



Niedersächsisches
Landesamt für
Ökologie



7. Materialienband für Maßnahmenpläne nach der EU-Richtlinie zur Luftqualität

Berechnung hochaufgelöster Emissionsdaten für einen Ballungsraum und Straßenschluchten

Herausgeber:
Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, NLÖ
An der Scharlake 39
31135 Hildesheim

in Zusammenarbeit:
Universität Stuttgart
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
J. Kühlwein
R. Friedrich

Volkswagen AG
H. Volkmar
H. Ernst

Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, NLÖ, Hannover
W.J. Müller
Dr. B. Heits

1. Auflage 2004, 300 Ex.
ISSN 0949-8265
Schutzgebühr 10,-€ zzgl. Versandkostenpauschale z.Zt. 2,50 €

Bezug
Niedersächsisches Landesamt für Ökologie
An der Scharlake 39
31135 Hildesheim

e-mail: heinrich.klaholt@nloe.niedersachsen.de
wolfgang.mueller@nloe.niedersachsen.de

ENDBERICHT

zur Durchführung eines Teilprojekts (TP 5)

Berechnung hochaufgelöster Emissionsdaten für einen Ballungsraum und Straßen- schluchten (BEBAS)

des vom Bundesministerium für Bildung und
Forschung (BMBF) im Rahmen des Atmo-
sphärenforschungsprogramms (AFO 2000)

geförderten Forschungsvorhabens

Entwicklung und Validierung von Instrumenten zur Umset- zung der europäischen Luft- qualitätspolitik (VALIUM)

Förderkennzeichen: 07ATF12

Jörg Kühlwein, Rainer Friedrich

Universität Stuttgart
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Heßbrühlstr. 49a
70565 Stuttgart

Mit Beiträgen von:

Henning Volkmar, Henning Ernst
Volkswagen AG
38436 Wolfsburg

August 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Verkehrserhebungen.....	2
2.1	Verkehrsstärken.....	2
2.1.1	Manuelle Zählungen	2
2.1.2	Automatische Zählungen.....	3
2.1.3	Vergleich zwischen automatischen und manuellen Zählergebnissen	5
2.2	Flottenzusammensetzungen.....	7
2.3	Geschwindigkeitsverteilungen und Beschleunigungen (Fahrmuster).....	13
2.4	Ampelschaltungen	17
2.5	Abgestellte Fahrzeuge und Parkdauerverteilungen.....	19
2.6	Straßenlängsneigung.....	20
3	Emissionsmodellierungen	21
3.1	Mikroskopische Kfz-Emissionsbestimmung.....	21
3.1.1	Emissionsbestimmung durch Verkehrsflussparametrisierung	21
3.1.2	Emissionsbestimmung durch Verkehrsflussmodellierung (Volkswagen AG) .	25
3.2	Mesoskopische / makroskopische Modellierung.....	27
3.3	c*-Werte	31
4	Fehlerbandbreiten	34
4.1	Verkehrsstärken.....	34
4.2	Geschwindigkeitsverteilungen	34
4.3	Flottenzusammensetzungen.....	34
4.4	Straßenlängsneigung.....	35
4.5	Emissionsfaktoren.....	35
4.6	Gesamtfehler	35
5	Ergebnis-Datenbank	38
6	Zusammenfassung.....	40

1 Einleitung

Ergebnisse modellgestützter Emissionsberechnungen von Ozonvorläufersubstanzen und anderen Schadstoffen werden in zunehmendem Maße für umweltpolitische Entscheidungen relevant. In den vergangenen Jahren wurden teilweise beträchtliche Fortschritte hinsichtlich des Detaillierungsgrades von Berechnungen anthropogener Emissionen erzielt. Dies trifft insbesondere auf den Sektor Straßenverkehr zu.

Mit dem Inkrafttreten der EU-Richtlinie 96/62/EG über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität (einschl. Tochterrichtlinien 1999/30/EG, 2000/69/EG und 2002/3/EG) werden verbindliche Immissionsgrenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit festgeschrieben. Es werden sowohl Langzeitgrenzwerte (z.B. Jahresmittelwerte für NO₂, PM₁₀, Benzol) als auch Kurzzeitgrenzwerte mit maximal zulässigen Überschreitungshäufigkeiten (z.B. Tagesmittel für PM₁₀, 8-Stunden-Mittel für CO, Stundenmittelwerte für NO₂) verbindlich.

Mit dem Umsetzen der EU-Richtlinien in nationales Recht (z.B. in Deutschland durch die 22. BImSchV) verpflichten sich die EU-Mitgliedländer zur regelmäßigen und flächendeckenden Überwachung und Beurteilung der Luftqualität. Dies erfolgt u.a. durch die Erstellung von Belastungskarten auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen:

- nationale Ebene
- Ballungsräume (Auflösung: 1 km x 1 km)
- mikroskalig (Auflösung: wenige Meter)

Die Erstellung derartiger Belastungskarten erfolgt vorrangig durch Messungen der Schadstoffkonzentrationen und Interpolationen der Messdaten. Aufgrund der Problematik, dass die geforderte umfassende Kontrolle der Luftqualität durch rein messtechnische Methoden nicht erreicht werden kann, hat der Gesetzgeber die Ergänzung und Kombination der Messdaten mit Modelldaten ausdrücklich zugelassen. Zu diesem Zweck werden detaillierte und präzise Modelle zur Ermittlung von Schadstoffkonzentrationen benötigt. Derartige Modelle bestehen aus zwei wesentlichen Teilen: einem Emissionsmodell und einem Chemie-Transport-Modell (CTM).

Die wesentlichen Ziele des Projekts VALIUM sind:

- Entwicklung eines kombinierten mesoskaligen und mikroskaligen Immissionsmodells
- Erstellung eines Validierungsdatensatzes für mikroskalige CTM am Beispiel der Göttinger Straße in Hannover

Die Aufgaben des hier vorgestellten VALIUM-Teilprojekts Nr. 5 (BEBAS) umfassen die Bereitstellung von makro-/mesoskopischen und mikroskopischen Emissionsdaten für das Untersuchungsgebiet, sowie die Erstellung einer umfassenden Datenbasis von Aktivitätsdaten als Grundlage für mikroskopische Emissionsmodellierungen. Zu diesem Zweck wurden umfangreiche Verkehrsmessungen an der Göttinger Straße und im umgebenden kleinräumigen Untersuchungsgebiet (ca. 1 km²) durchgeführt. Sowohl die ermittelten Aktivitätsdaten als auch die darauf basierenden Emissionsraten sind Bestandteil des erstellten Validierungsdatensatzes.

Zunächst folgt eine Beschreibung der während des Experiments durchgeführten Erhebungen der verkehrstechnischen Parameter sowie eine Darstellung der wichtigsten Ergebnisse. Anschließend werden die Methodik und beispielhafte Ergebnisse der Emissionsmodellierungen auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen dargestellt. Abschließend werden die auf der Grundlage sämtlicher Erhebungen und externer Daten berechneten Emissionsraten und die Fehlerbandbreiten für die Mikroskala dargestellt.

2 Verkehrserhebungen

Die verkehrsbezogenen Kenngrößen, die die Schadstoffemissionen auf Innerortsabschnitten maßgeblich beeinflussen, sind:

- Verkehrsstärken
- Zusammensetzungen der Fahrzeugflotte
- Geschwindigkeitsverteilungen der Fahrzeuge (Fahrmuster)
- Fahrtweitenverteilungen
- Standzeitenverteilungen
- Straßenlängsneigung

Zur exakten Ermittlung dieser verkehrsbezogenen Parameter während der Intensivmessphasen (IMP) wurden umfangreiche Erhebungen und Messungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden Verkehrsdaten aus einer automatischen, kontinuierlichen Messstelle, die an der Göttinger Straße installiert ist, in die Auswertung miteinbezogen. Zusätzlich zu den IMP wurden manuelle Kurzzeitzählungen und Erfassungen der Abstellparameter an 160 Straßenabschnitten im kleinräumigen Untersuchungsgebiet durchgeführt. Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Messungen.

Tab. 1: Daten der Messungen: Intensivmessphasen (IMP) und Zusatztage (Z)

Datum	IMP / Z	Bemerkungen
Mi, 08.08.2001	IMP 0	Testmessungen und man. Kurzzeitzählungen
Do, 09.08.2001	Z	manuelle Kurzzeitzählungen
Fr, 02.08.2002	Z	Parkplatzzählungen
Mi, 07.08.2002	IMP 1	
Mo, 12.08.2002	Z	Parkplatzzählungen
Di, 13.08.2002	Z	Messungen Göttinger Straße
Mi, 14.08.2002	Z	Messungen Göttinger Straße
Mi, 23.10.2002	IMP 2	
Do, 24.10.2002	IMP 2	
Fr, 25.10.2002	IMP 2	zus.: Parkplatzzählungen
Sa, 26.10.2002	IMP 2	
Fr, 11.04.2003	IMP 3	
Sa, 12.04.2003	Z	Parkdauerverteilung und man. Kurzzeitzählungen
So, 13.04.2003	Z	Messungen Göttinger Straße
Mi, 23.04.2003	IMP 3	

2.1 Verkehrsstärken

2.1.1 Manuelle Zählungen

Während der Intensivmessphasen wurde der Verkehrsablauf in der Göttinger Straße auf Videobändern aufgezeichnet. Die Verkehrsstärken der aufgezeichneten Stunden wurden anschließend durch manuelle Zählungen ermittelt. Dabei erfolgte zusätzlich eine Sichteinordnung der Fahrzeuge in neun Fahrzeugkategorien (Motorräder, Pkw, Pkw mit Anhänger, Leichte Nutzfahrzeuge, Leichte Nutzfahrzeuge mit Anhänger, Lkw, Lastzüge, Sattelzüge, Busse). Die Verkehrszählungen wurden in stündliche bzw. halbstündliche Abschnitte unterteilt und somit mit den zeitlichen Auflösungen der parallel durchgeführten Immissionsmessungen des Tracergasversuchs abgestimmt.

Zusätzlich zu den Messungen an der Göttinger Straße wurden die Verkehrsstärken an 160 Straßenabschnitten im Umfeld der Göttinger Straße (kleinräumiges Untersuchungsgebiet) ermittelt. Dazu wurden die Ergebnisse aus Kurzzeitmessungen (2 x 5 min) zunächst anhand des Tagesgangs der Göttinger Straße (automatische Zählstelle) auf Tageswerte und anschließend anhand des Jahresgangs der Göttinger Straße auf Jahresverkehrsstärken bzw. DTV hochgerechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 1 enthalten.

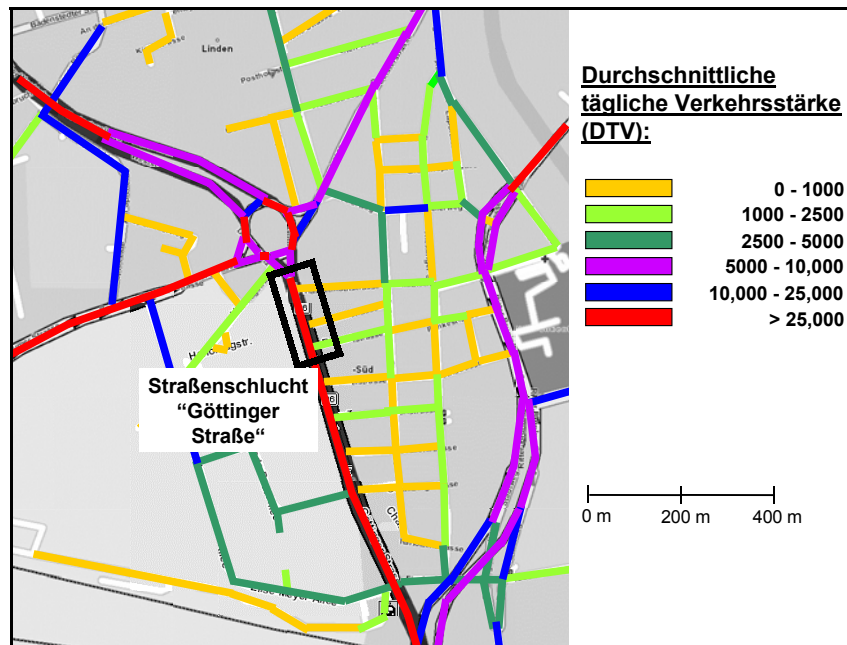


Bild 1: Klassierung der Straßenabschnitte im kleinräumigen Untersuchungsgebiet nach Durchschnittlichen Täglichen Verkehrsstärken (DTV) - Ergebnisse aus manuellen Kurzzeitmessungen

2.1.2 Automatische Zählungen

An dem untersuchten Straßenabschnitt der Göttinger Straße befindet sich in Höhe der Messstation HRVS eine automatische Dauerzählstelle (Induktiv-Zählschleife), die in 3-min-Auflösung Verkehrsstärken jeweils getrennt nach Fahrspuren für die Fahrzeugklassen „Pkw-ähnliche“ und „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge liefert. Die Unterteilung der Fahrzeugflotte in diese Klassen erfolgt dabei anhand der Kriterien Fahrzeuglänge und Bodenfreiheit des Fahrzeugs.

In der Tabelle 2 sind die Ergebnisse der automatischen und manuellen Zählungen für die verschiedenen Wochentagstypen für das Jahr 2002 zusammenfassend dargestellt.

Tab. 2: Aus manuellen und automatischen Zählungen abgeleitete Daten zum Verkehrsaufkommen am Messabschnitt - mittlere tägliche Verkehrsstärken und Anteile der einzelnen Fahrzeugkategorien für das Jahr 2002

	Kfz / d	Anteile Fahrzeugkategorien							LV		SV
		MR	Pkw	LNF	Lkw	LZ	SZ	Busse			
Montag bis Freitag	31994	177	26681	2644	1138	547	664	144	29501	2493	
Samstag	24135	56	21988	1553	369	97	6	65	23598	537	
Sonntag und Feiertage - Sommer	21054	1379	18592	963	49	0	4	66	20934	119	
Sonntag und Feiertage - Winter	19276	88	18205	875	44	0	4	60	19168	108	
alle Tage	28504	274	24358	2143	808	371	434	116	26775	1729	

MR: Motorräder

LNF: Leichte Nutzfahrzeuge und Kleinbusse bis 3,5 t zulässige Gesamtmasse

LZ: Lastzüge

SZ: Sattelzüge

LV: Leichtverkehr

SV: Schwerverkehr

Die Daten der Dauerzählstelle sind Bestandteil des „Luftüberwachungssystems Niedersachsen (LÜN)“ und darüber hinaus im VALIUM-Validierungsdatensatz enthalten.

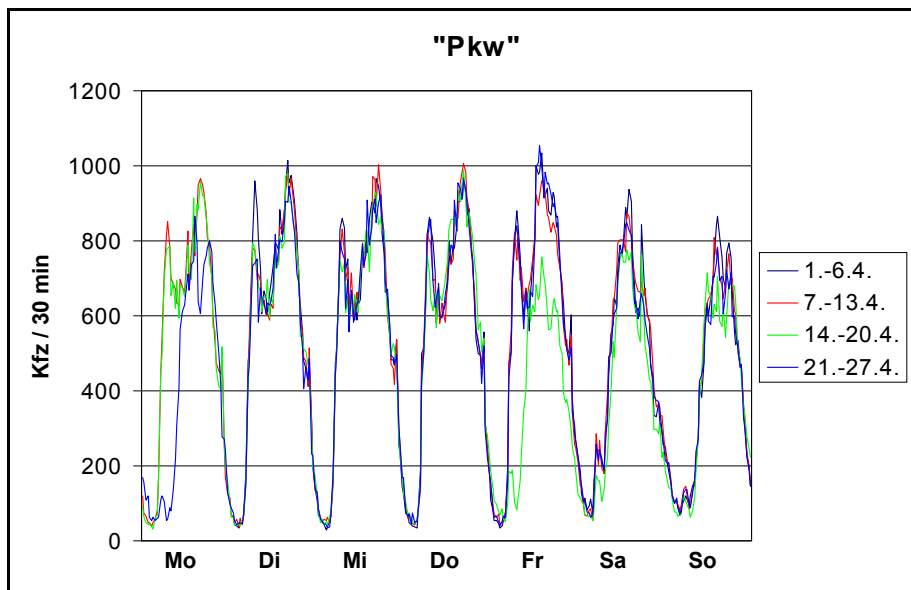


Bild 2: Wochengänge für „Pkw-ähnliche“ Fahrzeuge in der Göttinger Straße im April 2003 - Ergebnisse der automatischen Dauerzählstelle

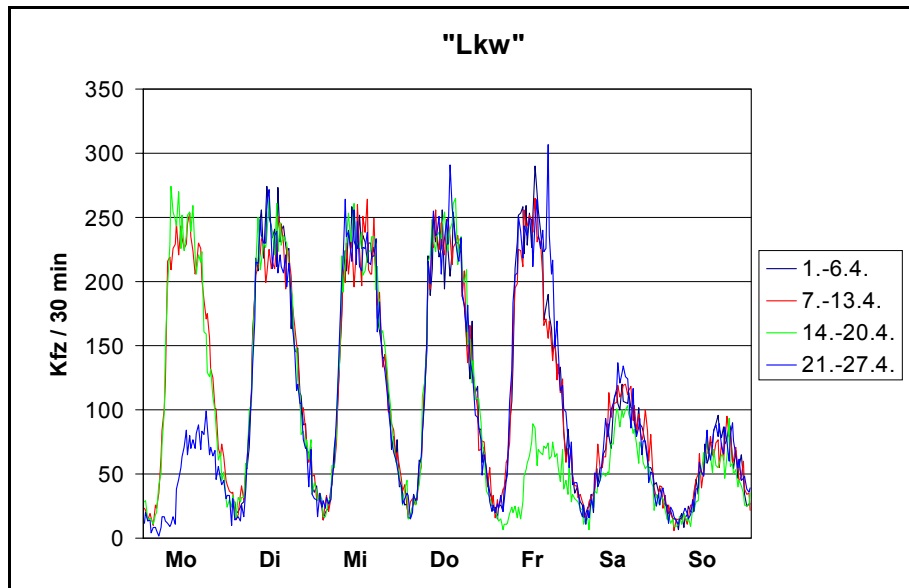


Bild 3: Wochengänge für „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge in der Göttinger Straße im April 2003 - Ergebnisse der automatischen Dauerzählstelle

Die Bilder 2 und 3 zeigen exemplarisch die Wochengänge im April 2003, jeweils aufsummiert über den Gesamtquerschnitt. Es zeigt sich bei den „Pkw-ähnlichen“ Fahrzeugen eine ausgeprägte Nachmittagsspitze an den Werktagen und eine weniger stark ausgeprägte Spitze am frühen Vormittag. Die Tagesgänge für den Schwerverkehr weisen dagegen einen gleichmäßigeren Verlauf auf. Am Wochenende nehmen die Verkehrsstärken beim Leichtverkehr um ca. 20-30 % ab, beim Schwerverkehr um ca. 80-95 % (s. Tabelle 2). Die beiden Messtage der 3. IMP (11. und 23.4.03) weisen trotz zeitgleicher Hannover-Messe (7.-12.4.) und Osterferien in Niedersachsen (7.-23.4.03) keine Auffälligkeiten auf. Deutlich ist der Einfluss des verlängerten Osterwochenendes (18.-21.4.) erkennbar.

2.1.3 Vergleich zwischen automatischen und manuellen Zählergebnissen

Zur Verifizierung der Verkehrsstärkedaten der automatischen Dauerzählstelle wurden für ausgewählte Stunden manuelle Vergleichszählungen durchgeführt. Das Bild 4 zeigt exemplarisch für die 2. IMP (Oktober 2002) für die Gesamtverkehrsstärken (alle Kfz) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen automatisch und manuell ermittelten Verkehrsstärken. Im Mittel liegen die automatisch erfassten Werte um 2,4 % über den manuellen Ergebnissen. Dieser geringe Mehrbefund dürfte im wesentlichen auf Fahrzeuge zurückzuführen sein, die im Bereich der Zählstelle die Fahrspur wechseln und somit doppelt erfasst werden. Der Variationskoeffizient (relative Standardabweichung) für die Quotienten automatisch / manuell als Maß für die Streubreite der Wertepaare liegt bei 6,1 %.

