

# DISSERTATION

„Sauberer Straßenverkehr in urbanen Ballungsräumen“

**Ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der technischen Wissenschaften**

unter Anleitung von

ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Ernst Pucher

Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau

Technische Universität Wien

Eingereicht an der Technische Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Dipl.-Ing. Jan Müller

Matr. Nr.: 9626587

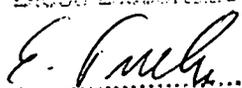
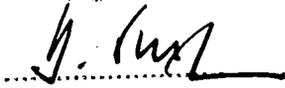
Soz.-Vers. Nr.: 1319 090276

A-6800 Feldkirch, Drevesstraße 1

Wien, im Dezember 2005



Diese Dissertation haben begutachtet:

## KURZFASSUNG

Trotz kontinuierlicher Absenkung der Abgas-Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge in der Europäischen Union, kam es in Österreichs Städten in der Vergangenheit bei verkehrsnahen Luftgütemessstellen vermehrt zu Immissions-Grenzwertüberschreitungen bei den Stickstoffoxiden  $\text{NO}_x$  und den Partikeln PM.

Die im Zuge dieser Arbeit untersuchten Städte Wien, Salzburg und Feldkirch weisen hinsichtlich der  $\text{NO}_2$ -Immissionsmesswerte bei den erhobenen, stark frequentierten Messstellen rund doppelt so hohe Werte aus, wie der angestrebte Luftgüte-Jahresgrenzwert (JMW) von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ebenso wurde der zulässige Feinstaub  $\text{PM}_{10}$ -Tagesgrenzwert (TMW) von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in allen drei Städten an markanten Messpunkten regelmäßig überschritten.

Mit Hilfe eines Rechenmodells basierend auf den in der Fachliteratur angeführten Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge war es möglich verschiedenen Fahrzeugkategorien bzw. -klassen den jeweiligen Emissionsanteil zuzuweisen. Anhand dieser ersten Berechnungen konnten die problematischen Verkehrsträger im städtischen Straßenverkehr in Wien identifiziert werden. Das dabei verwendete Basisrechenmodell wurde in einer aufwändigen Validierung im Zuge von Immissionsmessungen und Emissionsberechnungen hinsichtlich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit überprüft.

Eine weitere angewandte Methode zur Erfassung der real emittierten Abgasmenge bzw. zur Ermittlung von Emissionsfaktoren stellte das On-board Messsystem dar. Dieses in Eigenentwicklung gefertigte On-board Messsystem wurde direkt in die Messfahrzeuge eingebaut und ermittelte so auf beliebigen Fahrstrecken die Abgasmassenemissionen des Fahrzeuges. Somit konnten unterschiedliche Fahrzeugkategorien hinsichtlich der gesetzlich reglementierten Abgaskomponenten Kohlenwasserstoffe HC, Kohlenmonoxid CO, Stickstoffoxide  $\text{NO}_x$  sowie dem Treibhausgas Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  untersucht werden. Im speziellen wurden im Ballungsraum Wien Real-Life Emissions-Messkampagnen mit konventionell und alternativ angetriebenen Fahrzeugen durchgeführt.

Mit Hilfe der ermittelten Emissionsfaktoren der getesteten Fahrzeuge Opel Zafira und Opel Combo sowie einem MAN Gelenksbus wurden die möglichen Emissionsreduktionen für typische Straßenzüge im Ballungsraum Wien berechnet. Angenommen wurde eine Substitution von 10 % konventionell betriebenen Fahrzeugen durch die genannten CNG-Fahrzeuge.

Wie aus der Emissionsberechnung hervorgeht, wirkt sich eine Substitution der bisherigen konventionell betriebenen Fahrzeuge durch die getesteten CNG-Fahrzeuge mit fünf bis zehn Prozent bei den Abgaskomponenten Stickstoffoxide  $\text{NO}_x$  und den Partikeln PM aus. Eine Reduktion des  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes in betrachteten Straßenzügen Wiens in Höhe von ein bis knapp drei Prozent kann ebenfalls erwartet werden.

Erdgasbetriebene Fahrzeuge mit moderner Motor- und Abgasreinigungstechnologie sind damit aus heutiger Sicht ein effektives Hilfsmittel, um mittelfristig die Luftqualität in Ballungszentren nachhaltig zu verbessern.

## ABSTRACT

In the European Union emission limit values for motor vehicles have continuously been being lowered. Nevertheless near-traffic measuring stations in Austria's cities increasingly suffered from exceeding exhaust-gas limits, both with nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) and particulate matters (PM).

Within the framework of this thesis three Austrian cities have been surveyed: Vienna, Salzburg, and Feldkirch. At highly frequented measuring points in these cities, NO<sub>2</sub> emission was approximately double as high as the air quality limits strived for as an aim, i.e. 30 µg/m<sup>3</sup> per year. In all three cities the particulate matter limits per day (PM<sub>10</sub>) were equally exceeded at certain measuring points.

A mathematical model based on the emission factors, which are normally used in the relevant literature on motor traffic, made it possible to allot their specific emission share to the various categories and classes of motor vehicles. So the problematic carriers in Vienna's city traffic could be identified. The mathematical model used was scrutinized in an elaborate validation process by checking its accuracy and repeatability through comparing emission measuring results with calculation results.

The on-board measuring system of our research group was applied as another method of collecting the emitted emission quantities respectively of detecting emission factors. We developed and built our own on-board measuring system, one to be placed on board the measuring vehicles. Thus we could measure the exhaust emission of various vehicles on a variety of test routes. This on-board measuring system allowed us to study various vehicle categories as to the regulated emission components in exhaust fumes: hydrocarbon (HC), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) as well as the greenhouse gas carbon dioxide (CO<sub>2</sub>).

Special real-life emission measuring campaigns in the congested urban area of Vienna were conducted, both with conventionally and alternative powered vehicles (CNG).

Potential emission reductions for typical roads and streets in the congested urban area of Vienna were calculated based on measurements of emission factors of the following test vehicles: Opel Zafira, Opel Combo, and MAN articulated bus. This hypothesis assumes a substitution of 10 % of conventionally powered vehicles by the aforementioned CNG vehicles.

As this calculation proves that the substitution of conventionally powered vehicles by the tested CNG vehicles will result in a reduction of nitrogen oxides  $\text{NO}_x$  and the particles PM. An additional reduction of the  $\text{CO}_2$ -emission in urban roads by one to three percent can be expected.

It can be concluded that CNG vehicles (compressed natural gas) equipped with modern engine technology and purification of exhaust gases will be an effective measure to achieve sustained and long-term success, i.e. to improve the air quality in congested urban areas and in  $\text{CO}_2$  reduction as well.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich sehr herzlich bei all jenen Personen bedanken, die während meines Studiums immer an meiner Seite standen und mich mit Rat und Tat unterstützten. Besonderer Dank gilt meiner Mutter Karin und meiner Großfamilie Müller, die mir ein Studium an der Technischen Universität Wien ermöglichten und erleichterten.

Bei Prof. Dr. Ernst Pucher möchte ich mich bedanken, dass er mir das Vertrauen schenkte die Forschungsgruppe „On-board Measurement“ zu leiten und eigenverantwortlich an zahlreichen Projekten mitzuwirken. Seine fachlichen Ratschläge wie auch seine wertvollen Tipps zu Problemlösungen innerhalb interdisziplinärer Forschungsk Kooperationen werden mein weiteres Berufsleben positiv begleiten.

Ein herzliches Dankeschön für die tatkräftige Unterstützung und Mitarbeit gilt all meinen ehemaligen DiplomandInnen, die mir immer sehr hilfsbereit zur Seite standen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Methodik der Arbeit.....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Immissions-Situation in ausgesuchten Städten Österreichs .....</b>	<b>8</b>
3.1	Luftgütesituation in Wien .....	9
3.1.1	Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub> -Immissionen.....	10
3.1.2	Feinstaub PM10-Immissionen .....	13
3.2	Luftgütesituation in Salzburg Stadt .....	15
3.2.1	Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub> -Immissionen.....	16
3.2.2	Feinstaub PM10-Immissionen .....	17
3.3	Luftgütesituation in Feldkirch .....	19
3.3.1	Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub> -Immissionen.....	20
3.3.2	Feinstaub PM10-Immissionen .....	21
3.4	Fazit der Immissions-Situation in ausgesuchten Städten Österreichs .....	22
<b>4</b>	<b>Emissionsbilanzen des Straßenverkehrs in Ballungszentren .....</b>	<b>24</b>
4.1	Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge .....	24
4.1.1	Emissionsgrenzwerte in der Europäischen Union .....	24
4.1.2	Emissionsfaktorenbestimmung mittels Straßentunnel .....	28
4.1.3	Emissionsfaktorenbestimmung auf dem Rollenprüfstand .....	36
4.1.4	Emissionsfaktorenbestimmung mittels On-board System .....	41
4.2	Emissionsbilanzen .....	47
4.2.1	Emissionsbilanz in Wien .....	47
4.2.2	Emissionsbilanz an einem Verkehrsknotenpunkt in Feldkirch.....	51
<b>5</b>	<b>Validierung des Emissionsberechnungsmodells .....</b>	<b>52</b>
5.1	Immissionsmessung.....	52
5.1.1	Messaufbau.....	52
5.1.2	Ergebnisse der Immissionsmessung .....	53
5.2	Verkehrszählung.....	54
5.3	Emissionsbilanz .....	55
5.3.1	Methodik der Berechnung .....	55
5.3.2	Berechnungsergebnisse .....	58
5.4	Vergleich der gemessenen Immissionskonzentrationen mit den berechneten Emissionswerten.....	61
5.4.1	Methodik der Gegenüberstellung Messung zu Berechnung .....	61
5.4.2	Vergleich der Relativwerte .....	63
5.4.3	Fazit der Validierung des Emissionsberechnungsmodells.....	65

---

<b>6</b>	<b>Real-Life Messkampagnen mit schadstoffarmen Fahrzeugen .....</b>	<b>66</b>
6.1	Experimentaltechnik .....	66
6.1.1	OBM-Hardware-Komponenten .....	68
6.1.2	OBM-Software-Bausteine .....	70
6.1.3	Validierung des On-board Messsystems .....	73
6.2	Real-Life Messkampagne - Opel Zafira .....	76
6.2.1	Messfahrzeuge .....	76
6.2.2	Messgeräteeinbau .....	77
6.2.3	Messdurchführung .....	79
6.2.4	Ergebnisse der Messfahrten .....	81
6.2.5	Fazit der Messergebnisse .....	83
6.3	Real-Life Messkampagne - Opel Combo .....	84
6.3.1	Messfahrzeuge .....	84
6.3.2	Messgeräteeinbau .....	85
6.3.3	Messdurchführung .....	86
6.3.4	Ergebnisse der Messfahrten .....	88
6.3.5	Fazit der Messergebnisse .....	90
6.4	Real-Life Messkampagne - MAN A23 .....	91
6.4.1	Messfahrzeuge .....	91
6.4.2	Messgeräteeinbau .....	92
6.4.3	Messdurchführung .....	93
6.4.4	Ergebnis der Messfahrten .....	94
6.4.5	Fazit der Messergebnisse .....	96
<b>7</b>	<b>Emissionsreduktionspotentiale durch den Einsatz von CNG Fahrzeugen .....</b>	<b>97</b>
7.1	Methodik .....	97
7.2	Berechnungsergebnisse .....	99
<b>8</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>101</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>105</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>	<b>110</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>113</b>
	<b>LEBENS LAUF .....</b>	<b>114</b>

---

## Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

A/F	Air to Fuel
CLD	Chemiluminescence-Detektor
CNG	Compressed Natural Gas (Komprimiertes Erdgas)
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CVS	Constant Volume Sampling
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken DTV
EF	Emissionsfaktor
Efz	Einspurige Fahrzeuge
E-OBD II	European On-board Diagnostic System (der zweiten Generation)
EU	Europäische Union
EV	Emissionsverhältnis
FID	Flammenionisationsdetektor
FK	Fahrzeugkategorie
FTP	Federal Test Procedure (Amerikanischer Fahrzyklus)
FWY-HI	Amerikanischer Fahrzyklus
GPS	Global Positioning System
HC	Kohlenwasserstoffe
HMW	Halbstundenmittelwert
HDC	Heavy Duty Cycle (Amerikanischer Fahrzyklus)
Hz	Herz
IVK	Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau
JMW	Jahresmittelwert
K	Temperatur in Kelvin
kPa	Druck in Kilo Pascal
Lkw	Lastkraftwagen
LNG	Liquified Natural Gas
LPG	Liquid Petrol Gas (Flüssiggas)
MAMA	Mobile Abgas-Messanlage der Volkswagen AG
MVEG	Europäischen Fahrzyklus
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NO	Stickstoffmonoxid

NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxid
NYCC	New York City Cycle (Amerikanischer Fahrzyklus)
OBD	On-board Diagnostic System
OBM	On-board Messsystem
OEM	Original Equipment Manufacturer
ÖPNV	Öffentlicher Personen Nahverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
PM	Particulate Matter (Partikel)
PM10	Feinstaub-Immissionen
r <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß der Linearen Regression
SK	Straßenkategorie
TC	Total Carbon
TMW	Tagesmittelwert
TSP	Gesamtschwebstaub
TU	Technische Universität
US06	Federal Test Procedure 06 (Amerikanischer Fahrzyklus)
US 75	Federal Test Procedure aus dem Jahr 1975 (Amerikanischer Fahrzyklus)
USB	Universal Serial Bus
Vbg.	Vorarlberg
VEOMLow	Vito's On-the-Road Emission and Energy Measurement

## 1 Einleitung

Obwohl die Emissionsgrenzwerte bei der jeweils vorgeschriebenen Typprüfung von Kraftfahrzeugen in der Europäischen Union kontinuierlich gesenkt wurden, kam es in Österreichs Städten in der Vergangenheit bei verkehrsnahen Luftgütemessstellen vermehrt zu Immissions-Grenzwertüberschreitungen bei den Stickstoffoxiden  $\text{NO}_x$  und den Partikeln PM. Um den Anteil des Straßenverkehrs, neben Industrie und Haushalt, an den Gesamtemissionen besser quantifizieren zu können, wurden im Rahmen dieser Dissertation mehrere Forschungsprojekte zur Untersuchung der real emittierten Luftschadstoffe verschiedener Fahrzeugkategorien als auch alternativer Antriebe durchgeführt.

Besonders der Anteil des Straßengüterverkehrs an der Gesamtgüterverkehrsleistung ist mit rund 65 % in Österreich im Vergleich zu anderen Industriestaaten, wie zum Beispiel den Vereinigten Staaten, sehr hoch.

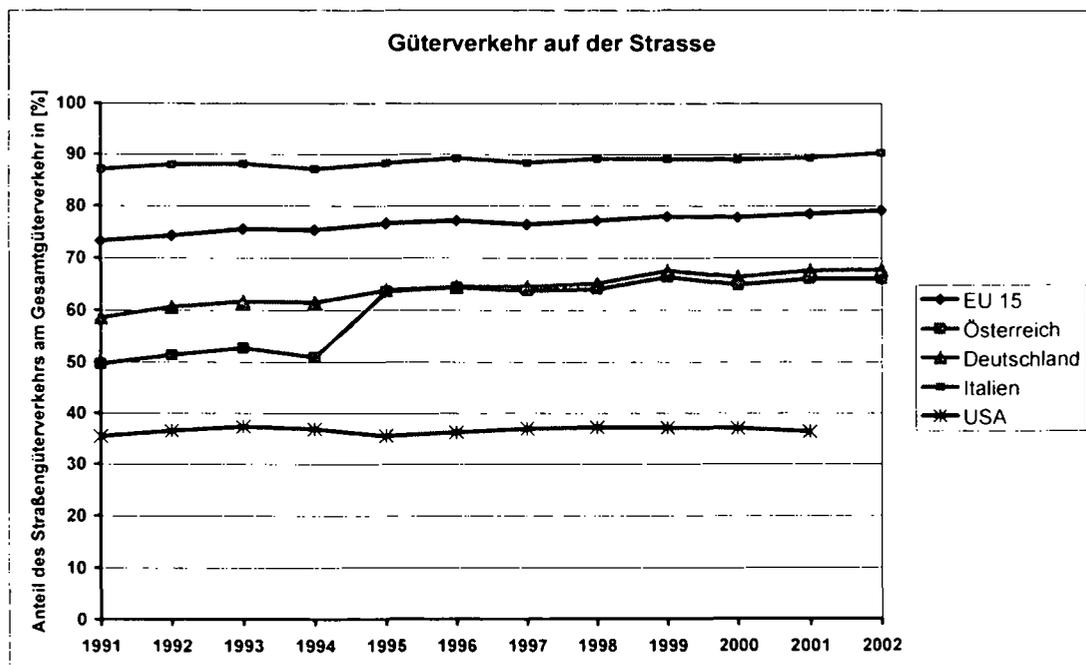


Abbildung 1: Anteil des Straßengüterverkehrs am Gesamtgüterverkehr<sup>1</sup>

Auch in der Bundeshauptstadt Wien ist der Güterverkehr eine immer wichtiger werdende verkehrstechnische Komponente. So steigt in den nächsten zehn Jahren der Güterverkehr

<sup>1</sup> Datenquelle: EUROSTAT, vgl. URL: <http://europa.eu.int/comm/eurostat/> (24.05.2004).

in der Knotenregion Wien auf Grund des Beitrittes der östlichen Nachbarstaaten zur Europäischen Union und durch die immer stärkere Integration der Weltwirtschaft erheblich an. Die folgende Abbildung zeigt die Gesamt-Güterverkehrsleistung in Mio. Tonnen pro Jahr im Ballungsraum Wien gegliedert nach Transportmittel und Art des Verkehrs (Binnen-, Quell-, Transitverkehr).

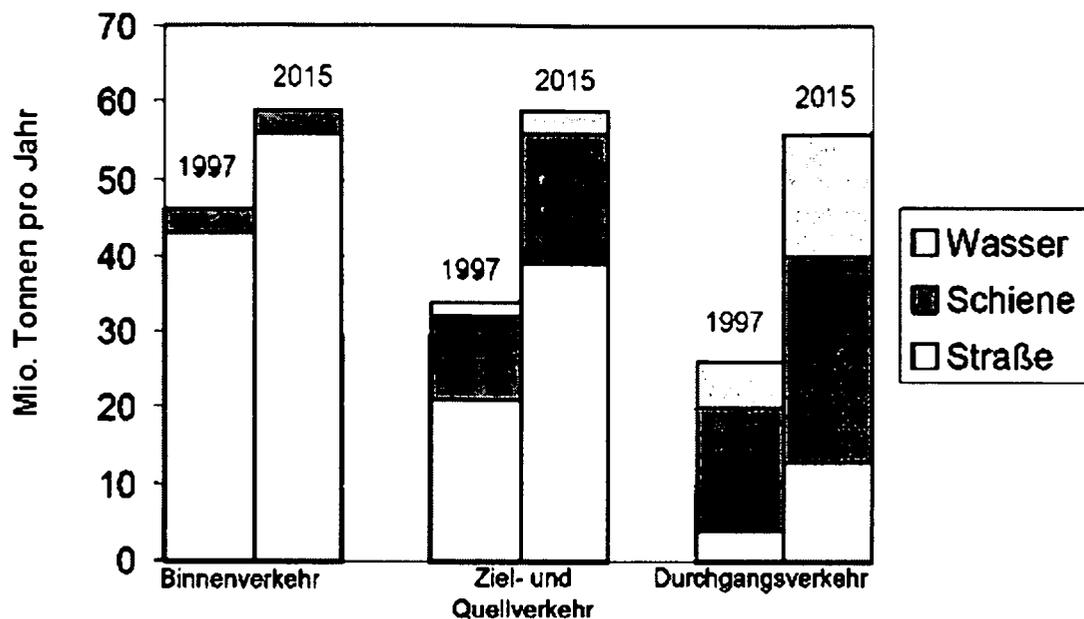


Abbildung 2: Entwicklung des Ziel-/Quell- und Durchgangsverkehrs im Güterverkehr in Mio. Tonnen pro Jahr in der Knotenregion Wien<sup>2</sup>

Wie aus der Abbildung zu erkennen ist, wird die in der Knotenregion Wien auf der Straße erbrachte Gesamt-Güterverkehrsleistung von heute (1997) von rund 70 Mio. Tonnen/Jahr bis zum Jahre 2015 auf 100 Mio. Tonnen/Jahr ansteigen. Dies entspricht einem Zuwachs von ca. 40 %.

Um dieser zukünftig gesteigerten Verkehrsleistung in urbanen Ballungsräumen in Europa und dem damit verbundenen Schadstoffausstoß entgegenzuwirken, rief die EU-Kommission unter anderem das Projekt CUTE und die CIVITAS Initiative ins Leben. Bereits 2030, schätzt die Kommission, werden 40 % aller zurückgelegten Kilometer in Ballungsräumen stattfinden.

<sup>2</sup> Vgl. HIESS/ROSINAK/SNIZEK 2003/61.

***EU Projekt CUTE***

Ende des Jahres 2001 wurde das europäische Projekt CUTE ("Clean Urban Transport for Europe") als öffentlich-private Partnerschaft gestartet.

Ziel des Projektes ist es, sowohl den Betrieb von Brennstoffzellenbussen, als auch die dazu notwendige Infrastruktur über einen Zeitraum von zwei Jahren zu erproben und darüber hinaus Erkenntnisse über die Akzeptanz dieser Technologie in der Öffentlichkeit zu gewinnen. Das CUTE Projekt ist das erste Projekt weltweit, welches sich gleichzeitig an Wasserstoffhersteller, Infrastruktur- und öffentliche Flottenbetreiber wendet.

Die Europäische Kommission fördert das Erprobungsprogramm CUTE mit 18,5 Mio. EUR. Bis Ende des Jahres 2003 sollen insgesamt 30 Niederflurbusse der Firma Mercedes Benz Nutzfahrzeuge AG in zehn europäische Städte (Amsterdam, Barcelona, Hamburg, London, Luxemburg, Madrid, Porto, Reykjavik, Stockholm und Stuttgart) ausgeliefert werden.

***EU Programm CIVITAS***

Die CIVITAS Initiative wurde im Jahr 2002 gestartet und wird voraussichtlich bis Ende 2005 andauern. Die Europäische Kommission beteiligt sich derzeit mit rund 50 Mio. EUR an der Finanzierung von integrierten Projekten in 19 Städten.

Ziel der Initiative ist es, einen nachhaltigen und umweltfreundlichen Stadtverkehr zu schaffen. Sie unterstützt engagierte Städte bei der Entwicklung innovativer Strategien, die sowohl technologische als auch politische Maßnahmen enthalten.

Die CIVITAS Initiative ist in vier Hauptprojekte gegliedert:

- TRENDSETTER (Lille, Stockholm, Graz, Prag, Pecs)
- VIVALDI (Bristol, Bremen, Nantes, Aalborg, Kaunas)
- TELLUS (Berlin, Göteborg, Bukarest, Gdynia, Rotterdam)
- MIRACLES (Rom, Barcelona, Winchester, Cork)

Folgende Ziele werden dabei verfolgt:

- Energieeffiziente, kostengünstige und umweltverträgliche öffentliche und/oder private Fahrzeuge und die erforderliche Infrastruktur
- Strategien für die Reduzierung der Nachfrage, die auf zufahrtsbeschränkten Zonen in der Innenstadt und anderen verkehrsreichen Gebieten basieren
- Strategien für die Reduzierung der Nachfrage die auf integrierten Preisgestaltungsstrategien aufbauen
- Förderung des öffentlichen Personennahverkehrs und der Dienstleistungsqualität
- Neue Formen der Nutzung und/oder des Eigentums von Fahrzeugen und weniger Auto-abhängige Lebensstile
- Neue Konzepte im Güterverkehr
- Innovative begleitende Maßnahmen zur Deckung des Mobilitätsbedarfs
- Verkehrsmanagementsysteme und diesbezügliche Informationssysteme

Neben den oben angeführten Initiativen CUTE und CIVITAS zur Verbesserung der Luft- bzw. der Lebensqualität durch Maßnahmen im Verkehrssektor in urbanen Ballungsräumen in europäischen Städten, initiierte die Europäische Union auch das Projekt CLEANER DRIVE zur Forcierung der Umsetzung bzw. Markteinführung von alternativ angetriebenen Fahrzeugen.

### ***EU Projekt CLEANER DRIVE***

CLEANER DRIVE ist ein Forschungs- und Technologieentwicklungsprojekt. Es verwendet die Erfahrungen, Kontakte zu Anspruchsgruppen und den Markteinfluss der nationalen Programme über sauberere Fahrzeuge mit dem Ziel europäische Lösungen für drei Themenbereiche zu entwickeln:

- Informationen für Fahrzeugflottenbetreiber
- Bewertung der Umweltverträglichkeit der Fahrzeuge
- Infrastrukturpolitik für gasförmige Kraftstoffe (Wasserstoff und Erdgas)

Das Hauptziel von CLEANER DRIVE ist die Überwindung von Marktbarrieren bei der Einführung von neuartigen Fahrzeugen. Der Hauptfokus zielt auf Informationsbarrieren.

Kennzeichnende Zielsetzungen von CLEANER DRIVE sind:

- Fundierte Informationen zur Fahrzeugauswahl für Marktteilnehmer im Rahmen von nationalen Websites zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen basieren auf einem allgemein gültigen europäischen Rahmen für Dateneingaben.
- Eine robuste europäische Methode für Fahrzeugumweltbewertung zu entwickeln. Diese Methode beschäftigt sich insbesondere mit sauberen Fahrzeugen und Technologien.
- Einsatz dieser Fahrzeugumweltbewertung im Rahmen einer Web-basierten Anwendung.
- Identifizieren der Bedingungen für eine kommerziell verfügbare Infrastruktur gasförmiger Kraftstoffe für Langstreckentransporte. Dieses umfasst die Empfehlung kurzfristiger ökonomischer Anreize sowie die Einführung und Harmonisierung von Normen und gesetzlichen Regelungen.

Wie aus den oben angeführten, von der EU geförderten Projekten ersichtlich ist, nimmt in Zukunft der Straßenverkehr in den Ballungszentren in Europa einen immer größer werdenden Stellenwert, hinsichtlich der nachhaltigen Umweltverträglichkeit und somit einer höheren Lebensqualität, ein.

Ein Großteil (mehr als 75 %) der europäischen Bevölkerung wohnt und lebt in urbanen Ballungsgebieten. Bereits im Jahr 2030, so schätzt die Europäische Kommission, werden 40 % aller zurückgelegten Kilometer in Ballungsräumen stattfinden. Dies war einer der ausschlaggebenden Gründe und gleichzeitig Motivation zur Verfassung dieser Dissertation mit dem Ziel, den urbanen Straßenverkehr in Zukunft sauberer gestalten zu können.

## 2 Methodik der Arbeit

Zur umfassenden Erörterung des umweltfreundlichen Straßenverkehrs in urbanen Ballungsräumen, speziell in Österreich, ist es notwendig, die Ausgangssituation (Immissions- und Emissionsanalyse der wichtigsten Luftschadstoffe) zu analysieren. Neben einer umfangreichen Validierung des verwendeten Emissionsrechenmodells wurden im Zuge dieser Arbeit aufwendige Untersuchungen zu den real emittierten Schadstoffen verschiedener Fahrzeugkategorien und Antriebstechnologien, insbesondere der Erdgas-Technik, durchgeführt.

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitspakete dieser Dissertation kurz dargestellt:

- ***Erfassung der Ist-Situation***

Zur Eruierung der Ausgangsproblematik hinsichtlich der Luftqualität in urbanen Ballungsräumen wurden in drei ausgesuchten Städten Österreichs (Wien, Salzburg Stadt, Feldkirch/Vbg.) die zeitlichen Verläufe der lokalen Immissionsmessstellen dargestellt. Hauptaugenmerk lag dabei auf stark befahrenen Straßenzügen und den zurzeit kritischen Luftschadstoffen Stickstoffoxide  $\text{NO}_x$  und den Partikeln PM.

- ***Emissionsbilanzen des Straßenverkehrs in Ballungszentren***

Mit Hilfe eines Rechenmodells, basierend auf den in der Fachliteratur angeführten Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge, war es möglich, den verschiedenen Fahrzeugkategorien bzw. -klassen den jeweiligen Emissionsanteil zuzuweisen. Anhand dieser ersten Berechnungen konnten die problematischen Verkehrsträger im städtischen Straßenverkehr identifiziert werden.

- ***Validierung des Emissionsberechnungsmodells***

Zur Validierung des Rechenmodells wurde eine aufwändige Untersuchung an einer stark frequentierten Durchzugsstraße in Wien-Hietzing durchgeführt. Durch eine videogestützte Verkehrszählung und einer parallelen Immissionsmessung der Komponenten (NO,  $\text{NO}_2$ , CO,  $\text{CO}_2$  und BC) konnte ein relativer Vergleich zwischen der Messung und der Emissionsmodellrechnung angestellt werden.

- ***Real-Life Messkampagnen mit schadstoffarmen Fahrzeugen***

Im Zuge dieser Arbeit wurden mit einem in Eigenentwicklung hergestelltem On-board Messsystem im Ballungsraum Wien Real-Life Emissions-Messkampagnen durchgeführt. Dieses sehr kompakte On-board Messsystem, kurz OBM, gestattete es, unterschiedlichste Fahrzeugkategorien (Automobil, Lastkraftwagen, Omnibus) hinsichtlich der gesetzlich reglementierten Abgaskomponenten Kohlenwasserstoffe HC, Kohlenstoffmonoxid CO, Stickstoffoxide NO<sub>x</sub> sowie dem Treibhausgas Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub> zu untersuchen.

Neben den konventionellen Antriebsarten (Benzin- und Dieselfahrzeuge) wurden auch so genannte Alternativantriebe, insbesondere Erdgasfahrzeuge (CNG), im realen Straßenverkehr in Wien gemessen.

- ***Emissionsreduktionspotentiale von Erdgas-Fahrzeugen***

Mit Hilfe der aus den zahlreichen Messfahrten gewonnenen Erkenntnisse ließen sich Rückschlüsse auf das reale Emissionsverhalten verschiedener Fahrzeugtechnologien, u.a. von Erdgas-Fahrzeugen, ziehen. Die so im realen Straßenbetrieb ermittelten Emissionsfaktoren sind eine wertvolle Ergänzung zu den in der Fachliteratur hinterlegten Emissionsdaten und können auch als Entscheidungshilfe für zukünftige Fuhrparkzukäufe in umweltbewussten privaten Unternehmen oder im öffentlichen Bereich dienen.

- ***Diskussion der Ergebnisse***

Zusammenfassend wurden die gewonnenen Erkenntnisse aus den Emissionsbilanzen und aus den im Ballungsraum Wien durchgeführten Real-Life Messungen diskutiert und die wichtigsten Ergebnisse nochmals dargestellt.

### 3 Immissions-Situation in ausgesuchten Städten Österreichs

Immer mehr Menschen entscheiden sich aus sozialen oder ökonomischen Gründen in Städten zu leben. Dadurch kommt es zu einem Anwachsen der bestehenden Ballungsgebiete, bzw. zu einer immer dichteren Besiedelung durch Neubauten in den Städten Österreichs. Darum muss auch in Zukunft gewährleistet werden, dass die Luftqualität kontinuierlich verbessert wird und die jeweils gültigen Immissions-Grenzwerte eingehalten werden. Die Entwicklung der Bevölkerung im relativen Vergleich zu 1951 in Österreich und in Wien, jeweils bis zum Jahre 2030, kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

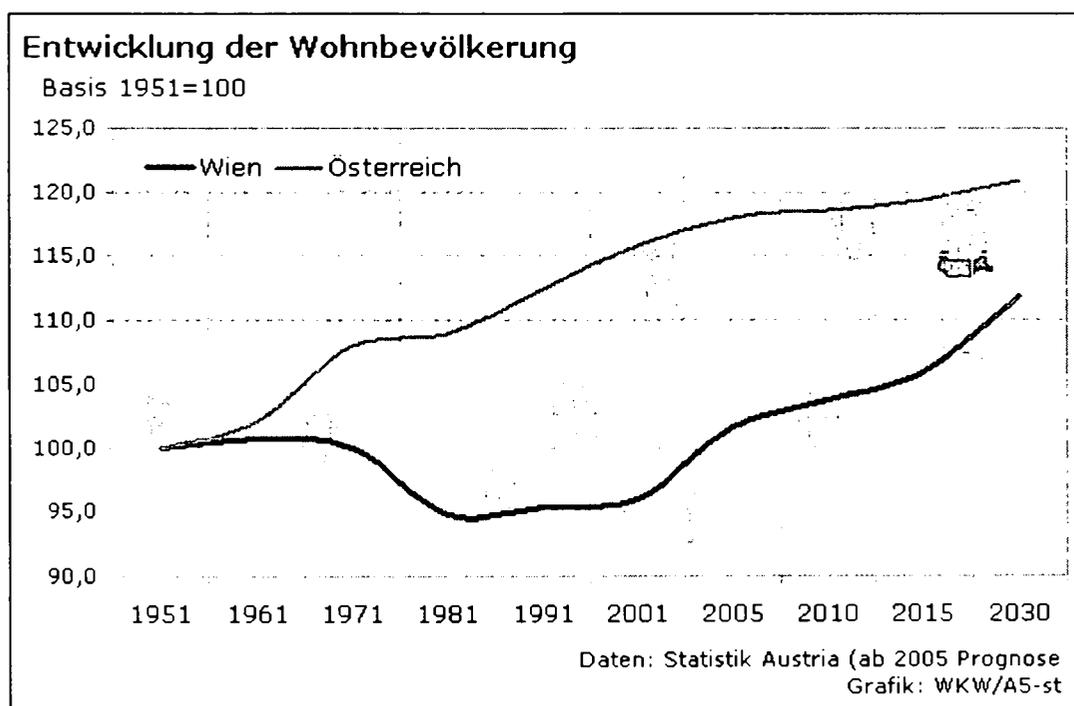


Abbildung 3: Wohnbevölkerungsentwicklung in Österreich<sup>3</sup>

In den folgenden Kapiteln wird die Immissions-Situation in Wien, Salzburg und Feldkirch näher erläutert. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf den zurzeit problematischen Luftschadstoffen Stickstoffoxide  $\text{NO}_x$  und den Partikeln PM.

<sup>3</sup> URL: <http://www.wkw.at/docextern/abtwipol/refstat/Grafik/bevgraf.htm> (11.04.2005); Wohnbevölkerung 1951: Wien: 1,6 Mio. Einwohner, Österreich: 6,9 Mio. Einwohner.

Stadt	Einwohner [Pers.]	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Bevölkerungsdichte [Pers./km <sup>2</sup> ]
Wien	1.610.000	415	3.880
Salzburg	145.000	66	2.197
Feldkirch	31.000	34	912

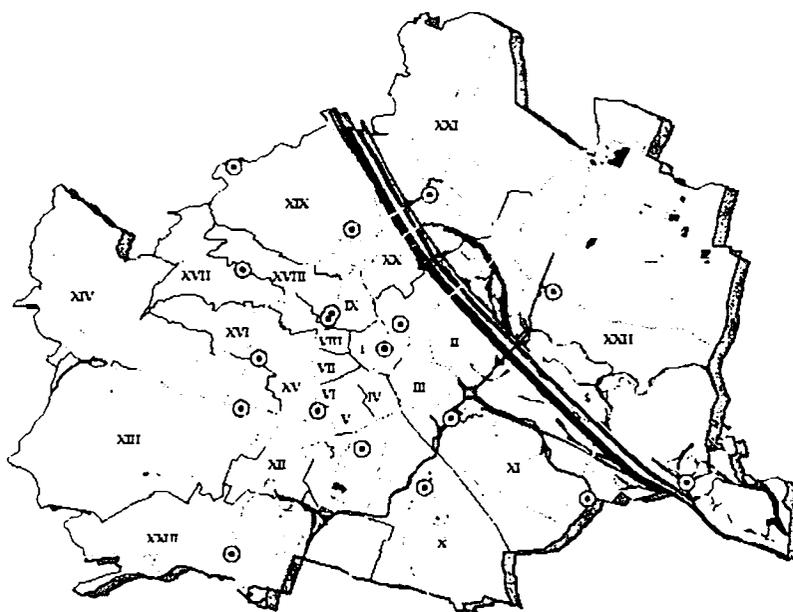
Datenquelle: URL: <http://www.tiscover.at> (11.04.2005)

Tabelle 1: Ausgesuchte Städte in Österreich

### 3.1 Luftgütesituation in Wien

Die Stadt Wien verfügt über ein sehr dichtes Netz von Immissions-Messstellen mit insgesamt 18 Standorten. Diese können je nach Standort folgende Schadstoffkomponenten in der Luft messen:

- Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>)
- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Schwebestaub (TSP)
- Feinstaub PM10
- Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)

Abbildung 4: Wiener Luftmessnetz Stand 2005<sup>4</sup>

<sup>4</sup> URL: <http://www.wien.gv.at/ma22/luft/messstat.htm> (15.04.2005).

Die Kohlenstoffmonoxid CO- und die Schwefeldioxid SO<sub>2</sub>-Immissionsbelastung in Wien spielt heute nur noch eine untergeordnete Rolle. Großen Beitrag dazu haben die Einführung des geregelten Drei-Wege-Katalysator für Benzin-Fahrzeuge in den 80er Jahren und die gesteigerte Entschwefelung, vor allem beim Diesel-Kraftstoff geleistet.

Eine besondere Stellung nimmt die Immissionsmessstelle am Hietzinger Kai ein, da diese direkt an einer stark frequentierten Einzugsstraße liegt.

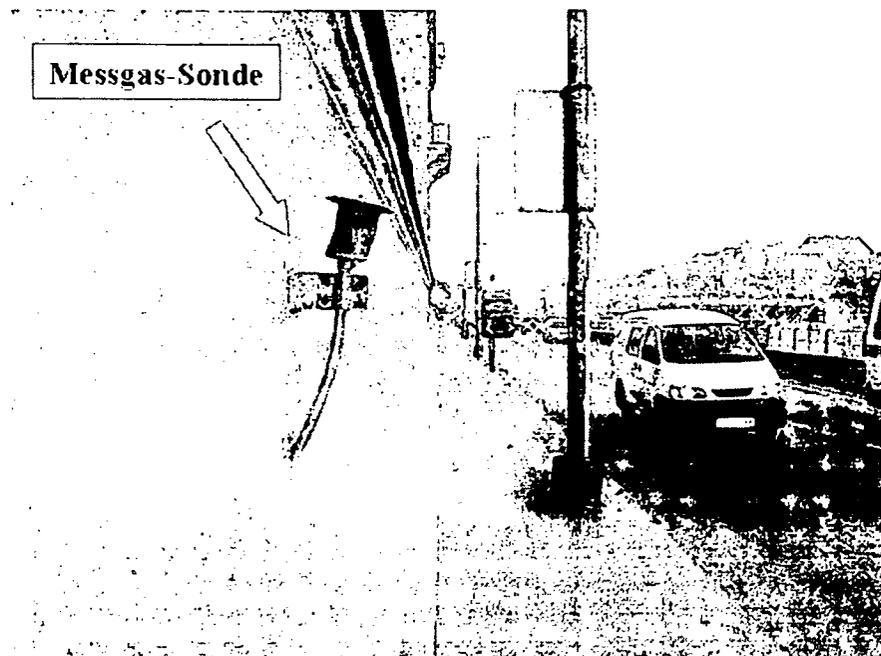


Abbildung 5: Immissions-Messstelle Hietzinger Kai

### 3.1.1 Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>-Immissionen

Der Jahresmittelwert der Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>-Immissionen über ganz Wien hat sich in den letzten zehn Jahren bei einem Wert von rund 30 bis 35 µg/m<sup>3</sup>, mit leichter Tendenz zum Steigen in den Jahren 2000 bis 2003, eingependelt.

