



PEMS-Messungen an drei Euro 6-Diesel-Pkw auf Streckenführungen in Stuttgart und München sowie auf Außerortsstrecken

 in Zusammenarbeit mit
Bayerisches Landesamt für Umwelt

PEMS-Messungen an drei Euro 6-Diesel-Pkw auf Streckenführungen in Stuttgart und München sowie auf Außerortsstrecken

 in Zusammenarbeit mit
Bayerisches Landesamt für Umwelt

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Postfach 100163, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
BEARBEITUNG	TÜV Nord Mobilität GmbH & Co. KG, Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität, Adlerstraße 7, 45307 Essen Dipl.-Ing. Martin Kleinebrahm Datenanalysen und Gutachten, Dorath 1, 52525 Heinsberg Dipl.-Ing. Heinz Steven
REDAKTION	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Referat 33 – Luftqualität Dr. Werner Scholz Bayerisches Landesamt für Umwelt, Bürgermeister-Ulrich-Str. 160, 86179 Augsburg Referat 23 - Luftreinhalteplanung und Verkehr Dipl.-Ing. (FH) Andrea Wellhöfer
STAND	März 2015
BERICHTSUMFANG	97 Seiten

Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit Zustimmung der LUBW unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ANLASS	7
1 ZUSAMMENFASSUNG	8
2 EINLEITUNG	11
3 ZIELSETZUNG	13
4 VORGEHENSWEISE	14
4.1 Allgemeines	14
4.2 Versuchsfahrzeuge	17
4.2.1 Volkswagen CC (Fahrzeug 1)	17
4.2.2 BMW 320d (Fahrzeug 2)	21
4.2.3 Mazda 6 SKYACTIV-D (Fahrzeug 3)	25
4.3 Messstrecken	27
4.3.1 Stadtrunde Stuttgart	27
4.3.2 Außenrunde Stuttgart	29
4.3.3 München Innenstadt	29
4.3.4 Messrunde Garmisch	30
4.4 Messprogramm	32
5 EINGESETZTE MESSTECHNIK	34
5.1 Messtechnik für gasförmige Komponenten	35
5.2 Messung des Abgasmassenstromes	36
5.3 Messung der Umgebungsdaten	37
5.4 Messung der geodätischen Daten	37
5.5 Fahrzeugdaten	37
5.6 Messtechnikapplikation am Fahrzeug	37
6 ERGEBNISSE	39
6.1 Verteilungen von Geschwindigkeit und Beschleunigung	39
6.1.1 Stuttgart	39
6.1.2 München	45
6.1.3 Garmisch	48
6.2 Emissionen bei Stillstand (Motorleerlauf)	51

6.3	NO _x -Emissionen	54
6.3.1	NO _x -Emissionen im Vergleich zum HBEFA 3.2	57
6.3.2	Streckenvergleich	59
6.3.3	Einfluss des Fahrzustandes (Beschleunigung, Konstantfahrt und Verzögerung)	65
6.3.4	Einfluss der Längsneigung	70
6.3.5	Abhängigkeit der Emissionen von kinematischen Parametern des Geschwindigkeitsverlaufs	72
6.3.6	NO _x -Emissionen in Abhängigkeit von Drehzahl und Motorleistung	81
6.4	NO ₂ /NO _x -Verhältnisse	87
6.5	Ergebnisse der vom ADAC durchgeführten Rollenprüfstandsmessungen	89
7	FAZIT	91
TABELLENVERZEICHNIS		93
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		94

Anlass

Für die Luftreinhaltung stellen hohe Immissionsbelastungen durch Stickstoffdioxid (NO₂) und Überschreitungen der Immissionsgrenzwerte an vielen verkehrsnahen Messstellen ein massives Problem dar. Hauptursache dafür sind die Dieselfahrzeuge mit hohen NO_x- und insbesondere NO₂-Emissionen.

Seit September 2014 gelten die Euro 6-Anforderungen für neue Pkw-Typen, ab September 2015 für alle neu zugelassenen Pkw. Die NO_x-Emissionen der Diesel-Pkw müssen dann von 180 auf 80 mg/km abgesenkt werden, wobei dies weiterhin im wenig realitätsnahen "Neuen Europäischen Fahrzyklus" (NEFZ) auf dem Rollenprüfstand nachzuweisen ist. Entscheidend für die Immissions-situation ist die Frage, ob und in welchem Umfang Emissionsreduzierungen bei Euro 6-Fahrzeugen im realen Fahrbetrieb im Vergleich zu Euro 4- und Euro 5-Fahrzeugen festzustellen sind.

Ziel dieses Projektes, das die Landesumweltämter Baden-Württembergs und Bayerns in Kooperation mit dem TÜV NORD, Heinz Steven Datenanalysen und Gutachten und dem ADAC durchgeführt haben, ist die Erfassung der Emissionen von Euro 6-Diesel-Pkw im Realbetrieb mit PEMS (Portable Emission Measurement System). In den drei ausgewählten Mittelklasse-Fahrzeugen, die vom ADAC zur Verfügung gestellt wurden, kommen unterschiedliche Techniken zur NO_x-Minderung zum Einsatz: SCR mit AdBlue-Eindüsung, NO_x-Speicherkatalysator bzw. innermotorische Maßnahmen. Diese Systeme wurden hinsichtlich ihrer Effektivität und Temperaturabhängigkeit unter Realbedingungen charakterisiert.

Die Befahrungen in Stuttgart fanden auf festgelegten Streckenführungen mit unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten (T30, T40, T50) statt. Darüber hinaus wurde eine Außerortsstrecke im Stuttgarter Umfeld mit in die Untersuchungen einbezogen.

In der Münchener Innenstadt wurde auf einer festgelegten Strecke neben der Fahrt im schwimmenden Verkehr auch T50 gemessen. Die gewählte Außerortsstrecke bei Garmisch beinhaltete neben Landstraßen und Autobahnanteilen auch kurvenreiche Steigungsstrecken.

1 Zusammenfassung

In vielen europäischen Städten werden die Grenzwerte des gesundheitsschädlichen Luftschadstoffs Stickstoffdioxid (NO_2) an städtischen Hauptverkehrsstraßen überschritten. Die europäische Gesetzgebung zur Luftreinhaltung, die mit der 39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (39. BImSchV) in bundesdeutsches Recht umgesetzt wurde, erfordert Maßnahmen, mit denen die Luftqualität verbessert werden kann.

Als Hauptquelle neben der städtischen Hintergrundimmission sind die NO_x - bzw. NO_2 -Emissionen des Straßenverkehrs identifiziert. Hieran sind insbesondere Dieselfahrzeuge beteiligt.

Zwar wurden die gesetzlichen Regelungen für das Emissionsverhalten von Fahrzeugen in der Vergangenheit regelmäßig und massiv verschärft, die Auswirkungen auf die Immissionssituation blieben allerdings gering.

Grund für diese Entwicklung ist neben dem Anstieg der Zahl von Fahrzeugen mit Dieselantrieb auch in einer Diskrepanz zwischen den auf einem Rollenprüfstand in einem Typprüfzyklus nachgewiesenen Emissionen und den Realemissionen im Straßenbetrieb zu suchen.

Seit September 2014 bzw. ab September 2015 gilt die Euro 6-Norm, mit der der Grenzwert für die NO_x -Emissionen der Diesel-Pkw nochmals deutlich abgesenkt wurde (von 180 auf 80 mg/km). In einem früheren Projekt der LUBW, in dem zwei Pkw und ein leichtes Nutzfahrzeug der Emissionsstufe 4 im Realbetrieb untersucht worden sind, wurde die Diskrepanz zwischen Typprüfemissionen und Realemissionen aufgezeigt.

Ziel des hier beschriebenen Projekts ist die Untersuchung des Emissionsverhaltens von Euro 6-Mittelklasse-Pkw im realen Fahrbetrieb.

Zu diesem Zweck haben die LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und das Bayerische Landesamt für Umwelt im Rahmen eines gemeinsamen Projekts umfangreiche Abgasmessungen an Euro 6-Diesel-Pkw bei TÜV Nord und ADAC durchführen lassen.

Getestet wurden drei Euro 6-Mittelklasse-Fahrzeuge mit unterschiedlichen Konzepten zur NO_x -Reduzierung: Ein Volkswagen CC mit SCR-Katalysator, ein BMW 320d mit NO_x -Speicher-katalysator sowie ein Mazda 6 mit rein innermotorischen Maßnahmen zur NO_x -Minimierung. Die unterschiedlichen Abgasnachbehandlungskonzepte der Fahrzeuge repräsentieren alle derzeit zur Einhaltung von Euro 6-Standards am Markt verfügbaren Techniken. Die Messung der Fahrzeugemissionen erfolgte im Realbetrieb mit im Fahrzeug mitgeführten PEMS-Messsystemen (PEMS = portable emission measurement system). Diese erlauben die Erfassung einer Vielzahl von Parametern, insbesondere der NO_x - und NO_2 -Emissionen.

Für die Untersuchungen wurden insgesamt vier Strecken ausgewählt: Hauptverkehrsstraßen in den Stadtzentren von Stuttgart (Streckenlänge: 20 km) und München (11 km) sowie auf zwei Außerortsstrecken (Überland und Autobahn) im Umkreis von Stuttgart (51 km) und Garmisch-Partenkirchen (90 km).

Alle Fahrten wurden durch zwei Fahrer in normaler Fahrweise (max. Beschleunigung $1,5 \text{ m/s}^2$), aber z. T. mit unterschiedlichen Fahraufträgen (Tempo 30, 40 und 50 sowie „mitschwimmen“ im

Verkehrsfluss) durchgeführt. Auch im Hinblick auf die Streckenauswahl und die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Steigung, etc.) entsprachen die Fahrten der normalen, alltäglichen Pkw-Nutzung.

Insgesamt wurden 90 Fahrten mit einer Gesamtstrecke von ca. 2.890 km und einer Gesamtfahrdauer von 79 Stunden durchgeführt. Jede Streckenführung und jeder Fahrauftrag wurde mit jedem der drei Fahrzeuge viermal durchfahren.

Ergänzend zu den PEMS-Messungen wurden auch Messungen auf dem Rollenprüfstand zur systematischen Untersuchung des Temperaturverhaltens der Abgasnachbehandlungssysteme (Tempo 30, 40, 50 für je 10 Minuten mit kaltem und mit warmem Motor) ergänzt.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die im Realbetrieb innerorts und außerorts gemessenen NO_x-Emissionen der untersuchten Euro 6-Fahrzeuge zeigen eine erhebliche Schwankungsbreite, abhängig von Fahrsituation und Nachbehandlungstechnik. Die Bandbreiten der bei den Einzelfahrten festgestellten NO_x-Emissionen sind in Tabelle 1-1 wiedergegeben und liegen innerorts zwischen 130 und 676 mg/km, außerorts zwischen 134 und 618 mg/km NO_x.

Tabelle 1-1: Bandbreiten der NO_x-Emissionsergebnisse

	Mittlere NO _x -Emissionen innerorts [mg/km]	Mittlere NO _x -Emissionen außerorts [mg/km]	Mittlere NO _x -Emissionen für Fahrten < 35 km/h Durchschnittsgeschwindigkeit [mg/km]	NO _x -Grenzwert im NEFZ [mg/km]
Fahrzeug 1	234,1 – 512,9	221,2 – 354,3	345,8	80
Fahrzeug 2	129,8 – 659,6	133,6 – 227,4	339,1	80
Fahrzeug 3	348,0 – 676,5	288,2 – 618,3	420,3	80

Mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren HBEFA 3.2¹ können Berechnungen zur Emissionsbelastung durch Fahrzeugflotten bei realen Straßenfahrten durchgeführt werden. Auch für Euro 6-Fahrzeuge sind hier Daten hinterlegt, die, abhängig von der Durchschnittsgeschwindigkeit, Emissionsprognosen zwischen 120 und 400 mg/km für Stickoxide ergeben. Gegenüber dem Grenzwert für das Typprüfverfahren (80 mg/km) wird hier also schon mit deutlich erhöhten Realemissionen gerechnet.

Vergleicht man die gemessenen Emissionswerte mit berechneten Emissionen aus dem HBEFA für die beschriebenen Verkehrssituationen, ergeben sich für den Volkswagen Emissionswerte, die über größere Bereiche im Streuband der HBEFA-Werte für Euro 6-Fahrzeuge liegen. Für die kleinsten mittleren Geschwindigkeiten sowie für größere Durchschnittsgeschwindigkeiten, die außerhalb des innerstädtischen Verkehrs erreicht werden, steigen die gemessenen Emissionswerte über die HBEFA-Werte für Euro 6-Fahrzeuge.

Der BMW weist über sehr große Bereiche der Durchschnittsgeschwindigkeit Emissionswerte im Streuband des HBEFA auf, lediglich bei den geringsten Geschwindigkeiten fällt eine sehr große Schwankungsbreite der gemessenen Emissionen mit Werten bis 600 mg/km auf.

¹ HBEFA 3.2: The Handbook of Emission Factors for Road Transport, Version 3.2; Umweltbundesamt, Dessau Juli 2014

Der Mazda weist meistens Emissionswerte auf, die oberhalb des HBEFA-Streubandes für Euro 6-Fahrzeuge liegen. Bei höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten (>60 km/h) befinden sich die Emissionen sogar im Streuband für Euro 5-Fahrzeuge.

Weitere Analysen der großen Schwankungsbreiten der Emissionsmesswerte in Geschwindigkeitsbereichen des innerstädtischen Verkehrs zeigen deutliche Unterschiede zwischen Stuttgarter und Münchener Streckenführung. Die höheren Emissionswerte werden in München erreicht. Der Grund hierfür ist in einer höheren Verkehrsdynamik zu suchen. Jeder Beschleunigungszustand verursacht Emissionspeaks bei den Stickoxidemissionen. In der Klassifizierung des HBEFA wird der Verkehr in den beiden Städten allerdings gleich bewertet.

Die Betrachtung der unterschiedlichen Betriebszustände „Beschleunigung, Konstantfahrt und Verzögerung“ zeigt für alle Fahrzeuge einen deutlichen bis starken Anstieg der Emissionen bei Konstantfahrt mit Geschwindigkeiten größer 135 – 140 km/h. Volkswagen und BMW erreichen hier Werte von ca. 500 mg/km. Der Mazda emittiert bis ca. 2000 mg/km. Während Beschleunigungsphasen weisen alle Fahrzeuge erwartungsgemäß erhöhte NO_x-Emissionen auf. Das Verhalten der drei Fahrzeuge ist unterschiedlich ausgeprägt, wobei auch hier der Mazda die höchsten Emissionswerte über 2500 mg/km erreicht.

Der Vergleich der unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten im innerstädtischen Betrieb (T30, T40 und T50) zeigt, dass, wie schon bei den Untersuchungen an Euro 4-Fahrzeugen gezeigt, eine geringere Höchstgeschwindigkeit nicht zu einer Verminderung der NO_x-Emissionen führt.

Um den Einfluss der Fahrdynamik, wie er in Stuttgart und München als Ursache für stark unterschiedliche Emissionen identifiziert worden ist, quantifizieren zu können, wurden Untersuchungen von fahrdynamischen Parametern durchgeführt. Sehr gute Korrelationen ließen sich herausarbeiten, wenn die relative positive Beschleunigung auf die Durchschnittsgeschwindigkeit bezogen wurde und mit der Anzahl der NO_x-Peaks pro Kilometer multipliziert wurde. Diese Kennzahl ist ein Maß für die streckenbezogene Fahrdynamik, geprägt von Anfahr- und Beschleunigungsvorgängen. Der Vergleich der drei Fahrzeuge zeigt, dass die Fahrten des Volkswagen mit geringeren Fahrdynamikkennzahlen durchgeführt werden konnten. Offensichtlich sind hier weniger Stop and Go Zustände aufgetreten als bei den anderen Fahrzeugen. Die Auswertungen zeigen für alle drei Fahrzeuge ein Potential zur Emissionsabsenkung durch eine Verstetigung des Verkehrs.

Die Darstellung der NO_x-Massenemissionen über Drehzahl und Leistung der Motoren zeigt für alle Fahrzeuge unterschiedliche Ausprägungen. Diese sind system- und applikationsbedingt und spiegeln das Realemissionsverhalten wider. Identifiziert man die Kennfeldbereiche, die mit größten Zeitanteilen im NEFZ² bedient werden, ist allen Fahrzeugen eine Emissionsoptimierung in diesen Bereichen anzusehen.

Untersucht wurde auch das NO₂/NO_x-Verhältnis der Fahrzeuge, das eine Aussage über die direkt emittierten NO₂-Anteile im Abgas erlaubt. Während die Euro 4-Fahrzeuge der Untersuchung von LUBW und TÜV NORD aus 2010 teilweise NO₂/NO_x-Verhältnisse deutlich über 50% aufwiesen, zeigen die untersuchten Euro 6-Fahrzeuge mit SCR und NO_x-Speicherkatalysator Verhältnisse in der Nähe von 30%. Gemeinsam mit dem geringeren Gesamt-NO_x-Emissionsniveau sind somit die direkten NO₂-Massenemissionen gegenüber Euro 4-Fahrzeugen deutlich reduziert. Das Fahrzeug

² NEFZ: Neuer Europäischer Fahrzyklus; Rollenprüfstandtest für die Typprüfung

mit innermotorischen Maßnahmen zeigt ein sehr niedriges NO_2/NO_x -Verhältnis von etwa 10% und liegt damit nur geringfügig über den NO_2/NO_x -Verhältnissen des motorischen Rohabgases.

Vor Beginn und nach Abschluss der PEMS-Messungen wurde mit jedem Fahrzeug der Typprüfzyklus NEFZ auf dem Rollenprüfstand des ADAC gefahren. Alle Fahrzeuge erfüllten jeweils die Anforderungen der Euro 6-Norm. Als Fazit bleibt zu resümieren, dass angesichts der Probleme in der Luftreinhaltung mit der Überschreitung der NO_2 -Immissionsgrenzwerte an stark befahrenen innerstädtischen Straßen die in dieser Untersuchung festgestellten NO_x -Emissionen der untersuchten Euro 6-Mittelklasse-Pkw noch deutlich zu hoch sind.

Die NO_x -Emissionen im Innerortsbereich liegen um den Faktor 1,6 – 8,5, im Außerortsbereich um den Faktor 1,7 – 7,7 über dem Grenzwert der Euro 6-Norm von 80 mg/km.

Betrachtet man nur die Fahrten mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit unter 35 km/h, die repräsentativ für innerstädtischen Betrieb sind, so überschreiten die NO_x -Emissionen den Grenzwert um den Faktor 4,2 – 5,3.

Die Einführung eines verschärften Zulassungsverfahrens im Sinn des RDE-Prozesses (RDE = Real Driving Emissions, reale Fahremissionen) wird als unbedingt notwendig angesehen, um in absehbarer Zeit der Einhaltung der Immissionsgrenzwerte näherzukommen.

2 Einleitung

Zur Ermittlung und Sicherstellung der Luftqualität gelten in Europa einheitliche Regelungen. Mit der 39. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (39. BImSchV) wurde die aktuelle Europäische Richtlinie 2008/50/EG über Luftqualität und saubere Luft in deutsches Recht umgesetzt.

Für Gebiete, in denen Überschreitungen der maßgeblichen EU-Luftqualitätsgrenzwerte festgestellt werden, sind Luftreinhaltepläne aufzustellen, in denen u.a. die zur Verbesserung der Luftqualität erforderlichen Maßnahmen festgelegt werden.

Die nachfolgende Tabelle 2-1 gibt einen Überblick über die Grenzwerte für Stickstoffdioxid (NO_2) und Partikel (PM_{10}). Die Grenzwerte für Partikel sind seit 2005 gültig, die für NO_2 seit 2010.

Tabelle 2-1: Grenzwerte für NO_2 und PM_{10}

Schadstoff	Zeitbezug	Grenzwert [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM_{10}	Jahresmittelwert	40
	Tagesmittelwert	50, maximal 35 Überschreitungen im Jahr
NO_2	Jahresmittelwert	40
	Stundenmittelwert	200, maximal 18 Überschreitungen im Jahr

Basis vieler Betrachtungen zur Emissionssituation auf bundesdeutschen Straßen ist das Handbuch für Emissionsfaktoren, kurz HBEFA. In Abhängigkeit von der Verkehrssituation, der Zusammen-

setzung der Fahrzeugflotte und der Verkehrsbelastung wird hier mit Hilfe von Emissionsfaktoren eine theoretische Emissionsbelastung berechnet. Grundlage für die Ermittlung der Emissionsfaktoren ist das Simulationsmodell PHEM³, welches an der TU Graz entwickelt wurde. Eingangsgrößen für das Simulationsmodell sind Prüfstandsergebnisse für diverse Fahrzeuge. Aus der Handbuchversion 2.1 wurde mit neuer Datenbasis, insbesondere für Fahrzeuge der Emissionsstufen 4 bis 6, sowie mit einem verbesserten PHEM-Modell die Handbuchversion 3.2 entwickelt, die seit Juli 2014 vorliegt.

Die Stadt Stuttgart weist an den straßennahen Messstationen eine erhebliche Problematik bei den NO₂-Immissionen auf; die Immissionsgrenzwerte für NO₂ werden dort teilweise erheblich überschritten. Neben anderen Emissionsquellen sind die Verkehrsemissionen und hier insbesondere die NO- und NO₂-Emissionen aus Dieselfahrzeugen als Probleme bekannt.

Im Jahre 2010 wurde aus diesem Grund durch die LUBW ein Projekt durchgeführt, in dem die NO_x-Emissionen von drei Dieselfahrzeugen des Emissionsstandards Euro 4 auf Streckenführungen in Stuttgart gemessen wurden. Es handelte sich hierbei um ein Fahrzeug der unteren Mittelklasse, ein Fahrzeug der oberen Mittelklasse sowie ein Fahrzeug der Transporterklasse. Die je nach Fahrsituation teilweise sehr hohen Stickoxidemissionen, die bei diesen Messungen ermittelt wurden, zeigten die bestehende Problematik sehr deutlich auf. Auf Basis dieser Untersuchungen sowie weiteren Arbeiten der LUBW wurden in Stuttgart in der Hohenheimer Straße verkehrsbeeinflussende Maßnahmen umgesetzt, die nachweisbare Verbesserungen nach sich zogen. Die Möglichkeiten der verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen sind allerdings sehr eingeschränkt, so dass eine massive Reduzierung der Fahrzeugemissionen zur Unterschreitung der Immissionsgrenzwerte zwingend notwendig ist, will man auf verkehrsvermeidende Maßnahmen verzichten.

Die Einführung des Euro 6-Emissionsstandards und die Einhaltung niedrigster Emissionswerte bei Realfahrten durch Euro 6-Fahrzeuge sowie eine möglichst schnelle Flottendurchdringung mit Euro 6-Fahrzeugen wird von verantwortlichen Stellen des Immissionsschutzes als derzeit effektivste Möglichkeit gesehen, die Grenzwerteinhaltung zu erreichen, ohne verkehrsvermeidende Maßnahmen durchsetzen zu müssen.

In der Konsequenz hat die LUBW gemeinsam mit dem ADAC, dem TÜV NORD sowie den Landesumweltämtern Bayerns und Nordrhein-Westfalens unter Beteiligung des Umweltbundesamtes ein Projekt geplant, welches die Emissionsvermessung von ersten verfügbaren Euro 6-Diesel-Pkw der Mittelklasse im realen Fahrbetrieb zum Inhalt hat. Die inhaltliche Ausrichtung wurde mit den Erfahrungen aus dem 2010er Projekt sowie unter Berücksichtigung der fortschreitenden RDE-Diskussion⁴ innerhalb der EU angepasst. Die Versuchsfahrzeuge repräsentieren hierbei unterschiedliche Technologien zur Euro 6-Grenzwertbefreiung.

³ PHEM (Passenger car and Heavy duty Emission Model), Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, TU Graz

⁴ Diskussion zur Fortschreibung der Abgasemissionsrichtlinie mit Aufnahme der „Real Driving Emission“

3 Zielsetzung

In konsequenter Fortführung der Untersuchungen aus dem Jahr 2010 wurden die NO_x-Emissionen von drei Euro 6-Dieselfahrzeugen auf Streckenführungen in Stuttgart, München und zwei Außerortsstrecken gemessen. Mit den Erfahrungen des ersten Projektes wurden die Streckenführungen so gewählt, dass zum einen eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen von 2010 gegeben ist und die Lage der Messstationen berücksichtigt wird und zum anderen über neue Streckenführungen Fahrmuster berücksichtigt werden, die weitergehende Aussagen ermöglichen. Hier standen eine möglichst große Kennfeldabdeckung, spezifische Betriebszustände der Abgasnachbehandlungssysteme sowie eine breite Datenbasis zur Verwendung für weitere Untersuchungen z.B. im RDE-Prozess im Vordergrund.

Da trotz der Erkenntnisse aus dem Projekt von 2010 weiterhin ein Diskussionsbedarf bezüglich unterschiedlicher Höchstgeschwindigkeitsgrenzen besteht, wurden auch in diesem Projekt Untersuchungen zu Befahrungen mit unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten durchgeführt. Hierbei lag allerdings der Fokus eher auf dem Verhalten der Abgasnachbehandlungssysteme bzw. der Abgasminderungskonzepte. Zu diesem Thema wurden zusätzlich durch die LUBW beim ADAC Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand in Auftrag gegeben, in denen das Verhalten von Abgasnachbehandlungssystemen bei unterschiedlichen Randbedingungen, insbesondere bei längerer Fahrt mit geringen Höchstgeschwindigkeiten, systematisch beleuchtet wurde. Die Wahl der Streckenführungen für die Emissionsmessungen auf der Straße oblag hierbei den Landesbehörden, die bei ihrer Auswahl eine möglichst hohe Aussagekraft für unterschiedliche Fragestellungen anstrebten. Für Stuttgart bedeutete dies, dass für eine Vergleichbarkeit mit den Messungen aus 2010 auch Anteile der Streckenführung in Wohngebieten lagen und auch Steigungsstrecken berücksichtigt wurden. Die Streckenführung in München beinhaltete die dort vorliegende Situation in Verbindung mit der Einführung einer Geschwindigkeitsbeschränkung auf der Landshuter Allee.

Um eine große Abdeckung von möglichen Fahrmustern zu erreichen, wurde noch eine Streckenführung bei Garmisch-Partenkirchen im Außerortsbereich mit kurvenreichen Steigungsstrecken und Autobahnanteilen, die auch höhere Geschwindigkeiten ermöglichen, definiert.

Die Auswertung der Messfahrten erfolgte nach Aufbereitung des Datenmaterials und Einbringung der Daten in eine Datenbank. Die Auswertung wurde, wie bei der Untersuchung im Jahr 2010, durch Heinz Steven, Datenanalysen und Gutachten, durchgeführt. Zusätzlich zu den Daten, die über die PEMS-Messtechnik aufgenommen wurden, sollte versucht werden, Informationen aus den Fahrzeugsteuergeräten auszulesen, um die Möglichkeit für weitere Auswertungen zu schaffen.

4 Vorgehensweise

4.1 Allgemeines

Die Markteinführung von Euro 6-Fahrzeugen erfolgte bisher zuerst über Fahrzeuge der oberen Klassen. Die Projektarchitektur mit der Beteiligung des ADAC legte nahe, Euro 6-Fahrzeuge, die im Fuhrpark des ADAC als Dauertestfahrzeuge betrieben werden, für die geplanten Messungen zu verwenden. Die zur Verfügung stehenden Fahrzeugtypen repräsentieren nur sehr bedingt die erwartete zukünftige Flottenzusammensetzung mit Euro 6-Fahrzeugen, was dem Umstand geschuldet ist, dass zum Zeitpunkt des Projektstarts die Massenmodelle noch nicht als Euro 6-Version verfügbar waren. Abbildung 4-1 zeigt die meistverkauften Fahrzeugtypen innerhalb der EU im Jahr 2013.

Die als Versuchsfahrzeuge zur Verfügung stehenden Modelle eignen sich andererseits sehr gut für die Untersuchungen, da sie die derzeit am Markt anzutreffenden Abgasminderungstechnologien repräsentieren und zudem dem Mittelklassesegment zuzurechnen sind. Abbildung 4-2 zeigt die nach Segmenten geordneten PKW-Zulassungszahlen innerhalb der EU. Zwei Drittel der Neufahrzeuge setzen sich hier aus Fahrzeugen unterhalb des Medium-Segmentes zusammen. Schon im Lower-Medium Bereich sind hier über 60% Dieselfahrzeuge vertreten, wie Abbildung 4-3 zeigt.

In diesen unteren Fahrzeugsegmenten ist als Abgasminderungsstrategie die NO_x-Speicherkatalysator-Technologie häufig anzutreffen. In diesem Projekt wird diese Technologie durch den BMW 320d vertreten.

Bei Fahrzeugen der Mittelklasse und darüber wird oft die SCR-Technologie eingesetzt. Unter den Versuchsfahrzeugen wurde diese Technologie durch den Volkswagen CC vertreten.

Beim dritten Versuchsfahrzeug handelt es sich um einen Mazda 6, der mit der von Mazda „Sky Activ“ benannten Technologie ausgerüstet ist. In diesem Fahrzeug ist keine NO_x-mindernde Abgasnachbehandlung verbaut. Die Erfüllung der Grenzwerte wird hier ausschließlich durch innermotorische Maßnahmen realisiert.

PKW-Verkaufszahlen

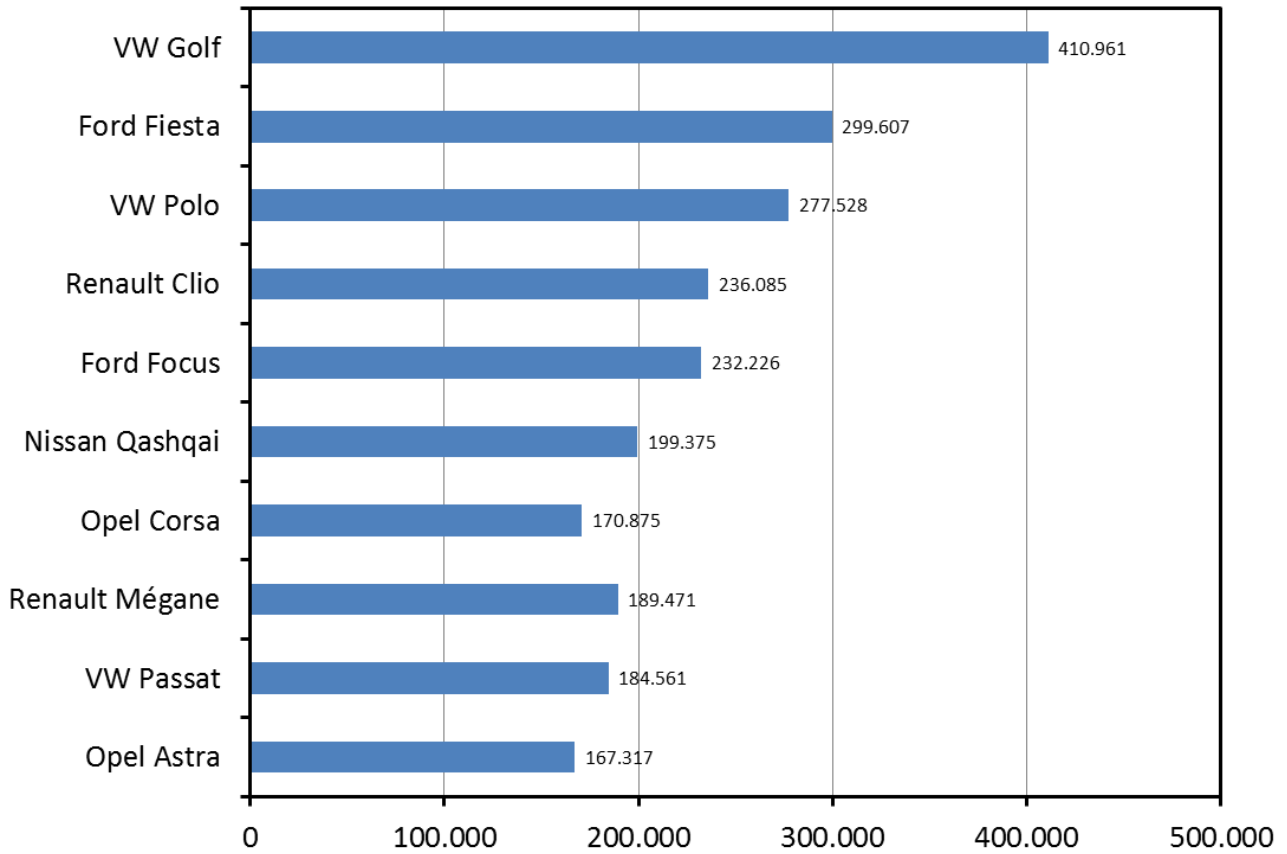


Abbildung 4-1: Meistverkaufte PKW in der EU im Jahr 2013. Quelle: European Vehicle Market Statistics; Pocketbook 2013; ICCT

Neuzulassungen (Millionen)

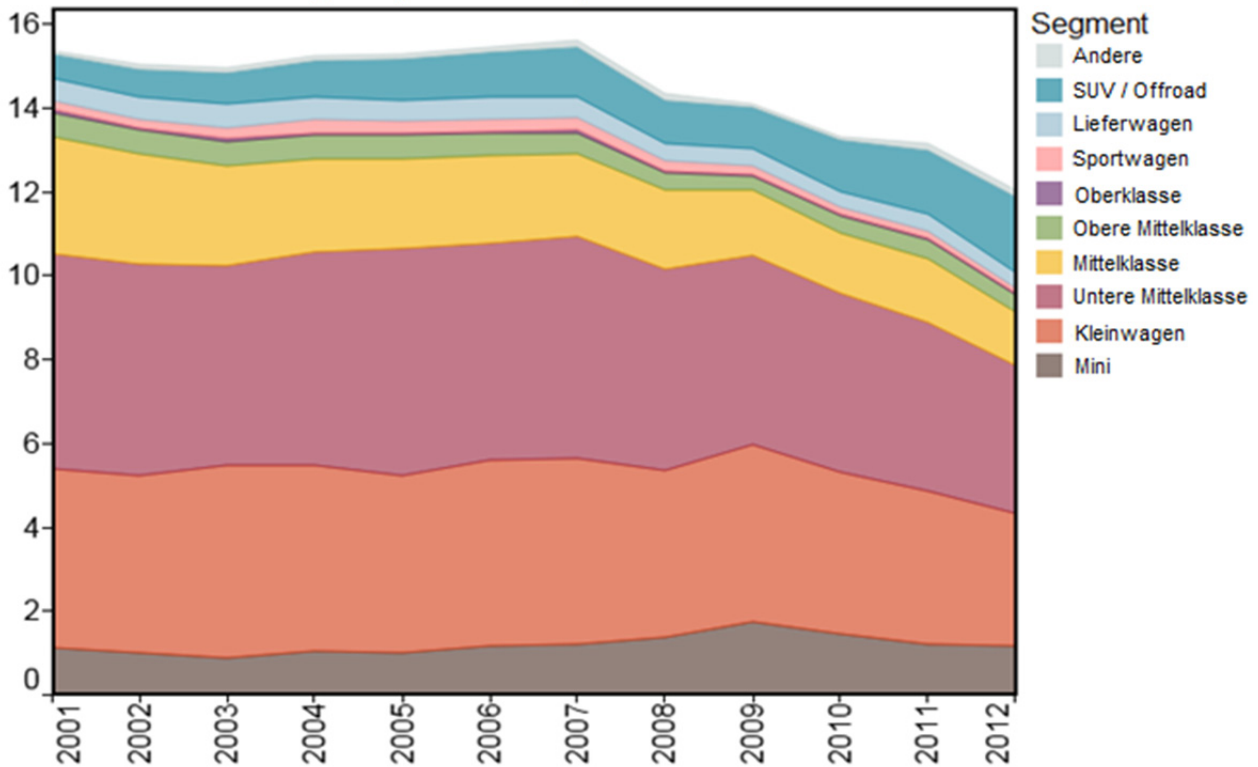


Abbildung 4-2: PKW-Segmente in der EU. Quelle: European Vehicle Market Statistics; Pocketbook 2013; ICCT

Marktanteil an Diesel-Fahrzeugen

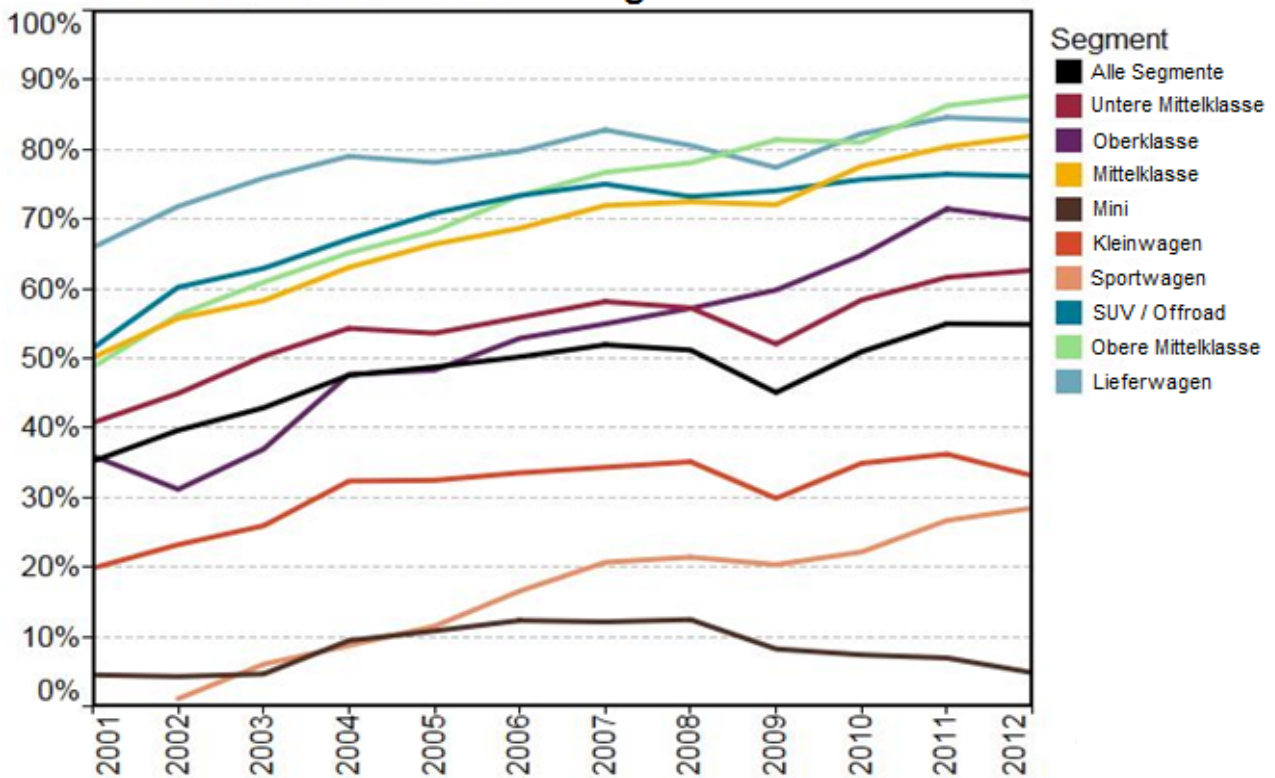


Abbildung 4-3: Diesel-Anteil in PKW-Segmenten innerhalb der EU. Quelle: European Vehicle Market Statistics; Pocketbook 2013; ICCT

4.2 Versuchsfahrzeuge

Die Verfügbarkeit von Euro 6-Fahrzeugen war zu Beginn der Projektplanung noch sehr gering. Der ADAC hatte zu diesem Zeitpunkt drei Euro 6-Fahrzeuge der Mittelklasse als Dauerlauffahrzeuge in seinem Fuhrpark und war bereit, diese für die Versuchsfahrten zur Verfügung zu stellen. Die Versuchsfahrzeuge durchliefen im ADAC-Dauerlauf unter anderem auch Rollenprüfstandsmessungen im Typprüfzyklus NEFZ sowie im ADAC ECO-Test. Hierüber wurde die Regelwerkskonformität der Fahrzeuge vor den PEMS-Messungen sichergestellt. Auch nach Abschluss der PEMS-Messungen wurden die Rollenprüfstandsmessungen wiederholt, um die immer noch bestehende Regelwerkskonformität zu bestätigen. Die Fahrzeuge werden im Folgenden vorgestellt.

4.2.1 Volkswagen CC (Fahrzeug 1)



Abbildung 4-4: Volkswagen CC (Fahrzeug 1)

Der Volkswagen CC (Abbildung 4-4) tritt als 4-türige Limousine auf, die konzeptionell der Volkswagen Passat-Familie sehr ähnlich ist. Wie Abbildung 4-1 zu entnehmen ist, gehört der Volkswagen Passat noch zu den zehn meistverkauften Fahrzeugtypen in der EU. Somit ist der Volkswagen CC wohl das Fahrzeug unter den drei Versuchsfahrzeugen, welches am ehesten die Massenfahrzeuge in der Mittelklasse repräsentiert.

Das Abgasnachbehandlungskonzept dieses Fahrzeuges ist als Kombination von Partikelfilter und SCR-Katalysator (SCR = Selective Catalytic Reduction) ausgeführt. Abbildung 4-5 zeigt den Aufbau des Abgasnachbehandlungssystems. Die Stickstoffoxidreduktion erfolgt hier durch den SCR-Katalysator, der zur katalytischen Reaktion auf NH_3 (Ammoniak) als Reagenz angewiesen ist. NH_3 wird über einen vorgeschalteten Hydrolysekatalysator und möglicher Thermolyse aus einer eingedüsten 32-prozentigen Harnstofflösung (AdBlue[®]) erzeugt. Für die Aktivierung des Systems sind Minimaltemperaturen notwendig, um die korrekte Aufbereitung des Harnstoffes sicherzustellen und eine hinreichende Katalysatoraktivität zu erzielen.

In Tabelle 4-1 sind die technischen Daten des Versuchsfahrzeugs zusammengefasst.

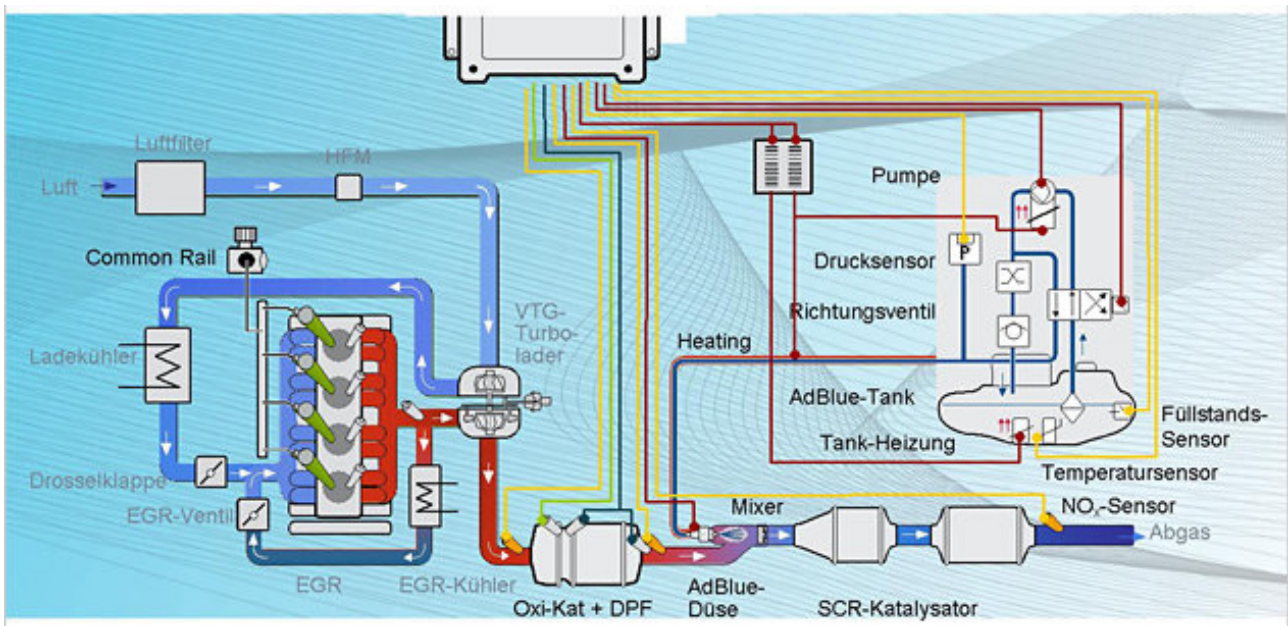


Abbildung 4-5: Abgasmachbehandlung im Volkswagen CC. Quelle: siehe Fußnote ⁵

⁵http://www.auto-news.de/test/einzeltest/bildergalerie_VW-Passat-Variant-BlueTDI-im-Test-Euro-6-per-SCR-schon-heute_id_23922&picindex=16

Tabelle 4-1: Technische Daten Volkswagen CC

Technische Daten	
Typ:	Volkswagen CC
Karosserie:	4-türige Limousine
FIN:	WVWZZZ3CZEE501101
Motor:	4-Zylinder Viertakt-Dieselmotor, Abgasturboaufladung, Common Rail
Hubraum:	1968 cm ³
Leistung:	103 kW bei 4200 min ⁻¹
max. Drehmoment:	320 Nm bei 1750-2500 min ⁻¹
Getriebe:	automatisiertes 6-Gang Doppelkupplungs-Schaltgetriebe
Antrieb:	Frontantrieb
Abgasminderungskonzept:	Partikelfilter und SCR System
Leergewicht (inkl. Fahrer 75kg):	1599 kg
zulässiges Gesamtgewicht:	2110 kg
Test-Zuladung:	152 kg
Reifengröße:	205/50 R17
CO ₂ -Emissionen:	131 g/km (gemäß VO 692/2008)
Höchstgeschwindigkeit:	212 km/h
Abgasnorm:	715/2007*566/2011Q
	EURO6;Q;Ci;M,N1 I
Kilometerstand zu Beginn der Messungen:	75.806 km
Erstzulassung:	19.06.2013

Aus den Angaben zur Nennleistung und zum maximalen Drehmoment wurde näherungsweise die in Abbildung 4-6 dargestellte Vollast-Leistungskurve erstellt, mit deren Hilfe die aus dem Motorsteuergerät erhaltenen Motorbelastungswerte für spätere Auswertungen in Motorleistungswerte umgerechnet wurden.

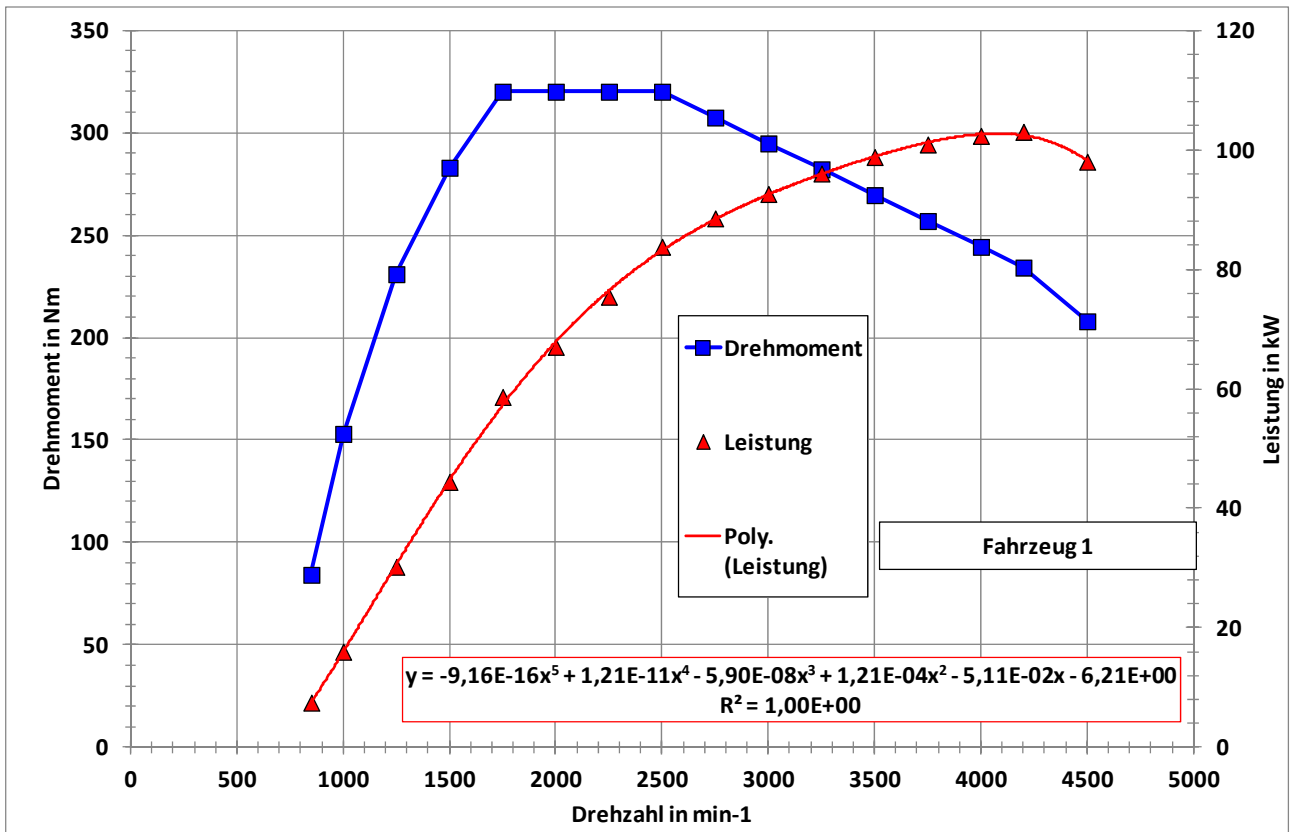


Abbildung 4-6: Motorleistungskurve Volkswagen CC

4.2.2 BMW 320d (Fahrzeug 2)



Abbildung 4-7: BMW 320d (Fahrzeug 2)

Der BMW 320d als 5-türige Kombilimousine repräsentiert den Bereich der sportlichen Mittelklasse-Kombifahrzeuge. Er ist mit 120 kW Leistung das leistungsstärkste Fahrzeug unter den drei Versuchsfahrzeugen.

Das Abgasreinigungskonzept des BMW 320d mit einem NO_x-Speicherkatalysator kommt ohne zusätzliche Reagenzien aus. Konzepte mit NO_x-Speicherkatalysator finden die meiste Anwendung in kleineren Hubraumklassen. Die 2,0 Liter Hubvolumen des BMW sind hier wohl als oberes Grenzvolumen in der Verbreitung der Speicherkatalysatoren zu sehen. Abbildung 4-8 zeigt das BMW-System mit dem NO_x-Speicherkatalysator und dem nachgeschalteten Dieselpartikelfilter.