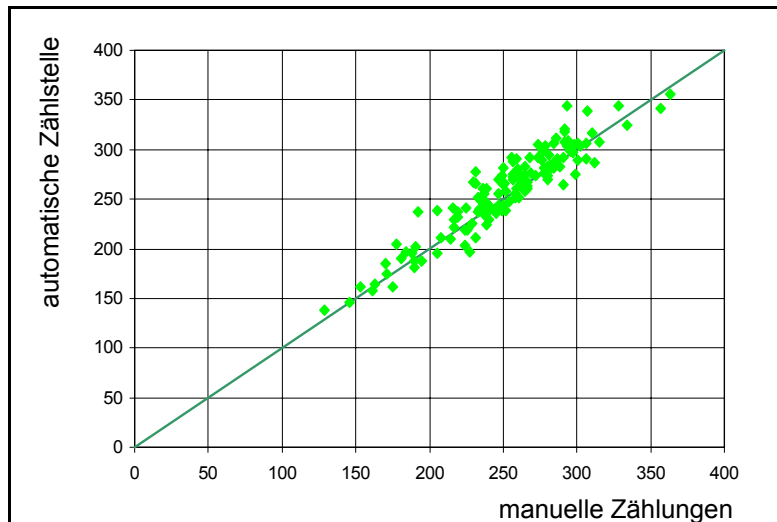


Bild 4: Vergleich zwischen automatisch und manuell erfassten Gesamtverkehrsstärken in der Göttinger Straße, aufgelöst nach Fahrspuren ($\frac{1}{2}$ -h-Werte)

Differenziert nach Wochentagstypen ergeben sich folgende mittlere Mehrbefunde der automatischen im Vergleich zur manuellen Erfassung: Montag bis Freitag: + 2,5 %, Samstag: + 3,1 %, Sonntag: + 1,0 %. Die Gesamtverkehrsstärken werden somit durch die automatische Dauerzählstelle mit hoher Qualität abgebildet. Dies gilt für alle vier Fahrspuren gleichermaßen.

Anders stellt sich die Situation beim Schwerverkehr-Anteil dar. In Bild 5 ist eine systematische deutliche Überschätzung der Schwerverkehr-Anteile durch die automatische Dauerzählstelle erkennbar. Während die manuellen Zählungen je nach Wochentagstyp zu SV-Anteilen zwischen 0,6 % und 7,8 % führen, liefert die Dauerzählstelle für die gleichen Messintervalle Anteile der „Lkw-ähnlichen“ Fahrzeuge zwischen 10,4 % und 19,8 % (s. Tabelle 3). Es zeigt sich, dass von der Dauerzählstelle alle Leichten Nutzfahrzeuge und Kleinbusse und selbst große Kombis den „Lkw-ähnlichen“ Fahrzeugen zugeordnet werden. Als reales Trennkriterium für die Unterscheidung zwischen „Pkw-ähnlichen“ und „Lkw-ähnlichen“ Fahrzeugen wurde eine Fahrzeuglänge von ca. 5,50 Metern ermittelt, und nicht - wie vom Hersteller und vom Betreiber der Zählstelle angegeben - eine Fahrzeuglänge von 9 Metern.

Diese systematische Überschätzung von Fahrzeugen des Schwerverkehrs erfordert eine Neuinterpretation aller bisher mit der Dauerzählstelle ermittelten Verkehrsstärkedaten. Der in der Realität deutliche geringere SV-Anteil hat u.a. erhebliche Auswirkungen auf die modellierten Emissionsraten (s. Kap. 3.1).

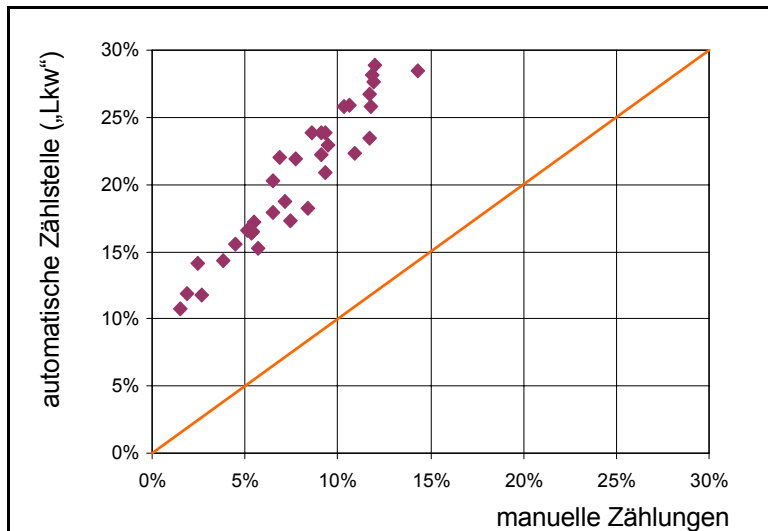


Bild 5: Vergleich zwischen automatisch und manuell erfassten Verkehrsstärken für „Lkw-ähnliche“ Fahrzeuge (Zählstelle) bzw. Schwerverkehr (manuell) in der Göttinger Straße, Gesamtquerschnitt ($\frac{1}{2}$ -h-Werte)

Tab. 3: Schwerverkehranteil in der Göttinger Straße 2002 - Vergleich manuelle und automatische Zählung

Wochentag	manuell	automatisch („Lkw“)	Faktor
Montag bis Freitag	7,8 %	19,8 %	2,5
Samstag	2,2 %	12,5 %	5,7
Sonntag	0,6 %	10,4 %	17,3

Zur Ermittlung der Anteile der einzelnen Fahrzeugkategorien aus den Daten der Dauerzählstelle wurden sog. „Korrekturfaktoren“ aus den Ergebnissen der manuellen Zählungen als Durchschnittswerte für die einzelnen Intensivmessphasen, differenziert nach Wochentagtypen, abgeleitet. Solche Korrekturfaktoren sind exemplarisch für die Messphase im Oktober 2002 in der Tabelle 4 wiedergegeben.

Tab. 4: Korrekturfaktoren zur Ermittlung der Anteile der Fahrzeugkategorien (2. IMP)

Fahrzeug-Kategorie:	Motorrad	Pkw	LNF	Lkw	Lastzug	Sattelzug	Bus
	=	=	=	=	=	=	=
Zählstelle:	„Pkw“	„Pkw“	„Lkw“	„Lkw“	„Lkw“	„Lkw“	„Lkw“
	x	x	x	x	x	x	x
Mo-Fr:	0,0067	1,0183	0,4072	0,1752	0,0842	0,1023	0,0221
Sa:	0,0026	1,0077	0,5000	0,1188	0,0313	0,0021	0,0208

2.2 Flottenzusammensetzungen

Nach der optischen Klassifizierung der Fahrzeugflotte in Fahrzeugkategorien erfolgte über eine Auswertung der Fahrzeugkennzeichen eine weitere Verfeinerung der Einteilung in sog. Fahrzeugschichten. Die Kennzeichen der den Messabschnitt passierenden Fahrzeuge wurden mit Hochleistungs-Videokameras aufgenommen und anschließend mit Hilfe einer speziellen Bilderkennungssoftware der Fa. "recognitec", Potsdam, auf Datenträger übertragen (Bild 6). Ein Abgleich mit dem Zentralen Fahrzeugregister des Kraftfahrtbundesamtes in

Flensburg lieferte anonymisierte Datensätze mit fahrzeugtechnischen Daten wie z.B. Antriebsart, Schadstoffminderungstechnik, erfüllte Abgasnorm, zulässige Gesamtmasse, Hubraum und Datum der Erstzulassung. Anhand dieses Datensatzes wurde eine Eingruppierung der Fahrzeuge in Fahrzeugschichten mit jeweils ähnlichem Emissionsverhalten vorgenommen.

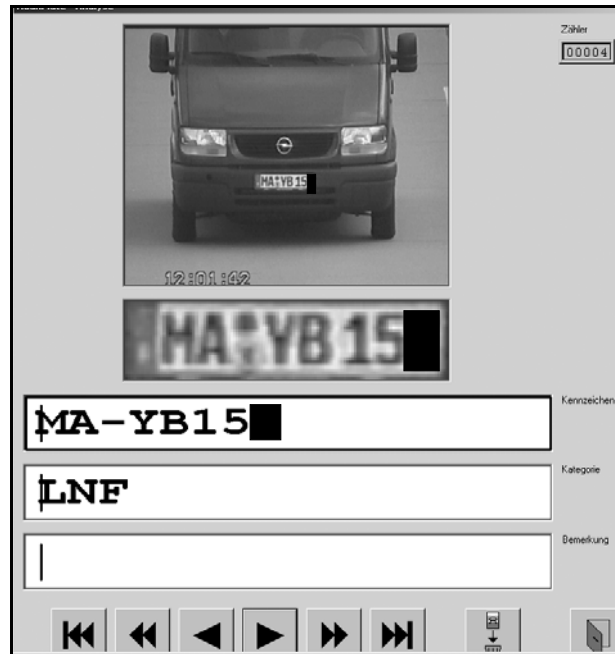


Bild 6: Bildverarbeitungs-Software zur automatischen Erfassung von Kfz-Kennzeichen (Fa. "recognitec")

Während der Messphasen stand pro Fahrspur eine Videokamera für die Kennzeichenaufnahmen zur Verfügung, so dass mit Ausnahme einer kurzen Pause (ca. 1 min), die zum Wechseln der Kassetten benötigt wurde, die gesamte, den Messquerschnitt passierende Fahrzeugflotte während eines Messtages erfasst werden konnte.

Die Videoaufnahmen wurden vom Dach des Messcontainers HRV2 (Nähe Deisterplatz) aus aufgezeichnet. Die Kameras wurden an Werktagen so ausgerichtet, dass jeweils das Frontkennzeichen (heranfahrende Fahrzeuge) aufgenommen wurde, da nur so Zugmaschinen mit Anhängern oder Sattelaufliegern erfasst werden können. Dagegen erfolgte die Ausrichtung an Sonn- und Feiertagen auf das Heckkennzeichen (abfahrende Fahrzeuge), um auch Motorräder zu erfassen, deren Anteil am Wochenende erhöht ist.

Aufgrund der relativ hohen Gebührensätze des Kraftfahrtbundesamtes wurden die Kennzeichenauswertungen auf insgesamt 34 Messstunden der drei IMP begrenzt. Es wurden insgesamt 31436 Fahrzeugkennzeichen ausgewertet.

Die Fahrzeugflotte in der Göttinger Straße ist sehr stark vom Regionalverkehr geprägt. Annähernd $\frac{3}{4}$ aller Pkw und Leichten Nutzfahrzeuge sind im Zulassungsbezirk Hannover (Stadt- und Landkreis Hannover) zugelassen (Bild 7 und 8). Lediglich Fahrzeuge der Nachbarkreise Hildesheim (6,6 % bzw. 4,6 %) und Nienburg (1,4 % bzw. 1,5 %) liefern noch nennenswerte Anteile. Auch beim Schwerverkehr stammen nahezu die Hälfte aller Fahrzeuge aus Hannover, weitere 20 % sind in den angrenzenden Kreisen zugelassen. Der Ausländeranteil liegt werktags mit 0,8 % beim Leichtverkehr und 4,4 % beim Schwerverkehr sehr niedrig und sonntags sogar noch darunter. Somit ist neben dem ausländischen Wirtschaftsverkehr auch der Anteil ausländischer Touristen gering.

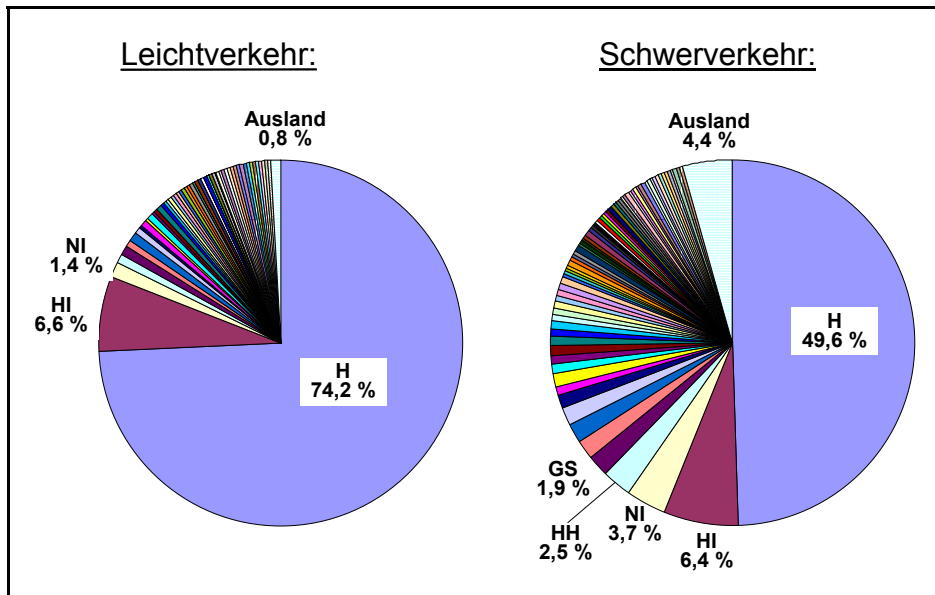


Bild 7: Herkunft nach Zulassungsbezirken von in der Göttinger Straße erfassten Fahrzeugen - Werktag

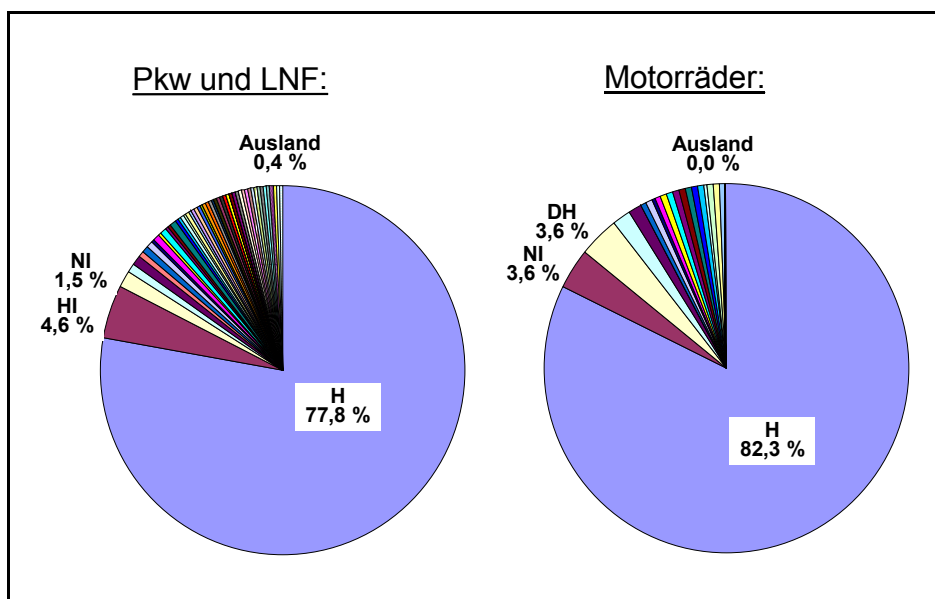


Bild 8: Herkunft nach Zulassungsbezirken von in der Göttinger Straße erfassten Fahrzeugen - Sonntage

Insgesamt wurden für 30996 Fahrzeuge die fahrzeugtechnischen Daten abgefragt. Für 30534 Kennzeichen wurden die Fahrzeugdaten vom Kraftfahrtbundesamt zurück übermittelt. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 98,5 %. Dabei gab es zwischen den verschiedenen Fahrzeugkategorien nur geringfügige Unterschiede (Motorräder: 99,4 %, Pkw und LNF: 98,4 %, Schwerverkehr: 99,3 %).

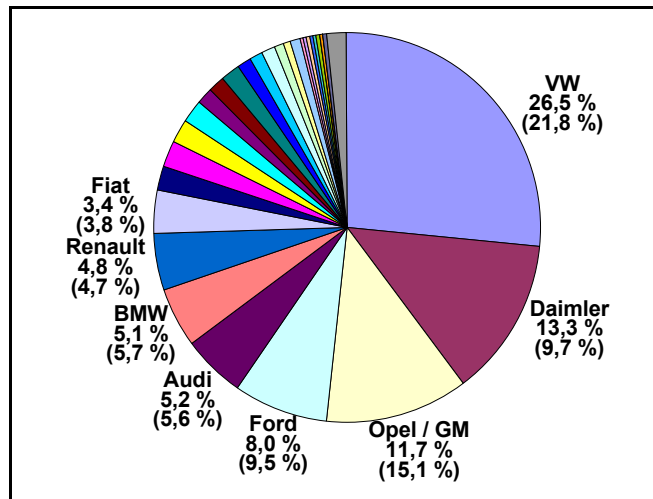


Bild 9: Kennzeichenauswertung in der Göttinger Straße - Verteilung nach Fahrzeugherstellern (Gesamtflotte). Werte in Klammern: Bestandsanteil in Deutschland

Die Verteilung der Fahrzeugflotte nach Herstellern ist in Bild 9 dargestellt. Die größten Anteile weisen Volkswagen (26,5 %) und Daimler-Chrysler (13,3 %), gefolgt von Opel, Ford und Audi auf. Im Vergleich zu den deutschlandweiten Zulassungszahlen treten Volkswagen- und Daimler-Chrysler-Fahrzeuge gehäuft auf, während die Hersteller Opel und Ford in der Göttinger Straße eher unterrepräsentiert sind.

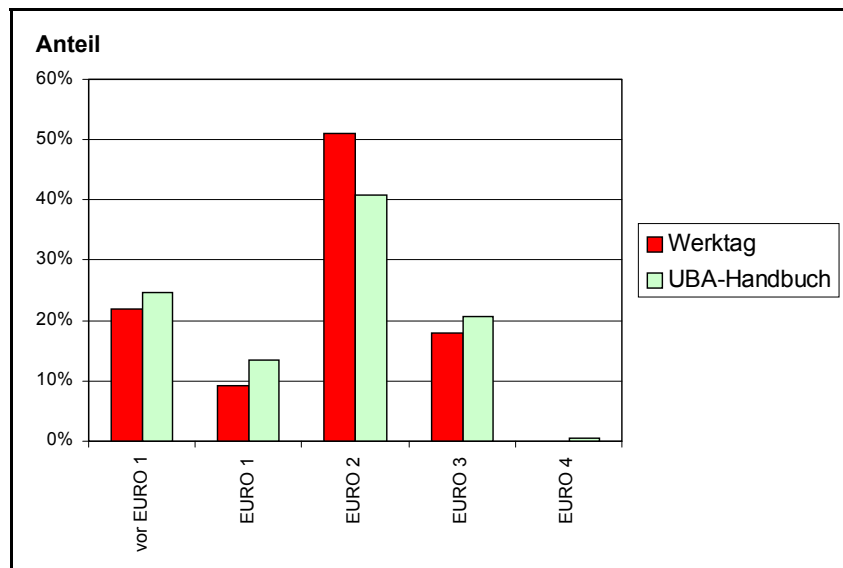


Bild 10: Fahrzeugkategorie Solo-Lkw - Differenzierung nach Abgaskonzept

Der Vergleich der Daten aus dem UBA-Handbuch mit den experimentell ermittelten Flottenzusammensetzungen ist exemplarisch für die Fahrzeugkategorien Solo-Lkw und Pkw in den Bildern 10,11,13 und 14 dargestellt. Bild 10 zeigt bei den Solo-Lkw eine Unterschätzung der EURO 2 - Fahrzeuge der Literaturdaten (UBA 1999) und leichte Überschätzungen älterer und neuerer Fahrzeugklassen. Die experimentell ermittelte Verteilung nach Massenklassen (Bild 11) zeigt eine deutliche Unterschätzung der schweren Fahrzeugklassen durch die Literaturdaten, was zu einer generellen Unterschätzung der realen Emissionsfaktoren führt. Es ist somit davon auszugehen, dass die Lkw-Emissionsraten in der Göttinger Straße bei Verwendung der Literaturdaten deutlich unterschätzt werden.