Der Grenzwert für NO<sub>2</sub> gemäß dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) beträgt 30 µg/m<sup>3</sup>. Diesem wird jedoch in Österreich bis 2012 eine definierte Toleranz gewährt.

Neben dem Ausstoß von Primär-Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ , z.B. aus Fahrzeug-Abgasen, kommt es auch zur Sekundärbildung von Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  mit Hilfe von Ozon  $\text{O}_3$ . Das heißt, dass die gemessene  $\text{NO}_2$ -Konzentration in der Luft nicht nur vom  $\text{NO}_x$ -Ausstoß der verantwortlichen Emittenten abhängig ist, sondern auch durch die vorhandene Ozon  $\text{O}_3$ -Konzentration limitiert wird. An verkehrsreichen Straßenzügen mit sehr hohem  $\text{NO}$ -Ausstoß ist daher, neben der Reduzierung des Primär-Ausstoßes an Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ , zur Reduzierung der  $\text{NO}_2$ -Immissionskonzentration eine überproportionale Verringerung der lokalen  $\text{NO}$ -Konzentration notwendig.

Die folgende Abbildung illustriert die gemessenen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen im Jahresmittel in Wien.

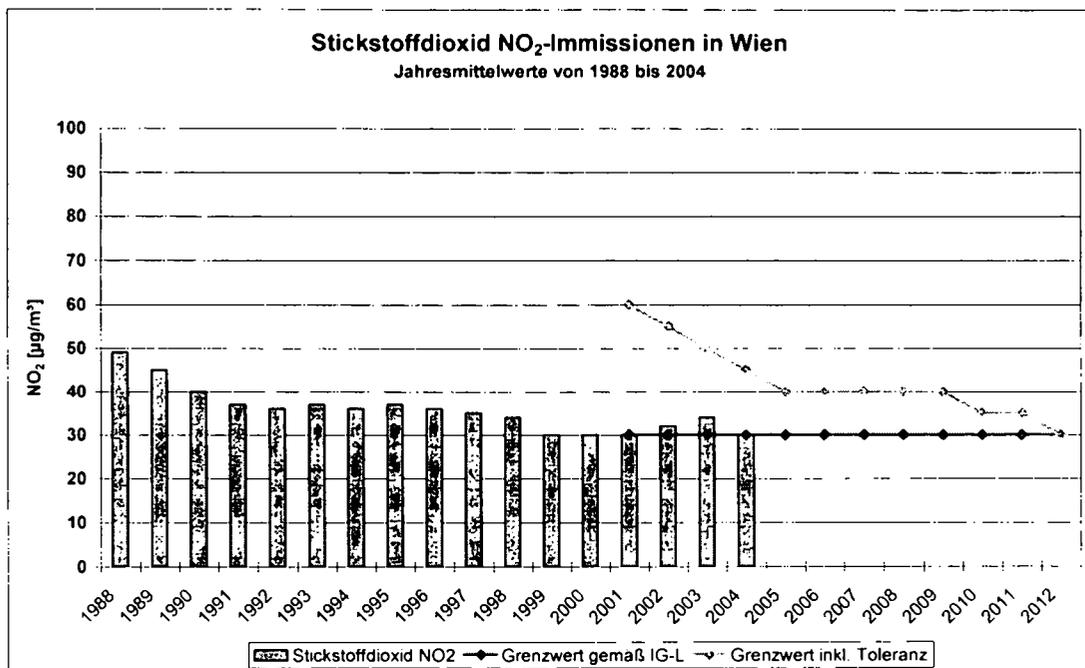


Abbildung 6: Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ -Immissionen in Wien<sup>5</sup>

Wesentlich höhere Immissions-Konzentrationen registrieren Messstellen, die besonders verkehrsnahe, wie zum Beispiel die Messstation Hietzinger Kai, angebracht sind. Diese liegt an einer viel befahrenen Durchzugsstraße in Wien mit einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsdichte von rund 29.000 Fahrzeugen.

<sup>5</sup> Datenquellen: AUGUSTYN 2004a/23 und AUGUSTYN 2004b.

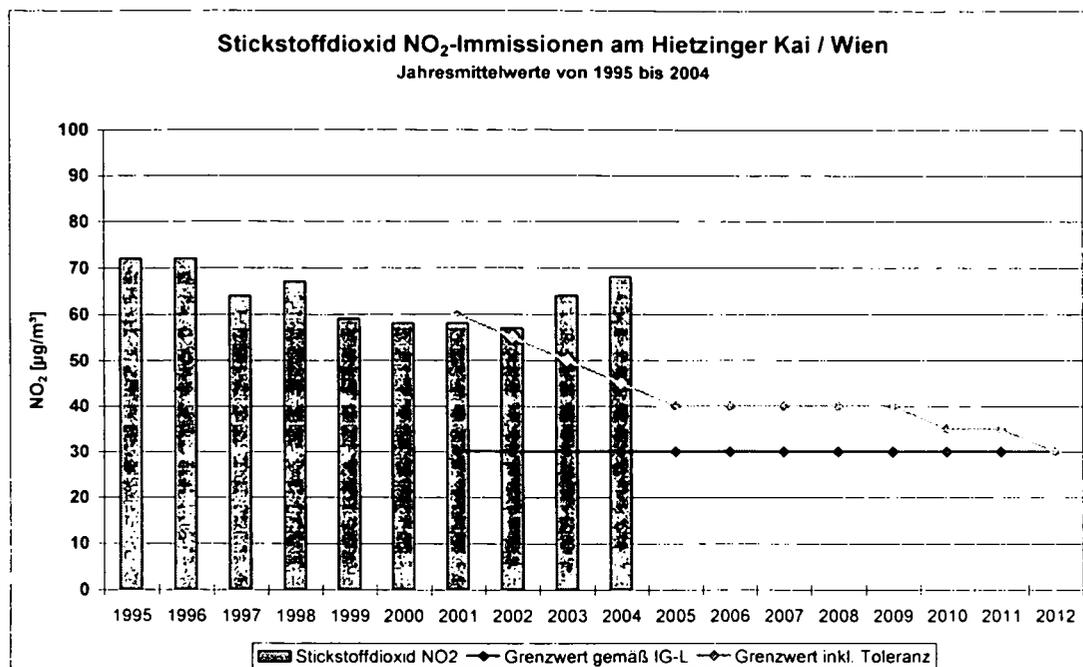


Abbildung 7: Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>-Immissionen am Hietzinger Kai/Wien<sup>6</sup>

Nach einem Abfall der NO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 1995 bis zum Jahrtausendwechsel stiegen die gemessenen Immissionen am Hietzinger Kai wieder relativ stark an und divergieren immer mehr mit dem angestrebten Grenzwert von 30 µg/m<sup>3</sup> gemäß dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L).

Ein Grund für dieses Ansteigen der Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>-Immissionen kann die ständig steigende Anzahl der dieselbetriebenen Fahrzeuge, vor allem im Pkw-Bereich, in Österreich sein. Dieselbetriebene Personenkraftwagen mit Oxidationskatalysator zur Reduzierung der Kohlenwasserstoff HC- und der Kohlenstoffmonoxid CO-Emissionen emittieren bis zu 40 % Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub> gemessen an den Gesamtemissionen an Stickstoffoxiden NO<sub>x</sub>. Diese Erhöhung des Ausstoßes der Primär-Stickstoffdioxiden schlägt sich nun besonders bei verkehrsnahen Immissions-Messstellen nieder.

<sup>6</sup> Datenquellen: AUGUSTYN 2001/4 und AUGUSTYN 2003/16 und AUGUSTYN/RIESS 2003/17 und AUGUSTYN 2004a/23 und AUGUSTYN 2004b.

### 3.1.2 Feinstaub PM10-Immissionen

Die Feinstaubpartikel PM10 stellen im Wesentlichen jenen Teil des Gesamtschwebstaubs (TSP) dar, dessen Partikel einen Durchmesser von 10  $\mu\text{m}$  nicht überschreiten. Die gesetzlichen Grenzwerte für den Gesamtschwebstaub (TSP) liefen mit Ende des Jahres 2004 aus. Ab Anfang 2005 gelten nur noch die Grenzwerte für PM10. Der maximal zulässige PM10-Tagesmittelwert (TMW) von 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  darf dabei bis 2005 an maximal 35 Tagen im Jahr und ab 2005 an höchstens 30 Tagen im Jahr überschritten werden. Im Jahresmittel dürfen 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht überschritten werden.

Die folgende Abbildung verdeutlicht, dass der PM10-Tagesmittelgrenzwert ein strengeres Kriterium darstellt, als der Jahresmittelgrenzwert von 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dabei sind die in Österreich im Zeitraum 2000 bis 2003 gemessenen Jahresmittelwerte JMW und die Anzahl der Tage, an denen eine Grenzwertüberschreitung TMW von mehr als 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  stattfand, aufgetragen.

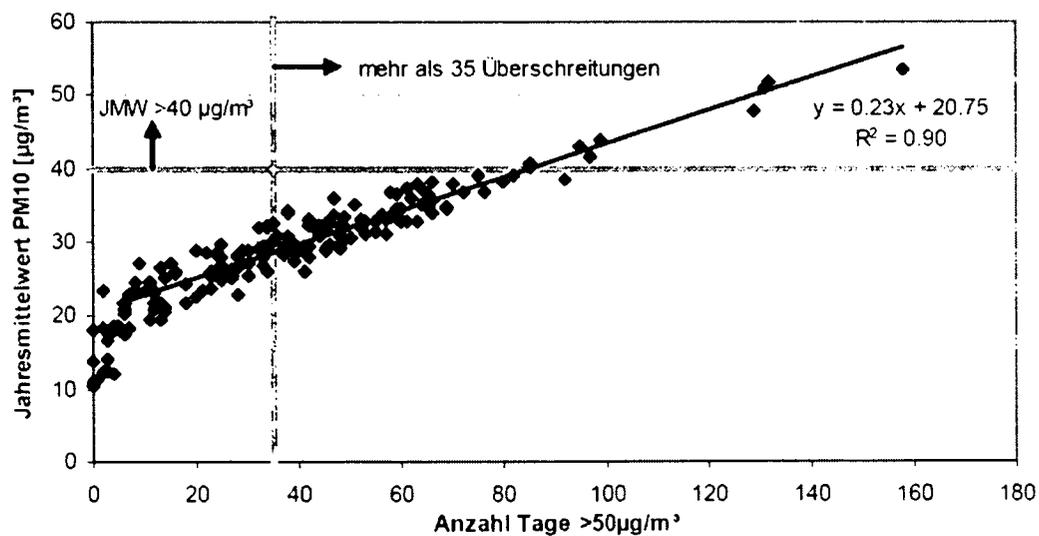


Abbildung 8: Korrelation zw. dem PM10-JMW (Grenzwert 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) und der Anzahl der Tage mit Werten über 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Zeitraum 2000 bis 2003<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Vgl. AUGUSTYN 2005a/5.

Einen typischen Jahresverlauf von Feinstaub-Immissionen im Ballungsraum Wien stellt die folgende Abbildung dar.

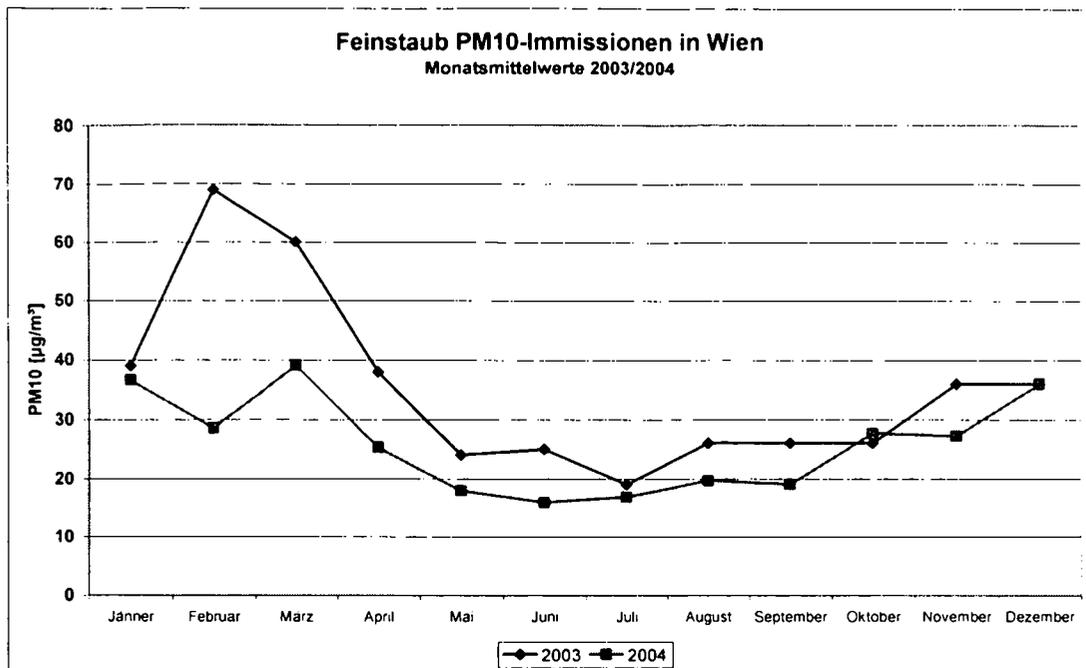


Abbildung 9: Zeitverlauf Feinstaub PM10-Immissionen in Wien<sup>8</sup>

An den drei PM10-Messstellen Liesing, Rinnböckstraße, Schafbergbad in Wien kam es im Jahr 2004 im Schnitt zu deutlich weniger Überschreitungen der  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  - Grenze als im Jahr zuvor. Dies ist in der nachstehenden Abbildung sehr schön ersichtlich.

<sup>8</sup> Datenquellen: AUGUSTYN 2004a/16 und AUGUSTYN 2004b.

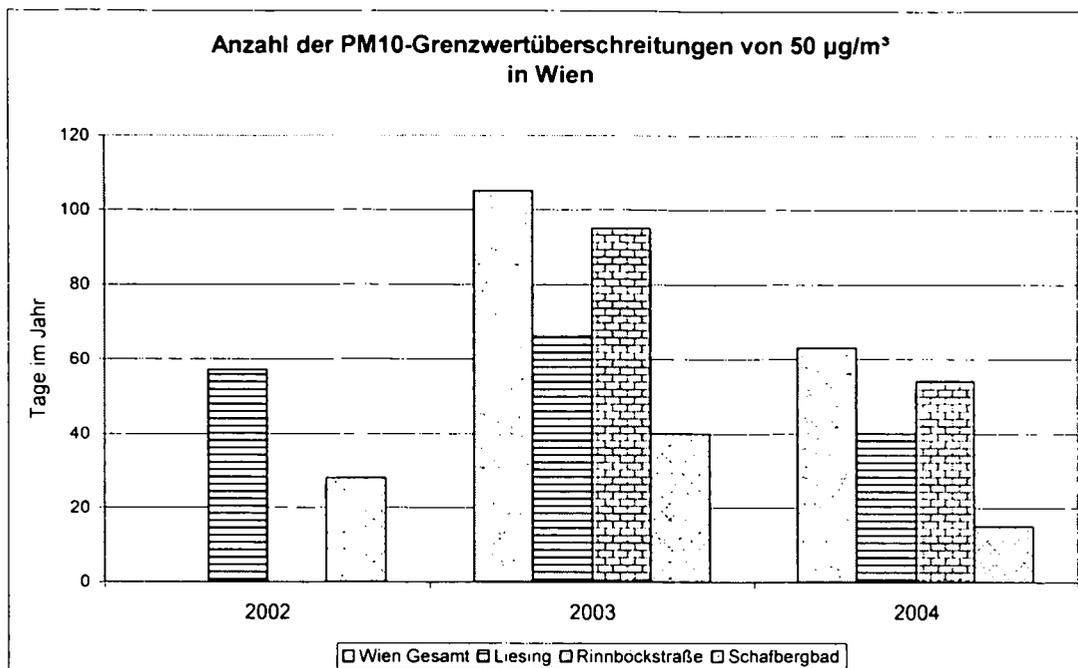


Abbildung 10: PM10-Grenzwertüberschreitungen in Wien<sup>9</sup>

### 3.2 Luftgütesituation in Salzburg Stadt

Die Stadt Salzburg verfügt über drei Immissions-Messstellen, die folgende Schadstoffkomponenten aufzeichnen:

- Salzburg Lehen: NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM10, O<sub>3</sub>
- Salzburg Mirabellplatz: NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM10, CO, O<sub>3</sub>
- Salzburg Rudolfsplatz: NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, PM10, CO

Standort	Lage	Messziel	Seehöhe
Rudolfsplatz	Verkehrinsel in einem Kreisverkehr	Stadtzentrum mit starker Verkehrsbelastung	425 m
Lehen	Wenig befahrene Strasse	Dicht verbautes Siedlungsgebiet	427 m
Mirabellplatz	Großer unverbauter Platz in Nähe der Verkehrsfläche	Stadtzentrum mit durchschnittlicher Verkehrsbelastung	430 m

Tabelle 2: Messnetz-Beschreibung Stadt Salzburg<sup>10</sup>

<sup>9</sup> Datenquellen: AUGUSTYN/RIESS 2003/15, AUGUSTYN 2004a/18, AUGUSTYN 2005b/17.

<sup>10</sup> Vgl. KRANABETTER/FALKENSTEINER 2004/8.



Abbildung 11: Luftgütemessstation Salzburg Rudolfplatz<sup>11</sup>

### 3.2.1 Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>-Immissionen

Ähnlich wie in der Bundeshauptstadt Wien steigen seit einigen Jahren an besonders viel befahrenen Straßen in Salzburg die Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>-Immissionsmesswerte wieder an. Die höchsten Grenzwertüberschreitungen gab es im Jahr 2003 an der Messstelle Rudolfplatz mit einem Halbstundenmittelwert von 220 µg/m<sup>3</sup> (Grenzwert: 200 µg/m<sup>3</sup> HMW) und dem Jahresmittelwert von 59 µg/m<sup>3</sup> (Grenzwert: 50 µg/m<sup>3</sup> JMW).<sup>12</sup> Die vorgeschriebene Stuserhebung laut dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) wurde daraufhin eingeleitet.

<sup>11</sup> Email: Dipl.-Ing. Michael Mandl, Amt der Salzburger Landesregierung, Abt. Umwelt (15.11.2005).

<sup>12</sup> Vgl. KRANABETTER/FALKENSTEINER 2004/5.

In der folgenden Abbildung sind die gemessenen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen der vergangenen 14 Jahre im Vergleich zum Immissionsgrenzwert aufgetragen. Um den vorgeschriebenen Zielwert von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im Jahr 2012 zu erreichen, sind erhebliche Reduktionsmaßnahmen notwendig.

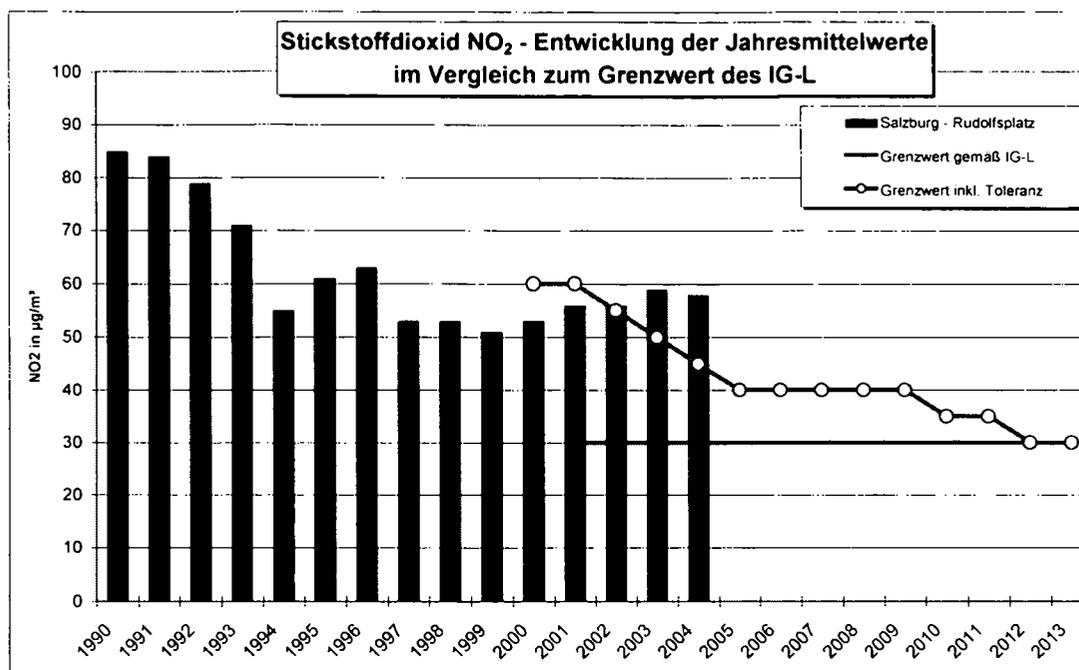


Abbildung 12: Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ -Immissionen am Rudolfplatz/Stadt Salzburg<sup>13</sup>

### 3.2.2 Feinstaub $\text{PM}_{10}$ -Immissionen

Ähnlich wie bei den Stickstoffdioxiden  $\text{NO}_2$  ist der Rudolfplatz in der Stadt Salzburg auch bei den Feinstaub  $\text{PM}_{10}$ -Immissionen Spitzenreiter. Im Jahr 2004 wurde der zulässige Tagesmittelwert (TMW) von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  34 mal überschritten. Dies ist im Vergleich zum Vorjahr eine deutliche Verbesserung.

Im Jahr 2003 wurde der Grenzwert nach dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) 62-mal übertroffen. Dabei traten die meisten Überschreitungen in den Monaten Februar und März 2003 auf. Auf Grund von trockenem, winterlichem Hochdruckwetter mit lang anhaltenden Inversionen konnten die Schadstoffe nicht verdünnt und abtransportiert werden.

<sup>13</sup> Datenquelle: Amt der Salzburger Landesregierung, Abteilung 16 – Umweltschutz (07.03.2005).

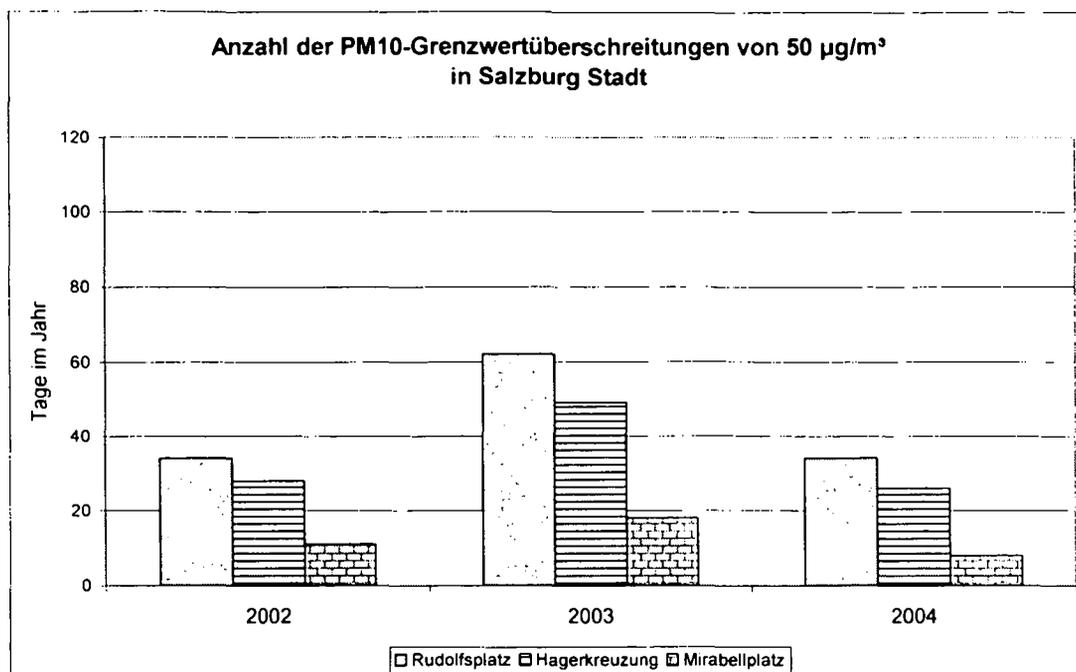


Abbildung 13: PM10-Grenzwertüberschreitungen in Salzburg Stadt<sup>14</sup>

<sup>14</sup> Datenquelle: KRANABETTER/FALKENSTEINER 2005/18.

### 3.3 Luftgütesituation in Feldkirch

Feldkirch ist eine Kleinstadt in Vorarlberg mit vergleichsweise hohem Verkehrsaufkommen in der inneren Stadt. Hauptkreuzungspunkt in Feldkirch ist die Bärenkreuzung, wo sich zwei viel befahrene Landesstraßen L190 und L191 kreuzen. In der folgenden Tabelle ist das Verkehrsaufkommen der vier Zubringerstraßen an der Bärenkreuzung als Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV) für das Jahr 2005 angeführt.

Zubringerstrassen Bärenkreuzung/Feldkirch				
Strasse	Pkw/Tag	Lkw/Tag	Summe	Lkw Anteil
L190 - Bahnhofstrasse	23.900	650	24.550	2,6%
L190 - Schlossgraben	19.300	850	20.150	4,2%
L191 - Hirschgraben	23.400	900	24.300	3,7%
L53 - Ardetzenbergtunnel	14.800	500	15.300	3,3%

Angaben als Durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV), Basisjahr 2005

Tabelle 3: Verkehrsaufkommen 2005 an der Bärenkreuzung/Feldkirch<sup>15</sup>



Abbildung 14: Luftgütemessstation Feldkirch-Bärenkreuzung

<sup>15</sup> Datenquelle: BESCH/BOBLETER 2003.

Die Immissionsmessstelle des Umweltinstitutes des Landes Vorarlberg ist sehr verkehrsnah in 30 m Abstand zur L190, 15 m Abstand zur L191 und in 3 m Abstand zur L53 platziert. Neben den Stickstoffdioxiden und den Partikeln werden auch die Kohlenstoffmonoxide und Benzol gemessen. Die Anlage befindet sich in 460 m Seehöhe.

### 3.3.1 Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>-Immissionen

Die folgende Abbildung zeigt die Immissionen der Stickstoffoxide NO<sub>x</sub> an der Bärenkreuzung im Zeitraum von 1988 bis 2003. Durch die Eröffnung des Ardetzenbergtunnels im Jahre 1998 kam es zu einer grundlegenden Veränderung der Verkehrssituation an der Bärenkreuzung und zu einem sprunghaften Anstieg der Stickstoffmonoxid NO-Immissionen im Jahresmittel. Dies kann auf eine Steigerung des durchschnittlich täglichen Verkehrs zurückgeführt werden.

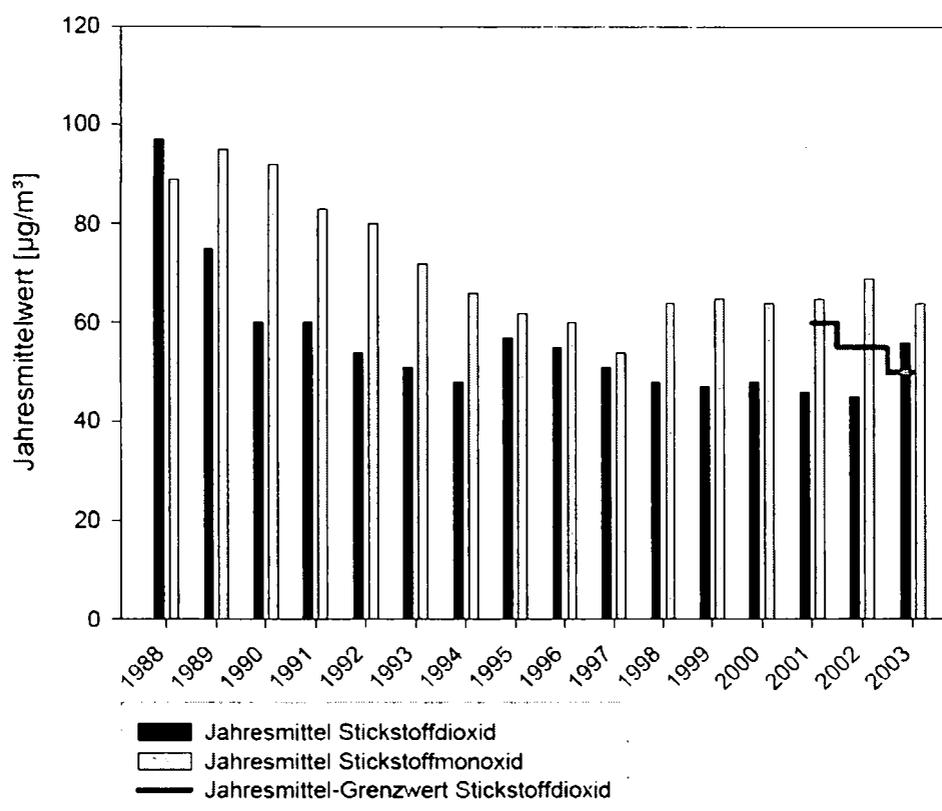


Abbildung 15: Entwicklung der NO<sub>x</sub>-Konzentrationen (NO und NO<sub>2</sub>) in Feldkirch<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Vgl. ANWANDER/BÖSCH 2004/14.

Die relativ konstante Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ -Belastung von 1998 bis 2002 von rund  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  stieg im Jahr 2003 deutlich an. Gemessen wurde 2003 ein Jahresmittelwert von  $56 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  bei einem Grenzwert von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ebenso wurde in diesem Jahr der zulässige Halbstundenmittelwert (HMW) von maximal  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_2$  mit einem Messwert von  $258 \mu\text{g}/\text{m}^3$  markant überschritten. Hingegen blieb die Summe aus Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$  und Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$  im Jahresmittel von 2002 auf 2003 mit einem Immissionswert von  $154 \mu\text{g}/\text{m}^3 \text{NO}_x$  konstant.

Ähnlich wie in der Stadt Salzburg kommt es auch in der Kleinstadt Feldkirch zu einem Konflikt zwischen dem vorgeschriebenen, zukünftigen Luftgütegrenzwert und den tatsächlich gemessenen Immissionen von Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ .

### 3.3.2 Feinstaub $\text{PM}_{10}$ -Immissionen

Bei den Feinstaub  $\text{PM}_{10}$ -Immissionen liegt Feldkirch im Vergleich zu den anderen Messstationen im Rheintal/Vbg. sowohl beim  $\text{PM}_{10}$ -Jahresmittelwert, als auch bei der Anzahl der Tage mit  $\text{PM}_{10}$ -Tagesmittelwerten über  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  an erster Stelle. Die erlaubten 35 Tage wurden im Jahr 2004 mit 46 Tagen deutlich überschritten.

Erfreulicherweise sank 2004 im Verhältnis zum Vorjahr die  $\text{PM}_{10}$ -Belastung in Feldkirch, wie auch in den Städten Wien und Salzburg, deutlich. Der Landeshauptmann hat jedoch die Aufgabe auf Grund der immer noch erheblichen Schadstoff-Belastung und der Grenzwertüberschreitungen von Feinstaub  $\text{PM}_{10}$  und den Stickstoffdioxiden  $\text{NO}_2$  im Jahr 2004 im Zuge des Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) eine Stuserhebung gemäß § 8 IG-L erstellen zu lassen.

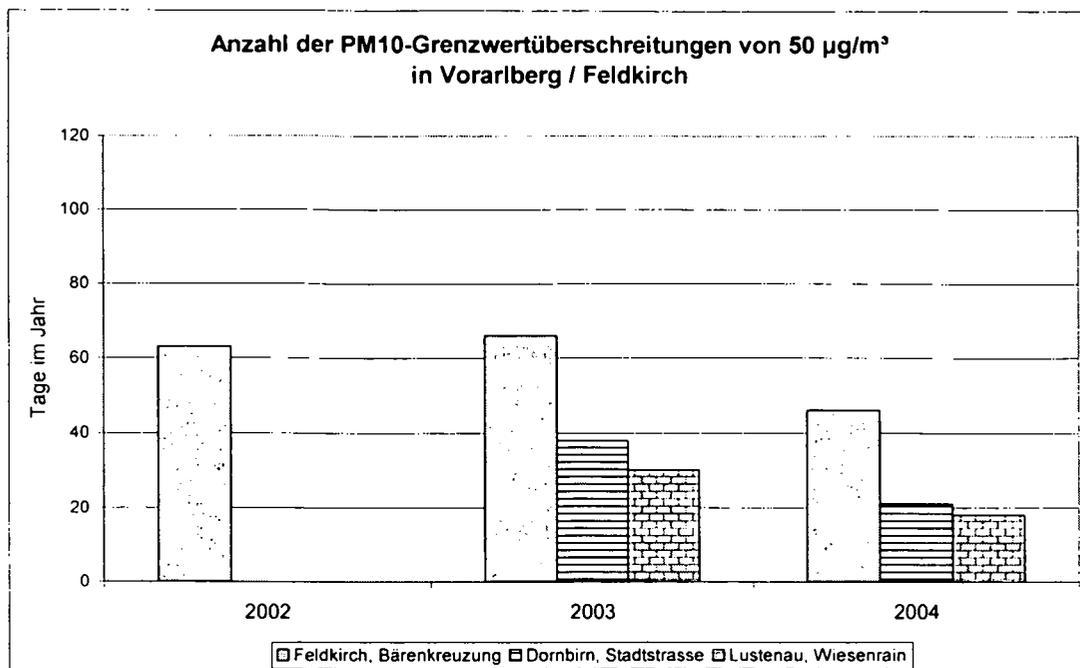


Abbildung 16: PM10-Grenzwertüberschreitungen in Vorarlberg / Feldkirch<sup>17</sup>

### 3.4 Fazit der Immissions-Situation in ausgesuchten Städten Österreichs

Sowohl in der Bundeshauptstadt Wien, als auch in Salzburg und der Kleinstadt Feldkirch erweisen sich die Stickstoffdioxide NO<sub>x</sub> bei verkehrsnahen Messstellen, wie dies der Hietzinger Kai, Rudolfsplatz und die Bärenkreuzung sind, als echtes Problem zur Einhaltung der Luftgüterichtlinien nach dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L). In allen drei Städten ist der Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub>-Messwert bei den besagten, stark frequentierten Messpunkten ca. doppelt so hoch wie der angestrebte Luftgüte-Grenzwert für das Jahr 2012 von 30 µg/m<sup>3</sup>.

Ebenso wird der zulässige Feinstaub PM10-Tagesgrenzwert (TMW) von 50 µg/m<sup>3</sup> in allen drei Städten an markanten Messpunkten regelmäßig überschritten. Laut österreichischem Gesetz darf es ab 2005 nur noch an maximal 30 Tagen pro Jahr zu Überschreitungen dieser Marke kommen.

<sup>17</sup> Datenquelle: URL:

[http://www.vorarlberg.at/vorarlberg/umwelt\\_zukunft/umwelt/umweltinstitut/weitereinformationen/luft/pm10.htm](http://www.vorarlberg.at/vorarlberg/umwelt_zukunft/umwelt/umweltinstitut/weitereinformationen/luft/pm10.htm) (19.10.2005).

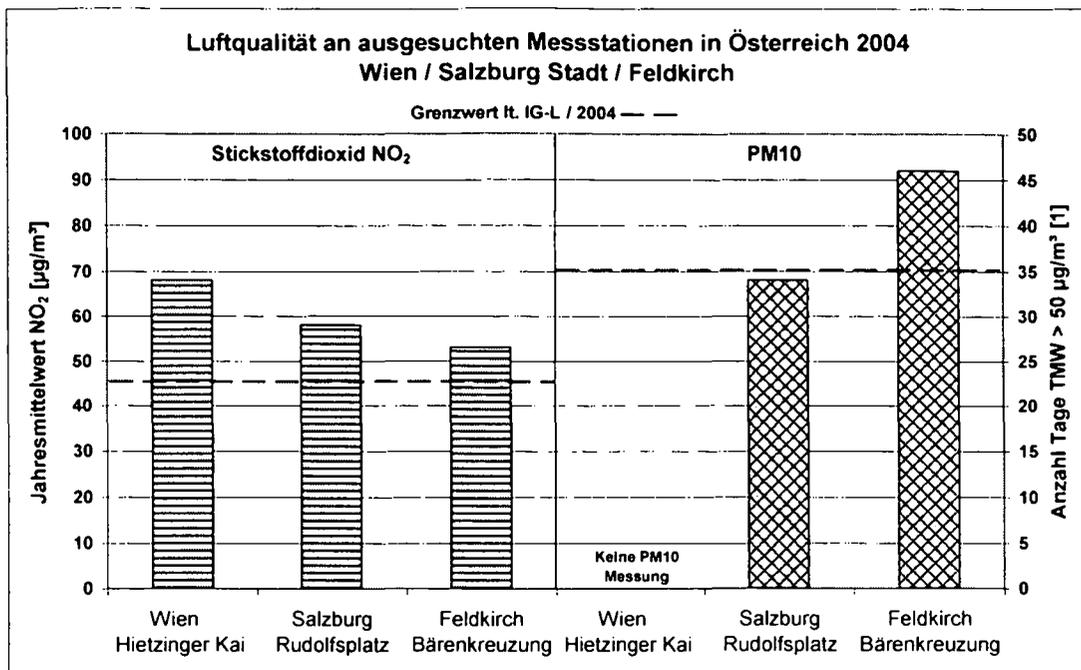


Abbildung 17: Luftqualität an ausgesuchten Messstationen in Österreich

## 4 Emissionsbilanzen des Straßenverkehrs in Ballungszentren

### 4.1 Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge

Als „Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge“ werden Schadstoff-Massenemissionen in g/km definiert. Je nach Messmethode werden diese entweder einem Fahrzeugkollektiv oder einem Einzelfahrzeug zugeordnet. In den folgenden Kapiteln werden unterschiedliche Möglichkeiten zur Erfassung von realen Emissionsfaktoren (EFA) erläutert. Die EFA in g/km für sich im Verkehr befindliche Kraftfahrzeuge können unter anderem wie folgt bestimmt werden:

- EFA-Bestimmung mittels Straßentunnel
- EFA-Bestimmung auf dem Rollenprüfstand
- EFA-Bestimmung mittels On-board System

Des Weiteren werden kurz die Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge in der Europäischen Union dargestellt, um eine Relation zu den real ermittelten Emissionsfaktoren aufzuzeigen.

#### 4.1.1 Emissionsgrenzwerte in der Europäischen Union

Die Europäische Union erarbeitet Richtlinien zur Reduzierung der Abgasemissionen von Kraftfahrzeugen. Neu zu typisierende Fahrzeuge bzw. Verbrennungsmotoren müssen zum Zeitpunkt ihrer Erstzulassung bzw. zum Zeitpunkt ihrer Typprüfung die jeweils gültigen Abgasstandards erfüllen.

Ein Problem, das sich dabei stellt ist, dass nicht alle Fahrzeuge, die auf den Markt kommen, vermessen werden, sondern von jeder Modellreihe nur eine bestimmte Anzahl an Fahrzeugen, die durch die in der Richtlinie festgelegten Prüfstatistik gegeben ist.

In den Richtlinien wird der Stickstoffoxid  $\text{NO}_x$ -Ausstoß als Summe von Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$  und Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$  mit jeweils der Dichte<sup>18</sup> von Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$  bei

---

<sup>18</sup> Vgl. 91/441/EWG - L242/4.