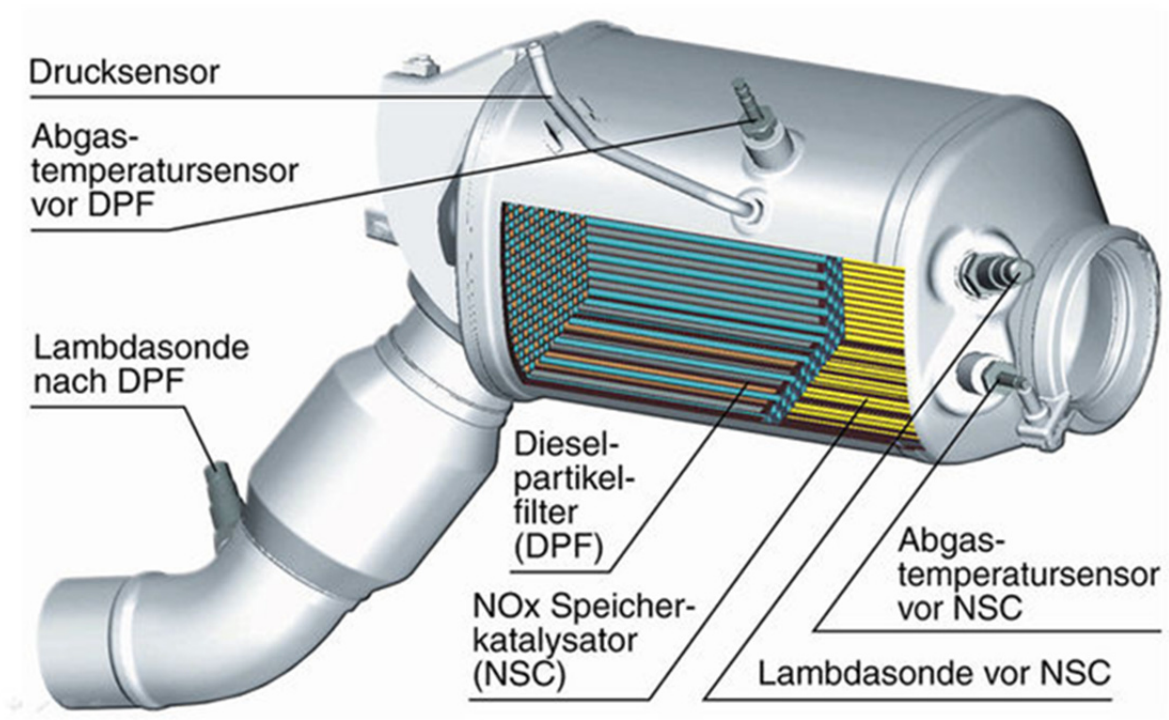


Abbildung 4-8: BMW NO_x-Speicher-katalysator und Dieselpartikelfilter. Quelle: siehe Fußnote ⁶

⁶ <http://www.auto-motor-und-sport.de/bilder/bmw-nox-speicherkat-die-euro-6-stickoxid-falle-6219243.html>

Tabelle 4-2 zeigt die technischen Daten des BMW.

Tabelle 4-2: Technische Daten BMW 320d

Technische Daten	
Typ:	BMW 320d
Karosserie:	5-türige Kombi Limousine
FIN:	WBA3L11050F282302
Motor:	4-Zylinder Viertakt-Dieselmotor, Abgasturboaufladung, Common Rail
Hubraum:	1995 cm ³
Leistung:	120 kW bei 4000 min ⁻¹
max. Drehmoment:	380 Nm bei 1750-2750 min ⁻¹
Getriebe:	8-Gang Automatikgetriebe
Antrieb:	Heckantrieb
Abgasminderungskonzept:	NO _x -Speicherkatalysator und Partikelfilter
Leergewicht (inkl. Fahrer 75kg):	1575 kg
zulässiges Gesamtgewicht:	2050 kg
Test-Zuladung:	146 kg
Reifengröße:	205/60 R16
CO ₂ -Emissionen:	112 g/km (gemäß VO 692/2008)
Höchstgeschwindigkeit:	222 km/h
Abgasnorm:	715/2007*630/2012T EURO6;T;Cl;M,N1 I
Kilometerstand zu Beginn der Messungen:	68.753 km
Erstzulassung:	14.05.2013

Die Vollast-Leistungskurve ist in Abbildung 4-9 dargestellt.

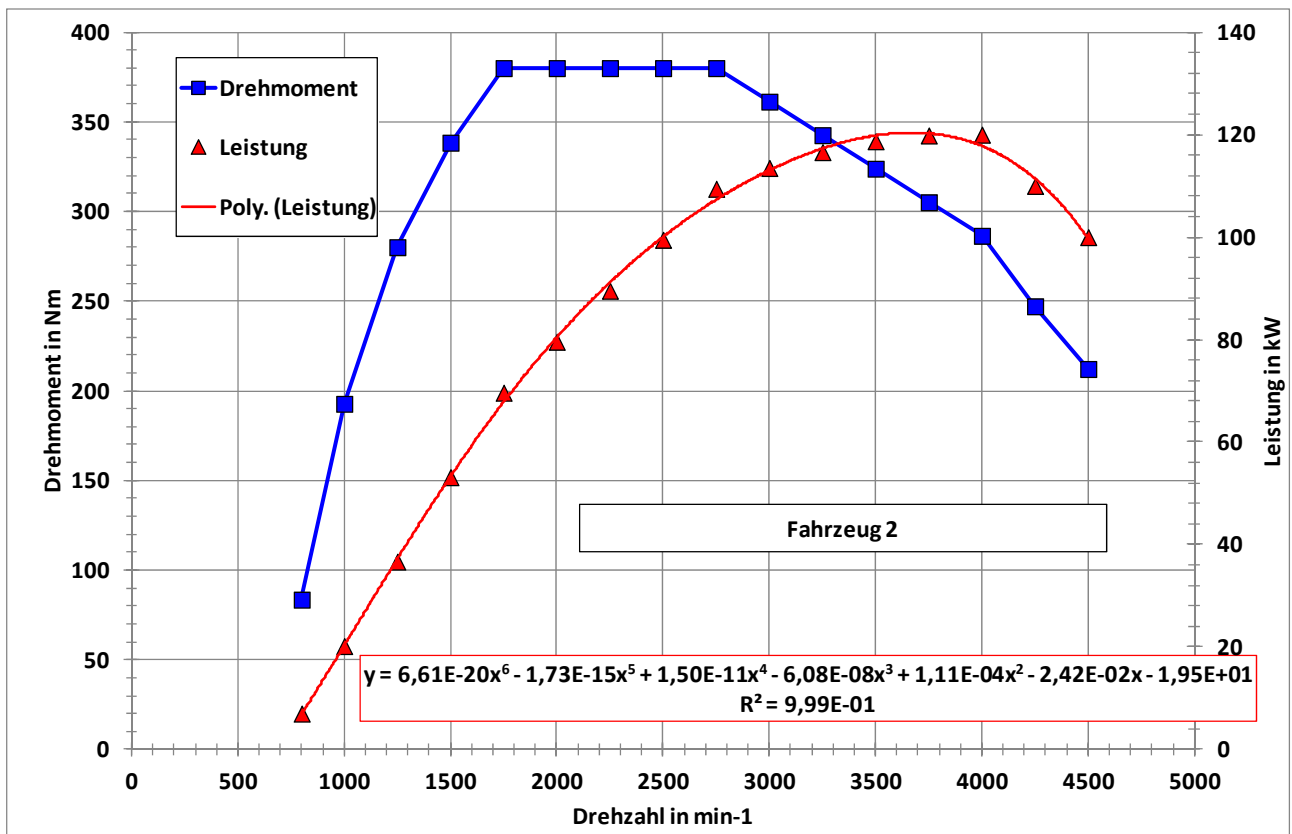


Abbildung 4-9: Motorleistungskurve BMW 320d

4.2.3 Mazda 6 SKYACTIV-D (Fahrzeug 3)



Abbildung 4-10: Mazda 6 SKYACTIV-D (Fahrzeug 3)

Der Mazda 6 (Abbildung 4-10) stellt innerhalb der Versuchsfahrzeuge eine Besonderheit dar, da das SKYACTIV-Konzept keinerlei NO_x -reduzierende Abgasnachbehandlung verwendet. Die Stickstoffoxid-Grenzwerte der Euro 6 werden hier allein durch innermotorische Maßnahmen der Verbrennungsführung und einer Abgasrückführung unterschritten. Kernmaßnahme beim SKYACTIV-Konzept ist die Reduzierung der Verdichtung auf 14:1. Mit der entsprechenden Verbrennungsführung wird hierdurch eine Absenkung der Verbrennungstemperaturen sowie der Spitzendrücke erreicht, welches in Verbindung mit einer verbesserten Gemischbildung zu niedrigen NO_x - und Partikelrohmissionen des Motors führt. Durch die Reduktion der mechanischen Belastung konnte das Triebwerkskonzept durch Anpassung von Materialien (Aluminium an Stelle von Stahl) sowie veränderten Dimensionierungen von Bauteilen so ausgelegt werden, dass neben einer günstigen Verbrennungsführung auch mechanische Verluste und Gewicht reduziert werden konnten.

Problemen bei Kaltstart und Warmlauf durch die niedrige Verdichtung wurde mit komplexen Einspritzmustern und Abgasrückführung über ein leicht geöffnetes Auslassventil während des Warmlaufs begegnet.

Wie die beiden anderen Fahrzeuge verfügt auch der Mazda über einen geschlossenen Partikelfilter.

Als 5-türige Kombilimousine bietet der Mazda das größte Platzangebot unter den Versuchsfahrzeugen. Als einziges Fahrzeug ist der Mazda mit einem manuell geschalteten 6-Gang Getriebe ausgerüstet.

Tabelle 4-3 zeigt die technischen Daten des Mazda 6.

Tabelle 4-3: Technische Daten Mazda 6 SKYACTIV-D

Technische Daten

Typ:	Mazda 6
Karosserie:	5-türige Kombilimousine
FIN:	JMZGJ691621107283
Motor:	4-Zylinder Viertakt-Dieselmotor, zweistufige Abgasturboaufladung
Hubraum:	2191 cm ³
Leistung:	110 kW bei 4500 min ⁻¹
max. Drehmoment:	380 Nm bei 2000 min ⁻¹
Getriebe:	manuell geschaltetes 6-Gang Getriebe
Antrieb:	Frontantrieb
Abgasminderungskonzept:	Innere motorische Maßnahmen zur Stickoxidminderung, Mazda SKYACTIVE-D; Partikelfilter
Leergewicht (inkl. Fahrer 75kg):	1578 kg
zulässiges Gesamtgewicht:	2090 kg
Test-Zuladung:	150 kg
Reifengröße:	225/55 R17
CO ₂ -Emissionen:	116 g/km (gemäß VO 692/2008)
Höchstgeschwindigkeit:	210 km/h
Abgasnorm:	715/2007*630/2012T EURO6;T;Cl;M,N1 I
Kilometerstand zu Beginn der Messungen:	82.760 km
Erstzulassung:	20.12.2012

Die Vollast-Leistungskurve ist in Abbildung 4-11 dargestellt.

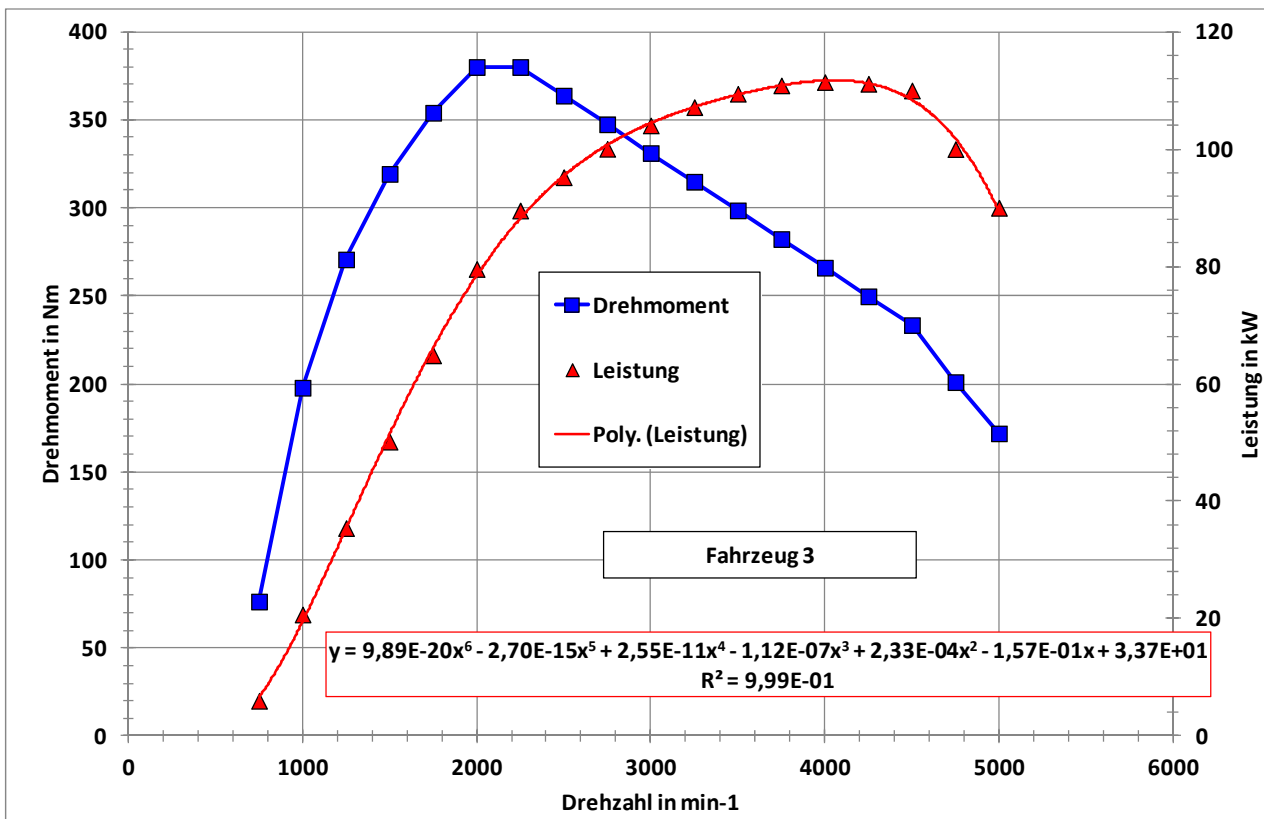


Abbildung 4-11: Motorleistungskurve Mazda 6

4.3 Messstrecken

Mit den Erfahrungen aus dem Projekt im Jahr 2010 wurden die Messstrecken neu überdacht und definiert. Einige Fragestellungen des Vorgängerprojektes blieben auch für die Betrachtung von Euro 6-Fahrzeugen bestehen, so dass sich die innerstädtischen Streckenführungen des Vorgängerprojektes auch in dem aktuellen Projekt wiederfinden. Auch die Betrachtung der unterschiedlichen Höchstgeschwindigkeiten innerorts wurde beibehalten.

4.3.1 Stadtrunde Stuttgart

Die Stadtrunde Stuttgart setzt sich prinzipiell aus drei Messstrecken des Vorgängerprojektes zusammen. Startpunkt ist wiederum an der Kreuzung B14 / Schillerstraße in Fahrtrichtung Hauptbahnhof. Zuerst wurde dann der „Cityring“ linksherum durchfahren. Die weitere Streckenführung ging über die B14 entlang Am Neckartor bis über den Neckar, wo gewendet wurde und bis zum Anschluss der Hohenheimer Straße die ehemalige „Neckartorrunde“ durchfahren wurde. Die weitere Streckenführung führte über die Hohenheimer Straße über die Wendestelle des Vorgängerprojektes hinaus die Neue Weinsteige entlang bis nach Stuttgart-Degerloch, wo am Albplatz gewendet wurde. Die Stadtrunde wurde geschlossen durch die Abfahrt zum Hauptbahnhof, wo an der Startstelle die Messrunde beendet wurde.

Abbildung 4-12 zeigt die Streckenführung der Stuttgarter Stadtrunde.

Für die Stadtrunde Stuttgart wurden wiederum wie im Vorgängerprojekt unterschiedliche Höchstgeschwindigkeiten (T30, T40 und T50) festgelegt.

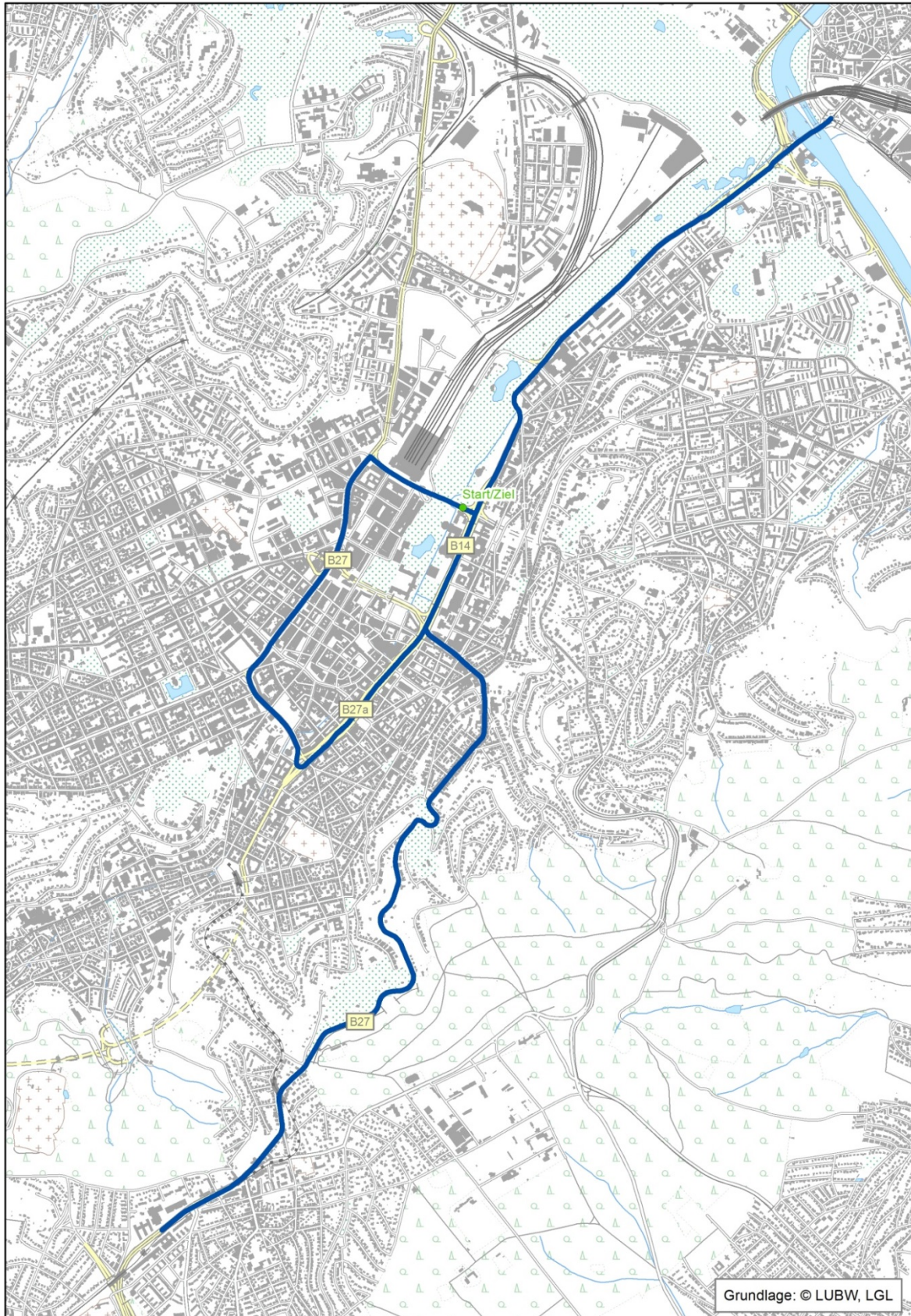


Abbildung 4-12: Stadtrunde Stuttgart

4.3.2 Außenrunde Stuttgart

Neben der Stadtrunde wurde in Stuttgart noch eine sogenannte Außenrunde definiert. Ziel dieser Außenrunde war es, auch Betriebszustände des Überlandverkehrs und Autobahnverkehrs in das Messprogramm mit aufzunehmen und so Datenmaterial zu erzeugen, welches mit den Werkzeugen der RDE-Arbeitsgruppe in Brüssel ausgewertet werden kann. Abbildung 4-13 zeigt den Streckenverlauf der Außenrunde Stuttgart.

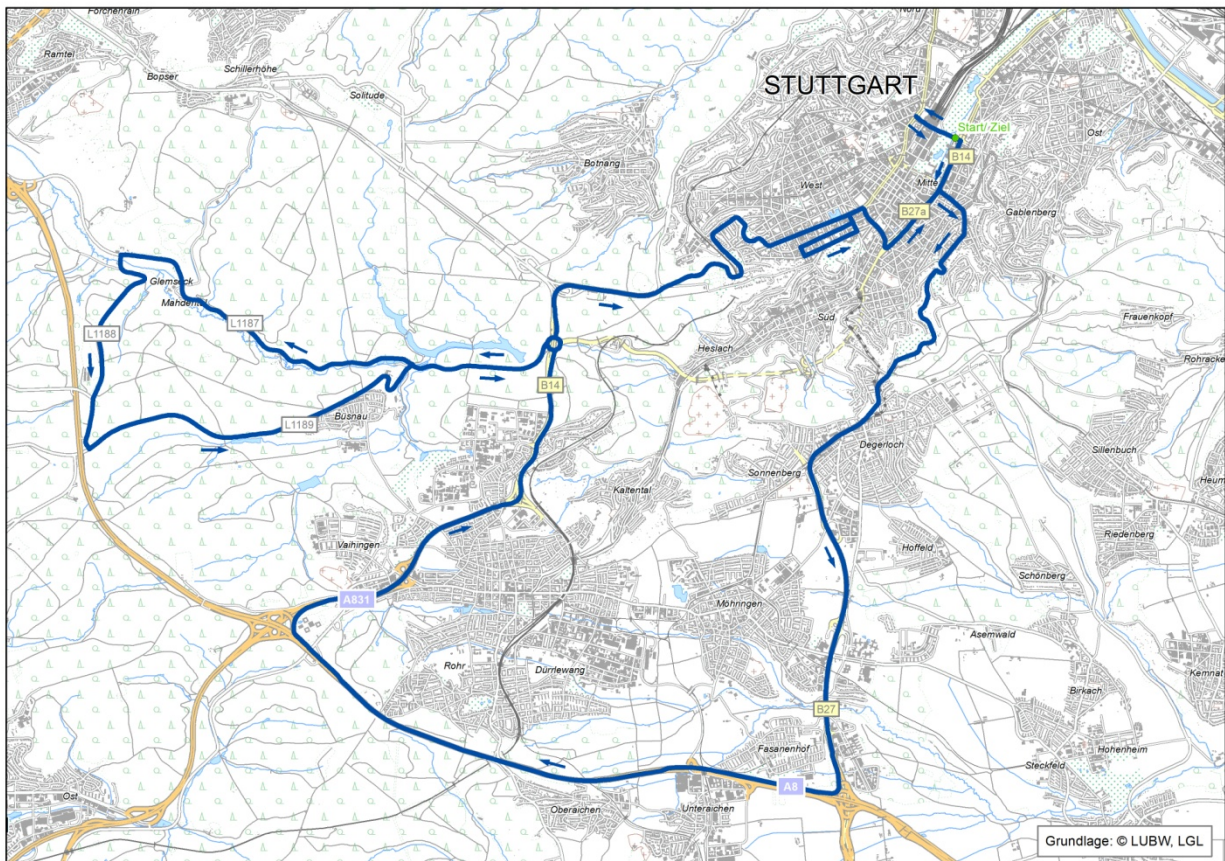
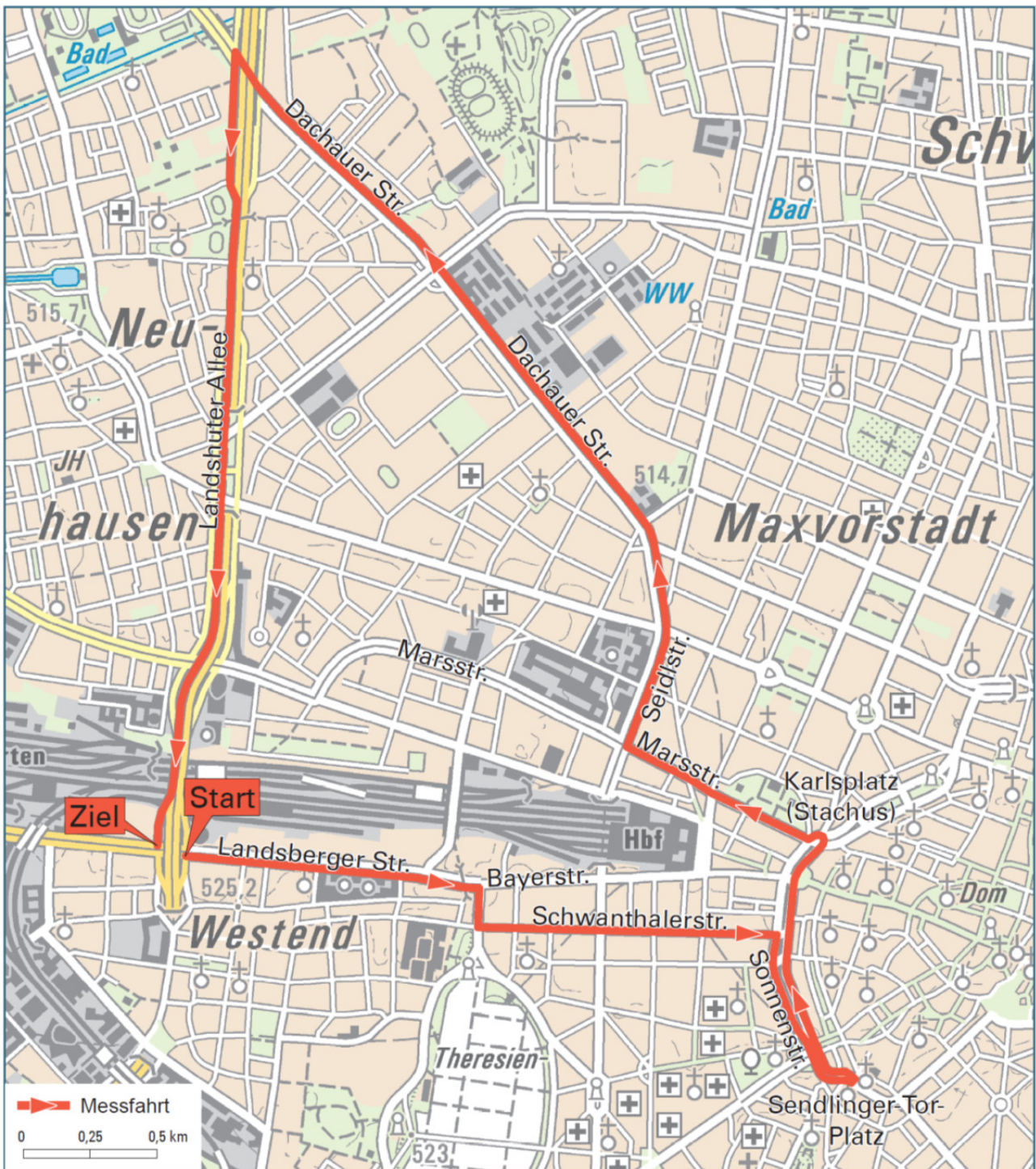


Abbildung 4-13: Außenrunde Stuttgart

4.3.3 München Innenstadt

Neben Stuttgart war München als weiterer Messort definiert worden. Hier wurde durch das Bayerische Landesamt für Umwelt eine Streckenführung festgelegt. In der Münchener Innenstadt sollten zwei Geschwindigkeitssituationen auf einer festgelegten Strecke erfasst werden. Neben der Mitfahrt im schwimmenden Verkehr wurde auch die Fahrt mit Höchstgeschwindigkeit T50 gemessen. Es wurden deshalb Testrunden mit beiden Höchstgeschwindigkeiten in diesem Abschnitt gefahren.

Die Abbildung 4-14 zeigt die Streckenführung dieser Messrunde, die an der Kreuzung Landshuter Allee und Landsberger Straße in Richtung Hauptbahnhof gestartet wurde.



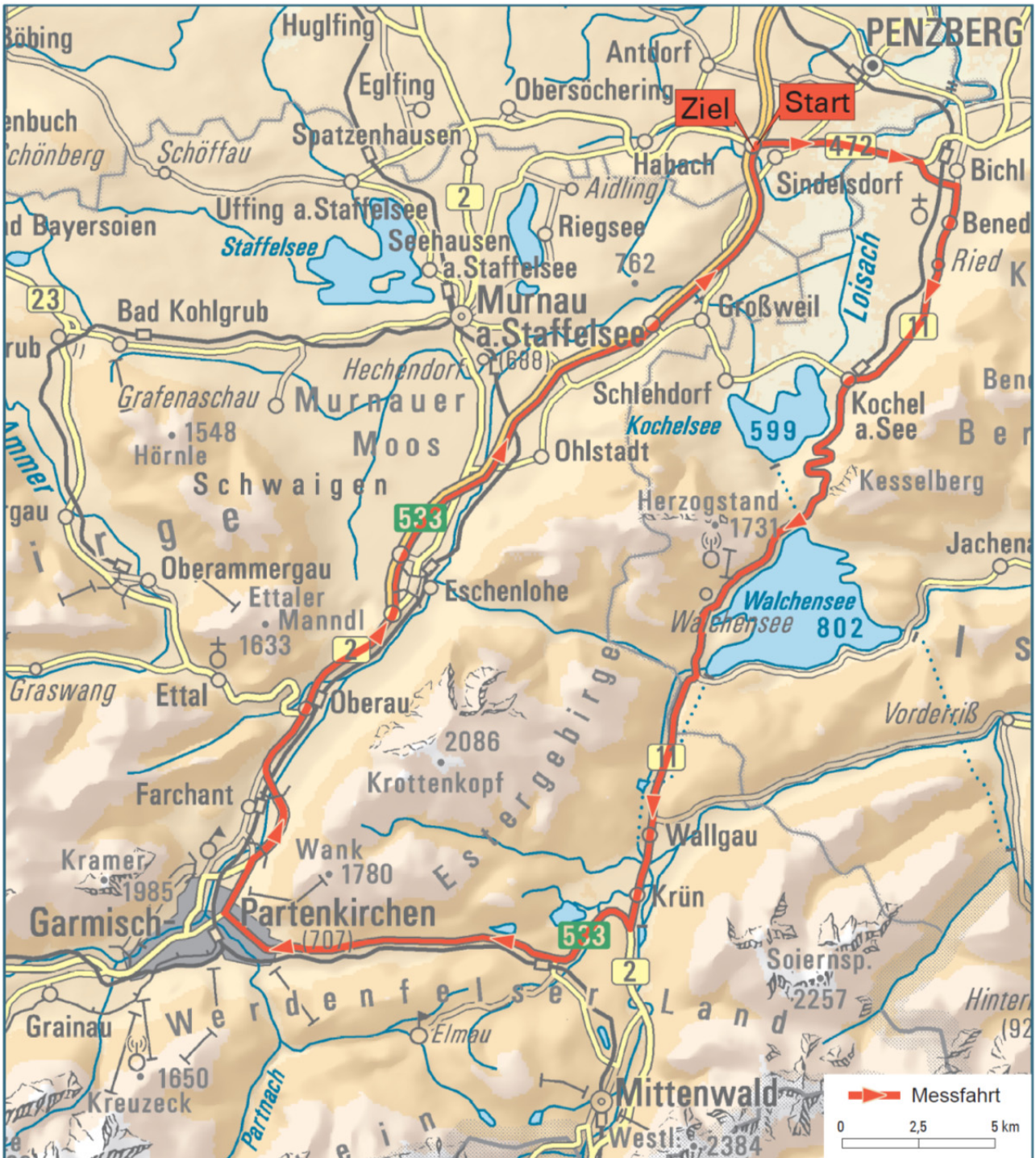
Geobasisdaten: Rasterdaten der Digitalen Topographischen Karte 1:50.000 (DTK50), © Bayerische Vermessungsverwaltung 2014

Abbildung 4-14: Messrunde München Innenstadt

4.3.4 Messrunde Garmisch

Zur Vervollständigung der Lastprofile, die mit den Fahrzeugen gefahren werden sollten, wurde noch eine Messstrecke definiert, die kurvige Steigungsstrecken und größere Anteile Landstraßenbetrieb beinhaltet.

Abbildung 4-15 zeigt die Streckenführung, die vom P+R-Parkplatz an der Anschlussstelle Sindelsdorf an der Bundesautobahn A95 ausgehend in Richtung Benediktbeuren durchfahren wurde.



Geobasisdaten: Rasterdaten der Digitalen Topographischen Karte 1:500.000 (DTK500), © Bayerische Vermessungsverwaltung 2013
 LfU, basierend auf SRTM-Daten der USGS

Abbildung 4-15: Streckenführung Garmisch

4.4 Messprogramm

Die nachfolgende Tabelle 4-4 gibt eine Übersicht über das Messprogramm, bei dem jede Streckenführung und jeder Fahrauftrag mit jedem Fahrzeug viermal durchfahren wurde. Tabelle 4-5 zeigt eine Auflistung aller durchgeführten Messfahrten. Es wurden insgesamt 90 Fahrten durchgeführt.

Tabelle 4-4: Übersicht über das Messprogramm

	Volkswagen CC	BMW 320d	Mazda 6
Innenstadtrunde Stuttgart T30	4x	4x	4x
Innenstadtrunde Stuttgart T40	4x	4x	4x
Innenstadtrunde Stuttgart T50	4x	4x	4x
Außenrunde Stuttgart	4x	4x	4x
München Innenstadt T50	4x	4x	4x
München Innenstadt "Mitschwimmen"	4x	4x	4x
Garmisch-Runde	4x	4x	4x

Überführungsfahrten

Tabelle 4-5: Liste aller Messfahrten des Gesamtprojektes

Fahrzeug Nr.	Einsatzgebiet	Strecke	max. Geschwindigkeit	Getriebe	Fahrt Nr. Gesamt	Datum	Interne Benennung
1=Passat	1=Stuttgart	1=Stuttgart City	1=T30	1=Automatik			
2=BMW	2=München	2=Stuttgart außerorts	2=T40	2=manuell			
3=Mazda	3=Garmisch	3=München Innenstadt	3=T50				
	4=Überführung	4=Garmisch	4=mitschwimmen				
		5=Überführung					
1	4	5	4	1	1	01.06.2014	Überführung_Stuttgart
1	1	1	3	1	2	02.06.2014	Passat_City_50_1
1	1	1	3	1	3	02.06.2014	Passat_City_50_2
1	1	1	2	1	4	02.06.2014	Passat_City_40_1
1	1	1	1	1	5	02.06.2014	Passat_City_30_1
1	1	2	4	1	6	02.06.2014	Passat_Außen_1
1	1	1	3	1	7	03.06.2014	Passat_City_50_3
1	1	1	2	1	8	03.06.2014	Passat_City_40_2
1	1	1	1	1	9	03.06.2014	Passat_City_30_2
1	1	2	4	1	10	03.06.2014	Passat_Außen_2
1	1	2	4	1	11	03.06.2014	Passat_Außen_3
1	1	1	3	1	12	03.06.2014	Passat_City_50_4
1	1	1	2	1	13	03.06.2014	Passat_City_40_3
1	1	1	1	1	14	03.06.2014	Passat_City_30_3
1	1	2	4	1	15	04.06.2014	Passat_Außen_4

1	1	1	3	1	16	04.06.2014	Passat_City_50_5
1	1	1	2	1	17	04.06.2014	Passat_City_40_4
1	1	1	1	1	18	04.06.2014	Passat_City_30_4
2	1	1	1	1	19	04.06.2014	BMW_City_30_1
2	1	1	2	1	20	04.06.2014	BMW_City_40_1
2	1	1	3	1	21	04.06.2014	BMW_City_50_1
2	1	2	4	1	22	04.06.2014	BMW_Außen_1
2	1	1	1	1	23	05.06.2014	BMW_City_30_2
2	1	1	2	1	24	05.06.2014	BMW_City_40_2
2	1	1	3	1	25	05.06.2014	BMW_City_50_2
2	1	2	4	1	26	05.06.2014	BMW_Außen_2
2	1	1	3	1	27	05.06.2014	BMW_City_50_3
2	1	2	4	1	28	05.06.2014	BMW_Außen_3
2	1	1	2	1	29	05.06.2014	BMW_City_40_3
2	1	1	1	1	30	05.06.2014	BMW_City_30_3
2	1	1	1	1	31	05.06.2014	BMW_City_30_4
2	1	1	2	1	32	05.06.2014	BMW_City_40_4
2	1	1	3	1	33	05.06.2014	BMW_City_50_4
2	1	2	4	1	34	05.06.2014	BMW_Außen_4
3	1	1	1	2	35	10.06.2014	Mazda_City_30_1
3	1	1	2	2	36	10.06.2014	Mazda_City_40_1
3	1	1	3	2	37	10.06.2014	Mazda_City_50_1
3	1	2	4	2	38	10.06.2014	Mazda_Außen_1
3	1	1	3	2	39	10.06.2014	Mazda_City_30_2
3	1	1	2	2	40	10.06.2014	Mazda_City_40_2
3	1	1	1	2	41	10.06.2014	Mazda_City_50_2
3	1	2	4	2	42	10.06.2014	Mazda_Außen_2
3	1	1	1	2	43	11.06.2014	Mazda_City_30_3
3	1	1	2	2	44	11.06.2014	Mazda_City_40_3
3	1	1	3	2	45	11.06.2014	Mazda_City_50_3
3	1	2	4	2	46	11.06.2014	Mazda_Außen_3
3	1	2	4	2	47	11.06.2014	Mazda_Außen_4
3	1	1	3	2	48	11.06.2014	Mazda_City_50_4
3	1	1	2	2	49	11.06.2014	Mazda_City_40_4
3	1	1	1	2	50	11.06.2014	Mazda_City_30_4
3	2	3	4	2	51	12.06.2014	Mazda_München_mitschw_1
3	2	3	4	2	52	12.06.2014	Mazda_München_mitschw_2
3	2	3	4	2	53	12.06.2014	Mazda_München_mitschw_3
3	2	3	4	2	54	12.06.2014	Mazda_München_mitschw_4
3	2	3	3	2	55	12.06.2014	Mazda_München_50kmh_1
3	2	3	3	2	56	12.06.2014	Mazda_München_50kmh_2
3	2	3	3	2	57	12.06.2014	Mazda_München_50kmh_3
3	2	3	3	2	58	12.06.2014	Mazda_München_50kmh_4
3	3	4	4	2	59	16.06.2014	Mazda_Garmisch_mitschw_1
3	3	4	4	2	60	16.06.2014	Mazda_Garmisch_mitschw_2
3	3	4	4	2	61	16.06.2014	Mazda_Garmisch_mitschw_3
3	3	4	4	2	62	16.06.2014	Mazda_Garmisch_mitschw_4
3	4	3	4	2	63	16.06.2014	Mazda_Überführung_Garm
1	2	3	4	1	64	17.06.2014	Passat_München_mitschw_1
1	2	3	4	1	65	17.06.2014	Passat_München_mitschw_2
1	2	3	4	1	66	17.06.2014	Passat_München_mitschw_3
1	2	3	4	1	67	17.06.2014	Passat_München_mitschw_4
1	2	3	3	1	68	17.06.2014	Passat_München_50kmh_1
1	2	3	3	1	69	17.06.2014	Passat_München_50kmh_2
1	2	3	3	1	70	17.06.2014	Passat_München_50kmh_3
1	2	3	3	1	71	17.06.2014	Passat_München_50kmh_4

1	4	4	4	1	72	17.06.2014	Passat_Überführung_Garmisch
1	3	4	4	1	73	17.06.2014	Passat_Garmsich_mitschw_1
1	3	4	4	1	74	17.06.2014	Passat_Garmsich_mitschw_2
1	3	4	4	1	75	17.06.2014	Passat_Garmsich_mitschw_3
1	3	4	4	1	76	17.06.2014	Passat_Garmsich_mitschw_4
2	2	3	4	1	77	18.06.2014	BMW_München_mitschw_1
2	2	3	4	1	78	18.06.2014	BMW_München_mitschw_2
2	2	3	4	1	79	18.06.2014	BMW_München_mitschw_3
2	2	3	4	1	80	18.06.2014	BMW_München_mitschw_4
2	2	3	3	1	81	18.06.2014	BMW_München_50kmh_1
2	2	3	3	1	82	18.06.2014	BMW_München_50kmh_2
2	2	3	3	1	83	18.06.2014	BMW_München_50kmh_3
2	2	3	3	1	84	18.06.2014	BMW_München_50kmh_4
2	4	4	4	1	85	19.06.2014	BMW_Überführung_Garmisch
2	3	4	4	1	86	19.06.2014	BMW_Garmisch_mitschw_1
2	3	4	4	1	87	19.06.2014	BMW_Garmisch_mitschw_2
2	3	4	4	1	88	19.06.2014	BMW_Garmisch_mitschw_3
2	3	4	4	1	89	19.06.2014	BMW_Garmisch_mitschw_4
2	4	3	4	1	90	19.06.2014	BMW_Überführung_München

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 Driving Emissions") 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 Richtlinien für schwere Nutzfahrzeuge haben PEMS (Portable Emission Measurement System) Messungen bereits Eingang gefunden. Die zu verwendende Messtechnik ist beschrieben. Derzeit wird durch die EU-Kommission in der RDE-Arbeitsgruppe auch ein Verfahren für Messungen an PKW entwickelt. Prinzipiell wird hier die gleiche Messtechnik benutzt wie bei den Nutzfahrzeugen. Auf die Messung der Kohlenwasserstoffe mit einem FID (Flammen-Ionisations-Detektor) wird bei PKW verzichtet, was den Betrieb der Messtechnik vereinfacht. Es muss kein Brenngas für den FID mitgeführt werden und auf die Beheizung des Messgeräts kann verzichtet werden, was eine deutliche Energieeinsparung bedeutet.

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 der dann sehr eingeschränkten Betriebszeiten nicht genutzt. Grundsätzlich wäre auch eine Verbindung mit dem elektrischen Netz des Fahrzeuges möglich, dies ist aber nicht erwünscht, um den Belastungszustand des Motors durch eine höhere Belastung der Lichtmaschine nicht 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 zur Bestimmung der Kohlenwasserstoffe beinhaltet. Die Beheizung auf 190°C ist notwendig, um Kondensation von Kohlenwasserstoffen zu verhindern. Wie bereits beschrieben, blieb bei den Messungen der FID außer Betrieb. Ein Teilstrom des Messgases wird zur Trocknung über einen Kühler geführt und dann dem NDIR-Analysator (Nicht-Dispersives-Infrarot-Analysator) zur Bestimmung der CO- und CO₂-Konzentration, dem elektrochemischen O₂-Analysator und der NDUV-Messbank (Nicht-Dispersives-Ultraviolett-Messbank) zur Bestimmung von NO und NO₂ 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 5-1 gibt eine Übersicht über die Spezifikationsdaten der verwendeten Analysatoren. Neben dem eigentlichen Analysesystem 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 5-1 zeigt das Messsystem SEMTECH DS der Firma Sensors und verdeutlicht den grundsätzlichen Systemaufbau.

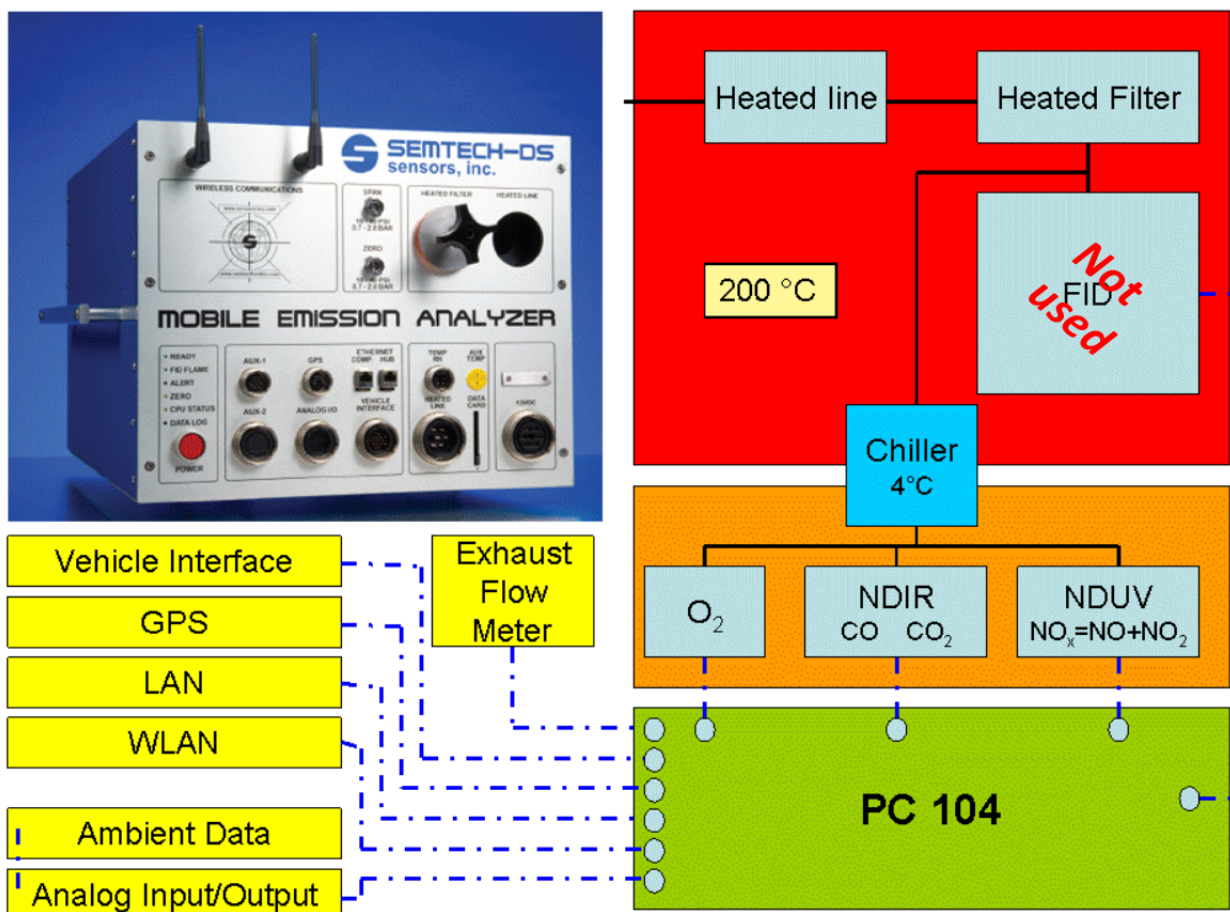


Abbildung 5-1: SEMTECH-DS, Systemaufbau, Quelle: TÜV NORD

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. Diese wurde bei den Messungen dieses Projektes mehrmals am Tag durchgeführt.

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.

Tabelle 5-1: Spezifikationen SEMTECH DS. Quelle: SENSORS Inc., Manual SEMTECH DS

SEMTECH-DS System Specifications								
Gas	CO	CO2	NO	NO2	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

5.2 Messung des Abgasmassenstromes

Zur Messung des Abgasmassenstromes wurde ein EFM (Exhaust 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 5-2 zeigt das Gesamtsystem mit Messrohr und Auswerteeinheit.



Abbildung 5-2: Exhaust Flow Meter, Quelle: SENSORS, Inc.

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.

5.5 Fahrzeugdaten

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

Darüber hinaus wurden über einen CAN-Datenlogger (Controller Area Network) noch Daten aus dem Motor-CAN-Bus ausgelesen und gespeichert.

5.6 Messtechnikapplikation am Fahrzeug

Abbildung 5-3 zeigt exemplarisch die Außenapplikation der Messtechnik am Volkswagen, an dem ein Trägersystem auf der Anhängerkupplung des Fahrzeuges benutzt wurde. An den beiden anderen Versuchsfahrzeugen war keine Anhängerkupplung vorhanden, so dass hier Heckklappenträgersysteme zur Aufhängung des EFM (Exhaust Flow Meter) und als Träger für das Stromaggregat benutzt wurden. Die Analytik wurde im Fahrzeuginneren untergebracht. Tabelle 5-2 fasst die Zuladungsgewichte der Versuchsfahrzeuge zusammen. Es werden bei allen drei Fahrzeugen ca. 30% der maximal möglichen Zuladung erreicht.



Abbildung 5-3: Messtechnik am Volkswagen

Tabelle 5-2: Zuladungsgewichte für die drei Versuchsfahrzeuge



Leermasse bedeutet im Sinne der Typprüfung: Fahrzeug abfahrbereit inkl. Fahrer mit 75 kg.

Fahrzeuge, Massen aus Zulassungbescheinigung

Marke	VW	BMW	Mazda
Modell	Passat CC (Typ 35)	320d (F31)	Mazda 6 (Typ GJ)
Leermasse	1599,0 kg	1575,0 kg	1578,0 kg
zul. Gesamtmasse	2110,0 kg	2050,0 kg	2090,0 kg
max. Zuladung	511,0 kg	475,0 kg	512,0 kg

Trägersystem für Mass Flow Meter und Generator, Massen ermittelt

Marke	unbekannt	Rameder	Paulchen
Art	Heckträger (AHK)	Heckträger (Heckklappe)	Heckträger (Heckklappe)
für Fahrzeug	Passat CC (Typ 35)	BMW 320 d	Mazda 6
Masse	18,0 kg	12,8 kg	16,0 kg

Messeinrichtung, Massen ermittelt

Analysesystem (Semtech DS)		35,4 kg	
Verbrauchsgase		0,0 kg	
Exhaust Flow Meter (EFM)		2,7 kg	
Rohrsystem / Adapter EFM	4,0 kg	4,0 kg	7,5 kg
Electronic Modul		3,4 kg	
Zubehör (Kabel, Entnahmeleitung)		5,0 kg	
Netzteil, Spannungswandler		5,0 kg	
Pufferbatterie (120 Ah)		18,0 kg	
Generator		25,0 kg	

Trägersystem	18,0 kg	12,8 kg	16,0 kg
Messeinrichtung (Summe)	98,5 kg	98,5 kg	102,0 kg
Pauschale Zusatzmasse (Fahrerdifferenz, Zubehör)		35,0 kg	
Gesamtzuladung	151,5 kg	146,3 kg	153,0 kg
Anteil an spez. max. Zuladung	29,6%	30,8%	29,9%

6 Ergebnisse

6.1 Verteilungen von Geschwindigkeit und Beschleunigung

6.1.1 Stuttgart

Die kumulierten Geschwindigkeitsanteile der Fahrten auf der Innerortsstrecke bei den drei Tempolimits sind in Abbildung 6-1 bis Abbildung 6-3 dargestellt. Die Abbildungen zeigen die zeitlichen Anteile der einzelnen Geschwindigkeiten an der Dauer der Gesamtfahrt. Die oben liegenden Fahrdarstellungen beschreiben somit „langsamere“ Fahrten. Die zugehörigen Beschleunigungsanteile sind in Abbildung 6-4 bis Abbildung 6-6 dargestellt. Die Kennwerte der mittleren positiven Beschleunigung (a_{pos_ave}) und der relativen positiven Beschleunigung (RPA) [Zeitintegral über Geschwindigkeit mal positiver Beschleunigung, bezogen auf die Fahrstrecke] sowie die Tageszeit zu Beginn der Fahrt sind in Tabelle 6-1 zusammengestellt.

Die kumulierten Geschwindigkeitsanteile zeigen zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrten, die auf (zeitlich bedingte) Unterschiede in den Verkehrssituationen zurückzuführen sind. Die Beschleunigungsverteilungen sind einheitlicher, zeigen aber die erwarteten Unterschiede hinsichtlich der verschiedenen Tempolimits (geringere Anteile von Konstantfahrt mit zunehmenden Höchstgeschwindigkeiten).

Das Ziel der unterschiedlichen Tempolimits wurde eindeutig erreicht, aber die Wiederholungsfahrten spiegeln häufig unterschiedliche Verkehrssituationen wider und sind somit keine Wiederholungsfahrten im eigentlichen Sinne. Erschwerend kommt hinzu, dass es gerade bei Tempo 30 und 40 deutliche Unterschiede in den Verkehrssituationen gibt. Dies erschwert den Vergleich der Ergebnisse.