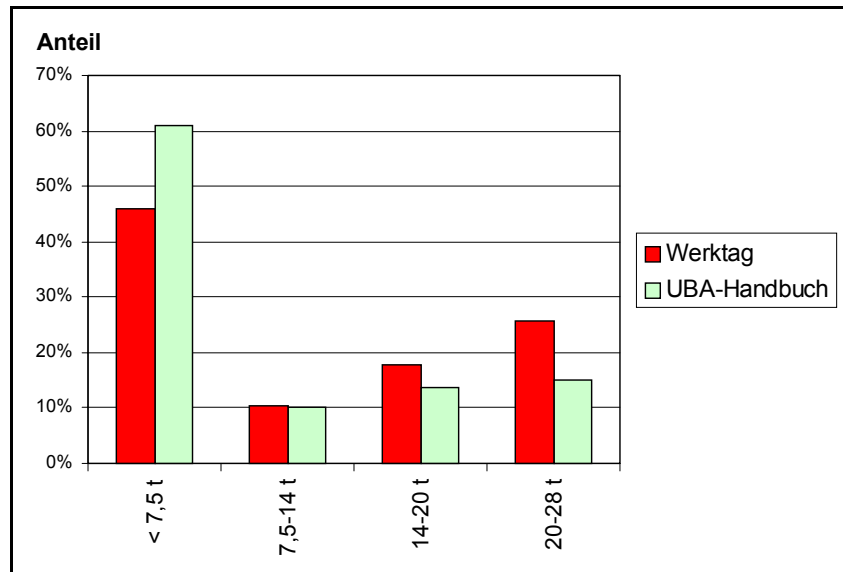


Bild 11: Fahrzeugkategorie Solo-Lkw - Differenzierung nach zulässiger Gesamtmasse

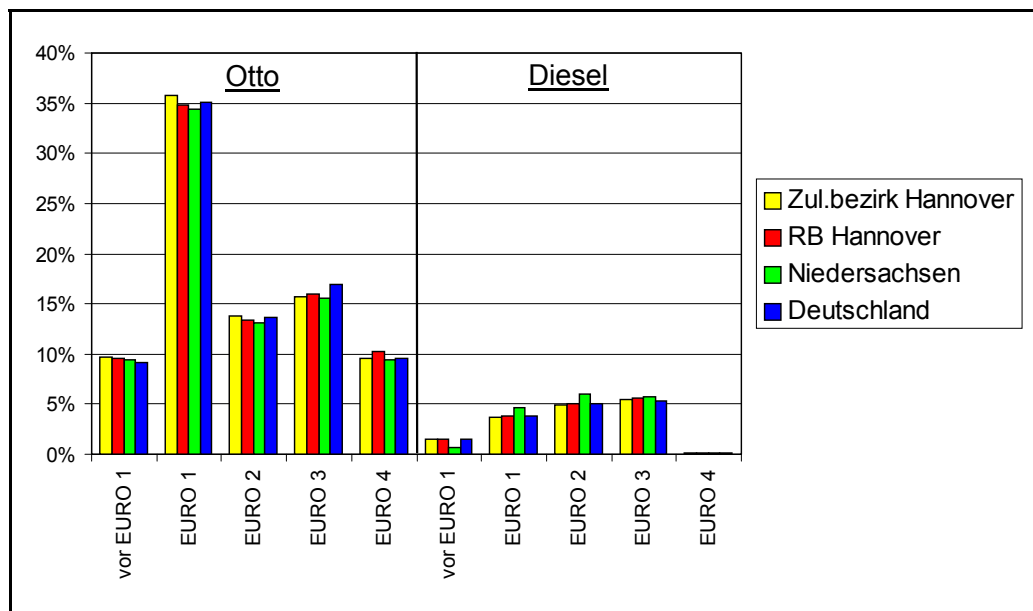


Bild 12: Bestandsdaten Pkw auf unterschiedlichen räumlichen Aggregierungsstufen, Stich-tag: 1.1.2002 (KBA 2002) (EURO 1: einschl. Anlage XXIII)

Die Bestandsdaten der Pkw wurden zum Stichtag 1.1.2002 auf unterschiedlichen räumlichen Aggregationsebenen ausgewertet (Zulassungsbezirk Hannover, Regierungsbezirk Hannover, Niedersachsen und Deutschland). Das Bild 12 zeigt bei allen vier Ebenen sehr gute Übereinstimmungen. Otto-Pkw des Abgaskonzepts EURO 1 (einschl. US-Norm nach Anlage XXIII) dominieren die Flotte mit einem Anteil von ca. 35 %. Regionale Besonderheiten in Hannover bezüglich Fahrzeugalter oder Antriebskonzept sind nicht zu erkennen.

Beim Vergleich der Bestandsdaten mit den experimentell ermittelten dynamischen Flottensammensetzungen (Bild 13) fällt auf, dass die alten Otto-Pkw (vor EURO 1) eine überdurchschnittlich hohe Fahrleistung aufweisen (ca. 14 % gegenüber ca. 9 % im Bestand). Dies führt zu einer Erhöhung der modellierten Emissionsraten. Erwartungsgemäß weisen auch die neueren Fahrzeuge (insbesondere diejenigen mit Dieselmotor) bei den Fahrleistungen höhere Anteile im Vergleich zum Bestand auf.

Die Differenzierung nach Antriebs- und nach Abgaskonzept ergibt bei den Literaturdaten (UBA-Handbuch) eine deutliche Verschiebung hin zu Fahrzeugen mit neuerer Schadstoffminderungstechnik bzw. zu niedrigeren Emissionsraten. Insbesondere der Anteil an EURO 3 - Pkw mit Otto-Motor wird deutlich überschätzt, während der Anteil an Pkw mit Abgaskonzepten vor EURO 1 deutlich unterschätzt wird. Der prognostizierte Diesel-Anteil (15,7 %) liegt deutlich unter dem realen von 23,8 %. Hier macht sich deutlich bemerkbar, dass die im UBA-Handbuch in der derzeitigen Version aus dem Jahre 1999 prognostizierten Pkw-Diesel-Anteile den drastischen Anstieg bei den Neuzulassungen in den letzten Jahren nicht enthalten.

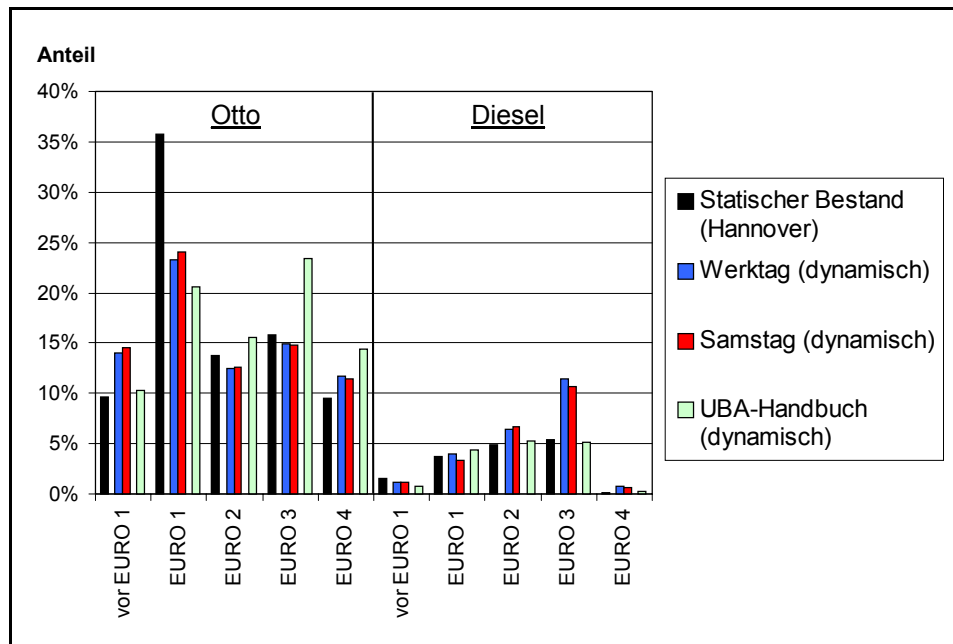


Bild 13: Fahrzeugkategorie Pkw, Differenzierung nach Abgas- und Antriebskonzept - Vergleich zwischen Bestandsdaten (KBA 2002), Messdaten und Literaturdaten (UBA 1999) (EURO 1: einschl. Anlage XXIII)

Die Pkw-Differenzierung nach Hubraumklassen (Bild 14) zeigt insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen UBA-Daten und Messdaten. Allerdings tritt auch hier die bereits erwähnte Unterschätzung der Fahrzeuge mit Dieselantrieb, insbesondere bei den kleineren Motoren, zu Tage.

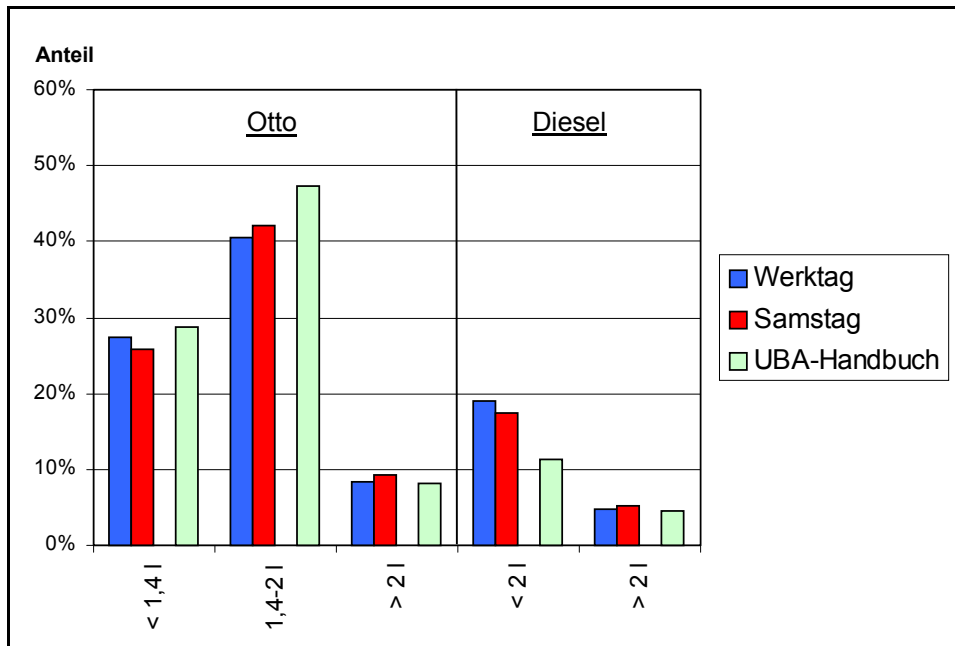


Bild 14: Fahrzeugkategorie Pkw, Differenzierung nach Antriebskonzept und Hubraumklasse - Vergleich zwischen Messdaten und Literaturdaten (UBA 1999)

2.3 Geschwindigkeitsverteilungen und Beschleunigungen (Fahrmuster)

Die Messungen der Fahrzeuggeschwindigkeiten erfolgten mit zwei Lasermessgeräten der Firma Riegler, Horn/Österreich (Typ „LR90-235/P“), dessen interne und externe Steuersoftware den speziellen Erfordernissen der automatischen und kontinuierlichen Messwerterfassung angepasst worden ist. Die Messgenauigkeit für die Geschwindigkeitsmessungen liegt nach Angaben des Herstellers bei Einzelmessungen innerhalb von ± 1 km/h. Das Messgerät wird leicht versetzt über der jeweiligen Fahrspur aufgebaut und der Messstrahl auf die Mitte der Fahrbahn in Entfernungen zwischen ca. 60 m und 130 m ausgerichtet (Bilder 15 und 16).

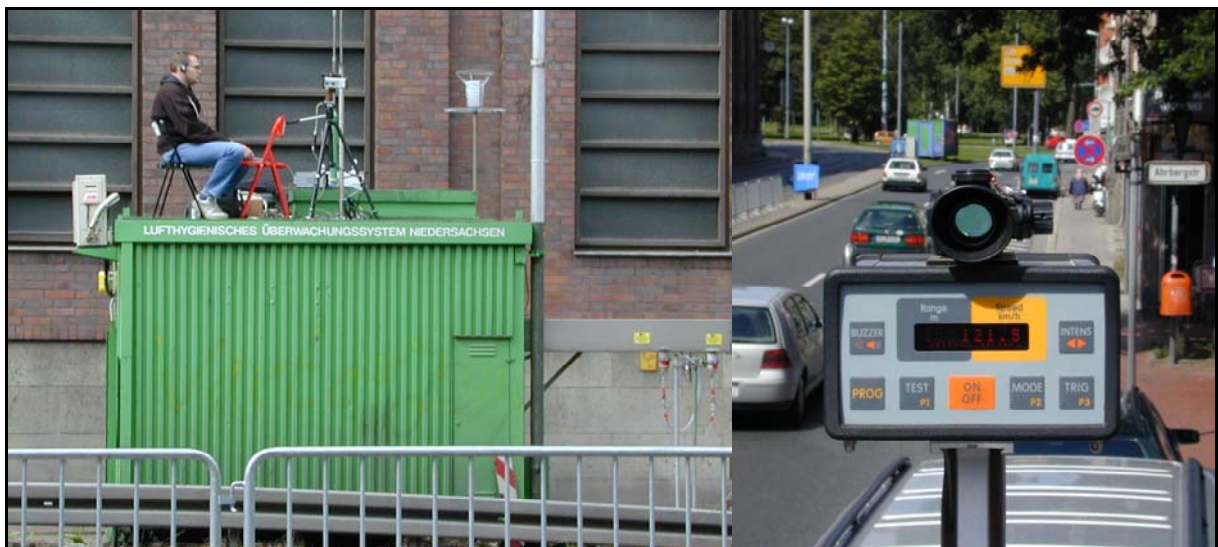


Bild 15: Geschwindigkeitsmessungen in der Göttinger Straße

Das Lasergerät ist an ein Notebook angeschlossen, das die Messdaten aufzeichnet und über eine Tastatureingabe die Zuordnung von frei wählbaren Attributen zu den jeweiligen Messwerten erlaubt. Somit ist über eine gleichzeitige Sichteinordnung der Fahrzeuge die Aufnahme von Geschwindigkeitsverteilungen getrennt nach Fahrzeugkategorien möglich.

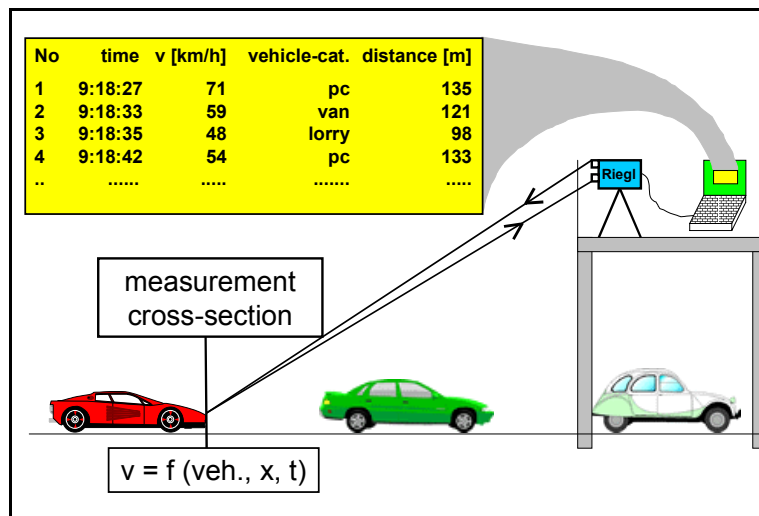


Bild 16: Grindprinzip der Geschwindigkeitsmessungen

Für die Geschwindigkeitsmessungen standen insgesamt zwei Messgeräte zur Verfügung. Da mit einem Messgerät jeweils nur eine Fahrspur abgedeckt werden kann, wurden die Geschwindigkeitsmessungen innerhalb eines Messintervalls durch Ortswechsel der Geräte gleichmäßig auf die vier Fahrspuren verteilt.

Während der Messintervalle der Intensivmessphasen (IMP) wurden insgesamt ca. 24.000 Geschwindigkeitsmessungen an Einzelfahrzeugen durchgeführt, davon ca. 22.000 an Fahrzeugen des Leichtverkehrs (LV) und ca. 2000 an Fahrzeugen des Schwerverkehrs (SV).

Das Bild 17 zeigt exemplarisch für den 8. August 2001 die Geschwindigkeitsprofile für die Gesamtflotte an zwei Straßenquerschnitten. Die oberen beiden Profile wurden am nördlichen Ende des Messabschnitts (kurz vor Ein-/Ausfahrt Deisterplatz), die beiden unteren am südlichen Ende des Messabschnitts (kurz vor der südlichen Fußgängerampel vor dem NLÖ-Gebäude) aufgenommen. Die beiden linken Profile stehen für die südliche, die beiden rechten Profile für die nördliche Fahrtrichtung.

Die Fahrzeuge weisen bei der Einfahrt in die Göttinger Straße in Fahrtrichtung Süd eine mittlere Geschwindigkeit von 41,8 km/h bei einer relativ engen Verteilung (Standardabweichung = 6,1 km/h) auf. Am südlichen Ende des Untersuchungsabschnitts liegt die mittlere Geschwindigkeit nur unwesentlich niedriger; jedoch ist die Verteilung der Einzelgeschwindigkeiten (Standardabweichung = 11,3 km/h) wesentlich breiter. Dies bedeutet, dass einige Fahrzeuge bei der Durchfahrt des Messabschnitts einen Beschleunigungsprozess durchlaufen, während andere Fahrzeuge durch die Betätigung der südlichen Fußgängerampel beeinflusst werden und ihre Geschwindigkeit reduzieren.

Die höchsten Geschwindigkeiten treten bei der Einfahrt in den Messabschnitt in Fahrtrichtung Nord auf (Bild 17: rechts unten). Hier ist auch die Geschwindigkeitsverteilung insgesamt am breitesten: Es treten einerseits sehr hohe Geschwindigkeiten auf (> 70 km/h), andererseits macht sich der Einfluss der südlichen Fußgängerampel bemerkbar. Die Ausfahrt aus dem Messabschnitt in den Deisterkreisel (Bild 17: rechts oben) ist sehr stark von der Ampelanlage am Deisterplatz beeinflusst. Hier tritt mit 33,9 km/h das niedrigste arithmetische Mittel auf.

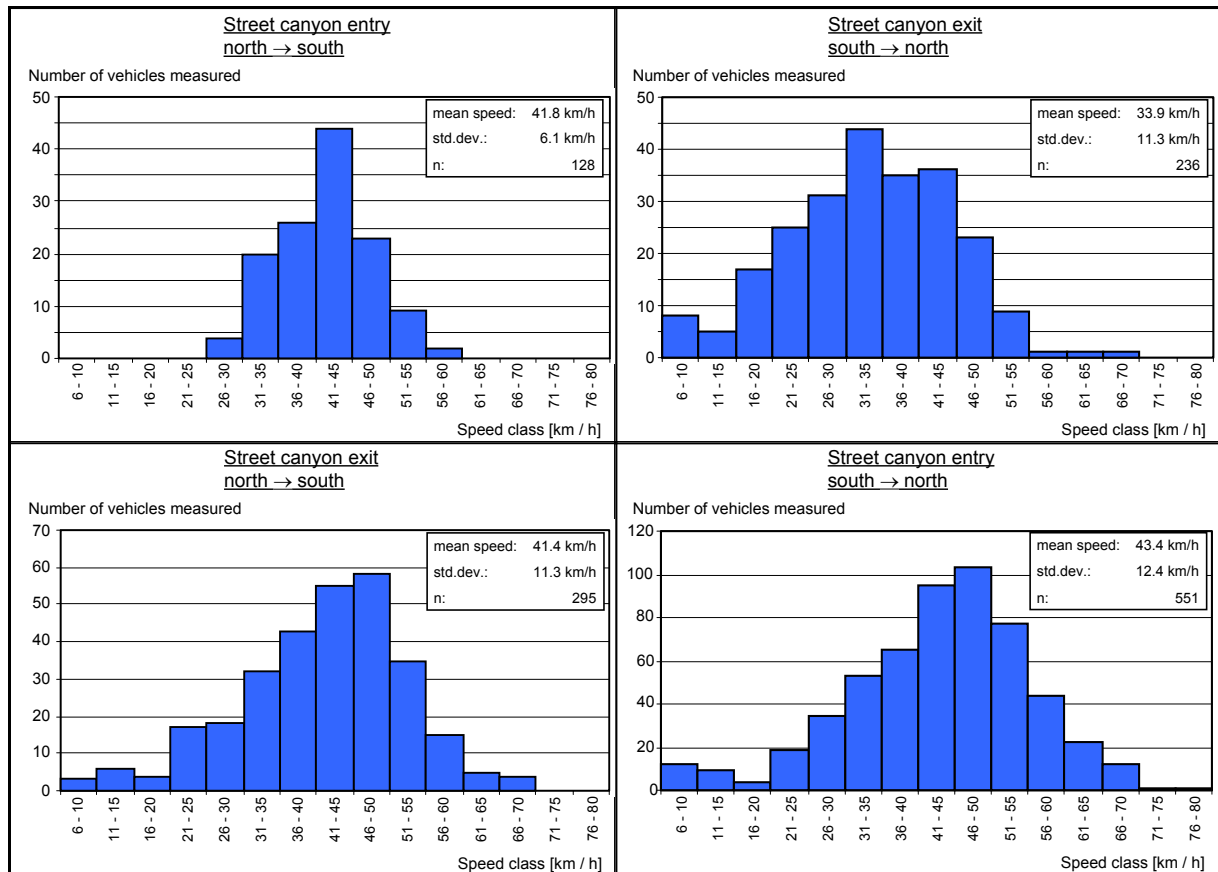


Bild 17: Geschwindigkeitsverteilungen an zwei Straßenquerschnitten (differenziert nach Fahrtrichtung) am Anfang und Ende des Untersuchungsabschnitts der Göttinger Straße (8.8.2001)

Zur Erfassung der Beschleunigungsprozesse längs des Untersuchungsabschnitts wurden spuraufgelöste Geschwindigkeitsmessungen über die gesamte Abschnittslänge durchgeführt und in 20-Meter-Abschnitten zusammengefasst.

