

**Vermessung des Abgasemissionsverhaltens
von zwei Pkw und einem Fahrzeug der
Transporterklasse im realen Straßenbetrieb
in Stuttgart mittels PEMS-Technologie**

Abschlussbericht

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
BEARBEITUNG	TÜV Nord Mobilität GmbH & Co. KG, Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, 45307 Essen, Adlerstr. 7, Martin Kleinebrahm Datenanalysen und Gutachten, 52525 Heinsberg, Dorath 1 Heinz Steven
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Referat 33 – Luftqualität Dr. Werner Scholz
STAND	Mai 2011

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit der Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

INHALT	SEITE
1 ZUSAMMENFASSUNG	5
2 EINLEITUNG	6
3 ZIELSETZUNG	8
4 VORGEHENSWEISE	9
4.1 Allgemeines	9
4.2 Versuchsfahrzeuge	10
4.2.1 Fahrzeug 1: Pkw der gehobenen Mittelklasse	10
4.2.2 Fahrzeug 2: Leichtes Nutzfahrzeug	10
4.2.3 Fahrzeug 3: Pkw der unteren Mittelklasse	11
4.3 Messstrecken	11
4.3.1 Cityring	11
4.3.2 Neckartor / Cannstatter Straße	13
4.3.3 Hohenheimer Straße	14
4.3.4 Wohngebiet an der Hohenheimer Straße	15
4.3.5 Wohngebiet Bad Cannstatt	16
4.3.6 Lederberg	17
4.3.7 Freiberg am Neckar	18
4.4 Messprogramm	19
5 EINGESETZTE MESSTECHNIK	20
5.1 Messtechnik für gasförmige Komponenten	20
5.2 Messung des Abgasmassenstromes	23
5.3 Messung der Umgebungsdaten	23
5.4 Messung der geodätischen Daten	23
5.5 Fahrzeugdaten	23
6 ERGEBNISSE	24
6.1 Ergebnisse für unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten auf Hauptverkehrsstraßen	24
6.2 Lastabhängigkeit der Emissionen bei Bergfahrt	48
6.3 Einflüsse von Verkehrsverstetigung auf die Emissionen	59
6.4 Betrachtung von Emissionsprofilen entlang ausgewählter Strecken	61

6.5	Emissionsergebnisse für Freiberg am Neckar	66
6.6	Ergebnisse der PHEM Modellierung	73
6.6.1	PHEM Modellierungsergebnisse für Stuttgart	73
6.6.2	PHEM Modellierungsergebnisse für Freiberg am Neckar	81
6.7	Diskussion emissionsmindernder Maßnahmen	85

1 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Vermessung des Abgasemissionsverhaltens von zwei Pkw (obere und untere Mittelklasse) und einem Fahrzeug der Transporterklasse im realen Straßenbetrieb in Stuttgart. Alle drei Fahrzeuge sind Euro 4-Dieselfahrzeuge mit Partikelfilter. Die Vermessung erfolgte auf drei Streckenführungen in der Stuttgarter Innenstadt, die jeweils an den Umweltmessstationen vorbeiführen. Darüber hinaus wurden noch Streckenführungen in zwei Wohngebieten und an einer Steigungsstrecke ausgewählt. Mit dem Fahrzeug der unteren Mittelklasse wurden zusätzlich Messungen in Freiberg am Neckar gefahren. Bei der Versuchsdurchführung wurden die einzuhaltende Höchstgeschwindigkeit sowie die Getriebeutzungen variiert. Die Messungen wurden mit PEMS- (Portable Emission Measurement System) Messtechnik durchgeführt. Mit den aufgenommenen Fahrprofilen wurden im Anschluss Modellierungen der realen Fahrten mit dem Emissionsmodell PHEM der TU Graz durchgeführt.

Ein Vergleich der gemessenen Emissionsmesswerte mit den Emissionsfaktoren aus dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs HBEFA 3.1 zeigte eine sehr gute Übereinstimmung bei den CO₂-Emissionen für alle drei Fahrzeuge. Bei den Stickoxidemissionen war lediglich bei Fahrzeug 3 (untere Mittelklasse) eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Das leichte Nutzfahrzeug sowie das Fahrzeug der oberen Mittelklasse wiesen deutlich erhöhte Emissionen auf. Dies war insbesondere bei höheren Lasten und Beschleunigungszuständen erkennbar. Auch der NO₂-Anteil im Abgas lag bei diesen beiden Fahrzeugen aufgrund einer stark oxidativen Auslegung der eingesetzten Abgasnachbehandlungsanlage auf hohem Niveau.

Eine zentrale Fragestellung des Projekts war, ob eine Absenkung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit auf Hauptverkehrsstraßen eine Verbesserung der Emissionssituation zur Folge hat. Zur Beantwortung dieser Fragestellung wurden Messfahrten mit 50 km/h, 40 km/h und 30 km/h als vom Fahrer einzuhaltender Höchstgeschwindigkeit durchgeführt. In Einzelergebnissen konnten geringfügige Vorteile für 40 km/h gezeigt werden. Ein eindeutiger Trend war hier aber nicht erkennbar. 30 km/h führte zu Verschlechterungen der Emissions- und Kraftstoffverbrauchssituation. Die Modellierung mit dem Emissionsmodell PHEM für eine mittlere Kfz-Flotte mit 95% Pkw und 5% leichten Nutzfahrzeugen im Bezugsjahr 2010 ergab einen eindeutigen Trend zu höheren Emissionen und einem höheren Kraftstoffverbrauch bei sinkenden Geschwindigkeiten.

Die Lastabhängigkeit der NO_x-Emissionen war in den Messergebnissen bei Bergfahrten und Beschleunigungen sehr gut nachvollziehbar. Als Konsequenz wurde gezeigt, dass die Vermeidung von Beschleunigungszuständen und somit die Verstetigung des Verkehrsflusses ein deutliches Potenzial zur Emissionsreduzierung besitzt. Die Nutzungsmöglichkeiten dieses Potenzials sind bei den Streckenführungen unterschiedlich. Strecken, die jetzt schon einen geringen Stillstandsanteil aufweisen, besitzen nur geringes Potenzial. Insbesondere bei Steigungsstrecken führt eine Verstetigung zu guten Ergebnissen.

Weiteres Potenzial muss in den Fahrzeugen selbst und damit - insbesondere bei den Dieselfahrzeugen - in der Emissionsminderung der nächsten Fahrzeuggeneration gesucht werden. Die Einführung von Euro 6-Fahrzeugen muss zu einer deutlichen Absenkung der Emissionen auch im realen Verkehr führen, um signifikante Verbesserungen zu erreichen.

Die Befahrung in Freiberg am Neckar wurde nur mit dem Fahrzeug der unteren Mittelklasse durchgeführt. Als Höchstgeschwindigkeiten wurden hier 30 km/h und 50 km/h gewählt. Für dieses Fahrzeug konnte eine Verbesserung bei den Stickoxidemissionen für Tempo 30 gezeigt werden. Bei der Modellierung mit PHEM war nur eine geringfügige Verbesserung bei den Stickoxidemissionen sichtbar. Partikelemissionen und Kraftstoffverbrauch zeigten bei Tempo 30 durchgängig Verschlechterungen.

2 Einleitung

Mit der EU-Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa vom 21. Mai 2008 werden Luftqualitätsziele zur Vermeidung oder Verringerung schädlicher Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt festgelegt. Die Beurteilung der Luftqualität in den Mitgliedstaaten der EU erfolgt nach einheitlichen Methoden und Kriterien.

Die Umsetzung dieser Richtlinie in deutsches Recht erfolgte mit der 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen – 39. BImSchV) im Jahr 2010.

In den nachfolgenden Tabellen 1 und 2 sind die Grenzwerte für Stickstoffoxide (NO_x) und Partikel (PM10) zusammengestellt, die in der EU-Richtlinie 2008/50/EG und der 39. BImSchV festgelegt sind. Die EU-Richtlinie schreibt zudem vor, dass die Belastungssituation regelmäßig durch Messung oder Modellrechnung zu ermitteln und zu beurteilen ist. Im Falle der Feststellung einer unzulässig hohen Umweltbelastung muss ein Luftreinhalteplan aufgestellt werden.

	Grenzwert	Toleranzmarge
1-Stunden-Grenzwert Gesundheitsschutz	200 µg/m ³ NO ₂ über 1 Stunde bei höchstens 18 Überschreitungen im Kalenderjahr, einzuhalten ab 1.1.2010	50% ab Inkrafttreten bis 1.1.2010 in gleichen Jahresraten auf 0% zu mindern
Jahresgrenzwert Gesundheitsschutz	40 µg/m ³ NO ₂ Kalenderjahres-mittelwert, einzuhalten ab 1.1.2010	50% ab Inkrafttreten bis 1.1.2010 in gleichen Jahresraten auf 0% zu mindern
Jahresgrenzwert Vegetationsschutz	30 µg/m ³ NO _x (NO+NO ₂), als Kalenderjahresmittelwert	keine
Alarmschwelle	400 µg/m ³ NO ₂ gemessen über 3 aufeinander folgende Stunden an repräsentativen Orten über mindestens 100 km ² oder in ganzen Ballungsräumen, wenn sie kleiner sind	keine

Tabelle 1: Grenzwerte für NO₂ und NO_x

	Grenzwert	Toleranzmarge
24-Stunden-Grenzwert	50 µg/m ³ PM10 über 24 Stunden, höchstens 35 Überschreitungen im Jahr, einzuhalten ab 1.1.2005	50% bei Inkrafttreten, in gleichen Jahresraten zu mindern auf 0%
Jahresgrenzwert	40 µg/m ³ PM10 über 1 Kalenderjahr, einzuhalten ab 1.1.2005	20% bei Inkrafttreten, in gleichen Jahresraten zu mindern auf 0%

Tabelle 2: Grenzwerte für Partikel (PM10)

Basis vieler Betrachtungen zur Emissionssituation auf bundesdeutschen Straßen ist das Handbuch für Emissionsfaktoren, kurz HBEFA¹. In Abhängigkeit von der Verkehrssituation, der Zusammensetzung der Fahrzeugpopulation und der Verkehrsbelastung wird hier mit Hilfe von Emissionsfaktoren eine theoretische Emissionsbelastung berechnet. Grundlage für die Ermittlung der Emissionsfaktoren ist das Simulationsmodell PHEM², welches an der TU Graz entwickelt wird. Eingangsgrößen für das Simulationsmodell sind Prüfstandsergebnisse für diverse Fahrzeuge. Aus der Handbuchversion 2.1 wurde mit neuer Datenbasis, insbesondere für Fahrzeuge der Emissionsstufe 4 und 5, sowie mit einem verbesserten PHEM Modell die Handbuchversion 3.1 entwickelt, die seit 2010 vorliegt.

Messungen der Emissionen bei Fahrzeugen im Realbetrieb liegen bisher nur in sehr geringem Umfang vor.

Die Stadt Stuttgart weist an den straßennahen Luftmessstationen eine erhebliche Problematik bei den NO₂-Immissionen auf; die Immissionsgrenzwerte für NO₂ werden dort teilweise erheblich überschritten. Die Ursachen dafür sind speziell beim Kurzzeit-Immissionsgrenzwert bislang nicht geklärt. Neben anderen Emissionsquellen gehören auch Diesel-Pkw des Emissionsstandards Euro 4 zu den NO₂-Emittenten. Aufgrund der bei Euro 4-Fahrzeugen eingesetzten Technologien ist zu vermuten, dass relativ hohe NO₂/NO_x-Verhältnisse vorliegen. Die hohen NO₂-Immissionswerte an verkehrsnahen Messstellen in Stuttgart sind mit Hochrechnungen auf Basis des Emissionshandbuches nur teilweise erklärbar, so dass die LUBW Messungen der Realemissionen von Euro 4-Fahrzeugen bei Betrieb im Stuttgarter Innenstadtverkehr angeregt hat.

¹ HBEFA Handbuch für Emissionsfaktoren 3.1, Januar 2010

² PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model), Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz

3 Zielsetzung

Die Vermessung von insgesamt drei Fahrzeugen auf unterschiedlichen Strecken in Stuttgart soll Erkenntnisse über das Emissionsverhalten von Dieselfahrzeugen des Euro 4 Standards im realen Straßenbetrieb liefern. Die Versuchsplanung ist so ausgelegt, dass möglichst viele Fragestellungen aus den Ergebnissen der Messungen beantwortet werden können. Für Stuttgart sind neben den absoluten Emissionsergebnissen vor allem die Fragestellungen nach Verbesserungspotenzialen wichtig. Hier steht zum Beispiel die Frage im Raum, ob eine generelle Absenkung der erlaubten Höchstgeschwindigkeit zu einer Verbesserung der Immissionssituation beitragen könnte. Besonderes Augenmerk wird in der Projektdurchführung auf die Streckenführungen gelegt, die an den drei Umweltmessstationen der LUBW vorbeiführen, die die bekannt hohen Immissionswerte liefern. Die individuelle Verkehrssituation an diesen drei Messstellen soll beleuchtet werden und eventuell vorhandene Verbesserungspotenziale sollen benannt und diskutiert werden.

Neben diesen Hauptmessstrecken gibt es noch weitere Streckenführungen durch zwei Wohngebiete, wobei eines mit deutlichen Steigungsstrecken gewählt wurde und ein zweites, welches nur sehr geringe Höhenunterschiede aufweist. Gewünschte Aussagen sind hier, ob gemessene Emissionen bei den Randbedingungen der Wohngebiete mit gerechneten Emissionsbelastungen über das HBEFA übereinstimmen. Die letzte Messstrecke für das Messprogramm in Stuttgart ist eine Steigungsstrecke, die über möglichst große Abschnitte eine konstante Steigung aufweist und auch möglichst ungestörte Fahrten in diesen Steigungen zulässt. Diese Strecke wurde ausgewählt, um Untersuchungen zum Emissionsverhalten der Fahrzeuge bei Befahren von Steigungen bei unterschiedlichen Parametern von Geschwindigkeit und Getriebeleistung durchführen zu können.

Ein weiteres Ziel des Projektes ist die Modellierung der gefahrenen Fahrprofile mit dem Modellierungstool PHEM durch die TU Graz. Hierfür sollen die aufgenommenen fahrdynamischen Daten aufbereitet werden und als Eingangsgrößen für das Modellierungstool zur Verfügung gestellt werden. So sollen gerechnete Emissionen und gemessene Emissionen direkt verglichen werden können. Die PHEM Modellierung soll auch Aussagen über Partikelemissionen generieren. In den Versuchsfahrzeugen wurde keine Messtechnik zur Ermittlung der Partikelemissionen installiert.

Neben der Beantwortung der genannten Fragestellungen für die Stadt Stuttgart soll noch ein weiteres Messprogramm in Freiberg am Neckar mit Versuchsfahrzeug 3, untere Mittelklasse, durchgeführt werden. Die Messungen in Freiberg sollen mit zwei Höchstgeschwindigkeiten (30 und 50 km/h) gefahren werden. Diese Versuche dienen der Validierung von gerechneten Emissionsdaten auf Basis von Befahrungen ohne Emissionsmessungen.

4 Vorgehensweise

4.1 Allgemeines

Auf Basis von Daten über die Fahrzeugpopulation in Stuttgart, die von der Landeshauptstadt zur Verfügung gestellt wurden, sind die Versuchsfahrzeuge ausgewählt worden. Ziel war es, Fahrzeuge zu identifizieren, die eine möglichst breite Repräsentanz der Fahrzeugpopulation darstellen. Abbildung 1 zeigt die unterschiedlichen Schichten des Fahrzeugbestandes nach HBEFA. Für das Bezugsjahr 2010 bedeutet dies eine Bestandsschicht von Diesel Pkw Euro 4 von 12,98% (3,87% ohne und 9,12% mit Dieselpartikelfilter (DPF)). Bezogen auf die Fahrleistungen sind Euro 4 Diesel mit DPF mit 16,9% beteiligt.

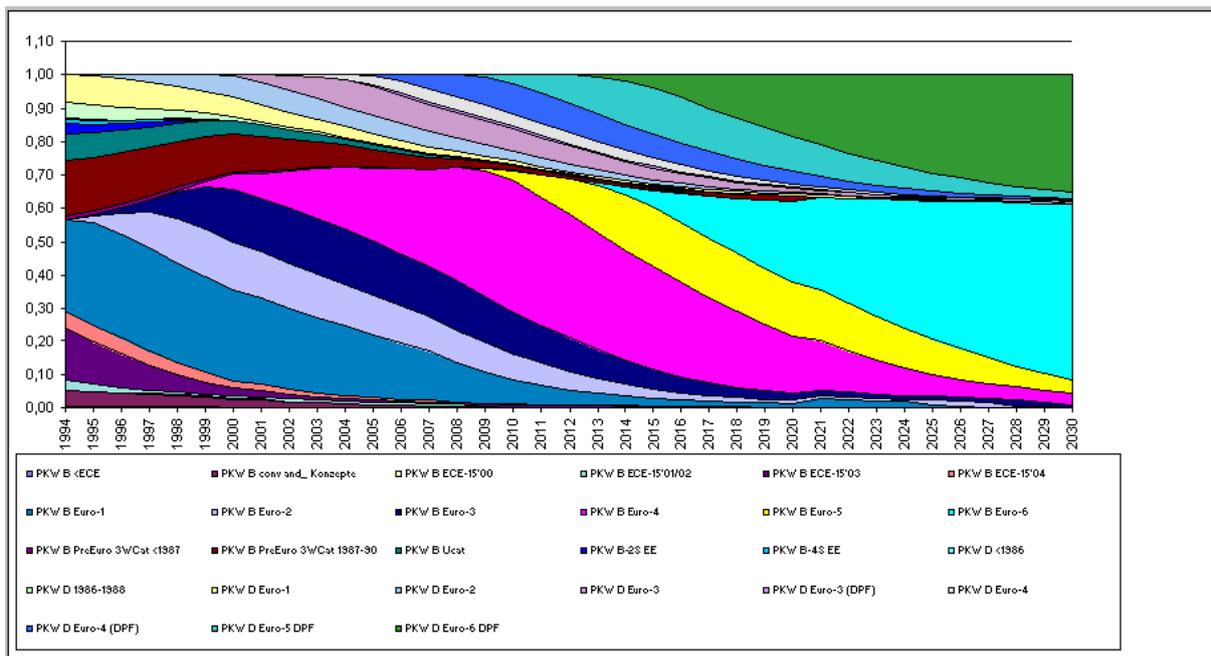


Abbildung 1: Fahrzeugbestände nach HBEFA 3.1

Für alle drei Fahrzeuge wurde ein Konzept entwickelt, um möglichst über große Zeiträume Messfahrten mit der später beschriebenen PEMS Messtechnik durchführen zu können. Nach erfolgter Aufrüstung mit der entsprechenden Messtechnik wurden die Fahrzeuge auf den unterschiedlichen Versuchsstrecken betrieben. Eine Übersicht über die gefahrenen Strecken erfolgt später in diesem Bericht.

4.2 Versuchsfahrzeuge

Über die Versuchsfahrzeuge sollten nicht nur die Fahrzeuge mit den höchsten Zulassungszahlen abgebildet werden, sondern es sollten darüber hinaus auch unterschiedliche Fahrzeugklassen repräsentiert sein. So war es gewünscht, ein Fahrzeug der gehobenen Mittelklasse, ein Fahrzeug der unteren Mittelklasse sowie ein Fahrzeug aus dem Bereich der leichten Nutzfahrzeuge einzusetzen.

4.2.1 Fahrzeug 1: Pkw der gehobenen Mittelklasse

Tabelle 3 zeigt die Daten des Versuchsfahrzeugs 1.

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>gehobene Mittelklasse</i>
<i>Nennleistung</i>	<i>125 kW / 3800 rpm</i>
<i>Erstzulassung</i>	<i>17.07.2006</i>
<i>Kilometerstand</i>	<i>72.453</i>
<i>Hubraum</i>	<i>2149</i>
<i>Gen. / Schadstoffstufe</i>	<i>70/220 2003/76B Euro 4 mit DPF</i>
<i>Masse (Leergewicht, Fahrzeugschein)</i>	<i>1640 (stimmt nicht mit Realmasse überein)</i>
<i>Masse (Leergewicht, gemessen, 1 Person, vollgetankt)</i>	<i>1900 kg</i>
<i>Masse (zul. Gesamtgewicht, Fahrzeugschein)</i>	<i>2140 kg</i>
<i>Masse (Testzustand)</i>	<i>2220 kg</i>
<i>Bemerkungen</i>	<i>Automatikgetriebe, zwei Schaltprogramme (Comfort und Sport)</i>

Tabelle 3: Daten Versuchsfahrzeug 1

4.2.2 Fahrzeug 2: Leichtes Nutzfahrzeug

Tabelle 4 zeigt die Daten des Versuchsfahrzeugs 2.

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Leichtes Nutzfahrzeug</i>
<i>Nennleistung</i>	<i>135 kW / 3800 rpm</i>
<i>Erstzulassung</i>	<i>16.12.2008</i>
<i>Kilometerstand</i>	<i>18.300 km</i>
<i>Hubraum</i>	<i>2987 ccm</i>
<i>Gen. / Schadstoffstufe</i>	<i>2005/55*2006/51C / 98/69/EG III;B Euro 4 mit DPF</i>
<i>Masse (Leergewicht, Fahrzeugschein)</i>	<i>2750 kg</i>
<i>Masse (Leergewicht, gemessen, inkl. 150 kg Gewichte, 1 Person, vollgetankt)</i>	<i>2870 kg</i>
<i>Masse (zul. Gesamtgewicht, Fahrzeugschein)</i>	<i>3550 kg</i>
<i>Masse (Testzustand, gemessen)</i>	<i>3230 kg</i>
<i>Bemerkungen</i>	<i>Automatikgetriebe, nur ein Schaltprogramm</i>

Tabelle 4: Daten Versuchsfahrzeug 2

4.2.3 Fahrzeug 3: Pkw der unteren Mittelklasse

Tabelle 5 zeigt die Daten des Versuchsfahrzeugs 3

<i>Fahrzeugklasse</i>	<i>Unter Mittelklasse</i>
<i>Nennleistung</i>	<i>103 kW / 4000 rpm</i>
<i>Erstzulassung</i>	<i>20.10.2006</i>
<i>Kilometerstand</i>	<i>129.000 km</i>
<i>Hubraum</i>	<i>1968 ccm</i>
<i>Gen. / Schadstoffstufe</i>	<i>70/220/EWG*2003/76B/EG, Euro 4 mit DPF</i>
<i>Masse (Leergewicht, Fahrzeugschein)</i>	<i>1356 kg bis 1526 kg</i>
<i>Masse (Leergewicht, gemessen, 1 Person, vollgetankt)</i>	<i>1430 kg</i>
<i>Masse (zul. Gesamtgewicht, Fahrzeugschein)</i>	<i>1870 kg</i>
<i>Masse (Testzustand)</i>	<i>1750 kg</i>
<i>Bemerkungen</i>	<i>Handschalter, 6-Gang</i>

Tabelle 5: Daten Versuchsfahrzeug 3

4.3 Messstrecken

Entsprechend den Zielen des Projektes wurden, wie oben erwähnt, unterschiedliche Streckenführungen als Messstrecken identifiziert. Primär waren hierbei Streckenführungen gefragt, die an den drei Immissionsmessstationen der LUBW vorbeiführen. Darüber hinaus sollten noch Messungen in Wohngebieten und Messungen an einer Steigungsstrecke durchgeführt werden.

Als zusätzliches Messprogramm waren noch Untersuchungen auf Streckenführungen in Freiberg am Neckar geplant.

In den Abbildungen für die drei ersten Streckenführungen (Abb. 2 - 4) sind die Lagen der Luftmessstationen mit roten Punkten kenntlich gemacht.

4.3.1 Cityring

Die in den Ergebnisdarstellungen als Route 1 bezeichnete Streckenführung beschreibt die Befahrung des Stuttgarter Cityringes. Abbildung 2 zeigt die Streckenführung.

Die Befahrung der Strecke wurde jeweils in beide Fahrtrichtungen durchgeführt. Ausgangspunkt für die Befahrung „links“, in den Ergebnisdarstellungen Fahrtrichtung 1, war die Bushaltestelle Staatsgalerie auf der Schillerstraße. Für die Befahrung „rechts“, in den Ergebnisdarstellungen Fahrtrichtung 2, war die Bushaltestelle Arnulf-Klett-Platz unmittelbar an der Luftmessstation der Ausgangspunkt.

Der Cityring ist eine typische Innenstadtstrecke auf mehrspurigen Hauptverkehrsstraßen, die insbesondere auf der Nord-West-Seite viele Ampelkreuzungen aufweist. Auf der Süd-Ost-Seite eingebunden ist die Bundesstraße 14, eine der Hauptdurchgangsstraßen in Stuttgart. Zur Kreuzungsvermeidung gibt es hier zwei Unterführungen.

Der Cityring wurde zu unterschiedlichen Tageszeiten befahren. Subjektiv auffällig war, dass - abgesehen von stop and go Situationen auf der B14 - trotz stark ansteigenden Verkehrsaufkommens in den Hauptverkehrszeiten keine ausgeprägte Staubildung erfolgte.

Die über Google-maps ermittelte Streckenlänge beträgt 4,1 km.

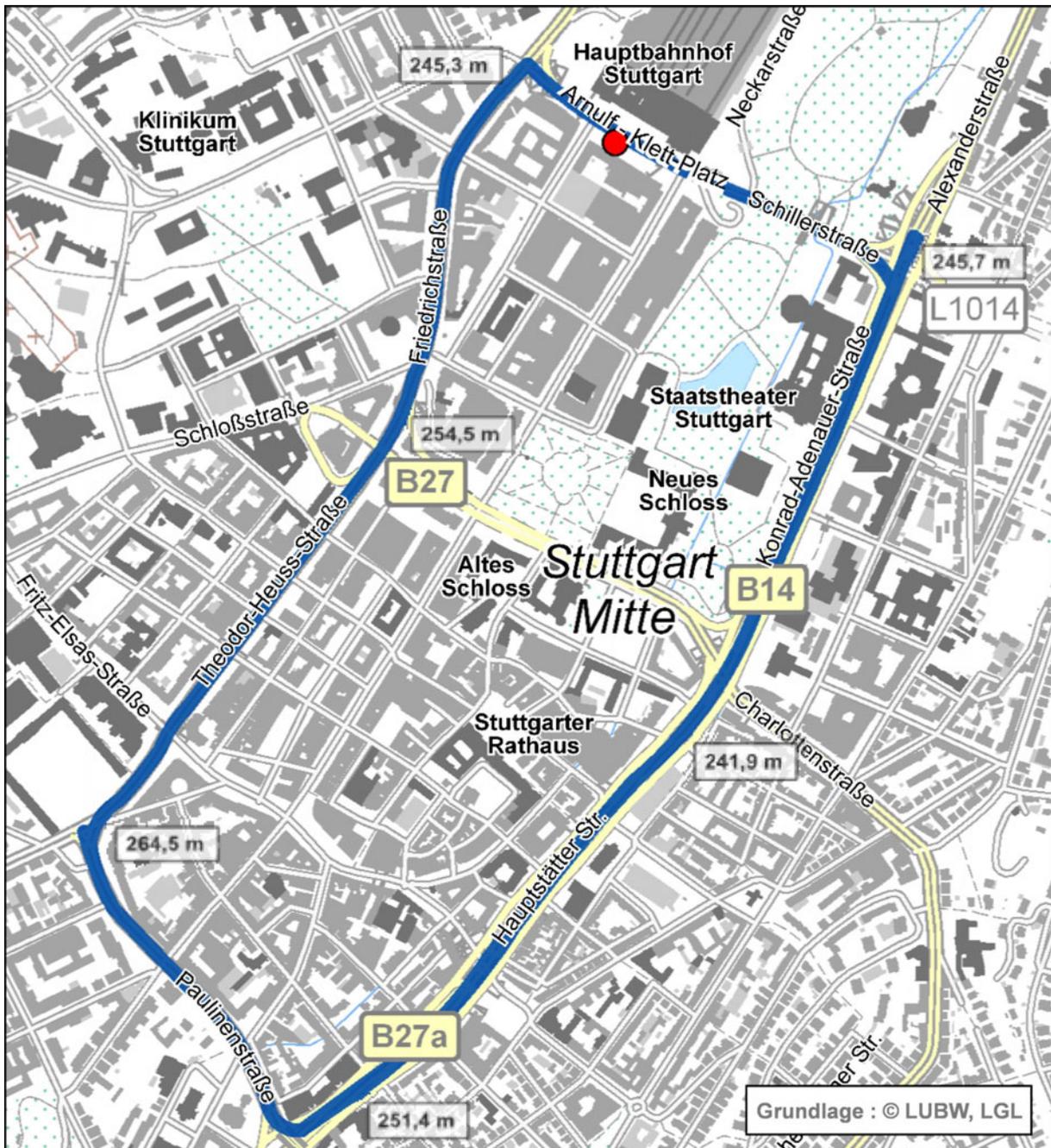


Abbildung 2: Streckenführung Cityring (Route 1)

4.3.2 Neckartor / Cannstatter Straße

Die als Route 2 bezeichnete Streckenführung verläuft auf der Cannstatter Straße und der Straße Am Neckartor. Abbildung 3 zeigt den Streckenverlauf. Ausgangspunkt für die Messfahrten war hier die Schwabengarage, die unmittelbar an der Kreuzung Am Neckartor, Cannstatter Straße und Heilmannstraße liegt. Die Streckenführung ist die Fortführung der B14, eine der Haupt-Verkehrsachsen in Stuttgart, die hier mit bis zu vierspurigem Ausbau für eine Fahrtrichtung ein sehr großes Verkehrsaufkommen, 72.000 Fahrzeuge pro Tag, zu bewältigen hat. Die Gesamtlänge einer Runde mit Wendestellen hinter der Neckarbrücke und an der Schillerstraße beträgt ca. 5,8 km.

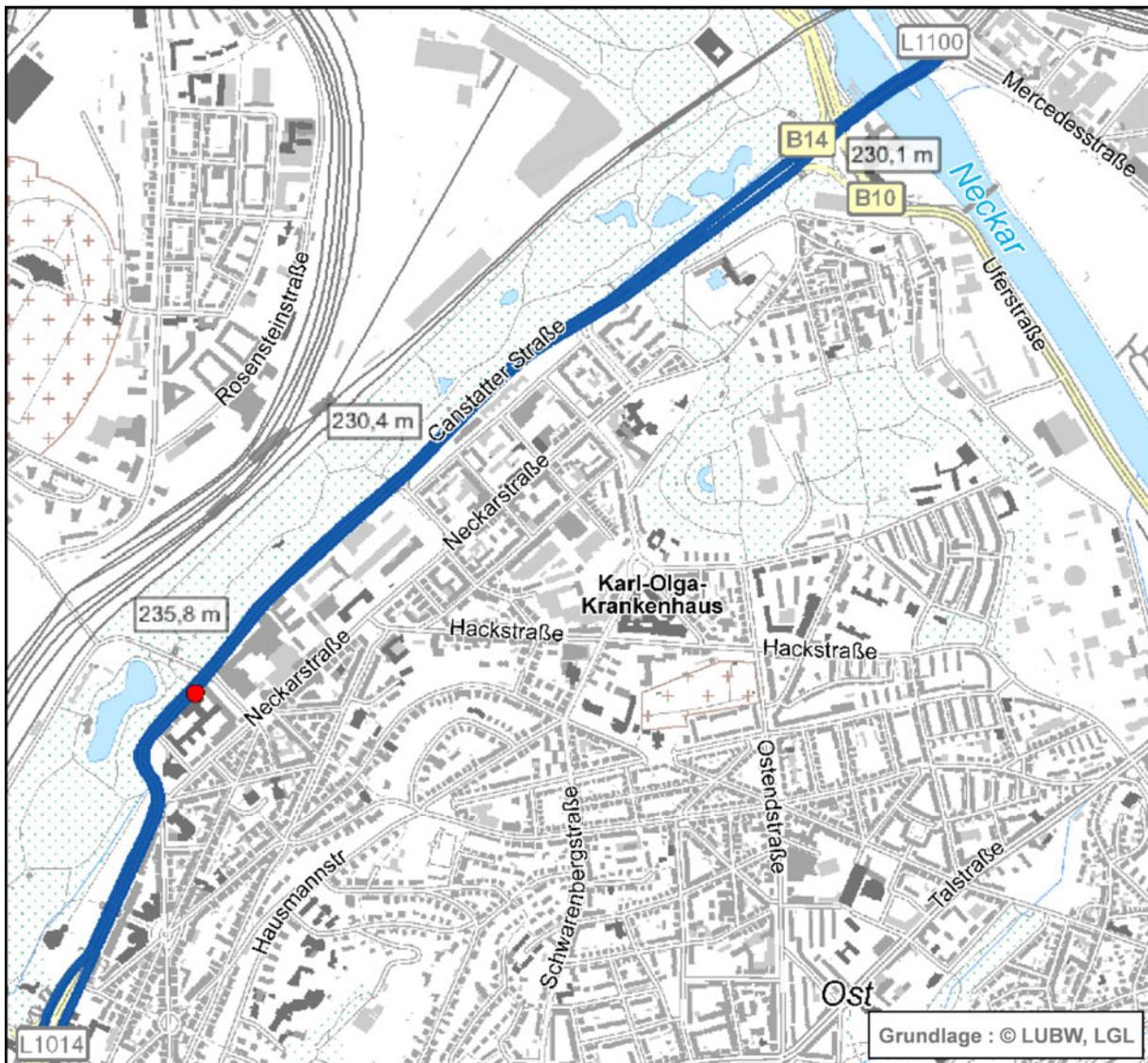


Abbildung 3: Streckenführung Cannstatter Straße / Am Neckartor (Route 2)

4.3.3 Hohenheimer Straße

Die dritte Hauptstreckenführung führt über die Bundesstraße 27, die Hohenheimer Straße, die oberhalb der Messtrecke in die Weinsteige übergeht und eine der großen südlichen Einfallstraßen nach Stuttgart darstellt. Abbildung 4 zeigt die Messtrecke an der Hohenheimer Straße. Im Gegensatz zu den beiden anderen Hauptstreckenführungen weist die Hohenheimer Straße deutliche Steigungen auf, die im oberen Teil im Bereich der Messstation relativ konstant bei 6,7 % liegt. Ausgangspunkt war hier das erste Teilstück der Charlottenstraße oberhalb des Charlottenplatzes unterhalb der ersten Ampel. Aufgrund der Verkehrssituation wurden die Messungen auf diesem Teilstück immer fliegend gestartet.

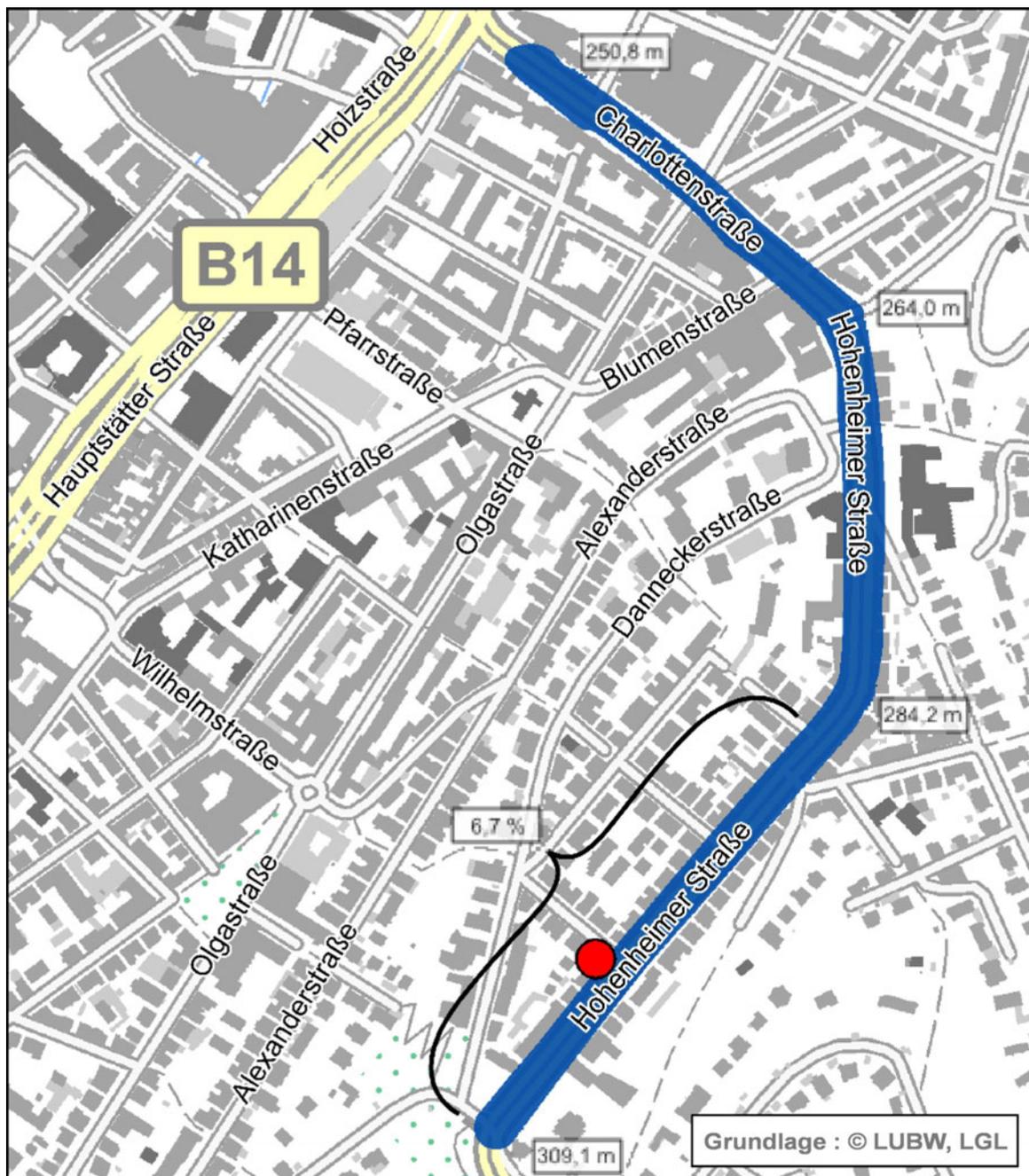


Abbildung 4: Streckenführung Hohenheimer Straße (Route 3)

4.3.4 Wohngebiet an der Hohenheimer Straße

Ein Wohngebiet in direkter Nachbarschaft zur Hohenheimer Straße wurde als Streckenführung 4 gewählt. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Streckenführung. Die Befahrung des Wohngebietes erfolgte in beide Richtungen, wobei der Ausgangspunkt immer die Ecke Etzelstraße und Danneckerstraße war. Die Danneckerstraße sowie die Etzelstraße weisen deutliche Steigungen auf, während die Alexanderstraße über einen großen Bereich eine moderate knapp dreiprozentige Steigung besitzt. Die Befahrung erfolgte nur mit der erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h.

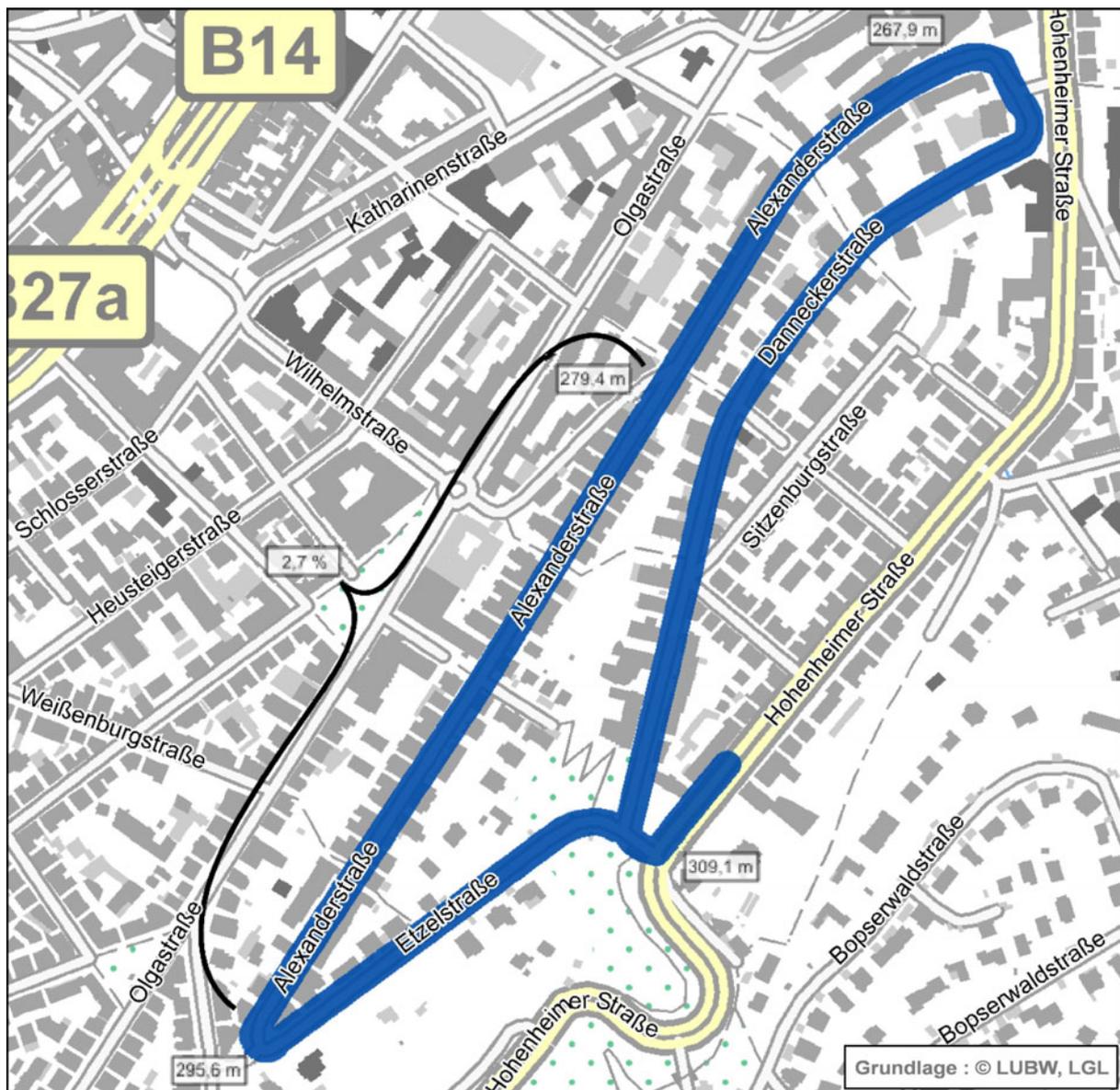


Abbildung 5: Streckenführung Wohngebiet an der Hohenheimer Straße (Route 4)

4.3.5 Wohngebiet Bad Cannstatt

Das zweite Wohngebiet, welches nur geringe Höhenunterschiede aufweist, liegt auf der anderen Neckarseite. Abbildung 6 zeigt die Streckenführung. Auch hier wurden Fahrten in beide Richtungen durchgeführt und nur Geschwindigkeiten bis maximal 30 km/h gefahren. Ausgangspunkt war auf der Wildunger Straße zwischen Kreuznacher und Nauheimer Straße.

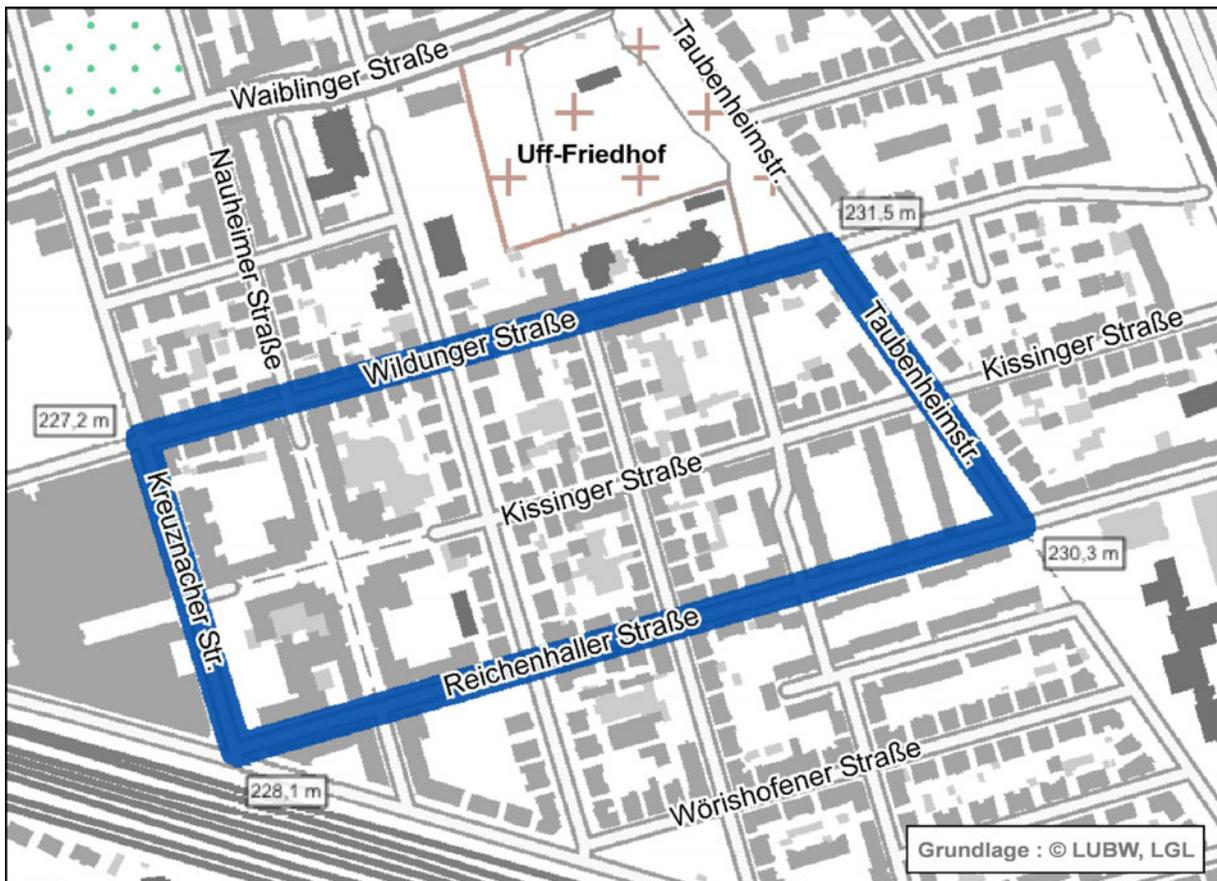


Abbildung 6: Streckenführung Wohngebiet Bad Cannstatt (Route 5)

4.3.6 Lederberg

Die letzte Befahrungsstrecke ist der Lederberg, von Stuttgart-Hedelfingen ausgehend. Die Strecke zeichnet sich durch relativ konstante Steigungen über größere Strecken aus und ist damit geeignet, den Einfluss unterschiedlicher Parameter auf die Emissionen bei Bergfahrt zu zeigen. Abbildung 7 zeigt den Streckenverlauf. Im oberen Bereich des Lederberges, der außerhalb geschlossener Ortschaften liegt, ist die erlaubte Höchstgeschwindigkeit bergauf auf 80 km/h und bergab auf 60 km/h begrenzt. Ausgangspunkt für die Messungen war die Heumadener Straße Nähe Krautgartenstraße.