Normbedingungen (101,33 kPa, 273,2 K)<sup>19</sup> berechnet. Auf Grund dieser Festlegung ist es bei der Typprüfung unerheblich, wie groß der Anteil des giftigen Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub> im Verhältnis zu den Gesamt-Stickstoffoxiden NO<sub>x</sub>-Emissionen ist. Lag das Verhältnis NO<sub>2</sub> zu NO<sub>x</sub> früher bei rund 5 % bei Benzin- wie auch bei Diesel-Fahrzeugen, so ist er heute bei Diesel-Fahrzeugen, bei gleich bleibenden NO<sub>x</sub>-Typprüfungswerten auf bis zu 40 % gestiegen.

#### 4.1.1.1 Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge

Die Überprüfung, ob ein Fahrzeug der vorgeschriebenen EU-Abgasnorm entspricht, erfolgt mittels des Europäischen Fahrzyklus (MVEG) auf einem Rollenprüfstand mit einer CVS-Anlage. Der seit der Euro 3 - Norm gültige MVEG-Fahrzyklus besteht einerseits aus dem ECE-Zyklus (Stadtzyklus, Teil 1) und dem EUDC (Extra Urban Driving Cycle, Teil 2), der den außerstädtischen Verkehr simuliert.

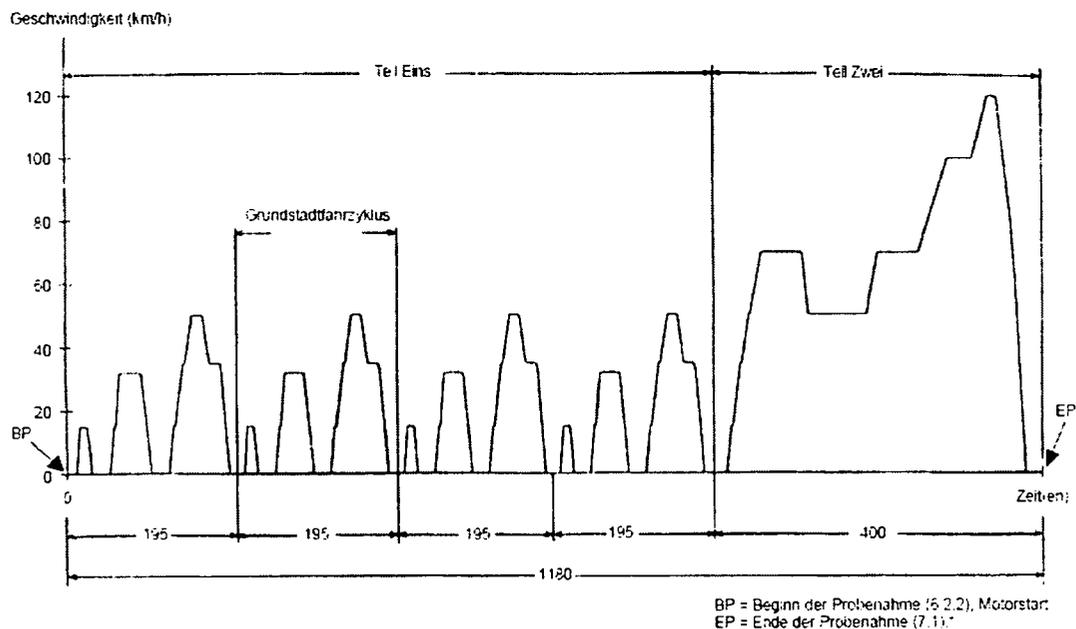


Abbildung 18: MVEG-Typprüfzyklus für Pkw<sup>20</sup>

<sup>19</sup> Vgl. 91/441/EWG - L242/32.

<sup>20</sup> Vgl. 98/69/EG - L350/26.

Beim Abfahren dieses Zyklus am Rollenprüfstand bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C dürfen die in den folgenden zwei Tabellen angeführten Grenzwerte an Schadstoff-Emissionen nicht überschritten werden.

Fremdzündungsmotor (Benzin und Erdgas)								
Abgasnorm	Klasse	Gruppe	Bezugsmasse (RW) [kg]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	HC + NO <sub>x</sub> [g/km]	PM (10) [g/km]
<b>Euro 3</b> ab 2000 nach 98/69/EC	M		RW < 2500	2,30	0,20	0,15	--	--
	N <sub>1</sub>	I	RW < 1305	2,30	0,20	0,15	--	--
		II	1305 < RW < 1760	4,17	0,25	0,18	--	--
		III	1760 < RW < 2500	5,22	0,29	0,21	--	--
<b>Euro 4</b> ab 2005 nach 98/69/EC	M		RW < 2500	1,00	0,10	0,08	--	--
	N <sub>1</sub>	I	RW < 1305	1,00	0,10	0,08	--	--
		II	1305 < RW < 1760	1,81	0,13	0,10	--	--
		III	1760 < RW < 2500	2,27	0,16	0,11	--	--

M...Personenkraftwagen (Pkw)  
N<sub>1</sub>...Leichte Nutzfahrzeuge

Tabelle 4: EU-Abgasnorm für Fahrzeuge mit Fremdzündungsmotor<sup>21</sup>

Selbstzündungsmotor (Diesel)								
Abgasnorm	Klasse	Gruppe	Bezugsmasse (RW) [kg]	CO [g/km]	HC [g/km]	NO <sub>x</sub> [g/km]	HC + NO <sub>x</sub> [g/km]	PM (10) [g/km]
<b>Euro 3</b> ab 2000 nach 98/69/EC	M		RW < 2500	0,64	--	0,50	0,56	0,050
	N <sub>1</sub>	I	RW < 1305	0,64	--	0,50	0,56	0,050
		II	1305 < RW < 1760	0,80	--	0,65	0,72	0,070
		III	1760 < RW < 2500	0,95	--	0,78	0,86	0,100
<b>Euro 4</b> ab 2005 nach 98/69/EC	M		RW < 2500	0,50	--	0,25	0,30	0,025
	N <sub>1</sub>	I	RW < 1305	0,50	--	0,25	0,30	0,025
		II	1305 < RW < 1760	0,63	--	0,33	0,39	0,040
		III	1760 < RW < 2500	0,74	--	0,39	0,46	0,060

M...Personenkraftwagen (Pkw)  
N<sub>1</sub>...Leichte Nutzfahrzeuge

Tabelle 5: EU-Abgasnorm für Fahrzeuge mit Selbstzündungsmotor<sup>22</sup>

#### 4.1.1.2 Lastkraftwagen und Busse

Bei schweren Nutzfahrzeugen wird nur der Antriebsmotor dem vorgeschriebenen Prüfzyklus am Motorenprüfstand ausgesetzt und so festgestellt, ob die zurzeit gültigen Abgasnormen eingehalten werden. Beim Abfahren des vorgeschriebenen Zyklus am Motorenprüfstand bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C dürfen die folgenden Emissionsgrenzwerte nicht überschritten werden.

<sup>21</sup> Vgl. 98/69/EG – L350/15.

<sup>22</sup> Vgl. 98/69/EG – L350/15.

	NOx [g/kWh]	PM (10) [g/kWh]	HC [g/kWh]	NMHC [g/kWh]	Methan [g/kWh]	CO [g/kWh]	Zyklus	Einführungs- datum
<b>EURO 0</b> 88/77/EWG	15,8	--	2,6	--	--	12,3	ECE 49	1988
<b>EURO I</b> 91/542/EWG	9	0,4	1,23	--	--	4,93	ECE 49	1993
<b>EURO II</b> 91/542/EWG	7	0,15	1,1	--	--	4	ECE 49	1996
<b>EURO III</b> 99/96/EG	5,0	0,16 0,1	0,66	0,78	1,6	5,45 2,1	ETC und ESC	2000
<b>EURO IV</b> 03/26/EG	3,5	0,03 0,02	0,46	0,55	1,1	4,0 1,5	ETC und ESC	2005
<b>EURO V</b> 03/26/EG	2,0	0,03 0,02	0,46	0,55	1,1	3,0 1,5	ETC und ESC	2008
<b>EEV</b> 99/96/EG	2,0	0,02 0,02	0,25	0,4	0,65	3,0 1,5	ETC und ESC	ab 1999

ETC... Europäische Prüfung mit instationärem Fahrzyklus  
ESC... Europäische Prüfung mit stationärem Fahrzyklus

Tabelle 6: EU-Abgasnormen für Schwere Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor<sup>23</sup>

	NOx [g/kWh]	PM (10) [g/kWh]	HC [g/kWh]	NMHC [g/kWh]	Methan [g/kWh]	CO [g/kWh]	Zyklus	Einführungs- datum
<b>EURO III</b> 99/96 EG	5,00	0,16	--	0,78	1,60	5,45	ETC	2000
<b>EURO IV</b> 03/26 EG	3,50	0,03	--	0,55	1,10	4,00	ETC	2005
<b>EURO V</b> 03/26 EG	2,00	0,03	--	0,55	1,10	4,00	ETC	2008
<b>EEV</b> 99/96 EG	2,00	0,02	--	0,40	0,65	3,00	ETC	ab 1999

Tabelle 7: EU-Abgasnormen für Schwere Nutzfahrzeuge mit Erdgasmotor<sup>24</sup><sup>23</sup> Vgl. 1999/96/EG – L44/22.<sup>24</sup> Vgl. 1999/96/EG – L44/22.

#### 4.1.2 Emissionsfaktorenbestimmung mittels Straßentunnel

Anhand von Schadstoffmessungen der Frisch- bzw. Abluft in Tunnelsystemen ist es möglich, für ein Fahrzeugkollektiv in einer bestimmten Zeitspanne die jeweiligen Emissionsfaktoren zu bestimmen. Die EFA können nicht direkt einem einzelnen Fahrzeug zugeordnet werden, da es zu Vermischungen und Verwirbelungen der spezifischen Abgase kommt. Diese Art der Bestimmung von Emissionsfaktoren soll hier anhand von zwei durchgeführten Messkampagnen illustriert werden.

##### 4.1.2.1 Messkampagne Tauerntunnel

Im Jahr 1997 wurde eine Messkampagne im Tauerntunnel<sup>25</sup> (Salzburg, Autobahn A10) mit dem Ziel der Validierung der in der Literatur vorhandenen Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge durchgeführt. Der Tunnel ist 6400 m lang, mit Gegenverkehr und hat eine Steigung von rund 1,5 %.

Der Tauerntunnel ist querdurchströmt und sichert so eine sehr homogene Gaskonzentration über den gesamten Belüftungsabschnitt. Gemessen wurde in der Mitte des Tunnels, jeweils in der Frischluftzufuhr als auch in der Abgasentlüftung.

Durch die Differenz der beiden gemessenen Konzentrationen, ist es möglich eine Schadstoffkonzentration einer mittels Video-Aufzeichnung erfassten Fahrzeugflotte zuzuweisen. Der Anteil des Güterverkehrs am Messtag Do 02.10.1997 betrug rund 16 %.

---

<sup>25</sup> Vgl. PUCHER/PUXBAUM/SCHMID 1997.

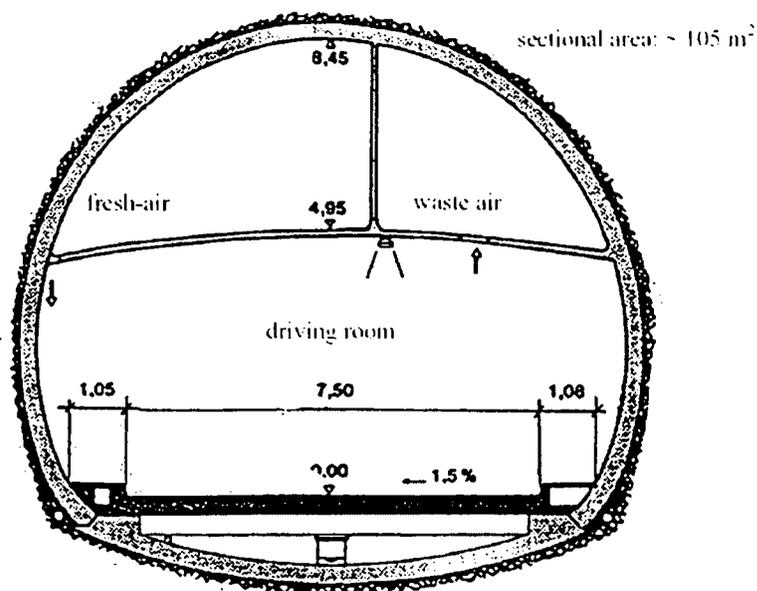


Abbildung 19: Querschnitt der Tauerntunnelröhre mit Belüftungsschächten<sup>26</sup>

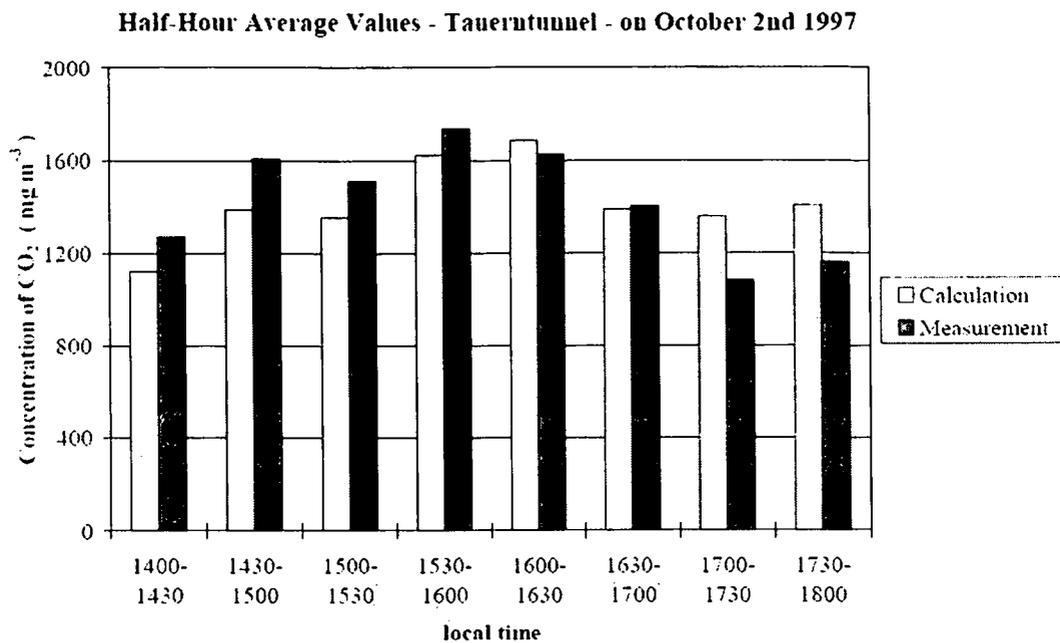
Neben der Schadstoff-Konzentrationserfassung wurde ebenso die Geschwindigkeit jedes Fahrzeuges mit aufgezeichnet, um anhand eines Modells, aufbauend auf dem „Handbuch für Emissionsfaktoren“<sup>27</sup>, die Emissionen rechnerisch zu bestimmen. Je nach Fahrzeugkategorie (Pkw, Lkw, Lkw mit Anhänger, Reisebus, ...) konnte so ein Emissionsfaktor für die Komponenten CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM und Blei Pb zugewiesen werden. Aus den berechneten Emissionen in g/km der gesamten Fahrzeugflotte konnte eine Konzentration in g/m<sup>3</sup> bestimmt werden, da der Volumenstrom pro Tunnelkilometer der Belüftung des Tauerntunnels mit rund 57 m<sup>3</sup>/(km\*sec) bekannt war.

Die folgenden Abbildungen zeigen eine Gegenüberstellung der berechneten Abgas-Emissionen und der gemessenen Immissionen der Komponenten Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>, Stickstoffoxiden NO<sub>x</sub> und den Rußpartikeln PM, ausgedrückt als Halbstundenmittelwert (HMW) in g/m<sup>3</sup>.

<sup>26</sup> Vgl. PUCHER/PUXBAUM/SCHMID 1997/2.

<sup>27</sup> Vgl. UBA 1995.

## Vergleich Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>



**Abbildung 20: Vergleich CO<sub>2</sub>-Konzentrationen Berechnung vs. Messung<sup>28</sup>**

Die Abweichungen zwischen Berechnung und Messung liegen in den ersten zwei Stunden zwischen 5 % und 10 %. Dabei unterschätzt das Berechnungsmodell die Messungen leicht. In der zweiten Messhälfte kommt es zu einer Umkehr. Die Messwerte liegen unter den Rechenwerten. Da sich bei der Fahrzeugzusammensetzung und dem Verkehrsaufkommen fast keine Änderungen ergaben, kann dieser Umschwung auf eine veränderte Wetterbedingung (Änderung der Windrichtung) hindeuten.

Mittelt man Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub> über die gesamte Messdauer, so stimmen die Berechnung und die Messung sehr gut überein.

<sup>28</sup> Vgl. PUCHER/PUXBAUM/SCHMID 1997/9.

### Vergleich Stickstoffdioxide NO<sub>x</sub>

Über die gesamte Messdauer hinweg zeigt sich, dass die berechneten Stickstoffoxid NO<sub>x</sub>-Konzentrationen die gemessenen Immissionswerte unterschätzen. Da die Personenkraftwagen im Verhältnis zum Güterverkehr relativ wenig Stickstoffoxide NO<sub>x</sub> (Bezugjahr 1997)<sup>29</sup> emittieren, kann davon ausgegangen werden, dass diese Differenz hauptsächlich den Lastkraftwagen und Bussen zuzuordnen ist.

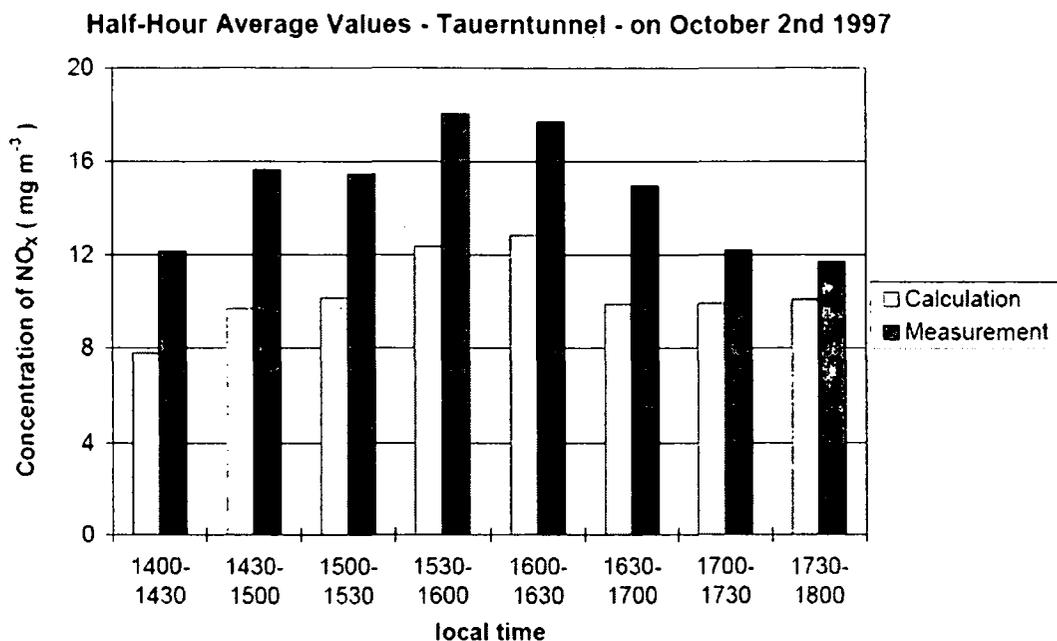


Abbildung 21: Vergleich NO<sub>x</sub>-Konzentrationen Berechnung vs. Messung<sup>30</sup>

### Rußpartikel PM

Die gemessenen Partikel-Immissionen basieren auf den Feinpartikel PM10. An diesem Messtag enthielten die PM10-Immissionen im Durchschnitt einen Anteil an Total Carbon (TC) von rund 75 %.

<sup>29</sup> Anteil Diesel-Pkw zu Gesamt-Pkw lt UBA 2004: 45 % (1997), 70 % (2005).

<sup>30</sup> Vgl. PUCHER/PUXBAUM/SCHMID 1997/11.

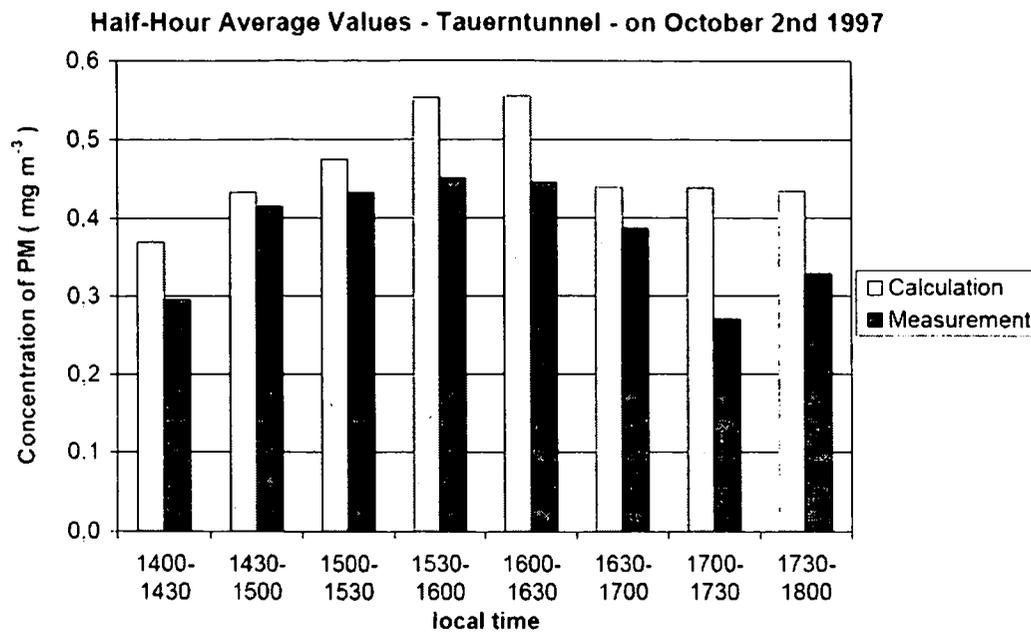


Abbildung 22: Vergleich PM-Konzentrationen Berechnung vs. Messung<sup>31</sup>

#### 4.1.2.2 Emissionsfaktoren-Bestimmung im Wuppertaler Kiesbergtunnel

Die Bergische Universität, Wuppertal<sup>32</sup> führte in den Jahren 1997 und 1998 Langzeitmessungen in einem Straßenverkehrstunnel durch. Dieser verbindet die Innenstadt von Wuppertal-Elberfeld mit der Autobahn A46 in Richtung Düsseldorf. Er ist rund 1100 m lang und verläuft in Ost-West-Richtung. Die beiden vorhandenen Fahrrohre, je mit zwei Fahrspuren, sind übereinander angeordnet. Der Tunnel hat vom westlichen Eingang aus eine 130 m lange Steigung von 3,25 %, ist dann auf den nächsten 70 m eben und hat auf den restlichen 900 m ein Gefälle von 1 %.

Rund 200 m vor dem östlichen Tunnelausgang wurde für die Langzeituntersuchungen die notwendige Messtechnik platziert. Die vorbeifahrenden Fahrzeuge passieren diese Stelle mit rund 50 km/h bis 90 km/h. Die zwei Tunnelrohre sind selbstentlüftend. Ab August 1997 wurde die obere Tunnelröhre für Instandhaltungsarbeiten gesperrt und der Verkehr durch die untere Röhre umgeleitet. Aufgrund des Gegenverkehrs im Tunnel kam es zu keiner Selbstentlüftung mehr, weshalb in weiterer Folge mittels Gebläse zwangsentlüftet werden musste.

<sup>31</sup> Vgl. PUCHER/PUXBAUM/SCHMID 1997/12.

<sup>32</sup> Vgl. BENTER/LÖRZER 2003.

Da der Kiesbergtunnel im Gegensatz zum Tauerntunnel über keinen eigenen Zu- bzw. Abluftschacht verfügt, war keine direkte Bestimmung der Schadstoffkomponenten als Massenemissionen in g/km möglich. Als Immissions-Messgröße wurde lediglich die Schadstoffkonzentration in ppm im Tunnel und außerhalb (Hintergrundkonzentration) des Tunnels gemessen. Mit den daraus erhaltenen Differenzen wurde ein Verhältnis (EV ... Emissionsverhältnis) zur Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>-Immission gebildet.

Zum Beispiel:

$$EV_{\frac{NO_x}{CO_2}} = \frac{\Delta NO_x}{\Delta CO_2} = \frac{NO_{xTunnel} - NO_{xAussen}}{CO_{2Tunnel} - CO_{2Aussen}} \quad (4.1)$$

$EV_{\frac{NO_x}{CO_2}}$	Emissionsverhältnis von NO <sub>x</sub> zu CO <sub>2</sub> [1]
$NO_{xTunnel}$	NO <sub>x</sub> Konzentration im Tunnel [ppm]
$NO_{xAussen}$	NO <sub>x</sub> Konzentration der Umgebungsluft außen [ppm]
$CO_{2Tunnel}$	CO <sub>2</sub> Konzentration im Tunnel [ppm]
$CO_{2Aussen}$	CO <sub>2</sub> Konzentration der Umgebungsluft außen [ppm]

Mit Hilfe von Kontaktschleifen in der Fahrbahn und Video-Überwachung (über 19 Wochen hinweg) wurden die Anzahl der Fahrzeuge und der Anteil der Lastkraftwagen ermittelt. Als Lkw wurden Fahrzeuge mit einem Mindestgewicht von 7,5 t kategorisiert. Kleinlaster (< 7,5 t) und Lieferwagen (>3,5 t) wurden als Transporter gezählt. Im Mittel machten Lkw und Transporter 13 % des Gesamtverkehrs aus. Anhand der Verkehrszusammensetzung und Anzahl wurde mit Daten aus UBA 1999 ein fixer Emissionsfaktor für CO<sub>2</sub> mit rund 152 g/km errechnet. Daraus ergab sich für alle gemessenen Komponenten nach der folgenden Formel jeweils ein spezifischer Emissionsfaktor.

Zum Beispiel (mit  $EF_{CO_2}=152$  g/km):

$$EF_{NO_x} = EV_{\frac{NO_x}{CO_2}} * \frac{M_{NO_x}}{M_{CO_2}} * EF_{CO_2} \quad (4.2)$$

$EF_{NO_x}$	Emissionsfaktor $NO_x$ [g/km]
$EV_{\frac{NO_x}{CO_2}}$	Emissionsverhältnis von $NO_x$ zu $CO_2$ [1]
$M_{NO_x}$	Molmasse $NO_x$ [kg/kmol]
$M_{CO_2}$	Molmasse $CO_2$ [kg/kmol]
$EF_{CO_2}$	Emissionsfaktor $CO_2$ [g/km]

Auf Grund dieser Mischkulanz zwischen Messung und Berechnung war es leider nicht möglich, „echte“ gemessene Emissionsfaktoren in g/km zu bestimmen bzw. berechnete Emissionen mit den Gemessenen zu vergleichen.

Die nachstehende Tabelle zeigt eine Aufstellung aus BENTER/LÖRZER 2003 von Stickstoffdioxid  $\text{NO}_x$ -Emissionen verschiedener Tunnelmessungen im Vergleich zu dem Ergebnis der Kiesbergtunnel-Studie.

		EF $\text{NO}_x$ (g/km)		
		Flotte	PKW	LKW
Kiesbergtunnel, 1997	6% LKW, 11% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW	$0.76 \pm 0.18$		
Fort McHenry Tunnel, USA 1992 [6]	17% LKW, 1% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW	2.05	$0.50 \pm 0.06$	$9.0 \pm 0.3$
Tuscaroratunnel, USA 1992 [6]	18% LKW, 1% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW	3.79	$0.24 \pm 0.16$	$12.1 \pm 0.5$
Tuscaroratunnel, USA 1992 [65]	18% LKW, 1% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW		$0.42 \pm 0.07$	$11.9 \pm 1.9$
Cassiatunnel, Kanada 1995 [7]	18% LKW, 1% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW		$0.87 \pm 0.26$	$12.0 \pm 4.3$
Tingstadttunnel, Schweden 1992 [121]	20% LKW, 2% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW	1.1		
Gubristunnel, Schweiz 1993 [167]	10% LKW, 2% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW	$2.5 \pm 0.2$	$1.1 \pm 0.1$	$15.0 \pm 0.9$
Tauernntunnel, Österreich 1988 [11]	12% LKW, 11% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW	2.26		
Tauernntunnel, Österreich 1997 [12]	12% LKW, 22% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW	1.97	0.31	13.0
Plabutschunnel, Österreich 1999 [172]	17% LKW, 25% Diesel-PKW, Rest Benzin-PKW	$2.4 \pm 0.3$	$0.32 \pm 0.14$	$12.7 \pm 0.4$
Prüfstand, USA 1976-1997 [173]	Diesel			$17.0 \pm 0.6$
Prüfstand, USA 1997 [112]	Otomotor		$0.10 \pm 0.06$	
Prüfstand, USA 1997 [112]	Diesel		$0.55 \pm 0.22$	
Prüfstand, Deutschland 1994 [174]	Otomotor		0.322	
Prüfstand, Deutschland 1994 [174]	Diesel		0.921	
Handbuch, Deutschland Bezugsjahr 1997 [20]	siehe Kiesbergtunnel	$0.68 \pm 0.12$	$0.39 \pm 0.08$	$4.78 \pm 0.78$
Handbuch, Deutschland Bezugsjahr 1998 [20]	siehe Kiesbergtunnel	$0.62 \pm 0.11$	$0.33 \pm 0.08$	$4.63 \pm 0.82$

Tabelle 8:  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktoren aus verschiedenen Tunnel-Messungen im Vergleich<sup>33</sup>

<sup>33</sup> Vgl. BENTER/LÖRZER 2003/103.

### 4.1.3 Emissionsfaktorenbestimmung auf dem Rollenprüfstand

Auf Rollenprüfständen ist es möglich, im Verkehr befindliche Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Abgas-Emissionen zu untersuchen. Je nach Fahrzeugkategorie (Pkw, Lkw, Motorrad) ist der Konditionierungsaufwand für die vorgesehene Messung unterschiedlich groß.

#### 4.1.3.1 Funktionsprinzip eines Rollenprüfstandes

Die Antriebsräder eines Fahrzeuges stehen auf Rollen des Prüfstandes. Die Fahrzeugmasse wird durch die Schwungmasse der Prüfstands-Rollen und Getriebeteile simuliert. Die durch Ausrollversuche auf der Straße ermittelten Fahrwiderstände des Testfahrzeuges bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten werden durch elektrische Bremsen eingestellt. Das Messfahrzeug kann nun einen gewählten Testzyklus abfahren. Ein Computer-Display gibt dem Fahrer dabei die Soll-Geschwindigkeit vor.

In einer Constant Volume Sampling (CVS) – Anlage wird das emittierte Abgas kontinuierlich mit Raumluft bei konstantem Volumenstrom verdünnt. Diese Verdünnung verhindert chemische Reaktionen von Kohlenwasserstoffen und die Kondensation des Wasserdampfes im Abgas. Aus diesem Messgasstrom wird eine dem Hauptstrom proportionale Menge entnommen und in Beutel gesammelt. Parallel dazu wird die Umgebungsluft ebenfalls in Beuteln separat gesammelt.

Nach Durchfahren des Testzyklus werden die Konzentrationen des Umgebungsluft-Beutels von denen der Messgasbeutel subtrahiert und man kann mit der Differenz-Konzentration des bekannten Volumenstroms der CVS-Anlage und den spezifischen Dichten der jeweiligen Abgaskomponente die Emissionen in g/km bestimmen.

Die Partikelemissionen des Messfahrzeuges werden gravimetrisch auf speziellen Filterplättchen gesammelt und nach der Messung ausgewertet.

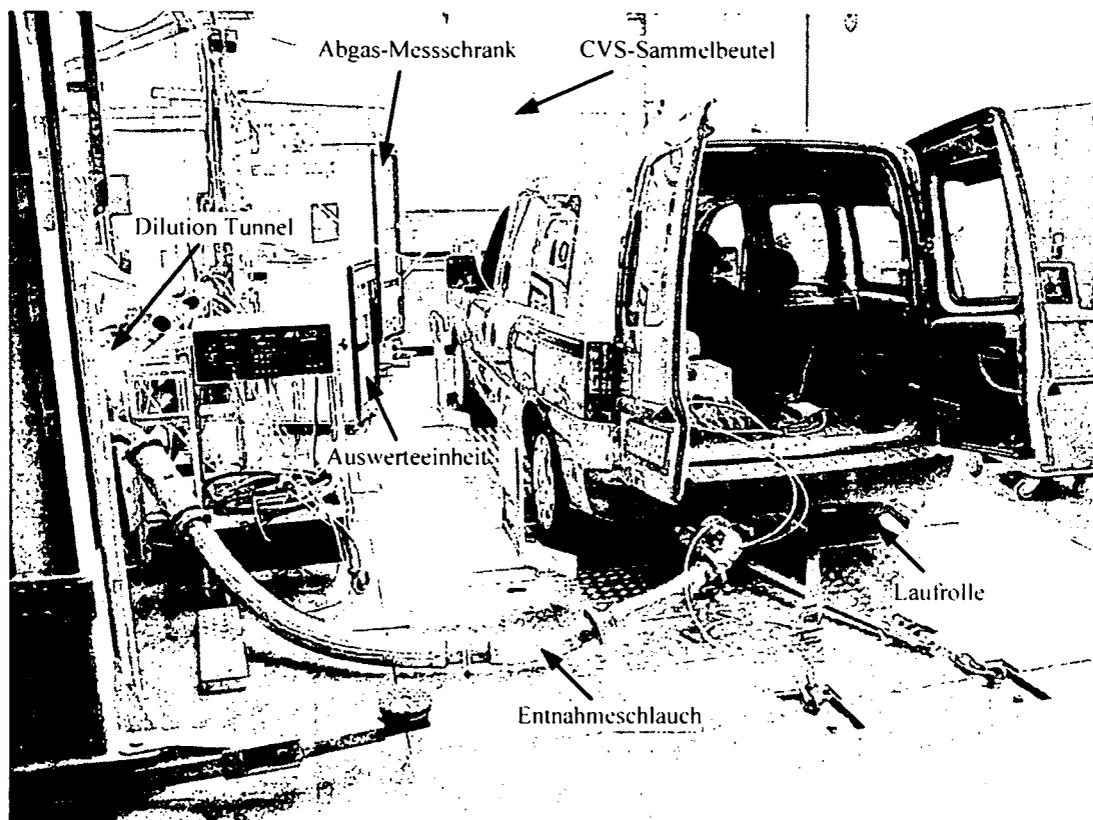


Abbildung 23: Aufbau eines Abgas-Rollenprüfstands

#### 4.1.3.2 Emissionsfaktoren-Bestimmung für Personenkraftwagen am Rollenprüfstand

Neben dem MVEG-Typprüfzyklus mit festgelegten Randbedingungen existieren noch eine Reihe weiterer gesetzlich vorgeschriebener bzw. in der Literatur standardisierter Fahrzyklen.

Je nach gewähltem Zyklus ergeben sich verschiedene Abgasemissionen des Testfahrzeuges, da die Dynamik des Zyklus und die Konditionierungs-Bedingungen (z.B. Kalt- oder Warmstart) einen wesentlichen Einfluss auf das Endergebnis haben. Dies soll das folgende Beispiel illustrieren.

### Vergleichsmessungen MVEG kalt/warm

Im Zuge des Projektes „Sauberer Güterverteilverkehr in Wien“ in Kooperation mit General Motors Austria GmbH, OMV Gas GmbH, DHL Express (Austria) GmbH und der ÖAMTC Akademie wurden im Jahr 2004 zur Ergänzung der durchgeführten Real-Life Emissionsmessungen mittels OBM auf verschiedenen Straßenzügen im Ballungsraum Wien, die Gesamt-Stickstoffoxid- und Partikelemissionen eines Opel Combo 1.6 CNG bzw. eines 1.7 CDTI am Abgasrollenprüfstand ermittelt. Es wurde dabei je ein Europäischer Fahrzyklus (MVEG)<sup>34</sup> mit kaltem und anschließend mit betriebswarmem Motor durchfahren. Die „Warmtests“ dienten als Anhaltspunkt für die On-board Untersuchungen, da diese ebenfalls mit betriebswarmem Motor durchgeführt wurden.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Massenemissionen von Stickstoffoxid ( $\text{NO}_x$ ) und Partikeln (PM), erfasst mit der Constant Volume Sampling – Anlage (CVS) des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau der TU Wien.

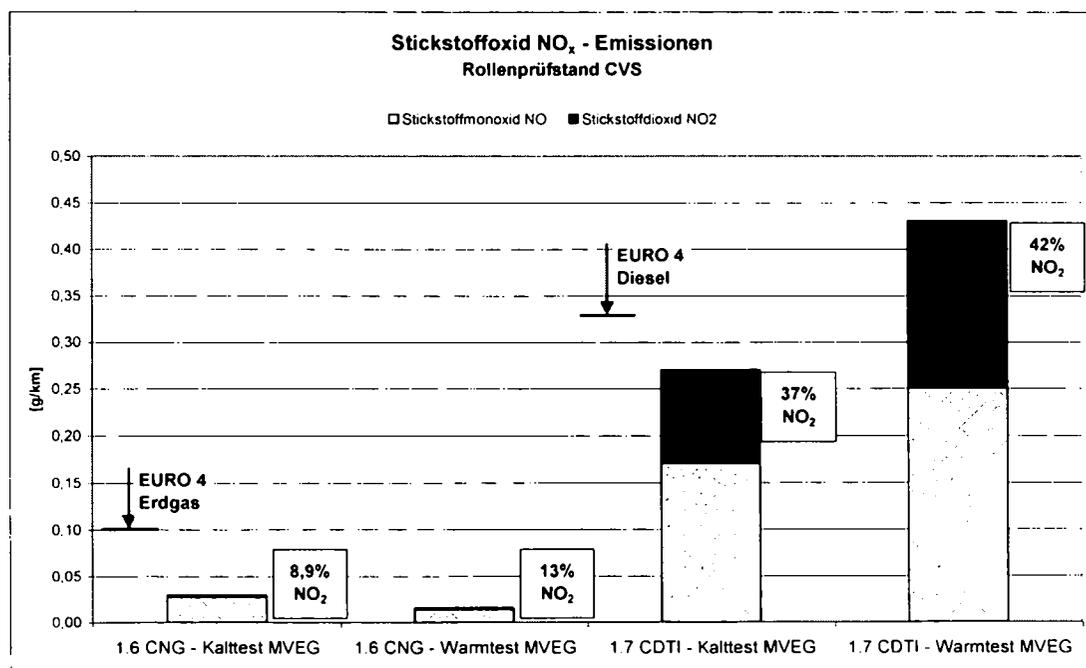


Abbildung 24: Vergleich Stickstoffoxid-Emissionen ( $\text{NO}_x$ ) im MVEG-Test (kalt/warm)

<sup>34</sup> Vgl. 98/69/EG.

Die Abgasemissionen des Erdgas-Fahrzeugs liegen um mehr als 90 % unter jenen des Diesel-Fahrzeuges. Ebenfalls ist der Anteil des Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$  an den Gesamt-Stickstoffoxiden  $\text{NO}_x$  mit rund 40 % beim Opel Combo 1.7 CDTI deutlich höher als beim Erdgasfahrzeug mit zirka 10 %. Der Opel Combo 1.7 CDTI erfüllt den EURO 4 Partikel-Grenzwert ( $0,04 \text{ g/km}$ )<sup>35</sup> im MVEG-Test ohne Partikelfilter. Beide Fahrzeuge verbessern ihren Partikel ausstoß mit betriebswarmem Motor. Das Erdgas-Fahrzeug emittiert warm um etwa 85 % weniger Partikel als das Dieselfahrzeug.

