



Niedersächsisches  
Landesamt für  
Ökologie



8. Materialienband für Maßnahmepläne  
nach der EU-Richtlinie zur Luftqualität

**Erstellung eines auf  
Naturmessungen basierenden  
Validierungsdatensatzes zur  
Ausbreitung von Schadstoffen in  
Straßenschluchten**

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

in Zusammenarbeit:  
Ingenieurbüro Dr.-Ing. Achim Lohmeyer, Karlsruhe  
Dr. W. Bächlin  
A. Rühling  
H. Frantz

Ingenieurbüro Theurer, Speyer  
Dr. W. Theurer

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

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

Bezug:  
Niedersächsisches Landesamt für Ökologie  
An der Scharlake 39  
31135 Hildesheim

e-mail: [heinrich.klaholt@nloe.niedersachsen.de](mailto:heinrich.klaholt@nloe.niedersachsen.de)  
[\\_\\_\\_\\_\\_ wolfgang.mueller@nloe.niedersachsen.de](mailto:wolfgang.mueller@nloe.niedersachsen.de)  
[\\_\\_\\_\\_\\_ wolfgang.baechlin@lohmeyer.de](mailto:wolfgang.baechlin@lohmeyer.de)

# INHALTSVERZEICHNIS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ANMERKUNG</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>1 ÜBERSICHT</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>2 PROJEKTKONZEPT UND REALISIERUNG</b> .....                    | <b>4</b>  |
| <b>3 EINGANGSDATEN</b> .....                                      | <b>6</b>  |
| 3.1 Lage des Untersuchungsgebiets.....                            | 6         |
| 3.2 Verkehrsdaten.....  | 9         |
| 3.3 Meteorologie .....  | 9         |
| <b>4 EXPERIMENTELLE DURCHFÜHRUNG UND QUALITÄTSSICHERUNG</b> ..... | <b>13</b> |
| 4.1 Meteorologie .....  | 13        |
| 4.2 Lage der Messpunkte bei Tracerversuchen.....                  | 13        |
| 4.3 Tracergasfreisetzung – Quellaufbau .....                      | 13        |
| 4.3.1 Grundlagen.....   | 13        |
| 4.3.2 Umsetzung in der Göttinger Straße .....                     | 15        |
| 4.3.3 Test der Quelle .....                                       | 17        |
| 4.3.4 Betrieb der Quelle.....                                     | 21        |
| 4.4 Erfassung der Tracergaskonzentrationen .....                  | 22        |
| 4.4.1 Probennahme .....   | 22        |
| 4.4.2 Analysen und Messgenauigkeit .....                          | 23        |
| 4.5 Qualitätssichernde Maßnahmen .....                            | 24        |
| <b>5 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN</b> .....                         | <b>28</b> |
| 5.1 Auswahl der Messtage.....                                     | 28        |
| 5.2 Messtage .....  | 28        |
| 5.2.1 Vorexperiment .....   | 28        |
| 5.3 Hauptexperimente.....   | 29        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>6</b> | <b>ERGEBNISSE</b> .....  | <b>31</b> |
| 6.1      | Windrichtung und Windgeschwindigkeit.....  | 31        |
| 6.2      | Tracergaskonzentrationen .....   | 31        |
| 6.2.1    | Darstellung der Konzentrationen in der Datenbank .....                                   | 31        |
| 6.2.2    | Gemessene Konzentrationen .....  | 36        |
| 6.3      | Vergleich der Tracergaskonzentration mit den Konzentrationen anderer<br>Schadstoffe..... | 36        |
| 6.4      | Endlichkeit der SF <sub>6</sub> -Linienquelle .....                                      | 45        |
| 6.5      | Dimensionslose Konzentration c* - Einfluss des Verkehrs.....                             | 48        |
| 6.5.1    | Definition von c* .....  | 48        |
| 6.5.2    | Darstellung c*-Werte für Schadstoff NO <sub>x</sub> .....                                | 49        |
| 6.5.3    | Darstellung c* Ergebnisse Tracermessungen.....   | 51        |
| 6.5.4    | Einfluss verkehrserzeugter Turbulenz TIT .....   | 56        |
| 6.6      | Überprüfung Emissionsmodellierung .....  | 58        |
| 6.7      | Fazit .....  | 60        |
| <b>7</b> | <b>VALIDIERUNGSDATENSATZ TRACEREXPERIMENTE</b> .....                                     | <b>61</b> |
| 7.1      | Einzelexperiment .....   | 61        |
| 7.2      | Ergebnisse der einzelnen Versuchstage.....   | 61        |
| 7.3      | Verfügbarkeit des Datensatzes .....  | 61        |
| <b>8</b> | <b>LITERATUR</b> .....   | <b>70</b> |

Hinweise:

Die Tabellen und Abbildungen sind kapitelweise durchnummeriert.

Literaturstellen sind im Text durch Name und Jahreszahl zitiert. Im Kapitel Literatur findet sich dann die genaue Angabe der Literaturstelle.

Es werden Dezimalpunkte (= wissenschaftliche Darstellung) verwendet, keine Dezimalkommas. Eine Abtrennung von Tausendern erfolgt durch Leerzeichen.

## **ANMERKUNG**

Die im vorliegenden Bericht beschriebene Studie ist im Rahmen des Verbundprojektes

## **VALIUM - ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG VON INSTRUMENTEN ZUR UMSETZUNG DER EUROPÄISCHEN LUFTQUALITÄTSPOLITIK**

des Atmosphärenforschungsprogramms AFO2000, Förderkennzeichen 07ATF12 entstanden.

Beteiligt an diesem Verbundprojekt waren nachfolgende Institutionen:

**Niedersächsisches Landesamt für Ökologie NLÖ, Hannover**

**Meteorologisches Institut, Universität Hamburg**

**IMK-IFU Garmisch, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH,  
Karlsruhe**

**Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Uni-  
versität Stuttgart, Stuttgart**

**Institut für Boden, Wasser, Luft, BTU Cottbus, Cottbus**

**Ingenieurbüro Lohmeyer, Karlsruhe**

## 1 ÜBERBLICK

Der Einsatz mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle nimmt in der gutachterlichen Praxis stark zu. Verschiedene Modelltypen sind im Einsatz. Um mit diesen Modellen vergleichbare Ergebnisse zu produzieren, müssen diese Modelle anhand von geeigneten Datensätzen validiert werden. Ziel der vorliegenden Untersuchung war die Erstellung eines für die Ausbreitung von Kfz-Abgasen innerhalb bebauten Gebietes geeigneten Validierungsdatensatzes.

Die meisten Datensätze stammen aus Windkanalexperimenten, belastbare Naturdatensätze liegen bisher nur wenige vor. Bei diesen Datensätzen handelt es sich dann meistens um reine Schadstoffmessungen, d.h. es werden die Konzentrationswerte bestimmter Schadstoffe vor Ort gemessen. Nutzt man die so erstellten Daten als Validierungsdaten, muss bei der Modellrechnung zunächst eine Emissionsmodellierung vorgenommen werden, dann erfolgt die Ausbreitungsmodellierung. Die Emission der Kraftfahrzeuge kann nicht direkt gemessen werden. D.h. das Ergebnis in Form der berechneten Konzentration resultiert aus zwei Modellansätzen, der Emissions- und der Transmissionsmodellierung. Damit ist beim Vergleich der gemessenen und berechneten Konzentrationen schwierig zu beurteilen, ob eventuelle Abweichungen an der Emissions- oder aber an der Transmissionsmodellierung liegen, bzw. ob zufällig das Produkt aus zwei falschen Größen zum richtigen Endergebnis führt.

Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Studie die Kfz- Emission ersetzt durch das Tracergas  $\text{SF}_6$ . Damit können wertvolle Informationen sowohl für die Emissions- als auch für die Ausbreitungsmodellierung bereit gestellt werden. Als Untersuchungsobjekt wurde die Göttinger Straße in Hannover ausgewählt, eine vierspurige Ausfallstraße mit einem DTV von ca. 30 000 Kfz/Tag. Das Tracergas  $\text{SF}_6$  wurde dort über eine linienförmige Quelle auf dem Mittelstreifen der Göttinger Straße freigesetzt. An verschiedenen Aufpunkten im Straßenraum wurden die Konzentrationen gemessen. Die Quellstärke konnte eindeutig über Durchflussmesser bestimmt werden.

Insgesamt wurde ein Vorexperiment und sieben Hauptexperimente durchgeführt. Die Tracergasmessungen waren eingebettet in ein Messprogramm, bei dem detaillierte Verkehrsmessungen sowie Wind- und herkömmliche Konzentrationsmessungen im Straßenraum und über Dach mit verschiedenen Messtechniken durchgeführt wurden. Die Ähnlichkeit zwischen tatsächlichen Schadstoffmessungen und den Tracergasmessungen mit  $\text{SF}_6$ , und damit die Anwendbarkeit als Validierungsdatensatz, konnte aufgezeigt werden.

Für den Validierungsdatensatz liegen Konzentrationsmesswerte für alle Experimenttage vor. Die Daten wurden integriert in die Datenbank VALIDATA, die alle gemessenen Größen während der Experimente und darüber hinaus auch alle kontinuierlichen Messungen im Zeitraum Januar 2000 bis Dezember 2003 umfasst.

Das Tracerexperiment liefert Konzentrationswerte ohne Beeinflussung durch eine Emissionsmodellierung, da die freigesetzten Emissionen direkt gemessen werden können. Für eine Validierung sollte daher auch genau diese Quellkonfiguration in Form einer Linienquelle auf dem Mittelstreifen berücksichtigt werden. Aufgrund der Endlichkeit dieser Linienquelle im Gegensatz zu den wesentlich längeren Linienquellen verursacht durch den Straßenverkehr ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten der Überprüfung der Modelle. So liefern die Messdaten Konzentrationsverteilungen entlang den beiden Straßenseiten, die bei einem Konzentrationswert nahe Null anfangen und auch wieder bei Null enden. Im gleichen Straßenbereich ist bei den üblicherweise gemessenen Schadstoffen eine derartige Verteilung aufgrund der wesentlich längeren Linienquelle nicht zu erwarten.

Neben der Bereitstellung des Datensatzes wurden ergänzende Auswertungen unternommen. So wurde der Einfluss des Verkehrs auf die Ausbreitung der Schadstoffe in Form der verkehrserzeugten Turbulenz näher betrachtet. Die Anwendbarkeit der häufig verwendeten dimensionslosen Darstellung von Konzentrationswerten in Form von  $c^*$  wurde überprüft. Es konnte aufgezeigt werden, dass diese Darstellungsart nur bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten angewendet werden darf. Bei Windgeschwindigkeiten unterhalb 6 bis 8 m/s in 10 m Höhe über Dach werden die gemessenen Konzentrationswerte deutlich durch die verkehrserzeugte Turbulenz geprägt. In der derzeitigen Praxis werden die höchsten Konzentrationen aufgrund der angesetzten Proportionalität von  $c$  mit  $1/u$  bei niedrigen Windgeschwindigkeiten berechnet. Diesen Zusammenhang geben die Naturmesswerte nicht wieder. Vielmehr konnte der Einfluss des Verkehrs auf die Ausbreitungsverhältnisse deutlich aufgezeigt werden.

Mit Abschluss des Projektes liegt nun ein Datensatz vor, der unter Naturbedingungen ermittelte Konzentrationsdaten unabhängig von einer Emissionsmodellierung zur Verfügung stellt. Die Anwendbarkeit des Transmissionsteils der mikroskaligen Modelle kann hiermit unter realen Bedingungen überprüft werden.

## 2 PROJEKTKONZEPT UND REALISIERUNG

Ausbreitungsrechnungen in der Mikroskala setzen sich aus einer Kette von Einflussgrößen in Form der angesetzten Vorbelastungswerte, der Meteorologie, der gewählten Methode zur Beschreibung der Emissionen sowie der eigentlichen Ausbreitungsmodellierung zusammen. In die vor Ort gemessenen Immissionswerte fließen die oben genannten Eingangsparameter ein, man kennt die einzelnen Größen aber nicht exakt. So können zwar die verkehrsspezifischen Parameter (DTV, LKW-Anteil, Fahrzeugflotte usw.) erfasst werden, die Beschreibung der resultierenden Emissionen erfolgt anhand einer Emissionsmodellierung. Die berechneten Emissionswerte stellen die Größe dar, die in die Immissionsprognose einfließt. D.h. in berechnete Immissionswerte fließt die Emissionsmodellierung und die Ausbreitungsmodellierung ein. Die Verknüpfung von beiden Ansätzen liefert die berechneten Immissionswerte, die wiederum mit den Messwerten verglichen werden können. Es ist daher nicht möglich, aufgrund des Vergleichs von gemessenen mit berechneten Immissionswerten Aussagen über die Güte der Ausbreitungsmodellierung zu treffen, man kann nur Aussagen über die Güte der Kombination Emissions- und Ausbreitungsmodellierung treffen. Dieser Umstand ist für Modellentwickler nicht zufrieden stellend.

Es war das Ziel der vorliegenden Studie, bei eindeutig definierten Randbedingungen Messungen mit einem Tracer vor Ort durchzuführen und die Ergebnisse in Form eines Validierungsdatensatzes für Ausbreitungsmodelle unabhängig von den tatsächlichen Kraftfahrzeugemissionen aufzubereiten. Dabei wurde eine linienförmige Freisetzung eines Tracergases bei definierter Länge vorgenommen. Damit ist die Quellstärke eindeutig fixiert.

Als für die Ausbreitung im Straßenraum relevanter Parameter wurde die verkehrserzeugte Turbulenz näher betrachtet. Auf Grund des eingesetzten Tracergases besteht die Möglichkeit, sowohl bei hohem Verkehrsaufkommen als auch bei geringem Verkehrsaufkommen belastbare Aussagen über das Ausbreitungsverhalten in Straßenschluchten zu gewinnen und somit Daten zur Validierung von Modellen zur Verfügung zu stellen.

Für die Realisierung wurde auf dem Mittelstreifen der vierspurigen Göttinger Straße in Hannover eine 96 m lange linienförmige Quelle installiert und die Tracergaskonzentrationen innerhalb des Straßenraumes und über Dach vermessen. Zeitgleich wurden an verschiedenen Messstationen des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie NLO und des Instituts für Atmosphärische Umweltforschung IFU des Forschungszentrums Karlsruhe Messungen der Schadstoffkonzentrationen verschiedener Stoffe durchgeführt. Vom Institut für Energiewirt-

schaft und Rationelle Energieanwendung IER der Universität Stuttgart wurden zeitgleich die relevanten Verkehrsdaten erfasst mit dem Ziel, auch die Emissionsmodellierung anhand der Tracermessungen überprüfen zu können.

Parallel zum vorliegenden Projekt liefen zwei Studien, die sich mit der PM10-Problematik im Untersuchungsgebiet und im Vergleich zu einem landwirtschaftlich geprägten Gebiet beschäftigten. Die Ergebnisse dieser Arbeiten finden sich in Bächlin et al. (2003a) und Bächlin et al. (2003b).

### 3 EINGANGSDATEN

Nachfolgend sind die experimentellen Randbedingungen für die Experimente näher beschrieben.

#### 3.1 Lage des Untersuchungsgebiets

Das Untersuchungsgebiet liegt im Südwesten von Hannover im Stadtteil Linden. Der Kernbereich der Untersuchungen umfasst eine Fläche von ca. 1 km x 1 km (s. **Abb. 3.1**) und liegt zwischen dem Bahnhof Hannover Linden im Süden und dem Deister Platz im Norden. Im Westen wird er begrenzt durch das südliche Ende der Hanomagstraße und im Osten durch die Ritter-Brüning-Straße. Das Areal wird geprägt durch das frühere Hanomag-Industriegelände, heute Fa. Komatsu-Hanomag AG, westlich der Göttinger Straße und städtische 4-6 stöckige Bebauung östlich der Göttinger Straße. Teile der Industriegebäude wurden in den letzten Jahren zurückgebaut, es haben sich Baumärkte und Speditionen mit großen Frei- und Parkplatzen angesiedelt.

Im näheren Umkreis um die Göttinger Straße befinden sich derzeit sieben Immissionsmessstationen, die vom Lufthygienischen Überwachungssystem Niedersachsen (LÜN) bzw. von Teilnehmern des Verbundprojektes VALIUM betrieben werden. In **Abb. 3.2** ist der nördliche Teil der Göttinger Straße rund um das NLÖ mit den LÜN-Messstationen dargestellt. Die Station HRSW befindet sich auf dem Dach des NLÖ-Gebäudes (RW 35 48 800, HW 58 03 100, in Höhe 32 m über Straßenniveau). Sie gilt als Referenzstation für die übergeordnete Meteorologie (Messhöhe Windrichtung und -geschwindigkeit in 42 m über Straßenniveau) sowie immissionsseitig für die Hintergrundbelastung in der Göttinger Straße. Die Stationen HRVS, HRV1, HRV2 und HRV3 befinden sich im Straßenraum der Göttinger Straße und sind stark verkehrsgeprägt, wobei die Station HRV2 am nördlichen Eingang zur Göttinger Straße auf dem Mittelstreifen liegt und die anderen Stationen auf Höhe des NLÖ-Gebäudes seitlich der Fahrbahnen stehen. Die Stationen HRV4 und HRV5 liegen außerhalb und damit nicht im direkten Einfluss der Göttinger Straße. HRV4 befindet sich etwa 75 m östlich in der Behnsenstraße. HRV5 steht auf dem Hof des NLÖ-Gebäudes in einer Entfernung zur Göttinger Straße von ca. 165 m. Eine ausführliche Dokumentation der an der Verkehrsstation HRVS seit 1989 durchgeführten Untersuchung enthält der Straßenschlucht-Bericht des NLÖ (NLÖ 1993).

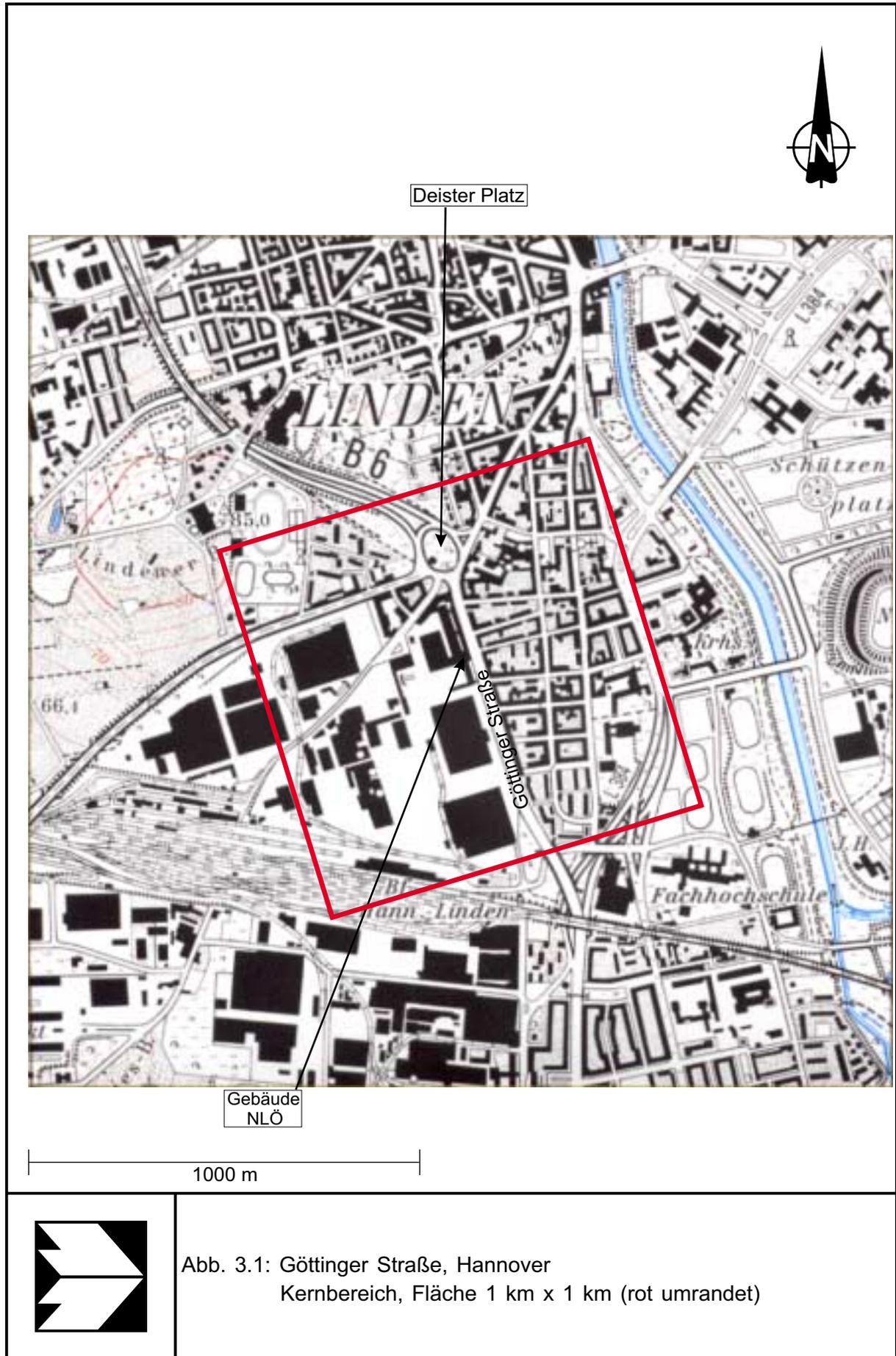


Abb. 3.1: Göttinger Straße, Hannover  
Kernbereich, Fläche 1 km x 1 km (rot umrandet)

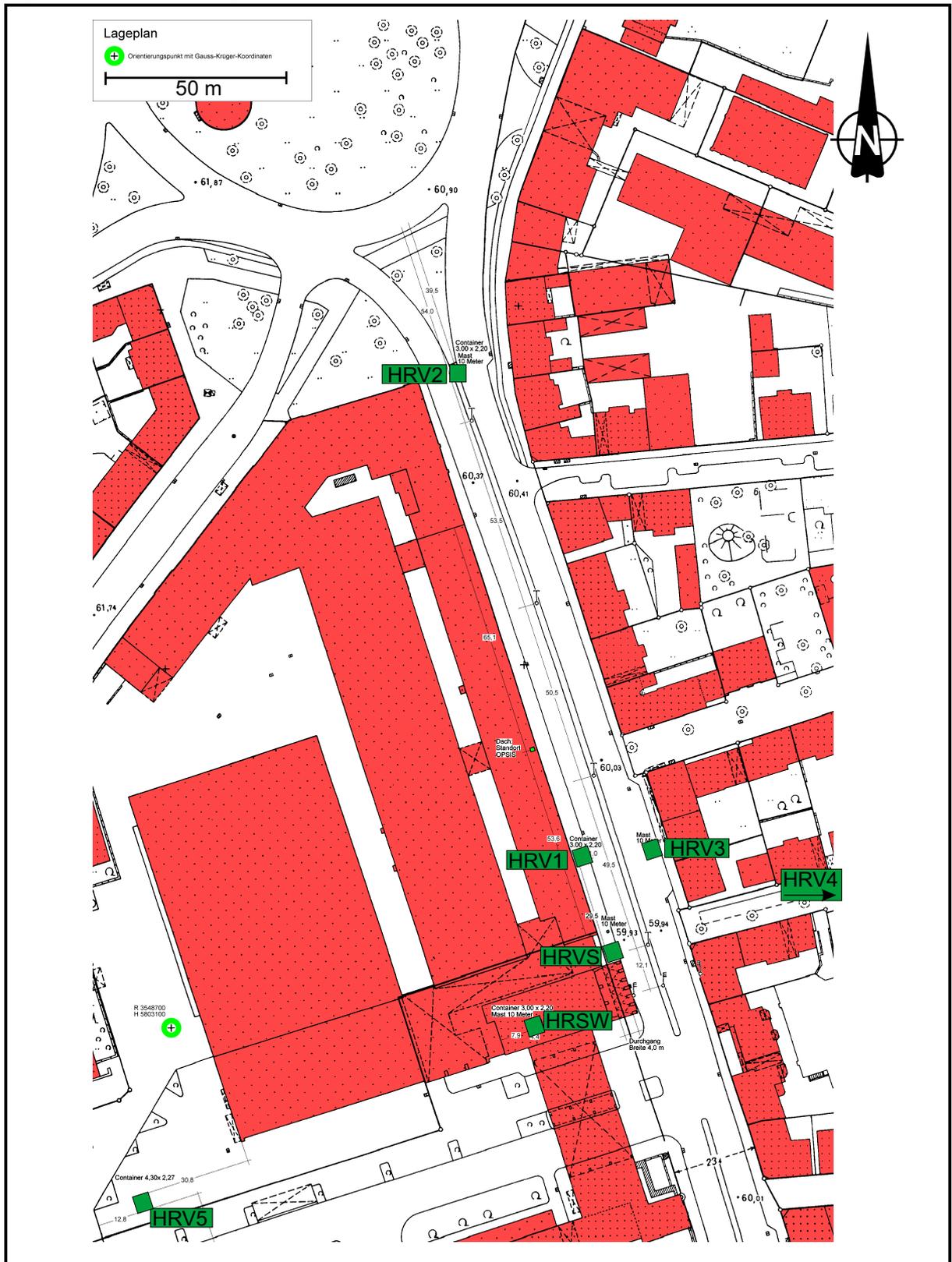


Abb 3.2: Lage der Immissionsmessungen des LÜN im Bereich der Göttinger Straße

## 3.2 Verkehrsdaten

Die Göttinger Straße ist eine stark befahrene 4-spurige Ein-/Ausfallstraße von Hannover. Sie ist Nordnordwest-Südsüdost (343 Grad / 163 Grad) orientiert. Die Straße mündet im Norden in den mit Lichtsignalanlagen geregelten Verkehrskreisel am Deister Platz. Eine Verkehrsmessstelle befindet sich ca. 200 m südlich des Kreisels. Der Mittelstreifen zwischen den Fahrspuren nach Nord und Süd ist ca. 1 m breit, mit Verbundsteinen belegt und ca. 10 cm hoch. Auf der westlichen Seite befindet sich zwischen dem westlichen Fahrstreifen und dem Gehweg ein unbefestigter Streifen, der teilweise mit Gras bewachsen ist. Auf der östlichen Straßenseite befindet sich zwischen Fahrspur und Gehweg teilweise ein Parkstreifen. Südlich der Messstelle befindet sich eine Lichtsignalanlage für Fußgänger. **Abb. 3.3** zeigt einen Blick Richtung Deister Platz vom NLÖ-Gebäude in die Göttinger Straße, **Abb. 3.4** zeigt einen Blick von Süden und **Abb. 3.5** einen Blick von Norden mit Blick auf Messstelle HRV1.

In der Göttinger Straße sind vor dem Gebäude des NLÖ Induktionsschleifen in allen 4 Fahrspuren eingelassen. Die Induktionsschleifen registrieren die passierenden Fahrzeuge. Weitere Details zu den Verkehrsdaten und ergänzende Informationen für die einzelnen Experimenttage sind in Kühlwein et al. (2004) dokumentiert.

## 3.3 Meteorologie

Meteorologische Daten wurden an mehreren Orten erfasst. Auf dem Dach des NLÖ-Gebäudes wurden in 42 m Höhe die Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen mit einem Schalenkreuzanemometer und aufgesetzter Windfahne erfasst (s. **Abb. 3.6**). Im Straßenraum selbst wurden Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an den Stationen HRV1 und HRV3 sowie HRV2 gemessen. Während ausgewählter Tage erfolgten zusätzliche Messungen im Straßenraum an verschiedenen Punkten. An den Stationen HRV4 und HRV5 abseits der Göttinger Straße wurden ebenfalls Windmessungen durchgeführt. Die genaue zeitliche Zuordnung ist der Datenbank VALIDATA zu entnehmen. Ergänzend wurden Messungen mit Sodar und WTR durchgeführt, detaillierte Informationen hierzu finden sich in Schäfer et al. (2004).



Abb. 3.3: Blick Richtung Deister Platz vom NLÖ-Gebäude in die Göttinger Straße



Abb. 3.4: Blick von Süden in die Göttinger Straße



Abb. 3.5: Blick auf HRV1 von Norden in die Göttinger Straße

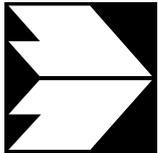


Abb. 3.6: Ansicht der Überdachmessstelle HRSW

## 4 EXPERIMENTELLE DURCHFÜHRUNG UND QUALITÄTSSICHERUNG

### 4.1 Meteorologie

Die relevanten meteorologischen Daten wurden an den in Kap. 3.3 beschriebenen Messpunkten erfasst und auf dem Rechner des LÜN abgelegt. Sie wurden in die Datenbank Validata integriert und für die weitere Auswertung zur Verfügung gestellt.

### 4.2 Lage der Messpunkte bei Tracerversuchen

Für jedes Tracerexperiment standen insgesamt 12 bzw. 15 Probensammler zur Verfügung. Die Positionen aller während der Experimente betriebenen Punkte sind in **Abb. 4.1** dargestellt. In der Kennung der Messstellen steht S für Sammlerstandort (sampling point), w bzw. e für west bzw. east und die beiden Ziffern sind die Standorte, durchnummeriert von Süd nach Nord. Wenn der Sammler direkt bei einer LÜN-Messstation stand, wurde diese Standortkennung (HRV1, HRV2, HRV3, HRV4, HRSW und HRV8) übernommen. Die Messhöhe betrug 1.5 m außer bei SW03, hier wurden die Proben in 3 m Höhe gezogen. Zur Erfassung eventueller sonstiger SF<sub>6</sub>-Quellen wurde bei jedem Experiment ein Probensammler auf dem Dach des NLÖ-Gebäudes bei der Station HRSW positioniert und ein zweiter Probensammler auf dem langgezogenen Flachdach an der Position HRV8. Die restlichen Sammelgeräte wurden im Straßenraum in Abhängigkeit von der jeweils am Versuchstag vorherrschenden Windrichtung positioniert. Die im jeweiligen Experiment bestückten Messorte sind im Datensatz dokumentiert.

