

Messung wichtiger Abgaskomponenten am fahrenden Pkw im realen innerstädtischen Straßenverkehr

B. Mittermaier, D. Klemp

Zusammenfassung Im Rahmen des BMBF-Projekts MOBINET wurde untersucht, wie der Verkehrsfluss in einer Großstadt den Schadstoffausstoß eines Pkw beeinflusst. Dazu wurden mit einem Fahrzeug mit On-board-Mess-technik während mehr als 20 Stunden Messfahrt im Stadtverkehr von München die Emissionen limitierter Abgaskomponenten sekundenaufgelöst erfasst. Bereits der Vergleich der Verteilung der Fahrparameter Geschwindigkeit (v) und spezifische Leistung ($v \cdot b$) mit denjenigen bei üblichen Prüfstandszyklen zeigen, dass reale Fahrbedingungen am Rollenprüfstand nur unzureichend abgebildet werden. Dies bestätigt sich beim Vergleich der Messwerte mit den Berechnungen des Emissionsmodells COPERT III, die um bis zu eine Größenordnung abweichen. Dies ist bei den Stickoxidemissionen besonders relevant, weil diese zum größten Teil im betriebswarmen Zustand erzeugt werden. Bei dieser Spezies besteht auch das größte Einsparpotenzial aufgrund von Verkehrsverflüssigungsmaßnahmen. Die Emissionen der Kohlenwasserstoffe und – in etwas kleinerem Umfang – von Kohlenmonoxid entstehen dagegen vorwiegend während des Kaltstarts und sind einer Abnahme durch Verkehrsverflüssigungsmaßnahmen nur eingeschränkt zugänglich.

Exhaust gas measurements of a passenger car under real-world driving conditions

Abstract In the framework of the MOBINET-project, dealing with mobility in cities, a passenger car was equipped with on-board exhaust gas measurement devices. In the city of Munich more than 20 hours of measurements of limited exhaust components were conducted. It is shown that the driving parameters velocity and velocity times acceleration observed in real-world-driving are not reflected by common driving cycles of chassis dynamometers. Comparison of measured exhaust figures with simulations by the state-of-the-art model COPERT III revealed discrepancies of up to one order of magnitude. These discrepancies are most important to nitrogen oxides. Emissions of nitrogen oxides can be reduced by measurements of traffic jam prevention more efficiently than hydrocarbons and carbon monoxide, which are emitted mainly during cold starts.

1 Einleitung

Der Straßenverkehr ist eine wichtige anthropogene Quelle atmosphärenchemisch relevanter Spurenstoffe. Gerade in Ballungsgebieten sind sie eine wesentliche Einflussgröße der Luftqualität [1]. Bekannt sind die Emissionsfaktoren von Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffen (Non Methane Hydrocarbons, NMHC) und Stickstoffoxiden (NO_x) sowie die Kohlenwasserstoffzusammensetzungen des Abgases von Pkw aus Untersuchungen an Prüfständen für einzelne, gesetzlich vorgeschriebene Fahrzyklen [2]. Daneben gibt es Immissionsmessungen in Straßentunneln, aus denen auf Flottenemissionen zurückgeschlossen wird [3]. Allerdings führen die Geschwindigkeitsbeschränkungen in Tunneln zu sehr einheitlichen Fahrmustern, die keine Rückschlüsse auf

die Spannbreite der Emissionen unter allen real auftretenden Bedingungen erlauben.

Unbekannt sind die im Straßenverkehr bei verschiedenen Verkehrssituationen auftretenden Emissionen der genannten Komponenten moderner Pkw. Zwar existieren Messungen der Abgaskomponenten NMHC, NO_x und CO am fahrenden Fahrzeug [4 bis 6], sie betreffen jedoch nur ältere Fahrzeuge bis zur Abgasnorm EURO 1. Somit sind die quantitativ erreichbaren Emissionsveränderungen unbekannt, die heute und in Zukunft mit einer Optimierung des Straßenverkehrsnetzes und einer damit verbundenen Änderung des Verkehrsflusses erreicht werden können. Aus diesem Grund fanden im Rahmen des MOBINET-Projekts auch Emissionsmessungen im Straßenverkehr statt.

Das Forschungsprojekt MOBINET befasste sich im Zeitraum von September 1998 bis Juli 2003 mit Verkehrs- und Mobilitätsmanagement im Ballungsraum München [7]. Es wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Im Mittelpunkt standen die Verlagerung vom Pkw-Verkehr auf den öffentlichen Verkehr, die Optimierung des Verkehrs im Hauptstraßennetz sowie das Angebot von Informationssystemen für Reisende vor und während der Fahrt. Gegenstand der hier vorgestellten Untersuchungen war die Ermittlung der Reduktionspotenziale verschiedener Schadstoffe durch Verkehrsverflüssigungsmaßnahmen. Aus Kostengründen konnte nur ein Fahrzeug mit On-board-Analytik ausgerüstet werden. Durch Prüfstandsmessung von diesem und von acht weiteren Fahrzeugen wurde seine Emissionscharakteristik jedoch in einen weiteren Rahmen gestellt. Die Ergebnisse der Prüfstandsmessung werden an anderer Stelle dargestellt [8].

2 Experimentelles

2.1 Aufbau und Evaluierung der On-board-Analytik

Als Versuchsfahrzeug wurde ein Ford Mondeo (Baujahr 2000, 85 kW, 3-Wege-Kat, D4-Abgasnorm) mit umfassender Abgasanalytik ausgerüstet [9]. Bild 1 zeigt eine Prinzipskizze des experimentellen Aufbaus. Der Benzinverbrauch (PLU 401–108, Pierburg), die gefahrene Geschwindigkeit, der Lambda-Wert und das Signal des Luftmassensensors wurden sekundlich vom Datenaufnahmesystem aufgezeichnet. Aus dem Abgasstrom wurde ein Fluss von ca. 5 l/min angesaugt und analysiert. Sekündliche Emissionswerte für CO, CO_2 , NO, NO_2 und Gesamt-HC in g/s und in g/km wurden aus den Mischungsverhältnissen unter Verwendung des Gesamtgasflusses (gemessen vom Luftmassensensor) berechnet. Zusätzlich wurde die massenflussabhängige Zeitverschiebung zwischen Motorauslasszeitpunkt und Analysezeitpunkt korrigiert (Tabelle 1).