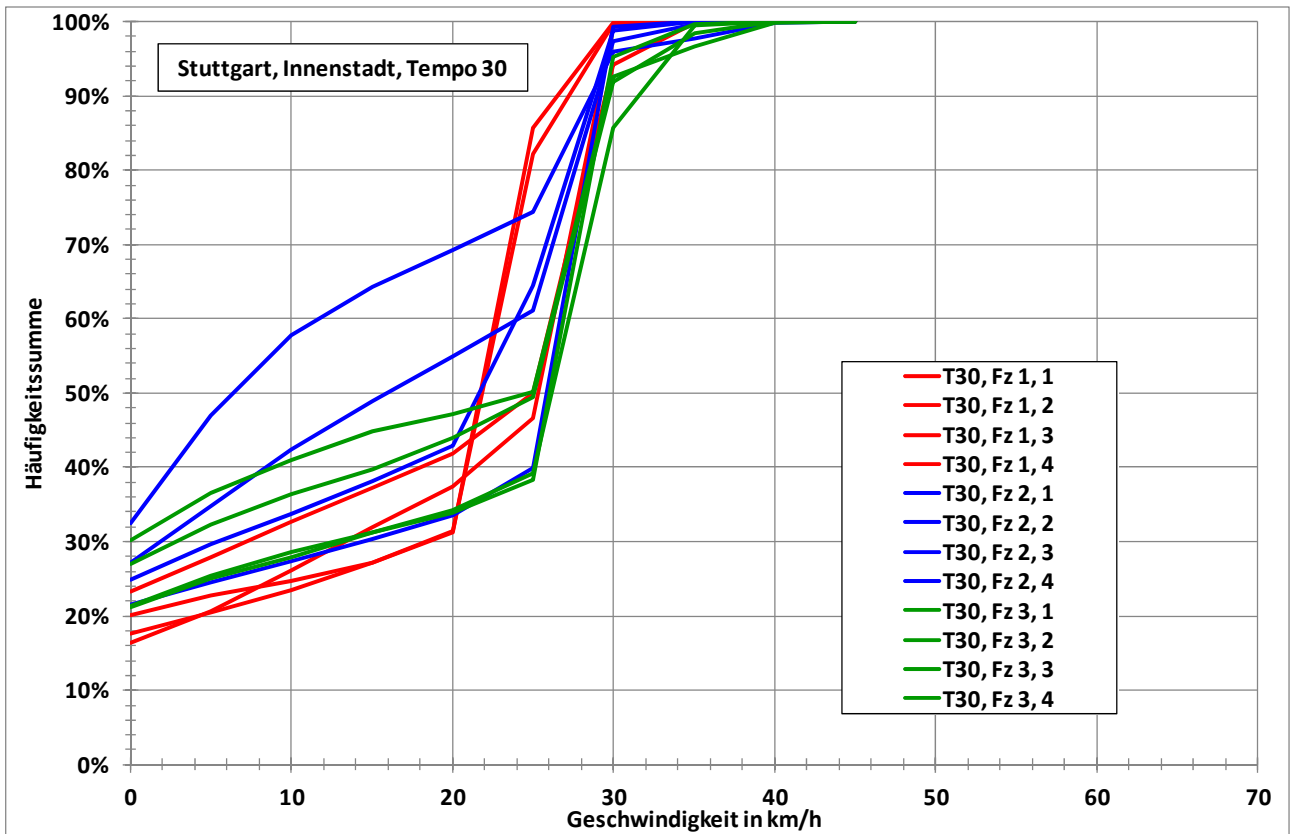


Abbildung 6-1: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart bei Tempo 30

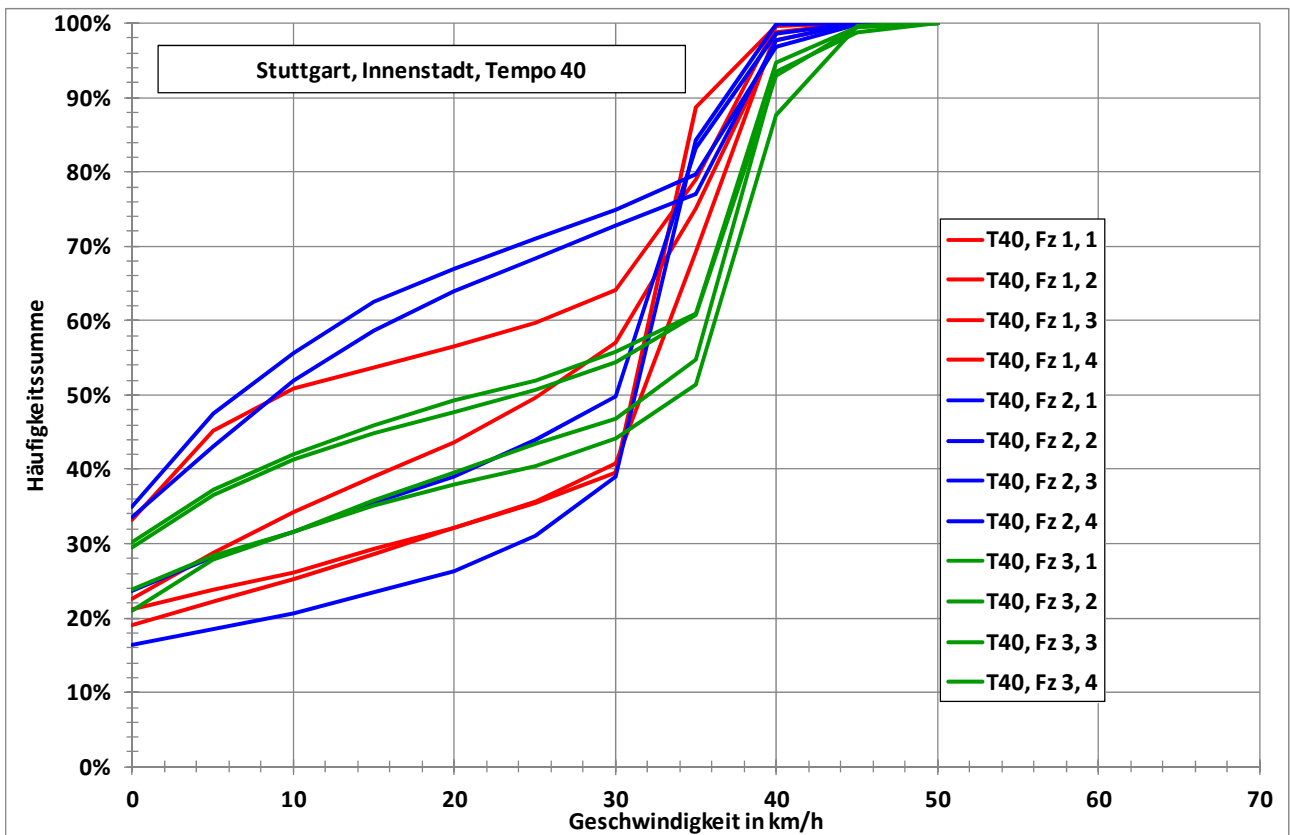


Abbildung 6-2: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart bei Tempo 40

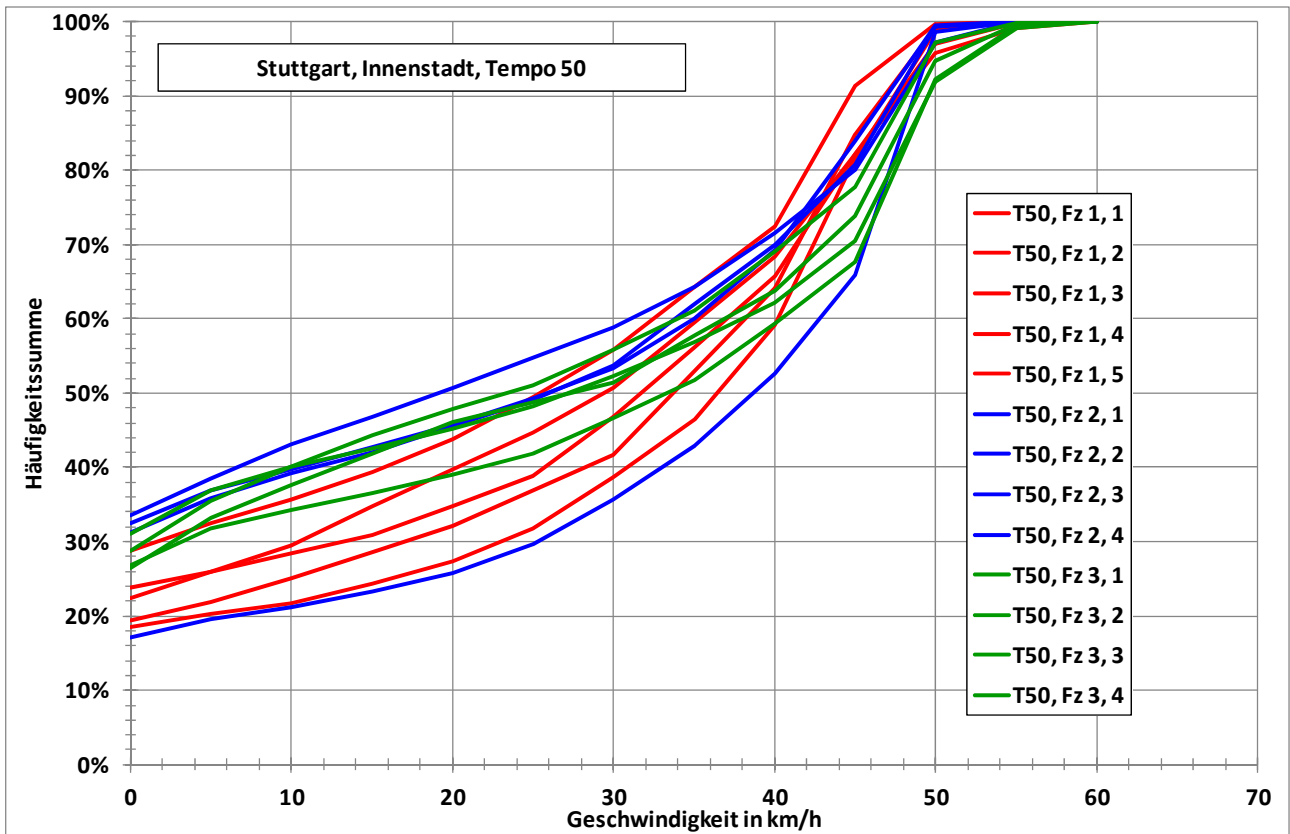


Abbildung 6-3: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart bei Tempo 50

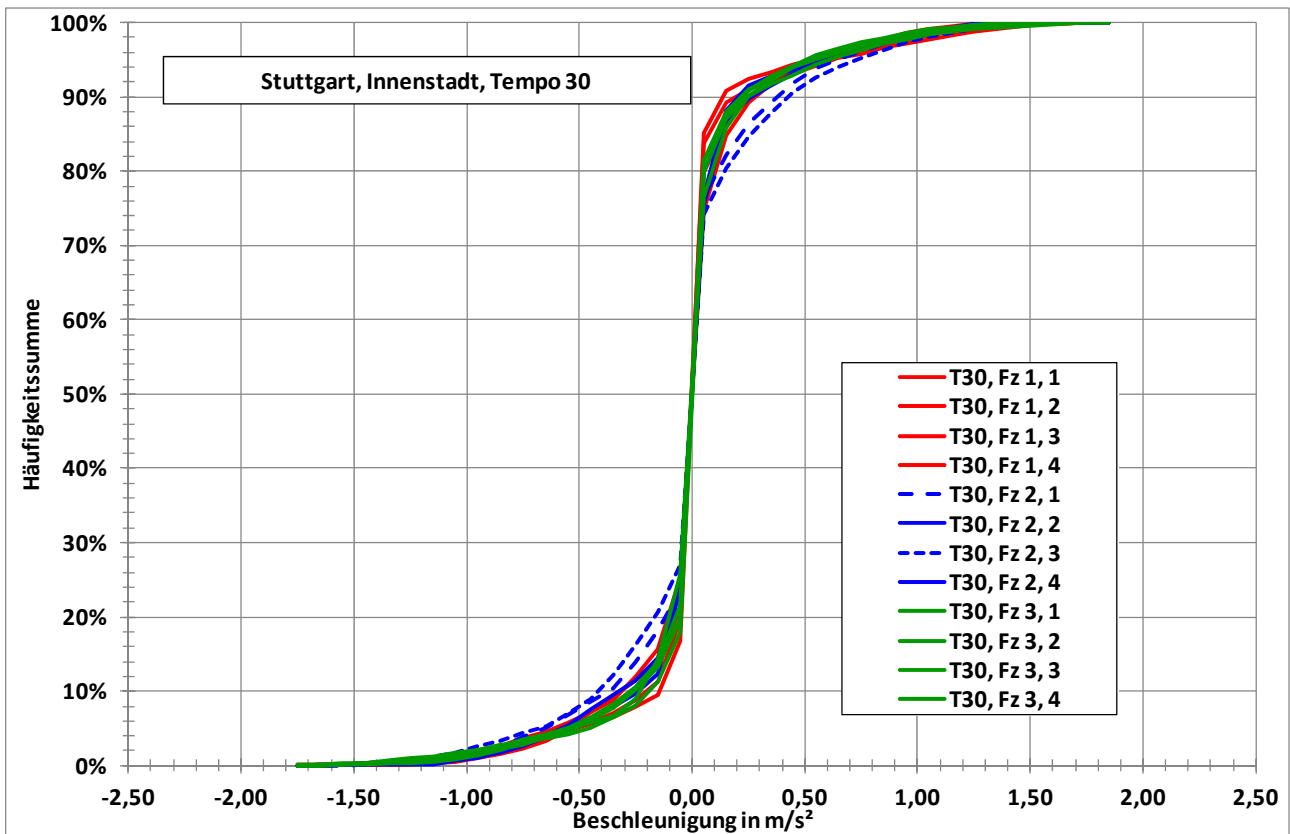


Abbildung 6-4: Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart bei Tempo 30

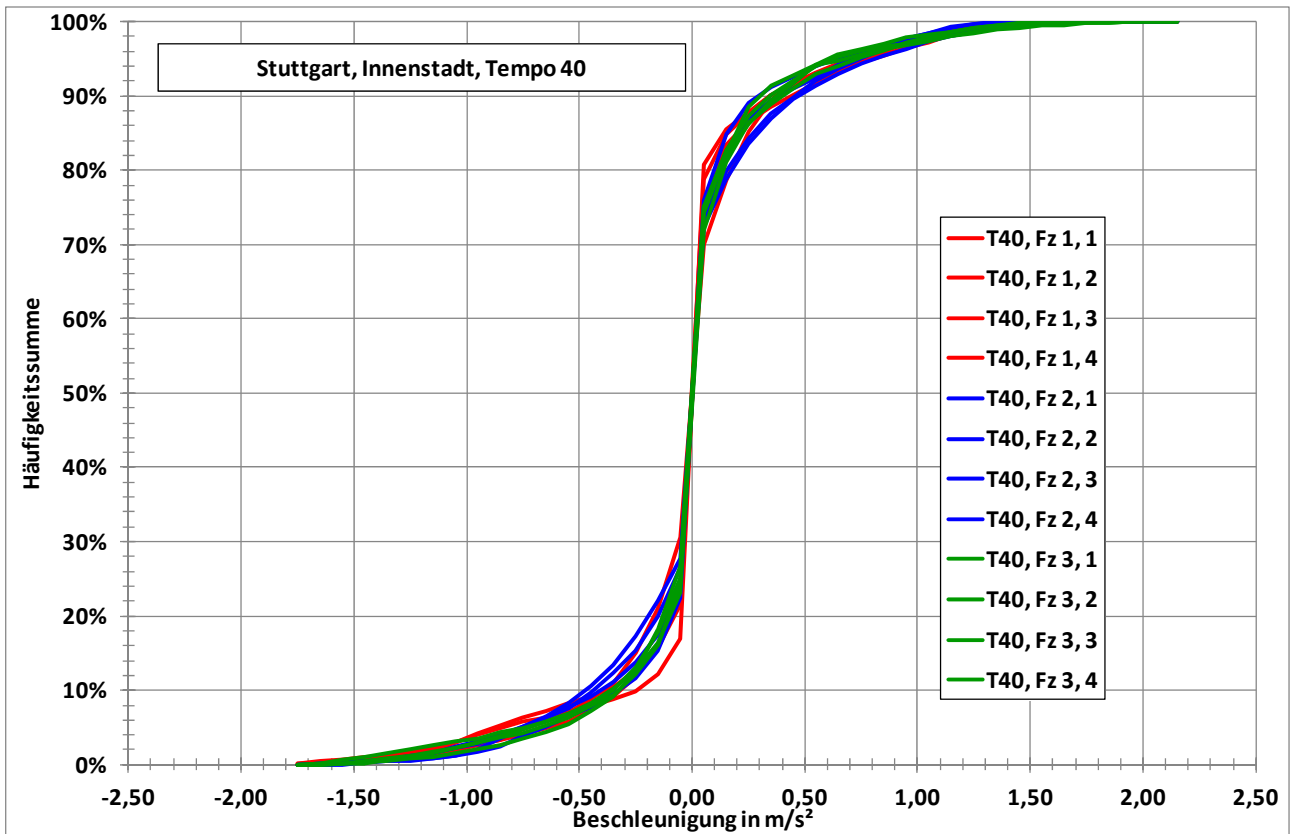


Abbildung 6-5: Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart bei Tempo 40

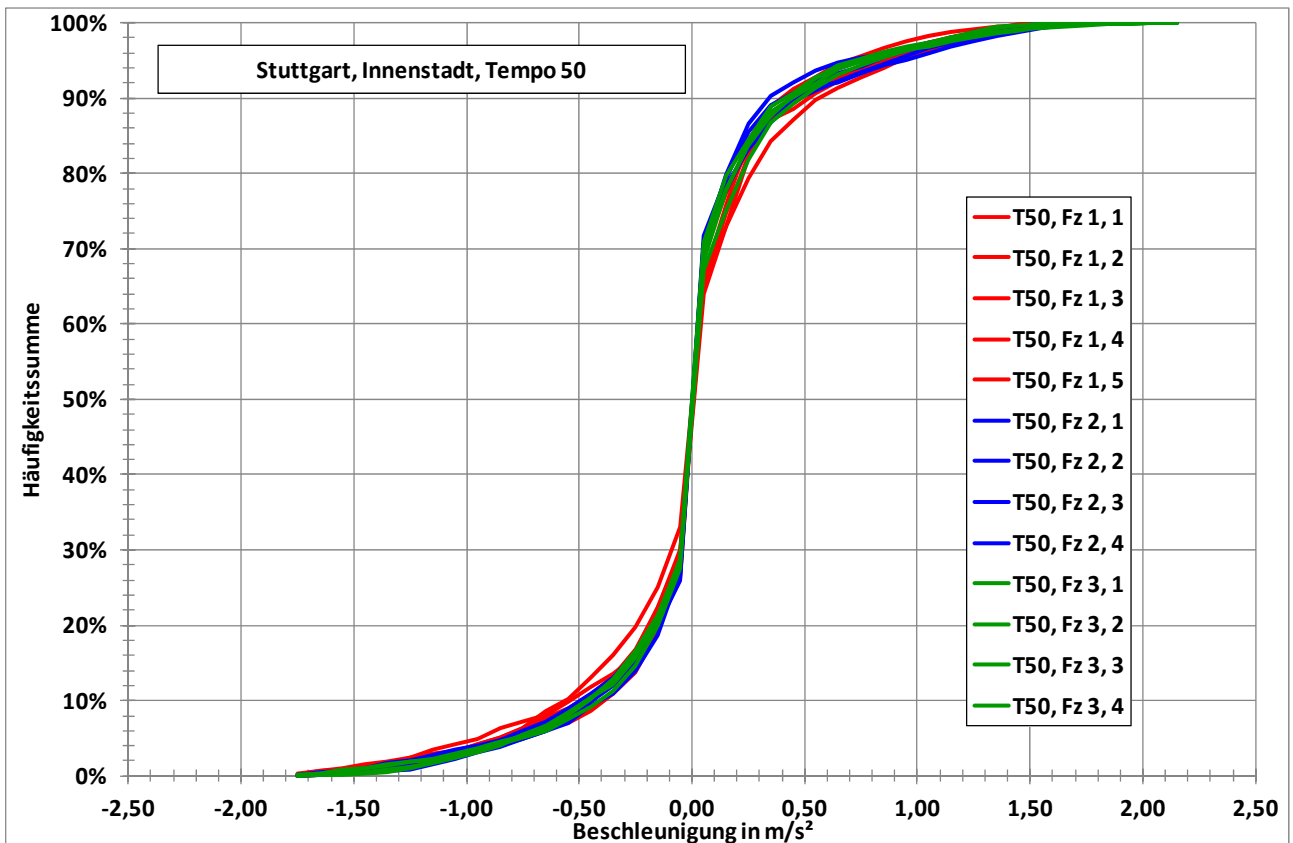


Abbildung 6-6: Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart bei Tempo 50

Tabelle 6-1: Kennwerte der Fahrten auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart

Tempolimit	Fz Nr	Fahrt	Uhrzeit beim Start	Zeitdauer s	p_stop	Strecke km	v_ave km/h	v_max km/h	a_pos_ave m/s ²	RPA m/s ²	eNOx mg/km	eCO2 g/km
30 km/h	1	9	08:45:12	3406	16,3%	19,5	20,6	37,3	0,50	0,0479	265,9	188,9
30 km/h	1	18	09:56:07	3461	18,4%	19,5	20,3	34,8	0,52	0,0437	322,1	232,7
30 km/h	1	5	15:19:12	3575	21,1%	19,9	20,0	38,4	0,39	0,0635	357,1	235,0
30 km/h	1	14	16:12:36	3454	14,4%	19,8	20,6	35,6	0,50	0,0567	280,3	221,7
30 km/h	2	23	06:47:28	3902	23,0%	19,9	18,3	35,6	0,41	0,0614	184,9	182,6
30 km/h	2	19	14:28:20	4247	24,1%	19,9	16,9	41,6	0,46	0,0753	378,3	258,7
30 km/h	2	30	15:16:53	5338	28,0%	19,6	13,3	45,1	0,49	0,0972	459,9	279,3
30 km/h	2	31	17:20:03	3455	20,3%	20,2	21,1	35,5	0,40	0,0543	254,7	168,9
30 km/h	3	43	06:38:57	3420	19,2%	20,6	21,7	39,8	0,41	0,0481	295,8	148,3
30 km/h	3	35	07:37:59	3327	19,3%	20,5	22,2	41,8	0,40	0,0582	380,8	162,4
30 km/h	3	39	14:32:55	3994	27,7%	20,4	18,4	44,1	0,46	0,0565	472,1	183,2
30 km/h	3	50	15:05:35	3784	24,5%	20,4	19,4	42,3	0,47	0,0600	393,5	172,9
40 km/h	1	8	07:58:52	2676	17,6%	20,0	26,9	46,9	0,52	0,0748	237,1	193,4
40 km/h	1	17	09:03:20	2748	19,9%	19,9	26,0	44,0	0,57	0,0679	350,6	202,5
40 km/h	1	4	14:25:24	3153	21,0%	19,9	22,7	47,7	0,43	0,0954	319,2	234,1
40 km/h	1	13	15:00:11	3954	30,3%	19,8	18,0	45,8	0,52	0,0853	431,5	271,5
40 km/h	2	24	07:53:08	3022	21,2%	20,0	23,8	44,9	0,45	0,0766	148,3	171,4
40 km/h	2	29	13:56:44	4562	30,6%	19,8	15,6	50,1	0,51	0,1142	402,0	243,6
40 km/h	2	20	15:43:35	4316	30,2%	19,9	16,6	46,8	0,48	0,1038	310,2	200,3
40 km/h	2	32	18:18:04	2603	15,5%	20,0	27,7	43,3	0,44	0,0622	125,3	144,0
40 km/h	3	44	07:36:39	2929	18,2%	20,6	25,3	52,4	0,45	0,0799	284,2	149,7
40 km/h	3	36	08:38:32	2816	22,1%	20,5	26,2	49,1	0,45	0,0793	333,8	152,4
40 km/h	3	40	13:32:19	3287	25,9%	20,4	22,3	48,5	0,47	0,0820	460,3	178,1
40 km/h	3	49	14:05:17	3361	27,0%	20,4	21,9	50,8	0,45	0,0766	409,7	178,7
50 km/h	1	7	07:17:54	2428	18,3%	20,1	29,8	54,9	0,44	0,1150	234,1	195,7
50 km/h	1	16	08:10:10	3012	26,9%	20,5	24,5	53,3	0,50	0,1211	328,1	206,4
50 km/h	1	2	11:37:02	2539	22,5%	20,1	28,5	58,4	0,45	0,1182	267,4	199,8
50 km/h	1	3	12:20:05	2290	17,6%	20,1	31,7	55,1	0,40	0,0984	252,2	183,7
50 km/h	1	12	14:09:43	2628	20,6%	20,0	27,4	62,1	0,50	0,1351	338,9	211,0
50 km/h	2	25	08:45:41	2999	30,3%	20,3	24,3	54,2	0,47	0,1086	162,2	175,3
50 km/h	2	27	11:39:11	3149	31,2%	20,2	23,1	55,9	0,52	0,1258	347,3	194,0
50 km/h	2	21	17:01:37	2956	28,2%	20,2	24,6	55,4	0,53	0,1212	289,3	179,4
50 km/h	2	33	19:05:07	2182	15,8%	20,3	33,5	55,8	0,45	0,0823	129,8	139,6
50 km/h	3	37	09:31:49	2579	24,7%	20,6	28,8	62,1	0,48	0,1048	392,9	150,9
50 km/h	3	45	09:32:20	2810	23,3%	20,5	26,3	58,4	0,46	0,1035	348,0	152,1
50 km/h	3	48	12:32:08	3007	25,6%	20,6	24,6	60,0	0,47	0,1254	498,8	166,8
50 km/h	3	41	12:39:51	2814	27,9%	20,6	26,4	62,1	0,47	0,1169	491,7	165,8

Ein ähnliches Bild, wenn auch mit etwas geringeren Unterschieden in den Verkehrssituationen, ergibt sich für die Außenbezirksstrecke in Stuttgart (siehe Abbildung 6-7, Abbildung 6-8 und Tabelle 6-2).

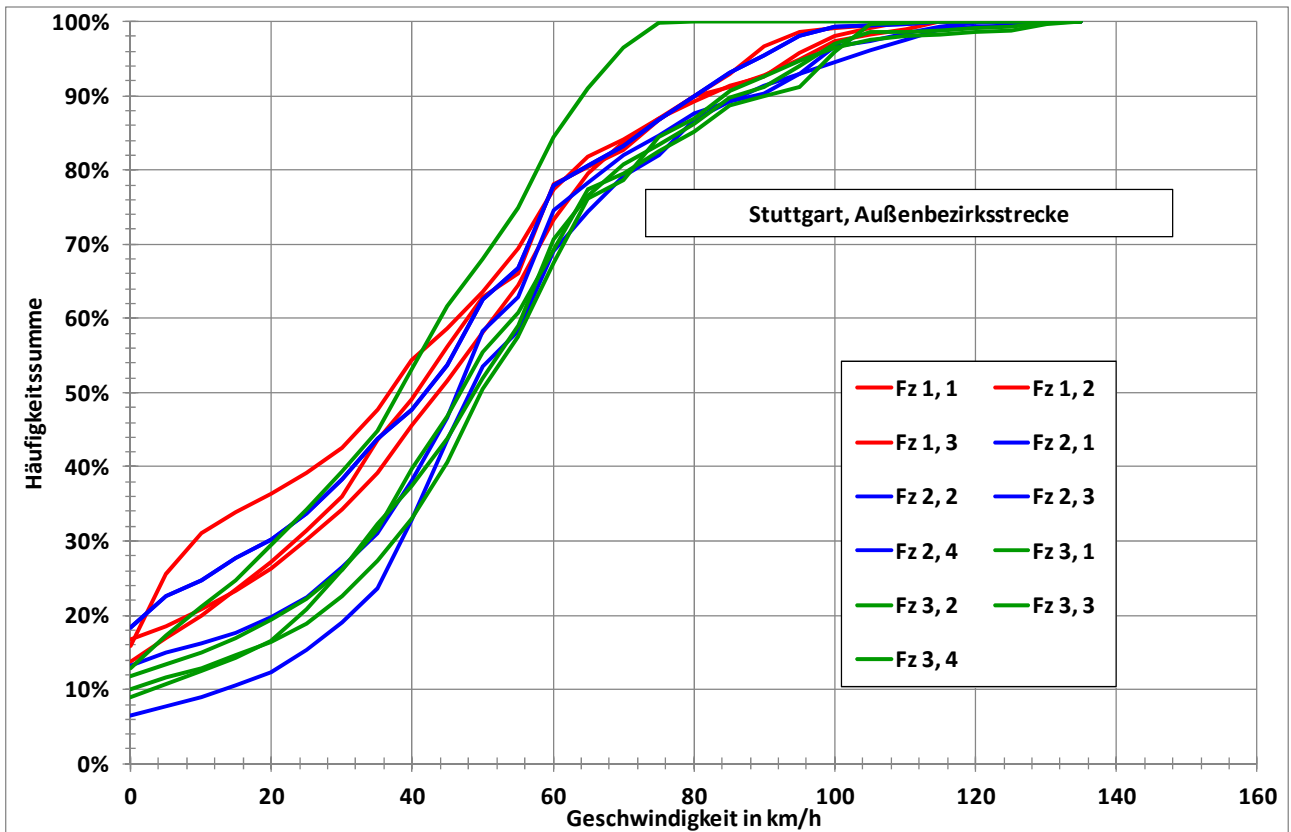


Abbildung 6-7: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Außenbezirksstrecke in Stuttgart

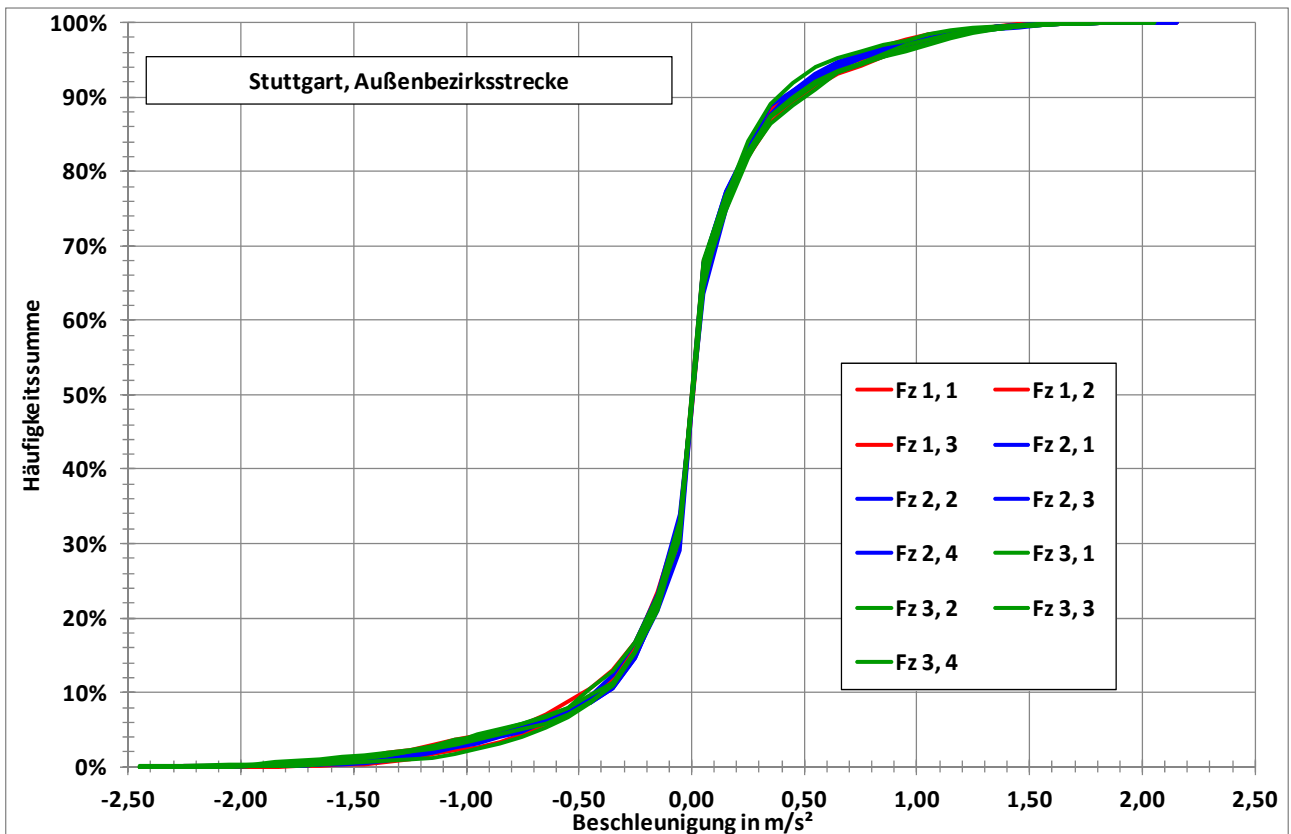


Abbildung 6-8: Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Außenbezirksstrecke in Stuttgart

Tabelle 6-2: Kennwerte der Fahrten auf der Außenbezirksstrecke in Stuttgart

Tempolimit	Fz Nr	Fahrt	Uhrzeit beim Start	Zeitdauer s	p_stop	Strecke km	v_ave km/h	v_max km/h	a_pos_ave m/s ²	RPA m/s ²	eNOx mg/km	eCO2 g/km
wechselnd	1	6	16:35:21	4693	13,8%	51,4	39,5	115,1	0,41	0,0974	304,2	174,0
wechselnd	1	11	12:49:22	4223	15,7%	51,6	44,0	111,1	0,42	0,1019	245,3	163,2
wechselnd	1	15	06:56:15	4377	12,2%	51,5	42,4	111,8	0,47	0,0968	221,2	165,0
wechselnd	2	22	17:55:52	3918	12,4%	52,3	48,0	127,0	0,42	0,0984	207,9	127,7
wechselnd	2	26	09:37:45	4542	16,6%	52,0	41,2	115,2	0,44	0,0972	175,5	133,4
wechselnd	2	28	09:37:45	4542	16,6%	52,0	41,2	115,2	0,44	0,0972	173,6	133,5
wechselnd	2	34	19:42:19	3550	5,8%	52,2	53,0	130,4	0,40	0,0987	207,9	121,9
wechselnd	3	38	10:19:24	3874	10,8%	52,8	49,1	114,7	0,45	0,1048	463,4	152,8
wechselnd	3	42	15:45:59	5075	11,6%	52,7	37,4	78,5	0,38	0,0924	288,2	138,3
wechselnd	3	46	10:21:59	3797	8,1%	52,8	50,1	133,2	0,47	0,1023	325,9	128,9
wechselnd	3	47	11:28:18	3711	9,2%	52,8	51,2	135,4	0,46	0,0989	374,4	144,0

6.1.2 München

Die kumulierten Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtstrecke in München sind in Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10 dargestellt. Die kumulierten Beschleunigungsanteile sind in Abbildung 6-11 und Abbildung 6-12 dargestellt. Die Kennwerte sind in Tabelle 6-3 zusammengestellt.

Auch hier zeigen sich wieder deutliche Unterschiede in den Verkehrssituationen zwischen den drei Fahrzeugen, während zwischen den beiden Fahraufträgen (mitschwimmen und Tempo 50) keine signifikanten Unterschiede ausgemacht werden können.

Im Vergleich zur Stuttgarter Innenstadtstrecke zeigen sich bei ähnlichen Durchschnittsgeschwindigkeiten deutlich höhere Stillstandanteile, die durch deutlich dynamischere Fahranteile kompensiert werden (höhere Beschleunigungen, a_pos_ave- und RPA-Werte). Auch die Anzahl der „short trips“ je km innerhalb der Strecke ist in München deutlich höher als in Stuttgart. Short trips sind einzelne Fahrtabschnitte zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stopps.

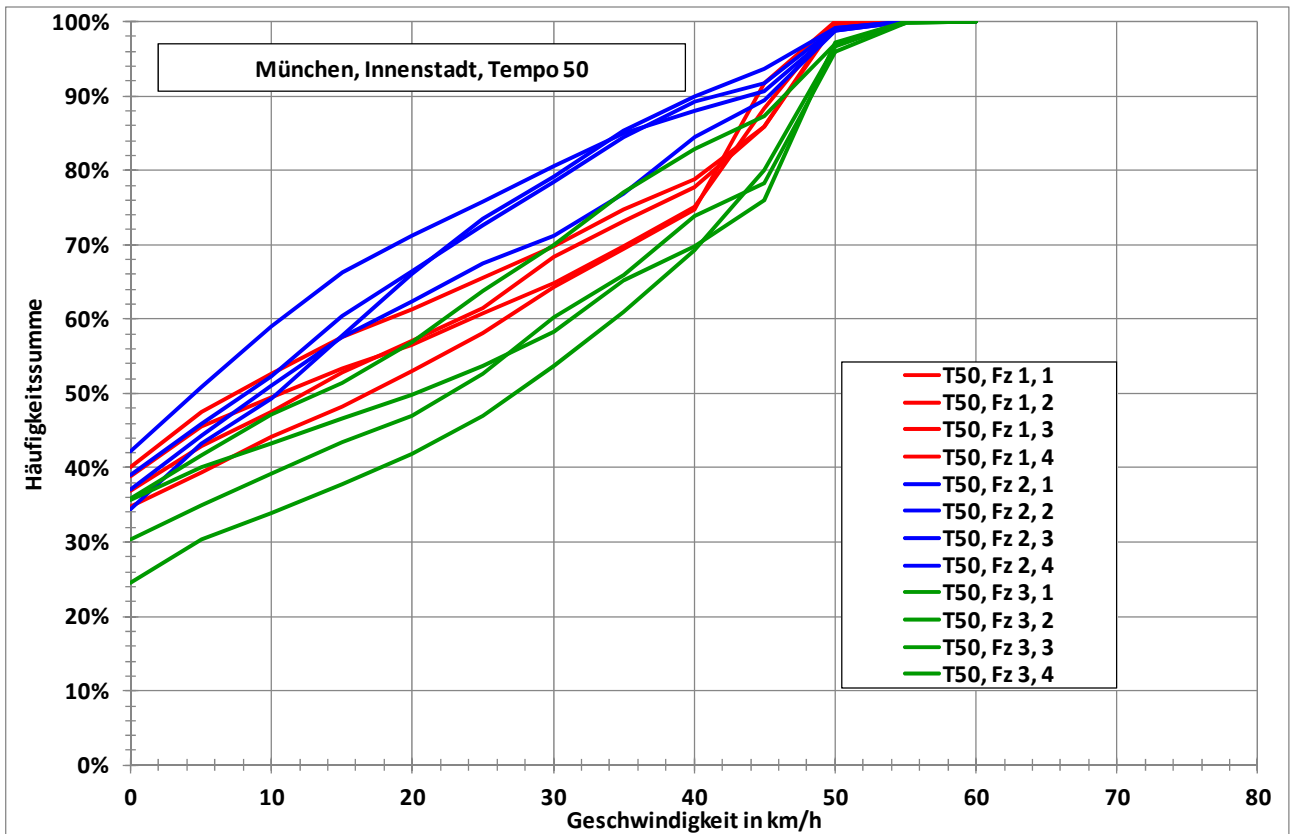


Abbildung 6-9: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtstrecke in München bei Tempo 50

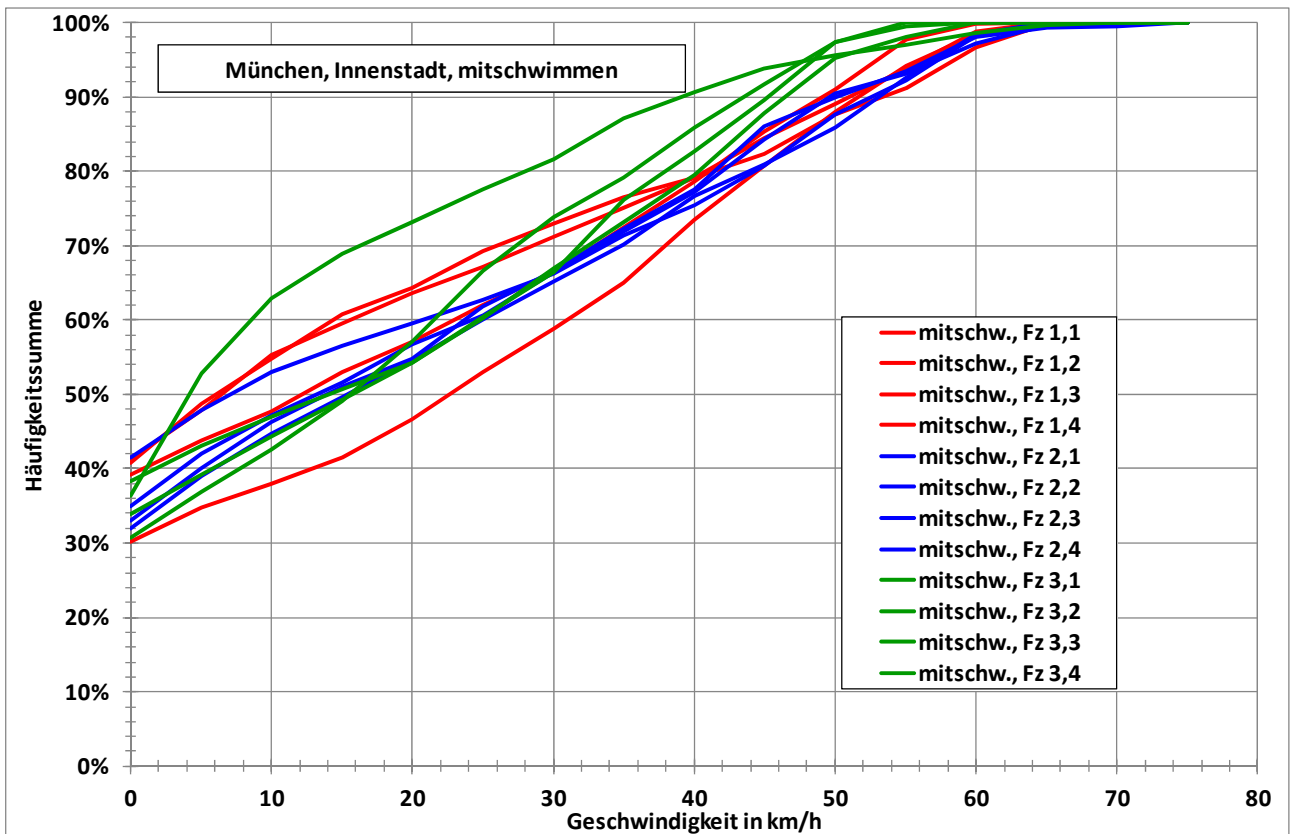


Abbildung 6-10: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtstrecke in München beim Mitschwimmen (T60)

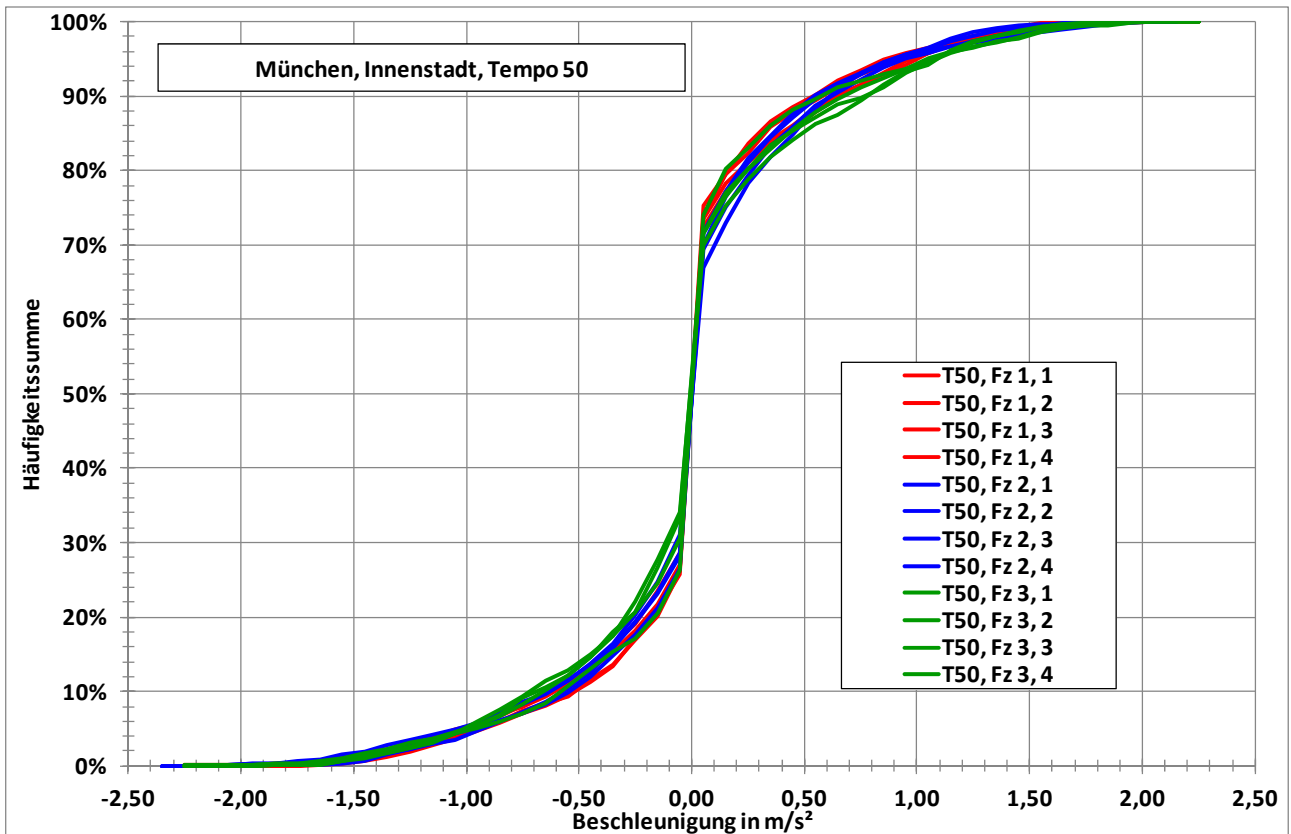


Abbildung 6-11: Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtstrecke in München bei Tempo 50

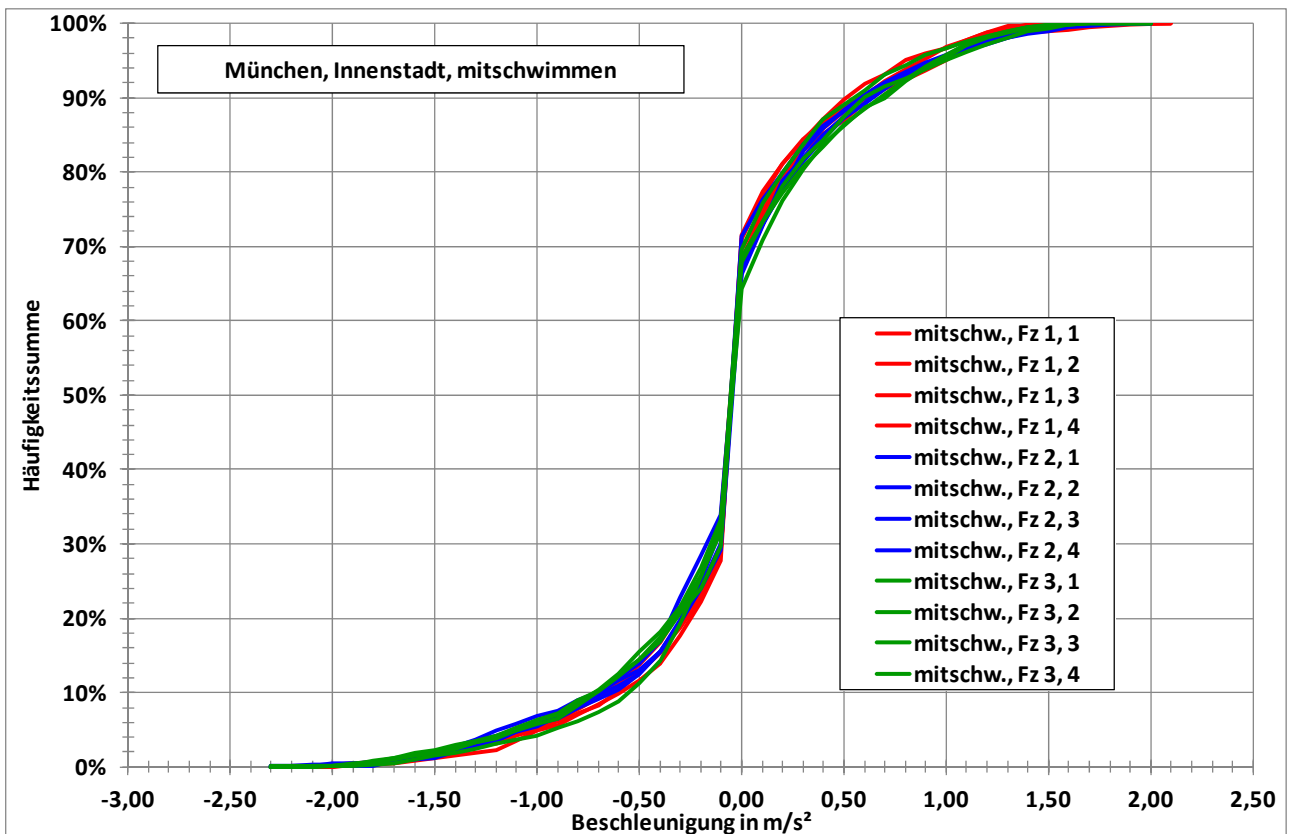


Abbildung 6-12: Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtstrecke in München beim Mitschwimmen (T60)

Tabelle 6-3: Kennwerte der Fahrten auf der Innenstadtstrecke in München

Tempolimit	Fz Nr	Fahrt	Uhrzeit beim Start	Zeitdauer s	p_stop	Strecke	v_ave	v_max	a_pos_ave	RPA	eNOx	eCO2
						km	km/h	km/h	m/s ²	m/s ²	mg/km	g/km
50 km/h	1	68	08:50:15	1845	33,0%	10,8	21,1	52,5	0,62	0,1534	432,8	231,1
50 km/h	1	69	09:21:35	2139	36,8%	10,9	18,3	49,2	0,60	0,1479	502,4	263,5
50 km/h	1	70	09:59:47	1962	35,0%	10,9	20,0	52,5	0,56	0,1290	441,3	243,7
50 km/h	1	71	10:32:53	1970	34,3%	10,9	19,8	53,7	0,62	0,1494	446,6	243,8
50 km/h	2	81	13:49:25	2187	34,8%	11,0	18,1	52,6	0,59	0,1968	659,6	243,0
50 km/h	2	82	14:26:18	2355	31,1%	10,8	16,5	54,2	0,53	0,1833	633,7	250,3
50 km/h	2	83	15:06:06	2431	35,6%	10,9	16,2	52,6	0,55	0,1734	585,4	261,4
50 km/h	2	84	15:47:02	2665	39,3%	10,9	14,7	52,6	0,58	0,1818	633,9	284,3
50 km/h	3	55	16:27:37	2062	32,5%	11,2	19,6	57,7	0,65	0,1778	626,7	207,1
50 km/h	3	56	17:02:22	1676	28,4%	11,2	24,2	58,2	0,67	0,1547	490,1	169,4
50 km/h	3	57	17:30:43	1722	33,3%	11,3	23,5	53,6	0,62	0,1398	450,0	164,5
50 km/h	3	58	17:59:48	1534	22,4%	11,2	26,4	55,3	0,65	0,1567	427,5	157,3
mitschwimmen	1	64	06:29:17	1590	28,6%	11,0	24,8	66,1	0,58	0,1613	401,0	240,1
	1	65	07:04:49	1922	37,0%	10,9	20,4	63,3	0,55	0,1660	458,2	232,7
	1	66	07:39:44	2094	38,5%	10,9	18,7	64,3	0,54	0,1628	508,6	243,3
	1	67	08:15:05	2083	36,7%	10,9	18,8	67,8	0,59	0,1769	512,9	249,1
mitschwimmen	2	77	11:10:10	1861	31,9%	11,0	21,4	67,8	0,56	0,1788	552,1	227,6
	2	78	11:41:44	1840	29,6%	11,0	21,6	77,2	0,55	0,1706	388,2	229,3
	2	79	12:12:47	1761	28,7%	11,0	22,6	66,1	0,58	0,1805	418,4	210,6
	2	80	12:44:00	1952	37,9%	11,0	20,4	65,4	0,62	0,1827	458,3	218,3
mitschwimmen	3	51	13:52:58	1982	31,8%	11,2	20,3	57,5	0,60	0,1874	614,5	191,8
	3	52	14:26:27	2053	27,7%	11,1	19,5	62,7	0,57	0,1964	653,0	218,9
	3	53	15:01:11	2777	31,9%	11,0	14,3	67,8	0,55	0,1952	676,5	250,5
	3	54	15:01:11	1981	35,7%	11,2	20,4	62,1	0,59	0,1937	569,4	200,8

6.1.3 Garmisch

Auf der gemischten Strecke bei Garmisch sind die verkehrssituationsbedingten Unterschiede geringer, dennoch hat Fahrzeug 2 niedrigere Durchschnittsgeschwindigkeiten als die anderen beiden Fahrzeuge (siehe Abbildung 6-13). Die Geschwindigkeitsverteilungen deuten darauf hin, dass die Verkehrsbelastung deutlich geringer ist als in München oder Stuttgart, was natürlich zu erwarten ist.