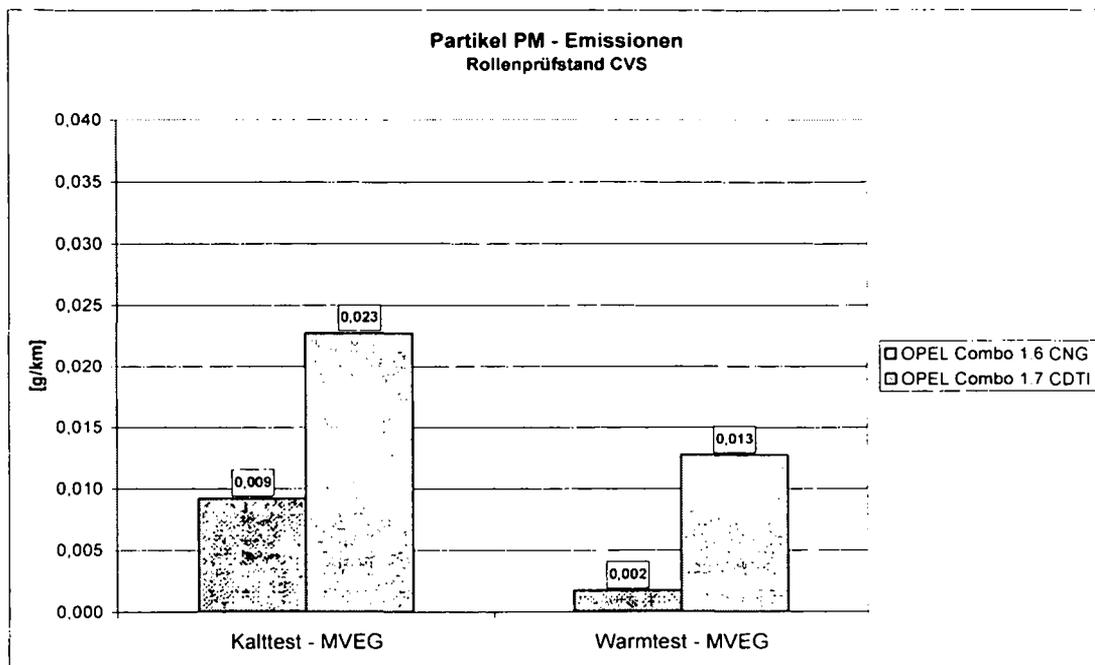


Abbildung 25: Vergleich Partikel-Emissionen (PM) im MVEG-Test (kalt/warm)

<sup>35</sup> Vgl. 98/69/EG.

#### 4.1.3.3 Emissionsfaktoren-Bestimmung für Nutzfahrzeuge am Rollenprüfstand

Untersuchungen zum Emissionsverhalten von schweren Nutzfahrzeugen mit Hilfe von Rollenprüfständen sind sehr aufwendig in der Durchführung und sehr kostspielig, da die Investitions- und Betriebskosten einer solchen Anlage äußerst hoch sind. Da bei schweren Nutzfahrzeugen nicht das Gesamtfahrzeug sondern nur die Verbrennungskraftmaschine am Motorenprüfstand zertifiziert wird, gibt es keine gesetzlich reglementierten Fahrzyklen. Oftmals werden bestimmte Zyklen, die zuvor mittels GPS-Receiver im Real-Betrieb des Fahrzeuges aufgezeichnet wurden, am Rollenprüfstand nachgefahren. Dies können zum Beispiel Autobus-Linien eines Verkehrsbetriebes sein.

Um international vergleichbare Studien erarbeiten zu können, finden sich in der Literatur folgende festgelegte Fahrzyklen wieder:

- New York Bus Cycle (NYB) - USA
- Manhattan Cycle - USA
- Braunschweig Zyklus - Deutschland
- u.a.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft einen mit Flüssiggas (LPG) betriebenen Niederflrbus des Nutzfahrzeugherstellers MAN auf einem Rollenprüfstand.



Abbildung 26: MAN LPG-Bus am Rollenprüfstand<sup>36</sup>

<sup>36</sup> PUCHER/BRUNER 2001/Folie Nr. 5.

#### 4.1.4 Emissionsfaktorenbestimmung mittels On-board System

Um eine Aussage über die real emittierten Abgasemissionen von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr treffen zu können, wurden in den letzten Jahren von verschiedenen Institutionen und Unternehmen so genannte On-board Messsysteme „OBM“ entwickelt. Diese werden direkt im Messfahrzeug eingebaut und ermitteln auf vorgegeben Messstrecken die Massenabgasemissionen des entsprechenden Fahrzeuges. Auf Grund der meist kompakten Abmessungen der Systeme ist der Adaptionaufwand im Fahrzeug im Vergleich zum Messaufbau auf einem Rollenprüfstand relativ gering. Dadurch sind auch die Kosten für entsprechende Untersuchungen bzw. Messkampagnen auf einem verhältnismäßig niedrigen Niveau.

Zur Demonstration der Funktionsweise von On-board Messsystemen sind im Folgenden zwei realisierte Lösungen der Firmen VITO und Volkswagen dargestellt.

##### 4.1.4.1 *On-board Messsystem der Firma VITO, Belgien*

Die Firma VITO in Belgien nennt sein OBM-System „VEOMLow“ (Vito's On-the-Road Emission and Energy Measurement). Mit Hilfe einer parallelen Messung des Kraftstoffverbrauches in g/s mittels Durchflussmesser und der vom Motor angesaugten Luftmasse in g/s ist es möglich, die Abgasemissionen der Versuchsfahrzeuge in g/km zu bestimmen. Die zeitliche Auflösung des Gesamtsystems beträgt 1 Hz, d.h. es wird jede Sekunde ein Datensatz auf der Festplatte des Messrechners gespeichert.

Die Konzentrationen der Komponenten Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub> und –monoxid CO werden mit einer nichtdispersiven Infrarotmessung (NDIR), die Kohlenwasserstoffe HC durch einen Flammenionisationsdetektor (FID) und die Stickstoffoxide NO<sub>x</sub> durch einen Chemiluminescence-Detektor bestimmt.

Die folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau einer VOEMLow-Messanlage.

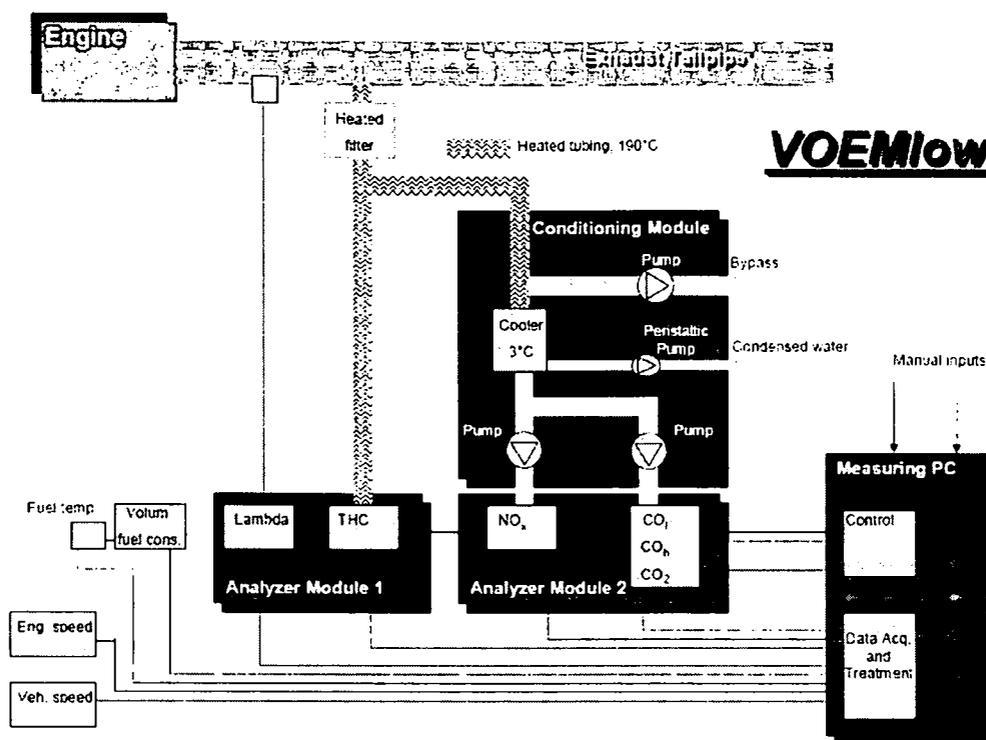


Abbildung 27: Prinzipschema einer VOEMLow der Firma VITO, Belgien<sup>37</sup>

Über eine mit 190 °C beheizte Messleitung wird dem Versuchsfahrzeug unverdünntes Abgas entnommen. Das ausfallende Wasser wird über Kondensatabscheider und einer Peristaltik-Pumpe abgeschieden. Die Konzentrationsmessungen der jeweiligen Abgas-Komponenten erfolgt bis auf die Heiß-Kohlenwasserstoff-Messung somit trocken.

Eine zusätzliche Partikelmessung PM erfolgt über eine Schwingquarz-Mikrowaage, deren Messgenauigkeit laut VITO jedoch eingeschränkt ist.

Das Gesamtsystem wird über einen 12 V DC / 230 V AC – Wandler und zwei Batterien gespeist. Dadurch sind Messungen bis zu 40 Minuten möglich. Bei längeren Messungen muss eine entsprechende Anzahl von Zusatzbatterien mitgeführt werden. Dadurch ergibt sich ein Gesamtgewicht des Systems von rund 230 kg.

<sup>37</sup> Vgl. LENAERS/POPPEL 2003/4.

Ein Messrechner überwacht das Gesamtsystem und archiviert simultan die ermittelten Ergebnisse.



Abbildung 28: VOEMLow-Messschrank der Firma VITO, Belgien<sup>38</sup>

Auf Grund des sehr hohen Gesamtgewichtes und des komplexen Aufbaues des Systems ergibt sich ein hoher Adaptionaufwand. Aus Platzgründen kann das System in der Praxis fast nur in Nutzfahrzeugen verwendet werden. In einem Personenkraftwagen muss das sehr hohe Gewicht der Anlage besonders beachtet werden, um vergleichbare Messdaten zu anderen OBM-Systemen zu erhalten.

Die Firma VITO validiert das VOEMLow-System laufend mit Hilfe von Parallelmessungen am Rollenprüfstand. Die dabei ermittelte Messgenauigkeit des Gesamtsystems im Vergleich zur CVS-Anlage beträgt rund 10 % und besser, je nach Abgas-Komponente.

---

<sup>38</sup> Vgl. LENAERS/POPPEL 2003/5.

#### 4.1.4.2 *On-board Messsystem der Volkswagen AG*

Bereits in den Achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts beschäftigte sich die Volkswagen AG mit der Entwicklung eines OBM-Messsystems. Dieses wurde in Kooperation mit einem Messgeräte-Hersteller aufgebaut und trug den Namen „MAMA“ (Mobile Abgas-Messanlage).

Diese Mobile Abgas-Messanlage „MAMA“ ermittelt die emittierten Abgas-Massenemissionen in g/km folgender Komponenten (Messmethode):

- Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub> (Nichtdispersiven Infrarotmessung)
- Kohlenstoffmonoxid CO (Nichtdispersiven Infrarotmessung)
- Kohlenwasserstoffe HC (Nichtdispersiven Infrarotmessung)
- Stickstoffdioxid NO<sub>x</sub> (Chemiluminescence-Detektor)
- Kraftstoffverbrauch (Durchflussmessgerät)

Das Messgas wird dem Abgasstrom unverdünnt am Endrohr über eine Edelstahlsonde entnommen und passiert anschließend einen Kondensatabscheider und einen Vorfilter. Ein Rechner liest über eine Anpasselektronik die gemessenen Abgas-Konzentrationen sowie den Kraftstoffdurchfluss und die Geschwindigkeit des Fahrzeuges ein.

Um die Massenemissionen der jeweiligen Schadstoffkomponente ermitteln zu können, bedarf es der Kenntnis des trockenen Abgasvolumens. Dieses wird nach folgendem Verfahren bestimmt:

1. Messung des Kraftstoffvolumens und Umrechnung in Kraftstoffmasse
2. Berechnung des Luft-Kraftstoff-Verhältnisses (A/F) aus den Komponenten CO<sub>2</sub>, CO und HC
3. Bestimmung des Luftvolumens aus Kraftstoffmasse und dem A/V-Verhältnisses
4. Berechnung des trockenen Abgasvolumens

Die Gesamtmassenemissionen in g/km werden als Summe der errechneten Momentanwerte am Ende der Messfahrt am Drucker ausgegeben.

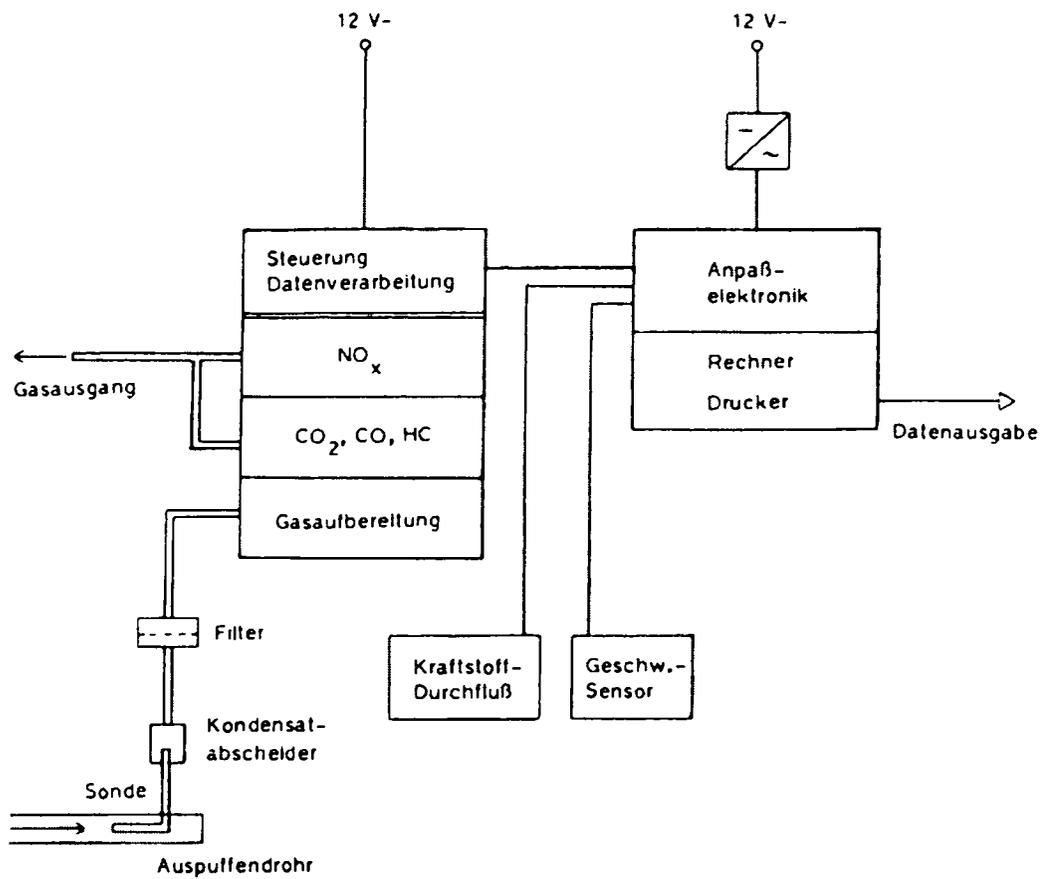


Abbildung 29: Aufbau-Schema der Mobile Abgas-Messanlage „MAMA“<sup>39</sup>

Das System wird über das 12 V DC Board-Netz des Versuchsfahrzeuges gespeist. Da die Mobile Abgas-Messanlage MAMA grundsätzlich aus konventionellen Labormessgeräten und einem Kraftstoffdurchflussmesser besteht, sind der Adaptierungsaufwand und der Platzbedarf im Inneren des Fahrzeuges relativ hoch.

Von Volkswagen wurden dutzende Vergleichsmessungen auf dem Rollenprüfstand nach unterschiedlichen Fahrzyklen (60/90/120 km/h konstant, ECE-Test, US 75, HDC) durchgeführt, um die Genauigkeit der mobilen Anlage zu ermitteln. Dabei wurden parallele Messungen mit der MAMA zur konventionellen Constant Volume Sampling CVS-Anlage gefahren.

<sup>39</sup> Vgl. SCHÜRMAN/STAAB 1987/36.

Die folgende Abbildung zeigt die von Volkswagen publizierten Korrelationsergebnisse zwischen der MAMA und einer CVS-Anlage.

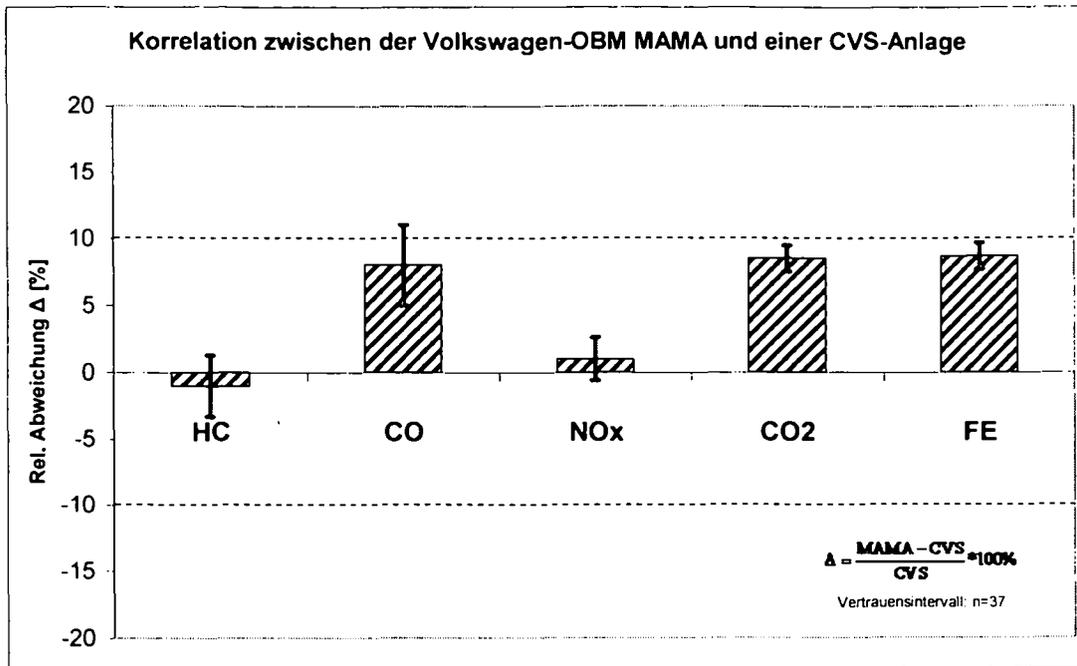


Abbildung 30: Korrelation zwischen der MAMA und einer CVS-Anlage<sup>40</sup>

<sup>40</sup> Datenquelle: ZÜGER/BURCH/RIEDWYL 1992/Anhang 1.

## 4.2 Emissionsbilanzen

Mit Hilfe eines Rechenmodells, basierend auf den oben bereits erläuterten Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge, war es möglich, den verschiedenen Fahrzeugkategorien bzw. -klassen den jeweiligen Emissionsanteils zuzuweisen. Anhand dieser ersten Berechnungen konnten die problematischen Verkehrsträger im städtischen Straßenverkehr identifiziert werden.

### 4.2.1 Emissionsbilanz in Wien

Unter diesen Gesichtspunkten wurde ein abgasemissionsbezogenes Rechenmodell für typische Straßenzüge (z.B. Stadt-, Durchzugsverkehr, Randgebiete, ...) im Ballungsraum Wien erstellt. Dabei sollte der Anteil der verschiedenen Fahrzeugkategorien an den gesetzlich limitierten Abgaskomponenten Stickstoffoxide  $\text{NO}_x$  und Partikel PM sowie dem Treibhausgas  $\text{CO}_2$  ermittelt werden.

#### 4.2.1.1 Verkehrsdaten

Um eine möglichst repräsentative Aussage über die Gesamtemissionssituation des Straßenverkehrs im Raum Wien machen zu können, wurden folgende Straßenzüge ausgewählt und den in Klammern angeführten Kategorien zugeordnet:

- Mariahilfer Straße zw. Kollergemgasse und Neubaugasse (City-Bereich, SK1)
- Karlsplatz bei Canovagasse (Stadtverkehr, SK2)
- Hadikgasse bzw. Hietzinger Kai bei Braunschweigasse (Durchzugsverkehr, SK3)
- Grinzinger Straße auf Höhe Hintergärtengasse (Randgebiet, SK4)
- Laaerberg-Tunnel A23 (Stadtautobahn, SK5)

Die Auswertungen beruhen auf Zählungen der Wiener Magistratsabteilung 18, die im Frühjahr 2000 durchgeführt wurden. Die durchschnittliche Verkehrsleistung wurde je nach Lage des Messpunktes in der Stadt entweder händisch oder maschinell erfasst.

Die Zählergebnisse sind als „durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken DTV“ d.h. Fahrzeuge pro Tag (Sonn- und Feiertage miteinbezogen) angegeben und in folgende Fahrzeugkategorien unterteilt:

- Einspurige Fahrzeuge – Efz (FK1)
- Personenkraftwagen – Pkw (FK2)
- Omnibus – Bus (FK3)
- Lieferwagen (FK4)
- Lastkraftwagen – Lkw (FK5)
- Lkw mit Anhänger (FK6)

Die folgende Abbildung veranschaulicht die ermittelten Verkehrsdaten in der Stadt Wien.

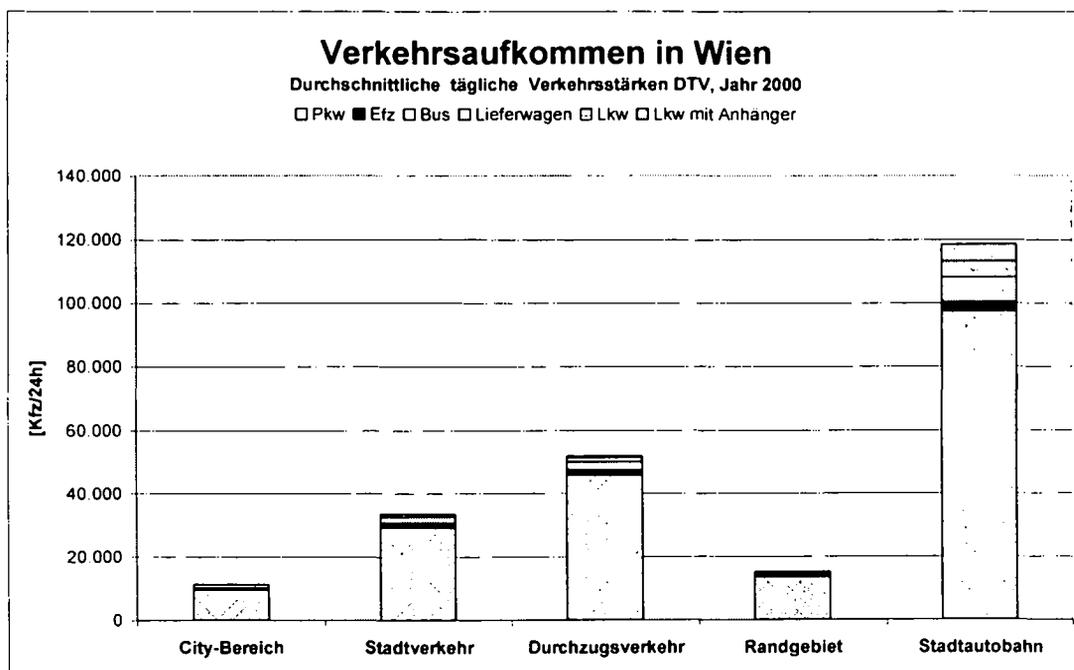


Tabelle 9: Verkehrsaufkommen in Wien im Jahre 2000<sup>41</sup>

Erwartungsgemäß sind das Verkehrsaufkommen und der Anteil des Güterverkehrs auf der Stadtautobahn in Wien (A23) mit Abstand am größten.

<sup>41</sup> Datenquelle: Magistratsabteilung 18 der Stadt Wien, MA 18-Stadtentwicklung und Stadtplanung, Verkehrszählung nach dem Wiener Modell im Frühjahr 2000.

#### 4.2.1.2 Emissionsbilanz

Die erstellte Emissionsbilanz, aufbauend auf den in der Literatur angeführten Emissionsfaktoren<sup>42</sup> für Fahrzeugkollektive, spiegelt den gegenwärtigen Schadstoffausstoß im Ballungsraum Wien wider. Für die Berechnung wurden die ermittelten Verkehrsstärken  $N_{SKi,FKi}$  in Kfz/24h der oben genannten Fahrzeugkategorien herangezogen.

Je Straßenkategorie (SK1 bis SK5) erfolgt eine Zuweisung von Emissionsfaktoren  $f_{k,SKi,FKi}$  in g/km gemäß der jeweiligen Verkehrssituation (Durchschnittsgeschwindigkeit, Verkehrsdichte, etc.). Der spezifische Emissionsfaktor  $f_{k,SKi,FKi}$  enthält dabei anteilmäßig die EFA für Benzinfahrzeuge mit/ohne Katalysator, Dieselfahrzeuge mit/ohne Oxidationskatalysator, usw. der jeweiligen EURO Abgasgrenzwertstufe statistisch dem Bezugsjahres 2005 entsprechend.

Der relative Anteil der Fahrzeugkategorien (z.B. Pkw, Lkw, ...) je Abgaskomponente k an den Gesamtemissionen im Stadtgebiet in Wien kann mit nachstehender Formel berechnet werden.

$$M_{k,FKj} = \frac{\sum_{SK1}^{SK5} N_{SKi,FKj} * f_{k,SKi,FKj}}{\sum_{FK1}^{FK6} \sum_{SK1}^{SK5} N_{SKi,FKj} * f_{k,SKi,FKj}} * 100 \quad (4.3)$$

$M_{k,FKj}$	Relativer Massenemissionsanteil der jeweiligen Fahrzeugkategorie j [%]
$N_{SKi,FKj}$	Anzahl der Fahrzeuge je Straßen- und Fahrzeugkategorie [Kfz/24h]
$f_{k,SKi,FKj}$	Emissionsfaktor je Straßen- und Fahrzeugkategorie [g/km]
SK	Straßenkategorie
FK	Fahrzeugkategorie
k	Abgaskomponente

<sup>42</sup> Vgl. KELLER/HAAN 2004.

Daraus erhält man die entsprechenden Emissionen für die in der Gegenwart relevanten Abgaskomponenten Kohlenstoffdioxid  $\text{CO}_2$ , Stickstoffoxide  $\text{NO}_x$  und die Partikel PM.

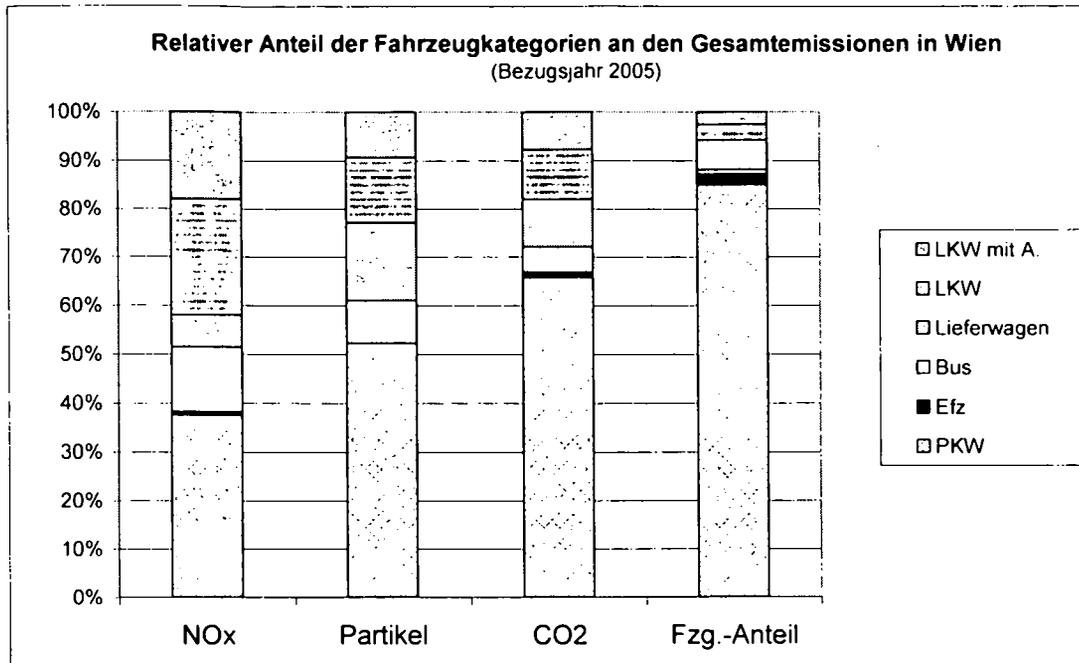


Abbildung 31: Verkehrsemissionen in Wien

Wie man aus der obigen Abbildung erkennen kann, verursachen der Bus- und Güterverkehr mehr als die Hälfte der  $\text{NO}_x$ - und annähernd die Hälfte der Partikel-Emissionen des Straßenverkehrs in Wien. Einen hohen Anteil an den Partikel-Emissionen weisen ebenfalls die leichten Nutzfahrzeuge (Kleintransporter) auf.

#### 4.2.2 Emissionsbilanz an einem Verkehrsknotenpunkt in Feldkirch

Im Zuge einer Stuserhebung, gemäß dem österreichischen Immissionsschutzgesetz-Luft, wurde im Jahr 2003 eine Luftgüte-Untersuchung an einem stark frequentierten Verkehrsknotenpunkt<sup>43</sup> in Feldkirch/Vbg. durch die Firma Ökoscience AG, CH-Chur durchgeführt. Ziel dieser Studie war es, die Immissionssituation an der Bärenkreuzung in Feldkirch darzustellen sowie die klimatischen Verhältnisse in Feldkirch in ihrer lufthygienischen Bedeutung zu charakterisieren. Aufbauend auf einer Verkehrsanalyse wurden die Stickstoffoxid NO<sub>x</sub>-Emissionen an der Bärenkreuzung berechnet.

Das entwickelte Verkehrs- und Emissionsmodell für die Bärenkreuzung in Feldkirch zeigt, dass die Personenkraftwagen zwar rund 90 % aller Fahrzeuge auf der Bärenkreuzung ausmachen, aber nur für rund 44 % aller NO<sub>x</sub>-Emissionen verantwortlich sind. Die Autobusse emittieren rund 27 %, der Schwerverkehr 29 % aller NO<sub>x</sub>-Emissionen.

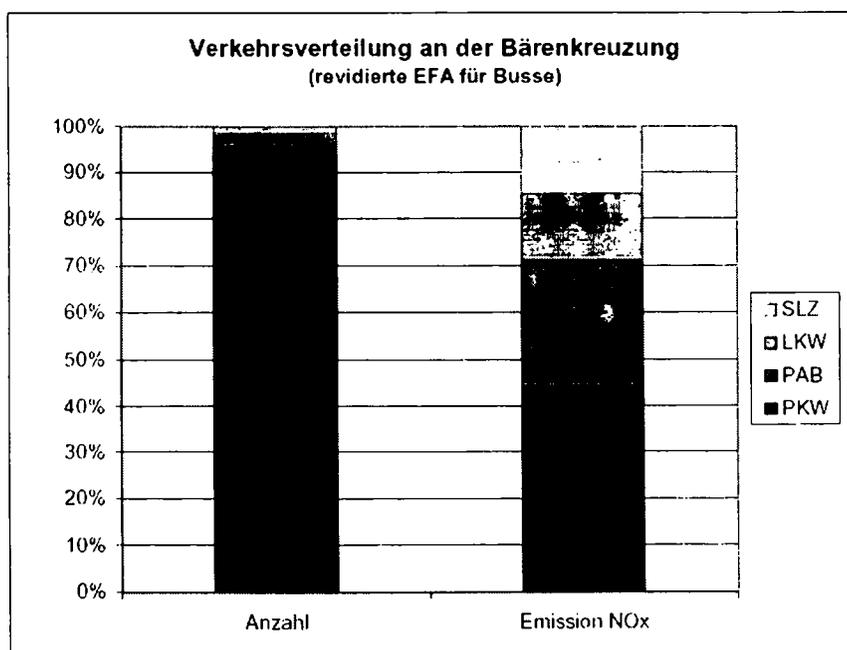


Abbildung 32: Nach Kategorien unterteilte Verkehrsverteilungen an der Bärenkreuzung und anteilige NO<sub>x</sub>-Emissionen<sup>44, 45</sup>

<sup>43</sup> Bärenkreuzung Feldkirch (Verkehrsnoten: Liechtenstein/Schweiz/Rheintal/Walgau).

<sup>44</sup> SLZ ... Lkw mit Anhänger, Sattelzüge; PAB ... Pkw mit Anhänger, Busse,

<sup>45</sup> ANWANDER/BÖSCH 2003/20.

## 5 Validierung des Emissionsberechnungsmodells

Zur Validierung des Rechenmodells wurde eine aufwändige Untersuchung an einer stark frequentierten Durchzugsstraße<sup>46</sup> in Wien-Hietzing durchgeführt. Durch eine videogestützte Verkehrszählung und eine parallele Immissionsmessung der Komponenten (NO, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> und BC) konnte ein Vergleich zwischen der Messung und der Emissionsmodellrechnung angestellt werden.

Der Hietzinger Kai ist eine nur in einer Fahrtrichtung (stadteinwärts) befahrene Einfallstraße im Westen Wiens. Während die Südseite der Straße mit Gebäuden verbaut ist, fließt auf der Nordseite der Wienfluss. Rund 70 m Luftlinie entfernt befindet sich die stadtauswärts befahrene und an der Nordseite verbaute Hadikgasse.

### 5.1 Immissionsmessung

#### 5.1.1 Messaufbau

Die Station Hietzinger Kai zeichnet sich besonders durch die verkehrsnahen Lage aus. Dadurch ist es möglich, die gemessenen Immissionswerte mit einer zeitlichen Auflösung von einer (NO, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>) bzw. fünf (BC) Minute(n) dem vorbeifahrenden Verkehr zuzuordnen. Die Messsonde ist an der Gebäudefront des Magistratischen Bezirksamtes für den 13. und 14. Wiener Gemeindebezirk angebracht. Neben den von der Magistratsabteilung für Umweltschutz in Wien - MA22 aufgezeichneten Messdaten für Stickstoffoxid NO<sub>x</sub> und Kohlenstoffmonoxid CO, wurden mit Hilfe eines mobilen Immissionsmesslabors auch Kohlenstoffdioxid- und Rußwerte (BC) ermittelt.

Parallel dazu erfolgte an den unten angeführten Tagen eine videogestützte Verkehrszählung:

- Freitag 23.05.2003 von 9<sup>00</sup> bis 11<sup>30</sup>
- Samstag 24.05.2003 von 8<sup>30</sup> bis 11<sup>00</sup>

---

<sup>46</sup> Hietzinger Kai - Fahrtrichtung stadteinwärts.

Die im Bericht vorkommenden Messdaten und Berechnungen beziehen sich immer auf den oben angegebenen Zeitraum.

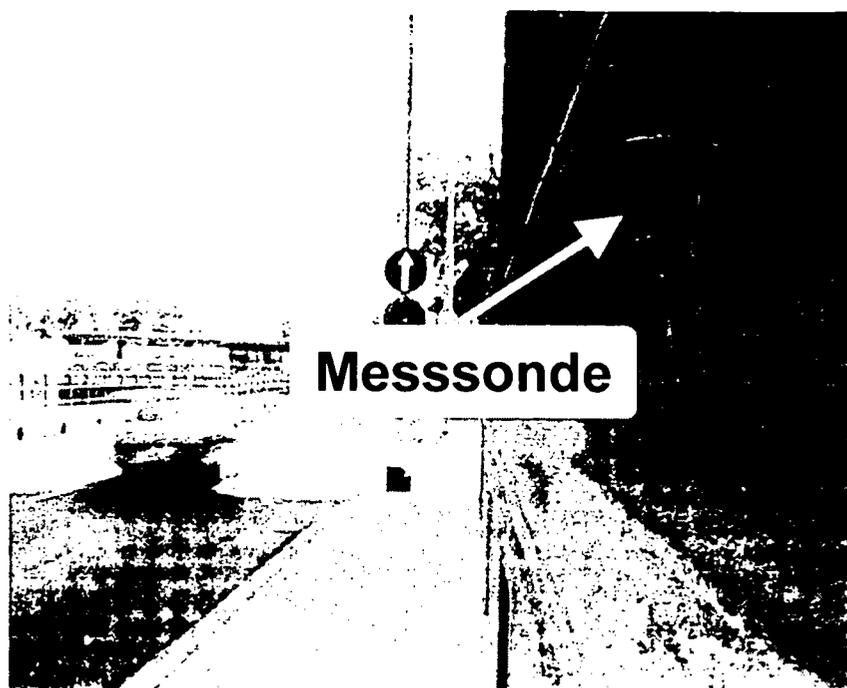


Abbildung 33: Immissionsmessstelle der Magistratsabteilung für Umweltschutz in Wien – MA22, Hietzinger Kai<sup>47</sup>

### 5.1.2 Ergebnisse der Immissionsmessung

Aus den Ergebnissen der Immissionsmessungen ist ersichtlich, dass am Freitag die Stickstoffmonoxidimmissionen  $\text{NO}$ , die hauptsächlich dem Straßenverkehr zuzuordnen sind, wesentlich größer sind als am Samstag. Ein Grund dafür kann der erhöhte Güterverkehrsanteil an Werktagen sein. Konträr dazu sind am Samstag die gemessenen Kohlenstoffmonoxidimmissionen  $\text{CO}$  um rund 45 % höher als am Vortag. In den weiteren Untersuchungen ist zu klären, ob diese Zunahme dem Pkw- oder dem Zweiradverkehr zuzuordnen ist.

<sup>47</sup> URL: <http://www.wien.gv.at/ma22/luft/mba1.jpg> (10.11.2003).

Die folgende Tabelle gibt die gemessenen Immissions-Konzentrationen an der Messstelle Hietzinger Kai als Mittelwert über die oben angeführte Untersuchungszeit wieder.

	NO	NO <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	BC
	µg/m <sup>3</sup>				
<b>Freitag</b>	108	64,9	551	680773	10,9
<b>Samstag</b>	85	72,9	800	701122	14,0

Die zum Teil in ppm oder ppb gemessenen Immissionswerte wurden gemäß dem „Leitfaden zur Immissionsmessung nach dem Immissionsschutzgesetz-Luft (BGBl. I Nr 115/1997)“ in µg/m<sup>3</sup> bzw. mg/m<sup>3</sup> umgerechnet.

**Tabelle 10: Durchschnittlich gemessene Immissionsmittelwerte**

Die hohe zeitliche Auflösung (außer bei BC) von einer Minute erlaubt es, hoch emittierenden Fahrzeugverbänden Immissionsspitzen auf dem parallel aufgezeichneten Video zuzuweisen.

## 5.2 Verkehrszählung

Die Auswertung der Videos ergab, dass im Beobachtungszeitraum (je 2,5 Stunden) am Freitag in Summe 4.234 und am Samstag 4.034 Fahrzeuge die Messstelle passiert haben.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Schwerverkehr- und Kleintransporteranteil von Freitag auf Samstag stark abnimmt und am Samstag der Pkw-Anteil eine noch dominantere Rolle einnimmt.