Das Abgas wurde zusätzlich auf seine Kohlenwasserstoffzusammensetzung untersucht. Zu diesem Zweck wurden zuvor evakuierte Edelstahlbehälter (SilcoCan™, Restek) mit Abgasproben befüllt (Sammelzeit ca. 20 s) und später im

Dr. Bernhard Mittermaier, Dr. Dieter Klemp,
Institut für Chemie und Dynamik der Geosphäre,
Forschungszentrum Jülich.

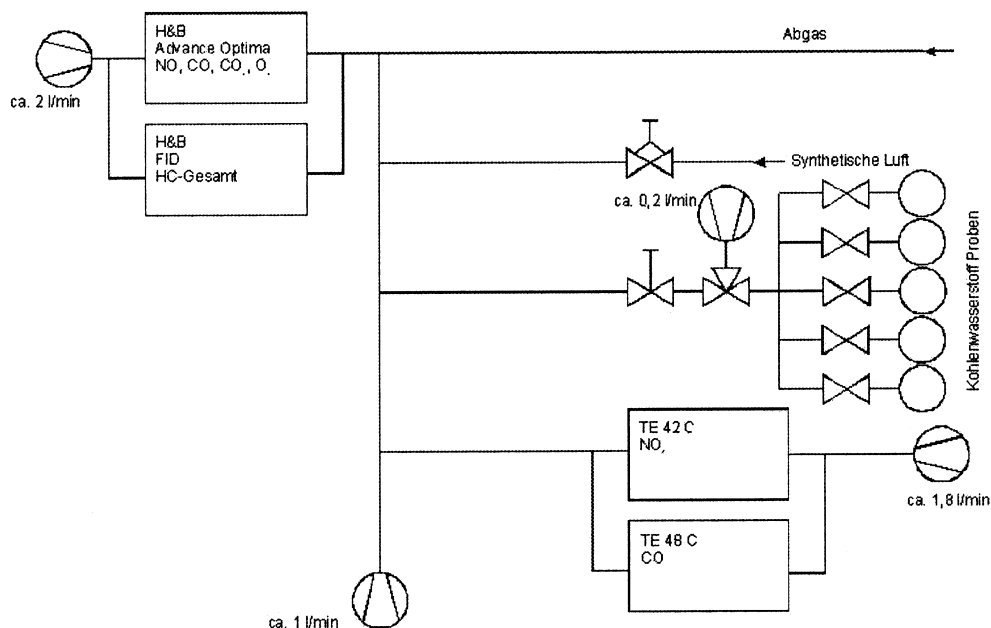


Bild 1. Schematischer Aufbau und Gaslaufplan der Abgasanalytik im MOBINET-Fahrzeug.

Tabelle 1. Messgrößen im Abgas.

Substanz	Messprinzip	Gerät	Zeitauflösung in s
Kohlenmonoxid (CO)	IR-Absorption	URAS 14, ABB Corp.	1 (online)
Kohlenmonoxid (CO)	IR-Absorption	TE48, Thermo Instruments	1 (online)
Kohlendioxid (CO ₂)	IR-Absorption	URAS 14, ABB Corp.	1 (online)
Stickstoffmonoxid (NO)	IR-Absorption	URAS 14, ABB Corp.	1 (online)
Stickstoffmonoxid (NO)	UV-Absorption	LIMAS 11, ABB Corp.	1 (online)
Stickstoffdioxid (NO ₂)	UV-Absorption	LIMAS 11, ABB Corp.	1 (online)
Sauerstoff (O ₂)	Magnetomechanik	MAGNOS 16, ABB Corp.	1 (online)
Kohlenwasserstoffe integral (HC)	Flammenionisation	FID, ABB Corp.	1 (online)
Kohlenwasserstoffe (NMHC; C ₂ – C ₁₀)	Flammenionisation	GC6890, Agilent	10 bis 60 (offline)

Labor gaschromatografisch analysiert. Dabei wurde das Abgas in unterschiedlichem Ausmaß mit synthetischer Luft verdünnt, so dass die Verdünnung stets umgekehrt proportional zum Gesamtabgasstrom erfolgte (constant volume sampling, CVS). Durch dieses Analyseverfahren war die exakte Quantifizierung von mehr als 70 Kohlenwasserstoffen im Abgas möglich. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass mit steigender Geschwindigkeit nicht nur die emittierte Kohlenwasserstoffmenge zunimmt, sondern dass sich zusätzlich die Zusammensetzung des Mixes hin zu fotochemisch reaktiveren Kohlenwasserstoffen verschiebt. Die Fähigkeit der Kohlenwasserstoffe zur Ozonbildung steigt somit stärker als linear mit der Geschwindigkeit an [10]. Die detaillierte Publikation dieser Ergebnisse wird derzeit vorbereitet. Ein Vergleich der On-board-Analytik mit der Prüfstandsanalytik am Emissionsprüfstand des RWTÜV in Essen lieferte gute Übereinstimmungen zwischen beiden Messverfahren. Für NO_x und HC wurden Abweichungen von deutlich unter 10 % beobachtet; für CO₂ und CO betrugen sie weniger als 3 %. Bei dieser Gelegenheit konnte gezeigt werden, dass das Fahrzeug die Zertifizierungsbedingungen der Schadstoffnorm D4 auch mit der Zuladung durch die Analysengeräte erfüllt [9].

