

Programm "Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung"

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Strömungsmechanische Aspekte in der Stadtplanung im Hinblick  
auf eine Reduktion von Kfz-Emissionen

von

P. Kastner-Klein, B. Ruck, E.J. Plate

Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe

Die Arbeiten des Projektes Europäisches Forschungszentrum für  
Maßnahmen zur Luftreinhaltung wurden mit Mitteln  
des Landes Baden-Württemberg gefördert

Förderkennzeichen: PEF 2 96 005 und 2 98 002

122 Seiten  
73 Abbildungen  
8 Tabellen  
57 Literaturstellen

März 2000

## **Kurzfassung**

Die Bedeutung der Themenbereiche Stadtklima und Luftreinhaltung in Ballungsgebieten hat in den letzten Jahren ständig zugenommen. Einen wichtigen Aspekt stellt die verkehrsbedingte Schadstoffbelastung in Innenstädten dar. Die Prognose von zukünftigen Schadstoffbelastungen kann nur bedingt anhand von Meßwerten erfolgen. Erforderlich sind vielmehr Prognoseverfahren, mit denen verschiedene Maßnahmen, welche eine Verbesserung der Luftqualität bewirken können (z.B. Veränderungen der Verkehrsführung oder der Bebauung) getestet werden können. Diese Prognoseverfahren müssen u.a. in der Lage sein die komplexen Strömungsverhältnisse in Stadtgebieten zu modellieren. Eine offene Frage ist, inwiefern die Fahrzeugbewegung selbst einen Einfluß auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in Stadtgebieten hat.

Im Rahmen des vorgestellten Projektes wurde mit Hilfe eines stufenweise aufgebauten Versuchsplans das Ziel verfolgt, möglichst allgemeingültige Aussagen über die Wirkung der Kfz - erzeugten Turbulenz auf die Schadstoffausbreitung in Stadtgebieten abzuleiten. Als Vorleistung für das Vorhaben wurde eine Versuchstechnik entworfen, welche die Überprüfung eines von Plate (1982) vorgeschlagenen Modellgesetzes zur Simulation der Kfz - erzeugten Turbulenz im Windkanal ermöglichte und es wurde eine Windkanalstudie mit idealisierten Straßenschluchten durchgeführt, welche im Rahmen des vorgestellten Projektes erweitert wurde. Die wichtigsten Ergebnisse dieser Studien können wie folgt beschrieben werden:

Messungen der Konzentrationsverteilungen an den Gebäudewänden haben den Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Ausbreitungsverhältnisse dokumentiert. Zu unterscheiden sind Situationen mit Gegen- bzw. Richtungsverkehr. Letzere führen zu einem signifikanten Schadstofftransport entlang der Straße, welcher nur durch eine aus der Fahrzeugbewegung resultierende, mittlere Strömung, erklärt werden kann. Im Falle von senkrecht angeströmten Straßenschluchten sind folglich die Konzentrationen an den Gebäudewänden asymmetrisch verteilt und nehmen entlang der Straße in Fahrtrichtung zu. Im Falle von Gegenverkehr ist die Konzentrationsverteilung ähnlich wie im Falle stehenden Verkehrs annähernd symmetrisch

zur Straßenmitte. Die Fahrzeugbewegung bewirkt einen Rückgang der Konzentrationen, welcher durch erhöhte Turbulenzanteile in der Straßenschlucht zu erklären ist. Ergebnisse aus Versuchen mit unterschiedlichen Verhältnissen von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit und Fahrzeugdichten bestätigen ein aus dem Modellgesetz von Plate (1982) abgeleitetes Ähnlichkeitskriterium.

Ein Vergleich der Windkanalergebnisse mit Ergebnissen aus numerischen Ausbreitungsmodellen, welche einen Ansatz zur Parametrisierung der verkehrserzeugten Turbulenz beinhalten, liefert eine gute Übereinstimmung für idealisierte Straßenschluchten mit Gegenverkehr.

Basierend auf den Ergebnissen der Studien mit idealisierten Straßenschluchten wurde ein Versuchsprogramm zur Modellierung der Ausbreitungsverhältnisse im Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße unter Berücksichtigung der Kfz - erzeugten Turbulenz aufgestellt. Das Versuchskonzept wird dokumentiert und der Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Konzentrationsverteilung wird aufgezeigt. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

Im Vergleich zur Situation mit ruhendem Verkehr sind die Gradienten der horizontalen Konzentrationsverteilung deutlich geringer. Die Unterschiede zwischen den Konzentrationen an den unterschiedlichen Meßstellen, welche bei ruhendem Verkehr durch die Umströmung der Gebäude (Luv - Lee Effekt in der Straßenschlucht, Wirbel in Kreuzungsbereichen) verursacht werden, werden abgeschwächt. Eine Absenkung des Konzentrationsniveaus in der Hauptstätter Straße wird bei höheren Geschwindigkeitsverhältnissen beobachtet.

Abschließend wird ein Vergleich der im Windkanal gemessenen Konzentrationsverteilungen im Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße mit Ergebnissen aus Modellrechnungen mit den Ausbreitungsmodellen MISKAM und ABC kurz betrachtet. Ein Vergleich mit Naturdaten war während des vorgestellten Projektes leider nicht möglich. Es sollte aber das Ziel zukünftiger Studien sein die Übertragbarkeit der erzielten Windkanalergebnisse auf die Natur, insbesondere für Situationen mit Richtungsverkehr, sicherzustellen.

## **Abstract**

Dispersion conditions inside street canyons were investigated in an atmospheric boundary - layer wind tunnel, within the framework of the research project "Flow mechanics aspects of city planning with respect to the reduction of vehicle emissions". The consideration of vehicle-induced turbulence presented an important aspect of the study. Series of experiments were designed, with the goal to derive general conclusions about the effect of vehicle-induced turbulence on dispersion of vehicle emissions in urban areas. A law of modelling for vehicle-induced turbulence in a wind tunnel, proposed by Plate in 1982, formed the background of the studies.

It was confirmed by the first part of experiments during which a technique of simulating the vehicle motions by small metal plates mounted on belts moving along the street was used in an idealised street canyon with a perpendicular approach flow. Concentration measurements carried out at the canyon walls documented the effect of the vehicle motions on the dispersion patterns. It is necessary to distinguish between situations with two-way traffic and one-way traffic. The second case results in a significant transport of pollutants along the street. It can only be explained by the presence of a mean flow velocity caused by the vehicle motions. For perpendicular approach flow the concentration distribution at the building walls becomes asymmetric with an increase of concentration along the street in the direction of traffic flow. In the case of two-way traffic, the concentration distribution is similar to the reference case without traffic movement, and is approximately symmetric to the centre of the buildings. The vehicle movement induces an increase of turbulence which in turn causes a reduction of concentrations. Results from studies with different ratios of vehicle velocity and density to wind velocity verify the similarity criterion derived from the law of modelling by Plate (1982).

A comparison of the wind - tunnel data with calculations by numerical dispersion models which take into account the effects of traffic induced turbulence has shown a good agreement for the idealised street canyon situations with two - way traffic.

Based upon these results, a study scheme was developed which takes into account the effects of vehicle-induced turbulence for modelling the dispersion conditions in the area around the Hauptstätter Straße in the city of Stuttgart. The entire measurement procedure is documented and the influence of the vehicle movements on the concentration distribution are presented. The results can be expressed as follows:

In comparison to the situation without traffic movement, the gradients of the horizontal concentration distribution are substantially smaller. The differences between the concentrations at the various measuring points, which for the case of non-moving vehicles are caused by flow between and around the buildings, are diminished. A reduction of the concentration levels in the Hauptstätter Straße is observed for higher ratios of vehicle to wind velocity.

Finally a comparison of concentration distributions measured in the wind tunnel with predictions by the numerical dispersion models MISKAM and ABC is presented. Unfortunately a comparison with full-scale data was not possible during this project. It should be a goal for future studies to verify the wind - tunnel results against observations in the nature, especially for the situations with one - way traffic.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Forschung</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Windkanalmodellierung</b>	<b>5</b>
3.1	Modellgesetze	5
3.2	Anströmbedingungen im Windkanal	8
3.3	Meßtechnik	16
3.3.1	Konzentrationsmessungen	16
3.3.2	Geschwindigkeitsmessungen	16
<b>4</b>	<b>Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Transportvorgänge in Straßenschluchten</b>	<b>19</b>
4.1	Zusammenfassung von Literaturergebnissen	20
4.2	Modellgesetz und Versuchskonzept für die Durchführung von Windkanalversuchen	28
4.3	Einfluß auf die Konzentrationsverteilung in einer Straßenschlucht mit $H/S = 1$ bei senkrechter Anströmung	32
4.4	Einfluß auf die Konzentrationsverteilung in einer Straßenschlucht mit $H/S = 1/2$ und $1/3$ bei senkrechter Anströmung	45
4.5	Einfluß auf die Konzentrationsverteilung in einer Straßenschlucht mit $H/S = 1$ bei paralleler Anströmung	55
4.6	Einfluß von Variationen der Plättchendicke auf die Konzentrationsverteilung	64
4.7	Beeinflussung des Strömungsfeldes in Straßenschluchten	71
4.8	Vergleich ausgewählter Windkanalergebnisse mit Literaturergebnissen	79
<b>5</b>	<b>Modellierung der Ausbreitungsverhältnisse im Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße</b>	<b>85</b>
5.1	Beschreibung des Untersuchungsgebietes	85
5.2	Beschreibung des Versuchsprogramms	85

<b>6</b>	<b>Konzentrationsverteilung im Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße ohne Berücksichtigung der Kfz - erzeugten Turbulenz</b>	<b>91</b>
6.1	Überprüfung der Quellbedingungen	91
6.2	Vergleich mit Ergebnissen für idealisierte Bebauungsstrukturen	91
6.3	Einfluß der Windrichtung an ausgewählten Meßpunkten	94
6.4	Räumliche Verteilung der Konzentrationen im Untersuchungsgebiet	97
<b>7</b>	<b>Konzentrationsverteilung im Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße unter Berücksichtigung der Kfz - erzeugten Turbulenz</b>	<b>99</b>
7.1	Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz in der Hauptstätter Straße	99
7.2	Einfluß auf die Konzentrationsverteilung	103
<b>8</b>	<b>Vergleich der Windkanalergebnisse für das Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße mit numerischen Simulationen</b>	<b>111</b>
<b>9</b>	<b>Schlußfolgerungen und offene Fragen</b>	<b>115</b>
<b>10</b>	<b>Literatur</b>	<b>119</b>

# Abbildungsverzeichnis

## Kapitel 3:

- Abb. 3.1:** Grenzschichtwindkanal am Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe. S. 8
- Abb. 3.2:** Prinzipskizze zur Grenzschichterzeugung im Grenzschichtwindkanal des Instituts für Hydromechanik an der Universität Karlsruhe. S. 8
- Abb. 3.3:** (a) Mittleres Windprofil und (b) Profil der Turbulenzintensitäten  $I_u$  gemessen am Ende der Anlaufstrecke im Windkanal des Instituts für Hydromechanik für zwei unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten. S. 9
- Abb. 3.4:** Anpassung des mittleren Windprofils an ein Potenzprofil und an das logarithmische Wandgesetz. S. 10
- Abb. 3.5:** Vergleich des mittleren Windprofils mit einem Potenzprofil und einem logarithmischen Profil. Der untere Bereich der Grenzschicht ist im rechten Diagramm vergrößert dargestellt. S. 12
- Abb. 3.6:** Schwankungsanteile in der Windkanalgrenzschicht im Vergleich zu Richtwerten aus experimentellen Beobachtungen:  $\sigma_u / u_*$  (links),  $\sigma_v / u_*$  und  $\sigma_w / u_*$  (rechts). S. 13
- Abb. 3.7:** Vergleich der Spektraldichtefunktion  $S_{uu}(f)$  in der Windkanalgrenzschicht mit Anpassungen für die Spektraldichtefunktion in der atmosphärischen Grenzschicht. Die Darstellung erfolgte in normierter Form. S. 15

## Kapitel 4:

- Abb. 4.1:** Skizze des Versuchsaufbaus (Ausschnitt) bei dem General Motors Experiment (aus Eskridge und Hunt 1979). S. 20
- Abb. 4.2:** Ergebnisse der mittleren und turbulenten Strömungskomponenten (Halbstundenwerte) aus dem General Motors Experiment für den exemplarisch ausgewählten Versuchstag 293. Angaben in cm/s bzw.  $(\text{cm/s})^2$  (aus Eskridge und Hunt 1979). S. 21 und 22
- Abb. 4.3:** Lage der Meßstellen bei Naturmessungen in einer vierspurigen Einfallstraße in der französischen Stadt Nantes (aus Delaunay und Houseaux, 1997). S. 24
- Abb. 4.4:** Einfluß des Verkehrsaufkommens auf die Ergebnisse an den beiden Meßstellen des Meßmastes A (Pylone A) bei Naturmessungen in einer vierspurigen Einfallstraße in der französischen Stadt Nantes: Mittlere Strömungskomponente in Fahrtrichtung der Fahrzeuge (linke Diagramme) und turbulente kinetische Energie (rechte Diagramme; aus Delaunay und Houseaux, 1997). S. 25

- Abb. 4.5:** Versuchsaufbau zur Simulation der Kfz - erzeugten Turbulenz in Straßenschluchten. Die Pfeile veranschaulichen die Bewegungsrichtung der Bänder bei Gegenverkehr (GV) und Richtungsverkehr (RV) bei den Versuchen mit senkrechter Anströmung (von rechts) und  $H/S = 1$ . S. 30
- Abb. 4.6:** Geometrie der Metallplättchen zur Simulation der Kfz - erzeugten Turbulenz. S. 31
- Abb. 4.7:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht in Abhängigkeit vom modellierten Verkehrszustand (Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7 \text{ m/s}$ , Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 33
- Abb. 4.8:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7 \text{ m/s}$ , Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 35
- Abb. 4.9:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen Wand (Geb. II) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7 \text{ m/s}$ , Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 36
- Abb. 4.10:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 43 \text{ km/h}$ , Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 37
- Abb. 4.11:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr bei einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  (Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 38
- Abb. 4.12:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen Wand (Geb. II) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr bei einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  (Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 39
- Abb. 4.13:** Konzentrationsprofile in der Mitte der leeseitigen Gebäudewand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Verhältnis Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0$  (Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 40
- Abb. 4.14:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Dichteparameter  $a$  ( $v/u_0 = 1.7$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 41

- Abb. 4.15:** Konzentrationen in der Schluchtmitte in Bodennähe an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis und der Verkehrsdichte (Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). Dargestellt sind die Konzentrationen bezogen auf das Ergebnis im Referenzfall mit stehendem Verkehr ( $v = 0 \text{ km/h}$ ). S. 42
- Abb. 4.16:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7 \text{ m/s}$ , Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 44
- Abb. 4.17:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr in Abhängigkeit vom Dichteparameter  $a$  (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 43 \text{ km/h}$ , Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7 \text{ m/s}$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). S. 45
- Abb. 4.18:** Versuchsaufbau bei den Experimenten mit senkrechter Anströmung und  $H/S = 1/2$  und  $H/S = 1/3$ . Zum Vergleich sind die entgegengesetzten Fahrrichtungen bei Gegenverkehr bei der Studie mit  $H/S = 1$  mit eingezeichnet. S. 46
- Abb. 4.19:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Grafik) und Gegenverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 24 \text{ cm}$  ( $H/S = 1/2$ ). S. 47
- Abb. 4.20:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen (Geb. II) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Grafik) und Gegenverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 24 \text{ cm}$  ( $H/S = 1/2$ ). S. 48
- Abb. 4.21:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Grafik) und Gegenverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 36 \text{ cm}$  ( $H/S = 1/3$ ). S. 49
- Abb. 4.22:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen (Geb. II) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Grafik) und Gegenverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 36 \text{ cm}$  ( $H/S = 1/3$ ). S. 50
- Abb. 4.23:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit für die Straßenbreiten  $S = 24 \text{ cm}$  und  $S = 36 \text{ cm}$ . S. 51

- Abb. 4.24:** Abhängigkeit des Konzentrationsmaximums an der leeseitigen Schluchtwand bei senkrechter Anströmung und bei Gegenverkehr vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit für  $H/S = 1/2$  und  $H/S = 1/3$  im Vergleich zu den Ergebnissen für  $H/S = 1$ . S. 51
- Abb. 4.25:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Abb.) und Richtungsverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 24 \text{ cm}$  ( $H/S = 1/2$ ). S. 52
- Abb. 4.26:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen (Geb. II) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Abb.) und Richtungsverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 24 \text{ cm}$  ( $H/S = 1/2$ ). S. 53
- Abb. 4.27:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Abb.) und Richtungsverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 36 \text{ cm}$  ( $H/S = 1/3$ ). S. 54
- Abb. 4.28:** Versuchsaufbau bei den Experimenten mit paralleler Anströmung S. 55
- Abb. 4.29:** Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. I) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr und variabler Windgeschwindigkeit. S. 56
- Abb. 4.30:** Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr und variabler Windgeschwindigkeit. S. 57
- Abb. 4.31:** Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. I) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr und einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$ . S. 58
- Abb. 4.32:** Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr und einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$ . S. 59
- Abb. 4.33:** Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. I) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit. S. 60
- Abb. 4.34:** Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit. S. 61

- Abb. 4.35:** Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr in Windrichtung und einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$ . S. 62
- Abb. 4.36:** Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr entgegen der Windrichtung und einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$ . S. 63
- Abb. 4.37:** Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr entgegen der Windrichtung in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit. S. 64
- Abb. 4.38:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Plättchendicke  $d$  (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 30$  km/h, Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7$  m/s, Dichteparameter  $a = 1$ ). S. 65
- Abb. 4.39:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Plättchendicke  $d$  (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 49$  km/h, Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7$  m/s, Dichteparameter  $a = 1$ ). S. 66
- Abb. 4.40:** Konzentrationen in der Schluchtmitte in Bodennähe an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis und der Verkehrsdichte (Plättchendicke  $d = 6$  mm). Dargestellt sind die Konzentrationen bezogen auf das Ergebnis im Referenzfall mit stehendem Verkehr ( $v = 0$  km/h). S. 68
- Abb. 4.41:** Konzentrationen in der Schluchtmitte in Bodennähe an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis, der Verkehrsdichte und der Plättchendicke. Dargestellt sind die Konzentrationen bezogen auf das Ergebnis im Referenzfall mit stehendem Verkehr ( $v = 0$  km/h). S. 69
- Abb. 4.42:** Strömungsablösung bei Quadern mit verschiedenen Längen-Breiten-Verhältnissen nach Nakaguchi (1978). Die Zugabe des Rauches erfolgte vor (obere Aufnahmen) bzw. hinter dem Hindernis (untere Aufnahmen). S. 70
- Abb. 4.43:** Versuchsaufbau bei den Strömungsfeldmessungen in der Straßenschlucht mit einem 2 - Komponenten - LDA - System (links: Ansicht von oben, rechts: vertikaler Schnitt durch die Straßenschlucht). S. 72
- Abb. 4.44:** Mittlere und turbulente, horizontale Geschwindigkeitskomponenten in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0$  mm einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (Referenzfall). S. 73
- Abb. 4.45:** Einfluß der Fahrzeugbewegung auf den Mittelwert der  $u_w$  - Komponente der Geschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0$  mm einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht. S. 75

- Abb. 4.46:** Einfluß der Fahrzeugbewegung auf den Mittelwert der  $v_w$  - Komponente der Geschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0$  mm einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht. S. 76
- Abb. 4.47:** Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Standardabweichung der  $u_w$  - Komponente der Geschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0$  mm einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht. S. 77
- Abb. 4.48:** Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Standardabweichung der  $v_w$  - Komponente der Geschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0$  mm einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht. S. 78
- Abb. 4.49:** Tagesgang des Turbulenzparameters  $\sigma_w$  für Schwachwindsituationen mit  $u < 1.5$  m/s an Werktagen und Samstagen an einer Straße in Kopenhagen, Dänemark. Die eingezeichneten Linien entsprechen dem gerechneten Verlauf der verkehrsinduzierten Turbulenzintensität mit dem Modell OSPM. S. 80
- Abb. 4.50:** Mit OSPM berechnete Abhängigkeit der Konzentration in einer Straßenschlucht an der leeseitigen Wand in Bodennähe von Variationen des Geschwindigkeitsverhältnisses und der Verkehrsdichte. S. 82
- Abb. 4.51:** Vergleich der Windkanalergebnisse mit Berechnungen, die mit dem numerischen Gittermodell MICRO CALGRID für eine vierspurige Straße in Berlin durchgeführt wurden. S. 84

### ***Kapitel 5:***

- Abb. 5.1:** Windkanalmodell des Gebietes Stuttgart Hauptstätter Straße S.86
- Abb. 5.2:** Skizzierter Lageplan des Untersuchungsgebietes Hauptstätter Straße. S.88