### 4.3 Tracergasfreisetzung – Quellaufbau

#### 4.3.1 Grundlagen

Die Emissionsrate entlang einer mit Tracergas betriebenen Linienquelle ist, im Gegensatz z.B. zu Emissionen aus Kraftfahrzeugen, eindeutig definierbar. Die Tracergasfreisetzung soll räumlich und zeitlich konstant sein, und damit weitgehend unabhängig von äußeren Druckschwankungen verursacht durch den Wind oder vorbeifahrende Fahrzeuge. Linienquellen sind in aller Regel eine Aneinanderreihung von punktförmigen Quellen. Um auf die Rezeptoren nicht als Punktquellen zu wirken, müssen die Austrittsöffnungen entlang der Quelle dicht genug angeordnet sein. Die Öffnungen sind so zu dimensionieren, dass bei den gewünschten Durchflüssen zur Verminderung der erwähnten Druckrückkopplungen stets ein ausreichender Über-

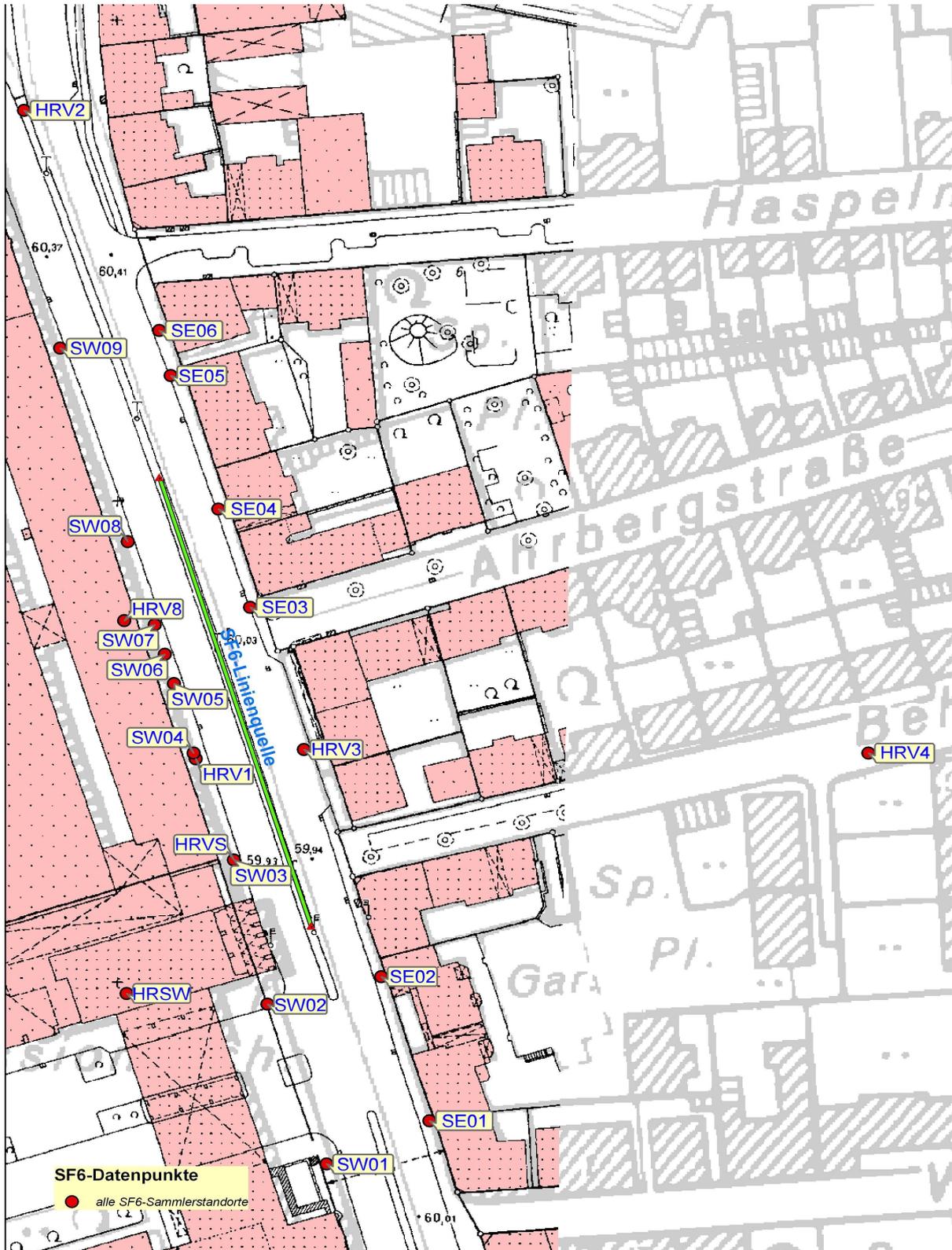


Abb. 4.1: Positionen aller Messpunkte während der Tracergasmessungen

druck in der Quelle herrscht. Da Fehler bei der Emissionsrate direkt in die Konzentrationen und damit in die Validierungsdaten einfließen, wurde die Quelle intensiv überwacht, um Defekte frühzeitig erkennen und beheben zu können.

Naturexperimente mit Linienquellen beschreiben u.a. Okamoto et al. (1990) und Claiborn et al. (1994). Die ca. 200 m lange Linienquelle von Okamoto et al. hatte 68 Öffnungen, als Tracer wurde Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) mit einer Durchflussrate von ca. 30 l/h verwendet. Zur Aufrechterhaltung des Druckes in der Quelle wurden ca. 5 m<sup>3</sup> Luft/h zugegeben. Claiborn et al. (1994) verwendeten für ihre ca. 100 m lange Quelle ebenfalls  $\text{SF}_6$  als Tracer mit Durchflussraten von 3 – 4.5 m<sup>3</sup>/h. Bei den gewählten Öffnungen reichte das  $\text{SF}_6$  aus, einen Überdruck in der Quelle von 10 psig, entsprechend etwa 0.7 bar, zu erzeugen. Auf die Zugabe von Luft konnte verzichtet werden.

#### 4.3.2 Umsetzung in der Göttinger Straße

Für die Ausbreitungsversuche in der Göttinger Straße in Hannover wurde ebenfalls  $\text{SF}_6$  als Tracer gewählt. Die zur Verfügung stehende Analysetechnik für dieses Gas erlaubte Emissionsraten von ca. 3 l  $\text{SF}_6$  pro Stunde. Die Tracergasquelle wurde auf dem erhöhten Mittelstreifen positioniert mit einer Länge von 96 m. Die Linienquelle besteht aus 8 Teilquellen (**Abb. 4.2**) von je 12 m Länge, die mit einer Betriebseinrichtung durch symmetrisch angeordnete Schläuche verbunden sind. Die Schläuche mit Durchmesser 1/2" werden mit Y-förmigen Schlauchverbindern baumartig so kombiniert, dass die Schlauchlänge (ca. 94 m) und die Verbinderanahl (3) zwischen der Betriebseinrichtung und jeder Teilquelle, und somit der Strömungswiderstand im Schlauch, möglichst gleich ist. Die Teilquellen bestehen aus 1 1/4" starken PE-Rohren mit 32 mm Innendurchmesser. Je zwei 6 m lange Rohrstücke werden an ihren Enden mit Stopfen verschlossen, wobei ein Stopfen mit einem Manometer versehen ist, und in der Mitte über ein T-Stück an das Schlauchsystem angeschlossen. Die Betriebseinrichtung der Quelle besteht aus einem Schwebekörperdurchflussmesser mit Nadelventil zur Regelung des  $\text{SF}_6$ -Durchflusses, einem Schwebekörperdurchflussmesser mit einem Steuerventil für den Gesamtdurchfluss aus  $\text{SF}_6$  und Pressluft und einem Präzisionsmanometer zur Kontrolle des Überdruckes. Stromab des Präzisionsmanometers können Proben der Mischung aus  $\text{SF}_6$  und Pressluft entnommen werden. **Abb. 4.3** zeigt ein Bild der Betriebseinrichtung.

Während des Vorversuchs war die Quelle in einer Höhe von ca. 10 cm Abstand zum Boden mittels Rohrschellen auf dem erhöhten Mittelstreifen befestigt (s. **Abb. 4.4**). Es zeigte sich bei

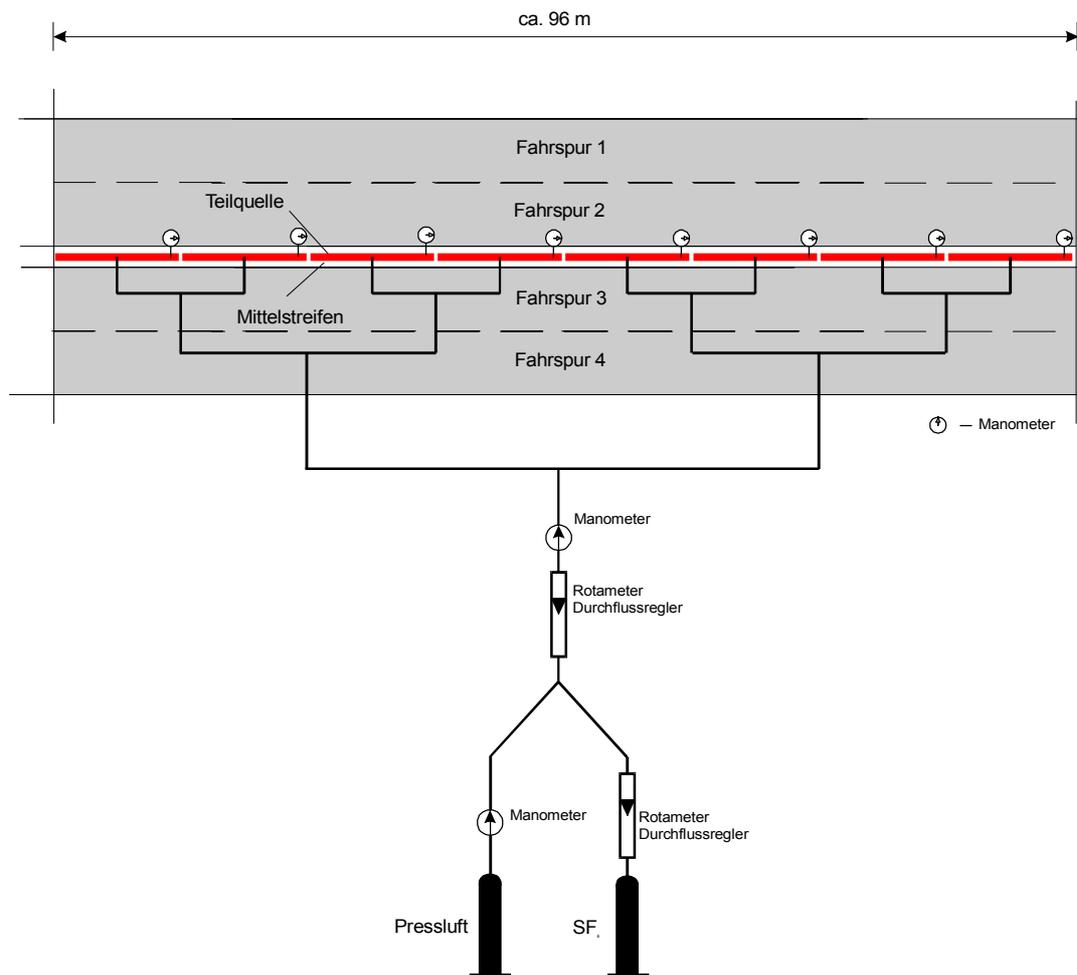


Abb. 4.2: Schematische Skizze der Linienquelle

dem Vorexperiment, dass diese Lösung zwar versuchstechnisch geeignet ist aber aus Sicherheitsgründen für den späteren Einsatz bei den Hauptexperimenten nicht praktikabel war. Während und nach dem ersten Experiment versuchten Passanten trotz Absperrband an dieser Stelle die Straße zu überqueren. Dabei wurde die Quelle am Abend des Vorversuchstages leicht beschädigt und musste repariert werden. Da es sich bei der Göttinger Straße um eine stark befahrene Straße handelt, war auch das Sicherheitsrisiko zu groß, dass ein Passant beim Überqueren der Quelle stürzt. Deshalb wurde der Aufbau überdacht und bei den Hauptexperimenten ein modifizierter Aufbau gewählt. Auf dem Mittelstreifen wurden so genannte Drängelgitter aufgebaut, wie sie üblicherweise als Absperrung bei Veranstaltungen eingesetzt werden. Dadurch konnte im Bereich der Quellenanordnung die Straße nicht mehr überquert werden. An diesen Gittern wurde die Quelle in ca. 30 cm Höhe befestigt wie in **Abb. 4.5** dargestellt. **Abb. 4.6** zeigt eine Gesamtansicht der Quelle mit den Drängelgittern.

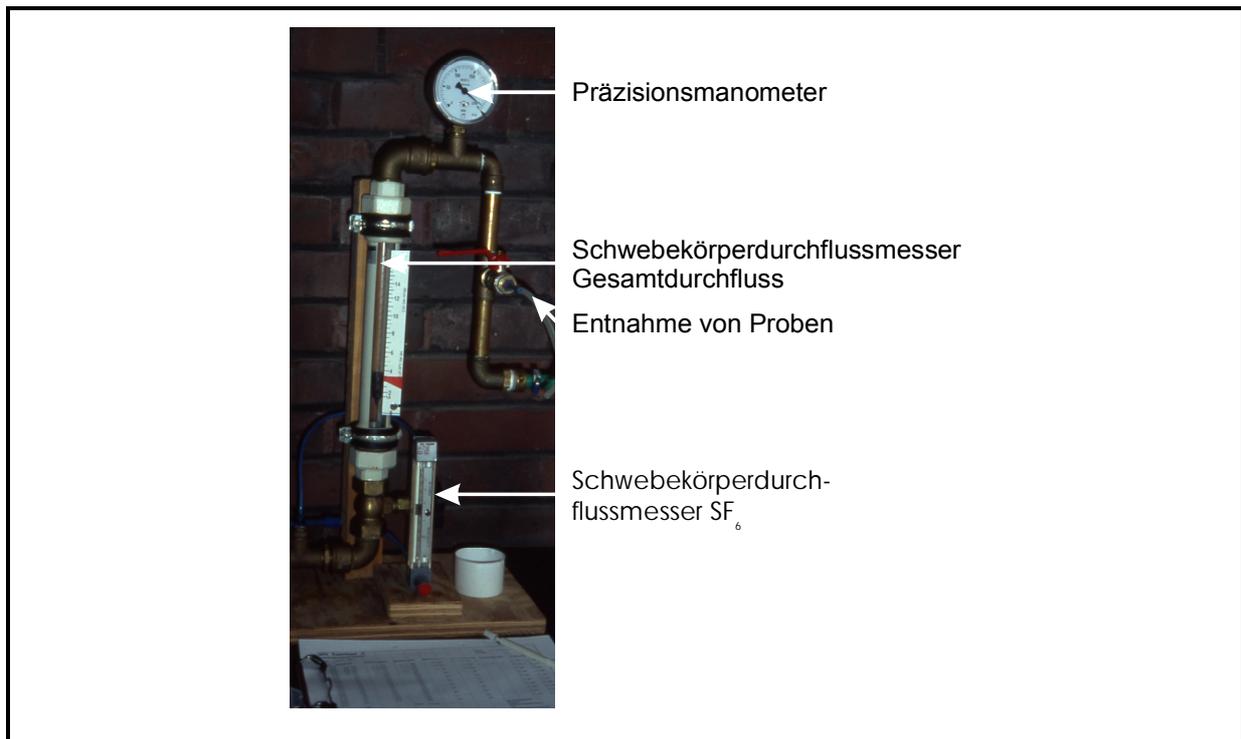


Abb. 4.3: Blick auf Betriebseinrichtung mit Durchflussmessern

Die in **Abb. 4.3** dargestellte Betriebseinrichtung mit den Durchflussmessern war im Vorversuch auf dem Mittelstreifen aufgebaut. Aus Sicherheitsgründen wurde diese Einheit bei den Hauptexperimenten unter die Arkaden des NLÖ-Gebäudes verlegt und über eine über dem Straßenraum installierte Schlauchleitung mit der Quelle auf dem Mittelstreifen verbunden. Die Quelle wurde ca. 30-60 Minuten vor Beginn des Experiments in Betrieb genommen, damit das Tracergas bei Beginn der Messung ausreichend im Straßenraum verteilt war.

#### 4.3.3 Test der Quelle

Größe und Anzahl der Austrittsöffnungen wurden in Vorversuchen im Labor dimensioniert. Dazu wurden handelsübliche Kanülen in verschiedene Rohre eingebaut und die Quelldrücke und -durchflüsse bestimmt. Es zeigte sich, dass mit einem Kanülenabstand von 0.4 m, einem Kanüleninnendurchmesser von 0.3 mm und einer Länge der Kanüle von 25 mm zum einen Drücke von ca. 150 mbar in der Quelle aufrecht erhalten werden können, und zum anderen der Verbrauch an Pressluft zur Druckstützung realisierbar blieb.



Abb. 4.4: Quellenordnung bei Vorexperiment ca. 10 cm über Boden

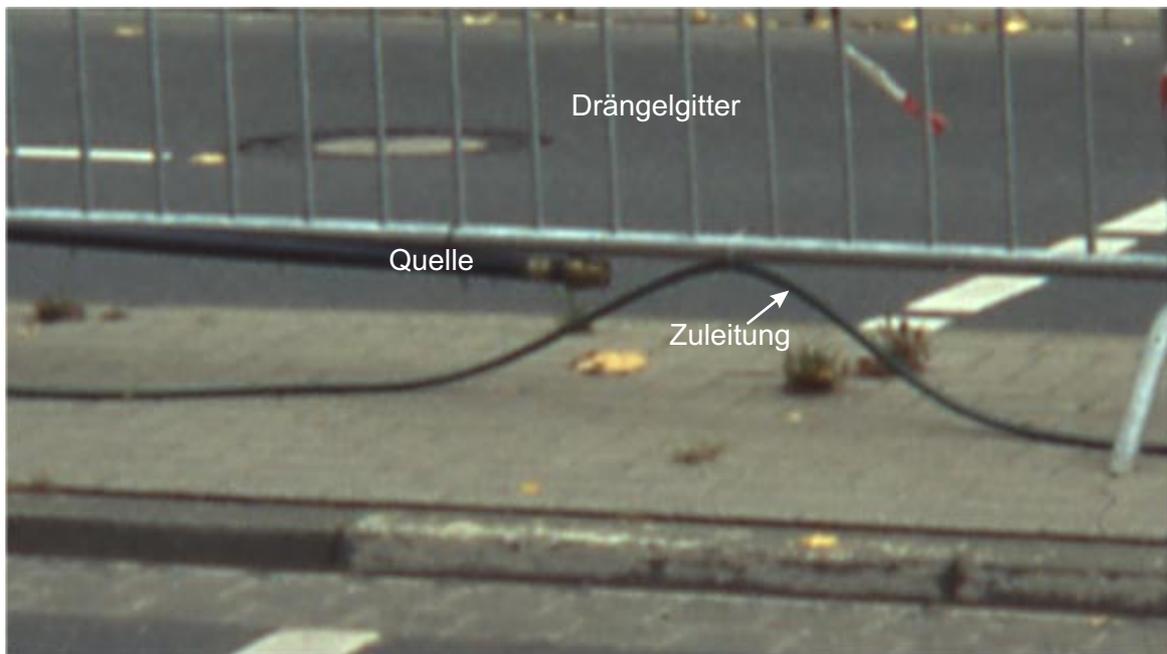


Abb. 4.5: Quellenordnung bei Hauptexperimenten ca. 30 cm über Boden



Abb. 4.6: Ansicht der Quelle mit den Drängelgittern auf dem Mittelstreifen

Alle Teilquellen wurden nach der Fertigung auf gleichmäßigen Austritt der Emission überprüft: Dabei wurde die Zeit ermittelt, in der ein Volumen von 70 ml aus einer Austrittsöffnung der Teilquelle austritt und eine Wassersäule mit ca. 10 mbar Gegendruck verdrängt (70ml-Test). An allen übrigen Öffnungen der Quelle liegt außen Atmosphärendruck an. Der Innendruck der Quelle beträgt, wie bei den Versuchen vorgesehen, 150 - 160 mbar. Die **Abb. 4.7** zeigt, dass die Abweichungen weniger als ca. 7 % des Mittelwertes von 15.7 s betragen, die Standardabweichung ist geringer als 0.5 s.

Nach dem Aufbau oder der Inbetriebnahme waren derart aufwändige Tests nicht mehr möglich. Hier wurden stichprobenartig vor Ort je 2 Austrittsöffnungen je Teilquelle mit dem 70ml-Test beprobt (s. **Abb. 4.8**). Die mittleren Werte der Vor-Ort-Tests wichen um maximal ca. 10 % von dem mittleren Ausgangswert unmittelbar nach der Fertigung ab. **Abb. 4.9** zeigt diesen Test vor Beginn des Experiments. Zusätzlich erfolgte ein Dichtigkeitsstest der Quelle und der Schlauchleitungen.

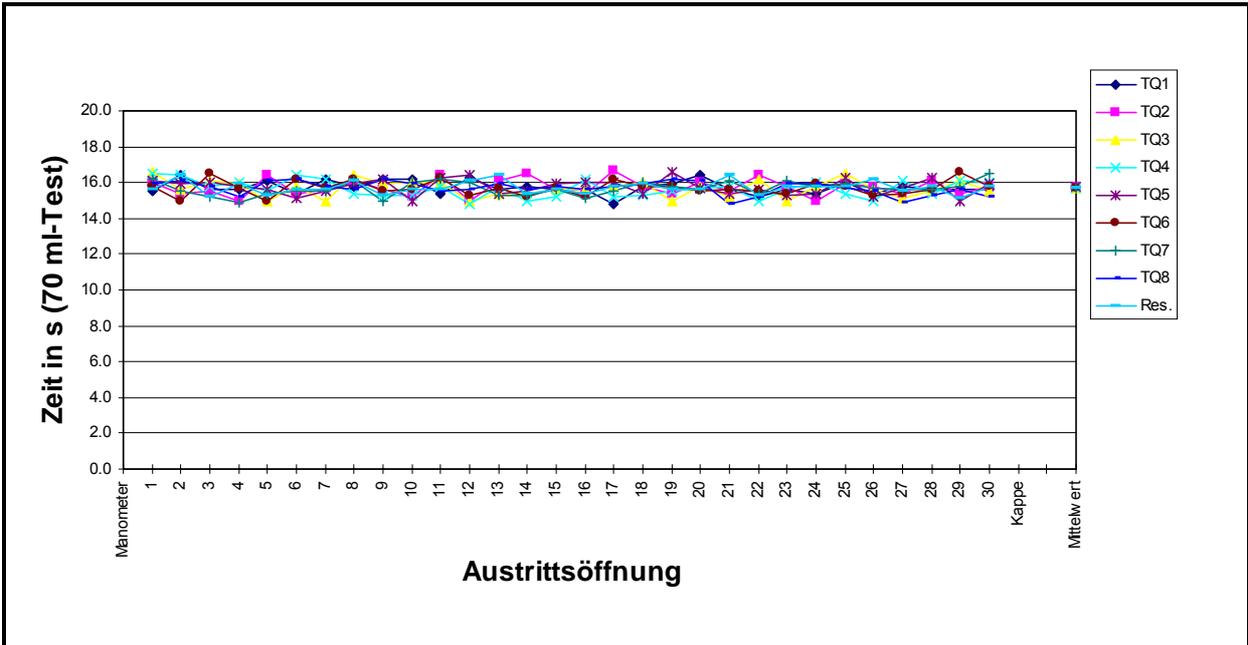


Abb. 4.7: Zeitdauer, in der ein Volumen von 70 ml aus einer Austrittsöffnung der Teilquelle austritt (70ml-Test) unmittelbar nach der Fertigung der Teilquellen

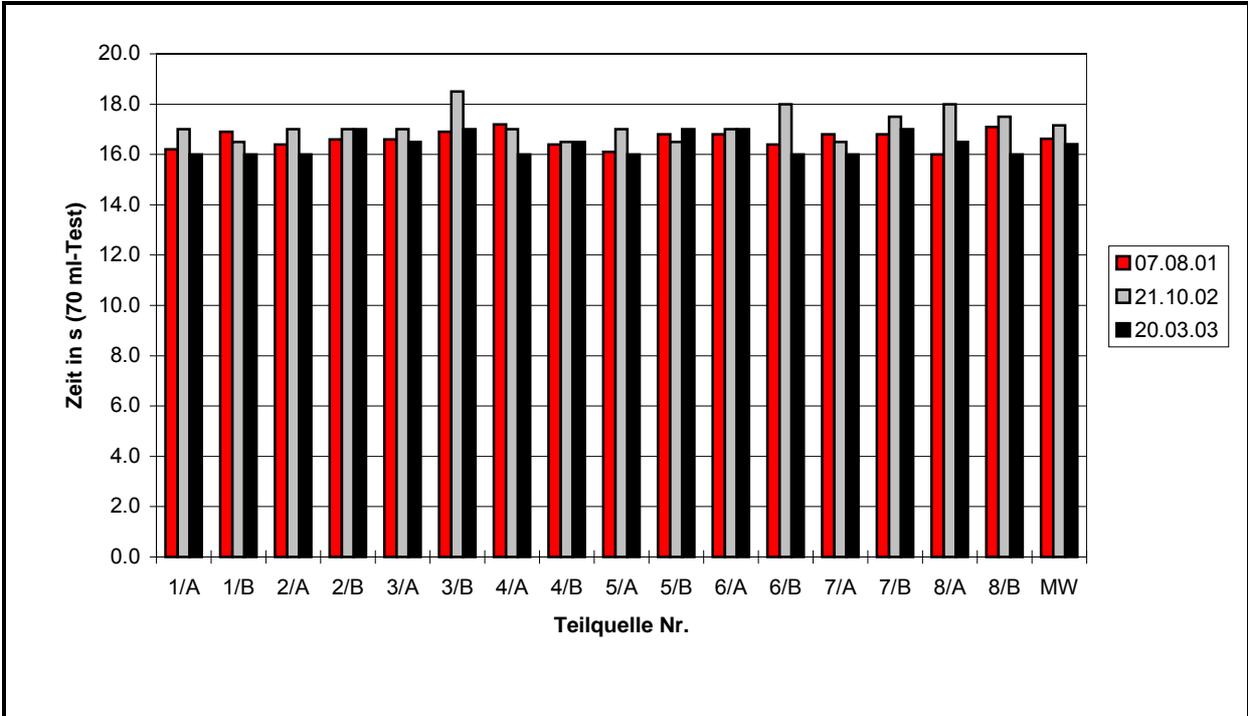


Abb. 4.8: Zeitdauer, in der ein Volumen von 70 ml aus einer Austrittsöffnung der Teilquelle austritt (70ml-Test) während der Versuchsphasen (Stichprobentest an 2 beliebigen Austrittsöffnungen der Teilquellen)

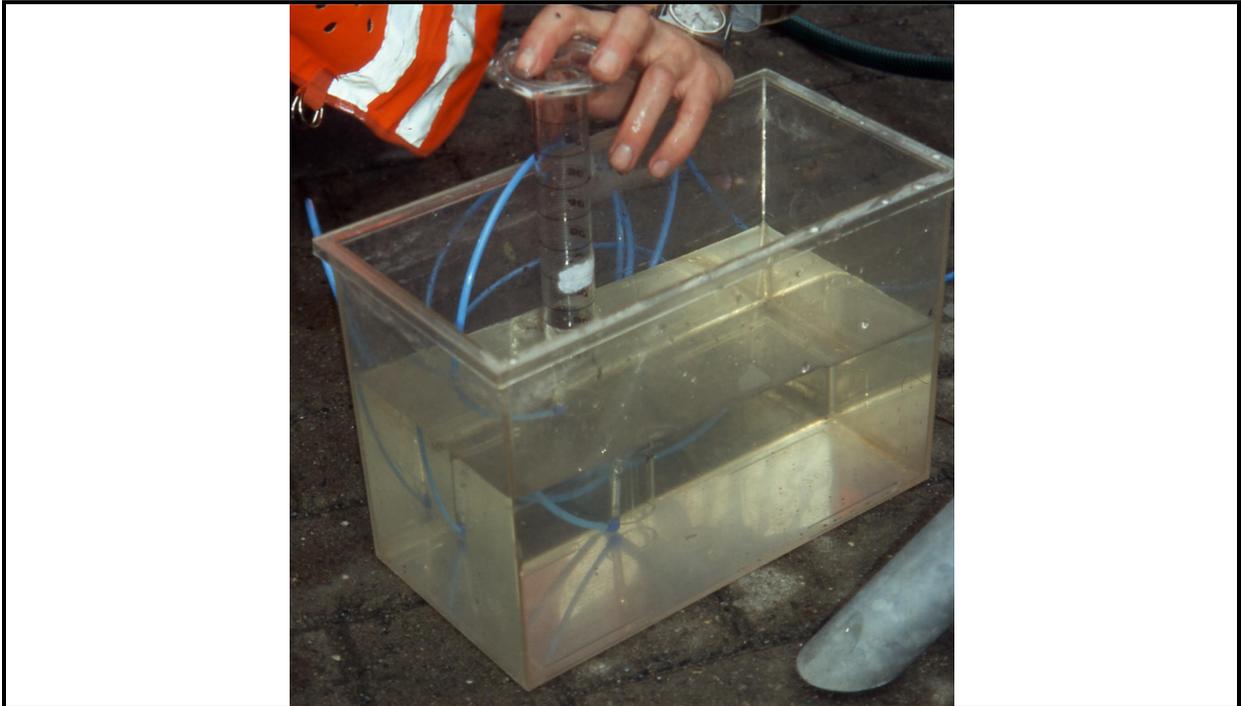


Abb. 4.9: Test der Austrittöffnungen vor dem Experiment

#### 4.3.4 Betrieb der Quelle

Um einen Überdruck in der Quelle von ca. 150 mbar aufrecht zu erhalten, mussten ca. 3.5 m<sup>3</sup>/h Pressluft dem als Tracer dienenden SF<sub>6</sub> beigemischt werden. Der Überdruck überschreitet den Betriebsdruck einer üblichen Niederdruckgasleitung von ca. 20 mbar um ein Vielfaches. Die Pressluft stammte aus Flaschen, um zu vermeiden, dass eventuell SF<sub>6</sub>-belastete Außenluft von einem Kompressor wieder angesaugt und in die Quelle eingespeist wird.

Um größere Leckagen zu erkennen, erfolgte während der Experimente eine Kontrolle der Manometer an den Teilquellen in 1 - 2 stündigem Rhythmus. An der Betriebseinrichtung der Quelle wurde eine Reihe von Messgrößen kontinuierlich protokolliert.

Die Quelle hat die drei Auf- und Abbauvorgänge und die Messkampagnen ohne Probleme überstanden. Durch die eingebauten Kontrollmechanismen und die regelmäßige Überwachung konnten Defekte, wie geknickte Schlauchleitungen, frühzeitig erkannt und behoben werden.

### 4.3.5 Genauigkeit der Durchflussmessung

Bei der hier verwendeten Linienquelle wurde die freigesetzte Tracermenge pro Zeiteinheit mittels eines Schwebekörperdurchflussmessers der Genauigkeitsklasse 2.5 bestimmt. Dies bedeutet eine zulässige Abweichung des Durchflussmessers von  $\pm 2.5\%$  des Skalenendwertes. Der Endwert des Durchflussmessers betrug bei einer Verwendung mit SF<sub>6</sub> ca. 3.5 l/h. Ein Durchfluss von ca. 3 l/h entspricht dann einer Beaufschlagung von 86 % des Endwertes. In diesem oberen Bereich nimmt die Messunsicherheit, im Gegensatz z.B. zu den unteren 10 % der Messskala, nur langsam zu. Somit ist mit einer Messunsicherheit von ca. 3 %, bezogen auf den Skalenendwert, bzw. 3.5 % bezogen auf den aktuellen Messwert, zu rechnen. An dem Meteorologischen Institut der Universität Hamburg durchgeführte Messungen ergaben bei einer vom Skalenwert her vergleichbaren Beaufschlagung mit Luft statt mit SF<sub>6</sub> Abweichungen von 2.75 %, bezogen auf den Endwert, bzw. 3.8 %, bezogen auf den aktuellen Messwert.

Zur Kontrolle des Gesamtdurchflusses aus freigesetzter Tracermenge und Zusatzluft wurde ein weiterer, erheblich größerer Schwebekörperdurchflussmesser der Genauigkeitsklasse 1.6 mit einem Endwert von ca. 16 000 l/h Luft verwendet. Die aktuellen Werte von 3 000 – 3 500 l/h Gesamtdurchfluss lagen im Bereich der unteren 20 % der Messskala, eine Kalibrierung ergab hier eine Messunsicherheit zwischen 3.3 % und 3.0 %, bezogen auf den aktuellen Messwert.

## 4.4 Erfassung der Tracergaskonzentrationen

### 4.4.1 Probennahme

Die Proben wurden mittels Luftprobensammler gezogen, die über eine Pumpe die Luftproben in Beutel sammeln. **Abb. 4.10** zeigt ein derartiges Gerät im Einsatz. Als Sammelbeutel wurden alukaschierte Beutel mit ca. 5 l Volumen verwendet. Über eine Schaltuhr kann die Sammelzeit am Probensammler eingestellt werden. Es wurden jeweils über Zeitintervalle von 30 Minuten Proben gezogen, die Geräte wurden vor dem Experiment entsprechend programmiert. Die Erstausrüstung der Geräte umfasst jeweils 10 Beutel, d.h. nach 5 Stunden müssen die Beutel spätestens ausgetauscht werden. Während der Experimente wurden die einzelnen Geräte kontinuierlich überwacht. Die verwendeten Beutel wurden im Vorfeld bzgl. ihrer Eignung für die Experimente überprüft. Dabei zeigte sich, dass die SF<sub>6</sub>-Konzentrationen im Beutel über Tage stabil blieben.