Die kumulierten Geschwindigkeitsanteile für die Überführungsstrecken zeigen die erwarteten streckenbedingten Unterschiede (siehe Abbildung 6-14). Abbildung 6-15 und Abbildung 6-16 zeigen die kumulierten Beschleunigungsanteile. Die Kennwerte für Garmisch und die Überführungsstrecken sind in Tabelle 6-4 zusammengefasst.

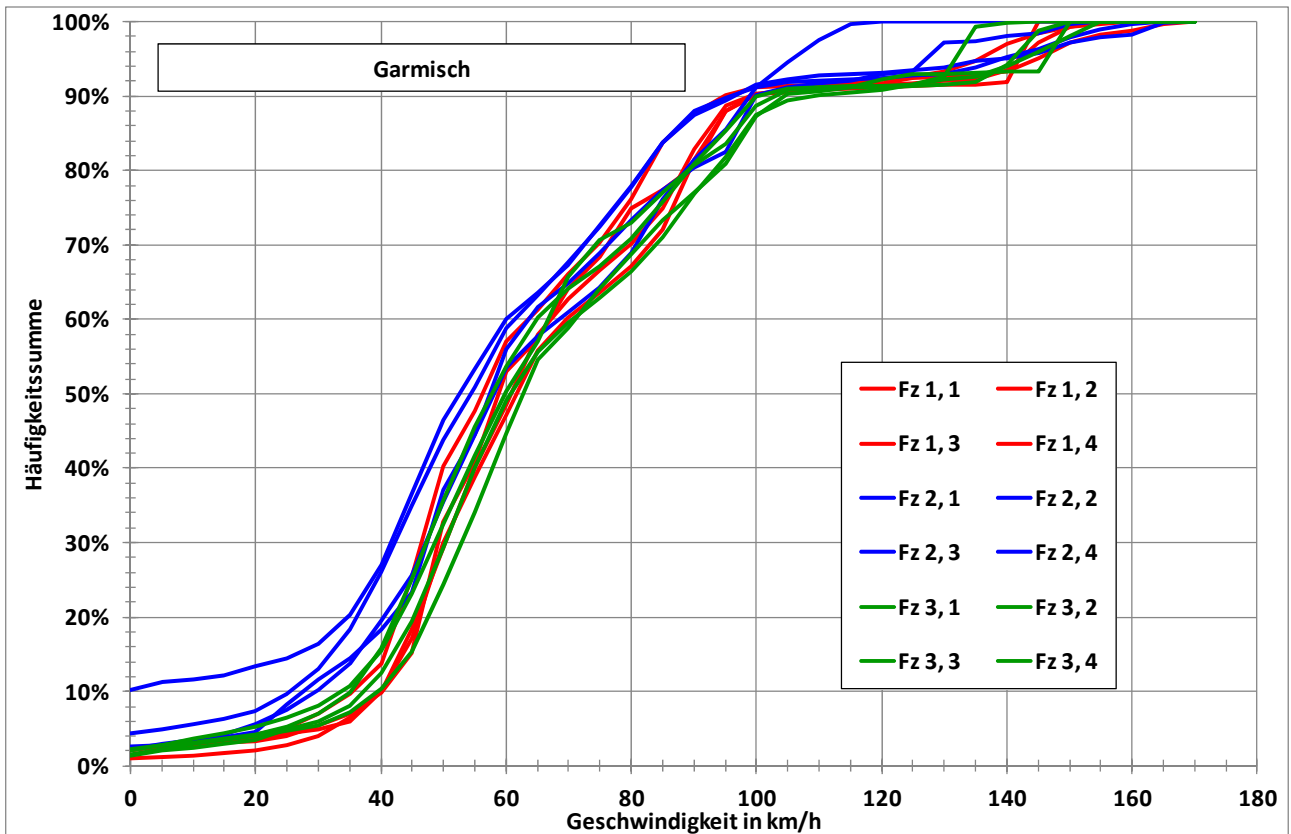


Abbildung 6-13: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der gemischten Strecke bei Garmisch

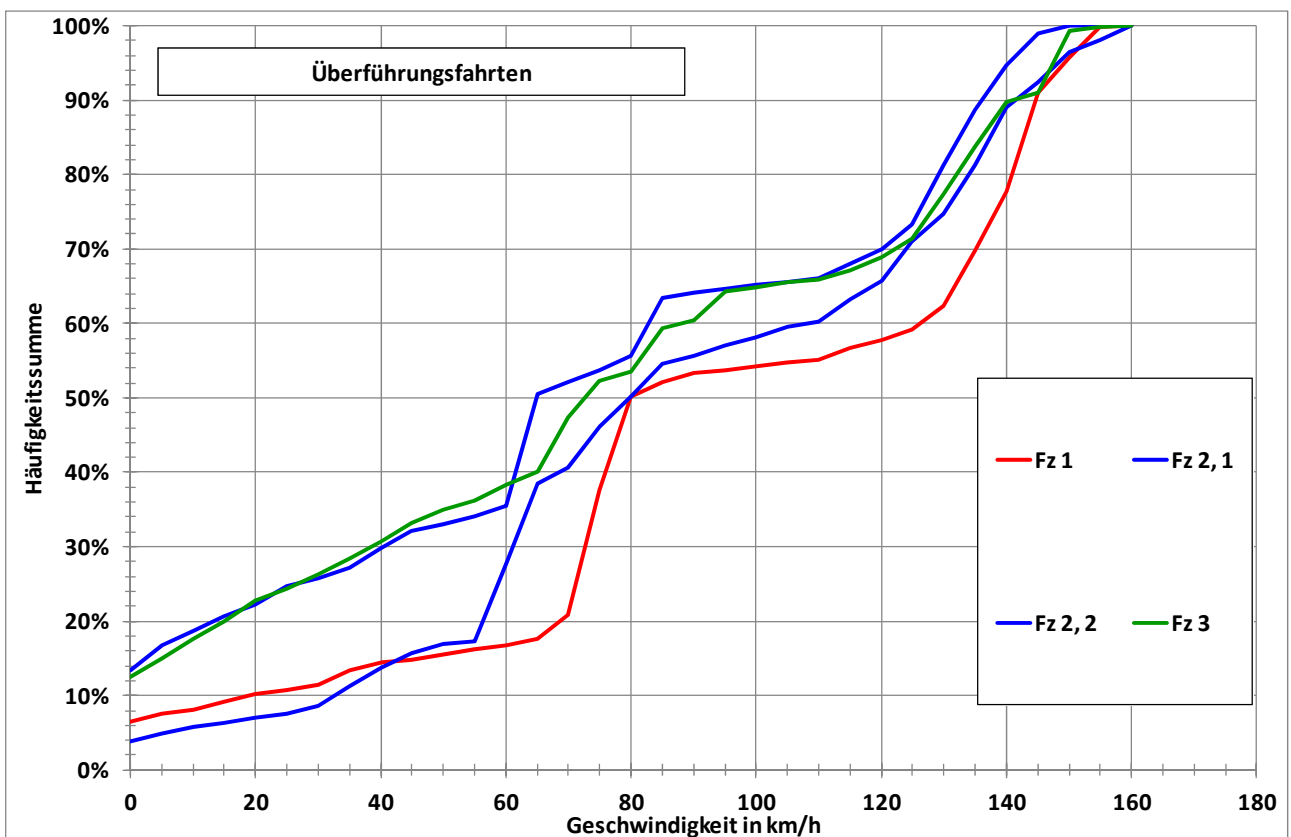


Abbildung 6-14: Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf Überführungsfahrten

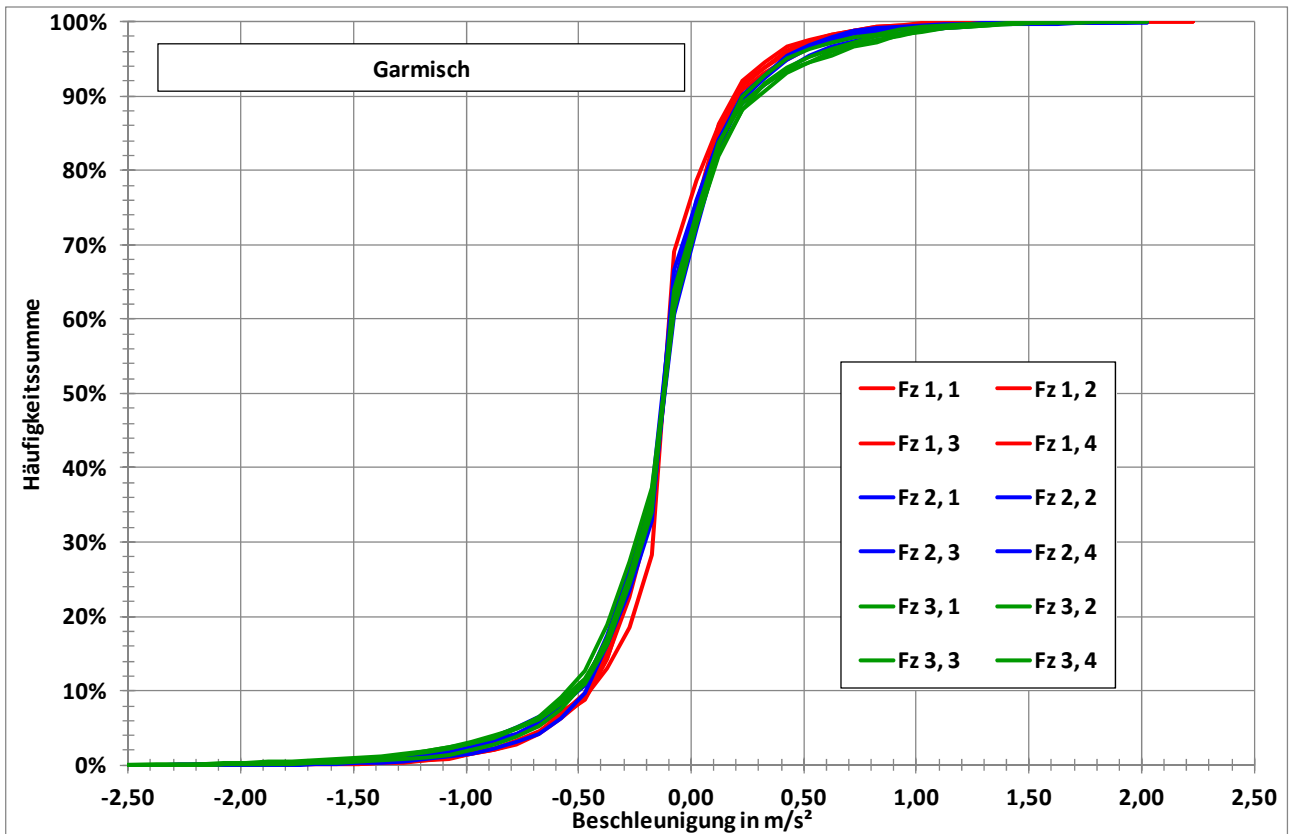


Abbildung 6-15: Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der gemischten Strecke bei Garmisch

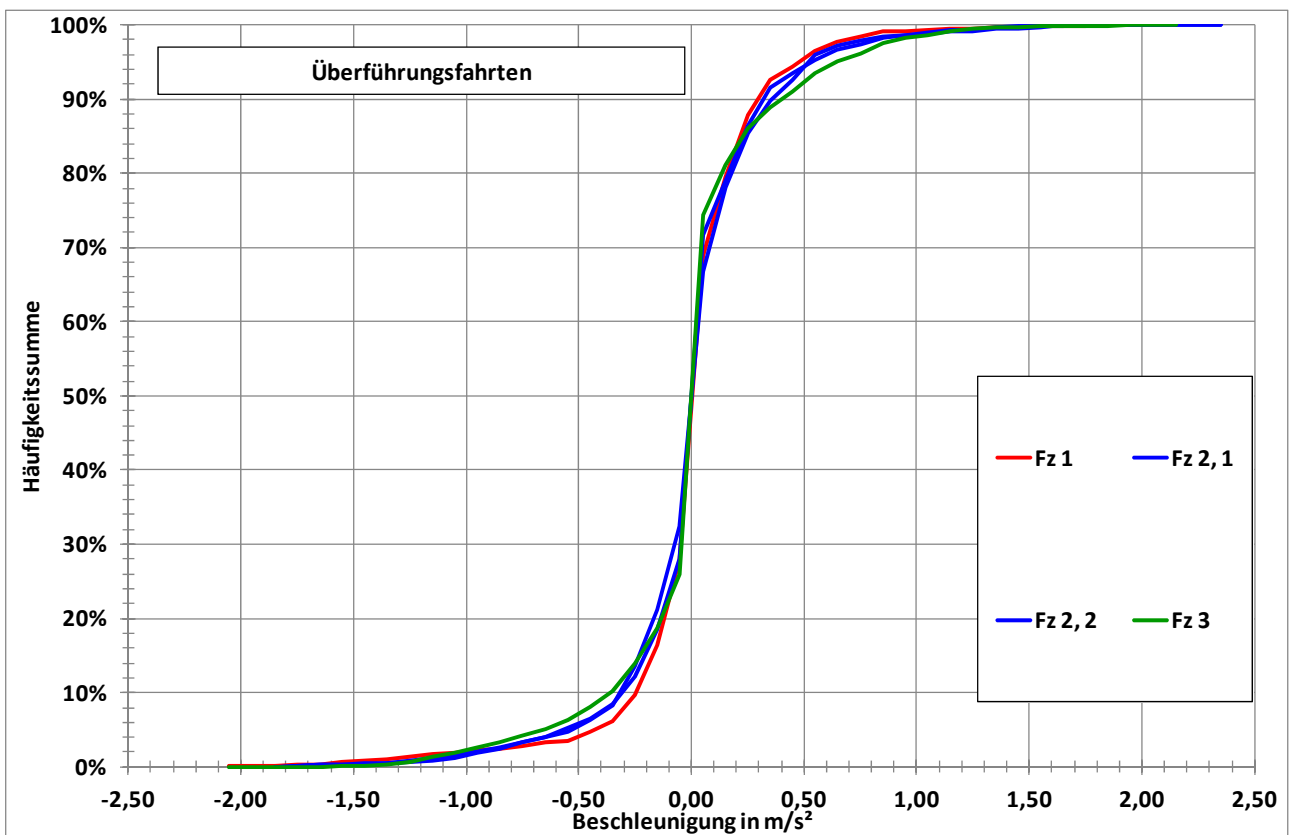


Abbildung 6-16: Kumulierte Beschleunigungsanteile auf Überführungsfahrten

Tabelle 6-4: Kennwerte der Fahrten auf der gemischten Strecke bei Garmisch und auf den Überführungsfahrten

ID_Strecke	Tempolimit	Fz Nr	Fahrt	Uhrzeit beim Start	Zeitdauer	p_stop	Strecke km	v_ave km/h	v_max km/h	a_pos_ave m/s ²	RPA m/s ²	eNOx mg/km	eCO2 g/km
					s								
4	wechselnd	1	73	13:38:28	4981	2,2%	90,6	65,5	161,8	0,31	0,0853	332,5	148,5
4	wechselnd	1	74	15:21:13	4672	2,0%	90,7	69,9	156,6	0,31	0,0897	316,7	145,3
4	wechselnd	1	75	16:54:55	4727	1,9%	90,7	69,1	145,7	0,36	0,0819	354,3	162,9
4	wechselnd	1	76	18:24:59	4565	0,9%	90,8	71,6	171,9	0,31	0,0888	302,3	149,5
4	wechselnd	2	86	06:52:13	4984	2,4%	91,6	66,2	156,9	0,39	0,0988	172,4	126,1
4	wechselnd	2	87	08:26:00	5289	4,1%	91,4	62,2	164,7	0,34	0,1031	234,0	139,3
4	wechselnd	2	88	10:02:58	5095	2,1%	91,5	64,7	122,0	0,34	0,0857	133,6	115,7
4	wechselnd	2	89	11:40:03	5505	9,8%	91,5	59,8	168,7	0,34	0,1091	227,4	125,9
4	wechselnd	3	59	07:32:32	4888	1,9%	92,6	68,2	152,5	0,37	0,1045	498,9	140,7
4	wechselnd	3	60	10:18:32	4720	1,2%	92,6	70,6	145,7	0,39	0,1085	439,8	135,6
4	wechselnd	3	61	11:45:55	4606	1,1%	92,6	72,4	152,5	0,39	0,0968	618,3	130,2
4	wechselnd	3	62	13:13:25	4889	1,8%	92,5	68,1	157,5	0,35	0,0992	532,0	133,1
6	wechselnd	1	72	12:50:20	1876	5,0%	50,3	96,5	158,9	0,32	0,0706	297,3	187,0
7	wechselnd	2	85	06:10:55	2085	2,9%	52,1	90,0	162,0	0,35	0,0881	213,8	129,4
8	wechselnd	2	90	13:13:03	2568	12,3%	53,3	74,7	152,4	0,37	0,0779	150,6	120,5
9	wechselnd	3	63	14:39:39	2518	11,4%	53,9	77,1	158,6	0,45	0,0729	518,1	167,0

6.2 Emissionen bei Stillstand (Motorleerlauf)

Alle zusammenhängenden Zeitanteile mit $v < 1$ km/h sind als Stopps indiziert. Abbildung 6-17 zeigt die Häufigkeitsverteilungen der Stoppzeiten auf den verschiedenen Fahrstrecken beispielhaft für Fahrzeug 1. Die Strecke bei Garmisch hat erwartungsgemäß die höchsten Anteile kurzer Stopps, gefolgt von der Außenbezirkstrecke in Stuttgart. Die Münchener Innenstadtstrecke hat etwas höhere Anteile längerer Stopps als die Innenstadtstrecke in Stuttgart. Der Vergleich der Kurven für unterschiedliche Tempolimits in Stuttgart und München zeigt, dass die Anzahl der Messungen für repräsentative Kurven nicht ausreicht bzw. dass die einzelnen Kurven einen relativ hohen Unsicherheitsbereich haben. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die Wiederholungsmessungen zu verschiedenen Tageszeiten stattfanden und die Verteilungen von den tageszeitlichen Schwankungen der Verkehrsbelastung beeinflusst wurden.

Alle drei Fahrzeuge waren mit Start-Stopp-Systemen ausgerüstet. Um festzustellen, zu welchem Anteil der Motor im Stillstand ausgeschaltet war, wurden die Motordrehzahlen bei den Stopps ausgewertet. In den Messergebnissen treten bei Stillstand Drehzahlen bis unter 100 min^{-1} , also bis weit unter die Leerlaufdrehzahl, auf. Das ist wahrscheinlich bei Motorabschaltung und Wiederanschaltung der Fall. Um Zeiten, in denen der Motor ausgeschaltet war, von denen trennen zu können, bei denen der Motor lief, wurde eine Grenzdrehzahl von 300 min^{-1} benutzt.

Die daraus berechneten Ergebnisse für die Stillstandanteile sind in Tabelle 6-5, Tabelle 6-6 und Tabelle 6-7 zusammengestellt. Bei Fahrzeug 1 wird das Start-Stopp-System nicht genutzt, sobald eine elektrische Verbindung über die Steckdose der Anhängerkupplung besteht, was beim Versuchsfahrzeug der Fall war. Darüber hinaus besteht laut ADAC ein unklarer Fehler in der Elektronik. Nennenswerte Prozentsätze von „Motor aus“ finden sich nur auf der ersten Überführungsfahrt und auf drei von den vier Fahrten bei Garmisch und sind aktiv durch den Fahrer verursacht, z.B. bei Fahrtbeginn oder Fahrtende.

Bei Fahrzeug 2 ist das Ergebnis deutlich besser. Die Anteile „Motor aus“ liegen zwischen 31% und 86% mit einem Mittelwert von 60,6%. Bei Fahrzeug 3 schwanken die Anteile „Motor aus“ zwischen 0% und 83% mit einem Mittelwert von 41,2%, wobei sehr niedrige Anteile ausschließlich in Stuttgart aufgetreten sind.

Allen Fahrzeugen gemeinsam sind starke Schwankungen in den mittleren Emissionen von NO_x und CO₂ bei „Motor an“ und zwar auch innerhalb einer Kombination von Fahrstrecke und Fahrauftrag. Die höchsten Schwankungen zeigt Fahrzeug 2 bei NO_x. Die genauen Ursachen für diese Schwankungsbreite werden im Rahmen dieses Projekts nicht analysiert, es wird allerdings vermutet, dass sie in unterschiedlichen Betriebszuständen während eines Ein-/Auspeicherzyklus des NO_x-Speicherkatalysators zu suchen sind.

Die Ergebnisse machen aber auch deutlich, dass man bei Ursachenanalysen für die Emissionen über eine gesamte Fahrt die Effekte während short trips und Stillstandphasen getrennt auswerten sollte.

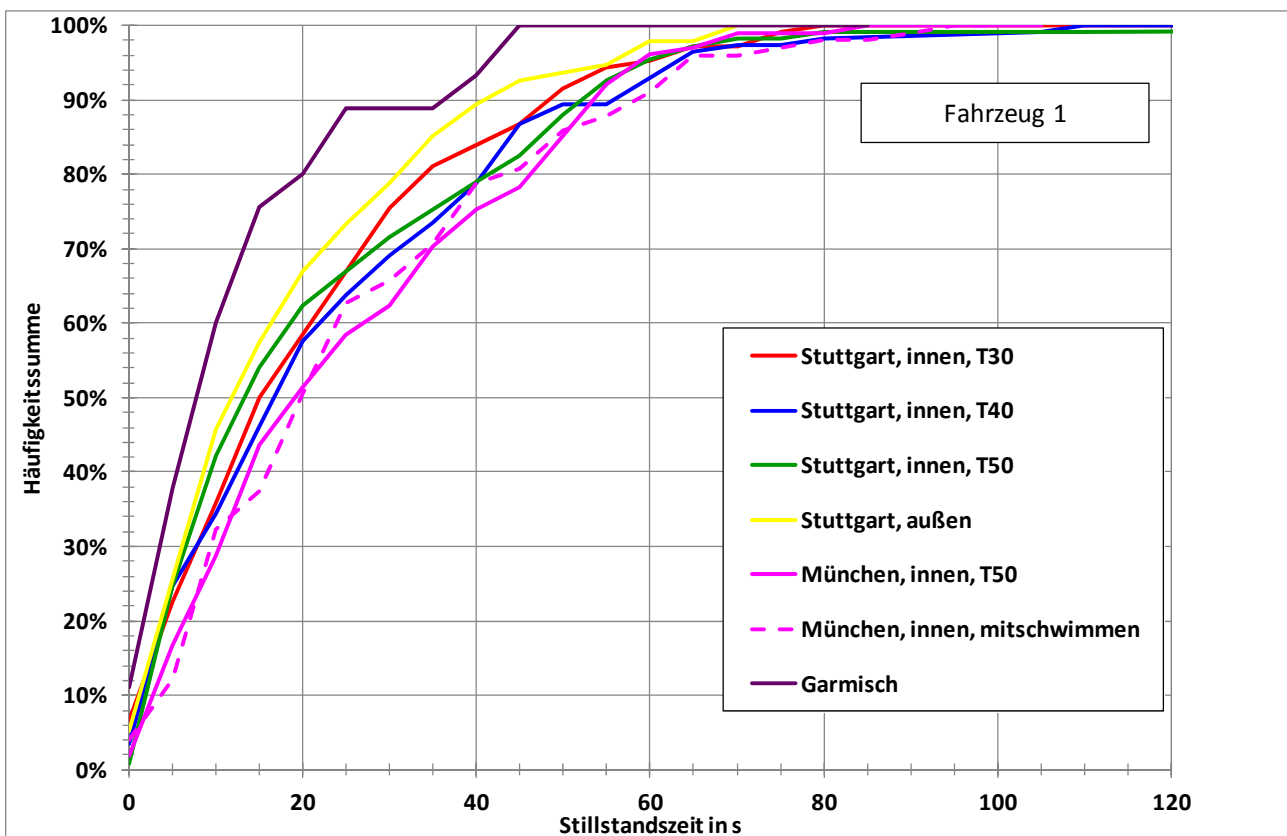


Abbildung 6-17: Häufigkeitsverteilungen der Stillstandszeiten auf den verschiedenen Fahrstrecken für Fahrzeug 1

Tabelle 6-7: Kennwerte der Stillstandzeiten für die verschiedenen Fahrstrecken bei Fahrzeug 3

Stadt, Tempolimit	Fahrt	Uhrzeit	Dauer s	Anzahl Stopps	mittl. Stoppzeit	Zeit Motor aus	Zeit Motor an	Anteil Motor aus	NOx Motor an	NOx effektiv	CO ₂ Motor an	CO ₂ effektiv
					s	s	s		mg/s	mg/s	mg/s	mg/s
Stuttgart, T30	43	06:38:57	658	27	24,4	317	341	48,2%	0,512	0,265	528,7	274,0
	35	07:37:59	642	26	24,7	152	490	23,7%	0,903	0,689	580,1	442,8
	39	14:32:55	1108	42	26,4	59	1049	5,3%	1,105	1,046	630,5	596,9
	50	15:05:35	927	41	22,6	191	736	20,6%	0,925	0,734	613,2	486,8
Stuttgart, T40	44	07:36:39	534	27	19,8	401	133	75,1%	0,650	0,162	520,9	129,7
	36	08:38:32	622	23	27,0	230	392	37,0%	0,920	0,580	569,8	359,1
	40	13:32:19	852	43	19,8	10	842	1,2%	1,053	1,041	613,2	606,1
	49	14:05:17	907	44	20,6	175	732	19,3%	1,095	0,884	678,4	547,5
Stuttgart, T50	37	09:31:49	638	23	27,7	168	470	26,3%	1,035	0,763	569,8	419,8
	45	09:32:20	654	36	18,2	347	307	53,1%	0,973	0,457	517,6	243,0
	48	12:32:08	770	37	20,8	378	392	49,1%	0,950	0,484	583,5	297,0
	41	12:39:51	785	32	24,5	227	558	28,9%	1,173	0,834	613,6	436,2
Stuttgart, Außenbezirksstrecke	38	10:19:24	419	22	19,0	1	418	0,2%	1,102	1,100	530,1	528,8
	46	10:21:59	307	20	15,4	80	227	26,1%	0,723	0,535	494,7	365,8
	47	11:28:18	343	18	19,1	139	204	40,5%	0,826	0,491	519,4	308,9
	42	15:45:59	590	28	21,1	155	435	26,3%	0,821	0,605	554,6	408,9
München, T50	55	16:27:37	670	28	23,9	283	387	42,2%	1,239	0,716	607,9	351,1
	56	17:02:22	476	20	23,8	238	238	50,0%	1,032	0,516	520,2	260,1
	57	17:30:43	574	19	30,2	229	345	39,9%	1,018	0,612	548,4	329,6
	58	17:59:48	343	17	20,2	118	225	34,4%	1,028	0,674	555,9	364,7
München, mit-schwimmen	51	13:52:58	630	25	25,2	521	109	82,7%	1,019	0,176	410,0	70,9
	52	14:26:27	569	31	18,4	182	387	32,0%	1,078	0,733	658,4	447,8
	53	15:01:11	885	40	22,1	596	289	67,3%	1,146	0,374	594,2	194,1
	54	15:01:11	708	28	25,3	364	344	51,4%	1,144	0,556	686,2	333,4
Garmisch	59	07:32:32	95	6	15,8	59	36	62,1%	1,584	0,600	722,5	273,8
	60	09:15:11	56	6	9,3	33	23	58,9%	1,645	0,676	735,7	302,1
	61	11:45:59	52	6	8,7	36	16	69,2%	1,001	0,308	616,3	189,6
	62	13:13:25	88	5	17,6	57	31	64,8%	1,108	0,390	543,2	191,4
Überführung	63	14:39:39	286	14	20,4	172	114	60,1%	1,021	0,407	608,6	242,6

6.3 NO_x-Emissionen

Bei der Auswertung der Ergebnisse für die NO_x-Emissionen wurde wie folgt vorgegangen: Für sämtliche Fahrzeuge und Fahrten wurden die Zeitverläufe der Geschwindigkeit, der NO_x-Emissionen in mg/s und der geographischen Höhe graphisch dargestellt und gesichtet.

Abbildung 6-18 bis Abbildung 6-20 zeigen Beispiele für die drei Fahrzeuge auf derselben Fahrstrecke. Die Bilder machen deutlich, dass die Hauptbeiträge zu den Emissionen aus Emissionsspitzen oder „Peaks“, die bei Beschleunigungsvorgängen auftreten, stammen. Deren Höhe ist z. T. stochastisch, was zu Streuungen im Messergebnis beiträgt.

Das Höhensignal weist starke lokale Schwankungen und/oder Aussetzer auf, die eine fortlaufende Bestimmung der Längsneigung unmöglich machen. Die GPS-Höhenbestimmung ist oft fehlerhaft und stark von äußeren Einflüssen wie Unterführungen, Straßenschluchten o. Ä. abhängig.

Abbildung 6-21 zeigt den Höhenverlauf der Innenstadtstrecke in Stuttgart. Aus diesen Bildern wurden auch für die anderen Fahrstrecken abschnittsweise konstante Längsneigungen abgeleitet und den sekundlichen Messergebnissen zugeordnet.

Auf den beiden Fahrstrecken in Stuttgart treten Steigungen und Gefälle von ca. 5% auf, in Spitzen bis 6,8% auf der Hohenheimer Straße und auf der Strecke in Garmisch von ca. 4%. Bei der Auf-fahrt auf der Kesselbergstraße treten hier Steigungen bis über 20% auf. Die Strecke in München wies keine nennenswerten Längsneigungen auf.

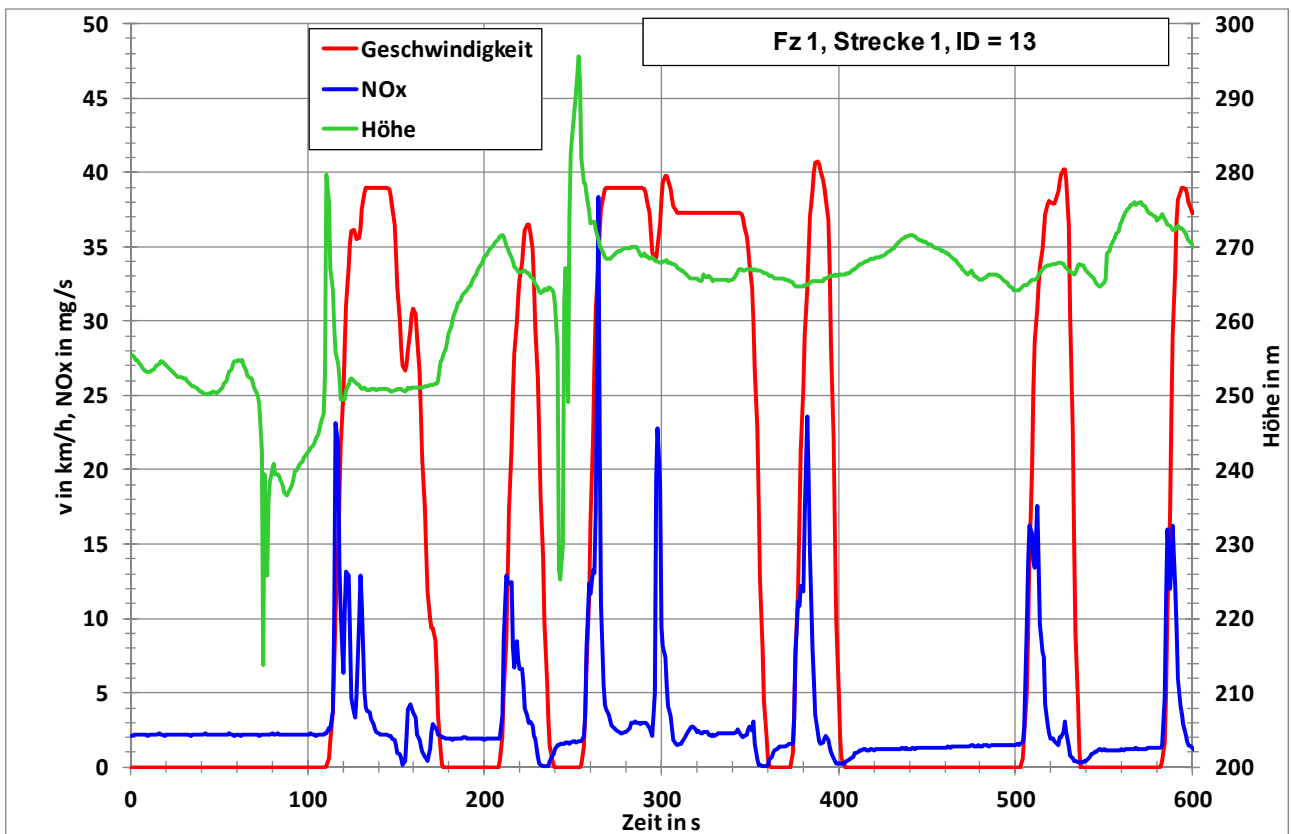


Abbildung 6-18: Zeitverlauf von Geschwindigkeit, NO_x-Emission und Höhe für Fahrzeug 1, Stuttgart, Innenstadtstrecke, Tempo 40

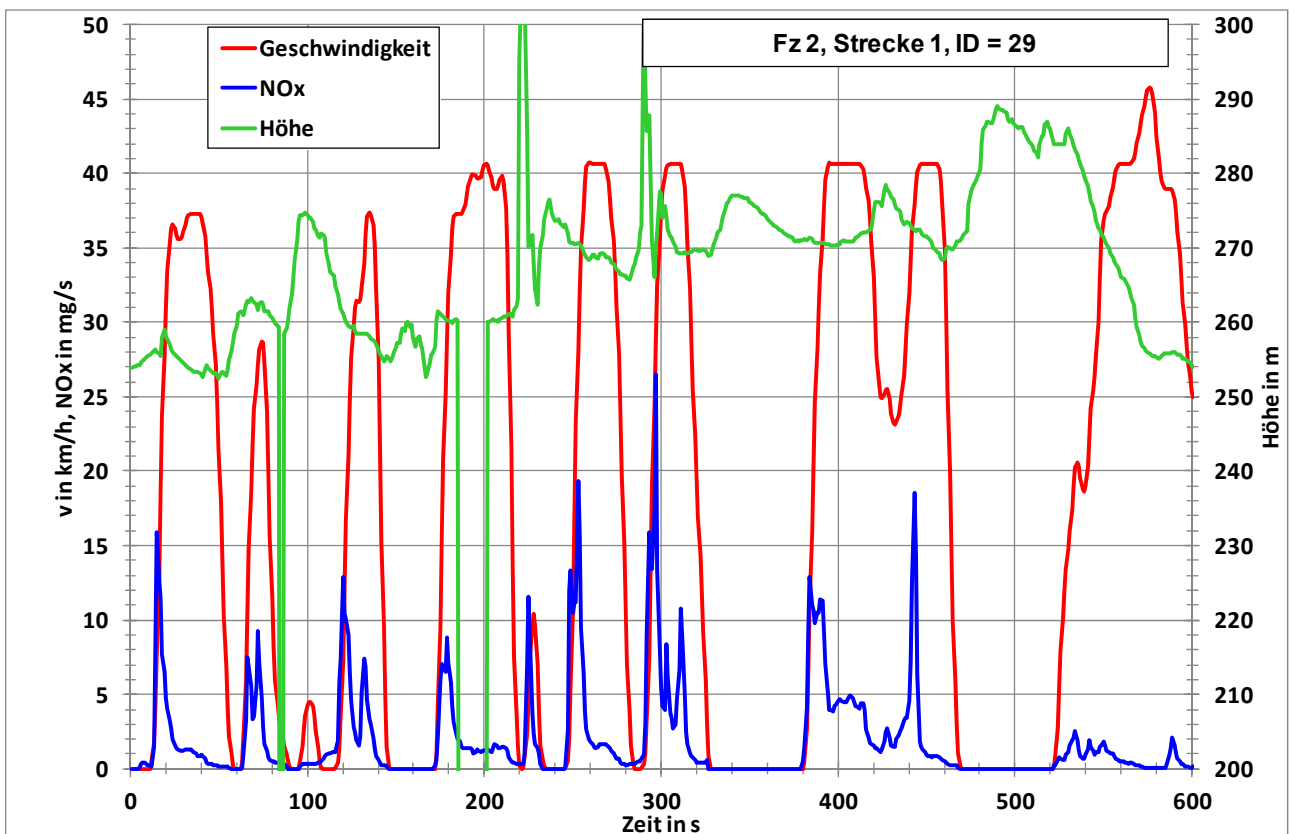


Abbildung 6-19: Zeitverlauf von Geschwindigkeit, NO_x-Emission und Höhe für Fahrzeug 2, Stuttgart, Innenstadtstrecke, Tempo 40

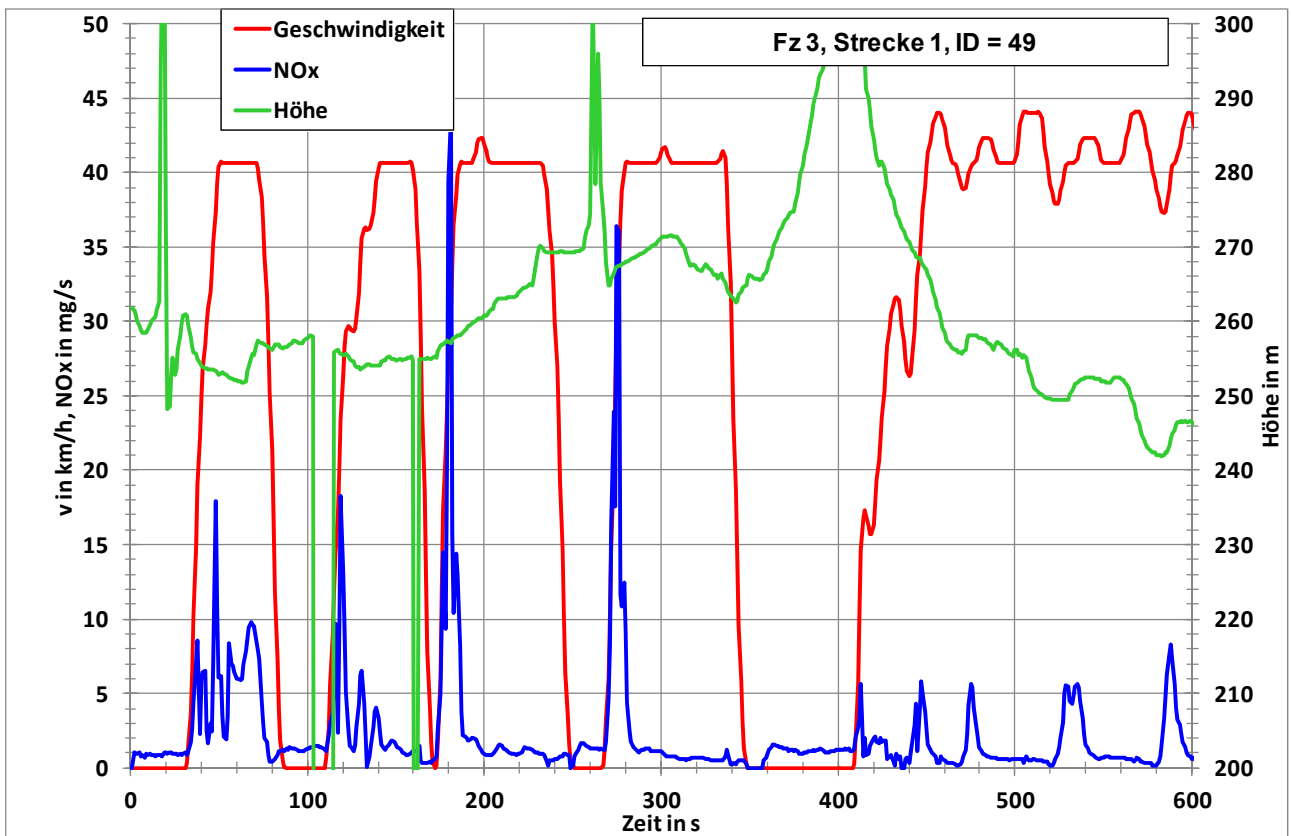


Abbildung 6-20: Zeitverlauf von Geschwindigkeit, NO_x-Emission und Höhe für Fahrzeug 3, Stuttgart, Innenstadtstrecke, Tempo 40

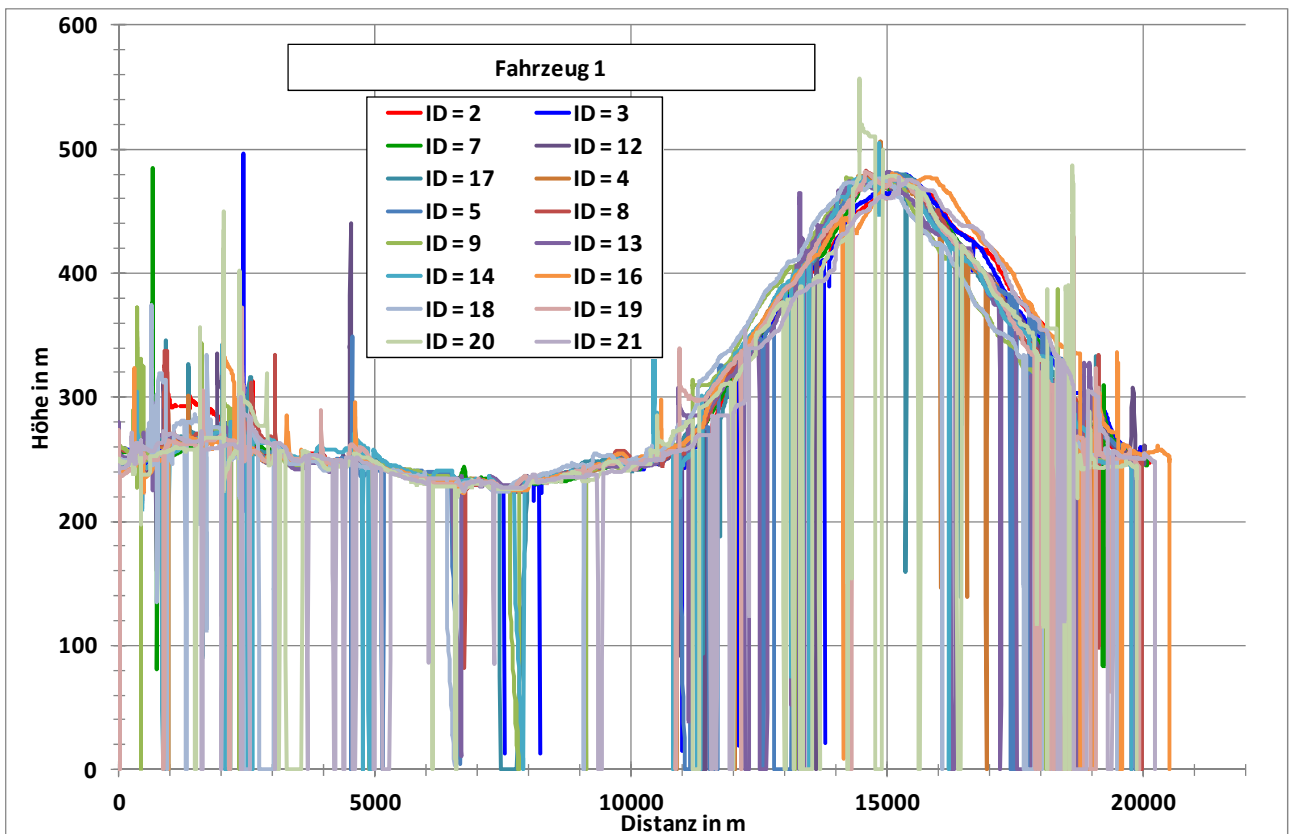


Abbildung 6-21: Höhenverlauf der Innenstadtstrecke in Stuttgart (alle Messfahrten Fahrzeug 1)

6.3.1 NO_x-Emissionen im Vergleich zum HBEFA 3.2

Im Folgenden werden die auf den verschiedenen Fahrstrecken erhaltenen Ergebnisse mit den Emissionsfaktoren des Handbuchs für Emissionsfaktoren (HBEFA) Version 3.2 verglichen, wobei natürlich nur die Emissionsfaktoren des Handbuchs für Euro 6-Diesel-Pkw der ersten Stufe berücksichtigt werden. Zusätzlich werden auch die Euro 5-Werte für Diesel-Pkw aus dem HBEFA angegeben. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6-22, Abbildung 6-23 und Abbildung 6-24 dargestellt.

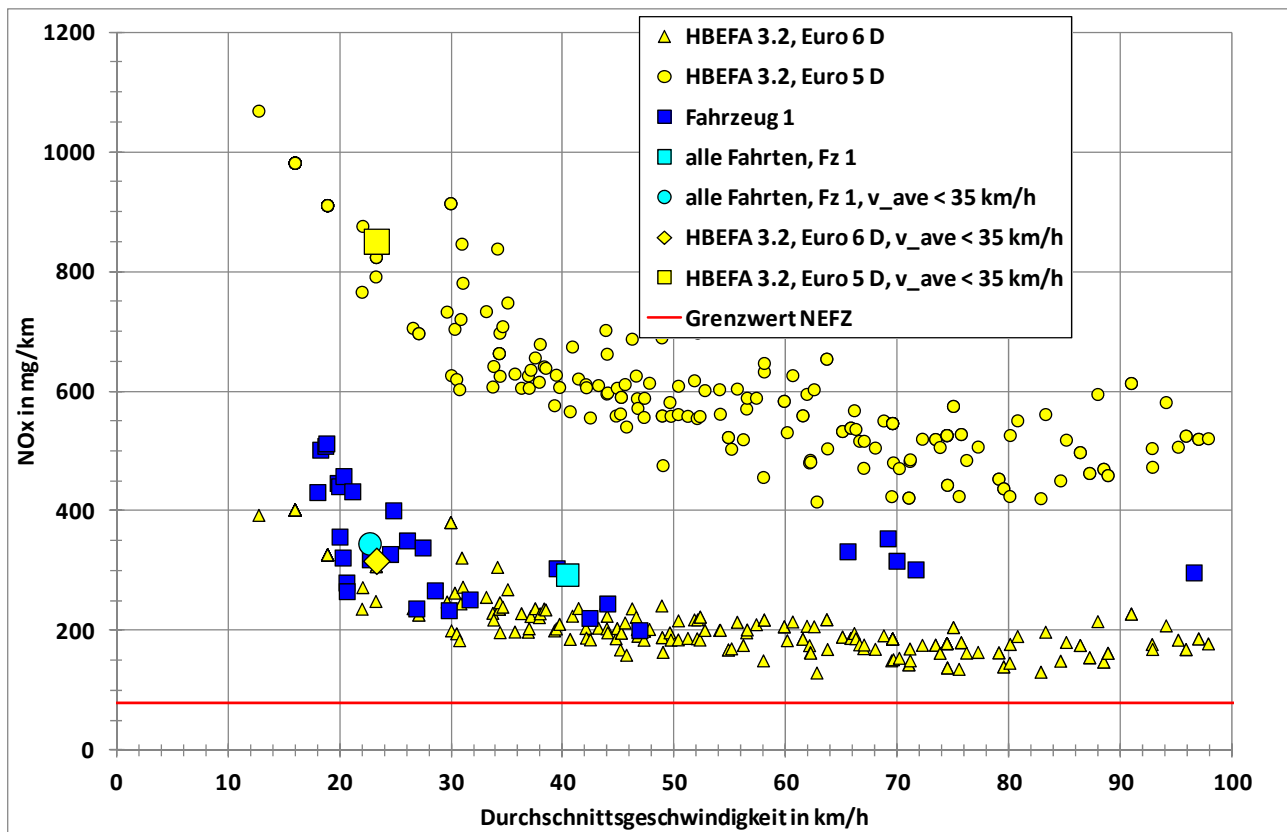


Abbildung 6-22: NO_x-Emissionen der verschiedenen Fahrten für Fahrzeug 1 im Vergleich zu den Emissionsfaktoren aus HBEFA 3.2

Bei Fahrzeug 1 (Abbildung 6-22) liegen die NO_x-Emissionen für die PEMS-Messungen zwischen 200 mg/km und 513 mg/km. Für Durchschnittsgeschwindigkeiten unter 50 km/h liegen die Emissionen im oder etwas über dem Streuband der HBEFA Euro 6-Diesel-Emissionsfaktoren, aber deutlich unter den Euro 5-Diesel-Emissionsfaktoren. Für die Fahrten in Garmisch und die Überführungsfahrt mit Durchschnittsgeschwindigkeiten über 60 km/h liegen die Emissionen bei Fahrzeug 1 jedoch signifikant über den HBEFA Euro 6-Diesel-Emissionsfaktoren und für Garmisch (Durchschnittsgeschwindigkeiten über 70 km/h) sogar näher an den HBEFA Euro 5-Diesel-Emissionsfaktoren. Die Emissionswerte über 400 mg/km sind bis auf einen Fall sämtlich der Innenstadtstrecke in München zugehörig, obwohl diese Strecke im Gegensatz zu Stuttgart keine Steigungsanteile enthält. Auf die Gründe hierfür wird später noch näher eingegangen (Kapitel 6.3.5).

