

Überprüfung der Genauigkeit von berechneten Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs: Konzept und Messergebnisse

U. Corsmeier, M. Kohler, B. Vogel, F. Fiedler, IMK

Einleitung

Die Verringerung der Belastung der Atmosphäre mit Emissionen aus Verkehr, Heizung und Industrie ist ein anerkanntes politisches Ziel. Zum Nachweis des Erfolges verschiedener Minderungsstrategien, müssen die Emissionen einzelner Emittenten bzw. Emittentengruppen gemessen werden.

Kraftfahrzeuge geben Stickstoffmonoxid, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und partikelförmige Luftbeimengungen, wie Dieseleruß ab. Folge dieser Emissionen sind z.B. hohe Ozonkonzentrationen während der Sommermonate. Kleinstpartikel, zu denen der Dieseleruß gehört, stehen im Verdacht gesundheitsschädlich zu sein. Daneben sind sie klimawirksam und tragen zum Treibhauseffekt bei.

Mit Modellrechnungen werden Prognosen und Bewertungen der zukünftigen Belastung der Atmosphäre mit Schadstoffen vorgenommen. Da die Modellergebnisse Grundlage für weitreichende

umweltpolitische Entscheidungen sind, gewinnt die Frage nach der Genauigkeit berechneter Emissionsdaten an Bedeutung. Sie kann z.Z. nur äußerst unzureichend beantwortet werden. Für die wichtigen Emissionen des Straßenverkehrs wird deshalb mit Hilfe des Feldmessprogramms BAB II die Güte statistisch-numerischer Emissionsberechnungsmodelle überprüft.

Das Feldmessprogramm BAB II wird vom Umweltbundesamt teilfinanziert. Zu den Arbeiten tragen neben dem Institut für Meteorologie und Klimaforschung des Forschungszentrums Karlsruhe die folgenden Institutionen bei:

Department of Chemistry der Universität Kopenhagen, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung der Universität Stuttgart, Institut für Physikalische Chemie der GH Wuppertal, Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfesselwesen der Universität Stutt-

gart, Paul Scherrer Institut, Villigen (Schweiz); Umweltbundesamt, Berlin; Zentrum für Umweltforschung der Universität Frankfurt, BASF AG und Ford Forschungszentrum sowie das Institut für Instrumentelle Analytik des Forschungszentrums Karlsruhe.

Konzept zur Ermittlung von Verkehrsemissionen

Der Berechnungsansatz für die Emission Q_i der Substanz i , die auf einem Straßenabschnitt freigesetzt wird, lautet:

$$Q_i = \int_0^h v(x_2, z) \cdot c_i(x_2, z) dz - \int_0^h v(x_1, z) \cdot c_i(x_1, z) dz$$

C_i ist die Konzentration der Substanz i und v ist die Windgeschwindigkeit jeweils am Ort x_1 im Luv der Straße, also der dem Wind zugewandten Seite, bzw. am Ort x_2 im Lee der Straße, der dem Wind abgewandten Seite; z beschreibt die vertikale Erstreckung der Abluffahne, sie reicht von $z=0$ bis $z=h$. Vorausgesetzt wird, dass keine Deposition und keine chemischen Umwandlungen der Emissionen stattfinden, dass die turbulenten Flüsse in Strömungsrichtung gegenüber dem mittleren horizontalen Transport vernachlässigbar sind und dass entlang des Straßenabschnittes homogene und stationäre Verhältnisse aller benötigten Größen vorliegen.



Abb. 1: Übersicht über das Messfeld an der Autobahn 656 bei Heidelberg-Wieblingen. Zur Erfassung der Vertikalprofile sind rechts und links 52 m hohe Krantürme aufgestellt worden.