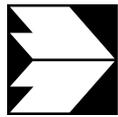
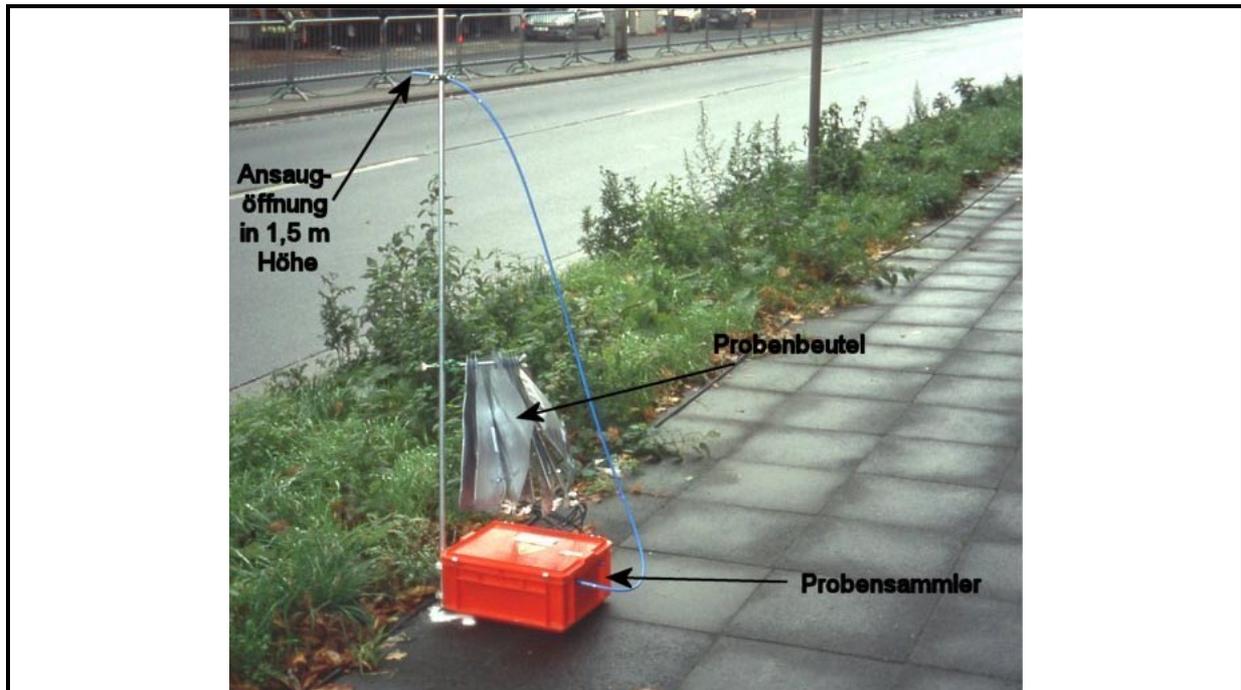


Abb. 4.10: Luftprobensammler mit angeschlossenen Probenbeutel

Aus den Beuteln wurden nach Abschluss des Experimentes Proben in Einmalspritzen mit 50 ml Inhalt gezogen (s. **Abb. 4.11**). Es wurden jeweils zwei Proben genommen, eine A- und eine B-Probe. Die A-Probe wurde an das Analyseinstitut zur Analyse weitergegeben, die B-Probe wurde zurückgehalten. Haben sich bei den Plausibilitätstest bzw. bei der Überprüfung der Ergebnisse Ungereimtheiten ergeben, wurden die B-Proben analysiert und für die Interpretation der Ergebnisse herangezogen. Auch hier haben Tests gezeigt, dass die Konzentrationen in den Spritzen über mehrere Tage stabil bleiben.

#### 4.4.2 Analysen und Messgenauigkeit

Die Analysen wurde durch die Firma TracerTech mit einem Gaschromatographen des Typs AUTOTRAC 101 durchgeführt. Der AUTOTRAC 101 verfügt über eine eingebaute und austauschbare Eichgasflasche. Der Kalibrierprozess kann manuell als auch vorprogrammiert stattfinden. Der Kalibriervorgang dauert etwa 5 Minuten. Während der Aufwärmphase des Gerätes nach dem Anschalten sollte etwa jede Stunde kalibriert werden, wenn eine hohe Genauigkeit gefordert ist. Nach mehreren Stunden ist der AUTOTRAC sehr stabil, so dass eine



Abb. 4.11: Proben mit Einmalspritzen aus Beuteln gezogen

Kalibrierung einmal pro Tag sicher ausreicht. Die Kalibrierung kann bei Langzeitmessungen während des laufenden Versuchs stattfinden und läuft automatisiert im Hintergrund ab.

Werksseitig ist AUTOTRAC über 13-15 Stützkonzentrationen kalibriert. Verschiebungen während der Aufwärmphase haben eine Parallelverschiebung der Kennlinie zur Folge, weshalb eine Einpunktkalibrierung über die im AUTOTRAC befindliche Eichgasflasche ausreicht, eine 3%ige Genauigkeit vom Anzeigewert zu garantieren.

## 4.5 Qualitätssichernde Maßnahmen

### 4.5.1 Vergleichsmessungen in der Windkanalhalle der Universität Hamburg

Konzentrationsmessungen des Tracergases  $\text{SF}_6$  erfolgten punktuell durch die bereits beschriebenen Beutelproben und gleichzeitig integrierend über eine bestimmte Distanz durch das TP 4 (s. Schäfer et al., 2004). Da entlang der Göttinger Straße unter natürlichen Verhältnissen die Konzentrationsverteilungen in Teilbereichen inhomogen sein können wurden unter definierten Randbedingungen Vergleichsmessungen durchgeführt. Hier bot sich die große Windkanalhalle der Universität Hamburg an. Die mögliche Messstrecke betrug hier ca. 26 m.

Eine definierte Menge SF<sub>6</sub> wurde in die Halle eingebracht, die Türen und Fenster waren geschlossen. Der Windkanal sorgte für eine gute Durchmischung in der Halle. Entlang der aufgespannten Traverse wurden mittels FTIR längengemittelt die SF<sub>6</sub>-Konzentrationen gemessen. Zeitgleich erfolgten an insgesamt 4 Punkten entlang der Traverse punktuelle Messungen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in **Abb. 4.12** dargestellt. Parallel zu den SF<sub>6</sub>-Messungen wurden auch längenintegrierende Ethanmessungen mit dem FTIR und zum Vergleich punktuelle Messungen durch die Universität Hamburg durchgeführt. Es zeigt sich bei beiden Gasen eine gute Übereinstimmung zwischen punktuellen und längengemittelten Messungen.

#### **4.5.2 Vergleichsmessungen in situ mit dem Forschungszentrum Jülich**

Zur Überprüfung der punktuellen Messungen unter realen Bedingungen im Feldversuch wurden durch das Forschungszentrum Jülich zeit- und ortsgleich Parallelmessungen durchgeführt und mittels eigener Analysegeräte im Forschungszentrum Jülich ausgewertet. Im Gegensatz zu den im vorliegenden Projekt gewählten Mittelungsintervallen von 30 Minuten erfolgten durch das Forschungszentrum Jülich Probenahmen über einen Zeitraum von jeweils 10 Minuten.

Die parallele Messkampagne lief am 24.10.2002, gemeinsamer Messpunkt war die Station HRV1. **Abb. 4.13** zeigt eine Aufnahme der beiden Probensammler des Forschungszentrum Jülich. Die mit den beiden Probensammlertypen erfassten und mit Gaschromatographen bei unterschiedlichen Institutionen analysierten Konzentrationen sind in **Abb. 4.14** gezeigt.

Die Übereinstimmung ist befriedigend, lediglich die um 16 Uhr und 16.30 Uhr erfassten Messwerte liegen deutlich auseinander. Der Vergleich der Ergebnisse als Scatterplot ist in **Abb. 4.15** dargestellt. Er zeigt, dass die meisten Werte im Bereich +/- 10 % liegen, lediglich die beiden zuvor erwähnten Ausreißer liegen außerhalb.

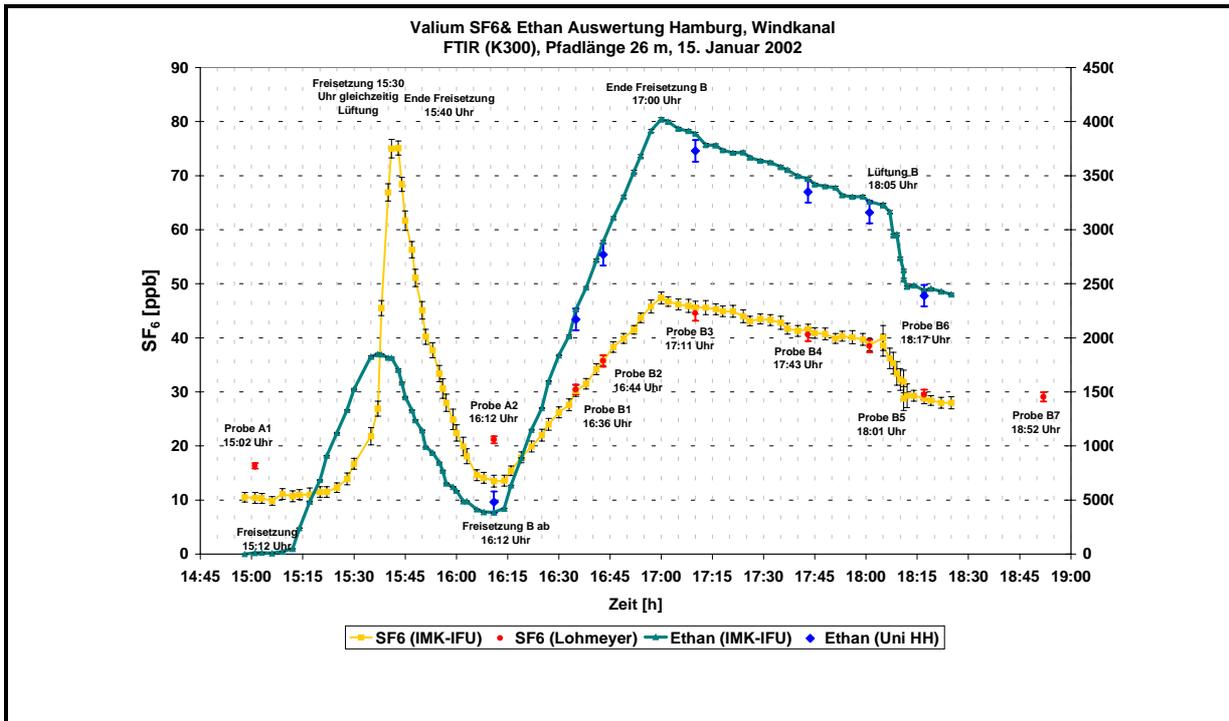


Abb. 4.12: Ergebnisse der Vergleichsmessungen SF<sub>6</sub>-Konzentrationen in der Windkanalhalle der Universität Hamburg

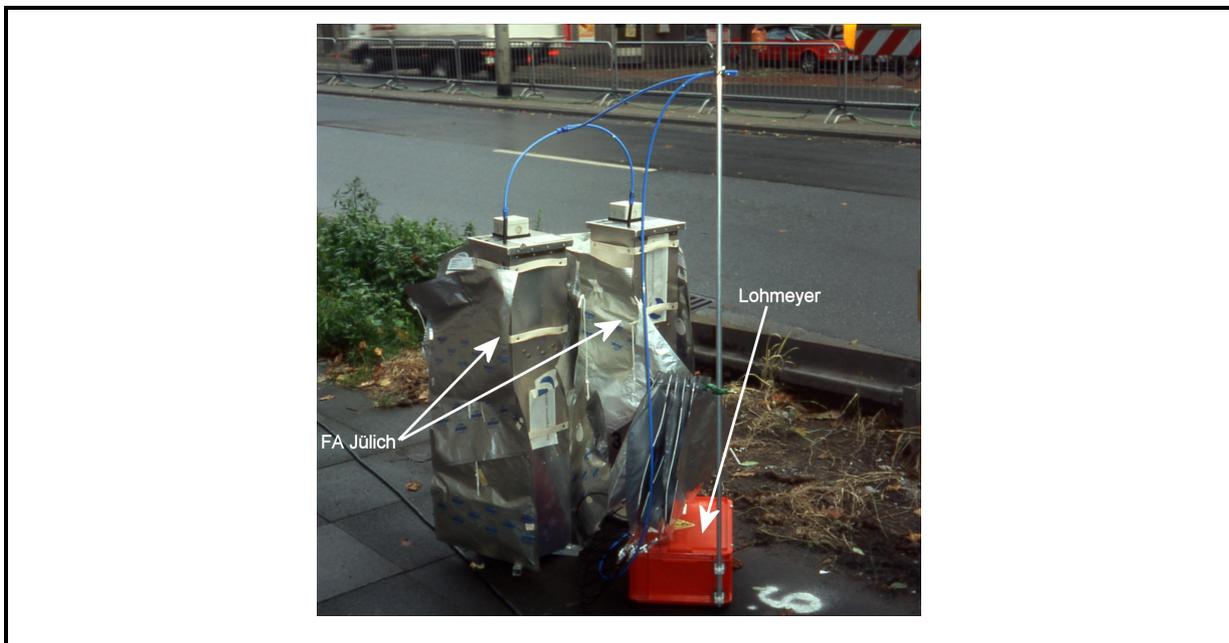


Abb. 4.13: Ansicht der Probensammler der Forschungsanlage Jülich und der Fa. Ingenieurbüro Lohmeyer bei der Station HRV1

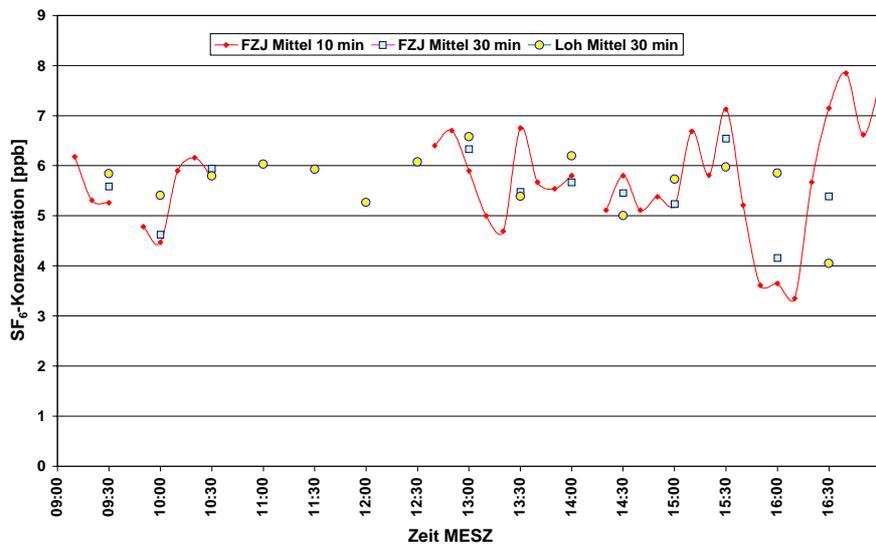


Abb. 4.14: Gemessene Zeitreihen der Tracergaskonzentrationen Messpunkt HRV1 mit unterschiedlichen Probensammlern und unterschiedlichen Analysegeräten

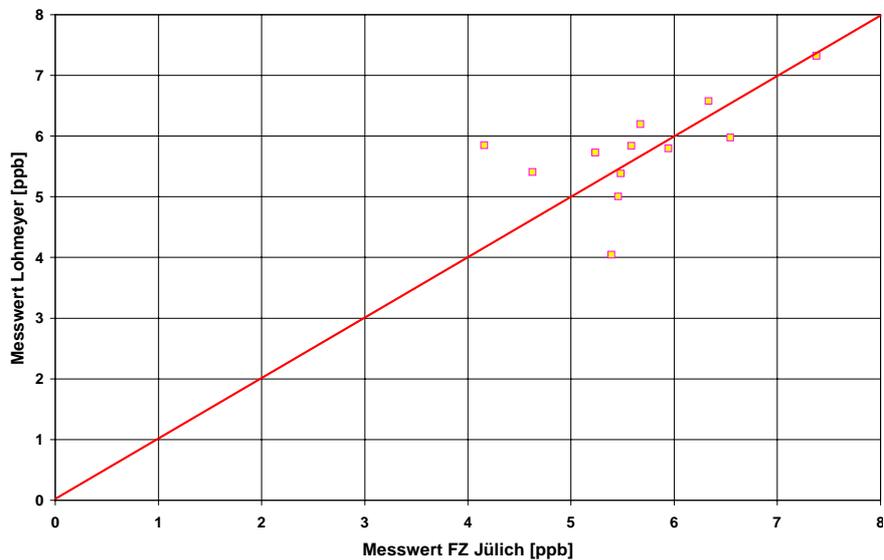


Abb. 4.15: Vergleich zwischen den Messergebnissen unterschiedliche Sammel- und Analysenverfahren am Messpunkt HRV1

## 5 DURCHFÜHRUNG DER MESSUNGEN

### 5.1 Auswahl der Messtage

Bei der Auswahl der Messtage wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern Vorgaben bzw. Randbedingungen definiert. Für die praktische Durchführung der Feldexperimente wurde jeweils ein ausreichend großes Zeitfenster vorgesehen, um diese Randbedingungen möglichst erfüllen zu können.

Während der Vorbereitung der Feldexperimente wurden die folgenden Anforderungen an die meteorologische Situation gestellt:

- ⇒ Kein Niederschlag
- ⇒ Windrichtungen bevorzugt aus Süd bis West sowie aus Ost
- ⇒ Windgeschwindigkeit möglichst zwischen 3 und 8 m/s an der Station HRSW in 42 m Höhe
- ⇒ konvektionsschwache, näherungsweise neutrale Wetterlagen

Im Laufe des Projekts wurden diese Forderungen teilweise aufgehoben. So wurde z.B. an einem Messtag auch bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten bzw. auch bei anderen Windrichtungen gemessen, um Effekte wie z.B. der verkehrserzeugten Turbulenz oder der Endlichkeit der Linienquelle im Experiment genauer betrachten zu können.

### 5.2 Messtage

Es wurden an insgesamt 8 Tagen Experimente durchgeführt. Das erste Experiment war als Vorversuch deklariert. Eine Zusammenstellung der Experimente mit den meteorologischen Randbedingungen zeigt **Tab. 5.1**.

#### 5.2.1 Vorexperiment

Nach Abschluss der vorbereitenden Arbeiten wurde am 08.08.2001 ein Vorexperiment durchgeführt. Ziel war dabei, die eigentlichen Experimente soweit vorzubereiten und den Ablauf zu optimieren, dass beim Hauptexperiment keine unvorhergesehenen Pannen eintreten. Es wurde daher eine Versuchsreihe komplett mit allen beteiligten Projektpartnern durchgeführt. Es wurde die SF<sub>6</sub>-Quelle vor Ort installiert und die SF<sub>6</sub>-Konzentrationsmeseinrichtung getestet.

Das Experiment lief von 10 Uhr MEZ bis 15 Uhr MEZ. Die Windrichtung an der Station HRSW über Dach lag zwischen 218 Grad und 245 Grad. Die Windgeschwindigkeiten über Dach lagen zwischen 11.5 m/s zu Beginn und ca. 6 m/s am Ende des Messintervalls. Der Vorversuch verlief erfolgreich.

| Experiment | Datum    | mittlere Windrichtung [Grad] | mittlere Windgeschw. [m/s] | Standardabw. Windrichtung [Grad] | Standardabw. Windgeschw. [m/s] | Messhöhe [m] |
|------------|----------|------------------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------|
| 1          | 08.08.01 | 233                          | 8.5                        | 7.2                              | 1.6                            | 42           |
| 2          | 07.08.02 | 351                          | 2.8                        | 16.3                             | 0.6                            | 42           |
| 3          | 23.10.02 | 259                          | 6.2                        | 8.9                              | 0.8                            | 42           |
| 4          | 24.10.02 | 252                          | 6.1                        | 7.8                              | 1.6                            | 42           |
| 5          | 25.10.02 | 171                          | 5.8                        | 9.4                              | 1.2                            | 42           |
| 6          | 26.10.02 | 260                          | 9.8                        | 3.0                              | 1.7                            | 42           |
| 7          | 11.04.03 | 246                          | 5.3                        | 9.4                              | 1.1                            | 42           |
| 8          | 23.04.03 | 55                           | 1.5                        | 50.9                             | 0.6                            | 42           |

Tab. 5.1: Durchgeführte Experimente und meteorologische Daten

Aufbauend auf den Erfahrungen aus dem Vorexperiment wurden an insgesamt 7 weiteren Tagen Tracergasexperimente durchgeführt. Es wurden insgesamt über eine Zeitdauer von 50 Stunden Tracergasmessungen durchgeführt. Die wichtigsten Anmerkungen zu den einzelnen Versuchstagen sind nachfolgend ausgeführt.

### 5.3 Hauptexperimente

#### Messung 07.08.2002

Der 07.08.2002 war ein Mittwoch mit normalem Verkehrsaufkommen. Das Experiment begann um 8 Uhr MEZ und endete um 15 Uhr MEZ. Die Temperatur über Dach lag zwischen 19 und 24 Grad C. Die Windrichtung schwankte zwischen 328 Grad und 20 Grad. Die Windgeschwindigkeit nahm während des Messzeitraumes zu von anfangs ca. 2.4 m/s auf über 3.5 m/s.

#### Messung 23.10.2002

Der 23.10.2002 war ebenfalls ein Mittwoch. Die Tracermessung begann um 13 Uhr MEZ und endete um 17 Uhr MEZ. Die mittlere Temperatur während des Messzeitraums lag bei ca. 11 Grad. Die Windrichtung drehte von anfangs 260 Grad zunächst auf 277 Grad und dann

entgegen bis 248 Grad. Die in diesem Messzeitraum erfassten Windgeschwindigkeiten über Dach lagen zwischen 5.2 m/s und 7.6 m/s.

### **Messung 24.10.2002**

Am Donnerstag, den 24.10.2002 begannen die Messungen um 9 Uhr MEZ und dauerten bis 17 Uhr MEZ. Die mittlere Temperatur lag bei 10 Grad C. Die Windrichtung drehte während des Experiments von Anfangs 248 Grad auf ca. 228 Grad. Die Windgeschwindigkeit über Dach sank von anfangs über 7 m/s auf ca. 3 m/s ab.

### **Messung 25.10.2002**

Am Freitag, den 25.10.2002 starteten die Messungen um 13 Uhr und endeten um 17 Uhr. Die mittlere Temperatur lag während des Messzeitraumes im Mittel bei ca. 13 Grad. An diesem Tag lag eine Südströmung vor mit Windrichtungen über Dach zwischen 158 und 181 Grad. Die Windgeschwindigkeiten schwankten zwischen 4.4 m/s und 7.4 m/s.

### **Messung 26.10.2002**

Am Samstag, den 26.10.2002 lag deutlich weniger Verkehr in der Göttinger Straße vor. Die Messungen dauerten von 11 Uhr MEZ bis 17 Uhr MEZ. Die mittlere Temperatur während diese Zeitraums lag bei ca. 12 Grad C. Die Windrichtung schwankte zwischen 256 Grad und 263 Grad. Die Windgeschwindigkeit über Dach sank von anfangs 12 m/s auf ca. 8 m/s am Ende des Messzeitraums.

### **Messung 11.04.2003**

Der 11.04.2003 war ein Freitag. An diesem Tag wurde um 9 Uhr MEZ mit den Messungen begonnen, das Ende lag um 17 Uhr MEZ. Die mittlere Temperatur in diesem Zeitintervall betrug ca. 7.2 Grad. Die Windrichtung in 42 m Höhe lag zwischen 234 Grad und 269 Grad. Die Windgeschwindigkeit fiel an diesem Tag von anfangs ca. 6.8 m/s auf ca. 3 m/s am Ende ab.

### **Messung 23.04.2003**

Am Mittwoch, den 23.04.2003 erfolgte die letzte Messkampagne. Die mittlere Temperatur während des Messzeitraums lag bei ca. 20 Grad. In diesem Zeitraum herrschte eine Nordnordostströmung über Dach vor, die Windrichtung variierte zwischen 310 und 143 Grad. Die Windgeschwindigkeit stieg von ca. 1.3 m/s zu Messbeginn auf ca. 3.4 m/s zu Messende.

## 6 ERGEBNISSE

Ziel der vorliegenden Studie ist die Erstellung eines Validierungsdatensatzes. Die Einzelergebnisse der verschiedenen Experimente sind als Datensatz in Kap. 7 aufgeführt und über das Datenbankprogramm ValiData eingebettet in alle anderen gemessenen Daten des Verbundprojektes VALIUM verfügbar. Im vorliegenden Kapitel werden die Messergebnisse zusammenfassend ausgewertet dargestellt und einzelne Schwerpunktthemen detaillierter betrachtet.

### 6.1 Windrichtung und Windgeschwindigkeit

Die an den Versuchstagen vorliegenden Windrichtungen und Windgeschwindigkeiten sind in den **Abb. 6.1** bis **6.4** dargestellt. Das Zeitfenster für die eigentlichen SF<sub>6</sub>-Messungen ist jeweils markiert, die Freisetzung des SF<sub>6</sub>-Tracergases war bereits 30 bis 60 Minuten früher. Die in den Abbildungen gemachten Angaben beziehen sich immer auf die Messstation HRSW in 42 m Höhe. Die Zeitachse bezieht sich auf MEZ. Die Windmessungen aus dem Straßenraum an den Stationen HRV1, HRV2, HRV3 und anderen, während der Tracermessungen zeitlich begrenzt betriebenen Anemometer sowie die Ergebnisse der beiden entfernteren Stationen HRV4 und HRV5 innerhalb der Bebauung können der Datenbank VALIDATA entnommen werden.

### 6.2 Tracergaskonzentrationen

#### 6.2.1 Darstellung der Konzentrationen in der Datenbank

Die Ergebnisse der gemessenen Tracergaskonzentrationen sind in der Datenbank als normierte Konzentrationen der Form  $c/q$  [ $s/m^2$ ] dargestellt. Dabei ist  $q$  die längenbezogene Quellstärke, die sich aus der Quellstärke in  $l$  SF<sub>6</sub>/h dividiert durch die Quelllänge berechnet.

Beispiel: Die gemessene SF<sub>6</sub>-Konzentration beträgt 1 ppb, die Quellstärke liegt bei 3  $l$  SF<sub>6</sub>/h und die Quelllänge beträgt 96 m. Daraus ergibt sich eine normierte Konzentration  $c/q$  von  $1.15 \cdot 10^{-1} s/m^2$ .

Die in der Datenbank angegebenen Messzeiten sind jeweils bezogen auf MEZ. Die Lage der Messpunkte ist in der **Abb. 4.1** definiert. Es wurde nicht immer an allen Messpunkten gemessen. Die im einzelnen Experiment tatsächlich bestückten Messpunkte sind im jeweiligen Datenblatt angegeben.

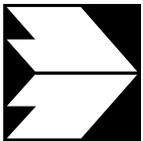
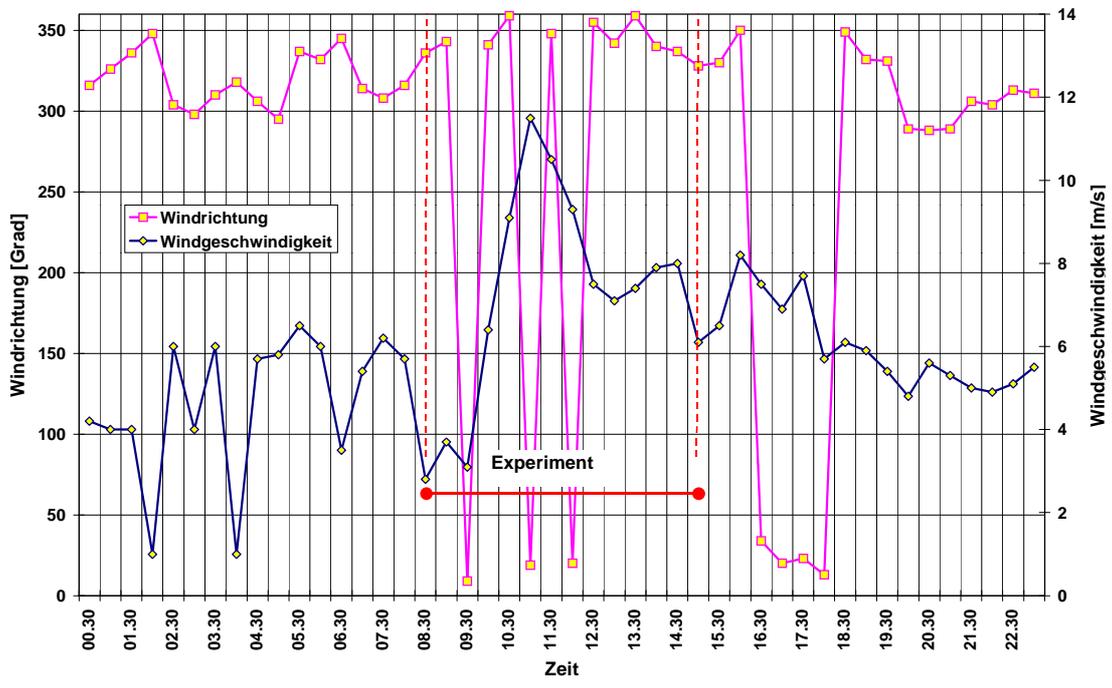
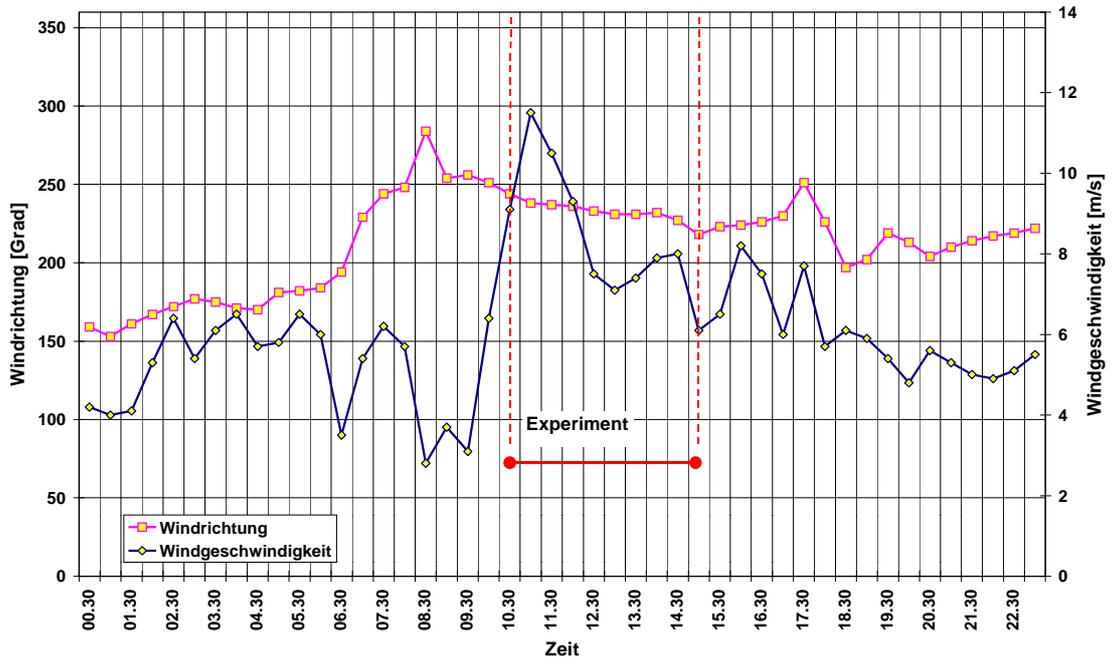


Abb. 6.1: Windrichtung und Windgeschwindigkeit während der Tracergasmessungen  
 oben: am 8.8.2001  
 unten: am 7.8.2002