In Bild 18 sind jeweils die mittleren Geschwindigkeiten und Standardabweichungen getrennt nach Leicht- und Schwerverkehr für die Spuren 1 und 2 (Fahrtrichtung Süd) dargestellt. Als Bezugsquerschnitt für die Längenangaben an der x-Achse wurde die Haltelinie der südlichen Fußgängerampel in Fahrtrichtung Süd gewählt. Es zeigt sich auf beiden Fahrspuren ein einheitlicher Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten. Die Verteilungen werden mit zunehmender Fahrlänge breiter, was sich in der Zunahme der Standardabweichungen widerspiegelt (s.o.). Die mittleren Geschwindigkeiten des Leichtverkehrs liegen bei Spur 2 um ca. 5,8 km/h über denjenigen von Spur 1. Der Schwerverkehr ist im Vergleich zum Leichtverkehr im Mittel um ca. 2,3 km/h langsamer.

Anders stellen sich die Verhältnisse in Fahrtrichtung Nord dar (Bild 19). Hier wirkt sich die Behinderung des Verkehrsflusses durch die Ampelanlage am Deisterplatz in einer Abnahme der mittleren Geschwindigkeiten ab 40 Metern (Spur 3) bzw. ab 80 Metern (Spur 4) Entfernung zur südlichen Fußgängerampel von ca. 50 km/h (Spur 3) bzw. ca. 40 km/h (Spur 4) auf unter 30 km/h aus. Über die Gesamtlänge betrachtet liegt die mittlere Geschwindigkeit bei Spur 3 um 5,3 km/h über derjenigen von Spur 4. Der Schwerverkehr ist auch in dieser Fahrtrichtung geringfügig langsamer als der Leichtverkehr (Differenz: 3,3 km /h).

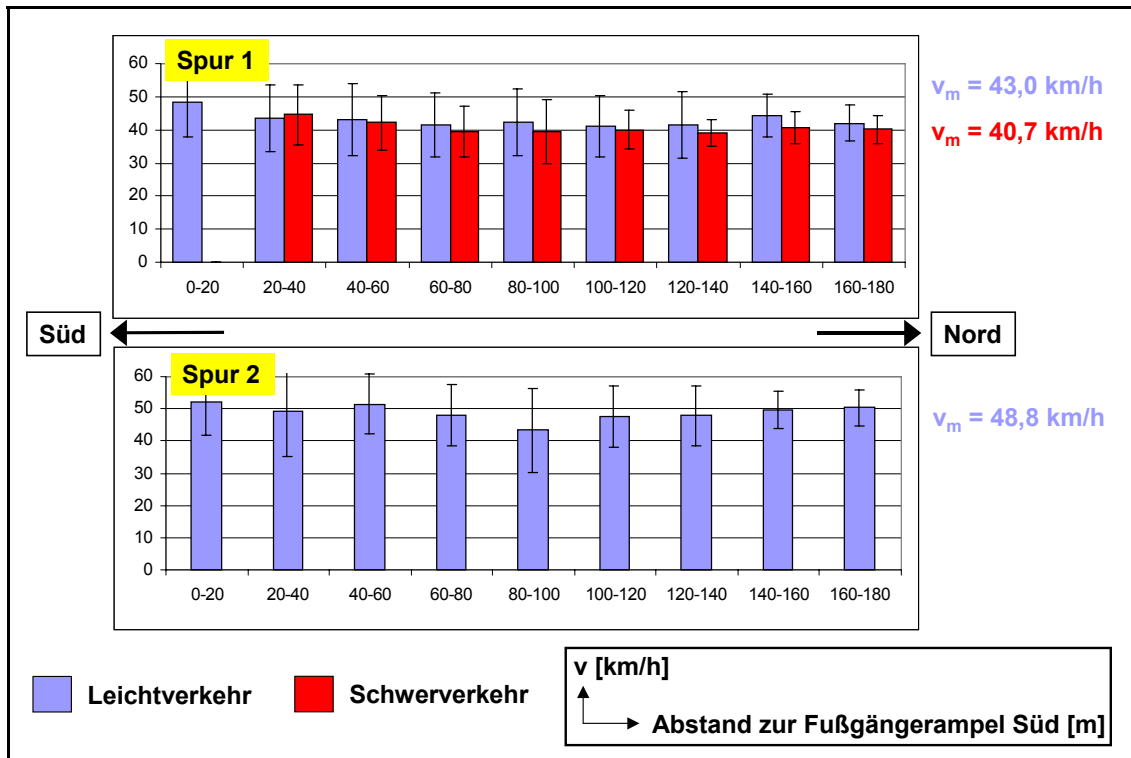


Bild 18: Mittlere Geschwindigkeiten und Standardabweichungen der Einzelwerte in räumlicher Auflösung längs des Straßenabschnitts (20-Meter-Schritte) - Fahrtrichtung Süd

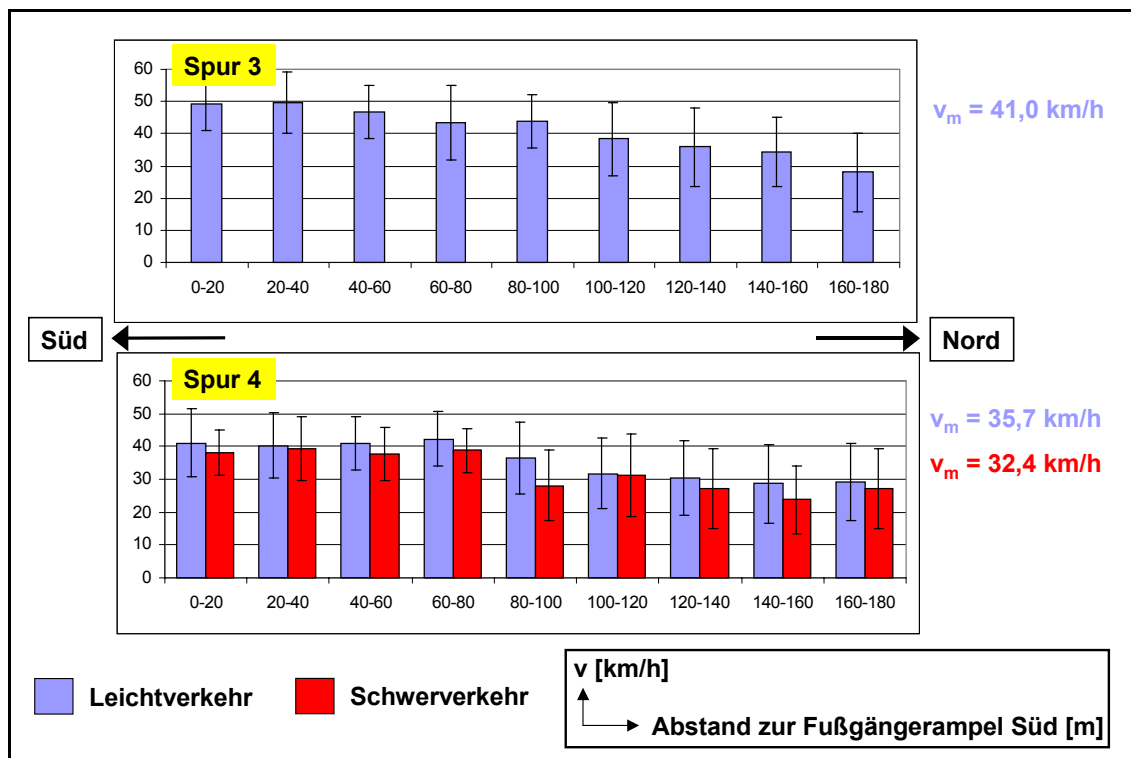


Bild 19: Mittlere Geschwindigkeiten und Standardabweichungen der Einzelwerte in räumlicher Auflösung längs des Straßenabschnitts (20-Meter-Schritte) - Fahrtrichtung Nord

Das fast völlige Fehlen des Schwerverkehrs an Sonntagen und das insgesamt niedrigere Verkehrsaufkommen führt zu einer erheblichen Erhöhung der gefahrenen Geschwindigkeiten (Bild 20). Insbesondere in Fahrtrichtung Nord liegen die sonntags gemessenen mittleren

Geschwindigkeiten mit 58,2 km/h (Spur 3) bzw. 49,0 km/h (Spur 4) deutlich über den Werten der Werktage von 46,6 km/h bzw. 40,2 km/h. Aber auch in Fahrtrichtung Süd ergeben sich am Sonntag signifikant höhere Geschwindigkeiten. Hier liegen die Unterschiede bei ca. 4 km/h (Spur 1) und ca. 7 km/h (Spur 2).

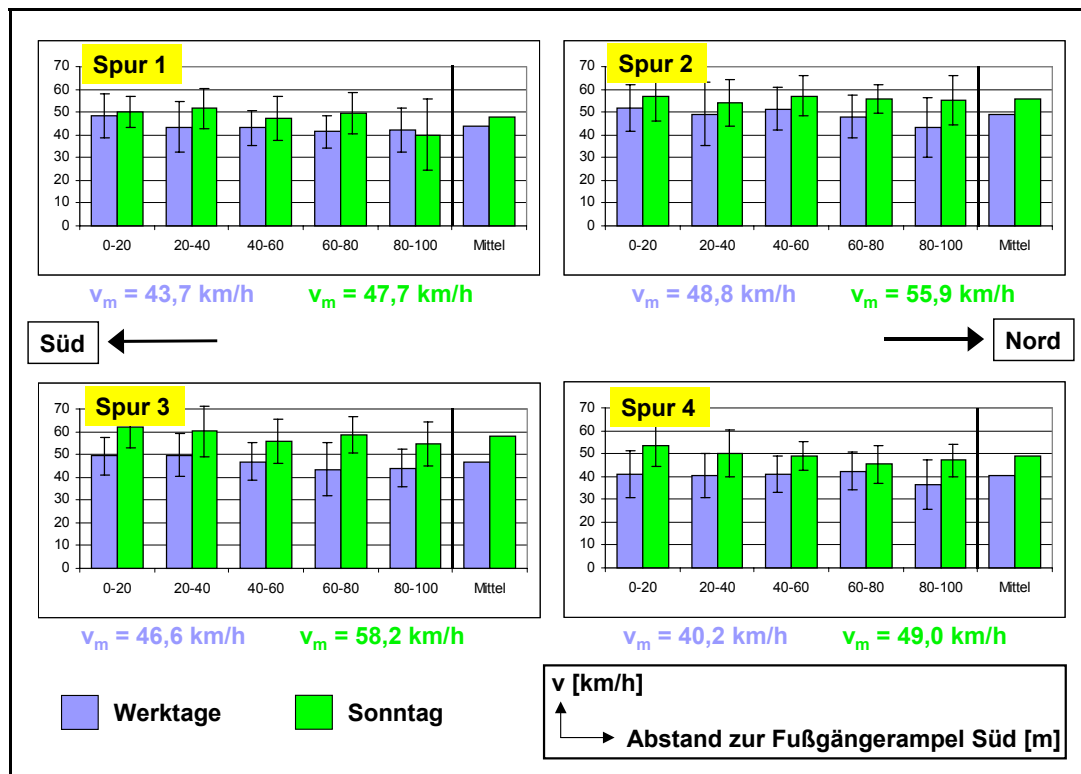


Bild 20: Mittlere Geschwindigkeiten und Standardabweichungen der Einzelwerte - Vergleich zwischen Werktagen und Sonntagen (Nummerierung der Fahrspuren durchgehend von West nach Ost)

Die Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen zeigen deutlich, dass für eine mikroskopische Emissionsmodellierung das Beschleunigungsverhalten der Fahrzeuge unbedingt berücksichtigt werden muss. Die Verwendung von längengemittelten Emissionsfaktoren (z.B. UBA 1999) kann bei der geforderten hohen räumlichen Auflösung zu erheblichen systematischen Abweichungen zwischen modellierten und realen Emissionsraten führen.

Die Messungen zeigen darüber hinaus, dass das Fahrverhalten an einem Straßenabschnitt erheblichen zeitlichen Schwankungen unterworfen sein kann. Für die Modellierung von zeitlich hoch aufgelösten Emissionen für längere Perioden ist es deshalb erforderlich, die zeitliche Variabilität der Fahrmuster durch geeignete Methoden zu erfassen.

2.4 Ampelschaltungen

Der Verkehrsfluss am Untersuchungsabschnitt wird maßgeblich von drei Ampelanlagen beeinflusst:

- manuelle Fußgängerampel vor Eingang des NLÖ-Gebäudes (südliche Fußgängerampel)
- manuelle Fußgängerampel am Deisterplatz, Einfahrt Göttinger Straße, Fahrtrichtung Süd (nordwestliche Ampel)
- automatische Ampel am Deisterplatz, Ausfahrt Göttinger Straße in den Deisterkreisel, Fahrtrichtung Nord (nordöstliche Ampel)

Die Phasenschaltungen der beschriebenen Ampelanlagen wurden mit Hilfe einer eigens konstruierten lichtempfindlichen Sonde (Bild 21) während der IMP kontinuierlich überwacht und mit angeschlossenen Datenloggern (Zeitpunkt und Phasendauer) aufgezeichnet.



Bild 21: Sonde zur Erfassung der Ampelschaltungen (Eigenentwicklung IER)

In den Diagrammen des Bilds 22 sind die elektronisch aufgezeichneten Rotphasen für den Verkehr beispielhaft für den 11.4.2003 im Tagesgang dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die automatisch gesteuerte Nordost-Ampel in regelmäßigen Intervallen geschaltet wird. Die Phasendauer variiert dabei in Abhängigkeit vom jeweiligen Verkehrsaufkommen, das über im Straßenbelag eingelassene Induktionsschleifen erfasst wird. Dagegen weisen die beiden manuell gesteuerten Ampelanlagen deutlich erkennbare Lücken und Häufungen im Tagesgang auf.

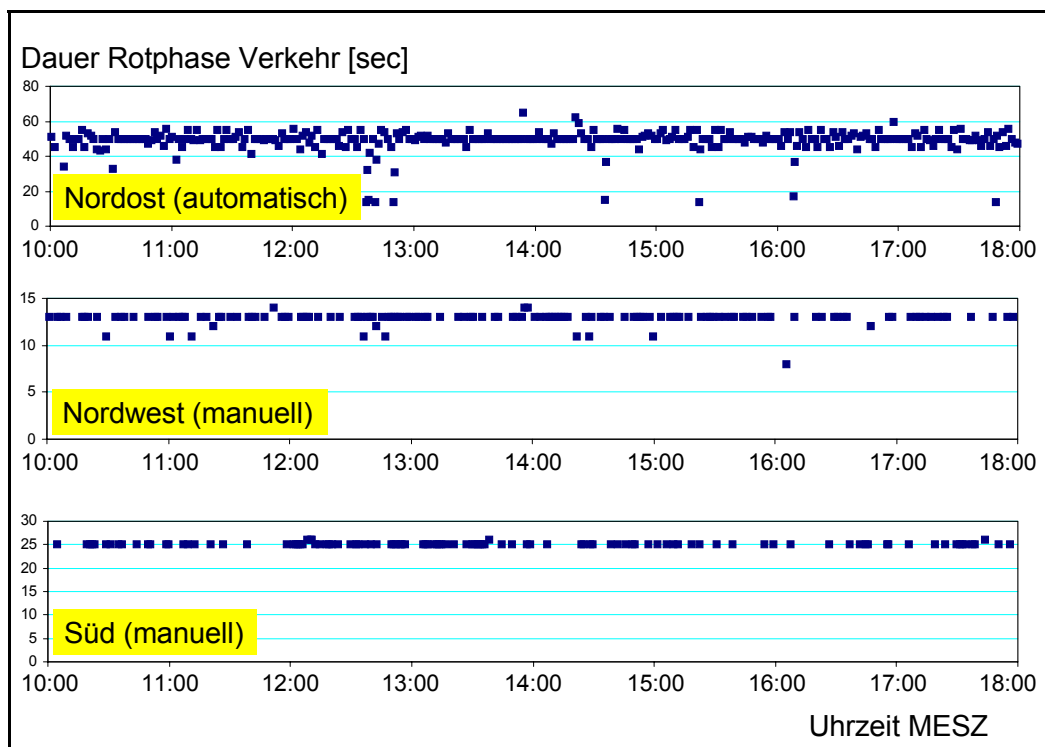


Bild 22: Ampelschaltungen und Intervalllängen im Tagesgang (11.4.2003)

Insbesondere die südliche Fußgängerampel hat einen erheblichen Einfluss auf den Verkehrsablauf bzw. die gefahrenen Fahrmuster in der Göttinger Straße. Die Grünphasen der südlichen Fußgängerampel treten dabei ausschließlich nach manueller Anforderung auf und sind nicht zeitlich mit den Phasen der Lichtsignalanlage am Deisterplatz gekoppelt. Das Bild 23 zeigt für ausgewählte Tage der IMP die Häufigkeiten der Ampel-Schaltvorgänge (pro Stunde) im Tagesgang. Stark ausgeprägte Spitzen treten werktags während der Mittagsstunden zwischen 12 und 14 Uhr Ortszeit auf. Diese Mittagsspitze ist vermutlich auf die Mittagspause der NLÖ-Mitarbeiter zurückzuführen. Weitere, schwächer ausgeprägte Häufungen treten nachmittags ab 15 Uhr auf, jedoch nicht freitags (Feierabend). Die Tagesgänge der Wochenendtage sind auf niedrigem Niveau vergleichsweise gering profiliert.

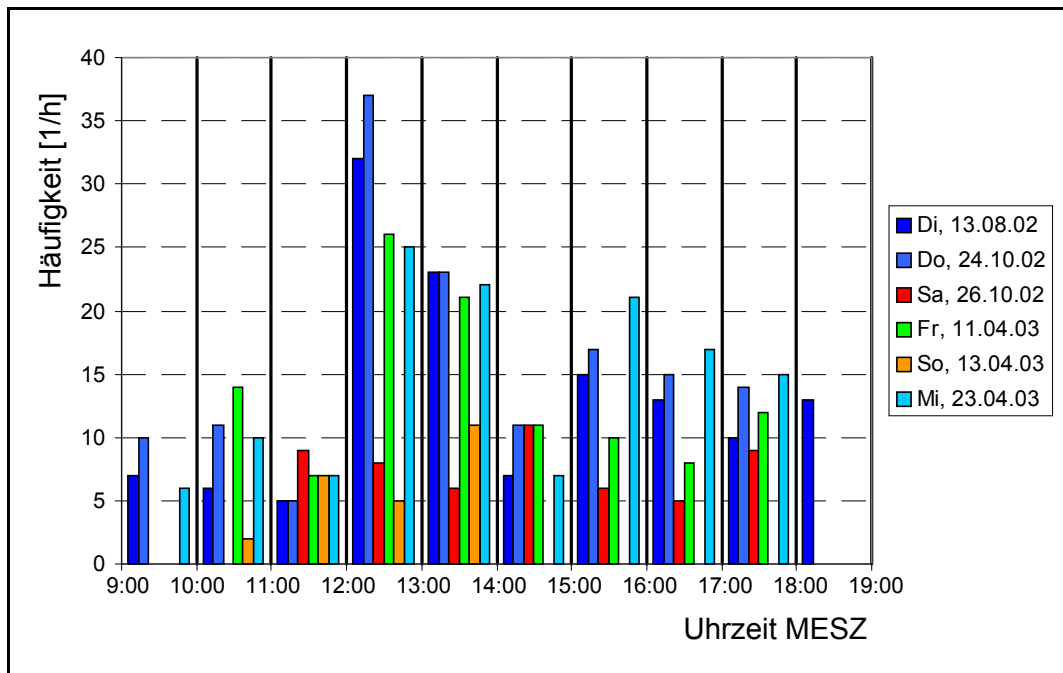


Bild 23: Häufigkeiten der Schaltungen der südlichen Fußgängerampel - Tagesgänge ausgewählter Messtage

Die Stunden mit stark gehäufter Anzahl der Ampelschaltungen sind mit drastisch erhöhten Beschleunigungs- und Verzögerungsanteilen bzw. anderen Fahrmustern im Vergleich zu Stunden mit frei fließendem Verkehr verbunden. Somit haben die Ampelschaltungen einen starken Einfluss auf das Emissionsverhalten der Fahrzeuge. Es wird deutlich, dass das Fahrverhalten nicht nur täglichen Schwankungen (Werktage <-> Wochenende), sondern auch erheblichen Variationen innerhalb eines Tages unterliegt.

2.5 Abgestellte Fahrzeuge und Parkdauerverteilungen

Emissionen von leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) stammen im Innerortsbereich zu einem Großteil aus Verdampfungs- und Verdunstungsprozessen (VDI 2003). Insbesondere für den Prozess der Heiß-/Warmabstellverluste ist die Abstelldauer nach einer Fahrt eine maßgebliche Größe für die Menge an freigesetzten VOC.