2.2 Auswahl der Teststrecken in München

Zwischen Mai und Juli 2001 wurden mit dem MOBINET-Fahrzeug umfangreiche Emissionsmessungen im Münchener Straßenverkehr durchgeführt. Hierfür wurden drei Fahrstrecken ausgewählt, die sowohl den Verkehr innerhalb der Stadt München als auch den Verkehr der Berufspendler auf den Ausfallstraßen und der Autobahn im Ballungsbereich (A8/A99) berücksichtigen. Zu Dokumentationszwecken wurden die Fahrten mit einem GPS-System aufgezeichnet. Alle Fahrtrouten wurden sechs bzw. sieben Mal befahren; insgesamt wurden bei 20 Fahrten 483 km Fahrstrecke zurückgelegt. Zwölf Fahrten fanden morgens statt; das Fahrzeug war zuvor mindestens 15 Stunden bei 20 °C in einer Tiefgarage klimatisiert worden (Außentemperatur während der Messungen: (20±3) °C). Dies entspricht den Bedingungen für einen Kaltstart entsprechend den Zertifizierungsbedingungen für Abgastests in der EU. Bei den acht Fahrten im abendlichen Berufsverkehr war die Betriebspause vor der Messfahrt kürzer. Der Datensatz umfasst insgesamt über 70 000 Sekundendaten von CO, CO₂, NO, NO₂, Gesamt-HC sowie den relevanten Fahrparametern.

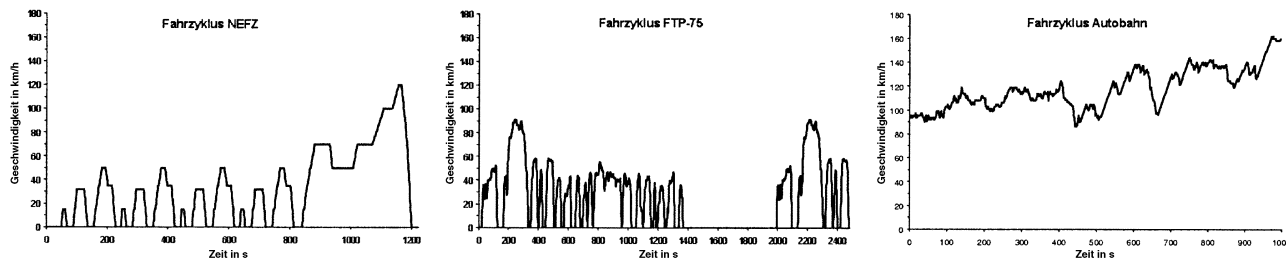
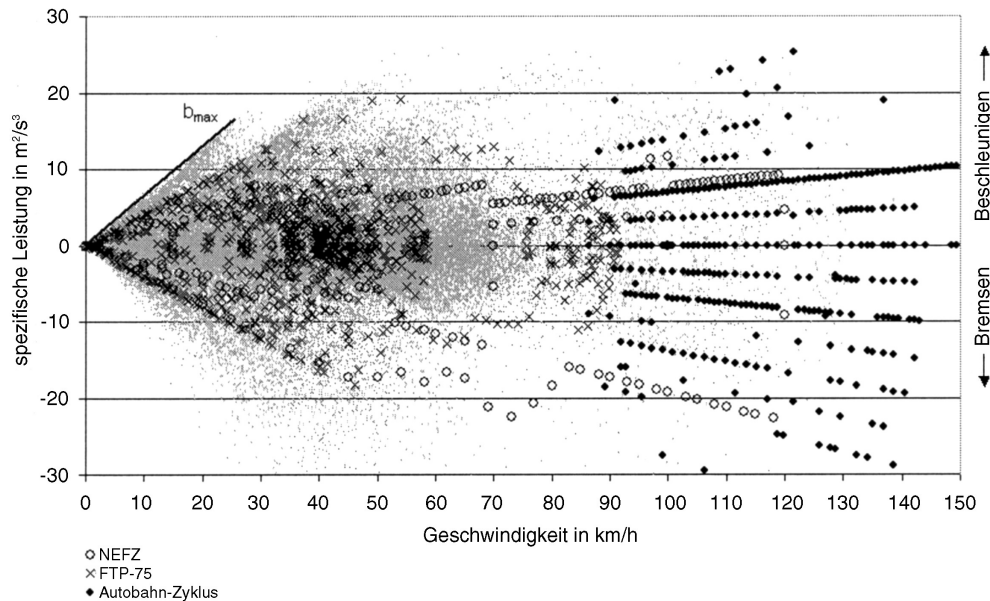


Bild 2. Geschwindigkeitsprofil der Fahrzyklen NEFZ, FTP-75 und Autobahn.

Bild 3. Darstellung der Sekundendaten der Geschwindigkeit (v) und der spezifischen Leistung ($v \cdot b$) für die Münchener Messungen (graue Punkte) und Vergleich mit den entsprechenden Darstellungen für NEFZ, FTP-75 und Autobahn-Zyklus.

3 Ergebnisse

3.1 Vergleich der On-board-Fahrten mit Prüfstandszyklen

Bestimmungen der Schadstoffemissionen von Kraftfahrzeugen, wie sie beispielsweise zur Erstellung des „Handbuch für Emissionsfaktoren“ des BMU durchgeführt wurden, basieren auf der Messung von Kraftfahrzeugen an Rollenprüfständen. Hierbei wird ein vorgegebenes Fahrmuster („Prüfstandszyklus“) reproduzierbar nachgefahren und die dabei auftretende Schadstoffemission sekundenauflösend aufgezeichnet. Zu den gebräuchlichsten Prüfstandszyklen zählen

NEFZ (Bild 2, links): Zertifikationszyklus für alle Neufahrzeuge in der EU. Der Zyklus beginnt mit einem Kaltstart und einer 40-sekündigen Leerlaufphase bei EURO1/2- und D3/D4-Fahrzeugen, nach der die Messung anfängt. Bei EURO3- und EURO4-Fahrzeugen wird die 40-Sekunden-Periode weggelassen und sofort nach dem Start mit der Probenahme begonnen. Der Zyklus besteht aus zwei Teilen, von denen der erste städtisches Fahren repräsentieren soll. Diese Phase besteht aus drei repetitiven Teilen mit einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 19 km/h. Die zweite Phase stellt Überlandfahrten dar und enthält Geschwindigkeiten bis zu 120 km/h bei durchschnittlich 63 km/h. Der NEFZ ist aufgrund seiner geringen Leistungsanforderungen nur wenig wirklichkeitsnah. Beispielsweise beginnt der Außerortsteil mit einer Beschleunigung von 0 km/h auf 70 km/h in 41 s, was tatsächlichem Fahrverhalten allenfalls bei sehr schwach motorisierten Fahrzeugen entspricht.