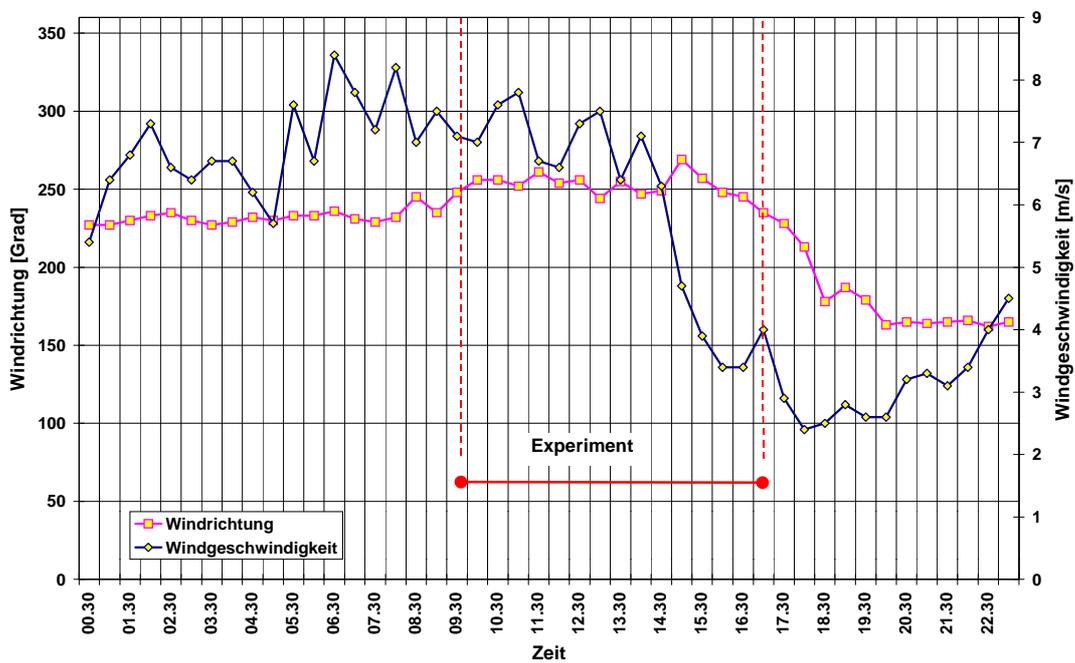
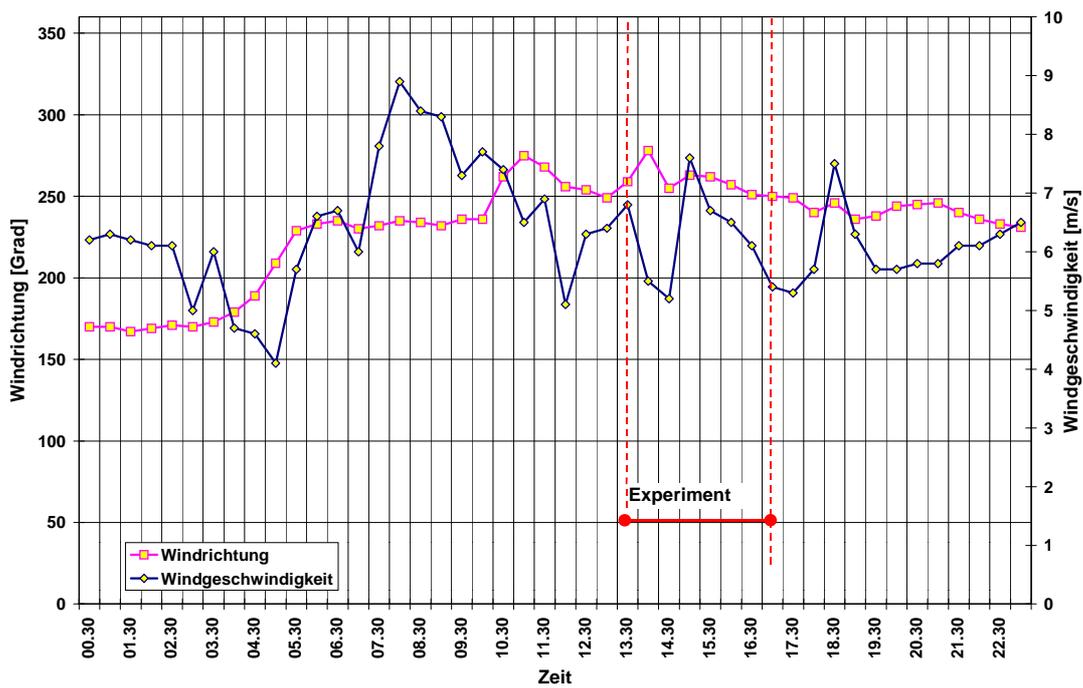


Abb. 6.2: Windrichtung und Windgeschwindigkeit während der Tracergasmessungen  
oben: am 23.10.2002  
unten: am 24.10.2002

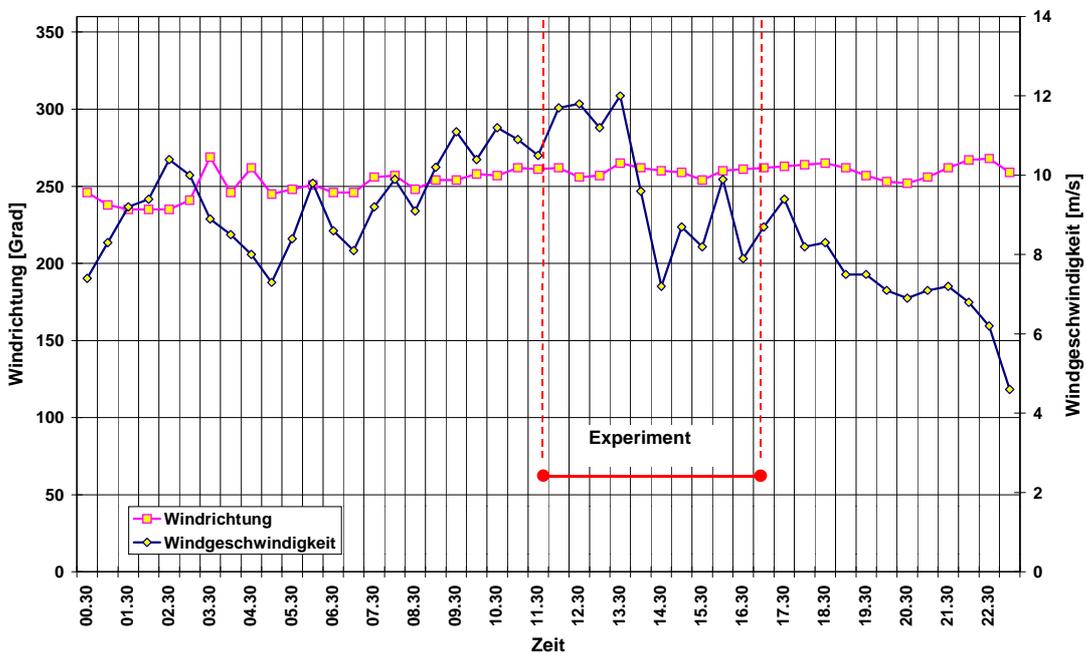
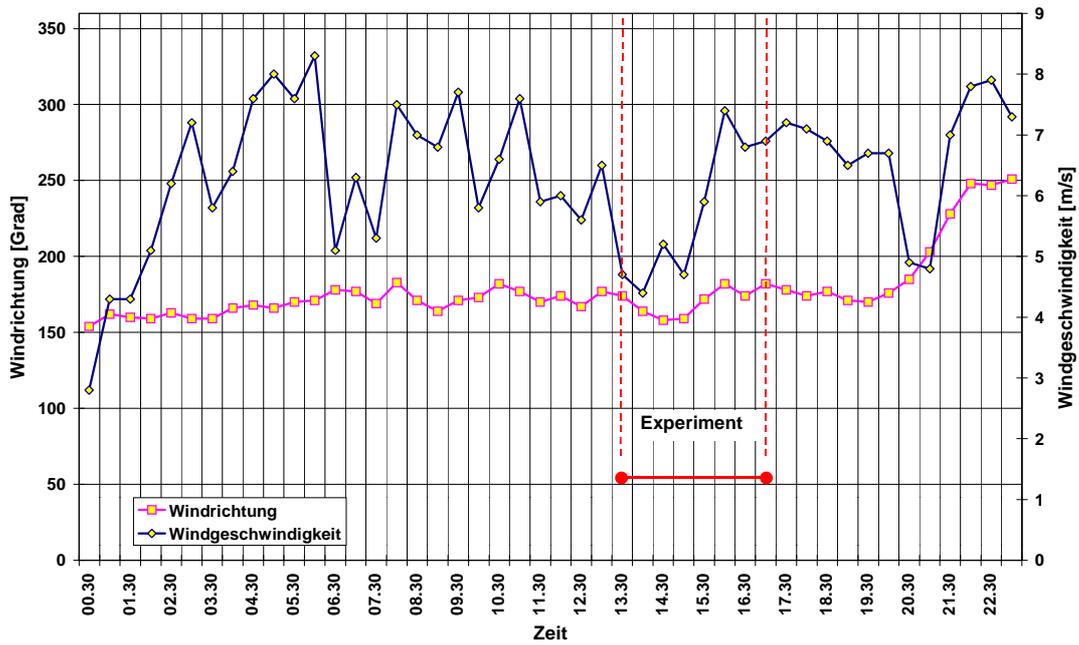


Abb. 6.3: Windrichtung und Windgeschwindigkeit während der Tracergasmessungen  
oben: am 25.10.2002  
unten: am 26.10.2002

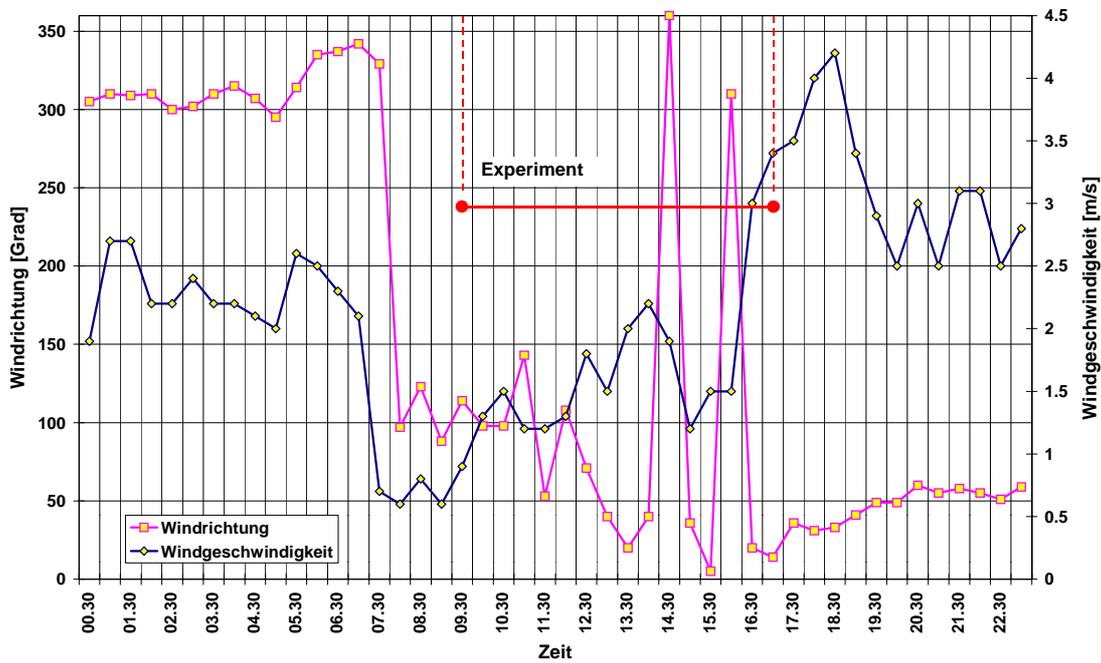
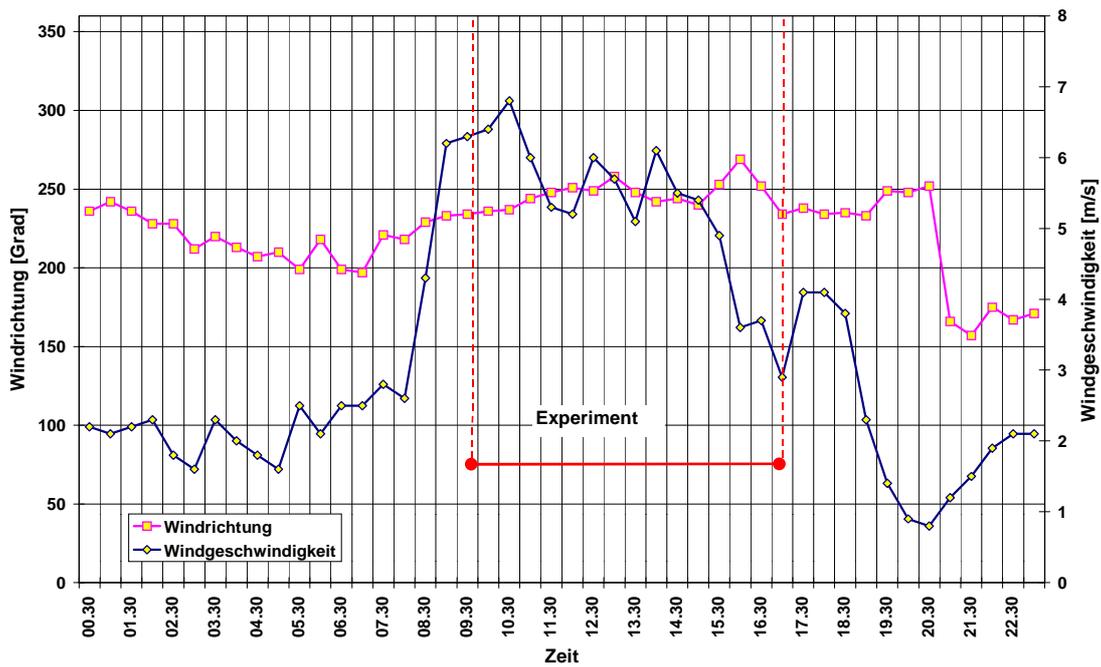


Abb. 6.4: Windrichtung und Windgeschwindigkeit während der Tracergasmessungen  
 oben: am 11.04.2003  
 unten: am 23.04.2003

## 6.2.2 Gemessene Konzentrationen

Die gemessenen Konzentrationen wurden Plausibilitätstests unterzogen. Diese beinhalteten die Überprüfung der Zeitreihen an einzelnen Messpunkten sowie der Vergleich mit anderen Messpunkten und den längenmittelnden Messungen in Teilprojekt TP4 (s. Schäfer et al., 2004). Ergaben sich aus diesen Tests und Vergleichen Unstimmigkeiten, wurde die entsprechende B-Probe nachanalysiert und ebenfalls den Tests unterzogen. Lag keine B-Probe vor oder ergab die Nachmessung keine plausiblen Werte, wurde der Messwert eliminiert, d.h. für diesen Messpunkt und das entsprechende Messintervall existiert kein Konzentrationswert.

In den **Abb. 6.5** bis **6.12** sind die Konzentrationsverläufe während der einzelnen Versuchstage dargestellt. Dabei wurde für jeden Versuchstag unterschieden nach den Konzentrationswerten auf der West- und Ostseite. Bei einer Anströmung aus West sind die Konzentrationswerte auf Grund der Walzenströmung im Straßenraum auf der Westseite wesentlich höher als auf der Ostseite. Diese Verhältnisse gelten für die Experimente 1, 3, 4, 6 und 7 aus **Tab. 5.1**. Bei einer Ostströmung in Überdachniveau liegen entsprechend umgekehrte Verhältnisse vor, d.h. hohe Konzentrationswerte an der Ostseite und niedrigere Werte an der Westseite. Dies gilt für das Experiment 8 in **Tab. 5.1**. Bei straßenparalleler Anströmung liegen die Konzentrationen auf beiden Straßenseiten auf ähnlichem Konzentrationsniveau, dies gilt z.B. für Experiment 5 aus **Tab. 5.1**.

Die dargestellten Zeitreihen für die verschiedenen Messpunkte zeigen insgesamt einen homogenen Verlauf. Die oftmals befürchteten großen Schwankungen der Konzentrationswerte aufgrund des begrenzten Mittelungsintervalls von 30 Minuten stellten sich nicht ein.

## 6.3 Vergleich der Tracergaskonzentrationen mit den Konzentrationen anderer Schadstoffe

Für die Experimente wurde die beschriebene linienförmige Quelle mit dem Tracergas  $\text{SF}_6$  betrieben. Gegenüber den realen Schadstoffen, deren linienförmige Freisetzung bei geraden Straßen sehr lang ist, handelt es sich bei der Tracergasquelle um eine wesentlich kürzere Quelle. Es ist zu erwarten, dass bei nahezu rechtwinkliger Anströmung der Straßenschlucht der Unterschied der gemessenen Immissionswerte für  $\text{SF}_6$  und einem realen Schadstoff eher gering ist, während bei straßenparalleler Anströmung größere Abweichungen zu erwarten sind. Der Vergleich ist gleichzeitig auch ein Maß für die Aussagekraft der Messungen. Betrachtet seien hier anlehnend an die Auswertungen von Kühlwein et al. (2004) die beiden Messstationen HRV1 und HRV3, die beide entsprechenden Abstand zu den beiden Enden der Tracergasquelle aufweisen und der Schadstoff  $\text{NO}_x$ , ausgewiesen als  $\text{NO}_2$ .

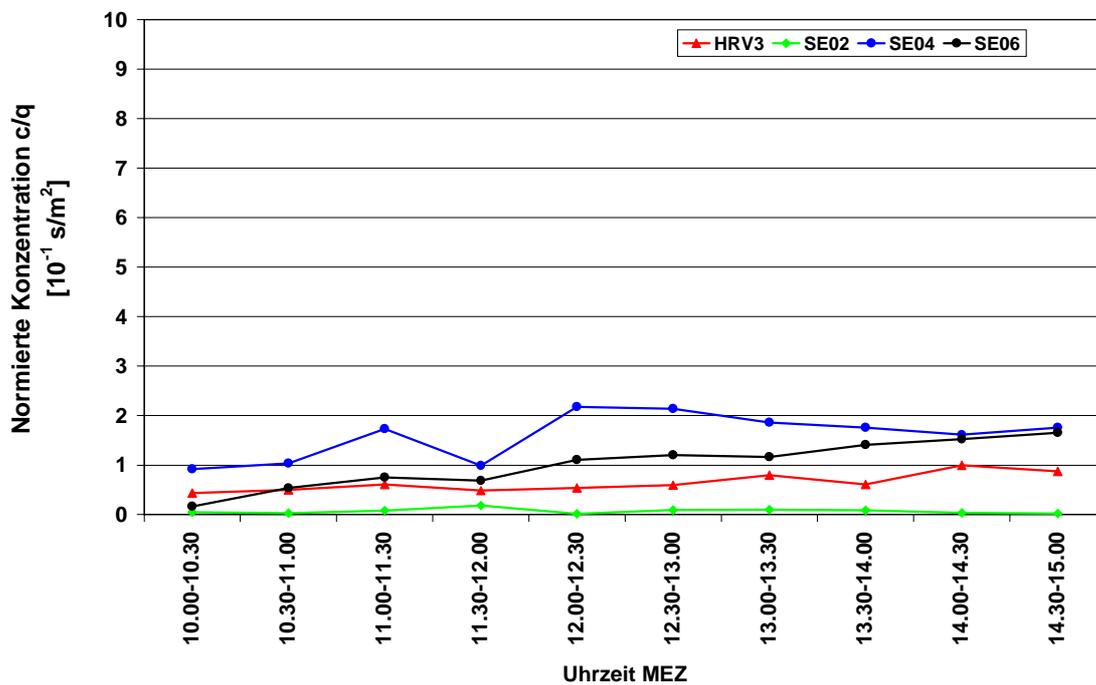
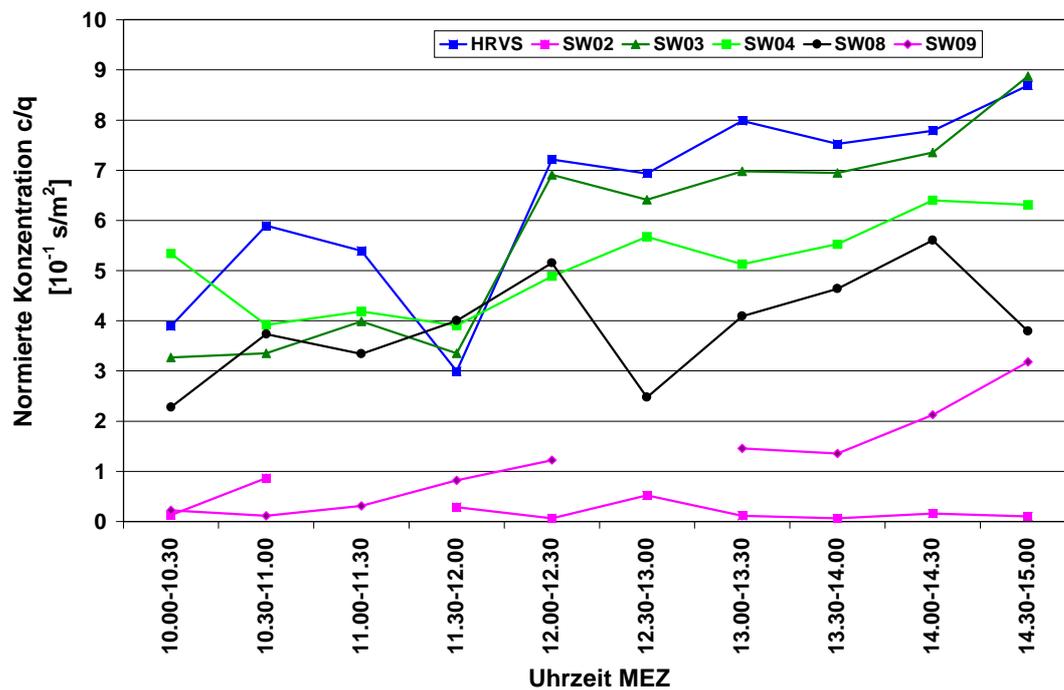


Abb. 6.5: Normierte Konzentration  $c/q$  gemessen am 8.8.2001 in der Göttinger Straße  
oben: Westseite  
unten: Ostseite

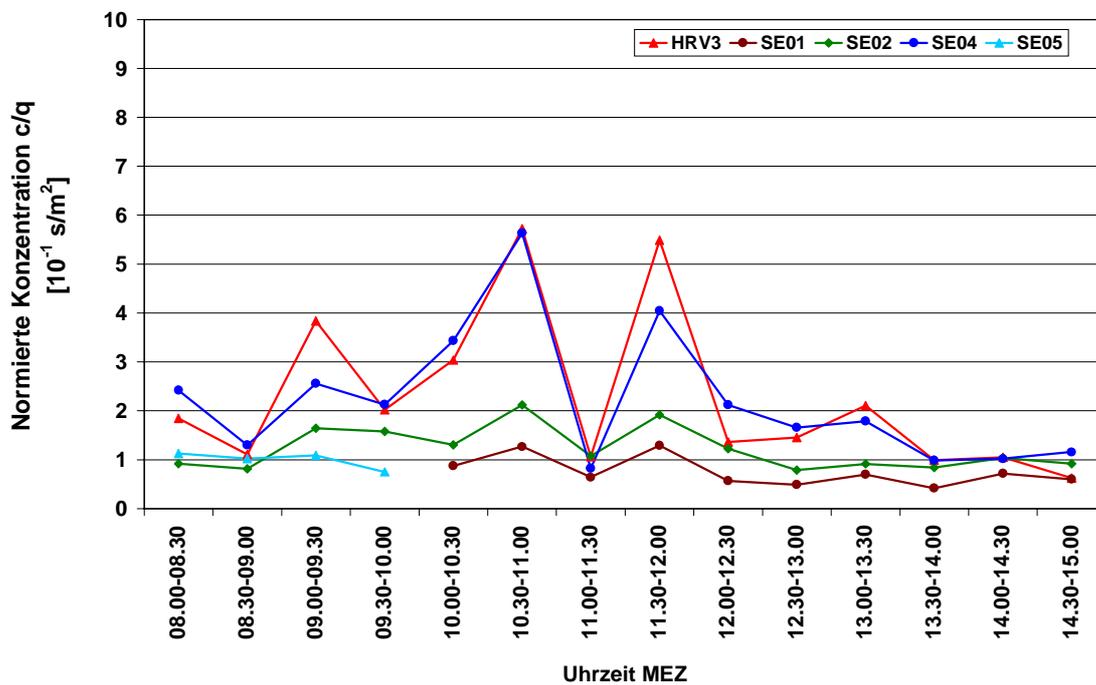
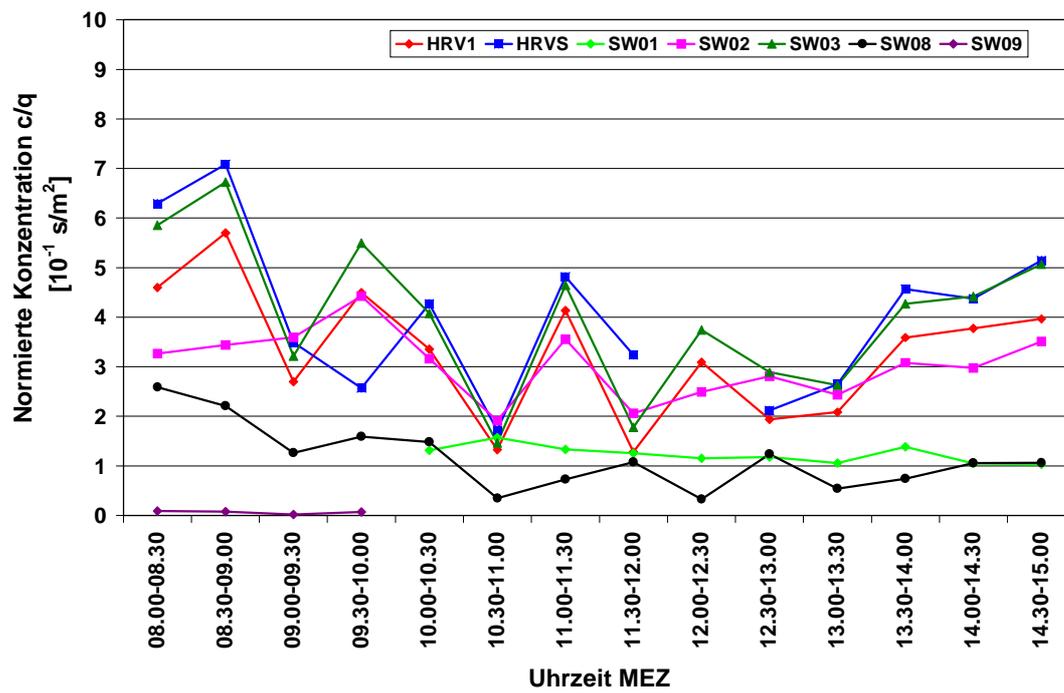


Abb. 6.6: Normierte Konzentration  $c/q$  gemessen am 7.8.2002 in der Göttinger Straße  
oben: Westseite  
unten: Ostseite

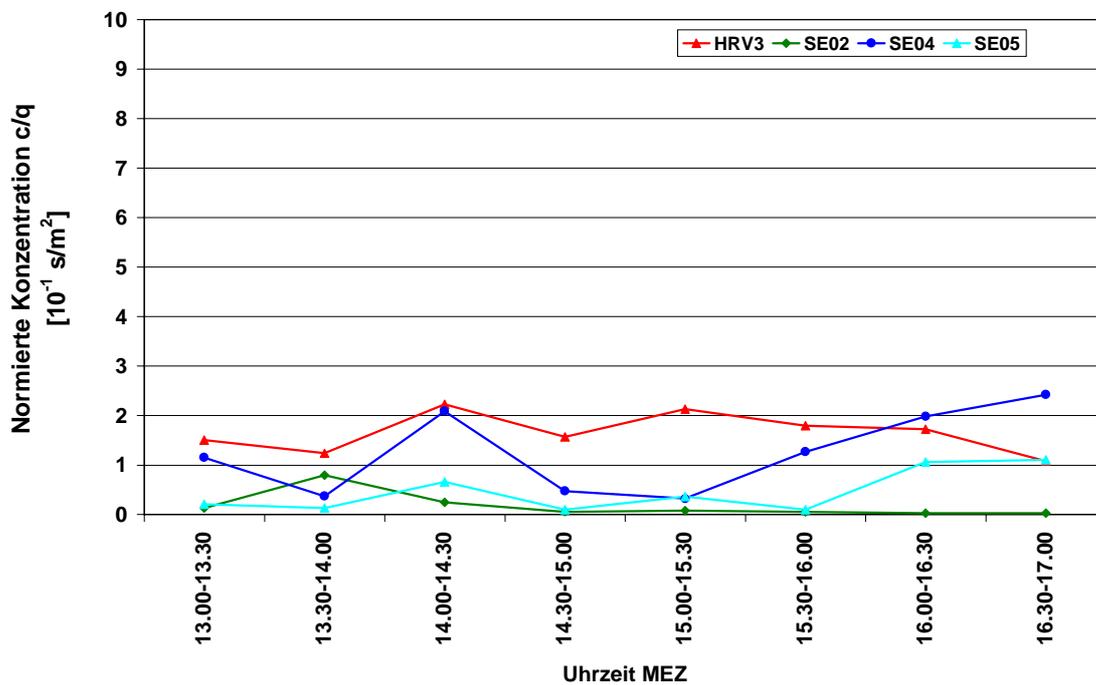
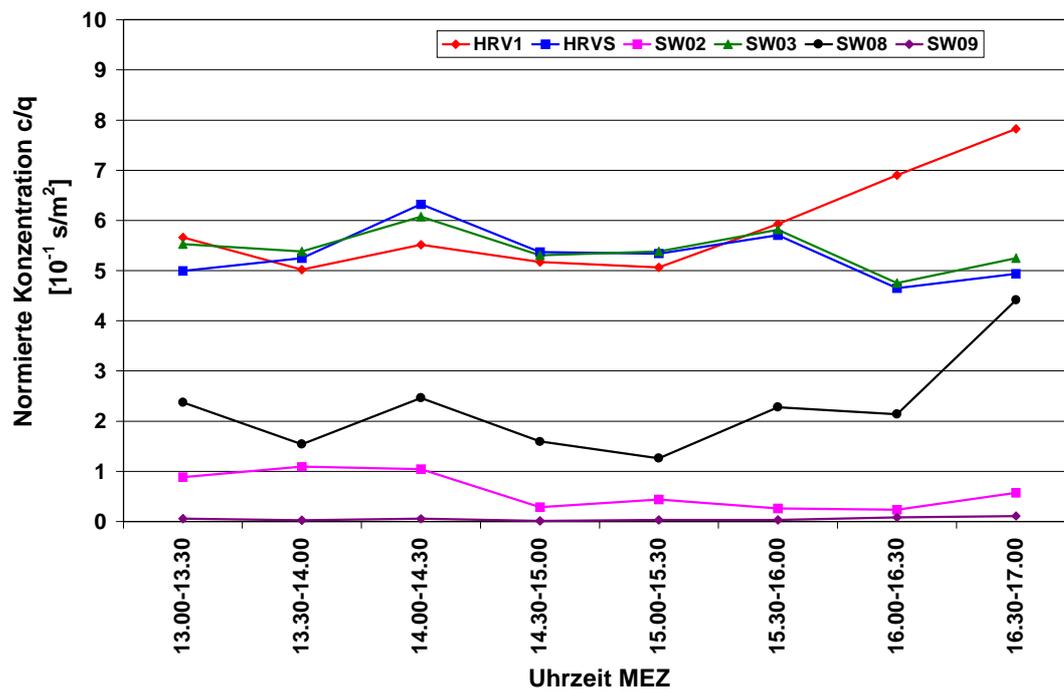


Abb. 6.7: Normierte Konzentration  $c/q$  gemessen am 23.10.2002 in der Göttinger Straße  
oben: Westseite  
unten: Ostseite