Im kleinräumigen Untersuchungsgebiet befinden sich zwei größere Baumärkte mit entsprechend hohen Abstellplatz-Umschlagszahlen. Für einen dieser Baumärkte wurde vor Ort die Verteilung der Abstelldauern experimentell ermittelt (Bild 24). Es ergab sich ein arithmetisches Mittel von 32,2 Minuten bei einem Median von 25 min. Die ermittelte Abstelldauerverteilung fließt unmittelbar in den Rechenprozess der Emissionsmodellierung ein.

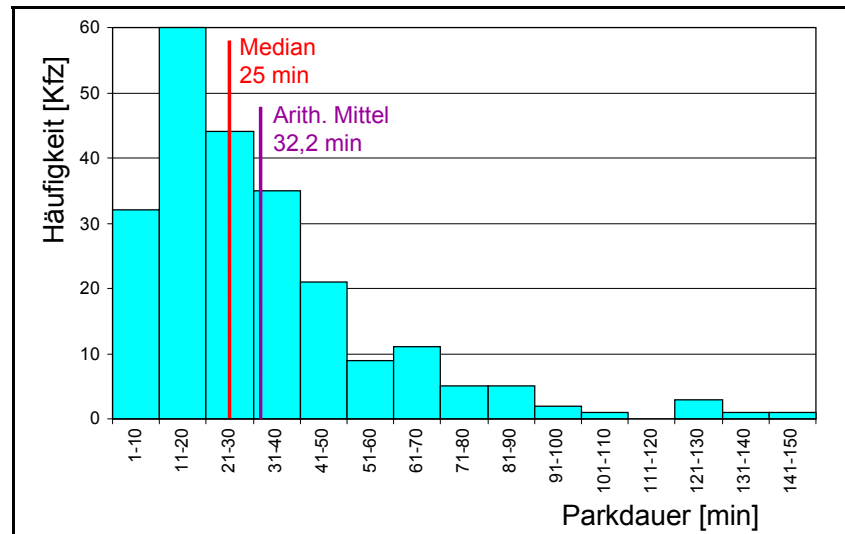


Bild 24: Verteilung der Parkdauern auf dem Parkplatz des „OBI-Baumarkts“, Hannover-Linden

2.6 Straßenlängsneigung

Die Längsneigung eines Straßenabschnitts hat einen erheblichen Einfluss auf das Emissionsverhalten von Kraftfahrzeugen. Bei ähnlichen Verkehrsstärken in beide Fahrtrichtungen steigt die Gesamtemission mit zunehmender Längsneigung an, da die Emissionszunahme bei Bergauffahrten die Emissionsabnahme bei Bergabfahrten überwiegt.

Der Höhenverlauf der Göttinger Straße wurde anhand der in den vorliegenden Flurkarten (Maßstab 1:1000) enthaltenen Aufrissdaten ermittelt. Es ergibt sich im Bereich des Messabschnitts ein geringfügiger Anstieg in Richtung Nord von ca. 0,8 Meter Höhendifferenz auf 200 Meter Straßenlänge, was einer mittleren Längsneigung von 0,4 % entspricht. Da für solch kleine Längsneigungen keine Korrekturfaktoren in den aktuellen Datenbanken für Emissionsfaktoren verfügbar sind, wurden die Emissionsmodellierungen unter der Annahme durchgeführt, dass am Messabschnitt keine Längsneigung vorliegt.

3 Emissionsmodellierungen

Emissionsmodellierungen wurden auf insgesamt fünf verschiedenen Ebenen durchgeführt. Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über die einzelnen Ebenen und die jeweilige räumliche Auflösung und das verwendete Straßennetz.

Tab. 5: Ebenen der Emissionsmodellierungen und räumliche Verschneidungen

Ebene:	Geographie	Fläche	räumliche Auflösung	Straßennetz
Mesoskala - Ebene 1	Zentraleuropa	2144 km x 2144 km	16 km x 16 km	Fernstraßen
Mesoskala - Ebene 2	Niedersachsen und Umgebung	352 km x 336 km	4 km x 4 km	A, B, L
Mesoskala - Ebene 3	Hannover / Braunschweig	112 km x 60 km	1 km x 1 km	A, B, L, K
Mikroskala 1	Umgebung Göttinger Straße	1 km x 1 km	1,5 m x 1,5 m bis 15 m x 15 m	alle Straßenabschnitte (160)
Mikroskala 2	Göttinger Straße	200 m x 25 m	variabel	Fahrstreifen

3.1 Mikroskopische Kfz-Emissionsbestimmung

Grundsätzlich gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Kfz-Emissionsbestimmung auf mikroskopischer Ebene (VDI 2003). Beide Varianten basieren auf einer Beschreibung des Verkehrsflusses. Als Eingangsdaten sind die Ergebnisse der in Abschnitt 2 beschriebenen experimentellen Verkehrserhebungen erforderlich. Die weitere Verwendung dieser Daten unterscheidet die Emissionsberechnung aus der Verkehrsflussparametrisierung (unmittelbare Verwendung der gemessenen Verkehrsdaten) von der aus der Verkehrsflussmodellierung (zwischengeschaltetes Verkehrsmodell). Während bei der messtechnisch aufwändigen Verkehrsflussparametrisierung in der Regel Emissionsfaktoren zum Einsatz kommen, erfordert die hoch aufgelöste Emissionsberechnung über Emissionsfunktionen ein detailliertes Verkehrsflussmodell.

3.1.1 Emissionsbestimmung durch Verkehrsflussparametrisierung

In die auf der Verkehrsflussparametrisierung basierenden Berechnung der Emissionen der Göttinger Straße fließen alle experimentell ermittelten Verkehrsdaten ein (in Bild 25 gelb unterlegt). Die Ergebnisse der manuellen Zählungen liefern in Kombination mit den Daten der Dauerzählstelle kontinuierliche Verkehrsstärken für Fahrzeugkategorien. Diese werden anhand der Ergebnisse der Kennzeichenauswertungen in Fahrzeugschichten differenziert. Die Fahrmuster werden fahrtrichtungsaufgelöst aus den Geschwindigkeitsmessungen und den Ampelschaltungen abgeleitet.

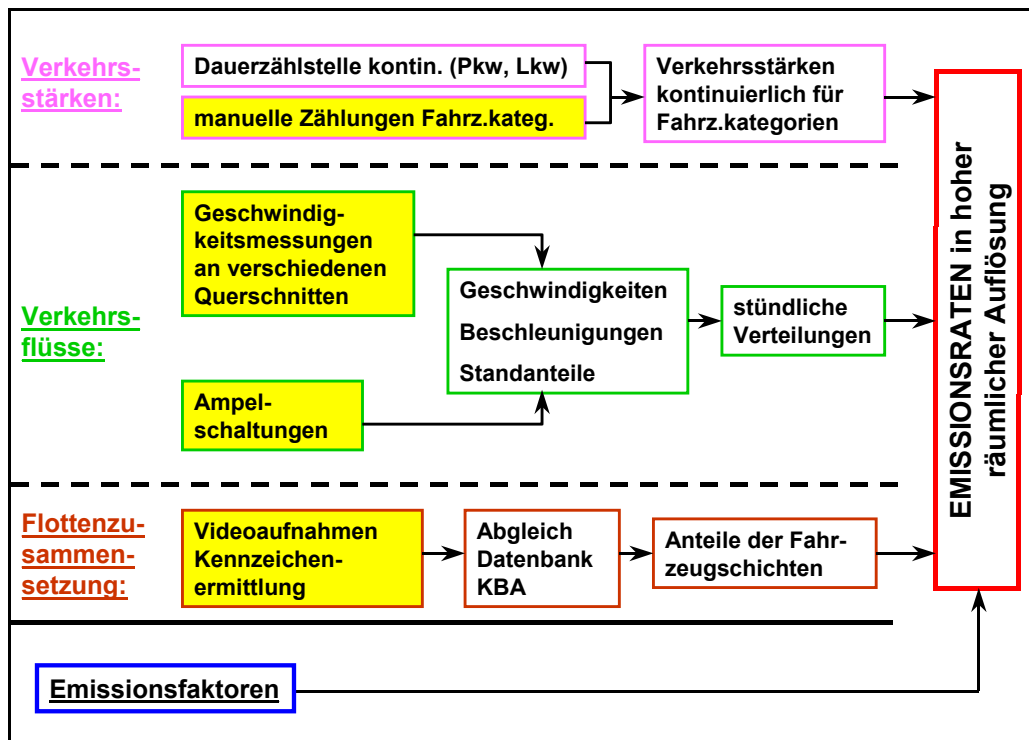


Bild 25: Grundprinzip der mikroskopischen Modellierung von Warm-Emissionen des Straßenverkehrs (Verkehrsflussparametrisierung)

Die Abgas-Emissionsfaktoren der einzelnen Fahrzeugschichten wurden dem UBA-Handbuch für Emissionsfaktoren (UBA 1999) entnommen. Zusätzlich wurde der Ruß-Anteil an den Partikelemissionen bestimmt (VDI 2003).

Aufgrund von Mess- und Übertragungsunsicherheiten können die erhobenen Verkehrsdaten nicht als fehlerfrei betrachtet werden. Die Fehler der Verkehrsdaten sowie die daraus folgenden Fehlerbandbreiten sind in Kapitel 4 beschrieben.

3.1.1.1 Kaltstartzuschläge

Emissionen von Fahrzeugen, deren Motor am Messquerschnitt noch nicht die Betriebstemperatur erreicht hat, werden durch zusätzliche Einbeziehung von Kaltstartzuschlägen berechnet. Kalte bzw. kühle Motoren sind i.d.R. bei Fahrzeugen anzutreffen, die mit kaltem Motor gestartet worden sind und deren Fahrstrecke zwischen Start und Messquerschnitt weniger als 5 km beträgt (VDI 2003).

Zusätzlich zu den notwendigen Datensätzen der Modellierung von Warm-Emissionen erfordert die Ermittlung der Kaltstartzuschläge in der Göttinger Straße die Einbeziehung von Fahrtweitenverteilungen am Untersuchungsabschnitt. Oftmals werden hier mittlere Literaturwerte verwendet, die einer bestimmten Straßenkategorie zugeordnet werden. Diese können aber im Einzelfall erheblich von den realen Verhältnissen vor Ort abweichen. Für die durchgeführten Modellierungen standen Ergebnisse eines Verkehrsflussmodells für Hannover zur Verfügung, das zeitlich gemittelte Fahrtweitenverteilungen differenziert nach Fahrtrichtungen lieferte.

Die für die Modellierung von Kaltstartemissionen ebenfalls essentiellen Lufttemperaturen wurden in ½-h-Auflösung dem Datensatz des LÜN-Messnetzes entnommen. Diese Daten sind ebenfalls in der VALIUM-Validierungsdatenbank enthalten.

3.1.1.2 Verdampfungsemissionen

Man unterscheidet drei wesentliche Quellgruppen von VOC-Verdampfungsemissionen:

- Heiß- / Warmabstellverluste (Hot Soak Losses)
- Tankatmung (Diurnal Losses)
- Running Losses

Alle drei Quellgruppen wurden im Rahmen der mikroskopischen Emissionsmodellierung berücksichtigt. Die Anzahl an geparkten Fahrzeugen im kleinräumigen Untersuchungsgebiet wurde anhand von Begehungen bestimmt. Die zur Ermittlung der Verdampfungsemissionen notwendigen Parkdauerverteilungen wurden im Rahmen dieses Projekts experimentell ermittelt (s. Kap. 2.5). Weitere notwendige Eingangsdaten (z.B. Dampfdruck des Kraftstoffs, spezielle Emissionsfaktoren) wurden der Literatur entnommen (VDI 2003).

3.1.1.3 Ergebnisse

Exemplarisch für die mikroskopische Emissionsmodellierung auf Basis der Verkehrsflussparametrisierung ist in Bild 26 für den 24.10.2002 der Emissionstagesgang für die Schadstoffklassen CO, NO_x (als NO₂) und NMHC dargestellt. Beim CO sind die morgendliche und vor allem die nachmittägliche Verkehrsspitze gut erkennbar. Dagegen ist der Verlauf beim NO_x aufgrund des stärkeren Einflusses des Schwerverkehrs homogener.

Die in Bild 26 enthaltenen Kurven mit der Bezeichnung „alt“ beziehen sich auf die Verkehrsstärkedaten der automatischen Dauerzählstelle in der ursprünglichen Interpretation der Daten, dass sämtliche Fahrzeuge, die als „Lkw-ähnlich“ klassifiziert worden sind, dem Schwerverkehr zugeordnet werden (s. Kap. 2.1.3). Die Kurven mit der Bezeichnung „neu“ dagegen basieren auf den im Rahmen dieses Projekts gewonnenen Erkenntnissen über die Verkehrszusammensetzung in der Göttinger Straße. Demnach ist der Schwerverkehr-Anteil deutlich geringer als ursprünglich angenommen.

Der in Realität niedrigere Anteil des Schwerverkehrs macht sich insbesondere bei den NO_x-Emissionen bemerkbar, die im Vergleich zum alten Ansatz nur noch halb so hoch sind. Auch bei den Kohlenwasserstoffen (NMHC) tritt eine deutliche Verringerung der Modellemissionen auf, während beim CO aufgrund der ähnlichen Emissionsfaktoren zwischen Schwer- und Leichtverkehr so gut wie kein Effekt bemerkbar ist.

Es muss somit davon ausgegangen werden, dass alle in der Vergangenheit auf den Zählstellendaten in der Göttinger Straße basierenden NO_x-Emissionsmodellierungen deutlich zu hoch liegen. Gegenläufige Tendenzen, wonach die NO_x-Emissionsfaktoren in der für die Berechnungen verwendeten Fassung des „Handbuchs für Emissionsfaktoren“ v1.2 (UBA 1999) aufgrund unvollständiger Kennfelder systematisch unterschätzt werden, wurden im Rahmen dieses Projekts nicht berücksichtigt. NMHC und CO sind hiervon nicht betroffen

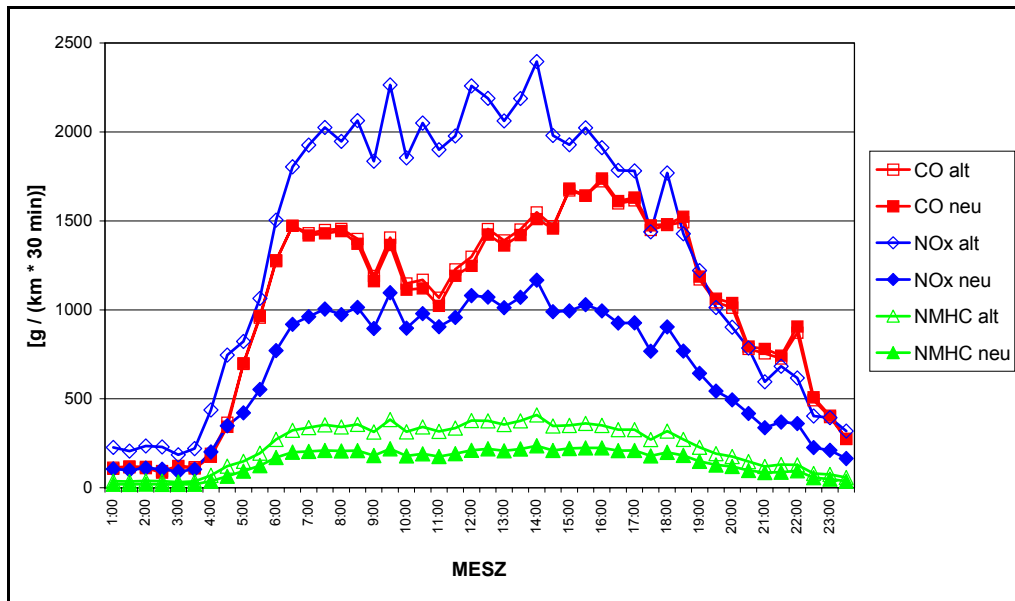


Bild 26: Emissionsraten der Göttinger Straße im Tagesgang (24.10.2002) - Vergleich zwischen alter und neuer Datenbasis über Verkehrsstärken und -zusammensetzung

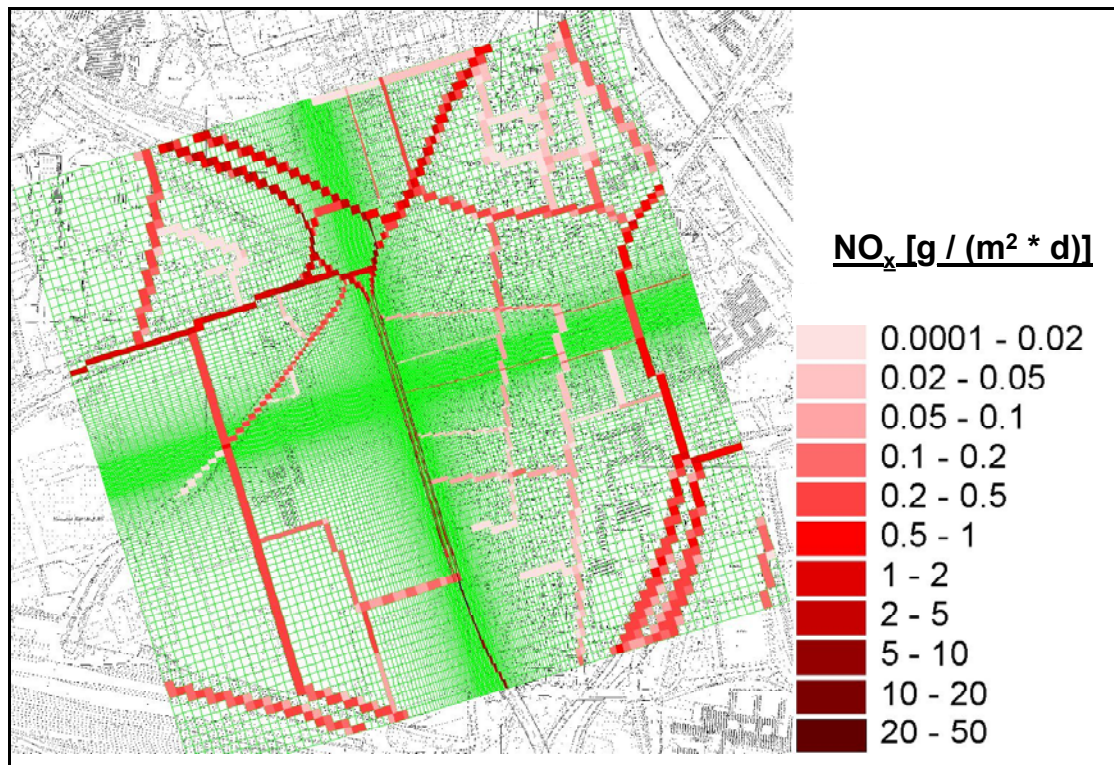


Bild 27: NO_x -Verkehrsemissionsraten als mittlere Tageswerte für Werktage - verschnitten mit dem mikroskopischen Gitter des kleinräumigen Untersuchungsgebiets (152 x 158 Zellen, 1 km^2 , nicht äquidistant)

Das Bild 27 zeigt berechnete tagesmittlere NO_x -Emissionsraten (Werktage) für das kleinräumige Untersuchungsgebiet, verschnitten mit dem mikroskopischen Gitter.

3.1.2 Emissionsbestimmung durch Verkehrsflussmodellierung (Volkswagen AG)

Wesentliche Eingangsvoraussetzung für die Berechnung der Emissionen durch die Verkehrsflussmodellierung ist die Kenntnis der Flottenzusammensetzung. Die aus der KBA-Auswertung gewonnenen Informationen über das Abgasemissionsverhalten der Fahrzeuge werden auf die Systematik des Simulationsmodells übertragen. D. h., die Fahrzeuge werden wie bei der Parametrisierung aufgrund Ihrer Eintragung im Fahrzeugschein einer emissionshomogenen Fahrzeugschicht zugeordnet. Im Gegensatz zur Vorgehensweise beim HBEFA (Parametrisierung) erfolgt bei den Pkw keine Unterscheidung in verschiedene Hubraumklassen.

Für die Berechnung der Warmemissionen von Pkw und LNF wird auf v/v*a-Kennfelder zugegriffen, so dass jeder Fahrsituation, charakterisiert durch eine bestimmte Geschwindigkeit und Beschleunigung, sekundlich ein entsprechender Emissionswert zugeordnet werden kann. Diese Emissionswerte werden dann in benutzerdefinierte Segmente fahrspurfein abgelegt. Ein Beispiel für ein solches Kennfeld ist in Bild 28 für die CO-Emissionen der Pkw-Klasse „B_E1“ (Otto EURO 1) dargestellt.