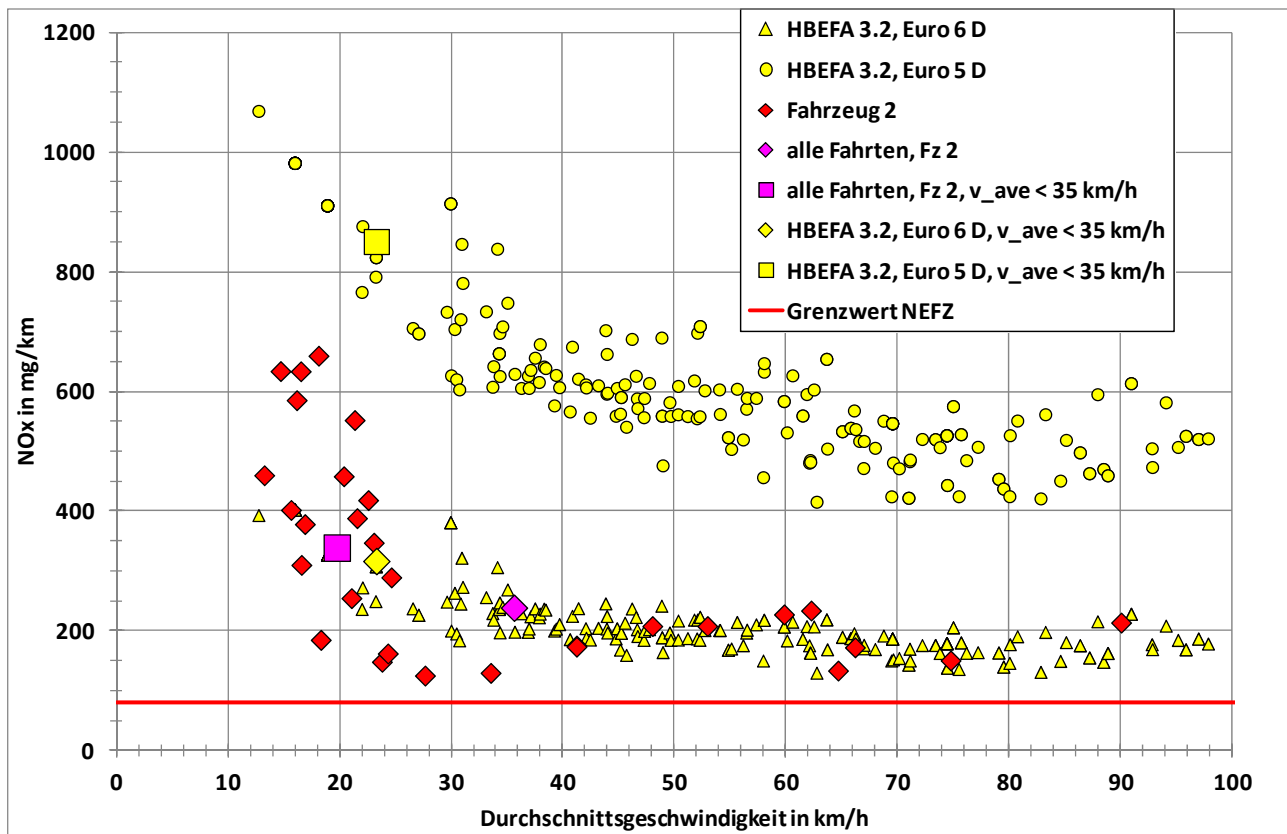


Abbildung 6-23: NO_x -Emissionen der verschiedenen Fahrten für Fahrzeug 2 im Vergleich zu den Emissionsfaktoren aus HBEFA 3.2

Bei Fahrzeug 2 (Abbildung 6-23) ergibt sich ein anderes Bild. Hier schwanken die NO_x -Emissionswerte zwischen 125 mg/km und 660 mg/km, wobei die Spanne für Durchschnittsgeschwindigkeiten über 30 km/h auf Werte zwischen 130 mg/km und 234 mg/km schrumpft. Im Innerortsbereich ist die Streubreite jedoch enorm. Die extrem hohen Werte über 500 mg/km sind wieder der Innenstadtstrecke in München zuzuordnen. Sie sind allerdings immer noch signifikant niedriger als die HBEFA Euro 5-Werte.

Fahrzeug 3 (Abbildung 6-24) zeigt die schlechtesten Ergebnisse. Die PEMS-Emissionswerte streuen zwischen 284 mg/km und 676 mg/km. Für die Strecken in Stuttgart und München liegen die Emissionswerte überwiegend oberhalb der HBEFA-Emissionsfaktoren für Euro 6-Diesel, aber noch unterhalb der HBEFA-Werte für Euro 5-Diesel. Für die Überführungsfahrt und die Strecke bei Garmisch liegen die Emissionswerte der PEMS-Fahrten jedoch voll im Streuband der HBEFA-Euro 5-Diesel-Werte. Dies liegt zum Teil auch daran, dass die NO_x -Emissionen bei diesem Fahrzeug oberhalb von 135 km/h extrem stark ansteigen.

Zur Information ist in den obigen Abbildungen der Grenzwert des Rollenprüfstand-Typprüfzyklus NEFZ dargestellt. Es ist erkennbar, dass das HBEFA 3.2 für Euro 6-Fahrzeuge bei Fahrten im Realverkehr von deutlich höheren Emissionen ausgeht als im Typprüfzyklus. Die Realitätsnähe des Typprüfzyklus wird allgemein angezweifelt, so dass höhere Emissionen bei Realfahrten nachvollziehbar sind. Die sehr große Bandbreite der Emissionsergebnisse für die einzelnen Fahrzeuge sowie die deutlichen Unterschiede zwischen den drei Abgasminderungskonzepten zeigen jedoch, dass Verbesserungspotentiale bestehen. So finden sich z.B. für Fahrzeug 2 durchaus Fahrten mit Durchschnittsgeschwindigkeiten des innerstädtischen Verkehrs, die Emissionen in der Nähe des NEFZ-Grenzwertes aufweisen. Gleichzeitig existieren aber auch Emissionsergebnisse in Höhen

von über 600 mg/km. Diese großen Unterschiede sind nicht ausschließlich fahrzeugspezifische Probleme, was im folgenden Kapitel 6.3.2 gezeigt wird.

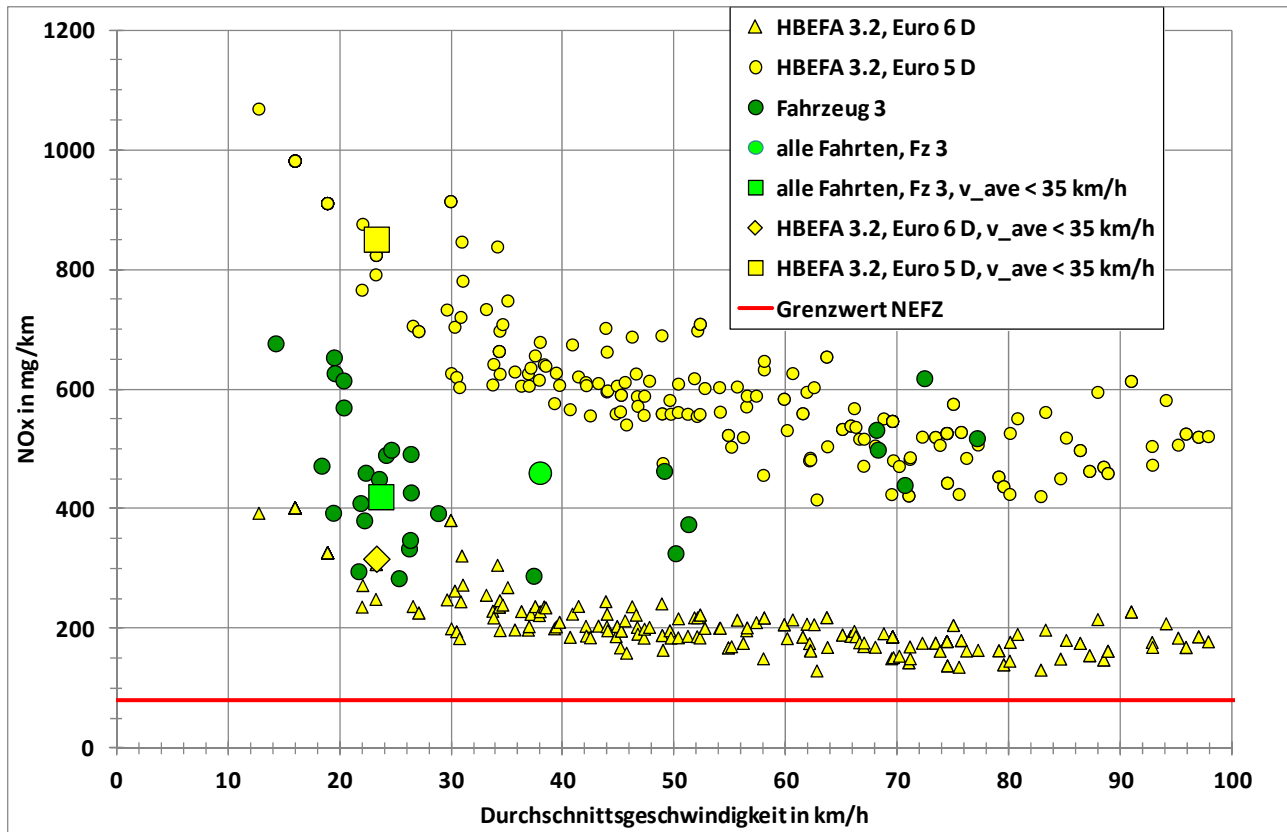


Abbildung 6-24: NO_x -Emissionen der verschiedenen Fahrten für Fahrzeug 3 im Vergleich zu den Emissionsfaktoren aus HBEFA 3.2

6.3.2 Streckenvergleich

In Abbildung 6-25 bis Abbildung 6-27 sind die NO_x -Emissionen aller Fahrten der drei Fahrzeuge getrennt nach Fahrstrecken und Fahrauftrag dargestellt. In Tabelle 6-8 bis Tabelle 6-10 sind die Kennwerte aller Fahrten aufgelistet. Die Ergebnisse zeigen, wie schon gesagt, den Einfluss wechselnder Verkehrssituationen, so dass keine eindeutigen Schlüsse für die verschiedenen Fahraufträge abgeleitet werden können. So ist z.B. der Unterschied zwischen mitschwimmen und Tempo 50 auf der Innenstadtstrecke in München bei Fahrzeug 1 nicht signifikant, bei Fahrzeug 2 ist mitschwimmen günstiger und bei Fahrzeug 3 ist Tempo 50 günstiger.

Auf jeden Fall sind die NO_x -Emissionen auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart bei gleicher Durchschnittsgeschwindigkeit niedriger als auf der Innenstadtstrecke in München. Dies ist ein wichtiges Ergebnis, zeigt es doch, dass für eine genauere Abschätzung der Emissionen die Systematik des HBEFA nicht ausreicht, denn beide Strecken würden danach in dieselbe Kategorie fallen. Wie in 6.3.5 noch gezeigt wird, sind für eine genauere Einschätzung zusätzliche kinematische Parameter notwendig.

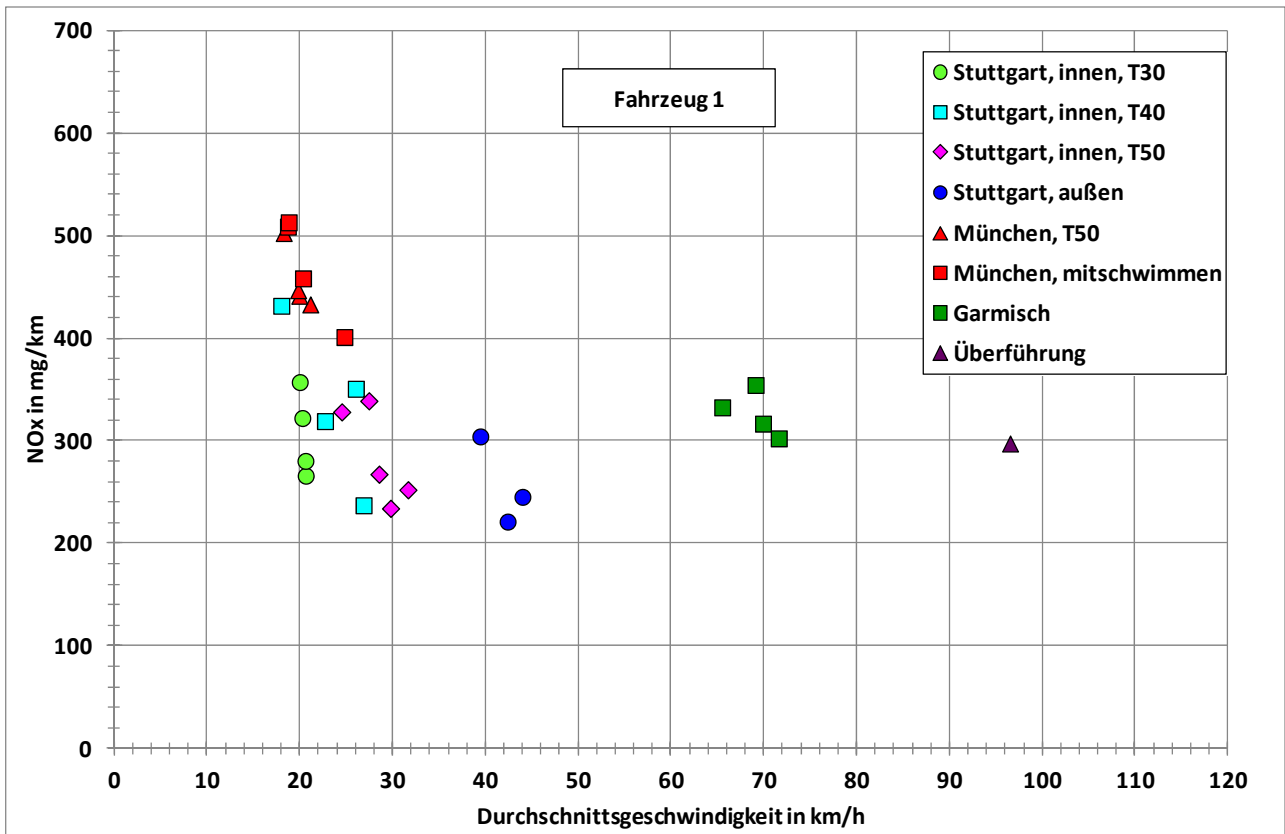


Abbildung 6-25: NO_x-Emissionen getrennt nach Fahrstrecken für Fahrzeug 1

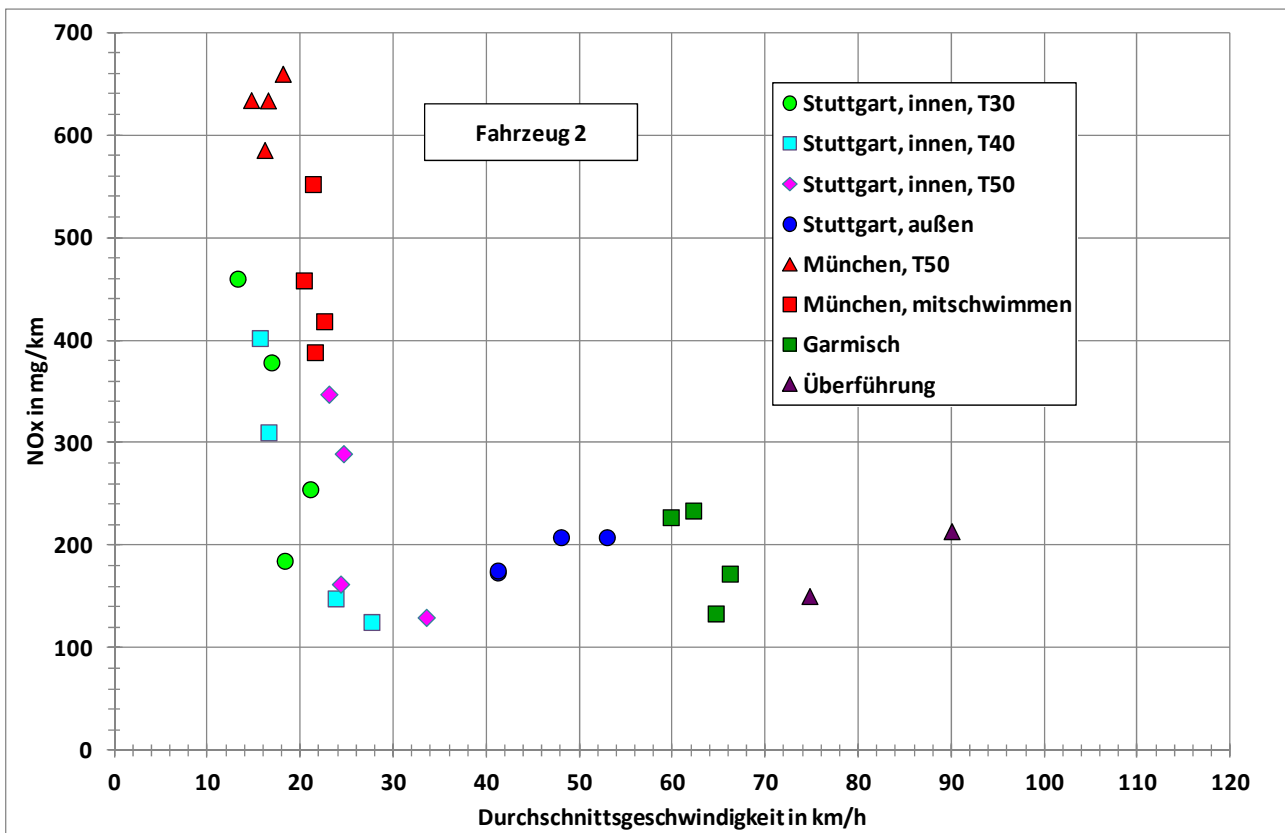


Abbildung 6-26: NO_x-Emissionen getrennt nach Fahrstrecken für Fahrzeug 2

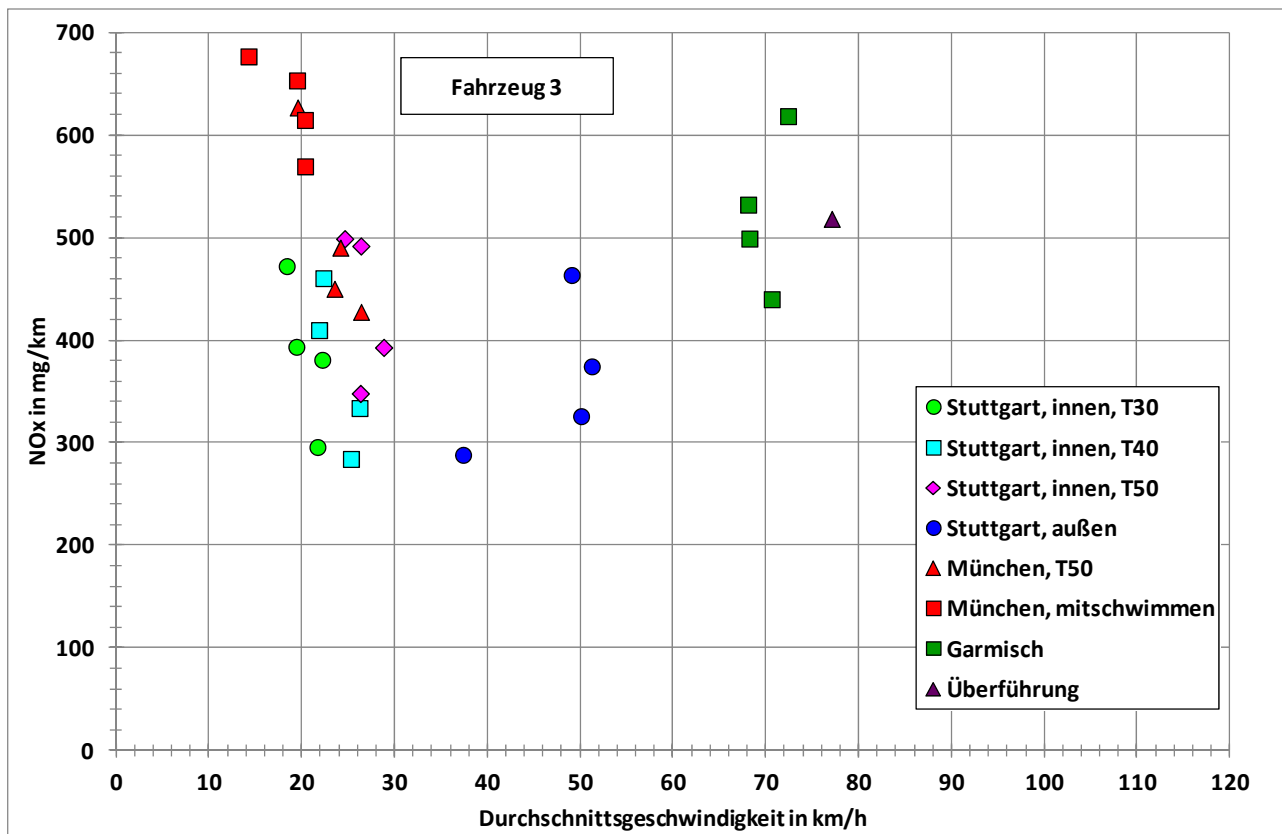


Abbildung 6-27: NO_x-Emissionen getrennt nach Fahrstrecken für Fahrzeug 3

In den folgenden Tabellen bedeutet:

- v_ave_wo Durchschnittsgeschwindigkeit ohne Stillstand,
- RPA relative positive Beschleunigung,
- eNO_x_ST spezifische NO_x-Emission in mg/km ohne Stillstand,
- n_ST Anzahl der short trips je Fahrt,
- n_NO_x_peaks Anzahl der NO_x-Emissionsspitzen pro Kilometer (> 8 mg/s)

Tabelle 6-8: Kennwerte der Fahrten für Fahrzeug 1

Stadt, Tempolimit	Fahrt	Uhrzeit	Dauer	Distanz	p_stop	v_ave	v_ave_wo	v_max	RPA	n_ave	n_max	P_ave	P_max	eNOx	NOx_ave_stop	eNOx_ST	n_ST	n NOx peaks
			s	km		km/h	km/h	km/h	m/s ²	min ⁻¹	min ⁻¹	kW	kW	mg/km	mg/s	mg/km		
Stuttgart, T30	9	08:45:12	3406	19,5	16,3%	20,6	24,7	37,3	0,0479	1254	1999	7,9	38,0	265,9	1,228	231,0	22	4
	18	09:56:07	3461	19,5	18,4%	20,3	24,9	34,8	0,0437	1260	2172	9,4	45,5	322,1	1,571	270,7	25	17
	5	15:19:12	3575	19,9	21,1%	20,0	25,3	38,4	0,0635	1307	1978	10,3	36,5	357,1	1,586	296,9	30	16
	14	16:12:36	3454	19,8	14,4%	20,6	24,1	35,6	0,0567	1290	2336	9,3	43,3	280,3	1,243	249,0	25	19
Stuttgart, T40	8	07:58:52	2676	20,0	17,6%	26,9	32,6	46,9	0,0748	1301	2203	10,4	39,7	237,1	0,945	214,8	22	14
	17	09:03:20	2748	19,9	19,9%	26,0	32,5	44,0	0,0679	1265	2486	10,2	42,3	350,6	1,321	314,3	21	29
	4	14:25:24	3153	19,9	21,0%	22,7	28,7	47,7	0,0954	1319	2250	10,9	43,9	319,2	1,307	275,7	26	22
	13	15:00:11	3954	19,8	30,3%	18,0	25,8	45,8	0,0853	1269	2271	10,1	51,7	431,5	1,337	350,4	40	36
Stuttgart, T50	7	07:17:54	2428	20,1	18,3%	29,8	36,4	54,9	0,1150	1364	2400	11,7	49,9	234,1	1,006	211,9	18	24
	16	08:10:10	3012	20,5	26,9%	24,5	33,5	53,3	0,1211	1374	2211	11,0	48,0	328,1	0,973	289,7	29	33
	2	11:37:02	2539	20,1	22,5%	28,5	36,8	58,4	0,1182	1398	2173	12,1	44,7	267,4	1,034	238,0	19	23
	3	12:20:05	2290	20,1	17,6%	31,7	38,4	55,1	0,0984	1364	2202	11,6	40,5	252,2	1,149	229,2	13	25
	12	14:09:43	2628	20,0	20,6%	27,4	34,5	62,1	0,1351	1378	2460	12,2	48,7	338,9	1,211	306,2	26	45
München, T50	68	08:50:15	1845	10,8	33,0%	21,1	31,5	52,5	0,1534	1266	2235	10,7	51,1	432,8	0,950	379,5	20	30
	69	09:21:35	2139	10,9	36,8%	18,3	28,9	49,2	0,1479	1267	2182	11,1	47,1	502,4	1,280	409,5	30	27
	70	09:59:47	1962	10,9	35,0%	20,0	30,7	52,5	0,1290	1274	2304	11,3	50,9	441,3	1,357	355,5	25	26
	71	10:32:53	1970	10,9	34,3%	19,8	30,2	53,7	0,1494	1303	2228	11,5	51,3	446,6	1,171	373,6	25	30
München, mit-schwimmen	64	06:29:17	1590	11,0	28,6%	24,8	34,7	66,1	0,1613	1299	2380	12,8	52,1	401,0	1,005	359,3	15	28
	65	07:04:49	1922	10,9	37,0%	20,4	32,3	63,3	0,1660	1285	2333	11,6	58,4	458,2	1,088	386,9	23	29
	66	07:39:44	2094	10,9	38,5%	18,7	30,4	64,3	0,1628	1257	2243	10,6	54,4	508,6	1,486	398,5	26	28
	67	08:15:05	2083	10,9	36,7%	18,8	29,7	67,8	0,1769	1242	2119	10,8	54,5	512,9	0,978	444,1	32	32
Stuttgart, Außenbezirksstrecke	15	06:56:15	4377	51,5	12,2%	42,4	48,3	111,8	0,0968	1422	2590	14,2	68,8	221,2	1,065	210,2	31	54
	11	12:49:22	4223	51,6	15,7%	44,0	52,2	111,1	0,1019	1457	2489	14,9	52,9	245,3	1,111	231,0	22	69
	6	16:35:21	4693	51,4	13,8%	39,5	45,8	115,1	0,0974	1437	2653	14,2	64,5	304,2	1,563	284,5	39	69
Garmisch	73	13:38:28	4981	90,6	2,2%	65,5	67,0	161,8	0,0853	1561	4343	18,4	84,2	332,5	1,636	330,6	6	103
	74	15:21:13	4672	90,7	2,0%	69,9	71,3	156,6	0,0897	1588	2965	19,0	81,9	316,7	0,958	315,7	5	119
	75	16:54:55	4727	90,7	1,9%	69,1	70,4	145,7	0,0819	1569	3181	19,3	94,1	354,3	1,026	353,3	4	83
	76	18:24:59	4565	90,8	0,9%	71,6	72,3	171,9	0,0888	1607	3277	19,5	85,5	302,3	0,985	301,9	3	90
Überführung	72	12:50:20	1876	50,3	5,0%	96,5	101,6	158,9	0,0706	2029	3014	32,1	78,3	297,3	1,296	294,9	5	30

Tabelle 6-9: Kennwerte der Fahrten für Fahrzeug 2

Stadt, Tempolimit	Fahrt	Uhrzeit	Dauer	Distanz	p_stop	v_ave	v_ave_wo	v_max	RPA	n_ave	n_max	P_ave	P_max	eNOx	NOx_ave_stop	eNOx_ST	n_ST	n NOx peaks
			s	km		km/h	km/h	km/h	m/s ²	min ⁻¹	min ⁻¹	kW	kW	mg/km	mg/s	mg/km		
Stuttgart, T30	23	06:47:28	3902	19,9	23,0%	18,3	23,8	35,6	0,0614	1363	2029	17,3	56,7	184,9	0,318	170,6	36	5
	19	14:28:20	4247	19,9	24,1%	16,9	22,2	41,6	0,0753	1275	2206	16,0	61,2	378,3	0,373	359,2	50	22
	30	15:16:53	5338	19,6	28,0%	13,3	18,4	45,1	0,0972	1262	2154	16,4	61,0	459,9	0,823	397,3	90	34
	31	17:20:03	3455	20,2	20,3%	21,1	26,4	35,5	0,0543	1410	2054	18,4	54,0	254,7	0,669	231,5	25	9
Stuttgart, T40	24	07:53:08	3022	20,0	21,2%	23,8	30,2	44,9	0,0766	1413	1952	19,7	50,6	148,3	0,433	134,4	31	5
	29	13:56:44	4562	19,8	30,6%	15,6	22,5	50,1	0,1142	1296	2173	17,6	66,6	402,0	0,460	369,6	78	45
	20	15:43:35	4316	19,9	30,2%	16,6	23,7	46,8	0,1038	1349	2170	19,4	63,7	310,2	0,137	301,2	61	25
	32	18:18:04	2603	20,0	15,5%	27,7	32,7	43,3	0,0622	1447	2807	20,3	58,6	125,3	0,165	121,9	15	7
Stuttgart, T50	25	08:45:41	2999	20,3	30,3%	24,3	34,9	54,2	0,1086	1390	2170	20,6	59,8	162,2	0,189	153,7	30	17
	27	11:39:11	3149	20,2	31,2%	23,1	33,5	55,9	0,1258	1350	2185	19,8	71,9	347,3	0,728	311,9	33	38
	21	17:01:37	2956	20,2	28,2%	24,6	34,3	55,4	0,1212	1367	2314	19,7	74,1	289,3	0,725	259,5	38	35
	33	19:05:07	2182	20,3	15,8%	33,5	39,8	55,8	0,0823	1352	2144	19,3	66,0	129,8	0,096	128,1	15	14
München, T50	81	13:49:25	2187	11,0	34,8%	18,1	27,8	52,6	0,1968	1277	2198	18,8	79,9	659,6	0,393	632,4	25	44
	82	14:26:18	2355	10,8	31,1%	16,5	24,0	54,2	0,1833	1276	2020	19,3	74,0	633,7	0,298	613,5	36	47
	83	15:06:06	2431	10,9	35,6%	16,2	25,1	52,6	0,1734	1266	2182	18,3	65,6	585,4	0,859	517,2	35	43
	84	15:47:02	2665	10,9	39,3%	14,7	24,2	52,6	0,1818	1265	2127	20,0	73,4	633,9	0,740	562,8	38	42
München, mit-schwimmen	77	11:10:10	1861	11,0	31,9%	21,4	31,3	67,8	0,1788	1305	2294	21,0	65,5	552,1	0,806	508,8	26	41
	78	11:41:44	1840	11,0	29,6%	21,6	30,6	77,2	0,1706	1293	2129	20,2	65,7	388,2	0,523	362,4	26	32
	79	12:12:47	1761	11,0	28,7%	22,6	31,6	66,1	0,1805	1301	2056	18,6	60,1	418,4	0,710	385,9	25	29
	80	12:44:00	1952	11,0	37,9%	20,4	32,8	65,4	0,1827	1322	2219	20,8	67,7	458,3	0,212	444,1	26	41
Stuttgart, Außenbezirksstrecke	28	09:37:45	4542	52,0	16,6%	41,2	49,4	115,2	0,0972	1394	2425	21,8	64,9	173,6	0,194	170,7	35	21
	26	09:37:45	4542	52,0	16,6%	41,2	49,4	115,2	0,0972	1394	2425	21,8	64,9	175,5	0,186	172,8	35	27
	22	17:55:52	3918	52,3	12,4%	48,0	54,8	127,0	0,0984	1426	2524	22,8	72,6	207,9	0,042	207,6	18	55
	34	19:42:19	3550	52,2	5,8%	53,0	56,2	130,4	0,0987	1436	2702	22,2	82,2	207,9	0,029	207,8	12	41
Garmisch	86	06:52:13	4984	91,6	2,4%	66,2	67,8	156,9	0,0988	1469	2659	25,9	80,4	172,4	0,005	172,4	4	67
	87	08:26:00	5289	91,4	4,1%	62,2	64,9	164,7	0,1031	1465	2463	24,2	83,7	234,0	0,229	233,4	6	80
	88	10:02:58	5095	91,5	2,1%	64,7	66,0	122,0	0,0857	1434	2404	25,6	79,2	133,6	0,044	133,6	4	56
	89	11:40:03	5505	91,5	9,8%	59,8	66,3	168,7	0,1091	1482	2523	25,1	87,9	227,4	0,047	227,2	8	63
Überführung	85	06:10:55	2085	52,1	2,9%	90,0	92,7	162,0	0,0881	1682	2422	34,8	85,7	213,8	0,101	213,7	5	28
	90	13:13:03	2568	53,3	12,3%	74,7	85,2	152,4	0,0779	1659	2285	32,9	80,0	150,6	0,170	149,6	11	32

Tabelle 6-10: Kennwerte der Fahrten für Fahrzeug 3

Stadt, Tempolimit	Fahrt	Uhrzeit	Dauer	Distanz	p_stop	v_ave	v_ave_wo	v_max	RPA	n_ave	n_max	P_ave	P_max	eNOx	NOx_ave_stop	eNOx_ST	n_ST	n NOx peaks
			s	km		km/h	km/h	km/h	m/s ²	min ⁻¹	min ⁻¹	kW	kW	mg/km	mg/s	mg/km		
Stuttgart, T30	43	06:38:57	3420	20,6	19,2%	21,7	26,8	39,8	0,0481	1135	2167	5,0	30,8	295,8	0,265	287,3	26	38
	35	07:37:59	3327	20,5	19,3%	22,2	27,5	41,8	0,0582	1109	2213	5,3	34,3	380,8	0,689	359,2	25	42
	39	14:32:55	3994	20,4	27,7%	18,4	25,4	44,1	0,0565	1047	2250	4,6	53,1	472,1	1,046	415,3	41	36
	50	15:05:35	3784	20,4	24,5%	19,4	25,7	42,3	0,0600	1074	2202	4,9	32,0	393,5	0,734	360,1	41	60
Stuttgart, T40	44	07:36:39	2929	20,6	18,2%	25,3	30,9	52,4	0,0799	1315	2489	7,1	42,3	284,2	0,162	280,0	27	43
	36	08:38:32	2816	20,5	22,1%	26,2	33,6	49,1	0,0793	1318	2377	6,8	53,0	333,8	0,580	316,2	22	39
	40	13:32:19	3287	20,4	25,9%	22,3	30,1	48,5	0,0820	1221	2538	6,5	45,6	460,3	1,041	416,9	42	47
	49	14:05:17	3361	20,4	27,0%	21,9	29,9	50,8	0,0766	1257	2409	6,5	36,8	409,7	0,884	370,5	43	42
Stuttgart, T50	37	09:31:49	2579	20,6	24,7%	28,8	38,3	62,1	0,1048	1275	2424	7,2	44,4	392,9	0,763	369,3	22	44
	45	09:32:20	2810	20,5	23,3%	26,3	34,3	58,4	0,1035	1256	2468	7,5	41,5	348,0	0,457	333,5	35	53
	48	12:32:08	3007	20,6	25,6%	24,6	33,1	60,0	0,1254	1258	2871	7,5	50,4	498,8	0,484	480,7	36	52
	41	12:39:51	2814	20,6	27,9%	26,4	36,6	62,1	0,1169	1234	2496	7,5	53,6	491,7	0,834	460,0	31	57
München, T50	55	16:27:37	2062	11,2	32,5%	19,6	28,9	57,7	0,1778	1212	2444	7,1	61,2	626,7	0,716	583,9	28	49
	56	17:02:22	1676	11,2	28,4%	24,2	33,7	58,2	0,1547	1269	2417	7,2	43,6	490,1	0,516	468,2	20	41
	57	17:30:43	1722	11,3	33,3%	23,5	35,3	53,6	0,1398	1204	2365	6,9	49,8	450,0	0,612	418,8	19	26
	58	17:59:48	1534	11,2	22,4%	26,4	34,0	55,3	0,1567	1232	2423	7,1	45,0	427,5	0,674	406,9	17	30
München, mit-schwimmen	51	13:52:58	1982	11,2	31,8%	20,3	29,8	57,5	0,1874	1284	2377	8,5	42,1	614,5	0,176	604,6	25	65
	52	14:26:27	2053	11,1	27,7%	19,5	26,9	62,7	0,1964	1229	2444	7,4	41,3	653,0	0,733	615,5	31	53
	53	15:01:11	2777	11,0	31,9%	14,3	20,9	67,8	0,1952	1164	2684	6,9	45,0	676,5	0,374	646,4	40	50
	54	15:01:11	1981	11,2	35,7%	20,4	31,7	62,1	0,1937	1239	2526	7,8	47,8	569,4	0,556	534,2	28	50
Stuttgart, Außenbezirksstrecke	38	10:19:24	3874	52,8	10,8%	49,1	55,0	114,7	0,1048	1486	2840	10,1	90,7	463,4	1,100	454,7	21	96
	46	10:21:59	3797	52,8	8,1%	50,1	54,5	133,2	0,1023	1500	3065	10,8	103,1	325,9	0,535	322,8	19	73
	47	11:28:18	3711	52,8	9,2%	51,2	56,5	135,4	0,0989	1443	2374	10,9	76,6	374,4	0,491	371,2	17	88
	42	15:45:59	5075	52,7	11,6%	37,4	42,3	78,5	0,0924	1307	2444	8,4	74,5	288,2	0,605	281,4	27	79
Garmisch	59	07:32:32	4888	92,6	1,9%	68,2	69,6	152,5	0,1045	1588	3055	14,9	96,8	498,9	0,600	498,3	5	111
	60	10:18:32	4720	92,6	1,2%	70,6	71,5	145,7	0,1085	1556	2867	14,6	95,5	439,8	0,676	439,4	6	140
	61	11:45:55	4606	92,6	1,1%	72,4	73,2	152,5	0,0968	1577	2802	15,1	89,9	618,3	0,308	618,1	7	92
	62	13:13:25	4889	92,5	1,8%	68,1	69,3	157,5	0,0992	1591	2784	14,3	83,5	532,0	0,390	531,7	4	119
Überführung	63	14:39:39	2518	53,9	11,4%	77,1	87,0	158,6	0,0729	1707	2987	18,6	97,9	518,1	0,407	515,9	13	28

6.3.3 Einfluss des Fahrzustandes (Beschleunigung, Konstantfahrt und Verzögerung)

In Abbildung 6-28 bis Abbildung 6-30 sind die NO_x -Emissionen der drei Fahrzeuge für die Fahrzustände Beschleunigungsphasen (acc), Konstantfahrt (cruise) und Verzögerungsphasen (dec) dargestellt. Die Werte sind Mittelwerte in Geschwindigkeitsklassen mit 5 km/h Bandbreite. Als Konstantfahrt wurden zusammenhängende Zeitabschnitte gekennzeichnet, für die die Beschleunigung zwischen $-0,2778 \text{ m/s}^2$ und $0,2778 \text{ m/s}^2$ liegt. Diese Grenzen entsprechen einer Veränderung der Geschwindigkeit um 1 km/h je Sekunde.

Der Anstieg der Emissionen zu niedrigen Geschwindigkeiten hin (unterhalb von 20 km/h) ergibt sich daraus, dass die zurückgelegte Wegstrecke mit sinkender Geschwindigkeit abnimmt, die Emissionen aber nicht gegen Null gehen. Ansonsten unterstreichen die Ergebnisse noch einmal, dass besonders hohe Emissionen bei Beschleunigungsvorgängen auftreten. Auffällig ist, dass die Konstantfahremissionen bei Fahrzeug 1 oberhalb von 140 km/h signifikant höher liegen als darunter, aber 500 mg/km nicht wesentlich überschreiten. Fahrzeug 3 zeigt ein ähnliches Verhalten, allerdings mit einem weitaus steileren und höheren Emissionsanstieg (bis nahezu 2000 mg/km) bei Konstantfahrt.

Nähere Einzelheiten zu Zeitanteilen, Weganteilen und Emissionsanteilen für die verschiedenen Fahrzustände einschließlich Stopps finden sich in Tabelle 6-11 bis Tabelle 6-13.

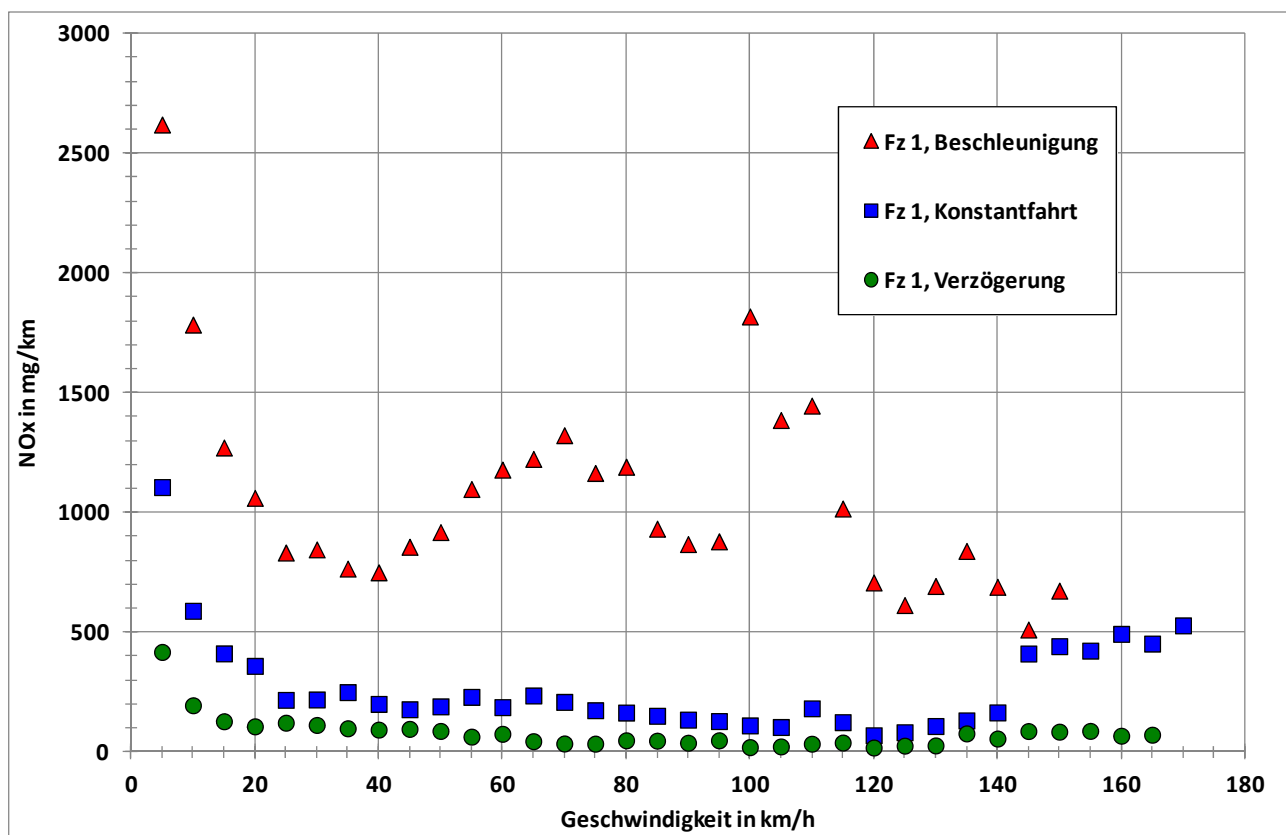


Abbildung 6-28: Mittlere NO_x -Emissionen bei verschiedenen Fahrzuständen über der Geschwindigkeit, Fahrzeug 1

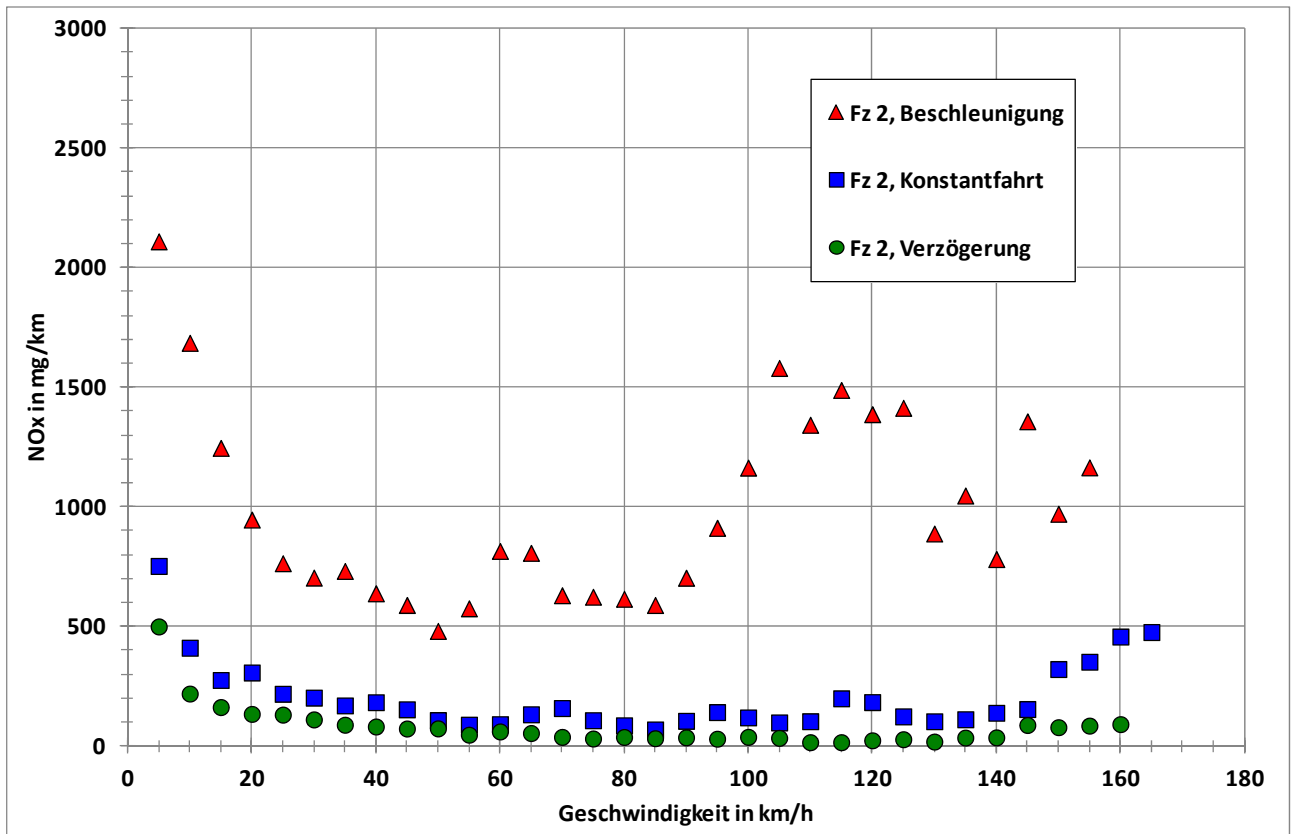


Abbildung 6-29: Mittlere NO_x-Emissionen bei verschiedenen Fahrzuständen über der Geschwindigkeit, Fahrzeug 2

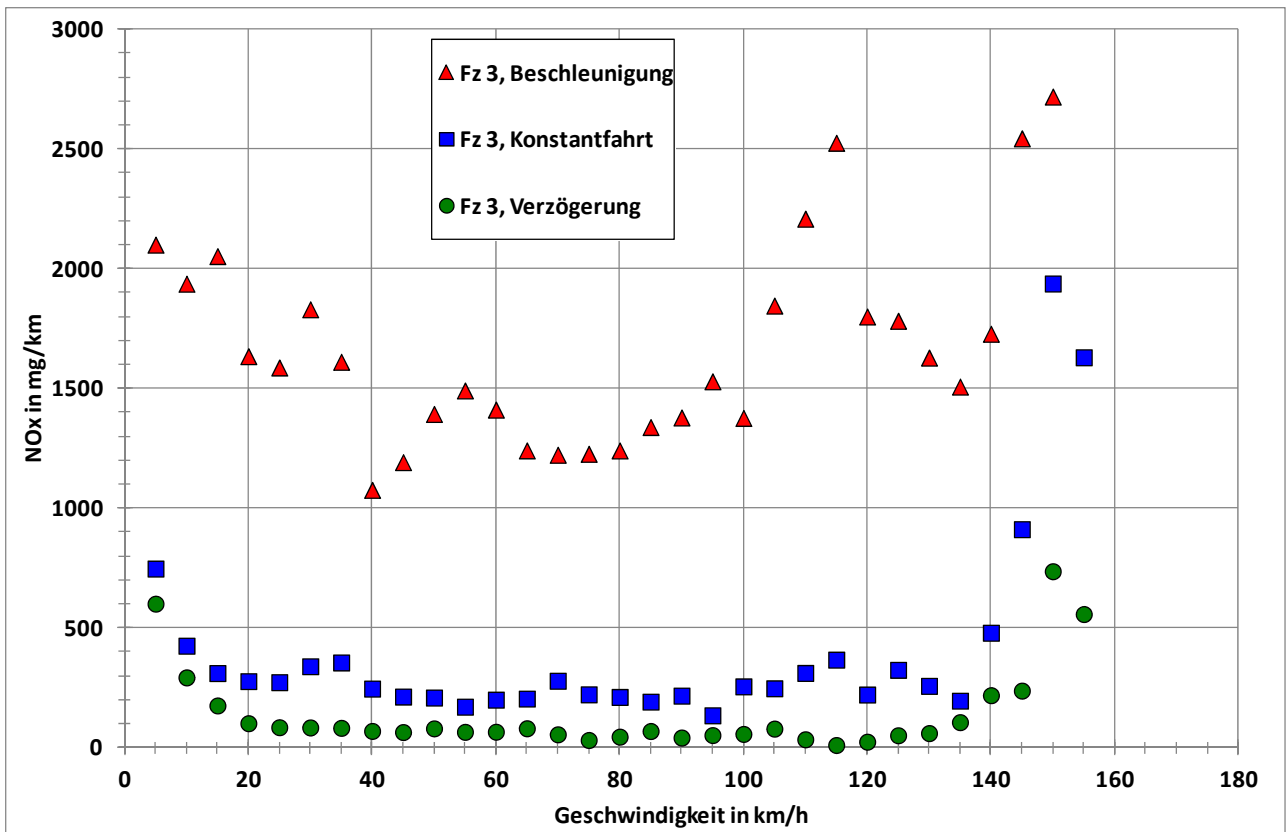


Abbildung 6-30: Mittlere NO_x-Emissionen bei verschiedenen Fahrzuständen über der Geschwindigkeit, Fahrzeug 3

Tabelle 6-11: Anteile von Fahrzeit, Wegstrecke und NO_x-Emissionen an verschiedenen Fahrzuständen, Fahrzeug 1