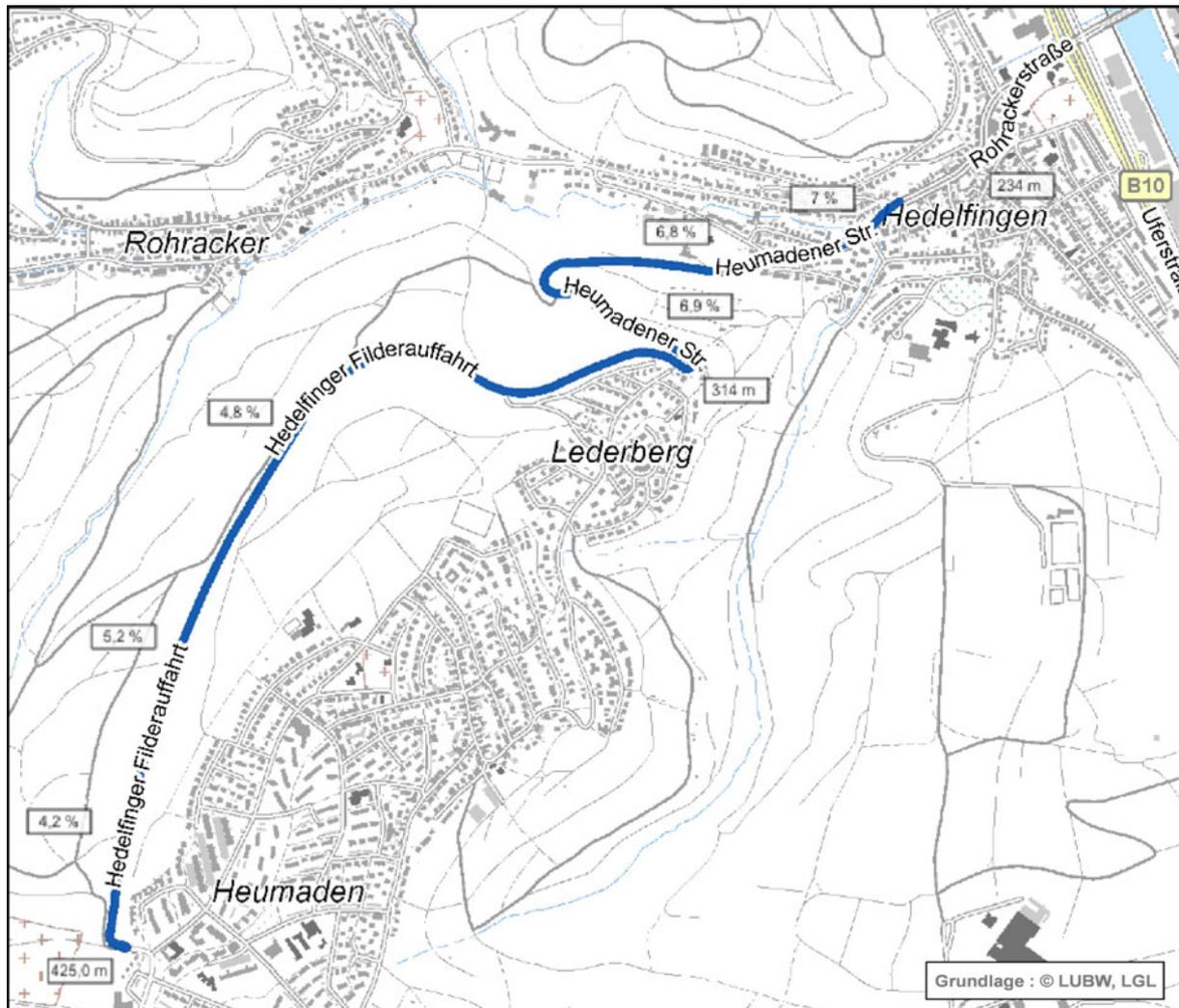


Abbildung 7: Streckenführung Lederberg Stuttgart-Hedelfingen (Route 6)

4.3.7 Freiberg am Neckar

In einem Zusatz zum Messprogramm in Stuttgart wurden auch Messfahrten in Freiberg am Neckar durchgeführt. Auf den Fahrstrecken in Freiberg wurden bereits durch Messungen fahrdynamische Daten durch die Firma AVISO³ erhoben, um über Modellierungen Emissionsaussagen generieren zu können. Zur Validierung dieser Aussagen wurden auf den gleichen Streckenführungen nun Emissionsmessungen durchgeführt. Abbildung 8 gibt einen Überblick über die Messstrecken. Die Messungen wurden in Teilstücken zwischen den jeweiligen Zielstellen A, B und D gefahren.

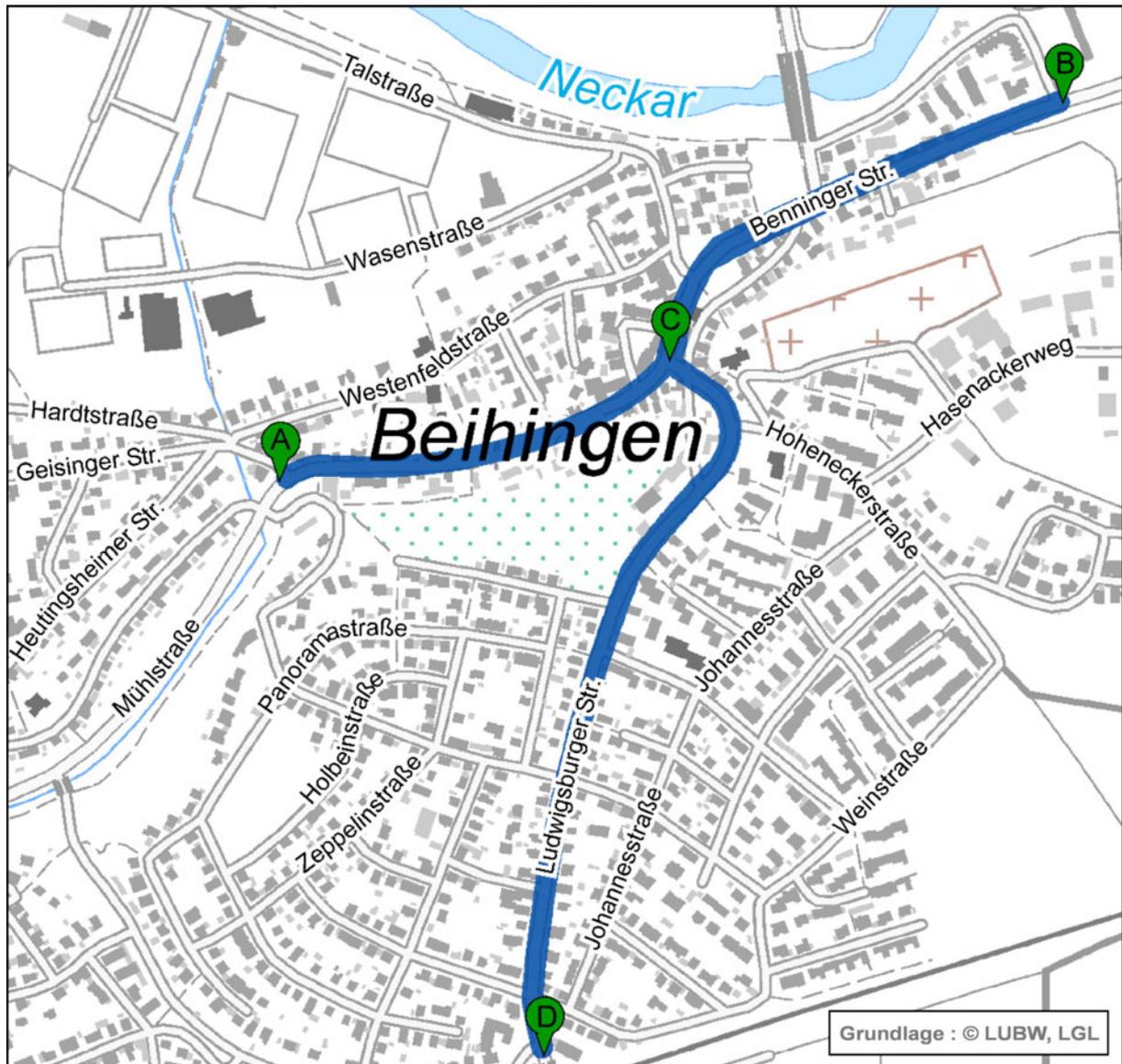


Abbildung 8: Streckenführung Freiberg am Neckar (Route 7)

³ AVISO GmbH, Aachener-Verkehrs-Ingenieur-Sozietät, Am Hasselholz 15, 52074 Aachen

4.4 Messprogramm

Tabelle 6 gibt einen Überblick über das gefahrene Messprogramm. Hierbei wurden die meisten Fahrten mehrmals wiederholt, um eine statistische Sicherheit der Ergebnisse zu schaffen.

	Messstrecke									
	Route 1 (Innenstadtring)		Route 2 (Neckartor)	Route 3 (Hohenheimer Str.)	Route 4 (Wohngebiet Hohenheimer Str.)		Route 5 (Wohngebiet Bad Cannstatt)		Route 6 (Lederberg)	Route 7 (Freiberg am Neckar, alle Teilstrecken)
	links	rechts			links	rechts	links	rechts		
Versuchsfahrzeug 1										
50 km/h / C	X	X	X	X					X	
50 km/h / S	X	X	X	X						
40 km/h / C	X	X	X	X					X	
30 km/h / C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
60 km/h / C									X	
angepasst bis Vmax									X	
Versuchsfahrzeug 2										
50 km/h / C	X	X	X	X					X	
40 km/h / C	X	X	X	X					X	
30 km/h / C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
60 km/h / C									X	
angepasst bis Vmax									X	
Versuchsfahrzeug 3										
50 km/h / 3. Gang	X	X	X	X					X	X
50 km/h / 4. Gang	X	X	X	X					X	X
40 km/h / 3. Gang	X	X	X	X					X	
30 km/h / 2. Gang	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
30 km/h / 3. Gang	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
60 km/h / 3. Gang									X	
60 km/h / 4. Gang									X	
angepasst bis Vmax									X	

Tabelle 6: Gefahrenes Messprogramm

5 Eingesetzte Messtechnik

Die Vermessung der Realemissionen von Fahrzeugen ist nicht vergleichbar mit Labormessungen auf Prüfständen. Mit Emissionsmessungen unter realen Straßenbedingungen soll auch nicht die Einhaltung von Grenzwerten aus Typprüfzyklen nachgewiesen werden, sondern das u.U. deutlich unterschiedliche Emissionsverhalten unter realen Verkehrsbedingungen ("real life") erfasst werden. Da die Emissionssituation unter realen Fahrbedingungen aber eine immer größer werdende Bedeutung bekommt, sind in den vergangenen Jahren Messtechniken entwickelt worden, um aussagekräftige Ergebnisse erreichen zu können. In den zukünftigen Richtlinien für schwere Nutzfahrzeuge haben PEMS (Portable Emission Measurement System) Messungen bereits Eingang gefunden. Die zu verwendende Messtechnik ist beschrieben. Das JRC (Joint Research Center) der EU in Ispra, Italien, weist derzeit auch die Verwendbarkeit in Pkw nach. Die in Stuttgart verwendete Messtechnik entspricht dem JRC PEMS Protokoll.

Die an dem Fahrzeug installierte Messtechnik wurde über ein eigenes Stromaggregat, welches bei den Messfahrten am Fahrzeug mitgeführt wurde, mit elektrischer Energie versorgt. Auch eine Energieversorgung über mitgeführte Batterien ist möglich, wurde aber aufgrund sehr eingeschränkter Betriebszeiten nicht genutzt. Grundsätzlich wäre auch eine Verbindung mit dem elektrischen Netz des Fahrzeuges möglich, es wurde aber darauf verzichtet, um den Belastungszustand des Motors nicht durch eine höhere Belastung der Lichtmaschine zu verfälschen.

5.1 Messtechnik für gasförmige Komponenten

Für die Messung der gasförmigen Komponenten wurde das SEMTECH-DS der Firma Sensors benutzt. Mit Ausnahme des NO_x -Analysators ist der prinzipielle Aufbau des Systems ähnlich der Messtechnik, die in den Regelwerken der EG zur Messung im unverdünnten Abgas von Dieselmotoren beschrieben ist. Hierbei gibt es einen beheizten Teil, der die Entnahmeleitung von der Messgassonde, ein beheiztes Filter und den FID (Flammenionisations-Detektor) zur Bestimmung der Kohlenwasserstoffe beinhaltet. Die Beheizung auf mindestens $180\text{ }^\circ\text{C}$ ist notwendig, um Kondensation von Kohlenwasserstoffen zu verhindern. Ein Teilstrom des Messgases wird zur Trocknung über einen Kühler geführt und dann dem NDIR Analysator (Nicht-Dispersiver-Infrarot-Analysator) zur Bestimmung der CO - und CO_2 -Konzentration, dem elektrochemischen O_2 -Analysator und der NDUV-Messbank (Nicht-Dispersive-Ultraviolett-Messbank) zur Bestimmung von NO und NO_2 zugeführt. Die Trocknung ist notwendig, da diese Messgeräte nicht mit feuchtem Abgas betrieben werden können. Ein im Messsystem angeordneter Rechner verwaltet das Gesamtsystem und führt die Daten aus den unterschiedlichen Quellen zusammen. Tabelle 7 gibt eine Übersicht über die Spezifikationsdaten der verwendeten Analysatoren. Neben dem eigentlichen Analysensystem können ebenfalls Daten aus einem GPS-System, einem Abgasmassensensor und diversen analogen und digitalen Eingängen gesammelt werden. Angeschlossen sind auch Sensoren zur Erfassung der atmosphärischen Daten. Zur Bedienung des Systems wird ein externer Rechner mit der entsprechenden Software über ein LAN angebunden. Abbildung 9 zeigt das Messsystem SEMTECH DS der Firma Sensors und verdeutlicht den grundsätzlichen Systemaufbau.

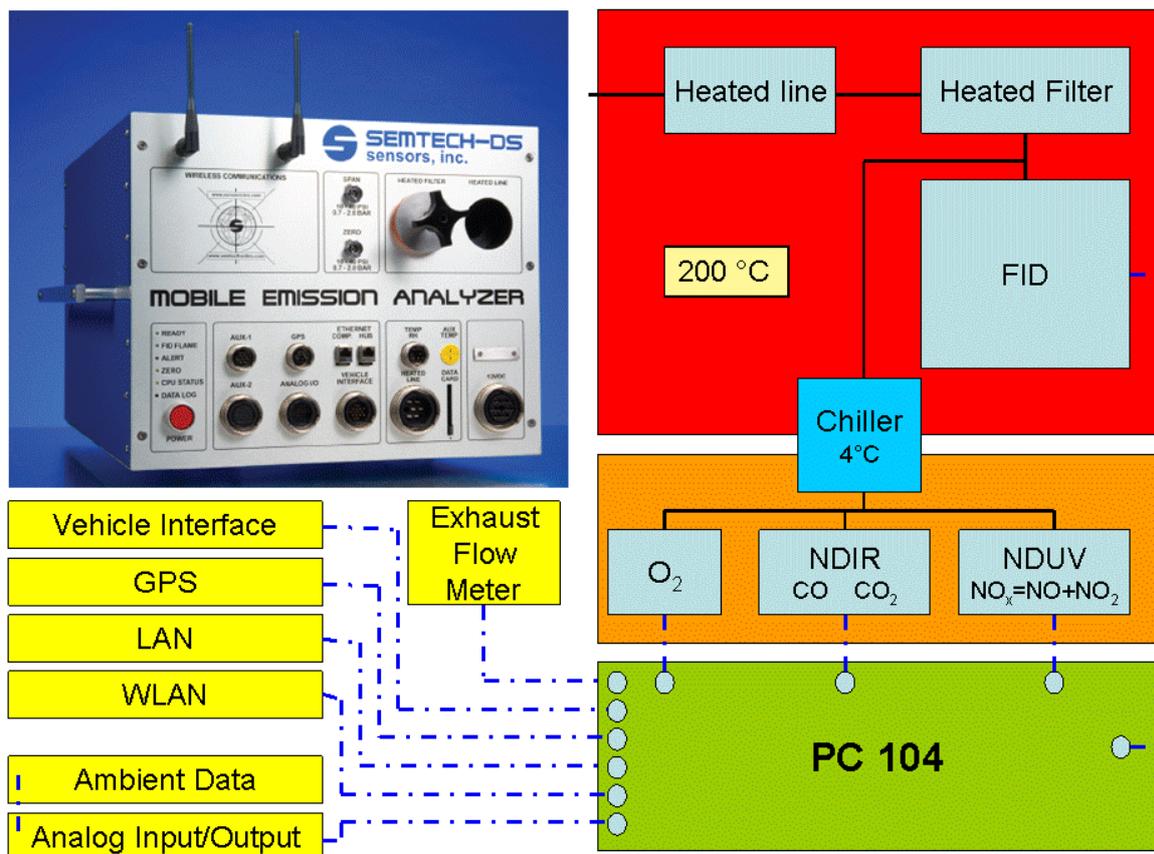


Abbildung 9: Semtech-Messgerät

Das zum Betrieb des Messsystems notwendige Gas wurde im Fahrzeug mitgeführt. Da der Gasverbrauch sehr gering ist, können grundsätzlich sehr kleine Druckgasflaschen benutzt werden, die teilweise auch im SEMTECH-DS Gehäuse untergebracht werden können. Für die umfangreichen Messungen dieses Projektes war es jedoch sinnvoll, größere Flaschen zu verwenden. Abbildung 10 zeigt die Applikation im Fahrzeug.

Da der gesamte Gasentnahmeweg sowie ein Teil des Messsystems auf 190°C beheizt werden, ist vom Zeitpunkt des Einschaltens des Gerätes bis zur Betriebsbereitschaft mit mindestens einer Stunde Aufwärm- und Vorbereitungszeit zu rechnen. Am Ende dieser Vorbereitung steht die Kalibrierung des Systems. Dies wurde bei den Messungen dieses Projektes mehrmals am Tag durchgeführt.

Das Gewicht des Messsystems einschließlich der Gasflaschen und des Stromaggregats sowie einer zusätzlichen Person zur Bedienung der Messgeräte ergab gegenüber dem Leergewicht der Fahrzeuge mit nur einer Person eine Zuladung von etwa 320 kg. Bei dem leichten Nutzfahrzeug (Fahrzeug 2) wurden noch weitere 150 kg Gewichte mit an Bord genommen, um das Fahrzeug mit ungefähr der Hälfte der möglichen Nutzlast zu vermessen.



Abbildung 10: Messtechnik im Fahrzeug

SEMTECH-DS System Specifications

Gas	CO	CO ₂	NO	NO ₂	THC			
Range	0 - 8%	0 - 20%	0 - 3,000 ppm 0 - 900 ppm 0 - 300 ppm	0 - 500 ppm 0 - 300 ppm 0 - 100 ppm	0 - 100 ppmC	0 - 1,000 ppmC	0 - 10,000 ppmC	0 - 40,000 ppmC
Resolution	10 ppm	0.01%	0.1 ppm	0.1 ppm	0.1 ppmC	1 ppmC	1 ppmC	10 ppmC
Accuracy	±3% of reading or ± 50 ppm	±3% of reading or ± 0.1%	±2% of pt or ±2% of meas	±2% of pt or ±2% of meas	±2.0 % of reading or ±5 ppmC	±2.0 % of reading or ±5 ppmC	±2.0 % of reading or ±25 ppmC	±2.0 % of reading or ±100 ppmC
Linearity	Intercept ≤0.5 % of range 0.990 ≤Slope ≤1.01 SEE ≤1.0 % of range r ² ≥0.998			Intercept ≤1.0 % of range 0.985≤Slope ≤1.015 SEE ≤1.0 % of range r ² ≥0.998	Intercept ≤0.5 % of range 0.990 ≤Slope ≤1.01 SEE ≤1.0 % of range r ² ≥0.998			
Repeatability	±2 % of reading or 20 ppm	±2 % of reading or ±0.05 %	±1% of pt or ±1% of meas	±1% of pt or ±1% of meas	±1.0 % of reading or ±2 ppmC	±1.0 % of reading or ±2 ppmC	±1.0 % of reading or ±10 ppmC	±1.0 % of reading or ±40 ppmC
Noise	±20 ppm	±0.02%	±1% max	±1% max	± 2 ppmC	± 2 ppmC	± 10 ppmC	± 40 ppmC
Span Drift	±2 % of reading or 20 ppm	±2 % of reading or 0.1 %	±2 % of span value	±2% of span value	±1.0 % of reading or 3 ppmC	±1.0 % of reading or 3 ppmC	±1.0 % of reading or 15 ppmC	±1.0 % of reading or 60 ppmC
Zero Drift	±0.005 % (50 ppm)	±0.1 %	± 2 ppm	± 2 ppm	± 5 ppmC	± 5 ppmC	± 10 ppmC	± 20 ppmC
Response Time	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds
Flow Rate	2 lpm	2 lpm	3 lpm	3 lpm	2 lpm	2 lpm	2 lpm	2 lpm
Data Rate	0.833 Hz	0.833 Hz	1 Hz	1 Hz	up to 4 Hz	up to 4 Hz	up to 4 Hz	up to 4 Hz

Tabelle 7: Spezifikationen des SEMTECH DS

5.2 Messung des Abgasmassenstromes

Zur Messung des Abgasmassenstromes wurde ein EFM (Electronic Flow Meter) der Firma SENSORS eingesetzt. Das System arbeitet nach dem Pitot-Rohr Prinzip, wobei über den dynamischen Staudruck im Vergleich zum statischen Druck die durchströmende Masse ermittelt wird. Abbildung 11 zeigt das Gesamtsystem mit Messrohr und Auswerteeinheit.

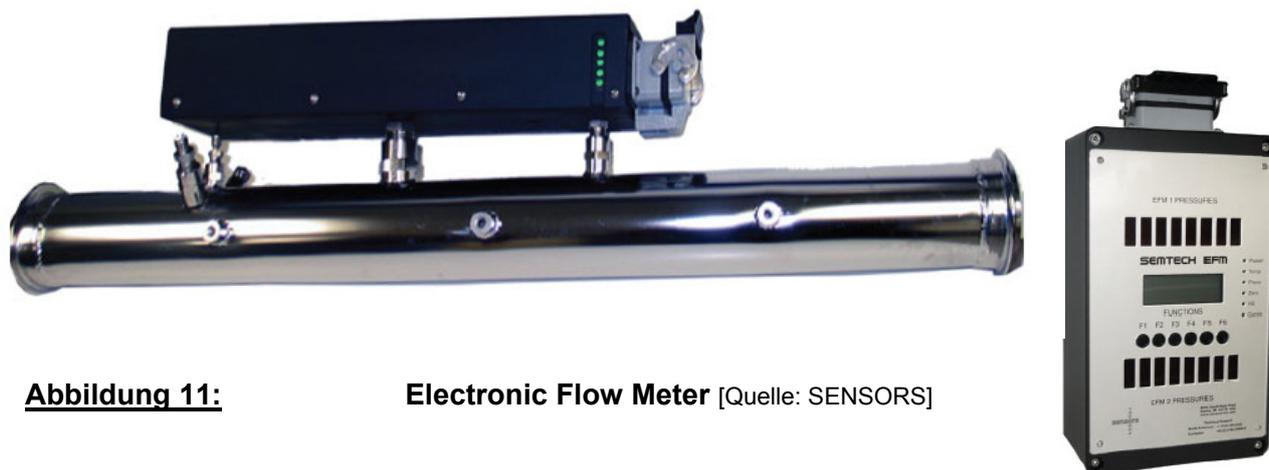


Abbildung 11: Electronic Flow Meter [Quelle: SENSORS]

5.3 Messung der Umgebungsdaten

Zur Bestimmung der Korrekturfaktoren bei der Auswertung der Messungen sind die Kenntnis der Umgebungsdaten von großer Wichtigkeit. Temperatur und Luftdruck sowie die relative Feuchte wurden durch geeignete Sensoren erfasst.

5.4 Messung der geodätischen Daten

Zur Messung der geodätischen Größen wurde ein GPS-System benutzt. Neben den Längen- und Breitengraden wurden die Geschwindigkeit über Grund sowie die Höhe über NN mitprotokolliert. Die Antenne für das GPS-System war auf dem Fahrzeugdach angebracht.

Da für spätere Messungen auf einem Rollenprüfstand die Fahrprofilaten möglichst präzise zur Verfügung stehen sollten und die Höhenbestimmung über das GPS teilweise recht ungenau ist, wurden nach den Messfahrten mit Hilfe der Positionskoordinaten durch die LUBW anhand eines digitalen Geländemodells mit einem Meter Auflösung (DGM1) die Höhendaten zugeordnet.

5.5 Fahrzeugdaten

Über ein Vehicle Interface wurden über die OBD Schnittstelle des Fahrzeugs Daten wie Motordrehzahl, Motorlast, Geschwindigkeit u.ä. in das SEMTECH-DS eingelesen.

6 Ergebnisse

Die vom SEMTECH DS aufgenommenen Daten werden über eine post processing Funktion nachbehandelt und in einer zeitlich auf 1 Hz synchronisierten Form als Excel-lesbares Datenfile abgelegt. Aus den so generierten Daten werden dann in einem Auswertetool die Berechnungen durchgeführt, um alle notwendigen Größen zu bestimmen. Dies wird für jede einzelne Fahrt geleistet. Gleichzeitig werden die Ergebnisse der Einzelfahrten in eine Form gebracht, die geeignet ist, die Daten in eine Datenbank zu überführen. Insgesamt wurden in diesem Projekt über 300 Einzelfahrten ausgewertet und in die Datenbank eingelesen.

Aus dieser Datenbank heraus wurden die einzelnen Fragestellungen des Projektes bearbeitet.

6.1 Ergebnisse für unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten auf Hauptverkehrsstraßen

Eine zentrale Frage in diesem Vorhaben ist der Einfluss der erlaubten Höchstgeschwindigkeit auf die Schadstoffemissionen. In Stuttgart wird derzeit die Einführung von 40 km/h als Höchstgeschwindigkeit auf Hauptverkehrsstraßen diskutiert. Auf den drei Streckenführungen „Cityring“, „Neckartor/Cannstatterstraße“ und „Hohenheimer Straße“ wurden deshalb Befahrungen mit reduzierter Höchstgeschwindigkeit auf 40 km/h und 30 km/h durchgeführt. Die Verkehrssituation bei reduzierter Höchstgeschwindigkeit für das Messfahrzeug bei gleichbleibend 50 km/h Höchstgeschwindigkeit für alle anderen Verkehrsteilnehmer ist nicht repräsentativ für eine Verkehrssituation bei reduzierter Höchstgeschwindigkeit für alle Verkehrsteilnehmer. Auf diesen Umstand muss bei der Interpretation der Ergebnisse geachtet werden.

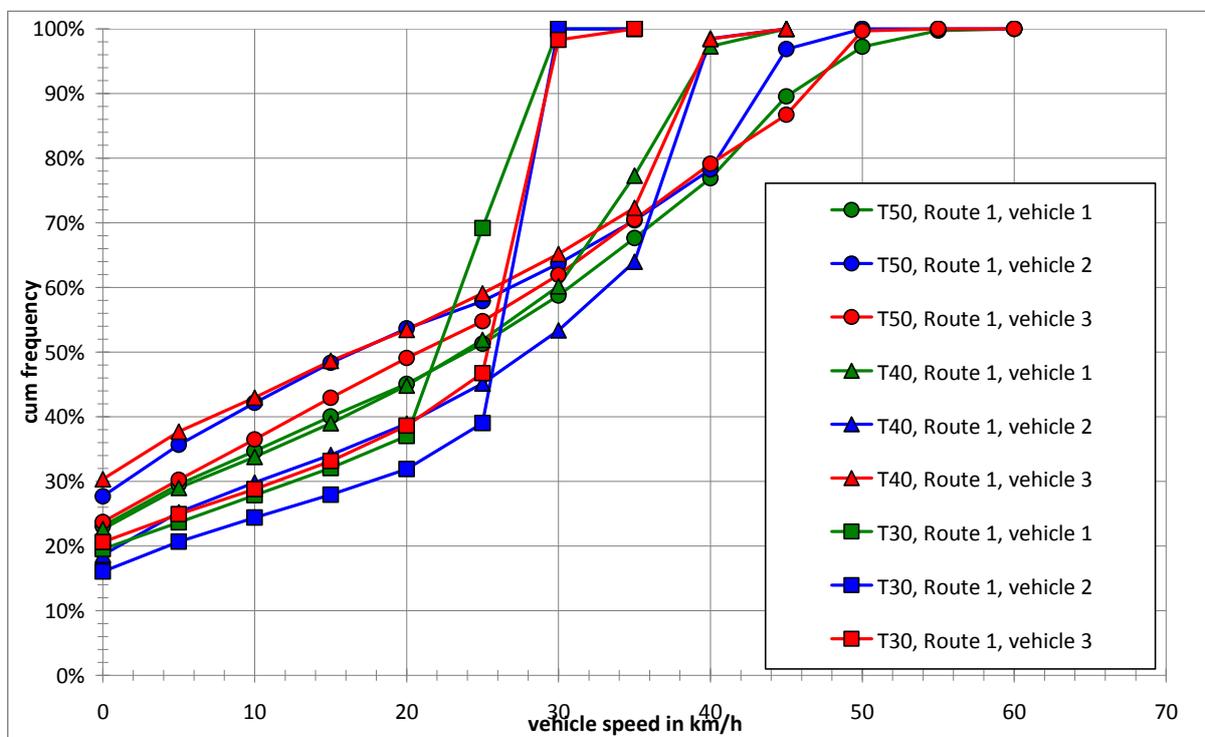


Abbildung 12: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile für alle drei Versuchsfahrzeuge T30, T40 und T50 auf dem Cityring

Abbildung 12 zeigt die kumulierten Geschwindigkeitsanteile für Fahrten mit 30 km/h, 40 km/h und 50 km/h Höchstgeschwindigkeit aller drei Versuchsfahrzeuge auf dem Cityring. Für diese Auswertung wurden alle Geschwindigkeitsdaten in 5 km/h Klassen klassiert und die prozentuale Häufigkeit an der Gesamtfahrt dargestellt.

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die reduzierten Höchstgeschwindigkeiten zu erhöhten Anteilen an Konstantfahrten führen. Die Fahrzeuge erreichen schneller ihre jeweilige Höchstgeschwindigkeit und kommen so zu einem größeren Anteil an Konstantfahrten. Noch ausgeprägter ist dieser Effekt auf der Strecke „Neckartor/Cannstatter Straße“ zu erkennen, wie Abbildung 13 zeigt. Der Grund hierfür liegt in deutlich weniger Ampeln auf dieser Strecke, was zu noch größeren Konstantfahrtanteilen führt. Dieser Effekt ist aber auch für 50 km/h Höchstgeschwindigkeit erkennbar.

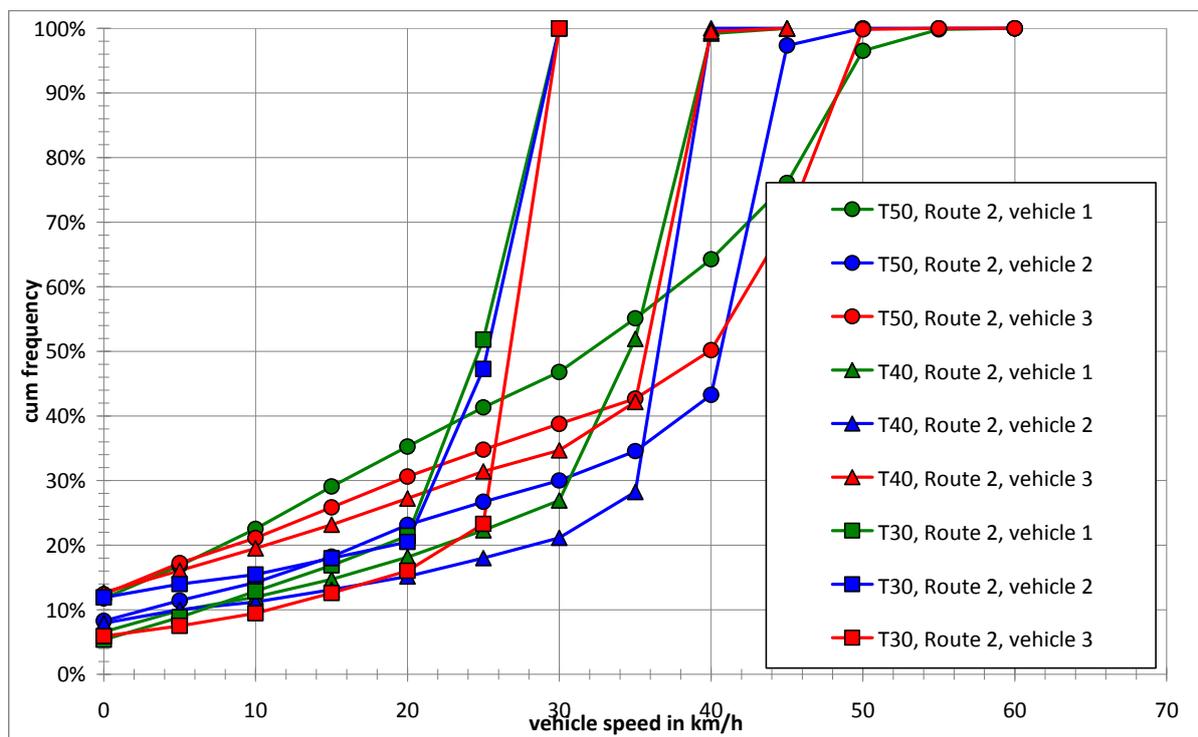


Abbildung 13: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile für alle drei Versuchsfahrzeuge T30, T40 und T50 auf der Strecke Neckartor/Cannstatter Straße

Für die Hohenheimer Straße stellt sich diese Situation nicht so eindeutig dar. Die relativ kurze Messstrecke mit einigen Ampeln und, je nach Verkehrssituation, Störeinflüsse durch notwendige Spurwechsel und Stillstandsphasen lassen ein nicht so eindeutiges Bild erkennen. Abbildung 14 zeigt die Situation auf der Hohenheimer Straße.

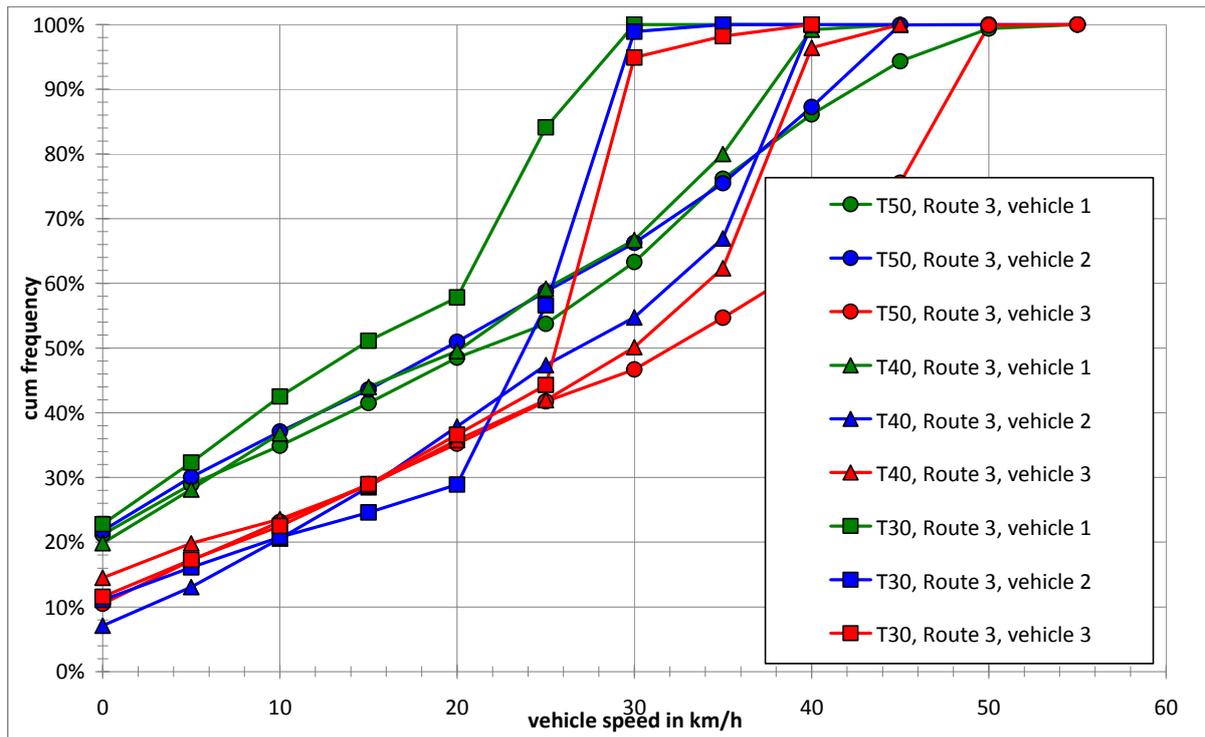


Abbildung 14: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile für alle drei Versuchsfahrzeuge T30, T40 und T50 auf der Hohenheimer Straße

Betrachtet man nun die CO₂-Emissionen der drei Versuchsfahrzeuge in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und aufgeschlüsselt nach Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Konstantfahrtsituationen, ergeben sich die Abbildungen 15 bis 17. Den Bildern liegen Befahrungen der Strecken 1, 2 und 5 zugrunde, die als einzige die Vorgaben der Längsneigung erfüllen. Die Datenpunkte stellen jeweils den Emissionsmittelwert über die angegebenen Zeiträume für die einzelnen Betriebszustände dar. Eine der Aussagen dieser Auswertung zeigt sich bei näherer Betrachtung der Konstantfahrtsituationen. Grundsätzlich steigen zu kleineren Geschwindigkeiten hin die streckenbezogenen CO₂-Emissionen, was gleichbedeutend ist mit einem Anstieg des streckenbezogenen Kraftstoffverbrauches. Dieser Effekt ist für alle drei Fahrzeuge festzustellen.

Die zu sehr kleinen Geschwindigkeiten hin stark ansteigende Ausgleichskurve für Fahrzeug 1 stellt keine fahrzeugspezifische Eigenart dar, sondern ist eine Gesetzmäßigkeit der Darstellung. Anschaulich wird dies bei Betrachtung einer Anfahrtsituation. Zum Beschleunigen des Fahrzeuges werden höhere Lastzustände angefordert, die zu einer entsprechenden CO₂-Emission führen. Da aber die zurückgelegte Strecke gegen Null strebt, muss eine streckenbezogene Darstellung prinzipiell zu sehr hohen Werten steigen.

Die Ergebnisse für Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen sind in sich schlüssig, d.h. die benötigte zusätzliche Leistung bei Beschleunigung des Fahrzeuges spiegelt sich in höheren CO₂-Emissionen wieder, der größere Anteil an Schubphasen bei Fahrzeugverzögerung führt zu CO₂-Emissionen unterhalb der Konstantfahrtemissionen.

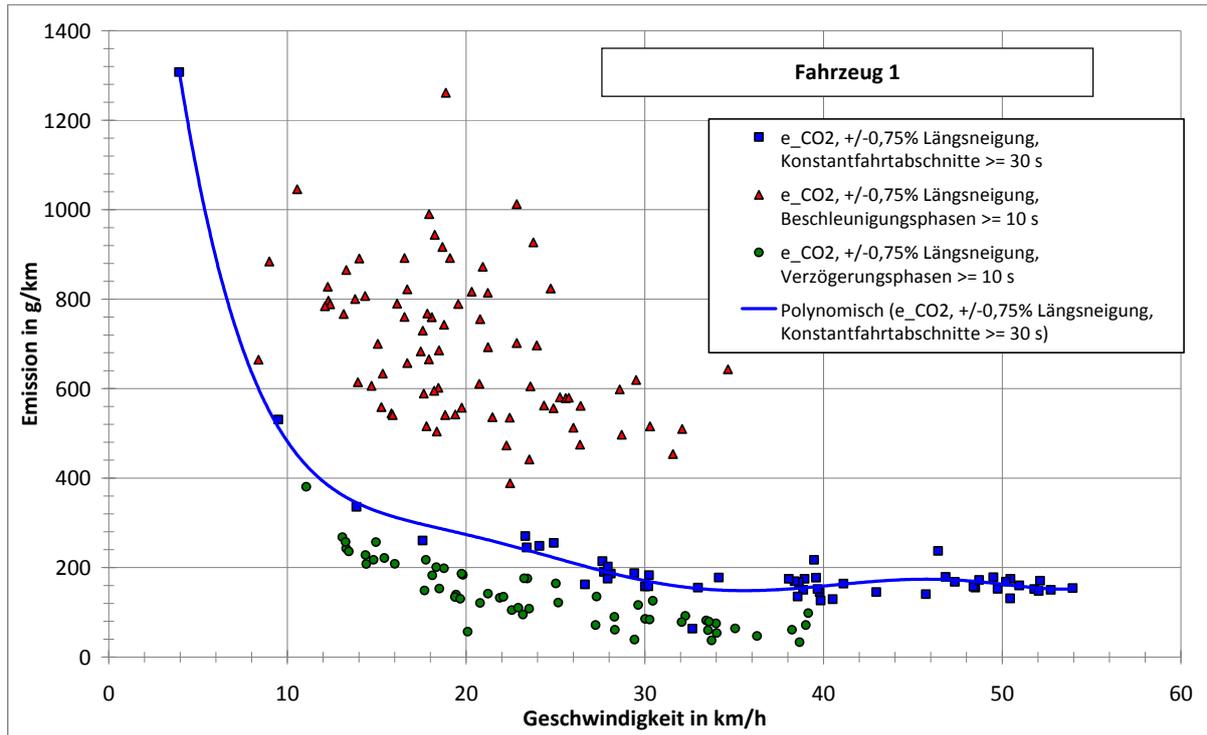


Abbildung 15: CO₂-Emissionen Fahrzeug 1

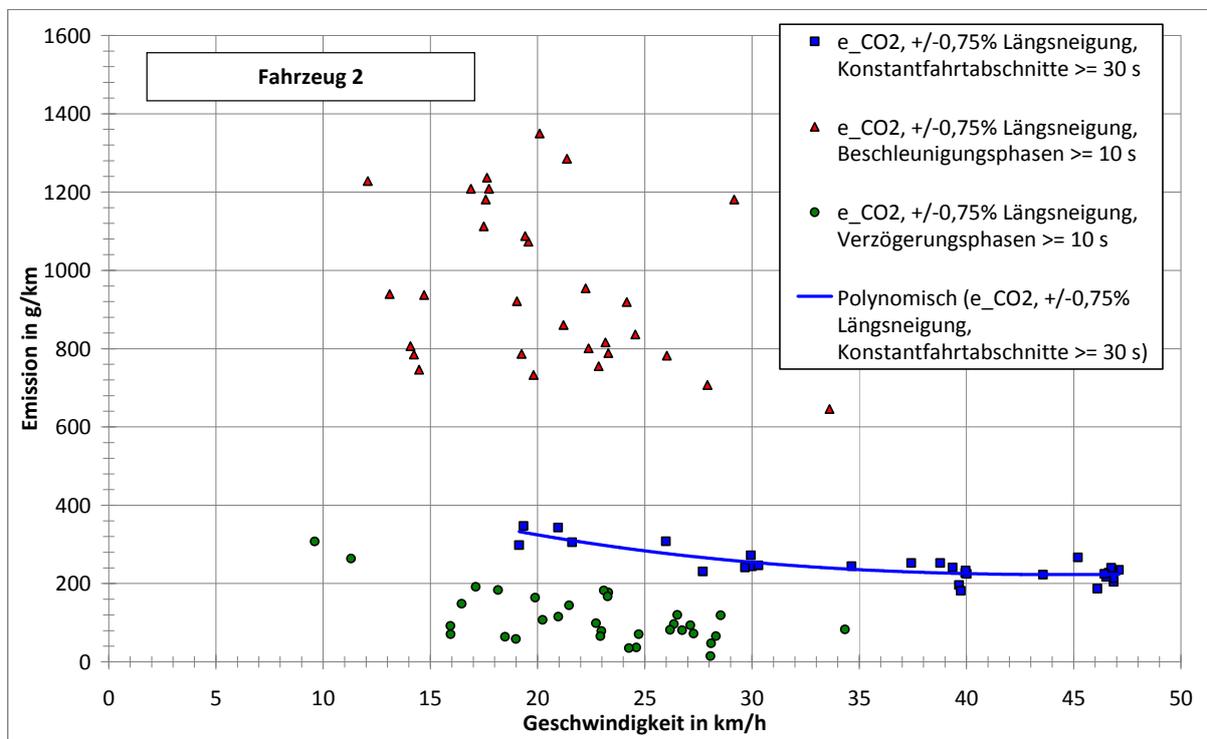


Abbildung 16: CO₂-Emissionen Fahrzeug 2

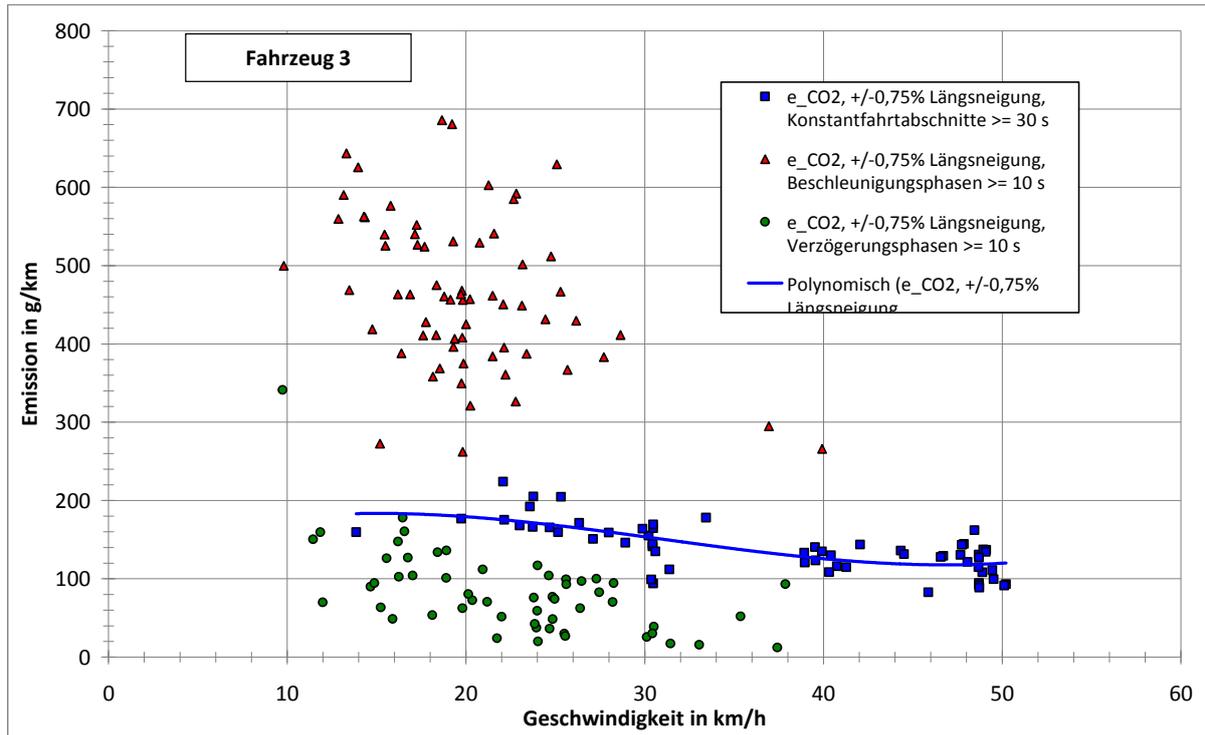


Abbildung 17: CO₂-Emissionen Fahrzeug 3

Die gleiche Darstellungsform für die NO_x-Emissionen führt zu den Abbildungen 18 bis 20. Die Randbedingungen sind die gleichen wie bei den Abbildungen 15 bis 17. Auch hier sind grundsätzlich ähnliche Effekte zu erkennen. Unter Konstantfahrtbedingungen ergibt sich für die streckenbezogene NO_x-Emission zu kleiner werdenden Geschwindigkeiten hin ein leichter Anstieg. Die Unterschiede in den absoluten Höhen der Emissionen ergeben sich durch die Klassenunterschiede der Fahrzeuge. Auffällig sind jedoch die absoluten Emissionswerte in Beschleunigungsphasen. Hier erreichen die Fahrzeuge 1 und 2 Werte, die deutlich doppelt so hoch liegen wie bei Fahrzeug 3.