Die Berechnung von Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge orientiert infolge einer Vielzahl an verschiedenen Gewichts- und Emissionsklassen an einer anderen Systematik. Für SNF stehen leistungs- und drehzahlnormierte Kennfelder zur Verfügung. Auf diese Weise können verschiedene Gewichtsklassen einer emissionshomogenen Fahrzeugschicht über ein Kennfeld abgebildet werden.

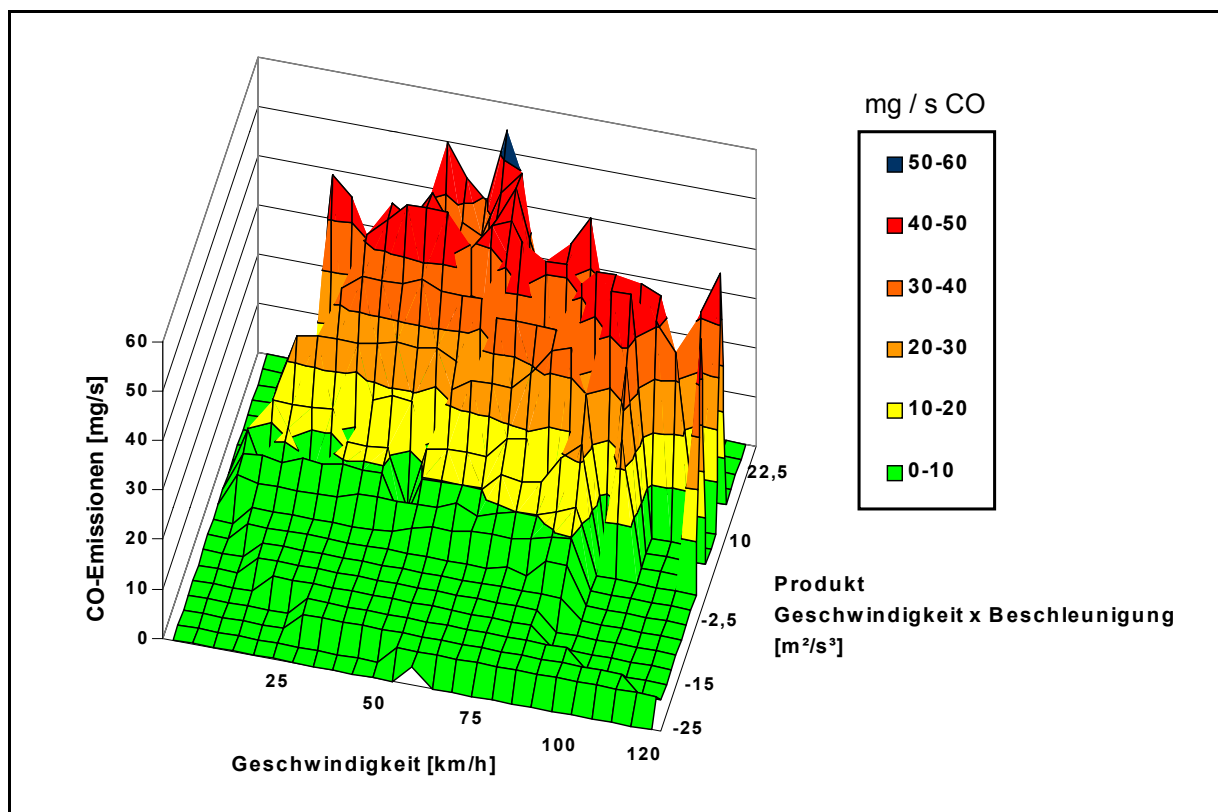


Bild 28: CO-Emissions-Kennfeld für die Pkw-Klasse „Otto EURO 1“ („B_E1“) aus modalen Analysen

Die Berechnung der Emissionen von motorisierten Zweirädern erfolgt nicht über Emissionsfunktionen, sondern orientiert sich wie das HBEFA (UBA 1999) an der Zuweisung von Emissionen über definierte Geschwindigkeitsklassen.

Anders als bei der Parametrisierung dienen die Geschwindigkeitserhebungen der Modellkalibrierung, da durch den Modellansatz und die eingegeben Rahmengrößen wie Fahrzeugzuflüsse, Geschwindigkeitsverteilungen, Beschleunigungsverteilungen sowie die gesamte Verkehrssignalisierung der Verkehr im Modell „erzeugt“ wird.

3.1.2.1 Kaltstartmodell

Das Kaltstartmodell innerhalb der Simulationssoftware berücksichtigt ausschließlich die Mehremissionen von Pkw und LNF und basiert auf einer Energiebilanz. Diese Energiebilanz postuliert, dass die in Form von Kraftstoff zugeführte Energie gleich der Bedarfsleistung zur Bewegung des Fahrzeugs zuzüglich der Verlustwärme ist. Dabei nutzt man die Tatsache, dass es einen Zusammenhang zwischen kumulierter Verlustwärme und Betriebstemperatur von Katalysator und Kühlwasser gibt. Die Abgasemissionen der Fahrzeuge korrelieren wiederum mit den genannten Betriebstemperaturen. Während für Diesel-Fahrzeuge und Fahrzeuge ohne GKat eine bessere Korrelation zur Kühlwassertemperatur vorliegt, ist für GKat-Fahrzeuge der Zusammenhang zur Kat-Temperatur besser. Die Emissions-Kennfelder orientieren sich entsprechend des Ansatzes an einer normierten Leistung über der Temperatur für Kat bzw. Kühlwasser. Als Starttemperatur für die Untersuchungen wurde die durchschnittliche Außentemperatur zugrunde gelegt.

Die Temperaturverteilung der im Untersuchungsgebiet eingesetzten Flotte wurde auf Basis der vorliegenden Fahrtweitenverteilungen, differenziert nach Fahrtrichtungen, ermittelt. Die zurückgelegten Wegstrecken wurden mit Hilfe des beschriebenen Ansatzes in Betriebstemperaturen umgerechnet, so dass die Kalt- bzw. Kühlemissionen berücksichtigt wurden.

3.1.2.2 Ergebnisse

Beispielhaft für den 23.10.2002 sind in Bild 29 die NO_x -Emissionen sowie die Verkehrsstärke für die Nord-Süd-Richtung, gemittelt über beide Fahrspuren, dargestellt. Die Korrelation der NO_x -Emissionen zur Verkehrsstärke ist deutlich erkennbar.

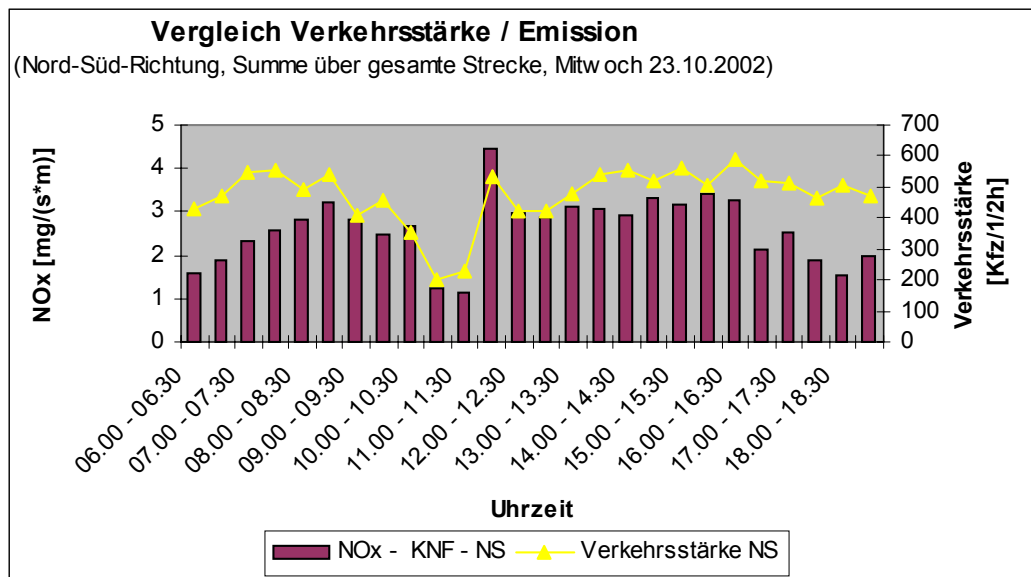


Bild 29: Zeitliche Auflösung der berechneten NO_x -Emissionen

Neben der hohen zeitlichen Auflösung leistet das Modell eine detaillierte kleinräumige Auflösung der Emissionen, was in Bild 30 veranschaulicht ist. Dort sind die CO - und NO_x -Emissionen des Untersuchungsabschnitts der Göttinger Straße dargestellt. Die eingetragenen Punkte sind Mittelwerte für je 25 m lange Segmente, die über beide Fahrstreifen pro Fahrtrichtung summiert wurden. Der Einfluss infolge Rückstauvorgängen an der Ampelanla-

ge am Deisterplatz ist deutlich erkennbar. Im Vergleich zum ungestört fließenden Verkehr ergeben sich in unmittelbarer Nähe des Deisterplatzes bei gleicher Verkehrsbelastung bei CO um einen Faktor 5 und bei NO_x um einen Faktor 3 erhöhte Emissionen.

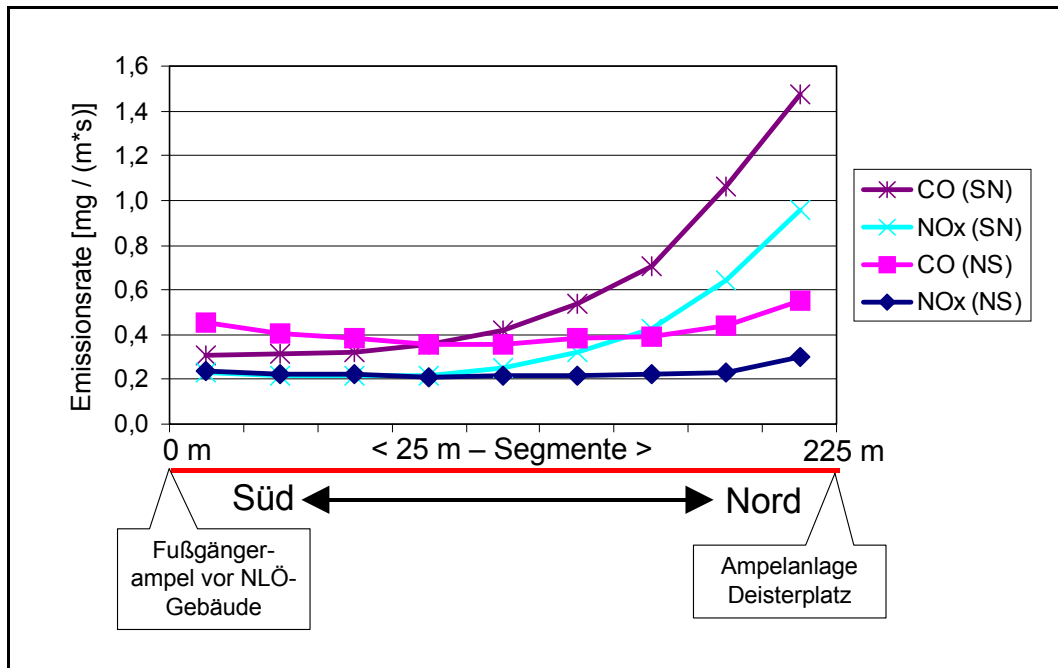


Bild 30: Räumliche Auflösung von CO- und NO_x-Emissionsraten in der Göttinger Straße am 11.04.2003 (zeitlich gemittelt von 6:00 Uhr bis 19:00 Uhr Ortszeit), aufgelöst nach Fahrtrichtungen (SN: Süd → Nord; NS: Nord → Süd)

3.2 Mesoskopische / makroskopische Modellierung

Bei der mesoskopischen bzw. makroskopischen Emissionsmodellierung werden sämtliche anthropogenen Quellen berücksichtigt: Verkehr (Straßenverkehr, Schienenverkehr, Schiffsverkehr, Flugverkehr, Off-Road), Industrie und Kraftwerke (Punktquellen und diffuse Quellen), Haushalte und Kleinverbraucher, Lösemittelemissionen, Tierhaltung. Die Methoden zur Ermittlung der Emissionsraten für die einzelnen Quellgruppen und zur zeitlichen und räumlichen Auflösung sind in (Kühlwein 2002) beschrieben.

Im Rahmen des VALIUM-Projekts wurden für die drei Ebenen auf der Mesoskala für insgesamt 42 Tage im Jahr 2000 Emissionen in stündlicher Auflösung berechnet und für die Chemie-Transport-Modellierung bereitgestellt. Die berücksichtigten Episoden waren im einzelnen:

20.02. - 23.02.2000
12.03. - 13.03.2000
21.03. - 22.03.2000
17.04. - 18.04.2000
03.05. - 16.05.2000
30.05. - 31.05.2000
17.06. - 21.06.2000
12.08. - 14.08.2000
16.10. - 23.10.2000

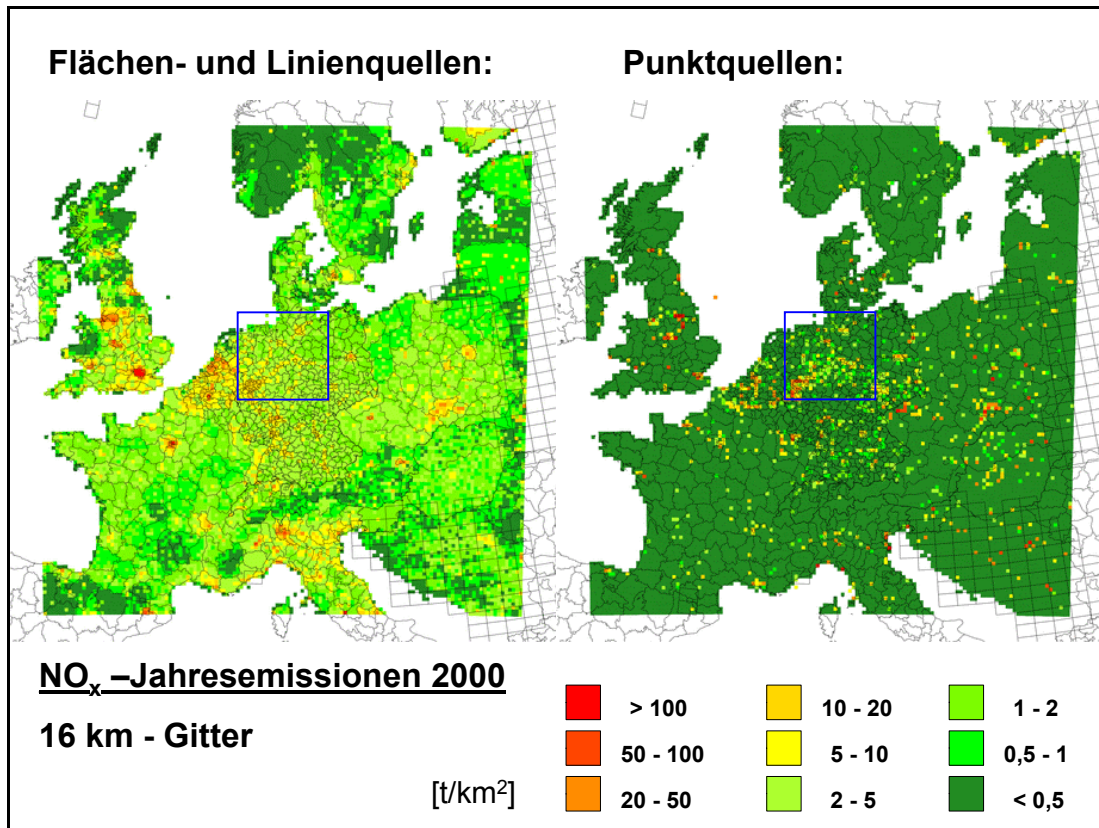


Bild 31: NO_x-Jahresemissionen 2000, differenziert zwischen Flächen-/Linienquellen und Punktquellen - Mesoskala Ebene 1 (Zentraleuropa)

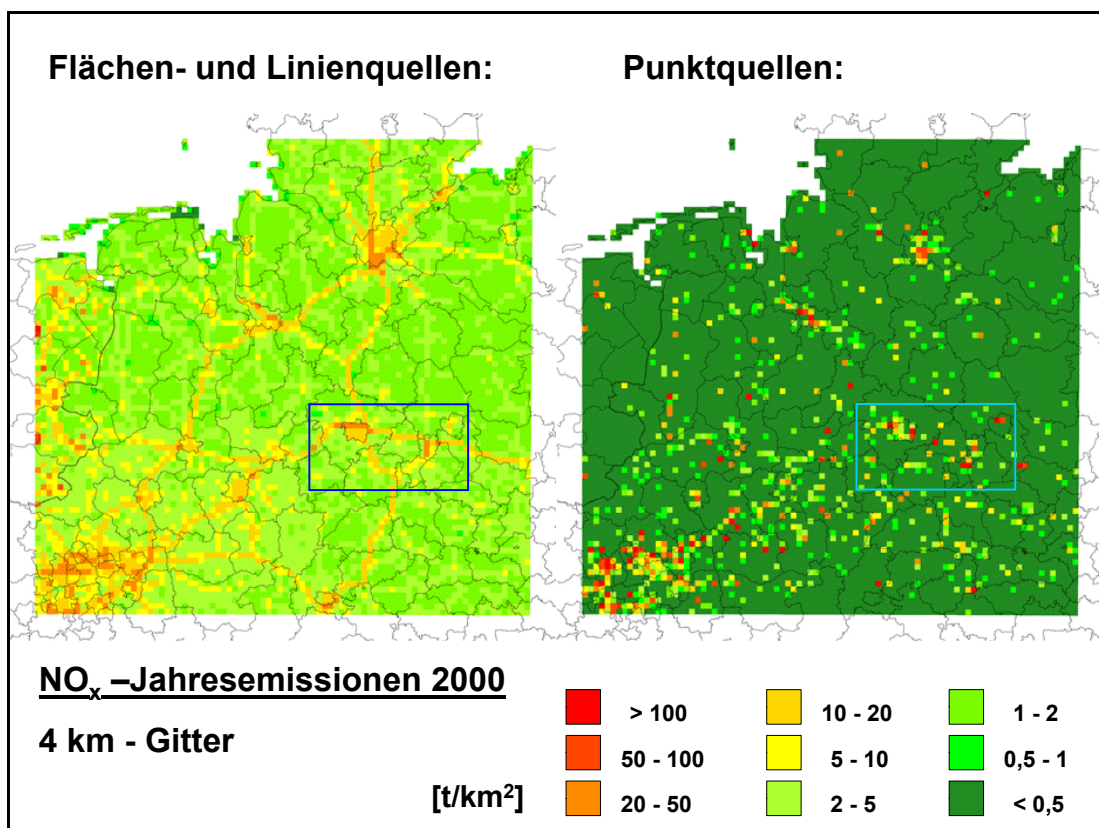


Bild 32: NO_x-Jahresemissionen 2000, differenziert zwischen Flächen-/Linienquellen und Punktquellen - Mesoskala Ebene 2 (Großraum Niedersachsen)

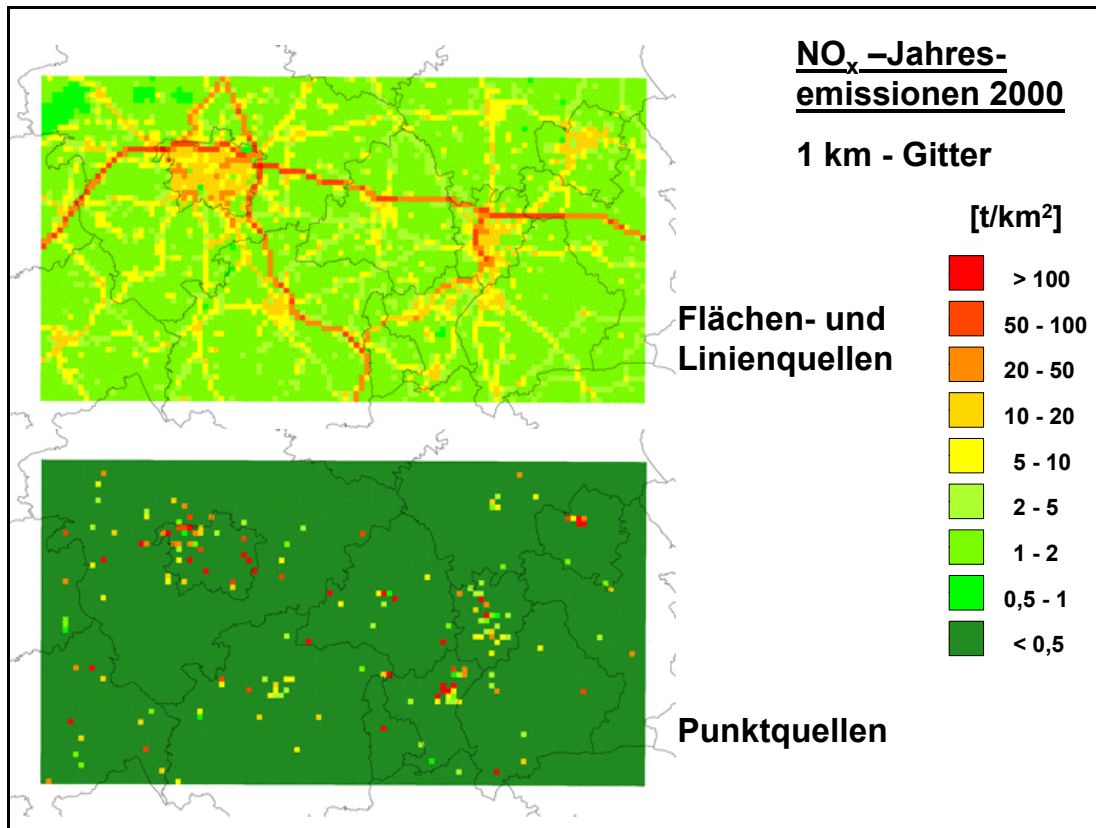


Bild 33: NO_x-Jahresemissionen 2000, differenziert zwischen Flächen-/Linienquellen und Punktquellen - Mesoskala Ebene 3 (Großraum Hannover / Braunschweig)

Modelliert wurden Emissionsraten für die Schadstoffe NO_x, CO, SO₂, CH₄, NH₃, NMVOC und für die 31 RADM-Klassen. Die Bilder 31 bis 33 zeigen exemplarisch die ermittelten NO_x-Jahresemissionsraten des Jahres 2000 für die drei Ebenen der Mesoskala, jeweils verschnitten mit dem jeweiligen Gitter und getrennt nach Flächen- und Linienquellen einerseits und Punktquellen andererseits.