### ***Kapitel 6:***

- Abb. 6.1:** Vertikale Konzentrationsprofile bei einer Senkrechtanströmung der Hauptstätter Straße (WR 300°) an den Meßpositionen H1 - H8 in der Hauptstätter Straße. Variiert wurde die Windgeschwindigkeit  $u_0$  in Grenzschichthöhe in der ungestörten Anströmung und die Austrittsgeschwindigkeit  $v_Q$  aus der Quelle. S.92
- Abb. 6.2:** Vergleich der Ergebnisse an den Meßpunkten in der Hauptstätter Straße (HS, Meßhöhe  $z=0.8$ cm bzw. 1.6m) mit den Ergebnissen aus den Studien mit idealisierten Straßenschluchten und - kreuzungen (Meßhöhe  $z=1$ cm bzw. 1.5m). Aufgetragen sind die Ergebnisse bei einer jeweils senkrechten Anströmung der Linienquelle. S.93
- Abb. 6.3:** Einfluß der Windrichtung auf die Konzentration am Meßpunkt H7 in der Meßhöhe  $z=1.8$  cm bzw. 6.8 cm (rote Linien). Die grüne Kurve entspricht den Ergebnissen an einem um - 1 cm horizontal versetzten Meßpunkt in  $z=1.8$  cm. S.95

**Abb. 6.4:** Einfluß der Windrichtung auf die Konzentration an den Meßpunkten R4 und R6 in der Römer Straße in der Höhe  $z=1.8\text{cm}$ . Betrachtet wird nur der Transport von Schadstoffen aus der Hauptstätter Straße. S.96

**Abb. 6.7:** Horizontale Konzentrationsverteilung im Untersuchungsgebiet in der Referenzhöhe  $z=1.8\text{cm}$ , resultierend aus Emissionen der Linienquelle Hauptstätter Straße. Dargestellt sind die Konzentrationswerte an den Meßpunkten H1 - H8 für insgesamt 8 verschiedene Windrichtungen ( $45^\circ$  - Schritte). Die Farbe und Größe der Symbole liefern die Information über die Höhe der gemessenen Konzentrationen; die Richtung des Symbols entspricht jeweils der Windrichtung. S.98

### ***Kapitel 7:***

**Abb. 7.1:** Definitionsskizze zu den Versuchen im Untersuchungsgebiet Hauptstätter Straße mit integrierter Versuchstechnik zur Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz. S.104

**Abb. 7.2:** Einfluß von Variationen der Fahrzeuggeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit auf die Konzentrationsprofile an der Meßstelle H7 bei der Windrichtung  $120^\circ$ . S.104

**Abb. 7.2:** Einfluß von Variationen der Fahrzeuggeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit auf die Konzentrationsprofile an der Meßstelle H7 bei der Windrichtung  $120^\circ$ . S.104

**Abb. 7.3:** Einfluß des Verhältnisses der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit auf die Konzentrationsprofile an den Meßstellen H1 - H8 bei der Windrichtung  $120^\circ$ . S.109

**Abb. 7.4:** Einfluß des Verhältnisses der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit auf die Konzentration in der Höhe  $z=0.8\text{ cm}$  an den Meßstellen H1 - H8 bei der Windrichtung  $120^\circ$ . S.110

### ***Kapitel 8:***

**Abb. 8.1:** Vergleich der Windkanalergebnisse an dem Meßpunkt H7 mit Berechnungen mit den Ausbreitungsmodellen Miskam und ABC. S.112

**Abb. 8.2:** Vergleich der Windkanalergebnisse an dem Meßpunkt R4 in der Römer Straße mit Berechnungen mit den Ausbreitungsmodellen Miskam und ABC. S.113



# Tabellenverzeichnis

## *Kapitel 4:*

<b>Tab. 4.1:</b> Verkehrsszenarien bei den Berechnungen mit dem Modell MICRO CALGRID.	S. 83
---	-------

## *Kapitel 5:*

<b>Tab. 5.1:</b> Beschreibung der Linienquellen in der Windkanalstudie Stuttgart Hauptstätter Straße	S. 86
<b>Tab. 5.2:</b> Beschreibung der Meßstellen im Untersuchungsgebiet	S. 89

## *Kapitel 7:*

<b>Tab. 7.1:</b> Typische Werte für das Verhältnis von Fahrzeug - zur Windgeschwindigkeit im Gebiet Hauptstätter Straße	S. 100
<b>Tab. 7.2:</b> Ableitung der Verkehrsdichte $(n_t)_n$ in der Natur (Anzahl der Kfz/km) aus den Verkehrsstärken und Fahrzeuggeschwindigkeiten.	S. 101
<b>Tab. 7.3:</b> Resultierende Verkehrsdichte im Modell $(n_t)_m$ in Kfz/m.	S. 101
<b>Tab. 7.4:</b> Übertragung der Modellparameter auf Naturverhältnisse.	S. 102
<b>Tab. 7.5:</b> Auflistung der Versuchsbedingungen der Studie Stuttgart Hauptstätter Straße, Phase2.	S. 103



# 1. Einleitung

Bei Genehmigungsverfahren von Projekten im Bereich der Stadtplanung müssen die Auswirkungen der geplanten Maßnahmen auf die Luftqualität berücksichtigt werden. Ein Themenschwerpunkt stellt die durch Kfz - Emissionen verursachte Schadstoffbelastung dar. Bisherige Maßnahmen zur Minderung der Kraftfahrzeugemissionen, wie z. B. die Installation von Katalysatoren, wurden durch ständig steigende Fahrzeugzahlen kompensiert. Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität in Stadtgebieten müssen deshalb über die Entwicklung von Emissionsminderungstechniken hinausgehen. Die Beurteilung von verkehrspolitischen Maßnahmen erfordert Verfahren, welche neben der Bestimmung der Emissionen auch die Prognose von Ausbreitungsvorgängen in urbanen Bereichen beinhalten. Mögliche Prognoseverfahren sind numerische Ausbreitungsmodelle oder die physikalische Modellierung der relevanten Prozesse in Windkanälen. Beide Methoden wurden in den letzten Jahren bei Stadtklima - Fragestellungen eingesetzt. Es hat sich dabei gezeigt, daß insbesondere im Bereich der numerischen Modellierung Defizite bestehen und Referenzdatensätze aus Messungen für die Modellvalidierung unabdingbar sind. Datensätze aus Windkanalversuchen haben sich bewährt und bereits erste Modellverbesserungen ermöglicht. Es gibt aber auch bei der Windkanalmodellierung noch offene Fragen bezüglich der Übertragbarkeit auf die Natur und der Modellierung verschiedener Einflußgrößen, wie z. B. der Kfz - erzeugten Turbulenz.

Im Rahmen des vorgestellten Projektes wurde das Ziel verfolgt, Informationen über die Wirkung der Kfz - erzeugten Turbulenz auf die Kfz - bedingte Schadstoffbelastung für ein Spektrum städtischer Bebauungsstrukturen zu erhalten. Das Vorhaben stellt eine Weiterführung bisheriger Arbeiten dar, wobei das Gesamtkonzept wie folgt beschrieben werden kann:

1. Erarbeiten der Grundlagen und Entwicklung einer Versuchstechnik zur Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz im Windkanal.
2. Überprüfung des Modellierungsansatzes in einer Windkanalstudie.
3. Einzelfallstudie zum Nachweis der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Natur.

4. Systematische Erweiterung der Datenbasis durch Parametervariationen, welche die Übertragung der Ergebnisse auf ein Spektrum von städtischen Untersuchungsgebieten ermöglichen.

Die ersten beiden Punkte wurden größtenteils als Vorleistungen für das vorgestellte Projekt erbracht. Die Ergebnisse werden im Kapitel 4 dieses Berichtes ausführlich diskutiert. Die unter Punkt 3 aufgeführte Überprüfung des Ergebnisse im Rahmen einer Einzelfallstudie mit einem Modell einer realen, äußerst komplexen Bebauungsstruktur war ursprünglich als Projektschwerpunkt geplant. Es wurde ein Stadtteil von Stuttgart ausgewählt, in welchem in der Natur an mehreren Punkten verteilt in dem Gebiet um die Hauptstätter Straße Konzentrationsmessungen durchgeführt werden, und in dem zusätzlich Messungen der mittleren und turbulenten Windgeschwindigkeiten an einer Meßstation in der Hauptstätter Straße erfaßt werden. In einem Grenzschichtwindkanal an der Universität Karlsruhe wurden die Ausbreitungsverhältnisse in diesem Gebiet untersucht. In einer ersten Versuchsreihe wurden Kfz - Emissionen in der Hauptstätter Straße und Tübinger Straße mit Hilfe von Linienquellen simuliert, wobei die Fahrzeugbewegung nicht explizit nachgebildet wurde. Eine spezielle Versuchstechnik zur Modellierung der Fahrzeugbewegung wurde für eine zweite Versuchsreihe in das Modell integriert. Die Dokumentation der Versuche und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in den Kapiteln 5-8.

Ein Vergleich der Windkanaldaten mit den Naturmessungen, sollte wichtige Informationen über die Übertragbarkeit der Modellergebnisse auf die Natur liefern. Nach Abschluß der ersten Projekthälfte war jedoch klar, daß diese Naturdaten im Bearbeitungszeitraum des Projektes nicht für einen Vergleich zur Verfügung stehen werden. Es wurde deshalb die unter Punkt 4 aufgeführte Erweiterung der Datenbasis in den Vordergrund gestellt. Untersucht wurde die Wirkung der Fahrzeugbewegung in idealisierten Straßenschluchten bei Variationen der Windrichtung und Straßenbreite. Die erzielten Ergebnisse werden in den Abschnitten 4.4 und 4.5 vorgestellt.

## **2. Stand der Forschung**

In den letzten Jahren wurden sowohl national als auch international zahlreiche Arbeiten zum Thema Ausbreitungs - und Strömungsvorgänge in Stadtgebieten veröffentlicht. Im Bereich der Windkanalmodellierung sind vor allem die Arbeiten aus Hamburg (z.B. Meroney et al., 1996, Pavageau et al., 1997 und Liedtke et al., 1998) und Karlsruhe (z.B. Kastner-Klein und Plate, 1998) zu nennen. Es wurden die Grundlagen zur Modellierung von Kfz - Emissionen mit Hilfe von Linienquellen geschaffen und die Ausbreitungsverhältnisse in realen und idealisierten Stadtgebieten untersucht.

Vorrangig betrachtet wurden die Strömungs - und Ausbreitungsverhältnisse in Straßenschluchten. Diese Bebauungsstruktur ist in Innenstadtbereichen weit verbreitet und ist gekennzeichnet durch lange, relativ hohe Gebäude, die die Straße flankieren und zu einer schlechten Belüftung des Straßenraumes führen. Eine Zusammenstellung von Literaturergebnissen zum Thema Schadstoffbelastung in Straßenschluchten und ein Vergleich von Ergebnissen aus verschiedenen Studien ist in Kastner-Klein (1999) enthalten. Es hat sich gezeigt, daß kleinskalige Parameter der Gebäudegeometrie, wie z.B. die Form der Dächer, einen wesentlichen Einfluß auf die Konzentrationsverteilung haben. Aus den Ergebnissen ist auch zu schließen, daß ein in der Straßenschlucht rotierender Wirbel ("Canyon - Vortex"), welcher üblicherweise als charakteristisches Strömungsregime in einer Straßenschlucht angenommen wird, nur in ausgewählten Zonen und nur unter bestimmten Randbedingungen beobachtet werden kann. In vielen Fällen dominieren auch bei einer senkrechten Anströmung der Straßenschlucht Strömungskomponenten entlang der Straße die Transportvorgänge. Im Falle von Schräganströmungen ist die Strömungskomponente entlang der Straße bereits bei kleinen Winkeln nicht zu vernachlässigen. Zusätzliche Gebäudereihen stromaufwärts der untersuchten Straßenschlucht führen zu einem Anstieg der Schadstoffbelastung im Straßenraum.

Eine offene Frage stellt die Modellierung des Einflusses der Kfz - erzeugten Turbulenz dar. In Kastner-Klein et. al. (1999) werden Ergebnisse aus Windkanalversuchen mit einer Versuchstechnik zur Modellierung dieser Einflußgröße beschrieben. Ein Modellierungskonzept wird dargelegt, der Einfluß auf die Konzentrationsverteilung in idealisierten Straßenschluchten

aufgezeigt und es erfolgt ein erster Vergleich mit Naturmessungen. Das Versuchskonzept und die Fortführung der Versuche im Rahmen des durchgeführten Forschungsvorhabens werden im folgenden Bericht dokumentiert. Eine Zusammenfassung von Literaturergebnissen zum Thema Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Schadstoffausbreitung in Straßen wird explizit im Abschnitt 4.1 vorgestellt.

Auf dem Gebiet der numerischen Modellierung wurden, u. a. Dank der ständig steigenden Computerressourcen, deutliche Fortschritte in der Leistungsfähigkeit der Modelle und der praktischen Anwendbarkeit erzielt. Die Aufnahme von Modellen in Richtlinien, haben die Frage nach der Qualitätssicherung der Ergebnisse weiter in den Vordergrund gestellt. Als Arbeiten, welche sich mit dem Thema der Modellvalidierung befassen, können exemplarisch die Veröffentlichungen von Schatzmann et al. (1997) und Schädler et al. (1996, 1999) genannt werden. Es hat sich gezeigt, daß Datensätze aus Windkanalversuchen eine gute Basis zur Validierung von mikroskaligen Ausbreitungsmodellen darstellen.

## 3. Windkanalmodellierung

Ein gutes Verfahren für Untersuchungen in den Bereichen Gebäudeaerodynamik und Stadtklimatologie ist die physikalische Modellierung der relevanten Prozesse in einem Windkanal. Geometrisch ähnliche Modelle der Bebauungsstruktur werden in eine Windkanalströmung eingebaut und vermessen. Im Vergleich zu Naturmessungen haben diese Art von Untersuchungen den großen Vorteil, daß die Versuchsbedingungen kontrollierbar sind und das Testen verschiedener Varianten möglich ist. Je nach Fragestellung werden beispielsweise die Druckverteilungen an den Gebäuden oder die Windgeschwindigkeiten und Konzentrationsverteilungen in einem bestimmten Gebiet für verschiedene Bebauungsvorschläge ermittelt. Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Windkanalversuchen auf die Naturverhältnisse sicher zu stellen, müssen bestimmte Modellgesetze erfüllt werden. Diese werden im Folgenden beschrieben und ihre Einhaltung bei den durchgeführten Versuchen wird diskutiert. Variablen, welche die Bedingungen bei den Windkanalversuchen (Modellsituation) repräsentieren, sind durch den Index  $M$  gekennzeichnet, während der Index  $N$  Naturbedingungen zugeordnet ist.

### 3.1 Modellgesetze

Eine ausführliche Beschreibung der Grundlagen der Windkanalmodellierung und der technischen Realisierung von atmosphärischen Grenzschichtströmungen in Windkanälen unterschiedlicher Bauart ist in Plate (1982) zu finden. Zur Standardisierung der Windkanalmodellierung wurde in den letzten Jahren ein Merkblatt der Windtechnologischen Gesellschaft (WTG) über Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik (enthalten in Plate, 1995) veröffentlicht und vom Normenausschuß der Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN wurde die Richtlinie VDI 3783, Blatt 12 (1999) erarbeitet.

Bei der Untersuchung von Ausbreitungs- und Strömungsvorgängen in bebauten Gebieten müssen zum einen die Anströmbedingungen in der Windkanalgrenzschicht ähnlich sein zur atmosphärischen Grenzschicht und zum anderen muß die Umströmung der Modellgebäude ähnlich sein zur Gebäudeumströmung in der Natur (siehe auch Bächlin u. Theurer, 1995). Die Modellgesetze können wie folgt formuliert werden:

**Ähnlichkeit der Anströmung:**

- Um sicherzustellen, daß die Windkanalströmung eine vollturbulente, reynoldsunabhängige Prandtl - Schicht nachbildet, muß für die im Kapitel 2 eingeführte Rauigkeitsreynoldszahl gelten:

$$\text{Re}_{R,M} = \frac{u_{*,M} \cdot z_{0,M}}{\nu} > 5 \quad (3.1)$$

Diese Angabe entspricht einer konservativen Forderung (siehe im Vergleich Gl. 2.26), wie sie im Merkblatt "Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik" der Windtechnologischen Gesellschaft angegeben ist.

- Die mittleren Windprofile in der Windkanalgrenzschicht und atmosphärischen Grenzschicht müssen ähnlich sein. Bei einer Anpassung des Windprofils mit einem Potenzansatz nach Gl. (2.27) folgt daraus, daß die Profilexponenten  $\alpha$  im Modell und in der Natur gleich sein müssen:

$$\alpha_M = \alpha_N . \quad (3.2)$$

Bei einer Anpassung des Windprofils nach dem logarithmischen Wandgesetz (Gl. 2.25) sind die Rauigkeitslängen entsprechend dem Modellmaßstab  $M$  zu modellieren:

$$\frac{z_{0,M}}{z_{0,N}} = M . \quad (3.3)$$

- Neben dem mittleren Windprofil müssen die Profile der Turbulenzintensitäten  $I_i = \sigma_i / u_i$  im Windkanal ähnlich sein zu den Turbulenzintensitäten in der Natur:

$$I_i(z/L_c)_M = I_i(z/L_c)_N . \quad (3.4)$$

- Um sicherzustellen, daß die räumliche Verteilung der Turbulenz maßstäblich simuliert wird, sind die integralen Längenmaße  $L_{ux}$  (Definition siehe Gl. 2.40) entsprechend dem geometrischen Maßstab zu modellieren:

$$\left( \frac{L_{ux}}{L_c} \right)_M = \left( \frac{L_{ux}}{L_c} \right)_N. \quad (3.5)$$

- Zudem muß die Verteilung der turbulenten Schwankungen mit der Frequenz im Modell und in der Natur ähnlich sein. Dies bedeutet, daß die normierten Spektraldichtefunktionen bei einer Auftragung über der normierten Frequenz  $f_n = f \cdot L_{ux}/u$  deckungsgleich sein müssen:

$$\left( \frac{f \cdot S_{uu}(f)}{\sigma_u^2} \right)_M = \left( \frac{f \cdot S_{uu}(f)}{\sigma_u^2} \right)_N. \quad (3.6)$$

### Ähnlichkeit der Gebäudeumströmung:

Um eine geometrisch ähnliche Umströmung der Modellgebäude wie in der Natur sicherzustellen, muß streng genommen die Reynoldszahl  $Re = u_c \cdot L_c/\nu$  im Modell den gleichen Wert haben wie in der Natur. Bei Modellversuchen mit unverändertem Strömungsmedium ist dieses Kriterium nicht einzuhalten, da aus  $\nu_M = \nu_N$  folgt, daß die Geschwindigkeiten im Modell um den geometrischen Maßstab höher sein müßten als in der Natur. Es ist leicht zu verstehen, daß bei den üblichen Maßstäben von 1:100 bis 1:1500 diese Forderung nicht zu erfüllen ist. Im vorhergehenden Abschnitt wurde jedoch bereits erwähnt, daß bei scharfkantigen Hindernissen die Lage der Strömungsablösung fixiert ist und ab einer gewissen Reynoldszahl ( $\approx 10000$ ) die Versuchsergebnisse unabhängig von der Reynoldszahl sind. Die Forderung nach einer ähnlichen Umströmung der Gebäude kann deshalb wie folgt formuliert werden:

$$Re_M = \left( \frac{u_c \cdot L_c}{\nu} \right)_M > 10000. \quad (3.7)$$

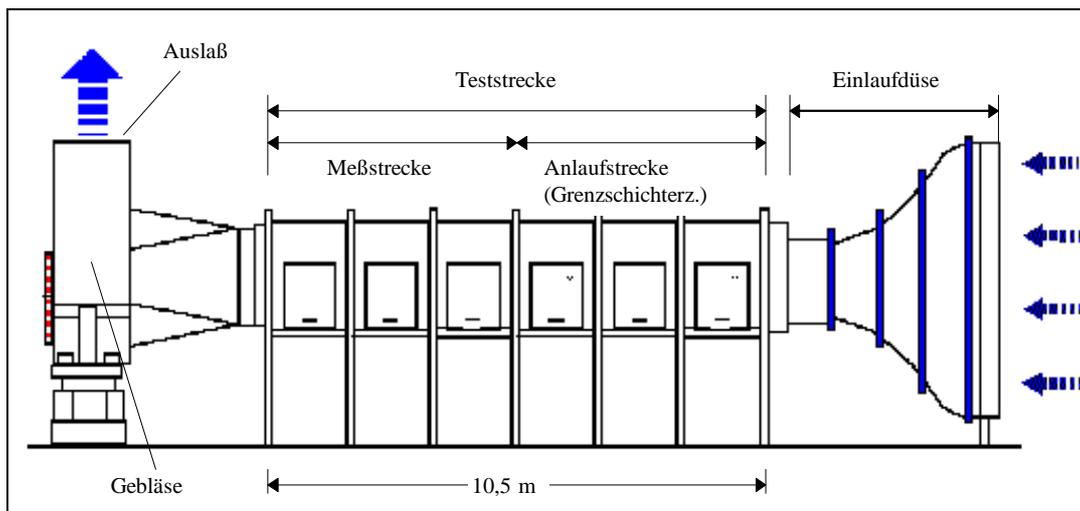


Abb. 3.1: Grenzschichtwindkanal am Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.