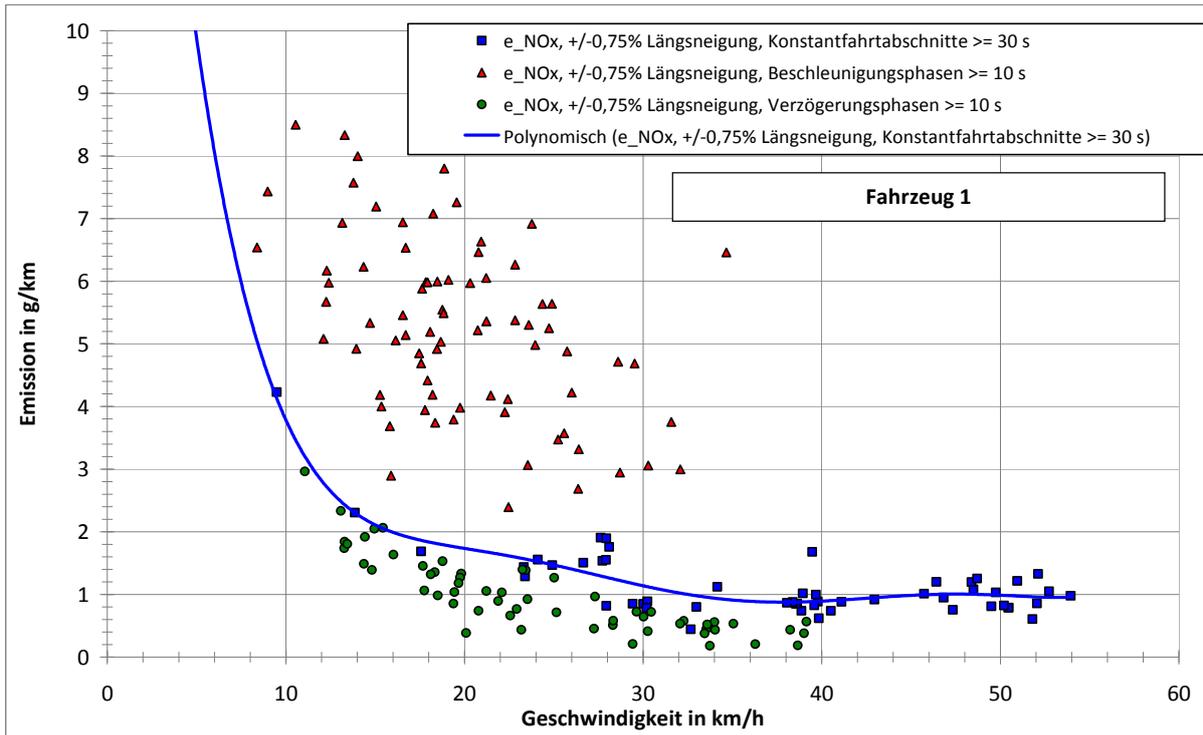


Abbildung 18: NO_x-Emissionen Fahrzeug 1
 Randbedingungen wie für Abb. 15 beschrieben

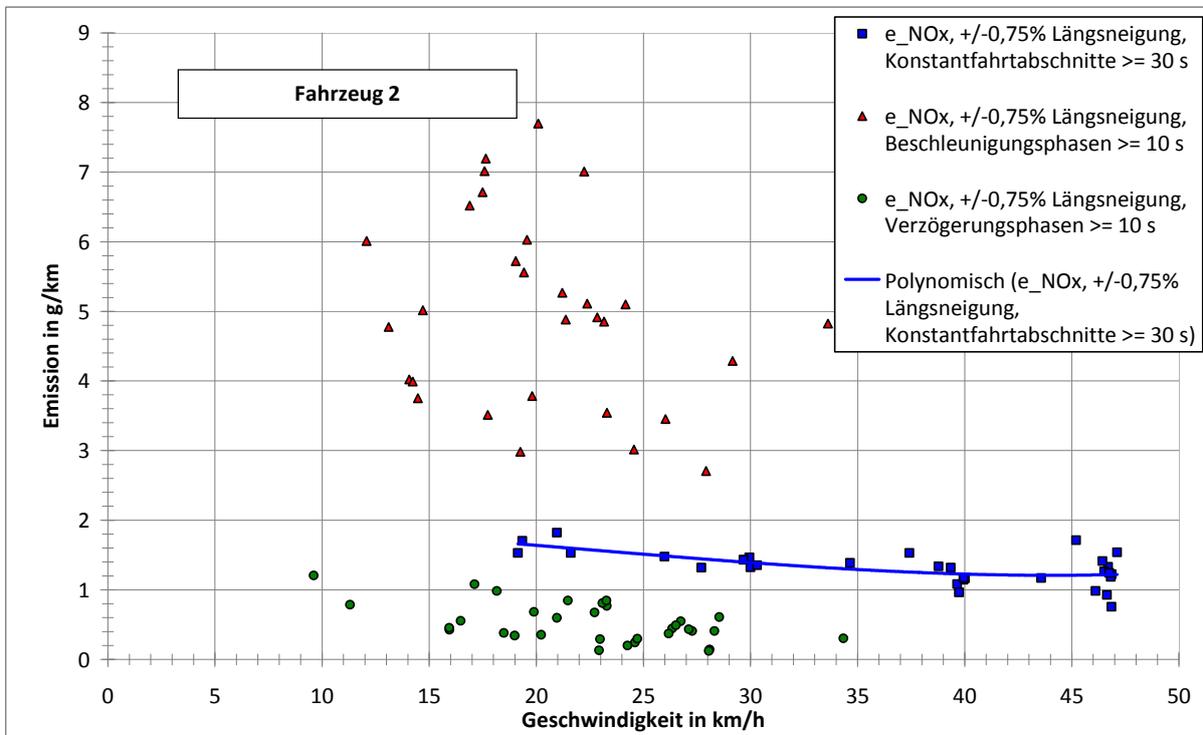


Abbildung 19: NO_x-Emissionen Fahrzeug 2
 Randbedingungen wie für Abb. 15 beschrieben

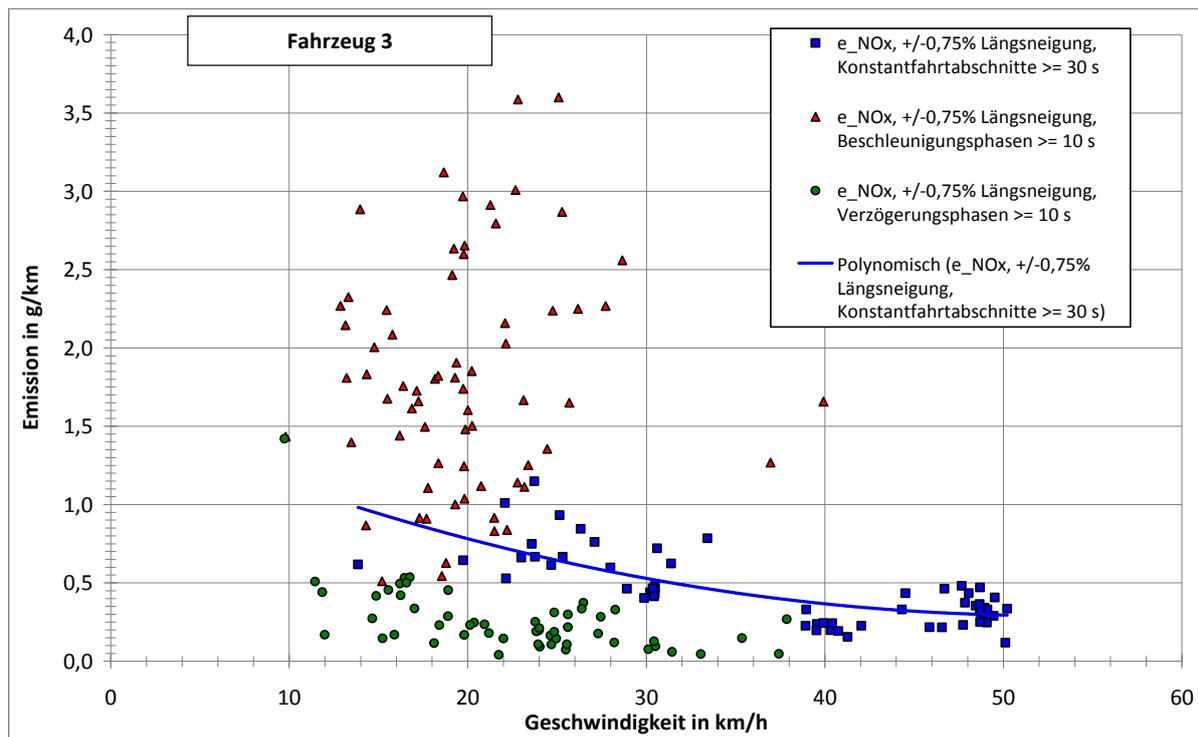


Abbildung 20: NO_x-Emissionen Fahrzeug 3
Randbedingungen wie für Abb. 15 beschrieben

Stellt man in gleicher Form nur den NO₂-Anteil an den NO_x-Emissionen dar, ergeben sich die Abbildungen 21 bis 23. Auch bei diesen Darstellungen gelten die gleichen Randbedingungen. Hier sind deutliche Unterschiede zwischen Fahrzeug 1 und 2 auf der einen Seite und Fahrzeug 3 auf der anderen Seite zu erkennen. Fahrzeug 1 und 2 weisen sehr viel höhere Anteile an NO₂ am NO_x-Ausstoß auf als Fahrzeug 3. Insbesondere in Beschleunigungsphasen ist dies deutlich zu erkennen.

Das Verhältnis von NO₂ zu NO_x im motorischen Rohabgas liegt üblicherweise zwischen 3 und 10 Prozent. Die Verschiebung zu sehr viel höheren NO₂-Anteilen erfolgt durch die Abgasnachbehandlung, die mit stark oxidierenden Beschichtungen bei entsprechenden Temperaturen zu einer Oxidation von NO zu NO₂ führt.

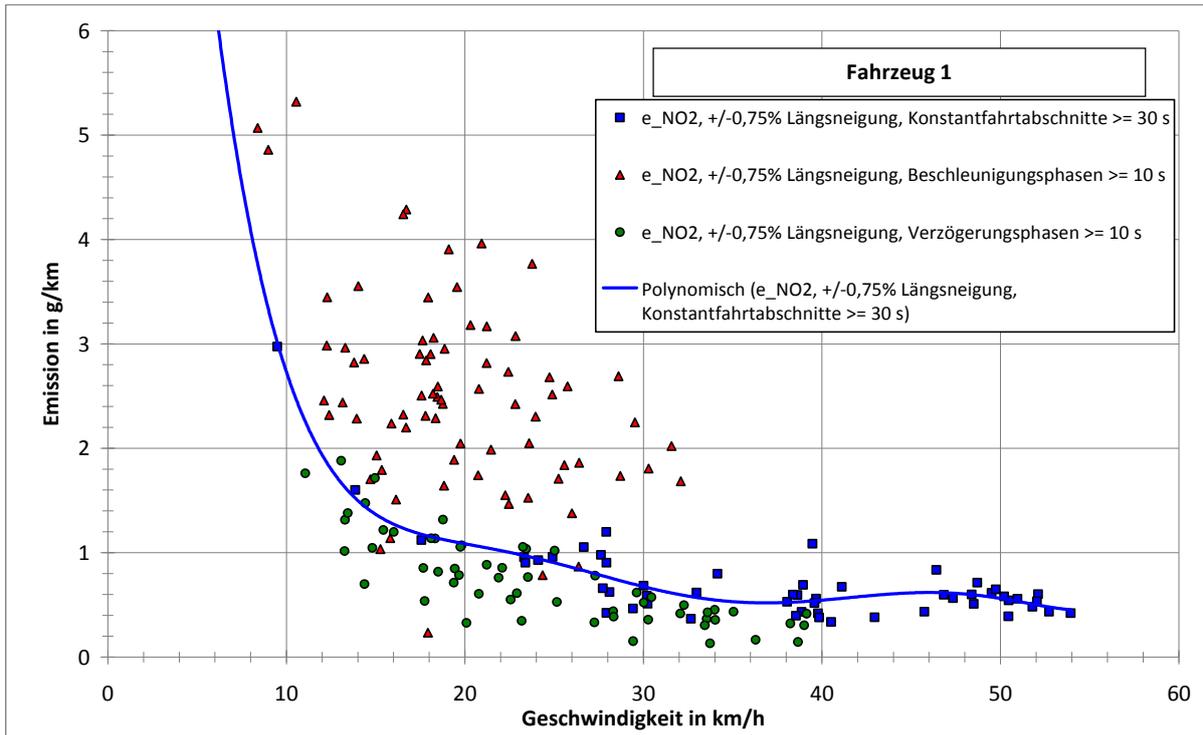


Abbildung 21: NO₂-Emissionen Fahrzeug 1
Randbedingungen wie für Abb. 15 beschrieben

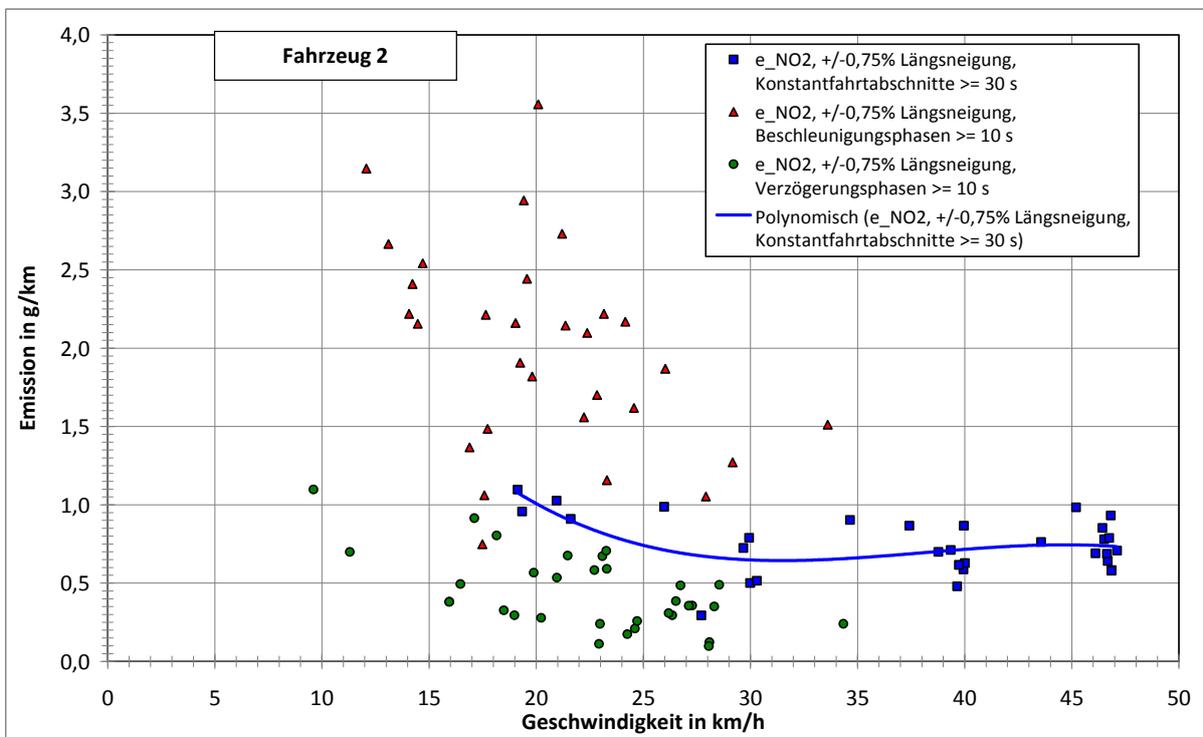


Abbildung 22: NO₂-Emissionen Fahrzeug 2
Randbedingungen wie für Abb. 15 beschrieben

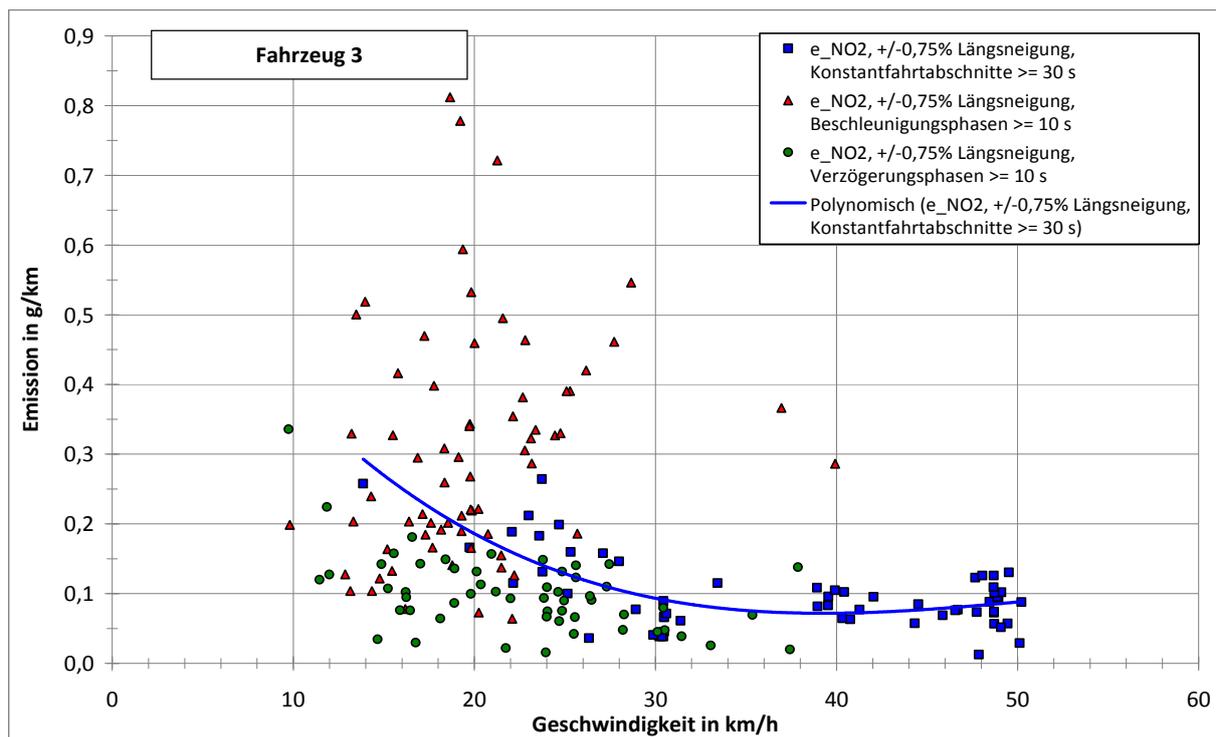


Abbildung 23: NO₂-Emissionen Fahrzeug 3
Randbedingungen wie für Abb. 15 beschrieben

Ergebnis dieser ersten Betrachtungen ist, dass reduzierte Höchstgeschwindigkeiten auf die streckenbezogenen NO_x- und speziell auf die NO₂-Emissionen keinen großen positiven Einfluss haben. Die streckenbezogenen CO₂-Emissionen und somit der Kraftstoffverbrauch bewegen sich bei einer Absenkung der Geschwindigkeit eher nach oben.

Um nun aufzuzeigen, ob die hohen Immissionswerte an den Messstationen mit den Emissionsmessdaten erklärbarer werden, wurden den Messergebnissen Daten aus dem HBEFA 3.1 gegenübergestellt. Für Fahrzeug 1 ergeben sich die folgenden Darstellungen für CO₂, CO, NO_x und NO₂ (Abbildungen 24 bis 27), die Ergebnisse für Fahrzeug 2 stellen die Abbildungen 28 bis 31 dar. Das Verhalten von Fahrzeug 3 wird in den Abbildungen 32 bis 35 gezeigt. Die Datenpunkte repräsentieren Emissionsmittelwerte für Emissionsereignisse, die die dargestellten Randbedingungen (Neigung und Geschwindigkeit) erfüllen.

Für die CO₂-Emissionen fällt für alle drei Fahrzeuge der Vergleich zwischen den HBEFA 3.1-Werten und den Messergebnissen sehr gut aus. Die real gemessenen Werte korrelieren sehr gut mit den Rechenwerten aus dem HBEFA 3.1. Völlig anders sieht dies für die CO-Emissionen bei allen drei Versuchsfahrzeugen aus. Offensichtlich geht hier das HBEFA 3.1 von deutlich zu niedrigen Emissionsfaktoren aus. Einschränkend muss aber darauf hingewiesen werden, dass die Emissionsmessungen bei der Komponente CO mit größeren Messunsicherheiten behaftet ist. Die Auslegung der PEMS Messtechnik sieht hier auch eine Verwendung bei Ottomotoren vor, was zu einem Messbereich von bis zu 8 Vol % CO führt. Die Messungen an Dieselfahrzeugen mit katalytischen Abgasnachbehandlungssystemen sind durch die kleinen Emissionen mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet.

Bei den NO_x - und NO_2 -Emissionen sieht das Bild etwas differenzierter aus. Fahrzeug 1 liegt bei kleineren Geschwindigkeiten in beiden Komponenten deutlich über den gerechneten Emissionen des HBEFA 3.1. Zu höheren Geschwindigkeiten nähern sich die gemessenen Emissionen den gerechneten stark an. Auch Fahrzeug 2 zeigt höhere Emissionen bei kleineren Geschwindigkeiten, liegt aber nicht so weit von den gerechneten Werten entfernt wie Fahrzeug 1.

Fahrzeug 3 zeigt für NO_x eine überwiegend gute Korrelation zwischen den gemessenen und den gerechneten Emissionen. Lediglich einzelne Punkte bei Steigungsfahrten liegen oberhalb der gerechneten Werte. Für NO_2 liegt sogar eine Überbewertung durch das HBEFA 3.1 vor.

Für die Komponenten CO und NO_x sind mit roten Linien die Grenzwerte für Prüfstandsmessungen im europäischen Fahrzyklus eingetragen.

In den Abbildungen 24 bis 35 stellen die Datenpunkte Mittelwerte der gemessenen Emissionen für Fahrsituationen dar, die die Randbedingungen Geschwindigkeit und Längsneigung erfüllen.

Den HBEFA 3.1-Daten liegt ein mittlerer Diesel-Pkw Euro 4 mit DPF bei innerstädtischer Verkehrssituation zugrunde.

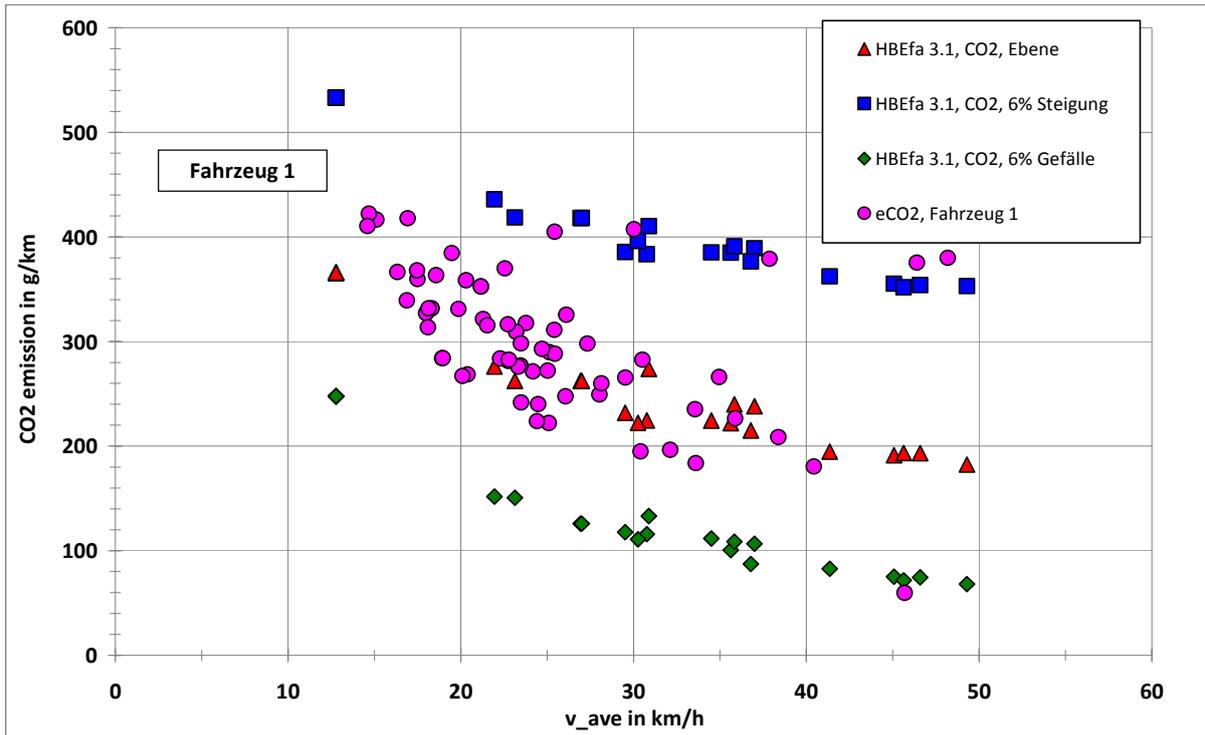


Abbildung 24: Fahrzeug 1, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen CO₂

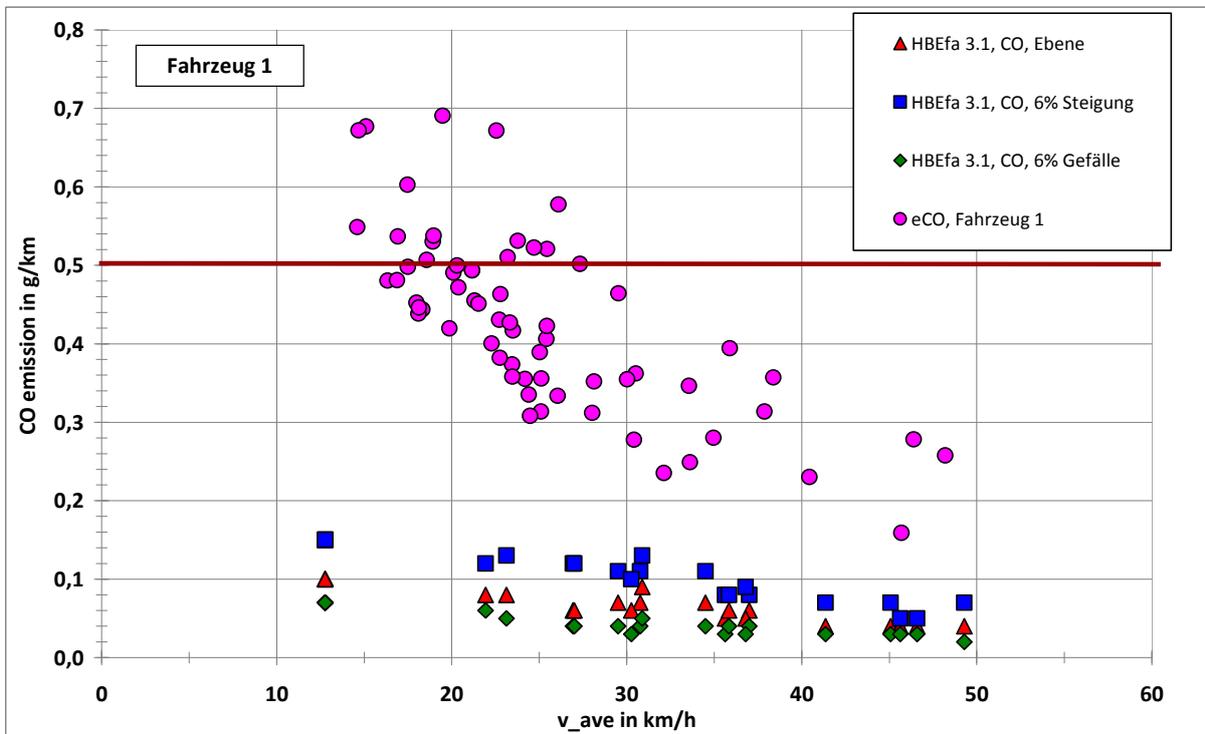


Abbildung 25: Fahrzeug 1, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen CO

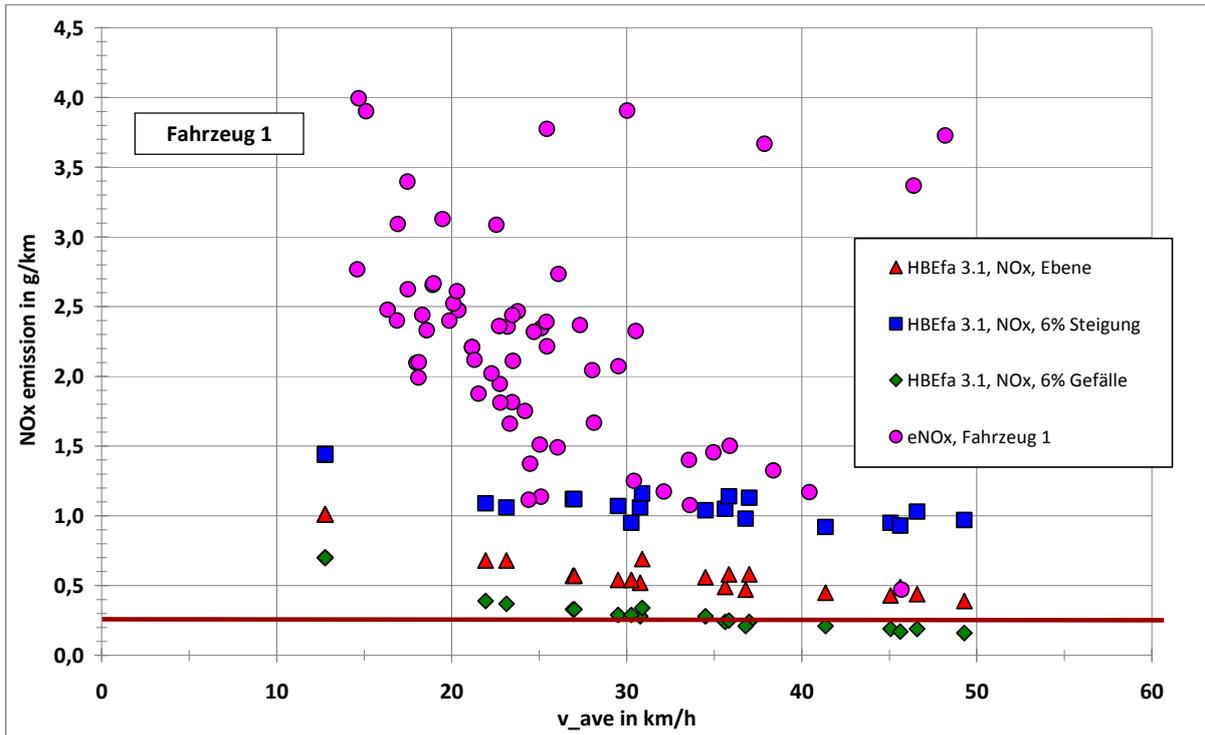


Abbildung 26: Fahrzeug 1, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO_x

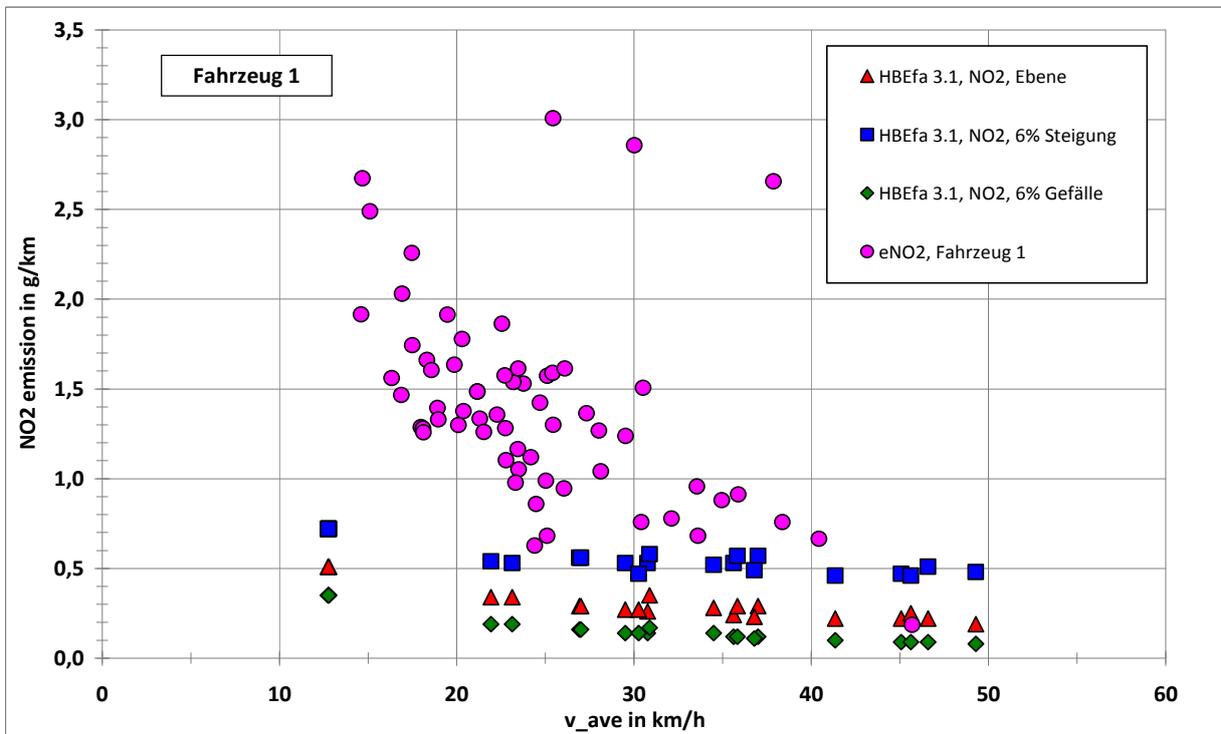


Abbildung 27: Fahrzeug 1, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO₂

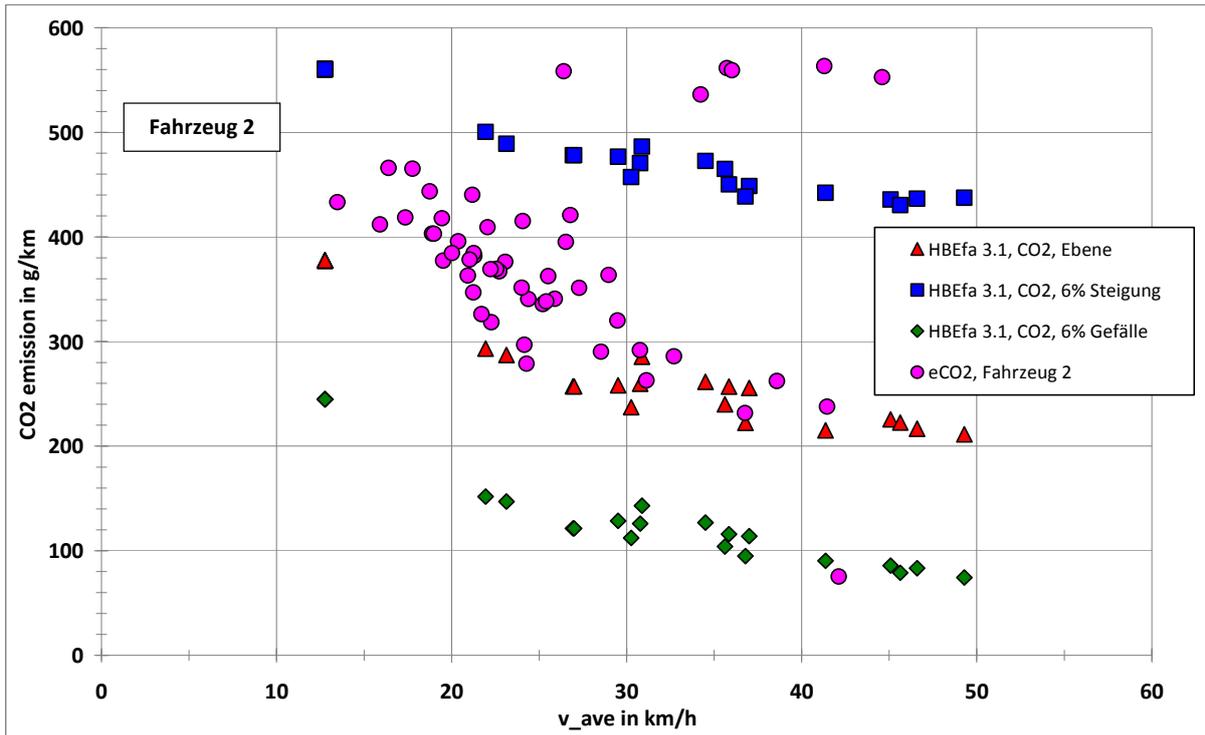


Abbildung 28: Fahrzeug 2, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen CO₂

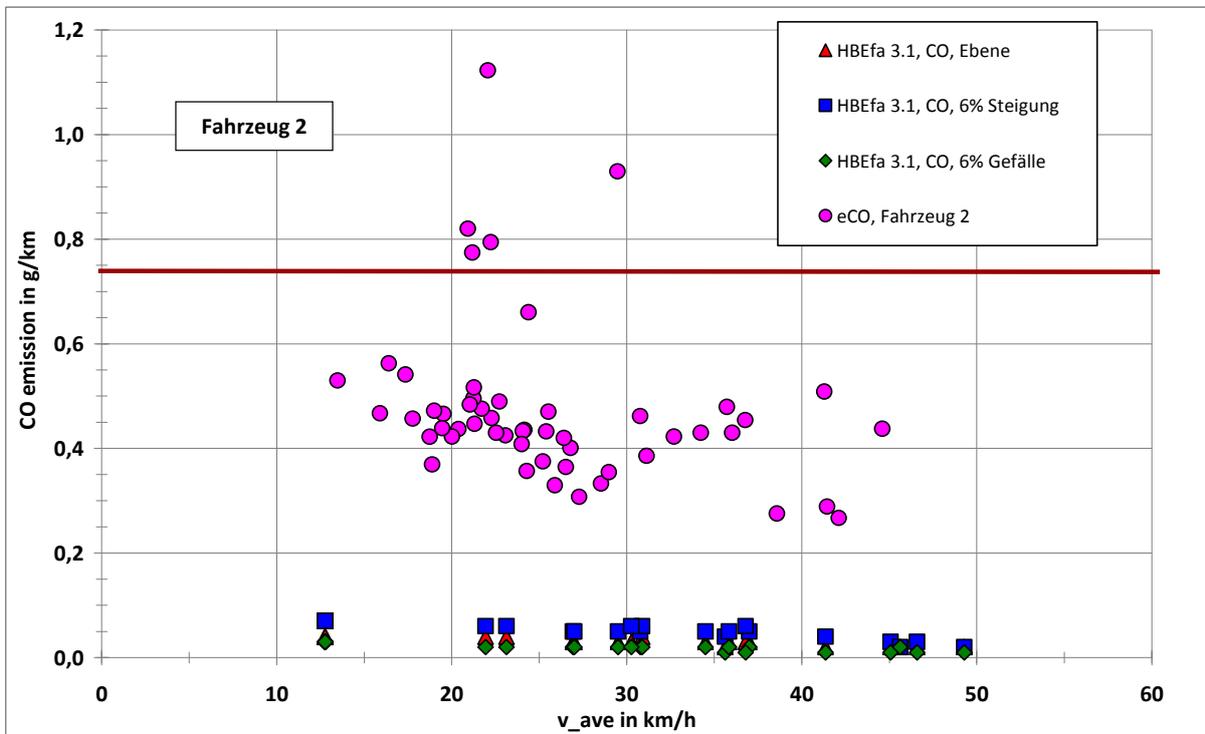


Abbildung 29: Fahrzeug 2, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen CO

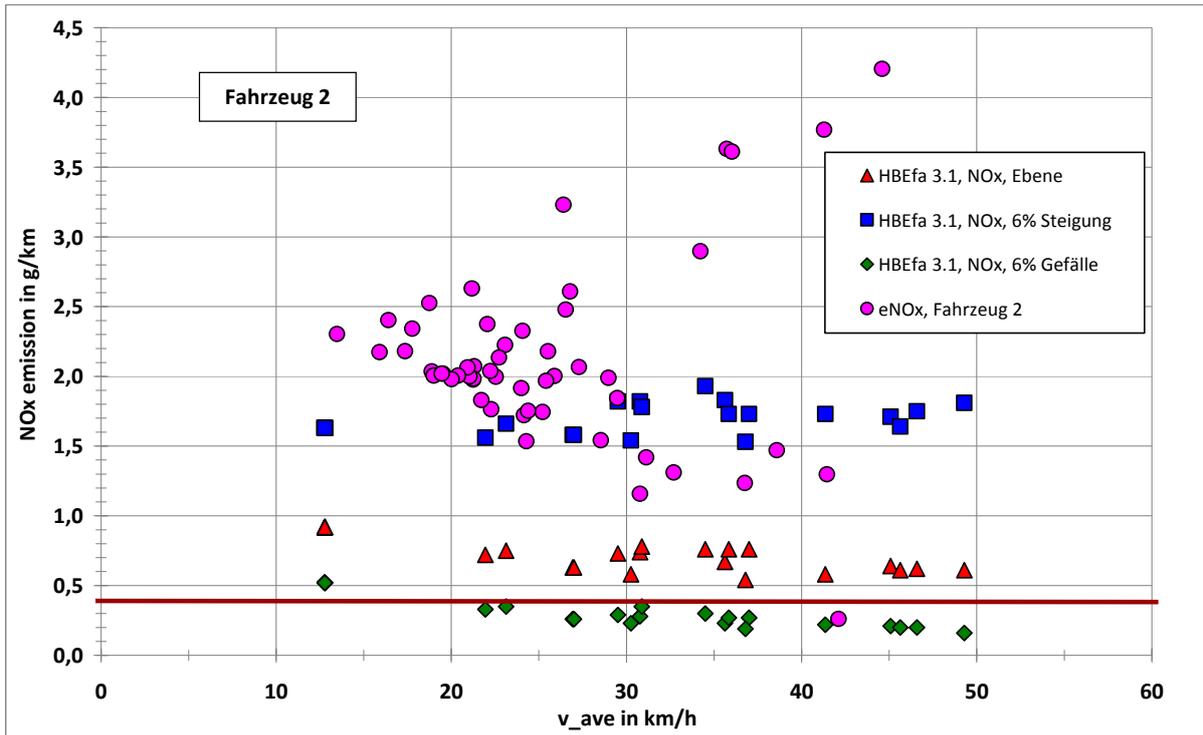


Abbildung 30: Fahrzeug 2, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO_x

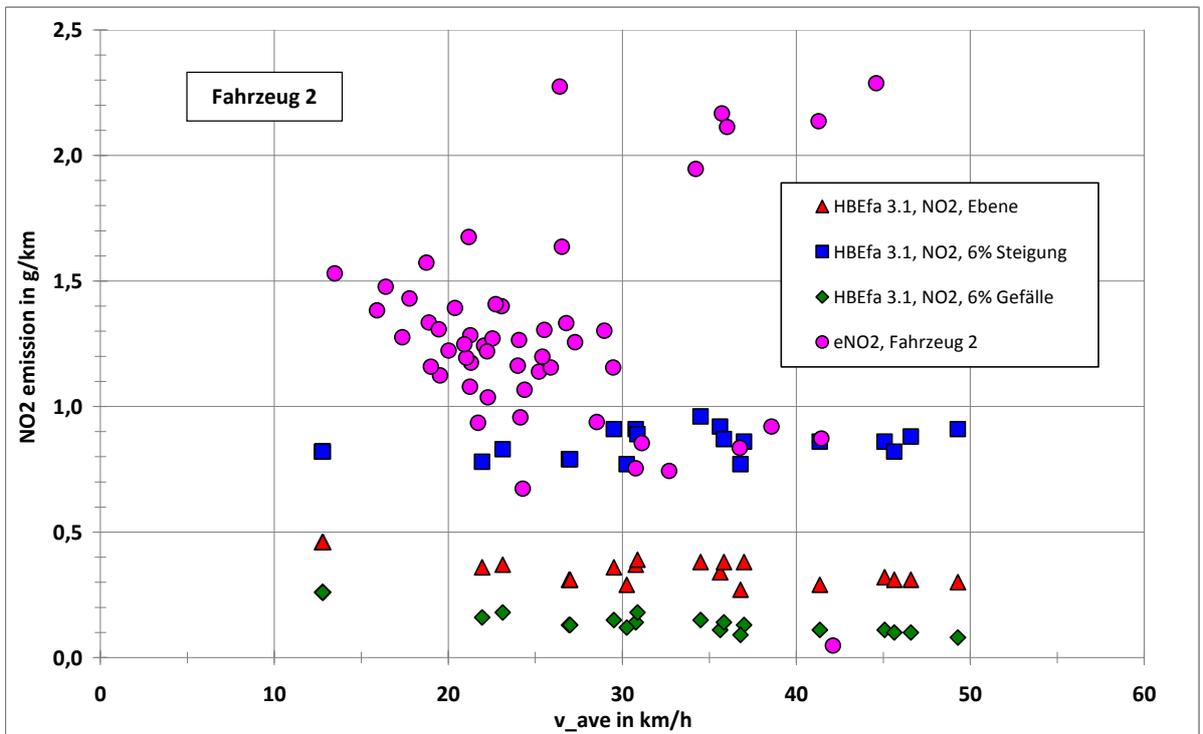


Abbildung 31: Fahrzeug 2, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO_2

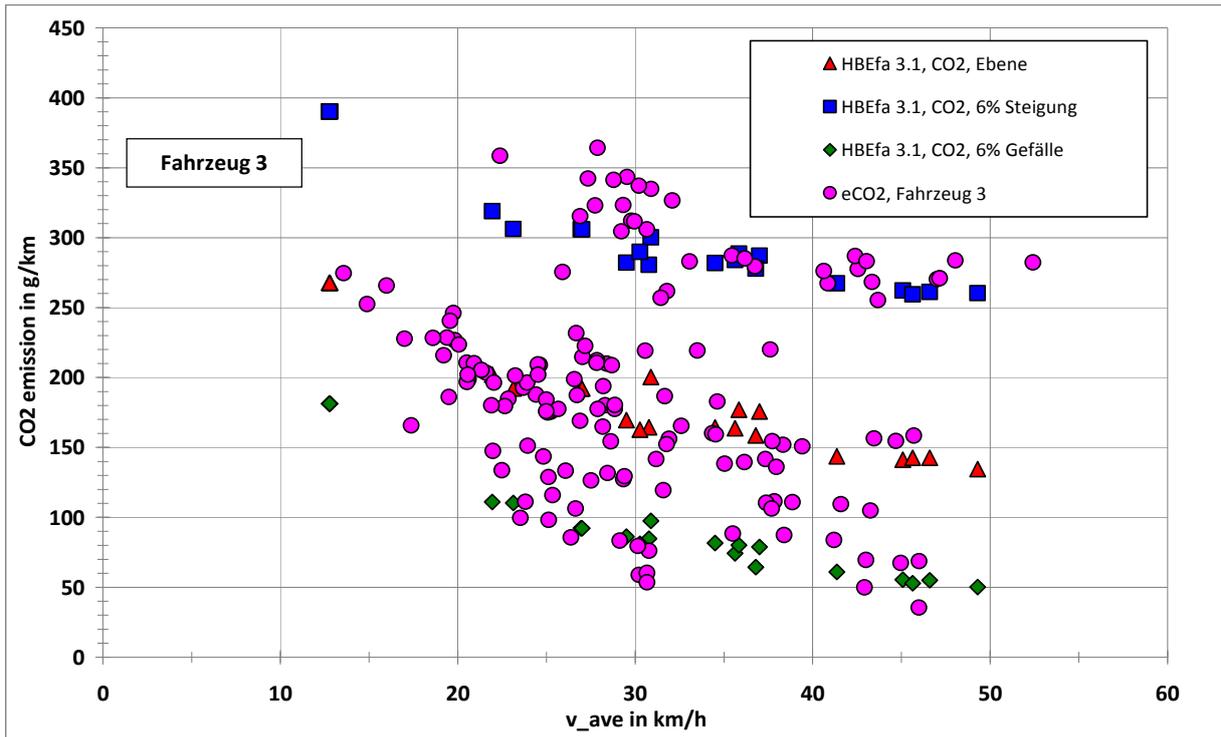


Abbildung 32: Fahrzeug 3, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen CO₂

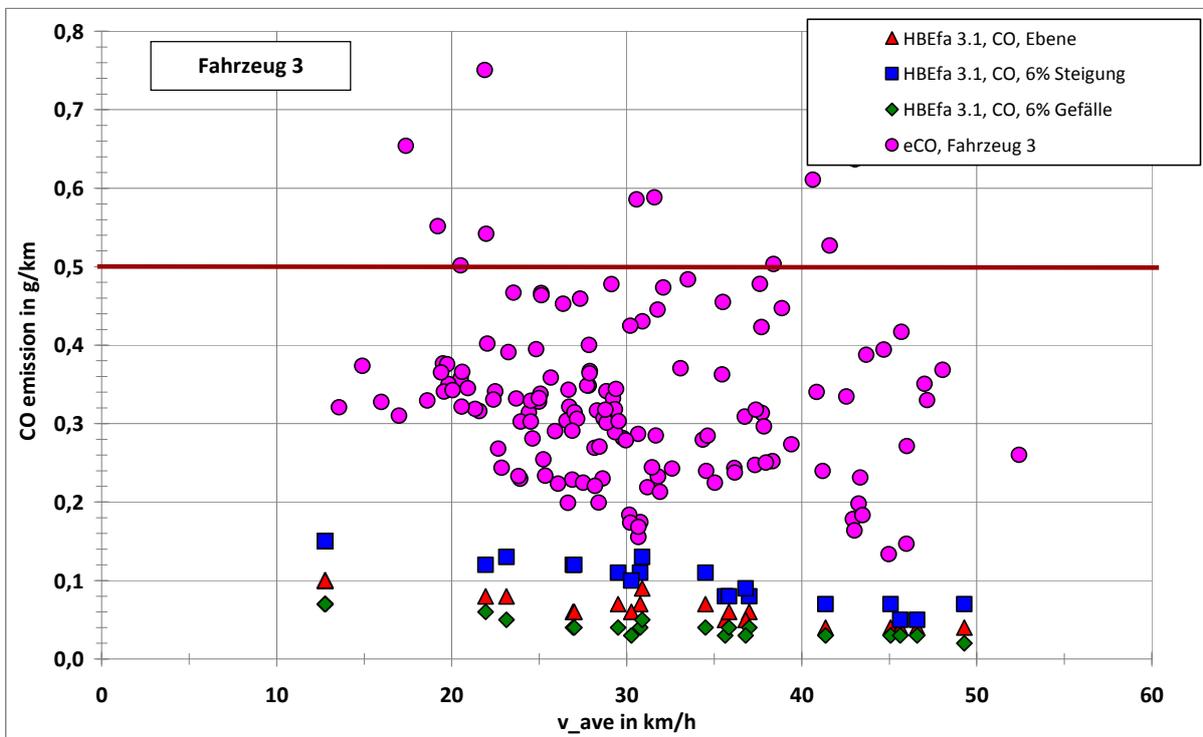


Abbildung 33: Fahrzeug 3, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen CO