Im Rahmen des durchgeführten Projekts wurde die bestehende Datenbasis dahingehend verbessert, dass die Punktquellendaten für Niedersachsen durch die Emissionserklärungsdaten für das Jahr 2000 aktualisiert wurden. Die alte Datenbasis umfasste lediglich 75 Einzel-Punktquellen für Niedersachsen aus alten öffentlichen Datenbasen (z.B. CORINAIR / EMEP) mit z.T. fragwürdigen Emissionsmengen. Die neue Datenbasis enthält nunmehr 12.588 Einzelpunktquellen mit hochgradig detaillierten, anlagenspezifischen Informationen.

Neben der erheblichen Verbesserung der räumlichen Auflösung der Emissionen aus Punktquellen bringt die Aktualisierung des Punktquellen-Katasters auch Veränderungen in Bezug auf die gesamten Emissionsmengen mit sich. Die Bilder 34 und 35 zeigen für die Mesoskala-Ebenen 2 und 3 den Vergleich der jährlichen Gesamtemissionen für die Schadstoffe SO₂, NO_x, CO und NMVOC. Grundsätzlich ist mit der Zunahme der Anzahl der Punktquellen auch eine Zunahme der Emissionsmengen verbunden. Dagegen nehmen die Emissionsmengen der Flächenquellen ab, da einige Punktquellen des neuen Katasters im alten Kataster aus Unkenntnis der genauen geographischen Lage als Flächenquellen enthalten sind.

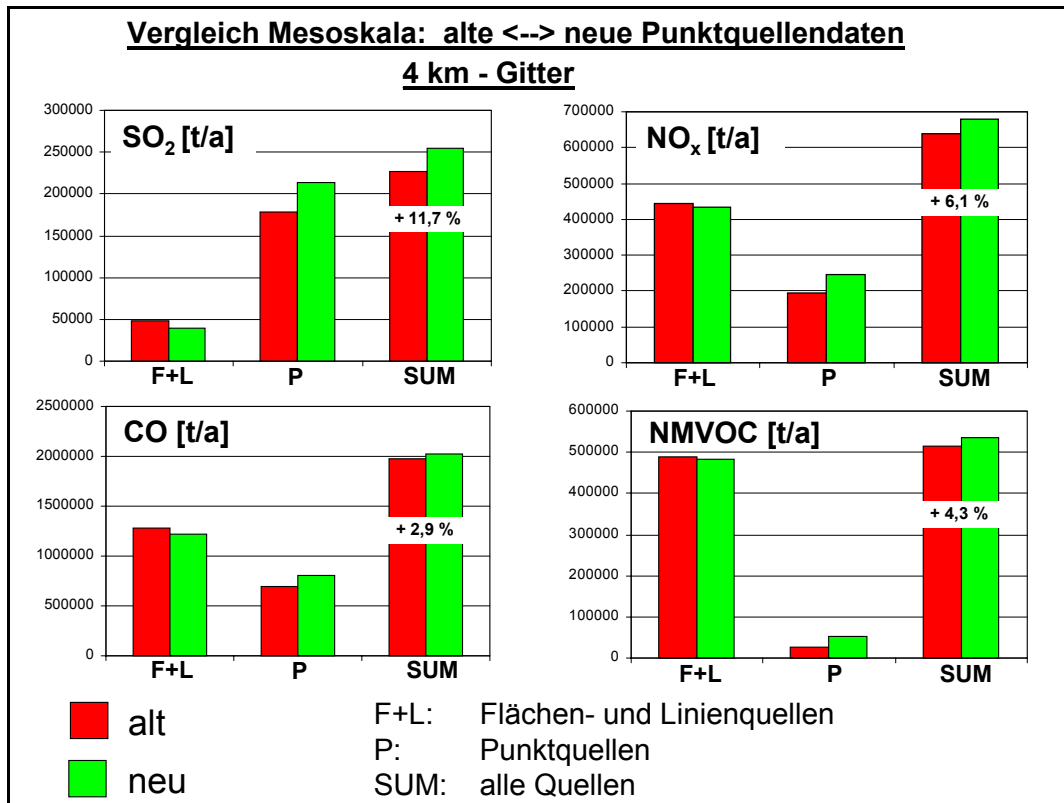


Bild 34: Vergleich der jährlichen Gesamtemissionen zwischen alter und neuer Datenbasis für die Punktquellen in Niedersachsen - Mesoskala Ebene 2

Für das Gitter der Mesoskala 2 (Bild 34) ergeben sich Zunahmen zwischen 2,9 % (CO) und 11,7 % (SO₂). Die Emissionserhöhungen fallen also relativ gering aus, was im wesentlichen darauf zurückzuführen ist, dass das Gitter der Mesoskala 2 nicht nur das Gebiet von Niedersachsen, sondern auch Teile der angrenzenden Bundesländer und Staaten umfasst (s. Bild 32). Ein Großteil der auf der 2. Ebene der Mesoskala emittierten Schadstoffe stammt nicht aus Niedersachsen, sondern insbesondere aus Nordrhein-Westfalen. Auch Hamburg, Bremen und die Niederlande tragen erheblich zu den Gesamtemissionen bei.

Anders stellen sich die Verhältnisse dar, wenn man ausschließlich Teile von Niedersachsen bzw. die 3. Ebene der Mesoskala betrachtet (Bild 35). Hier bringt die Aktualisierung der Punktquellenkatasters massive Erhöhungen der Gesamt-Emissionsmengen mit sich. Diese liegen zwischen 22,4 % (NMVOC) und 157,0 % (SO₂).

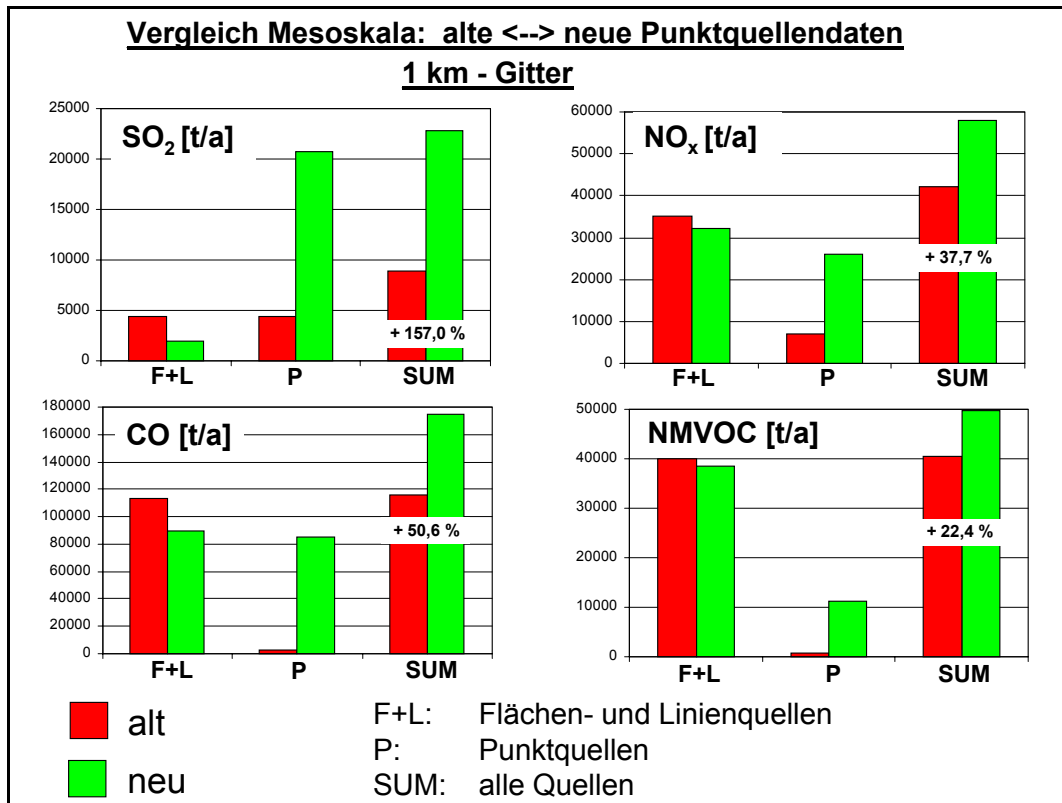


Bild 35: Vergleich der jährlichen Gesamtemissionen zwischen alter und neuer Datenbasis für die Punktquellen in Niedersachsen - Mesoskala Ebene 3

3.3 c*-Werte

Als c^* wird eine dimensionslose Größe bezeichnet, die als Maßstab zur Verifizierung von Modellen herangezogen werden kann (s. Berichte der entsprechenden Teilprojekte: Windkanal - TP 1, Chemie-Transport-Modell - TP 2). Die Grundidee hinter der Definition dieser Größe ist, dass eine gemessene Netto-Schadstoffkonzentration u.a. von der Emissionsquellstärke und der Windgeschwindigkeit abhängig ist (Gl. 1).

$$c^* = \frac{\Delta c \cdot u \cdot H}{Q} \quad (\text{Gl. 1})$$

Δc : Schadstoffkonzentration (Straßenschlucht – Hintergrund)
 Q : modellierte Emissionsrate
 u : Windgeschwindigkeit in 42 m über Boden (HRSW)
 H : mittlere Gebäudehöhe (20 m)

c^* -Werte wurden für die Göttinger Straße für das Jahr 2002 in 1/2-stündiger Auflösung für die Messstationen HRVS, HRV1 und HRV3 und für die Schadstoffe NO_x, CO, Benzol und Ruß berechnet. Für die Hintergrundkonzentrationen und für die Windgeschwindigkeit wurden die Messdaten der Überdach-Station HRSW verwendet.

Bei der Modellierung der Emissionsraten wurden berücksichtigt:

- Warmemissionen
- Kaltstartzuschläge mit gemessenen Temperaturen
- Verkehrsstärken aus automatischer Dauerzählstelle

- Anteile der Fahrzeugkategorien aus manuellen Zählungen nach Wochentagstypen differenziert
- Flottenzusammensetzungen aus Kennzeichenauswertungen nach Wochentagstypen differenziert
- Fahrmuster aus Geschwindigkeitsmessungen und Ampelüberwachungen - differenziert nach Wochentagstypen und Fahrtrichtung
- Emissionsfaktoren aus UBA-Handbuch (v 1.2)

Unberücksichtigt blieben besondere Verkehrssituationen, z.B. Stausituationen.

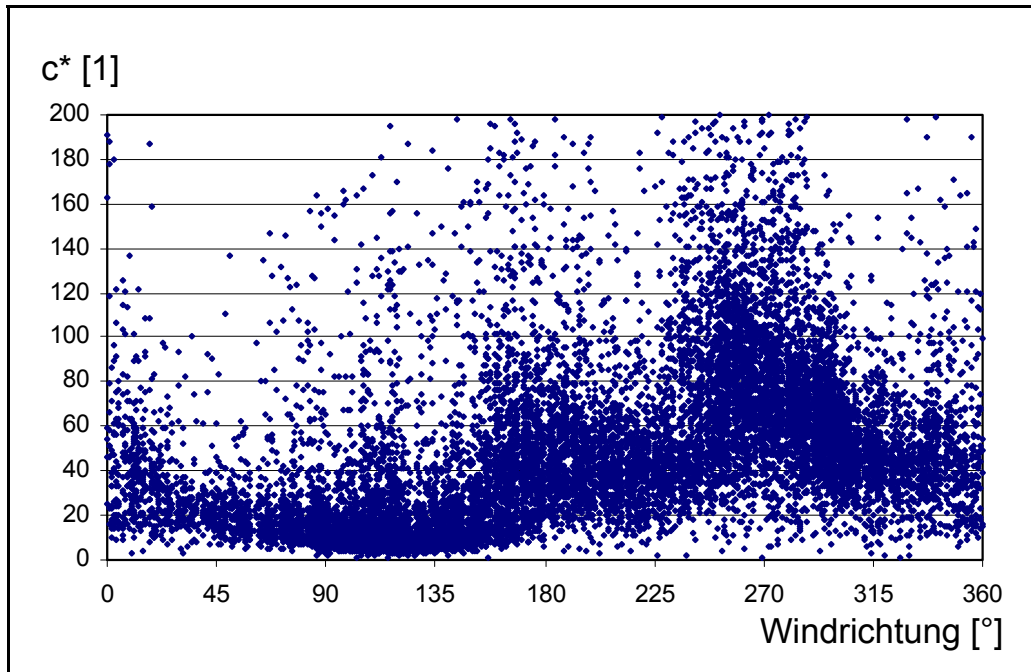


Bild 36: c^* -Werte für NO_x an der Messstation HRV1 - alle $\frac{1}{2}$ -h-Werte im Jahr 2002

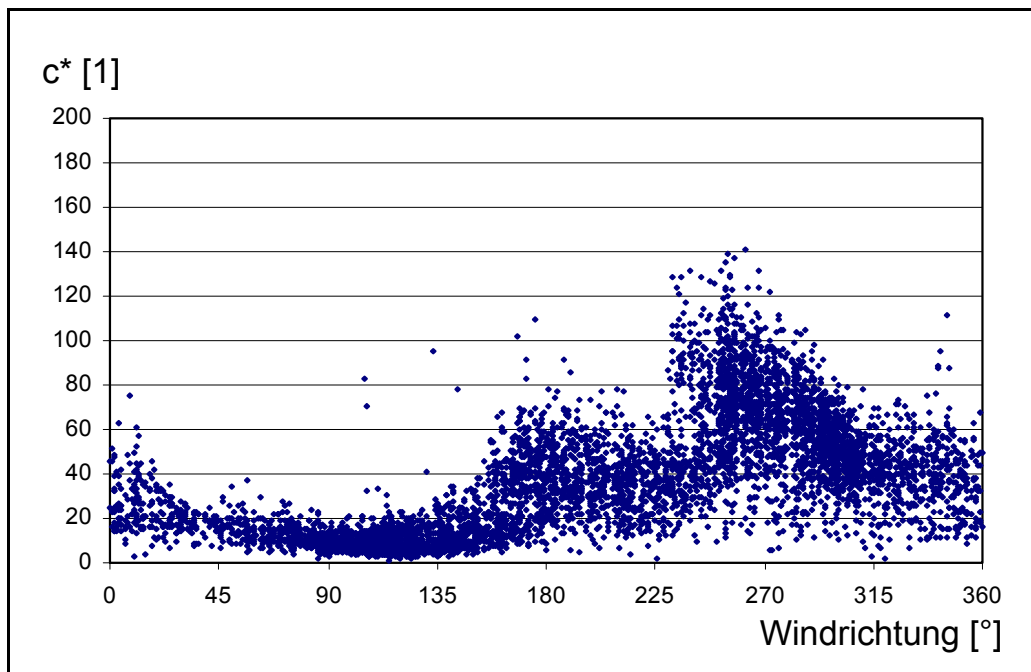


Bild 37: c^* -Werte für NO_x an der Messstation HRV1 - 7000 höchste NO_x - $\frac{1}{2}$ -h-Werte im Jahr 2002

Im Bild 36 sind alle berechneten c^* -Werte für NO_x an der Messstation HRV1 dargestellt. Deutlich ist die Abhängigkeit von der Windrichtung erkennbar. Um schwach belastbare Punkte während emissionsarmer Nachtstunden zu eliminieren, wurden für das Bild 37 nur die Punkte mit den 7000 höchsten NO_x - $\frac{1}{2}$ -h-Werten berücksichtigt. Die Anzahl der ausgewählten Werte entspricht in etwa den Zeiten mit hohem Verkehrsaufkommen. Es bildet sich nunmehr eine klarere Struktur heraus mit Windrichtungsbereichen mit geringen Streuungen (z.B. 45° - 135°) und anderen Bereichen mit starken Streuungen (z.B. 180° oder 250°). Hier wird deutlich, dass bisher im c^* -Konzept nicht berücksichtigte Größen einen erheblichen Einfluss auf die in der Straßenschlucht gemessenen Schadstoffkonzentrationen haben können.

Die berechneten c^* -Werte wurden im Rahmen des VALIUM-Projekts zur Validierung von numerischen Modellen und von Windkanalmessungen verwendet. Ausführliche Diskussionen zur c^* -Problematik (z.B. die Gültigkeitsbereiche des c^* -Konzepts) sind in den Berichten der entsprechenden Teilprojekte (VALIUM 2004, BÄCHLIN 2004) enthalten.

4 Fehlerbandbreiten

Die experimentell ermittelten Verkehrsgrößen, die aus der Literatur entnommenen Emissionsfaktoren und die daraus berechneten Emissionsraten sind beispielsweise aufgrund von Messfehlern und Fehlern bei der Verwendung nicht repräsentativer Stichproben fehlerbehaftet. Anhand einer detaillierten Fehleranalyse wurden die Fehlerbandbreiten der Eingangsparmeter des mikroskopischen Emissionsmodells und die jeweiligen Auswirkungen auf die Gesamtemissionen differenziert für die vier Schadstoffklassen CO, NO_x, NMHC und PM10 quantifiziert. Die Fehler der Eingangsgrößen werden in den nachfolgenden Abschnitten diskutiert.

4.1 Verkehrsstärken

Vergleiche manueller Zählergebnisse von verschiedenen Zählern haben ergeben, dass die aus manuellen Zählungen stammenden Gesamtverkehrsstärken mit einem Variationskoeffizienten (VK) von ca. 1 % verbunden sind (je nach Motivation des Zählers). Dazu kommen Unsicherheiten bei der optischen Einteilung der Fahrzeuge in Fahrzeugkategorien, deren Auswirkungen auf die Emissionsraten mit VK zwischen 1,2 % (CO und NO_x) und 2,6 % (PM10) quantifiziert wurden.

Bei der Übertragung von nach Fahrzeugklassen (Pkw <--> Lkw) differenzierten Verkehrsstärkedaten aus der automatischen Dauerzählstelle für Intervalle ohne Störungen des Verkehrsflusses treten VK zwischen 2,5 % (CO, sonntags) und 5,5 % (PM10, montags bis freitags) auf. Stausituationen sind mit erhöhten Unsicherheiten verbunden. Hier wurden die VK mit ca. 10-12 % abgeschätzt.

4.2 Geschwindigkeitsverteilungen

Bei der messtechnischen Ermittlung der Geschwindigkeiten sind sowohl die Ungenauigkeiten des Messgerätes (laut Herstellerangaben ≤ 1 km/h) als auch fehlerhafte Zuordnungen der Fahrzeugkategorien zu den Geschwindigkeitsdaten zu berücksichtigen. Diese Störgrößen führen zu VK zwischen 0,6 % (NMHC, montags bis freitags) und 4,3 % (NMHC, Stau).