FTP-75 (Bild 2, Mitte): Zertifikationszyklus für Neufahrzeuge in den USA und verschiedenen anderen Ländern. Der

FTP-Zyklus beginnt ebenfalls mit einem Kaltstart und besteht aus drei Teilen. In der ersten Testphase beträgt die Durchschnittsgeschwindigkeit 41 km/h, in der zweiten Phase lediglich 26 km/h. Nach der zweiten Phase wird der Motor für 10 min abgestellt und der Test dann mit einem Warmstart fortgesetzt. Die Fahrkurve in dieser dritten Phase ist identisch mit der ersten Phase. Der Zyklus stellt hinsichtlich der Leistungsanforderungen und der Höchstgeschwindigkeit insgesamt ein brauchbares Abbild des Fahrverhaltens in den USA dar.

Autobahn-Zyklus (Bild 2, rechts): Der Zyklus wurde im Rahmen der Erstellung des Handbuchs für Emissionsfaktoren entwickelt. Dieser Warmstartzyklus repräsentiert das Fahren auf deutschen Autobahnen. Auch er besteht aus drei Phasen. Nach einem fliegenden Start bei 95 km/h steigt die mittlere Geschwindigkeit an. In der dritten Phase wird in 40 s von 127 km/h auf die Maximalgeschwindigkeit von 162 km/h beschleunigt. Derartig hohe Leistungsanforderungen und Geschwindigkeiten treten weder im NEFZ noch im FTP-75 auf.

Die spezifische Leistung ($v \cdot b$) als Produkt aus Geschwindigkeit (v) und Beschleunigung (b) hat sich, zusammen mit der Geschwindigkeit selbst, als geeigneter Parameter zur Beschreibung des Abgasausstoßes eines Kraftfahrzeugs erwiesen [11]. Sie entspricht physikalisch der massenormierten (spezifischen) momentanen Leistungsanforderung. In Bild 3 werden die Fahrparameter der Prüfstandszyklen mit den in München tatsächlich ermittelten Messwerten für Geschwindigkeit und spezifische Leistung verglichen. Es zeigt sich, dass auch die Kombination dieser Fahrzyklen reales Fahrverhalten nur unzureichend beschreibt:

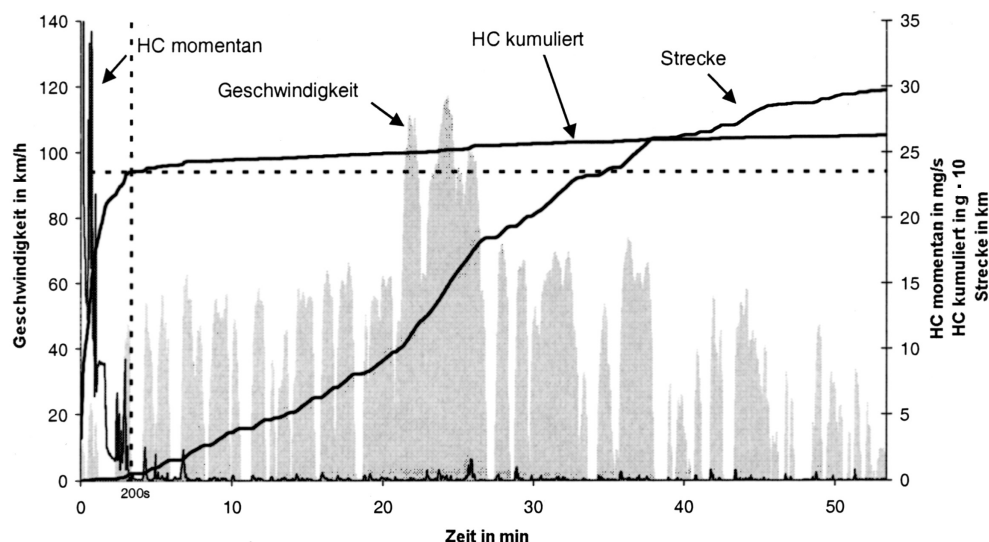


Bild 4. Kohlenwasserstoff-(HC)-emissionen während einer Messfahrt in München (12. Juli 2001, Kaltstart).