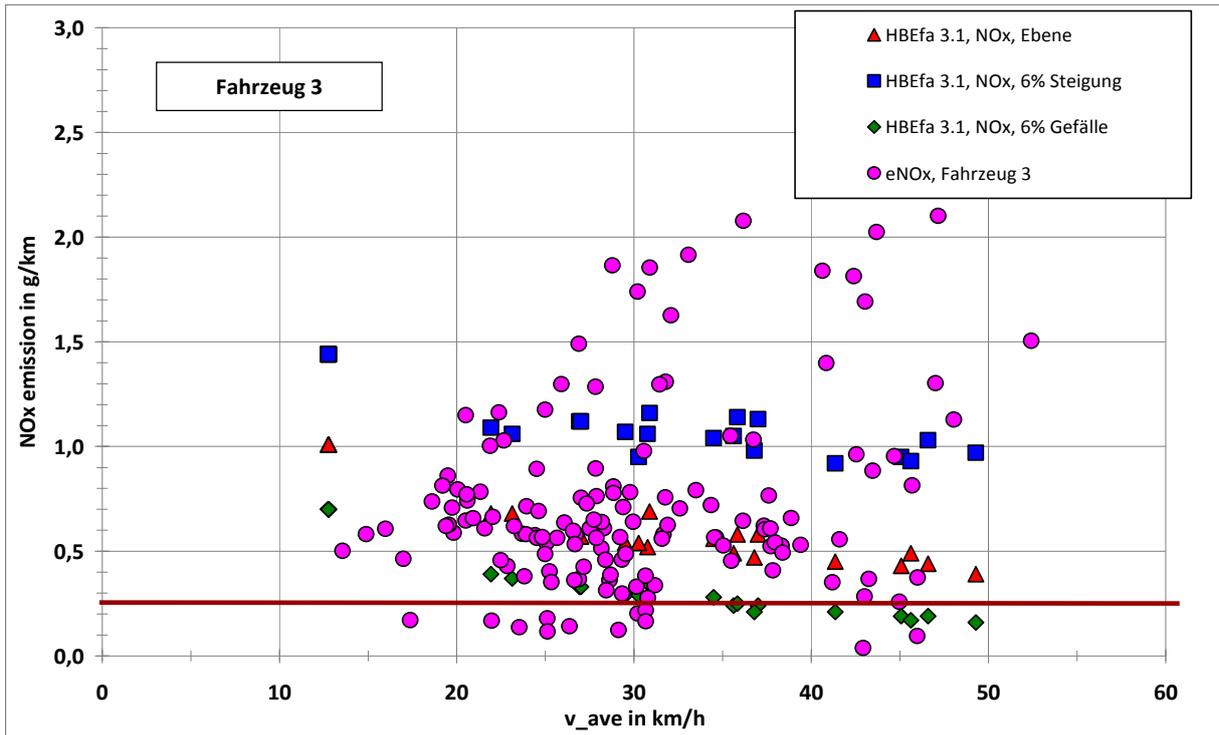


Abbildung 34: Fahrzeug 3, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO_x

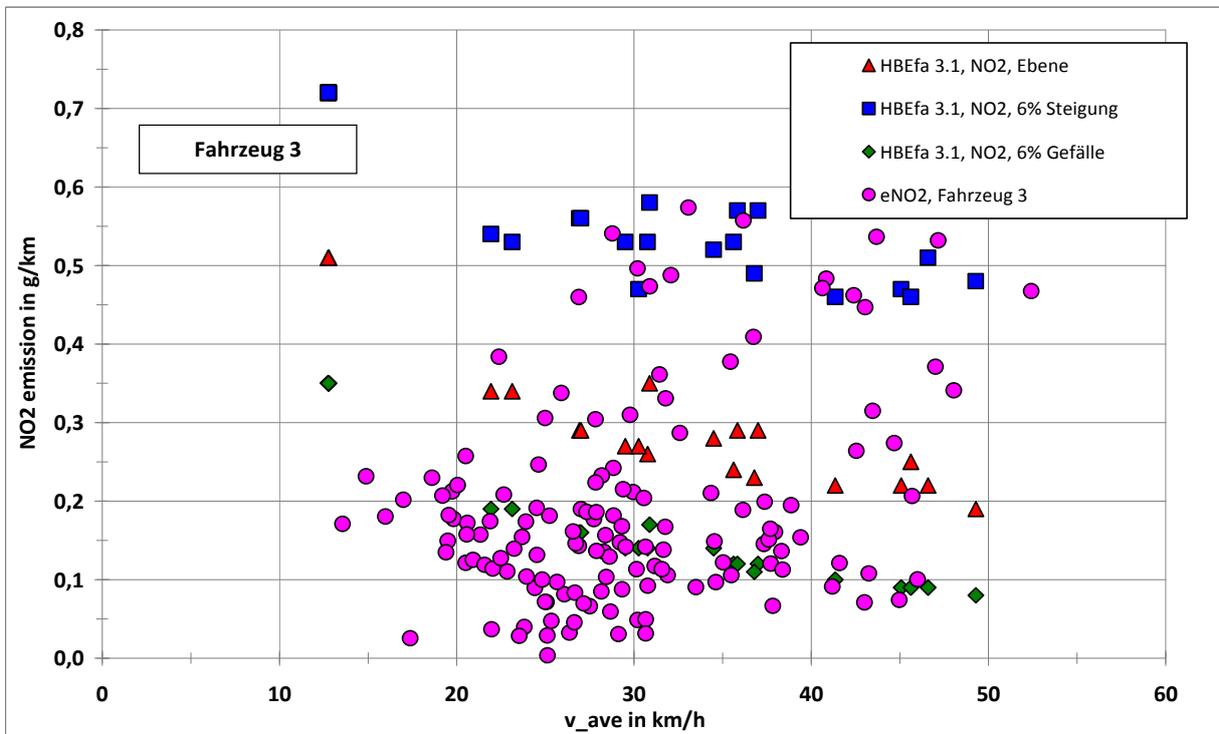


Abbildung 35: Fahrzeug 3, HBEFA 3.1 Daten im Vergleich zu Realemissionen NO₂

Da alle drei Versuchsfahrzeuge Euro 4 Abgasstandards genügen und mit DPF ausgerüstet sind, wird durch die obige Betrachtung deutlich, dass offensichtlich die Auslegung des Abgasnachbehandlungssystems erheblichen Einfluss auf das Emissionsverhalten im Realbetrieb hat. Die bei Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2 im Vergleich zu berechneten Werten auf Basis des HBEFA 3.1 sehr hohen NO_x - und NO_2 -Emissionen, die insbesondere bei Durchschnittsgeschwindigkeiten unter 50 km/h auftreten, passen in das Bild der NO_2 -Immissions-situation an den Luftmessstationen. Die Ergebnisse für Fahrzeug 3 zeigen aber auch, dass es Fahrzeugauslegungen gibt, die mit der Berechnungsgrundlage des HBEFA 3.1 im Wesentlichen übereinstimmen. Offensichtlich sind individuelle Fahrzeugbetrachtungen notwendig, um hier umfassendere Aussagen treffen zu können.

Hinweise der Fahrzeughersteller verweisen auf unterschiedliche Generationen von Katalysatorbeschichtungen, die, von einer reinen Platindotierung hin zu kombinierten Platin/Palladium Beschichtungen, unterschiedliches NO_2 -Emissionsverhalten zeigen. Vergleichende Betrachtungen von Katalysatoren unterschiedlicher Auslegung könnten Aufschluss darüber geben, ob hier Optimierungspotenziale im Feld befindlicher Fahrzeuge bestehen.

Eine Quantifizierung der Emissionsänderungen, die sich durch eine Veränderung der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit ergeben, ist aus mehreren Gründen nicht einfach und muss sehr differenziert gesehen werden. Ein entscheidender Punkt bei diesen Betrachtungen ist das Verkehrsumfeld, in dem die Messungen durchgeführt wurden. Ein Versuchsfahrzeug, welches mit einer Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h in einem Verkehrsumfeld unterwegs ist, welches mit einer erlaubten Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h fährt, erreicht sehr viel größere Konstantfahrtanteile als es bei einer generellen Höchstgeschwindigkeitsbeschränkung auf 30 km/h der Fall wäre. Bei einer reinen Betrachtung der Konstantfahrtanteile größer 30 Sekunden ergeben sich für die drei Versuchsfahrzeuge folgende Darstellungen (Abbildungen 36 bis 44). Die Datenpunkte stellen Emissionsmittelwerte unter den genannten Randbedingungen dar.

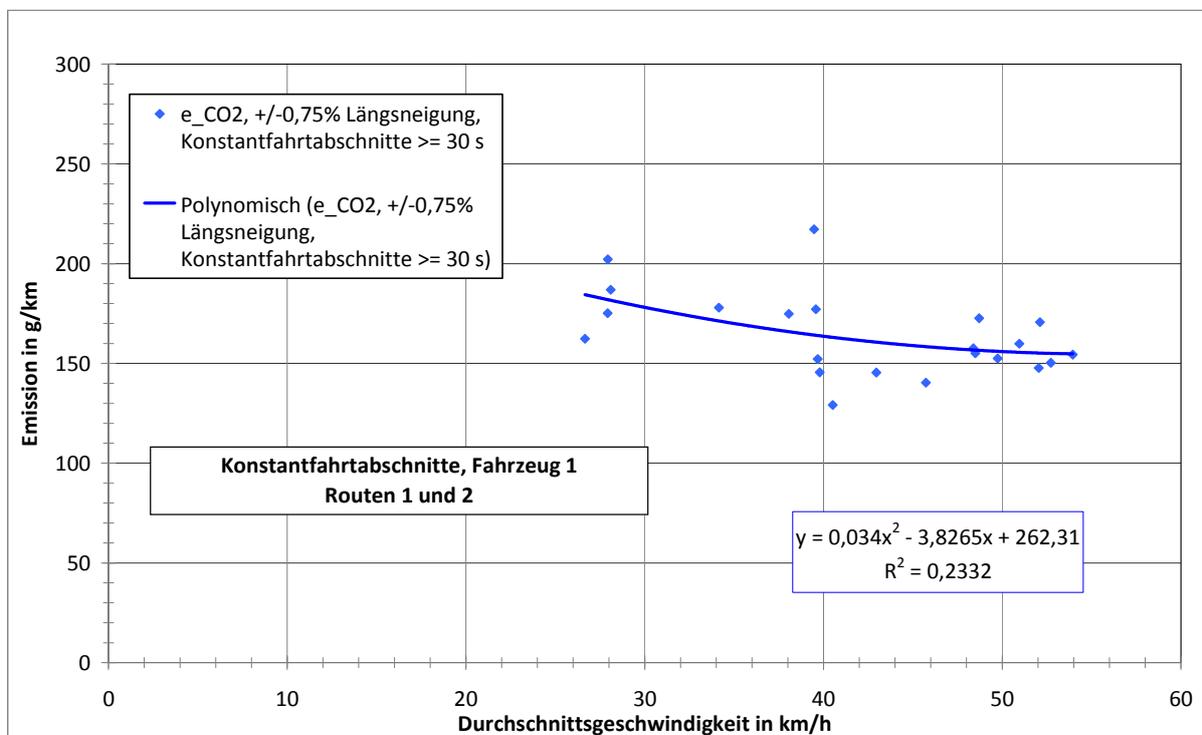


Abbildung 36: CO_2 -Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 1

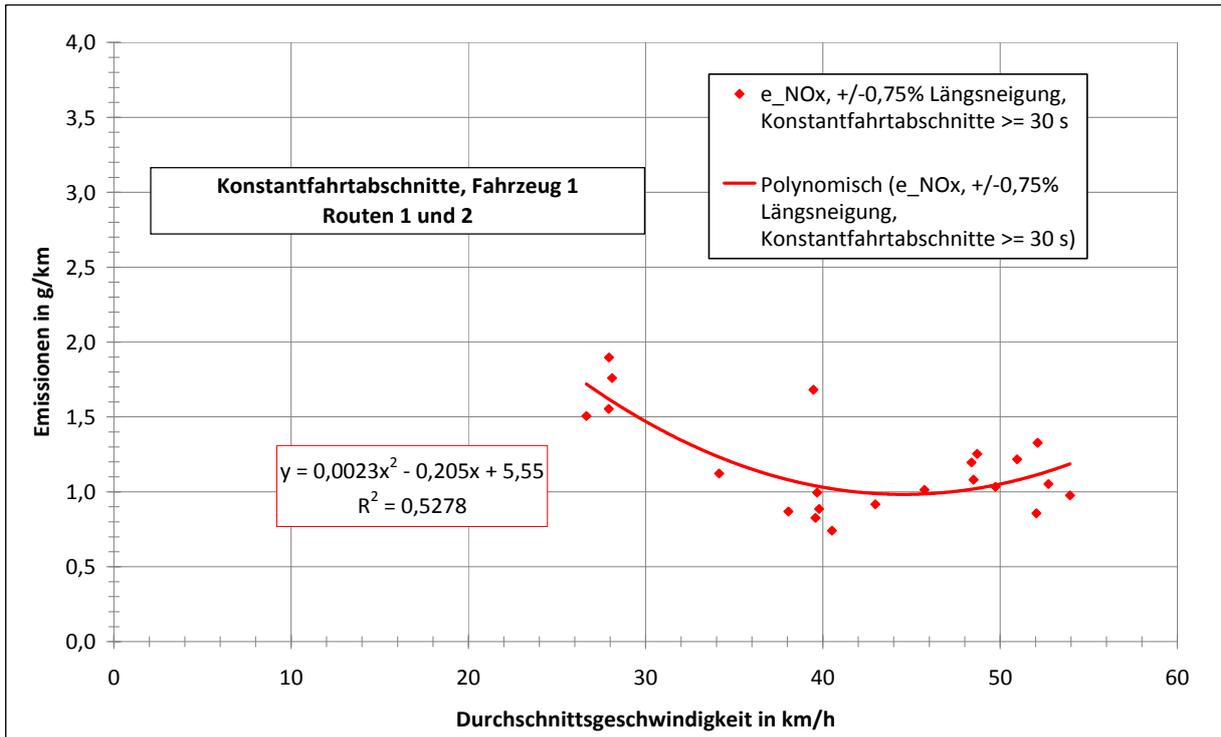


Abbildung 37: NO_x-Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 1

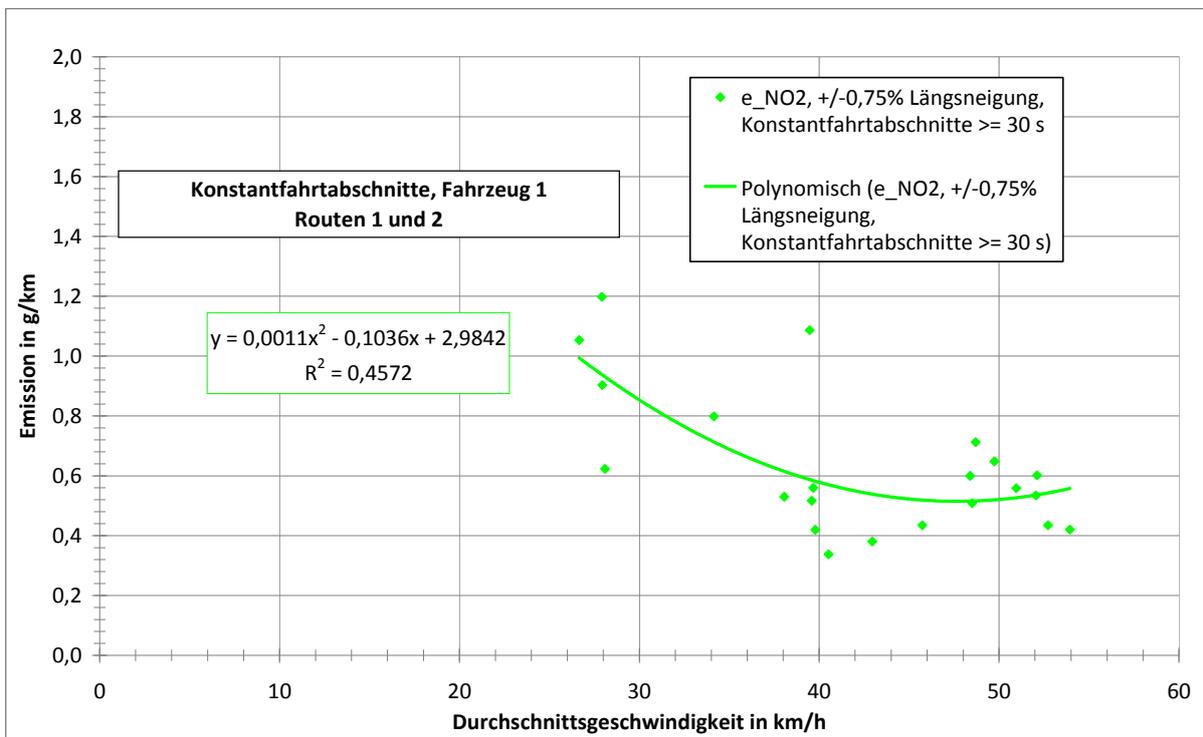


Abbildung 38: NO₂-Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 1

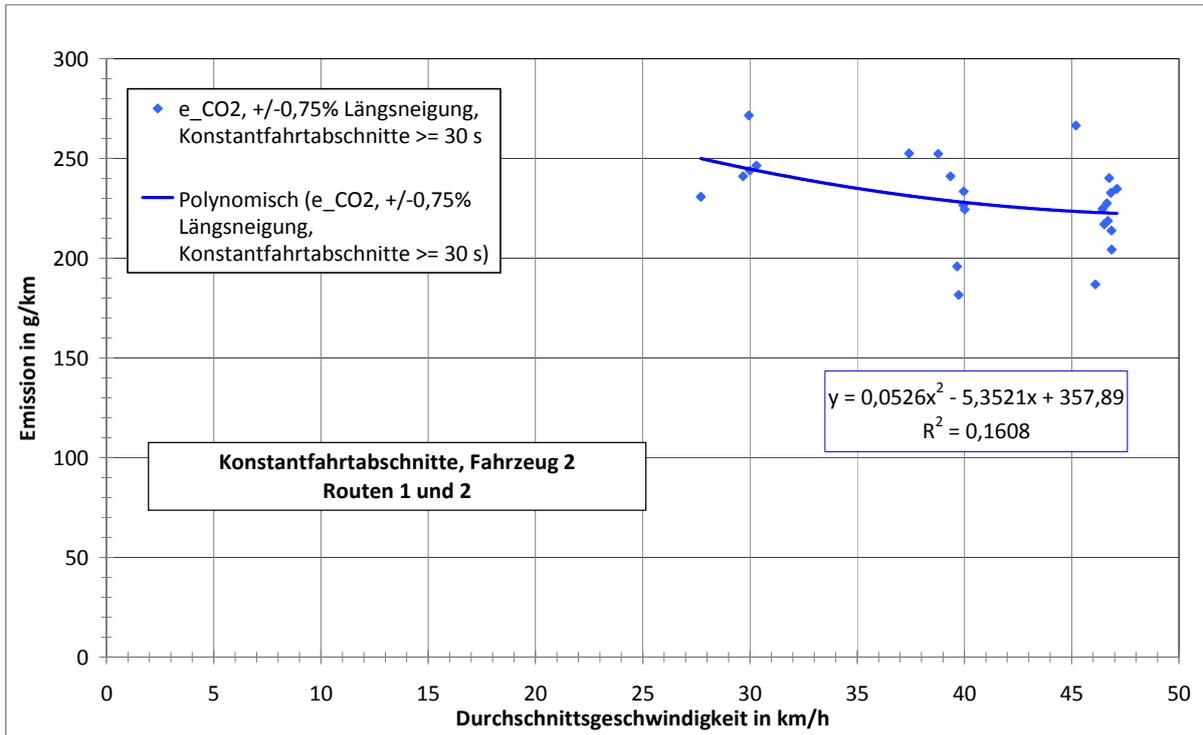


Abbildung 39: CO₂-Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 2

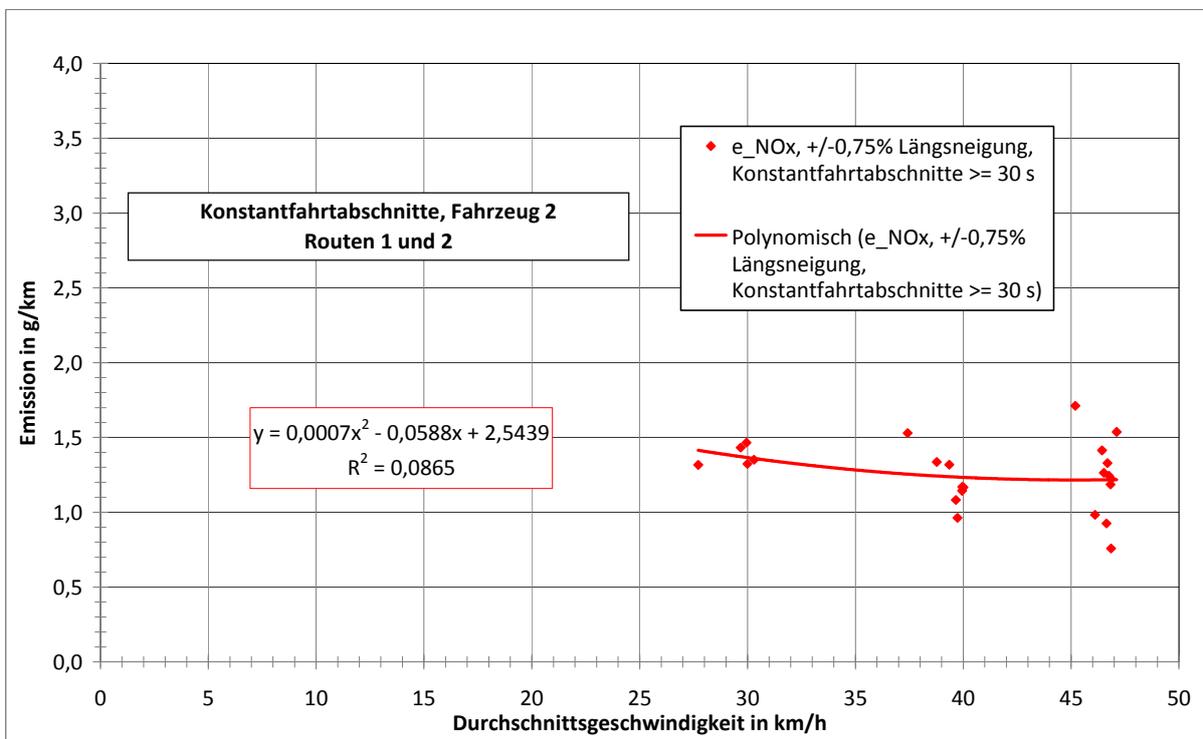


Abbildung 40: NO_x-Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 2

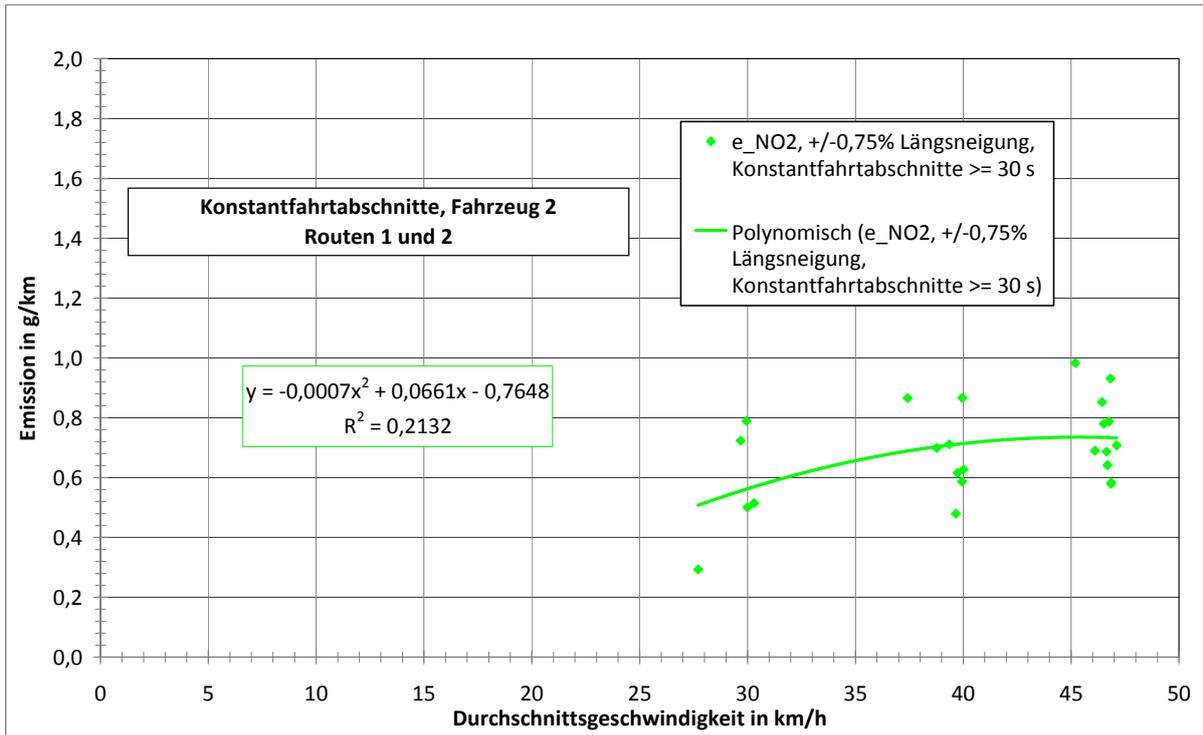


Abbildung 41: NO₂-Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 2

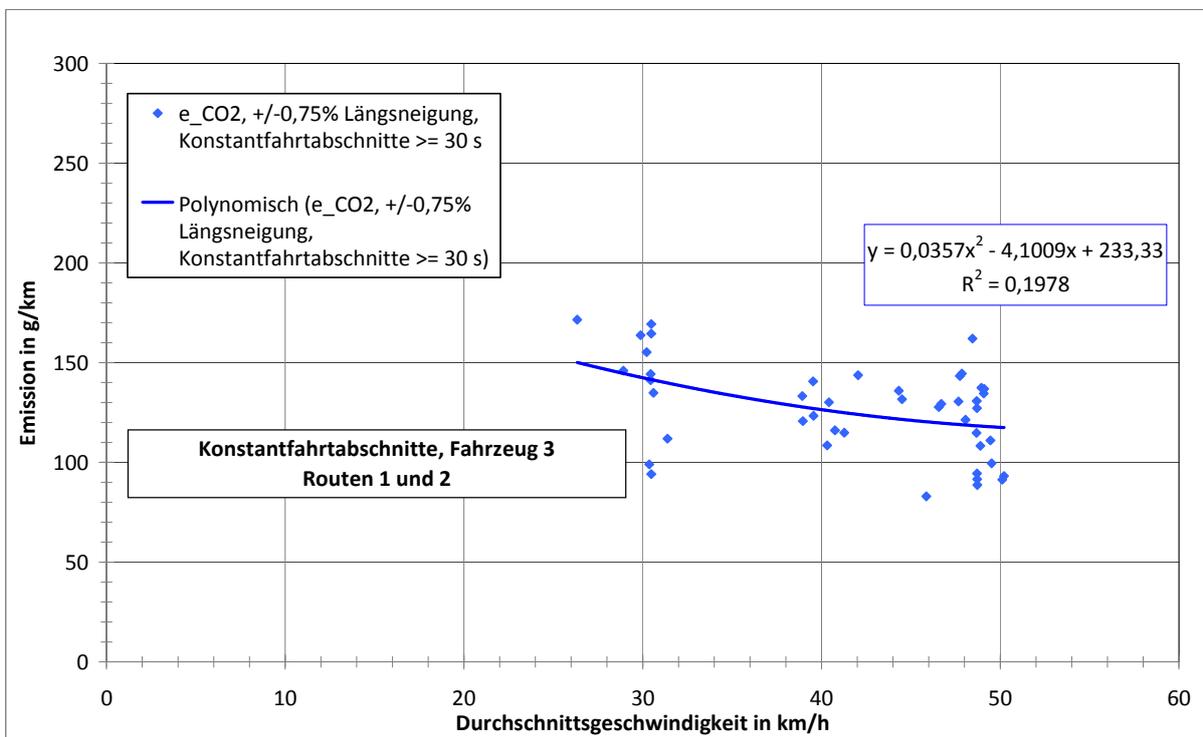


Abbildung 42: CO₂-Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 3

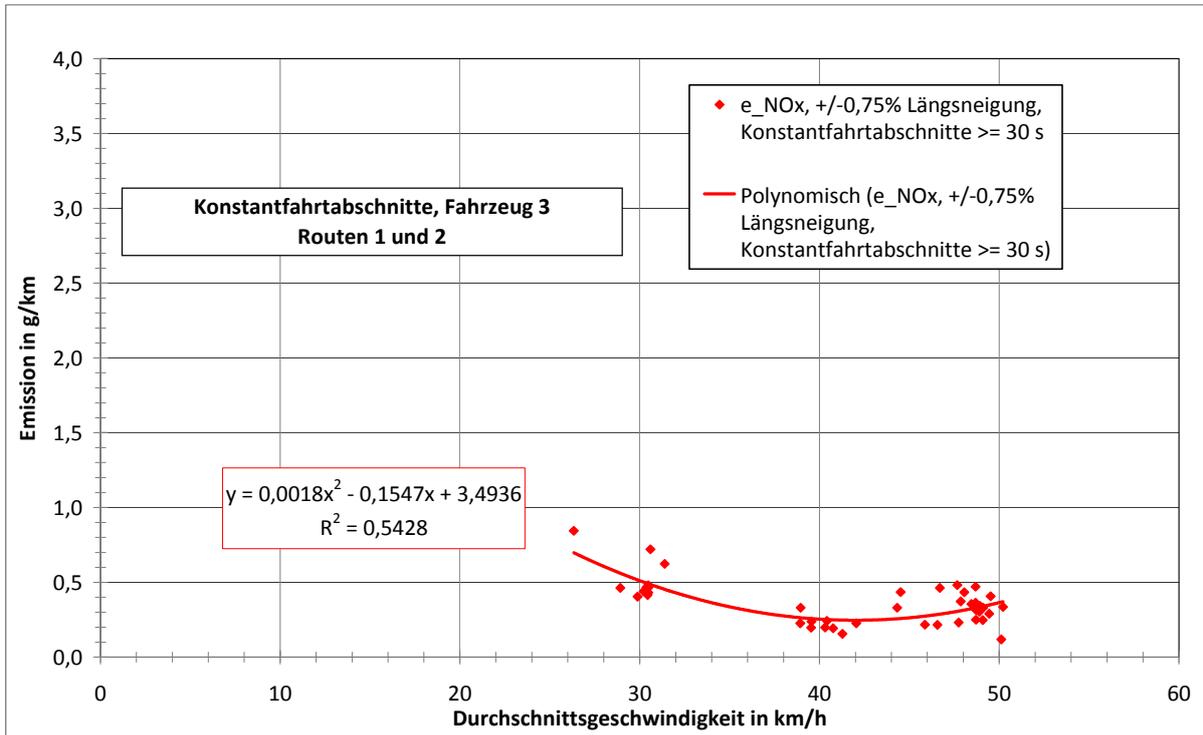


Abbildung 43: NO_x-Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 3

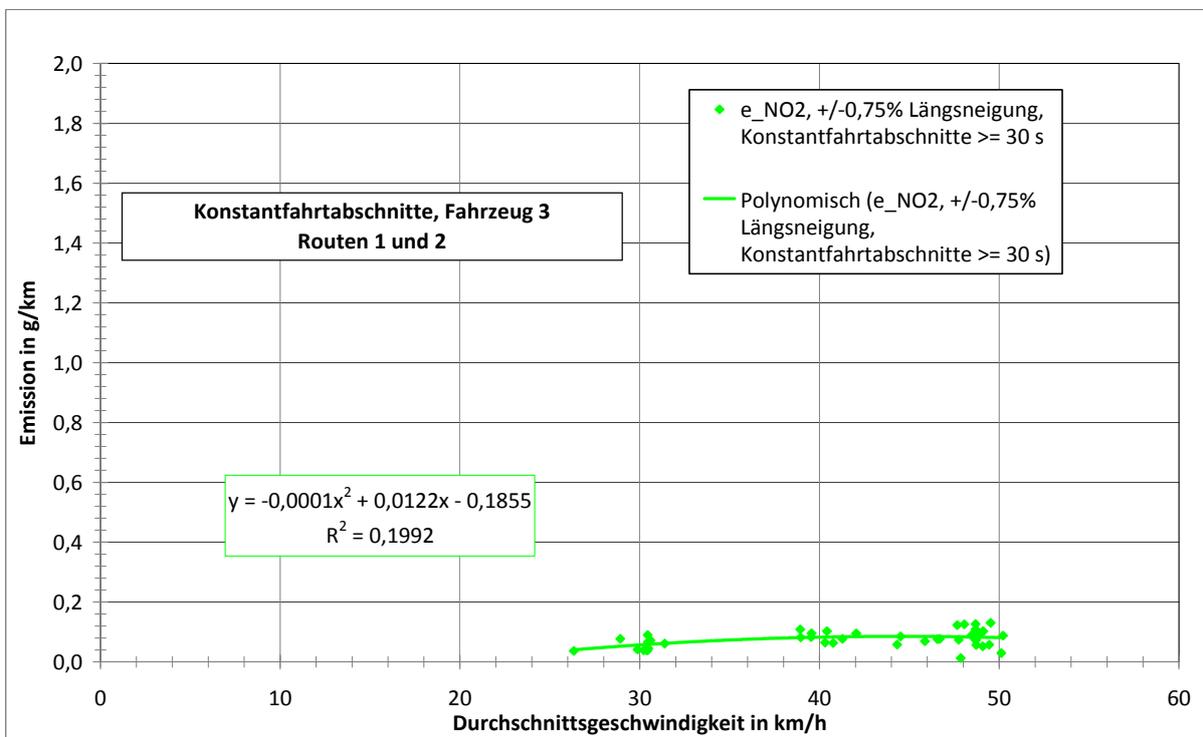


Abbildung 44: NO₂-Emissionen bei Konstantfahrtanteilen Fahrzeug 3

Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Tabelle 8.

	Fahrstrecke	Fahrzeug 1			Fahrzeug 2			Fahrzeug 3		
		NO2	NOx	CO2	NO2	NOx	CO2	NO2	NOx	CO2
30 km/h	1	0,915	1,568	180,905	0,580	1,369	243,819	0,060	0,520	142,018
		0,623	1,122	162,335	0,501	1,323	241,017	0,039	0,404	111,941
		1,198	1,897	202,161	0,724	1,432	246,473	0,089	0,720	163,745
		0,223	0,295	14,788	0,125	0,057	2,731	0,021	0,143	20,068
40 km/h	1	0,533	0,991	160,239	0,698	1,299	239,400	0,088	0,207	126,273
		0,338	0,741	129,203	0,587	1,143	224,446	0,063	0,156	114,927
		1,086	1,681	217,245	0,866	1,530	252,515	0,108	0,237	143,668
		0,236	0,292	28,305	0,107	0,155	13,507	0,018	0,033	12,160
50 km/h	1	0,558	1,110	157,866	0,762	1,389	229,462	0,072	0,292	116,907
		0,420	0,856	147,745	0,583	1,223	204,393	0,029	0,119	91,375
		0,712	1,327	172,689	0,983	1,711	266,529	0,130	0,435	135,923
		0,095	0,149	8,627	0,134	0,180	20,157	0,029	0,098	18,247
30 km/h	2	0,616	1,055	178,989	0,541	1,391	251,223	0,053	0,511	140,826
		0,422	0,785	155,249	0,293	1,317	230,829	0,036	0,429	94,110
		0,980	1,906	214,388	0,789	1,465	271,617	0,077	0,845	171,529
		0,174	0,425	20,522	0,351	0,105	28,842	0,017	0,148	32,344
40 km/h	2	0,538	0,835	155,353	0,654	1,072	203,662	0,083	0,242	124,997
		0,379	0,620	126,325	0,479	0,963	181,608	0,064	0,196	108,535
		0,693	1,017	174,756	0,866	1,170	233,469	0,102	0,330	140,606
		0,132	0,125	18,562	0,196	0,104	26,786	0,015	0,063	13,665
50 km/h	2	0,548	0,820	166,611	0,722	0,963	215,243	0,088	0,355	121,134
		0,391	0,755	130,971	0,579	0,759	186,935	0,013	0,217	82,941
		0,835	1,199	237,555	0,931	1,186	232,732	0,126	0,482	162,037
		0,131	0,156	31,493	0,149	0,176	20,493	0,030	0,080	23,567

Tabelle 8: Emissionsergebnisse in g/km für Konstantfahrtanteile

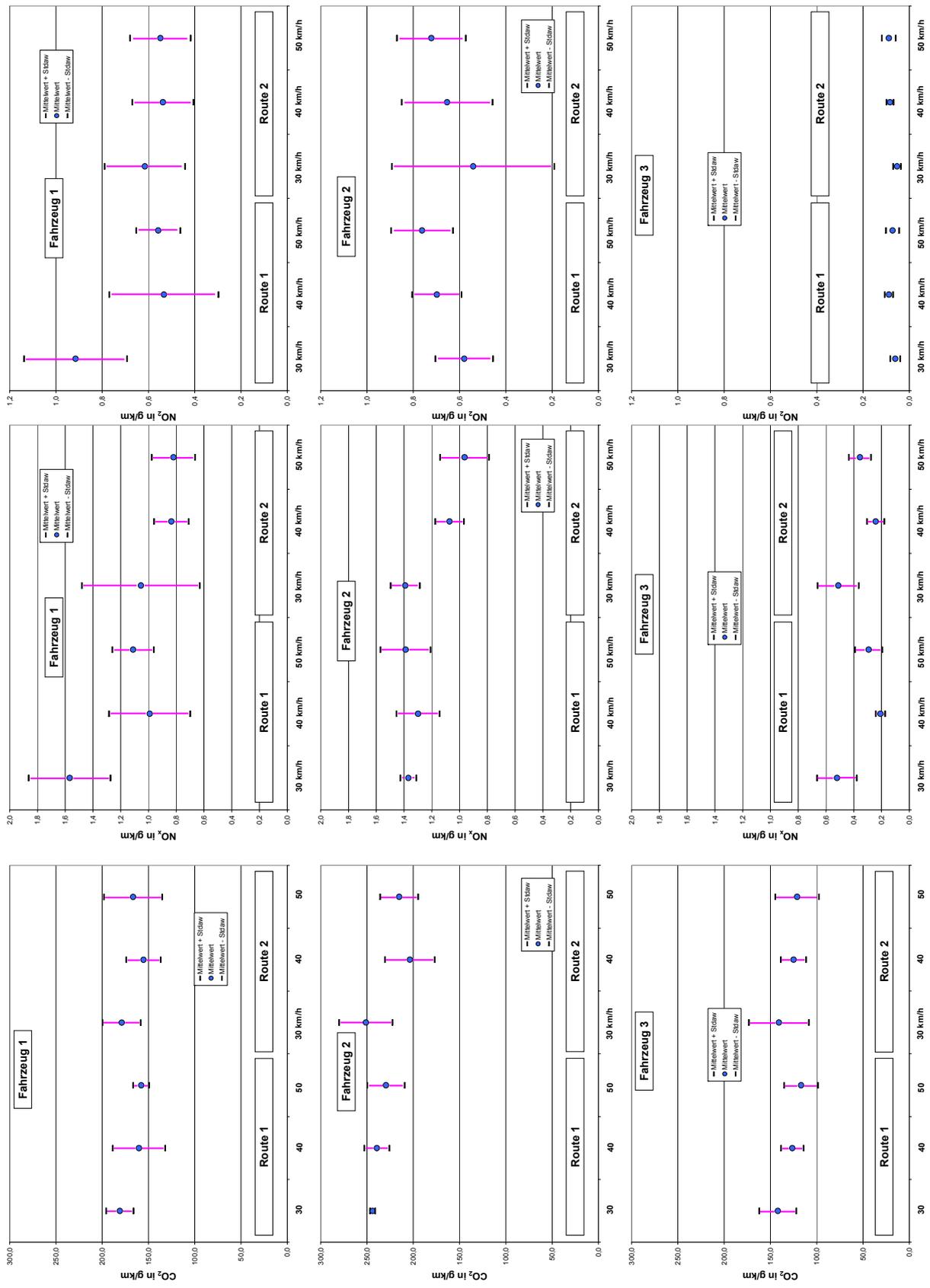


Abbildung 45:

Grafische Darstellung der Tabelle 8

Der Vergleich von Emissionsergebnissen ganzer Fahrten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist nur unter Vorbehalten möglich. Die oben beschriebenen Effekte führen zu erheblichen Schwierigkeiten bei der direkten Vergleichbarkeit. So muss für eine direkte Gegenüberstellung sichergestellt sein, dass ähnliche Stopanteile und Getriebebenutzung in den zu vergleichenden Zyklen vorliegen, um entsprechend ähnliche Beschleunigungs- und Verzögerungshäufigkeiten zu erhalten. Im Folgenden (Tabelle 9 und 10) sind exemplarisch Ergebnisse für einzelne Fahrten mit ähnlichen Stopanteilen dargestellt.

Fahrstrecke	Höchstgeschw. km/h	Stopanteil %	Durchschnittsgeschw. km/h	NO ₂ g/km	NO _x g/km	CO ₂ g/km
				Fahrzeug 1		
1	30	18,5	20,1	1,299	2,521	266,95
	40	18,2	22,7	1,282	1,946	281,37
	50	17,8	22,7	1,268	2,044	249,24
				Fahrzeug 2		
1	30	14,2	21,7	0,935	1,830	326,12
	40	14,6	25,2	1,139	1,745	335,58
	50	13,8	27,3	1,256	2,067	351,16
				Fahrzeug 3		
1	30	18,2	20,9	0,125	0,657	210,16
	40	17,2	25,2	0,181	0,403	175,61
	50	16,1	28,8	0,242	0,809	177,49

Tabelle 9: Emissionsergebnisse für einzelne Fahrten, Cityring

Fahrstrecke	Höchstgeschw. km/h	Stopanteil %	Durchschnittsgeschw. km/h	NO ₂ g/km	NO _x g/km	CO ₂ g/km
				Fahrzeug 1		
2	30	1,9	25,1	0,682	1,136	222,15
	40	2,7	33,6	0,681	1,077	183,62
	50	1,9	40,4	0,665	1,170	180,39
				Fahrzeug 2		
2	30	9,4	24,3	0,673	1,535	278,82
	40	12,4	31,1	0,854	1,419	262,78
	50	9,8	32,7	0,743	1,311	285,88
				Fahrzeug 3		
2	30	9,0	25,1	0,072	0,540	174,96
	40	10,9	31,2	0,117	0,337	141,63
	50	9,0	34,6	0,097	0,566	182,88

Tabelle 10: Emissionsergebnisse für einzelne Fahrten, Neckartor

6.2 Lastabhängigkeit der Emissionen bei Bergfahrt

Im Vergleich zu den Strecken 1 und 2 weist die Hohenheimer Straße deutliche Steigungen auf, die durch den Leistungsmehrbedarf zu veränderten Emissionen führen. Die Abbildungen 46 bis 51 zeigen die CO₂-, NO_x- und NO₂-Emissionen in Abhängigkeit von unterschiedlichen Steigungen bei Konstantfahrt. Neben den erhöhten CO₂-Werten aufgrund des größeren Leistungsbedarfes sind auch die Emissionserhöhungen bei den Stickoxiden deutlich sichtbar. Sie steigen teilweise auf ein Vielfaches an. Die dargestellten Auswertungen zeigen Zustände bei Konstantfahrt, bei denen lediglich die Energie zur Überwindung der Steigung aufgebracht wird. Beschleunigungszustände sind hierbei nicht dargestellt.

Für die Fragestellung, ob Tempo 40 oder Tempo 30 an Bergstrecken eine Emissionsminderung im Vergleich zu Tempo 50 bewirken kann, lassen sich aus den Ergebnissen folgende Aussagen ableiten:

Für CO₂ zeigen alle drei Fahrzeuge einen einheitlichen Trend zu einer leichten Zunahme der Emissionen (ca. +5 - +20%) mit abnehmender Geschwindigkeit.

Bei NO_x und NO₂ weisen die Veränderungen bei den drei Fahrzeugen in gegenläufige Richtungen, so dass keine einheitliche Aussage möglich ist. Die gemessenen Zu- oder Abnahmen bewegen sich hier meistens im Bereich von etwa 10%.