### 3.2 Anströmbedingungen im Windkanal

Alle Versuche der vorgestellten Arbeit wurden in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal des Instituts für Hydromechanik an der Universität Karlsruhe durchgeführt. Abb. 3.1 zeigt eine Skizze dieses Windkanals. Der Einfluß von thermischen Effekten wird nicht berücksichtigt. Die simulierten Bedingungen beschränken sich auf neutrale Schichtungen der Atmosphäre. Die Teststrecke ist ca. 10.5 m lang, 2 m breit und 1 m hoch. Sie unterteilt sich in eine Anlaufstrecke und die eigentliche Meßstrecke. Entlang der Anlaufstrecke wird mit Hilfe verschiedener Einbauten (siehe Abb. 3.2) eine turbulente Grenzschichtströmung erzeugt.

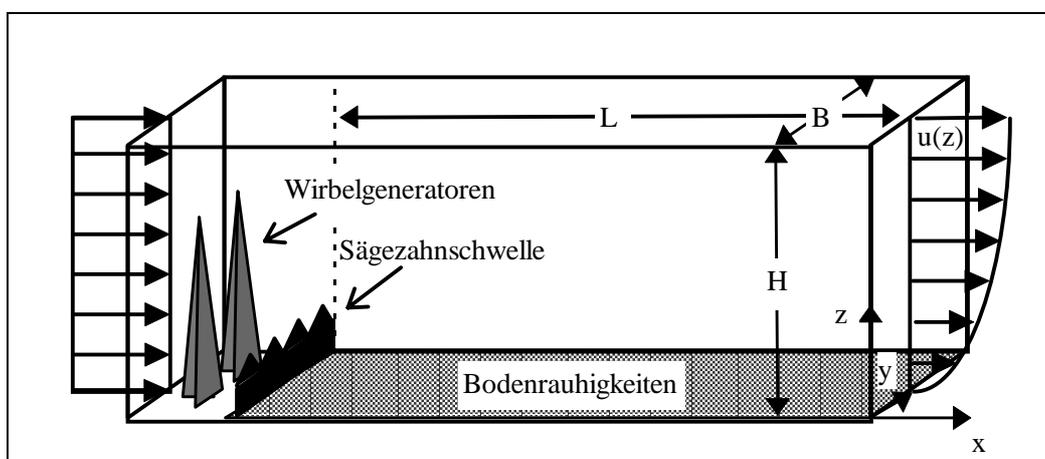
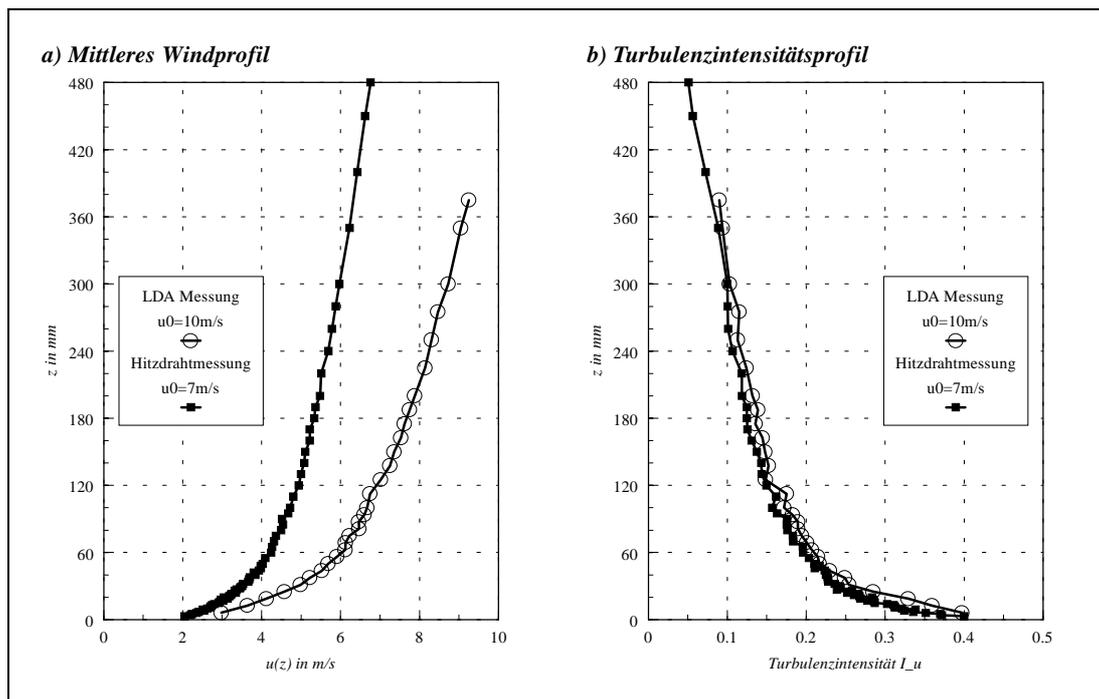


Abb. 3.2: Prinzipskizze zur Grenzschichterzeugung im atmosphärischen Grenzschichtwindkanal des Instituts für Hydromechanik an der Universität Karlsruhe.



**Abb. 3.3:** (a) Mittleres Windprofil und (b) Profil der Turbulenzintensitäten  $I_u$  gemessen am Ende der Anlaufstrecke im Windkanal des Instituts für Hydromechanik für zwei unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten.

Zur Dokumentation der Anströmbedingungen wurden Geschwindigkeitsmessungen am Ende der Anlaufstrecke in der Kanalmitte durchgeführt. Das Ziel war, die mittleren Windgeschwindigkeiten, die turbulenten Schwankungsanteile und die spektrale Verteilung auf die Wirbelemente unterschiedlicher Größe zu ermitteln. Um alle drei Komponenten des Geschwindigkeitsvektors zu erfassen, wurden Messungen mit einem LDA-System durchgeführt. Die Aufnahmefrequenz der Zeitreihen lag bei 100 Hz. Zusätzlich wurden mit einem Einzdraht-Hitzdraht-Anemometer Zeitreihen mit einer Abtastfrequenz von 200 Hz und einem Bandpaßfilter aufgenommen, aus welchen neben dem Mittelwert und der Turbulenzintensität die spektrale Energiedichte der  $u$  - Komponente ermittelt wurde.

Der Mittelwert der  $u$  - Komponente und das Profil der Turbulenzintensitäten  $I_u$  in Längsrichtung in der Windkanalgrenzschicht sind in Abb. 3.3 zu sehen. Die eingestellte Anströmgeschwindigkeit  $u_0$ , welche an einer Referenzsonde im oberen Bereich des Windkanals kontrolliert wird, betrug bei den Hitzdrahtmessungen 7 m/s und bei den LDA - Messungen 10 m/s. Die Messungen erlauben somit eine Überprüfung der Windprofileigenschaften für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten. Aus technischen Gründen konnten die

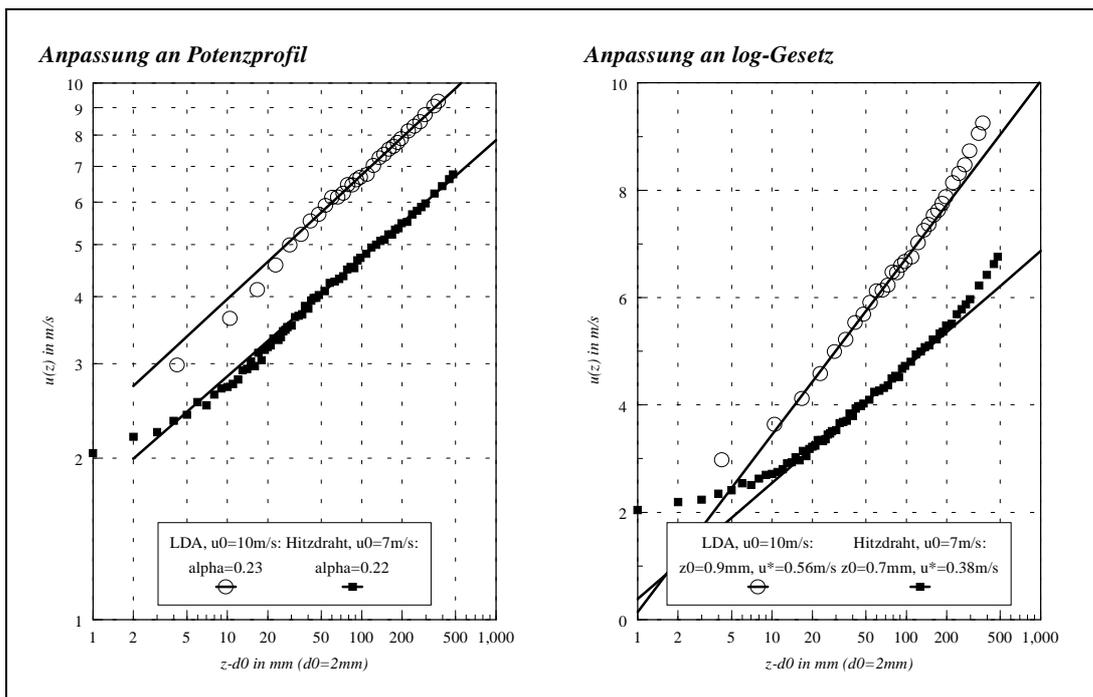


Abb. 3.4: Anpassung des mittleren Windprofils an ein Potenzprofil und an das logarithmische Wandgesetz.

LDA - Messungen nur bis zu einer Höhe von  $z = 375$  mm durchgeführt werden. Die maximale Meßhöhe bei den Hitzdrahtmessungen war  $z = 480$  mm. Es ist zu erkennen, daß der Wert der Windgeschwindigkeit  $u(480 \text{ mm})$  in dieser Höhe in etwa dem Wert von  $u_0 = 7 \text{ m/s}$  entspricht, so daß die Grenzschichtdicke  $\delta$  der Windkanalströmung mit 480 mm angegeben werden kann. Dieser Wert wurde auch in weiteren Messungen bestätigt, bei welchen die Windprofile bis zu einer Höhe von  $z = 600$  mm aufgenommen wurden. Der Vergleich der Turbulenzintensitäten aus den beiden Meßreihen liefert eine gute Übereinstimmung. In Bodennähe liegt die Turbulenzintensität bei etwa 40%.

Zur Beschreibung der Grenzschichtströmung sind in Abb. 3.4 Anpassungen der Ergebnisse für das mittlere Windprofil mit einem Potenzansatz entsprechend

$$\frac{u(z)}{u_{ref}} = \left( \frac{z - d_0}{z_{ref} - d_0} \right)^\alpha \tag{3.8}$$

und mit dem logarithmischen Wandgesetz entsprechend

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{z - d_0}{z_0} \quad (3.9)$$

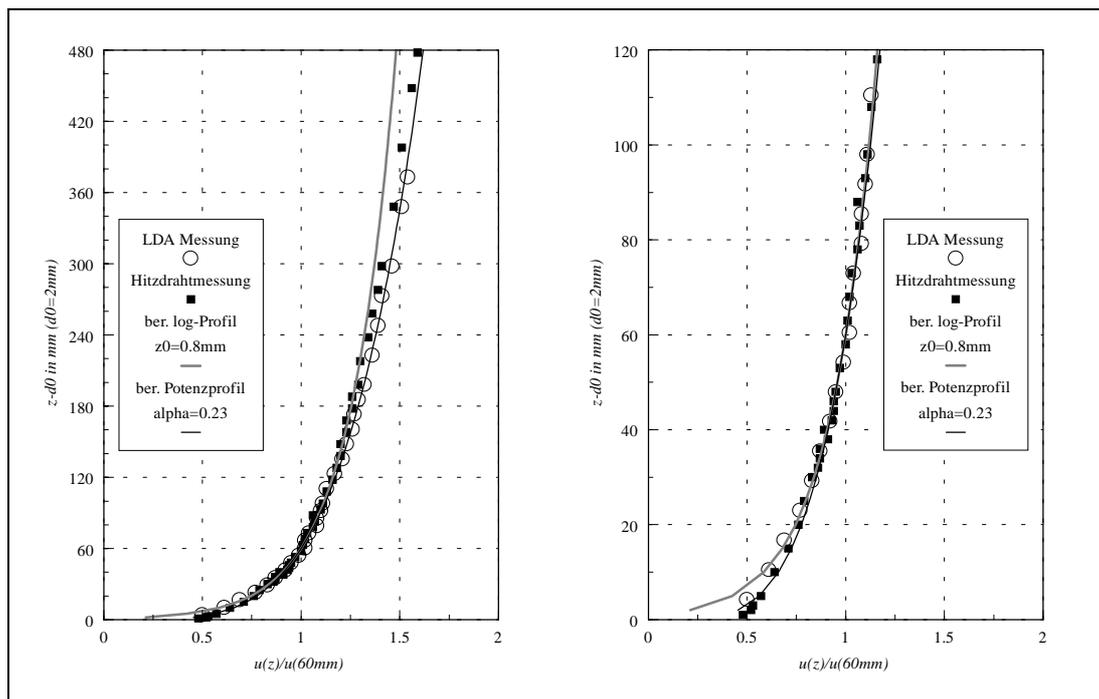
dargestellt. Das linke Diagramm zeigt die Anpassung an ein Potenzprofil. Die Windgeschwindigkeit  $u(z)$  ist doppelt logarithmisch über der Höhe  $z$  aufgetragen. Ein Potenzprofil entspricht in dieser Darstellung einer Geraden, deren Steigung den Profilexponent  $\alpha$  liefert. Es ist zu erkennen, daß die Ergebnisse beider Meßreihen für  $z \geq 20$  mm sehr gut durch ein Potenzprofil beschrieben werden können. Die durch eine lineare Regression ermittelten Profilexponenten sind nahezu identisch:

$$\begin{aligned} \text{LDA - Messung:} & \quad \alpha = 0.23, \\ \text{Hitzdraht - Messung:} & \quad \alpha = 0.22. \end{aligned}$$

Im rechten Diagramm der Abb. 3.4 sind die Windgeschwindigkeiten über der logarithmisch skalierten Höhe  $z$  aufgetragen. Aus dem logarithmischen Wandgesetz folgt bei dieser Darstellung eine Gerade. Die Rauigkeitslänge  $z_0$  und die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  können aus dem  $y$  - Achsenabschnitt und der Steigung der Geraden berechnet werden. Es ist zu erkennen, daß die Ergebnisse aus beiden Meßreihen im Höhenbereich  $20 \text{ mm} \leq z \leq 100 \text{ mm}$  gut mit einem logarithmischen Profil übereinstimmen. Die Verdrängungsdicke  $d_0$  kann mit 2 mm angegeben werden. Aus den linearen Regressionen wurden folgende Größen ermittelt:

	LDA - Messung	Hitzdraht - Messung
Rauhigkeitslänge $z_0$	0.9 mm	0.7 mm
Schubspannungsgeschwindigkeit $u_*$	0.56 m/s	0.38 m/s
$u_* / u_0$	0.056	0.054

Die Übereinstimmung zwischen den Profilparametern aus den beiden Meßreihen ist sehr gut. Die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  beträgt jeweils etwa 5% der Anströmgeschwindigkeit  $u_0$  und die Werte für die Rauigkeitslänge  $z_0$  sind ähnlich.



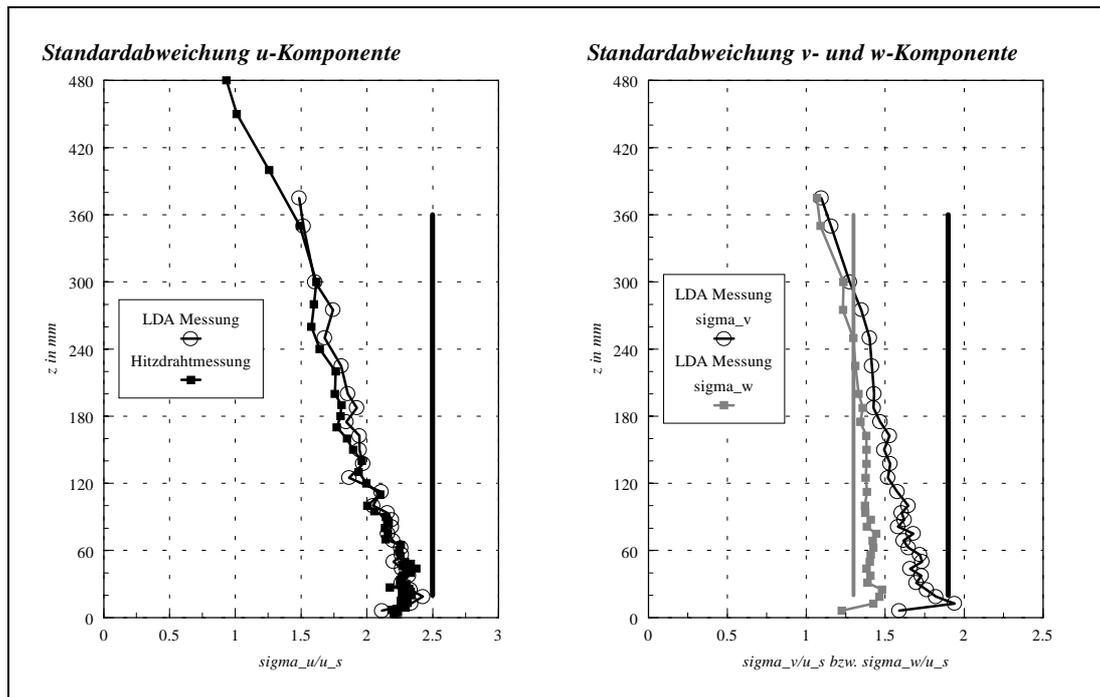
**Abb. 3.5:** Vergleich des mittleren Windprofils mit einem Potenzprofil und einem logarithmischen Profil. Der untere Bereich der Grenzschicht ist im rechten Diagramm vergrößert dargestellt.

Mit diesen Werten für die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  und Rauigkeitslänge  $z_0$  ergibt sich bei einer üblicherweise in den Versuchen eingehaltenen Mindestanströmgeschwindigkeit von  $u_0 \geq 5 \text{ m/s}$  für die Rauigkeitsreynoldszahl

$$\text{Re}_{R,M} = \frac{u_{*,M} \cdot z_{0,M}}{\nu} = \frac{0.055 \cdot 5 \text{ m/s} \cdot 0.8 \text{ mm}}{1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \approx 15.$$

Die Forderung nach Gleichung (3.1)  $\text{Re}_{R,M} > 5$  wird erfüllt.