Stadt, Tempolimit	Fahrt	Uhrzeit	Zeitanteile				Weganteile			Emissionsanteile NO _x			
			Stop	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung	Stop	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung
Stuttgart, T30	9	08:45:12	16,3%	8,0%	67,5%	8,2%	6,2%	87,4%	6,4%	13,1%	19,8%	62,9%	4,2%
	18	09:56:07	18,4%	6,8%	67,4%	7,4%	5,0%	89,3%	5,7%	16,0%	21,3%	59,2%	3,5%
	5	15:19:12	21,1%	9,3%	58,4%	11,2%	7,2%	83,3%	9,5%	16,9%	20,6%	57,6%	4,9%
	14	16:12:36	14,4%	8,8%	66,0%	10,7%	6,3%	85,1%	8,6%	11,2%	26,9%	57,1%	4,8%
Stuttgart, T40	8	07:58:52	17,6%	12,3%	58,1%	12,0%	9,4%	80,7%	9,9%	9,4%	26,8%	59,9%	3,9%
	17	09:03:20	19,9%	10,8%	59,6%	9,6%	8,6%	83,3%	8,1%	10,4%	23,2%	63,2%	3,2%
	4	14:25:24	21,0%	13,1%	51,9%	14,1%	11,6%	75,1%	13,3%	13,6%	29,7%	49,6%	7,0%
	13	15:00:11	30,3%	10,8%	47,6%	11,2%	10,6%	77,9%	11,4%	18,8%	30,5%	45,7%	5,0%
Stuttgart, T50	7	07:17:54	18,3%	15,9%	50,0%	15,8%	13,8%	70,7%	15,5%	9,5%	36,1%	49,5%	4,9%
	16	08:10:10	26,9%	15,0%	42,8%	15,3%	14,4%	70,0%	15,6%	11,7%	40,0%	44,3%	4,0%
	2	11:37:02	22,5%	15,6%	46,0%	15,8%	15,3%	68,0%	16,7%	11,0%	37,9%	45,8%	5,2%
	3	12:20:05	17,6%	14,0%	55,2%	13,3%	12,4%	74,8%	12,8%	9,1%	31,1%	55,3%	4,5%
	12	14:09:43	20,6%	18,3%	42,2%	19,0%	18,0%	63,3%	18,7%	9,6%	44,1%	40,7%	5,5%
Stuttgart, Außenbezirksstrecke	15	06:56:15	12,2%	16,3%	55,9%	15,6%	13,3%	74,3%	12,4%	5,0%	46,3%	44,8%	3,9%
	11	12:49:22	15,7%	15,6%	54,4%	14,3%	13,5%	73,8%	12,7%	5,8%	43,2%	46,9%	4,1%
	6	16:35:21	13,8%	15,0%	56,2%	15,0%	13,2%	73,2%	13,6%	6,5%	42,6%	46,5%	4,4%
München, T50	68	08:50:15	33,0%	17,1%	31,9%	18,0%	19,2%	60,0%	20,7%	12,3%	49,6%	33,0%	5,1%
	69	09:21:35	36,8%	15,8%	31,7%	15,6%	18,9%	62,3%	18,8%	18,5%	43,9%	32,6%	5,0%
	70	09:59:47	35,0%	14,6%	34,5%	15,9%	16,0%	65,5%	18,5%	19,4%	42,2%	33,2%	5,2%
	71	10:32:53	34,3%	17,0%	31,4%	17,3%	18,5%	61,9%	19,6%	16,3%	46,7%	30,9%	6,0%
München, mit-schwimmen	64	06:29:17	28,6%	18,8%	33,0%	19,6%	20,2%	57,6%	22,1%	10,4%	52,6%	31,5%	5,5%
	65	07:04:49	37,0%	18,5%	26,5%	18,0%	23,2%	52,9%	23,9%	15,6%	48,1%	29,9%	6,5%
	66	07:39:44	38,5%	17,4%	27,6%	16,4%	22,7%	54,9%	22,3%	21,7%	45,4%	28,0%	4,9%
	67	08:15:05	36,7%	16,9%	28,6%	17,7%	19,8%	56,6%	23,6%	13,4%	54,3%	27,1%	5,2%
Garmisch	73	13:38:28	2,2%	12,4%	72,3%	13,1%	10,9%	76,9%	12,2%	0,6%	39,5%	57,2%	2,6%
	74	15:21:13	2,0%	13,4%	71,9%	12,6%	12,2%	75,8%	12,1%	0,3%	46,9%	51,0%	1,8%
	75	16:54:55	1,9%	12,6%	73,6%	11,9%	11,2%	78,2%	10,6%	0,3%	37,1%	61,1%	1,4%
	76	18:24:59	0,9%	12,5%	73,3%	13,2%	11,5%	75,8%	12,7%	0,2%	41,7%	55,7%	2,5%
Überführung	72	12:50:20	5,0%	10,9%	75,4%	8,6%	9,7%	82,8%	7,5%	0,8%	30,1%	67,4%	1,7%

Tabelle 6-12: Anteile von Fahrzeit, Wegstrecke und NO_x-Emissionen an verschiedenen Fahrzuständen, Fahrzeug 2

Stadt, Tempolimit	Fahrt	Uhrzeit	Zeitanteile				Weganteile			Emissionsanteile NO _x			
			Stop	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung	Stop	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung
Stuttgart, T30	23	06:47:28	23,0%	9,1%	57,0%	10,8%	6,9%	84,0%	9,0%	7,8%	20,0%	66,2%	6,0%
	19	14:28:20	24,1%	12,2%	50,7%	12,9%	10,2%	77,7%	12,2%	5,1%	22,9%	62,9%	9,1%
	30	15:16:53	28,0%	13,5%	43,4%	15,1%	12,6%	71,5%	15,9%	13,6%	35,9%	41,2%	9,3%
	31	17:20:03	20,3%	7,5%	62,8%	9,4%	5,4%	87,2%	7,4%	9,1%	21,4%	64,8%	4,7%
Stuttgart, T40	24	07:53:08	21,2%	11,8%	54,0%	12,9%	9,2%	79,5%	11,3%	9,4%	28,1%	57,7%	4,8%
	29	13:56:44	30,6%	14,1%	39,1%	16,2%	13,8%	68,9%	17,4%	8,1%	41,8%	43,1%	7,0%
	20	15:43:35	30,2%	13,7%	41,3%	14,7%	13,1%	71,8%	15,1%	2,9%	35,3%	53,0%	8,8%
	32	18:18:04	15,5%	9,8%	63,5%	11,2%	7,5%	83,3%	9,2%	2,7%	23,4%	70,2%	3,7%
Stuttgart, T50	25	08:45:41	30,3%	12,3%	43,3%	14,1%	12,2%	72,8%	14,9%	5,2%	34,4%	54,3%	6,1%
	27	11:39:11	31,2%	15,1%	38,8%	15,0%	16,2%	67,6%	16,2%	10,2%	39,6%	40,2%	10,0%
	21	17:01:37	28,2%	14,4%	41,8%	15,6%	14,4%	69,5%	16,2%	10,3%	33,3%	49,7%	6,7%
	33	19:05:07	15,8%	11,6%	59,5%	13,1%	9,4%	79,6%	11,0%	1,3%	31,5%	63,1%	4,2%
Stuttgart, Außenbezirks- strecke	28	09:37:45	16,6%	15,1%	55,0%	13,3%	13,7%	74,7%	11,6%	1,6%	52,3%	43,5%	2,6%
	26	09:37:45	16,6%	15,1%	55,0%	13,3%	13,7%	74,7%	11,6%	1,5%	52,2%	43,6%	2,7%
	22	17:55:52	12,4%	15,8%	57,8%	14,0%	14,2%	72,9%	12,9%	0,2%	39,7%	56,4%	3,7%
	34	19:42:19	5,8%	14,7%	63,6%	15,8%	12,4%	73,7%	13,9%	0,1%	45,2%	51,7%	3,1%
München, T50	81	13:49:25	34,8%	18,8%	28,1%	18,2%	25,6%	49,2%	25,2%	4,1%	66,8%	22,4%	6,7%
	82	14:26:18	31,1%	19,7%	30,1%	19,1%	25,1%	49,2%	25,7%	3,2%	60,8%	28,5%	7,5%
	83	15:06:06	35,6%	16,9%	28,9%	18,6%	22,7%	51,9%	25,4%	11,6%	52,6%	27,5%	8,3%
	84	15:47:02	39,3%	16,2%	27,7%	16,8%	22,3%	54,0%	23,7%	11,2%	57,0%	24,8%	6,9%
München, mit- schwimmen	77	11:10:10	31,9%	19,4%	30,6%	18,2%	22,3%	56,2%	21,5%	7,8%	51,0%	32,7%	8,5%
	78	11:41:44	29,6%	20,2%	31,5%	18,7%	24,2%	52,6%	23,2%	6,7%	63,1%	23,8%	6,5%
	79	12:12:47	28,7%	20,2%	29,9%	21,2%	23,9%	49,6%	26,4%	7,8%	60,6%	25,5%	6,2%
	80	12:44:00	37,9%	18,4%	25,3%	18,5%	24,4%	51,1%	24,5%	3,1%	59,4%	28,7%	8,8%
Garmisch	86	06:52:13	2,4%	14,7%	67,9%	14,9%	13,0%	73,4%	13,5%	0,0%	59,0%	37,6%	3,3%
	87	08:26:00	4,1%	15,2%	65,2%	15,5%	13,7%	71,4%	14,9%	0,2%	41,6%	53,5%	4,8%
	88	10:02:58	2,1%	14,2%	69,0%	14,7%	11,8%	75,7%	12,5%	0,0%	51,5%	45,9%	2,6%
	89	11:40:03	9,8%	14,6%	60,1%	15,5%	14,2%	69,8%	16,0%	0,1%	52,3%	44,8%	2,7%
Überführung	85	06:10:55	2,9%	13,6%	71,6%	11,9%	13,5%	75,3%	11,3%	0,1%	56,3%	41,7%	2,0%
	90	13:13:03	12,3%	12,0%	65,1%	10,6%	10,4%	80,7%	8,9%	0,7%	45,7%	51,7%	1,9%

Tabelle 6-13: Anteile von Fahrzeit, Wegstrecke und NO_x-Emissionen an verschiedenen Fahrzuständen, Fahrzeug 3

Stadt, Tempolimit	Fahrt	Uhrzeit	Zeitanteile				Weganteile			Emissionsanteile NO _x			
			Stop	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung	Stop	Beschl.	Konstantf.	Verzögerung
Stuttgart, T30	43	06:38:57	19,2%	8,1%	65,1%	7,6%	5,8%	88,1%	6,1%	2,9%	20,3%	73,4%	3,4%
	35	07:37:59	19,3%	8,6%	63,7%	8,4%	6,6%	86,8%	6,5%	5,7%	19,6%	72,4%	2,3%
	39	14:32:55	27,7%	7,9%	54,9%	9,5%	6,3%	85,5%	8,2%	12,0%	18,4%	66,0%	3,5%
	50	15:05:35	24,5%	8,6%	57,1%	9,8%	6,7%	85,1%	8,2%	8,5%	26,5%	60,5%	4,5%
Stuttgart, T40	44	07:36:39	18,2%	12,2%	57,9%	11,6%	9,2%	80,7%	10,0%	1,5%	41,0%	53,9%	3,7%
	36	08:38:32	22,1%	10,3%	55,9%	11,7%	8,4%	81,3%	10,3%	5,3%	35,4%	55,8%	3,5%
	40	13:32:19	25,9%	11,4%	50,3%	12,4%	9,4%	79,1%	11,4%	9,4%	38,6%	48,2%	3,7%
	49	14:05:17	27,0%	12,1%	49,0%	12,0%	9,9%	79,8%	10,2%	9,6%	34,8%	51,3%	4,2%
Stuttgart, T50	37	09:31:49	24,7%	13,9%	46,5%	14,9%	13,4%	71,4%	15,2%	6,0%	49,4%	41,0%	3,6%
	45	09:32:20	23,3%	13,8%	48,9%	14,0%	11,7%	74,8%	13,5%	4,2%	43,0%	48,5%	4,3%
	48	12:32:08	25,6%	16,2%	42,4%	15,9%	16,1%	66,7%	17,2%	3,6%	49,6%	42,6%	4,1%
	41	12:39:51	27,9%	14,3%	42,8%	15,0%	15,0%	68,7%	16,3%	6,5%	48,2%	41,4%	3,9%
Stuttgart, Außenbezirks- strecke	38	10:19:24	10,8%	16,3%	57,3%	15,6%	13,8%	72,2%	13,9%	1,9%	41,1%	54,2%	2,9%
	46	10:21:59	8,1%	16,2%	61,3%	14,4%	13,0%	74,4%	12,6%	1,0%	54,5%	42,5%	2,0%
	47	11:28:18	9,2%	15,7%	61,0%	14,1%	13,8%	73,7%	12,5%	0,9%	40,6%	56,3%	2,3%
	42	15:45:59	11,6%	14,0%	60,2%	14,2%	11,9%	75,4%	12,8%	2,4%	39,0%	55,2%	3,4%
München, T50	55	16:27:37	32,5%	18,2%	29,3%	20,0%	21,6%	53,5%	25,0%	6,8%	72,8%	16,2%	4,2%
	56	17:02:22	28,4%	18,1%	33,5%	20,0%	18,6%	60,2%	21,2%	4,5%	72,1%	19,6%	3,8%
	57	17:30:43	33,3%	15,3%	34,7%	16,7%	16,4%	65,0%	18,6%	6,9%	75,1%	15,0%	3,1%
	58	17:59:48	22,4%	19,4%	37,2%	21,0%	18,7%	59,7%	21,6%	4,8%	76,7%	14,4%	4,1%
München, mit- schwimmen	51	13:52:58	31,8%	20,8%	27,8%	19,6%	25,8%	48,6%	25,6%	1,6%	74,8%	19,2%	4,4%
	52	14:26:27	27,7%	21,8%	29,9%	20,6%	26,5%	47,9%	25,6%	5,7%	73,8%	16,6%	3,8%
	53	15:01:11	31,9%	17,9%	32,4%	17,8%	25,9%	46,7%	27,4%	4,4%	69,3%	21,0%	5,3%
	54	15:01:11	35,7%	20,0%	24,4%	19,8%	26,3%	46,4%	27,3%	6,2%	73,9%	16,1%	3,9%
Garmisch	59	07:32:32	1,9%	15,6%	67,2%	15,2%	13,4%	73,2%	13,4%	0,1%	44,6%	53,8%	1,5%
	60	10:18:32	1,2%	16,2%	65,2%	17,4%	14,2%	70,1%	15,7%	0,1%	52,1%	44,9%	2,9%
	61	11:45:55	1,1%	14,7%	69,3%	14,8%	12,1%	75,2%	12,6%	0,0%	33,2%	65,9%	0,9%
	62	13:13:25	1,8%	14,8%	67,9%	15,5%	13,4%	72,1%	14,5%	0,1%	34,2%	62,7%	3,1%
Überführung	63	14:39:39	11,4%	12,8%	62,9%	12,9%	10,1%	80,0%	10,0%	0,4%	23,2%	74,0%	2,4%

6.3.4 Einfluss der Längsneigung

In Abbildung 6-31 bis Abbildung 6-33 sind die NO_x-Emissionen für alle Fahrstrecken, aufgeteilt auf verschiedene Fahrbahn­längs­neigungen, in Abhängigkeit von der Längs­neigung dargestellt. Der Längs­neigungseinfluss ist zu erkennen, die Korrelation der Emissionen mit der Längs­neigung ist aber gering (r² zwischen 0,25 und 0,35). Bei den Fahrzeugen 1 und 2 sind die Emissionen auf Steigungs­strecken zwar im Mittel höher als auf ebener Fahr­bahn, aber immer noch im Streube­reich der Emissionen auf ebener Fahr­bahn. Bei Fahrzeug 3 sind die Emissionen auf Steigungs­strecken dagegen am oberen Ende oder oberhalb des Streubandes für ebene Fahr­bahn.

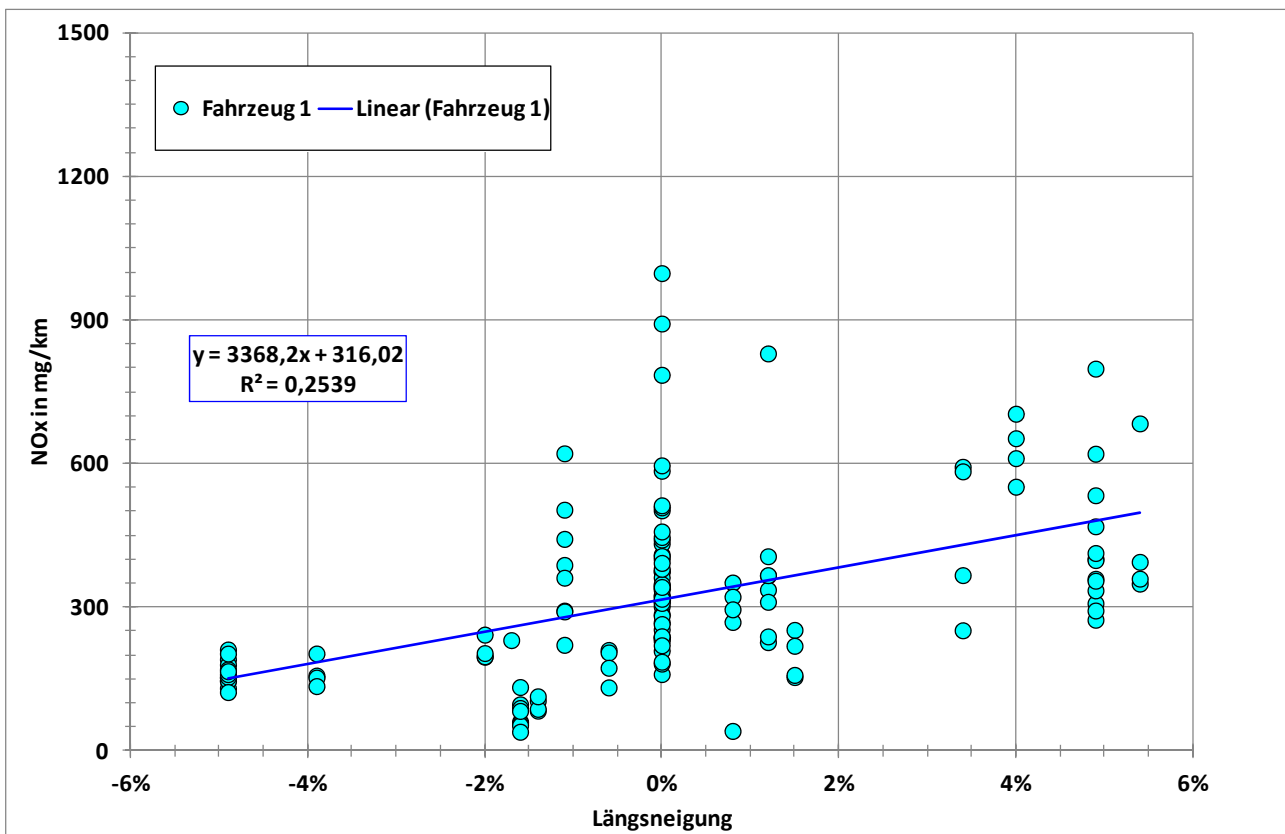


Abbildung 6-31: NO_x-Emissionen über der Längsneigung für Fahrzeug 1

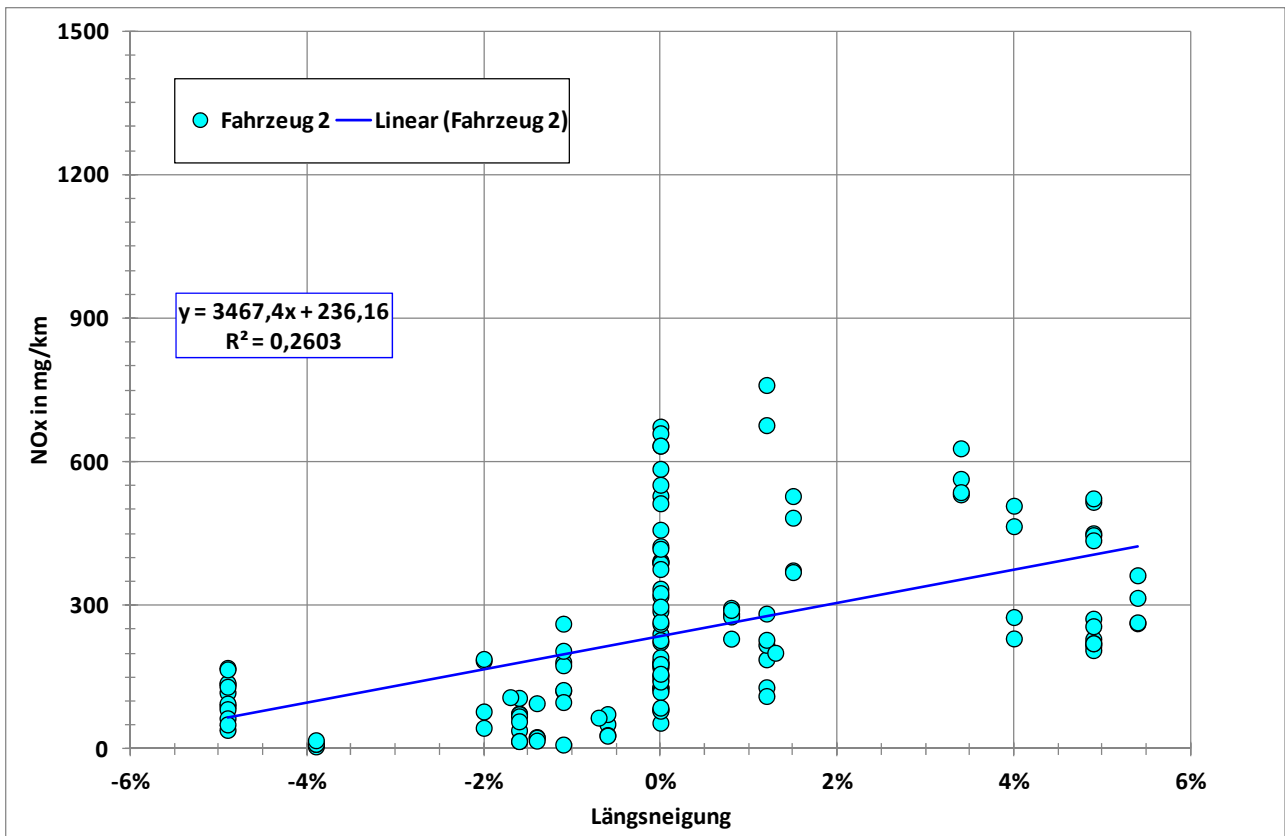


Abbildung 6-32: NO_x-Emissionen über der Längsneigung für Fahrzeug 2

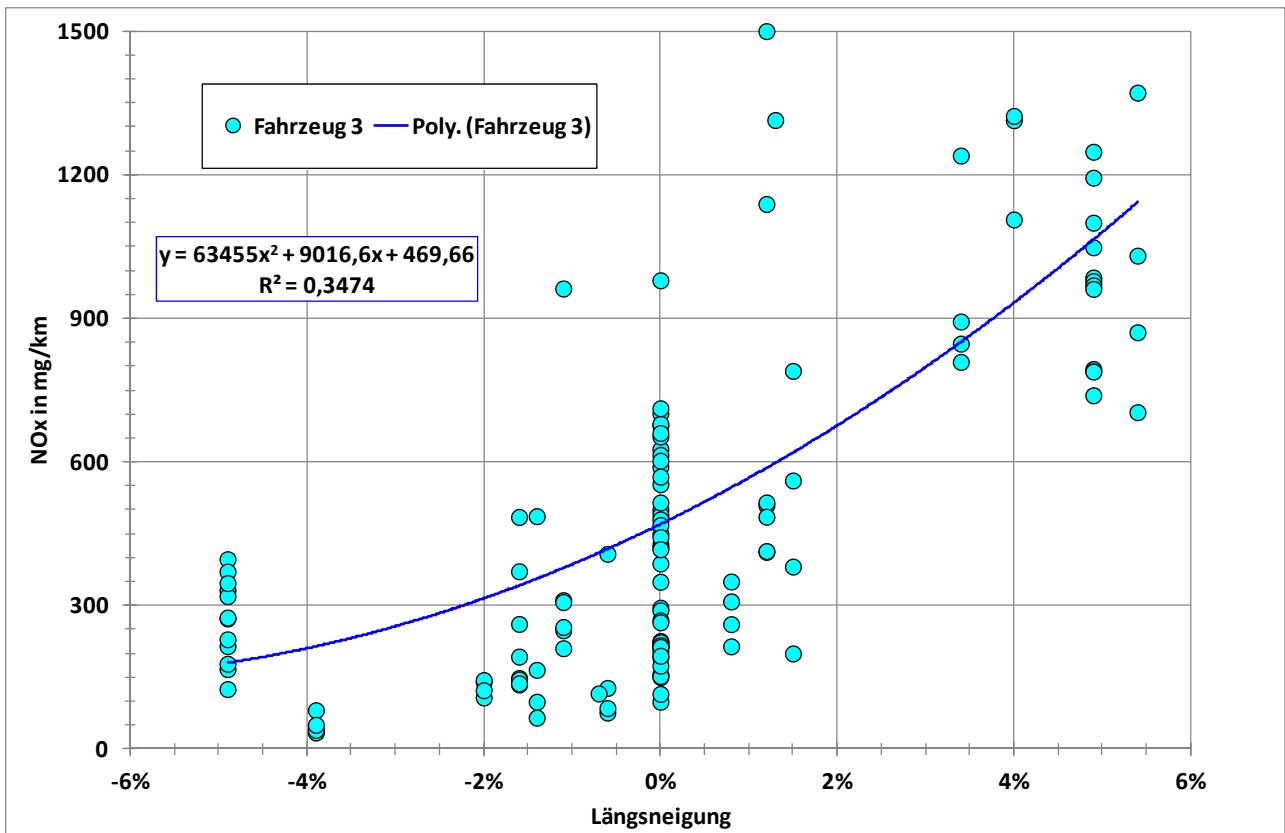


Abbildung 6-33: NO_x-Emissionen über der Längsneigung für Fahrzeug 3

6.3.5 Abhängigkeit der Emissionen von kinematischen Parametern des Geschwindigkeitsverlaufs

Im Weiteren wird versucht, die großen Unterschiede in den Emissionen Unterschieden in Parametern des Geschwindigkeitsverlaufs zuzuordnen. Dazu wurde die Auswertung zunächst auf die beiden Innerortsstrecken in Stuttgart und München und auf Tempo 50 beschränkt, um einheitliche Rahmenbedingungen hinsichtlich der Straßenkategorie zu erzielen.

In Abbildung 6-34, Abbildung 6-35 und Abbildung 6-36 sind die NO_x-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit dargestellt, einmal als Gesamtemission über der mittleren Geschwindigkeit einschließlich Stillstandanteile und einmal als Emission der short trips (ST), also ohne die Emissionen bei Stillstand, über der mittleren Geschwindigkeit ohne Stillstandanteile.

Die Korrelation ist wesentlich besser als bei der Längsneigung (r^2 zwischen 0,77 und 0,94) und für die Werte einschließlich Stillstand etwas größer als ohne Stillstand. Die Unterschiede in den Emissionshöhen zwischen den beiden Betrachtungsweisen resultieren aus den Emissionsmassen während des Stillstandes, die bei der gesamten Betrachtung hinzukommen ohne eine Änderung der gefahrenen Strecke. Die Auswirkungen sind hier bei Fahrzeug 1 deutlicher zu erkennen, da die Start-Stop Automatik hier nicht zum Tragen kommt.

Wie Abbildung 6-37, Abbildung 6-38 und Abbildung 6-39 zeigen, korrelieren die Emissionen aber auch mit der relativen positiven Beschleunigung RPA in etwa gleicher Größenordnung, wobei hier die Werte ohne Stillstand etwas besser korrelieren, weil RPA unabhängig vom Stillstandanteil ist. Außerdem wird deutlich, dass die Fahrten für Fahrzeug 1 etwas weniger dynamisch waren.

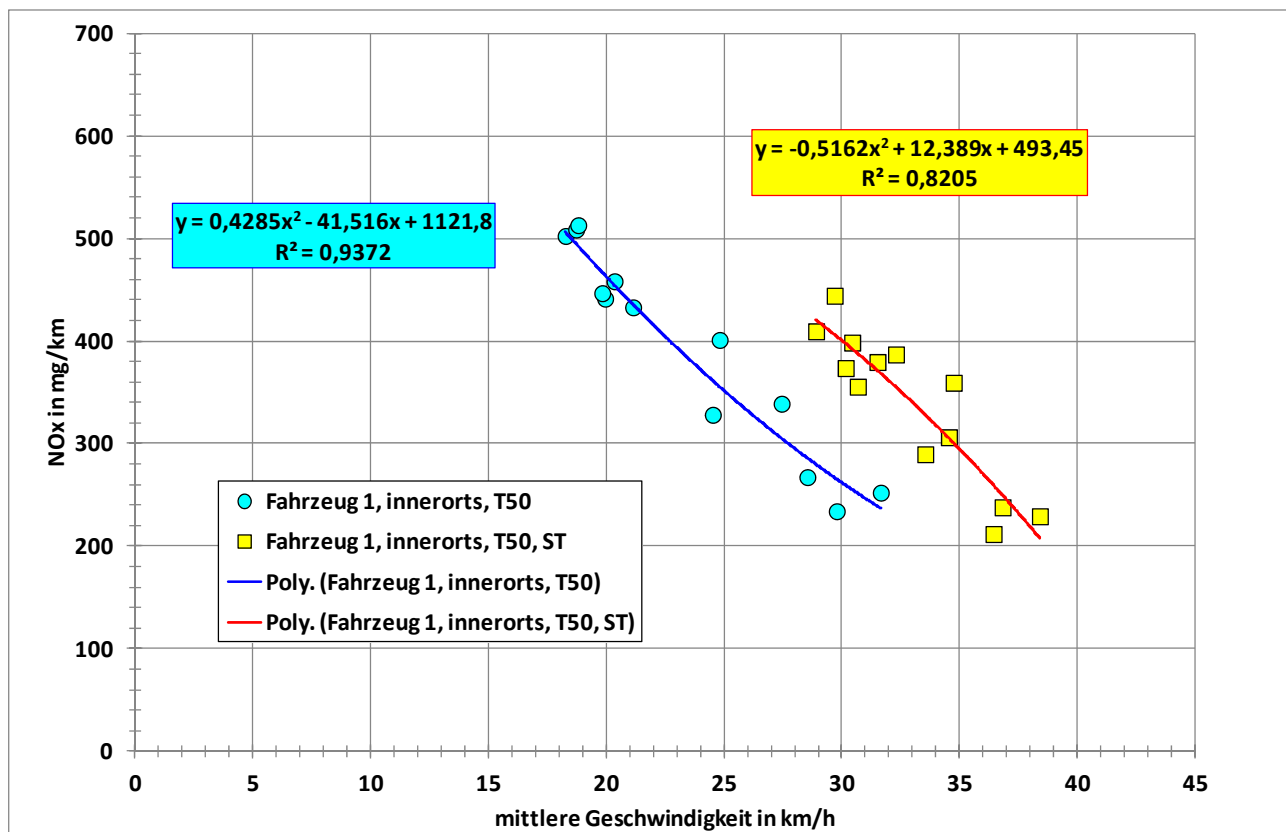


Abbildung 6-34: NO_x-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit, innerorts, Fahrzeug 1

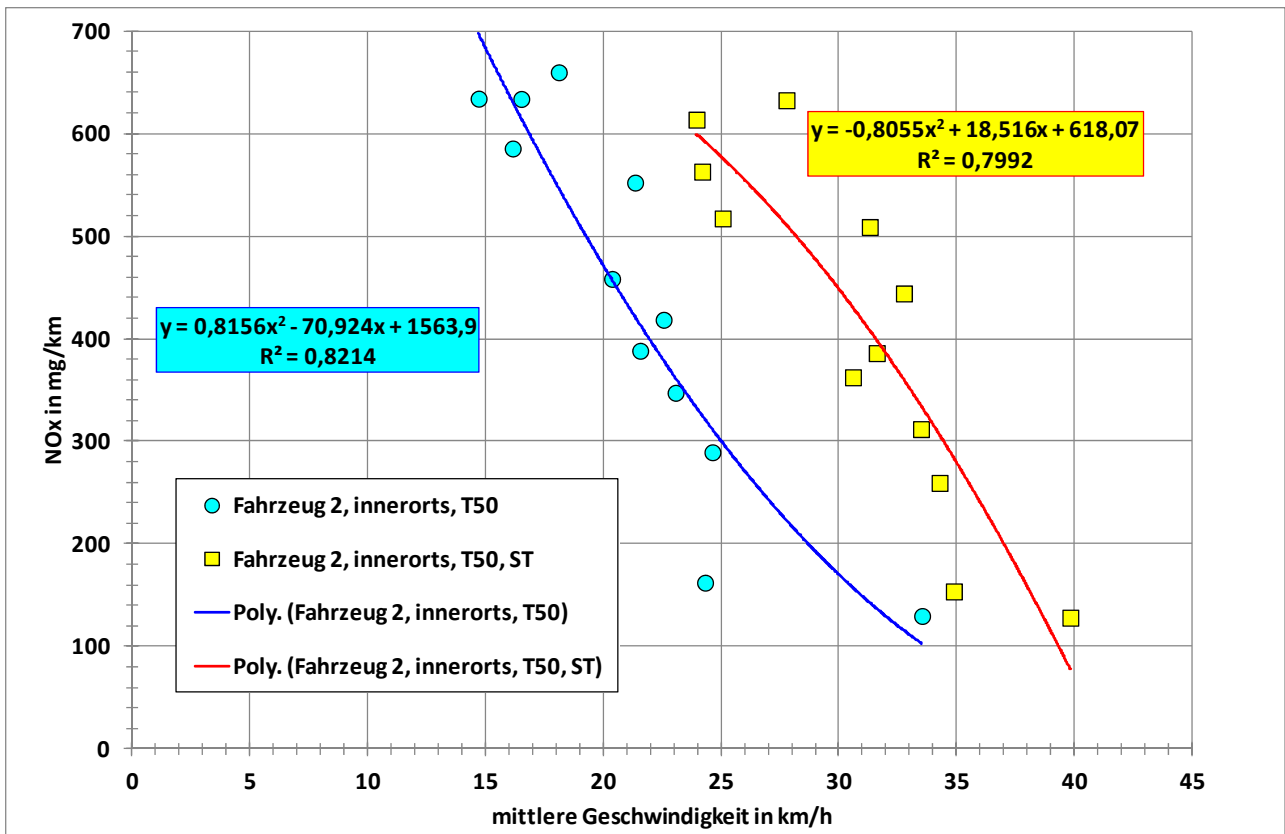


Abbildung 6-35: NO_x-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit, innerorts, Fahrzeug 2

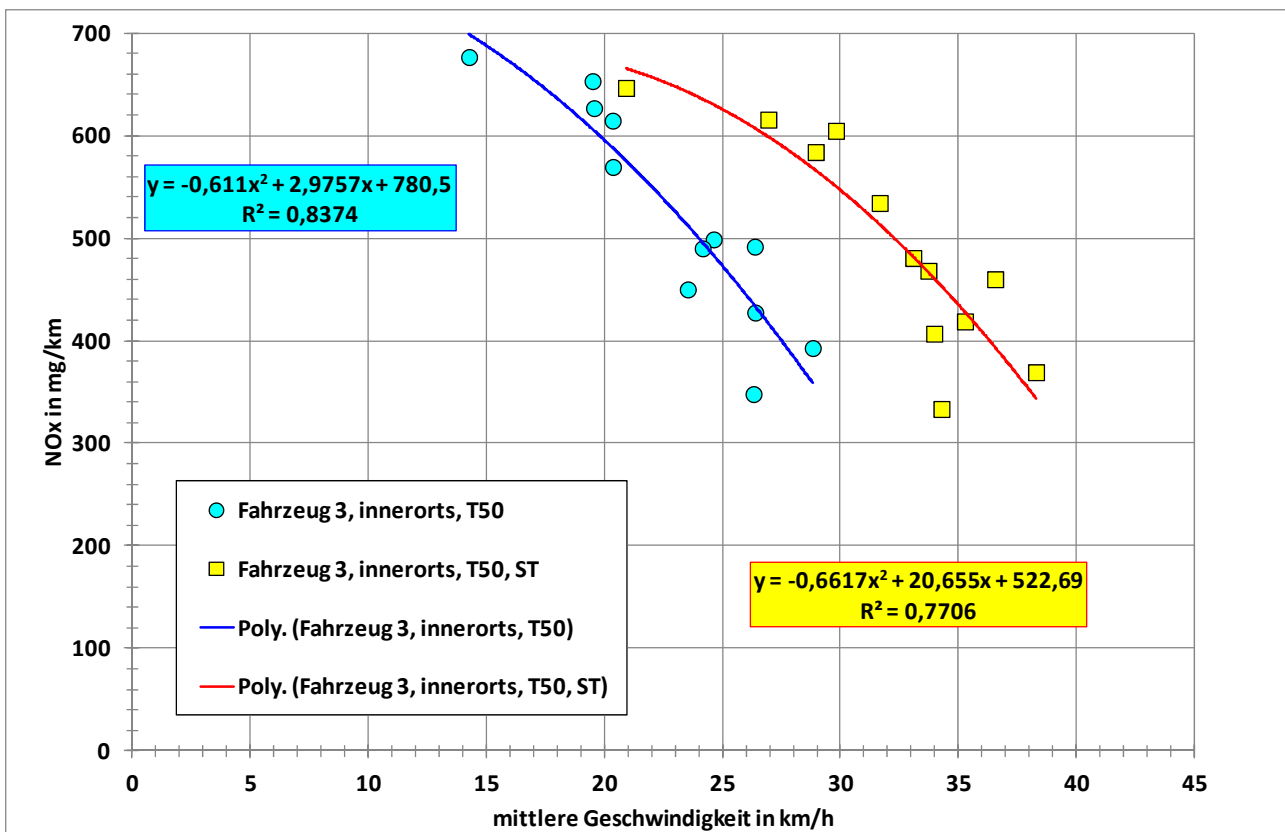


Abbildung 6-36: NO_x-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit, innerorts, Fahrzeug 3

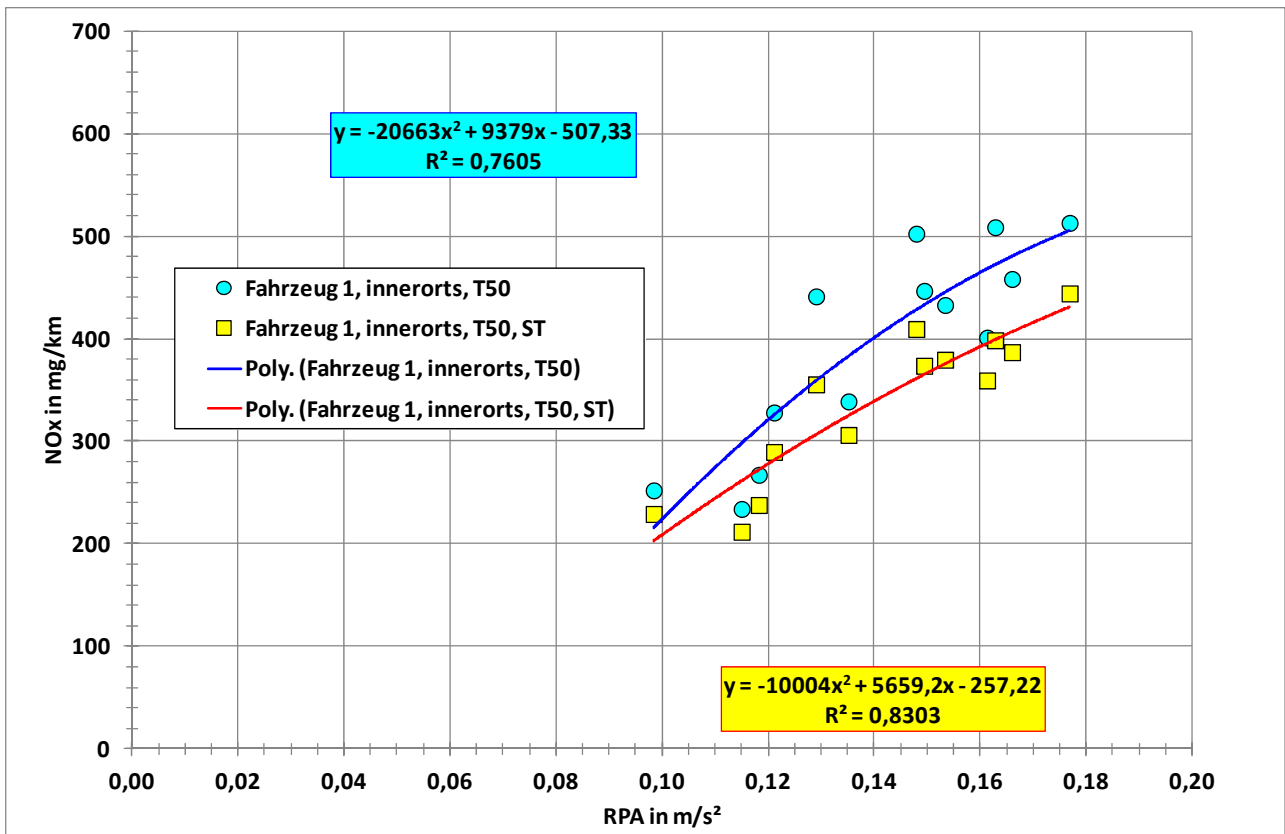


Abbildung 6-37: NO_x-Emissionen über der mittleren positiven Beschleunigung, innerorts, Fahrzeug 1

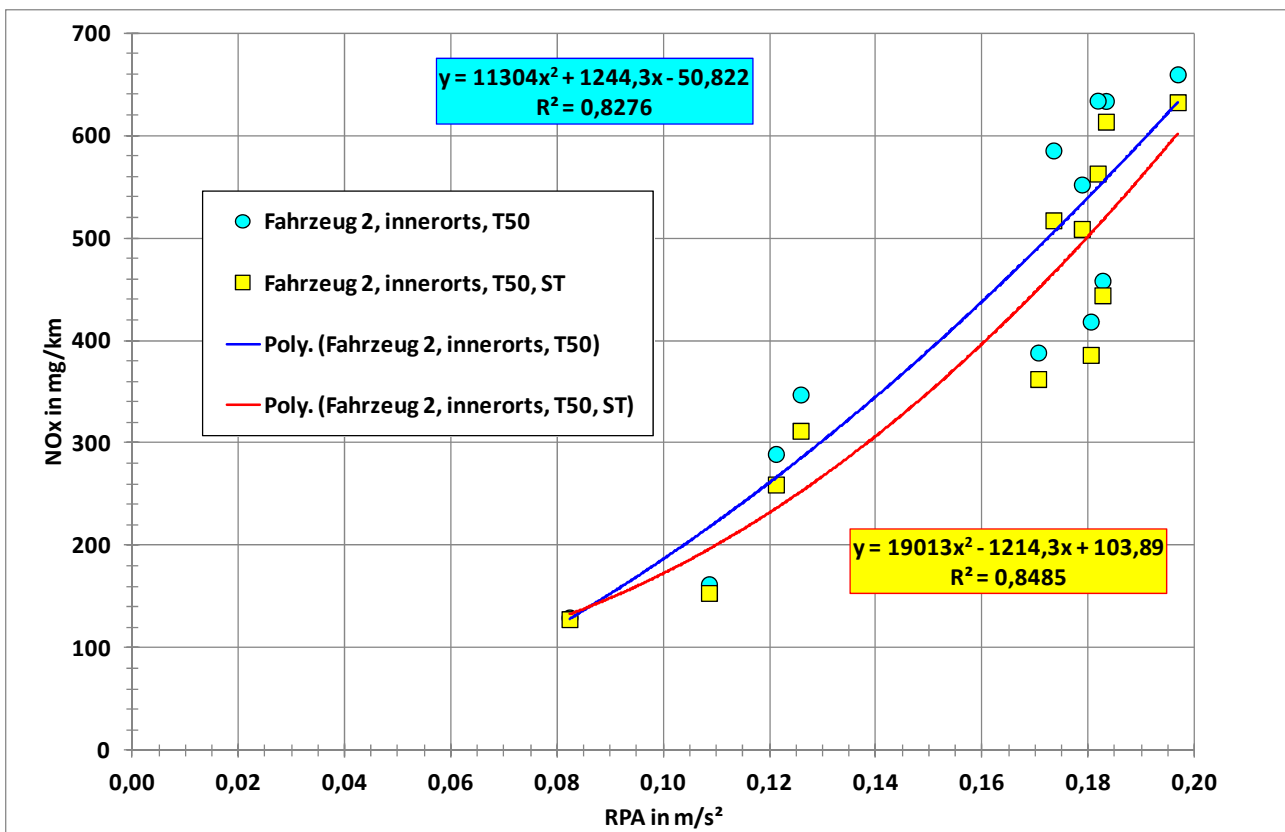


Abbildung 6-38: NO_x-Emissionen über der mittleren positiven Beschleunigung, innerorts, Fahrzeug 2

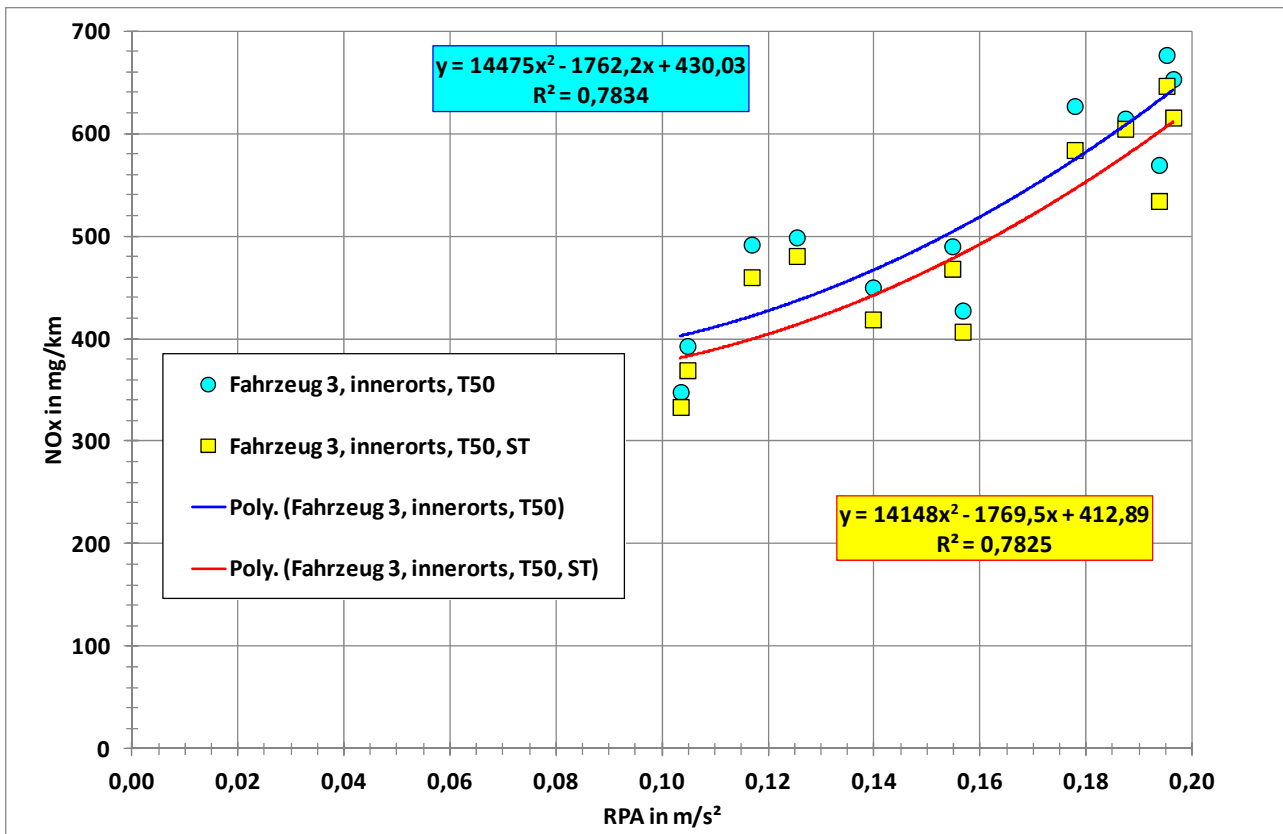


Abbildung 6-39: NO_x-Emissionen über der mittleren positiven Beschleunigung, innerorts, Fahrzeug 3

Die Korrelation lässt sich noch deutlich verbessern, wenn man die Emissionen über dem Quotienten aus RPA und der mittleren Geschwindigkeit darstellt (r^2 zwischen 0,85 und 0,95, siehe Abbildung 6-40 bis Abbildung 6-42). Diese Kennzahl beschreibt recht gut die Dynamik einer Fahrt.

Eine weitere, aber nur noch kleine Verbesserung lässt sich erreichen, wenn man obigen Quotienten mit der Anzahl an Emissionspeaks je km Fahrstrecke multipliziert (r^2 zwischen 0,88 und 0,95, siehe Abbildung 6-43 bis Abbildung 6-45). Als Emissionspeak wurden diejenigen zusammenhängenden Zeitabschnitte gekennzeichnet, bei denen die Emission höher als 8 mg/s war. In beiden Fällen ergeben sich fahrzeugspezifisch unterschiedliche Regressionskurven.

Die höheren Emissionen auf der Innerortsstrecke in München erklären sich also aus deutlich höheren RPA-Werten und höheren Anzahlen von short trips je km im Vergleich zur Innerortsstrecke in Stuttgart.

Die Ergebnisse für die Werte ohne Stillstand sind in Abbildung 6-46 bis Abbildung 6-48 noch einmal dargestellt, wobei die Emissionen auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart bei Tempo 30 und Tempo 40 zum Vergleich mit eingezeichnet sind. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass Tempo 30 und Tempo 40 für die beiden Fahrzeuge mit Abgasnachbehandlungssystemen (Fahrzeuge 1 und 2) eher zu höheren Emissionen führt, während sich für Fahrzeug 3 keine signifikanten Unterschiede ergeben.