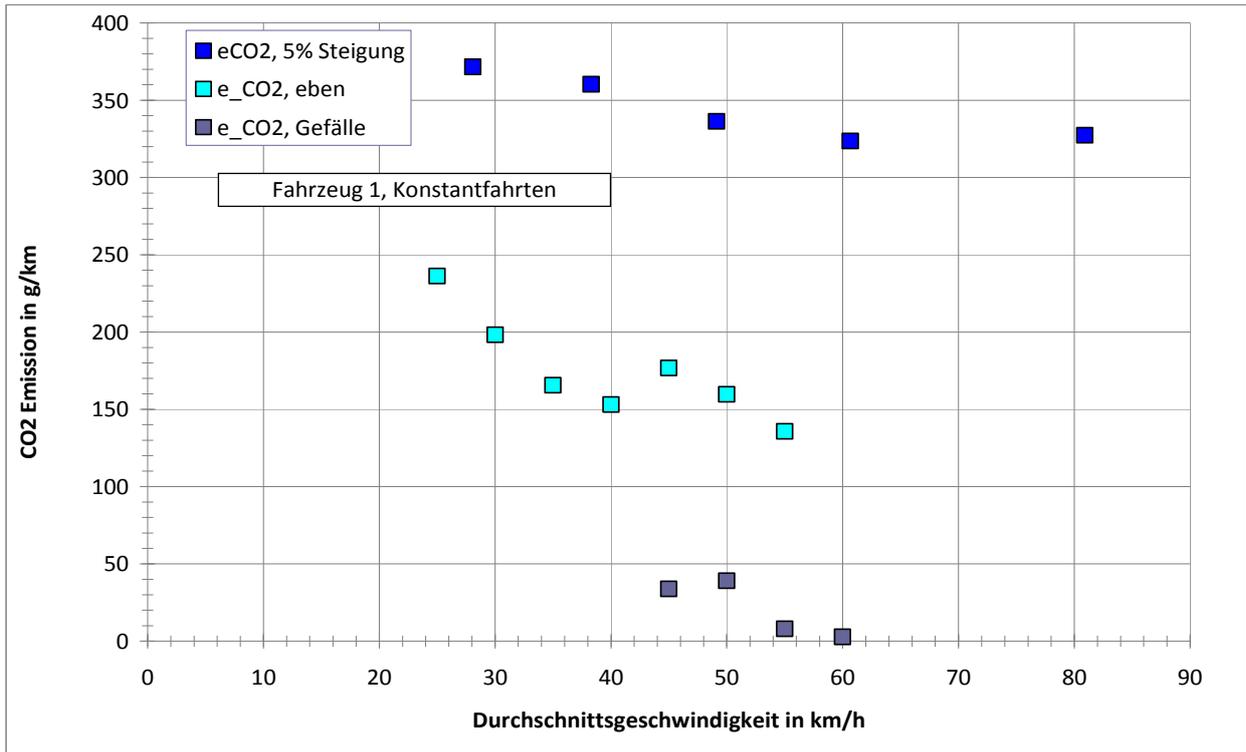


Abbildung 46: CO₂-Emissionen für unterschiedliche Steigungen, Fahrzeug 1

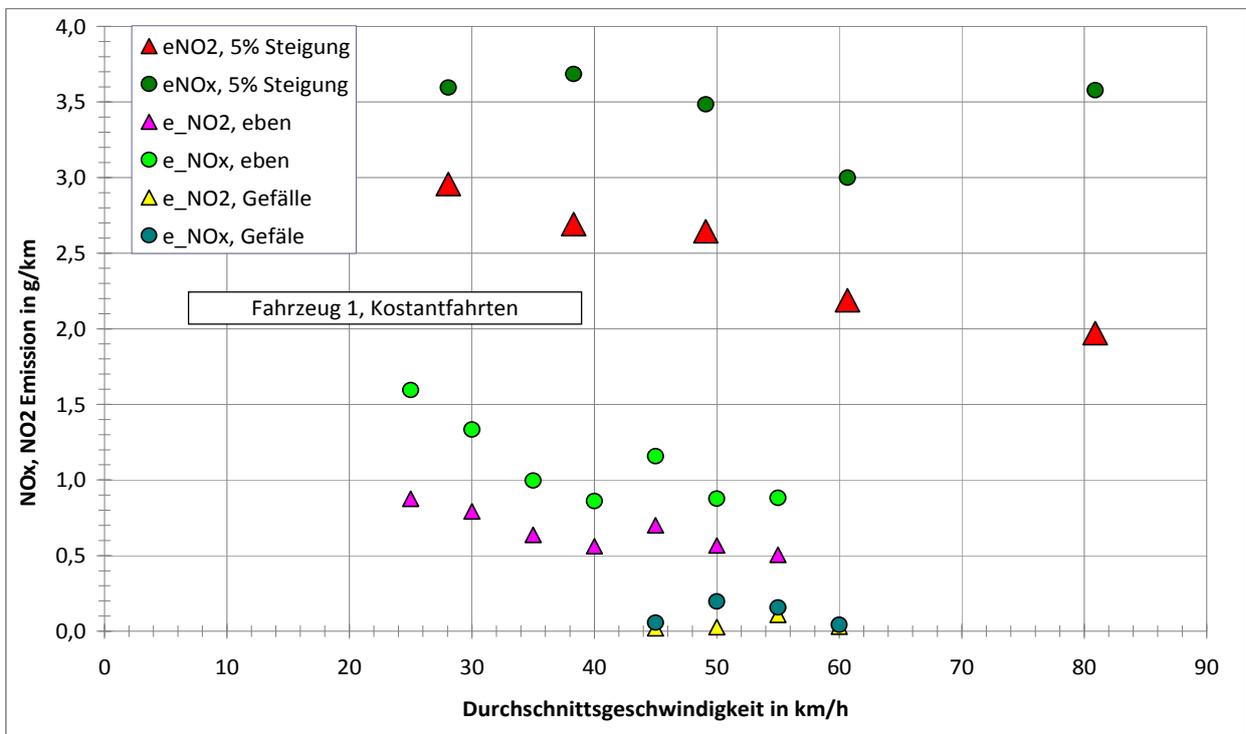


Abbildung 47: NO_x- und NO₂-Emissionen für unterschiedliche Steigungen, Fahrzeug 1

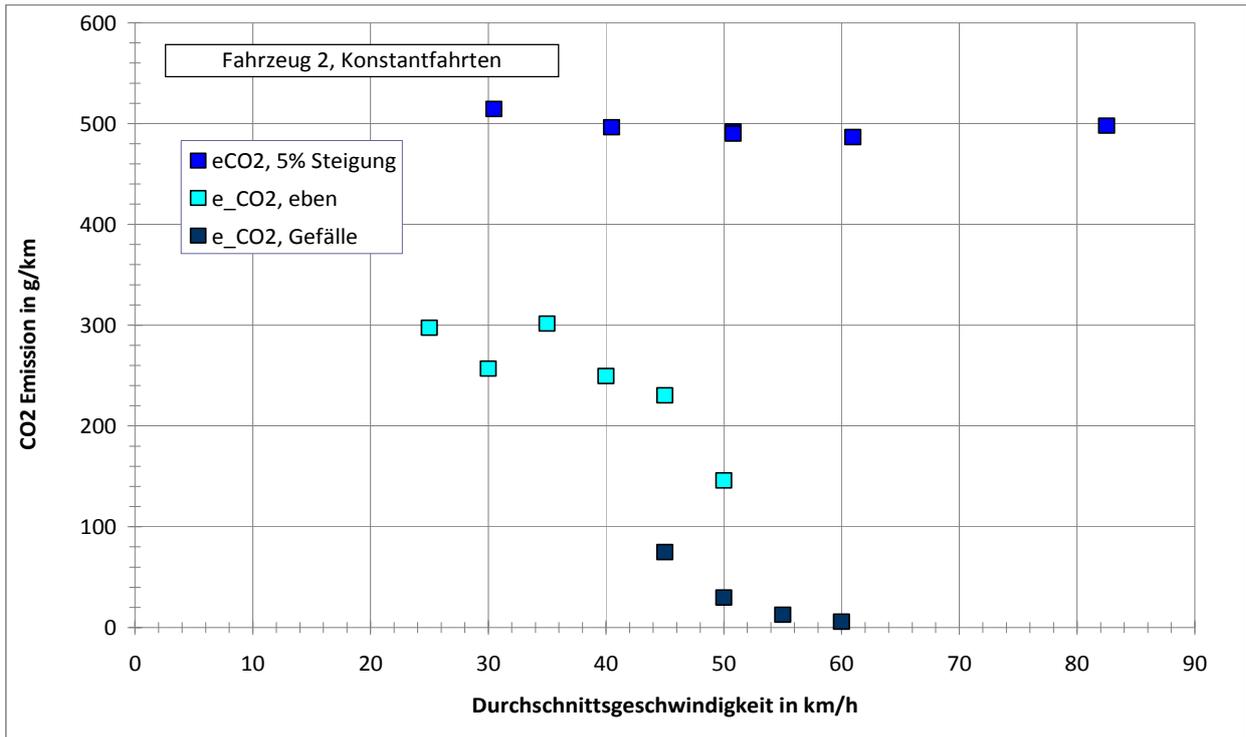


Abbildung 48: CO₂-Emissionen für unterschiedliche Steigungen, Fahrzeug 2

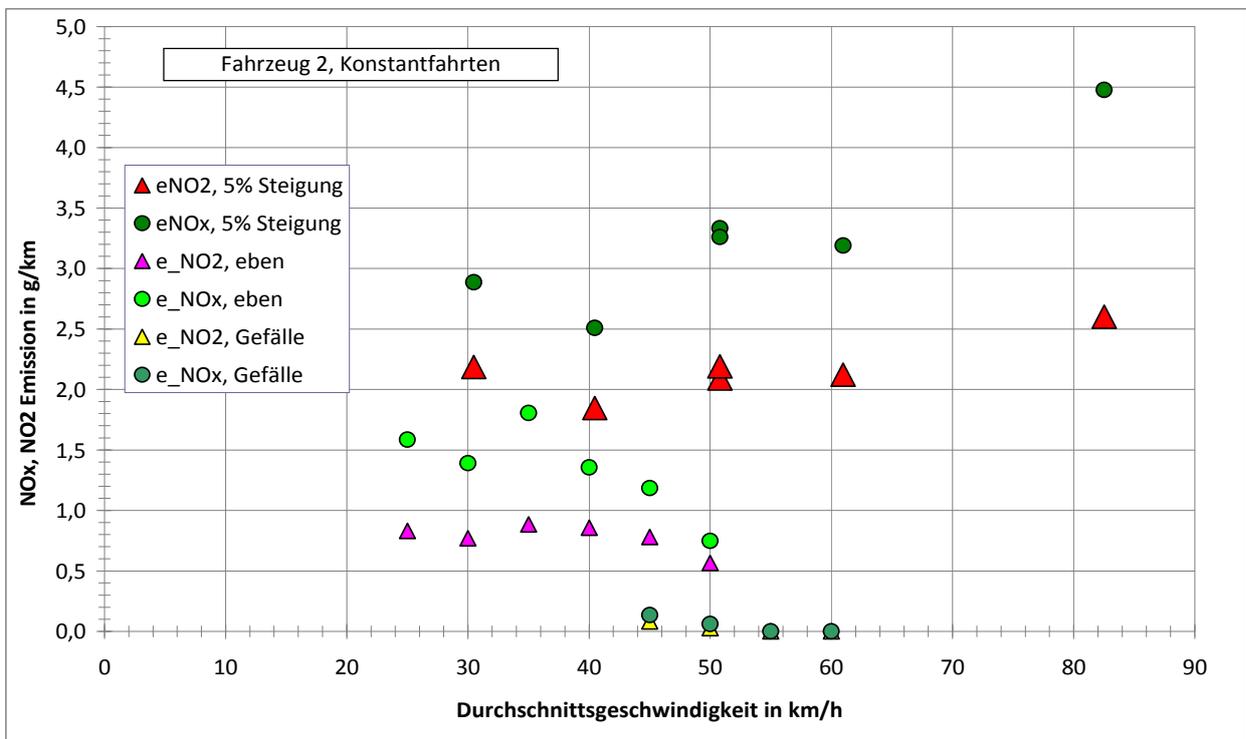


Abbildung 49: NO_x- und NO₂-Emissionen für unterschiedliche Steigungen, Fahrzeug 2

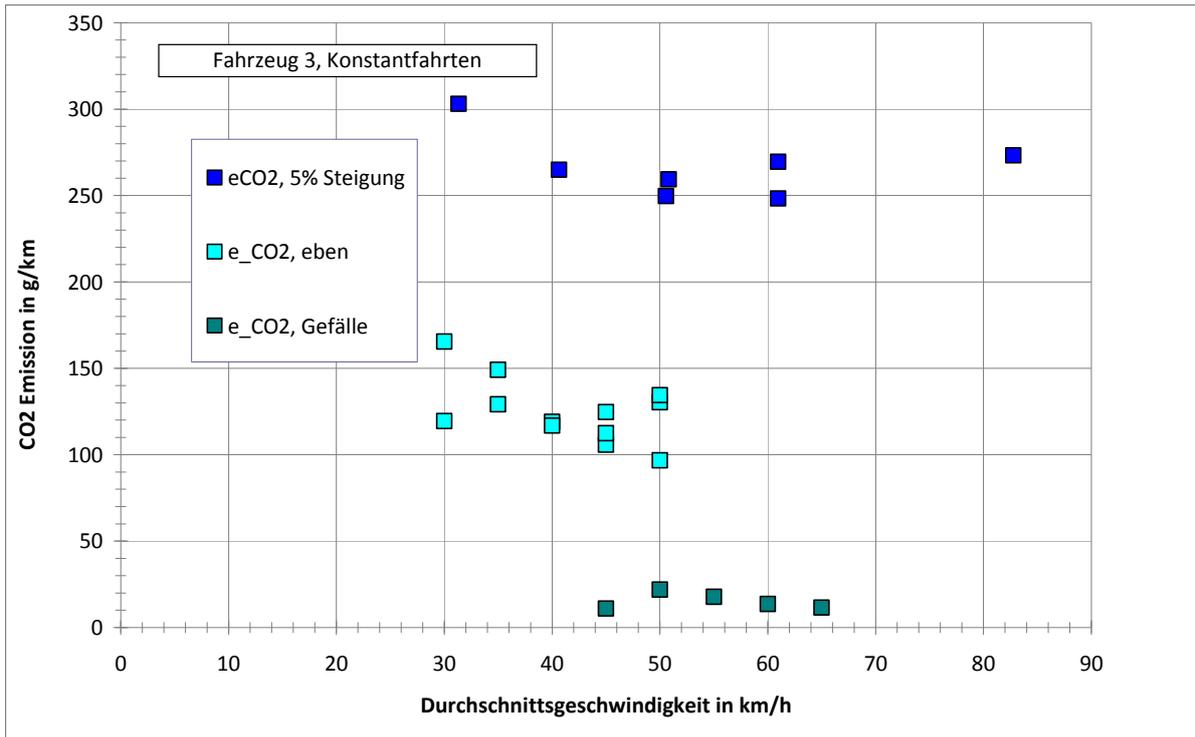


Abbildung 50: CO₂-Emissionen für unterschiedliche Steigungen, Fahrzeug 3

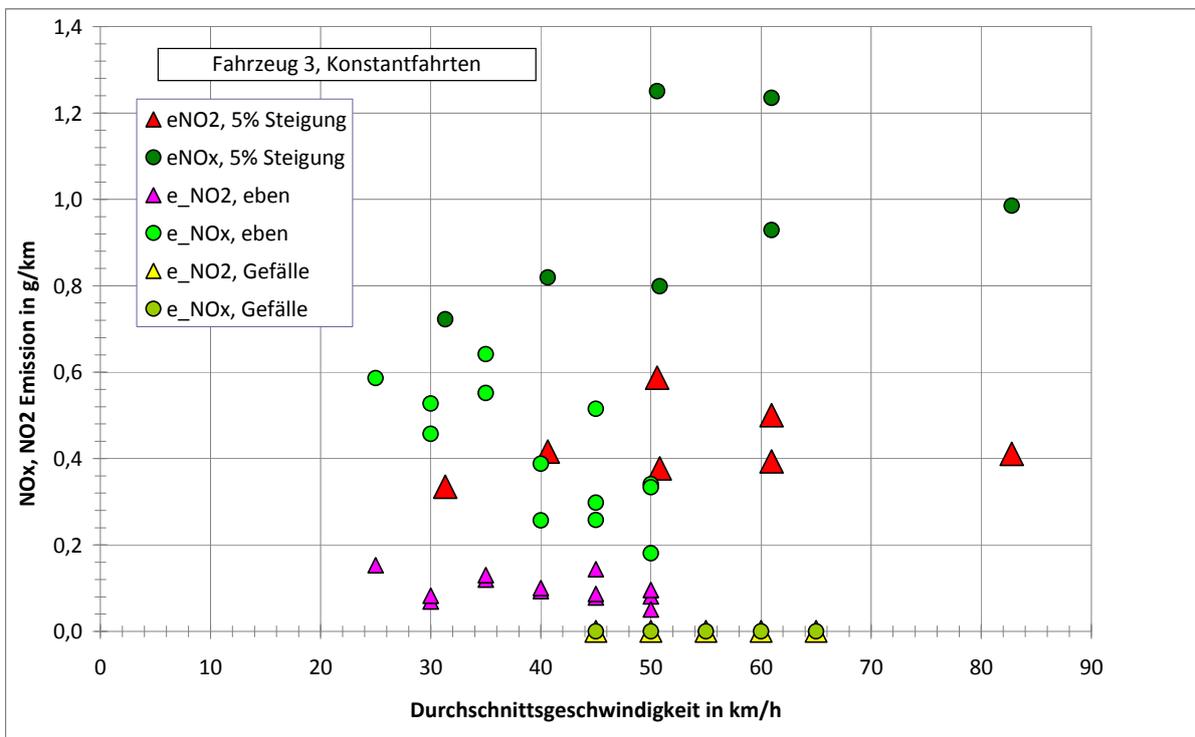


Abbildung 51: NO_x- und NO₂-Emissionen für unterschiedliche Steigungen, Fahrzeug 3

Die höheren Motorlasten führen naturgemäß zu höheren Stickoxidrohmissionen. Die mit den höheren Lastpunkten verbundenen höheren Abgastemperaturen sowie der größere Abgasmassendurchsatz führen auch zu veränderten Zuständen der Abgasnachbehandlung. Die höheren Abgastemperaturen haben eine Verschiebung des $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ -Verhältnisses durch die höhere Reaktivität des Katalysators zur Folge. Die Darstellungen der Abbildungen 52 bis 60 zeigen die zeitbezogenen Massenemissionen von NO_2 und NO_x für die unterschiedlichen Befahrungsstrecken 1, 2, 3 und 6 in sekundlicher Auflösung. Deutlich zu erkennen ist hier der Einfluss der Steigung. Der Vergleich zwischen den Routen 1 und 2 einerseits und Route 3 andererseits zeigt eine Verschiebung zu höheren $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ -Verhältnissen aufgrund der Bergfahrt. Die Darstellung für die Route 6 verdeutlicht diesen Zusammenhang noch einmal (Abbildung 54). Die Abbildung beinhaltet Bergfahrten mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten bis zu 80 km/h sowie Messwerte aus einer einzigen Talfahrt. Die Abbildungen 61 bis 63 zeigen Darstellungen für die beiden befahrenen Wohngebiete. Deutlich zu erkennen sind die Steigungs- und Gefällestreckenanteile im Wohngebiet an der Hohenheimer Straße (Route 4). Die Gesetzmäßigkeiten der Verschiebung zu höheren $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ -Verhältnissen sind für alle drei Versuchsfahrzeuge gleich, treten aber stark unterschiedlich ausgeprägt auf.

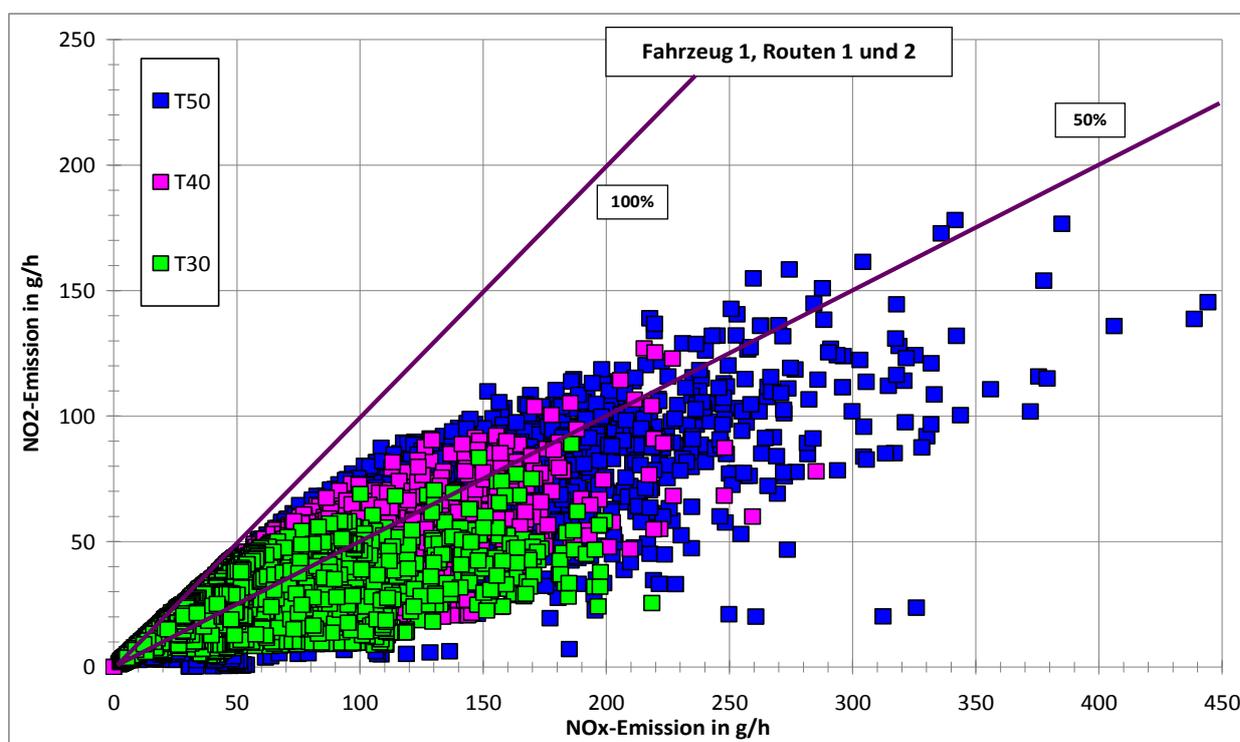


Abbildung 52: $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ -Verhältnis für die Routen 1 und 2, Fahrzeug 1
Messpunkte: Emissionen in sekundlicher Auflösung

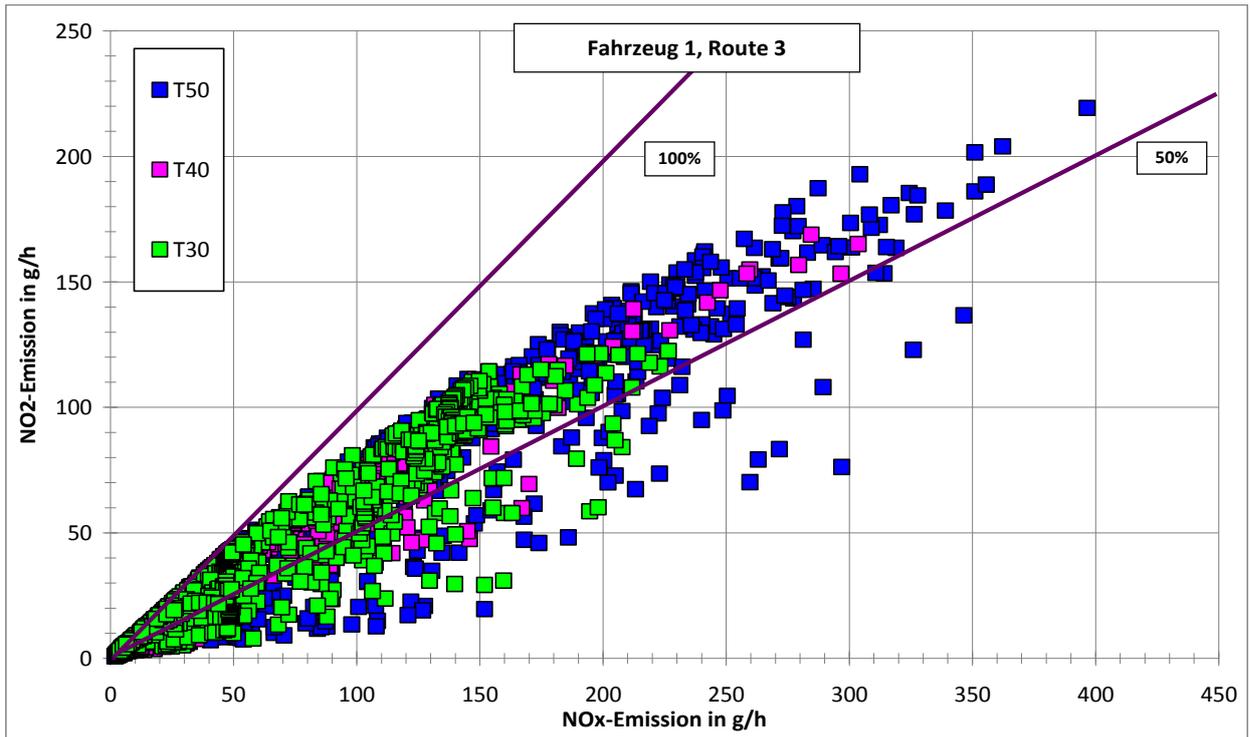


Abbildung 53: NO₂ / NO_x Verhältnis für die Route 3, Fahrzeug 1

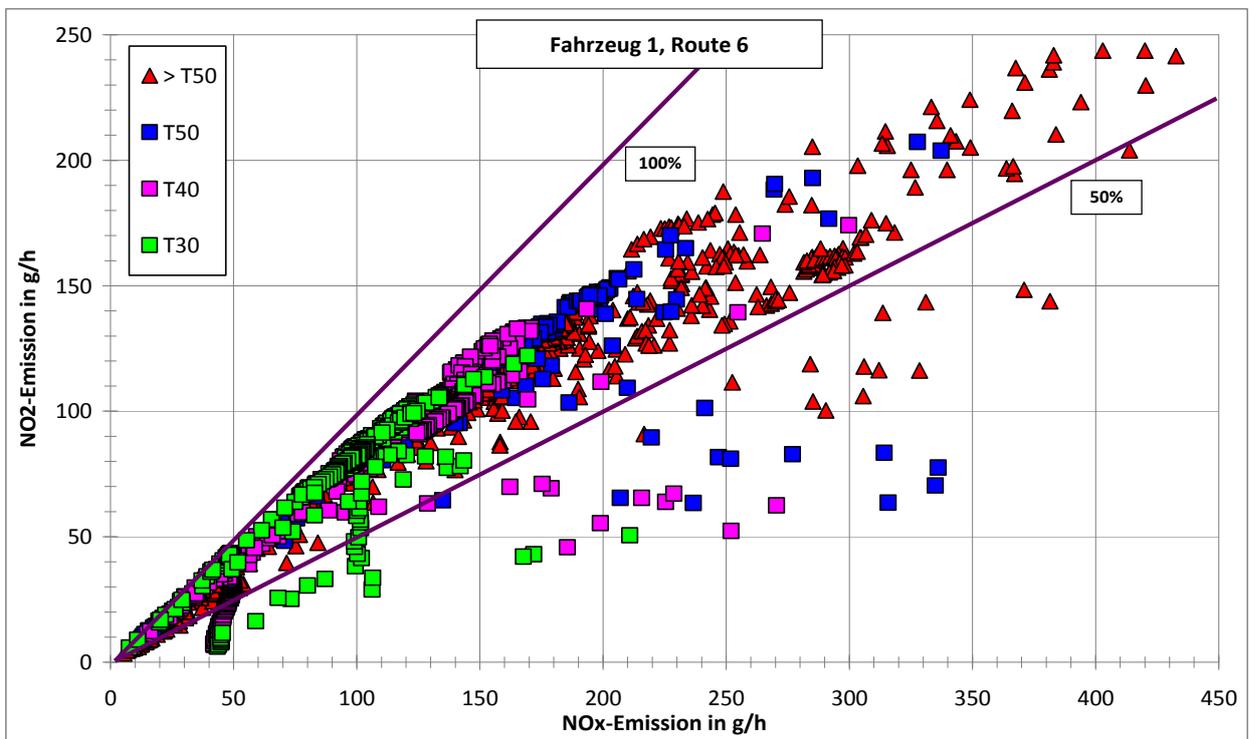


Abbildung 54: NO₂ / NO_x Verhältnis für die Route 6, Fahrzeug 1

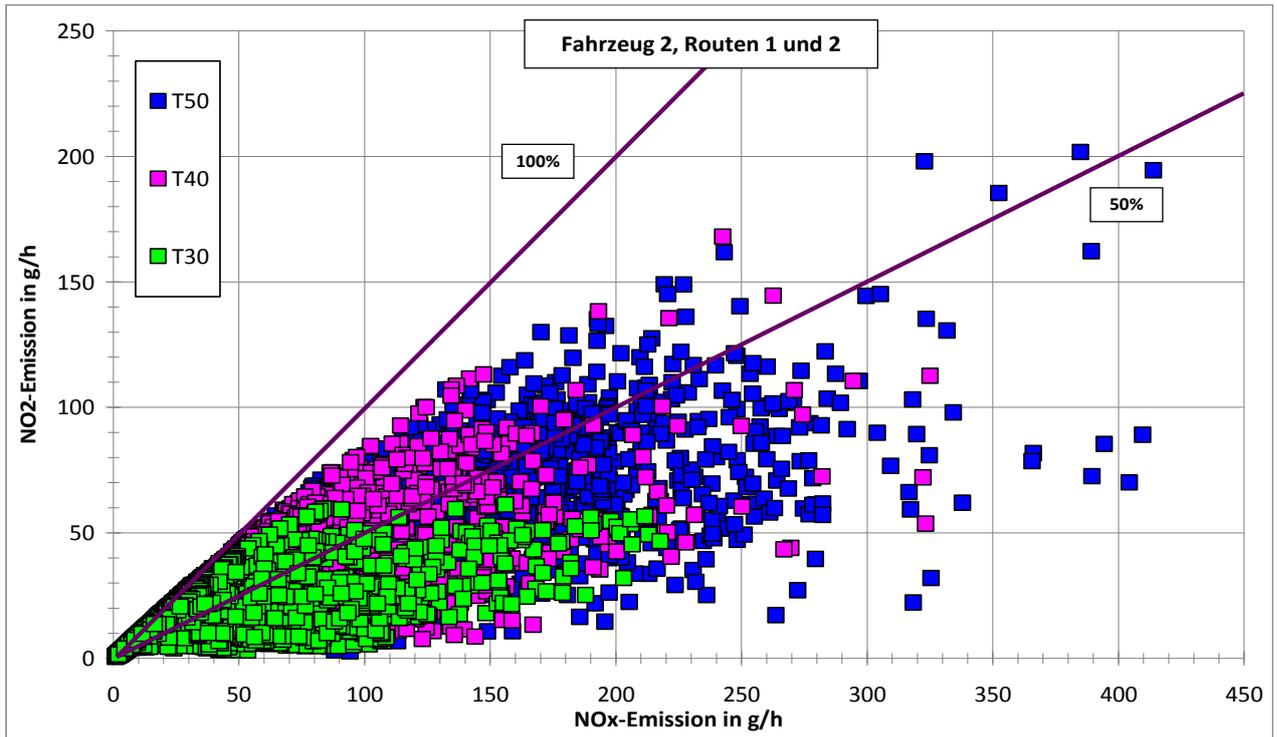


Abbildung 55: NO₂ / NO_x Verhältnis für die Routen 1 und 2, Fahrzeug 2

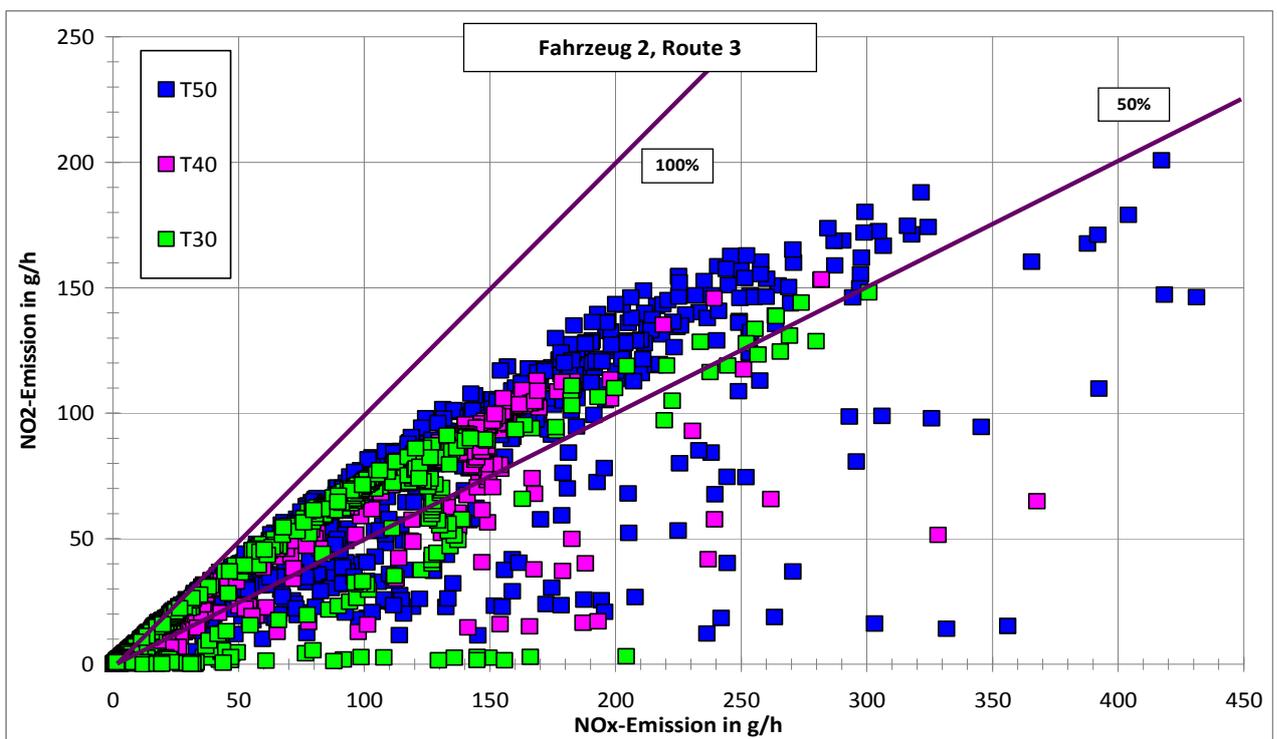


Abbildung 56: NO₂ / NO_x Verhältnis für die Route 3, Fahrzeug 2

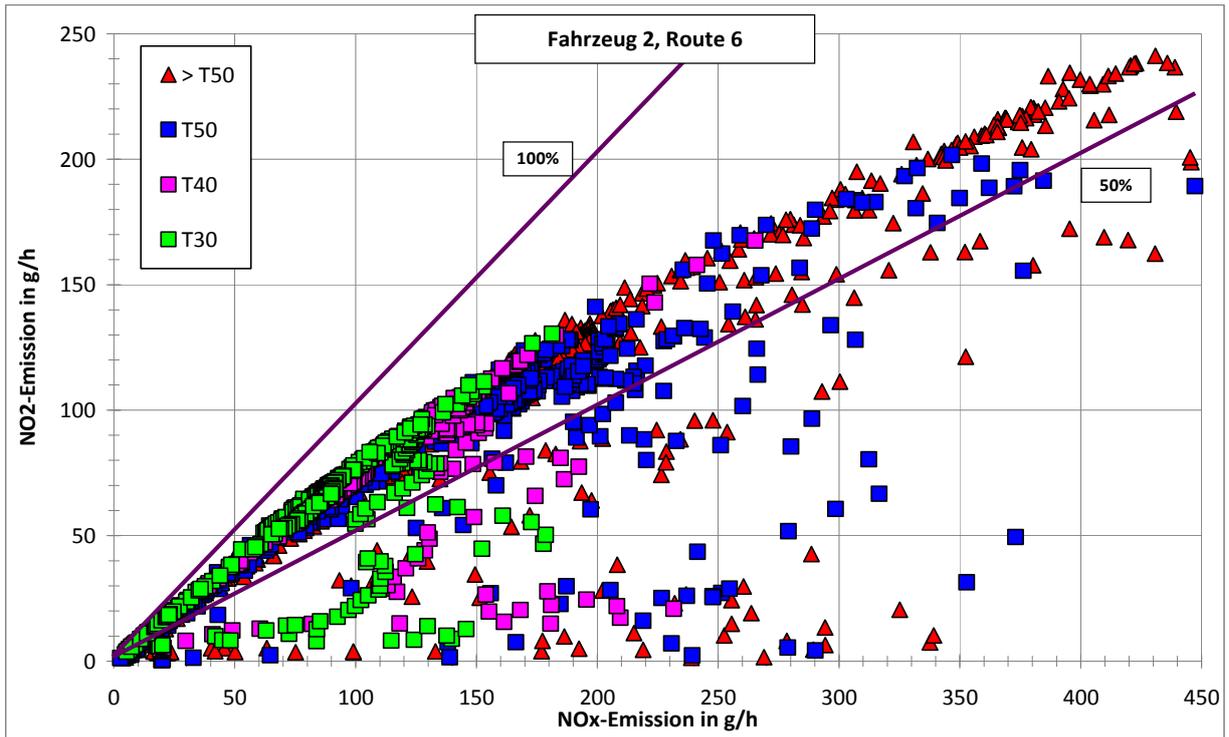


Abbildung 57: $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ Verhältnis für die Route 6, Fahrzeug 2

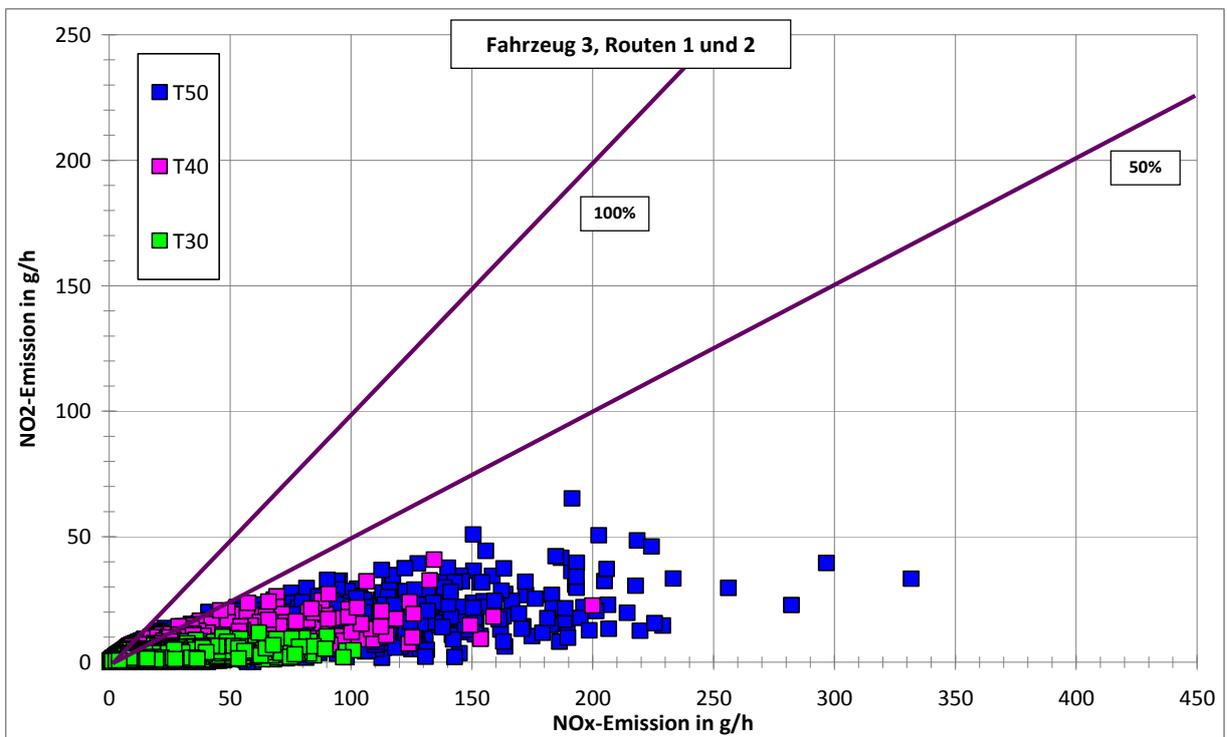


Abbildung 58: $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ Verhältnis für die Routen 1 und 2, Fahrzeug 3

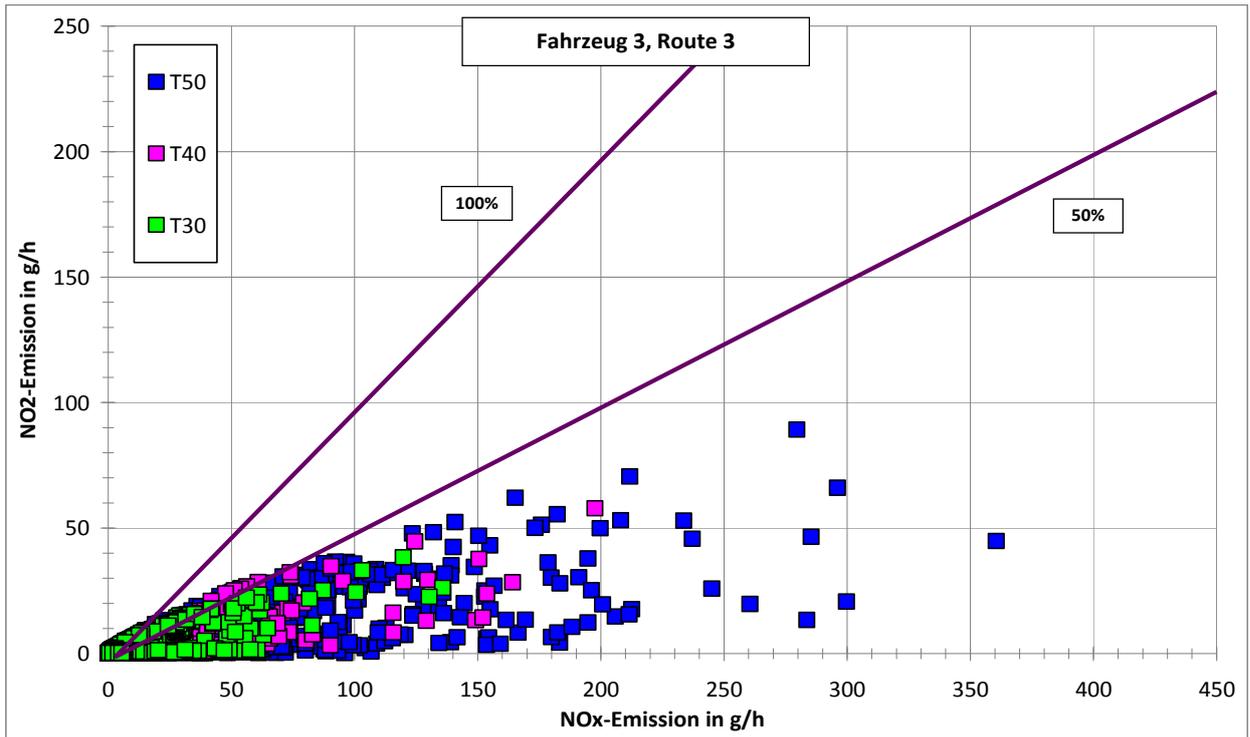


Abbildung 59: NO₂ / NO_x Verhältnis für die Route 3, Fahrzeug 3

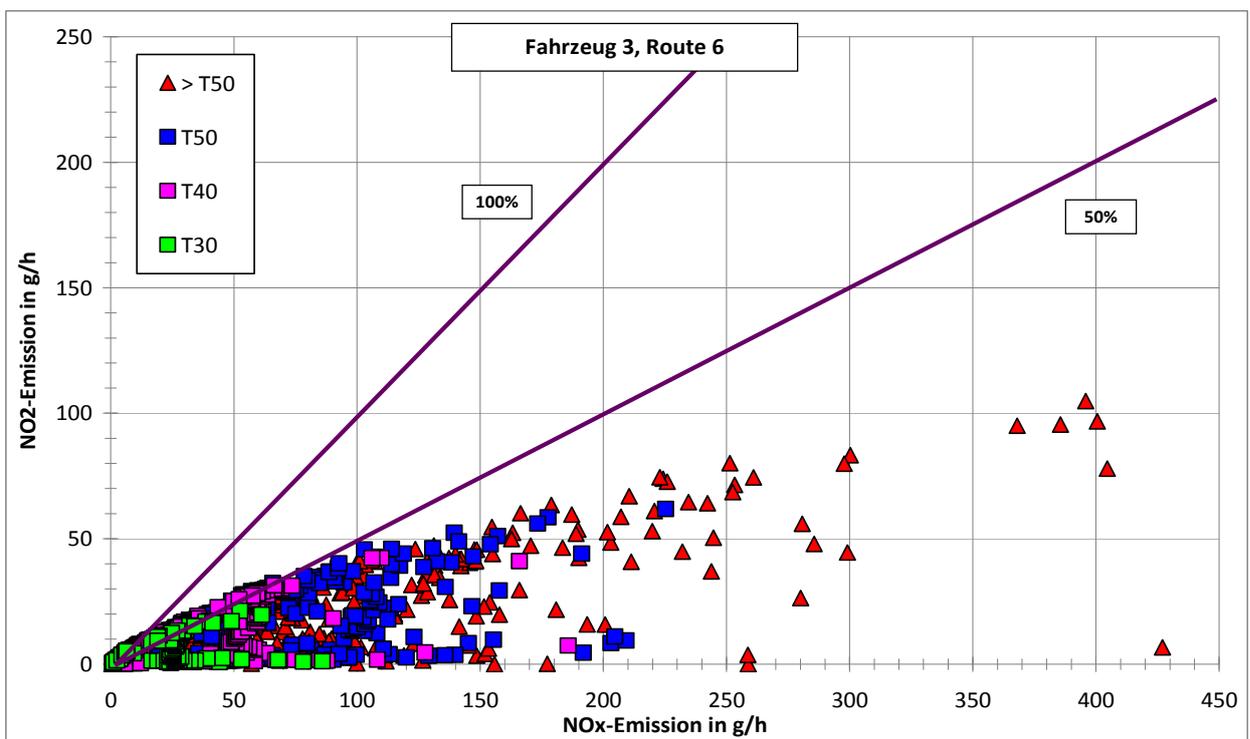


Abbildung 60: NO₂ / NO_x Verhältnis für die Route 6, Fahrzeug 3

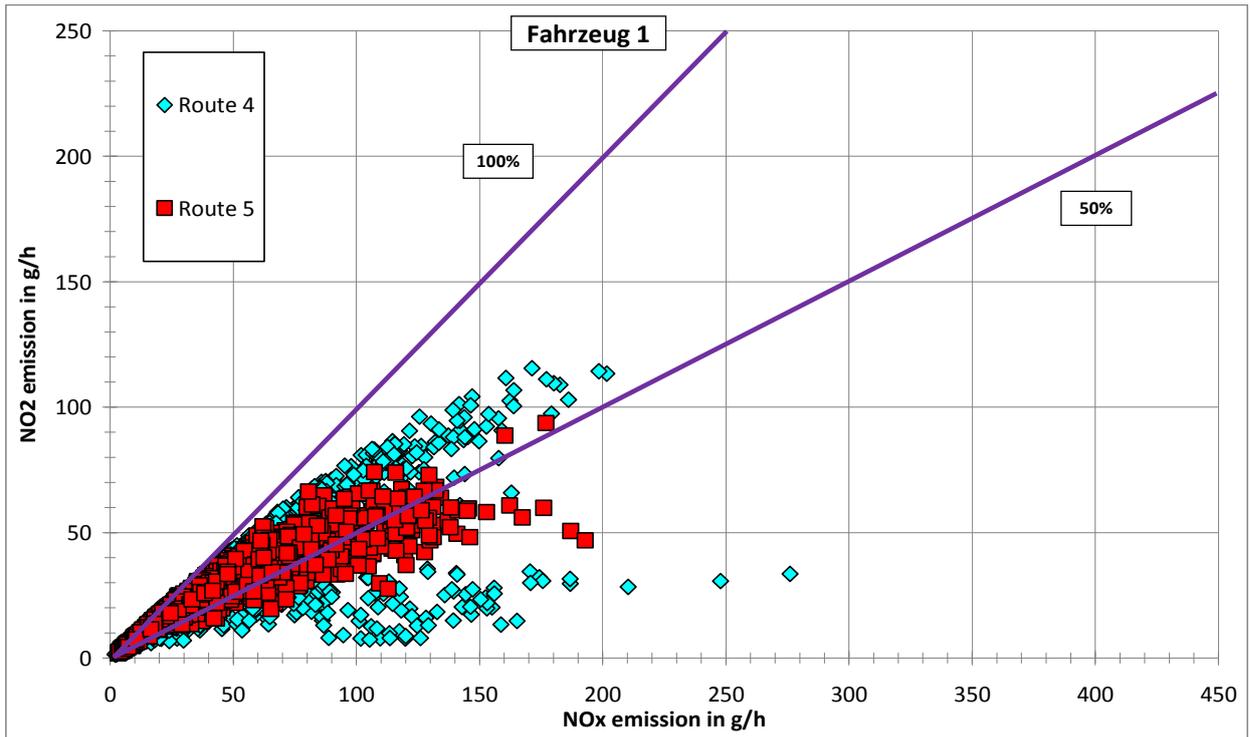


Abbildung 61: $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ Verhältnis für die Wohngebiete Routen 4 und 5, Fahrzeug 1

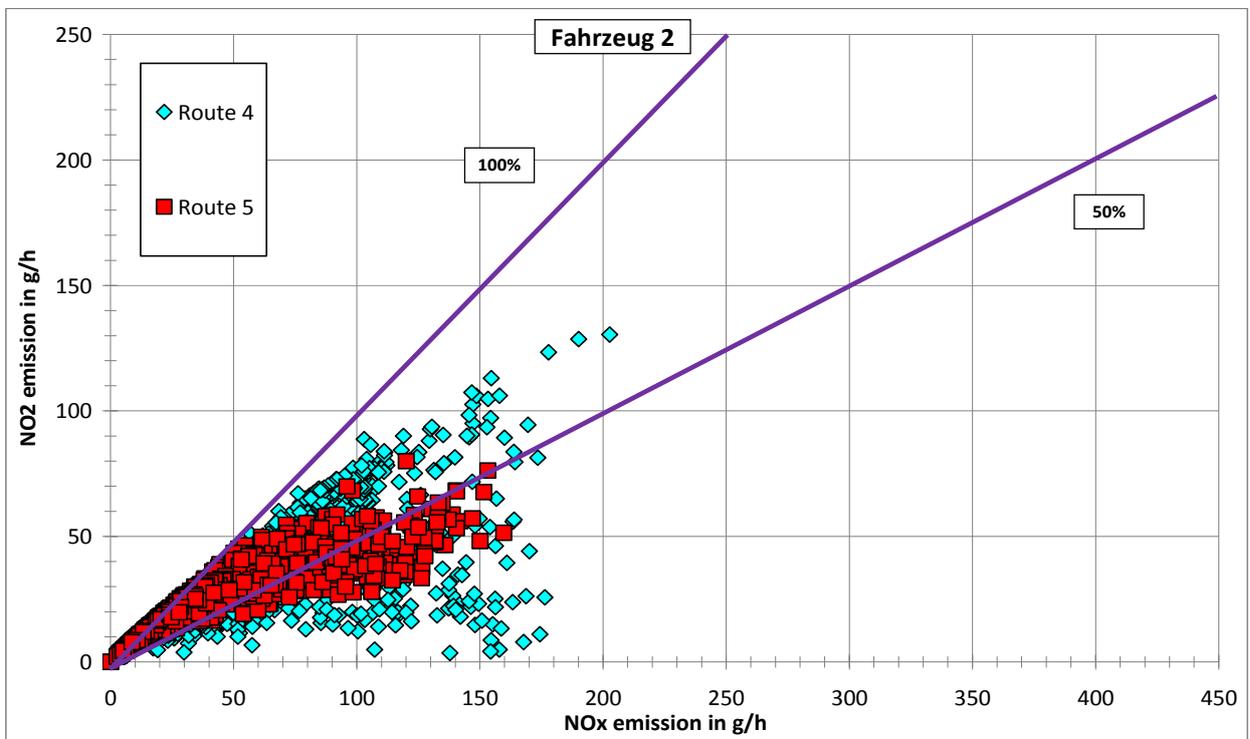


Abbildung 62: $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ Verhältnis für die Wohngebiete Routen 4 und 5, Fahrzeug 2

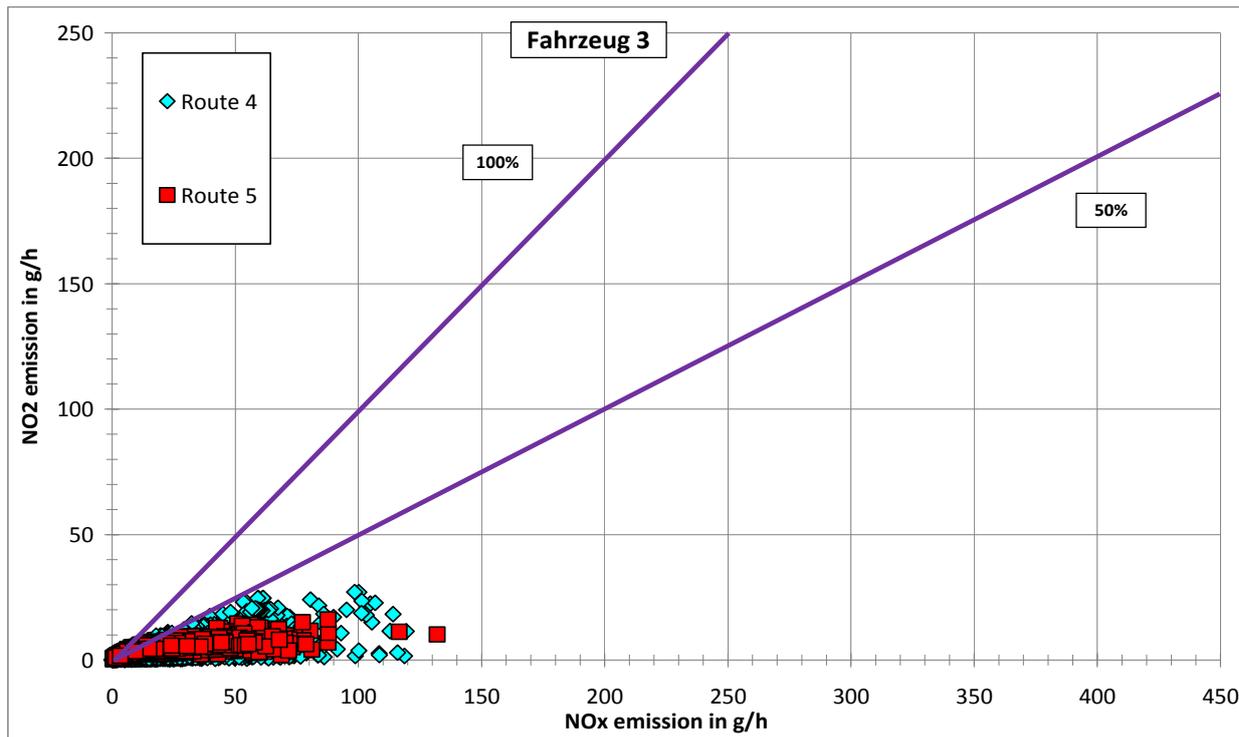


Abbildung 63: $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ Verhältnis für die Wohngebiete Routen 4 und 5, Fahrzeug 3

In Tabelle 11 sind die arithmetischen Mittelwerte der $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ -Verhältnisse der obigen Abbildungen dargestellt.