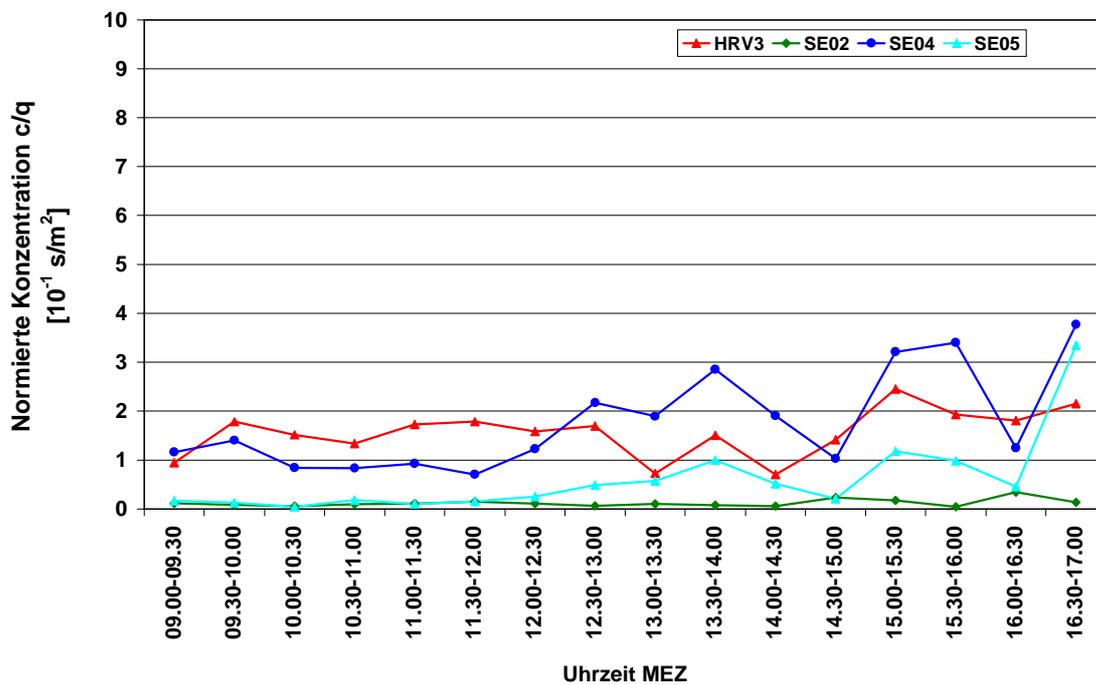
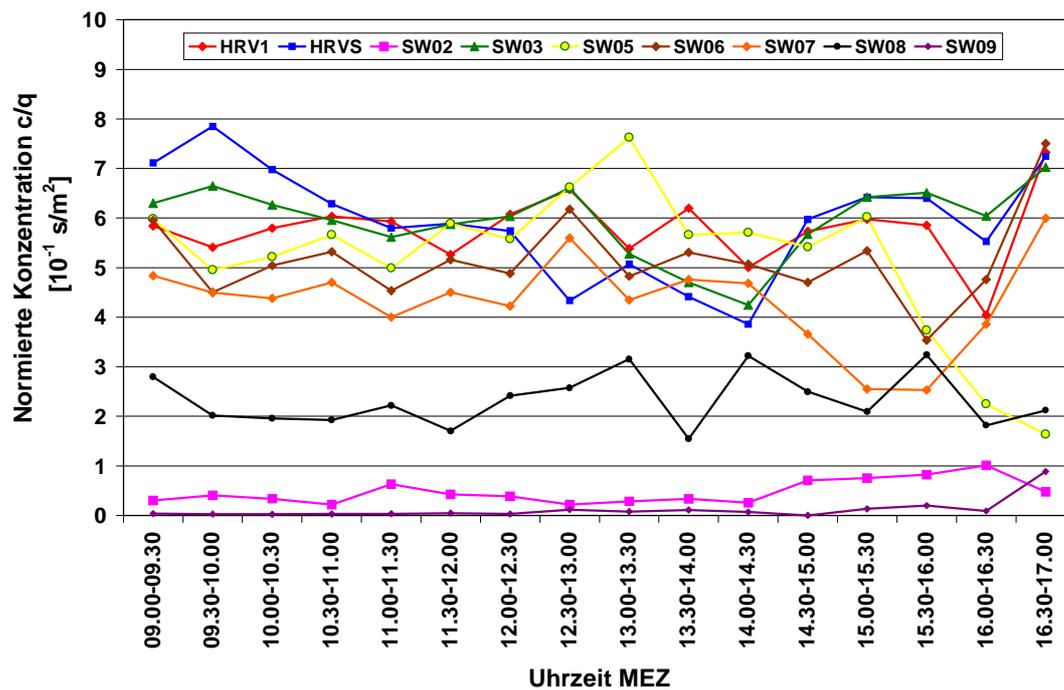


Abb. 6.8: Normierte Konzentration  $c/q$  gemessen am 24.10.2002 in der Göttinger Straße  
oben: Westseite  
unten: Ostseite

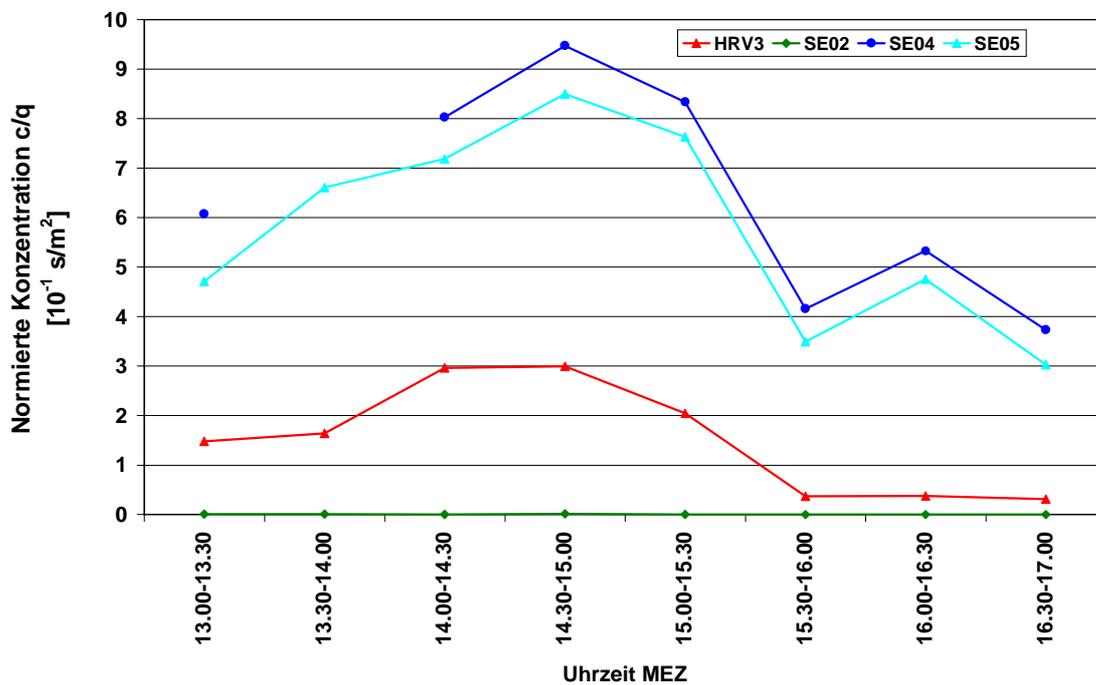
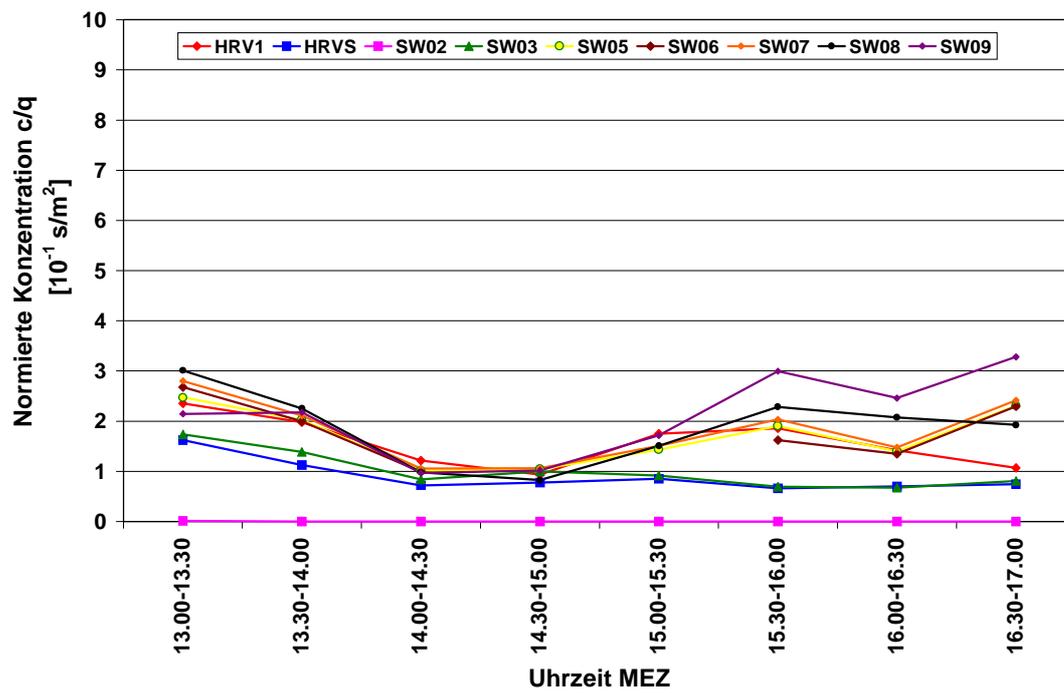


Abb. 6.9: Normierte Konzentration  $c/q$  gemessen am 25.10.2002 in der Göttinger Straße  
oben: Westseite  
unten: Ostseite

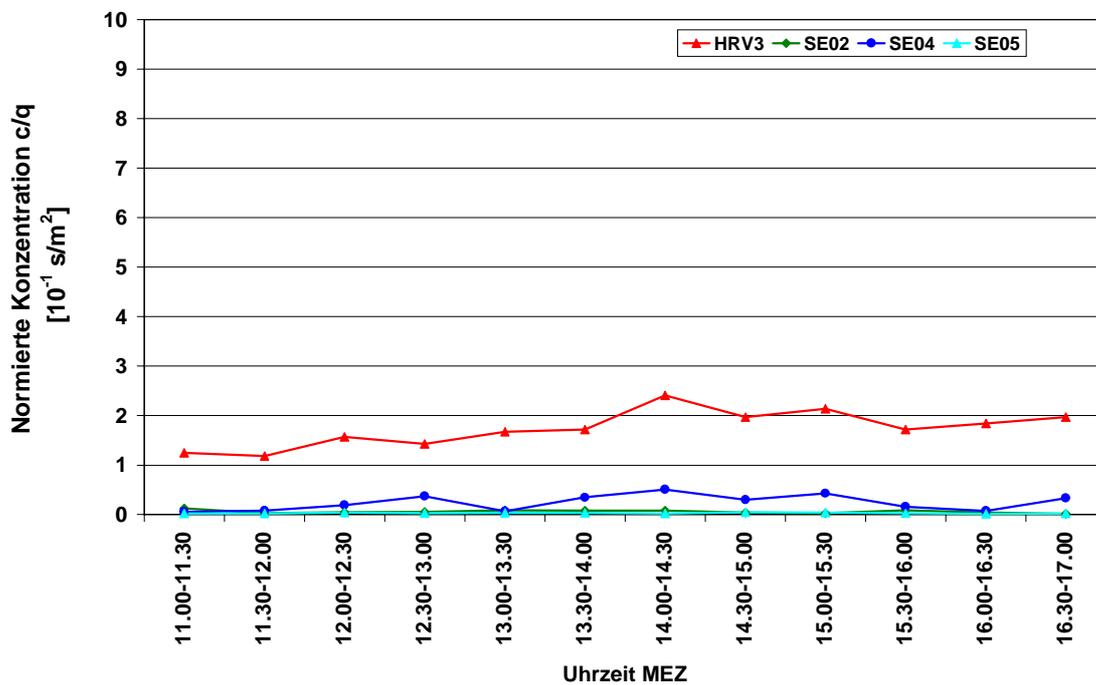
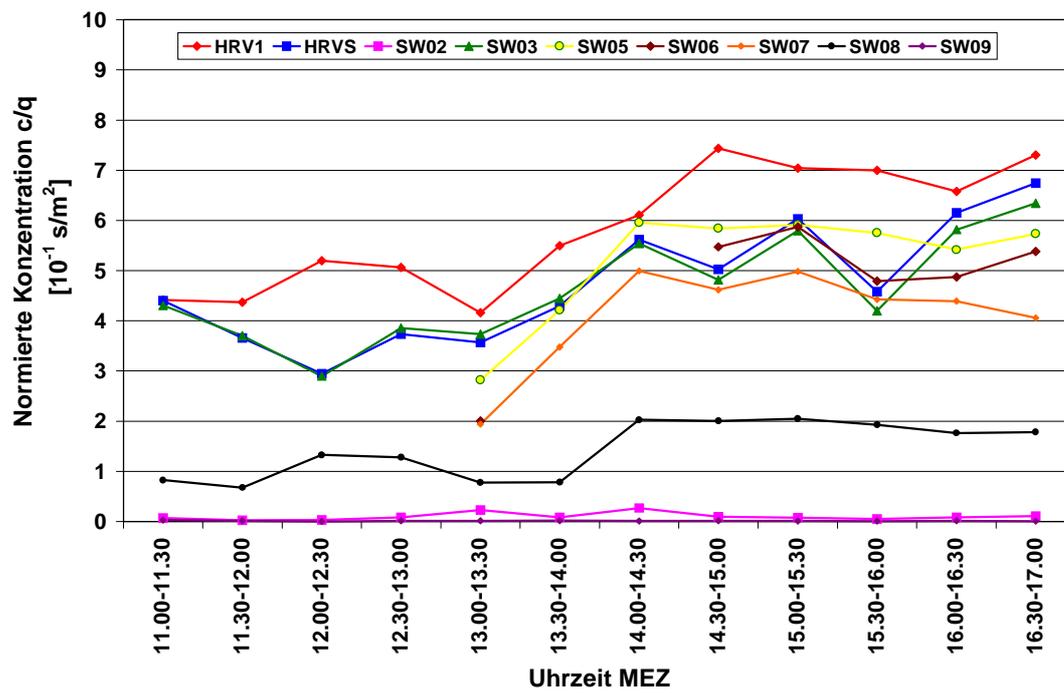


Abb. 6.10: Normierte Konzentration  $c/q$  gemessen am 26.10.2002 in der Göttinger Straße  
oben: Westseite  
unten: Ostseite

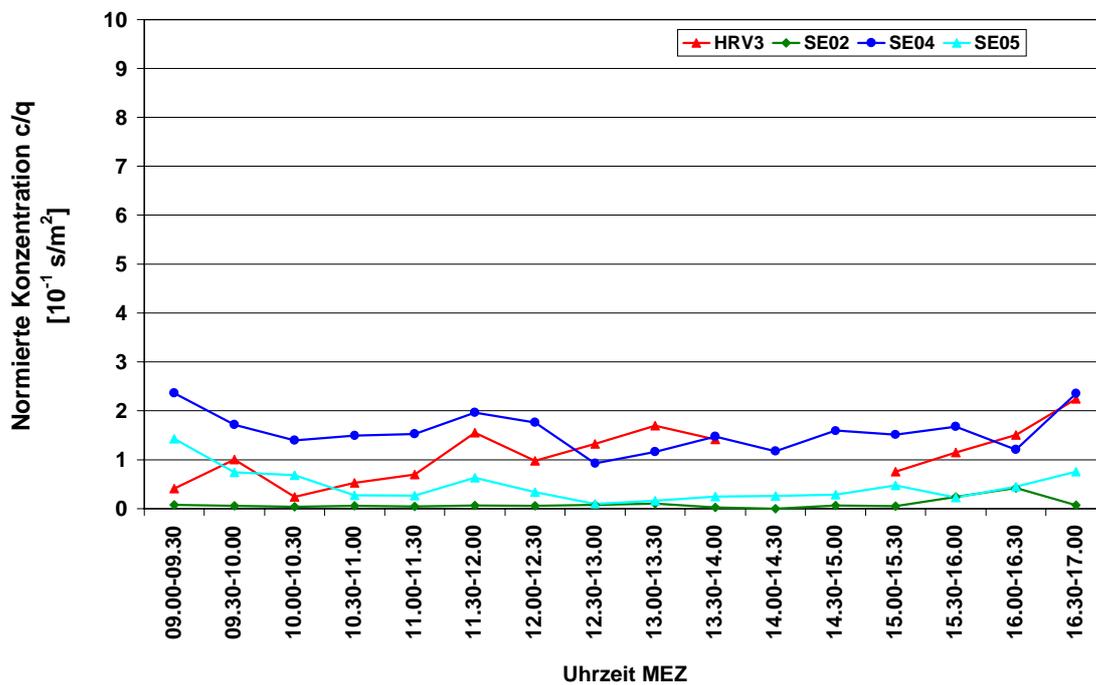
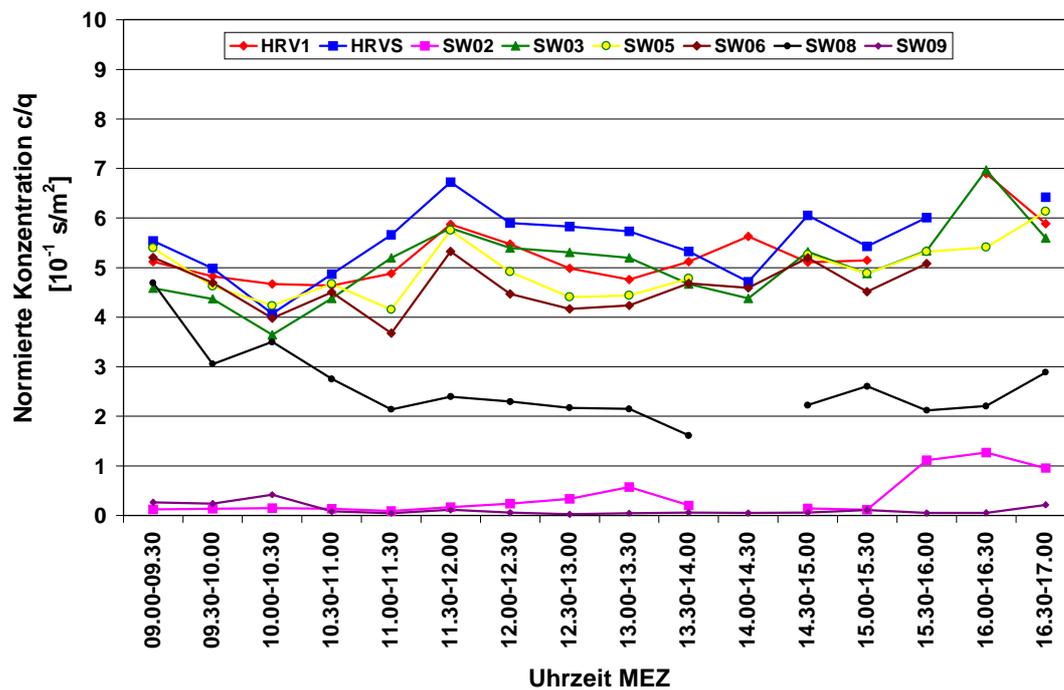


Abb. 6.11: Normierte Konzentration  $c/q$  gemessen am 11.4.2003 in der Göttinger Straße  
oben: Westseite  
unten: Ostseite

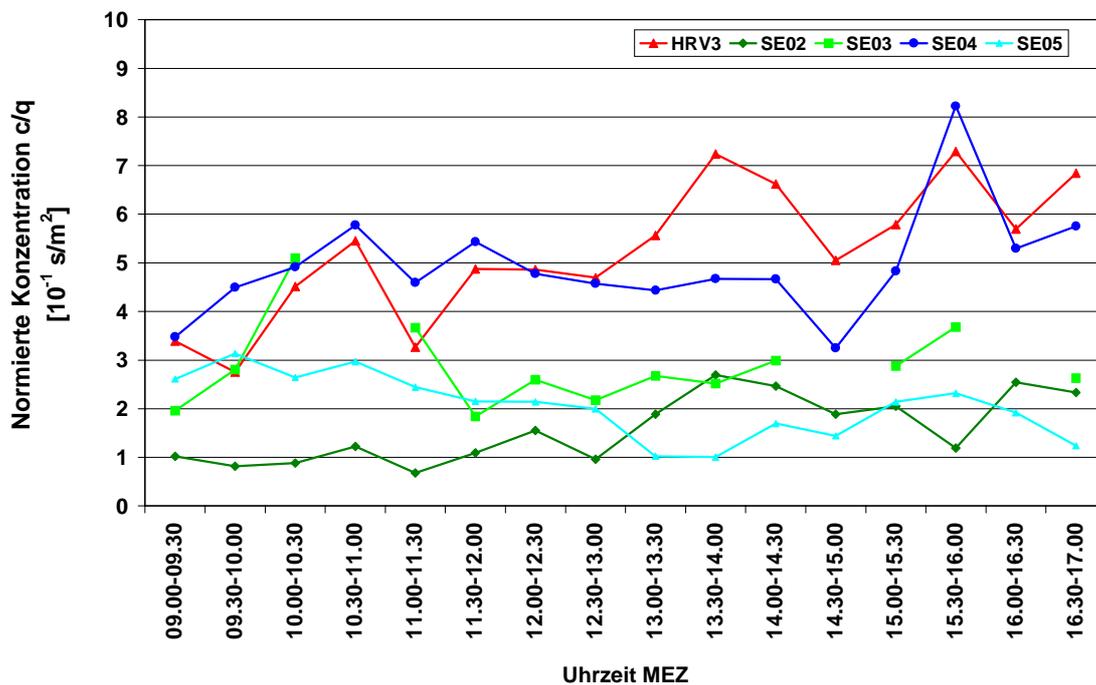
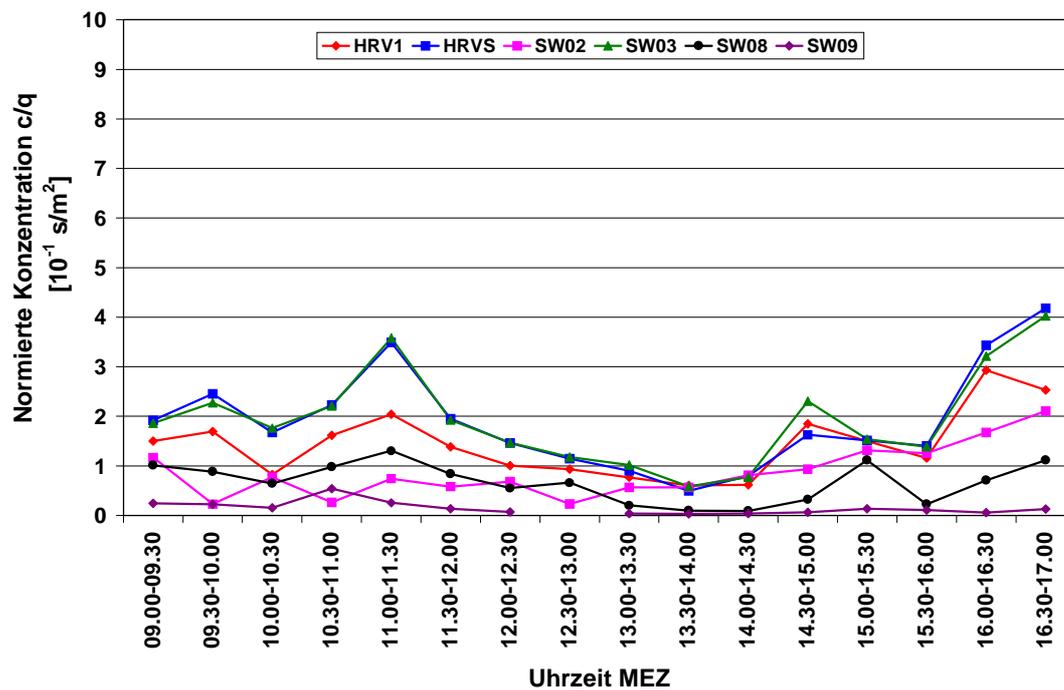


Abb. 6.12: Normierte Konzentration  $c/q$  gemessen am 23.4.2003 in der Göttinger Straße  
oben: Westseite  
unten: Ostseite

In **Abb. 6.13** ist der Vergleich der Verhältnisse Emissionsrate/Immissionskonzentration für den Schadstoff  $\text{NO}_x$  und das Tracergas  $\text{SF}_6$  dargestellt. Die Anströmrichtung liegt hier im westlichen Sektor, betrachtet wird der Messpunkt HRV1. Die Modell-Emissionsrate für  $\text{NO}_x$  wurde nach dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (UBA, 1999) bestimmt. Es zeigt sich, dass die berechneten Verhältnisse für  $\text{NO}_x$  und für das Tracergas in den meisten Fällen befriedigend übereinstimmen. Im Vergleich dazu zeigt **Abb. 6.14** die entsprechenden Verhältnisse für den gegenüber liegenden Messpunkt HRV3. Hier ergeben sich für das Tracergas teilweise höhere Verhältnisse, d.h. die gemessenen  $\text{SF}_6$ -Konzentrationen sind eher zu klein. Dies könnte ein Indiz dafür sein, dass aufgrund der größeren Nähe des Straßenverkehrs und damit der  $\text{NO}_x$ -Quelle zum Aufpunkt diese Abgase zum Teil direkt zum Aufpunkt transportiert werden, während das Tracergas  $\text{SF}_6$  vollständig in die in der Straßenschlucht vorliegende Strömungswalze eingemischt wird.

Die Ergebnisse für eine straßenparallele Anströmung sind in **Abb. 6.15** und **Abb. 6.16** dargestellt. Hier weichen für beide Messstationen die für das Tracergas ermittelten Verhältnisse stark von dem für das Schadgas  $\text{NO}_x$  ermittelten Verhältnis ab. Die unterschiedlichen Quelllängen werden hier deutlich sichtbar. Während beim Schadstoff  $\text{NO}_x$  aufgrund der großen Quelllänge kleine Windrichtungsänderungen kaum zu Änderungen der Konzentrationen führen reagiert das  $\text{SF}_6$ -Signal wesentlich stärker.

#### **6.4 Endlichkeit der $\text{SF}_6$ -Linienquelle**

Wie bereits erwähnt, ergeben sich auf Grund der kürzeren Ausdehnung der Tracergasquelle gegenüber dem tatsächlichen Emissionsband auf Grund der Kfz gewisse Unterschiede. Für die Verwendung dieses Datensatzes als Validierungsdatensatz muss daher die Länge der Quelle berücksichtigt werden. In Kap. 6.3 wurde gezeigt, dass prinzipiell das Ausbreitungsverhalten des Tracergases mit dem der Schadstoffe vergleichbar ist.

Wie zuvor bereits erwähnt, ergeben sich bei straßenparalleler Anströmung die größten Abweichungen, bei senkrechter Anströmung der Straßenschlucht waren die Abweichungen vergleichsweise gering. Aufgrund der Endlichkeit der Quelle ergeben sich längs der Straße unterschiedliche Verteilungen. Während bei einer sehr langen Quelle in einer Straßenschlucht ohne Querstraßen homogene Verteilungen entlang der Straßen zu erwarten sind, ergeben sich bei einer begrenzten Länge deutliche Konzentrationsverteilungen entlang der Straße.

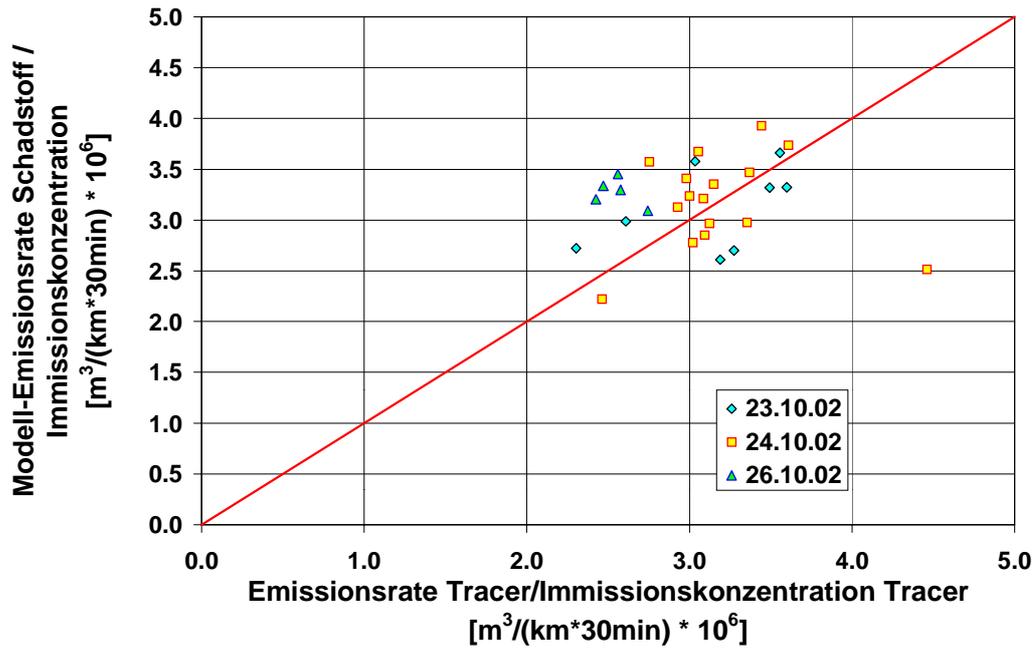


Abb. 6.13: Vergleich der Verhältnisse Emissionsrate / Immissionskonzentration für den Schadstoff NO<sub>x</sub> und für das Tracergas SF<sub>6</sub>. Messtation HRV1, Anströmung aus westlichem Sektor

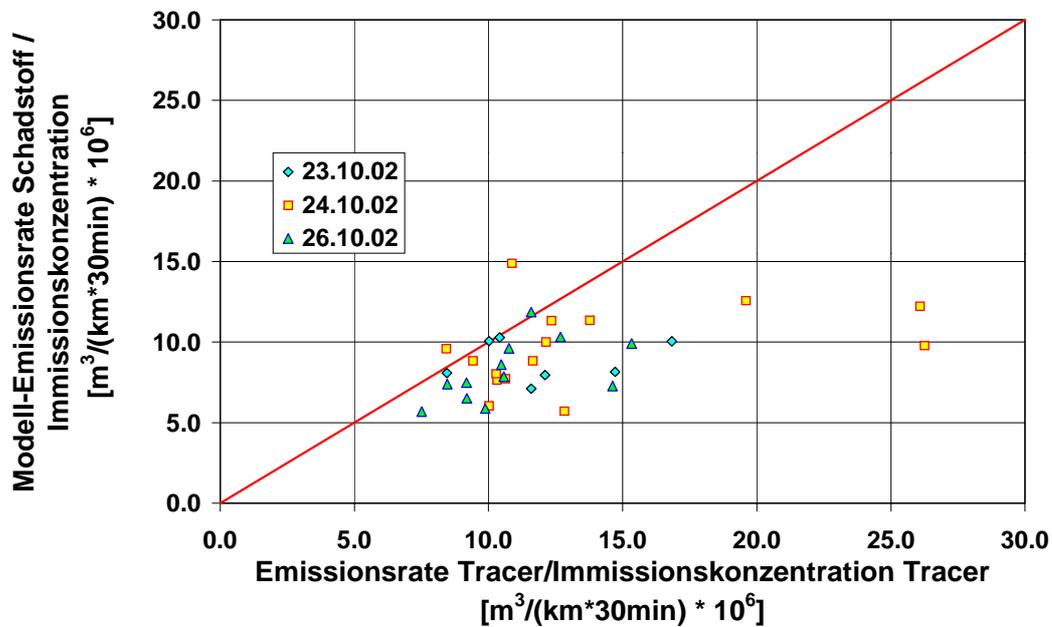


Abb. 6.14: Vergleich der Verhältnisse Emissionsrate / Immissionskonzentration für den Schadstoff NO<sub>x</sub> und für das Tracergas SF<sub>6</sub>. Messtation HRV3, Anströmung aus westlichem Sektor