	Gezählte Fahrzeuge im Beobachtungszeitraum* [Stk.]								
	PKW	MR	Mofa	RBus	LI/LNF	LKW	LZ	SZ	SUMME
<b>Freitag</b>	3441	75	25	37	462	132	14	48	<b>4234</b>
<b>Samstag</b>	3642	86	18	41	196	33	5	13	<b>4034</b>

\* Freitag 23.05.2003 von 9<sup>00</sup> bis 11<sup>30</sup>, Samstag 24.05.2003 von 8<sup>30</sup> bis 11<sup>00</sup>

**Tabelle 11: Verkehrszählung Hietzinger Kai in Stk.**

Die folgende Abbildung zeigt eine detaillierte Übersicht der Zusammensetzung des Gesamtverkehrs in % nach Fahrzeugkategorien aufgeteilt.

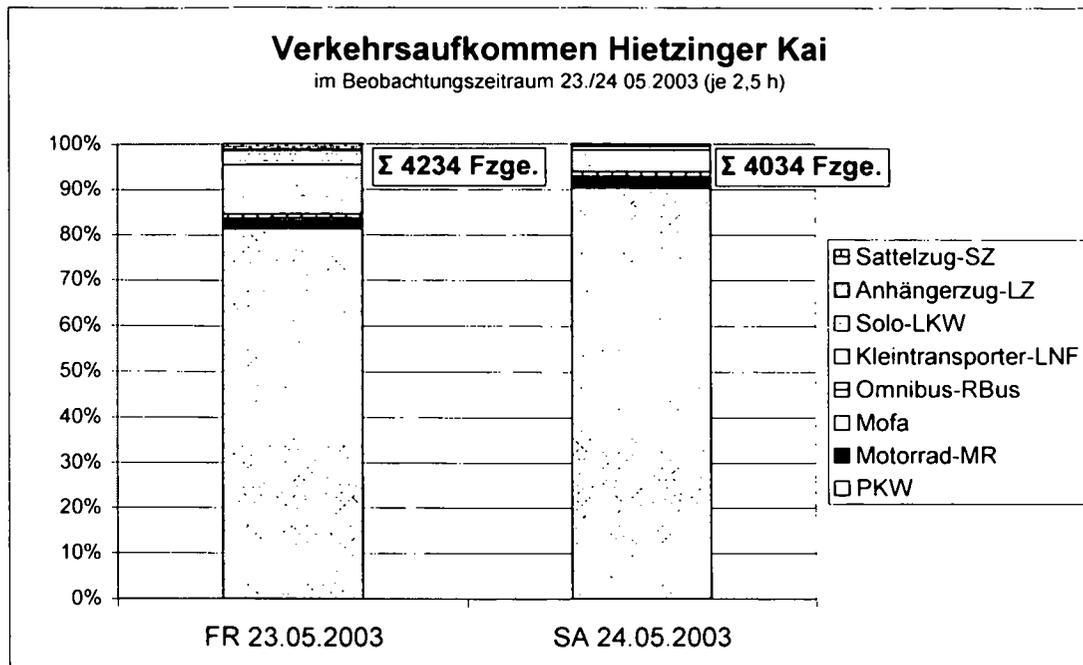


Abbildung 34: Verkehrszählung Hietzinger Kai in %

## 5.3 Emissionsbilanz

### 5.3.1 Methodik der Berechnung

Mit Hilfe der videogestützten Verkehrszählung und den jeweiligen Emissionsfaktoren aus der Fachliteratur<sup>48</sup> war es möglich, entsprechend dem Verkehrsaufkommen, Massenemissionswerte für eine entsprechende Fahrzeugflotte zu ermitteln.

Je nach Bezugsjahr ändert sich der statistische Anteil und das Alter der entsprechenden Fahrzeugklassen (Fahrzeuge mit/ohne Kat, EURO 0, EURO I, ...). Das Handbuch berücksichtigt dies ebenso wie die statistische jährliche Kilometerleistung der entsprechenden Fahrzeugklassen. Besonders neue und dieselbetriebene Fahrzeuge haben eine sehr hohe jährliche Laufleistung. Eine Darstellung für die Zusammensetzung eines mit der jährlichen Laufleistung und der statistischen Fahrzeuganzahl gewichteten

<sup>48</sup> Vgl. UBA 1999.

Stickstoffoxid  $\text{NO}_x$ -Emissionsfaktors für einen Lastkraftwagen ohne Anhänger oder Sattelaufleger zeigt die folgende Abbildung. Dabei sind die Fahrzeuganteile in Prozent und die jeweiligen Emissionsfaktoren für jede Fahrzeugklasse in g/km angegeben. Der gewichtete Emissionsfaktor beträgt bei diesem Beispiel rund 3,9 g/km  $\text{NO}_x$ .

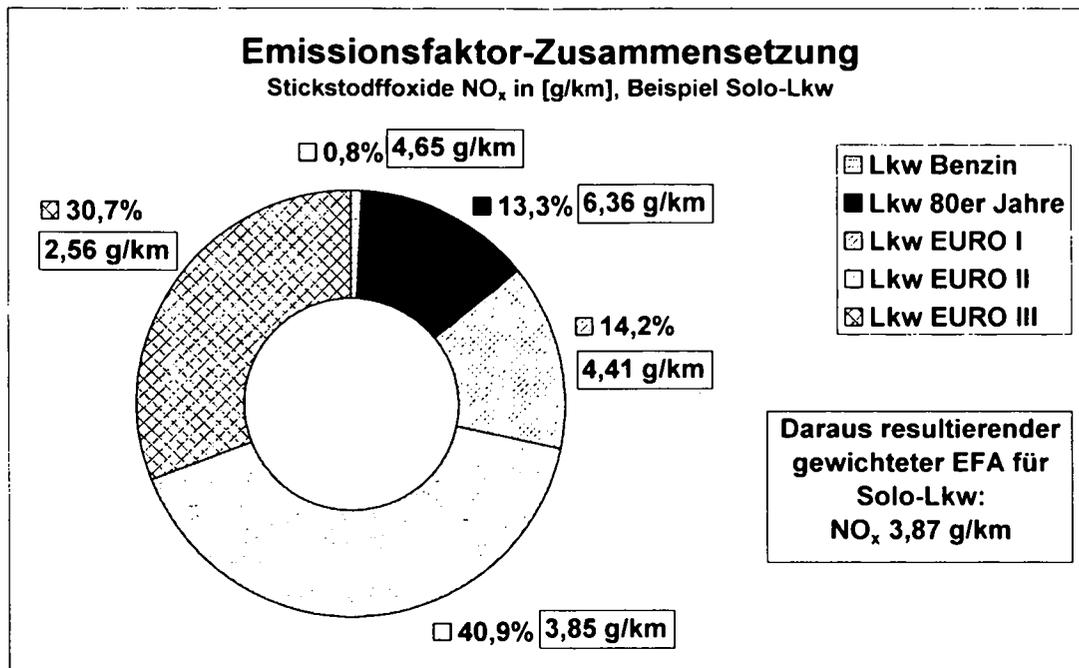


Abbildung 35: Emissionsfaktor-Zusammensetzung am Beispiel  $\text{NO}_x$ <sup>49</sup>

Um die Emissionsfaktoren den entsprechenden Fahrzeuggattungen zuordnen zu können, wird der Gesamtverkehr in folgende Kategorien (FK I bis FK8) unterteilt:

- Sattelzug – SZ
- Anhängerzug – LZ
- Solo – Lkw
- Kleintransporter – LI/LNF
- Reisebus – RBus
- Mofa
- Motorrad – MR
- Personenkraftwagen Pkw

<sup>49</sup> Datenquelle: UBA 1999.

Die Massenemissionen je Abgaskomponente k werden nach folgender Formel berechnet:

$$M_{k, \text{HMW}} = \sum_{\text{FKi}}^{\text{FK8}} N_{\text{FKi}} * f_{k, \text{FKi}} \quad (5.1)$$

$M_{k, \text{HMW}}$	Massenemission der jeweiligen Abgaskomponente k als HMW [g/km]
$N_{\text{FKi}}$	Anzahl der Fahrzeuge im Halbstunden-Beobachtungszeitraum [Stk.]
$f_{k, \text{FKi}}$	Emissionsfaktor je Fahrzeugkategorie und Abgaskomponente k [g/km]
FK	Fahrzeugkategorie
k	Abgaskomponente

Die für die Berechnung notwendigen Emissionsfaktoren in g/km sind dem „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“<sup>50</sup> entnommen.

	Emissionsfaktoren [g/km]*			
	CO	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	Partikel
<b>Sattelzug - SZ</b>	0,747	855,4	6,327	0,192
<b>Anhängerzug - LZ</b>	0,978	729,9	5,146	0,211
<b>Solo - LKW</b>	1,322	537,8	3,879	0,171
<b>Kleintransporter- LI/LNF</b>	0,679	240,4	0,643	0,080
<b>Omnibus - RBus</b>	1,028	706,1	6,209	0,212
<b>Mofa</b>	5,312	34,5	0,010	0
<b>Motorrad - MR</b>	6,992	81,9	0,233	0
<b>PKW</b>	0,693	136,0	0,246	0,021

\* gewichtete Emissionsfaktoren lt. HBEFA, Bezugsjahr 2003, Verkehrssituation IO\_HVS1, 0% Steigung

Tabelle 12: Verwendete Emissionsfaktoren

<sup>50</sup> Vgl. UBA 1999.

### 5.3.2 Berechnungsergebnisse

Die folgenden Diagramme geben die nach (5.1) berechneten, durchschnittlichen Halbstundenmittelwerte (HMW) der jeweiligen Abgaskomponente, je nach Fahrzeugkategorie, als Absolutwerte wieder.

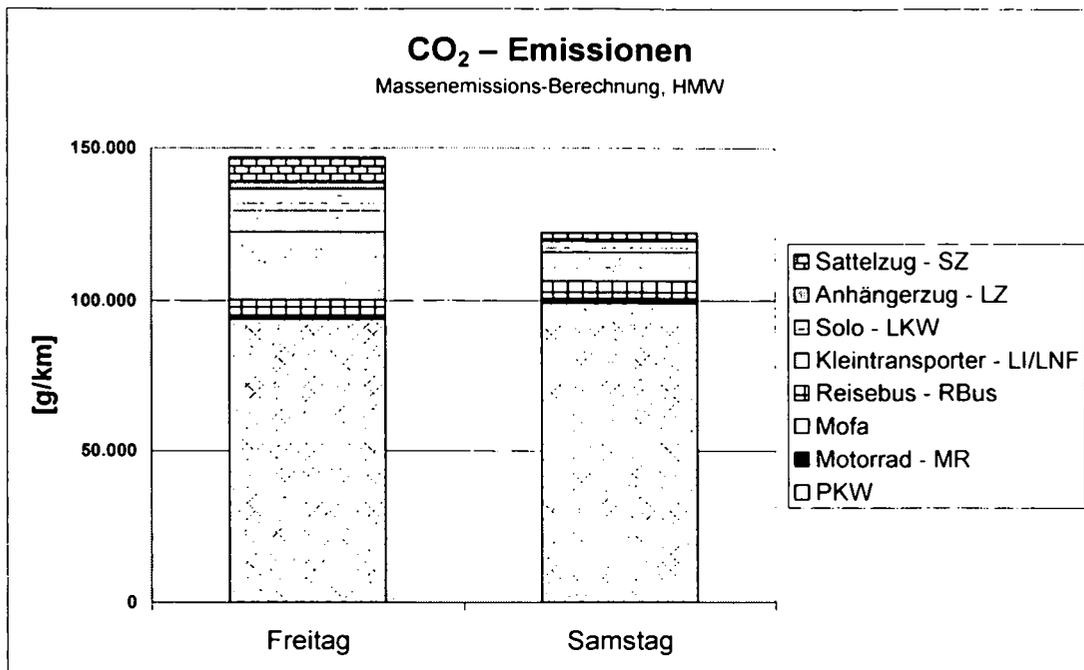


Abbildung 36: Berechnete Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>-Emissionen, HMW

Wie aus der obigen Abbildung ersichtlich ist, sinkt der durchschnittliche Halbstundenmittelwert des Kohlenstoffdioxids CO<sub>2</sub> von rund 147 kg/km am Freitag auf 122 kg/km am Samstag. Diese Reduktion ist auf den geringeren Güterverkehr am Samstag zurückzuführen.

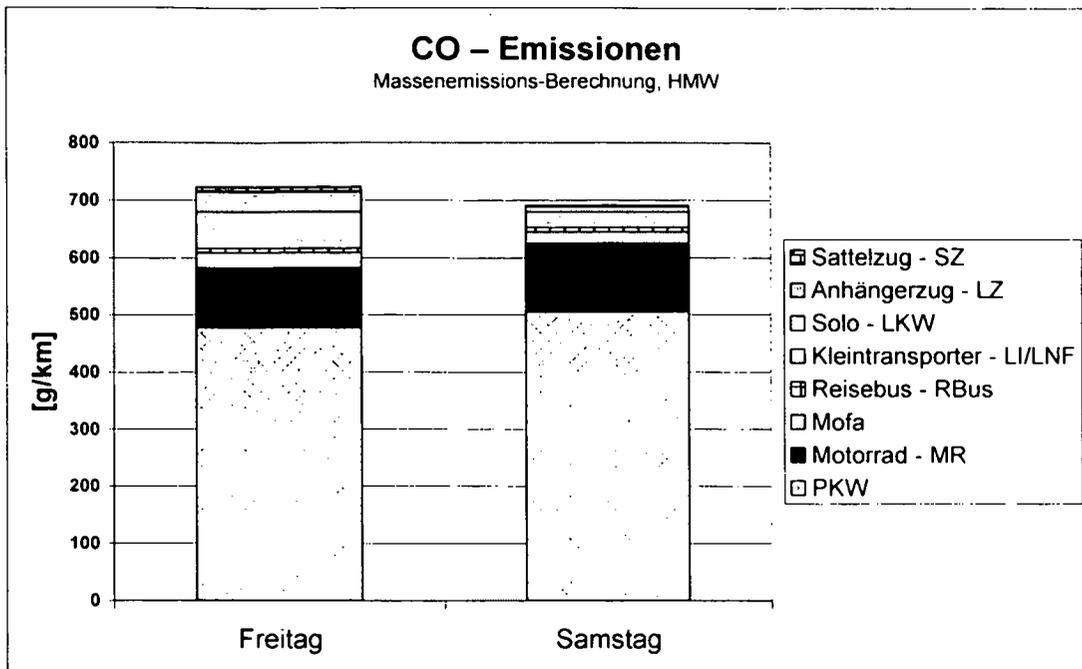
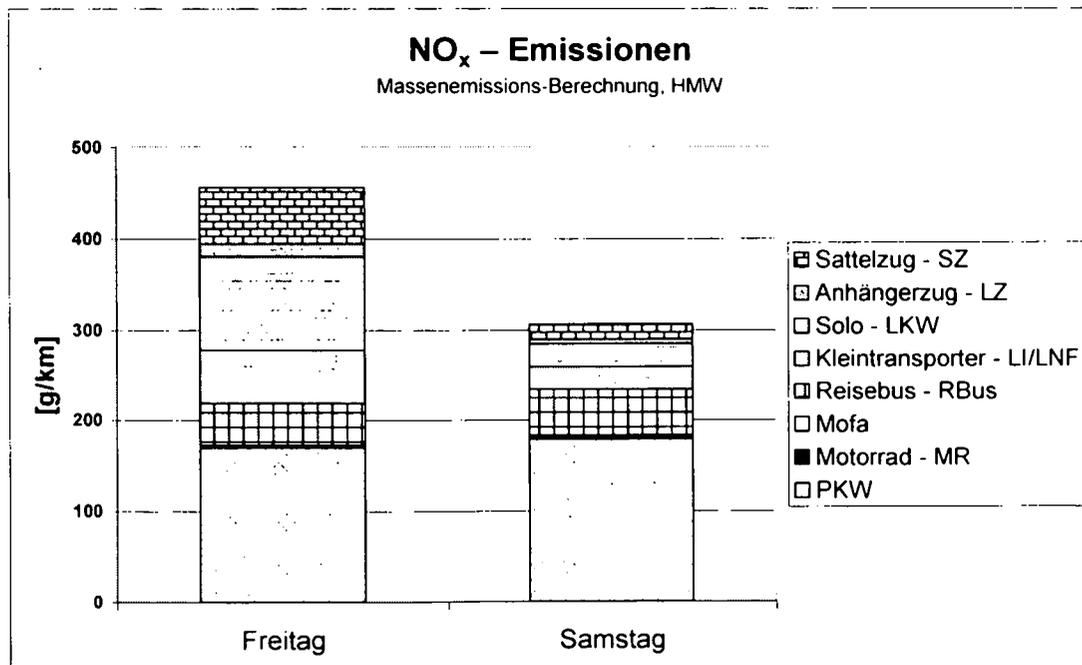


Abbildung 37: Berechnete Kohlenstoffmonoxid CO-Emissionen, HMW

Die Kohlenstoffmonoxid CO-Emissionen werden größtenteils durch den Pkw- und Zweiradverkehr beeinflusst. Der Anteil des Güterverkehrs an den CO-Emissionen ist hingegen relativ gering.

Abbildung 38: Berechnete Stickstoffoxid NO<sub>x</sub>-Emissionen, HMW

Hauptverursacher für die Stickstoffoxid  $\text{NO}_x$ -Emissionen am Freitag ist der Bus- und Güterverkehr mit einem Anteil von rund 60 % am Gesamtausstoß (Samstag ca. 40 %).

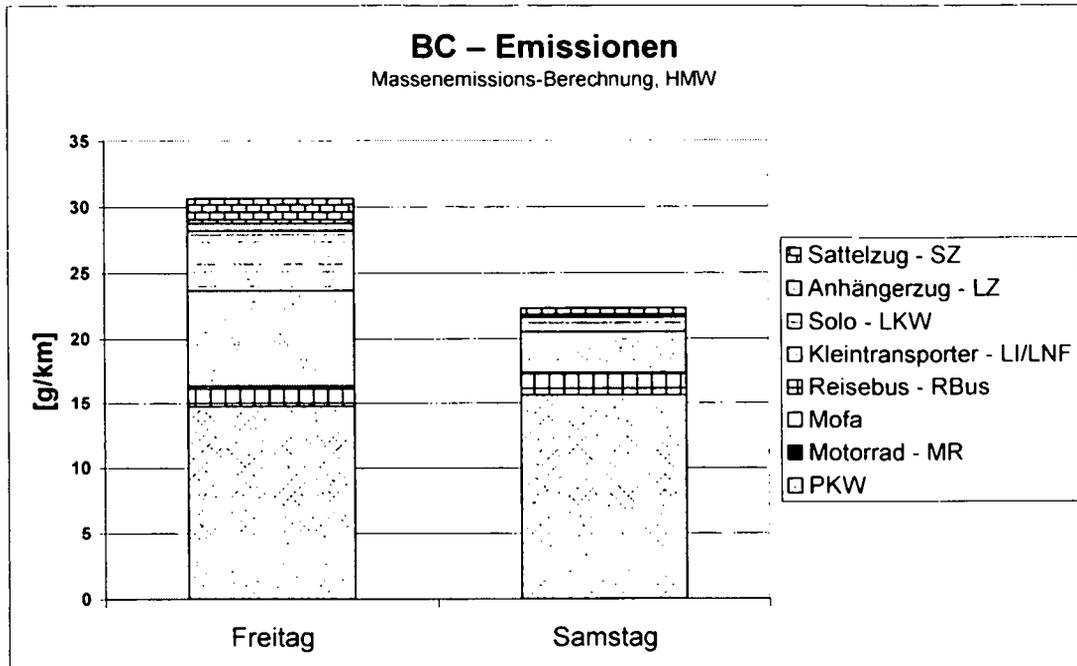


Abbildung 39: Berechnete Partikel Emissionen, HMW

Ein beträchtlicher Teil des Partikel ausstoßes wird durch den Güterverkehr, insbesondere den leichten Nutzfahrzeugen, verursacht.

## 5.4 Vergleich der gemessenen Immissionskonzentrationen mit den berechneten Emissionswerten

### 5.4.1 Methodik der Gegenüberstellung Messung zu Berechnung

In diesem Kapitel sollen die gemessenen Schadstoff-Immissionswerte in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  mit den berechneten Emissionswerten in  $\text{g}/\text{km}$  verglichen werden. Damit eine derartige Gegenüberstellung möglich ist, werden einheitslose Relativverhältnisse betrachtet. Als Bezugsgröße dient das gemessene bzw. berechnete Kohlenstoffdioxid  $\text{CO}_2$ .

#### *Relativwert Immissionsmessung $C_{k,rel}$*

Um nur den direkten Einfluss des Straßenverkehrs auf die Immissionswerte zu erhalten, wird die nächtliche Hintergrundbelastung der jeweiligen Komponente von den Messwerten subtrahiert und auf die Bezugsgröße  $\text{CO}_2$  relativiert.

$$C_{k,rel} = \frac{C_{k,HMW} - C_{k,HMW,Nacht}}{C_{\text{CO}_2,HMW} - C_{\text{CO}_2,HMW,Nacht}} \quad (5.2)$$

$C_{k,rel}$	Relativwert Immissionsmessung der Abgaskomponente k [1]
$C_{k,HMW}$	Immissionskonzentration der Komponente k als HMW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
$C_{k,HMW,Nacht}$	Nächtliche Hintergrundkonzentration der Komponente k, HMW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
$C_{\text{CO}_2,HMW}$	Immissionskonzentration der Komponente $\text{CO}_2$ als HMW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
$C_{\text{CO}_2,HMW,Nacht}$	Nächtliche Hintergrundkonzentration der Komponente $\text{CO}_2$ , HMW [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
k	Abgaskomponente

Als Hintergrundkonzentrationen wurden folgende Messwerte herangezogen:

Hintergrundbelastungen			
CO <sub>2</sub>	CO	NOx	BC
ppm	mg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>
340	0,2	20	1,1

Tabelle 13: Nächtliche Hintergrundbelastung Hietzinger Kai

### Relativwert Emissionsberechnung $M_{k,rel}$

Die relative Emissions-Rechengröße  $M_{k,rel}$  wird wie folgt definiert:

$$M_{k,rel} = \frac{M_{k,HMW}}{M_{CO_2,HMW}} \quad (5.3)$$

- $M_{k,rel}$       Relativwert Emissionsberechnung der Abgaskomponente k [1]
- $M_{k,HMW}$       Massenemission der jeweiligen Abgaskomponente k als HMW [g/km] aus  
(5.1)
- $M_{CO_2,HMW}$       Massenemission der jeweiligen Abgaskomponente CO<sub>2</sub> als HMW [g/km]  
aus (5.1)
- k              Abgaskomponente

In den nachstehenden Abschnitten werden die in (5.2) und (5.3) ermittelten, einheitslosen relativen Rechengrößen  $C_{k,rel}$  bzw.  $M_{k,rel}$  gegenübergestellt.

Mögliche Einflüsse auf die Qualität des Vergleiches können sein:

- Verdünnungsfaktor der Emissionen
- meteorologische Einflüsse (Wind, Temperatur, ...)
- Veränderungen der Hintergrundkonzentrationen (private Haushalte, Kraftwerke, ...)

## 5.4.2 Vergleich der Relativwerte

### 5.4.2.1 Kohlenstoffmonoxid CO

Die tatsächlich gemessenen Kohlenstoffmonoxid CO-Immissionen sind um ca. 20 % (Fr) bzw. 35 % (Sa) höher als die berechneten Werte. Da sich die CO-Immissionen am Samstag mit rund 0,8 mg/m<sup>3</sup> aber auf einem absolut niederen Niveau (Grenzwert lt. IG-L für das Jahr 2004: 10 mg/m<sup>3</sup> Achtstundenmittelwert MW8)<sup>51</sup> befinden, genügt eine Korrektur der verwendeten Emissionsfaktoren.

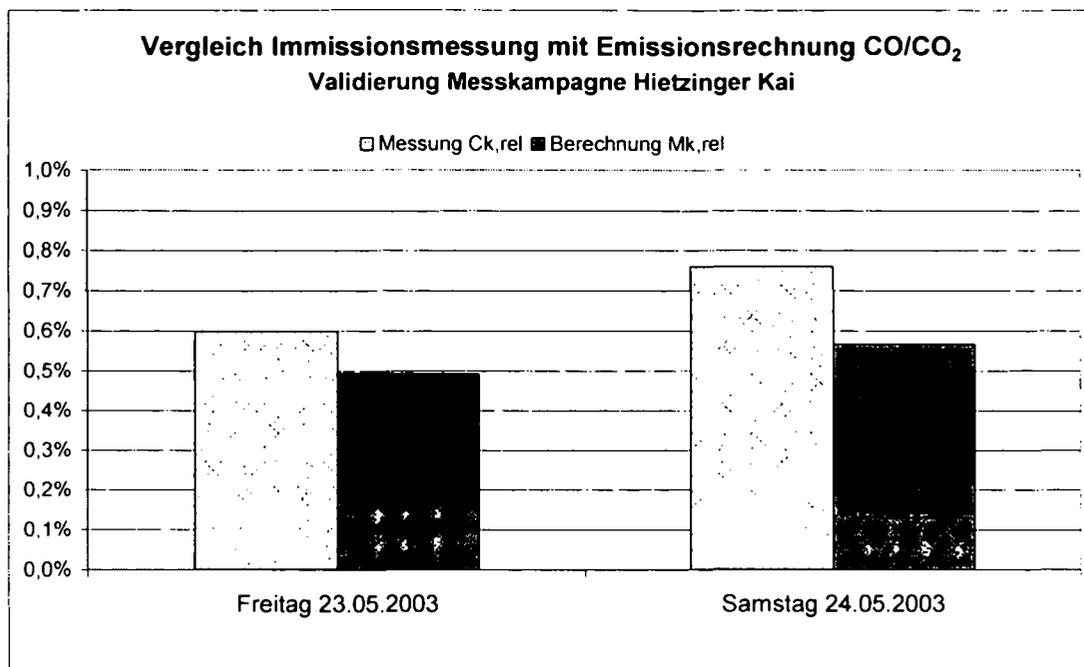


Abbildung 40: CO/CO<sub>2</sub>-Verhältnis, Hietzinger Kai, 23./24. Mai 2003

Durch die Lkw bedingte CO<sub>2</sub>-Reduktion von Freitag auf Samstag und den annähernd gleich bleibenden absoluten CO-Wert, steigt das CO/CO<sub>2</sub>-Verhältnis am Samstag, auf Grund des erhöhten Pkw- und Motorradverkehrs, an.

<sup>51</sup> Vgl. AUGUSTYN 2004b/12/5.

#### 5.4.2.2 Stickstoffoxide $NO_x$

Die Berechnung unterschätzt am Freitag die  $NO_x$ -Gesamtemissionen um ca. 15 %, während am Samstag (hohes Pkw-Verkehrsaufkommen) die Stickstoffoxide leicht überbewertet werden. Geht man davon aus, dass rund 60 % der Gesamt- $NO_x$  werktags vom Bus- und Güterverkehr verursacht werden, so werden die verwendeten Emissionsfaktoren für die schweren Nutzfahrzeuge um ca. 25 % unterbewertet.

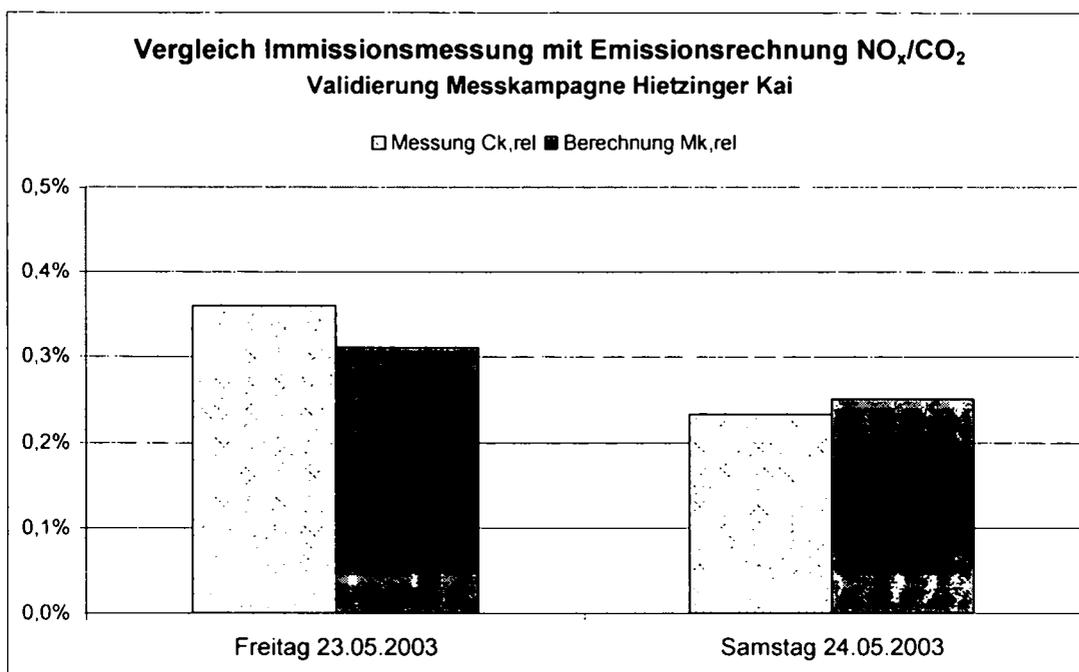


Abbildung 41:  $NO_x/CO_2$ -Verhältnis, Hietzinger Kai, 23./24. Mai 2003

#### 5.4.2.3 Partikel/Ruß BC

Durch die Reduktion des Schwerverkehranteiles von Freitag auf Samstag kommt es zu einer deutlichen Senkung der berechneten Partikelverhältnisse, die jedoch bei den Immissionsmessungen geringer ausfällt.

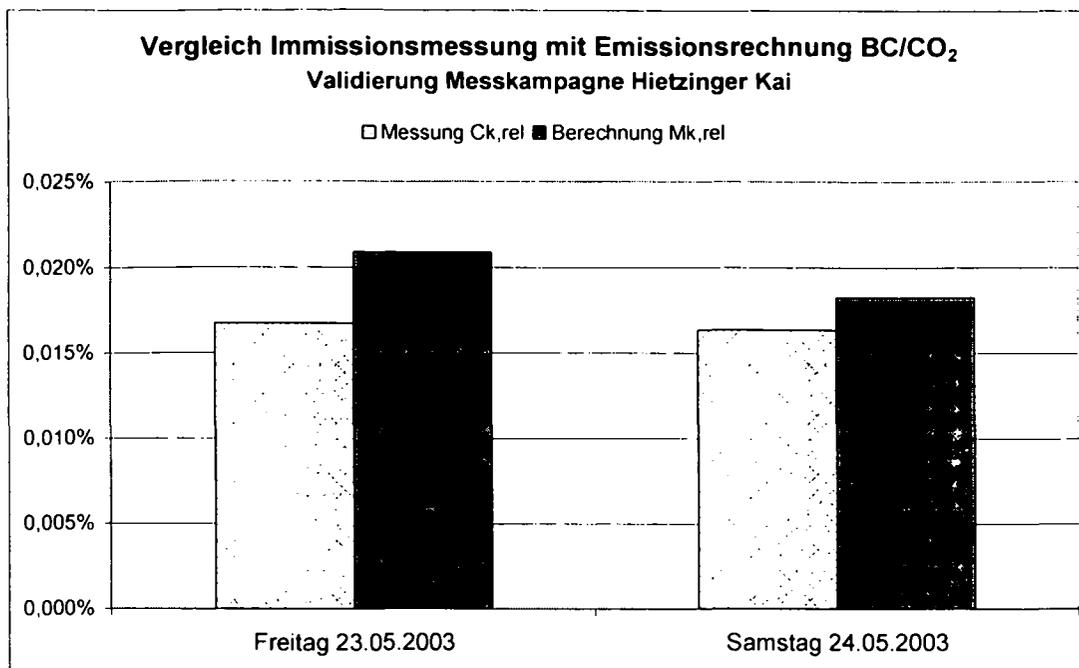


Abbildung 42: BC/CO<sub>2</sub>-Verhältnis, Hietzinger Kai, 23./24. Mai 2003

#### 5.4.3 Fazit der Validierung des Emissionsberechnungsmodells

Durch die straßennahe Lage der Luftgüte-Messstation in Wien-Hietzing war es möglich, mit Hilfe von Immissionsmessungen sowie mittels paralleler Videoaufzeichnungen nachzuweisen, dass das verwendete Emissionsberechnungsmodell sehr gut mit den Messungen korreliert.

Um die berechneten mit den gemessenen Schadstoffwerten vergleichen zu können, war es notwendig, Relativwerte ( $C_{k,rel}$  und  $M_{k,rel}$ ) zu schaffen, da eine direkte Gegenüberstellung der absoluten Schadstoffwerte Einheiten bedingt wenig Sinn gehabt hätte. Mögliche Einschränkungen, wie meteorologische Einflüsse oder eine Veränderung der Hintergrundkonzentration (z.B. durch Kraftwerke), könnten durch Ausdehnung des Beobachtungszeitraumes verringert werden und so die Qualität der Validierung erhöhen.

Durch eine Korrektur einzelner Emissionsfaktoren, insbesondere der Stickstoffoxid NO<sub>x</sub>-EFA der schweren Nutzfahrzeuge, ist es möglich, die Genauigkeit der Emissionsberechnung zu steigern.

## 6 Real-Life Messkampagnen mit schadstoffarmen Fahrzeugen

Eine weitere angewandte Methode zur Erfassung der real emittierten Abgasmenge bzw. zur Ermittlung von Emissionsfaktoren stellte das On-board Messsystem dar. Dieses in Eigenentwicklung gefertigte On-board Messsystem wurde direkt in die Messfahrzeuge eingebaut und ermittelte so auf beliebigen Fahrstrecken die Massenabgasemissionen des Fahrzeuges. Somit konnten unterschiedliche Fahrzeugkategorien hinsichtlich der gesetzlich reglementierten Abgaskomponenten Kohlenwasserstoffe HC, Kohlenmonoxid CO, Stickstoffoxide NO<sub>x</sub> sowie dem Treibhausgas Kohlendioxid CO<sub>2</sub> untersucht werden.

Neben den konventionellen Antriebsarten (Benzin- und Dieselfahrzeuge) wurden auch so genannte Alternativantriebe, insbesondere Erdgasfahrzeuge (CNG), im realen Straßenverkehr in Wien gemessen.

Die erfolgten Messungen können wie folgt untergliedert werden:

- Personenkraftwagen – Opel Zafira
- Leichtes Nutzfahrzeug – Opel Combo
- Niederflur-Gelenksbus – MAN A23

Auf Grund der Vielzahl an Messergebnissen und Datensätzen wird in den folgenden Kapiteln nur auszugsweise auf die jeweils ermittelten Abgas-Emissionen und Kraftstoffverbräuche eingegangen.

### 6.1 Experimentaltechnik

Das für die Untersuchungen verwendete On-board Messsystem „OBM“ ist ein sehr kompaktes und einfach in den Messfahrzeugen zu integrierendes System, da die Schnittstellen und externen Anschlüsse auf ein Minimum reduziert worden sind.

Das Gesamtsystem besteht aus einem eigens entwickelten Gasanalysator (Hardware) und einem Verbrennungsrechenmodell (Software), das in Echtzeit auf einem Notebook während den Messungen abgearbeitet wird.

Am Ende einer Messfahrt werden die Ergebnisse als Massenemissionen in g/km analog wie bei einer CVS-Anlage ausgegeben. Durch wiederholende Validierungen des OBM-Gesamtsystems, unter anderem auf dem Rollenprüfstand, kann das System qualitativ laufend verbessert werden.<sup>52</sup>

Die untenstehende Abbildung veranschaulicht eine vereinfachte Darstellung des Aufbaus des OBM-Systems.

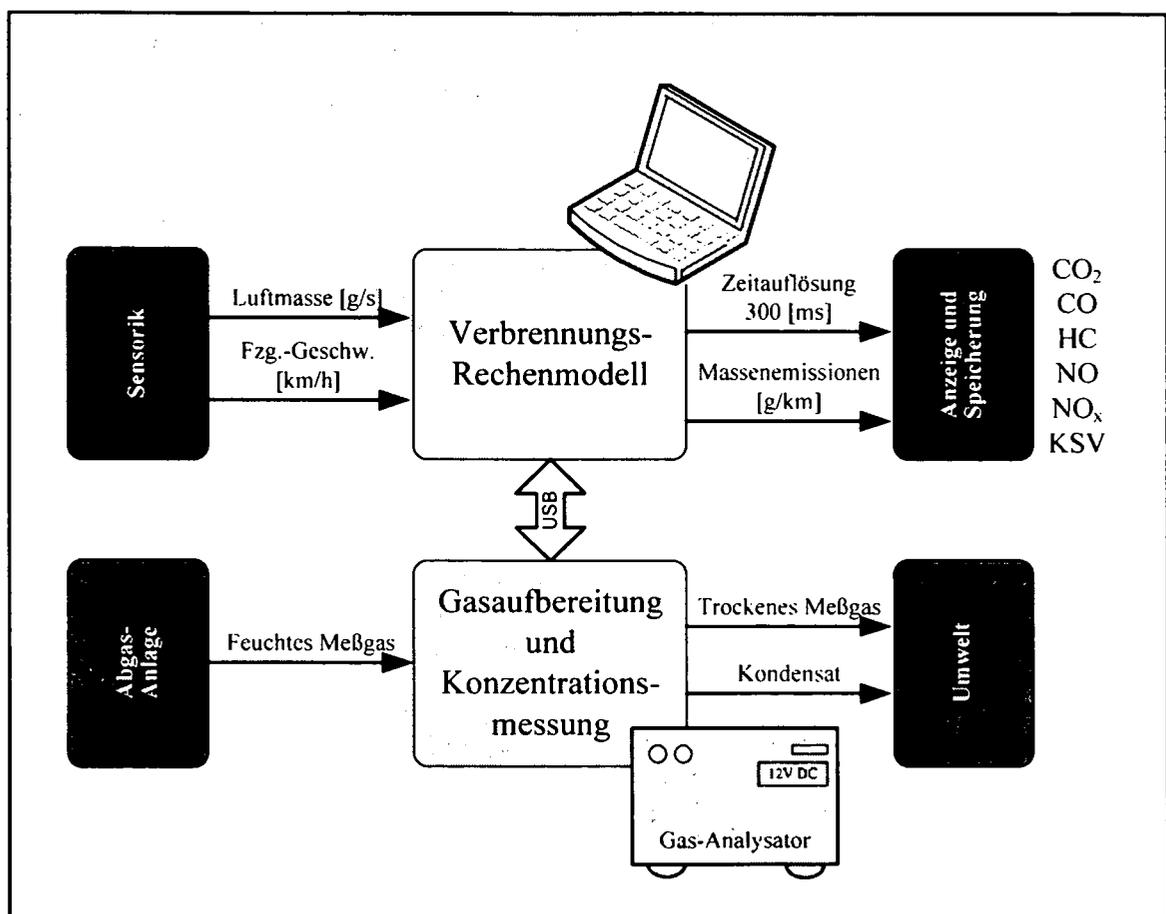


Abbildung 43: Prinzipskizze des On-board Messsystems

<sup>52</sup> Vgl. PUCHER/MÜLLER 2005/3.

### 6.1.1 OBM-Hardware-Komponenten

Die Hardware arbeitet mit einer Betriebsspannung von 12 V DC und kann somit an das Boardnetz eines Personenkraftwagens direkt angeschlossen werden. Bei Bussen und Lastkraftwagen ist ein handelsüblicher DC/DC-Wandler von 24 V DC auf 12 V DC notwendig. Das Messgas wird dem Abgasendrohr des Messfahrzeuges mittels einer Abgassonde in unverdünnter Weise entnommen. Das feuchte Messgas wird durch feinporige Papierfilter und Kondensatabscheider mit Hilfe einer Membranpumpe gesaugt.