Tabelle 11: Mittelwerte der $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ -Verhältnisse in %

		Route 1 und 2	Route 3	Route 6	Route 4	Route 5
Fahrzeug 1	T30	61,5	70,04	79,81	71,2	69,81
	T40	73,28	68,83	72,32		
	T50	71,73	63,7	74,91		
Fahrzeug 2	T30	61,81	57,25	72,05	72,8	71,34
	T40	73,49	57,38	69,16		
	T50	77,26	72,28	63,97		
Fahrzeug 3	T30	19,98	42,91	42,72	33,74	37,43
	T40	57,02	53,97	44,74		
	T50	39,75	36,76	39,88		

6.3 Einflüsse von Verkehrsverstetigung auf die Emissionen

In den bisherigen Ergebnissen ist der starke Einfluss des Lastzustandes auf die Emissionen deutlich geworden. Neben Bergfahrten treten höhere Lastzustände im Stadtverkehr im Wesentlichen bei Beschleunigungsmanövern auf, die u.a. bei jedem Anfahrvorgang nach einem Halt erforderlich werden. Es ist also zu erwarten, dass eine Verstetigung des Verkehrsflusses zu einer Absenkung der Emissionen führt. Die Abbildungen 64 bis 67 zeigen exemplarisch für Fahrzeug 1 die Veränderungen von Durchschnittsgeschwindigkeit, der CO₂-, NO_x- und NO₂-Emissionen für die Strecken 1, 2 und 3. Die Datenpunkte stellen Emissionsmittelwerte aus mehreren Fahrten dar, wobei unterschiedliche Stopanteile rechnerisch ermittelt wurden. Eine Reduzierung des Stop-Anteils führt auf allen Strecken zur Reduzierung der Emissionen. Strecke 2 weist hier den größten Gradienten auf. Die Lage der Datenpunkte zeigt aber auch, dass der Stopanteil auf Strecke 2 bereits relativ gering ist und somit das Minderungspotential nur klein erscheint. In Verbindung mit den Ergebnissen des vorherigen Kapitels und hier insbesondere mit den Informationen aus den Abbildungen 46 bis 51 kann für die Strecke 3 (Hohenheimer Straße) abgeleitet werden, dass eine Verstetigung hier durchaus ein Verbesserungspotential für die Emissionssituation bedeuten kann. Zum einen gibt es auf der Hohenheimer Straße Verkehrssituationen, die z.B. durch Linksabbiegemöglichkeit bzw. durch Einfahren der Straßenbahn in die linke Fahrspur zu Stockungen führen mit den damit verbundenen Anfahrvorgängen, zum anderen gibt es aber auch Situationen mit frei fließendem Verkehr. Erkennbar wird dies in den folgenden Abbildungen an der großen Bandbreite der Stopanteile auf der Hohenheimer Straße. Da die Emissionsmassen aufgrund der Steigung deutlich höher liegen als bei Fahrten in der Ebene, sollten hier zusätzliche emissionssteigernde Situationen wie Beschleunigungsvorgänge vermieden werden.

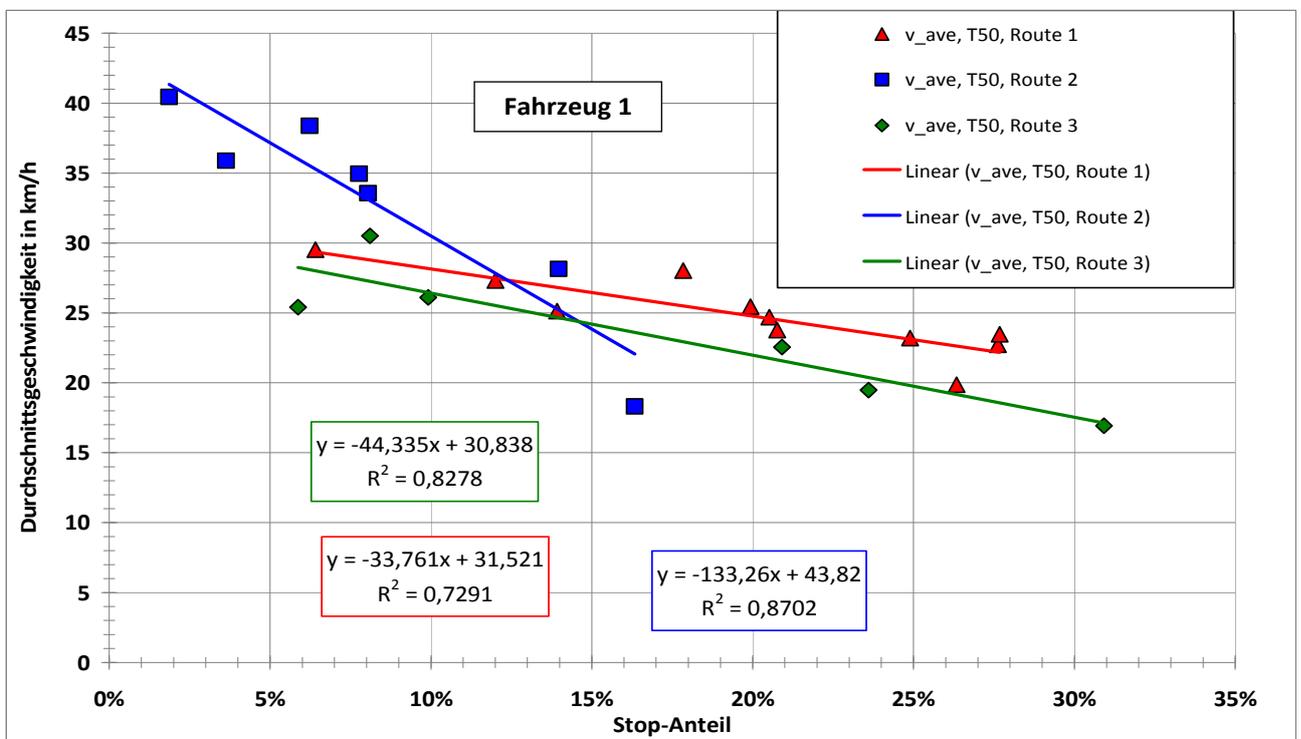


Abbildung 64: Veränderung der Durchschnittsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Stop-Anteil, Fahrzeug 1

Datenpunkte: Berechnete Emissionsmittelwerte aus short trips (stop to stop) und unterschiedlich gewichteten Emissionen aus Stillstandsereignissen über mehrere Befahrungen einer Streckenführung

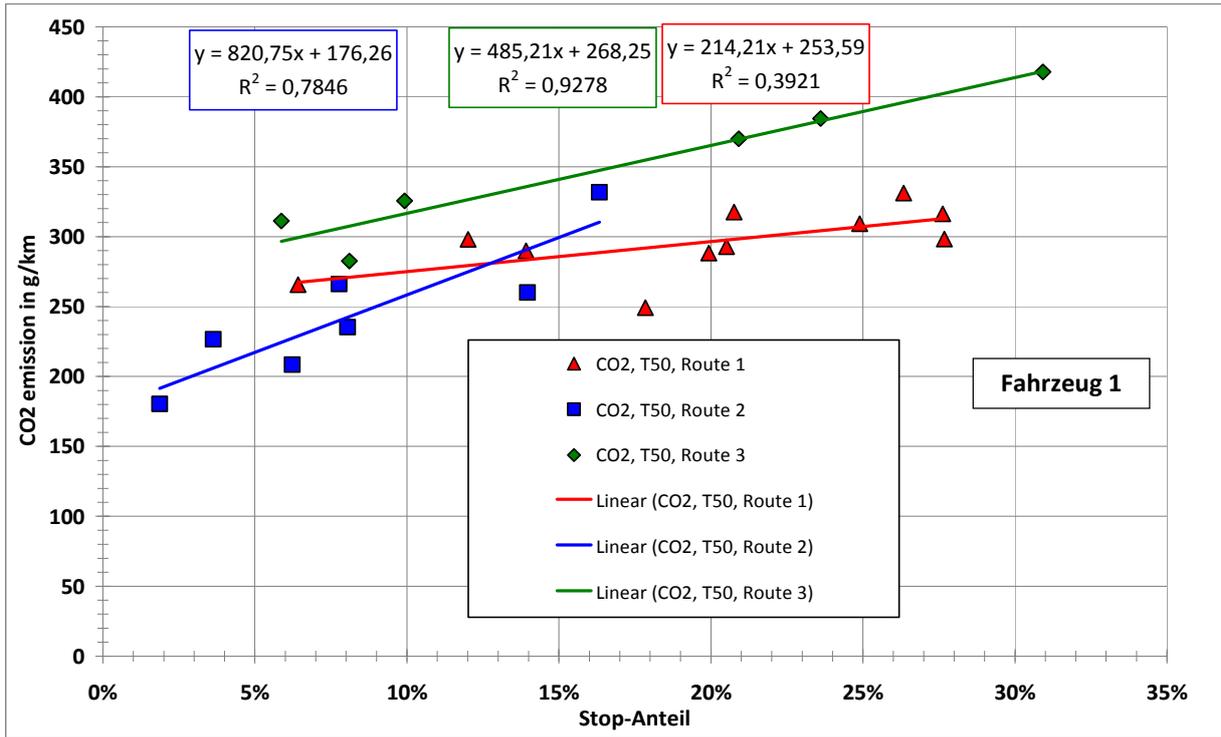


Abbildung 65: Veränderung der CO₂-Emissionen in Abhängigkeit vom Stop-Anteil, Fahrzeug 1

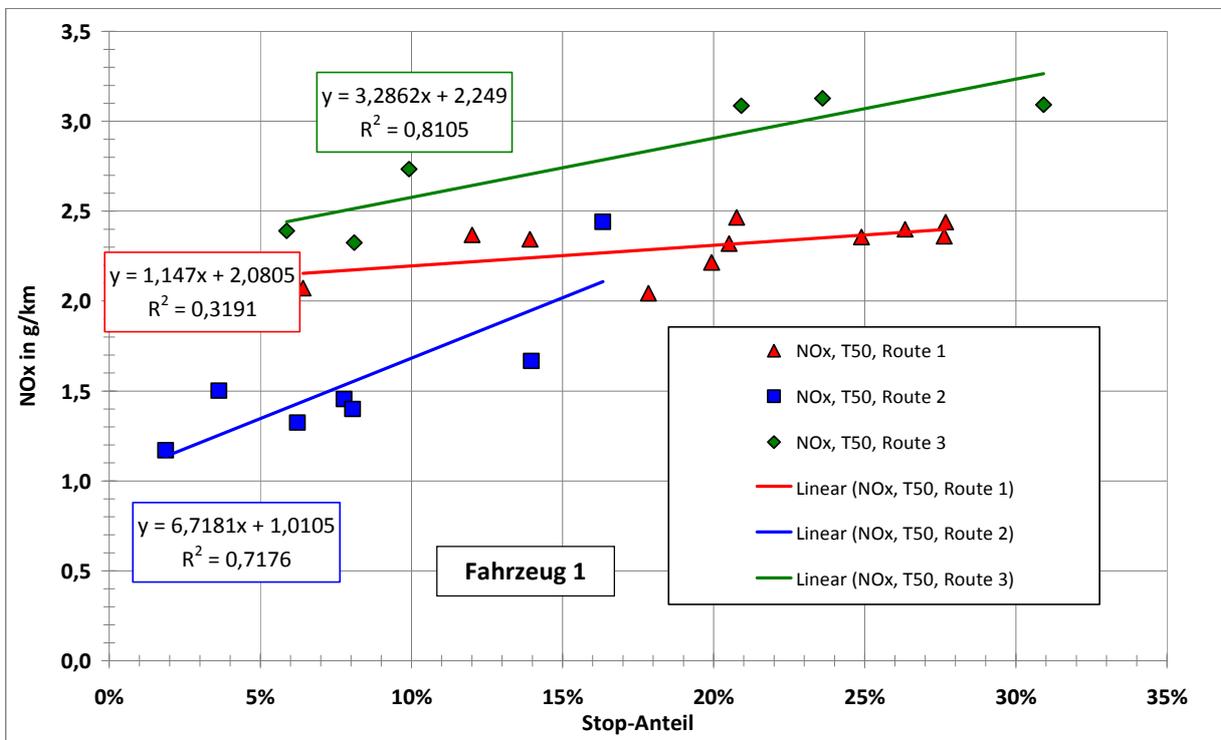


Abbildung 66: Veränderung der NO_x-Emissionen in Abhängigkeit vom Stop-Anteil, Fahrzeug 1

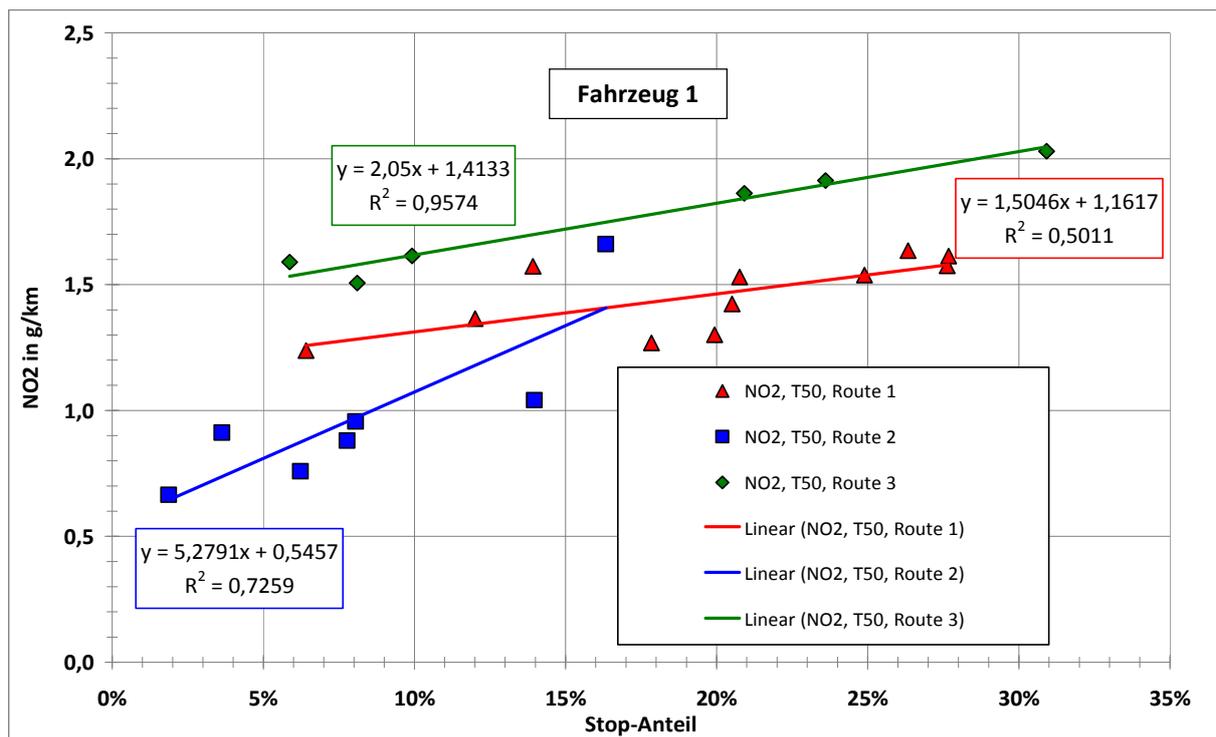


Abbildung 67: Veränderung der NO₂-Emissionen in Abhängigkeit vom Stop-Anteil, Fahrzeug 1

6.4 Betrachtung von Emissionsprofilen entlang ausgewählter Strecken

Die Betrachtung von Emissionsprofilen entlang der Aufstellungsorte der Luftmessstationen kann lediglich exemplarisch anhand ausgewählter Messfahrten erfolgen. Die dargestellte Situation ist somit allerdings einmalig und nicht zwingend repräsentativ. Große Einflussfaktoren für die jeweilige Emissionssituation sind z.B. der Signalzustand vorgeschalteter Ampelanlagen oder Geschwindigkeitsreduzierung mit anschließender Beschleunigung unmittelbar vor der Messstation. Neben den Darstellungen von Ergebnissen aus realen Messfahrten wurden für entsprechende Auswertungen noch PHEM Modellierungen von ausgewählten Fahrten mit ähnlichen Charakteristiken für die drei Höchstgeschwindigkeiten 30, 40 und 50 km/h durchgeführt.

Die Abbildungen 68 und 69 zeigen eine Vorbeifahrtsituation auf der Strecke 1, Fahrtrichtung links (1) von Fahrzeug 1 für NO_x und NO₂. Ausgehend von der Startstelle (Haltestelle „Staatsgalerie“) ergibt sich eine Fahrsituation wie folgt: Anfahren und kurzes Vorrollen zur Ampelanlage vor dem Hauptbahnhof; Ampelstop bis ca. Sekunde 40; Beschleunigung zur Vorfahrt vor den Hauptbahnhof mit anschließender kleiner Verzögerungsphase aufgrund der Verkehrssituation (Sekunde 80); erneute Beschleunigung bis zur Ampelanlage Arnulf-Klett-Platz / Friedrichstraße; Ampelstop (Sekunde 120 bis 160).

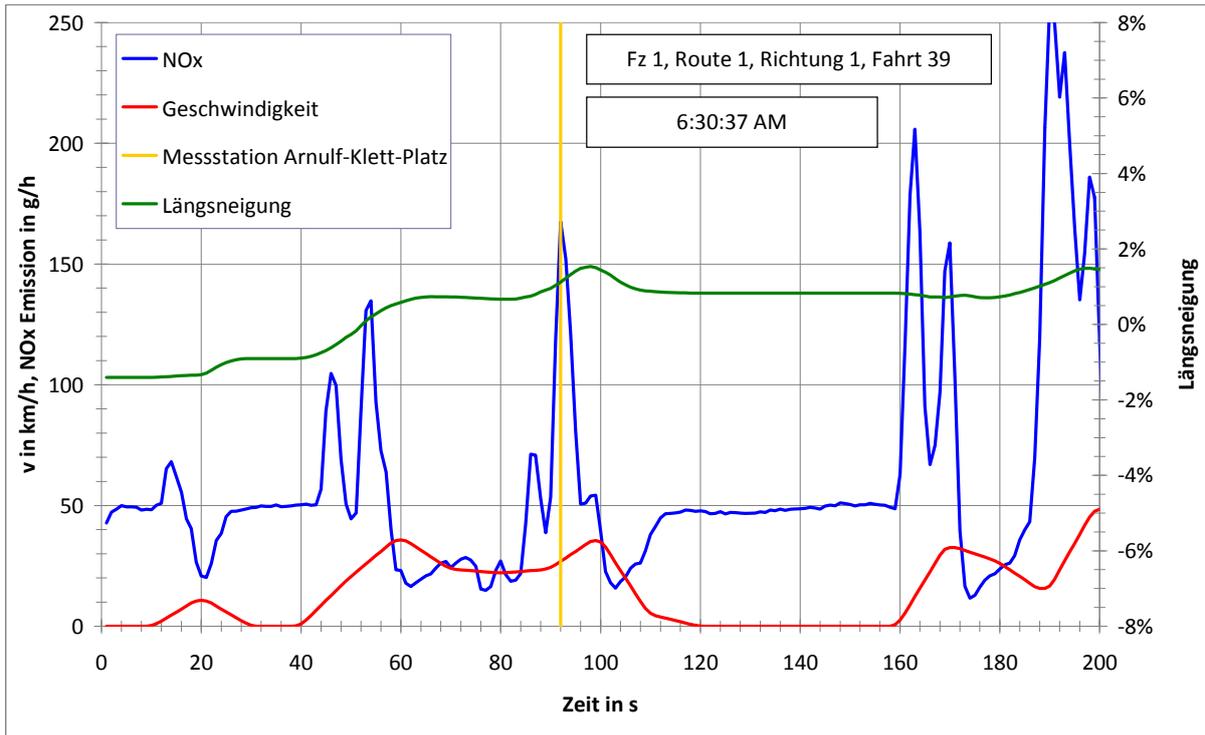


Abbildung 68: Vorbeifahrtsituation Messstation Arnulf-Klett-Platz (NO_x)

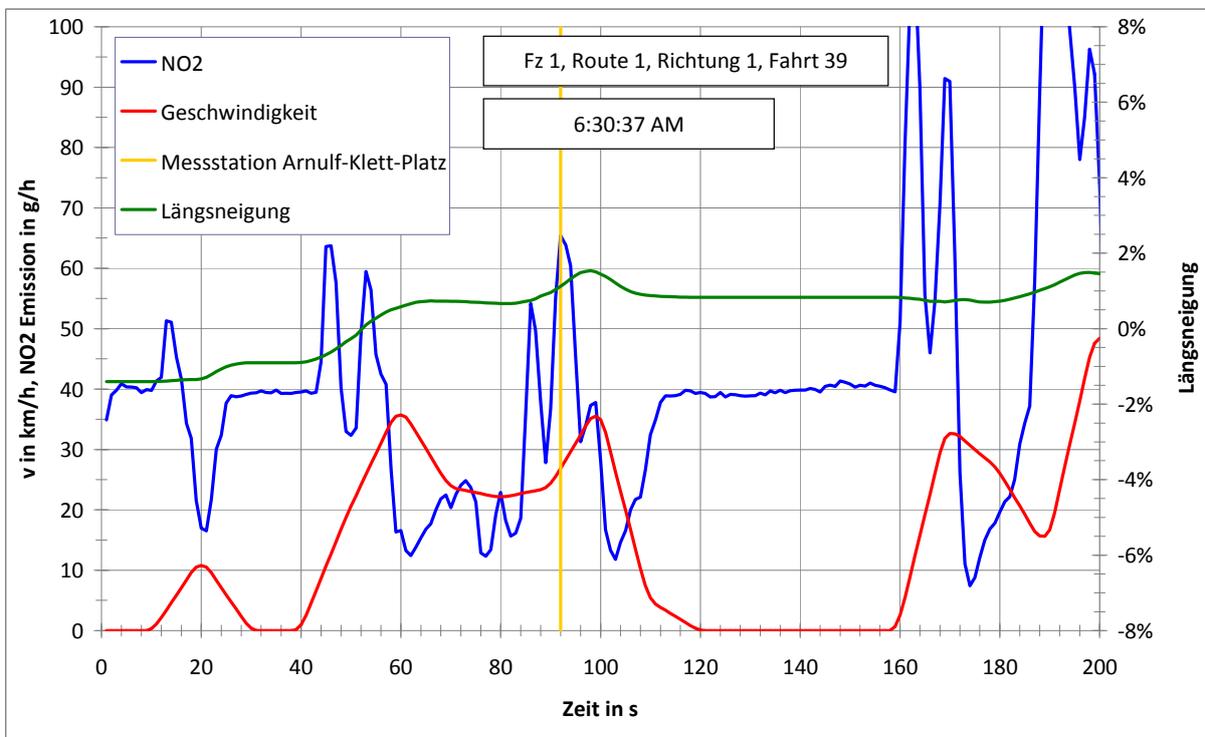


Abbildung 69: Vorbeifahrtsituation Messstation Arnulf-Klett-Platz (NO₂)

Diese spezielle Situation führt zu einem NO_x-Peak genau auf Höhe der Luftmessstation, was aber eindeutig der Verkehrssituation auf Höhe der Bushaltestelle am Hauptbahnhof geschuldet ist. Wäre eine freie Durchfahrt bis zur Ampelanlage Arnulf-Klett-Platz / Friedrichstraße möglich gewesen, wäre dieser NO_x-Peak nicht zustande gekommen.

Die Abbildungen 70 und 71 zeigen die gleiche Vorbeifahrtsituation für Fahrzeug 2. Zum Zeitpunkt der Vorbeifahrt an der Messstation befindet sich das Fahrzeug hier in einer Verzögerungsphase und hat somit nur geringe NO_x- und NO₂-Emissionen.

Die Abbildungen 72 und 73 zeigen eine Vorbeifahrtsituation auf der Hohenheimer Straße mit Fahrzeug 1. Gut zu erkennen ist, dass auch bei relativ konstanten Geschwindigkeiten durch mikrodynamische Vorgänge (z.B. Betätigung des Fahrpedals zur Anpassung an den momentanen Verkehrsfluss und zur Geschwindigkeitserhaltung an der Steigung) deutliche Emissionspeaks erzeugt werden. Die Darstellung dieser Realsituation zeigt, dass eine Verstetigung des Verkehrsflusses insbesondere auf der Hohenheimer Straße ein Potenzial zur Verringerung der Emissionsbelastung darstellen kann.

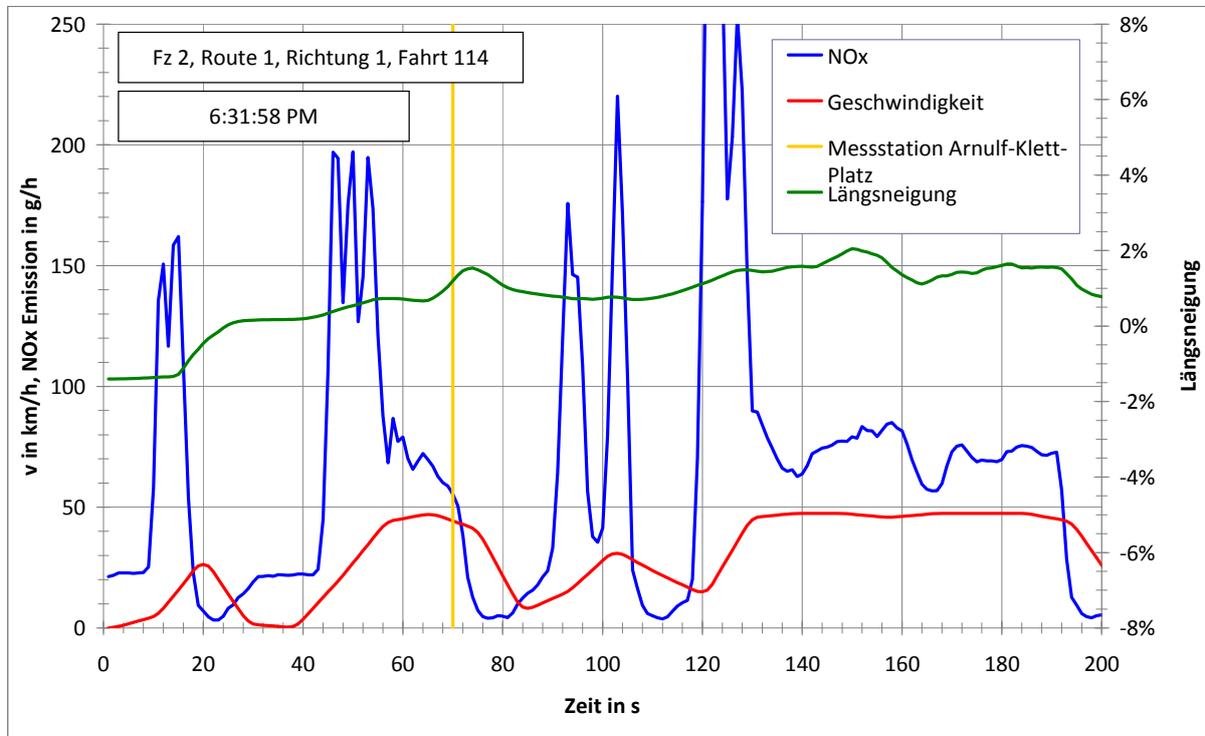


Abbildung 70: Vorbeifahrtsituation Messstation Arnulf-Klett-Platz (NO_x)

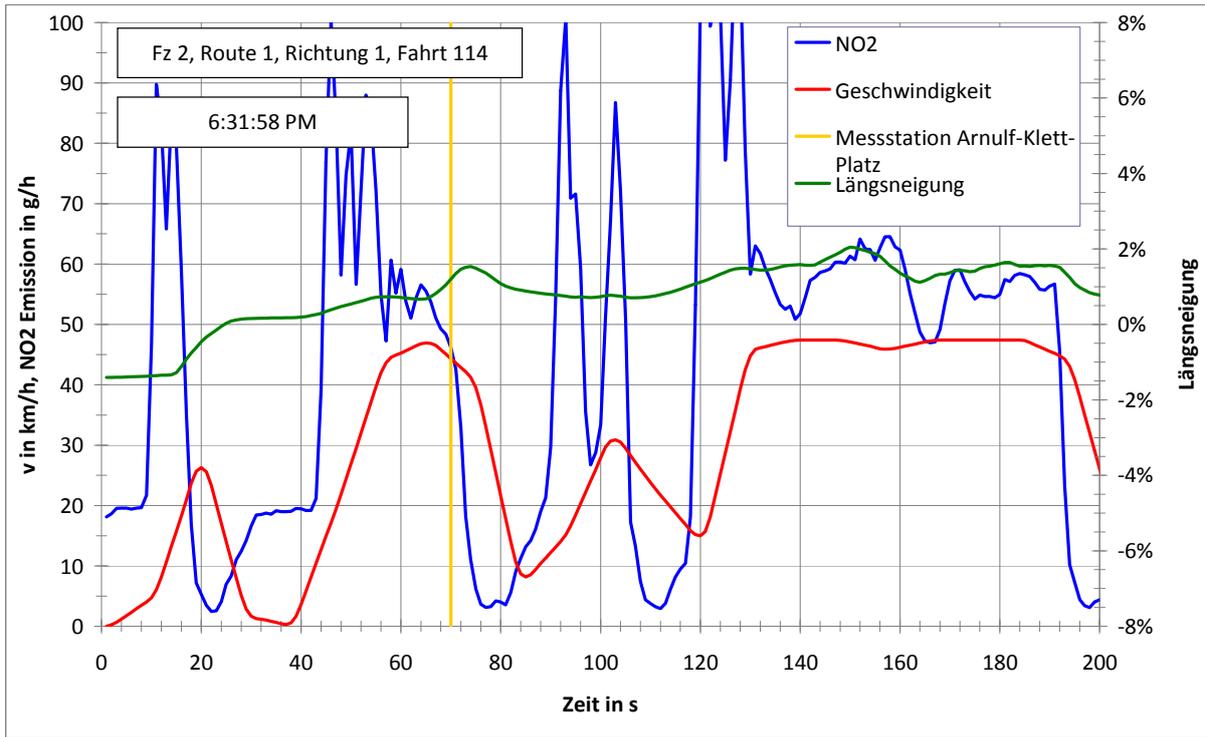


Abbildung 71: Vorbeifahrtsituation Messstation Arnulf-Klett-Platz (NO₂)

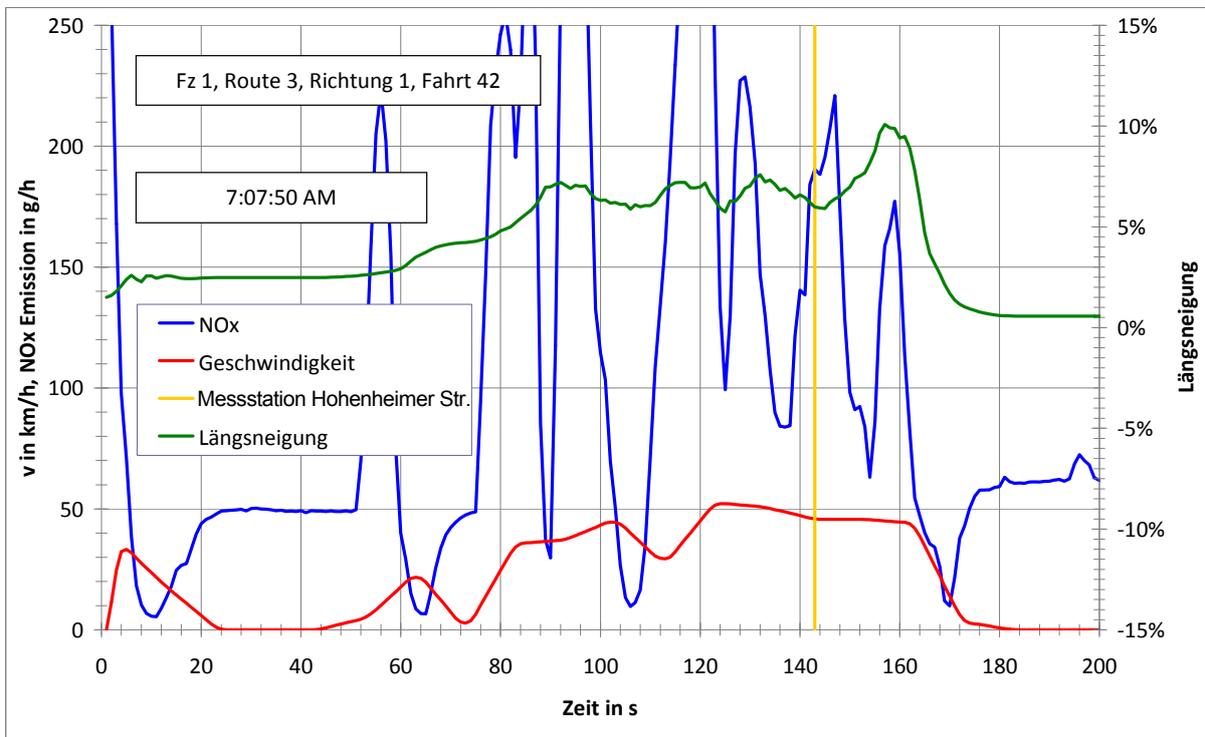


Abbildung 72: Vorbeifahrtsituation Messstation Hohenheimer Str. (NO_x)

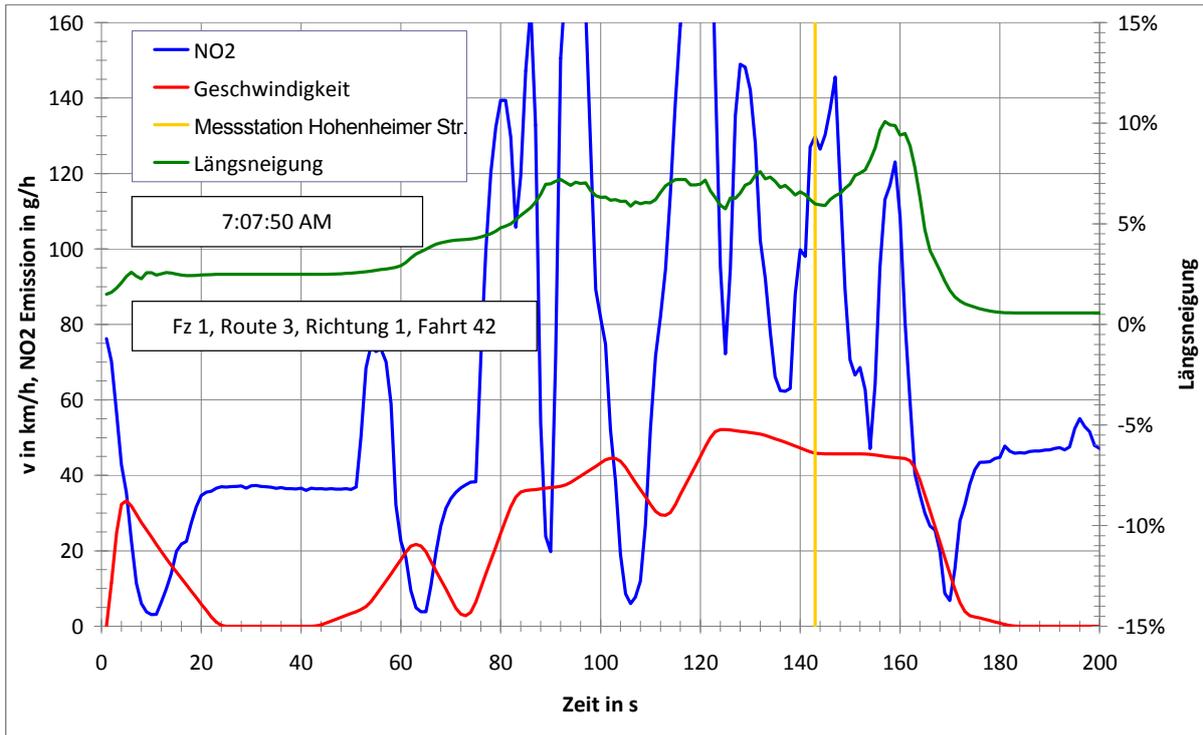


Abbildung 73: Vorbeifahrtsituation Messstation Hohenheimer Str. (NO₂)

Zur Verdeutlichung der Schwierigkeiten bei der Vergleichbarkeit einzelner Fahrten sind im Folgenden noch zwei PHEM Modellierungen dargestellt.

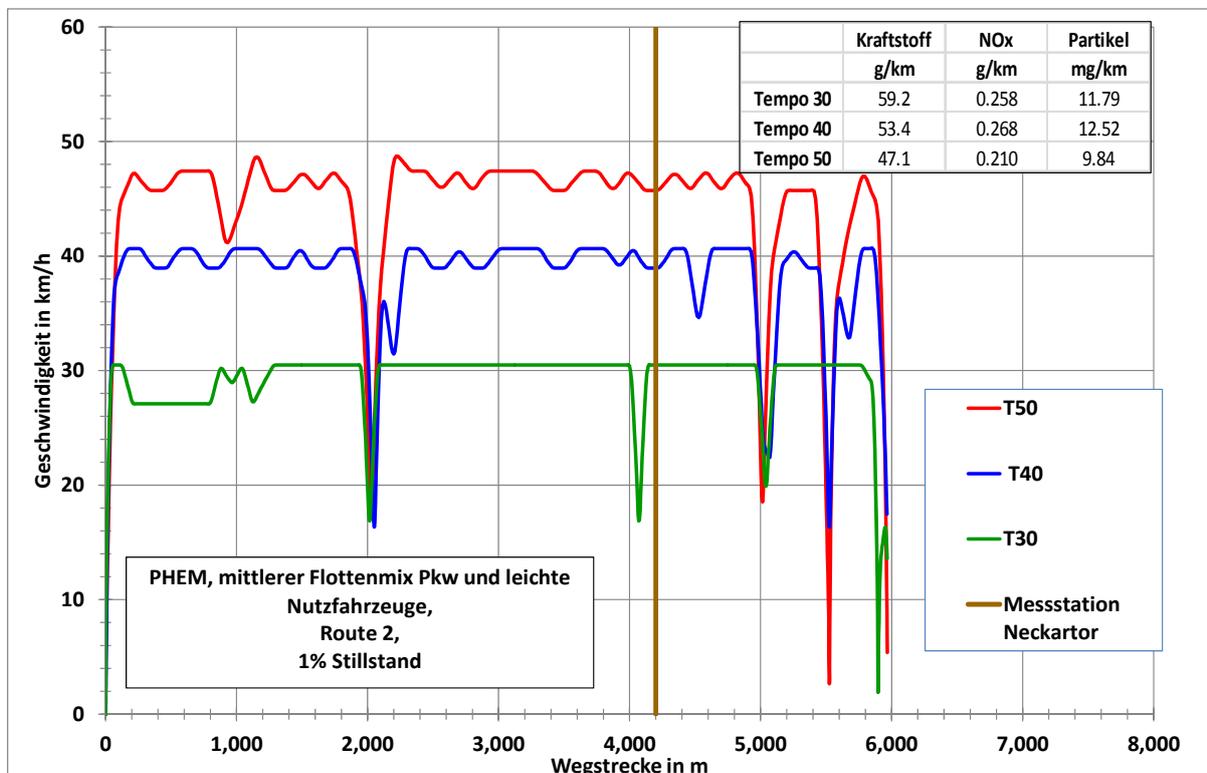


Abbildung 74: PHEM Modellierung für Strecke 2 mit vergleichbaren Fahrten
Mittlerer Flottenmix: 95% Pkw, 5% LNfz, Bezugsjahr 2010

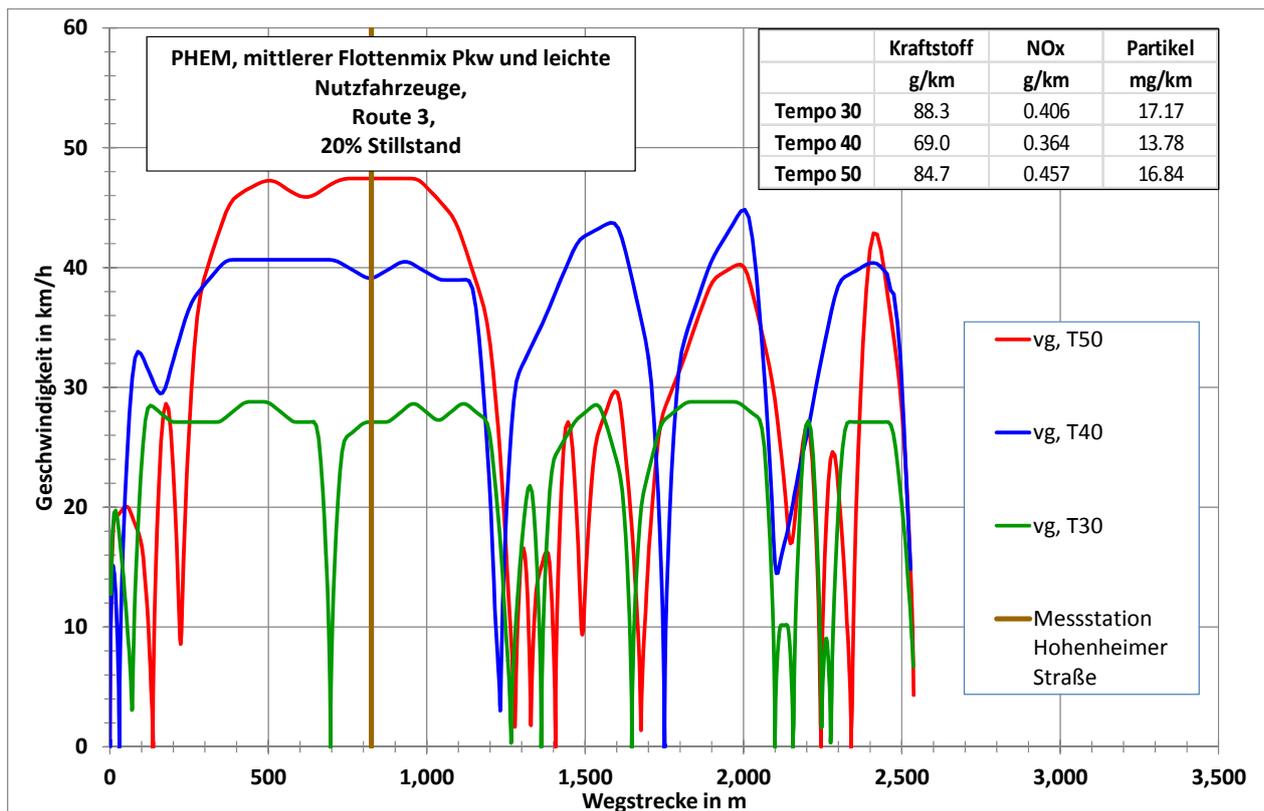


Abbildung 75: PHEM Modellierung für Strecke 3 mit nicht vergleichbaren Fahrten

Abbildung 74 zeigt eine PHEM Modellierung von realen Fahrten auf der Strecke 2 bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten, die aber sehr ähnliche Stillstandsanteile und Fahrmuster besitzen. Die angegebenen streckenbezogenen Werte beziehen sich auf die Gesamtfahrt. Durch die sehr ähnlichen Fahrmuster können diese Fahrten gut miteinander verglichen werden. Die streckenbezogenen Ergebnisse zeigen eindeutige Vorteile bei Tempo 50. In Abbildung 75 ist die Modellierung von Fahrten auf der Strecke 3 dargestellt, die jedoch aufgrund sehr unterschiedlicher Fahrmuster bei den drei Geschwindigkeiten nicht gut vergleichbar sind. Bei Betrachtung der Fahrmuster ist sehr leicht verständlich, dass durch die häufigeren Stops mit entsprechend häufigeren Beschleunigungsvorgängen bei Tempo 30 und 50 die Emissions- und Verbrauchsergebnisse ungünstiger ausfallen als bei Tempo 40.

6.5 Emissionsergebnisse für Freiberg am Neckar

Zusätzlich zu dem Messprogramm in Stuttgart waren Versuchsfahrten in Freiberg am Neckar Bestandteil der Untersuchungen. Durch die Firma AVISO wurden im Vorfeld Befahrungen in Freiberg durchgeführt und anschließend über Modellierungen die Emissionssituation dargestellt.

Exemplarisch sollten nun mit einem Fahrzeug (Fahrzeug 3) und zwei Geschwindigkeiten (30 km/h und 50 km/h) Emissionsmessungen auf den gleichen Streckenführungen durchgeführt werden. Als zusätzliche Variable wurden die beiden unterschiedlichen Geschwindigkeiten noch in jeweils zwei Gangstufen gefahren (30 km/h: 2. und 3. Gang; 50 km/h: 3. und 4. Gang).

Die Streckenführungen sind Abbildung 8 zu entnehmen. Als Einzelmessung wurden Fahrten von jeweils einem Endpunkt (A, B oder D) zu den jeweiligen anderen Endpunkten definiert. Die Streckenführungen A–B bzw. B–A verlaufen über eine Ortsdurchgangsstraße mit geringem Gefälle von A nach B. Das Teilstück C–D weist jedoch deutliche Steigungen auf. Abbildung 76 zeigt streckenbezogene CO₂-Emissionen von Einzelfahrten bei Tempo 30 in unterschiedlichen Gangstufen. Der linke Block stellt die Ergebnisse für die Strecke A–B dar, wobei die ersten beiden Fahrten mit der 2. Gangstufe bei Tempo 30 und die restlichen drei Fahrten mit der 3. Gangstufe gefahren wurden. Auffällig ist hier das letzte Ergebnis für die 3. Gangstufe, welches deutlich höhere Werte als die vorherigen beiden Ergebnisse liefert. Analysiert man diese Fahrt, zeigt sich eine deutlich verringerte Durchschnittsgeschwindigkeit (22,8 km/h zu 31,3 km/h), was auf Verkehrsstörungen zurückzuführen ist. Die tendenziell geringeren CO₂-Emissionen bei Verwendung der 3. Gangstufe lassen sich auch in den beiden weiteren Blöcken feststellen, die die Teilstrecken B–A (mittlerer Block) und A–D (rechter Block) darstellen. Jeweils die letzten drei Fahrten sind Messungen bei Verwendung der 3. Gangstufe.