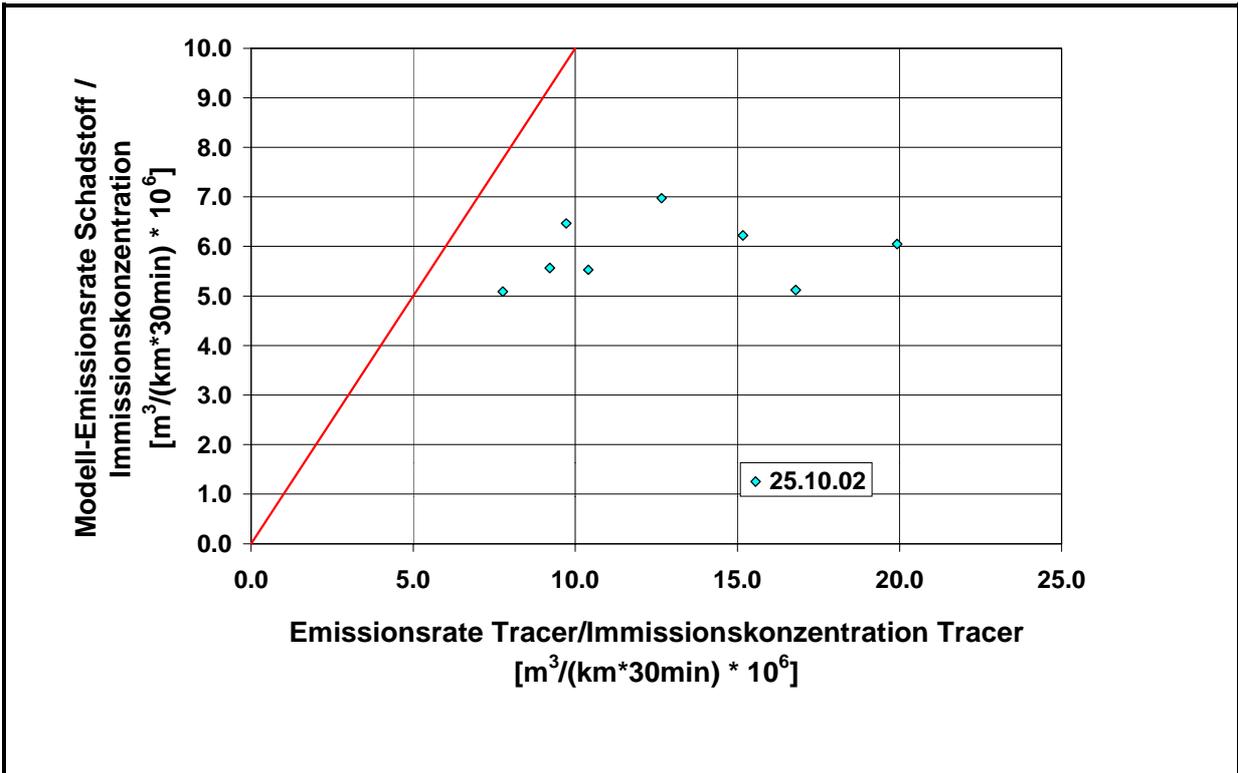


Abb. 6.15: Vergleich der Verhältnisse Emissionsrate / Immissionskonzentration für den Schadstoff NOx und für das Tracergas SF6. Messstation HRV1, Anströmung aus südlichem Sektor

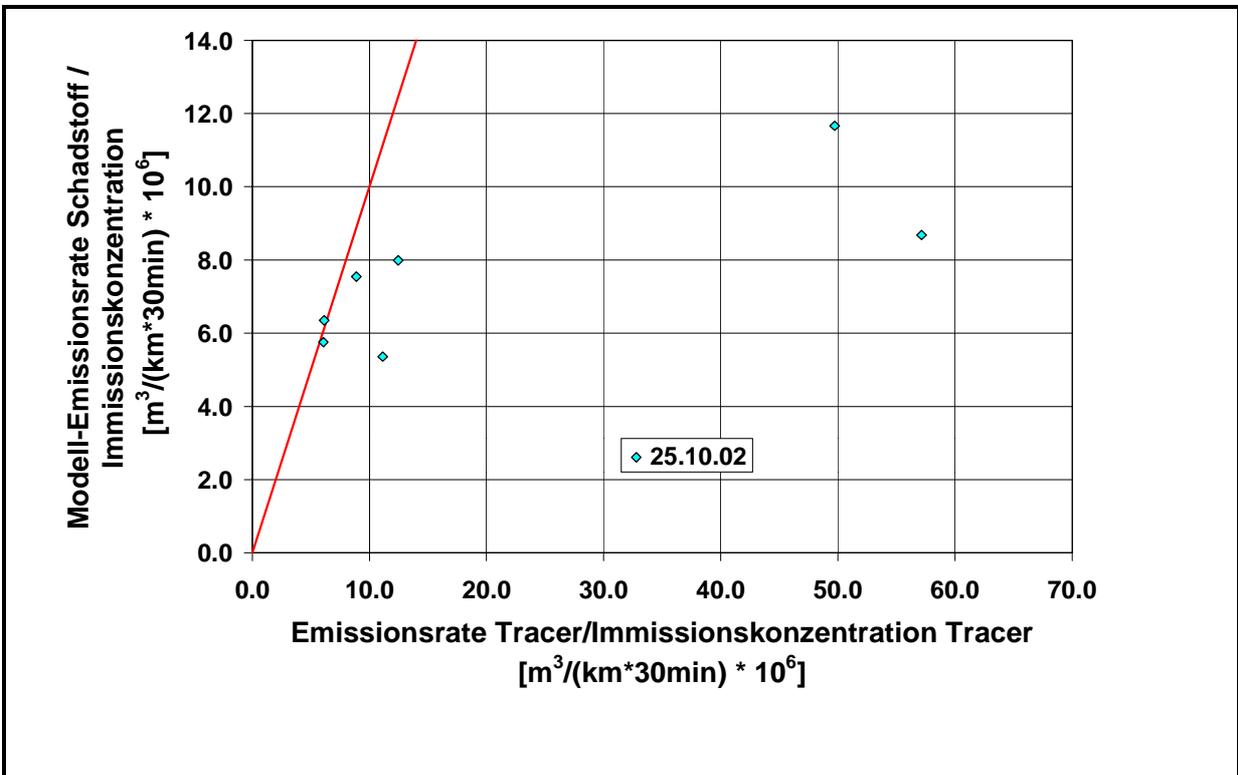


Abb. 6.16: Vergleich der Verhältnisse Emissionsrate / Immissionskonzentration für den Schadstoff NOx und für das Tracergas SF6. Messstation HRV3, Anströmung aus südlichem Sektor

Bei der Auswertung der Konzentrationsmessungen zeigten sich deutliche Verteilungen entlang der Straßenseiten wie exemplarisch in **Abb. 6.17** für den Messtag 11.04.2003 gezeigt. Bei senkrechter Anströmung zeigten sich zudem deutliche Verschiebungen der Konzentrationsprofile an den beiden Straßenseiten. Auf der Westseite ist eine Verschiebung in Richtung Süden, auf der Ostseite in Richtung Norden zu erkennen, also entsprechend der beiden Fahrrichtungen. Die Längenangaben sind auf den Messpunkt SW09 bezogen. Der Versatz der Konzentrationsprofile ist deutlich zu erkennen.

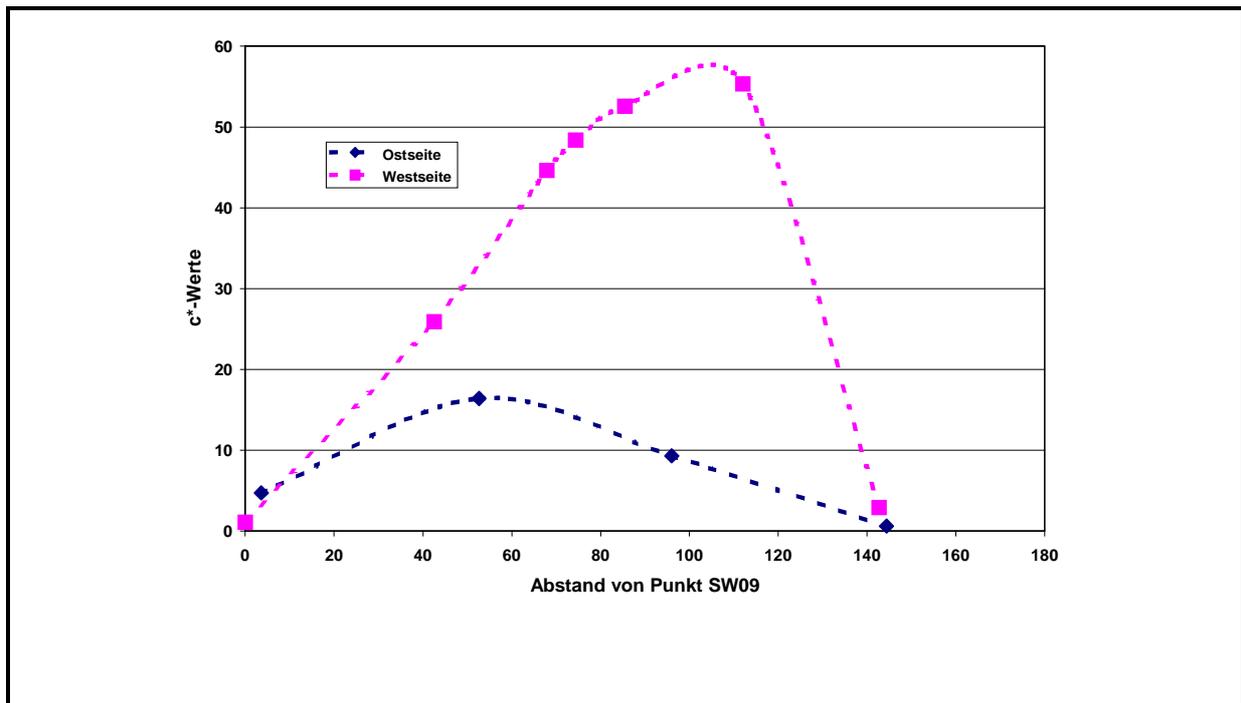


Abb. 6.17: Konzentrationsprofile entlang der beiden Straßenseiten erfasst am 11.04.2003

### 6.5.1 Definition von $c^*$

Als eingeführte Größe zur normierten Darstellung von Ergebnissen aus Konzentrationsmessungen gilt basierend auf einer Dimensionsanalyse die dimensionslose Konzentration  $c^*$ , die definiert ist als

$$c^* = \frac{c \cdot u \cdot H}{(Q/L)} = f \left( DD, \frac{l_i}{H}, Re, \frac{L_M}{H}, TIT \right) \quad (1)$$

wobei

|         |  |
|---------|--|
| c       | = gemessene Konzentration                                    |
| u       | = Windgeschwindigkeit  |
| H       | = charakteristische Gebäudeabmessung (z.B. Gebäudehöhe)      |
| Q       | = Quellstärke  |
| L       | = Quelllänge   |
| DD      | = Windrichtung   |
| $l/H$   | = normiertes Längenmaß                                       |
| Re      | = Reynoldszahl   |
| $L_M/H$ | = Monin-Obukhov Länge  |
| TIT     | = Kenngröße zur Erfassung der verkehrsinduzierten Turbulenz. |

Während für punktförmige Quellen dieses dargestellte  $c^*$ -Konzept anhand von Messungen bei geeigneten Randbedingungen überprüft und die Anwendbarkeit nachgewiesen wurde, stehen im Bereich des Straßenverkehrs derartige Nachweise noch aus. Hier liegt eine linienförmige Quelle vor, die Quellstärke ist nicht immer homogen und hinzu kommt der Einfluss der Turbulenz, die durch die fahrenden Fahrzeuge produziert wird.

Im Rahmen des Verbundprojektes VALIUM wurde anhand der durchgeführten Tracergasmessungen überprüft, inwieweit und in welchen Bereichen das bisherige  $c^*$ -Konzept anwendbar ist.

### 6.5.2 Darstellung $c^*$ -Werte für Schadstoff $\text{NO}_x$

In Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt TP5 (s. Kühlwein et al., 2004) wurden für das Jahr 2002 die  $c^*$ -Werte für den Schadstoff  $\text{NO}_x$  an der Messstation HRV1 berechnet. Die **Abb. 6.18** oben zeigt die  $c^*$ -Werte dargestellt in Abhängigkeit von der Windrichtung an der Überdachstation HRSW. Es zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Anströmrichtung, die höchsten  $c^*$ -Werte werden bei Windrichtungen im Bereich zwischen 240 und 270 Grad gemessen. Betrachtet man nur die  $c^*$ -Werte tagsüber während der Zeit von 9 bis 17 Uhr MEZ, so ergeben sich deutlich niedrigere  $c^*$ -Werte, wie in **Abb. 6.18** unten gezeigt. Die hohen Werte vorwiegend in den Nachtstunden können durch Stabilitätseinflüsse in Kombination mit wenig Verkehr in der Nacht bedingt sein, andererseits ist die Emissionsmodellierung, die in den  $c^*$ -Wert direkt einfließt, bei nur wenigen Fahrzeugen u.U. stark fehlerbehaftet und kann zu entsprechenden Ausreißern führen.

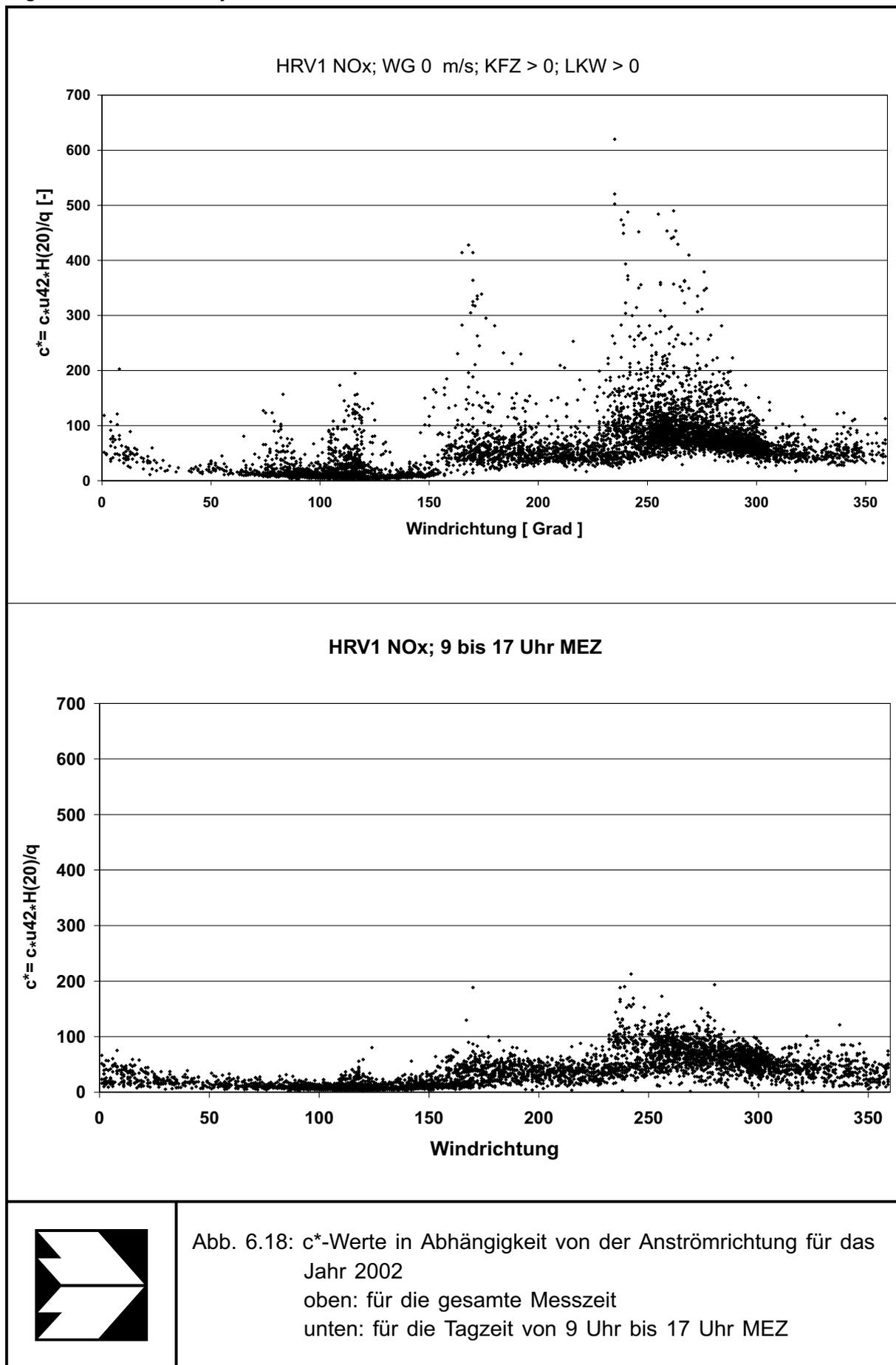


Abb. 6.18:  $c^*$ -Werte in Abhängigkeit von der Anströmrichtung für das Jahr 2002  
oben: für die gesamte Messzeit  
unten: für die Tagzeit von 9 Uhr bis 17 Uhr MEZ

Aus der Datenanalyse ergibt sich auch eine Abhängigkeit der  $c^*$ -Werte von der Anströmgeschwindigkeit  $u_{42}$  über Dach. **Abb. 6.19** oben zeigt alle ermittelten  $c^*$ -Werte für  $\text{NO}_x$  für das Jahr 2002 für die Zeit zwischen 9 und 17 Uhr MEZ. Betrachtet man nur die Fälle mit Windgeschwindigkeiten größer 4 m/s in 42 m Höhe so ergibt sich **Abb. 6.19** Mitte. Es ist deutlich zu erkennen, dass die niedrigen  $c^*$ -Werte eliminiert wurden. Beschränkt man die  $c^*$ -Werte auf die für Windgeschwindigkeiten größer 8 m/s in 42 m Höhe, so ergibt sich **Abb. 6.19** unten. Auch hier scheinen im wesentlichen wiederum nur die niedrigeren  $c^*$ -Werte zu fehlen. Dieser Effekt wird nachfolgend detaillierter betrachtet.

### 6.5.3 Darstellung $c^*$ Ergebnisse Tracermessungen

Die **Abb. 6.20** zeigt die  $c^*$ -Werte für die Station HRV1 gebildet für den Schadstoff  $\text{NO}_x$  für das Jahr 2002 und die Tageszeit zwischen 9 Uhr und 17 Uhr. Mit eingetragen sind die in diesem Zeitraum ermittelten  $c^*$ -Werte gebildet für den Tracer  $\text{SF}_6$ . Man kann erkennen, dass diese  $c^*$ -Werte im Bereich derer für  $\text{NO}_x$  liegen. Bei Parallelanströmung der Straße (Anströmrichtung  $\simeq 180$  Grad bzw.  $\simeq 360$  Grad) sind die mit  $\text{SF}_6$  gebildeten  $c^*$ -Werte niedriger, weil hier die Endlichkeit der Tracerquelle gegenüber der wesentlich größeren Quelllänge beim Straßenverkehr durchschlägt.

In **Abb. 6.21** sind die  $c^*$ -Werte in Abhängigkeit von der Tageszeit dargestellt. Es ist deutlich die große Streubreite in den Nachtstunden zu erkennen. In den Tagstunden zwischen 9 und 17 Uhr ist die Streubreite wesentlich kleiner. Auch hier ist zu erkennen, dass die  $c^*$ -Werte gebildet für das Tracergas  $\text{SF}_6$  die gesamte Bandbreite abdecken.

Bei der Betrachtung der Abhängigkeit der  $c^*$ -Werte von der Anströmwindgeschwindigkeit darf man nur einzelne Richtungssegmente vergleichen. **Abb. 6.22** zeigt exemplarisch die Ergebnisse für den Messpunkt HRV1 und den Windrichtungsbereich zwischen 260 und 280 Grad. Erst ab einer Windgeschwindigkeit von ca. 8 m/s über Dach zeigen die Messungen einen eindeutigen Abfall der mit der Quellstärke normierten Konzentration  $c/q$  mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Trägt man, wie in **Abb. 6.23**, dagegen die dimensionslose Größe  $c^*$  über der Windgeschwindigkeit  $u$  auf, so müssten nach Gl. (1) die  $c^*$ -Werte für alle Windgeschwindigkeiten konstant sein. Es zeigen sich aber stattdessen deutliche Zunahmen des  $c^*$ -Wertes mit zunehmender Windgeschwindigkeit bis ca. 8 bis 9 m/s für den exemplarisch ausgewählten Windrichtungsbereich 260 – 280 Grad. In **Abb. 6.24** sind die entsprechenden Ergebnisse für Windrichtungen zwischen 200 und 300 Grad zusammen gestellt. Auf Grund dieses großen Windrichtungsektors sind auch entsprechende Schwankungen im Betrag des  $c^*$ -Wertes zu erwarten.

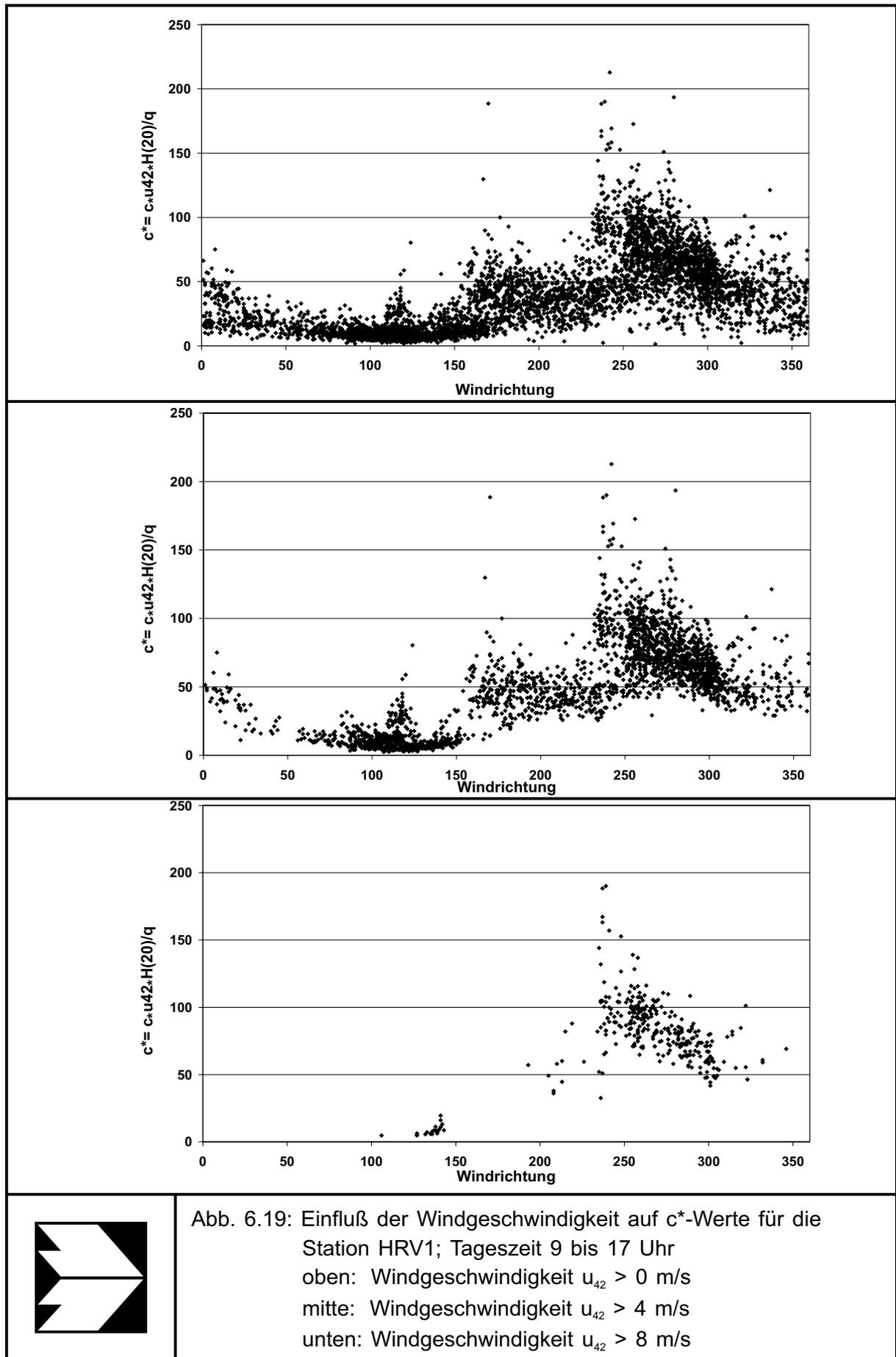
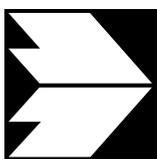
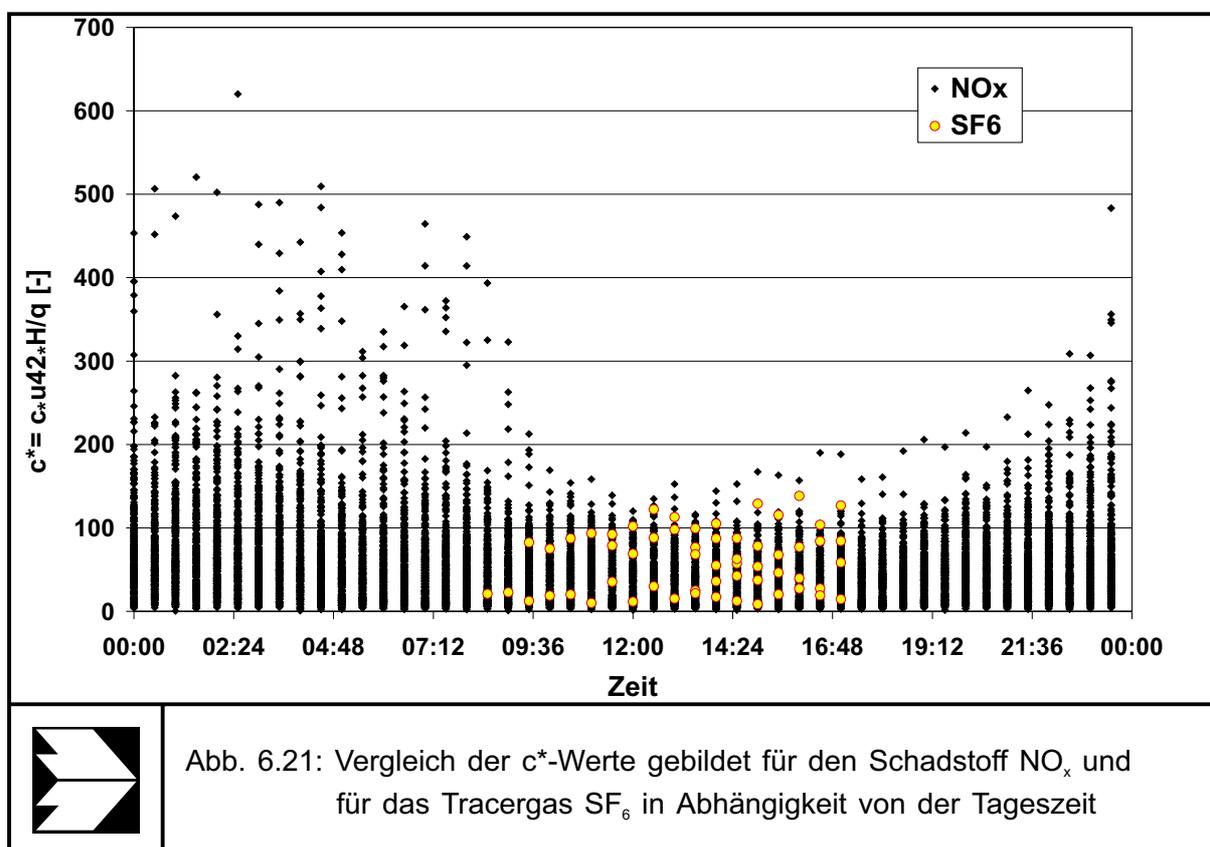
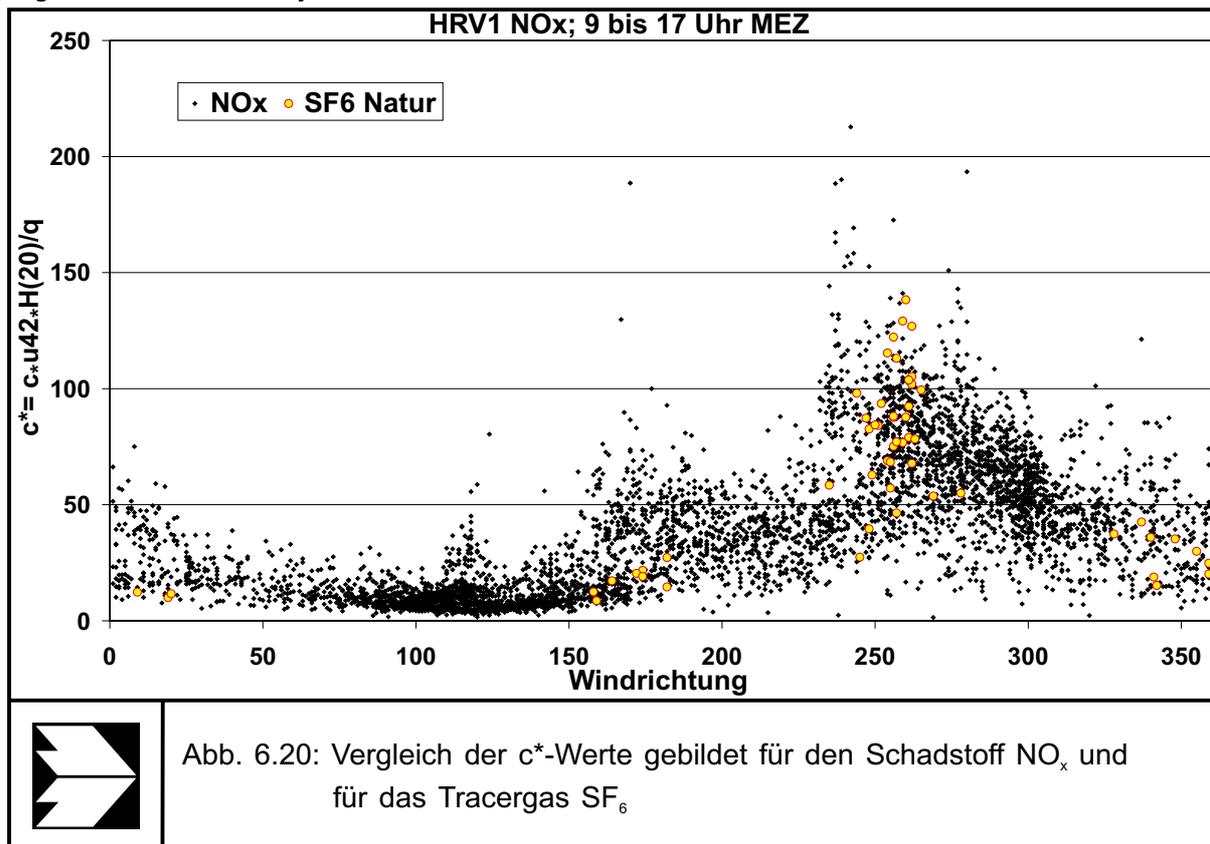


Abb. 6.19: Einfluß der Windgeschwindigkeit auf  $c^*$ -Werte für die Station HRV1; Tageszeit 9 bis 17 Uhr  
oben: Windgeschwindigkeit  $u_{42} > 0$  m/s  
mitte: Windgeschwindigkeit  $u_{42} > 4$  m/s  
unten: Windgeschwindigkeit  $u_{42} > 8$  m/s