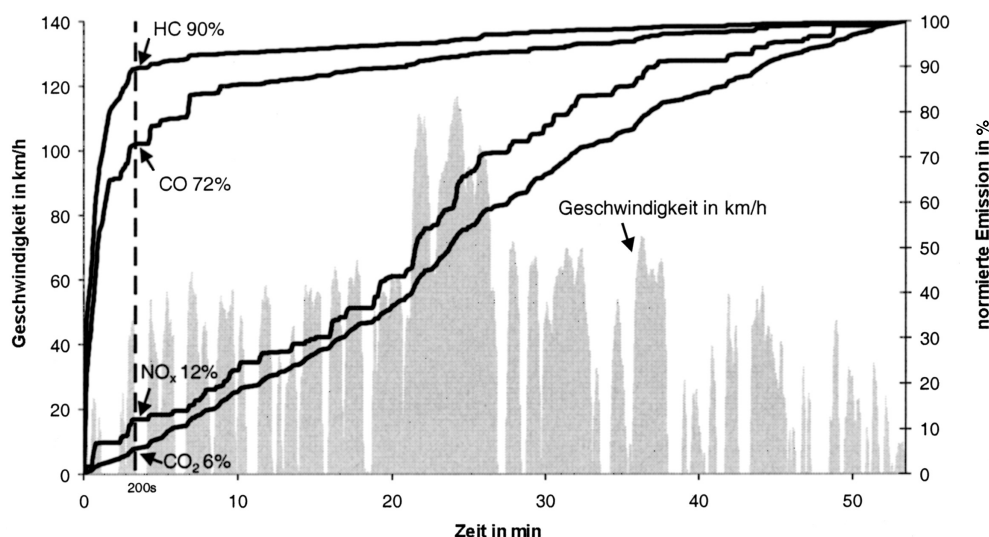


Bild 5. Kumulierte Emissionen (auf 100 % normiert) während einer Messfahrt in München (12. Juli 2001, Kaltstart).

- Innerhalb der Fläche, die durch die Intervalle $-15 \text{ m}^2/\text{s}^5 \leq v \cdot b \leq 15 \text{ m}^2/\text{s}^5$ und $0 \text{ km/h} \leq v \leq 130 \text{ km/h}$ aufgespannt wird und in der 97 % aller Messwerte liegen, ist die Besetzungsdichte der aus den Münchener Messungen gewonnenen Fahrparameterdaten wesentlich höher als die der betrachteten Prüfstandszyklen. Somit kann bei einer Clusterung der Sekundenintervalle der Emissionen in v - und $v \cdot b$ -Intervalle mit üblichen Datenbreiten ($\Delta v = 10 \text{ km/h}$, $\Delta(v \cdot b) = 5 \text{ m}^2/\text{s}^5$), wie sie für eine Erstellung von Emissionshandbüchern notwendig ist, immer ein statistisches Ensemble von Sekundenintervallen betrachtet und somit jeweils ein Mittelwert und eine Standardabweichung angegeben werden.

- Der Bereich 60 bis 75 km/h bei $v \cdot b$ -Werten von $-5 \text{ m}^2/\text{s}^5$ bis $5 \text{ m}^2/\text{s}^5$ wird von keinem der Prüfstandszyklen auch nur annähernd abgedeckt.

- Der Vergleich der positiven Maximalsteigung der Einhüllenden der in München gemessenen v - und $v \cdot b$ -Sekundenintervalle (in Bild 3 als $b_{\max}$ bezeichnet) mit der aus den Prüfstandsdaten ermittelten positiven Maximalsteigung zeigt, dass die Prüfstandszyklen die im Münchener Straßenverkehr vorgefundenen maximalen Beschleunigungen nicht widerspiegeln. Das zugehörige Emissionsverhalten kann daher bei Verwendung dieser Zyklen nicht vermessen werden.

- Aufgrund der hohen Symmetrie des NEFZ ist die Anzahl unterschiedlicher v - und $v \cdot b$ -Datenpunkte insgesamt deutlich geringer als bei den beiden anderen Prüfstandszyklen. Für die Erstellung von Emissionshandbüchern aus Prüfstandszyklen ist es daher von Vorteil, wenn die Prüfstandszyklen unsymmetrische Zeitverläufe besitzen, so dass eine möglichst hohe Zahl unterschiedlicher Betriebszustände abgedeckt wird.

3.2 Kaltstartemission

Die Beschreibung des Emissionsverhaltens moderner Kraftfahrzeuge muss aus dem Kaltstartverhalten und den Emissionen im warmen Betriebszustand zusammengesetzt werden, weil die Emissionen von Fahrzeugen mit moderner Abgasreinigungstechnologie im warmen Betriebszustand unter vielen Betriebsbedingungen um mehr als eine Größenordnung geringer sind als unter Kaltstartbedingungen. Als „Kaltstartemissionen“ werden hier die Emissionen während der ersten 200 s nach einem Kaltstart definiert. Diese Grenzziehung beruht darauf, dass die anfänglich sehr hohen Emissionen an Kohlenwasserstoffen regelmäßig nach ca. 200 s erstmals auf Werte nahe Null zurückgehen, vgl. beispielhaft Bild 4. Wie die Messungen gezeigt haben, gilt dies

weitgehend unabhängig von den Fahrbedingungen während dieser 200 s.

Den Anteil, den die Emissionen während des Kaltstarts an den gesamten Emissionen einer typischen Fahrt haben, zeigt **Bild 5**. Demnach wurden während der ersten 200 s dieser 53-minütigen Fahrt 6 % des gesamten CO₂ emittiert. Während dieser Zeit von 200 s (6 % der Gesamtzeit) wurden 2 % der Gesamtstrecke zurückgelegt. Der Anteil der Emissionen von NO_x, CO und HC an den jeweiligen Gesamtemissionen betrug währenddessen 12 %, 72 % bzw. 90 %. Dies bedeutet, dass NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs nur zu einem geringen Teil vom Kaltstart geprägt sind, während die Emissionen von CO und noch stärker die von HC vom Kaltstart dominiert werden.

In **Tabelle 2** sind die durchschnittlichen Kaltstartemissionen aller Münchener Fahrten dargestellt. Es ist zu erkennen, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den morgendlichen Fahrten (vorhergehende Standzeit des Fahrzeugs 15 h) und den abendlichen Fahrten mit Standzeiten von maximal 6 h bestehen. Insofern können alle Fahrten als Kaltstartfahrten angesehen werden. Da die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrten relativ gering sind (erkennbar an den niedrigen Standardabweichungen), können die Messwerte zumindest für dieses Fahrzeug als typisch angesehen werden. Da die Fahrstrecken mit 20 bis 30 km Länge für großstädtische Verhältnisse relativ lang sind, stellen die angegebenen Kaltstartanteile sogar eher untere Grenzen dar. Ergebnis ist somit, dass beim Versuchsfahrzeug über 80 % der gesamten Kohlenwasserstoffemission und etwa zwei Drittel der gesamten Kohlenmonoxidemission während des Kaltstarts erfolgen. Sie sind somit unabhängig vom Fahrtverlauf und verkehrsverflüssigenden Maßnahmen nicht zugänglich. Ihre Vermeidung ist nur durch den Verzicht auf die jeweilige Fahrt oder durch kraftfahrzeugtechnische Maßnahmen möglich.