In der Abb. 3.5 werden abschließend die gemessenen Windprofile in normierter Darstellung mit einem berechneten Potenzprofil mit dem Profilexponent  $\alpha = 0.23$  und einem berechneten logarithmischen Profil mit der Rauigkeitslänge  $z_0 = 0.8 \text{ mm}$  verglichen. Als Referenzhöhe  $z_{ref}$  wurde  $60 \text{ mm}$  ausgewählt. Der untere Bereich der Grenzschicht bis zur Höhe  $z = 120 \text{ mm}$  wurde im rechten Diagramm vergrößert dargestellt. Es wird noch einmal deutlich, daß in diesem Bereich die gemessenen Werte sehr gut mit einem Potenzprofil und einem logarithmi-



**Abb. 3.6:** Schwankungsanteile in der Windkanalgrenzschicht im Vergleich zu Richtwerten aus experimentellen Beobachtungen:  $\sigma_u / u_*$  (links),  $\sigma_v / u_*$  und  $\sigma_w / u_*$  (rechts).

sehen Profil übereinstimmen. Für den Bereich  $z > 120$  mm stellt erwartungsgemäß der Potenzansatz die bessere Anpassung dar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

Das am Windkanaleinlauf zunächst gleichförmige Geschwindigkeitsprofil  $u(z) = \text{konstant}$  wird durch die Kanaleinbauten Wirbelgeneratoren, Sägezahnschwelle und Bodenrauigkeiten verändert und am Beginn der Meßstrecke kann das Geschwindigkeitsprofil durch einen Potenzansatz beschrieben werden. Im unteren Teil der Grenzschicht, bis etwa zu einer Höhe von 20% der Grenzschichtdicke, kann das Windprofil mit dem logarithmischen Wandgesetz angepaßt werden. Die Profilparameter lauten:

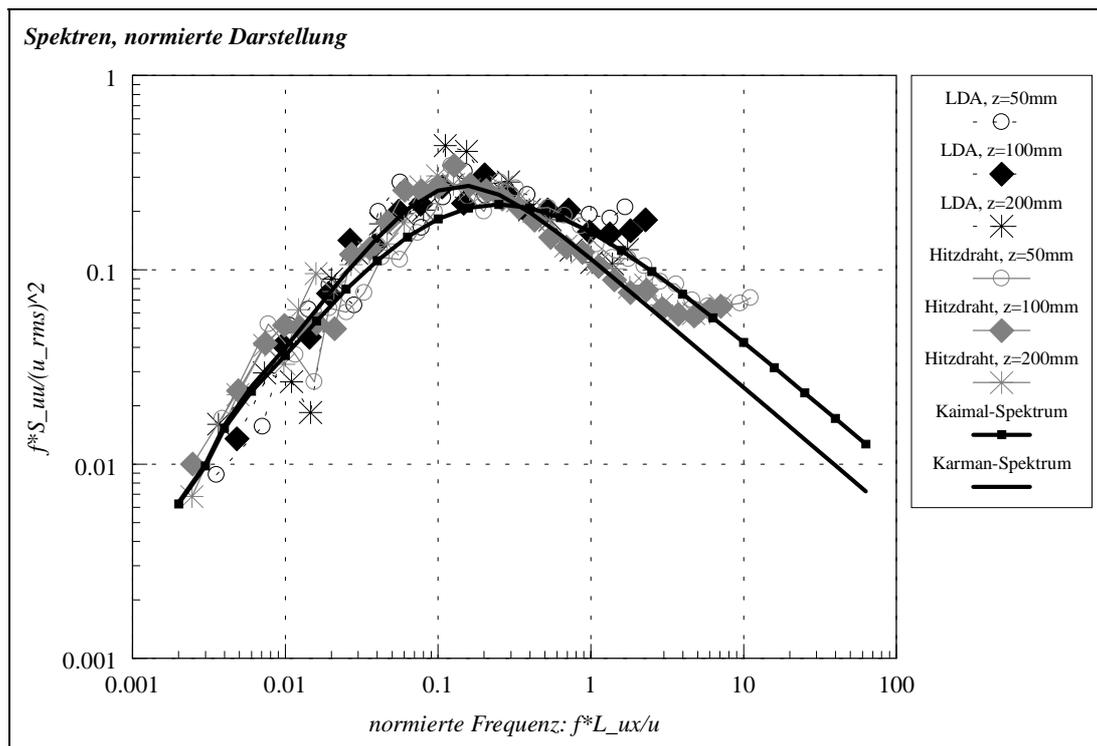
$$\text{Verdrängungsdicke} \quad d_0 = 2 \text{ mm}$$

$$\text{Rauigkeitslänge} \quad z_0 = 0.8 \text{ mm}$$

$$\text{Profilexponent} \quad \alpha = 0.23$$

Neben dem mittleren Windprofil stellt die Verteilung der Turbulenzanteile ein wichtiges Merkmal der Grenzschichtströmung dar. In der Atmosphäre ist innerhalb der Prandtl - Schicht die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  die Skalierungsgröße für Geschwindigkeiten und die Schwankungsgrößen  $\sigma_u$ ,  $\sigma_v$  und  $\sigma_w$  können als von der Höhe unabhängig angenommen werden. Aus experimentellen Beobachtungen sind die Richtwerte  $\sigma_u / u_* \cong 2.5$ ,  $\sigma_v / u_* \cong 1.9$  und  $\sigma_w / u_* \cong 1.3$  bekannt. Ein Vergleich der in der Windkanalgrenzschicht gemessenen, normierten Schwankungsanteile  $\sigma_u / u_*$  (linkes Diagramm),  $\sigma_v / u_*$  und  $\sigma_w / u_*$  (rechtes Diagramm) ist in Abb. 3.6 zu sehen. Die eingezeichneten Linien entsprechen den jeweiligen Vergleichswerten aus den Naturbeobachtungen. Es wird deutlich, daß die Schwankungsanteile in der Windkanalgrenzschicht in der Regel niedriger sind, als die angegebenen Richtwerte und als Funktion von der Höhe  $z$  abnehmen. Im Gültigkeitsbereich ( $20 \text{ mm} \leq z \leq 100 \text{ mm}$ ) des logarithmischen Wandgesetzes wird jedoch die Forderung  $\sigma_i / u_* = \text{konstant}$  näherungsweise erfüllt.

Ein Vergleich der Spektren in der Windkanalgrenzschicht mit den Ansätzen von *Kaimal* und von *Karman* (angegeben in Niemann, 1996) zur Beschreibung der Spektraldichtefunktionen in der atmosphärischen Grenzschicht ist in Abb. 3.7 dargestellt. Eingezeichnet sind die Ergebnisse der Spektralanalyse der Geschwindigkeitszeitreihen aus den LDA - und Hitzdrahtmessungen in drei verschiedenen Höhen. Die Darstellung der Spektren erfolgte in dimensionsloser Form, wobei die normierte Frequenz mit dem für die jeweilige Höhe berechneten, integralen Längenmaß  $L_{ix}$  als Referenzlänge gebildet wurde. Die Ergebnisse aus den LDA - Messungen sind aufgrund der geringen Aufnahmefrequenz  $f_s$  von 100 Hz nur bedingt zur Spektralanalyse geeignet. Die sogenannte *Nyquist - Cutoff - Frequenz*  $f_c$ , bis zu welcher die Spektralanteile aufgelöst werden können, berechnet sich zu  $f_c = 1/2 \cdot f_a$ . Frequenzanteile mit  $f > f_c$  werden im Spektrum Frequenzen kleiner der *Nyquist - Cutoff - Frequenz*  $f_c$  zugeordnet und in den Spektralbereich für  $f < f_c$  gefaltet. Man bezeichnet diesen Effekt als *aliasing*. Bei der Aufnahme der Zeitreihen ist deshalb darauf zu achten, daß die Aufnahmefrequenz in einer Größenordnung liegt, in welcher der Energieanteil der Frequenzanteile  $f > 1/2 \cdot f_a$  zu vernachlässigen ist. Abb. 3.7 macht deutlich, daß diese Bedingung bei den LDA - Messungen mit einer Aufnahmefrequenz von 100 Hz und der zugehörigen *Nyquist - Cutoff - Frequenz*



**Abb. 3.7:** Vergleich der Spektraldichtefunktion  $S_{uu}(f)$  in der Windkanalgrenzschicht mit Anpassungen für die Spektraldichtefunktion in der atmosphärischen Grenzschicht. Die Darstellung erfolgte in normierter Form.

$f_c = 50$  Hz nicht erfüllt ist. Eine Erhöhung der Aufnahme­frequenz war aus technischen Gründen bei den LDA - Messungen nicht möglich. Es wurden deshalb zusätzlich Zeitreihen mit der Hitzdrahtmeßtechnik und einer Aufnahme­frequenz von 200 Hz durchgeführt. Im Gegensatz zur LDA - Meßtechnik ist bei der Hitzdrahtmeßtechnik ein analoges Ausgangssignal vorhanden und es ist möglich, mit Hilfe von Filtern Störungen bestimmter Frequenzanteile zu verhindern. Die Zeitreihen wurden mit einem 100 Hz *Low - Pass* Filter aufgenommen. Neben der Erhöhung der Aufnahme­frequenz verhindert dies zusätzlich *aliasing* - Probleme bei der Spektralanalyse. Die ermittelten Spektraldichtefunktionen aller Meßreihen stimmen hinsichtlich der Lage und Höhe des Maximums sehr gut mit dem *von Karman* - Spektrum überein. Das Abklingverhalten proportional zu  $f^{-2/3}$  im hochfrequenten Bereich wird bei den Spektren aus den Hitzdrahtzeitreihen gut wiedergegeben.

Es konnte gezeigt werden, daß die Windkanalgrenzschicht die wesentlichen Merkmale der atmosphärischen Grenzschicht bezüglich der mittleren Windgeschwindigkeit der Turbulenzintensität, der räumlichen Struktur der Turbulenz und der Energieverteilung auf die unter-

schiedlichen Frequenzanteile gut wiedergibt. Weitere Informationen bezüglich des Vergleichs der Windkanalströmung mit der atmosphärischen Grenzschicht, eine Diskussion des Modellmaßstabs und eine Beschreibung der Modellierung von Kfz - Emissionen im Windkanal sind in Kastner-Klein (1999) enthalten.

### **3.3 Meßtechnik**

#### **3.3.1 Konzentrationsmessungen**

Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein Tracergas (Schwefelhexafluorid SF<sub>6</sub>) aus einer Linienquelle mit einem konstanten Volumenstrom  $Q_{M,T} / L_{M,Q}$  pro Längeneinheit freigesetzt. An den Meßstellen, welche bei den durchgeführten Versuchen an den Wänden und auf den Dächern der Gebäudemodelle lagen, wird das verdünnte Tracergas über Röhrchen abgesaugt und in einer Probeentnahmeeinrichtung gespeichert. Pro Meßzyklus werden gleichzeitig bis zu 19 Proben gesammelt, welche dann nacheinander hinsichtlich des SF<sub>6</sub> - Gehaltes analysiert werden. Zusätzlich wird in der Anlaufstrecke eine Probe zur Überprüfung der Hintergrundkonzentration entnommen. Als Analysegerät dient ein Lecksuchgerät MELTRON LH 108, welches auf dem Prinzip eines Elektroneneinfangdetektors basiert. Das Gerät wird bei jedem Meßzyklus mit einem Eichgas bekannter SF<sub>6</sub> - Konzentration kalibriert.

#### **3.3.2 Geschwindigkeitsmessungen**

Bei den im weiteren Verlauf der Arbeit beschriebenen Geschwindigkeitsmessungen in der Straßenschlucht wurde ein 4-strahliges 2-Komponenten-LDA-System eingesetzt. Damit kann die Strömungsgeschwindigkeit in 2 Raumrichtungen zeit- und ortsgleich gemessen werden. Die Analyse der Zeitreihen ermöglicht die Berechnung der statistischen Kennwerte der Geschwindigkeitskomponenten und der Korrelationen der zeitgleich aufgenommen Komponenten. Es liegen somit Informationen über die mittleren und turbulenten Geschwindigkeiten sowie über die turbulenten Flüsse vor.

Auf die Grundlagen und die technischen Details der verschiedenen LDA - Systeme kann hier im einzelnen nicht eingegangen werden. Als Literaturstellen mit ausführlichen Informationen

können Ruck (1987) und Durst et al. (1987) angegeben werden. Die genaue Beschreibung des bei den Versuchen eingesetzten LDA - Systems kann aus Kaiser (1996) entnommen werden. Sie wird im Folgenden nur kurz zusammengefaßt.

Ein 4Watt Argon-Ion-Laser ist zusammen mit Strahlteiler, Braggzelle, Dispersionsprisma und Einkopplungsoptik fest auf einer optischen Bank montiert, während eine Sende- und Empfangsoptik über ein 10 Meter langes Glasfaserkabel versorgt wird. Der Aufbau mit Glasfaserkabel bietet ein Höchstmaß an Mobilität und ist notwendig um das Problem der optischen Zugänglichkeit zum Meßort zu lösen. Eine mögliche andere Methode wäre die Fertigung der Häuser aus durchsichtigem Material (z.B. Plexiglas). Bei komplexer Bebauung wie im vorliegenden Fall würden dadurch allerdings zu viele teilreflektierende Flächen den Strahlengang behindern, was die Messung aufgrund eines sehr schlechten Signal - Rausch - Verhältnisses unmöglich machen würde. Die LDA-Strahlen müssen also in der Regel von oben in die bebauten Gebiete gesendet werden. Dies ist möglich mittels einer kleinen Sende- und Empfangsoptik mit Glasfaseranschluß, die an der Traversierung im Windkanal befestigt und positioniert werden kann. Man hat dadurch aber den Nachteil, daß wieder eine Sonde die Strömung im Kanal stört. Um den Einfluß dieser Störungen abzuschätzen, wurden auch Messungen mit einer zweiten, großen Optik, welche außerhalb des Kanals eingerichtet wurde, durchgeführt. Die Laserstrahlen wurden in diesem Falle durch die Windkanalfenster eingestrahlt und es konnten für eine senkrecht angeströmte Straßenschlucht Messungen durchgeführt werden. Der Vergleich der Meßergebnisse mit den zwei Versuchsaufbauten (Optiksonde im Windkanal bzw. Einstrahlung der Laserstrahlen durch das Windkanalfenster) ist in Kastner-Klein und Plate (1999) dokumentiert. Die aufgetretenen Abweichungen und Probleme bei den Messungen werden diskutiert und ein verbesserter Versuchsaufbau für die Experimente mit der kleinen, im Windkanal montierten Optiksonde beschrieben. Dieser Versuchsaufbau wurde bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche verwendet.

Die Hitzdrahtmessungen der Anströmprofile wurden mit einer Eindrahtsonde (DISA 55P01, Meßbrücke 56C17) durchgeführt (genaue Beschreibung in Theurer, 1993).



## **4. Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Transportvorgänge in Straßenschluchten**

Für die Prognose der durch den Kfz - Verkehr verursachten Schadstoffbelastung in Stadtgebieten ist eine korrekte Modellierung der kleinskaligen Strömungsverhältnisse im Straßenraum eine wichtige Voraussetzung. Eine offene Frage ist, inwiefern die Bewegung der Fahrzeuge einen Einfluß auf die Strömungs -und Ausbreitungsverhältnisse hat. Diese Frage steht in engem Zusammenhang mit der Frage nach der korrekten Modellierung der Freisetzung von Kfz - Abgasen. Bei der physikalischen Modellierung der Ausbreitung von Kfz - Emissionen in Windkanälen wird die Freisetzung der Schadstoffe in der Regel durch Linienquellen am Boden simuliert. In numerischen Modellen zur Prognose der Schadstoffbelastung wird üblicherweise ein Quellterm in einer (pro Fahrspur) der untersten Gitterboxen integriert. Die Ausdehnung der Quellen und implizit auch eine Anfangsverdünnung der Schadstoffe wird durch die Gitterauflösung des Modells festgelegt.

Das Konzept Kfz - Emissionen durch Linienquellen bzw. Gitterboxen zu simulieren beinhaltet indirekt eine Berücksichtigung des Einflusses der Fahrzeugbewegung. Als Folge der Verwirbelung durch die fahrenden Kraftfahrzeuge wird anstelle von Punktquellen für jeden einzelnen Auspuff eine entlang der Straße homogene Quellverteilung angenommen. Es bleibt jedoch zu klären, inwiefern durch dieses Konzept der Einfluß der Fahrzeugbewegung richtig bzw. vollständig erfaßt wird. Ist nicht zu erwarten, daß die Fahrzeugbewegung auch eine vertikale Anfangsverteilung der Schadstoffe bewirkt? Eine offene Frage ist auch, inwiefern die Fahrzeugbewegung einen Einfluß auf das mittlere Strömungsverhalten hat. Es wäre denkbar, daß in Straßen mit enger Randbebauung die Kolbenwirkung der Fahrzeuge eine Rolle spielt. Dieses Phänomen ist aus Straßentunneln bekannt, in denen insbesondere in Tunneln mit getrennten Röhren pro Fahrtrichtung durch die Fahrzeugbewegung eine signifikante Längsströmung entsteht, welche auch bei der Bemessung der Lüftungsanlagen berücksichtigt wird. Es wäre dann möglich, daß in Einbahnstraßen und Straßen mit Gegenverkehr, bei sonst gleichen Bedingungen, unterschiedliche Konzentrationsverteilungen zu beobachten sind. Die Klärung dieser Fragen bildete die Motivation umfangreicher Windkanaluntersuchungen, welche teilweise bereits als Vorarbeiten für das vorgestellte Vorhaben geleistet wurden. Sie werden im Folgen-

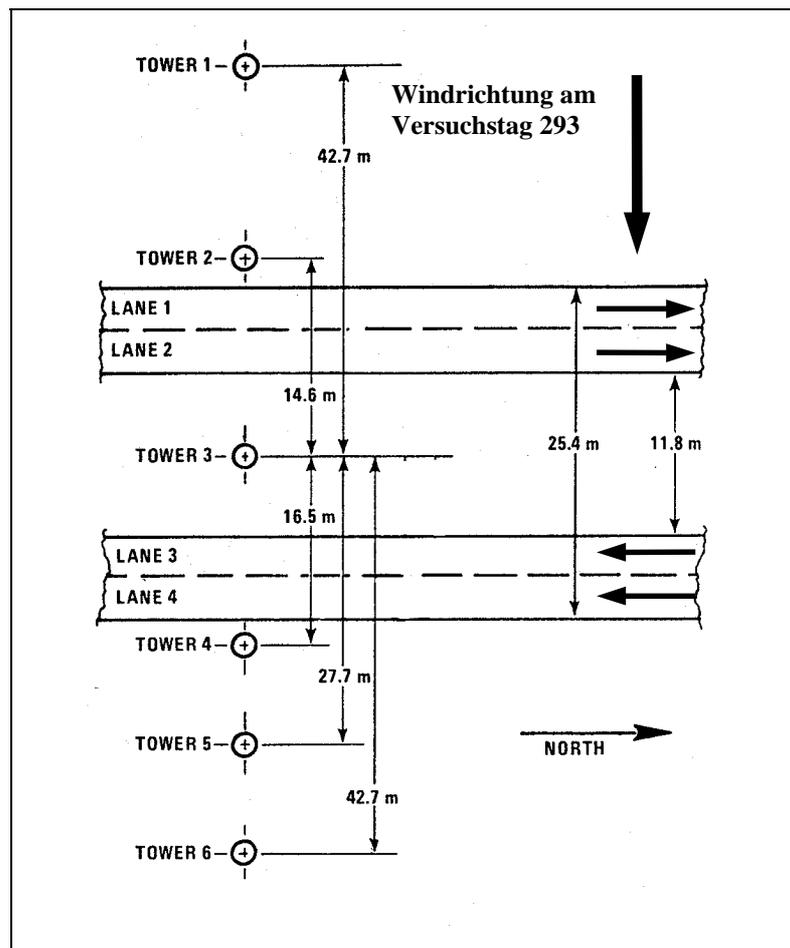
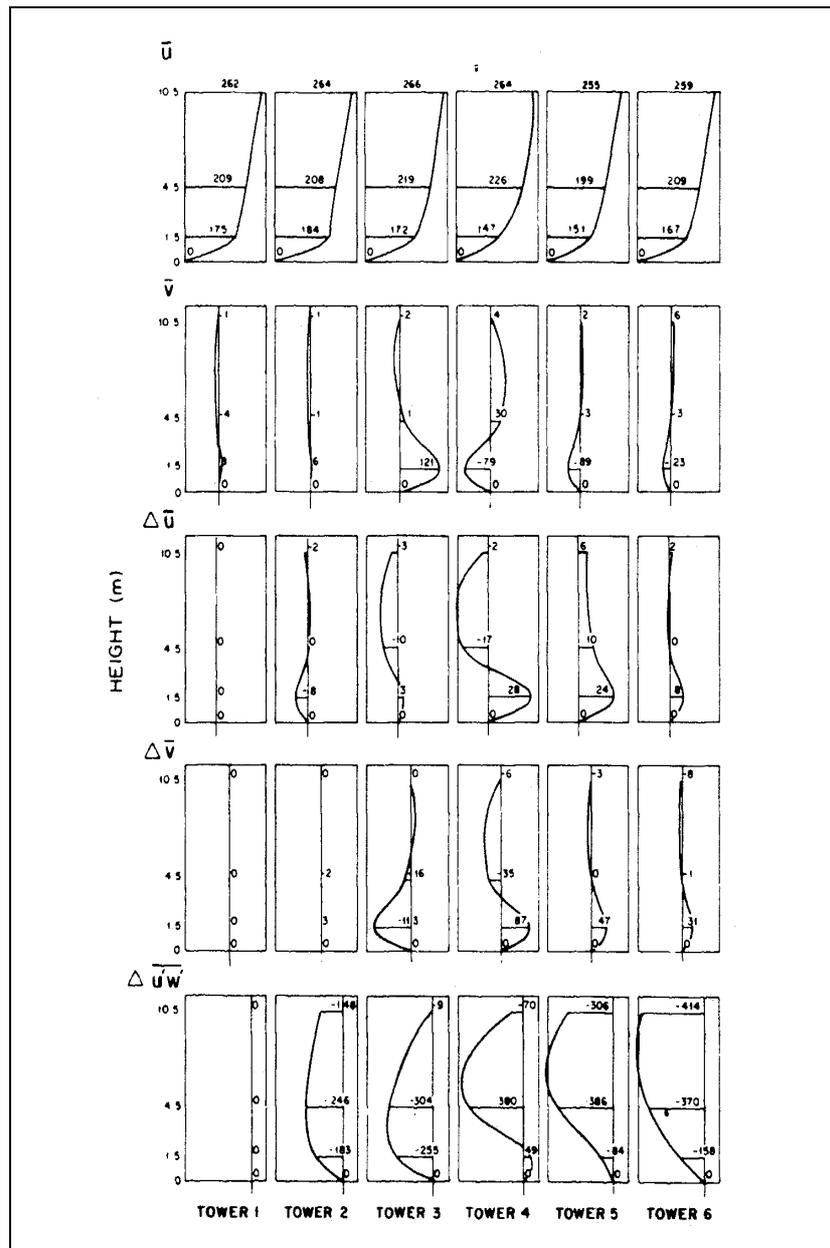


Abb. 4.1: Skizze des Versuchsaufbaus (Ausschnitt) bei dem General Motors Experiment (aus Eskridge und Hunt 1979).

den mit in die Diskussion der Ergebnisse einbezogen. Einige wichtige Aspekte der Fahrzeug-aerodynamik, welche die Grundlage der Versuche bildeten, sind in Kastner - Klein (1999) zusammengefaßt.