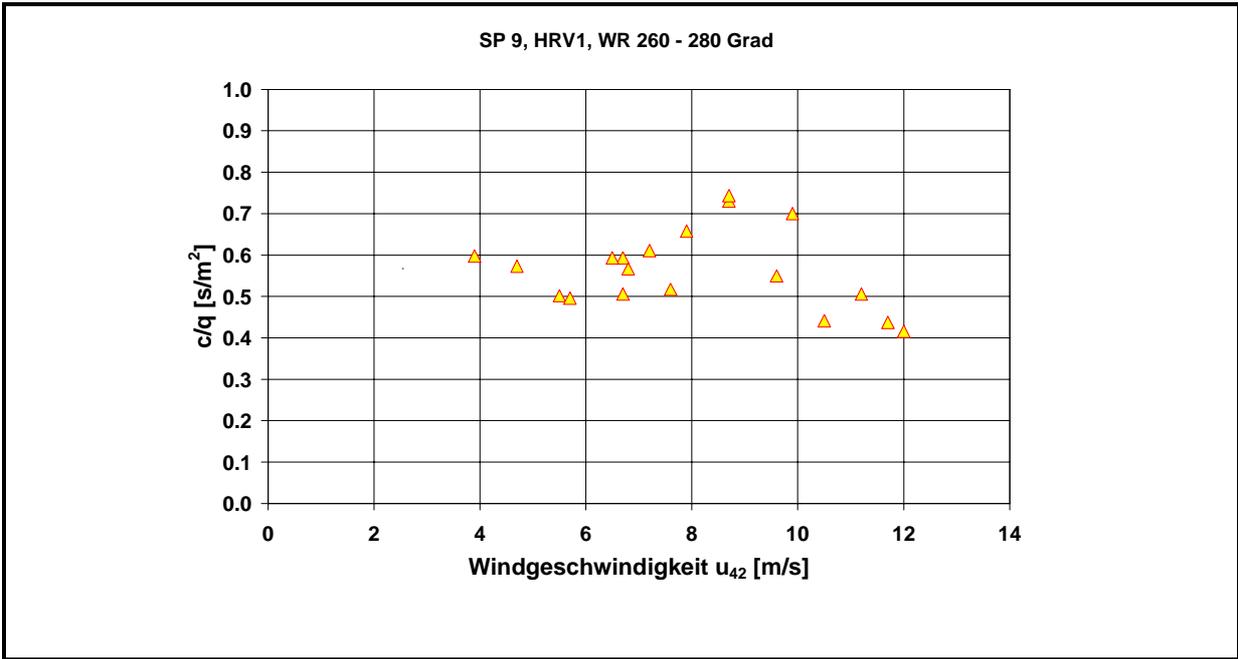


Abb. 6.22: Normierte Konzentration  $c/q$  für den Messpunkt HRV1 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit  $u_{42}$  für Windrichtungen 260 bis 280 Grad gemessen in 42 m Höhe

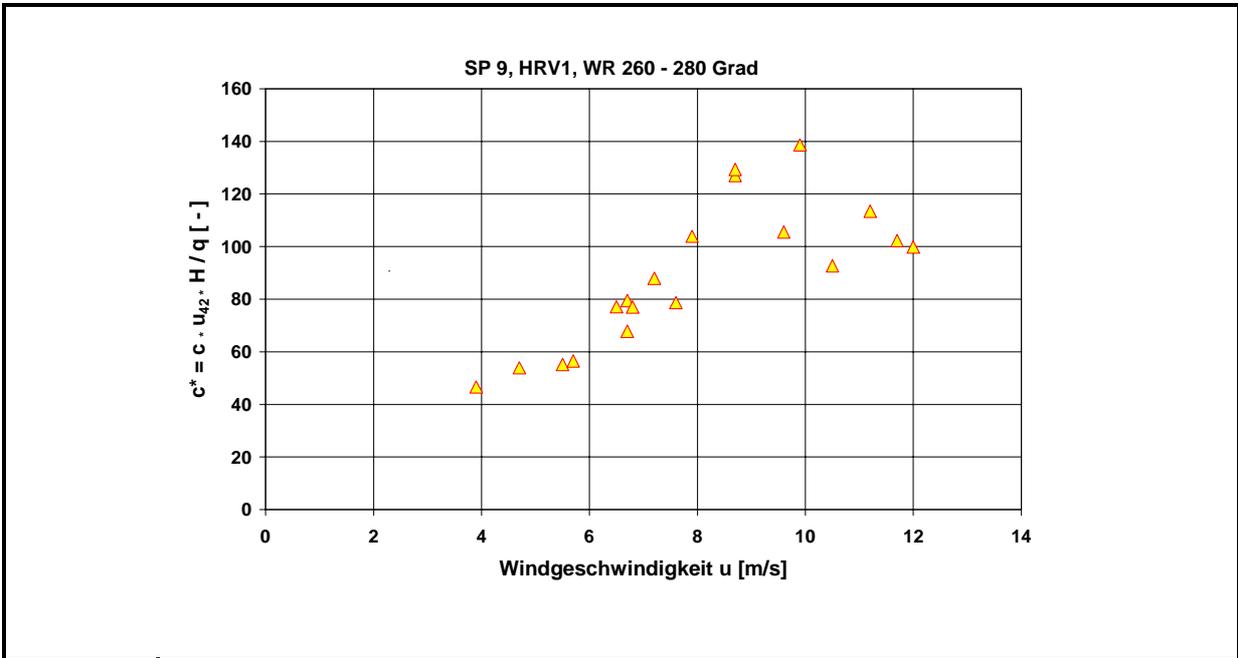


Abb. 6.23: Dimensionslose Konzentration  $c^*$  für den Messpunkt HRV1 in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit  $u_{42}$  für Windrichtungen 260 bis 280 Grad gemessen in 42 m Höhe

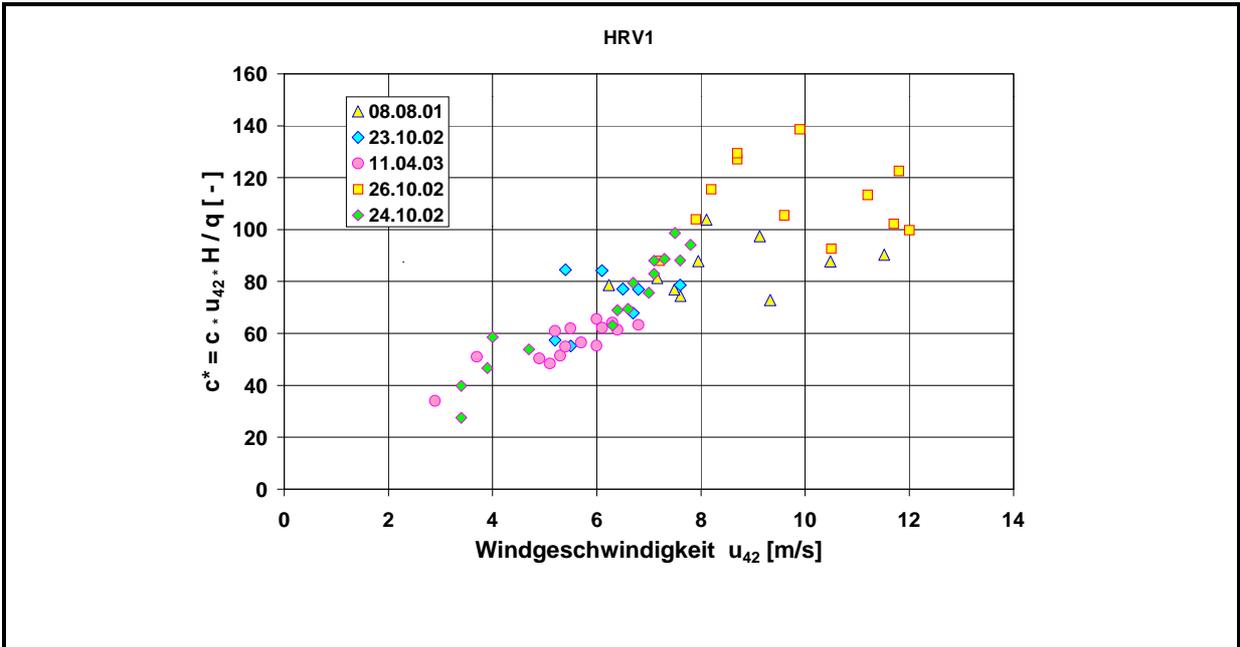


Abb. 6.24: Dimensionslose Konzentrationen  $c^*$  in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit  $u$  gemessen in 42 m Höhe

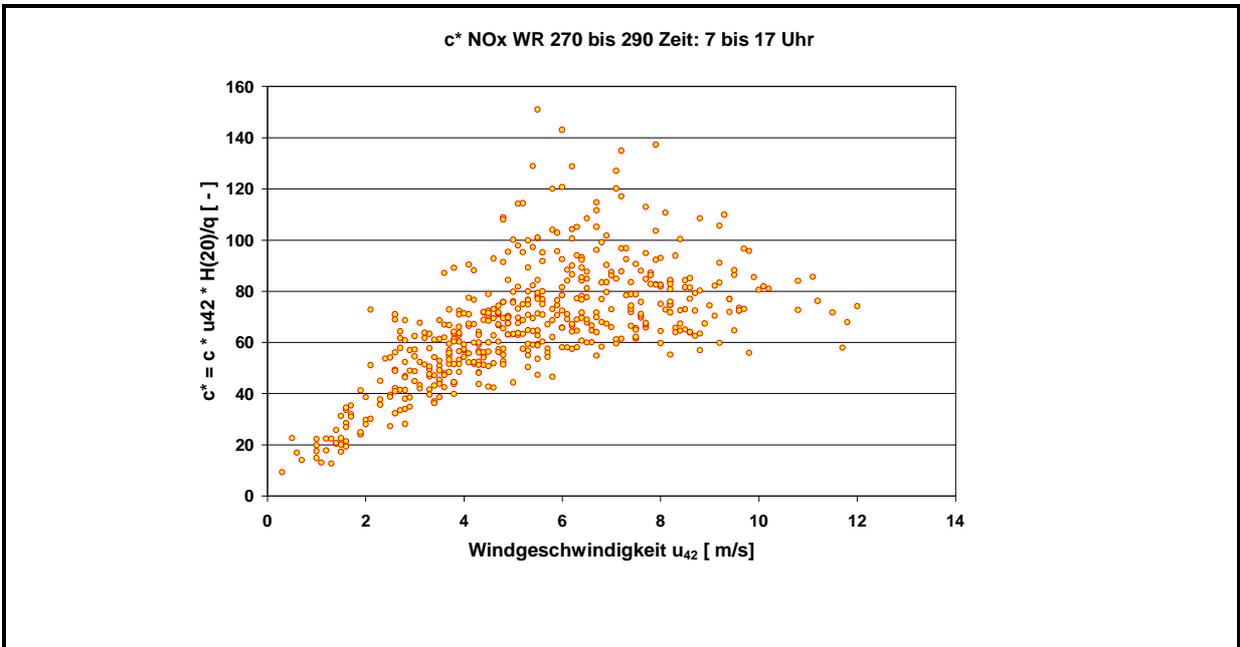


Abb. 6.25: Dimensionslose Konzentration  $c^*$  in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit  $u_{42}$  für  $\text{NO}_x$ -Werte des Jahres 2002 und Windrichtungsbereich zwischen 270 und 290 Grad

Bei Erfüllung des  $c^*$ -Konzeptes müssten bei einer vorgegebenen Windrichtung alle Werte auf gleicher Höhe liegen. Die Ergebnisse deuten aber darauf hin, dass das bisherige  $c^*$ -Konzept

nicht direkt auf die hier vorliegende Fragestellung angewendet werden darf und lässt vermuten, dass es weitere Einflussgrößen gibt, die bei Immissionsprognosen zu berücksichtigen sind. Die gleiche Tendenz zeigen auch die ausgewerteten NO<sub>x</sub> Messungen des Jahres 2002 an dieser Station (s. **Abb. 6.25**). Die in der Zeit von 7 bis 17 Uhr auf Grundlage der NO<sub>x</sub>-Messungen ermittelten c\*-Werte zeigen eine deutliche Zunahme derselben mit zunehmender Windgeschwindigkeit u<sub>42</sub> über Dach. Da tagsüber Stabilitätseinflüsse im Straßenraum vernachlässigt werden können und sonstige thermische Einflüsse bei den während der Experimente vorliegenden Windgeschwindigkeiten auch auszuschließen sind, deutet vieles auf die durch die vorbeifahrenden Fahrzeuge erzeugte Turbulenz. Sie ist bei kleinen Windgeschwindigkeiten von großem Einfluss auf die Konzentrationsverhältnisse an straßennahen Aufpunkten.

#### 6.5.4 Einfluss verkehrserzeugter Turbulenz TIT

Aus der Dimensionsanalyse in Gl. (1) ergibt sich als weitere Größe die verkehrserzeugte Turbulenz TIT. Diese Größe ist in der Literatur beschrieben. Bereits im Jahre 1975 lief in den USA ein Feldexperiment, das General Motors Experiment auf dem Testgelände der General Motors Werke in Milford, Michigan (Chock, 1982). Die Ergebnisse zeigen deutliche Einflüsse der Fahrzeugbewegung sowohl auf die mittleren Strömungskomponenten als auch auf die turbulenten Anteile. Ein weiteres Feldexperiment wird von Rao et al. (1979) beschrieben. Auch hier konnte durch Vergleiche der Windspektren in Luv und Lee der Einfluss der fahrzeuginduzierten Turbulenz aufgezeigt werden. Theoretische Betrachtungen wurden z.B. von Hunt (1982) und Eskeridge und Hunt (1979) durchgeführt. Kastner-Klein (1999) zeigt zusammenfassend in einer Literaturübersicht die Ergebnisse mehrerer Studien auf, die sich in Feldexperimenten, in Windkanalversuchen und durch theoretische Betrachtungen mit dieser Fragestellung befasst haben und die Einflüsse der verkehrserzeugten Turbulenz teilweise auch quantitativ dargestellt haben. So beschrieb bereits Plate (1982) den Einfluss der verkehrserzeugten Turbulenz in Relation zur winderzeugten Turbulenz in Form einer sogenannten Turbulenzproduktionszahl T<sub>p</sub>. Die von Plate (1982) definierte Turbulenzproduktionszahl, das Verhältnis von verkehrserzeugter Turbulenz zu Windturbulenz, ist definiert als

$$T_p = \frac{C_D u_v^3 n_v F_v}{c_f u_\delta^3 B} \quad (2)$$

wobei

C<sub>D</sub> = Widerstandsbeiwert der PKW bzw. LKW

F<sub>v</sub> = Anströmfläche der Fahrzeuge

- $u_v$  = Fahrgeschwindigkeit der Fahrzeuge
- $n_v$  = Fahrzeugdichte
- $c_f$  = Reibungsbeiwert der Stadt
- $u_\delta$  = ungestörte Anströmgeschwindigkeit
- B = Breite der Schlucht

Diese Verhältniszahl wurde im Zusammenhang mit Anforderungen an Windkanalmodellierungen definiert, sie setzt voraus, dass die ungestörte Anströmgeschwindigkeit  $\neq 0$  ist.

Die Turbulenzproduktionszahl wächst linear mit der Anzahl der Fahrzeuge. Es bietet sich daher eine Betrachtung der  $c^*$ -Werte in Abhängigkeit von der Anzahl der Fahrzeuge an. **Abb. 6.26** zeigt die Zusammenhänge. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme der  $c^*$ -Werte mit zunehmender Fahrzeugdichte. Konstante  $c^*$ -Werte setzen voraus, dass der Einfluss der verkehrserzeugten Turbulenz vernachlässigt werden kann. Diese Forderung wird hier nicht erfüllt. Das  $c^*$ -Konzept sollte daher für derartige Fragestellungen nicht angewendet werden, es ist zu modifizieren. Ähnliche Ergebnisse fanden auch Ketzler et al. (2002).

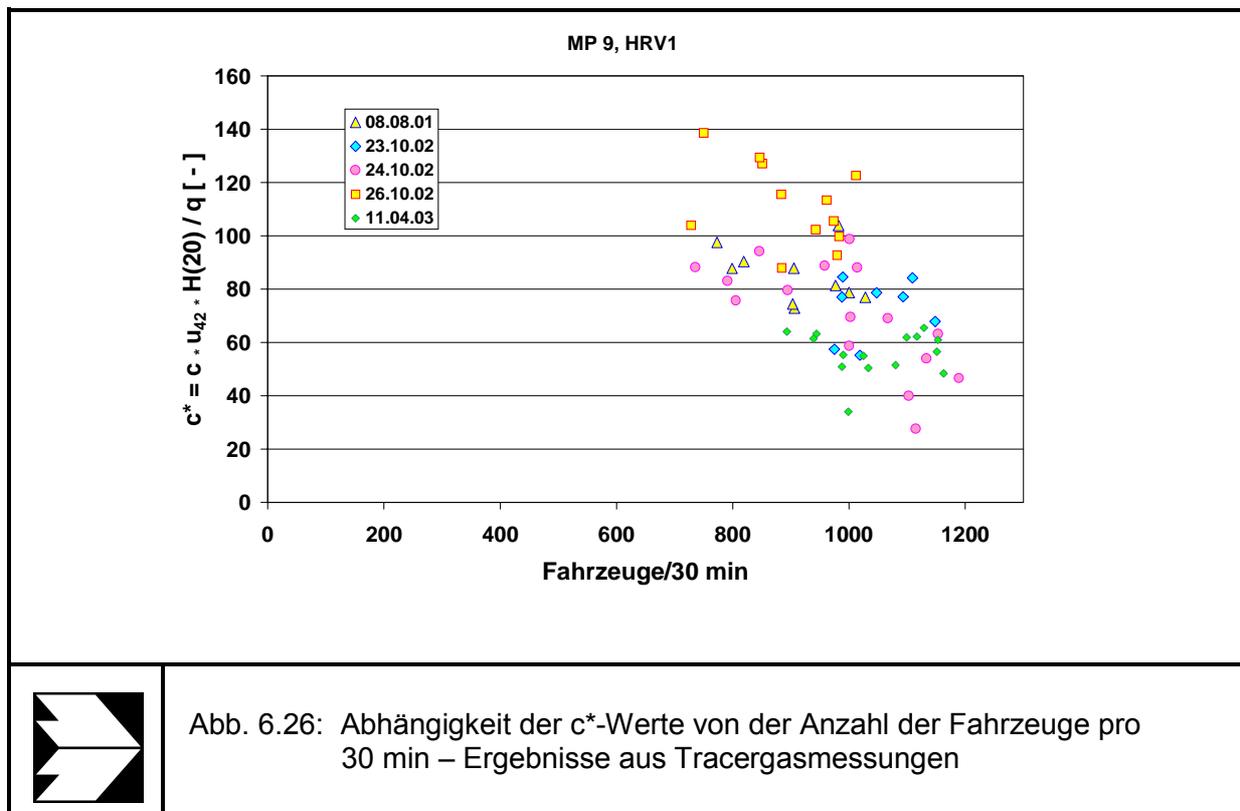


Abb. 6.26: Abhängigkeit der  $c^*$ -Werte von der Anzahl der Fahrzeuge pro 30 min – Ergebnisse aus Tracergasmessungen

Diese Ergebnisse werden auch durch die Auswertung  $\text{NO}_x$ -Immissionswerte des Jahres 2002 bestätigt. **Abb. 6.27** zeigt die Verhältnisse  $c/q$  in Abhängigkeit von der Anströmgeschwindigkeit  $u_{42}$  in Überdachhöhe (42 m). Während bei kleinen Verkehrsmengen, wie im untersten

Diagramm in **Abb. 6.27** zu erkennen, die gemessenen normierten Konzentrationen  $c/q$  einem  $1/u$ -Abfall folgen, zeigen sich bei hohen Verkehrszahlen, wie im obersten Diagramm in **Abb. 6.27** dargestellt, unterhalb einer bestimmten Grenzgeschwindigkeit keine Abhängigkeiten von der Überdachwindgeschwindigkeit. Die maßgebende Größe ist dann die verkehrserzeugte Turbulenz.

## 6.5 Überprüfung Emissionsmodellierung

In Kap. 2 wurde ausgeführt, dass eine berechnete Immission sich zusammensetzt aus einer modellierten Emission und der modellierten Transmission. Durch Tracerexperimente kann man beide „Modellteile“, Emission und Transmission überprüfen. Kennt man die gemessenen Tracergaskonzentration an einem Aufpunkt und die Tracergasquellstärke sowie die gemessene Konzentration eines Schadstoffes und berechnet dessen Quellstärke aus den Verkehrsangaben unter Zuhilfenahme eines Emissionsmodells so kann man diese Größen in Beziehung setzen mit:

$$\frac{\text{Emission Tracergas } E_{\text{Tracer}}}{\text{Immission Tracergas } I_{\text{Tracer}}} = \frac{\text{Emission Schadstoff } E_{\text{Schadstoff}}}{\text{Immission Schadstoff } I_{\text{Schadstoff}}}$$

In Kap. 6.4 wurde dieses Verhältnis bereits bei der Datenauswertung verwendet. Diese Beziehung gilt unter der Voraussetzung, dass das Tracergas und der betrachtete Schadstoff gleiches Ausbreitungsverhalten aufweisen und die Emissionsmodellierung des Schadstoffes korrekt ist. **Abb. 6.28** zeigt exemplarisch den Vergleich dieser Faktoren für den Standort HRV1 für die verschiedenen betrachteten Schadstoffe. Da die  $\text{SF}_6$ -Quelle mit einer Länge von 96 m verglichen mit der Freisetzungslänge der Straße kurz ist, gilt der Vergleich nur für nahezu senkrechte Anströmung der Straße. Bei straßenparalleler Anströmung ist der Effekt der Endlichkeit der Tracergasquelle sehr deutlich, d.h. die gemessenen Tracergaskonzentrationen sind zu klein. Dies gilt vor allem für die Messtage 25.10.2002 und 23.04.2003. Während für diese Messstation für  $\text{NO}_x$  die Werte nahe bei 1 liegen, zeigen sich bei den anderen Schadstoffen teils deutliche Abweichungen. Die Ergebnisse werden in dem Teilprojekt TP5 von Kühlwein et al. (2004) diskutiert.

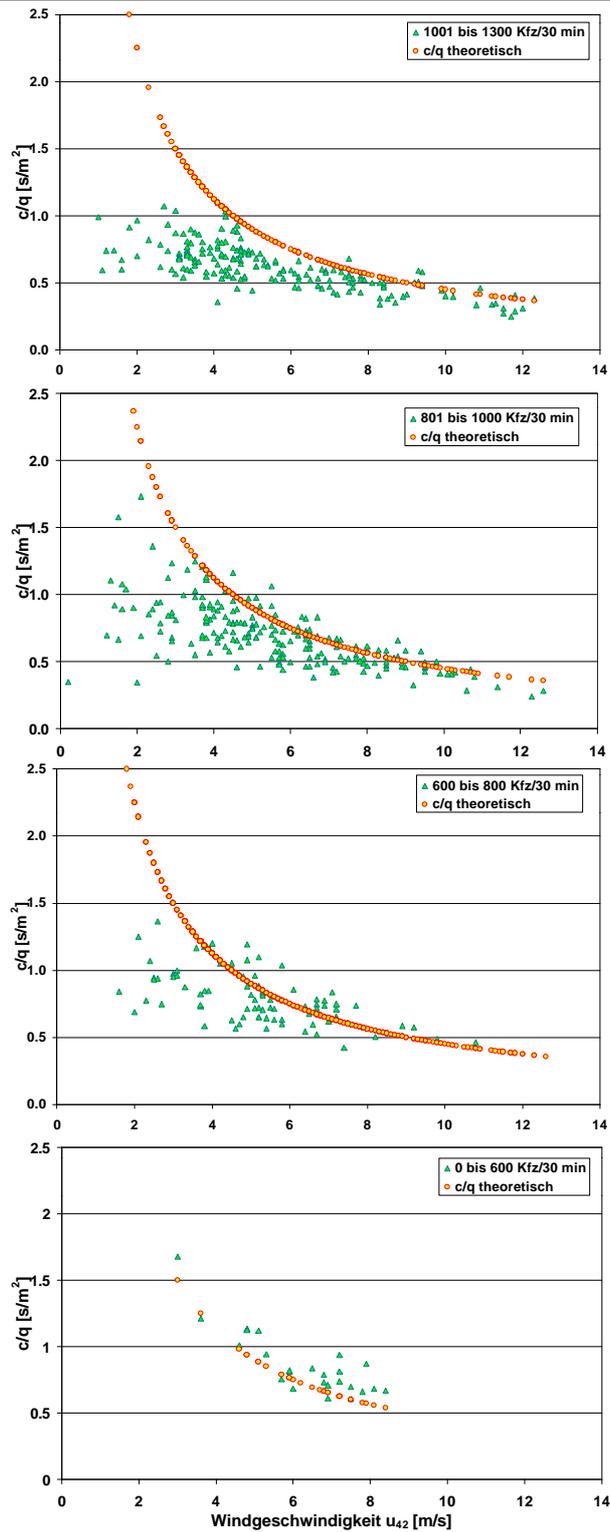


Abb. 6.27: Normierte Konzentration  $c/q$  als Funktion von der Windgeschwindigkeit  $u_{42}$  für den Windrichtungsbereich  $260^\circ - 280^\circ$

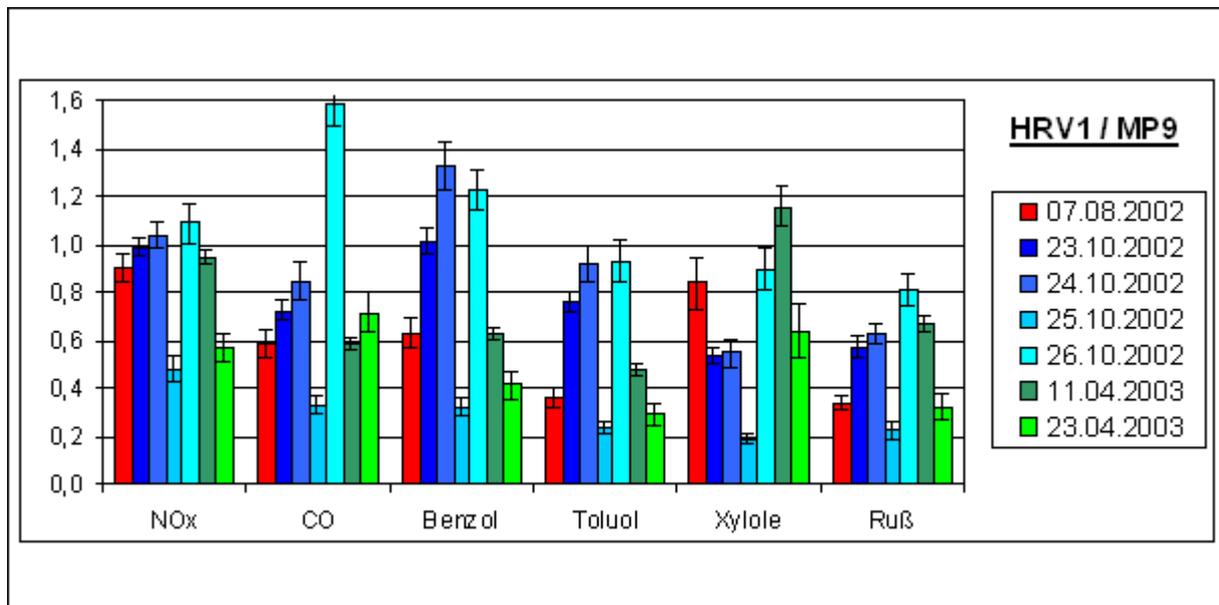


Abb. 6.28: Tagesmittelwerte der  $(E/I)_{\text{Schadstoff}} / (E/I)_{\text{Tracer}}$ -Verhältnisse (Quotienten) für alle Tage der IMP - Messstation HRV1 (entnommen aus Kühlwein et al. (2004))

## 6.6 Fazit

Ziel der Untersuchung waren Tracerversuche in einer Straßenschlucht mit Hilfe einer Linienquelle, durch die kontrolliert ein Tracergas freigesetzt wurde. Durch dieses Verfahren konnte ein Datensatz für die Validierungsdatenbank VALIDATA geliefert werden, der unabhängig von einer Emissionsmodellierung Konzentrationsdaten für die Validierung von Ausbreitungsmodellen liefert. Auch für die Überprüfung der Emissionsmodellierung kann dieses Verfahren eingesetzt werden. Die eingesetzte Methode hat sich bewährt. Aufgrund der Erfahrungen aus den Experimenten liegt nun ein Verfahren vor, das auch für andere Fragestellungen eingesetzt werden kann. Neben der Datenlieferung für die Datenbank konnten aus wissenschaftlicher Sicht Informationen zum Thema verkehrserzeugte Turbulenz und Gültigkeit des  $c^*$ -Konzeptes bei verkehrsreichen Straßen geliefert werden.

## 7 VALIDIERUNGSDATENSATZ TRACEREXPERIMENTE

### 7.1 Einzelexperiment

Der Datensatz ist geordnet nach den einzelnen Messtagen. Tracergasmessungen erfolgten an insgesamt 8 Versuchstagen, die in **Tab. 5.1** aufgelistet sind. Bei jedem Experiment wurden an insgesamt 12 bis 15 Messorten Proben gesammelt. Die im Einzelexperiment bestückten Messorte sind jeweils angegeben. Die Lage der Messorte ist in **Abb. 4.1** fixiert.

### 7.2 Ergebnisse der einzelnen Versuchstage

Für jeden einzelnen Versuchstag ist jeweils Anfangs- und Endzeit der einzelnen Probenahmen aufgelistet. Die Zeitangaben beziehen sich immer auf MEZ. Die gemessenen Tracergaskonzentrationen sind in der Datenbank als normierte Konzentrationen der Form  $c/q$  [ $s/m^2$ ] dargestellt. Dabei ist  $q$  die längenbezogene Quellstärke, die sich aus der Quellstärke in  $l SF_6/h$  dividiert durch die Quelllänge berechnet. Die Ergebnisse der einzelnen Tage sind in **Tab. 7.1** bis **Tab. 7.8** aufgelistet.

### 7.3 Verfügbarkeit des Datensatzes

Die in Kap. 7.2 beschriebenen Datensätze sind in die Datenbank VALIDATA integriert. Der komplette Datensatz ist abrufbar unter [www.lohmeyer.de](http://www.lohmeyer.de).