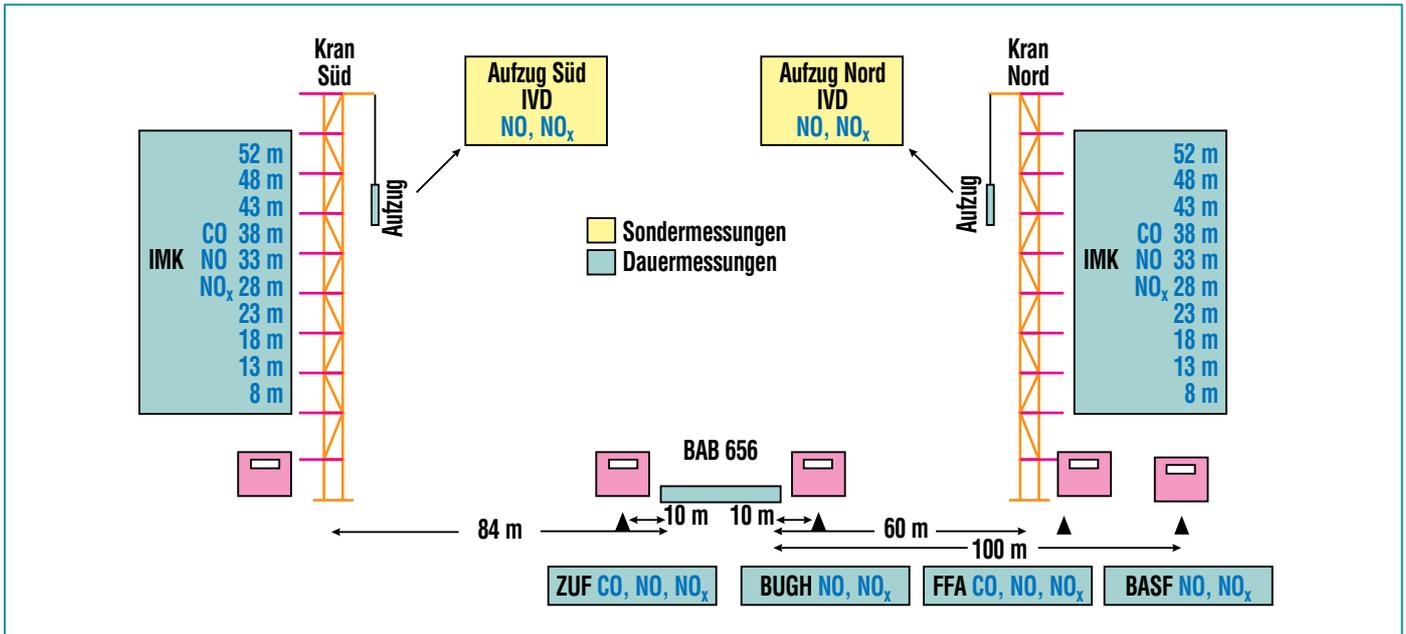


Abb. 2: Messaufbau während BAB II senkrecht zur Autobahn 656 am Beispiel der Größen NO, NO_x and CO. Die roten Container markieren die Positionen der Messungen am Boden.



Abb. 3: Messturm mit Instrumentierung und Aufzug.

Das Messprogramm BAB II

Die Messungen im Rahmen von BAB II fanden vom 1. bis 25. Mai 2001 auf einem landwirtschaftlich genutzten Gelände beiderseits der Autobahn 656 bei Heidelberg-Wieblingen statt (Abb. 1). Eingebettet in diesen Zeitraum für kontinuierliche Messungen waren 8 Intensivmessphasen von jeweils 24 h Dauer. Auf der Südseite der Autobahn wurden an zwei Punkten, auf der Nordseite an drei Punkten die Konzentrationen für die Substanzen NO, NO₂, O₃, CO, CO₂ und für bis zu 26 Kohlenwasserstoffe (VOC) gemessen (Abb. 2).

Zur Erfassung der Vertikalprofile ist auf jeder Seite der Autobahn ein 52 m hoher Kranturm aufgestellt worden (Abb. 3). Die Konzentrationen von NO, NO₂, CO, CO₂ wurden in 10 Höhen, die von Ozon in

3 Höhen kontinuierlich über den gesamten Untersuchungszeitraum gemessen. Während der Intensivmessphasen wurden auch die Kohlenwasserstoffe im Luv in 3 Höhen und im Lee in 6 Höhen registriert. Partikelmessungen wurden nördlich der Autobahn in 3 Höhen und südlich davon in 2 Höhen durchgeführt. Zusätzliche Informationen über die vertikale Verteilung von NO, NO₂, CO₂ lieferten Profildfahrten mit Aufzügen während der Intensivmessphasen. An der Basis der Türme wurden Partikelmessungen (Größenverteilung, Massenkonzentration) im Dauerbetrieb durchgeführt.