#### 4.1 Zusammenfassung von Literaturergebnissen

Ein wichtiges Ziel der Literaturrecherche war Informationen aus Naturmessungen zu erhalten, die den Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die mittleren und turbulenten Strömungsverhältnisse in der Umgebung von Straßen aufzeigen. Einen wichtigen Datensatz stellen die Ergebnisse aus dem General Motors Experiment dar. Dieses Experiment wurde 1975 auf dem Testgelände der General Motors Werke in Milford, Michigan durchgeführt. Auf eine vollständige Beschreibung der Versuche im Rahmen dieser Arbeit wird verzichtet. Als Referenz können



**Abb. 4.2a:** Ergebnisse der mittleren und turbulenten Strömungskomponenten (Halbstundenwerte) aus dem General Motors Experiment für den exemplarisch ausgewählten Versuchstag 293. Angaben in cm/s bzw.  $(\text{cm/s})^2$  (aus Eskridge und Hunt 1979).

die Veröffentlichungen von Eskridge und Hunt (1979) und Eskridge und Rao (1983) angegeben werden.

Ein Ausschnitt des Versuchsaufbaus ist in der Abb. 4.1 skizziert. Es wurden an 17 Tagen Testfahrten mit insgesamt 352 Fahrzeugen durchgeführt. Die Teststrecke hatte eine Länge von ca. 10km und entsprach, wie in Abb. 4.1 zu erkennen ist, einer vierspurigen Straße. Die Fahr-

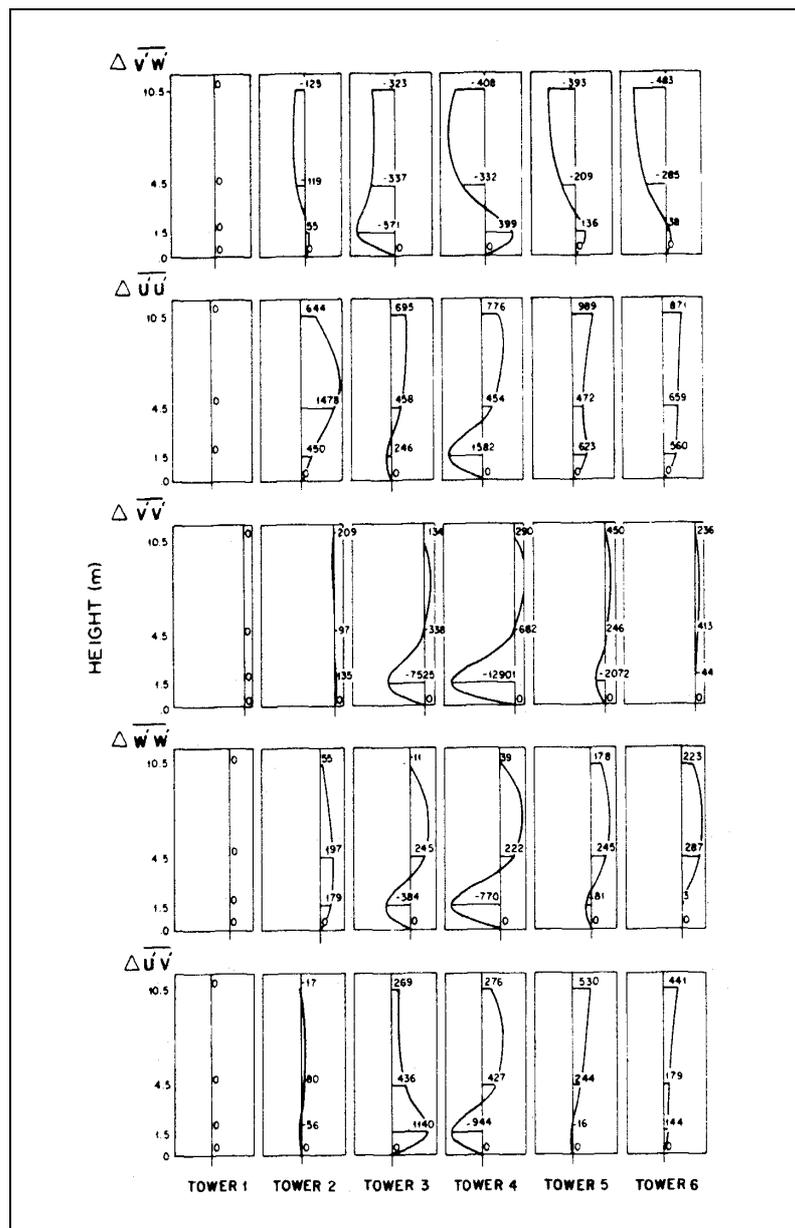


Abb. 4.2b: Fortsetzung der Abb. 4.2a.

zeuge passierten in Gruppen von jeweils 22 die Meßstelle, wobei das erste Fahrzeug jeder Gruppe eine Geschwindigkeit von 80 km/h hatte. Die Pfeile in Abb. 4.1 verdeutlichen die Fahrrichtungen auf den verschiedenen Spuren. Meteorologische Messungen wurden an sechs Meßmasten (Tower 1-6, Positionen siehe Abb. 4.1) durchgeführt. Das Gelände in der Umgebung der Meßstellen kann als flach bezeichnet werden und war zum Zeitpunkt der Messungen mit einem Gras mittlerer Höhe bewachsen.

Ergebnisse für den exemplarisch ausgewählten Versuchstag 293, bei welchem die Windrichtung in etwa senkrecht zur Straße war, sind in den Abb. 4.2a und 4.2b zu sehen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Komponente in Hauptwindrichtung ( $u$ ) und der Querkomponente ( $v$ ) und die turbulenten Korrelationsgrößen an den sechs Meßmasten. Ergebnisse für den Meßmast 1 können als Referenzwerte für die Bedingungen in der Anströmung betrachtet werden. Mit Ausnahme der in den beiden oberen Reihen gezeigten mittleren Geschwindigkeiten  $u$  und  $v$  wurden jeweils die Änderungen im Vergleich zu diesen Referenzwerten aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen einen Einfluß der Fahrzeugbewegung, sowohl auf die mittleren Strömungskomponenten als auch auf die turbulenten Anteile. Es wird deutlich, daß im straßennahen Bereich durch die Fahrzeugbewegung eine Strömungskomponente in Fahrtrichtung, d.h. für die ausgewählten Versuchsbedingungen quer zur Hauptwindrichtung ( $v$ -Komponente) induziert wird. Die gemessenen Werte liegen im bodennahen Bereich in der Größenordnung von 1 m/s. Bei den Profilen der turbulenten Schubspannungen wurden insbesondere bei den lateralen Komponenten in Straßennähe hohe zusätzliche Werte beobachtet. Die Ergebnisse lassen sich durch die Strömungsvorgänge im Nachlauf der Fahrzeuge erklären.

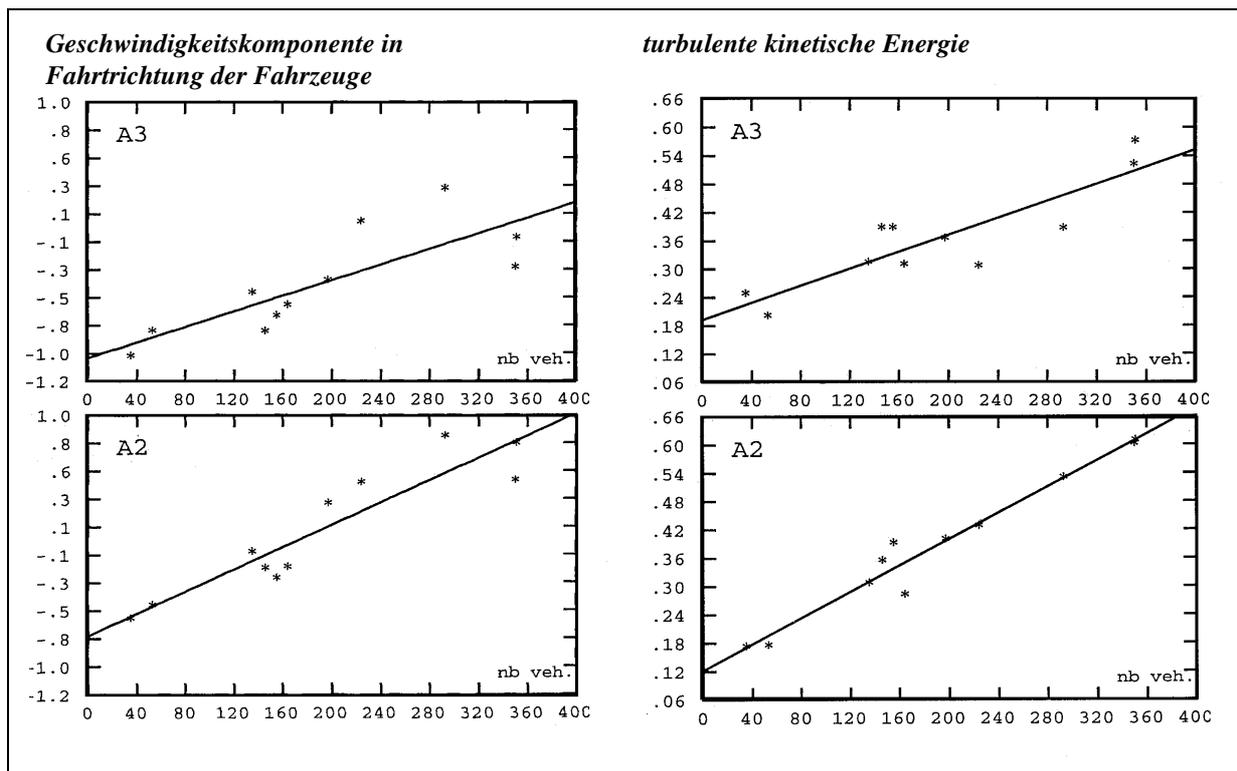
Theoretische Ansätze zur Beschreibung des Nachlaufes von Fahrzeugen und deren Auswirkungen auf die Schadstoffausbreitung (Eskridge und Hunt, 1979; Eskridge et al., 1979) wurden mit Hilfe von Modellversuchen in einem Windkanal (Eskridge und Thompson, 1982; Eskridge und Rao, 1983) überprüft und verbessert. In einer scherungsfreien Grenzschichtströmung wurden quaderförmige Modelle untersucht, mit denen Fahrzeuge im Maßstab 1/8 und 1/32 nachgebildet werden sollten. Die Modelle waren stationär im Windkanal montiert, während der Boden des Windkanals mit einer der Windgeschwindigkeit entsprechenden Geschwindigkeit bewegt wurde. Mit diesem Aufbau wird der Nachlauf eines Fahrzeuges bei Windstille simuliert. Untersucht wird die inverse Situation, wobei die Windgeschwindigkeit entsprechend der gewünschten Fahrzeuggeschwindigkeit zu wählen ist. Die Ergebnisse des General Motor Experiments und der Windkanalversuche wurden in Ausbreitungsmodelle für Straßen in freiem Gelände integriert, in denen beispielsweise die Diffusionskoeffizienten der Gaußverteilungen zur Berücksichtigung der verkehrsinduzierten Turbulenz entsprechend modifiziert wurden (Rao et al. 1986, Eskridge und Rao, 1986).



**Abb. 4.3:** Lage der Meßstellen bei Naturmessungen in einer vierspurigen Einfallstraße in der französischen Stadt Nantes (aus Delaunay und Houseaux, 1997).

Weitere Daten, welche Aufschluß über den Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Strömungsverhältnisse geben, wurden 1997 bei Naturmessungen in einer Straße in der französischen Stadt Nantes aufgenommen (Delaunay und Houseaux, 1997). Die Lage der Meßstationen ist auf dem Photo in Abb. 4.3 zu erkennen. Es wird deutlich, daß die Messungen in einer vierspurig ausgebauten Einfallstraße durchgeführt wurden. Jeweils zwei Fahrspuren pro Fahrtrichtung sind durch einen Grünstreifen getrennt und die Umgebungsbebauung grenzt nicht direkt an die Straße. Es handelt es sich um eine lockere Bebauung, welche durch einzelne Gebäudekomplexe, die in einem relativ großen Abstand voneinander stehen, gekennzeichnet wird. Im Gegensatz zu den General Motors Experimenten wurden die Versuche unter realen Verkehrsbedingungen, d.h. mit einem an Wochentagen üblicherweise sehr stark variierenden Verkehrsaufkommen, durchgeführt. Es ist jedoch nicht zu erwarten, daß die Ergebnisse die Verhältnisse in einer Straße mit Innenstadtcharakter wiedergeben.

Die Analyse der Messungen liefert wichtige Ergebnisse, die wie folgt zusammengefaßt werden können: Bis zu einer Höhe von 3 m kann eine Erhöhung der Windgeschwindigkeitskomponente parallel zur Fahrtrichtung der Fahrzeuge beobachtet werden. Es kann ein Zusammen-



**Abb. 4.4:** Einfluß des Verkehrsaufkommens auf die Ergebnisse an den beiden Meßstellen des Meßmastes A (Pylone A) bei Naturmessungen in einer vierspurigen Einfallstraße in der französischen Stadt Nantes: Mittlere Strömungskomponente in Fahrtrichtung der Fahrzeuge (linke Diagramme) und turbulente kinetische Energie (rechte Diagramme; aus Delaunay und Houseaux, 1997).

hang zwischen der Höhe dieser Geschwindigkeitskomponente und der Anzahl der Fahrzeuge, welche pro Stunde die Meßstelle passieren, festgehalten werden. In den linken Diagrammen der Abb. 4.4 sind exemplarisch die Ergebnisse an 2 Meßstellen (Kennzeichnung in Abb. 4.3) für Situationen mit Windrichtungen entgegen der Fahrtrichtung und mittleren Windgeschwindigkeiten von 2-3 m/s in 30 m Höhe in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen aufgetragen. Das Anwachsen der mittleren Strömungskomponente parallel zur Straße ist deutlich zu erkennen. Den Einfluß auf die turbulente, kinetische Energie veranschaulichen die Diagramme in der rechten Spalte in Abb. 4.4. Auch hier konnte ein Anstieg mit zunehmender Verkehrsdichte beobachtet werden.

Die bisher gezeigten Ergebnisse haben den Nachweis geliefert, daß die Fahrzeugbewegung das mittlere und turbulente Strömungsfeld im Nahbereich von Straßen beeinflusst, und daß ein Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte und der Stärke der Veränderungen besteht. Sie resultieren aus Meßkampagnen in der Natur bzw. Versuchen im Labor für Straßen in freiem

Gelände oder für Straßen mit lockerer Umgebungsbebauung. Eine Aussage über die Auswirkungen auf die Schadstoffbelastung in urbanen Gebieten ist nicht möglich. Es ist denkbar, daß in bestimmten Bebauungsstrukturen die Wirkung der Kraftfahrzeugbewegung infolge der geringen mittleren Windgeschwindigkeiten zwischen den Gebäuden stärker ausgeprägt ist als im freien Gelände. Möglicherweise ist der Anteil der verkehrsinduzierten Turbulenz aber auch zu vernachlässigen da die Turbulenzanteile in urbanen Gebieten infolge der Wirbelbildung an den Gebäudekanten relativ hoch sind.

Ergebnisse aus Naturmessungen, welche Aussagen über die Wirkung der Fahrzeugbewegung in urbanen Bebauungsstrukturen, wie z.B. Straßenschluchten, liefern, sind derzeit in der Fachliteratur nicht veröffentlicht. Eine Möglichkeit diese Lücke zu schließen, sind Datensätze aus Windkanalversuchen. Man hätte den Vorteil, daß die Messungen unter kontrollierten und reproduzierbaren Versuchsbedingungen stattfinden und Parametervariationen leicht zu untersuchen sind. Voraussetzung für die Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz im Windkanal ist aber die Definition einer Ähnlichkeitsbeziehung, welche die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Natur sicherstellt und auf deren Grundlage eine Simulationstechnik entworfen werden kann.

In der Literatur sind zwei Arbeiten bekannt, in welchen die Modellierung der Fahrzeugbewegung im Windkanal diskutiert wird. In Brilon et al. (1987) werden Ergebnisse aus Windkanaluntersuchungen zur Ausbreitung von Abgasen an Autobahnen vorgestellt. Die Versuche wurden in einem Grenzschichtwindkanal an der Universität Bochum durchgeführt. Die verkehrsinduzierte Turbulenz wurde mit Hilfe von Holzplättchen, die auf umlaufenden Nylonbändern befestigt waren, simuliert. Eine Ähnlichkeitsbeziehung, auf welcher die Modellierung der verkehrsinduzierten Turbulenz beruht, wird nicht explizit angegeben. Als Gesetzmäßigkeiten, die zu berücksichtigen sind, wird u. a. aufgeführt, daß die ablösenden Wirbel im Modell die gleiche Größenordnung haben müssen wie in der Natur. Diese Anforderung wird laut Angabe der Autoren durch ein maßstäbliches Abbilden des aerodynamischen Querschnitts (Widerstandsfläche) erfüllt. Weiterhin wird aufgeführt, daß durch die Auswahl von scharfkantigen Plättchen der Fahrtwiderstand der Modellfahrzeuge im Vergleich zu realen Fahrzeugen erhöht wird und damit das Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit im Modell geringer sein kann als in der Natur. Als weiterer Vorteil der scharfkantigen

Plättchen wird angegeben, daß für die gewählte Fahrzeuggeschwindigkeit im Modell von 85 km/h eine kritische Reynoldszahl überschritten wird, woraus zu schließen sei, daß die Ergebnisse vom Wert der Fahrzeuggeschwindigkeit unabhängig sind. Die gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf den Fall einer vierspurigen Autobahn. Die Modellierung der verkehrsinduzierten Turbulenz führt zu einer deutlichen Abnahme der Konzentrationen in Straßennähe. Im Abstand von 50 m quer zur Straßenachse werden beispielsweise Reduktionen im Vergleich zum Staufall in der Größenordnung von 30 - 50% beobachtet. Die Untersuchungen haben somit erneut den Einfluß der verkehrsinduzierten Turbulenz dokumentiert, liefern aber keine Aussagen über die Wirkung in komplexen Bebauungsstrukturen und auch die Definition einer Ähnlichkeitsbeziehung für die Modellierung der verkehrsinduzierten Turbulenz im Windkanal wird nicht zufriedenstellend gelöst. Es fehlen konkrete, allgemeingültige Aussagen, welche durch systematische Parametervariationen überprüft wurden.

Ein Modellgesetz zur Berücksichtigung der Kfz - erzeugten Turbulenz bei der Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen in bebauten Gebieten im Windkanal wurde von Plate (1982) vorgeschlagen. Als maßgebliche Kennzahl hat er die sogenannte Turbulenzproduktionszahl definiert. Diese Kennzahl entspricht dem Verhältnis der Turbulenzproduktion infolge der Bewegung der Kraftfahrzeuge zur Turbulenzproduktion durch die Windströmung. Bei der Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz im Windkanal muß der Wert der Turbulenzproduktionszahl im Modell dem Wert der Turbulenzproduktionszahl in der Natur entsprechen. Der Einfluß der Kfz - erzeugten Turbulenz wurde daraufhin bei einigen Windkanaluntersuchungen an der Universität Karlsruhe berücksichtigt, indem ähnlich wie bei den Versuchen an der Universität Bochum, eine Simulationstechnik mit umlaufenden Bändern, auf welchen kleine Metallplättchen befestigt waren, in die Windkanalmodelle integriert wurde. Eine Überprüfung der Gültigkeit der Ähnlichkeitsbeziehung und eine systematische Untersuchung des Einflusses für verschiedene Versuchsbedingungen wurde jedoch nicht veröffentlicht. Allgemeingültige Aussagen über die Wirkung der Kfz - erzeugten Turbulenz auf die Schadstoffausbreitung in Stadtgebieten konnten aus den durchgeführten Untersuchungen nicht abgeleitet werden. Dieses Ziel wurde bei den im Folgenden vorgestellten Windkanalstudien verfolgt.