Bei der Übertragung von gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen auf die vorliegenden klassierten Verkehrssituationen, für die Emissionsfaktoren vorliegen, treten zusätzliche statistische Schwankungen auf. Bei allen Schadstoffklassen tritt eine erhöhte Sensitivität gegenüber Verschiebungen der mittleren Geschwindigkeiten auf. Besonders stark ausgeprägt ist die Sensitivität bei CO. Hier wurden VK zwischen 7,6 % und 11,0 % ermittelt. Stausituationen erweisen sich als besonders sensibel gegenüber Verschiebungen der Geschwindigkeitsprofile. Ungenaue Kenntnisse über das reale Fahrverhalten führen hier zu Unsicherheiten der Emissionsraten zwischen 8,6 % (CO) und 21,9 % (NMHC).

4.3 Flottenzusammensetzungen

Die Emissionen der ausländischen Fahrzeuge können nicht gesondert erfasst werden, da hier kein Zugriff auf die fahrzeugtechnischen Daten über Kennzeichenauswertungen möglich ist. Die Videoauswertungen haben ergeben, dass der Großteil der ausländischen Fahrzeugflotte aus Lkw aus EU-Ländern besteht. Gravierende Unterschiede im Emissionsverhalten zwischen der inländischen und der ausländischen Fahrzeugflotte sind daher nicht zu erwarten. Nimmt man pro Fahrzeug einheitlich für alle Schadstoffklassen eine durchschnittliche Abweichung von maximal 30 % an, so ergibt sich bezogen auf die Gesamtemissionen ein statistischer Fehler von 1,7 %. Dazu kommen bei den Messstunden Unsicherheiten, da aus

Kostengründen nicht alle Fahrzeugkennzeichen einer Stunde ausgewertet werden konnten. Diese liegen bei ca. 2 %.

Die Unsicherheiten bei der Übertragung der Flottenzusammensetzungen auf andere Modellintervalle wurden anhand der statistischen Schwankungen zwischen den verschiedenen Messintervallen mit VK zwischen 4,8 % (NO_x, montags bis freitags) und 12,0 % (PM10, sonntags) quantifiziert.

4.4 Straßenlängsneigung

Die Emissionsberechnungen wurden unter der Annahme eines völlig ebenen Straßenabschnitts durchgeführt. Die Auswertungen der Aufrissdaten haben eine geringfügige mittlere Steigung von 0,4 % ergeben. Diese hypothetische Längsneigung führt bei Verwendung von Emissionsfaktoren, die durch lineare Interpolation von Korrekturfaktoren für 0 % und für 2 % Längsneigung abgeleitet worden sind, bei CO zu einer Mehremission zwischen 9,5 % und 10,0 %, während die Auswirkung auf die restlichen Schadstoffe gering ausfällt (NMHC: < 4 %; NO_x, PM10: < 1 %).

4.5 Emissionsfaktoren

Detaillierte Analysen statistischer Fehler der z.Zt. verfügbaren Emissionsfaktoren (EF) führen im Innerortsbereich zu Variationskoeffizienten zwischen ca. 20 % (NO_x) und 24 % (HC), bezogen auf die Gesamtflotte (Kühlwein 2000, 2004). Die statistischen Fehlerermittlungen des TÜV Rheinland enthalten alle Fehlerbeiträge, die zu Schwankungen der EF innerhalb einer Fahrzeugschicht führen. Dies sind neben den durch unterschiedliche Fahrzeugtypen verursachten Schwankungen auch Messunsicherheiten (Messanlage, Rollenprüfstand, Fahrerverhalten, Umwelteinflüsse, Aggregat) und methodisch bedingte Streuungen bei der Ermittlung der sog. Basisemissionsfunktionen (BEFU) und der Ableitung der EF aus den BEFU. Vergleiche der Streuungsbreiten mit parallel durchgeführten integralen Beutelmessungen haben ergeben, dass der methodisch bedingte Streuungseinfluss die restlichen Fehlerbeiträge deutlich übersteigt (Anteil an der Gesamtstandardabweichung: ca. 86 %). Somit muss die Methodik der Ermittlung der EF als maßgebliche Ursache der statistischen Fehler der EF angesehen werden.

4.6 Gesamtfehler

Aus den quantifizierten Unsicherheiten der verkehrsbezogenen Modelleingangsgrößen wurden auf die jeweilige Emissionsrate bezogene Gesamtfehler berechnet. Als Gesamtfehler können zwei unterschiedliche statistische Größen angegeben werden. Der *Größtfehler* ergibt sich aus der Summe der Auswirkungen der Einzelfehler auf die Gesamtemission. Der *mittlere Fehler* leitet sich aus der Methodik der „Gaußschen Fehlerfortpflanzung“ ab und lässt sich näherungsweise auch für nicht normalverteilte Eingangsgrößen berechnen mit:

$$\frac{\Delta \bar{E}}{E} = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\Delta E_i}{E} \right)^2}$$

(Gl. 2)

$\Delta \bar{E}$: mittlerer absoluter Gesamtfehler

E: Gesamtemission

ΔE_i : Auswirkung des Fehlers der Eingangsgröße i auf die Gesamtemission

Der mittlere Gesamtfehler entspricht somit der Standardabweichung bei Einzelgrößen und beschreibt die Fehlerbandbreiten innerhalb derer der „wahre Wert“ mit einer 68,3 %igen Wahrscheinlichkeit liegt.

Die Tabelle 6 enthält die ermittelten mittleren Gesamtfehler für die vier Schadstoffklassen CO, NO_x, NMHC und PM10, differenziert nach Intervallen mit vollständiger experimenteller Messwerterfassung und nach Intervallen ohne Verkehrsmessungen für verschiedene Wochentage und für Stausituationen. Die berechneten Gesamtfehler beinhalten ausschließlich Fehler der verkehrsbezogenen Eingangsgrößen.

Tab. 6: Standard-Gesamtfehler (Variationskoeffizienten) modellierter stündlicher Emissionsraten, Intervalle mit und ohne Verkehrsmessungen - **ohne Fehler der Emissionsfaktoren**

	gezählt / gemessen	Intervalle ohne Verkehrsmessungen			
		Montag - Freitag	Samstag	Sonntag	Stau
CO	10,9 %	17,6 %	15,8 %	14,1 %	15,9 %
NO _x	3,6 %	7,0 %	7,8 %	7,3 %	16,7 %
NMHC	4,9 %	10,0 %	10,7 %	10,4 %	25,7 %
PM10	4,1 %	8,9 %	10,9 %	12,8 %	19,0 %

Die Variationskoeffizienten (VK) der Emissionsraten liegen für Stunden mit vollständiger messtechnischer Erfassung der relevanten Verkehrsparameter mit Ausnahme von CO unter 5 % (ohne die Fehler der Emissionsfaktoren). Beim CO fällt die sehr starke Sensitivität gegenüber der Straßenlängsneigung ins Gewicht, die eine genaue Emissionsmodellierung stark erschwert. Auch bei den Parametern Flottenzusammensetzung und Geschwindigkeitsverteilungen weist CO relativ hohe Sensitivitäten auf, was sich in den VK für Intervalle ohne Verkehrsmessungen widerspiegelt. Intervalle mit Stausituationen sind mit den höchsten Fehlerbandbreiten verknüpft. Hier machen sich insbesondere bei NMHC die starken Sensitivitäten gegenüber den mittleren Fahrgeschwindigkeiten in Stop+Go-Situationen bemerkbar.

Tab. 7: Standard-Gesamtfehler (Variationskoeffizienten) modellierter stündlicher Emissionsraten, Intervalle mit und ohne Verkehrsmessungen - **mit Fehler der Emissionsfaktoren**

	gezählt / gemessen	Intervalle ohne Verkehrsmessungen			
		Montag - Freitag	Samstag	Sonntag	Stau
CO	26,4%	29,8%	28,7%	27,8%	28,8%
NO _x	20,3%	21,2%	21,5%	21,3%	26,1%
NMHC	24,5%	26,0%	26,3%	26,2%	35,2%
PM10	20,4%	21,9%	22,8%	23,7%	27,6%

Bezieht man die statistischen Fehler der Emissionsfaktoren in die Fehleranalyse mit ein, so erhält man als Gesamtfehler der modellierten Emissionsraten die in Tabelle 7 enthaltenen Unsicherheiten. Es zeigt sich klar, dass die Emissionsfaktoren die eindeutig dominierende Fehlerquelle der auf Verkehrsmessungen basierenden Emissionsraten darstellen. Aber auch bei den Intervallen ohne Verkehrsmessungen kommt den Unsicherheiten der Emissionsfaktoren der größte Anteil zu. Lediglich bei Stausituationen haben die Unsicherheiten der Verkehrsparameter einen ähnlichen Stellenwert wie die der Emissionsfaktoren.

Die dargestellten Unsicherheitsbandbreiten umfassen ausschließlich Fehler statistischer Natur. Systematische Fehler, wie sie derzeit beispielsweise bei den NO_x-Emissionen des Schwerverkehrs diskutiert werden, sind hierin naturgemäß nicht enthalten.

5 Ergebnis-Datenbank

Alle wichtigen, im Rahmen des BEBAS-Projekts durch Messungen und Rechnungen ermittelten Datensätze für die Mikroskala sowie für die Emissionsmodellierungen wichtige Daten aus externen Quellen wurden in einer Ergebnis-Datenbank zusammengestellt. Die Tabelle 8 enthält eine Kurzbeschreibung der einzelnen Dateien. Die Dateien sind zum einen Bestandteil der VALIUM-Datenbank „VALIDATA“ und können zum anderen direkt von der Homepage des IER-Teilprojekts herunter geladen werden (BEBAS 2004).

Tab. 8: Kurzbeschreibung der IER-Daten für VALIUM

Liesmich.doc	Erläuterungen zu den bereitgestellten Dateien
Validierungsdatensatz.doc	Datensatzbeschreibung des Validierungsdatensatzes bestehend aus Messdaten der IMP
VSt_Goettinger.xls	Verkehrsstärken in der Göttinger Straße aus manuellen Zählungen während der IMP, aufgelöst nach Fahrspuren und Fahrzeugkategorien (1/2-h-Werte) Nummerierung der Spuren: durchgehend von West nach Ost
DTV_1km ² .xls	tägliche Verkehrsstärken im kleinräumigen Untersuchungsgebiet aus manuellen Kurzzeitzählungen
Geschw_xxxx.xls	Geschwindigkeitsverteilungen Göttinger Straße, aufgelöst nach Fahrzeugkategorie, Fahrspur und 20-Meter-Abschnitten für die drei IMP (differenziert nach Wochentagtypen) Nummerierung der Spuren: durchgehend von West nach Ost
Flotte_xxxx.xls	Umrechnungsfaktoren Zählstellen-Klassierung -> Fahrzeugkategorien und Flottenzusammensetzungen aus Kennzeichenauswertungen (Fahrzeugschichten) für die drei IMP
Ampeln_xxxx.xls	Ampelschaltungen für die drei IMP: Süd: Fußgängerampel vor NLÖ-Eingang Nordwest: Einfahrt Deisterkreisel -> Göttinger Nordost: Ausfahrt Göttinger -> Deisterkreisel
parking_1km ² .xls	Anzahl von geparkten Fahrzeugen, Parkvorgängen, Parkdauern, offenen Parkplätzen, Garagenplätzen im kleinräumigen Untersuchungsgebiet
parkdauer_baumarkt.xls	Parkdauer-Verteilung am „OBI-Baumarkt“ im kleinräumigen Untersuchungsgebiet
Fahrtweitenverteilung.xls	Richtungsaufgelöste Fahrtweitenverteilungen in der Göttinger Straße im Tagesmittel aus Verkehrsmodell VISUM Nummerierung der Spuren: durchgehend von West nach Ost
Emissionen_Goett_IMP.xls	Emissionsraten für die Göttinger Straße für die IMP (1/2-h-Werte) für 13 Schadstoffe Nummerierung der Spuren: durchgehend von West nach Ost
Emissionen_Goett_2002.xls	Emissionsraten für die Göttinger Straße für das Gesamtjahr 2002 (1/2-h-Werte) für 4 Schadstoffe Nummerierung der Spuren: durchgehend von West nach Ost
Emissionen_1km ² .xls	Emissionsraten für kleinräumiges Untersuchungsgebiet für 3 Tage der IMP für 6 Schadstoffe + RADM-Klassen

Abschn_nr_1km^2.ppt	Plan zur Erläuterung der Nummerierung der Straßenabschnitte im kleinräumigen Untersuchungsgebiet
Abschn-nr_deister.ppt	Plan zur Erläuterung der Nummerierung der Straßenabschnitte im kleinräumigen Untersuchungsgebiet - Ausschnitt Deisterplatz
flurk1000.tif	Flurkarte des kleinräumigen Untersuchungsgebiets, Maßstab 1:1000

6 Zusammenfassung

Das Projekt VALIUM hat zum Ziel, die Umsetzungsmöglichkeiten aktueller EU-Richtlinien zur kontinuierlichen Überwachung und Beurteilung von Luftqualitäten zu untersuchen. Es werden Chemie-Transport-Modelle zur Erstellung von Belastungskarten entwickelt, für die im Rahmen des hier beschriebenen Teilprojekts Emissionsdaten in unterschiedlichen Skalenbereichen (Straßenschlucht bis Zentraleuropa) modelliert wurden.

Bereits in vorangegangenen Forschungsvorhaben entwickelte Emissionsmodelle wurden gezielt verbessert und verfeinert. Die Integration der niedersächsischen Emissionserklärungsdaten führte zu erheblichen Verbesserungen bei der räumlichen Verteilung der Emissionsdaten und regional zu teilweise deutlichen Erhöhungen der Emissionsraten. Neue, verfeinerte Straßennetze wurden sowohl auf der mesoskaligen als auch auf der mikroskaligen Ebene in die Emissionsmodelle integriert. Die gezielte messtechnische Erhebung der essentiellen verkehrstechnischen Parameter führte zu einer fundierten Datenbasis zur Erstellung kleinräumiger Emissionskataster.

Die erhobenen Verkehrsdaten und modellierten Emissionsraten führen zusammen mit den in den Partnerprojekten erhobenen Daten (Schadstoffkonzentrationen, meteorologische Daten, Tracer-Daten) zu einer fundierten Datenbasis, die die Validierung von mikroskaligen Ausbreitungsmodellen ermöglicht (Validierungsdatensatz).

Die Verkehrsmessungen in der Straßenschlucht „Göttinger Straße“ in Hannover haben u.a. ergeben, dass das Fahrverhalten bzw. die Fahrmuster aufgrund von variablen Verkehrszusammensetzungen und zu bestimmten Zeiten stark frequentierter Ampelanlagen starken zeitlichen Variationen unterworfen sind. Eine einheitliche, feste Zuordnung einer „Verkehrssituation“ zu einem Straßenabschnitt, wie in der Literatur beschrieben, führt somit zu erheblichen Fehlern bei der Emissionsmodellierung.

Die manuellen Verkehrszählungen mit einer Sichteinordnung der Fahrzeuge in Fahrzeugkategorien in Kombination mit Daten der automatischen Dauerzählstelle, die teilautomatisierte Erfassung der Fahrzeuggeschwindigkeiten, die weitere Differenzierung der Fahrzeugflotte durch Kennzeichenauswertungen, die automatisierte Erfassung der Ampelschaltungen und die exakte Ermittlung der Straßenlängsneigung führen zu einer fundierten Datenbasis, die die Genauigkeit der mikroskopischen Emissionsberechnungen für einen speziellen Anwendungsfall im Vergleich zu Rechnungen auf der Basis typischer bzw. mittlerer Daten aus der Literatur und öffentlichen Datenbanken deutlich verbessert.

Der Einsatz eines mikroskopischen Emissionsmodells in hoher räumlicher Auflösung zeigt, dass das Emissionsverhalten längs eines Untersuchungsabschnitts aufgrund verkehrstechnischer Störungen des Verkehrsablaufs sehr inhomogen ist. Die Ampelanlage am Deisterplatz führt im Vergleich zum ungestörten Verkehrsfluss (ab ca. 100 m Entfernung Richtung Süden) zu erheblichen Emissionserhöhungen (CO: Faktor 5; NO_x: Faktor 3). Diese starke räumliche Inhomogenität der Emissionscharakteristik hat entsprechende Auswirkungen auf die mikroskopischen Schadstoffkonzentrationsfelder in innerstädtischen Gebieten.

Die durch statistische Schwankungen der Verkehrsdaten und Emissionsfaktoren verursachten Variationskoeffizienten der modellierten stündlichen mikroskaligen Emissionsraten liegen in der Größenordnung zwischen ca. 20 % und 35 %. Emissionen während Stausituationen sind mit noch höheren Unsicherheitsbandbreiten verknüpft. Die Emissionsfaktoren stellen die mit Abstand wichtigste Quelle der Unsicherheiten dar.

Die auf der Basis der umfangreichen Verkehrserhebungen durchgeführten Emissionsmodellierungen ermöglichen über den Vergleich mit gemessenen Schadstoffkonzentrationen und den Daten des Tracergasversuchs (Tracer-Emissionsraten und Tracer-Immissionen) Aussagen über die Qualität der derzeit aktuellsten veröffentlichten Emissionsfaktoren, einschließ-

lich möglicher systematischer Fehler. Abweichungen, die über die Unsicherheiten der Verkehrsdaten in Kombination mit den Unsicherheiten der Messdaten (Immissionen) hinausgehen, sind auf fehlerhafte Emissionsfaktoren zurückzuführen

Quellenverzeichnis

- BÄCHLIN (2004) Bächlin, W.; Rühling, A.; Frantz, H.; Theurer, W.; Müller, W.J.; Heits, B.; Drunkenmölle, D.: Erstellung eines auf Naturmessungen basierenden Validierungsdatensatzes zur Ausbreitung von Schadstoffen in Straßenschluchten. – Endbericht des TP 3 VALIUM. Ingenieurbüro Lohmeyer, Karlsruhe; Ingenieurbüro Theurer, Speyer; NLÖ, Hannover. Juni 2004.
- BEBAS (2004) BEBAS-Homepage:
<http://www.ier.uni-stuttgart.de/valium>
22. BImSchV Zweiundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Immissionswerte für Schadstoffe in der Luft - 22. BImSchV) vom 11.9.2002, BGBl. I S. 3626
- EU-RL 96/62/EG Richtlinie des Rates vom 27. September 1996 über die Beurteilung und die Kontrolle der Luftqualität, ABl. EG Nr. L 296 S. 55
- EU-RL 1999/30/EG Richtlinie des Rates vom 22. April 1999 über Grenzwerte für Schwefeldioxid, Stickstoffdioxid und Stickstoffoxide, Partikel und Blei in der Luft, ABl. EG Nr. L 163 S. 41
- EU-RL 2000/69/EG Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. November 2000 über Benzol und Kohlenmonoxid in der Luft, ABl. EG Nr. L 313 S. 12, ABl. EG Nr. L 111 S. 31
- EU-RL 2002/3/EG Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Februar 2002 über den Ozongehalt der Luft, ABl. EG Nr. L 67 S. 14
- KBA (2002) Kraftfahrtbundesamt: Statistische Mitteilungen. Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern am 1. Januar 2002 nach Zulassungsbezirken. Reihe 2: Kraftfahrzeuge, Sonderheft 1, 2002.
- KÜHLWEIN (2000) Kühlwein, J; Friedrich, R.: Uncertainties of modelling emissions from road transport. - Atmospheric Environment 34 pp. 4603-4610, 2000.
- KÜHLWEIN (2002) Kühlwein, J.; Wickert, B.; Trukenmüller, A.; Theloke, J.; Friedrich, R.: Emission modelling in high spatial and temporal resolution and calculation of pollutant concentrations for comparisons with measured concentrations. - Atmospheric Environment 36 Supplement No.1 pp. S7 - S18, 2002.
- KÜHLWEIN (2004) Kühlwein, J.: Unsicherheiten bei der rechnerischen Ermittlung von Schadstoffemissionen des Straßenverkehrs und Anforderungen an zukünftige Modelle. - Dissertation, in Druck, 2004.
- 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 (erschienen als Software auf CD-ROM). Berlin, 1999.
- VALIUM (2004) VALIUM-Homepage:
www.mi.uni-hamburg.de/technische_meteorologie/valium

VDI (2003)

VDI-Richtlinie 3782 Blatt 7: Kfz-Emissionsbestimmung (Luftbeimengungen). - VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b. November 2003.

Danksagung

Die durchgeführten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Atmosphärenforschungsprogramms (AFO 2000) gefördert. Die in der Göttinger Straße in Hannover und den umliegenden Stadtbezirken durchgeführten Verkehrsmessungen und -erhebungen wurden dankenswerterweise vom Niedersächsischen Landesamt für Ökologie (NLÖ) logistisch unterstützt. Das NLÖ hat darüber hinaus für die Emissionsmodellierung essentielle Eingangsdaten zur Verfügung gestellt. Die Stadt Hannover hat freundlicherweise umfangreiche Verkehrsdaten für das Stadtgebiet Hannover bereit gestellt.

Der besondere Dank gilt allen an VALIUM beteiligten Projektpartnern für die ausgezeichnete und fruchtbare Kooperation.