Die folgende Abbildung zeigt den Gas-Analysator und dessen externe Peripherie-Anschlüsse im Kofferraum eines Porsche Boxster.

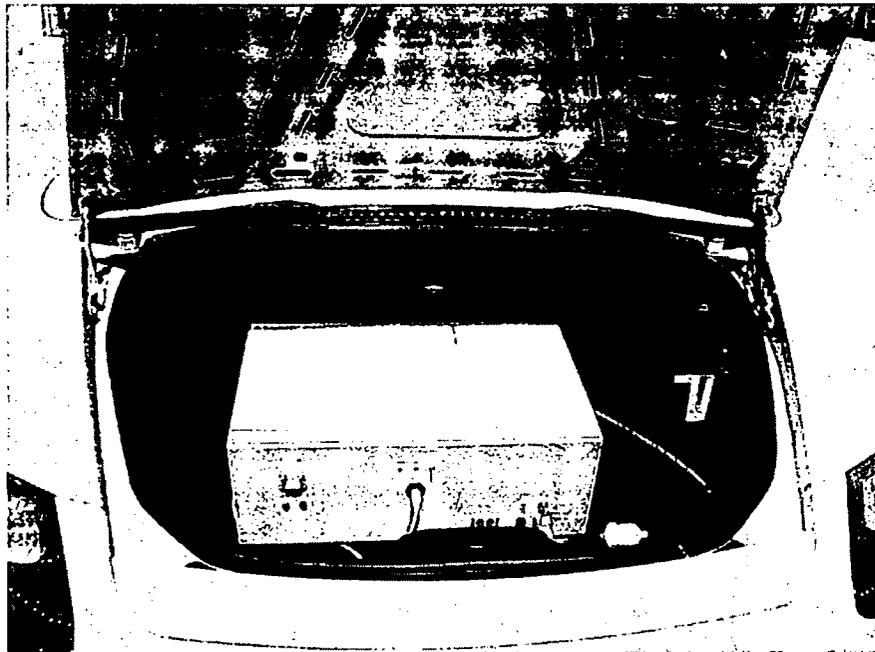


Abbildung 44: OBM-Gasanalysator

Das getrocknete Abgas durchströmt daraufhin die Infrarot-Messkammern. Diese arbeiten nach dem Prinzip der nichtdispersiven Infrarotabsorption (NDIR). Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein Einstrahlverfahren mit optopneumatischen Doppelschichtdetektoren.

Dabei werden folgende Abgaskonzentrationen (trocken) in ppm bzw. Vol-% ermittelt:

- Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>)
- Kohlenstoffmonoxid (CO)
- Kohlenwasserstoffe (HC)
- Stickstoffmonoxid (NO)

Um die immer bedeutsamer werdende Abgaskomponente Stickstoffdioxid NO<sub>2</sub> zu ermitteln, ist eine Stickstoffoxid NO<sub>x</sub>-Messkammer auf Zirkoniumdioxid ZrO<sub>2</sub>-Basis nachgeschaltet. Diese ermittelt die Summen-Stickstoffoxide in ppm.

Für Kalibrierungs- und Kompensationsroutinen sind noch folgende Komponenten in der Hardware untergebracht:

- Elektrochemische Sauerstoff O<sub>2</sub>-Messzelle
- Messgasdruck und -temperaturfühler
- Strömungsdurchflusssensor

Nachdem das trockene Messgas die Analysekkammern durchströmt hat, wird es wie das anfallende Kondenswasser über entsprechende Teflon-Schläuche in die Umwelt gepumpt.

Die interne Kommunikation der Hardware sowie die Schnittstelle zur übergeordneten Software wird über den so genannten Universal Serial Bus „USB“ bewerkstelligt.

### 6.1.2 OBM-Software-Bausteine

In der folgenden Abbildung sind die wichtigsten Bausteine der OBM-Software dargestellt.

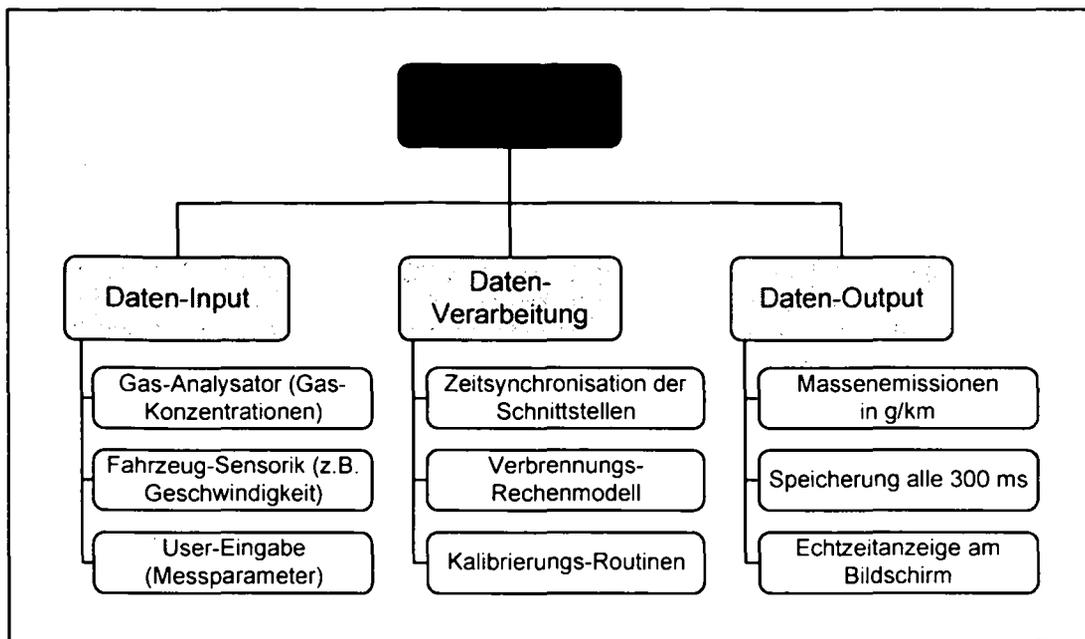


Abbildung 45: OBM-Software-Bausteine

Der Gas-Analysator liefert der Software die trockenen Messgas-Konzentrationen in ppm oder Vol-%. Mit den Daten der Sensorik des Messfahrzeuges (z.B. Geschwindigkeit) ist das Programm in der Lage, die Massenemissionen nach (6.1) zu bestimmen. Neben diesen automatisierten Daten-Inputs kann der Anwender eigene Messparameter-Eingaben tätigen, um z.B. die Art des Kraftstoffes, Messgas-Schlauchlänge, etc. festzulegen.

Im ersten Schritt der Daten-Verarbeitung erfolgt die zeitliche Synchronisation der internen und externen Schnittstellen. Ist diese Gleichschaltung erfolgt, errechnet das Programm aus der angesaugten feuchten Luftmasse die trockene emittierte Abgasmasse des Versuchsfahrzeuges, da die Gas-Komponenten im Analysator ebenfalls trocken gemessen werden.

Unter Berücksichtigung interner Lauf-, Tot- und Anstiegszeiten<sup>53</sup> verschiedener Hardware-Komponenten des OBM-Systems, werden mit Hilfe der Abgasmasse und den gemessenen Messgas-Konzentrationen die Massenemissionen zu jedem Rechenschritt  $i$  bestimmt.

$$\dot{m}_{k,i} = VAL_i * \frac{\dot{m}_{Luft,i}}{\rho_{Luft,Norm}} * c_{k,i} * \rho_{k,Norm} \quad (6.1)$$

$\dot{m}_{k,i}$	Massenemission der Abgaskomponente $k$ [g/s]
$VAL_i$	Verhältnis Ansaugvolumenstrom/Abgasvolumenstrom trocken [1] <sup>54</sup>
$\dot{m}_{Luft,i}$	Ansaugluftmassenstrom [g/s]
$\rho_{Luft,Norm}$	Normdichte der Ansaugluft [kg/m <sup>3</sup> ]
$c_{k,i}$	Konzentration der Abgaskomponente $k$ [ppm oder Vol-%]
$\rho_{k,Norm}$	Normdichte der Abgaskomponente $k$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$k$	Abgaskomponente
$i$	Rechenschritt

Die Archivierung dieser Zwischenergebnisse auf der Hard-Disk des Notebooks geschieht alle 300 ms. Dadurch kann bei späteren Analysen auf eine große Datenmenge zurückgegriffen werden. Dies hat den Vorteil, dass jeder Betriebspunkt während einer Messfahrt annähernd in Echtzeit ausgewertet werden kann.

Durch eine programminterne Aufsummierung der Einzelrechenergebnisse  $\dot{m}_{k,i}$  ergibt sich am Ende einer Messung (Messfahrt) eine durchschnittliche Massenemission  $M_k$  in g/km der Komponenten CO<sub>2</sub>, CO, HC, NO, NO<sub>x</sub>, als auch der mittels Kohlenstoffbilanz berechnete Kraftstoffverbrauch KSV in l/100km oder kg/100km.

<sup>53</sup> Vgl. TOTH 2005/74.

<sup>54</sup> Vgl. PRESSLER 1999/46.

$$M_k = \frac{\sum_0^t \dot{m}_{k,i} \cdot \Delta t}{s_{\text{gesamt}}} \quad (6.2)$$

$M_k$	Gesamtmassenemission [g/km]
$\dot{m}_{k,i}$	Massenemission der Abgaskomponente k [g/s]
$\Delta t$	Rechenschritt-Intervall [s]
t	Gesamtmesszeit
$s_{\text{gesamt}}$	Messstrecke [km]
k	Abgaskomponente
i	Rechenschritt

Ebenso hat der Messingenieur die Möglichkeit online am Bildschirm zeitgleich zu einer Messung die wichtigsten Eingangsgrößen, Parameter, Messkonzentrationen und Massenemissionen zu beobachten.

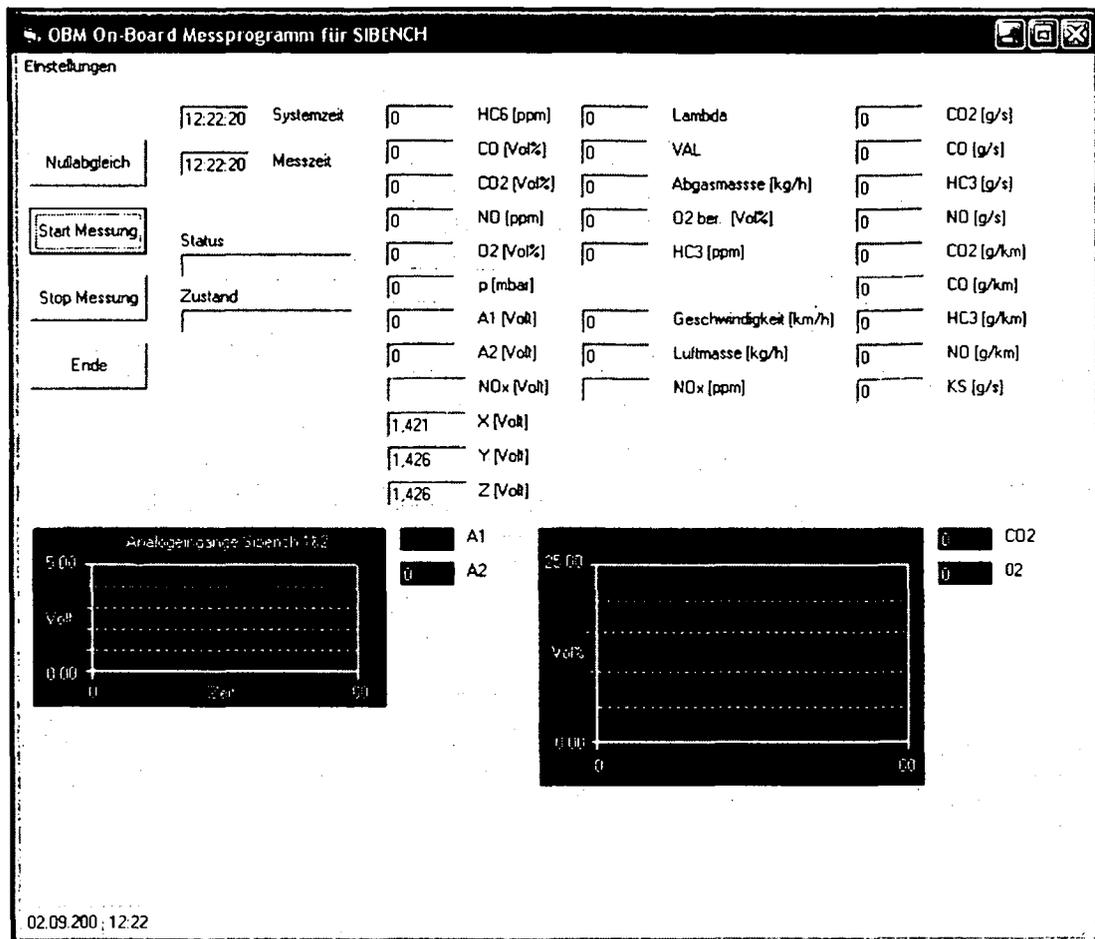


Abbildung 46: OBM-Software Oberfläche

### 6.1.3 Validierung des On-board Messsystems

Um die Qualität der Messungen mit dem OBM-System zu gewährleisten, wurden vor der jeweiligen Real-Life Messkampagne entsprechende Tests und Validierungen durchgeführt. Zur Überprüfung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Gasanalysators sowie der Zirkonoxid-Messkammer, wurden in regelmäßigen Abständen stationäre Untersuchungen mit Kalibriergas im Versuchslabor des Institutes für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau an der Technischen Universität Wien durchgeführt.

Die folgende Abbildung zeigt die im Zeitraum vom 24.11.2004 bis zum 14.07.2005 gemessenen Prüfgaskonzentrations-Abweichungen in % des Gasanalysators. Die Werte der  $\text{NO}_x$ -Messkammer beziehen sich auf Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$ -Prüfgas.

<b>Genauigkeit des OBM Gasanalysators</b> Untersuchungen mit Kalibriergasen					
Abweichungen in % vom Messwert					
CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	NO	NO <sub>x</sub>	CO	(HC) <sub>3</sub>
1,0	1,4	0,5	0,3	2,4	2,0

Messzeitraum: 24.11.2004 bis 14.07.2005  
 Anzahl der Messungen: n=11  
 Verwendete Prüfgase:  
 CO<sub>2</sub>: 9%/15%; O<sub>2</sub>: 0,5%/5,5%; NO: 940ppm; CO: 290ppm; C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>: 91,5ppm

Abbildung 47: Durchschnittliche Abweichungen des Gasanalysators in %

Neben parallelen Konzentrationsmessungen des On-board Messsystems mit stationären Messgeräten (z.B. CLD Chemiluminescence-Detektor, etc.) im Versuchslabor wurden während verschiedener Messfahrten mit einem Opel Combo Kastenwagen in Wien auch die Einflüsse von Beschleunigungen bzw. Erschütterungen auf den Gasanalysator untersucht. Dies geschah mit Hilfe einer im Fahrzeuginnenraum untergebrachten 10 Liter Kalibriergasflasche mit einer Zusammensetzung von 11 Vol-% CO<sub>2</sub> und 3,5 Vol-% O<sub>2</sub>. Die Versuche ergaben eine befriedigende Stabilität des Gasanalysators. Besonders die Messkanäle für Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>, Sauerstoff O<sub>2</sub> und Stickstoffoxid NO<sub>x</sub> wiesen eine besonders hohe Unempfindlichkeit gegenüber auftretenden Beschleunigungen auf.

Zur Validierung des OBM Gesamtsystems, insbesondere des Verbrennungsrechenmodells, wurden Untersuchungen am Rollenprüfstand<sup>55</sup> des IVK, sowie Treibstoffverbrauchs-Messungen verschiedener Versuchsfahrzeuge durchgeführt.

Bei den Treibstoffverbrauchs-Testfahrzeugen handelt es sich dabei um einen Personenkraftwagen VW Golf mit Ottomotor, und um einen MAN Niederflrigelenksbus mit Erdgas-Magermotor. Zwischen zwei Betankungsvorgängen wurde die gesamte zurückgelegte Wegstrecke während der Real-Life Messfahrten im Ballungsraum Wien mittels OBM aufgezeichnet.

<sup>55</sup> Vgl. PUCHER/TAUSCHER 2002/8f.

Die Betankungsmenge an der Befüllungsanlage konnte so nach Ende einer Messfahrt mit den Aufzeichnungen des On-board Systems verglichen werden. Die folgende Tabelle gibt die mittels OBM (Kohlenstoff C-Bilanz) bzw. durch Nachtanken ermittelten Verbräuche sowie die gemessenen Abweichungen wieder.

OBM Validierung Messfahrzeug			Treibstoff-Verbrauch ermittelt aus				
	Messtrecke	Einheit	C-Bilanz OBM	Betankung	Einheit	Abweichung	Einheit
VW Golf 1.8 GL - 66 kW	107	[km]	10,2	10,3	[l/100km]	-1,0	[%]
MAN A23 (NG 313) - 228 kW	112	[km]	77,2	78,2	[kg/100km]	-1,3	[%]
	97	[km]	70,8	69	[kg/100km]	2,6	[%]
	178	[km]	65,4	66,5	[kg/100km]	-1,7	[%]

**Tabelle 14: OBM Validierung mittels Verbrauchkontrolle**

Die Abweichungen der dabei ermittelten Treibstoffverbräuche liegen bei rund 2 % bis 3 %. Diese Differenz kann als ausreichend genau für die Validierung des Gesamtsystems hinsichtlich des Kraftstoffverbrauches KSV und des Verbrennungsrechenmodells (insbesondere des Verhältnisses VAL) betrachtet werden.

## 6.2 Real-Life Messkampagne - Opel Zafira

Im Februar 2004 wurde in Kooperation mit der Opel Austria Vertrieb GmbH eine Messkampagne zur Erfassung der Real-Life Abgasemissionen im Ballungsraum Wien durchgeführt. Als Versuchsfahrzeuge dienten (wie unten näher beschrieben) ein diesel- und ein erdgasbetriebener Kompaktvan der Firma Opel.

Ziel dieser Untersuchung war es, die Emissionsreduktionspotentiale der Schadstoffkomponenten CO, HC, NO und des Treibhausgases CO<sub>2</sub> eines erdgasbetriebenen Fahrzeuges im Vergleich zu einem Diesel-Fahrzeug darzustellen.

### 6.2.1 Messfahrzeuge

Als Versuchsfahrzeuge dienten ein dieselbetriebener Opel Zafira 2.0 DTI und ein Opel Zafira 1.6 CNG mit dem Erdgas monovalent<sup>plus</sup>-Konzept von Opel. Beide Fahrzeuge hatten annähernd dieselbe Motorleistung und waren somit sehr gut vergleichbar. Der Erdgas-Zafira verfügte über einen geregelten Drei-Wege-Katalysator mit Lambda-Sonde, der Diesel-Zafira über einen Oxidationskatalysator.



Abbildung 48: Messfahrzeuge Opel Zafira Erdgas/Diesel

Die wichtigsten technischen Daten der Versuchsfahrzeuge können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Hersteller:	OPEL	OPEL
Bezeichnung:	Zafira 2.0 DTi	Zafira 1.6 CNG
Motor:	2.0 DTi ECOTEC	1.6 CNG monovalent <sup>plus</sup>
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]:	1995	1598
Bohrung/Hub [mm]:	84/90	79/81,5
Verdichtung:	18,5:1	12,5:1
Nennleistung [kW/PS bei 1/min]:	74/100 bei 4300	71/97 bei 6200
Max. Drehmoment [Nm bei 1/min]:	230 bei 1500	140 bei 4200
Abgasnachbehandlung:	Oxidationskatalysator	3-Wege-Katalysator
Getriebe:	5 Gang-Schalt.	5 Gang-Schalt.
Leergewicht [kg]:	1503	1570
Kraftstofftank:		
Diesel [l]:	58	n.v.
Erdgas [kg/l]:	n.v.	19/110
Benzin [l]:	n.v.	14
Kraftstoffverbrauch <sup>1</sup> :		
Diesel [l/100km]:	8,0/5,3/6,3	n.v.
Erdgas [kg/100km]:	n.v.	6,7/4,4/5,3 <sup>2</sup>
Benzin [l/100km]:	n.v.	k.A.
Schadstoffklasse:		
	Euro3	Euro3/D4
CO <sub>2</sub> -Emission [g/km]:	169	144 <sup>2</sup>
<sup>1</sup> innerstädt./ausserstädt./gesamt nach Richtlinie 199/100/EG.		
<sup>2</sup> Angaben beziehen sich auf Prüfgas G20 (H-Gas).		

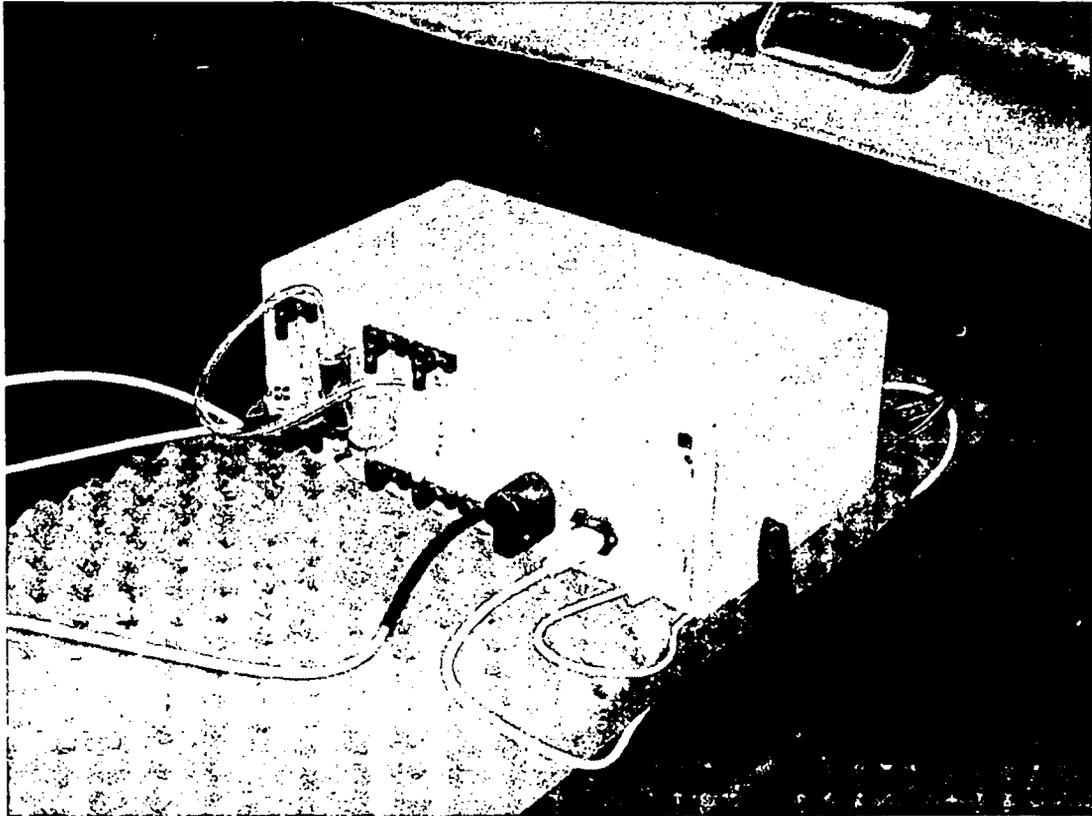
Tabelle 15: Technische Daten der Versuchsfahrzeuge lt. Hersteller

## 6.2.2 Messgeräteeinbau

Zur Ermittlung der massenbezogenen Abgasemissionen im realen Fahrbetrieb wurden die Versuchsfahrzeuge mit dem On-board Messsystem (OBM) und der erforderlichen Sensorik ausgestattet.

Für die Erfassung der angesaugten Luftmasse wurde in beiden Testfahrzeugen ein Heißfilmluftmassenmesser der Firma Bosch verwendet. Für den Einbau im Opel Zafira CNG waren entsprechende Veränderungen und Adaptierungen im Ansaugmodul notwendig, da dieses Fahrzeug serienmäßig nicht über einen Luftmassenmesser verfügte. Die Geschwindigkeit der Messfahrzeuge wurde mit Hilfe des fahrzeugintegrierten ABS-Streckensignals und einem nachgeschalteten Frequenz-Spannungswandler in das Messsystem eingespeist.

Das OBM-Messgerät war mit den entsprechenden Abgasein- und Ausgängen im Kofferraum verbaut. Die Stromversorgung für das Messgerät und das Notebook wurde durch einen 12V/230V-Wechselrichter gewährleistet.



**Tabelle 16: Gas-Analysator im Kofferraum des Opel Zafira**

Der Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen konnten somit aus den gemessenen Abgaskomponenten des Gasanalysators und der Kohlenstoffbilanz berechnet werden. Die Ergebnisse konnten online in Echtzeit am Notebook im Fahrzeug beobachtet werden. Zur Archivierung der Daten wurden diese in eine Datenbank auf der Harddisk des Messrechners geschrieben.

### 6.2.3 Messdurchführung

Durch das geringe Gewicht des Messsystems und der Messung der Emissionswerte ohne Beeinflussung der Motoreigenschaften war es möglich, die real emittierten Abgase zu bestimmen. Um charakteristische Werte für den Bereich des Stadtverkehrs zu erhalten, wurden die Umgebungseinflüsse miteinbezogen und auf die Vielfältigkeit der Teststrecken geachtet.

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messwerte hatte auch der Fahrstil des jeweiligen Fahrzeuglenkers. Durch den Einsatz des gleichen Fahrers bei allen Messfahrten konnten mögliche Abweichungen minimiert werden. Um ein charakteristisches Fahrverhalten zu gewährleisten, wurde die Geschwindigkeit dem Verkehrsaufkommen angepasst und ein nicht zu „aggressiver“ Fahrstil für alle Messungen gewählt.

#### 6.2.3.1 Strecken

Für die Wahl der Teststrecken wurden das Verkehrsaufkommen und die für den städtischen Verkehr typischen Straßenzüge analysiert. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden die Messstrecken festgelegt und darauf geachtet, diese bei verschiedener Verkehrsdichte zu befahren.

Kategorie nach BMVIT	Bezeichnung	Streckenbeschreibung	Länge [km]	Geschw. [km/h]
City-Bereich	Innenstadt (1. Bezirk)	Rosenbursenstrasse/Ring - Postgasse - Dr. Karl-Lueger-Platz - Schulerstrasse - Strobelgasse - Wollzeile - Liebenberg - Seilerstätte - <b>Weihburggasse/Ring</b>	2,2	16,7
	Ring	Stubenring - Parkring - Kämtner Ring - Opernring - Burgring - Dr. Karl-Lueger Ring - Schottenring - Franz-Josefs-Kai - <b>Stubenring</b>	5,5	28,6
Stadverkehr	Wiener Gürtel	Matzleinsdorfer Platz - Margareten Gürtel - Manahlfir Gürtel - Neubaugürtel - Hernauer G. - Währinger Gürtel - <b>Spittelau</b>	7,5	24,9
	Lände	Spittelau - Spitelauer Lände - Roßauer Lände - Franz-Josefs-Kai - <b>Urania</b>	2,8	34,7
Durchzugsverkehr	Hadikgasse	Naschmarkt - Linke Wienzeile - Hadikgasse - Wientalstrasse - <b>Einkaufszentrum Auhof</b>	12,1	43,1
	Hietzinger Kai	Einkaufszentrum Auhof - Wientalstrasse - Hackinger Kai - Hietzinger Kai - Sönbirnerstr - Rechte Wienzeile - <b>Naschmarkt</b>	11,9	39,5
Randgebiete	Triesterstrasse	Triesterstrasse/Sterngasse - Triesterstrasse - <b>Matzleinsdorfer Platz</b>	4,3	31
	Donaustadt-Stadlau	Naschmarkt - Friedrichstrasse - Am Heumarkt - Vordere Zollamtstrasse - Praterstrasse - Praterstern - Lassallestrasse - Wagranerstr - Breitenleer Strasse - <b>Gewerbepark Stadlau</b>	11,4	29,2
Stadtautobahnen	Süd-Ost-Tangente	Gewerbepark Stadlau - A23 - <b>Knoten Inzerdorf</b>	16	78,4

Tabelle 17: Kategorisierte Messstrecken in der Stadt Wien

Um die Untersuchungsergebnisse auch auf andere Städte übertragen zu können, oder mit Messkampagnen in unterschiedlichen Ballungsgebieten vergleichbar zu machen, wurden die für Wien spezifischen Strecken kategorisiert. Weiters erlaubt die Einführung dieser Kategorien einen Vergleich mit den in der Fachliteratur hinterlegten Emissionsfaktoren. Damit die Genauigkeit der Messung ausreichend gewährleistet war und zufällige Fehler möglichst eliminiert werden konnten, wurden in Summe 72 Messfahrten auf den oben genannten Strecken durchgeführt.

### 6.2.3.2 Wetterbedingungen

Die Messungen wurden im Februar 2004 durchgeführt, wodurch eine Beeinflussung der Messergebnisse durch die winterlichen Umgebungseinflüsse zu befürchten war. An den Messtagen waren die Witterungsbedingungen für die Messdurchführung sehr gut. Die Straßen waren vorwiegend trocken und nur kurzzeitig etwas regennass. Die Wetterdaten und ihren Verlauf über die einzelnen Messtage zeigt folgendes Diagramm.

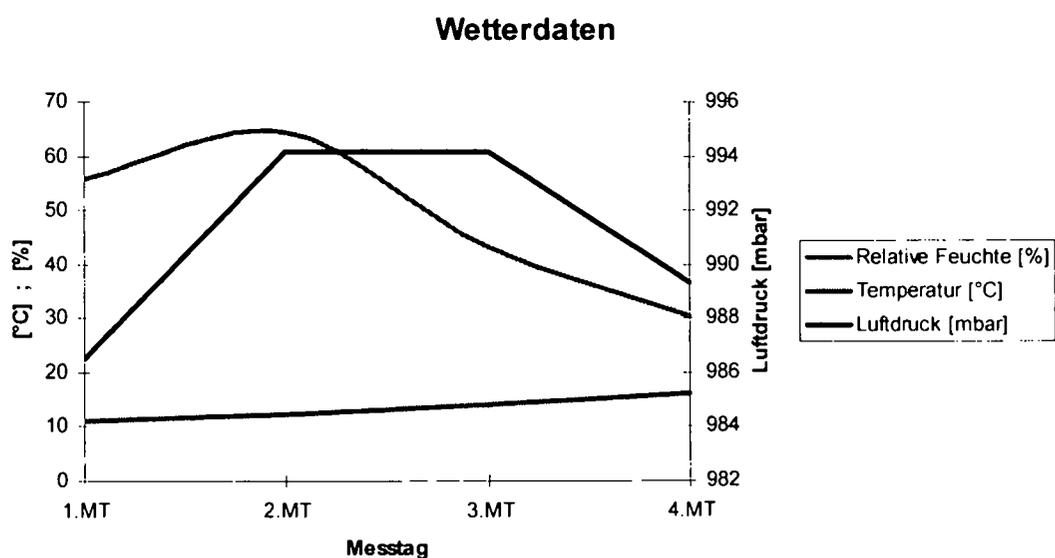


Abbildung 49: Wetterdaten

Mit einer durchschnittlichen Temperatur rund 14 °C, einer relativen Feuchte von ca. 50 % und einem Luftdruck von 990 mbar, sind die Werte für den Mitteleuropäischen Raum durchaus charakteristisch.

## 6.2.4 Ergebnisse der Messfahrten

Neben den Real-Life Messungen des Diesel- bzw. Erdgasfahrzeuges wurden zur Veranschaulichung ebenso die Abgasemissionen des Opel Zafira CNG im Benzinmodus (Notbetrieb) gemessen. Diese Ergebnisse dienen jedoch nur als Anhaltspunkte, da der CNG-Motor speziell für den Erdgasbetrieb optimiert war.

### 6.2.4.1 Kohlenstoffdioxid $CO_2$

Die folgende Abbildung zeigt den real-life gemessenen Ausstoß an Kohlenstoffdioxid  $CO_2$  der Versuchsfahrzeuge. Dabei sind die Ergebnisse in die oben erläuterten Straßenkategorien unterteilt.

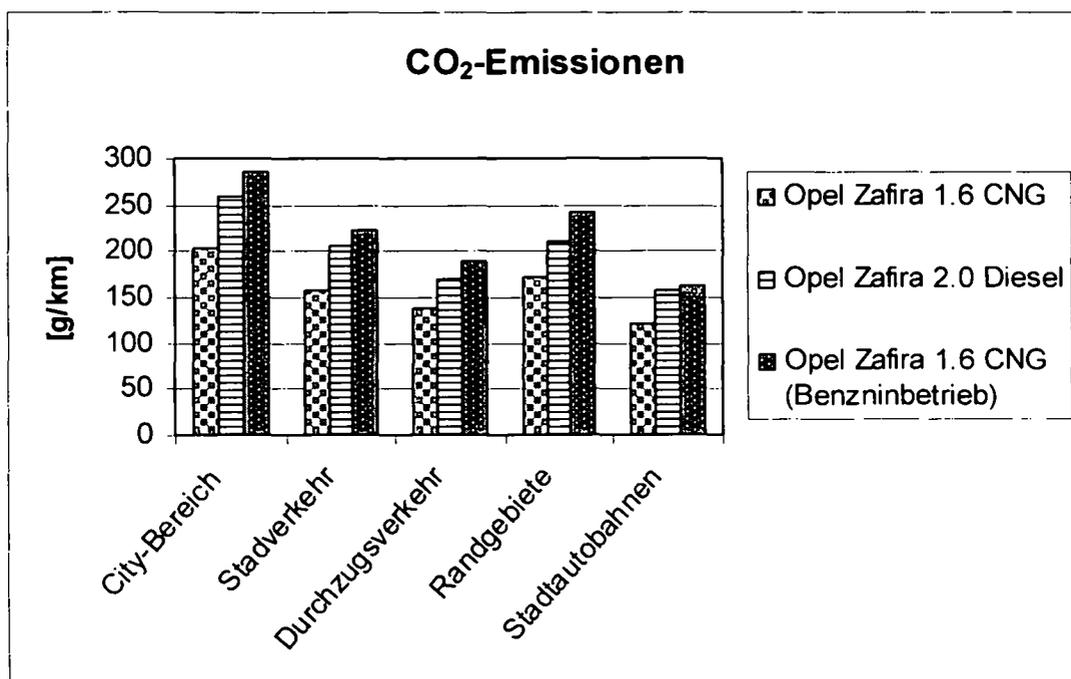


Abbildung 50: CO<sub>2</sub>-Emissionen in Kategorien

Es zeigt sich in allen Fahrsituationen bzw. Straßenkategorien, dass der Opel Zafira 1.6 CNG deutliche CO<sub>2</sub>-Emissionsvorteile (rund 20 %) gegenüber dem Diesel-Fahrzeug hat.

#### 6.2.4.2 Stickstoffmonoxid NO

Die im Zuge der Real-Life Messungen erfassten NO-Emissionen werden normgerecht als NO<sub>2</sub>-Äquivalent ausgewiesen.<sup>56</sup> Folgende Abbildung veranschaulicht die NO-Emissionen der Testfahrzeuge über der durchschnittlichen Geschwindigkeit der jeweiligen Messfahrt. Der Stickstoffmonoxid NO-Ausstoß ist beim CNG-Fahrzeug auf Grund des geregelten Drei-Wege-Katalysators in jeder Fahrsituation bzw. bei jeder Geschwindigkeit deutlich geringer als beim Dieselfahrzeug.

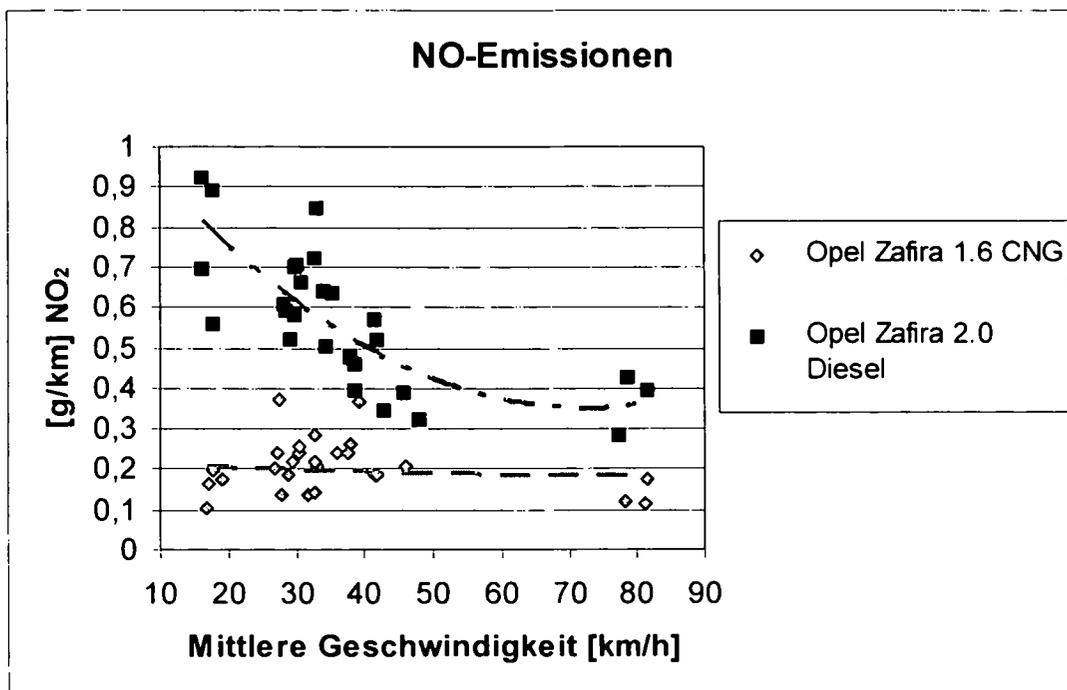


Abbildung 51: NO-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit

#### 6.2.4.3 Kraftstoffverbrauch KSV

Der mit Hilfe der Kohlenstoff-Bilanz ermittelte Kraftstoffverbrauch ist in dem folgenden Diagramm (Erdgas in kg/100km, Diesel und Benzin in l/100km) ersichtliche.

<sup>56</sup> Vgl. 91/441/EWG, L242/81.

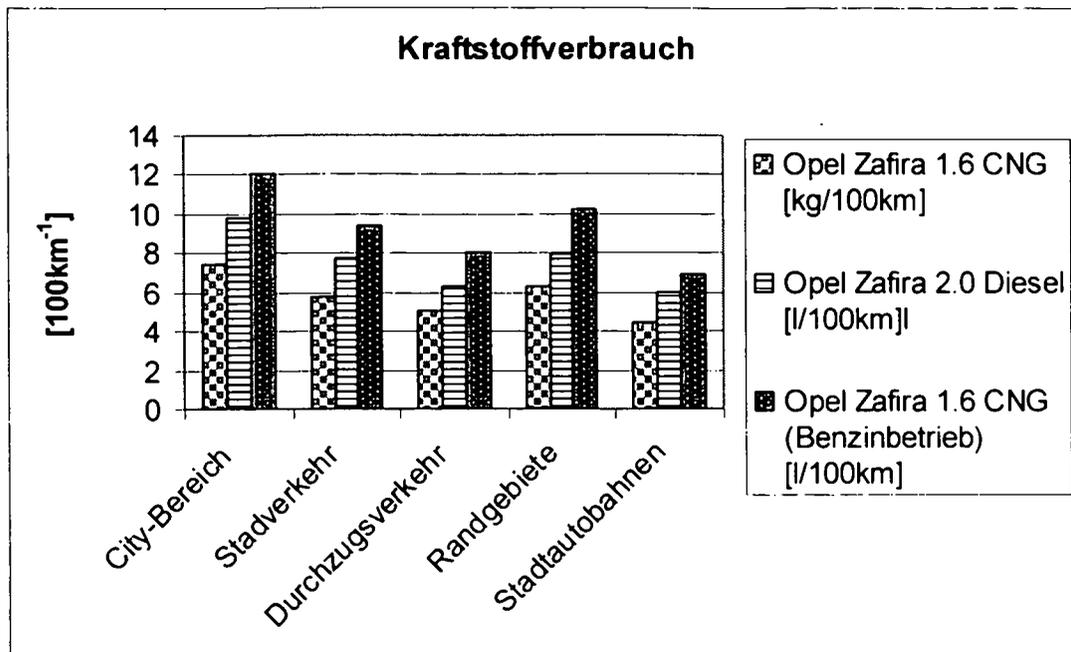


Abbildung 52: Kraftstoffverbrauch KSV in Kategorien

### 6.2.5 Fazit der Messergebnisse

Auf Grund des geringeren Kohlenstoffanteiles im Kraftstoff Erdgas gegenüber dem Diesel kam es beim Opel Zafira 1.6 CNG Testfahrzeug zu einem erfreulichen Einsparungspotential der Emissionen von Kohlenstoffdioxid  $\text{CO}_2$  von rund 20 % bei durchgängiger moderater Fahrweise.