## **4.2 Modellgesetz und Versuchskonzept für die Durchführung von Windkanalversuchen**

Wie bereits im vorhergehenden Absatz erläutert wurde, hat Plate (1982) eine Kennzahl für die Modellierung von Kfz - erzeugter Turbulenz im Windkanal, die sogenannte Turbulenzproduktionszahl  $T_p$ , definiert. Sie entspricht dem Verhältnis der Turbulenzproduktion  $P_T$  infolge der Bewegung der Kraftfahrzeuge zur Turbulenzproduktion  $P_W$  durch die Windströmung. Das Modellgesetz zur Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz im Windkanal lautet dann wie folgt:

Der Wert der Turbulenzproduktionszahl im Modell muß dem Wert der Turbulenzproduktionszahl in der Natur entsprechen.

$$T_{P,M} = T_{P,N} \Leftrightarrow \frac{P_{T,M}}{P_{W,M}} = \frac{P_{T,N}}{P_{W,N}}. \quad (4.1)$$

Der Index  $M$  kennzeichnet die Modellsituation und der Index  $N$  die Naturbedingungen. Die Turbulenzproduktion  $P_T$  infolge der Bewegung der Kraftfahrzeuge in einer Straßenschlucht mit der Höhe  $H$  und Breite  $S$ , bezogen auf eine Längeneinheit der Straße, wird wie folgt berechnet:

$$P_T = \frac{\rho \cdot C_{DT} \cdot A_T \cdot n_T \cdot v^3}{S \cdot H}, \quad (4.2)$$

wobei  $\rho$  der Dichte der Luft,  $C_{DT}$  dem Widerstandsbeiwert der Kraftfahrzeuge,  $A_T$  der Frontfläche der Kraftfahrzeuge,  $v$  der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit und  $n_T$  der Anzahl der Fahrzeuge pro Längeneinheit entspricht.

Die Turbulenzproduktion  $P_W$  infolge der Windströmung kann wie folgt abgeschätzt werden

$$P_w = \tau \frac{\Delta u}{\Delta z} \approx \frac{\rho \cdot u_*^2}{H} u(H) \propto \frac{\rho \cdot c_{fh} \cdot u_0^3}{H}. \quad (4.3)$$

Dabei wurde die Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_* = \sqrt{c_{fh}} \cdot u_0$  durch den Reibungsbeiwert der Bebauungsstruktur  $c_{fh}$  und die Windgeschwindigkeit  $u_0$  in Grenzschichthöhe ausgedrückt. Für die Turbulenzproduktionszahl folgt dann

$$T_P = \frac{C_{DT} \cdot A_T \cdot n_T}{c_{fh} \cdot S} \cdot \frac{v^3}{u_0^3} \quad (4.4)$$

und das Modellgesetz nach Gl. (4.1) kann wie folgt ausgedrückt werden:

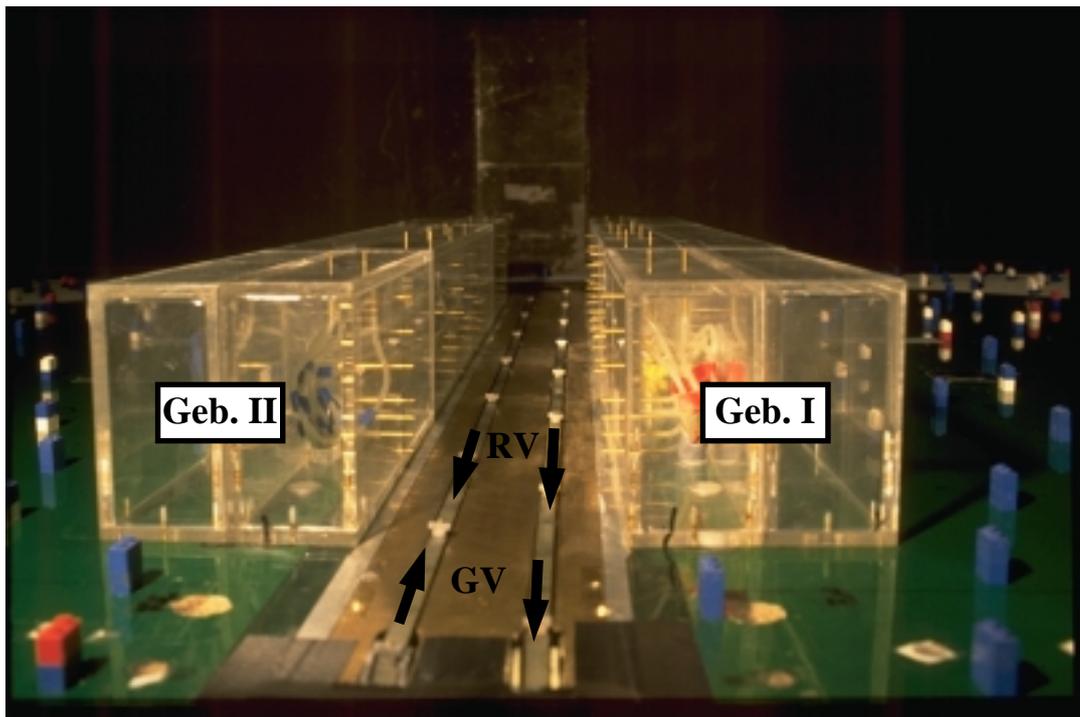
$$\underbrace{\frac{C_{DT,M} \cdot A_{T,M} \cdot n_{T;M}}{c_{fh,M} \cdot S_M}}_{a_M} \cdot \frac{v_M^3}{u_{0,M}^3} = \underbrace{\frac{C_{DT,N} \cdot A_{T,N} \cdot n_{T;N}}{c_{fh,N} \cdot S_N}}_{a_N} \cdot \frac{v_N^3}{u_{0,N}^3} \quad (4.5)$$

Mit der Definition der dimensionslosen Faktoren  $a_M$  und  $a_N$  kann Gl. (4.5) zu folgendem Ähnlichkeitskriterium umformuliert werden:

$$\frac{(v_N / u_{0,N})^3}{(v_M / u_{0,M})^3} = a \quad \text{mit} \quad a \equiv \frac{a_M}{a_N} \quad (4.6)$$

Folglich müßte bei einer Gültigkeit des Modellgesetzes beispielsweise ein im Modellversuch aus technischen Gründen geringeres Geschwindigkeitsverhältnis durch einen im Vergleich zur Natur höheren Wert des Faktors  $a_M$  kompensiert werden können, wobei jedoch weitere Modellgesetze wie z.B. die geometrische Ähnlichkeit zu berücksichtigen sind.

Zur Überprüfung der Gültigkeit der Gl. (4.6) wurden Konzentrationsmessungen mit idealisierten Straßenschluchten durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4.5 zu sehen. In einer ersten Versuchsreihe kann die Gebäudeanordnung durch die Größen Gebäudehöhe  $H = 12$  cm, Gebäudelänge  $L = 120$  cm, Gebäudebreite  $B = 12$  cm und Breite der Straße  $S = 12$  cm be-



**Abb. 4.5:** Versuchsaufbau zur Simulation der Kfz - erzeugten Turbulenz in Straßenschluchten. Die Pfeile veranschaulichen die Bewegungsrichtung der Bänder bei Gegenverkehr (GV) und Richtungsverkehr (RV) bei den Versuchen mit senkrechter Anströmung (von rechts) und  $H/S = 1$ .

schrieben werden und die Windrichtung war senkrecht zur Straße (Windrichtung  $90^\circ$ ). In weiteren Versuchen wurden Situationen mit breiteren Straßen und der Fall Windrichtung parallel ( $0^\circ$ ) zur Straße untersucht. Der Modellmaßstab  $M$  betrug  $\approx 1/150$ . Die Versuchstechnik zur Simulation der Kfz - erzeugten Turbulenz wurde in folgender Art realisiert und dimensioniert:

Es wurde ein Versuchsaufbau entworfen, welcher die Simulation von verschiedenen Fahrzuständen (verschiedene Fahrzeuggeschwindigkeiten, Richtungs- bzw. Gegenverkehr) ermöglicht. Die Versuchstechnik basiert auf Metallplättchen, die auf Zahnriemen befestigt sind. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen werden 2 Fahrspuren durch 2 Linienquellen und zwei getrennt und unabhängig steuerbare Zahnriemen realisiert, die sowohl in Gegenverkehr als auch im Richtungsverkehr betrieben werden können.

Die Größe der Metallplättchen wurde entsprechend Gl. (4.5) so festgelegt, daß für das Produkt aus Widerstandsbeiwert und Frontfläche gilt:

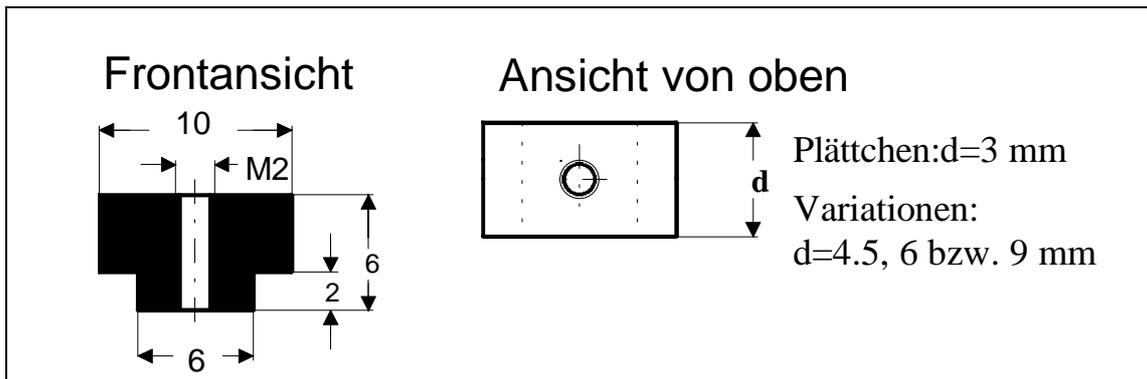


Abb. 4.6: Geometrie der Metallplättchen zur Simulation der Kfz - erzeugten Turbulenz.

$$(C_{DT} \cdot A_T)_M = (C_{DT} \cdot A_T)_N \cdot M^2.$$

Basierend auf Abschätzungen der mittleren Widerstandsbeiwerte und Frontflächen von Kraftfahrzeugen ( $\bar{C}_{DT}^{PKW} \approx 0.4$ ,  $\bar{A}_T^{PKW} \approx 2\text{m}^2$ ,  $\bar{C}_{DT}^{LKW} \approx 0.7$ ,  $\bar{A}_T^{LKW} \approx 8\text{m}^2$ ) und einer Berücksichtigung eines LKW - Anteils von 10%, kann als typischer Wert des Produktes  $(C_{DT} \cdot A_T)_N$  in der Natur angegeben werden:

$$(C_{DT} \cdot A_T)_N \approx 1.3.$$

Der Widerstandsbeiwert der rechteckigen Metallplättchen im Modell liegt in etwa bei  $(C_{DT})_M \approx 1.18$ , so daß sich für ihre Größe der Wert

$$(A_T)_M = \frac{(C_{DT} \cdot A_T)_N \cdot M^2}{(C_{DT})_M} \approx \frac{1.3}{150^2 \cdot 1.18} \approx 50 \text{ mm}^2$$

ergibt. Die Geometrie der Metallplättchen ist in Abb. 4.6 skizziert. Die Form der Frontfläche resultierte aus technischen Gründen. Die Dicke der Metallplättchen betrug in einer ersten Studie 3 mm. Dieser Wert entspricht dem kleinsten, möglichen Wert, da die Plättchen mit Schrauben auf den Zahnriemen befestigt werden mußten. In einer zweiten Studie wurde die

Dicke der Plättchen variiert. Auf die Ergebnisse und das Ähnlichkeitskriterium für diesen Teil der Untersuchungen wird im Abschnitt 4.6 explizit eingegangen.

Im Falle einer konstanten Plättchendicke und unter der Annahme, daß der Reibungsbeiwert  $c_{fh}$  des Modells dem Wert in der Natur entspricht, folgt für die Größe  $a$  aus Gl. (4.6) unter Berücksichtigung von  $(S)_M = (S)_N \cdot M$  (geometrische Ähnlichkeit der Bebauungsstruktur)

$$a = \frac{a_M}{a_N} = \frac{C_{DT,M} \cdot A_{T,M}}{\underbrace{C_{DT,N} \cdot A_{T,N}}_{=M^2}} \cdot \frac{c_{fh,N}}{\underbrace{c_{fh,M}}_{=1}} \cdot \frac{S_N}{\underbrace{S_M}_{=1/M}} \cdot \frac{n_{t,M}}{n_{t,N}} = \frac{n_{t,M} \cdot M}{n_{t,N}}, \quad (4.7)$$

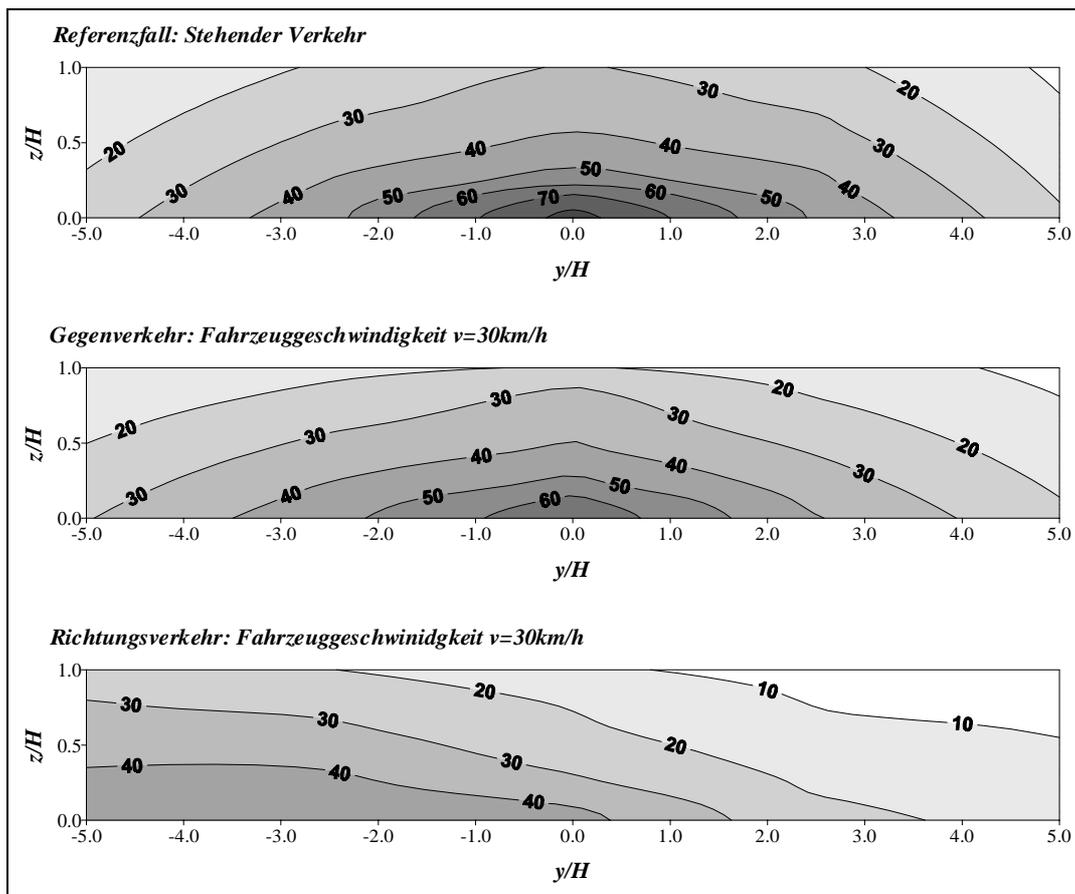
und das Ähnlichkeitskriterium kann wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned} \frac{\left(\frac{v^3}{u_0^3}\right)_N}{\left(\frac{v^3}{u_0^3}\right)_M} &= \frac{n_{t,M} \cdot M}{n_{t,N}} \equiv a \Leftrightarrow \left(\frac{v^3}{u_0^3}\right)_N = a \cdot \left(\frac{v^3}{u_0^3}\right)_M \\ &\Leftrightarrow \left(\frac{v}{u_0}\right)_N = a^{1/3} \cdot \left(\frac{v}{u_0}\right)_M \end{aligned} \quad (4.8)$$

Bei den Versuchen wurde der Einfluß von Variationen der Windgeschwindigkeit  $u_0$ , Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und Verkehrsdichte  $n_T$  auf die Konzentrationsverteilung an den Gebäudewänden untersucht. Variationen der Verkehrsdichte  $n_T$  im Modell werden durch Variationen des Parameters  $a$  ausgedrückt. Im Falle  $a = 1$  betrug die Verkehrsdichte im Modell  $(n_t)_M = 10$  Kfz/m. Dies entspricht in der Natur 67 Fahrzeugen auf einer Strecke von 1 km Länge.

### **4.3 Einfluß auf die Konzentrationsverteilung in einer Straßenschlucht mit $H/S = 1$ bei senkrechter Anströmung**

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Versuchen mit in Abb. 4.5 gezeigten Versuchsaufbau vorgestellt. Das Ziel der Versuche war die Überprüfung des Ähnlichkeitskriteriums nach Gl. (4.8). Die Bebauungsstruktur entsprach einer idealisierten Straßenschlucht mit



**Abb. 4.7:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht in Abhängigkeit vom modellierten Verkehrszustand (Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7 \text{ m/s}$ , Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ).

den geometrischen Parametern  $L/H = 10$  und  $H/S = 1$ . Gemessen wurden die Konzentrationsverteilungen an den Gebäudewänden. Aufgrund der Gebäudegeometrie ist zu erwarten, daß im Zentrum der Straßenschlucht die Konzentrationsverteilung zweidimensionalen Charakter hat und an den Gebäudeenden jeweils ein Zone mit einer horizontalen Ausdehnung von  $2 - 3H$  vorzufinden ist, welche durch die an den Gebäudekanten ablösenden Wirbel geprägt ist.

In Abb. 4.7 ist die Konzentrationsverteilung an der Wand des Lee - Gebäudes in Abhängigkeit vom modellierten Verkehrszustand zu sehen. Dargestellt sind Isolinien der dimensionslosen

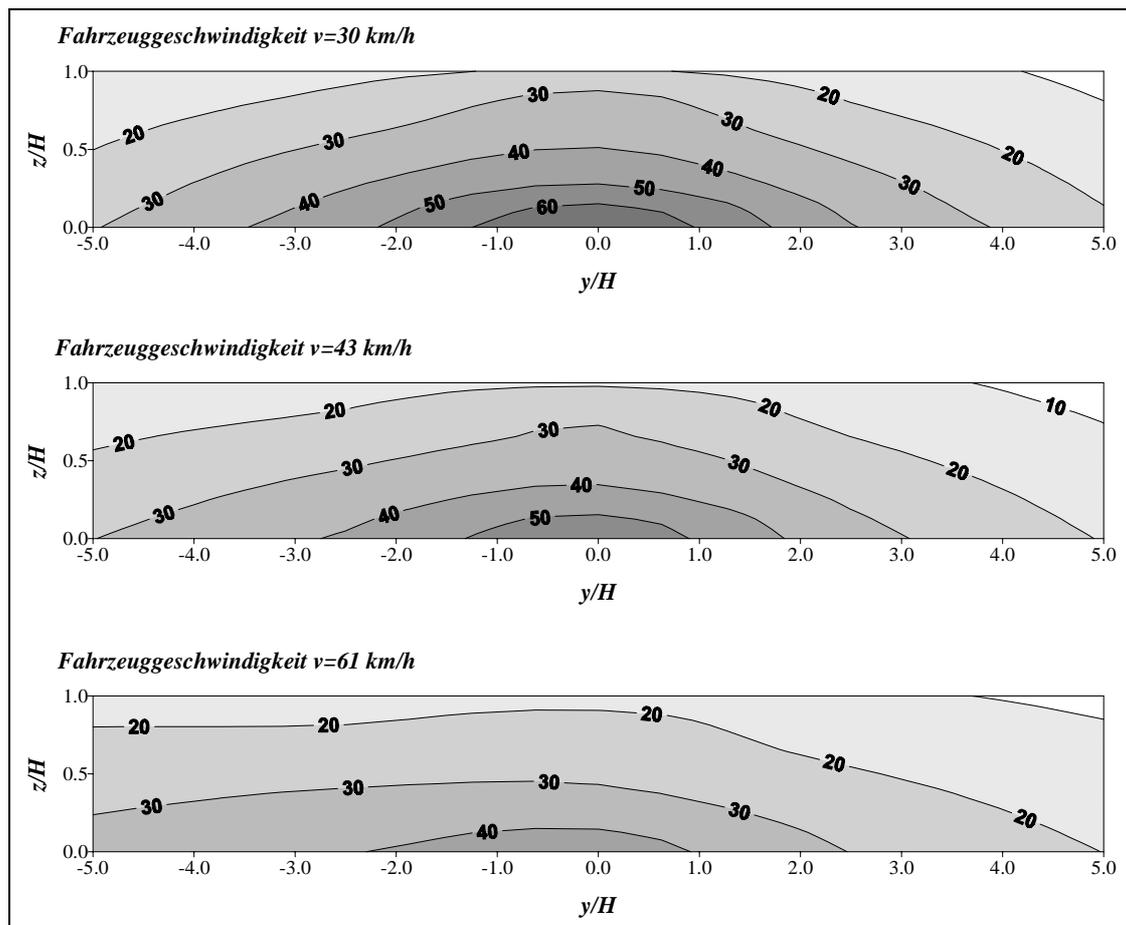
Konzentrationen  $c_M^* = \frac{c_M \cdot u_0 \cdot S}{Q_{M,T}/L_{M,Q}}$ . Als Referenzgrößen wurden die Straßenbreite  $S$

(= 120 mm) und die Geschwindigkeit  $u_0$  in der Grenzschichthöhe  $\delta$  eingesetzt.