Abbildung 77 zeigt für gleiche Strecken und Gangverwendungen die Ergebnisse für NO_x. Die Bedingungen, die zu geringeren CO₂-Emissionen geführt haben (höhere Lasten bei höheren Gangstufen und damit besserer Wirkungsgrad), führen hier zu erhöhten NO_x-Emissionen. Bei der Strecke A–B fällt dies auf Grund des leichten Gefälles und der damit verbundenen geringen Motorlast nicht auf.

Abbildung 78 zeigt analog die NO₂-Emissionen.

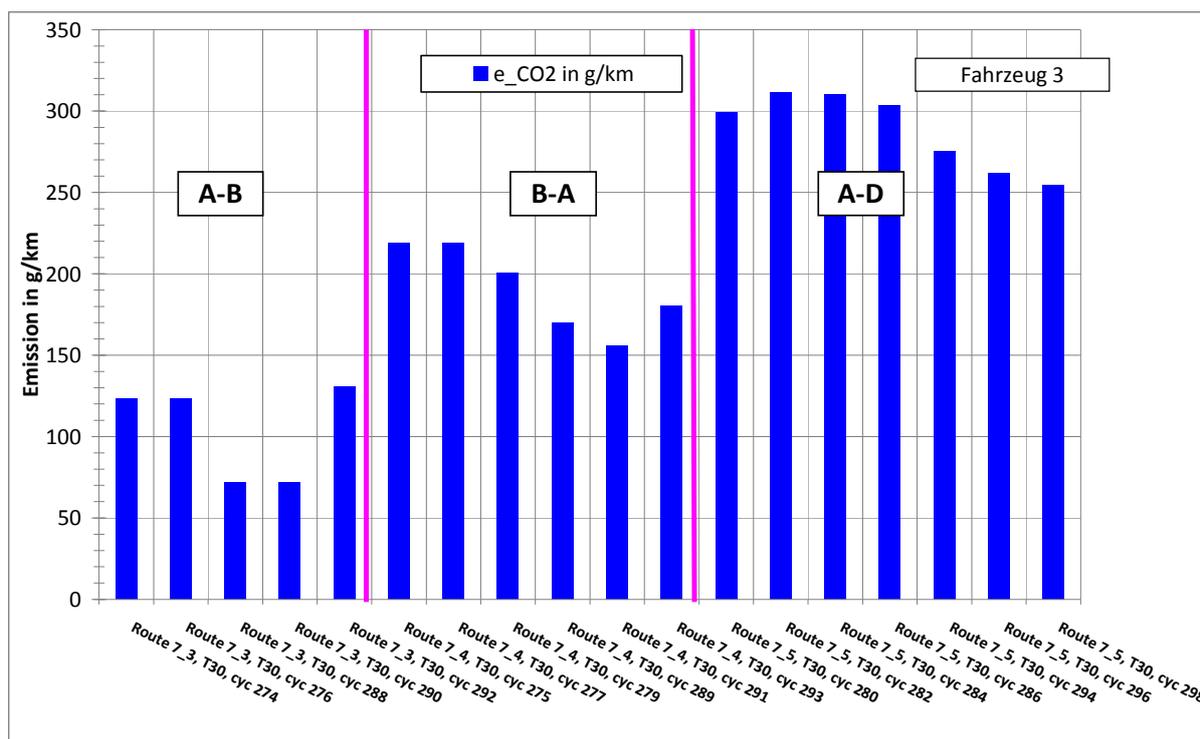


Abbildung 76: CO₂ in g/km bei Tempo 30 für unterschiedliche Teilstrecken in unterschiedlichen Gangstufen

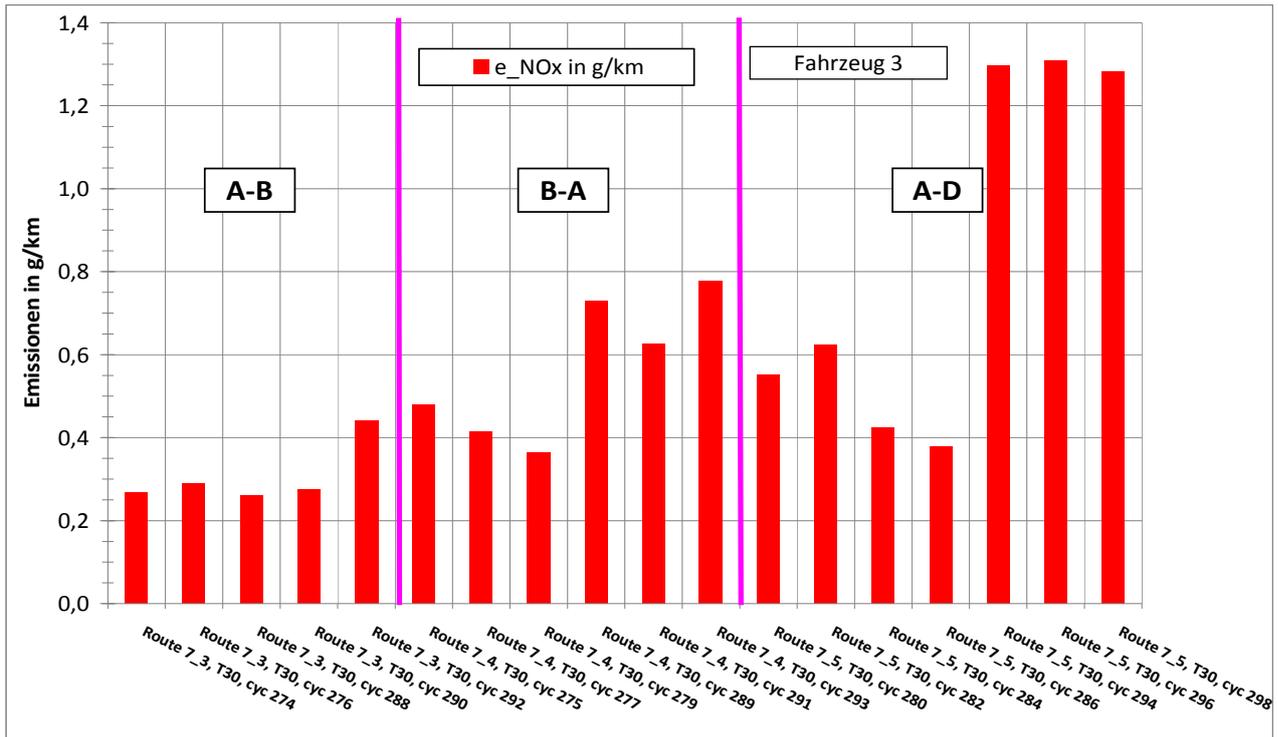


Abbildung 77: NO_x in g/km bei Tempo 30 für unterschiedliche Teilstrecken in unterschiedlichen Gangstufen

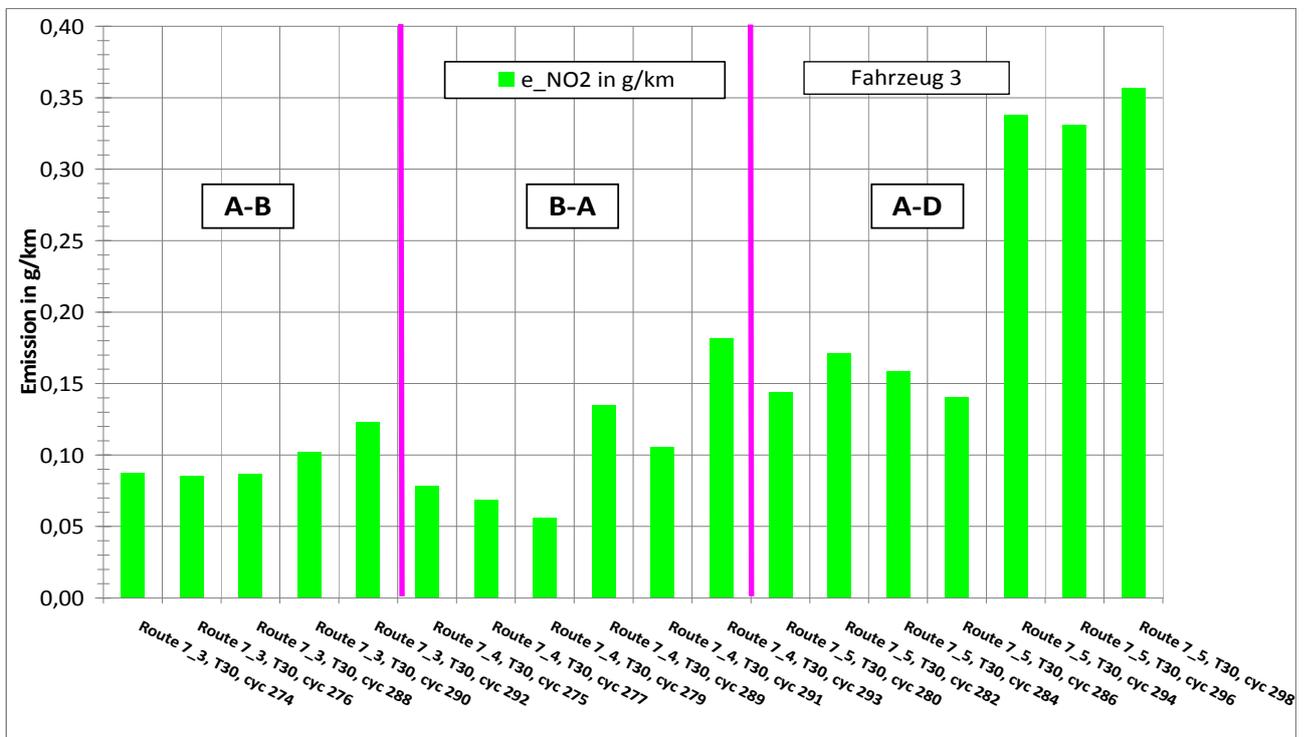


Abbildung 78: NO₂ in g/km bei Tempo 30 für unterschiedliche Teilstrecken in unterschiedlichen Gangstufen

Betrachtet man nun in gleicher Weise die Situation bei Tempo 50, so ergeben sich die Abbildungen 79 bis 81. Die Effekte fallen bei Tempo 50 nicht mehr so eindeutig auf, sind prinzipiell aber die gleichen und tendenziell auch erkennbar. Bei Tempo 50 gibt es bei einspuriger Verkehrsführung häufiger Störungen, so dass stetige Fahrten, wie sie bei Tempo 30 in einer Tempo 50 Umgebung fahrbar sind, nur selten möglich sind. Darüber hinaus ist die Verwendung der 4. Gangstufe auf dem Teilstück C–D nur streckenweise möglich gewesen, da bei den vorliegenden Steigungen die 4. Gangstufe realistischerweise nicht benutzt wird.

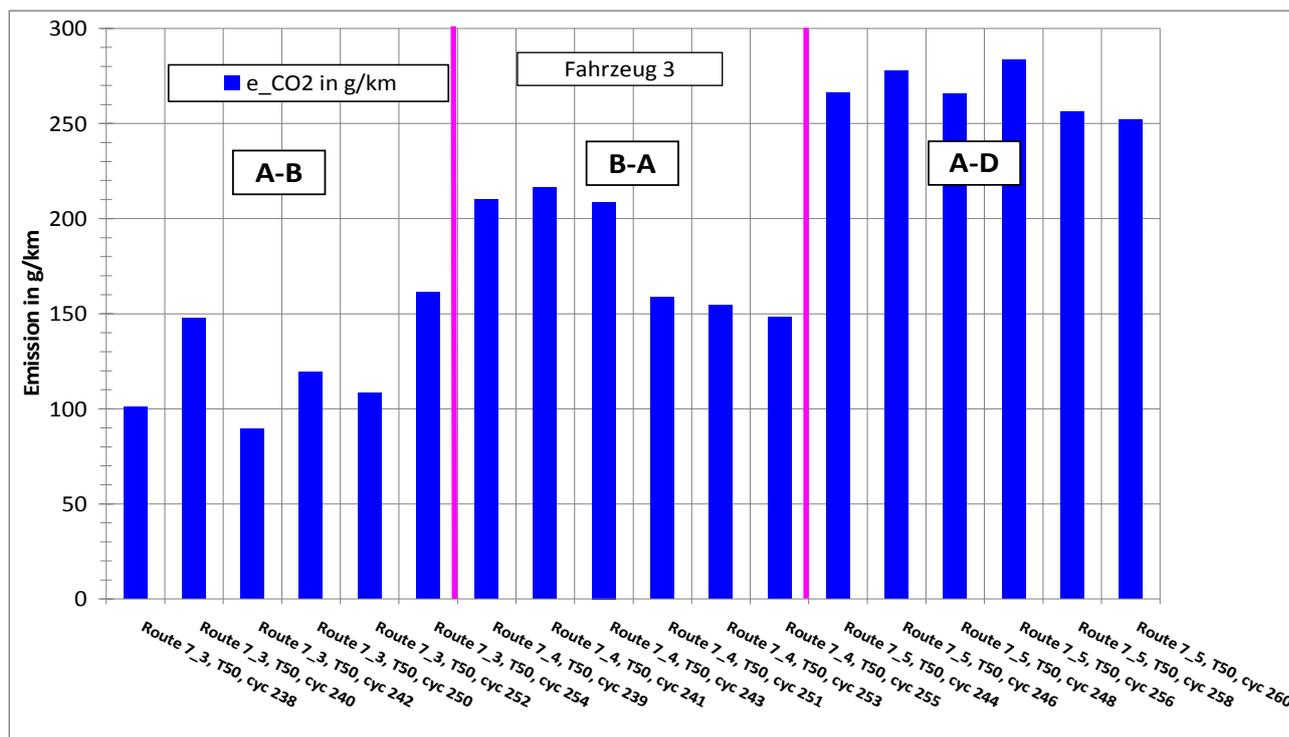


Abbildung 79: CO₂ in g/km bei Tempo 50 für unterschiedliche Teilstrecken in unterschiedlichen Gangstufen

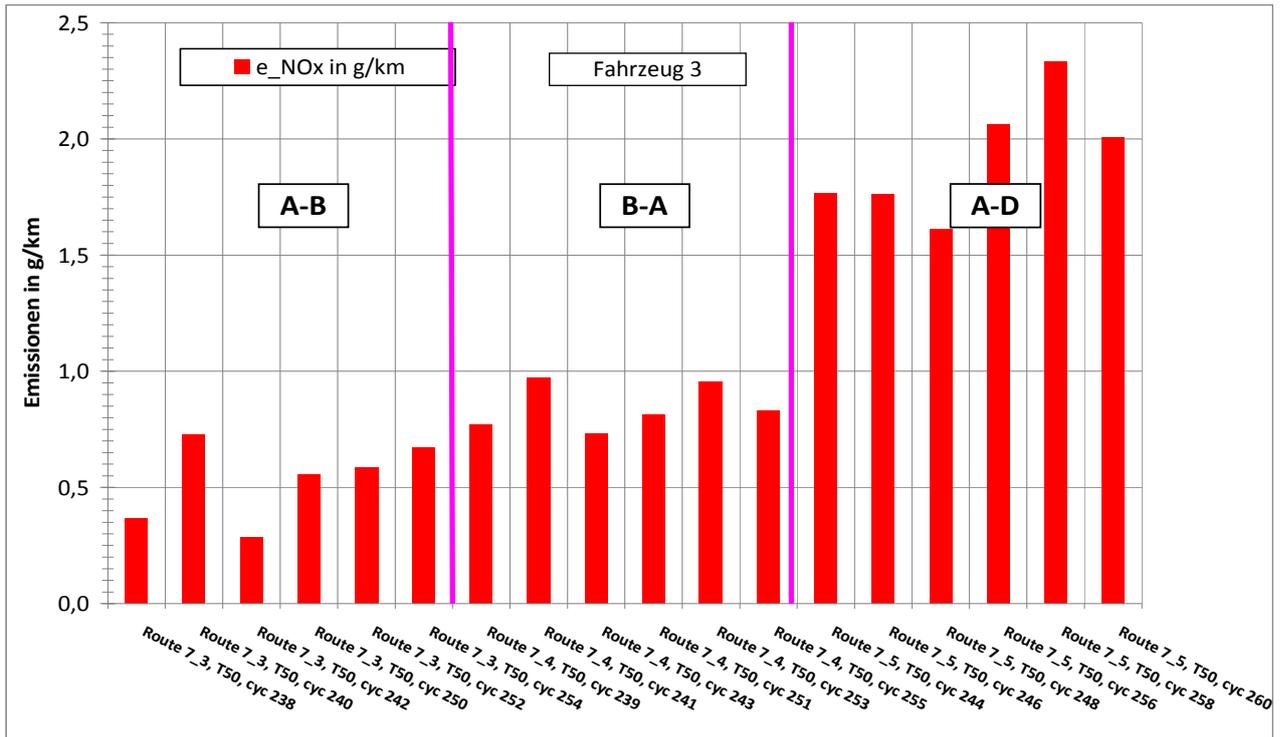


Abbildung 80: NO_x in g/km bei Tempo 50 für unterschiedliche Teilstrecken in unterschiedlichen Gangstufen

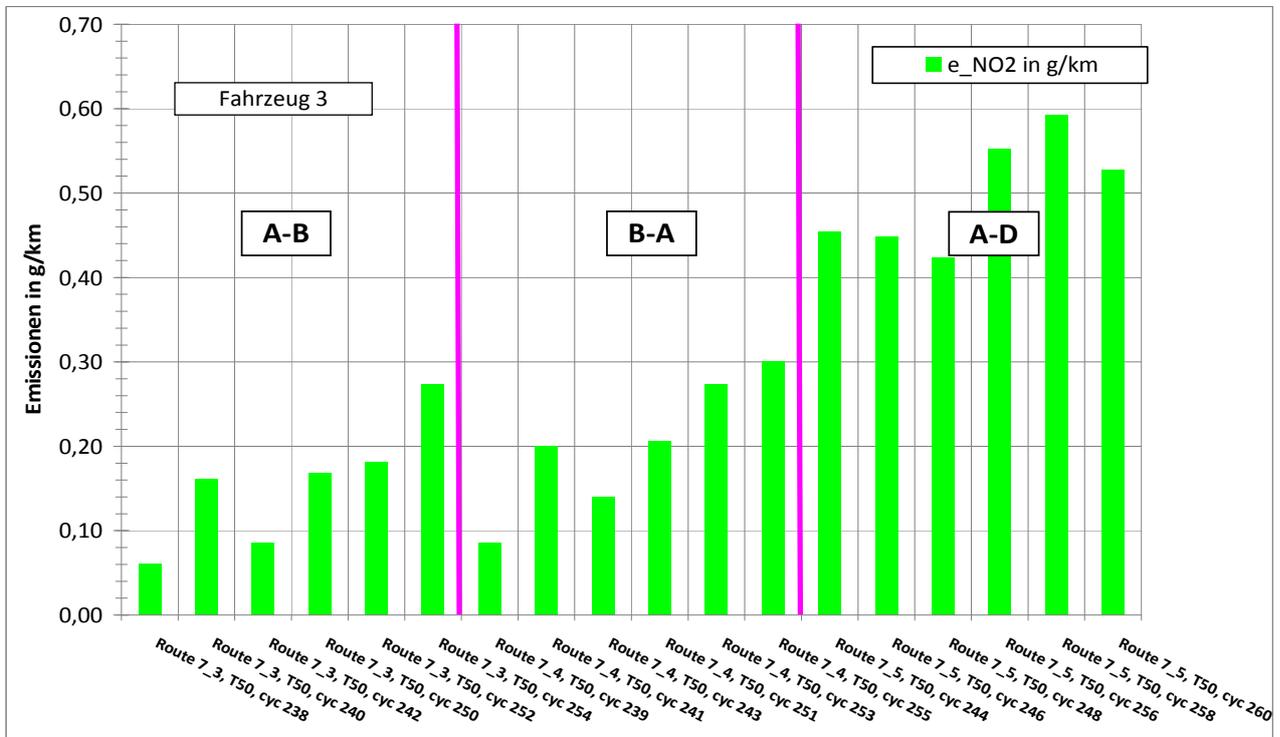


Abbildung 81: NO₂ in g/km bei Tempo 50 für unterschiedliche Teilstrecken in unterschiedlichen Gangstufen

Um eine Aussage über Vorteile von Tempo 30 gegenüber Tempo 50 für Freiberg am Neckar zu generieren, stellen die Abbildungen 82 bis 84 die Ergebnisse für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten gegenüber. Jeder Datenpunkt projiziert die mittleren Emissionsergebnisse bei der Befahrung einer Teilstrecke einerseits mit 30 km/h auf die Abszisse und andererseits mit 50 km/h auf die Ordinate. Angemerkt sei hier, dass es sich lediglich um Ergebnisse für ein Fahrzeug handelt.

Bei den CO₂-Emissionen zeigen sich geringfügige Verschlechterungen bei Tempo 30. Wie bereits bei den Untersuchungen in Stuttgart angemerkt, beschreiben die Ergebnisse nicht die Situation bei einer generellen Einführung von Tempo 30. Da für die restlichen Verkehrsteilnehmer während der Versuchsfahrten weiterhin Tempo 50 galt, waren mit dem Versuchsfahrzeug Fahrten bei Tempo 30 nahezu ungestört möglich. Sollte Tempo 30 für alle Fahrzeuge gelten, ist zu erwarten, dass sich der Nachteil bei den CO₂-Emissionen deutlicher darstellt, da durch Störungen größere Stopanteile zu erwarten sind.

Für NO_x und NO₂ ergeben sich bei den Messungen in Freiberg Vorteile für Tempo 30, die jedoch durch die oben beschriebenen Effekte verstärkt werden, da sehr stetige Fahrten möglich waren.

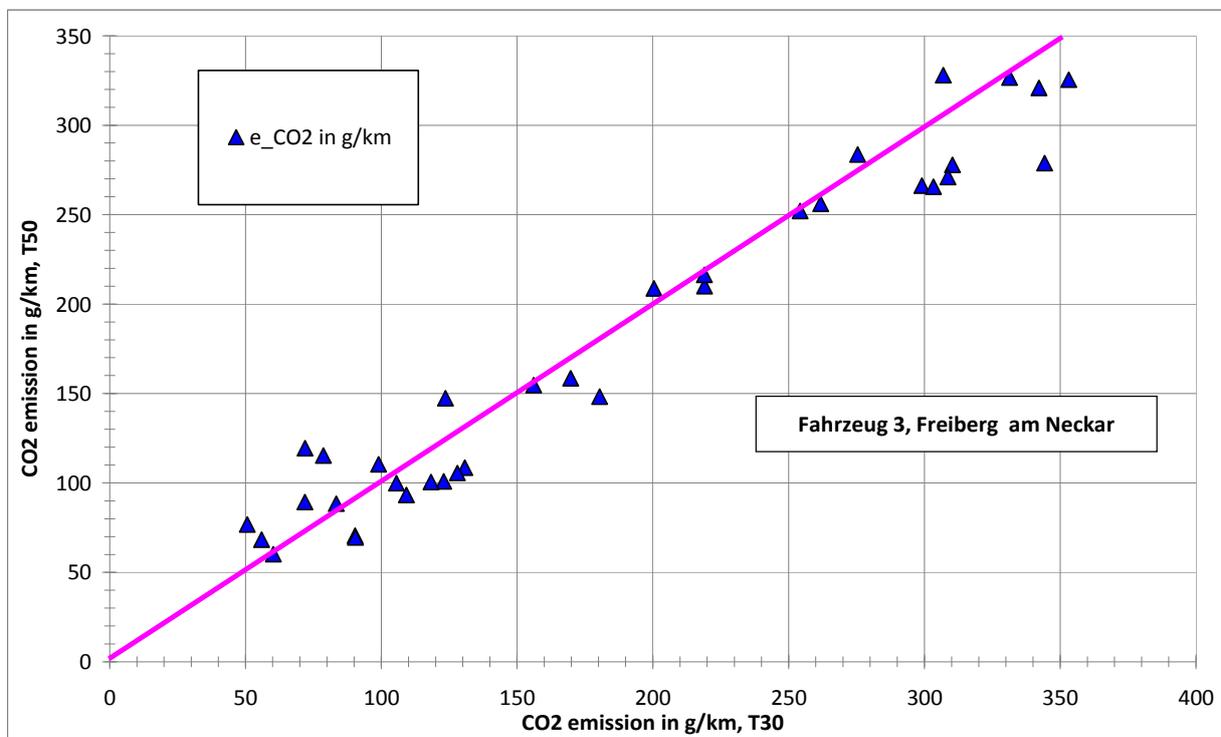


Abbildung 82: Gegenüberstellung CO₂ für Tempo 30 und Tempo 50

Jeder Datenpunkt projiziert die mittleren Emissionsergebnisse bei der Befahrung einer Teilstrecke einerseits mit 30 km/h auf die Abszisse und andererseits mit 50 km/h auf die Ordinate.

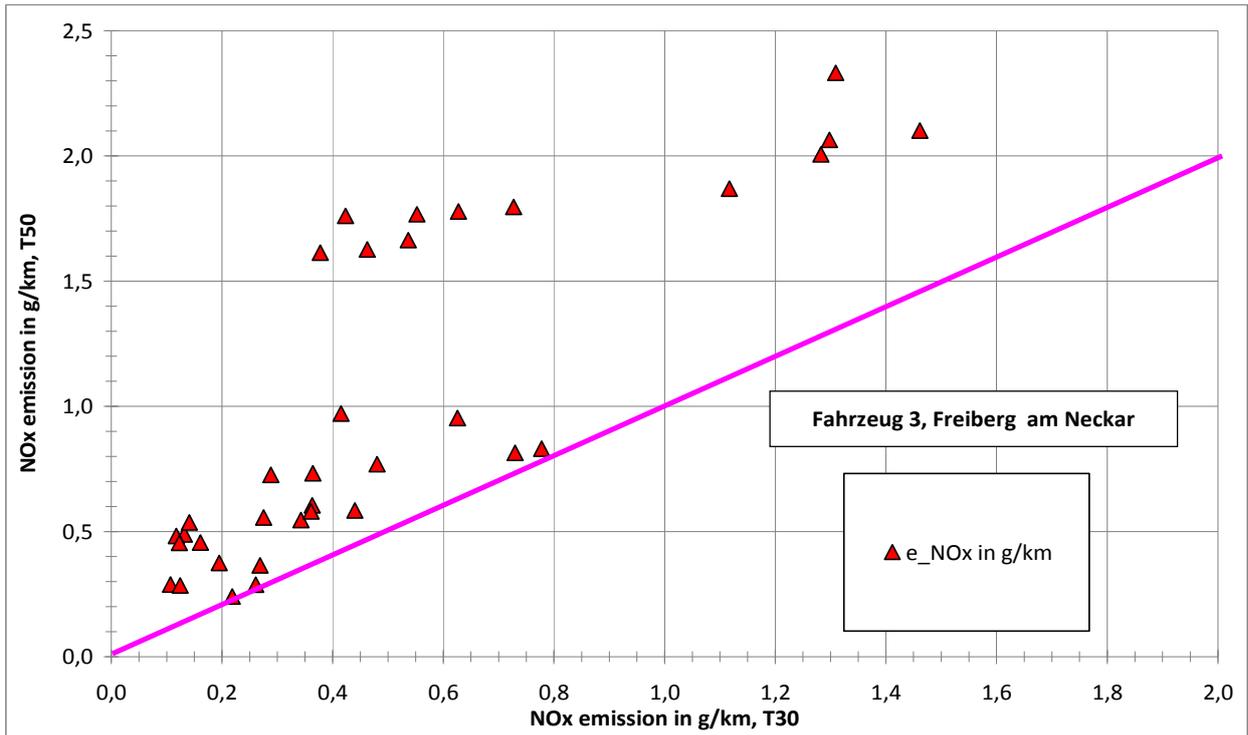


Abbildung 83: Gegenüberstellung NO_x für Tempo 30 und Tempo 50
Randbedingungen wie für Abb. 82 erläutert.

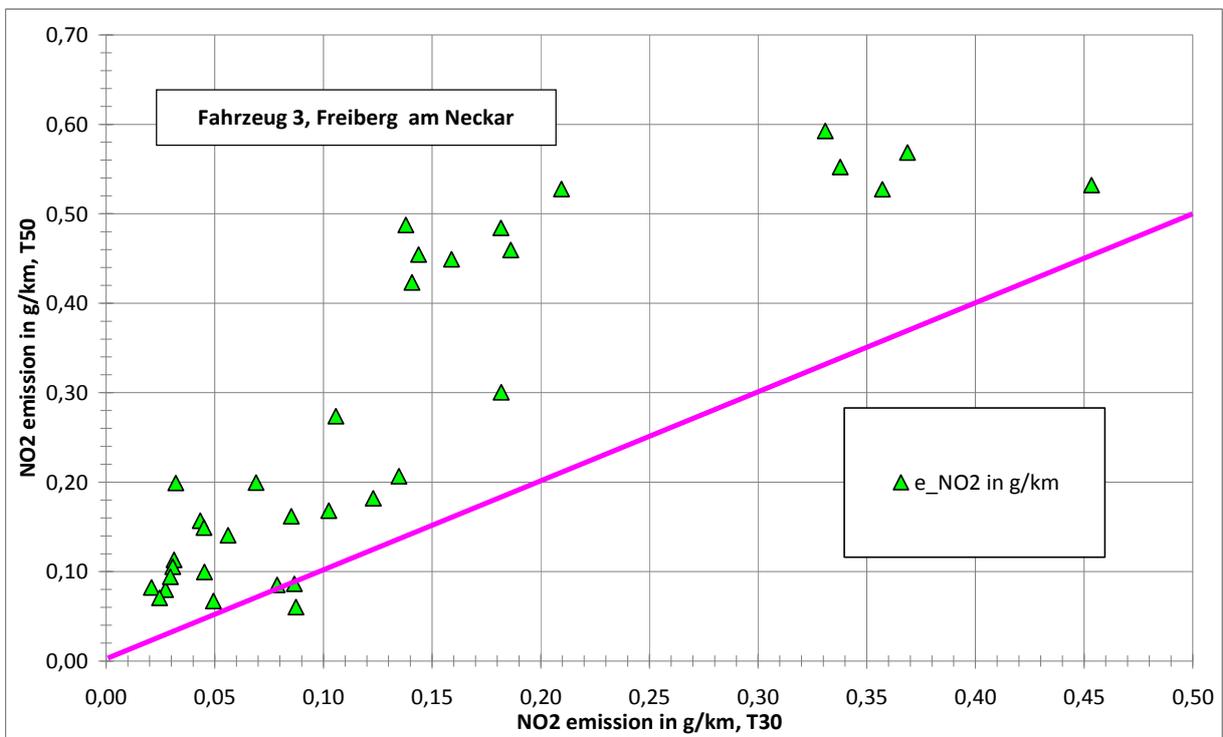


Abbildung 84: Gegenüberstellung NO₂ für Tempo 30 und Tempo 50
Randbedingungen wie für Abb. 82 erläutert.

6.6 Ergebnisse der PHEM Modellierung

Neben den Emissionsmessungen in Stuttgart und in Freiberg am Neckar wurden mit den gewonnenen Fahrprofilen auch Modellierungen der real gefahrenen Zyklen berechnet. In diesem Kapitel sollen Ergebnisse aus dieser Modellierung vorgestellt werden.

Da die Messergebnisse keine wirklich eindeutige Antwort auf die Frage gegeben haben, ob eine Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit zu einer Reduzierung der Emissionen führt, wurden anhand der Fahrdaten mit dem Emissionsmodell PHEM der TU Graz Modellierungen für eine typische Fahrzeugflotte durchgeführt, um hier eindeutige Trends zu erkennen. Die berechneten Emissionen beschreiben ein mittleres Kfz bei einer angenommenen Flottenzusammensetzung von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen im Verhältnis 95% / 5% für das Bezugsjahr 2010.

6.6.1 PHEM Modellierungsergebnisse für Stuttgart

Die Abbildungen 85 bis 93 zeigen die Ergebnisse dieser Modellierungen auf den Stuttgarter Innenstadtstrecken 1 bis 3 für die Partikelemission, die NO_x-Emissionen und den Kraftstoffverbrauch in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und für verschiedene Anzahlen von Short trips (Fahrtverlauf beginnend mit einem Halt bis zum nächsten Halt). Für alle Komponenten ist ein eindeutiger Trend festzustellen, der höhere Emissionen und einen höheren Kraftstoffverbrauch für sinkende Geschwindigkeiten zeigt. Weiterhin wird deutlich, dass - in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Abschnitt 6.3 - mit zunehmender Anzahl von Stops die Emissionen ansteigen. Die unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus zwischen Route 1 und 2 spiegeln die unterschiedlichen Verkehrssituationen wider (große Störungen auf Route 1, deutlich geringere Störungen auf Route 2). Die höheren Emissionen auf Route 3 resultieren aus dem hohen Steigungsanteil, wodurch sich auch die größere Streubreite der Werte ergibt.

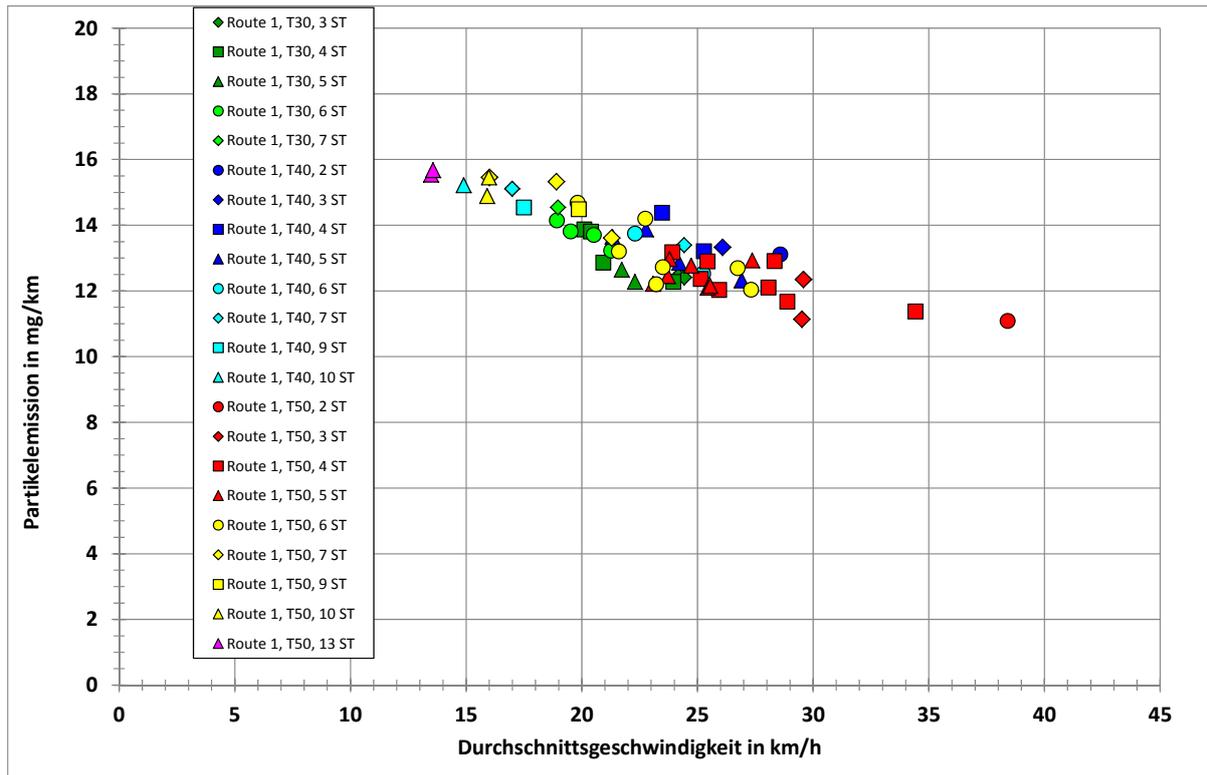


Abbildung 85: Partikelemissionen auf Strecke 1 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

In den Abbildungen 85 bis 93 entspricht jeder Datenpunkt der mittleren Emission einer Befahrung bei angegebener Geschwindigkeit. Die Befahrung bestand aus der angegebenen Zahl von short trips.

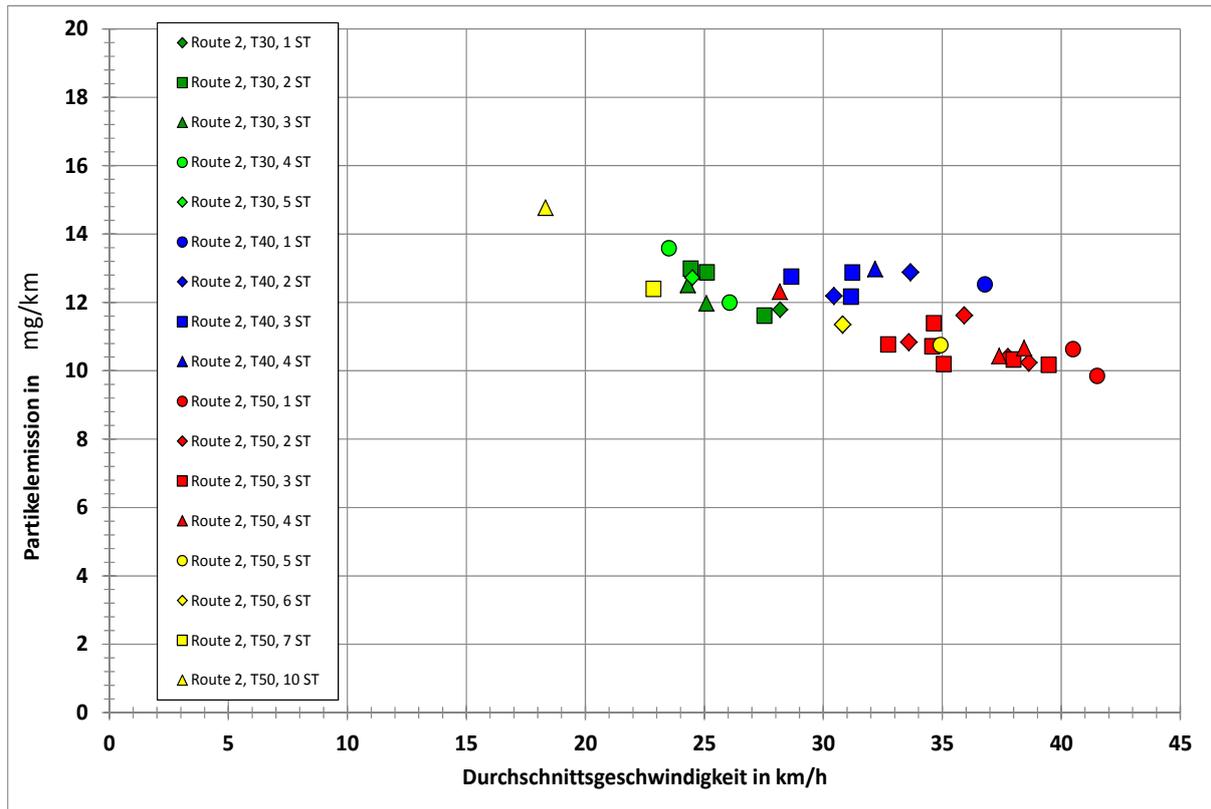


Abbildung 86: Partikelemissionen auf Strecke 2 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

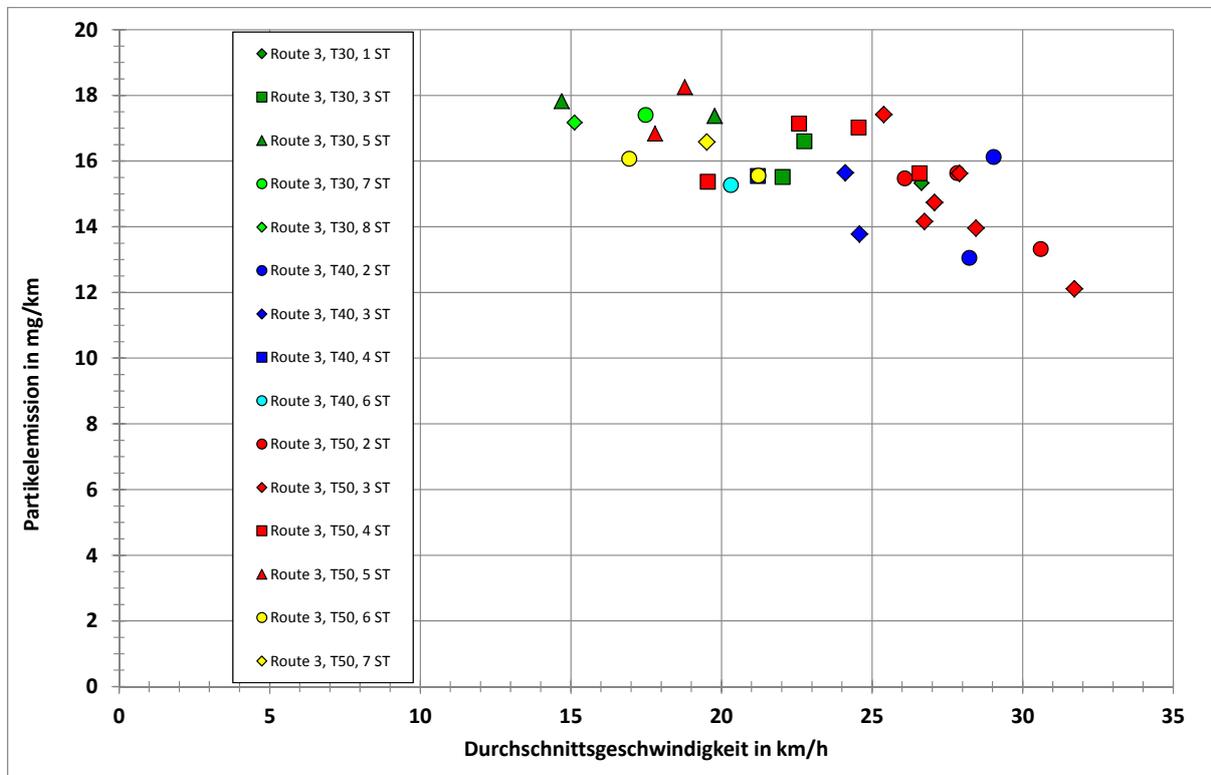


Abbildung 87: Partikelemissionen auf Strecke 3 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

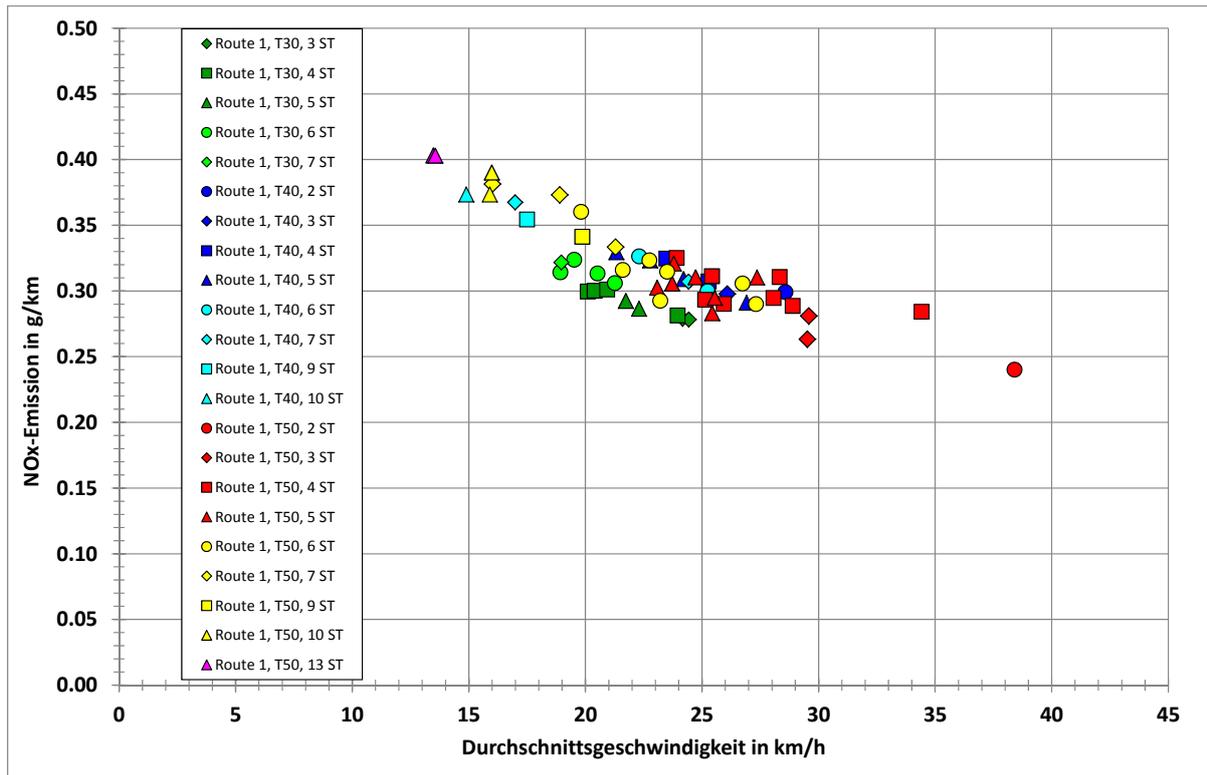


Abbildung 88: NO_x-Emissionen auf Strecke 1 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

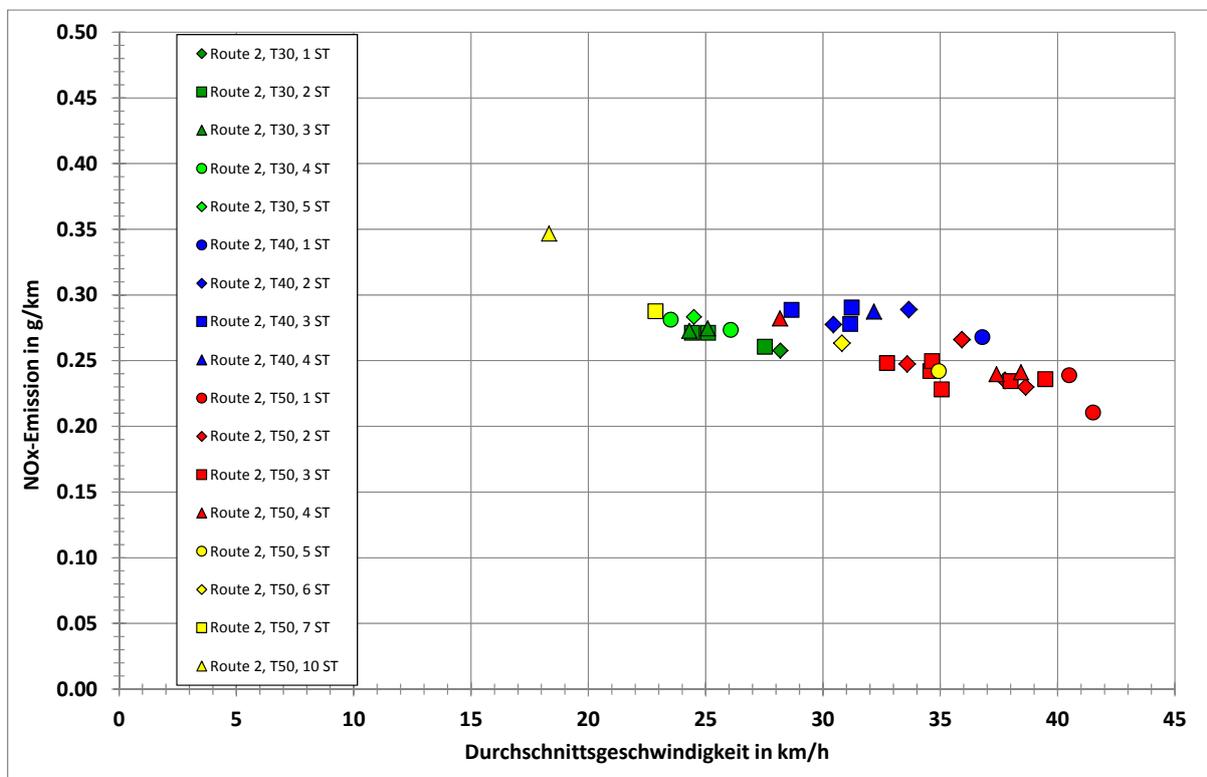


Abbildung 89: NO_x-Emissionen auf Strecke 2 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