**MEZ****Normierte Konzentration c/q [ $10^{-1}$  s/m<sup>2</sup>]**

| <b>08.08.01</b>    | <b>HRSW</b> | <b>HRV3</b> | <b>HRV8</b> | <b>HRVS</b> | <b>SE02</b> | <b>SE04</b> | <b>SE06</b> | <b>SW02</b> | <b>SW03</b> | <b>SW04</b> | <b>SW08</b> | <b>SW09</b> |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>10.00-10.30</b> | <b>0.17</b> | <b>0.43</b> | <b>0.06</b> | <b>3.90</b> | <b>0.05</b> | <b>0.92</b> | <b>0.16</b> | <b>0.12</b> | <b>3.27</b> | <b>5.34</b> | <b>2.28</b> | <b>0.22</b> |
| <b>10.30-11.00</b> | <b>0.13</b> | <b>0.50</b> | <b>0.04</b> | <b>5.89</b> | <b>0.03</b> | <b>1.03</b> | <b>0.54</b> | <b>0.86</b> | <b>3.35</b> | <b>3.92</b> | <b>3.73</b> | <b>0.12</b> |
| <b>11.00-11.30</b> | <b>0.05</b> | <b>0.61</b> | <b>0.02</b> | <b>5.40</b> | <b>0.08</b> | <b>1.73</b> | <b>0.75</b> |             | <b>3.99</b> | <b>4.18</b> | <b>3.34</b> | <b>0.31</b> |
| <b>11.30-12.00</b> | <b>0.02</b> | <b>0.48</b> | <b>0.06</b> | <b>2.99</b> | <b>0.18</b> | <b>0.99</b> | <b>0.68</b> | <b>0.29</b> | <b>3.35</b> | <b>3.91</b> | <b>4.00</b> | <b>0.82</b> |
| <b>12.00-12.30</b> | <b>0.19</b> | <b>0.54</b> | <b>0.02</b> | <b>7.21</b> | <b>0.02</b> | <b>2.17</b> | <b>1.10</b> | <b>0.06</b> | <b>6.91</b> | <b>4.89</b> | <b>5.16</b> | <b>1.23</b> |
| <b>12.30-13.00</b> | <b>0.03</b> | <b>0.59</b> | <b>0.05</b> | <b>6.94</b> | <b>0.09</b> | <b>2.14</b> | <b>1.20</b> | <b>0.52</b> | <b>6.41</b> | <b>5.68</b> | <b>2.47</b> |             |
| <b>13.00-13.30</b> | <b>0.01</b> | <b>0.80</b> | <b>0.04</b> | <b>7.99</b> | <b>0.10</b> | <b>1.86</b> | <b>1.17</b> | <b>0.12</b> | <b>6.98</b> | <b>5.13</b> | <b>4.09</b> | <b>1.46</b> |
| <b>13.30-14.00</b> | <b>0.26</b> | <b>0.61</b> | <b>0.17</b> | <b>7.52</b> | <b>0.09</b> | <b>1.76</b> | <b>1.41</b> | <b>0.07</b> | <b>6.95</b> | <b>5.52</b> | <b>4.63</b> | <b>1.35</b> |
| <b>14.00-14.30</b> | <b>0.35</b> | <b>1.00</b> | <b>0.07</b> | <b>7.79</b> | <b>0.04</b> | <b>1.62</b> | <b>1.53</b> | <b>0.16</b> | <b>7.35</b> | <b>6.40</b> | <b>5.61</b> | <b>2.13</b> |
| <b>14.30-15.00</b> | <b>0.07</b> | <b>0.87</b> | <b>0.16</b> | <b>8.69</b> | <b>0.02</b> | <b>1.76</b> | <b>1.65</b> | <b>0.10</b> | <b>8.88</b> | <b>6.31</b> | <b>3.79</b> | <b>3.18</b> |

Tab. 7.1: Versuchstag 08.08.2001

**MEZ****Normierte Konzentration  $c/q$  [ $10^{-1} \text{ s/m}^2$ ]**

| <b>07.08.02</b>    | <b>HRSW</b> | <b>HRV1</b> | <b>HRV3</b> | <b>HRV8</b> | <b>HRVS</b> | <b>SE01</b> | <b>SE02</b> | <b>SE04</b> | <b>SE05</b> | <b>SW01</b> | <b>SW02</b> | <b>SW03</b> | <b>SW08</b> | <b>SW09</b> |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>08.00-08.30</b> | <b>0.02</b> | <b>4.60</b> | <b>1.85</b> | <b>0.02</b> | <b>6.29</b> |             | <b>0.92</b> | <b>2.42</b> | <b>1.12</b> |             | <b>3.27</b> | <b>5.86</b> | <b>2.59</b> | <b>0.09</b> |
| <b>08.30-09.00</b> | <b>0.03</b> | <b>5.70</b> | <b>1.11</b> | <b>0.00</b> | <b>7.08</b> |             | <b>0.81</b> | <b>1.30</b> | <b>1.02</b> |             | <b>3.44</b> | <b>6.72</b> | <b>2.21</b> | <b>0.08</b> |
| <b>09.00-09.30</b> | <b>0.09</b> | <b>2.70</b> | <b>3.84</b> | <b>0.00</b> | <b>3.49</b> |             | <b>1.64</b> | <b>2.56</b> | <b>1.09</b> |             | <b>3.59</b> | <b>3.21</b> | <b>1.26</b> | <b>0.02</b> |
| <b>09.30-10.00</b> | <b>0.04</b> | <b>4.49</b> | <b>2.02</b> | <b>0.00</b> | <b>2.57</b> |             | <b>1.58</b> | <b>2.13</b> | <b>0.75</b> |             | <b>4.42</b> | <b>5.50</b> | <b>1.59</b> | <b>0.07</b> |
| <b>10.00-10.30</b> | <b>0.05</b> | <b>3.35</b> | <b>3.04</b> | <b>0.04</b> | <b>4.27</b> | <b>0.87</b> | <b>1.30</b> | <b>3.43</b> |             | <b>1.31</b> | <b>3.16</b> | <b>4.08</b> | <b>1.48</b> |             |
| <b>10.30-11.00</b> | <b>0.12</b> | <b>1.33</b> | <b>5.72</b> | <b>0.06</b> | <b>1.72</b> | <b>1.27</b> | <b>2.12</b> | <b>5.63</b> |             | <b>1.58</b> | <b>1.91</b> | <b>1.46</b> | <b>0.35</b> |             |
| <b>11.00-11.30</b> | <b>0.02</b> | <b>4.14</b> | <b>1.06</b> | <b>0.00</b> | <b>4.82</b> | <b>0.64</b> | <b>1.08</b> | <b>0.82</b> |             | <b>1.34</b> | <b>3.56</b> | <b>4.65</b> | <b>0.73</b> |             |
| <b>11.30-12.00</b> | <b>0.06</b> | <b>1.28</b> | <b>5.48</b> | <b>0.04</b> | <b>3.24</b> | <b>1.29</b> | <b>1.91</b> | <b>4.05</b> |             | <b>1.26</b> | <b>2.06</b> | <b>1.78</b> | <b>1.07</b> |             |
| <b>12.00-12.30</b> | <b>0.03</b> | <b>3.09</b> | <b>1.36</b> | <b>0.02</b> |             | <b>0.57</b> | <b>1.22</b> | <b>2.12</b> |             | <b>1.16</b> | <b>2.49</b> | <b>3.74</b> | <b>0.33</b> |             |
| <b>12.30-13.00</b> | <b>0.02</b> | <b>1.94</b> | <b>1.45</b> | <b>0.01</b> | <b>2.12</b> | <b>0.49</b> | <b>0.79</b> | <b>1.65</b> |             | <b>1.18</b> | <b>2.81</b> | <b>2.89</b> | <b>1.24</b> |             |
| <b>13.00-13.30</b> | <b>0.09</b> | <b>2.08</b> | <b>2.11</b> | <b>0.00</b> | <b>2.65</b> | <b>0.70</b> | <b>0.92</b> | <b>1.79</b> |             | <b>1.06</b> | <b>2.44</b> | <b>2.63</b> | <b>0.54</b> |             |
| <b>13.30-14.00</b> | <b>0.08</b> | <b>3.59</b> | <b>0.99</b> | <b>0.02</b> | <b>4.57</b> | <b>0.42</b> | <b>0.84</b> | <b>0.98</b> |             | <b>1.38</b> | <b>3.08</b> | <b>4.27</b> | <b>0.74</b> |             |
| <b>14.00-14.30</b> | <b>0.02</b> | <b>3.77</b> | <b>1.05</b> | <b>0.00</b> | <b>4.37</b> | <b>0.72</b> | <b>1.04</b> | <b>1.02</b> |             | <b>1.05</b> | <b>2.98</b> | <b>4.42</b> | <b>1.05</b> |             |
| <b>14.30-15.00</b> | <b>0.07</b> | <b>3.97</b> | <b>0.62</b> | <b>0.01</b> | <b>5.14</b> | <b>0.60</b> | <b>0.92</b> | <b>1.16</b> |             | <b>1.03</b> | <b>3.51</b> | <b>5.07</b> | <b>1.06</b> |             |

Tab. 7.2: Versuchstag 07.08.2002

**MEZ****Normierte Konzentration  $c/q$  [ $10^{-1} \text{ s/m}^2$ ]**

| <b>23.10.02</b>    | <b>HRSW</b> | <b>HRV1</b> | <b>HRV3</b> | <b>HRV8</b> | <b>HRVS</b> | <b>SE02</b> | <b>SE04</b> | <b>SE05</b> | <b>SW02</b> | <b>SW03</b> | <b>SW08</b> | <b>SW09</b> |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>13.00-13.30</b> | <b>0.01</b> | <b>5.66</b> | <b>1.51</b> | <b>0.02</b> | <b>4.99</b> | <b>0.13</b> | <b>1.15</b> | <b>0.21</b> | <b>0.88</b> | <b>5.53</b> | <b>2.37</b> | <b>0.06</b> |
| <b>13.30-14.00</b> | <b>0.00</b> | <b>5.02</b> | <b>1.24</b> | <b>0.01</b> | <b>5.25</b> | <b>0.80</b> | <b>0.37</b> | <b>0.13</b> | <b>1.09</b> | <b>5.38</b> | <b>1.54</b> | <b>0.03</b> |
| <b>14.00-14.30</b> | <b>0.00</b> | <b>5.52</b> | <b>2.23</b> | <b>0.02</b> | <b>6.32</b> | <b>0.25</b> | <b>2.08</b> | <b>0.66</b> | <b>1.04</b> | <b>6.08</b> | <b>2.46</b> | <b>0.05</b> |
| <b>14.30-15.00</b> | <b>0.43</b> | <b>5.17</b> | <b>1.57</b> | <b>0.02</b> | <b>5.37</b> | <b>0.06</b> | <b>0.47</b> | <b>0.10</b> | <b>0.29</b> | <b>5.31</b> | <b>1.59</b> | <b>0.01</b> |
| <b>15.00-15.30</b> | <b>0.37</b> | <b>5.06</b> | <b>2.13</b> | <b>0.00</b> | <b>5.34</b> | <b>0.08</b> | <b>0.32</b> | <b>0.37</b> | <b>0.44</b> | <b>5.38</b> | <b>1.26</b> | <b>0.03</b> |
| <b>15.30-16.00</b> | <b>0.50</b> | <b>5.93</b> | <b>1.79</b> | <b>0.00</b> | <b>5.71</b> | <b>0.05</b> | <b>1.27</b> | <b>0.10</b> | <b>0.26</b> | <b>5.82</b> | <b>2.27</b> | <b>0.03</b> |
| <b>16.00-16.30</b> | <b>0.80</b> | <b>6.90</b> | <b>1.73</b> | <b>0.00</b> | <b>4.65</b> | <b>0.03</b> | <b>1.98</b> | <b>1.06</b> | <b>0.24</b> | <b>4.75</b> | <b>2.14</b> | <b>0.09</b> |
| <b>16.30-17.00</b> |             | <b>7.83</b> | <b>1.08</b> | <b>0.01</b> | <b>4.94</b> | <b>0.03</b> | <b>2.42</b> | <b>1.11</b> | <b>0.57</b> | <b>5.25</b> | <b>4.41</b> | <b>0.11</b> |

Tab. 7.3: Versuchstag 23.10.2002

## MEZ Normierte Konzentration $c/q$ [ $10^{-1} \text{ s/m}^2$ ]

| 24.10.02    | HRSW | HRV1 | HRV3 | HRV8 | HRVS | SE02 | SE04 | SE05 | SW02 | SW03 | SW05 | SW06 | SW07 | SW08 | SW09 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 09.00-09.30 | 0.03 | 5.84 | 0.94 | 0.02 | 7.11 | 0.11 | 1.16 | 0.17 | 0.30 | 6.30 | 5.99 | 5.95 | 4.84 | 2.80 | 0.04 |
| 09.30-10.00 | 0.03 | 5.41 | 1.78 | 0.04 | 7.85 | 0.08 | 1.40 | 0.13 | 0.41 | 6.64 | 4.95 | 4.50 | 4.49 | 2.02 | 0.03 |
| 10.00-10.30 | 0.03 | 5.80 | 1.52 | 0.03 | 6.98 | 0.06 | 0.84 | 0.04 | 0.34 | 6.27 | 5.22 | 5.04 | 4.38 | 1.96 | 0.03 |
| 10.30-11.00 | 0.02 | 6.03 | 1.34 | 0.03 | 6.29 | 0.10 | 0.84 | 0.18 | 0.22 | 5.95 | 5.66 | 5.32 | 4.70 | 1.93 | 0.03 |
| 11.00-11.30 | 0.04 | 5.93 | 1.73 | 0.04 | 5.80 | 0.11 | 0.92 | 0.11 | 0.63 | 5.62 | 4.99 | 4.54 | 4.00 | 2.22 | 0.03 |
| 11.30-12.00 | 0.02 | 5.26 | 1.78 | 0.03 | 5.89 | 0.15 | 0.71 | 0.16 | 0.43 | 5.88 | 5.89 | 5.16 | 4.50 | 1.71 | 0.05 |
| 12.00-12.30 | 0.02 | 6.08 | 1.58 | 0.04 | 5.74 | 0.11 | 1.23 | 0.25 | 0.39 | 6.03 | 5.57 | 4.88 | 4.23 | 2.42 | 0.03 |
| 12.30-13.00 | 0.02 | 6.58 | 1.69 | 0.04 | 4.34 | 0.06 | 2.17 | 0.49 | 0.22 | 6.61 | 6.62 | 6.18 | 5.60 | 2.58 | 0.12 |
| 13.00-13.30 | 0.22 | 5.38 | 0.73 | 0.04 | 5.07 | 0.10 | 1.90 | 0.57 | 0.29 | 5.27 | 7.63 | 4.83 | 4.35 | 3.15 | 0.08 |
| 13.00-14.00 | 0.17 | 6.20 | 1.51 | 0.05 | 4.41 | 0.08 | 2.85 | 1.00 | 0.33 | 4.70 | 5.66 | 5.31 | 4.76 | 1.55 | 0.11 |
| 14.00-14.30 | 0.16 | 5.01 | 0.71 | 0.02 | 3.86 | 0.06 | 1.91 | 0.51 | 0.26 | 4.25 | 5.71 | 5.07 | 4.68 | 3.22 | 0.07 |
| 14.30-15.00 | 0.17 | 5.73 | 1.42 | 0.01 | 5.98 | 0.24 | 1.03 | 0.21 | 0.71 | 5.67 | 5.42 | 4.70 | 3.66 | 2.50 | 0.00 |
| 15.00-15.30 | 0.14 | 5.98 | 2.45 | 0.02 | 6.42 | 0.17 | 3.21 | 1.18 | 0.76 | 6.42 | 6.02 | 5.34 | 2.55 | 2.10 | 0.14 |
| 15.30-16.00 | 0.12 | 5.85 | 1.93 | 0.02 | 6.40 | 0.05 | 3.40 | 0.98 | 0.82 | 6.51 | 3.73 | 3.53 | 2.53 | 3.24 | 0.20 |
| 16.00-16.30 | 0.16 | 4.05 | 1.81 | 0.01 | 5.53 | 0.34 | 1.25 | 0.46 | 1.01 | 6.04 | 2.25 | 4.76 | 3.86 | 1.82 | 0.09 |
| 16.30-17.00 | 0.20 | 7.32 | 2.15 | 0.02 | 7.25 | 0.13 | 3.77 | 3.34 | 0.48 | 7.02 | 1.64 | 7.50 | 6.00 | 2.12 | 0.89 |

Tab. 7.4: Versuchstag 24.10.2002

# MEZ Normierte Konzentration $c/q$ [ $10^{-1} \text{ s/m}^2$ ]

| 25.10.02    | HRSW | HRV1 | HRV3 | HRV8 | HRVS | SE02 | SE04 | SE05 | SW02 | SW03 | SW05 | SW06 | SW07 | SW08 | SW09 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 13.00-13.30 | 0.04 | 2.35 | 1.48 | 0.03 | 1.62 | 0.01 | 6.07 | 4.71 | 0.01 | 1.74 | 2.47 | 2.68 | 2.80 | 3.01 | 2.14 |
| 13.30-14.00 | 0.02 | 1.98 | 1.64 | 0.03 | 1.13 | 0.01 |      | 6.61 | 0.00 | 1.39 | 2.02 | 2.00 | 2.11 | 2.25 | 2.18 |
| 14.00-14.30 | 0.01 | 1.21 | 2.96 | 0.03 | 0.72 | 0.01 | 8.03 | 7.19 | 0.00 | 0.84 | 1.01 | 1.00 | 1.06 | 0.98 | 0.97 |
| 14.30-15.00 | 0.01 | 0.94 | 3.00 | 0.03 | 0.78 | 0.01 | 9.47 | 8.50 | 0.00 | 1.00 | 1.05 |      | 1.07 | 0.82 | 1.02 |
| 15.00-15.30 | 0.02 | 1.75 | 2.05 |      | 0.85 | 0.01 | 8.33 | 7.63 | 0.00 | 0.92 | 1.43 |      | 1.51 | 1.51 | 1.72 |
| 15.30-16.00 | 0.02 | 1.86 | 0.37 | 0.01 | 0.66 | 0.00 | 4.16 | 3.49 | 0.00 | 0.69 | 1.90 | 1.62 | 2.03 | 2.29 | 3.00 |
| 16.00-16.30 | 0.01 | 1.42 | 0.38 | 0.00 | 0.70 | 0.00 | 5.33 | 4.76 | 0.00 | 0.67 | 1.40 | 1.35 | 1.48 | 2.08 | 2.46 |
| 16.30-17.00 | 0.01 | 1.07 | 0.31 | 0.00 | 0.74 | 0.00 | 3.73 | 3.03 | 0.00 | 0.81 | 2.31 | 2.30 | 2.42 | 1.92 | 3.28 |

Tab. 7.5: Versuchstag 25.10.2002

## MEZ Normierte Konzentration $c/q$ [ $10^{-1} \text{ s/m}^2$ ]

| 26.10.02    | HRSW | HRV1 | HRV3 | HRV8 | HRVS | SE02 | SE04 | SE05 | SW02 | SW03 | SW05 | SW06 | SW07 | SW08 | SW09 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 11.00-11.30 | 0.02 | 4.41 | 1.25 | 0.02 | 4.40 | 0.12 | 0.05 | 0.02 | 0.07 | 4.30 |      |      |      | 0.82 | 0.03 |
| 11.30-12.00 | 0.01 | 4.37 | 1.18 | 0.01 | 3.66 | 0.03 | 0.08 | 0.02 | 0.02 | 3.70 |      |      |      | 0.67 | 0.02 |
| 12.00-12.30 | 0.02 | 5.20 | 1.57 | 0.02 | 2.94 | 0.05 | 0.19 | 0.04 | 0.03 | 2.90 |      |      |      | 1.33 | 0.00 |
| 12.30-13.00 | 0.01 | 5.06 | 1.43 | 0.01 | 3.73 | 0.06 | 0.37 | 0.03 | 0.09 | 3.86 |      |      |      | 1.28 | 0.01 |
| 13.00-13.30 | 0.01 | 4.16 | 1.67 | 0.00 | 3.57 | 0.09 | 0.07 | 0.04 | 0.23 | 3.73 | 2.82 | 2.01 | 1.94 | 0.78 | 0.02 |
| 13.30-14.00 | 0.02 | 5.50 | 1.72 | 0.00 | 4.29 | 0.08 | 0.35 | 0.04 | 0.08 | 4.45 | 4.21 |      | 3.48 | 0.78 | 0.02 |
| 14.00-14.30 | 0.02 | 6.11 | 2.41 | 0.01 | 5.62 | 0.08 | 0.51 | 0.02 | 0.27 | 5.54 | 5.95 |      | 4.99 | 2.03 | 0.01 |
| 14.30-15.00 | 0.01 | 7.44 | 1.97 | 0.01 | 5.03 | 0.04 | 0.30 | 0.05 | 0.09 | 4.82 | 5.84 | 5.47 | 4.62 | 2.01 | 0.01 |
| 15.00-15.30 | 0.01 | 7.05 | 2.14 | 0.01 | 6.03 | 0.03 | 0.43 | 0.04 | 0.08 | 5.80 | 5.91 | 5.88 | 4.98 | 2.05 | 0.01 |
| 15.30-16.00 | 0.01 | 7.00 | 1.72 | 0.01 | 4.58 | 0.09 | 0.16 | 0.03 | 0.05 | 4.20 | 5.75 | 4.79 | 4.43 | 1.93 | 0.01 |
| 16.00-16.30 | 0.01 | 6.58 | 1.84 | 0.02 | 6.15 | 0.04 | 0.07 | 0.02 | 0.08 | 5.82 | 5.42 | 4.87 | 4.39 | 1.76 | 0.02 |
| 16.30-17.00 | 0.01 | 7.30 | 1.97 | 0.02 | 6.74 | 0.02 | 0.33 | 0.02 | 0.11 | 6.34 | 5.73 | 5.38 | 4.06 | 1.78 | 0.01 |

Tab. 7.6: Versuchstag 26.10.2002

**MEZ****Normierte Konzentration c/q [ $10^{-1}$  s/m<sup>2</sup>]**

| <b>11.04.03</b> | <b>HRSW</b> | <b>HRV1</b> | <b>HRV2</b> | <b>HRV3</b> | <b>HRV8</b> | <b>HRVS</b> | <b>SE02</b> | <b>SE04</b> | <b>SE05</b> | <b>SW02</b> | <b>SW03</b> | <b>SW05</b> | <b>SW06</b> | <b>SW08</b> | <b>SW09</b> |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 09.00-09.30     | 0.03        | 5.12        | 0.06        | 0.41        | 0.03        | 5.54        | 0.08        | 2.36        | 1.43        | 0.12        | 4.58        | 5.40        | 5.21        | 4.69        | 0.27        |
| 09.30-10.00     | 0.03        | 4.83        | 0.03        | 1.00        | 0.03        | 4.98        | 0.06        | 1.72        | 0.74        | 0.14        | 4.37        | 4.63        | 4.69        | 3.05        | 0.24        |
| 10.00-10.30     | 0.02        | 4.67        | 0.03        | 0.24        | 0.02        | 4.07        | 0.03        | 1.39        | 0.68        | 0.15        | 3.65        | 4.24        | 3.98        | 3.50        | 0.42        |
| 10.30-11.00     | 0.03        | 4.64        | 0.03        | 0.52        | 0.02        | 4.87        | 0.05        | 1.49        | 0.27        | 0.14        | 4.38        | 4.67        | 4.50        | 2.75        | 0.08        |
| 11.00-11.30     | 0.03        | 4.88        | 0.02        | 0.70        | 0.03        | 5.66        | 0.05        | 1.53        | 0.27        | 0.09        | 5.20        | 4.16        | 3.68        | 2.14        | 0.05        |
| 11.30-12.00     | 0.02        | 5.88        | 0.02        | 1.55        | 0.02        | 6.72        | 0.06        | 1.96        | 0.63        | 0.17        | 5.80        | 5.75        | 5.33        | 2.40        | 0.11        |
| 12.00-12.30     | 0.02        | 5.47        | 0.02        | 0.98        | 0.03        | 5.90        | 0.06        | 1.76        | 0.34        | 0.24        | 5.40        | 4.92        | 4.47        | 2.30        | 0.06        |
| 12.30-13.00     | 0.02        | 4.98        | 0.02        | 1.33        | 0.02        | 5.83        | 0.08        | 0.93        | 0.10        | 0.33        | 5.31        | 4.40        | 4.17        | 2.17        | 0.03        |
| 13.00-13.30     | 0.02        | 4.76        | 0.03        | 1.69        | 0.02        | 5.73        | 0.11        | 1.16        | 0.16        | 0.58        | 5.20        | 4.44        | 4.24        | 2.15        | 0.04        |
| 13.30-14.00     | 0.02        | 5.12        | 0.02        | 1.42        | 0.03        | 5.33        | 0.02        | 1.47        | 0.25        | 0.21        | 4.67        | 4.78        | 4.68        | 1.62        | 0.06        |
| 14.00-14.30     | 0.00        | 5.63        | 0.03        |             | 0.02        | 4.72        | 0.00        | 1.17        | 0.26        |             | 4.38        |             | 4.59        |             | 0.05        |
| 14.30-15.00     | 0.02        | 5.11        | 0.02        |             | 0.03        | 6.05        | 0.06        | 1.59        | 0.28        | 0.14        | 5.32        | 5.26        | 5.20        | 2.23        | 0.06        |
| 15.00-15.30     | 0.01        | 5.15        | 0.02        | 0.75        | 0.03        | 5.43        | 0.05        | 1.52        | 0.47        | 0.11        | 4.88        | 4.88        | 4.52        | 2.61        | 0.11        |
| 15.30-16.00     | 0.02        |             | 0.04        | 1.15        | 0.02        | 6.01        | 0.24        | 1.67        | 0.23        | 1.11        | 5.34        | 5.32        | 5.08        | 2.12        | 0.05        |
| 16.00-16.30     | 0.02        | 6.90        | 0.04        | 1.51        | 0.03        |             | 0.42        | 1.20        | 0.45        | 1.27        | 6.97        | 5.41        |             | 2.21        | 0.06        |
| 16.30-17.00     | 0.03        | 5.89        | 0.03        | 2.24        | 0.02        | 6.42        | 0.07        | 2.35        | 0.75        | 0.96        | 5.60        | 6.13        |             | 2.89        | 0.22        |

Tab. 7.7: Versuchstag 11.04.2003

**MEZ****Normierte Konzentration c/q [ $10^{-1}$  s/m<sup>2</sup>]**

| <b>23.04.03</b> | <b>HRSW</b> | <b>HRV1</b> | <b>HRV2</b> | <b>HRV3</b> | <b>HRV4</b> | <b>HRV8</b> | <b>HRVS</b> | <b>SE02</b> | <b>SE03</b> | <b>SE04</b> | <b>SE05</b> | <b>SW02</b> | <b>SW03</b> | <b>SW08</b> | <b>SW09</b> |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 09.00-09.30     | 0.08        | 1.51        |             | 3.39        | 0.02        | 0.19        | 1.92        | 1.02        | 1.96        | 3.48        | 2.61        | 1.17        | 1.86        | 1.01        | 0.25        |
| 09.30-10.00     | 0.05        | 1.69        | 0.18        | 2.75        | 0.03        | 0.30        | 2.45        | 0.82        | 2.81        | 4.49        | 3.13        | 0.23        | 2.27        | 0.88        | 0.23        |
| 10.00-10.30     | 0.09        | 0.83        | 0.12        | 4.52        | 0.04        | 0.23        | 1.67        | 0.88        | 5.09        | 4.92        | 2.64        | 0.77        | 1.76        | 0.64        | 0.15        |
| 10.30-11.00     | 0.09        | 1.62        | 0.13        | 5.45        | 0.03        |             | 2.23        | 1.23        |             | 5.77        | 2.97        | 0.27        | 2.21        | 0.98        | 0.54        |
| 11.00-11.30     | 0.07        | 2.04        | 0.16        | 3.27        | 0.03        | 0.26        | 3.49        | 0.68        | 3.67        | 4.59        | 2.44        | 0.75        | 3.58        | 1.30        | 0.26        |
| 11.30-12.00     | 0.10        | 1.38        | 0.03        | 4.87        | 0.02        | 0.29        | 1.95        | 1.09        | 1.84        | 5.43        | 2.15        | 0.58        | 1.93        | 0.84        | 0.14        |
| 12.00-12.30     | 0.08        | 1.00        | 0.04        | 4.86        | 0.02        | 0.29        | 1.46        | 1.55        | 2.60        | 4.77        | 2.14        | 0.68        | 1.47        | 0.55        | 0.07        |
| 12.30-13.00     | 0.06        | 0.93        | 0.11        | 4.69        | 0.02        | 0.28        | 1.15        | 0.96        | 2.17        | 4.57        | 2.00        | 0.24        | 1.18        | 0.66        |             |
| 13.00-13.30     | 0.11        | 0.77        | 0.02        | 5.56        | 0.02        | 0.29        | 0.90        | 1.88        | 2.68        | 4.44        | 1.02        | 0.57        | 1.02        | 0.20        | 0.04        |
| 13.30-14.00     | 0.11        | 0.61        | 0.02        | 7.24        | 0.03        | 0.19        | 0.49        | 2.70        | 2.52        | 4.67        | 1.01        | 0.57        | 0.59        | 0.10        | 0.03        |
| 14.00-14.30     | 0.07        | 0.62        | 0.02        | 6.62        | 0.01        | 0.26        | 0.80        | 2.46        | 2.99        | 4.66        | 1.69        | 0.81        | 0.77        | 0.09        | 0.04        |
| 14.30-15.00     | 0.10        | 1.85        | 0.02        | 5.05        | 0.01        | 0.13        | 1.63        | 1.88        |             | 3.24        | 1.44        | 0.93        | 2.31        | 0.32        | 0.06        |
| 15.00-15.30     | 0.07        | 1.51        | 0.07        | 5.79        | 0.02        | 0.21        | 1.52        | 2.05        | 2.88        | 4.83        | 2.14        | 1.32        | 1.54        | 1.11        | 0.13        |
| 15.30-16.00     | 0.08        | 1.16        | 0.04        | 7.29        | 0.03        | 0.47        | 1.40        | 1.19        | 3.68        | 8.23        | 2.32        | 1.26        | 1.38        | 0.23        | 0.11        |
| 16.00-16.30     | 0.08        | 2.93        | 0.03        | 5.70        | 0.03        | 0.09        | 3.43        | 2.54        |             | 5.30        | 1.92        | 1.67        | 3.21        | 0.71        | 0.06        |
| 16.30-17.00     | 0.09        | 2.53        | 0.02        | 6.85        | 0.01        | 0.15        | 4.18        | 2.33        | 2.63        | 5.75        | 1.24        | 2.11        | 4.02        | 1.11        | 0.13        |

Tab. 7.8 : Versuchstag 23.04.2003

## 8 LITERATUR

Bächlin, W., Frantz, H., Lohmeyer, A., Dreiseidler, A., Baumbach, G., Theurer, W., Heits, B., Müller, W.J., Giesen, K.-P. (2003a): Feinstaub und Schadgasbelastungen in der Göttinger Straße, Hannover (Projekt 1847).

Bächlin, W., Lohmeyer, A., Kuhlbusch, T., Dreiseidler, A., Baumbach, G., Giesen, K.-P., Heits, B., Müller, W.J., Klasmeier, E., Schmidt, H. (2003b): Aerosolbudget in einem landwirtschaftlich geprägten Gebiet in Niedersachsen (Projekt 1890).

Chock, D.P. (1982): Pollutant Dispersion Near Roadways – Experiments and Modeling. In: Abgasbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr im Nahbereich verkehrsreicher Straßen - Kolloquiumsbericht. Köln, TÜV Rheinland.

Claiborn, C., Mitra, A., Westberg, H., Lamb, B. (1994): Measurement and Source Apportionment of PM10 Roadway Emissions. Final Report. Washington State Transportation Center (TRAC), Washington, April 1994.

Eskridge, R., Hunt, J.C.R. (1979): Highway modelling. Part I: Prediction of velocity and turbulence fields in the wake of vehicles. In: J. Appl. Meteor. 18, pp. 387-400.

Hunt, J.C.R. (1982): Mechanism for Dispersion of Pollution around Buildings and Vehicles. In: Abgasbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr - Berichtsband mit zusammengestellten Beiträgen im Rahmen eines gemeinsamen Kolloquiums (20. und 21.10.1981, Köln) des Bundesministeriums für Forschung und Technologie und des TÜV Rheinland. Verlag TÜV Rheinland.

Ketzel, M., Berkovicz, R., Müller, W.J., Lohmeyer, A. (2002): Dependence of street canyon concentrations on above-roof wind speed - implications for numerical modelling

Kastner-Klein (1999): Experimentelle Untersuchung der strömungsmechanischen Transportvorgänge in Straßenschluchten. Dissertation am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe. Dissertationsreihe, Heft 1992/2.

Kühlwein, J., Friedrich, R. (2004): Endbericht (Entwurf) zur Durchführung eines Teilprojektes (TP 5) „Berechnung hochaufgelöster Emissionsdaten für einen Ballungsraum und Straßenschluchten (BEBAS)“ des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Atmosphärischenforschungsprogramms (AFO 2000) geförderten Forschungsvorhabens „Entwicklung und Validierung von Instrumenten zur Umsetzung der europäischen

Luftqualitätspolitik (VALIUM)“. Förderkennzeichen: 07ATF12. Hrsg.: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER), Stuttgart.

NLÖ (1993): Lufthygienisches Luftüberwachungssystem Niedersachsen. Luftschadstoffbelastung in Straßenschluchten. Hrsg.: Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hannover.

Okamoto et al. (1990): Comparative study on estimation methods for NO<sub>x</sub> emissions from a roadway, *Atm. Environment* Vol. 24A, No.6, pp. 1535-1544, 1990

Plate, E.J. (1982): Windkanalmodellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten. In: Abgasbelastungen durch den Kfz-Verkehr im Nahbereich verkehrsreicher Straßen. Kolloquiumsbericht. Köln, TÜV Rheinland, S. 61-83.

Rao, S.T., Sedefian, L., Czapski, U.H. (1979): Characteristics of turbulence and dispersion of pollutants near major highways. In: *J. Appl. Meteor.* 18, pp. 283-293.

Schäfer, K., Emeis, S., Hoffmann, H., Jahn, C. (2004): Feldmessungen in einem Stadtquartier zur Erzeugung eines Validierungsdatensatzes (Teilprojekt 4). Bericht im Rahmen des Verbundprojektes „Entwicklung und Validierung von Instrumenten zur Umsetzung der europäischen Luftqualitätspolitik (VALIUM)“ des AFO 2000-Programms (Förderkennzeichen 07ATF12). Hrsg.: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (IMK-IFU), Garmisch-Partenkirchen.

UBA (1999): Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 1.2/Januar 1999. INFRAS AG, Bern/Schweiz. Hrsg.: Umweltbundesamt, Berlin.