Zur Verkehrserfassung wurden vom Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart Geschwindigkeitsmessungen auf allen 4 Fahrspuren durchgeführt [1]. Ferner wurden die Fahrzeugkennzeichen mit Video-

kameras aufgezeichnet. Dies erlaubt eine Einordnung der Fahrzeuge in die Klassen Motorräder, Pkw/Kombi, leichte Nutzfahrzeuge, Lkw, Sattelzüge und Busse. Über die aufgezeichneten Kennzeichen werden beim Kraftfahrtbundesamt die emissionsrelevanten Daten der Fahrzeuge abgerufen. Dies sind: Fahrzeugart, Antriebsart (Otto-/Dieselmotor), Hubraum, Schadstoffminderungstechnik, Einstufung in Schadstoffklassen, zulässige Gesamtmasse und Datum der Erstzulassung.

Die Einhaltung vorgegebener maximaler Messfehler wurde durch ein Qualitätssicherungsprogramm für NO, NO₂, CO, CO₂, O₃ (Stoffgruppe A), Kohlenwasserstoffe (Stoffgruppe B) und Partikel (Stoffgruppe C) gewährleistet: Die Analytoren für die Stoffgruppen A und B wurden vor und nach dem Messprogramm sowohl mit zertifizierten Prüfgasen beaufschlagt als auch zu einer mehrtägigen Außenluftparallelmessung zusammengezogen. Die Durchführung und Überwachung der Qualitätssicherung oblag dem Institut für Verfahrenstechnik und Dampfesselwesen der Universität Stuttgart. Das Institut für Physikalische Chemie der Universität Wuppertal überwachte durch Kontrollmessungen mit einem bekannten und ebenfalls zertifizierten 30-Komponenten-Kohlenwasserstoffgemisch die Qualität der VOC Messungen.

Gemessene Emissionen

Bei autobahnsekrechter Anströmung werden luv- und leeseitig unterschiedliche Spurenstoffpro-

file gemessen. Im Luv der Autobahn wird unter den vorgegebenen Bedingungen ein über alle Messhöhen hinweg konstantes Profil registriert. Auf der Leeseite ist, bedingt durch die Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs auf der Autobahn, die Ausbildung einer Abgasfahne zu beobachten.

Abb. 4 zeigt einen solchen Fall bei nordöstlicher Anströmung der Autobahn für CO und NO_x. Die Fahnenhöhe liegt hier am 11. Mai 2001 zwischen 12 Uhr und 18 Uhr im Mittel zwischen 25 m und 30 m. Im unteren Messniveau (8 m) ist im Lee die CO-Konzentration um 50 ppb und die NO_x-Konzentration um 15 ppb gegenüber den Messungen im Luv erhöht.

Die zusätzlich zu den Spurenstoffmessungen ausgeführten Partikelmessungen lassen ebenfalls die Ausbildung einer Abluftfahne im Lee der Autobahn er-

kennen. Abb. 5 zeigt exemplarisch für die Vielzahl der eingesetzten Messsysteme Ergebnisse des ELPI-Systems (Electrostatic Low Pressure Impactor) vom Paul Scherrer Institut in der Schweiz. Das ELPI wurde am 14. Mai 2001 bei Südwestwind im Aufzug des Nordturms, also leeseitig der Autobahn betrieben. Pro Stunde wurden je 6 Auf- und Abstiege mit dem Aufzug gefahren. Die Vertikalprofile liegen somit in einer zeitlichen Auflösung von ca. 6 Minuten vor. In der Abbildung ist exemplarisch für zwei Aufstiege die Anzahlkonzentration in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser (D_p) und der Höhe über Grund aufgetragen. Die beiden Vertikalprofile zeigen bis zu einer Höhe von 20 m über Grund im Partikelbereich < 0.2 µm und im Partikelbereich > 1 µm deutliche Erhöhungen der Anzahlkonzentrationen.