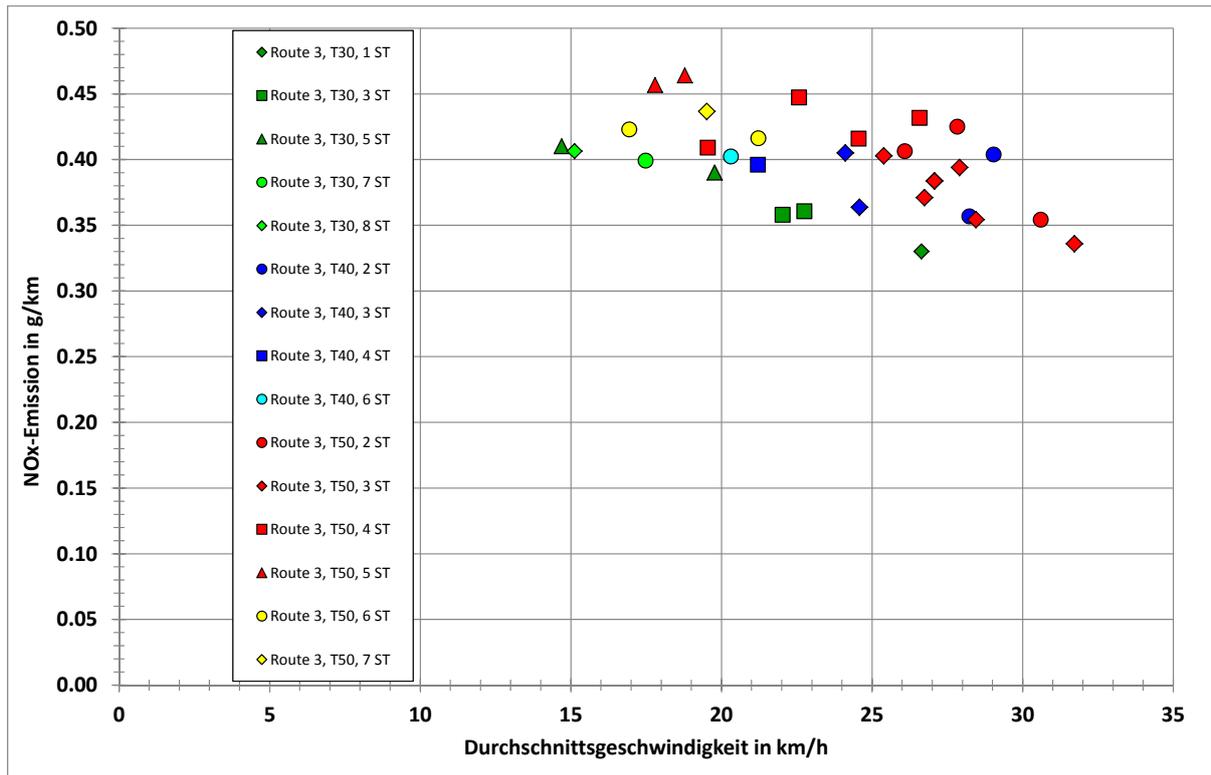


Abbildung 90: NO_x-Emissionen auf Strecke 3 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

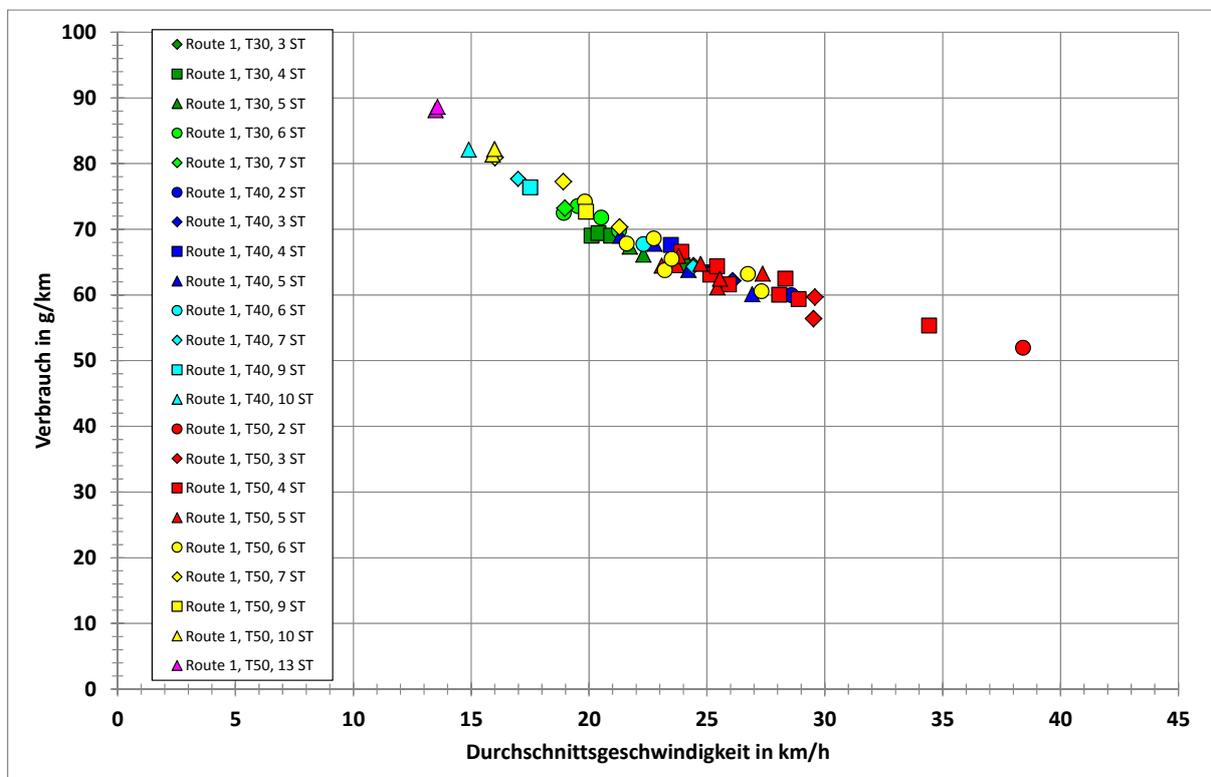


Abbildung 91: Kraftstoffverbrauch auf Strecke 1 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

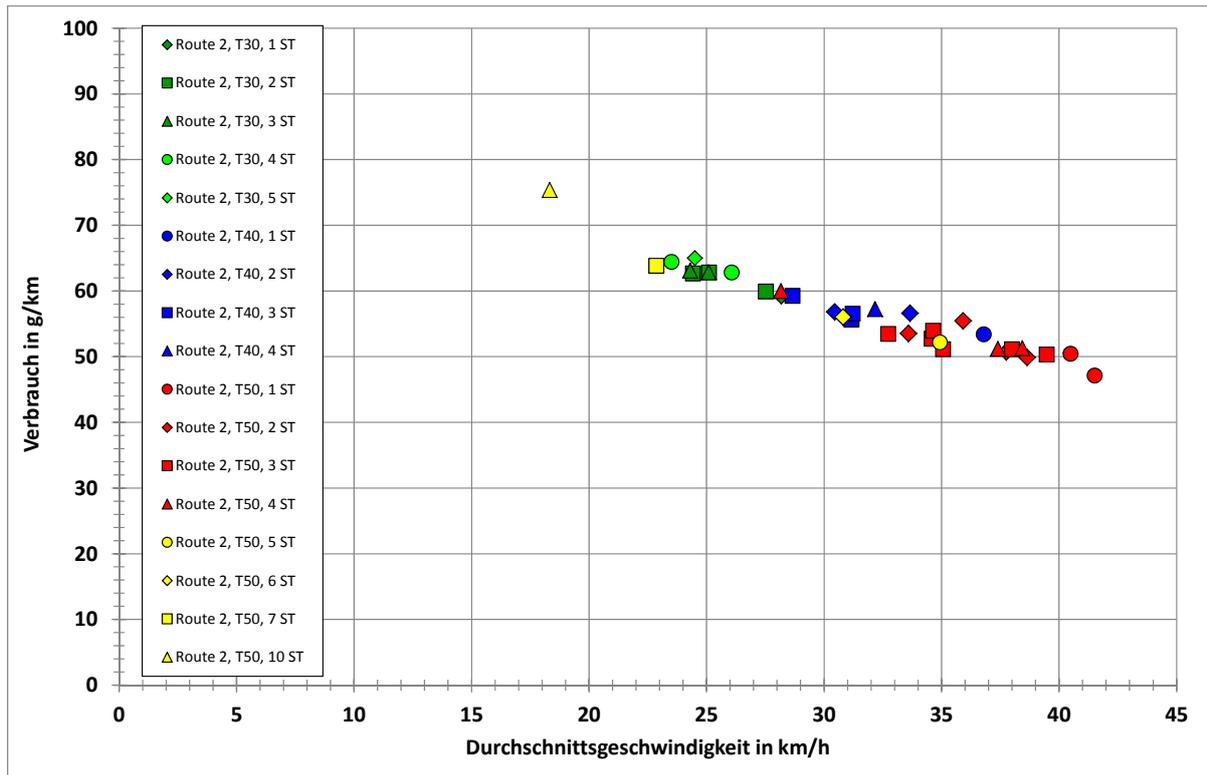


Abbildung 92: Kraftstoffverbrauch auf Strecke 2 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

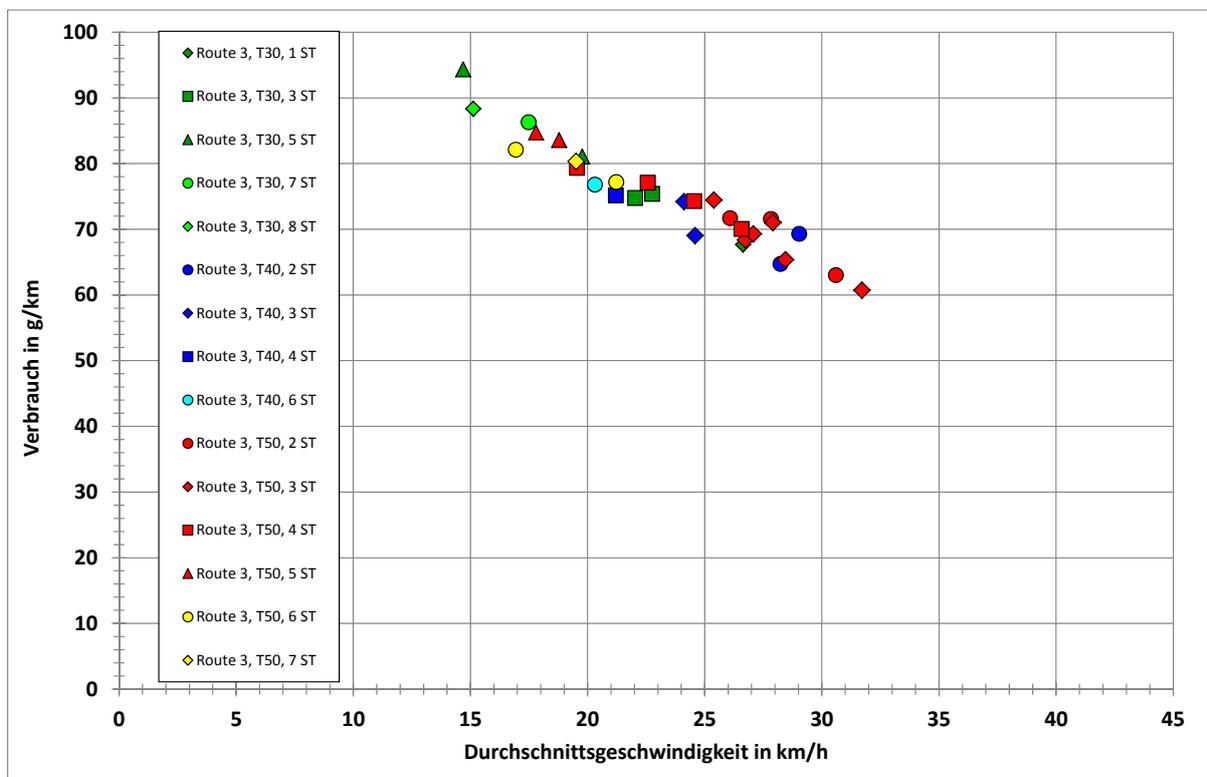


Abbildung 93: Kraftstoffverbrauch auf Strecke 3 für unterschiedliche Stophäufigkeiten und unterschiedliche Geschwindigkeiten

Um die Frage nach der Wirkung einer Geschwindigkeitsreduzierung auf Hauptverkehrsstraßen auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch zu beantworten, sind in den beiden folgenden Abbildungen die PHEM Modellierungsergebnisse für die drei Stuttgarter Innenstadtstrecken (Routen 1 – 3) zusammengefasst, einmal für Tempo 30, zum anderen für Tempo 40, jeweils im Vergleich zu Tempo 50.

Abbildung 94 zeigt die Änderungen der mittleren Emissionen bei Tempo 30 gegenüber Tempo 50 sowie die Standardabweichungen für Partikel, NO_x und Kraftstoffverbrauch. Für alle drei Parameter ergeben sich erhöhte Emissionen bei Tempo 30 gegenüber Tempo 50. Dies steht in Übereinstimmung mit den PEMS-Messergebnissen aus Abschnitt 6.1.

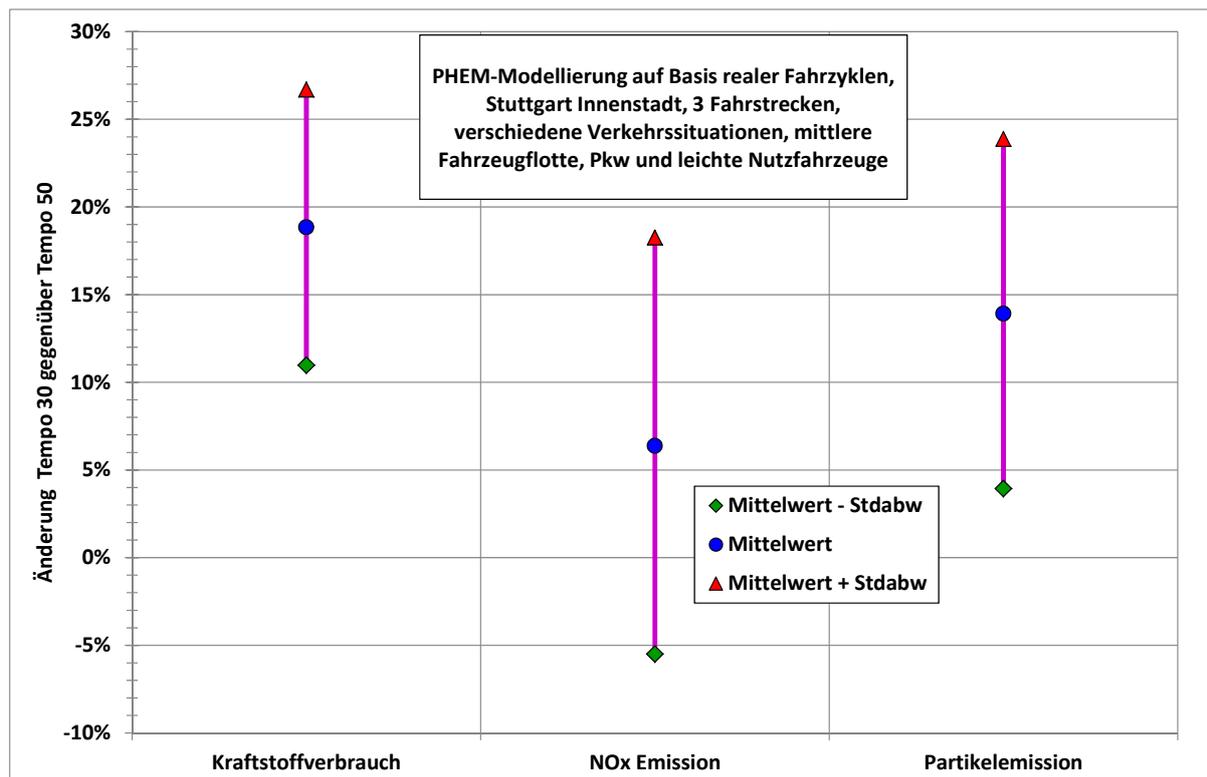


Abbildung 94: Tempo 30 im Vergleich zu Tempo 50, Zusammenfassung der PHEM Modellierungsergebnisse für Stuttgart Innenstadt

PHEM-Modellierung auf Basis realer Fahrzyklen auf Hauptverkehrsstraßenstrecken in Stuttgart (Routen 1 – 3) bei unterschiedlichen Verkehrssituationen. Berechnungsergebnisse für mittlere Fahrzeugflotte mit 95% Pkw und 5% leichte Nutzfahrzeuge, Bezugsjahr 2010.

In Abbildung 95 ist entsprechend die Änderung der mittleren Emissionen bei Tempo 40 im Vergleich zu Tempo 50 dargestellt. Auch hier zeigen sich für alle drei Parameter erhöhte Emissionen bei Tempo 40 gegenüber Tempo 50.

Die Modellierung mit dem Emissionsmodell PHEM für eine mittlere Kfz-Flotte mit 95% Pkw und 5% leichten Nutzfahrzeugen ergibt also für die drei Stuttgarter Innenstadtstrecken bei Berücksichtigung verschiedener Verkehrssituationen im Bezugsjahr 2010 einen eindeutigen Trend zu höheren Emissionen und einem höheren Kraftstoffverbrauch bei sinkenden Geschwindigkeiten.

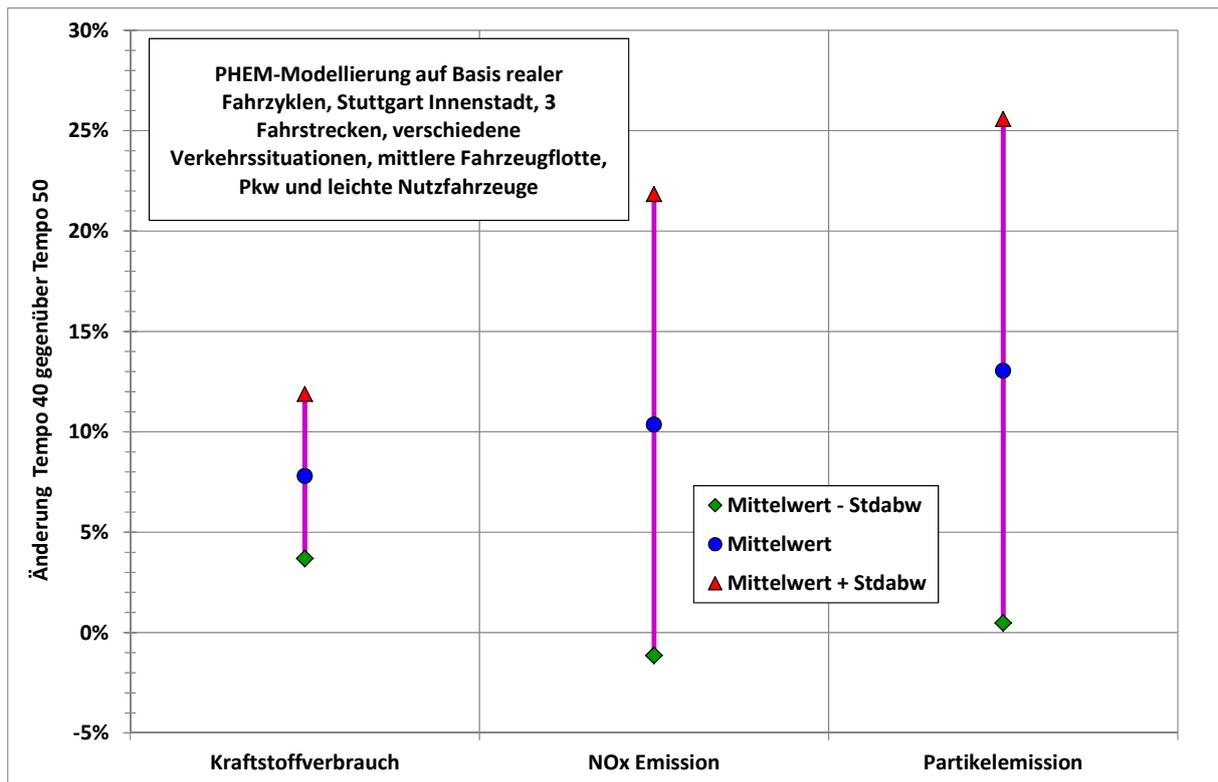


Abbildung 95: **Änderung Tempo 40 gegenüber Tempo 50, Zusammenfassung der PHEM Modellierungsergebnisse für Stuttgart Innenstadt**

PHEM-Modellierung auf Basis realer Fahrzyklen auf Hauptverkehrsstraßenstrecken in Stuttgart (Routen 1 – 3) bei unterschiedlichen Verkehrssituationen. Berechnungsergebnisse für mittlere Fahrzeugflotte mit 95% Pkw und 5% leichte Nutzfahrzeuge, Bezugsjahr 2010.

6.6.2 PHEM Modellierungsergebnisse für Freiberg am Neckar

Die folgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse der PHEM Modellierung für die Fahrten in Freiberg am Neckar. In Abbildung 96 ist eine Zusammenfassung aller Ergebnisse aus den sechs Teilfahrstrecken (A–B, B–A, A–D, D–A, B–D und D–B) für Partikel, NO_x und Kraftstoffverbrauch zu sehen. Dargestellt sind die Änderungen der Emissionsmittelwerte von Ergebnissen bei Tempo 30 gegenüber Tempo 50 sowie die Standardabweichungen. Es zeigt sich, dass lediglich bei den NO_x-Emissionen eine geringe Verbesserung bei Tempo 30 zu erzielen ist. Die späteren Abbildungen machen deutlich, dass dieser Rückgang auf den Steigungsstrecken erzielt wird.

Die Abbildungen 97 bis 102 zeigen die Ergebnisse für Partikelemissionen, NO_x-Emissionen und den Kraftstoffverbrauch, aufgeteilt für Steigungs- und Gefällestrecken. Abgesehen von einer NO_x-Minderung bei Steigungsstrecken ist kein eindeutiger Trend erkennbar.

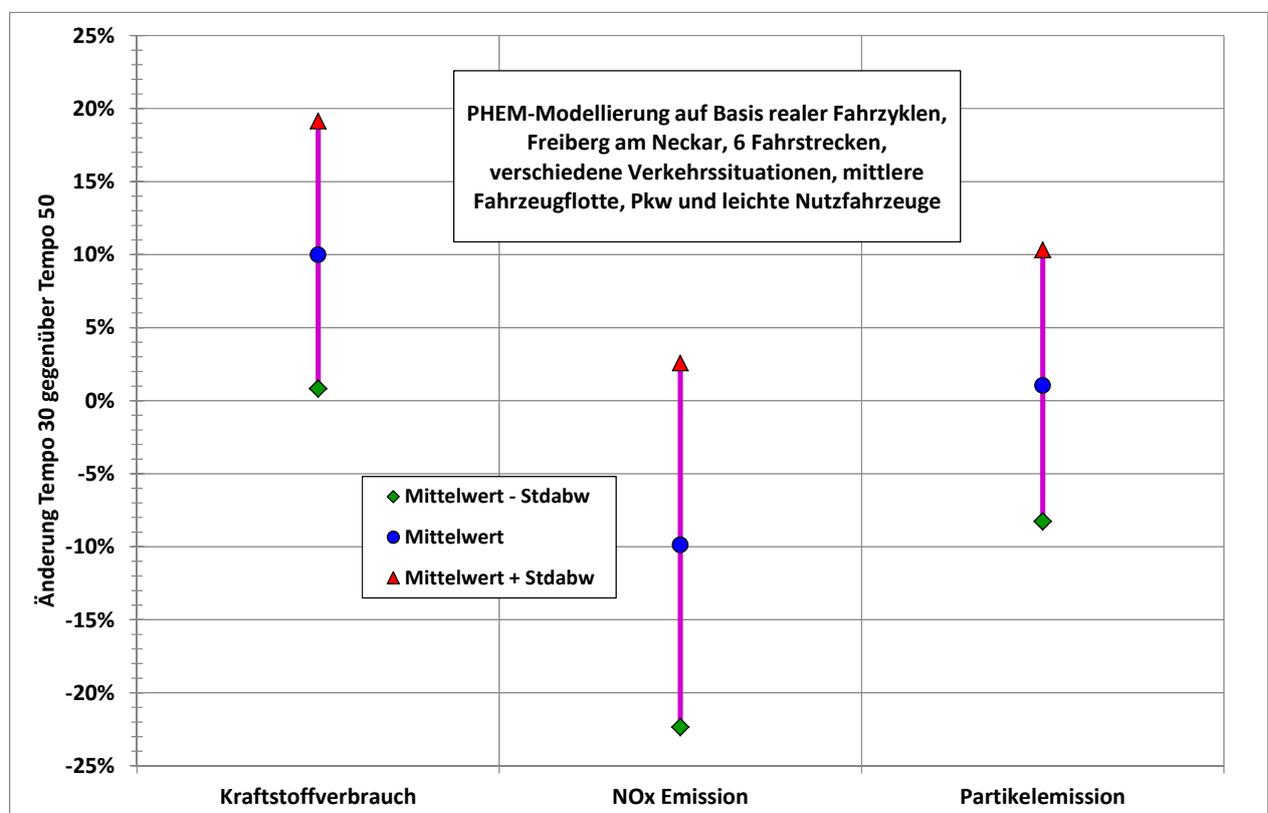


Abbildung 96: Zusammenfassung der PHEM Modellierung für Freiberg am Neckar

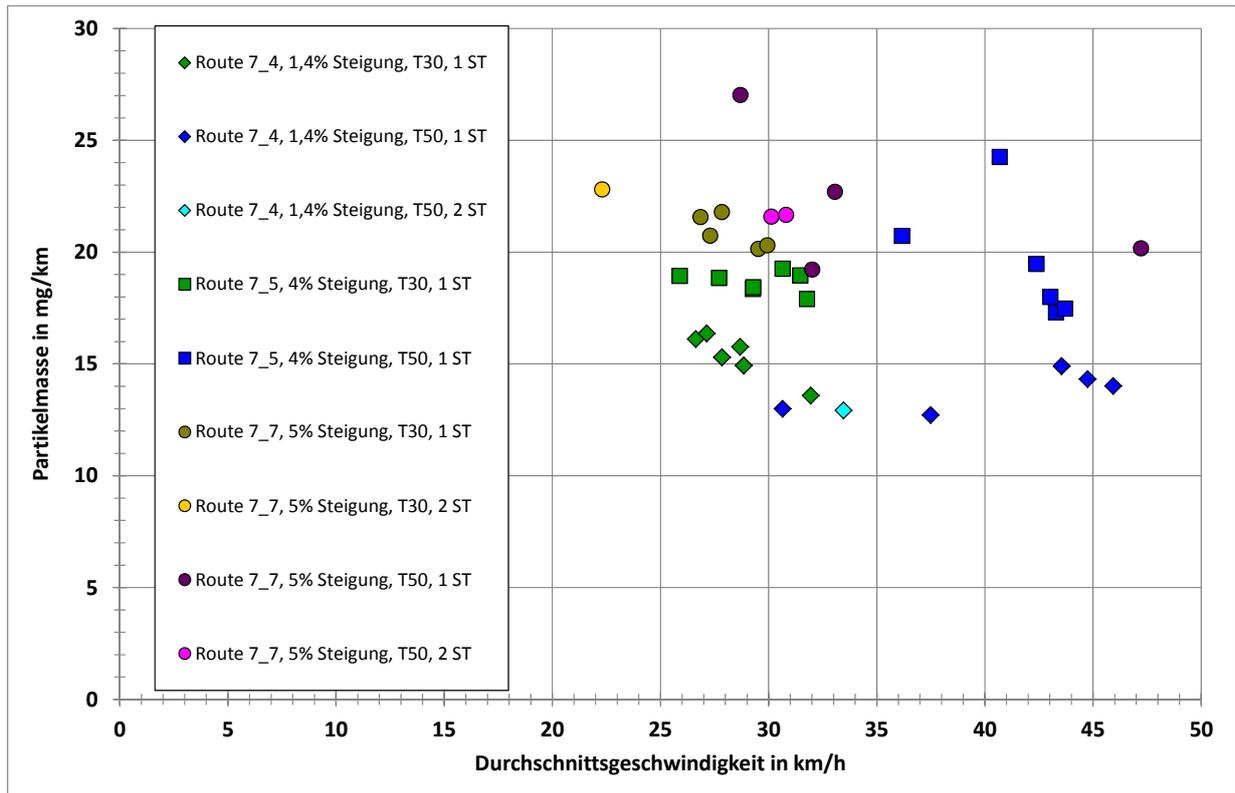


Abbildung 97: Partikelemissionen für Steigungsstrecken in Freiberg am Neckar
(Bedingungen: vgl. Legende zu Abb. 85)

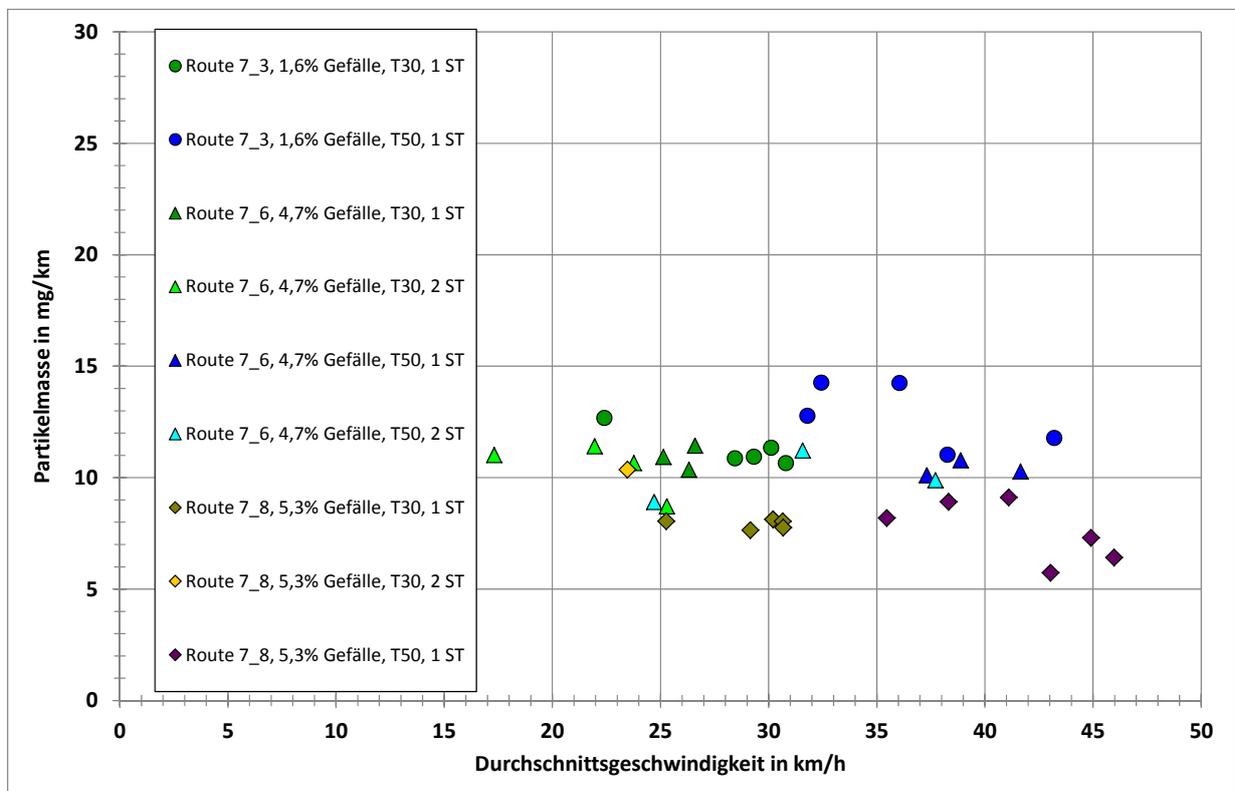


Abbildung 98: Partikelemissionen für Gefällestrecken in Freiberg am Neckar

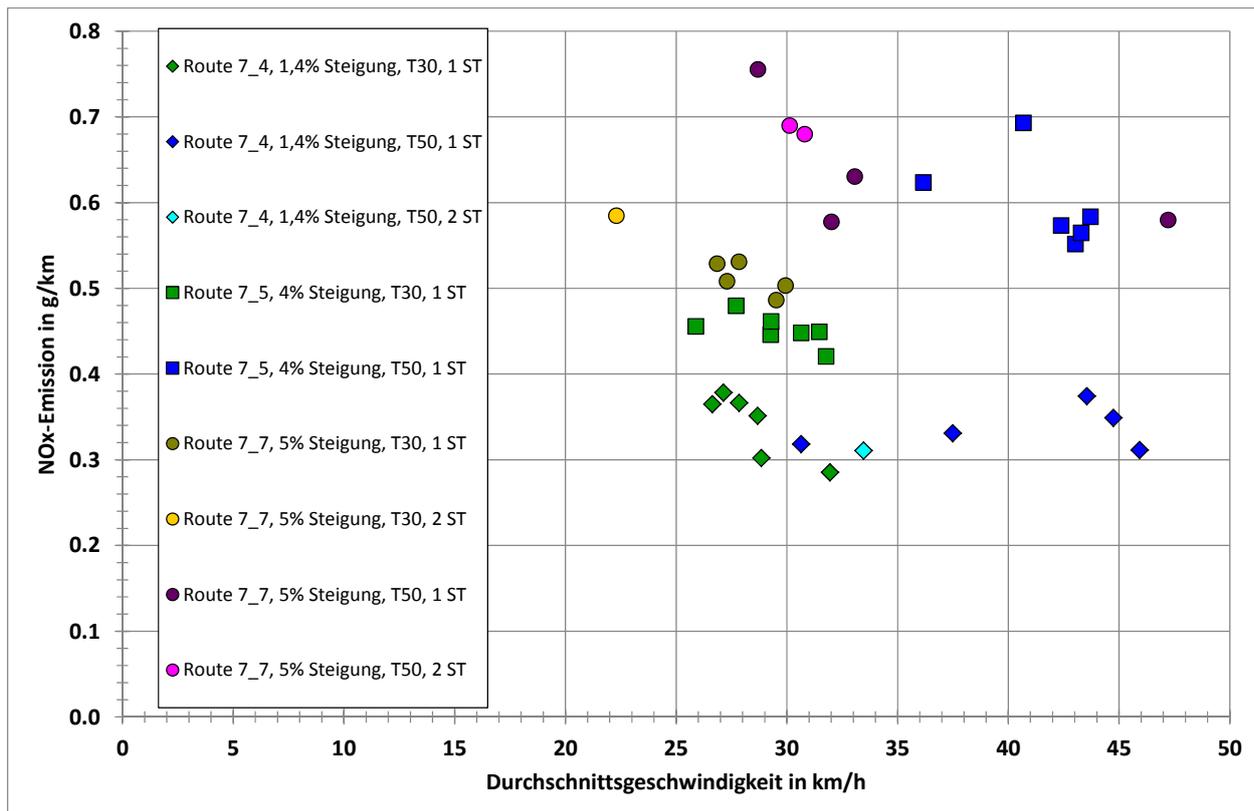


Abbildung 99: NO_x-Emissionen für Steigungsstrecken in Freiberg am Neckar

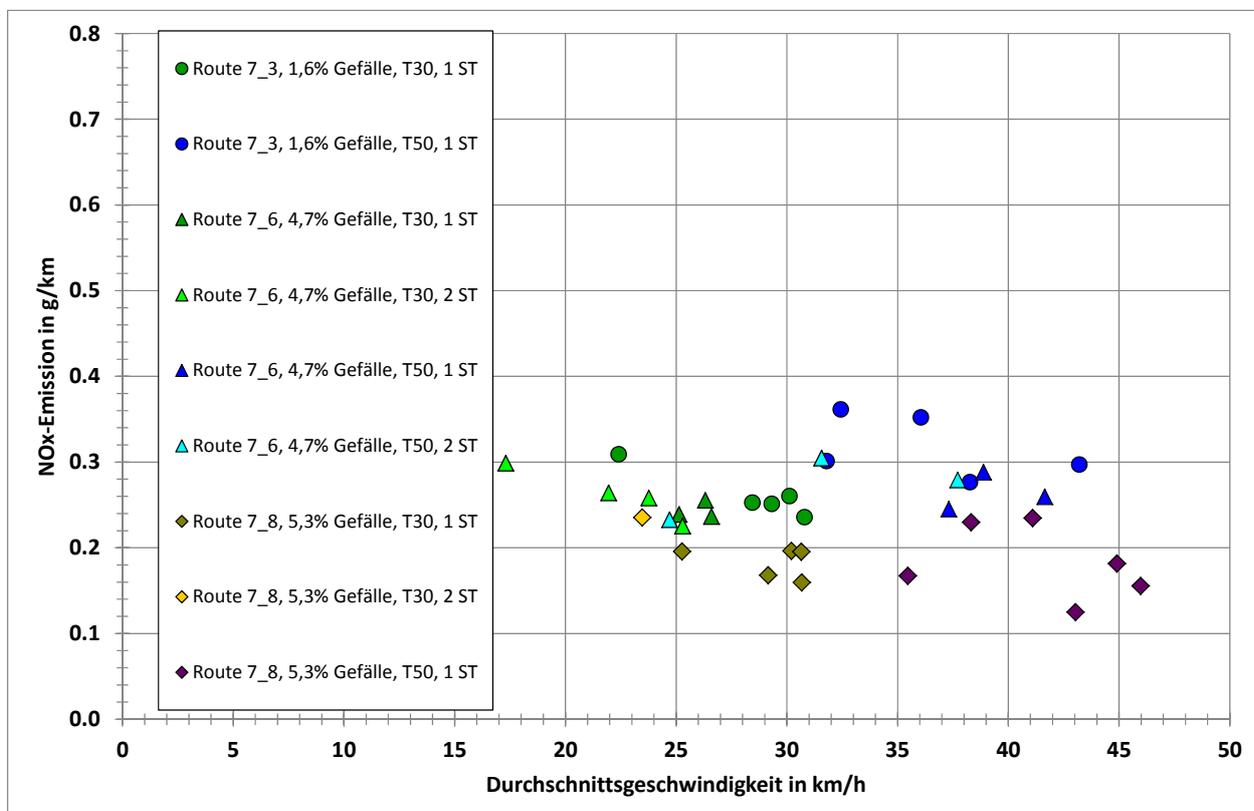


Abbildung 100: NO_x-Emissionen für Gefällestecken in Freiberg am Neckar

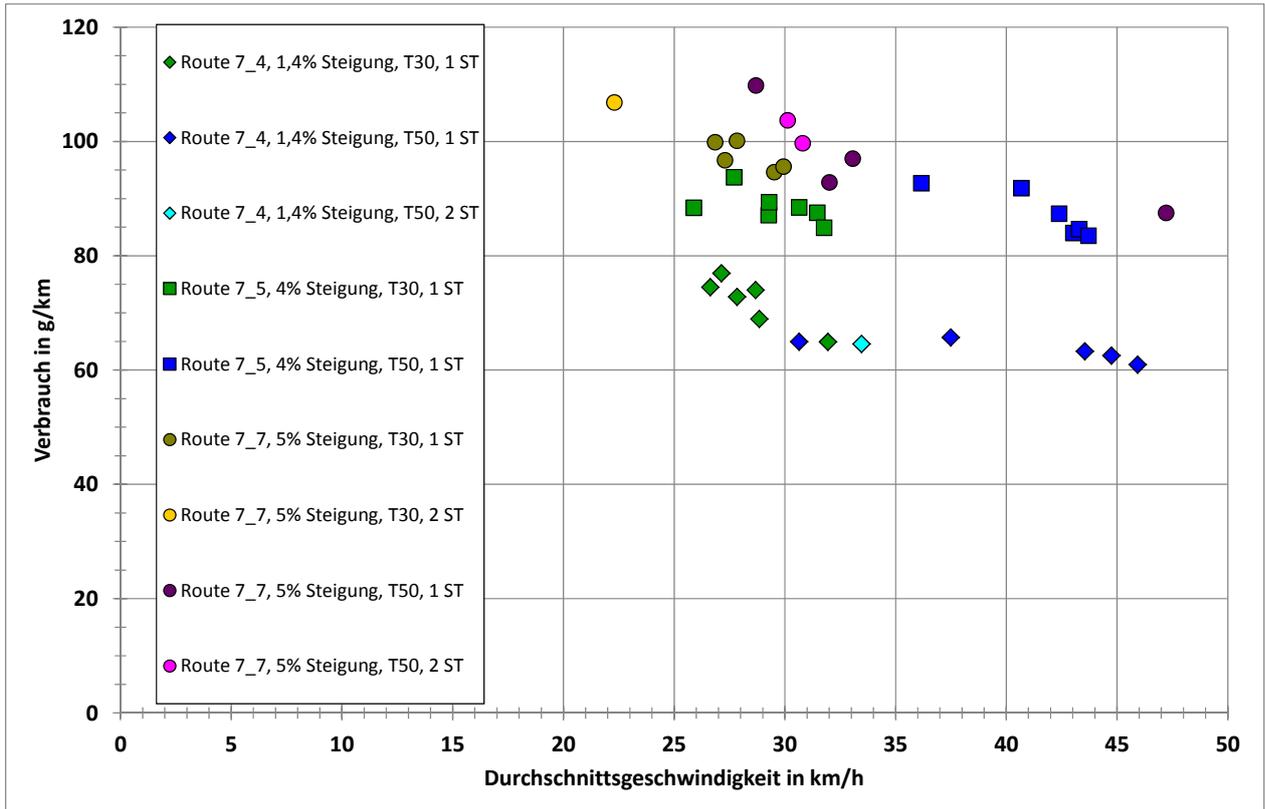


Abbildung 101: Kraftstoffverbrauch für Steigungsstrecken in Freiberg am Neckar

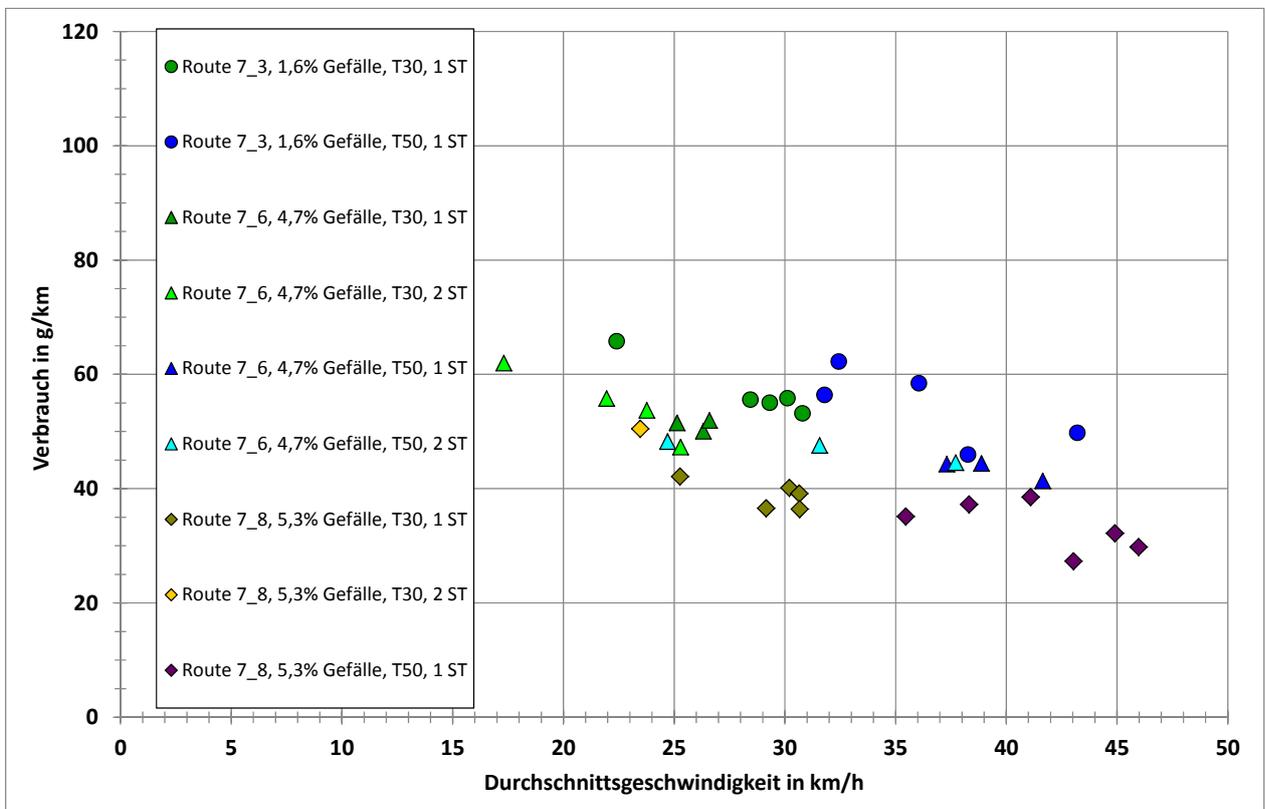


Abbildung 102: Kraftstoffverbrauch für Gefällestrrecken in Freiberg am Neckar

6.7 Diskussion emissionsmindernder Maßnahmen

Die in dem beschriebenen Vorhaben durchgeführten Messungen in Stuttgart mit drei Fahrzeugen auf unterschiedlichen Streckenführungen haben viele Ergebnisse bezüglich des Emissionsverhaltens unter realen Verkehrsbedingungen geliefert. Die Gestaltung des Messprogramms war so angelegt, dass möglichst viele Fragestellungen beantwortet werden konnten. Eine zentrale Frage war der Einfluss der erlaubten Höchstgeschwindigkeit auf Hauptverkehrsstraßen auf die Emissionssituation. Die Auswertungen der Versuchsergebnisse führten hier nicht zu einem eindeutigen Ergebnis. Zwar konnten in Einzelergebnissen leichte Vorteile bei Tempo 40 gezeigt werden, die aber nicht durchgängig nachweisbar waren. Ergebnisse für Tempo 30 zeigten keine Vorteile. PHEM Modellierungen mit den Fahrdaten der real gefahrenen Zyklen zeigten einen eindeutigen Trend zu steigenden Emissionen bei geringeren Geschwindigkeiten. Zugrunde gelegt wurde hier eine Fahrzeugflotte mit einem Anteil von 95% Pkw und 5% leichten Nutzfahrzeugen mit dem Bezugsjahr 2010. Zusammenfassend kann aus diesen Ergebnissen gefolgert werden, dass die Emissionssituation auf den hoch belasteten Hauptverkehrsstraßen in Stuttgart nicht durch eine Reduktion der erlaubten Höchstgeschwindigkeit signifikant verbessert werden kann.

Eine der Auffälligkeiten der Emissionsergebnisse waren die sehr hohen Stickoxidemissionen bei zwei Fahrzeugen, die deutlich über den Werten des Emissionshandbuchs HBEFA 3.1 lagen. Aufgrund der Abgasnachbehandlung mit stark oxidierend wirkenden Komponenten ergeben sich daraus insbesondere bei höherer Motorlast und höheren Abgastemperaturen hohe NO₂-Emissionen. Die direkte Lastabhängigkeit bei der Stickoxidemission führt dazu, dass insbesondere bei Bergfahrten oder Beschleunigungsmanövern der Schadstoffmassenstrom deutlich ansteigt. Da die Straßensteigungen nicht beeinflussbar sind, bleibt als veränderlicher Parameter die Beschleunigung. Beschleunigungszustände sind nach jedem Stop zu finden und steigen in ihrer Häufigkeit durch Störungen im Verkehrsfluss an. Eine sehr effektive Form der Emissionsvermeidung ist bei gegebener Fahrzeugpopulation eine Verstetigung des Verkehrsflusses. Dieses Potenzial ist grundsätzlich vorhanden, kann aber auf den Strecken teilweise nur bedingt genutzt werden. So ist der Stopanteil auf der Strecke Neckartor-Cannstatter Straße jetzt schon sehr gering, so dass eine Verstetigung hier nur sehr bedingt möglich erscheint. Etwas anders stellt sich die Situation auf der Hohenheimer Straße dar. Linksabbiegemöglichkeit auf der eigentlich zweispurigen Straßenführung sowie Einfahren der Straßenbahn in die linke Fahrspur führen zu Verkehrsflussstörungen mit Verzögerungs- und Beschleunigungszuständen. Auch die Parkerlaubnis zu bestimmten Tageszeiten mit daraus resultierender Einspurigkeit führt auf der kritischen Bergfahrtstrecke zu einer Störung der Stetigkeit.

Das größte Potenzial zur Emissionsvermeidung ist bei den Fahrzeugen selbst zu suchen. Wünschenswert wäre hier insbesondere bei den Dieselfahrzeugen die schnelle Einführung weiterer Emissionsgrenzwertstufen (Euro 6). Dabei bleibt allerdings nachzuweisen, dass auch im Realverkehr eine massive Reduktion der Stickoxidemission erreicht wird.