Das oberste Diagramm zeigt die Ergebnisse für den Referenzfall, d. h. den Fall einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr. Die Konzentrationsverteilung ist symmetrisch mit einem Konzentrationsmaximum in der Schluchtmitte in Bodennähe. Der Zentrumsbereich ( $y/H < \pm 2$ ) entspricht annähernd zweidimensionalen Verhältnissen. Der Einfluß der an den Gebäudekanten ablösenden Wirbel ist in den Zonen mit  $y/H > \pm 2$  zu sehen. Die Konzentrationen nehmen zu den Gebäudeenden hin ab. Bei der vertikalen Verteilung der Konzentrationen wurden hohe Gradienten beobachtet, wie sie für die Leeseite einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht typisch sind.

Der Einfluß der Fahrzeugbewegungen auf die Konzentrationsverteilung bei einer Situation mit Gegenverkehr (d.h. im Modell bewegen sich die Zahnriemen der beiden Fahrspuren in entgegengesetzte Richtungen) und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 30\text{km/h}$  ist im mittleren Diagramm zu sehen. Die wesentlichen Merkmale der Konzentrationsverteilung bleiben im Vergleich zum Referenzfall unverändert. Die Konzentrationsverteilung ist nach wie vor symmetrisch. Das Konzentrationsmaximum befindet sich in der Schluchtmitte in Bodennähe und die Konzentration nimmt in Richtung der Gebäudeenden und über die Höhe der Gebäudewand deutlich ab. Im Vergleich zum Referenzfall sind die Konzentrationen jedoch geringer. Die Berücksichtigung der Fahrzeugbewegung bewirkt folglich eine zusätzliche Verdünnung der Schadstoffe, welche auf veränderte Turbulenzverhältnisse in der Straßenschlucht zurückzuführen ist. Der advective Transport der Schadstoffe bleibt jedoch annähernd unverändert. Dies ist im Falle einer Situation mit Richtungsverkehr, d.h. beide Zahnriemen bewegen sich in die gleiche Richtung, nicht mehr gegeben. Das untere Diagramm, in welchem die Ergebnisse für eine Situation mit Richtungsverkehr und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v = 30\text{km/h}$  dargestellt sind, verdeutlicht, daß in diesem Falle eindeutig ein mittlerer Transport von Schadstoffen entlang der Straße infolge der Fahrzeugbewegung entsteht. Die Konzentrationsverteilung ist asymmetrisch, wobei das Konzentrationsmaximum am in Fahrtrichtung liegenden Ende der Straßenschlucht auftritt.

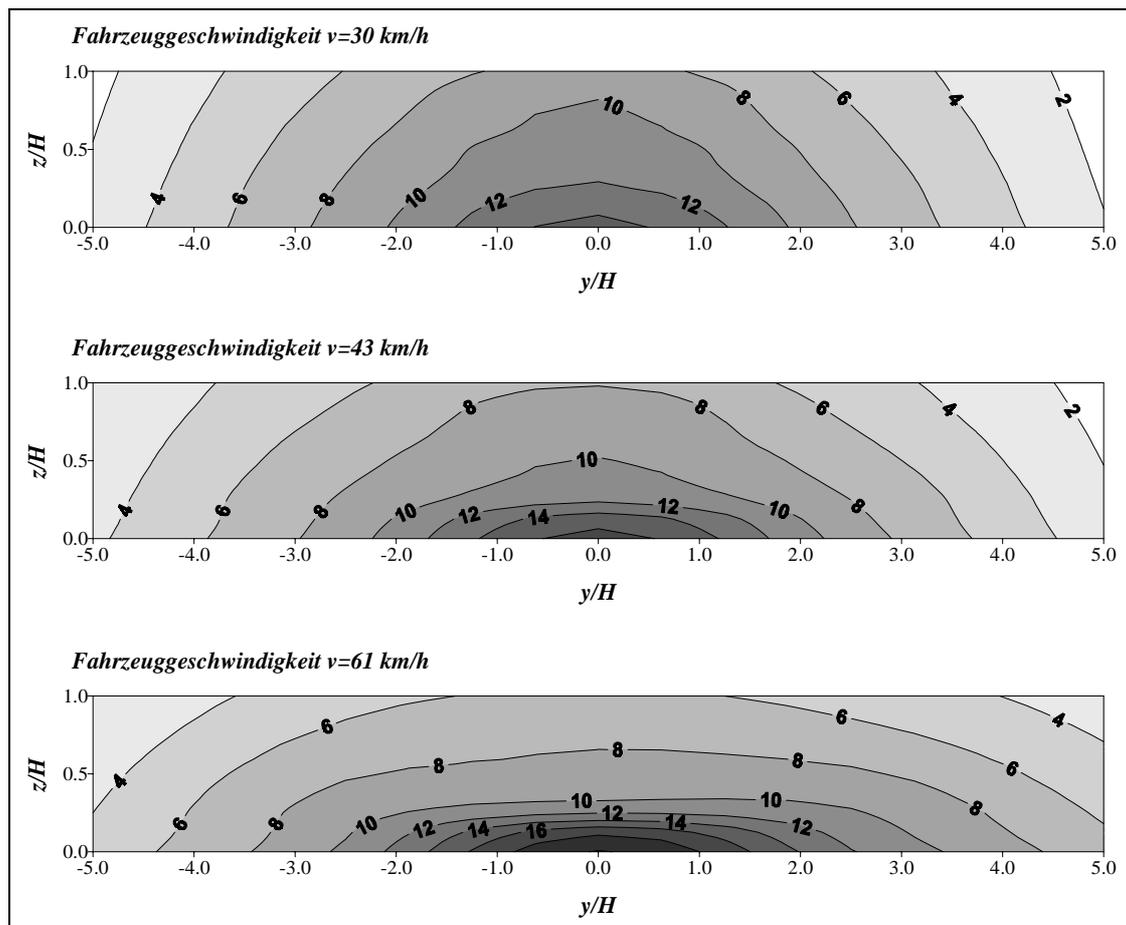
Es ist anzumerken, daß die im untersten Diagramm in Abb. 4.7 gezeigte Konzentrationsverteilung nicht direkt auf Naturverhältnisse übertragen werden kann. Im Modell haben die simulierten Linienquellen nur eine endliche Länge, so daß ein seitlicher Transport von Schadstoffen in die Straßenschlucht nicht berücksichtigt wird. In der Natur dagegen ist zu erwarten,



**Abb. 4.8:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7 \text{ m/s}$ , Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ).

daß bei den entsprechenden Verhältnissen, d.h. einer ausgeprägten Strömungskomponente entlang der Straße, Schadstoffe aus den umliegenden Gebieten in die betrachtete Straßenschlucht einströmen, so daß das in Abb. 4.7 gezeigte starke Anwachsen der Konzentration entlang der Straße eher unrealistisch ist. Die Abbildung ist als Nachweis zu verstehen, daß die Modellierung der Fahrzeugbewegung insbesondere bei Situationen mit Richtungsverkehr zu veränderten mittleren Strömungsverhältnissen in Straßen führen kann.

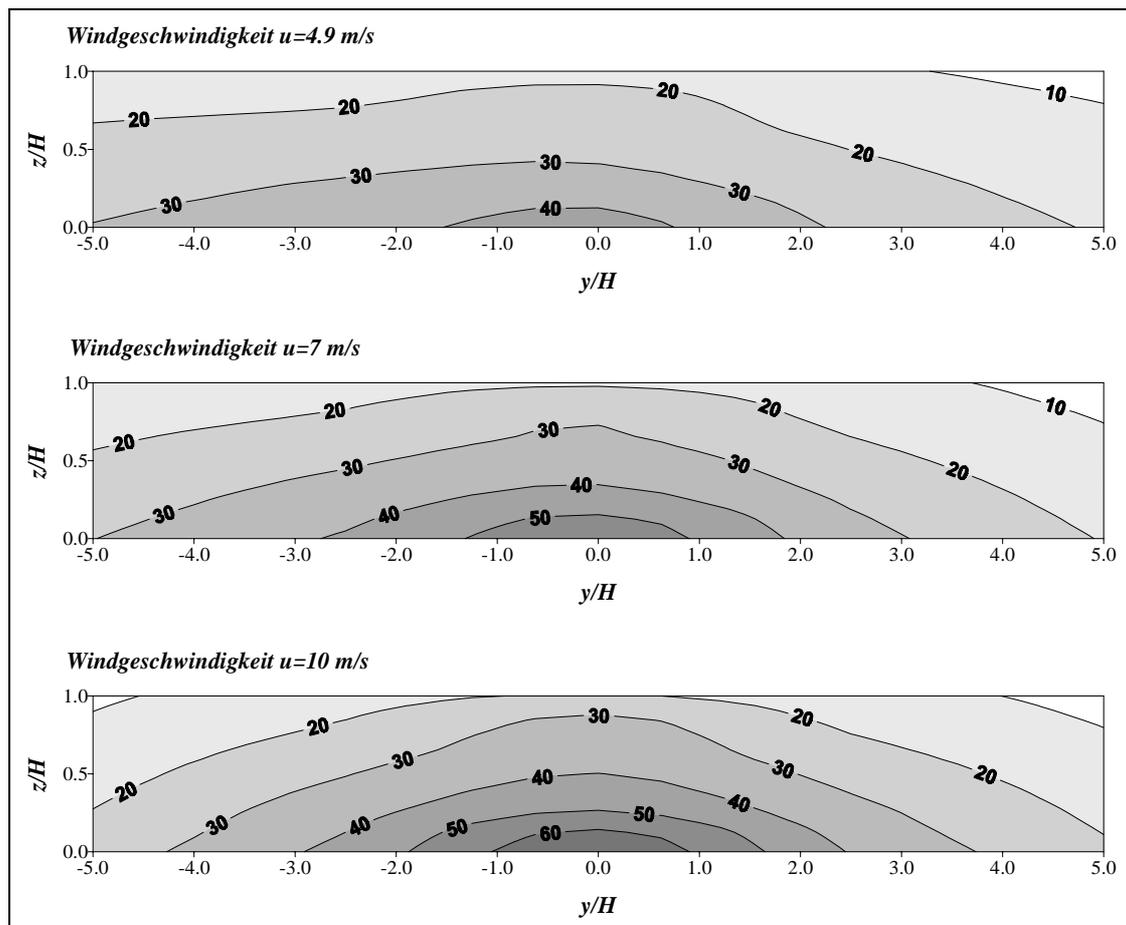
Die Diagramme in Abb. 4.7 haben gezeigt, daß die Berücksichtigung der Kfz - erzeugten Turbulenz einen Einfluß auf die Schadstoffausbreitung in Straßenschluchten hat. Im Folgenden wird der Einfluß systematischer Parametervariationen aufgezeigt und der Nachweis der Gültigkeit des Ähnlichkeitskriteriums nach Gl. (4.8) erbracht. Betrachtet werden zunächst Situationen mit Gegenverkehr.



**Abb. 4.9:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen Wand (Geb. II) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7$  m/s, Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3$  mm).

In Abb. 4.8 sind die Konzentrationsverteilungen an der Wand des Lee - Gebäude für drei verschiedene Fahrzeuggeschwindigkeiten dargestellt. Die Windgeschwindigkeit  $u_0$  betrug 7 m/s und wurde nicht variiert. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Konzentrationen mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit abnehmen. Eine Veränderung der Form der Konzentrationsverteilung kann erst bei hohen Fahrzeuggeschwindigkeiten beobachtet werden, so daß insgesamt betrachtet der Einfluß der Fahrzeugbewegung auf den mittleren Schadstofftransport entlang der Straße bei Situationen mit Gegenverkehr als gering bezeichnet werden kann.

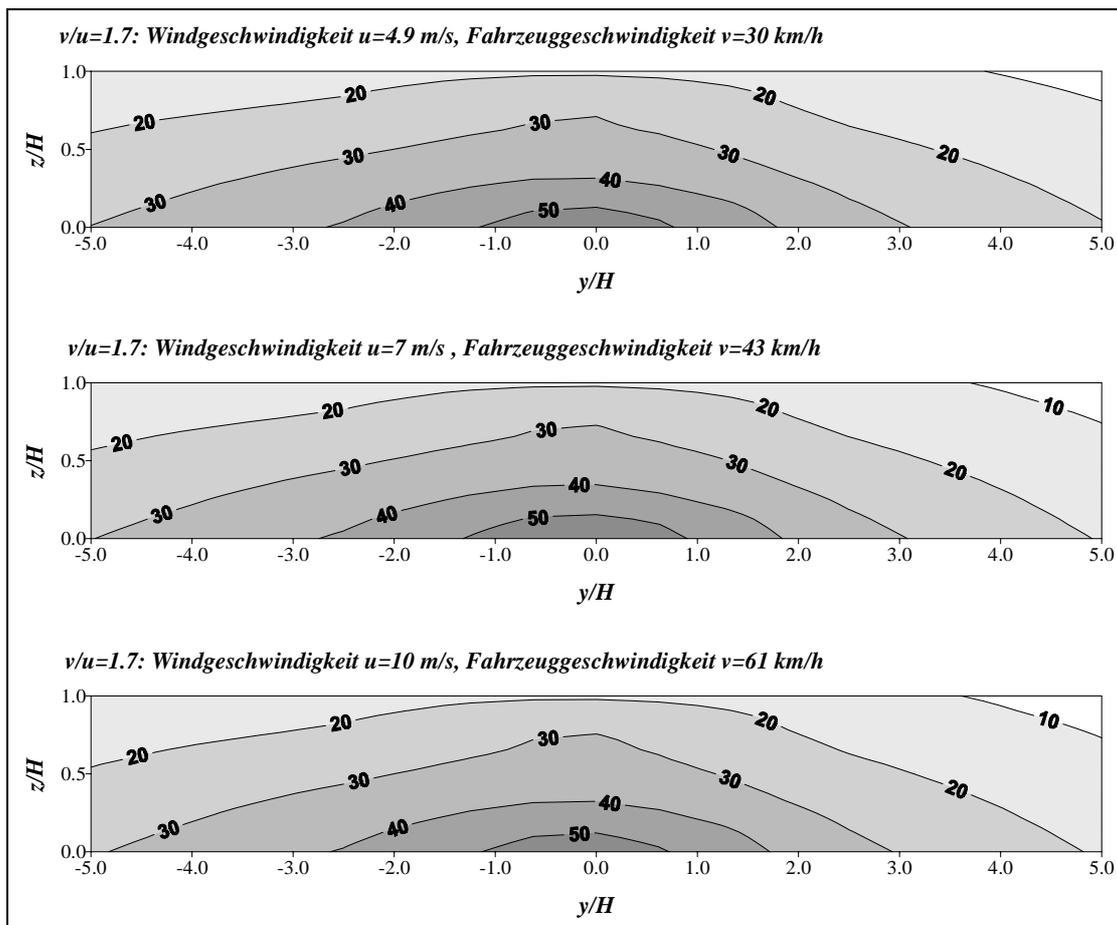
In Abb. 4.9 sind die Konzentrationsverteilungen an der gegenüberliegenden Wand des Gebäudes II eingezeichnet. Die Konzentrationen sind erwartungsgemäß deutlich niedriger als am Gebäude I. Die Erhöhung der Fahrzeuggeschwindigkeit bewirkt einen Anstieg des Konzentrationsmaximums. Daraus ist zu schließen, daß eine Zunahme der Fahrzeuggeschwindigkeit,



**Abb. 4.10:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 43$  km/h, Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3$  mm).

bei Situationen mit Gegenverkehr in der Straßenschlucht einen höheren Quertransport der Schadstoffe in der Straße bewirkt. Die Wirkung des Canyon - Vortex, welcher bei senkrechten Anströmrichtungen von Straßenschluchten zu einer hohen Schadstoffbelastung an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht führt, wird abgeschwächt. Die horizontalen, bodennahen Konzentrationsgradienten sind geringer als im Referenzfall mit stehendem Verkehr.

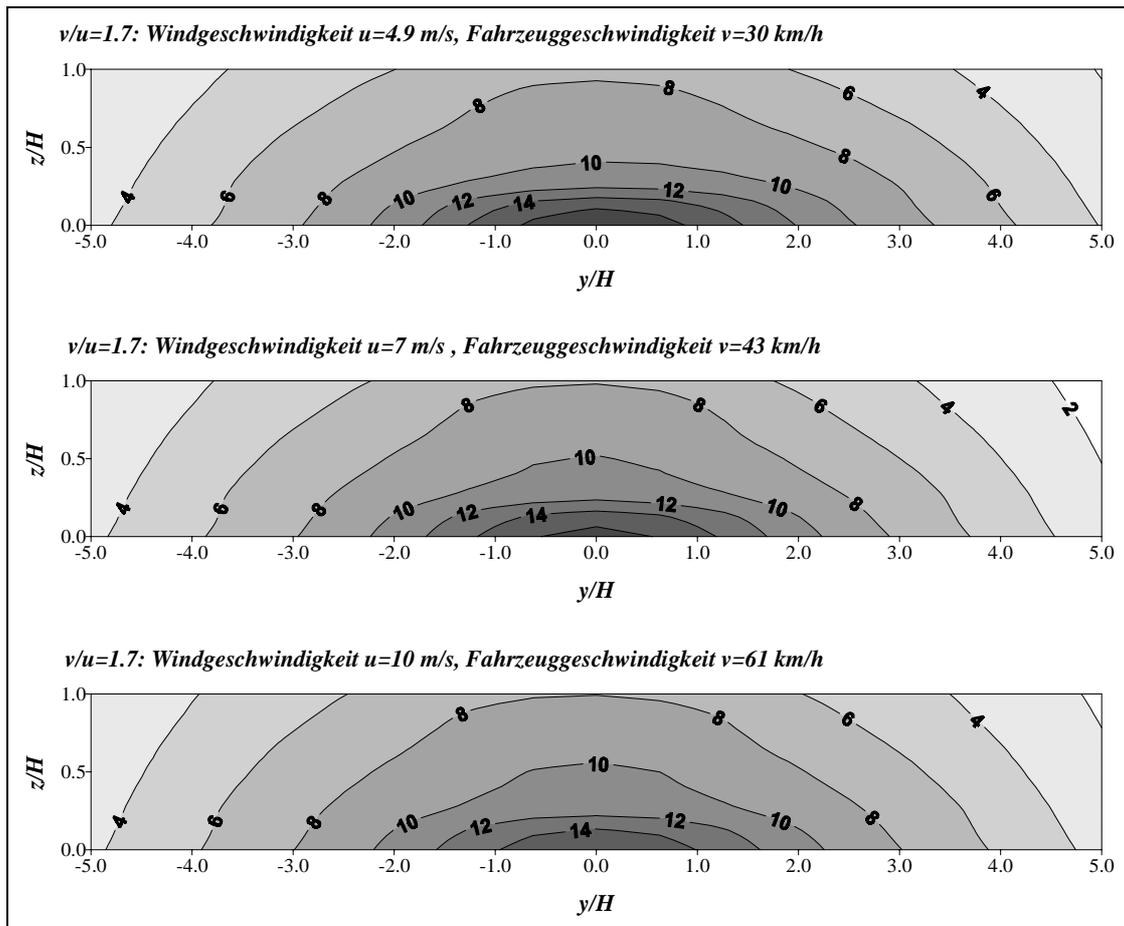
In der Abb. 4.10 sind noch einmal Konzentrationsverteilungen an der leeseitigen Wand zu sehen. Variiert wurde die Windgeschwindigkeit, während die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  konstant 43 km/h betrug. Die Wirkung der verkehrsinduzierten Turbulenz läßt mit zunehmender Windgeschwindigkeit nach. Die gezeigten Ergebnisse aus den Versuchen mit Variationen der Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. Windgeschwindigkeit deuten darauf hin, daß für Situationen mit Gegenverkehr das Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windge-