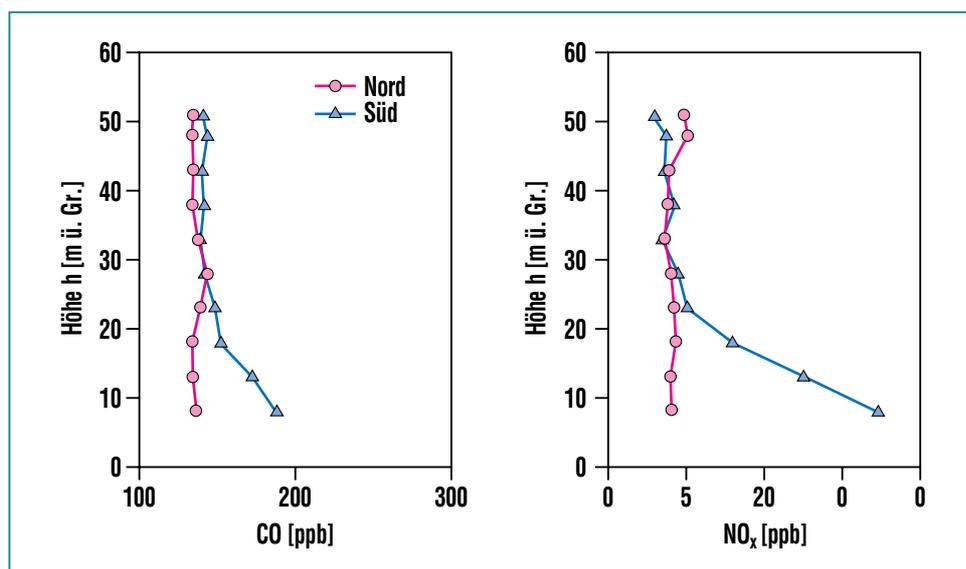


Abb. 4: Mittlere Vertikalprofile für CO (links) und NO_x (rechts) am 11. Mai 2001 zwischen 12 Uhr und 18 Uhr bei nordöstlicher Anströmung (39°). Das Profil mit Punktmarkierungen zeigt Messungen im Luv, dasjenige mit Dreieckmarkierungen Messungen im Lee der Autobahn. Die Emissionen des Verkehrs bilden eine Abluftfahne zwischen 25 m und 30 m Höhe aus.

Die Konzentrationserhöhung im Feinstpartikelbereich wird hauptsächlich durch direkte Rußemissionen aus dem Auspuff der Fahr-

zeuge und durch kondensierte Schwefelsäurepartikel verursacht, während die erhöhten Werte für die größeren Partikel

auf Reifenabrieb, zusammengewachsene Rußpartikel und die Aufwirbelung von sedimentierten Partikeln durch den Fahrbetrieb zurückzuführen sind.

Berechnete und modellierte Emissionen

Über den gesamten Messzeitraum hinweg konnten insgesamt 262 Einzelprofile jeweils für NO_x und CO ausgewertet werden. Die Berechnung der Quellstärken aus den Einzelprofilen führt zu einem Wochengang der Emissionen auf der A656. In Abb. 6 sind die experimentell ermittelten mittleren Tageswerte der Wochentage dargestellt (EXP).

Zum Vergleich sind zusätzlich die Emissionen, die vom IER der Universität Stuttgart aus Modellrechnungen bestimmt wurden angegeben (MOD), [1]. Die für die Rechnungen notwendigen Verkehrsstärken wurden aus einer automatischen Zählstelle abgeleitet und mit den Daten der detaillierten Verkehrserfassung korreliert. Somit steht ein homogener Verkehrsdatensatz für den gesamten Untersuchungszeitraum zur Verfügung.

Die Quellstärke für NO_x liegt an Arbeitstagen bei $3.5 \text{ kg h}^{-1} \text{ km}^{-1}$ und an Wochenenden bei $1.6 \text{ kg h}^{-1} \text{ km}^{-1}$. Die Übereinstimmung zwischen Messung und Modell ist hier sehr gut. Die gemessene Quellstärke für CO liegt an Arbeitstagen bei $9.9 \text{ kg h}^{-1} \text{ km}^{-1}$ und an Wochenenden bei $7.4 \text{ kg h}^{-1} \text{ km}^{-1}$. Die berechneten Werte sind jeweils etwa 25% niedriger. Diese Abweichungen sind geringer als bei einem Vorexperiment 1997 [3]. Damals lagen die vom Modell be-