Die Kohlenstoffmonoxid- bzw. Kohlenwasserstoff-Emissionen bewegten sich beim Opel Zafira CNG bzw. DTI auf konstant niedrigem Niveau.

Durch den sehr geringen Ausstoß an Kohlenstoffmonoxid  $\text{CO}$  im Opel Zafira CNG kam es zu keiner vollständigen Reduktion des Stickstoffmonoxid  $\text{NO}$  zu Stickstoff  $\text{N}_2$  im Katalysator des Erdgas-Fahrzeuges. Das Emissionsminderungspotential von  $\text{NO}$  war jedoch gegenüber dem Diesel-Fahrzeug besonders bei niederen Geschwindigkeiten sehr hoch. Im Durchschnitt über Wien bewegte es sich bei ca. 60 %.

Der bei den On-board Messungen ermittelte Kraftstoffverbrauch des Opel Zafira 1.6 CNG von nur 5,8 kg/100km ist besonders für Vielfahrer und Flottenbetreiber sehr interessant.

### 6.3 Real-Life Messkampagne - Opel Combo

Der Güterverteilverkehr in Städten stellt eine besonders rasch wachsende Verkehrskategorie dar. Er verursacht derzeit rund die Hälfte der Stickstoffoxid- und Partikel-Emissionen des Straßenverkehrs. Aus diesem Grund hatte sich ein Konsortium, bestehend aus Universitärer Forschung (TU Wien), Fahrzeugindustrie (GM Austria), Flottenbetreiber (DHL), Energieversorger (OMV) und verkehrspolitischer Forschung (ÖAMTC Akademie) zusammengetan, um in einem kombinierten Forschungs- und Demonstrationsprojekt die Machbarkeit sowie ökologische und ökonomische Effizienz des Einsatzes von Fahrzeugen mit optimierten Erdgasmotoren zu analysieren und zu erproben.

Ziel dieser Forschungsarbeit war es, die Emissionsreduktionspotentiale der Schadstoffkomponenten CO, HC, NO und des Treibhausgases CO<sub>2</sub> eines erdgasbetriebenen Fahrzeuges im Vergleich zu Diesel- und Benzin-Fahrzeugen zu untersuchen.

#### 6.3.1 Messfahrzeuge

Als Versuchsfahrzeuge dienten ein Opel Combo 1.6 CNG, ein Opel Combo 1.7 CDTI und ein Opel Combo 1.4i TWINPORT.

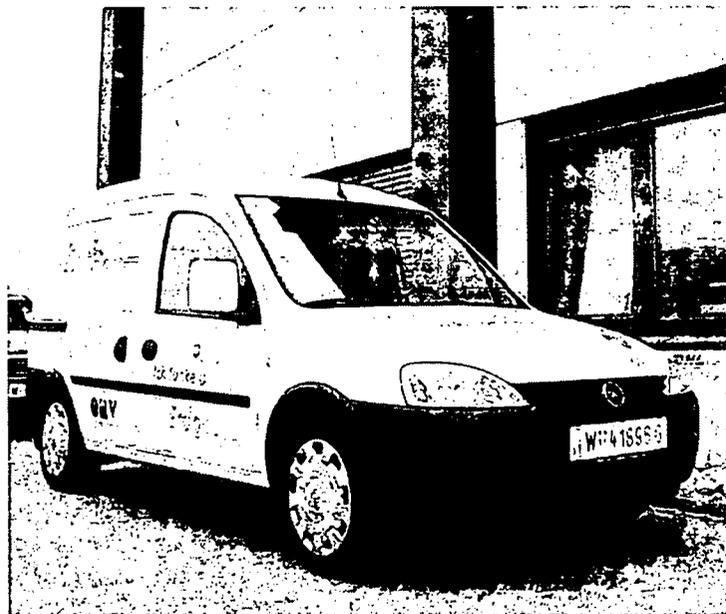


Abbildung 53: Messfahrzeug Opel Combo 1.6 CNG

Die drei Versuchsfahrzeuge hatten annähernd dieselbe Motorleistung und sind somit sehr gut vergleichbar. Der Erdgas- sowie der Benzin-Combo verfügten über einen geregelten Drei-Wege-Katalysator mit Lambda-Sonden, der Diesel-Combo über einen Oxidationskatalysator.

Die wichtigsten technischen Daten der Versuchsfahrzeuge können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Hersteller:	OPEL		
	Combo 1.6 CNG	Combo 1.7 CDTI	Combo 1.4
Motor:	1.6 CNG monovalent <sup>plus</sup>	1.7 CDTI ECOTEC	1.4 TWINPORT ECOTEC
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]:	1598	1686	1364
Bohrung/Hub [mm]:	79/81,5	79/86	73,4/80,6
Verdichtung:	12,5:1	18,4:1	10,5:1
Nennleistung [kW/PS bei 1/min]:	71/97 bei 6200	74/100 bei 4400	66/90 bei 5600
Max. Drehmoment [Nm bei 1/min]:	140 bei 4200	240 bei 2300	125 bei 4000
Abgasnachbehandlung:	3-Wege-Katalysator	Oxidationskatalysator	3-Wege-Katalysator
Getriebe:	5 Gang-Schalt.	5 Gang-Schalt.	5 Gang-Schalt.
Leergewicht (inkl. 75 kg Fahrer) [kg]:	1320	1375	1190
Kraftstofftank:			
Diesel [l]:	n.v.	52	n.v.
Erdgas [kg/l]:	19/110	n.v.	n.v.
Benzin [l]:	14	n.v.	52
Kraftstoffverbrauch <sup>1</sup> :			
Diesel [l/100km]:	n.v.	6,8/4,6/5,4	n.v.
Erdgas [kg/100km]:	6,6/3,9/4,9 <sup>2</sup>	n.v.	n.v.
Benzin [l/100km]:	k.A.	n.v.	8,0/5,3/6,3
Schadstoffklasse:			
CO <sub>2</sub> -Emission [g/km]:	Euro3/D4 134 <sup>2</sup>	Euro4 146	Euro4 151

<sup>1</sup> innerstädt / ausserstädt / gesamt nach Richtlinie 199/100/EG.  
<sup>2</sup> Angaben beziehen sich auf Prüfgas G20 (H-Gas)

**Tabelle 18: Technische Daten der Versuchsfahrzeuge lt. Hersteller**

### 6.3.2 Messgeräteeinbau

Der Einbau der Messgeräte erfolgte analog zu den Untersuchungen mit dem Opel Zafira. Zur Erfassung der angesaugten Luftmasse wurde in den Combo-Testfahrzeugen ein Heißfilmluftmassenmesser der Firma Bosch verwendet. Für den Einbau im Opel Combo 1.6 CNG waren entsprechende Adaptierungen im Ansaugmodul notwendig, da dieses Fahrzeug serienmäßig keinen Luftmassenmesser benötigt.

Die Geschwindigkeit der Messfahrzeuge wurde mit Hilfe des fahrzeugintegrierten ABS-Signale und einem nachgeschalteten Frequenz-Spannungswandler in das Messsystem eingespeist.

Das On-board Messgerät war mit den entsprechenden Abgasein- und Ausgängen jeweils im Laderaum der Lieferfahrzeuge verbaut. Die Stromversorgung für das Messgerät und das Notebook wurde durch einen 12V/230V-Wechselrichter gewährleistet.

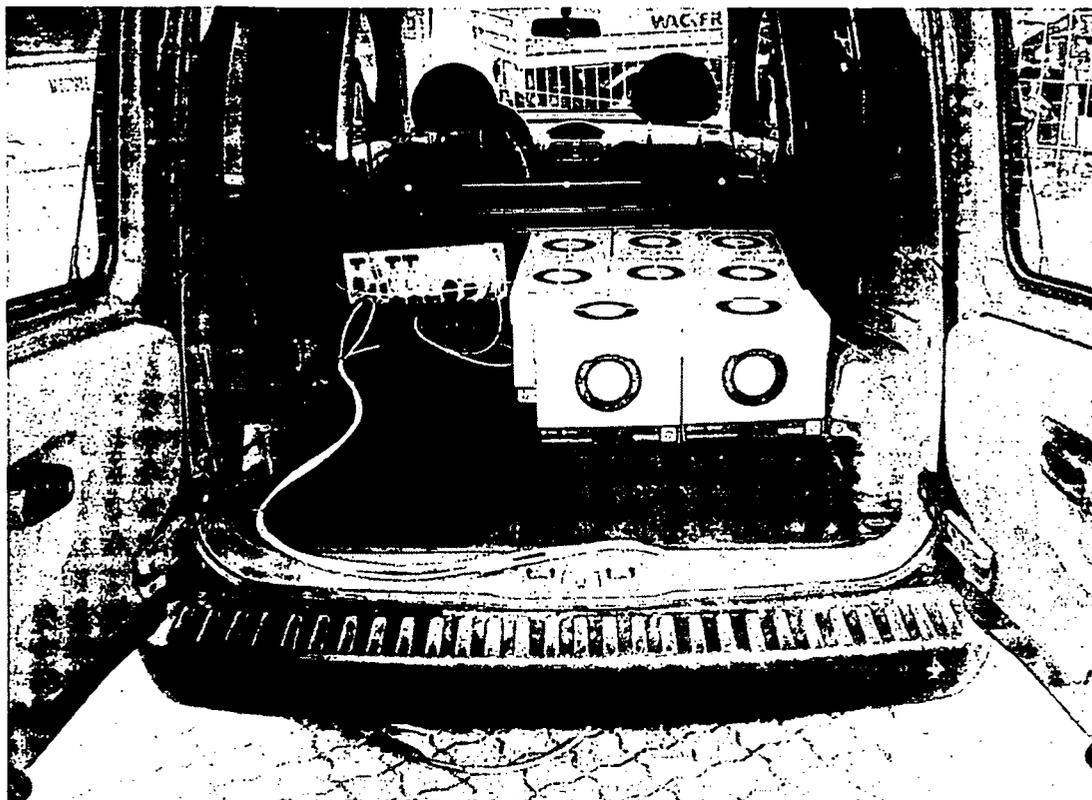


Abbildung 54: On-board Abgasmassensmessgerät im Opel Combo 1.4i neben Ladegut

Die mit dem Gasanalysator erfassten Daten wurden an das Notebook weitergeleitet und in Echtzeit verarbeitet. Der Beifahrer konnte dabei online die Ergebnisse des internen Rechenmodells am Bildschirm verfolgen.

### 6.3.3 Messdurchführung

Einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Messwerte hat auch der Fahrstil des jeweiligen Fahrzeuglenkers. Um vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten, wurden die Versuchsfahrten im professionellen Güterverkehr vom Fahrer des Paketdienstes durchgeführt.

**DHL-Messstrecken**

Zur Abbildung möglichst realer Emissionen eines DHL-Verteilfahrzeuges in Wien, wurde eine typische Innenstadt-Verteilverkehr-Route ausgesucht. Neben dieser „Auslieferungs-Strecke“ wurde auch die An- und Rückfahrt vom DHL-Verteilzentrum in Wien-Simmering in die Innenstadt (6./7./8. Bezirk) gefahren und die jeweiligen Abgasemissionen bestimmt.

Anfahrt	Start:	DHL-Verteilzentrum, Schemmerlstr.82, A-1110 Wien
	Ziel:	Mariahilferstrasse 20, A-1070 Wien
Auslieferung	Station 1:	Mariahilferstrasse 20, A-1070 Wien
	Station 2:	Stiftgasse 21, A-1070 Wien
	Station 3:	Mariahilferstrasse 42, A-1070 Wien
	Station 4:	Mariahilferstrasse 123, A-1060 Wien
	Station 5:	Apollo-Gasse 16, A-1070 Wien
	Station 6:	Kandl-Gasse 21, A-1070 Wien
	Station 7:	Wimberger-Strasse 14, A-1070 Wien
	Station 8:	Skodagasse 32, A-1080 Wien
	Station 9:	Josefstätterstrasse 10, A-1080 Wien
	Station 10:	Piaristen-Gasse 17, A-1080 Wien
Rückfahrt	Start:	Piaristen-Gasse 17, A-1080 Wien
	Ziel:	DHL-Verteilzentrum, Schemmerlstr. 82, A-1110 Wien

Abbildung 55: DHL Messstrecken, Wien

Da es sich bei der An- bzw. Rückfahrt um dieselbe Wegstrecke handelt, sind die diesbezüglichen Emissionsfaktoren als „DHL-Anfahrt“ zusammengefasst.

Damit möglichst reale Bedingungen bei den Messfahrten simuliert werden, wurde neben dem Gewicht des Fahrers, Beifahrers und der Messtechnik eine Zuladung von rund 100 kg in Form von gelben Kartons gewählt. Daraus ergab sich eine Gesamtnutzlast ohne Fahrer von 180 kg. Bei allen Messungen kam, wie bereits erwähnt, derselbe Fahrer der Fa. DHL zum Einsatz.

Bei allen Messungen wurden die Kraftstoffe von der OMV-Tankstelle in Wien-Simmering bezogen. Die Untersuchungen wurden jeweils bei betriebswarmem Motor durchgeführt.

### 6.3.4 Ergebnisse der Messfahrten

#### 6.3.4.1 Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>

Die folgende Abbildung zeigt den real-life gemessenen Ausstoß an Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub> der Versuchsfahrzeuge. Dabei sind die Ergebnisse in „DHL-Anfahrt“ und „DHL-Auslieferung“ gegliedert.

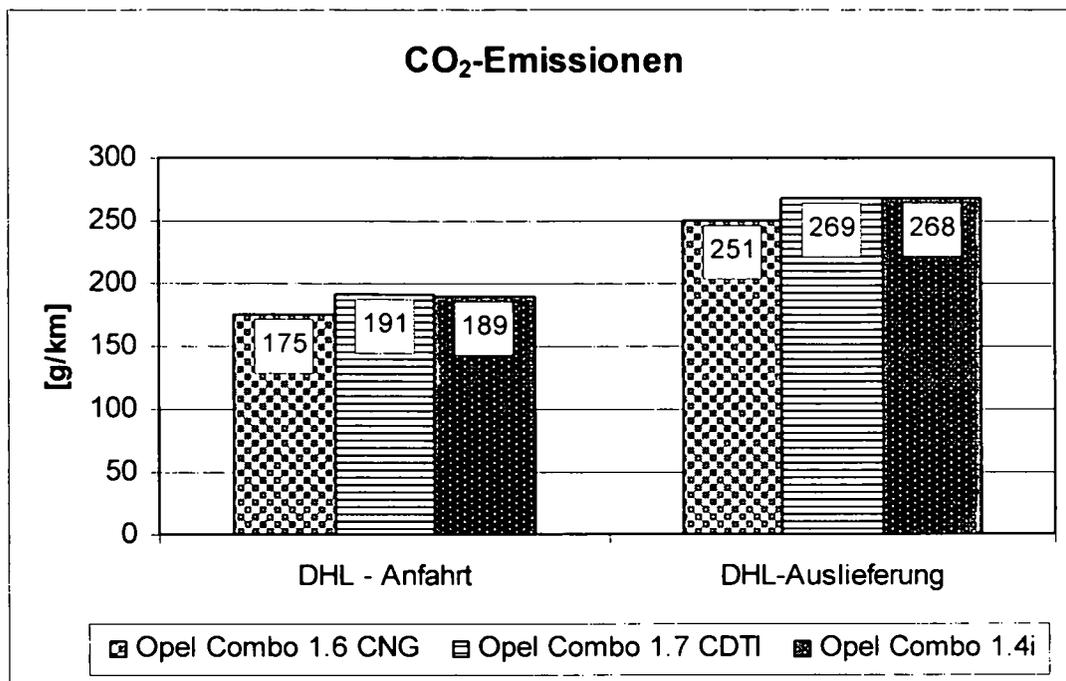


Abbildung 56: CO<sub>2</sub>-Emissionen, DHL-Messungen

Auf Grund der erschwerten Rahmenbedingungen (vermehrter „Stop and Go“-Betrieb in der Innenstadt) steigt der CO<sub>2</sub>-Ausstoß besonders deutlich während der „DHL-Auslieferungsfahrt“ an. Auf beiden Messstrecken ergibt sich ein CO<sub>2</sub>-Vorteil von rund 10 % für das Erdgas-Fahrzeug im Vergleich zum Opel Combo 1.7 CDTI.

Mit Hilfe des neu entwickelten TWINPORT-Motors und dem geringeren Fahrzeuggewicht erreicht der Opel Combo Benzin 1.4i einen ähnlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß wie das Diesel-Fahrzeug.

### 6.3.4.2 Stickstoffmonoxid NO

Die im Zuge der On-board-Messungen erfassten NO-Emissionen werden normgerecht als NO<sub>2</sub>-Äquivalent ausgewiesen.<sup>57</sup> Die folgende Abbildung veranschaulicht auszugsweise die Stickstoffmonoxid NO-Emissionen des Opel Combo 1.7 CDTI über der Zeit während einer Auslieferung-Runde. Start dieser Aufzeichnung am 12.08.2004 war die Station 3 (Mariahilferstraße 42), deren Ende war die Station 4 (Mariahilferstraße 123).

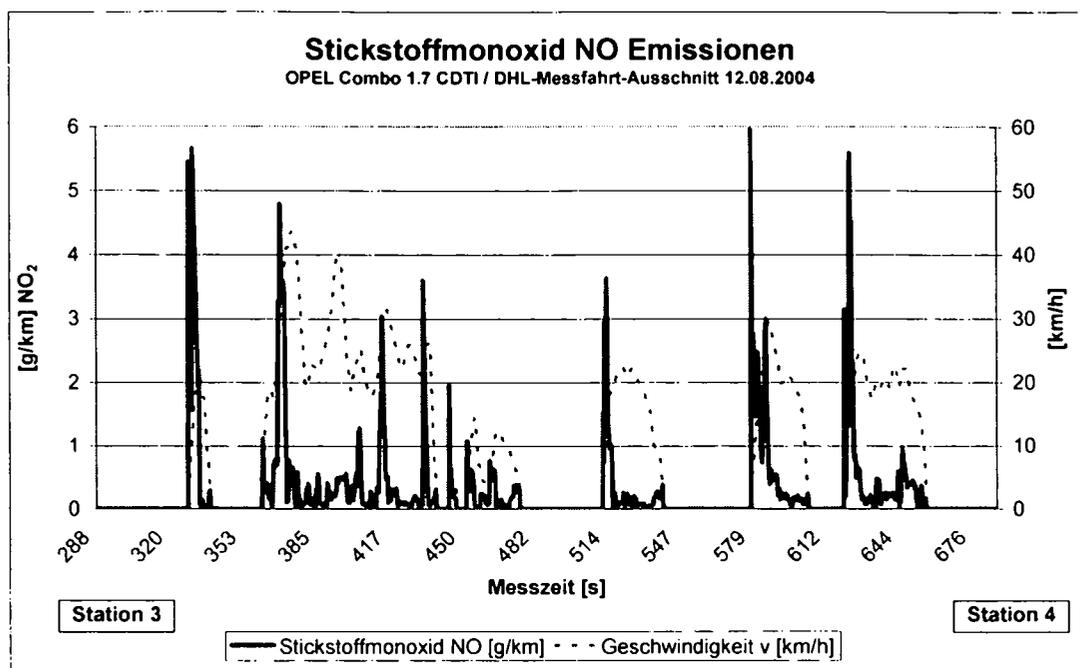


Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffmonoxidemissionen, Opel Combo 1.7 CDTI, DHL-Messfahrt

### 6.3.4.3 Kraftstoffverbrauch KSV

Der mit Hilfe der Kohlenstoff-Bilanz ermittelte Kraftstoffverbrauch ist für den Fahrzeugbetreiber besonders aus ökonomischer Sicht interessant. In den folgenden Diagrammen wird der Kraftstoffverbrauch von Erdgas in kg/100km und der Kraftstoffverbrauch von Diesel und Benzin in l/100km angegeben.

<sup>57</sup> Vgl. 91/441/EWG, L242/81.

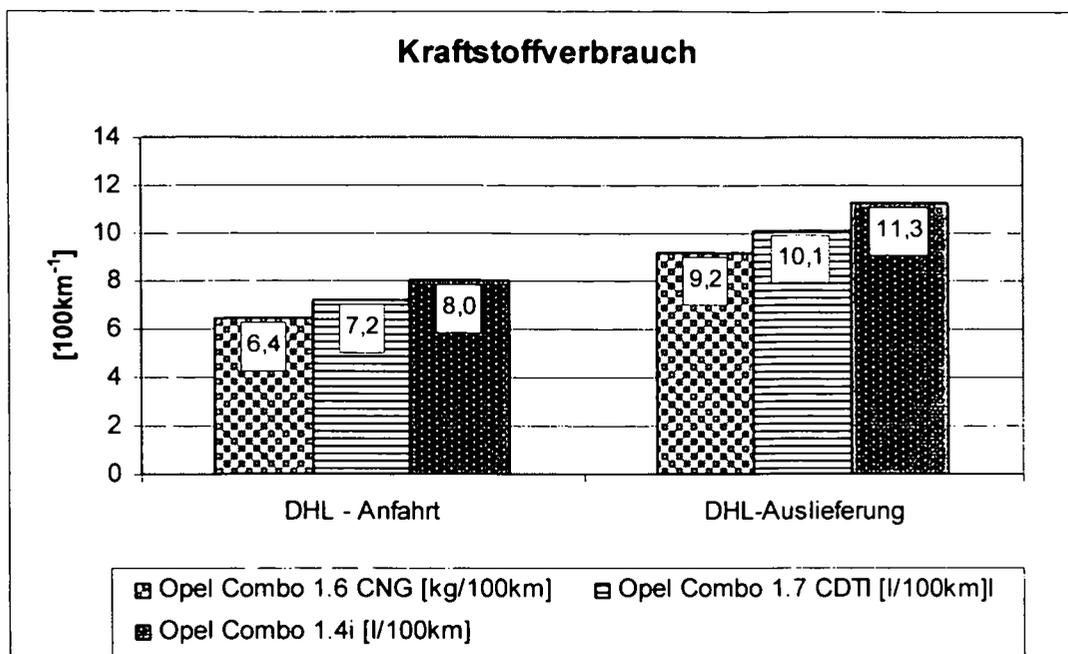


Abbildung 58: Kraftstoffverbrauch KSV bei den DHL-Messungen

### 6.3.5 Fazit der Messergebnisse

Unter realen Bedingungen kam es zu einem Einsparungspotential des Kohlenstoffdioxid  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes von rund 10 % gegenüber Diesel- und Benzinfahrzeug.

Im Betrieb stiegen die NO-Emissionen des Opel Combo 1.7 CDTI deutlich an. Hingegen war beim Erdgas- und Benzin-Fahrzeug der NO-Ausstoß auf einem äußerst niedrigen Niveau und kaum mehr nachweisbar. Parallele Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand zeigten ebenfalls, dass der Anteil der Stickstoffdioxidemissionen ( $\text{NO}_2$ ) an den Gesamt-Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x$ ) beim Dieselmotor rund 40 % beträgt.

Der relativ niedrigere Kraftstoffverbrauch des Opel Combo 1.6 CNG gegenüber dem Dieselfahrzeug ist auch aus wirtschaftlicher Hinsicht für Vielfahrer und Flottenbetreiber sehr interessant.

## 6.4 Real-Life Messkampagne - MAN A23

Das stetige Bestreben zur Verbesserung der Luftqualität in urbanen Ballungsräumen erfordert auch einen möglichst ökologischen Öffentlicher Personen Nahverkehr (ÖPNV). Im Bereich des öffentlichen Autobusverkehrs können Erdgasfahrzeuge eine sinnvolle Alternative zu den konventionell betriebenen Dieselfahrzeugen darstellen. Um das Emissionsverhalten eines modernen CNG-Niederflur-Gelenksbusses zu untersuchen, wurde im Auftrag der Wien Energie, mit Unterstützung der Wiener Linien, ein entsprechendes Fahrzeug mit der oben beschriebenen On-board-Messtechnik ausgerüstet. Auf drei ausgewählten Autobus-Linien des ÖPNV-Betreibers konnten so die Abgasemissionen des getesteten MAN A23-Busses sowie dessen Kraftstoffverbrauch in Echtzeit ermittelt und in weiterer Folge ausgewertet werden.

### 6.4.1 Messfahrzeuge

Als Messfahrzeug kam ein Niederflur-Gelenkbus A23 (NG 313) der Firma MAN mit erdgasbetriebenen und EEV-zertifiziertem Magermotor (E2876) zum Einsatz. Die wichtigsten technischen Daten des Versuchfahrzeuges können der folgenden Tabelle entnommen werden.

<b>MAN Nutzfahrzeuge AG</b>	
<b>Fahrgestell</b>	
Typ:	A23 Gelenkbus
Fgst.-Nr.:	WMAA23ZZ54B024194
Abmessungen außen [mm]:	17950 / 2500 / 3310
Leergewicht [kg]:	17600
Zul. Gesamtgewicht [kg]:	28000
Steh-/Sitzplätze:	106 / 45
<b>Motor</b>	
Bauart:	6 Zyl. Reihenmotor LUH
Hubraum [cm <sup>3</sup> ]:	12816
Nennleistung [kW / PS]:	228 / 310
Nenn Drehzahl [U/min]:	2000
Nenn Drehmoment [Nm]:	1250
Aufladung:	Abgasturbolader
Ventilanzahl:	2 pro Zyl.
Verbrennungsverfahren:	4-Takt-Otto
Gemischbildung:	zentrales Gaseinblassystem

Tabelle 19: Kenndaten MAN A23 E2876 lt. Hersteller

### 6.4.2 Messgeräteeinbau

Der Einbau der Messausrüstung erfolgte größtenteils analog zu den bereits untersuchten Personenkraftwagen bzw. leichten Nutzfahrzeugen. Als Versorgungsspannung diente in diesem Falle jedoch 24 V DC anstelle der im Pkw-Bereich üblichen 12 V DC.

Zur Erfassung der angesaugten Luftmasse wurde der serienmäßig eingebaute Heißfilmluftmassenmesser der Firma Bosch verwendet. Die Messgasentnahme erfolgte nach Katalysator im Endrohr des Abgassystems über eine Edelstahl-Leitung.

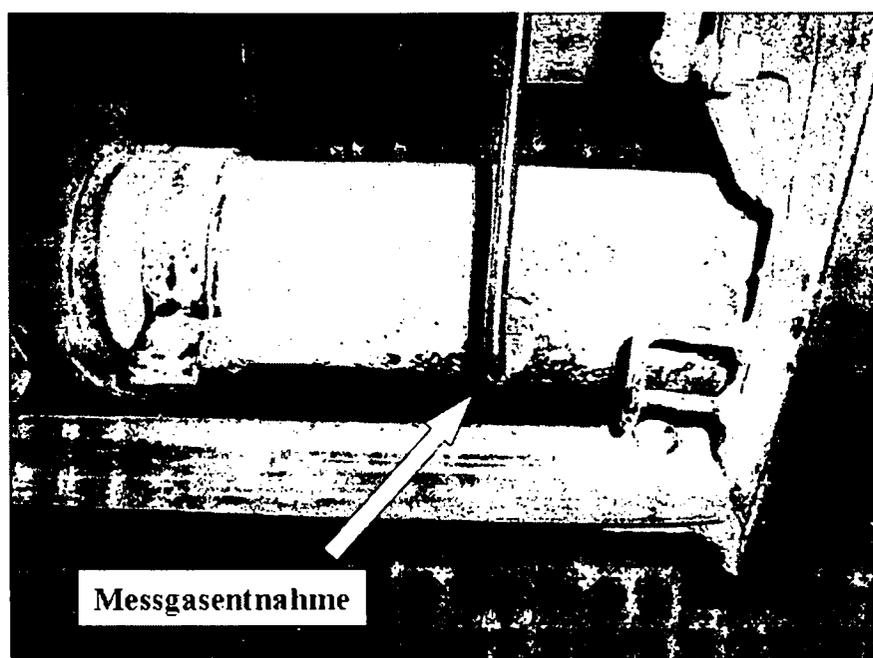


Abbildung 59: Messgasentnahme MAN NG 313

Die Geschwindigkeit des Messfahrzeuges wurde mit Hilfe des fahrzeugintegrierten v-Signales und einem nachgeschalteten Frequenz-Spannungswandler in das Messsystem eingespeist. Die Ergebnisse konnten dabei in Echtzeit am Notebook-Computer im Fahrzeug beobachtet werden. Zur Archivierung und späteren Analyse wurden die Messdaten alle 300 Millisekunden gespeichert.

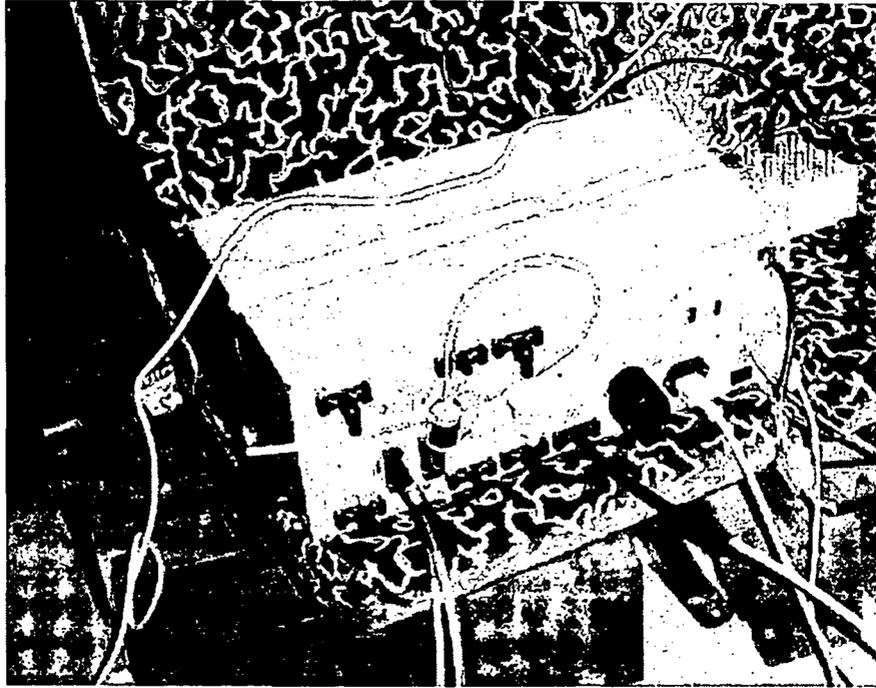


Abbildung 60: OBM System

### 6.4.3 Messdurchführung

Im Streckennetz der Wiener Linien wurden drei für Wien typische Linienführungen im simulierten Linienbetrieb an vier Tagen mit vergleichbarer Verkehrsqualität in beide Richtungen mehrmals durchfahren. Fahrgastwechsel wurden durch entsprechende Haltezeiten an den Haltestellen simuliert. Die Emissionen des Messfahrzeuges wurden jeweils mit Leergewicht und halber Zuladung (simuliert mit Gewichten) gemessen. Bei den Messfahrten kam jeweils der gleiche Fahrer zum Einsatz.

Linie	Start	Ende	Streckenlänge [km]
48A	Baumgartner Höhe	Dr. Karl Renner Ring	10,8
10A	Niederhofstrasse	Heiligenstadt	7,5
26A	Kagran	Groß Enzersdorf	11,8

Tabelle 20: Durchfahrene Linien und deren Endstellen

Die durchfahrenen Strecken können wie folgt klassifiziert werden:

- Linie 48A: bergige Linie mit zwei langen Anstiegen,  $v_{\text{mittel}} = 16 \text{ km/h}$
- Linie 10A: sehr lange Stadtlinie, hügelig,  $v_{\text{mittel}} = 16 \text{ km/h}$
- Linie 10A: ebene Linie, Randbezirk in Wien,  $v_{\text{mittel}} = 21 \text{ km/h}$

#### 6.4.4 Ergebnis der Messfahrten

##### 6.4.4.1 Kohlenstoffdioxid $\text{CO}_2$

Im folgenden Diagramm sind die ermittelten  $\text{CO}_2$ -Massenemissionen des CNG-Versuchsfahrzeuges MAN NG 313 als Mittelwert der jeweiligen Linie ausgewiesen.

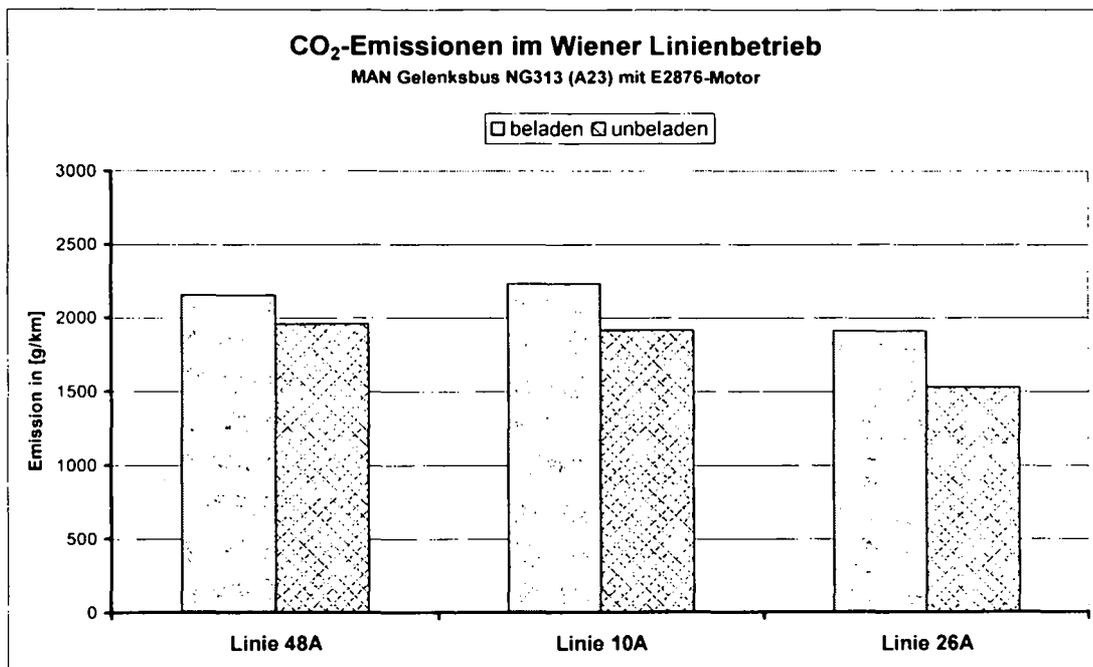


Abbildung 61:  $\text{CO}_2$  Emission aus Real-Life Messfahrten

Die zwei Messstrecken 48A und 10A, mit einer durchschnittlichen gemessenen Geschwindigkeit von rund 16 km/h, emittieren auch annähernd dieselbe Menge an Kohlenstoffdioxid pro gefahrenem Kilometer. Hingegen sinkt der Ausstoß an  $\text{CO}_2$  auf der ebenen und etwas schneller durchfahrenen Linie 26A in Wien-Kagran merklich.

#### 6.4.4.2 Stickstoffoxide $NO_x$

Dank der kontinuierlichen Weiterentwicklung und Verbesserung des On-board Messsystems war es zu dem Zeitpunkt der Linienbus-Messungen bereits möglich, Summen-Stickstoffoxide  $NO_x$  zu erfassen. Der zeitliche Verlauf der  $NO_x$ -Massenemissionen in g/km zwischen zwei Haltestellen der Linie 26A ist in der folgenden Abbildung illustriert.

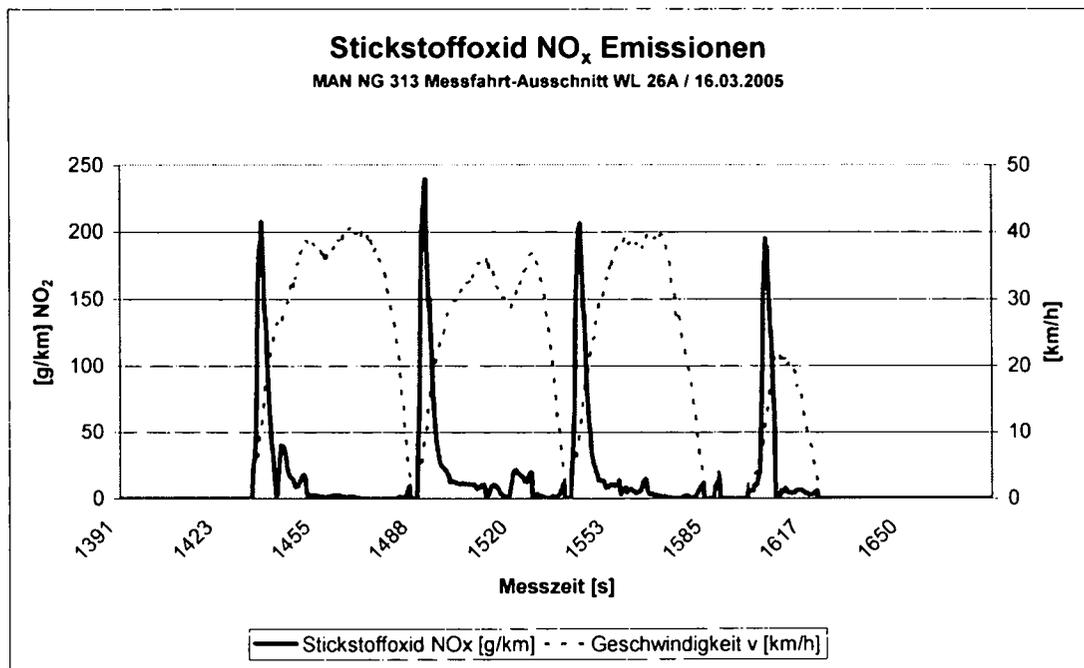


Abbildung 62:  $NO_x$  Emission aus Real-Life Messfahrten

#### 6.4.4.3 Kraftstoffverbrauch KSV

Die angeführten Verbrauchswerte wurden mit Hilfe einer Kohlenstoff-Bilanz aus den gemessenen Emissionskomponenten ermittelt. Um den Kraftstoffverbrauch und somit das Rechenmodell bei den vorliegenden Messungen zu überprüfen, wurde die gesamte Wegstrecke zwischen zwei Betankungsvorgängen mittels OBM aufgezeichnet und mit den Verbrauchswerten aus der Betankung verglichen. Die Abweichungen betragen weniger als 3 % (siehe Tabelle 14).

Auf Grund der verhältnismäßig niederen CO und HC Emissionen des Erdgas-Busses wird der Kraftstoffverbrauch fast ausschließlich durch den  $CO_2$ -Ausstoß bestimmt. Dies spiegelt sich in den Abbildungen 61 bzw. 63 wieder.