3.3 Emissionen im warmen Betriebszustand

Auch im warmen Betriebszustand sind die Emissionen der einzelnen Schadstoffkomponenten sehr unterschiedlich. Dies soll beispielhaft durch die Unterschiede in den Emissionen von CO und NO_x im Verlauf einer repräsentativen Fahrt unter betriebswarmen Bedingungen (MOBINET-Fahrt, [12]) gezeigt werden (**Bild 6**):

● Die stärksten NO_x-Emissionen treten im Fahrtabschnitt 730 bis 875 s auf. Dieser Fahrtabschnitt vom „Mittleren Ring“ ist geprägt durch eine Beschleunigungsphase zu Beginn und

Tabelle 2. Anteil des Kaltstarts (Emission bis 200 s nach Start) an der Gesamtemission bei allen Münchener Fahrten (Durchschnitt ± Standardabweichung).

	Gesamtfahrt		Kaltstartanteil an der Gesamtemission			
	Weg in km	Zeit in min	CO ₂ in %	CO in %	NO _x in %	HC in %
morgens	24 ± 5	61 ± 13	6 ± 1	64 ± 11	17 ± 5	87 ± 6
abends	25 ± 6	62 ± 10	6 ± 1	65 ± 11	15 ± 4	85 ± 4
gesamt	24 ± 5	61 ± 11	6 ± 1	64 ± 11	16 ± 4	86 ± 5

anschließende zügige Fahrt ohne zwischenzeitliche Stopps. Während dieses Abschnitts werden 43 % des gesamten NO_x emittiert, aber nur 6 % des CO.

● Die mit Abstand größte CO-Emission findet im letzten Fahrtabschnitt statt, bei dem ein Abschnitt der Autobahn A8 befahren wurde. Während der Beschleunigungsphase zu Beginn finden innerhalb von 30 s 35 % der gesamten CO-Emissionen statt (NO_x: 6 %).

● In den Bereichen 160 bis 447 s und 880 bis 1420 s wird kaum CO emittiert (praktisch horizontaler Verlauf der Kurve der kumulierten Emission im linken Bild). Zu den gleichen Zeiten finden jedoch beträchtliche NO_x-Emissionen statt: Im Zeitraum 160 bis 447 s wird 15 % des gesamten NO_x emittiert, dagegen nur 0,4 % des gesamten CO. Der Fahrtabschnitt zwischen 880 und 1420 s, der geprägt ist durch ausgeprägten Stop-and-go-Verkehr, enthält mehrfach hohe NO_x-Emissionen, die nicht mit entsprechenden CO-Emissionen korrespondieren.

Die Beispiele machen deutlich, dass zwar grundsätzlich die Emissionen mit der Geschwindigkeit und der Beschleunigung ansteigen. Sie lassen sich bei Fahrzeugen mit moderner Abgastechnologie jedoch nicht mehr als einfache Funktion der Geschwindigkeit und/oder der Beschleunigung beschreiben. Dies ist der Fall, weil die Effizienz der Abgasnachbehandlung durch weitere Faktoren nachhaltig beeinflusst wird (z. B. durch Einschwingverhalten der Lambda-Regelung, durch vorherige „Beladung“ des Katalysators mit Sauerstoff bei Schubabschaltungen oder durch die Dauer von Beschleunigungsphasen). Die Konsequenz für die Modellierung von Emissionen wird in den **Bildern 7 bis 9** verdeutlicht. Hier sind die Emissionen aufgrund einer Modellierung mit dem Modell COPERT III („Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport“, [12]), das auf der Basis von Prüfstandsmessungen entwickelt wurde, im Vergleich mit den tatsächlichen Emissionen dargestellt.

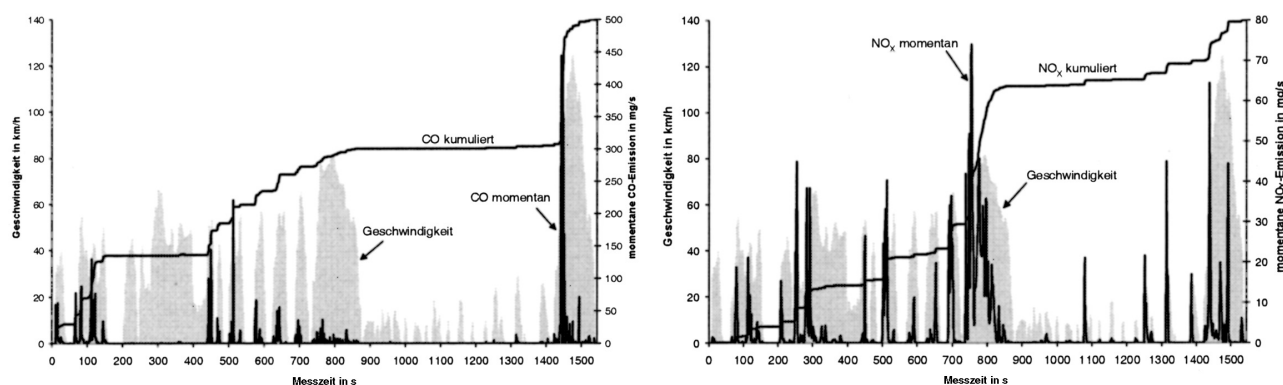


Bild 6. Emissionen von CO (links) und NO_x (rechts) während einer repräsentativen Fahrt im Münchener Straßenverkehr.