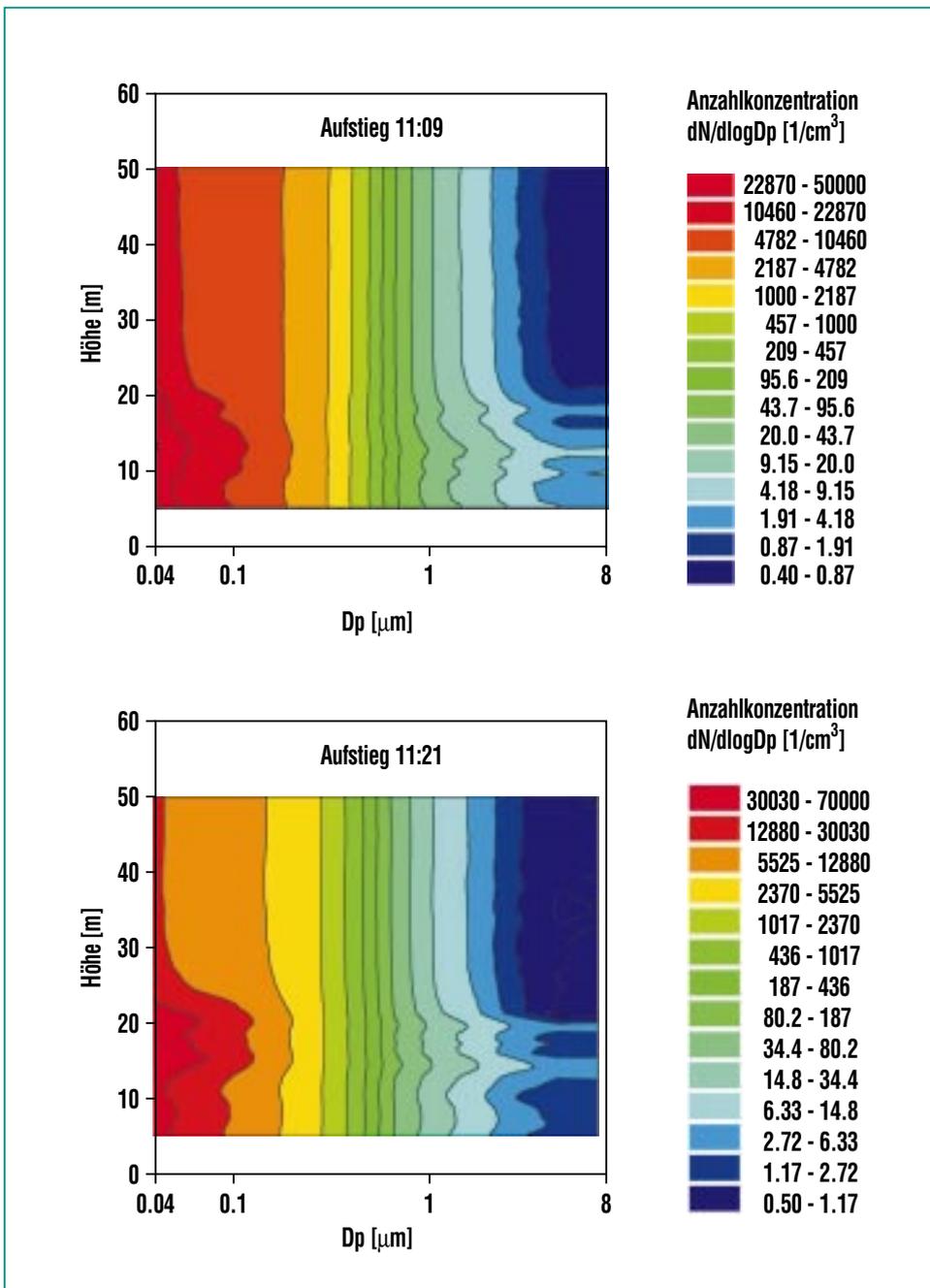


Abb. 5: Partikelgrößenverteilung im Lee der Autobahn. Das Beispiel zeigt zwei Vertikalprofile vom 14. Mai 2001. Aufgetragen ist der Partikeldurchmesser (D_p) über der Höhe über Grund. Die Farben geben die Anzahlkonzentration einzelner Partikelgrößenklassen wieder. (Imhoff, PSI, Schweiz).