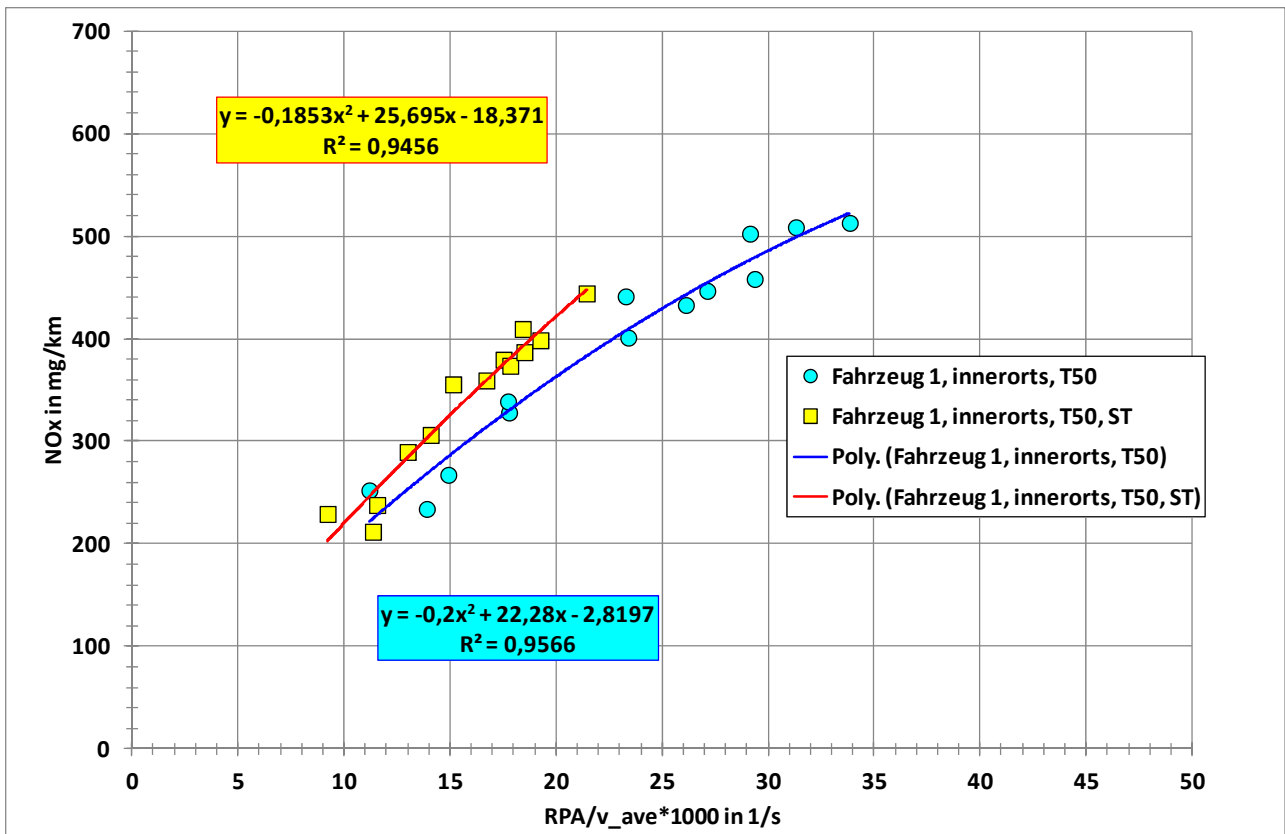


Abbildung 6-40: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittlerer Geschwindigkeit für Fahrzeug 1

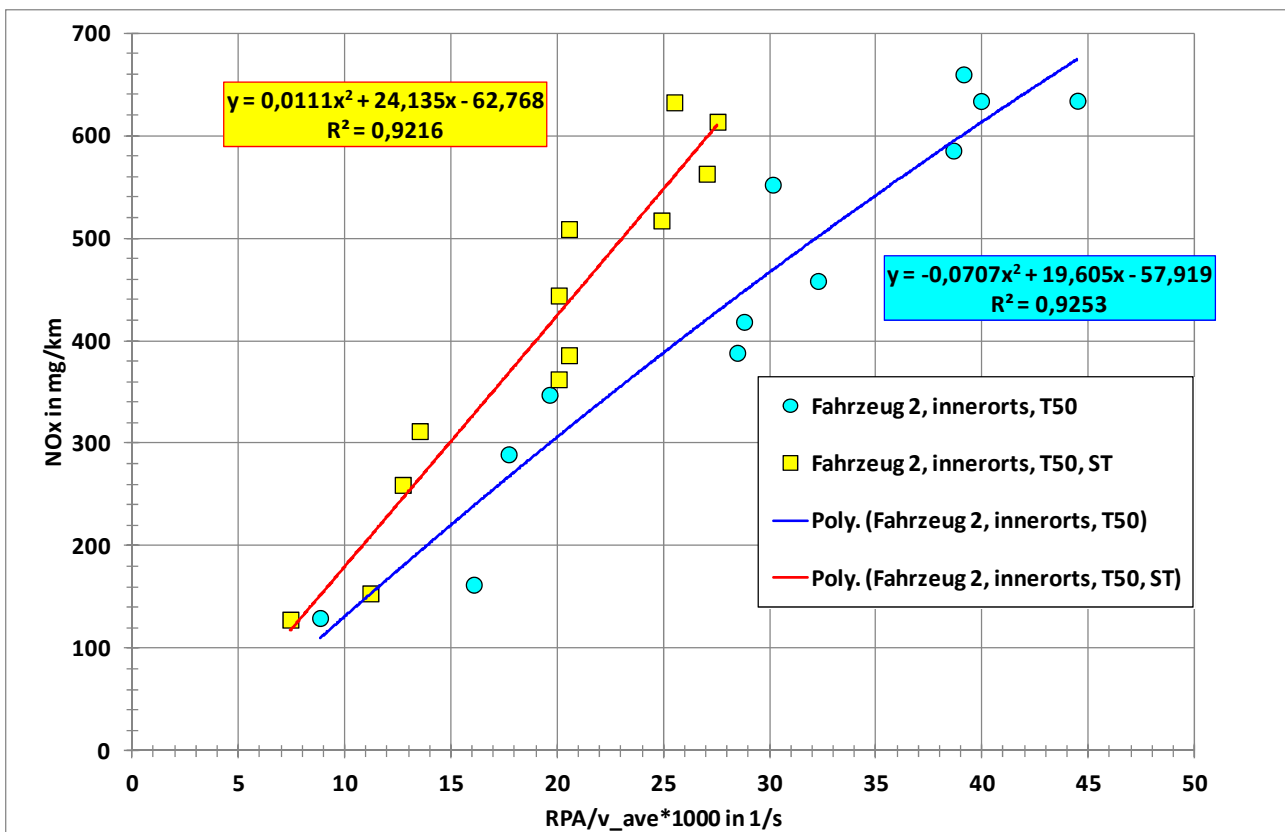


Abbildung 6-41: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittlerer Geschwindigkeit für Fahrzeug 2

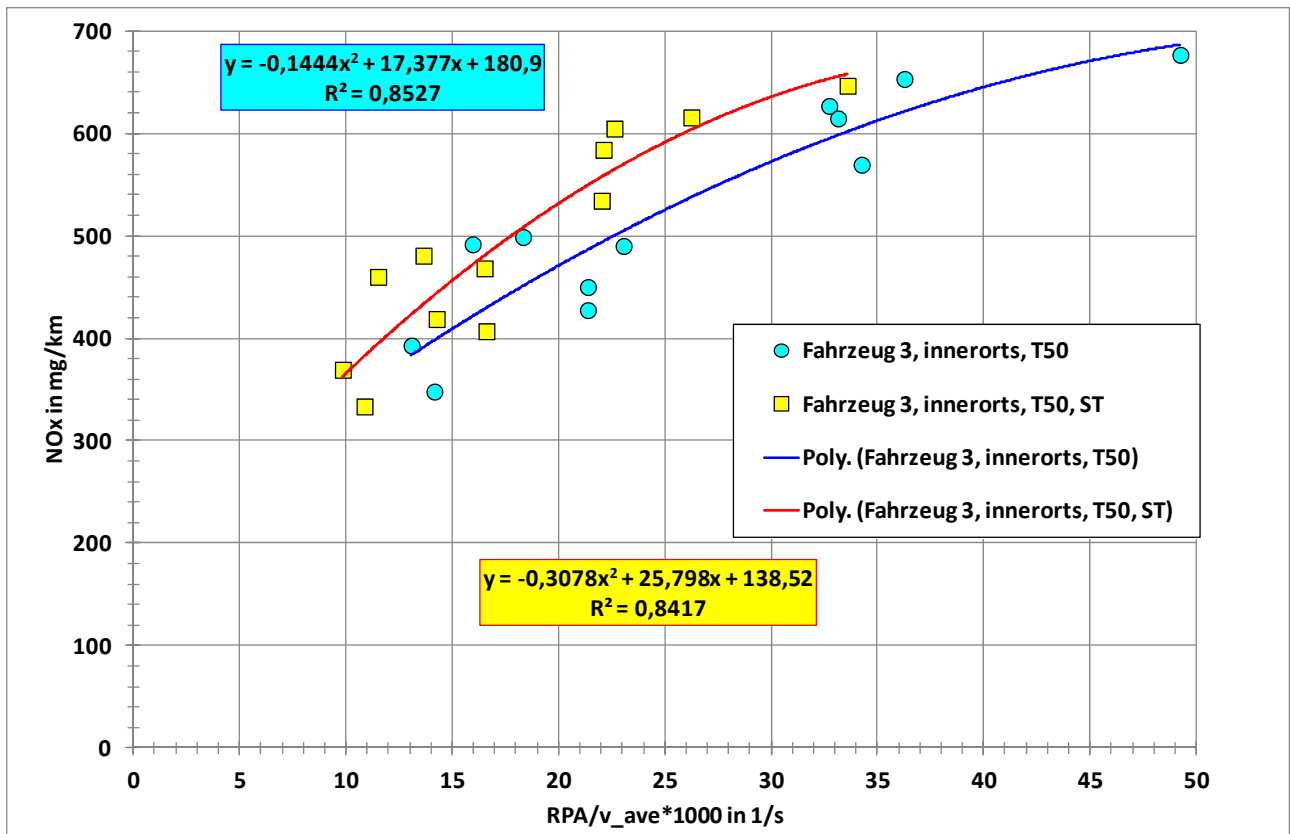


Abbildung 6-42: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittlerer Geschwindigkeit für Fahrzeug 3

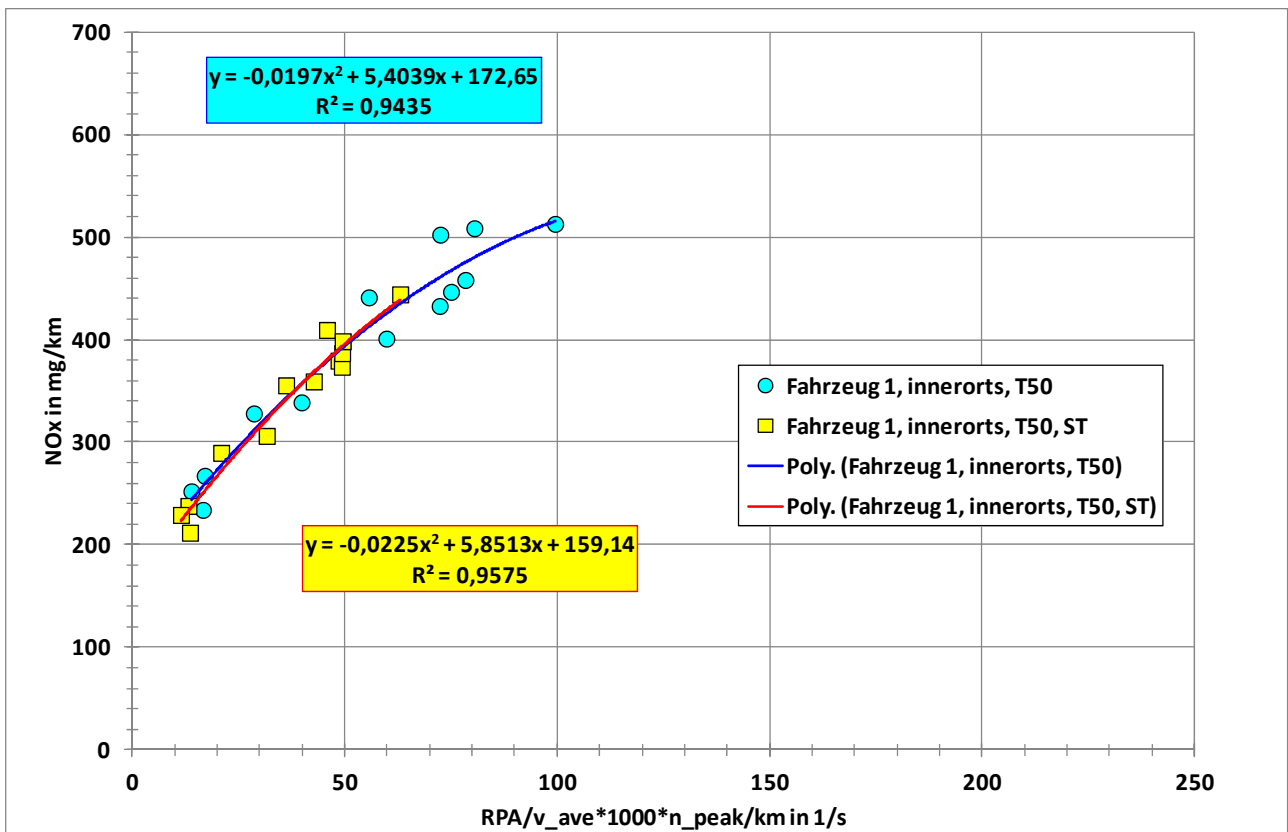


Abbildung 6-43: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittl. Geschwindigkeit multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 1

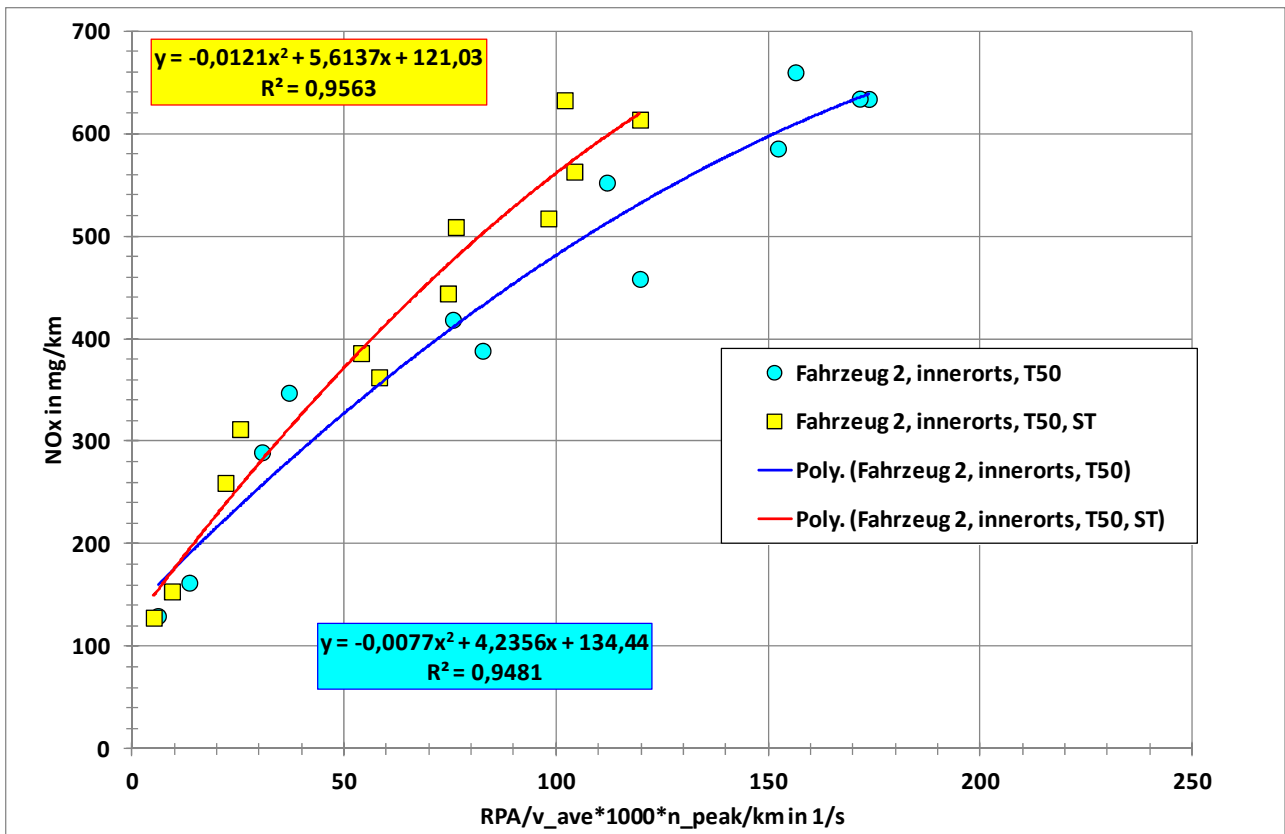


Abbildung 6-44: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittl. Geschwindigkeit multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 2

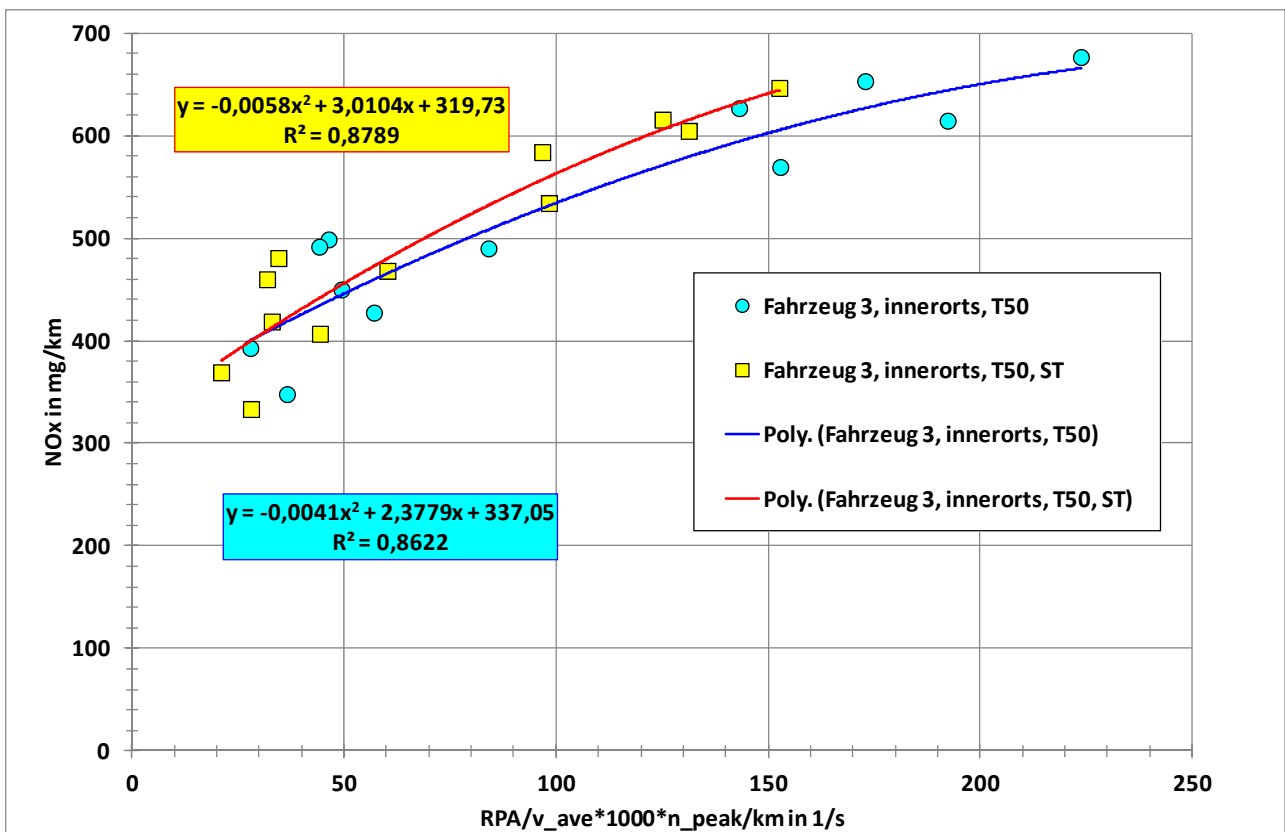


Abbildung 6-45: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittl. Geschwindigkeit multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 3

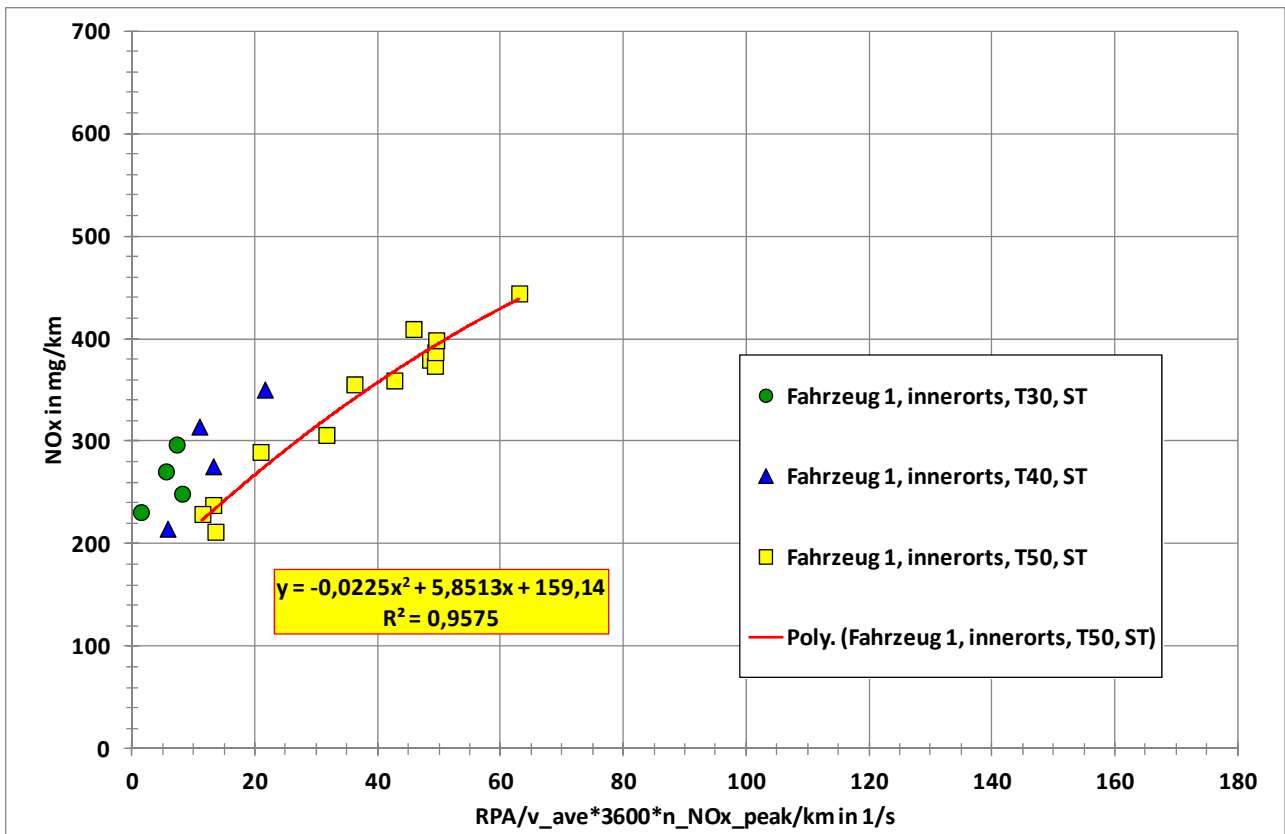


Abbildung 6-46: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA/v_{ave} multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 1, T30 und T40 Werte zum Vergleich

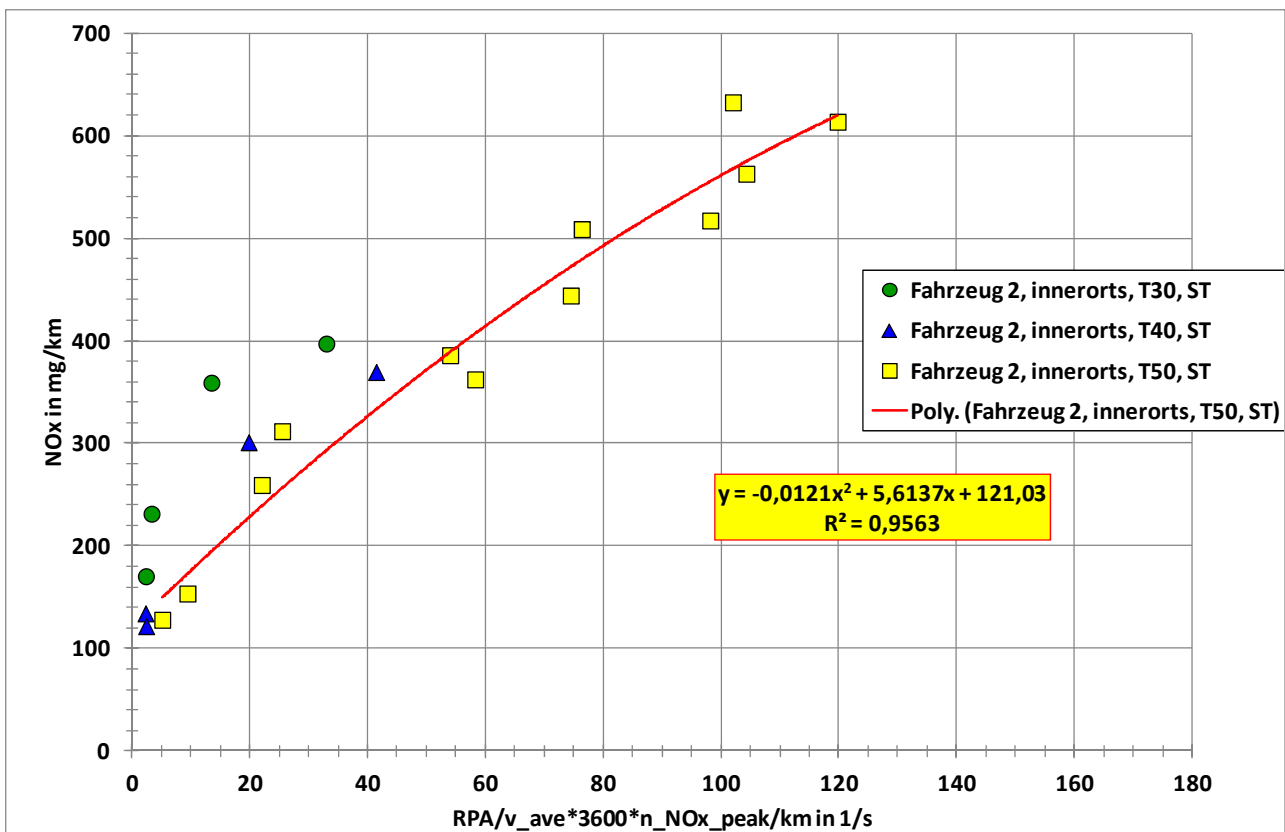


Abbildung 6-47: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA/v_{ave} multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 2, T30 und T40 Werte zum Vergleich

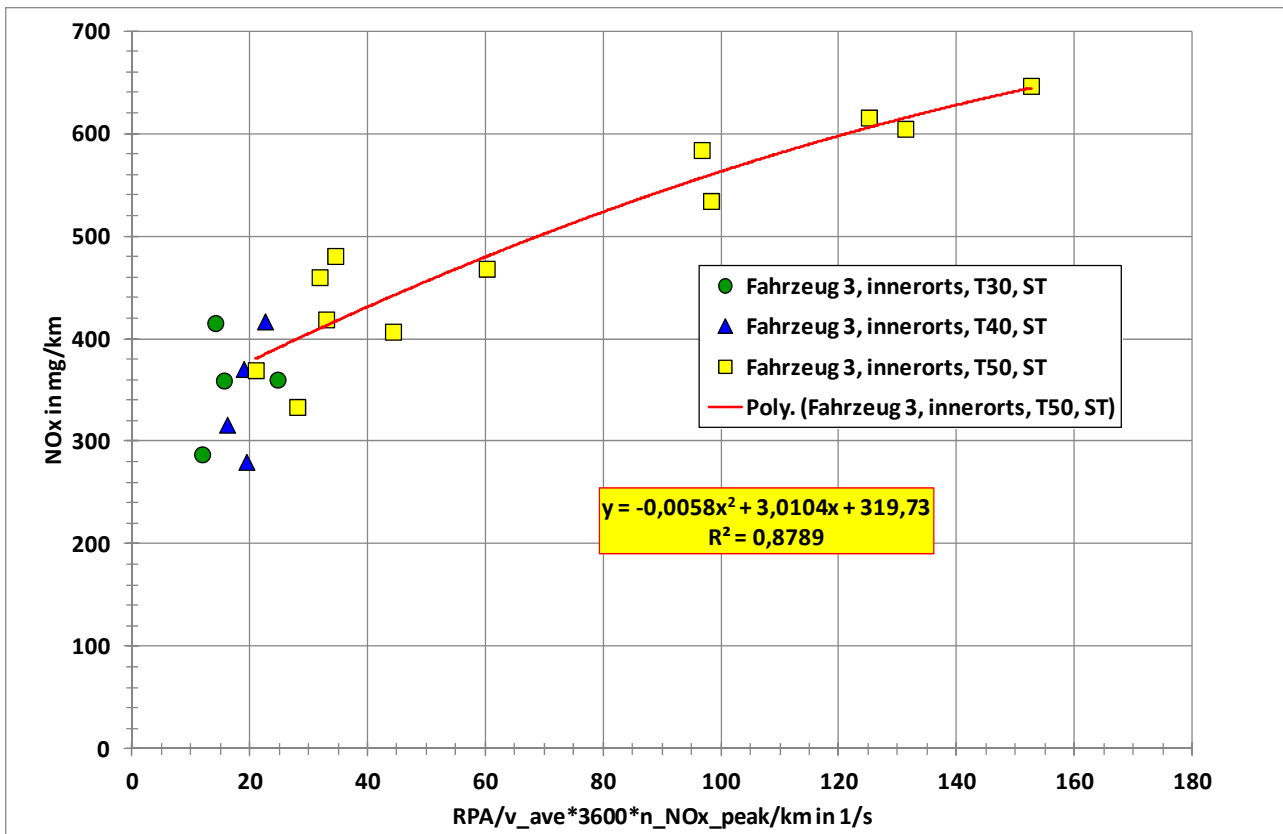


Abbildung 6-48: NO_x-Emissionen über dem Quotienten aus RPA/v_{ave} multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 3, T30 und T40 Werte zum Vergleich

Die Abbildung 6-38 bis Abbildung 6-48 beschreiben die Emissionen in Abhängigkeit von Kennzahlen, die ein Maß für die Dynamik einer Fahrt darstellen. Die sehr guten Korrelationen der Emissionen mit diesen fahrdynamischen Parametern sowie die nochmalige Steigerung der Korrelation bei Einbeziehung der Emissionswirklichkeit in Form von Emissionspeaks pro Kilometer lassen zwei Folgerungen zur Emissionsminderung insbesondere im städtischen Verkehr zu: Zum einen muss fahrzeugseitig darauf hin gearbeitet werden, die Emissionspeaks, wie sie bei Lastaufschaltung während Beschleunigungsmomenten entstehen, zu minimieren. Zum anderen zeigen die genannten Abbildungen, dass die Vermeidung hoher Fahrdynamik ein hohes Potential zur Emissionsminderung hat. Es muss also Bestrebungen geben, eine Verkehrsverstetigung herbeizuführen.

Weitet man die Korrelationen auf alle Fahrten, also auch auf höhere Geschwindigkeiten auf, verschlechtern sich die Korrelationen.

6.3.6 NO_x-Emissionen in Abhängigkeit von Drehzahl und Motorleistung

Wie schon erwähnt, sind den Messergebnissen auch Drehzahlen und Motorbelastungen aus dem Motorsteuergerät zugeordnet. Die Motorbelastungswerte wurden mit Hilfe der Drehzahlen und der Vollastleistungskurven (siehe Abbildung 4-6 bis Abbildung 4-11) in Motorleistungswerte umgerechnet. Wie die Ergebnisse in Abbildung 6-49 zeigen, steigen die zeitbezogenen NO_x-Emissionen mit zunehmender Motorleistung progressiv an. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte je Motorleistungsklasse und die Mittelwerte plus Standardabweichung. Zwar erreicht Fahrzeug 2 die höchsten Emissionswerte, jedoch hat es bis 60 kW Leistung das niedrigste Emissionsniveau, während die Emissionen für Fahrzeug 3 in diesem Bereich deutlich höher liegen.

In Abbildung 6-50, Abbildung 6-51 und Abbildung 6-52 sind die NO_x-Kennfelder der drei Fahrzeuge dargestellt. Es handelt sich um Mittelwerte in mg/s über alle Fahrten in den zweidimensionalen Drehzahl/Motorleistungsklassen. Da die hohen NO_x-Emissionen durch Emissionsspitzen bei Beschleunigungsvorgängen geprägt sind und die Höhe dieser Spitzen stochastisch ist, können die Kennfelder für einzelne Fahrten von diesen mittleren Kennfeldern abweichen. Entsprechende Kennfelder für jede einzelne Fahrt liegen als Excel-Tabellen vor.

Es ist unschwer zu erkennen, dass Fahrzeug 2 das günstigste und Fahrzeug 3 das ungünstigste Kennfeld aufweisen. Dass Fahrzeug 3 dennoch den Grenzwert für Euro 6-Diesel in Höhe von 80 mg/km einhalten kann, wird in Abbildung 6-53 deutlich, in dem das Kennfeld als Blasendiagramm dargestellt ist und die Zeitanteile für den derzeitigen Typprüfzyklus NEFZ zusätzlich angegeben sind. Der NEFZ hat seine häufigsten Zeitanteile bei mittleren Drehzahlen und niedrigen Motorleistungen, also in einem Bereich, in dem die spezifischen NO_x-Emissionen niedrig sind. Abbildung 6-54 zeigt einen Vergleich mit dem zukünftigen Typprüfzyklus WLTC, der eine höhere Kennfeldabdeckung erreicht.

Abschließend sind in Abbildung 6-55 und Abbildung 6-56 die zeitlichen Häufigkeitsverteilungen von Drehzahl und Motorleistung für zwei Fahrten in Stuttgart auf der Innenstadtstrecke bei Tempo 30 für Fahrzeug 2 dargestellt. Fahrt 23 (Abbildung 6-55) hat eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 18,3 km/h, einen Stillstandanteil von 23% und eine NO_x-Emission von 184,9 mg/km. Die Fahrt besteht aus 36 short trips und hat 5 NO_x-Peaks. Fahrt 30 dagegen (Abbildung 6-56) besteht aus 90 short trips, hat 34 NO_x-Peaks, eine Durchschnittsgeschwindigkeit von 13,3 km/h, einen Stillstandanteil von 28% und eine NO_x-Emission von 459,9 mg/km. Durch die hohe Anzahl an short trips und Emissionsspitzen fällt das Kennfeld für die Fahrt 30 (Abbildung 6-58) ungünstiger aus als das aus Mittelwerten sämtlicher Fahrten errechnete Kennfeld, während das Kennfeld für Fahrt 23 (Abbildung 6-57) günstiger als das mittlere ausfällt.

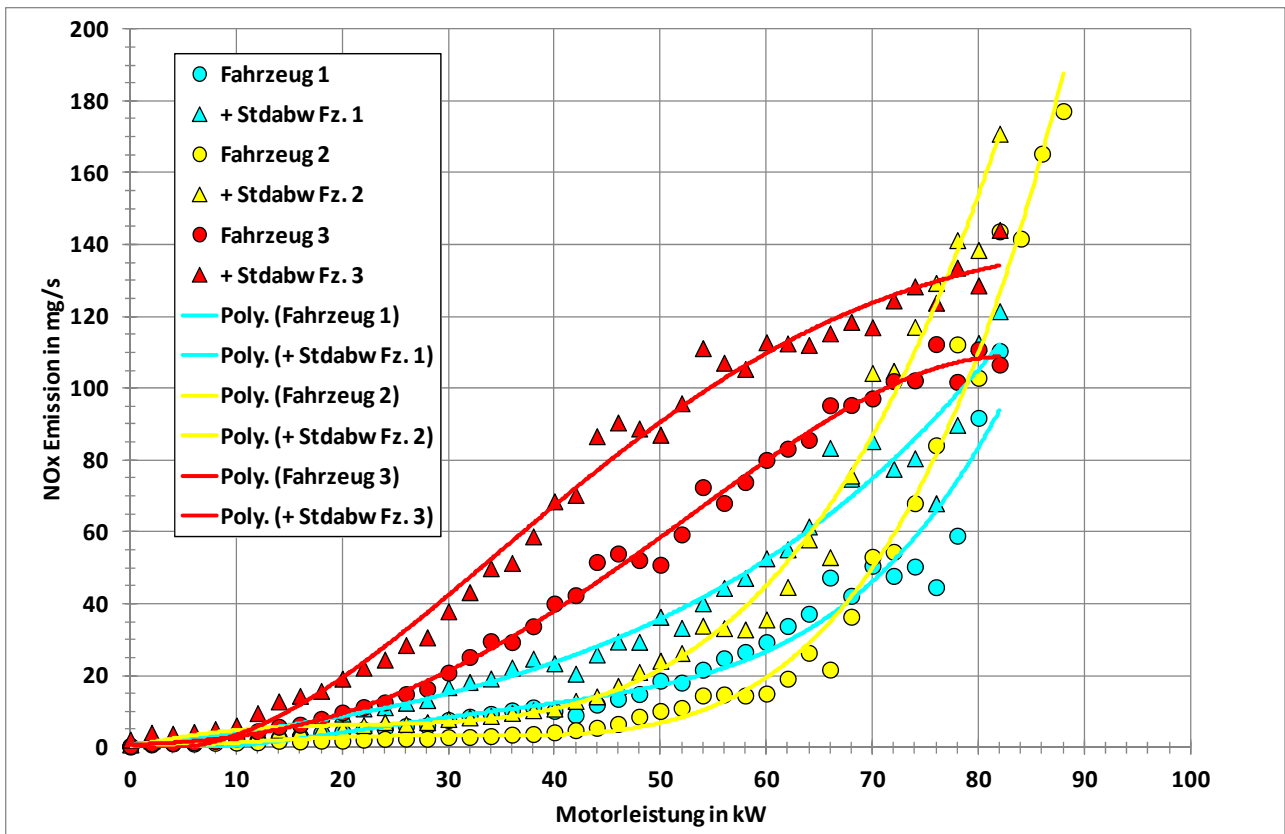


Abbildung 6-49: Mittlere NO_x-Emissionen über der Motorleistung

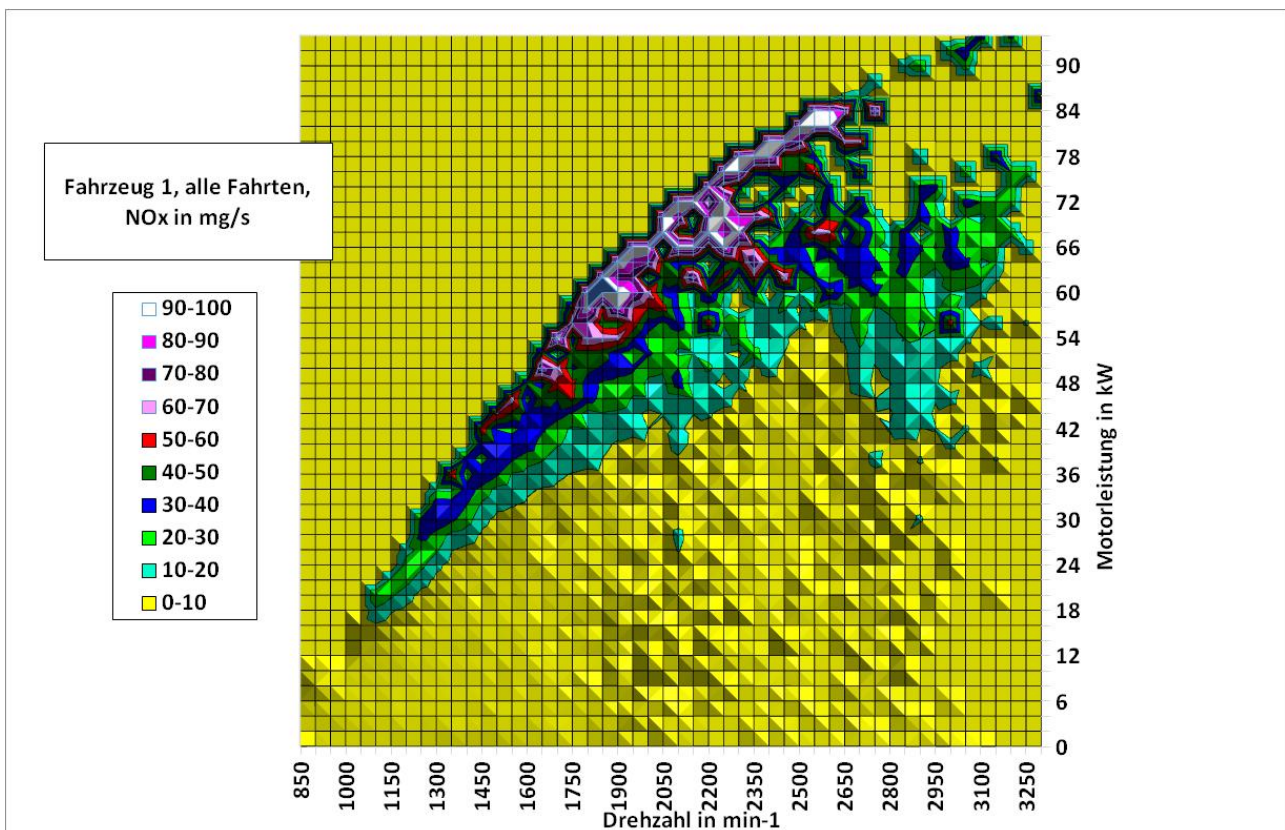


Abbildung 6-50: Mittleres NO_x-Emissionskennfeld Fahrzeug 1

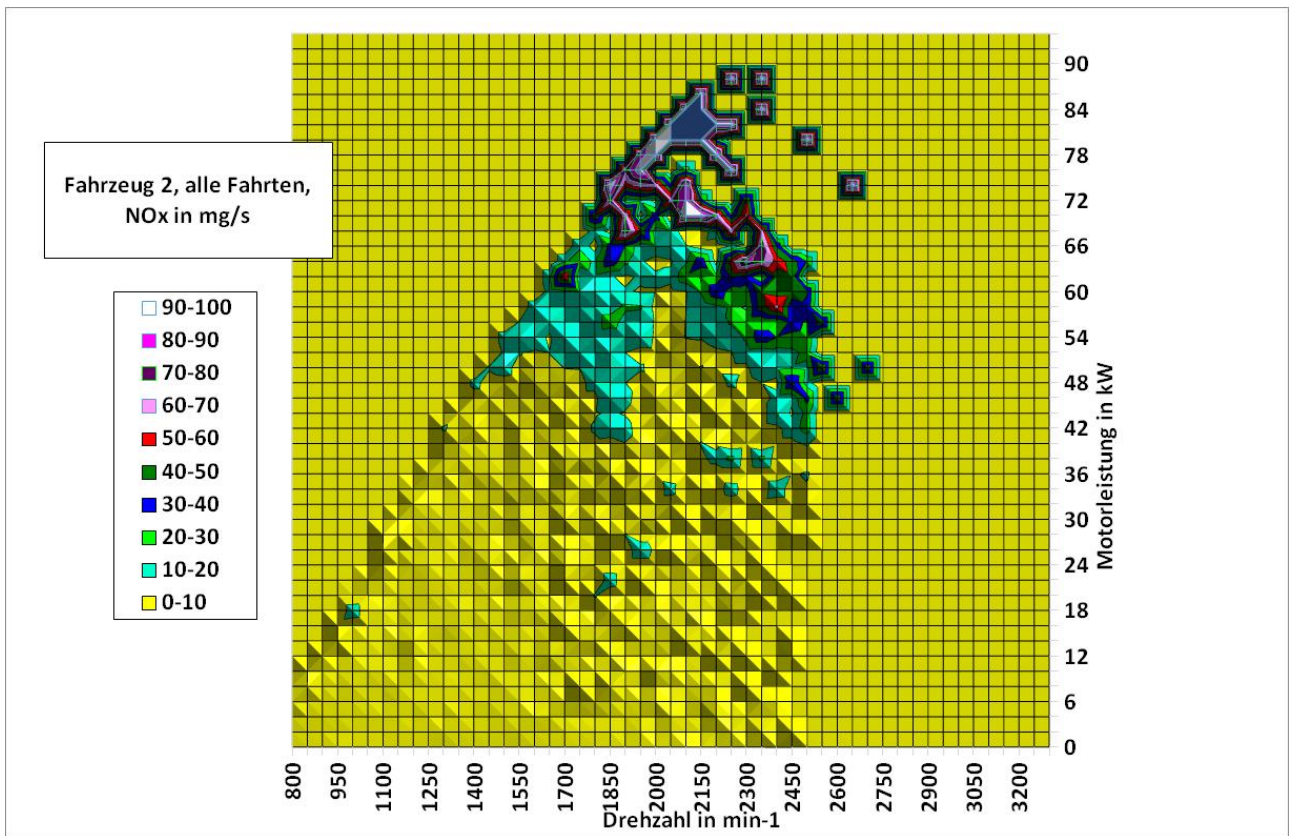


Abbildung 6-51: Mittleres NO_x-Emissionskennfeld Fahrzeug 2

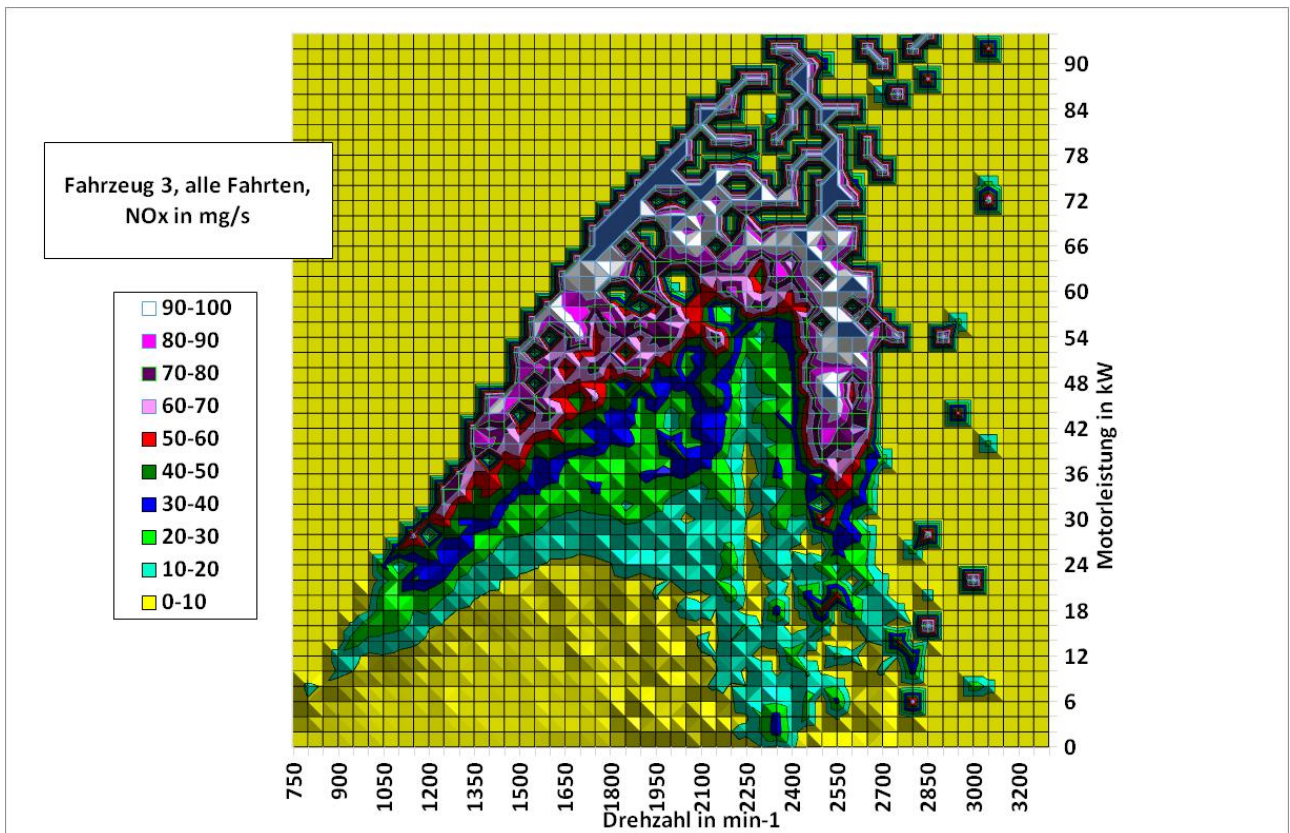


Abbildung 6-52: Mittleres NO_x-Emissionskennfeld Fahrzeug 3

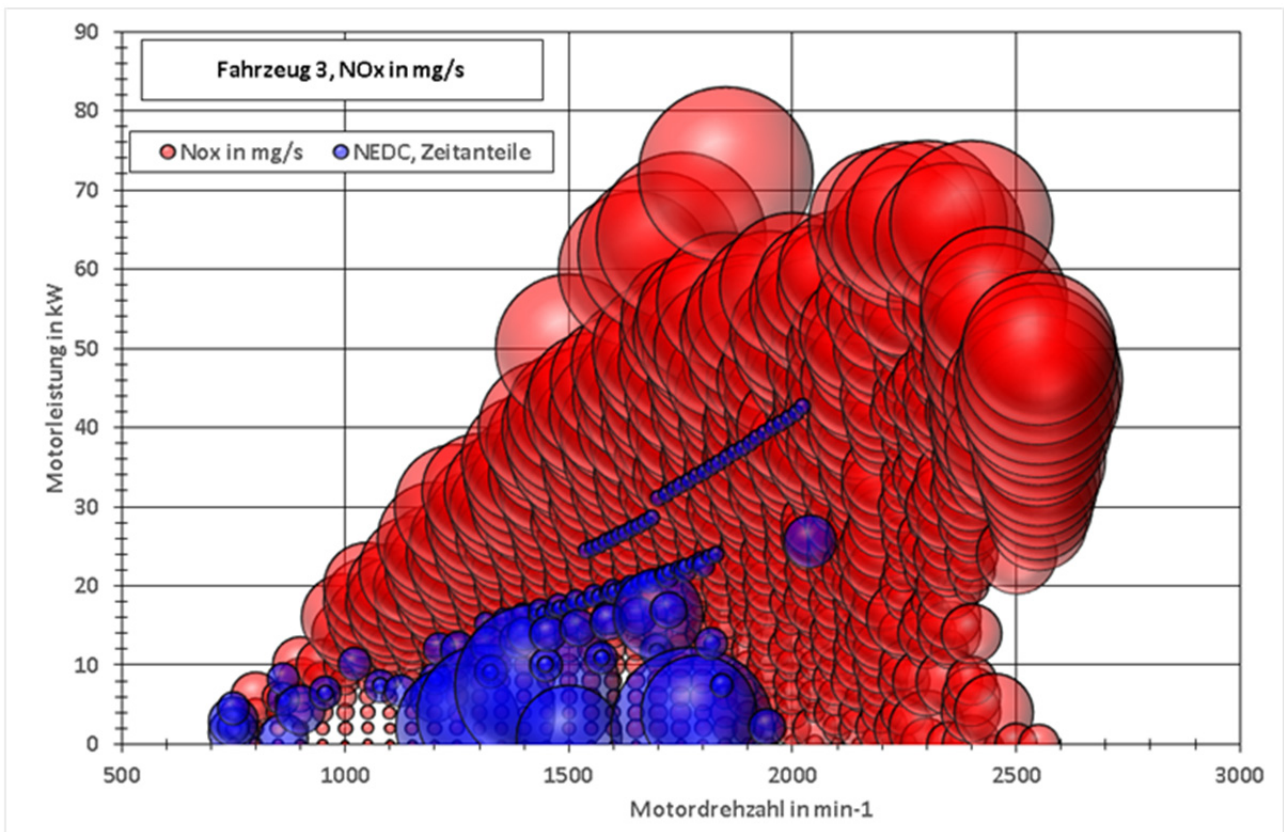


Abbildung 6-53: Mittleres NO_x-Kennfeld von Fahrzeug 3, NEFC-Zeitanteile zum Vergleich

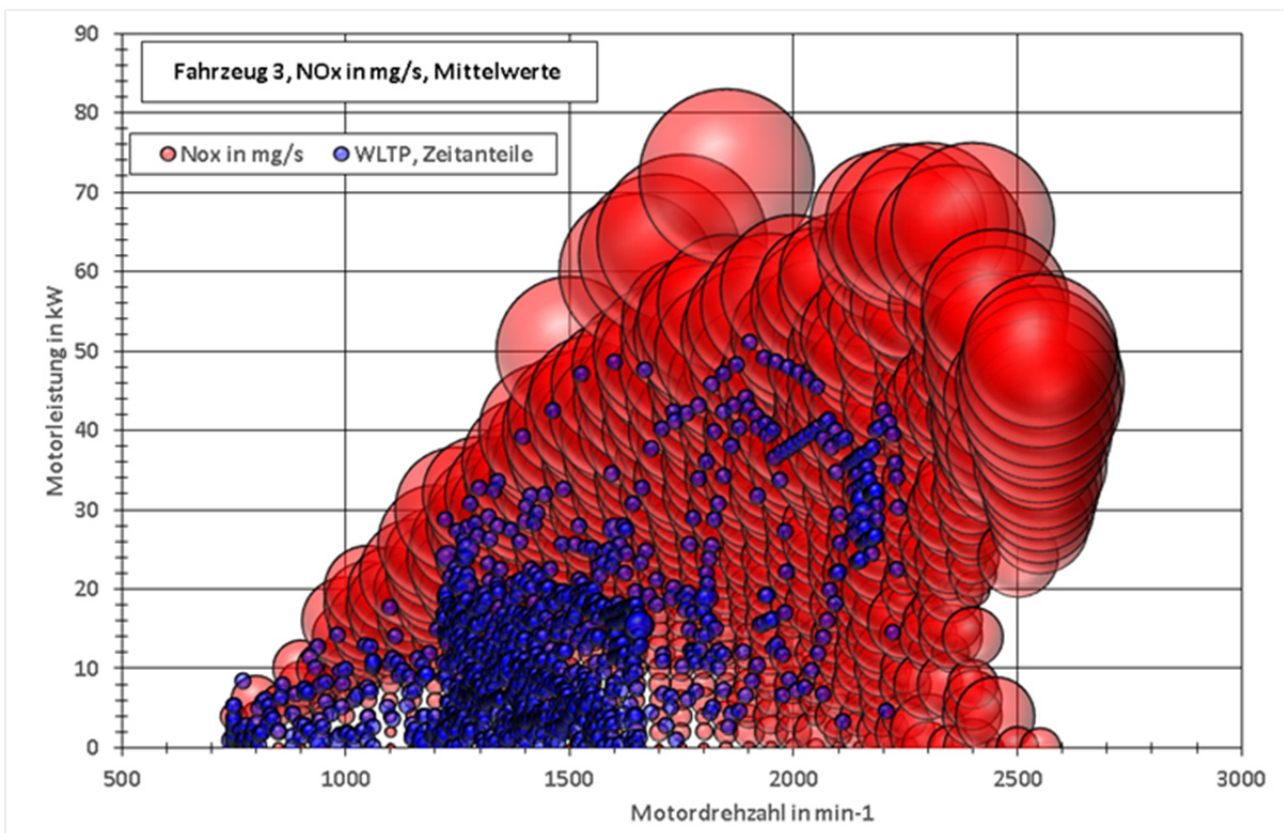


Abbildung 6-54: Mittleres NO_x-Kennfeld von Fahrzeug 3, WLTP-Zeitanteile zum Vergleich