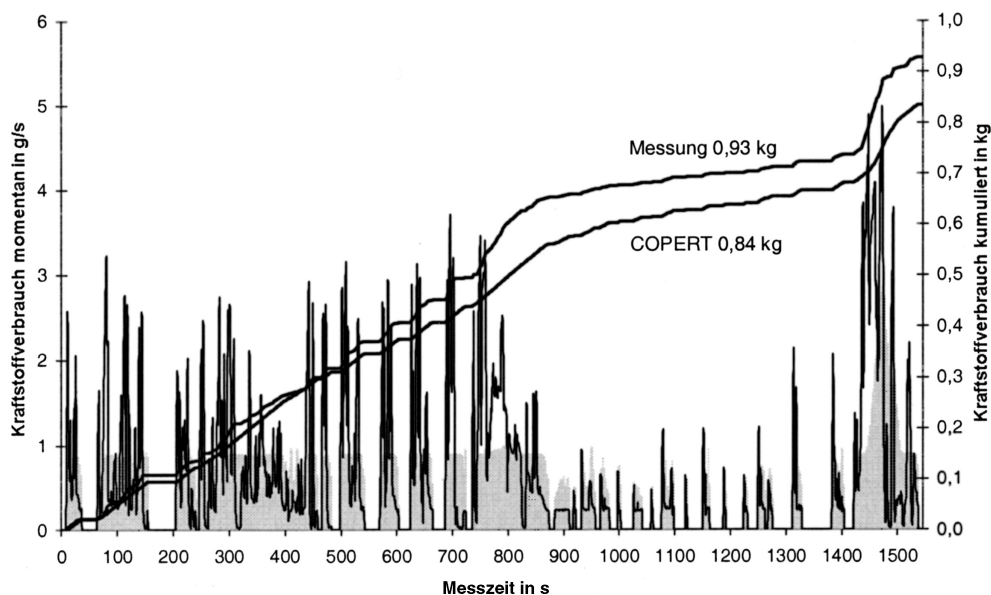


Bild 7. Kraftstoffverbrauch während der MOBINET-Fahrt – Modellierung nach COPERT III (graue Fläche) und On-board-Messung (schwarze Linie).

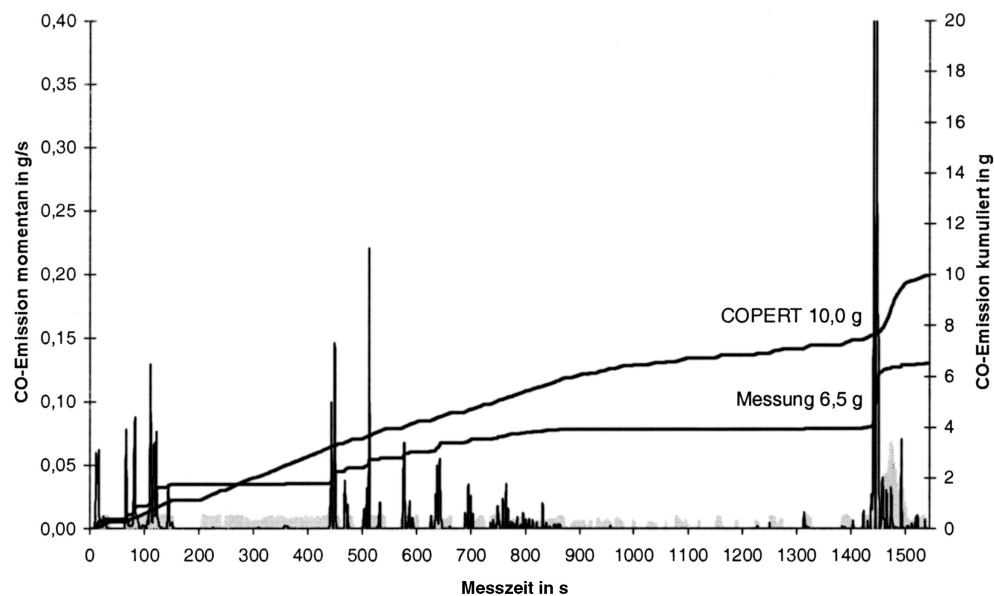


Bild 8. CO-Emission während der MOBINET-Fahrt – Modellierung nach COPERT III (graue Fläche) und On-board-Messung (schwarze Linie).

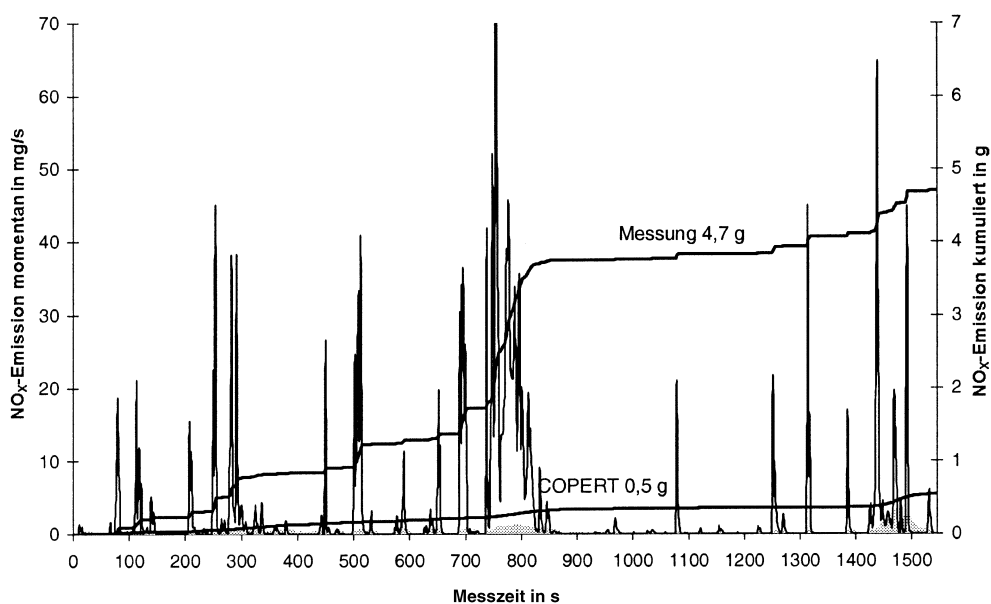


Bild 9. NO_x-Emission während der MOBINET-Fahrt – Modellierung nach COPERT III (graue Fläche) und On-board-Messung (schwarze Linie).