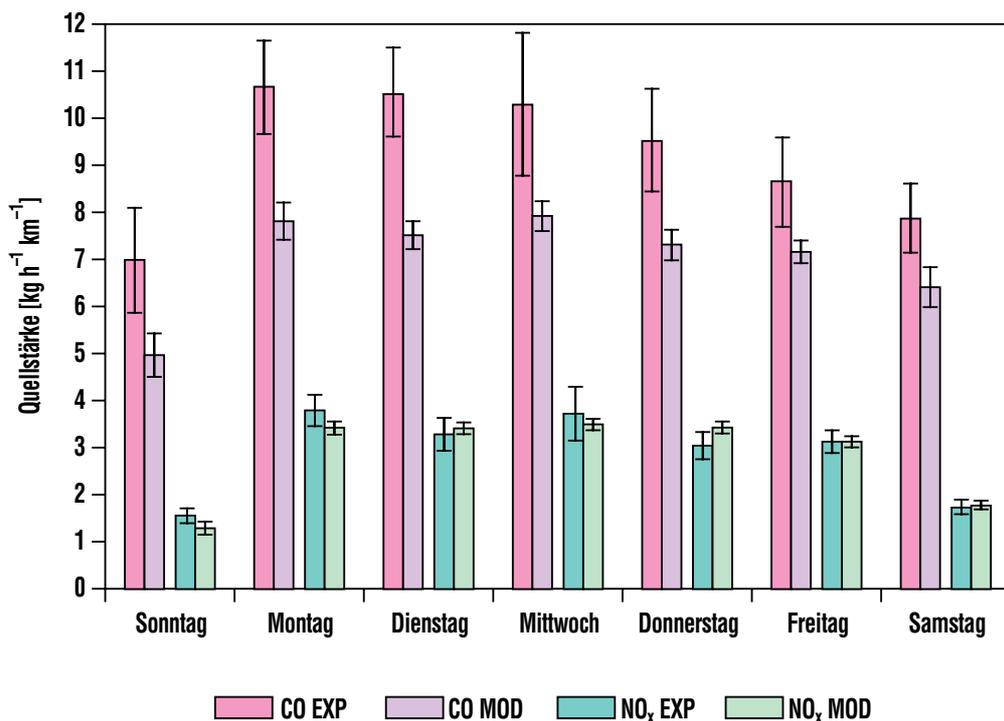


Abb. 6: Wochengang der Emissionen gemittelt zwischen 6:00 und 20:00 Uhr für CO und NO_x. Die senkrechten Linien geben die Fehler an, mit denen die gemessenen (EXP) und die berechneten Emissionen (MOD) behaftet sind [1].

rechneten Werte nur bei etwa 50% der gemessenen realen Emissionen. Die heutige bessere Übereinstimmung konnte durch den optimierten Messaufbau und eine deutlich verbesserte Messtechnik, aber auch durch die gegenüber 1997 veränderten Annahmen über Emissionsfaktoren [2], Flottenzusammensetzung und Fahrmodi in den Modellrechnungen erreicht werden.

Zusammenfassung

Im Mai 2001 wurde entlang der Bundesautobahn 656 bei Heidelberg ein Messprogramm zur experimentellen Bestimmung der Emissionen des Kraftfahrzeugverkehrs durchgeführt. Ziel war es, die Gü-

te von statistisch-numerisch berechneten Emissionen zu überprüfen. Erfahrungen, die 1997 durch ein Vorexperiment an gleicher Stelle gewonnen werden konnten [3], schlugen sich in einem optimierten und aufwendigeren Messaufbau nieder. Zusätzlich wurde das Messprogramm durch Partikelmessungen ergänzt.

Es stellen sich bei autobahnsekrechter Anströmung luv- und leeseitig unterschiedliche Konzentrationsprofile ein. Sie werden zur Bestimmung der durch den Kraftfahrzeugverkehr verursachten Emissionen herangezogen.

Eine detaillierte Verkehrserfassung vor Ort, in Verbindung mit Daten einer automatischen Ver-

kehrszählstelle, lieferten für den gesamten Messzeitraum einen aussagekräftigen Datensatz über die Verkehrsstärke und die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte. Dieser Datensatz dient zur Berechnung der Emissionen durch ein numerisches Modell. Dabei werden auf Motorprüfständen gewonnene Emissionsfaktoren benutzt [2].

Ein Vergleich zwischen experimentell und statistisch-numerisch ermittelten Emissionen zeigt für Stickoxide eine gute Übereinstimmung. Für Kohlenstoffmonoxid dagegen wurden die Emissionen im Modell um 25% unterschätzt.

Literatur

- [1] J. Kühlwein, R. Friedrich, 2001: *Verkehrsmessung, Emissionsmodellierung und Datenauswertung. Endbericht zur Durchführung eines Teilvorhabens im Rahmen des vom IMK durchgeführten Forschungsvorhabens „Emissionsnahe Überprüfung Kfz-bedingter Immissionen“*. Interner Bericht, 22 S.
- [2] UBA, 1999: *Umweltbundesamt, Berlin (Hrsg.); Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern (Hrsg.), INFRAS AG, Bern (Bearb.): Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs: Version 1.2 (erschieden als Software auf CD-Rom)*. Berlin 1999
- [3] B. Vogel, U. Corsmeier, H. Vogel, F. Fiedler, J. Kühlwein, R. Friedrich, A. Obermeier, J. Weppner, N. Kalthoff, D. Bäumer, A. Bitzer, K. Jay, *Atmospheric Environment* 34, 2437-2450