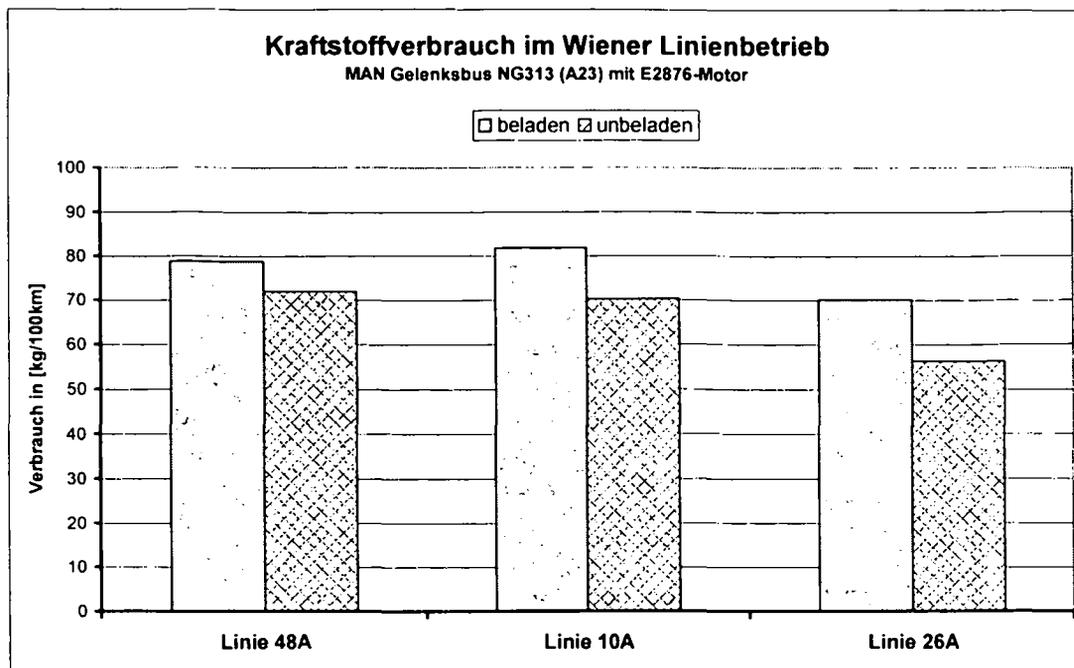


Abbildung 63: Kraftstoffverbrauch KSV aus Real-Life Messfahrten

#### 6.4.5 Fazit der Messergebnisse

Um das Emissionsverhalten des Testfahrzeuges MAN Gelenksbus Typ A23 mit Motor E2876 (NG313) im realen Linienverkehrseinsatz auf den Strecken 48A, 10A und 26A der Wiener Linien zu erhalten, wurden mit einem On-board Abgasmeßsystem Untersuchungen der streckenbezogenen Massenemissionen von CO<sub>2</sub>, CO, HC und NO<sub>x</sub> durchgeführt.

Das Fahrzeug wurde in einem simulierten Linienbetrieb leer bzw. mit halber zulässiger Zuladung untersucht. Der Kraftstoffverbrauch des Messfahrzeuges wurde über eine Kohlenstoff-Bilanz aus den Abgaskomponenten sowie zur Validierung der Messgenauigkeit über die Betankungsmenge ermittelt.

Im Linienbetrieb auf den Linien 48A und 10A mit starkem „Stop and Go“- Verkehr und einer relativ niederen Durchschnittsgeschwindigkeit von  $v_{\text{mittel}} = 16$  km/h ergaben sich Kraftstoffverbräuche von rund 80 kg/100km im beladenen und 70 kg/100km im unbeladenen Zustand. Durch die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit von  $v_{\text{mittel}} = 21$  km/h der Randbezirklinie 26A, sanken die Verbrauchswerte auf rund 55 kg/100km.

## 7 Emissionsreduktionspotentiale durch den Einsatz von CNG Fahrzeugen

Erdgasbetriebene Fahrzeuge bieten hinsichtlich der Emissionen von Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>, Stickstoffoxiden NO<sub>x</sub> sowie den Rußpartikeln PM ein großes Potential zur Reduktion an. Mit Hilfe der ermittelten Emissionsfaktoren der getesteten Fahrzeuge Opel Zafira und Opel Combo sowie einem MAN Gelenksbus wurden die möglichen Emissionsreduktionen für typische Straßenzüge im Ballungsraum Wien berechnet. Angenommen wurde eine Substitution von 10 % konventionell betriebenen Fahrzeugen durch die genannten CNG-Fahrzeuge.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei den gemessenen Emissionsfaktoren für die CNG-Fahrzeuge um spezifische EFA von Einzelfahrzeugen<sup>58</sup> handelt. Die nachfolgenden Überlegungen und Berechnungen basieren auf diesen Einzelfahrzeugen und dürfen nicht für Erdgasfahrzeuge verallgemeinert werden.

### 7.1 Methodik

Aufbauend auf den Verkehrsdaten, den gewählten Straßenkategorien sowie den bereits erstellten Emissionsberechnungen aus dem Kapitel 4.2.1 werden die Emissionen von CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> und PM bei einer gedachten, virtuellen Fahrzeugsubstitution der konventionell betriebenen Fahrzeuge von 10 % durch CNG-Fahrzeuge ermittelt. Das heißt, dass 10 % des jeweiligen Verkehrsaufkommens (Pkw, LNF, Bus) durch erdgasbetriebene Fahrzeuge mit deren spezifischen Emissionsfaktoren EFA ersetzt werden.<sup>59</sup>

Die bereits verwendeten EFA im Kapitel 4.2.1 für konventionell betriebene Fahrzeuge der jeweiligen Straßenkategorie bzw. Verkehrssituation finden sich in der Berechnung für die Diesel- und Benzinfahrzeuge wieder.

---

<sup>58</sup> On-Board gemessene Fahrzeuge: Opel Zafira, Opel Combo, MAN A23.

<sup>59</sup> Ziel laut EU 2001/99: „... 20 % der herkömmlichen Kraftstoffe bis zum Jahr 2020 durch alternative Kraftstoffe zu ersetzen.“

Zur Ermittlung des entsprechenden Emissionsfaktors für die CNG-Fahrzeuge wurden die mittels On-Board System gemessenen EFA herangezogen. Auf Grund fehlender Vergleichsdaten eines konventionell betriebenen Diesel-Gelenksbusses wurden zusätzlich Daten aus OBM-Vergleichsmessungen<sup>60</sup> in der Schweiz involviert. Von den gemessenen Real-Life Emissionsfaktoren der konventionell betriebenen Fahrzeuge wurde ein gewichteter Mittelwert gemäß des statistischen Kfz-Bestandes (Diesel zu Benzin-Anteil) mit dem Bezugsjahr 2005 gebildet. Mit Hilfe dieses gewichteten Emissionsfaktors für herkömmliche Fahrzeuge und des gemessenen Real-Life Emissionsfaktors für CNG-Fahrzeuge wird das Reduktionspotential von erdgasbetriebenen Fahrzeugen für jede herangezogene Straßenkategorie bzw. Verkehrssituation berechnet.

Der resultierende neue Rechenwert für den Emissionsfaktor  $f_{k,SKi,CNG}$  pro Fahrzeugkategorie ergibt sich aus:

$$f_{k,SKi,CNG} = f_{k,SKi,konv} * \frac{EFA_{k,SKi,CNG}}{b * EFA_{k,SKi,Benzin} + d * EFA_{k,SKi,Diesel}} \quad (7.1)$$

$f_{k,SKi,CNG}$	Emissionsfaktor für CNG-Fzg. [g/km]
$f_{k,SKi,konv}$	Emissionsfaktor für Benzin und Diesel-Fahrzeuge aus UBA 2004 [g/km]
$EFA_{k,SKi,CNG}$	Real-Life Emissionsfaktor für CNG-Fzg. [g/km]
$EFA_{k,SKi,Benzin}$	Real-Life Emissionsfaktor für Benzin-Fzg. [g/km]
$EFA_{k,SKi,Diesel}$	Real-Life Emissionsfaktor für Diesel-Fzg. [g/km]
b	Statistischer Anteil Benzinfahrzeuge am Gesamtverkehr je Fzg-Klasse [1]
d	Statistischer Anteil Dieselfahrzeuge am Gesamtverkehr je Fzg-Klasse [1]
SK	Straßenkategorie
k	Abgaskomponente

<sup>60</sup> Vgl. SVGW 2005.

Die verwendeten Verhältniszahlen (b, d) für die Verkehrszusammensetzung können der folgenden Tabelle entnommen werden.

<b>Statistische Verkehrszusammensetzung 2005</b>			
<b>Fzg-Kategorie</b>	<b>Diesel</b>		<b>Benzin</b>
Pkw		72%	28%
LNF		95%	5%
Bus		100%	0%

**Tabelle 21: Statistische Verkehrszusammensetzung je Fahrzeug-Klasse<sup>61</sup>**

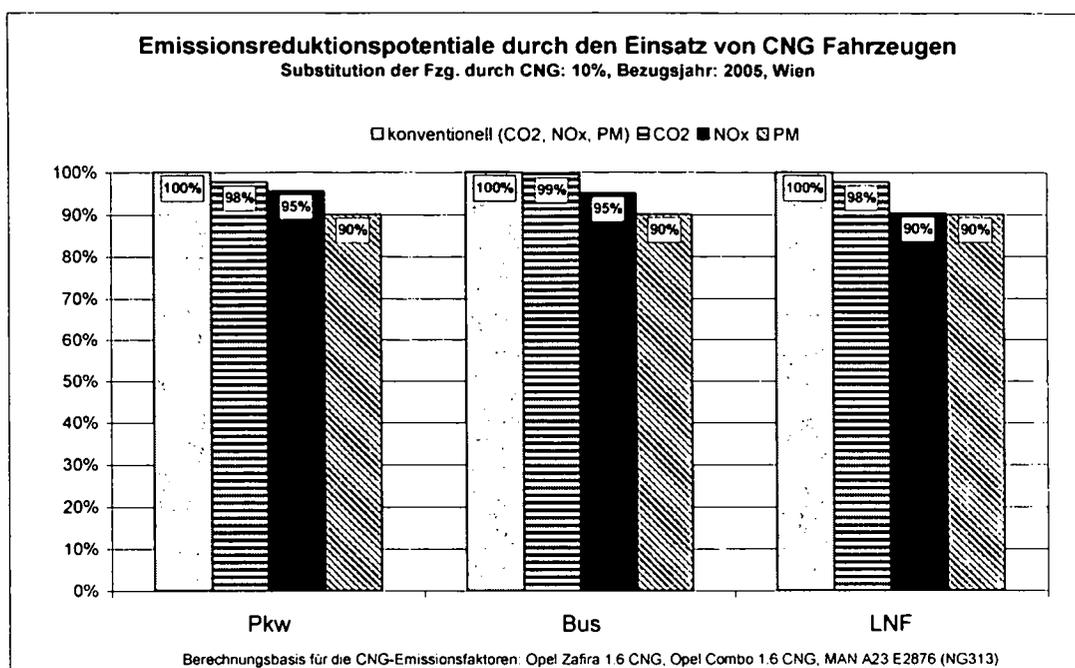
Die Berechnung der Gesamt-Massenemissionen je Fahrzeug-Klasse erfolgt mit Hilfe des in (7.1) ermittelten Emissionsfaktors  $f_{k,SKI,CNG}$  analog dem Kapitel 4.2.1.

## 7.2 Berechnungsergebnisse

Um das Abgas-Reduktionsvermögen von den im Kapitel 6 untersuchten, erdgasbetriebenen Fahrzeugen im Stadtverkehr darzustellen, werden die Emissionen, die eine 10 % CNG-Fahrzeug-Substitution enthalten, auf den bisherigen berechneten Emissionswert für Diesel- und Benzinfahrzeuge relativiert. Der mit konventionellen Emissionsfaktoren berechnete Abgas-Gesamtausstoß wird als Referenzbasis 100 % herangezogen.

---

<sup>61</sup> Datenquelle: UBA 2004.



**Abbildung 64: Berechnete Emissionsreduktion durch Erdgas als Treibstoff in Wien**

Wie aus der Emissionsberechnung hervorgeht, wirkt sich eine Substitution der bisherigen konventionell betriebenen Fahrzeuge durch die getesteten CNG-Fahrzeuge mit fünf bis zehn Prozent bei den Abgaskomponenten Stickstoffoxide NO<sub>x</sub> und den Partikeln PM aus.

Eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes in betrachteten Straßenzügen Wiens in Höhe von ein bis knapp drei Prozent kann ebenfalls erwartet werden. Fahrzeug spezifisch konnten jedoch im Einzelfall<sup>62</sup> zum Teil erhebliche Potentiale aufgezeigt werden konnten.

<sup>62</sup> Am Beispiel Opel Zafira 1.6 CNG vs. Opel Zafira 2.0 DTI: CO<sub>2</sub>-Reduktion bis zu 20 %.

## 8 Diskussion der Ergebnisse

Trotz kontinuierlicher Absenkung der Abgas-Emissionsgrenzwerte für Kraftfahrzeuge in der Europäischen Union, kam es in Österreichs Städten in der Vergangenheit bei verkehrsnahen Luftgütemessstellen vermehrt zu Immissions-Grenzwertüberschreitungen bei den Stickstoffoxiden  $\text{NO}_x$  und den Partikeln PM.

Die Untersuchungen im Zuge dieser Arbeit haben gezeigt, dass sich die Stickstoffdioxide  $\text{NO}_x$  bei verkehrsnahen Messstellen sowohl in der Bundeshauptstadt Wien, als auch in Salzburg Stadt und der Kleinstadt Feldkirch/Vbg. als echtes Problem zur Einhaltung der Luftgüterichtlinien nach dem Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) erwiesen haben. In allen drei Städten ist der Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$ -Messwert bei den erhobenen Messpunkten rund doppelt so hoch wie der angestrebte EU-Grenzwert von  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ebenso wird der zulässige Feinstaub  $\text{PM}_{10}$ -Tagesgrenzwert (TMW) von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in allen drei Städten an markanten Messpunkten regelmäßig überschritten. Laut österreichischem Gesetz darf es zu Überschreitungen dieser Marke ab 2005 in 30 Tagen pro Jahr kommen.

Mit Hilfe eines Rechenmodells basierend auf den in der Fachliteratur angeführten Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeuge war es möglich verschiedenen Fahrzeugkategorien bzw. -klassen den jeweiligen Emissionsanteil zuzuweisen. Anhand dieser ersten Berechnungen konnten die problematischen Verkehrsträger im städtischen Straßenverkehr in Wien identifiziert werden.

Das dabei verwendete Basisrechenmodell wurde in einer aufwändigen Validierung im Zuge von Immissionsmessungen und Emissionsberechnungen hinsichtlich Genauigkeit und Reproduzierbarkeit überprüft. Um die berechneten mit den gemessenen Schadstoffwerten vergleichen zu können, war es notwendig Relativwerte ( $C_{k,rel}$  und  $M_{k,rel}$ ) zu schaffen, da eine direkte Gegenüberstellung der absoluten Schadstoffwerte Einheiten bedingt wenig Sinn gehabt hätte. Mögliche Einschränkungen, wie meteorologische Einflüsse oder eine Veränderung der Hintergrundkonzentration (z.B. durch Kraftwerke), könnten durch Ausdehnung des Beobachtungszeitraumes verringert werden und so die Qualität der Validierung erhöhen.

Im Zuge dieser Dissertation wurden mit einem in Eigenentwicklung hergestelltem On-board Messsystem im Ballungsraum Wien Real-Life Emissions-Messkampagnen durchgeführt. Dieses sehr kompakte On-board Messsystem, kurz OBM, gestattete es, unterschiedlichste Fahrzeugkategorien (Automobil, Lastkraftwagen, Omnibus) hinsichtlich der gesetzlich reglementierten Abgaskomponenten Kohlenwasserstoffe HC, Kohlenmonoxid CO, Stickstoffoxide NO<sub>x</sub> sowie dem Treibhausgas Kohlendioxid CO<sub>2</sub> zu untersuchen.

Das Gesamtsystem bestand aus einem eigens entwickelten Gasanalysator (Hardware) und einem Verbrennungsrechenmodell (Software), das in Echtzeit auf einem Notebook während den Messungen abgearbeitet wurde. Am Ende einer Messfahrt wurden die Ergebnisse als Massenemissionen in g/km analog wie bei einer Constant Volume Sampling CVS-Anlage ausgegeben. Durch wiederholende Validierungen des OBM-Gesamtsystems, unter anderem auf dem Rollenprüfstand, konnte das System qualitativ laufend verbessert werden.

Neben den konventionellen Antriebsarten (Benzin- und Dieselfahrzeuge) wurden auch so genannte Alternativantriebe, insbesondere Erdgasfahrzeuge (CNG), im realen Straßenverkehr in Wien gemessen.

Die erfolgten Messungen konnten wie folgt untergliedert werden:

- Personenkraftwagen – Opel Zafira
- Leichtes Nutzfahrzeug – Opel Combo
- Niederflur-Gelenksbus – MAN A23

***Real-Life Messergebnisse Opel Zafira***

Auf Grund des geringeren Kohlenstoffanteiles im Kraftstoff Erdgas gegenüber dem Diesel kam es beim Opel Zafira 1.6 CNG Testfahrzeug zu einem erfreulichen Einsparungspotential der Emissionen von Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub> von rund 20 % bei durchgängiger moderater Fahrweise.

Die Kohlenstoffmonoxid- bzw. Kohlenwasserstoff-Emissionen bewegten sich beim Opel Zafira CNG bzw. DTI auf konstant niedrigem Niveau.

Durch den sehr geringen Ausstoß an Kohlenstoffmonoxid CO im Opel Zafira CNG kam es zu keiner vollständigen Reduktion des Stickstoffmonoxid NO zu Stickstoff N<sub>2</sub> im Katalysator des Erdgas-Fahrzeuges. Das Emissionsminderungspotential von NO war jedoch gegenüber dem Diesel-Fahrzeug besonders bei niederen Geschwindigkeiten sehr hoch. Im Durchschnitt über Wien bewegte es sich bei ca. 60 %.

Der bei den On-board Messungen ermittelte Kraftstoffverbrauch des Opel Zafira 1.6 CNG von nur 5,8 kg/100km ist besonders für Vielfahrer und Flottenbetreiber sehr interessant.

***Real-Life Messergebnisse Opel Combo***

Unter realen Bedingungen kam es zu einem Einsparungspotential des Kohlenstoffdioxid CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von rund 10 % gegenüber Diesel- und Benzinfahrzeug.

Im Betrieb stiegen die NO-Emissionen des Opel Combo 1.7 CDTI deutlich an. Hingegen war beim Erdgas- und Benzin-Fahrzeug der NO-Ausstoß auf einem äußerst niedrigen Niveau und kaum mehr nachweisbar. Parallele Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand zeigten ebenfalls, dass der Anteil der Stickstoffdioxidemissionen (NO<sub>2</sub>) an den Gesamt-Stickstoffoxiden (NO<sub>x</sub>) beim Dieselmotor rund 40 % beträgt.

Der relativ niedrigere Kraftstoffverbrauch des Opel Combo 1.6 CNG gegenüber dem Dieselfahrzeug ist auch aus wirtschaftlicher Hinsicht für Vielfahrer und Flottenbetreiber sehr interessant.

***Real-Life Messergebnisse MAN A23***

Das Testfahrzeug MAN Gelenksbus Typ A23 mit Motor E2876 (NG313) wurde in einem simulierten Linienbetrieb leer bzw. mit halber zulässiger Zuladung untersucht. Der Kraftstoffverbrauch des Messfahrzeuges wurde über eine Kohlenstoff-Bilanz aus den Abgaskomponenten sowie zur Validierung der Messgenauigkeit über die Betankungsmenge ermittelt.

Im Linienbetrieb auf den Linien 48A und 10A mit starkem „Stop and Go“- Verkehr und einer relativ niederen Durchschnittsgeschwindigkeit von  $v_{\text{mittel}} = 16$  km/h ergaben sich Kraftstoffverbräuche von rund 80 kg/100km im beladenen und 70 kg/100km im unbeladenen Zustand. Durch die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit von  $v_{\text{mittel}} = 21$  km/h der Randbezirklinie 26A, sanken die Verbrauchswerte auf rund 55 kg/100km.

Mit Hilfe der ermittelten Emissionsfaktoren der getesteten Fahrzeuge Opel Zafira und Opel Combo sowie einem MAN Gelenksbus wurden die möglichen Emissionsreduktionen für typische Straßenzüge im Ballungsraum Wien berechnet. Angenommen wurde eine Substitution von 10 % konventionell betriebenen Fahrzeugen durch die genannten CNG-Fahrzeuge.

Wie aus der Emissionsberechnung hervorgeht, wirkt sich eine Substitution der bisherigen konventionell betriebenen Fahrzeuge durch die getesteten CNG-Fahrzeuge mit fünf bis zehn Prozent bei den Abgaskomponenten Stickstoffoxide  $\text{NO}_x$  und den Partikeln PM aus. Eine Reduktion des  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes in betrachteten Straßenzügen Wiens in Höhe von ein bis knapp drei Prozent kann ebenfalls erwartet werden.

Erdgasbetriebene Fahrzeuge mit moderner Motor- und Abgasreinigungstechnologie sind damit aus heutiger Sicht ein effektives Hilfsmittel, um mittelfristig die Luftqualität in Ballungszentren nachhaltig zu verbessern.

## LITERATURVERZEICHNIS

### **91/441/EWG - L242**

Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L242, RICHTLINIE DES RATES vom 26. Juni 1991 zur Änderung der Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen (91/441/EWG)

### **98/69/EG – L350**

Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L350, RICHTLINIE 98/69/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Oktober 1998 über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen und zu Änderung der Richtlinie 70/220/EWG des Rates

### **1999/96/EG – L44**

Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L44, RICHTLINIE 1999/96/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Dezember 1999 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Emission gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel aus Selbstzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und die Emission gasförmiger Schadstoffe aus mit Erdgas oder Flüssiggas betriebenen Fremdzündungsmotoren zum Antrieb von Fahrzeugen und zur Änderung der Richtlinie 88/77/EWG des Rates

### **ANWANDER/BÖSCH 2003**

B. Anwander/R. Bösch: Statuserhebung gemäß Immissionsschutzgesetz-Luft, Amt der Vorarlberger Landesregierung, Abteilung IVe – Umweltschutz, Bregenz, 2003

### **ANWANDER/BÖSCH 2004**

B. Anwander/R. Bösch: Statuserhebung gemäß Immissionsschutzgesetz-Luft, Grenzwertüberschreitungen bei Stickstoffdioxid im Jahr 2003 und bei Feinstaub PM10 in den Jahren 2002 und 2003 im Stadtgebiet von Feldkirch, Amt der Vorarlberger Landesregierung, Hausdruckerei, Bregenz, 2004

**AUGUSTYN 2001**

R. Augustyn, u.a.: Stuserhebung Hietzinger Kai 2000 Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Magistrat der Stadt Wien MA 22 Umweltschutz, Wien, 2001

**AUGUSTYN 2003**

R. Augustyn, u.a.: Jahresbericht 2001, Luftgütemessungen der Umweltschutzabteilung der Stadt Wien, Magistrat der Stadt Wien MA 22 Umweltschutz, Wien, 2004

**AUGUSTYN/RIESS 2003**

R. Augustyn/P. Riess: Jahresbericht 2002, Luftgütemessungen der Umweltschutzabteilung der Stadt Wien, Magistrat der Stadt Wien MA 22 Umweltschutz, Wien, 2004

**AUGUSTYN 2004a**

R. Augustyn, u.a.: Jahresbericht 2003, Luftgütemessungen der Umweltschutzabteilung der Stadt Wien, Magistrat der Stadt Wien MA 22 Umweltschutz, Wien, 2004

**AUGUSTYN 2004b**

R. Augustyn, u.a.: Luftgütemessungen der Umweltschutzabteilung der Stadt Wien, Monatsberichte 2004, Magistrat der Stadt Wien MA 22 Umweltschutz, Wien, 2004

**AUGUSTYN 2005a**

R. Augustyn, u.a.: Stuserhebung PM10 2002 & 2003 in Wien, Magistrat der Stadt Wien MA 22 Umweltschutz, Wien, 2005

**AUGUSTYN 2005b**

R. Augustyn, u.a.: Jahresbericht 2004 Luftgütemessungen der Umweltschutzabteilung der Stadt Wien, Magistrat der Stadt Wien MA 22 Umweltschutz, Wien, 2005

**BENTER/LÖRZER 2003**

T. Benter/J. Lörzer: Messungen ausgewählter Abgaskomponenten in einem Verkehrstunnel zur Bestimmung von Emissionsfaktoren, Bergische Universität, Fachbereich 9, Physikalische Chemie, Wuppertal, 2003

**BESCH/BOBLETER 2003**

M. Besch/H. Bobleter: Verkehrsmodell Feldkirch - Oberes Rheintal, Amt d. Vlbg Landesregierung, Abt. VIIb Straßenbau, Feldkirch 2003

**EU 2001**

Amt für amtliche Veröffentlichungen der Europäischen Gemeinschaften: Weißbuch - Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellungen für die Zukunft, ISBN 92-894-0339-X, Europäische Gemeinschaften, Luxemburg, 2001

**HIESS/ROSINAK/SNIZEK 2003**

H. Hiess/W. Rosinak/S. Snizek: Masterplan Verkehr 2003, Entwurf, Magistrat der Stadt Wien, Wien, 2003

**KELLER/HAAN 2004**

M. Keller/P. de Haan: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1, INFRAS Bern, Bern/Heidelberg/Graz/Essen, 2004

**KRANABETTER 2003**

A. Kranabetter: Luftgütebericht Jahresbericht 2002, Land Salzburg, vertreten durch Abteilung 16, Umweltschutz Referat 16/02, Immissionsschutz, Salzburg, 2003

**KRANABETTER/FALKENSTEINER 2004**

A. Kranabetter/A. Falkensteiner: Luftgütebericht Jahresbericht 2003, Land Salzburg, vertreten durch Abteilung 16, Umweltschutz Referat 16/02, Immissionsschutz, Salzburg, 2004

**KRANABETTER/FALKENSTEINER 2005**

A. Kranabetter/A. Falkensteiner: Luftgütebericht Jahresbericht 2004, Land Salzburg, vertreten durch Abteilung 16, Umweltschutz Referat 16/02, Immissionsschutz, Salzburg, 2005

**LENAERS/POPPEL 2003**

G. Lenaers/M. van Poppel: Mobile emission measurements for assessing low emitting vehicles exemplified on a CRT equipped bus, Vito – Flemish Institute for Technological Research, Vehicle Technology, Mol, Belgien, 2003

**PRESSLER 1999**

M. Preßler: Aufbau einer On-Board Abgasmessanlage für Personenkraftwagen. Diplomarbeit, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien, 1999

**PUCHER/BRUNER 2001**

E. Pucher/G. Bruner: Vergleich der Abgas-Massenemissionen von Stadtbussen mit Flüssiggas- und Dieselmotor im realen Verkehr. Vortrag, Düsseldorf, 2001

**PUCHER/MÜLLER 2005**

E. Pucher, J. Müller: Real-life Emission Measurement of Light Duty Trucks with CNG, Diesel and Gasoline Engines. SAE Paper number 2005-01-3445

**PUCHER/PUXBAUM/SCHMID 1997**

E. Pucher/H. Puxbaum/H. Schmid: Tauerntunnel Air Quality Measurement 1997 – Verification of the modelling by measured results, Vienna University of Technology, Vienna, 1997

**PUCHER/TAUSCHER 2002**

E. Pucher/M. Tauscher: On-board Measurement of Real-Life CO<sub>2</sub>, CO, HC and NO Mass-emissions. Paper Code: F02E134, FISITA 2002 World Automotive Congress Helsinki, 2002

**SCHÜRMAN/STAAB 1987**

D. Schürmann/J. Staab: Messung von Automobilabgasen bei Straßenfahrten, Artikel in der Motortechnischen Zeitschrift MTZ, Ausgabe 48 (1987) 1, 1987

**SVGW 2005**

Schweizer Verein des Gas- und Wasserfaches: Busvergleichsstudie zwischen einem Niederflur MAN 313 Diesel- und Erdgasbus, Bericht, Schwerzenbach, 2005

**TOTH 2005**

D. Toth: In-car Abgasmessung für Automobile, Diplomarbeit, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Technische Universität Wien, 1999

**UBA 1999**

Umweltbundesamt Berlin: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs VI.1A, INFRAS Bern, Bern/Zürich/Heidelberg, 1999

**UBA 1995**

Umweltbundesamt Berlin: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs VI.1, INFRAS Bern, Bern/Zürich/Heidelberg, 1995

**UBA 2003**

Umweltbundesamt Berlin: Future Diesel - Abgasgesetzgebung Pkw, leichte Nfz und Lkw-Fortschreibung der Grenzwerte bei Dieselfahrzeugen, Berlin, 2003

**UBA 2004**

Umweltbundesamt Berlin: Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs V2.1, INFRAS Bern, Bern/Zürich/Heidelberg, 2004

**ZÜGER/BURCH/RIEDWYL 1992**

P. Züger/D. Burch/P. Riedwyl: Mobile Abgasmessanlagen – Korrelationsbericht, Touring Club der Schweiz TCS, 1992

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1: Anteil des Straßengüterverkehrs am Gesamtgüterverkehr .....	1
Abbildung 2: Entwicklung des Ziel-/Quell- und Durchgangsverkehrs im Güterverkehr in Mio. Tonnen pro Jahr in der Knotenregion Wien .....	2
Abbildung 3: Wohnbevölkerungsentwicklung in Österreich .....	8
Abbildung 4: Wiener Luftmessnetz Stand 2005.....	9
Abbildung 5: Immissions-Messstelle Hietzinger Kai.....	10
Abbildung 6: Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub> -Immissionen in Wien .....	11
Abbildung 7: Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub> -Immissionen am Hietzinger Kai/Wien.....	12
Abbildung 8: Korrelation zw. dem PM10-JMW (Grenzwert 40 µg/m <sup>3</sup> ) und der Anzahl der Tage mit Werten über 50 µg/m <sup>3</sup> , Zeitraum 2000 bis 2003 .....	13
Abbildung 9: Zeitverlauf Feinstaub PM10-Immissionen in Wien .....	14
Abbildung 10: PM10-Grenzwertüberschreitungen in Wien.....	15
Abbildung 11: Luftgütemessstation Salzburg Rudolfsplatz.....	16
Abbildung 12: Stickstoffdioxid NO <sub>2</sub> -Immissionen am Rudolfsplatz/Stadt Salzburg .....	17
Abbildung 13: PM10-Grenzwertüberschreitungen in Salzburg Stadt.....	18
Abbildung 14: Luftgütemessstation Feldkirch-Bärenkreuzung .....	19
Abbildung 15: Entwicklung der NO <sub>x</sub> -Konzentrationen (NO und NO <sub>2</sub> ) in Feldkirch .....	20
Abbildung 16: PM10-Grenzwertüberschreitungen in Vorarlberg / Feldkirch .....	22
Abbildung 17: Luftqualität an ausgesuchten Messstationen in Österreich .....	23
Abbildung 18: MVEG-Typprüfzyklus für Pkw .....	25
Abbildung 19: Querschnitt der Tauerntunnelröhre mit Belüftungsschächten.....	29
Abbildung 20: Vergleich CO <sub>2</sub> -Konzentrationen Berechnung vs. Messung.....	30
Abbildung 21: Vergleich NO <sub>x</sub> -Konzentrationen Berechnung vs. Messung.....	31
Abbildung 22: Vergleich PM-Konzentrationen Berechnung vs. Messung .....	32
Abbildung 23: Aufbau eines Abgas-Rollenprüfstands.....	37
Abbildung 24: Vergleich Stickstoffoxid-Emissionen (NO <sub>x</sub> ) im MVEG-Test (kalt/warm). 38	
Abbildung 25: Vergleich Partikel-Emissionen (PM) im MVEG-Test (kalt/warm) .....	39
Abbildung 26: MAN LPG-Bus am Rollenprüfstand.....	40
Abbildung 27: Prinzipschema einer VOEMLow der Firma VITO, Belgien.....	42
Abbildung 28: VOEMLow-Messschrank der Firma VITO, Belgien .....	43
Abbildung 29: Aufbau-Schema der Mobile Abgas-Messanlage „MAMA“ .....	45
Abbildung 30: Korrelation zwischen der MAMA und einer CVS-Anlage .....	46

Abbildung 31: Verkehrsemissionen in Wien .....	50
Abbildung 32: Nach Kategorien unterteilte Verkehrsverteilungen an der Bärenkreuzung und anteilige NO <sub>x</sub> -Emissionen' .....	51
Abbildung 33: Immissionsmessstelle der Magistratsabteilung für Umweltschutz in Wien – MA22, Hietzinger Kai .....	53
Abbildung 34: Verkehrszählung Hietzinger Kai in % .....	55
Abbildung 35: Emissionsfaktor-Zusammensetzung am Beispiel NO <sub>x</sub> .....	56
Abbildung 36: Berechnete Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub> -Emissionen, HMW .....	58
Abbildung 37: Berechnete Kohlenstoffmonoxid CO-Emissionen, HMW .....	59
Abbildung 38: Berechnete Stickstoffoxid NO <sub>x</sub> -Emissionen, HMW .....	59
Abbildung 39: Berechnete Partikel Emissionen, HMW .....	60
Abbildung 40: CO/CO <sub>2</sub> -Verhältnis, Hietzinger Kai, 23./24. Mai 2003 .....	63
Abbildung 41: NO <sub>x</sub> /CO <sub>2</sub> -Verhältnis, Hietzinger Kai, 23./24. Mai 2003.....	64
Abbildung 42: BC/CO <sub>2</sub> -Verhältnis, Hietzinger Kai, 23./24. Mai 2003 .....	65
Abbildung 43: Prinzipskizze des On-board Messsystems.....	67
Abbildung 44: OBM-Gasanalyator .....	68
Abbildung 45: OBM-Software-Bausteine .....	70
Abbildung 46: OBM-Software Oberfläche .....	73
Abbildung 47: Durchschnittliche Abweichungen des Gasanalyators in % .....	74
Abbildung 48: Messfahrzeuge Opel Zafira Erdgas/Diesel.....	76
Abbildung 49: Wetterdaten .....	80
Abbildung 50: CO <sub>2</sub> -Emissionen in Kategorien .....	81
Abbildung 51: NO-Emissionen über der mittleren Geschwindigkeit .....	82
Abbildung 52: Kraftstoffverbrauch KSV in Kategorien .....	83
Abbildung 53: Messfahrzeug Opel Combo 1.6 CNG .....	84
Abbildung 54: On-board Abgasmassenmessgerät im Opel Combo 1.4i neben Ladegut ....	86
Abbildung 55: DHL Messstrecken, Wien .....	87
Abbildung 56: CO <sub>2</sub> -Emissionen, DHL-Messungen .....	88
Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf der Stickstoffmonoxidemissionen, Opel Combo 1.7 CDTI, DHL-Messfahrt .....	89
Abbildung 58: Kraftstoffverbrauch KSV bei den DHL-Messungen.....	90
Abbildung 59: Messgasentnahme MAN NG 313 .....	92
Abbildung 60: OBM System .....	93
Abbildung 61: CO <sub>2</sub> Emission aus Real-Life Messfahrten.....	94

---

Abbildung 62: NO <sub>x</sub> Emission aus Real-Life Messfahrten .....	95
Abbildung 63: Kraftstoffverbrauch KSV aus Real-Life Messfahrten.....	96
Abbildung 64: Berechnete Emissionsreduktion durch Erdgas als Treibstoff in Wien.....	100

**TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1: Ausgesuchte Städte in Österreich.....	9
Tabelle 2: Messnetz-Beschreibung Stadt Salzburg .....	15
Tabelle 3: Verkehrsaufkommen 2005 an der Bärenkreuzung/Feldkirch.....	19
Tabelle 4: EU-Abgasnorm für Fahrzeuge mit Fremdzündungsmotor.....	26
Tabelle 5: EU-Abgasnorm für Fahrzeuge mit Selbstzündungsmotor .....	26
Tabelle 6: EU-Abgasnormen für Schwere Nutzfahrzeuge mit Dieselmotor.....	27
Tabelle 7: EU-Abgasnormen für Schwere Nutzfahrzeuge mit Erdgasmotor .....	27
Tabelle 8: NO <sub>x</sub> -Emissionsfaktoren aus verschiedenen Tunnel-Messungen im Vergleich..	35
Tabelle 9: Verkehrsaufkommen in Wien im Jahre 2000.....	48
Tabelle 10: Durchschnittlich gemessene Immissionsmittelwerte .....	54
Tabelle 11: Verkehrszählung Hietzinger Kai in Stk.....	54
Tabelle 12: Verwendete Emissionsfaktoren .....	57
Tabelle 13: Nächtliche Hintergrundbelastung Hietzinger Kai .....	62
Tabelle 14: OBM Validierung mittels Verbrauchkontrolle.....	75
Tabelle 15: Technische Daten der Versuchsfahrzeuge lt. Hersteller.....	77
Tabelle 16: Gas-Analysator im Kofferraum des Opel Zafira.....	78
Tabelle 17: Kategorisierte Messstrecken in der Stadt Wien.....	79
Tabelle 18: Technische Daten der Versuchsfahrzeuge lt. Hersteller.....	85
Tabelle 19: Kenndaten MAN A23 E2876 lt. Hersteller .....	91
Tabelle 20: Durchfahrene Linien und deren Endstellen.....	93
Tabelle 21: Statistische Verkehrszusammensetzung je Fahrzeug-Klasse .....	99

**LEBENS LAUF****Persönliche Daten**

Jan Müller

Geb. 09.02.1976 in A-6800 Feldkirch

**Wohnadresse**

A-6800 Feldkirch, Drevesstraße 1

**Präsenzdienst**

01.01.1996 – 31.08.1996

**Ausbildungsdaten**

1982 – 1984

Volksschule Fellengatter

1984 – 1986

Volksschule Feldkirch

1986 – 1990

Mathematisches Realgymnasium Feldkirch

1990 – 1995

HTL-Maschinenbau-Automatisierungstechnik

Bregenz

Mai 1995

Matura an der HTL Bregenz

1996 – 2003

Studium an der TU Wien

Wirtschaftsingenieurwesen für Maschinenbau

Vertiefung: Verbrennungskraftmaschinen

Projektmanagement

Betriebstechnik

Feb. 2000

Prüfung zum EU-Gefahrgutbeauftragter (ADR,  
RID) am WIFI Wien

April 2003

Diplomprüfung zum Dipl.-Ing. an der TU Wien

Okt. 2003 –

Studium an der TU Wien

Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften

**Publikationen**

E. Pucher, J. Müller:

„Real-life Emission Measurement of Light Duty Trucks with CNG, Diesel and Gasoline Engines“; Referiertes SAE Paper number 2005-01-3445.

E. Pucher, J. Müller:

„Sauberer Güterverkehr in Wien“; ÖAMTC Akademie Schriftenreihe, Wien, 2005, 3-900235-83-X; 22 S.

*Forschungsberichte:*

E. Pucher, J. Müller et al.:

„Umweltfreundliche urbane Bus- und Güterverkehrssysteme - Saubere Kraftstoffe und Zero Emission in Kerngebieten – Endbericht“; für: FFF, BM VIT; 2004

E. Pucher, J. Girard, J. Müller:

„Summary of Austrian National Cleaner-Drive Website and Recommendations“; für EU Project Cleaner-Drive; 2004

E. Pucher, J. Müller:

„Messung der streckenbezogenen Real-life Abgasmassenemissionen von Linienbussen“; Wien 2005.