Während der tatsächliche Kraftstoffverbrauch (Bild 7) durch das Modell mit lediglich 10 % Abweichung sehr gut vorhergesagt wird, liegt die prognostizierte CO-Emission um etwa der Hälfte über dem Messwert (Bild 8). Deutlich größere Abweichungen treten bei der NO_x-Emission auf, bei der die modellierten Emissionen um eine ganze Größenordnung unter den tatsächlich gemessenen liegen (Bild 9). Eine derart große Abweichung scheint darauf hinzudeuten, dass Emissionsmodellierungen auf der Grundlage von Prüfstandsmessungen prinzipielle Schwächen haben: Zum einen wird die Vielzahl von Betriebszuständen im realen Verkehr von den Prüfstandszyklen, auf denen das Modell basiert, nicht adäquat erfasst (vgl. Abschn. 3.1). Zum anderen müssen die einzelnen Betriebszustände auch noch mehrfach erfasst werden, um die o. g. Einflussfaktoren auf die Emission zumindest auf statistischem Wege herauszumitteln. Dies ist mit Prüfstandsmessungen nicht möglich. Daher sind Emissionen auf der Basis von Prüfstandszyklen nicht hinreichend genau prognostizierbar. Der hier aufgetretene Unterschied von fast einer Größenordnung ist größer als der Unterschied in den Emissionslimits von EURO1- (Pflicht seit 1992) und EURO4-Autos (Pflicht ab 2005). Die Ergebnisse dieser Untersuchung stehen in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen an Straßentunneln [3]. Sie sollten allerdings an einem größeren Ensemble wiederholt werden, um auch auf dieser Ebene eine statistische Absicherung zu erhalten.

4 Schlussfolgerung

- Die stärksten Emissionen von Kohlenwasserstoffen und (etwas weniger ausgeprägt) von Kohlenmonoxid finden während des Kaltstarts statt.
- Im Stadtverkehr liegt das größte Einsparpotenzial der Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxid-Emissionen in der Verringerung der Zahl der Kaltstarts, die nur durch den Verzicht auf Fahrten erreichbar ist.
- Stickoxide werden vorwiegend in Beschleunigungsphasen während betriebswarmer Bedingungen emittiert. Sie sind einer Verminderung durch Verkehrsverflüssigungsmaßnahmen am besten zugänglich.
- Prüfstandszyklen eignen sich zwar zum Vergleich verschiedener Fahrzeuge untereinander, nicht aber zur Vorhersage der absoluten Höhe der Schadstoffemissionen moderner Katalysatorfahrzeuge.
- On-board-Messungen bieten eine statistisch abgesicherte Grundlage zur Emissionsprognose.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Leitprojekts „MOBINET – Mobilität im Ballungsraum München“ unter der Kennziffer 19B98118E/0 gefördert.

Literatur

- [1] Haagen-Smit, A. J.; Fox, M. M.: Photochemical ozone formation with hydrocarbons and automobile exhaust. J. Air Pollut. Control Assoc. (1954) Nr. 4, S. 105-109.
- [2] Rijkeboer, R. C.; Hendriksen, P.: Regulated and unregulated exhaust gas components from LD vehicles on petrol, diesel, LPG and CNG. Report 93.OR.VM.029/I/PHE/RR. TNO Road Vehicles Research Institute, Delft 1993.
- [3] Gertler, A. W.; Pierson, W. R.: Recent measurements of mobile source emission factors in North American tunnels. Sci. Total Environm. (1996) Nr. 189/190, S. 107-113.
- [4] Staab, J.; Schürmann, D.: Measurement of automobile exhaust emissions under realistic road conditions. SAE Technical Paper Series Nr. 890495. Hrsg.: Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA 1987.
- [5] Lenaers, G.: On-board real life emission measurements on a 3 way catalyst gasoline car in motor way-, rural- and city traffic and on two Euro-1 diesel city buses. Sci. Total Environm. (1996) Nr. 189/190, S. 139-147.
- [6] De Vlieger, I.: On-board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars. Atmos. Environm. (1997) Nr. 31, S. 3753-3761.
- [7] www.mobinet.de
- [8] Mittermaier, B.; Klemp, D.; Buers, H. J.: Regulated and unregulated exhaust emissions from nine passenger cars. Actes INRETS (2003) Nr. 92, S. 183-190.
- [9] Klemp, D.; Mittermaier, B.; Buers, H. J.; Schmitz, T.: Determination of temporally highly resolved passenger car emissions of important exhaust components by means of on-board measurements under real traffic conditions. VKM-THD Mitteilungen (2002) Nr. 81, S. 41-48.
- [10] Klemp, D.; Mittermaier, B.; Buers, H. J.: On-board-Untersuchungen zum Abgasausstoß eines Fahrzeuges mit moderner Abgasreinigungstechnologie im realen Straßenverkehr. Monographien des Forschungszentrums Jülich 2004.
- [11] Hassel, D.; Jost, P.; Weber, F. J.; Dursbeck, F.; Sonnborn, S.; Pletttau, D.: Abgasemissionsfaktoren von Pkw in der Bundesrepublik Deutschland – Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990. UBA-Forschungsbericht 104 05 102 und 104 105 109 des TÜV Rheinland Berichte 8/94. Berlin: Erich Schmidt 1994.
- [12] <http://vergina.eng.auth.gr/mech/lat/copert/copert.htm>.