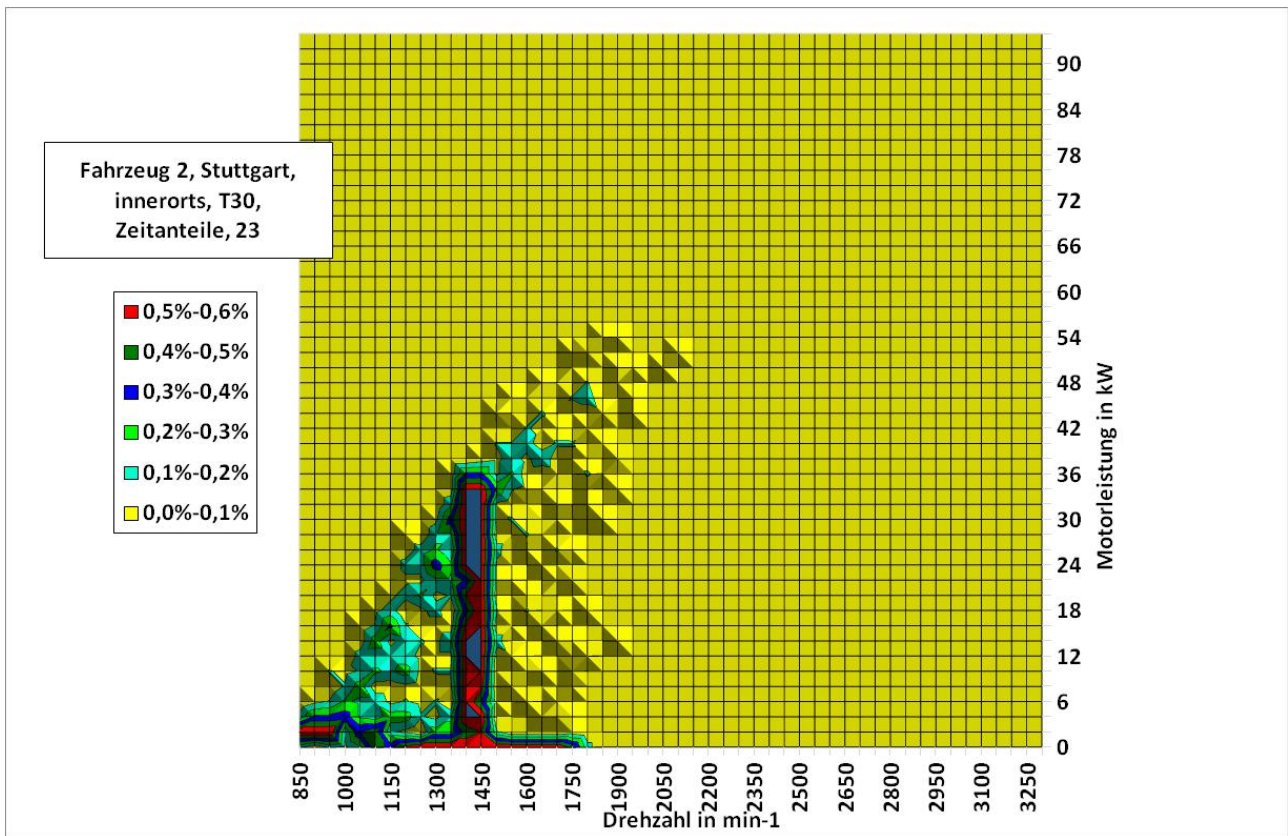


Abbildung 6-55: Zeitliche Häufigkeit von Drehzahl und Leistung, Stuttgart, Innenstadtstrecke, T30, Fahrzeug 2, Fahrt 23

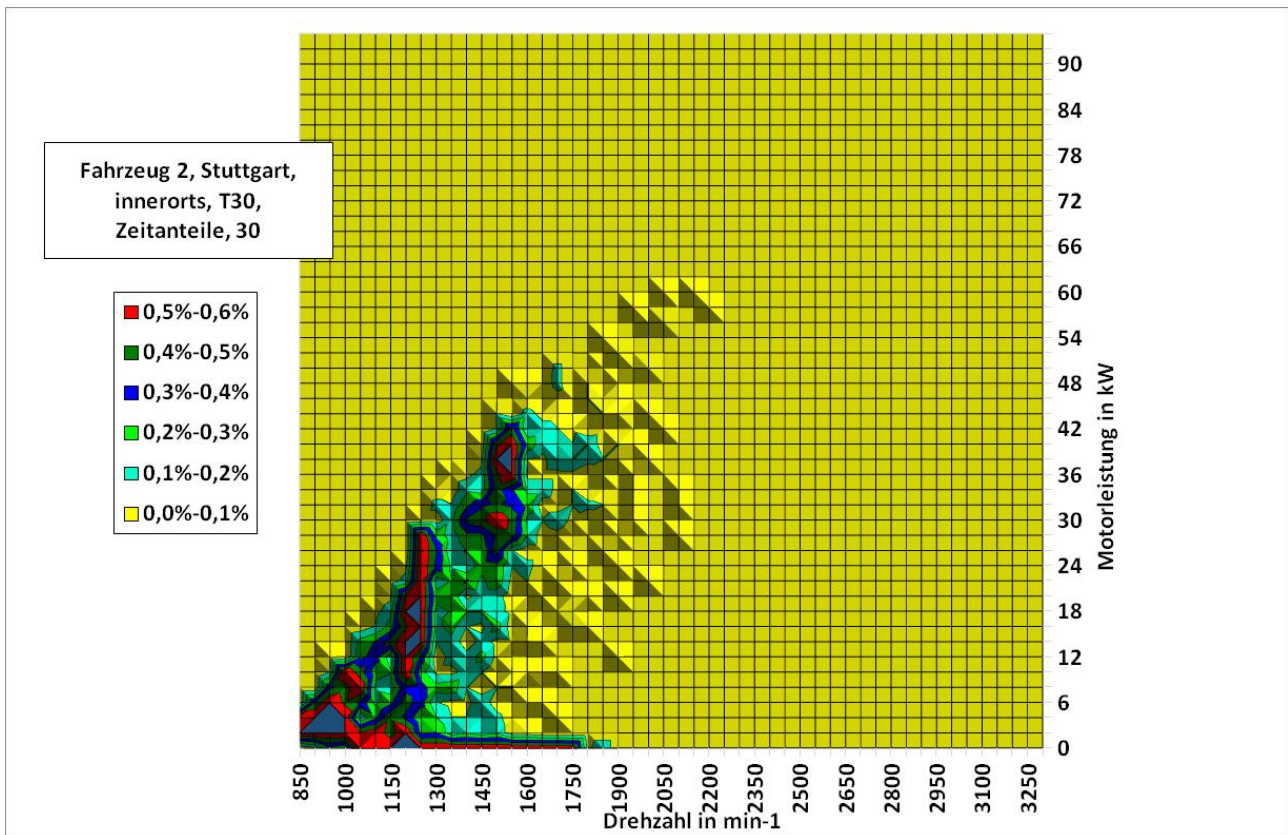


Abbildung 6-56: Zeitliche Häufigkeit von Drehzahl und Leistung, Stuttgart, Innenstadtstrecke, T30, Fahrzeug 2, Fahrt 30

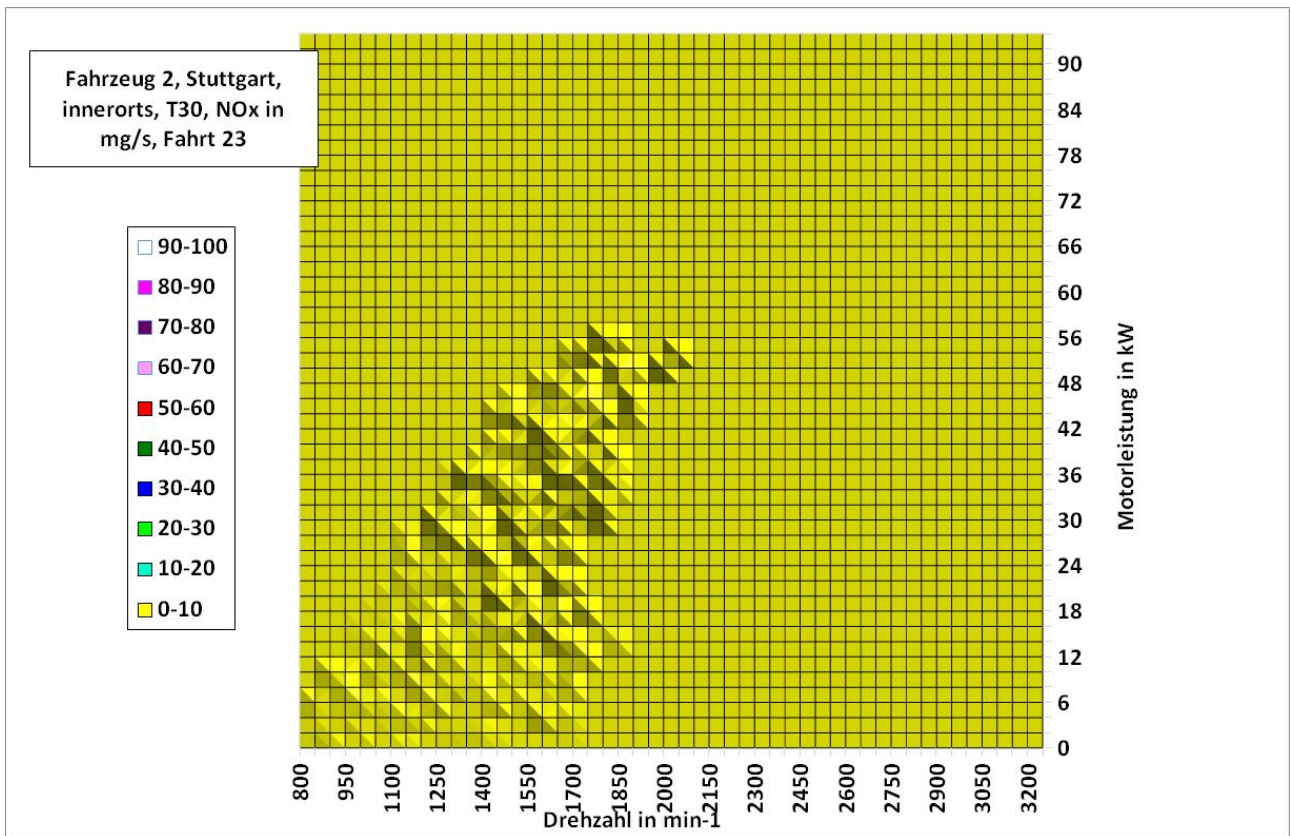


Abbildung 6-57: NO_x-Kennfeld für Fahrt 23, Bedingungen siehe Abbildung 6-55

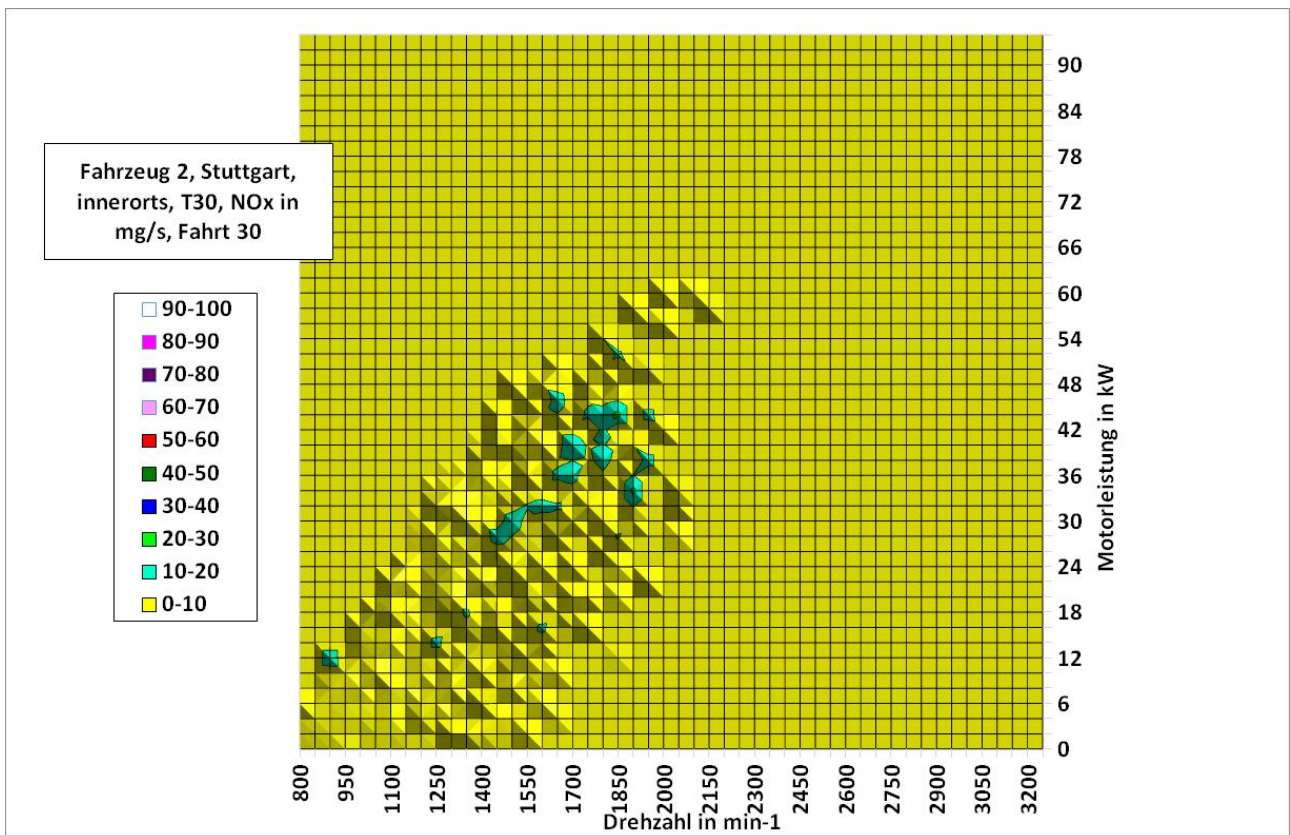


Abbildung 6-58: NO_x-Kennfeld für Fahrt 30, Bedingungen siehe Abbildung 6-56

6.4 NO₂/NO_x-Verhältnisse

Neben der Frage der Gesamt-NO_x-Emissionen ist insbesondere in städtischen Verkehrssituationen mit straßennaher hoher Bebauung auch die Frage der NO₂-Direktemissionen von Bedeutung. In den Untersuchungen, die im Jahre 2010 durchgeführt wurden, zeigten sich bei zwei Fahrzeugen sehr hohe NO₂/NO_x-Verhältnisse häufig bis über 50% als Mittelwert für die Fahrten. Ein erhöhter NO₂-Anteil ist für eine sichere passive Regeneration eines Partikelfilters notwendig und erwünscht und wird durch oxidierende Bestandteile der Abgasnachbehandlung sichergestellt. Der NO₂-Anteil im Motorrohgas liegt in Bereichen unter 10%. In der Emissionsgesetzgebung sind nur die Gesamt-NO_x-Emissionen limitiert, so dass keine Begrenzung des NO₂-Anteils im Abgas besteht.

Auch für die Abgasnachbehandlungssysteme der Euro 6-Fahrzeuge gibt es systemabhängig optimale NO₂/NO_x-Verhältnisse. So wird bei SCR-Systemen für größte Effektivität häufig ein NO₂-Anteil von ca. 50% angestrebt. Für NO_x-Speicherkatalysatoren ist der NO₂-Anteil stark abhängig vom Ein-/Auspeicherzyklus.

Abbildung 6-59 bis Abbildung 6-61 zeigen die NO₂/NO_x-Verhältnisse der drei Versuchsfahrzeuge. Dargestellt sind die sekundlichen Werte aller Fahrten und die linearen Korrelationen. Wie die Steigungen der Ausgleichsgeraden zeigen, liegen für Fahrzeug 1 und Fahrzeug 2 die Werte im Mittel in der Nähe von 30% und somit deutlich unter denen von den Euro 4-Fahrzeugen, die 2010 vermessen wurden. Die Werte des Fahrzeugs 3 weichen deutlich zu geringeren NO₂-Werten ab. Der NO₂-Bedarf zur Filterregeneration erscheint hier gering zu sein, so dass die emittierten NO₂-Mengen in der Nähe der Motorrohmissionen liegen.

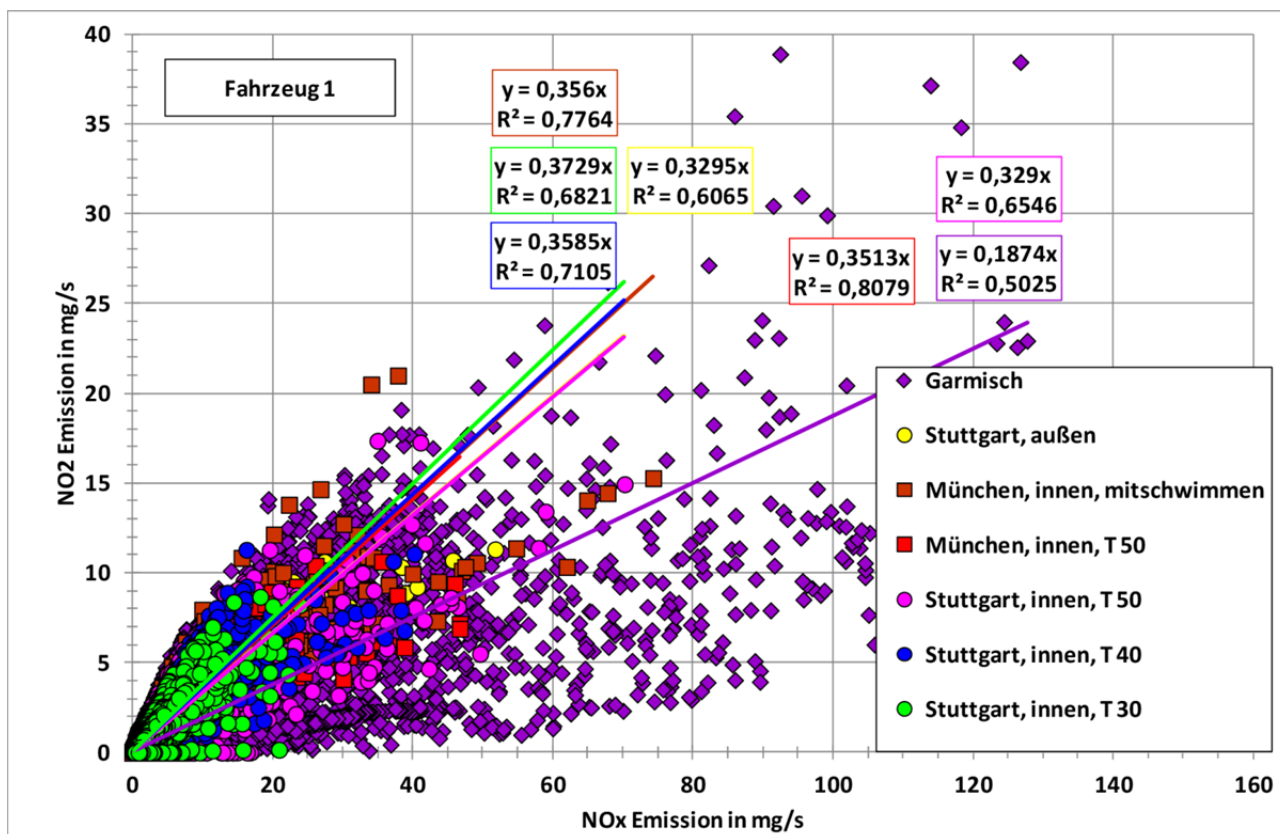


Abbildung 6-59: NO₂/NO_x-Verhältnisse Fahrzeug 1

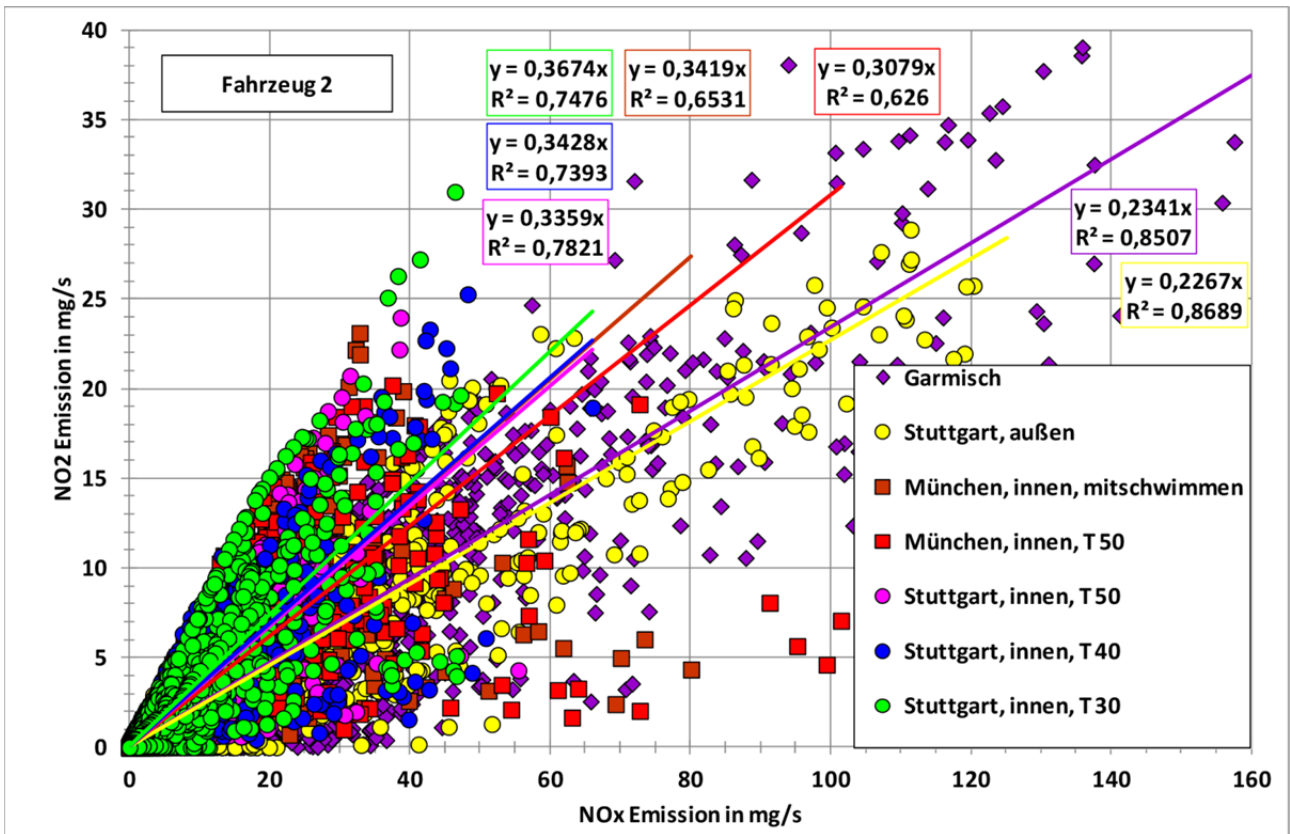


Abbildung 6-60: NO₂/NO_x-Verhältnisse Fahrzeug 2

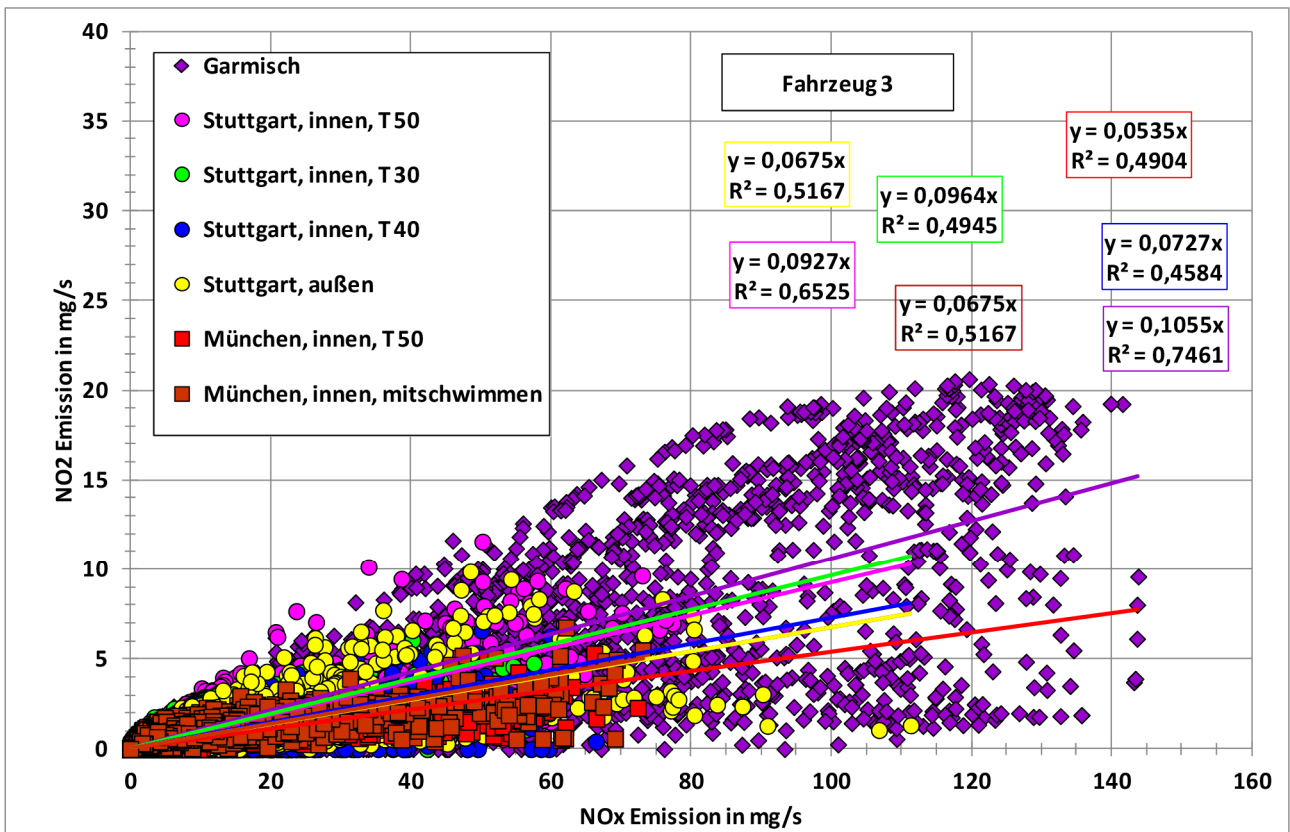


Abbildung 6-61: NO₂/NO_x-Verhältnisse Fahrzeug 3

Zusammenfassend ergibt sich bei den Euro 6-Fahrzeugen durch die geringeren NO_x-Gesamtemissionen und die geringeren NO₂/NO_x-Verhältnisse eine stark reduzierte NO₂-Direktemission gegenüber den im Jahr 2010 gemessenen Werten.

6.5 Ergebnisse der vom ADAC durchgeführten Rollenprüfstandsmessungen

Zur Absicherung der Ergebnisse der durchgeführten Realfahrtmessungen wurden alle drei Versuchsfahrzeuge vor und nach den Messkampagnen im NEFZ vermessen. Durchgeführt wurden diese Messungen durch den ADAC in seinem Technikzentrum in Landsberg am Lech. Abbildung 6-62 zeigt die NO_x-Emissionen im NEFZ der drei Versuchsfahrzeuge nach den PEMS-Messungen mit der Aufschlüsselung der einzelnen Phasen. Die unterschiedlichen Auslegungen der NO_x-reduzierenden Systeme werden mit den Phasenergebnissen deutlich. So zeigen die hohen NO_x-Ergebnisse der Phase 1 für den VW die längere Aufwärmzeit des Unterbodensystems, welches aber in der Phase 2 mit sehr hoher Effektivität arbeitet.

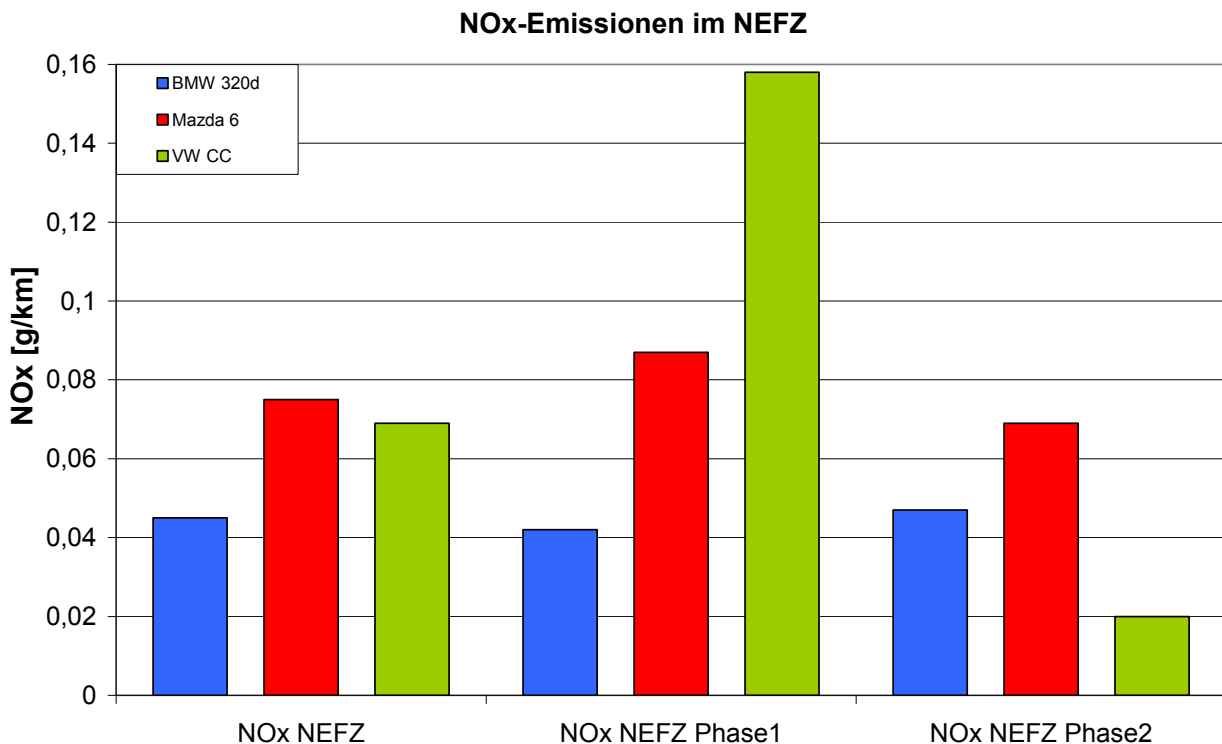


Abbildung 6-62: NO_x-Emissionen im NEFZ

Abbildung 6-63 zeigt die NO₂-Ergebnisse der Rollenprüfstandsmessungen im NEFZ. Die anschließende Tabelle 6-14 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse. Für die ausgewiesenen NO₂/NO_x-Verhältnisse ergeben sich quantitative Unterschiede zu den Ergebnissen der Realfahrten, wobei die qualitativen Unterschiede zwischen VW, BMW und Mazda auch auf dem Rollenprüfstand nachvollziehbar sind.

NO₂-Emissionen im NEFZ

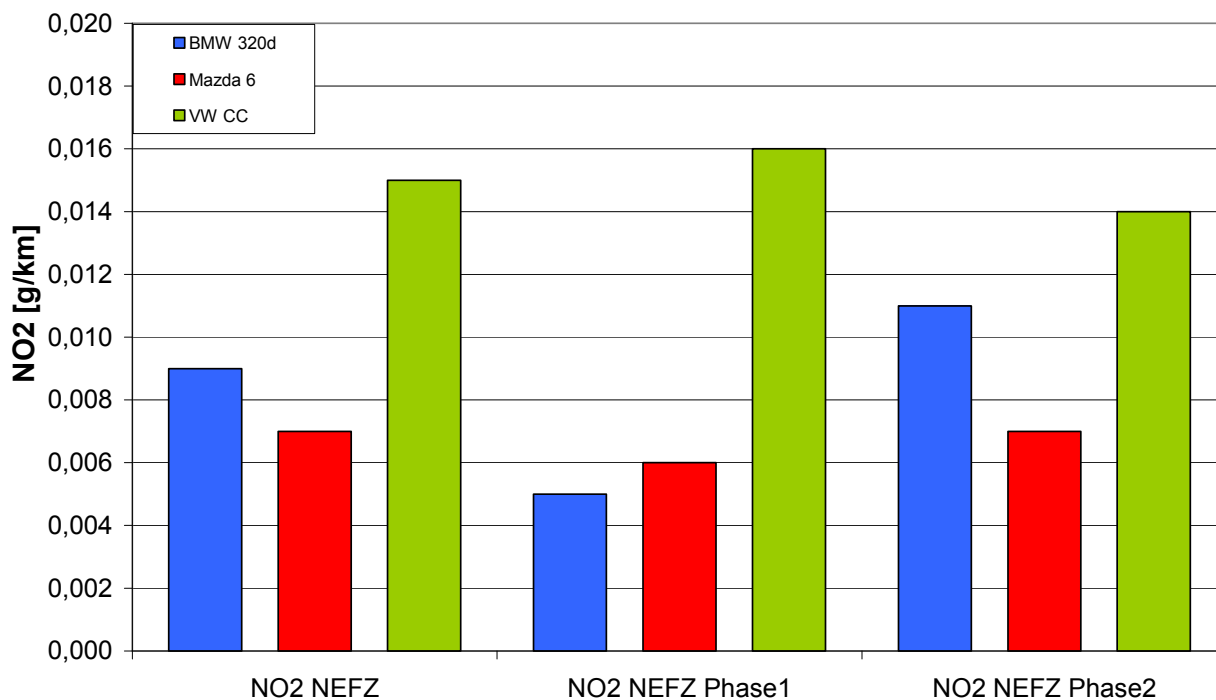


Abbildung 6-63: NO₂-Emissionen im NEFZ

Tabelle 6-14: Tabellarische Zusammenfassung der Rollenprüfstandsergebnisse

Fahrzeug	NEFZ			NEFZ Phase 1			NEFZ Phase2		
	NOx [g/km]	NO2 [g/km]	Verhältnis NO2/NOx	NOx [g/km]	NO2 [g/km]	Verhältnis NO2/NOx	NOx [g/km]	NO2 [g/km]	Verhältnis NO2/NOx
BMW 320d	0,045	0,009	20,00%	0,042	0,005	11,90%	0,047	0,011	23,40%
Mazda 6	0,075	0,007	9,33%	0,087	0,006	6,90%	0,069	0,007	10,14%
VW CC	0,069	0,015	21,74%	0,158	0,016	10,13%	0,020	0,014	70,00%

7 Fazit

In dem beschriebenen Projekt wurden drei Euro 6-Fahrzeuge auf unterschiedlichen Streckenführungen in Stuttgart, München und einer Außerortsstrecke bei Garmisch-Partenkirchen auf ihre Abgasemissionen hin mit mobiler Abgasmesstechnik vermessen. Tabelle 7-1 zeigt die Bandbreiten der mittleren Emissionen einzelner Fahrten. Zusätzlich sind die Ergebnisse aller Fahrten mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit kleiner 35 km/h dargestellt. Zur Information ist auch der NO_x-Grenzwert im NEFZ aufgelistet. Tabelle 7-2 zeigt Mittelwerte der NO_x-Emissionen für unterschiedliche Betriebszustände.

Tabelle 7-1: Bandbreiten der Emissionsergebnisse

	Bandbreiten							Grenzwert NEFZ
	Mittlere NO _x -Emissionen für alle Fahrten	Mittlere NO _x -Emissionen Stuttgart T50	Mittlere NO _x -Emissionen München T50	Mittlere NO _x -Emissionen München T60	Mittlere NO _x -Emissionen Stuttgart Außenbezirk	Mittlere NO _x -Emissionen Garmisch	Mittlere NO _x -Emissionen für Fahrten <35 km/h Durchschnitts-	NO _x -Grenzwert im NEFZ
	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]
Fahrzeug 1	221,2 - 512,9	234,1 - 338,9	432,8 - 502,4	401,0 - 512,9	221,2 - 304,2	302,3 - 354,3	345,8	80
Fahrzeug 2	125,3 - 659,6	129,8 - 347,3	585,4 - 659,6	388,2 - 552,1	173,6 - 207,9	133,6 - 227,4	339,1	80
Fahrzeug 3	284,2 - 676,5	348,0 - 498,8	427,5 - 626,7	569,4 - 676,5	288,2 - 463,4	439,8 - 618,3	420,3	80

Tabelle 7-2: Mittelwerte der NO_x-Emissionen für unterschiedliche Betriebszustände

	Mittelwerte						
	NO _x -Emissionen Konstantfahrten zwischen 20 und 40 km/h	NO _x -Emissionen Konstantfahrten zwischen 40 und 140 km/h	NO _x -Emissionen Konstantfahrten > 140 km/h	NO _x -Emissionen aller Beschleunigungs zustände	NO _x -Emissionen aller Beschleunigungs zustände zwischen 0 und 20 km/h	NO _x -Emissionen aller Beschleunigungs zustände zwischen 25 und 100 km/h	NO _x -Emissionen aller Beschleunigungs zustände > 100 km/h
	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]	[mg/km]
Fahrzeug 1	248,5	154,6	424,5	1064,7	1683,7	1039,8	857,0
Fahrzeug 2	215,6	123,7	275,7	991,9	1496,9	708,7	1225,6
Fahrzeug 3	298,1	245,4	1493,1	1671,9	1930,9	1384,0	2028,9

Bildet man mit den Mittelwerten der Tabelle 7-1 Verhältnisse zum NEFZ-Grenzwert, ergeben sich für den Innerortsbereich Faktoren von 1,6 – 8,5, im Außerortsbereich 1,7 – 7,7. Bei Fahrten mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit kleiner 35 km/h liegen diese Faktoren zwischen 4,2 und 5,3.

Die Analysen der Ergebnisse konnten die unterschiedlichen Einflussfaktoren für die Emissionsergebnisse zeigen, die im Verhalten der Nachbehandlungskonzepte bzw. des NO_x-Minderungskonzepts bezogen auf den Realbetrieb, der Routenführung (große Unterschiede zwischen Innenstadtfahrten Stuttgart und München) und der damit verbundenen Fahrdynamik sowie in unterschiedlichen Verkehrsverhältnissen zu suchen sind.

Um die notwendigen anspruchsvollen innerstädtischen Immissionsziele zu erreichen, resultieren aus den erzielten Ergebnissen dieses Projekts Forderungen nach weiterer Verbesserung des Emissionsverhaltens von Pkw-Dieselfahrzeugen sowie nach einem wirkungsvollen Verfahren im Rahmen der europäischen Emissionsgesetzgebung zur Bewertung der Realemissionen von Pkw.

Neben diesen Forderungen nach weitergehenden Verbesserungen der Fahrzeuge wurden in diesem Projekt, ebenso wie im vorangegangenen Projekt aus dem Jahr 2010, Verbesserungspotenziale durch verkehrslenkende Maßnahmen mit dem Ziel der Verkehrsverstetigung nachgewiesen. Eine Reduzierung der innerstädtischen Höchstgeschwindigkeit konnte auch in dem hier beschriebenen Projekt nicht als emissionsmindernde Maßnahme identifiziert werden.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Bandbreiten der NO _x -Emissionsergebnisse	9
Tabelle 2-1:	Grenzwerte für NO ₂ und PM ₁₀	11
Tabelle 4-1:	Technische Daten Volkswagen CC	19
Tabelle 4-2:	Technische Daten BMW 320d	23
Tabelle 4-3:	Technische Daten Mazda 6 SKYACTIV-D	25
Tabelle 4-4:	Übersicht über das Messprogramm	32
Tabelle 4-5:	Liste aller Messfahrten des Gesamtprojektes	32
Tabelle 5-1:	Spezifikationen SEMTECH DS. Quelle: SENSORS Inc., Manual SEMTECH DS	36
Tabelle 5-2:	Zuladungsgewichte für die drei Versuchsfahrzeuge	38
Tabelle 6-1:	Kennwerte der Fahrten auf der Innenstadtstrecke in Stuttgart	43
Tabelle 6-2:	Kennwerte der Fahrten auf der Außenbezirksstrecke in Stuttgart	45
Tabelle 6-3:	Kennwerte der Fahrten auf der Innenstadtstrecke in München	48
Tabelle 6-4:	Kennwerte der Fahrten auf der gemischten Strecke bei Garmisch und auf den Überführungsfahrten	51
Tabelle 6-5:	Kennwerte der Stillstandzeiten für die verschiedenen Fahrstrecken bei Fahrzeug 1	53
Tabelle 6-6:	Kennwerte der Stillstandzeiten für die verschiedenen Fahrstrecken bei Fahrzeug 2	53
Tabelle 6-7:	Kennwerte der Stillstandzeiten für die verschiedenen Fahrstrecken bei Fahrzeug 3	54
Tabelle 6-8:	Kennwerte der Fahrten für Fahrzeug 1	62
Tabelle 6-9:	Kennwerte der Fahrten für Fahrzeug 2	63
Tabelle 6-10:	Kennwerte der Fahrten für Fahrzeug 3	64
Tabelle 6-11:	Anteile von Fahrzeit, Wegstrecke und NO _x -Emissionen an verschiedenen Fahrzuständen, Fahrzeug 1	67
Tabelle 6-12:	Anteile von Fahrzeit, Wegstrecke und NO _x -Emissionen an verschiedenen Fahrzuständen, Fahrzeug 2	68
Tabelle 6-13:	Anteile von Fahrzeit, Wegstrecke und NO _x -Emissionen an verschiedenen Fahrzuständen, Fahrzeug 3	69
Tabelle 6-14:	Tabellarische Zusammenfassung der Rollenprüfstandsergebnisse	90
Tabelle 7-1:	Bandbreiten der Emissionsergebnisse	91
Tabelle 7-2:	Mittelwerte der NO _x -Emissionen für unterschiedliche Betriebszustände	91

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 4-1:	Meistverkaufte PKW in der EU im Jahr 2013. Quelle: European Vehicle Market Statistics; Pocketbook 2013; ICCT	15
Abbildung 4-2:	PKW-Segmente in der EU. Quelle: European Vehicle Market Statistics; Pocketbook 2013; ICCT	16
Abbildung 4-3:	Diesel-Anteil in PKW-Segmenten innerhalb der EU. Quelle: European Vehicle Market Statistics; Pocketbook 2013; ICCT	16
Abbildung 4-4:	Volkswagen CC (Fahrzeug 1)	17
Abbildung 4-5:	Abgasnachbehandlung im Volkswagen CC. Quelle: siehe Fußnote	18
Abbildung 4-6:	Motorleistungskurve Volkswagen CC	20
Abbildung 4-7:	BMW 320d (Fahrzeug 2)	21
Abbildung 4-8:	BMW NO _x -Speicherkatalysator und Dieselpartikelfilter. Quelle: siehe Fußnote	22
Abbildung 4-9:	Motorleistungskurve BMW 320d	24
Abbildung 4-10:	Mazda 6 SKYACTIV-D (Fahrzeug 3)	25
Abbildung 4-11:	Motorleistungskurve Mazda 6	27
Abbildung 4-12:	Stadtrunde Stuttgart	28
Abbildung 4-13:	Außenrunde Stuttgart	29
Abbildung 4-14:	Messrunde München Innenstadt	30
Abbildung 4-15:	Streckenführung Garmisch	31
Abbildung 5-1:	SEMTECH-DS, Systemaufbau, Quelle: TÜV NORD	35
Abbildung 5-2:	Exhaust Flow Meter, Quelle: SENSORS, Inc.	37
Abbildung 5-3:	Messtechnik am Volkswagen	38
Abbildung 6-1:	Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtsstrecke in Stuttgart bei Tempo 30	40
Abbildung 6-2:	Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtsstrecke in Stuttgart bei Tempo 40	40
Abbildung 6-3:	Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtsstrecke in Stuttgart bei Tempo 50	41
Abbildung 6-4:	Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtsstrecke in Stuttgart bei Tempo 30	41
Abbildung 6-5:	Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtsstrecke in Stuttgart bei Tempo 40	42
Abbildung 6-6:	Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtsstrecke in Stuttgart bei Tempo 50	42
Abbildung 6-7:	Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Außenbezirksstrecke in Stuttgart	44
Abbildung 6-8:	Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Außenbezirksstrecke in Stuttgart	44
Abbildung 6-9:	Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtsstrecke in München bei Tempo 50	46
Abbildung 6-10:	Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der Innenstadtsstrecke in München beim Mitschwimmen (T60)	46
Abbildung 6-11:	Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtsstrecke in München bei Tempo 50	47

Abbildung 6-12:	Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der Innenstadtstrecke in München beim Mitschwimmen (T60)	47
Abbildung 6-13:	Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf der gemischten Strecke bei Garmisch	49
Abbildung 6-14:	Kumulierte Geschwindigkeitsanteile auf Überführungsfahrten	49
Abbildung 6-15:	Kumulierte Beschleunigungsanteile auf der gemischten Strecke bei Garmisch	50
Abbildung 6-16:	Kumulierte Beschleunigungsanteile auf Überführungsfahrten	50
Abbildung 6-17:	Häufigkeitsverteilungen der Stillstandzeiten auf den verschiedenen Fahrstrecken für Fahrzeug 1	52
Abbildung 6-18:	Zeitverlauf von Geschwindigkeit, NO _x -Emission und Höhe für Fahrzeug 1, Stuttgart, Innenstadtstrecke, Tempo 40	55
Abbildung 6-19:	Zeitverlauf von Geschwindigkeit, NO _x -Emission und Höhe für Fahrzeug 2, Stuttgart, Innenstadtstrecke, Tempo 40	55
Abbildung 6-20:	Zeitverlauf von Geschwindigkeit, NO _x -Emission und Höhe für Fahrzeug 3, Stuttgart, Innenstadtstrecke, Tempo 40	56
Abbildung 6-21:	Höhenverlauf der Innenstadtstrecke in Stuttgart (alle Messfahrten Fahrzeug 1)	56
Abbildung 6-22:	NO _x -Emissionen der verschiedenen Fahrten für Fahrzeug 1 im Vergleich zu den Emissionsfaktoren aus HBEFA 3.2	57
Abbildung 6-23:	NO _x -Emissionen der verschiedenen Fahrten für Fahrzeug 2 im Vergleich zu den Emissionsfaktoren aus HBEFA 3.2	58
Abbildung 6-24:	NO _x -Emissionen der verschiedenen Fahrten für Fahrzeug 3 im Vergleich zu den Emissionsfaktoren aus HBEFA 3.2	59
Abbildung 6-25:	NO _x -Emissionen getrennt nach Fahrstrecken für Fahrzeug 1	60
Abbildung 6-26:	NO _x -Emissionen getrennt nach Fahrstrecken für Fahrzeug 2	60
Abbildung 6-27:	NO _x -Emissionen getrennt nach Fahrstrecken für Fahrzeug 3	61
Abbildung 6-28:	Mittlere NO _x -Emissionen bei verschiedenen Fahrzuständen über der Geschwindigkeit, Fahrzeug 1	65
Abbildung 6-29:	Mittlere NO _x -Emissionen bei verschiedenen Fahrzuständen über der Geschwindigkeit, Fahrzeug 2	66
Abbildung 6-30:	Mittlere NO _x -Emissionen bei verschiedenen Fahrzuständen über der Geschwindigkeit, Fahrzeug 3	66
Abbildung 6-31:	NO _x -Emissionen über der Längsneigung für Fahrzeug 1	70
Abbildung 6-32:	NO _x -Emissionen über der Längsneigung für Fahrzeug 2	71
Abbildung 6-33:	NO _x -Emissionen über der Längsneigung für Fahrzeug 3	71
Abbildung 6-34:	NO _x -Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit, innerorts, Fahrzeug 1	72
Abbildung 6-35:	NO _x -Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit, innerorts, Fahrzeug 2	73
Abbildung 6-36:	NO _x -Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit, innerorts, Fahrzeug 3	73
Abbildung 6-37:	NO _x -Emissionen über der mittleren positiven Beschleunigung, innerorts, Fahrzeug 1	74
Abbildung 6-38:	NO _x -Emissionen über der mittleren positiven Beschleunigung, innerorts, Fahrzeug 2	74
Abbildung 6-39:	NO _x -Emissionen über der mittleren positiven Beschleunigung, innerorts, Fahrzeug 3	75
Abbildung 6-40:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittlerer Geschwindigkeit für Fahrzeug 1	76
Abbildung 6-41:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittlerer Geschwindigkeit für Fahrzeug 2	76

Abbildung 6-42:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittlerer Geschwindigkeit für Fahrzeug 3	77
Abbildung 6-43:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittl. Geschwindigkeit multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 1	77
Abbildung 6-44:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittl. Geschwindigkeit multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 2	78
Abbildung 6-45:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA und mittl. Geschwindigkeit multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 3	78
Abbildung 6-46:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA/v _{ave} multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 1, T30 und T40 Werte zum Vergleich	79
Abbildung 6-47:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA/v _{ave} multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 2, T30 und T40 Werte zum Vergleich	79
Abbildung 6-48:	NO _x -Emissionen über dem Quotienten aus RPA/v _{ave} multipliziert mit der Anzahl an Emissionspeaks pro km für Fahrzeug 3, T30 und T40 Werte zum Vergleich	80
Abbildung 6-49:	Mittlere NO _x -Emissionen über der Motorleistung	82
Abbildung 6-50:	Mittleres NO _x -Emissionskennfeld Fahrzeug 1	82
Abbildung 6-51:	Mittleres NO _x -Emissionskennfeld Fahrzeug 2	83
Abbildung 6-52:	Mittleres NO _x -Emissionskennfeld Fahrzeug 3	83
Abbildung 6-53:	Mittleres NO _x -Kennfeld von Fahrzeug 3, NEFZ-Zeitanteile zum Vergleich	84
Abbildung 6-54:	Mittleres NO _x -Kennfeld von Fahrzeug 3, WLTC-Zeitanteile zum Vergleich	84
Abbildung 6-55:	Zeitliche Häufigkeit von Drehzahl und Leistung, Stuttgart, Innenstadtstrecke, T30, Fahrzeug 2, Fahrt 23	85
Abbildung 6-56:	Zeitliche Häufigkeit von Drehzahl und Leistung, Stuttgart, Innenstadtstrecke, T30, Fahrzeug 2, Fahrt 30	85
Abbildung 6-57:	NO _x -Kennfeld für Fahrt 23, Bedingungen siehe Abbildung 6-55	86
Abbildung 6-58:	NO _x -Kennfeld für Fahrt 30, Bedingungen siehe Abbildung 6-56	86
Abbildung 6-59:	NO ₂ /NO _x -Verhältnisse Fahrzeug 1	87
Abbildung 6-60:	NO ₂ /NO _x -Verhältnisse Fahrzeug 2	88
Abbildung 6-61:	NO ₂ /NO _x -Verhältnisse Fahrzeug 3	88
Abbildung 6-62:	NO _x -Emissionen im NEFZ	89
Abbildung 6-63:	NO ₂ -Emissionen im NEFZ	90