**Abb. 4.11:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr bei einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  (Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3$  mm).

schwindigkeit ein maßgeblicher Parameter zur Charakterisierung der strömungsmechanischen Wirkung der Fahrzeugbewegung ist. In den Abb. 4.11 und 4.12 sind Konzentrationsverteilungen für drei Situationen mit unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten  $u_0$  und Fahrzeuggeschwindigkeiten  $v$  bei einem konstantem Verhältnis  $v/u_0$  gegenübergestellt. Die Konzentrationsverteilungen an den leeseitigen und luvseitigen Wänden sind nahezu identisch. Die festgestellten Abweichungen liegen im Bereich der Meßgenauigkeit. Dieses Ergebnis ist eine erste Bestätigung des Ähnlichkeitskriteriums nach Gl. (4.8), denn bei konstanter Verkehrsdichte muß gelten:

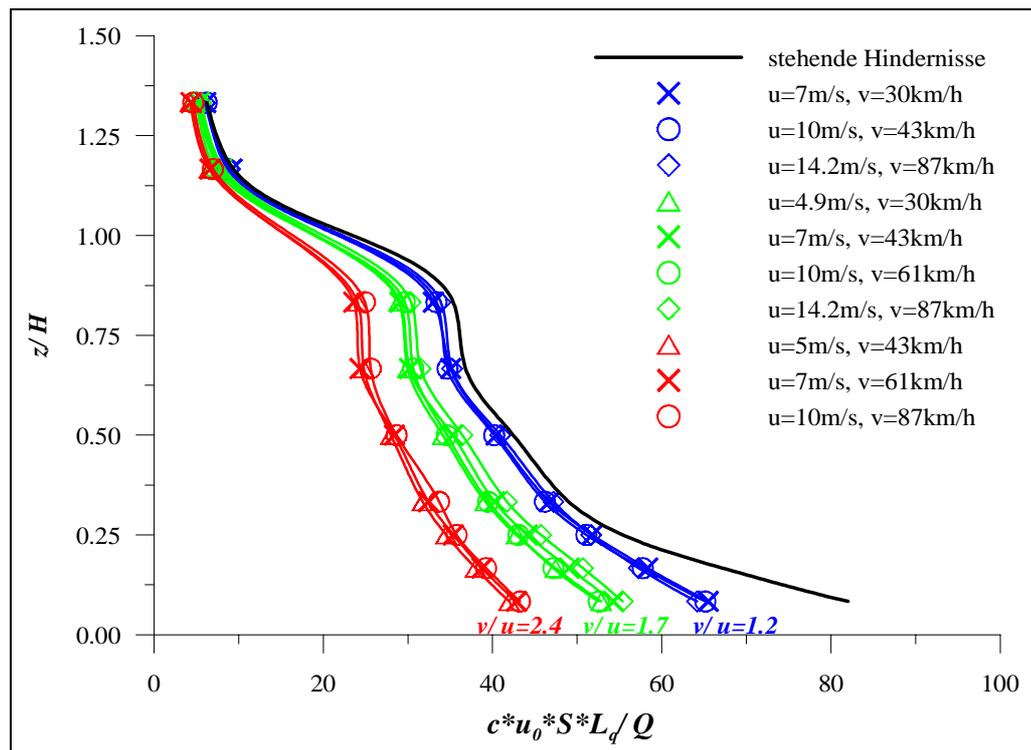
$$c^* = \text{konstant für } v/u = \text{konstant} .$$



**Abb. 4.12:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen Wand (Geb. II) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr bei einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  (Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3$  mm).

Eine weitere Bestätigung liefern die Ergebnisse in Abb. 4.13. Dargestellt sind vertikale Konzentrationsprofile in der Gebäudemitte an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht. Neben dem Ergebnis für den Referenzfall wurden Ergebnisse für verschiedene Kombinationen von Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und Windgeschwindigkeit  $u_0$  eingezeichnet. Es ist zu erkennen, daß Situationen mit einem konstanten Verhältnis von  $v/u_0$  nahezu identische Konzentrationsprofile liefern.

Bei den bisher betrachteten Versuchen wurde die Dichte der Metallplättchen nicht variiert. Der Parameter  $a$ , welcher im vorhergehenden Abschnitt zur Beschreibung von Variationen der Verkehrsdichte eingeführt wurde, hatte den Wert 1. Unter Voraussetzung der Gültigkeit des Ähnlichkeitskriteriums nach Gl. (4.8), muß ein Anwachsen des Dichteparameters  $a$  eine ähn-



**Abb. 4.13:** Konzentrationsprofile in der Mitte der leeseitigen Gebäudewand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Verhältnis Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0$  (Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3$  mm).

liche Wirkung wie die Zunahme des Geschwindigkeitsverhältnisses  $v/u_0$  bewirken. Aufgrund der dritten Wurzel in Gl. (4.8) sollte der Einfluß im Falle des Dichteparameters  $a$  jedoch geringer sein als im Falle des Geschwindigkeitsverhältnisses  $v/u_0$ .

In der Abb. 4.14 sind Konzentrationsverteilungen an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht für drei verschiedene Werte des Dichteparameters  $a$  zu sehen. Die Windgeschwindigkeit  $u_0$  betrug 7 m/s und die Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  war 43 km/h, so daß sich für das Verhältnis  $v/u_0$  ein Wert von 1.7 ergibt. Die Ergebnisse machen deutlich, daß die Konzentrationen an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht mit steigender Verkehrsdichte abnehmen. Die Wirkung ist somit ähnlich wie im Falle des Geschwindigkeitsverhältnisses. Ein Vergleich mit den Ergebnissen in Abb. 4.13 veranschaulicht, daß die Konzentrationsabnahme in der Schluchtmitte durch das Anwachsen des Dichteparameters von  $a = 0.5$  auf den 4-fachen Wert  $a = 2$  in etwa in der gleichen Größenordnung liegt wie infolge einer Verdopplung des Ge-

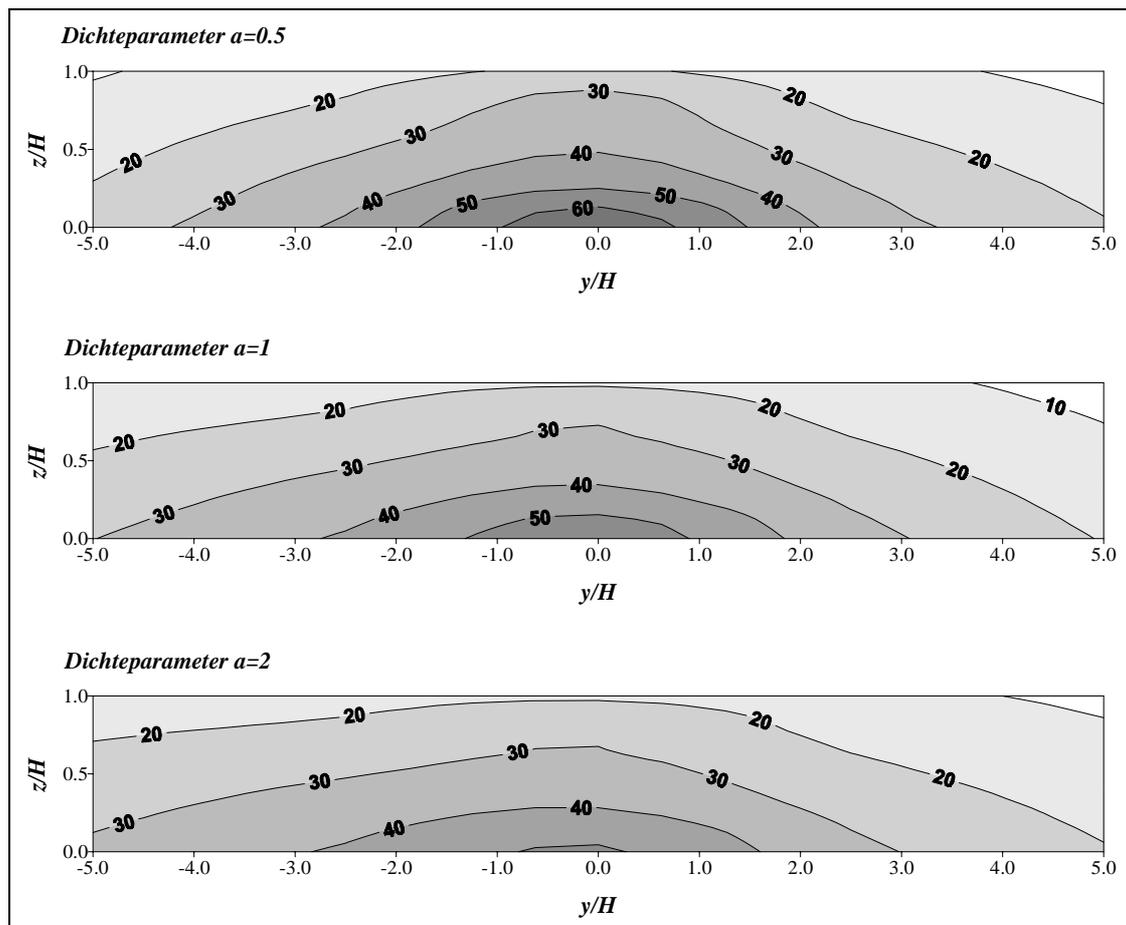
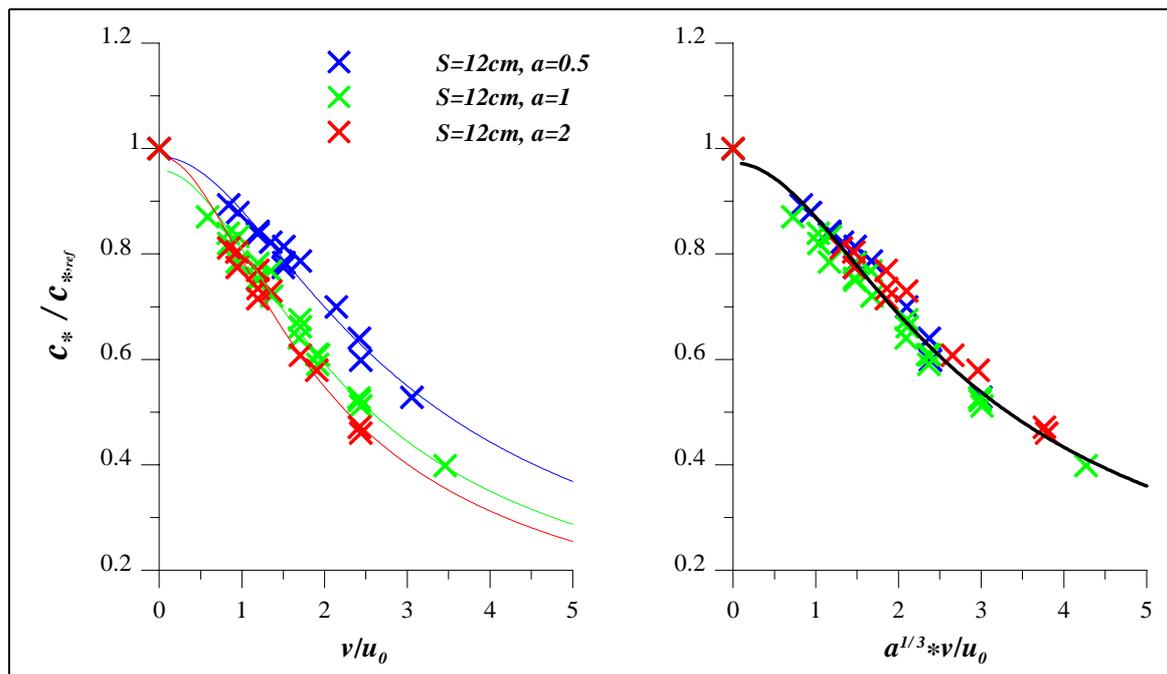


Abb. 4.14: Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Dichteparameter  $a$  ( $v/u_0 = 1.7$ , Plättchendicke  $d = 3$  mm).

schwindigkeitsverhältnisses. Die Wirkung der ansteigenden Verkehrsdichte ist somit schwächer als im Falle einer Zunahme des Geschwindigkeitsverhältnisses.

Dies bestätigen auch die in der Abb. 4.15 gezeigten Ergebnisse. Dargestellt ist der Einfluß von Variationen des Geschwindigkeitsverhältnisses  $v/u_0$  und des Dichteparameters  $a$ , auf die Konzentration in der Schluchtmitte in Bodennähe ( $z/H = 0.083$ ). Im linken Diagramm sind die Konzentrationsverhältnisse bezogen auf die Ergebnisse im Referenzfall (stehender Verkehr) in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis  $v/u_0$  aufgetragen. Es wird noch einmal deutlich, daß die Konzentrationen in der Schluchtmitte mit steigendem Geschwindigkeitsverhältnis abnehmen, wobei die Abnahme stärker ist bei Situationen mit höherer Verkehrsdichte. Im rechten Diagramm sind die Konzentrationsverhältnisse über der Skalierungsgröße



**Abb. 4.15:** Konzentrationen in der Schluchtmitte in Bodennähe an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis und der Verkehrsdichte (Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ). Dargestellt sind die Konzentrationen bezogen auf das Ergebnis im Referenzfall mit stehendem Verkehr ( $v = 0 \text{ km/h}$ ).

$\sqrt[3]{a} \cdot v/u$  entsprechend Gl. (4.8) aufgetragen. Die Ergebnisse für die drei Versuchsreihen können bei dieser Skalierung gut durch eine einzige Kurve beschrieben werden. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit einer nach der Methode der kleinsten Quadrate angepaßten Kurve für alle drei Versuchsreihen. Die Kombination von Geschwindigkeitsverhältnis und Verkehrsdichte in einer Skalierungsgröße folgt aus dem Ähnlichkeitskriterium nach Gl. (4.8). Situationen mit  $\sqrt[3]{a} \cdot v/u = \text{konstant}$  müssen bei einer Gültigkeit von Gl. (4.8) zu den gleichen Ergebnissen führen. Abb. 4.15 liefert somit die Bestätigung der Gültigkeit des Ähnlichkeitskriteriums nach Gl. (4.8), welches aus dem von Plate (1982) vorgeschlagenen Modellgesetz zur Modellierung von Kfz - erzeugter Turbulenz im Windkanal, abgeleitet wurde.

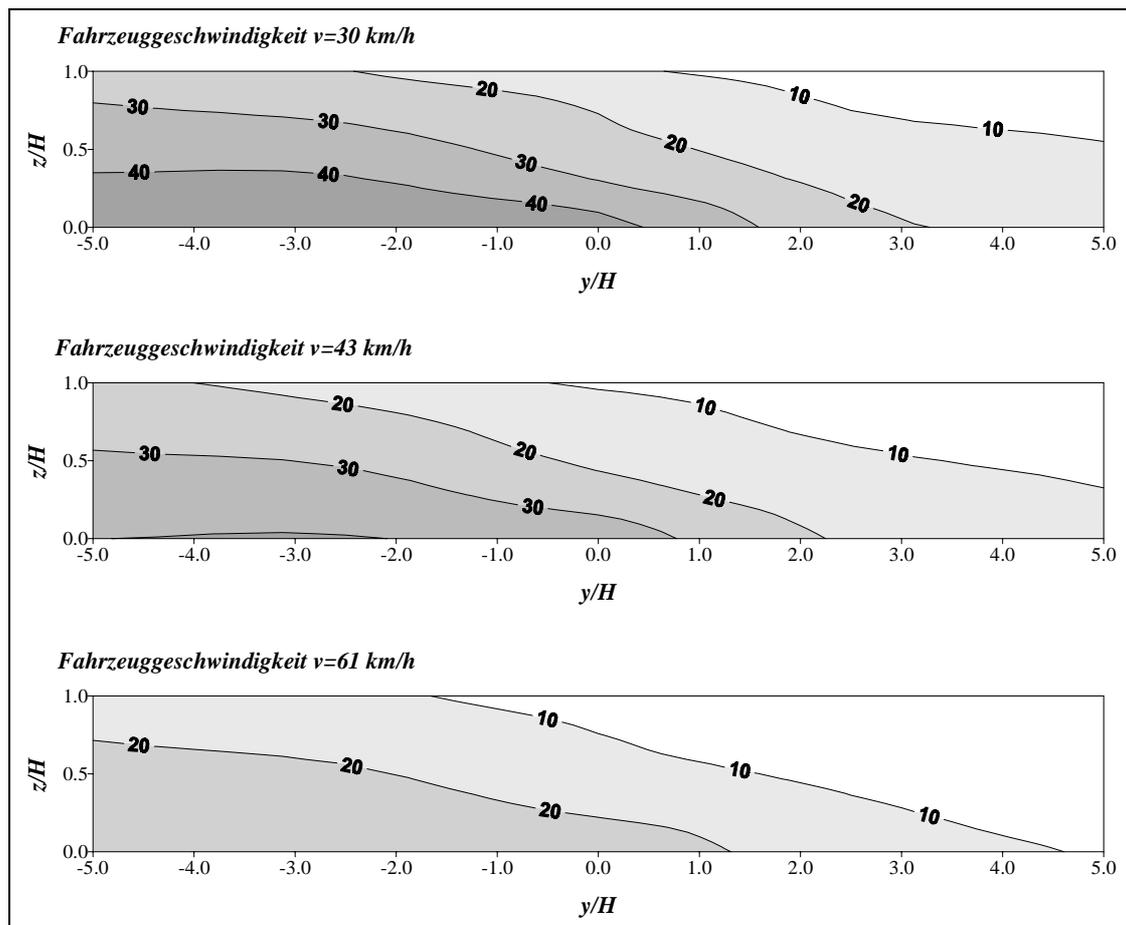
Es kann zusammenfassend festgehalten werden, daß die Ergebnisse aus der durchgeführten Parameterstudie mit Variationen der Windgeschwindigkeit  $u_0$ , Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$  und Verkehrsdichte, ausgedrückt durch den Dichteparameter  $a$ , für Situationen mit Gegenverkehr in einer senkrechten angeströmten Straßenschlucht eine Bestätigung des Modellgesetzes von Plate (1982) zur Modellierung der verkehrsinduzierten Turbulenz im Windkanal liefern.

Die Konzentrationsverteilung ist abhängig von dem abgeleiteten Ähnlichkeitskriterium, d.h. es gilt:

$$c^* = f\left(\sqrt[3]{a} \cdot \frac{v}{u}\right).$$

Die jeweilige Funktion zur Beschreibung der Wirkung der verkehrsinduzierten Turbulenz ist nicht für jeden Punkt des Konzentrationsfeldes in der Straßenschlucht gleich. Für das bodennahe Konzentrationsmaximum in der Mitte der leeseitigen Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht wurde eine Reduktion beobachtet. Der funktionale Zusammenhang der die Abnahme beschreibenden Kurve wird derzeit im Rahmen eines EG - Netzwerkes weiter betrachtet. In die Analyse werden neben den Windkanalergebnissen Naturdaten und Ergebnisse aus numerischen Modellrechnungen einbezogen. Einige Ergebnisse des Vergleichs mit Berechnungen mit Ausbreitungsmodellen, die einen Ansatz zur Berücksichtigung der Fahrzeugbewegung beinhalten, werden im Abschnitt 4.8 vorgestellt.

Für Situationen mit Richtungsverkehr hat die in Abb. 4.7 gezeigte Konzentrationsverteilung bereits verdeutlicht, daß in diesem Falle ein Schadstofftransport entlang der Straße festzustellen ist. Eine derartige Wirkung der Fahrzeugbewegung kann nicht durch veränderte Turbulenzverhältnisse erklärt werden, sondern muß das Resultat veränderter mittlerer Strömungsverhältnisse sein. Die Ableitung des Modellgesetzes von Plate (1982) geht als Grundannahme von der Umwandlung der von den Fahrzeugen erbrachten Leistung entgegen der Strömung in Turbulenz aus. Die Erfüllung dieser Forderung ist für Situationen mit Richtungsverkehr nicht gegeben und es ist somit eigentlich nicht zwingend zu erwarten, daß die Ergebnisse durch das Ähnlichkeitskriterium nach Gl. (4.8) beschrieben werden können. Aus diesem Grunde wurden die Ergebnisse in die bisherige Betrachtung nicht integriert und werden im Folgenden nur kurz betrachtet. Das Versuchsprogramm war im Vergleich zu Situationen mit Gegenverkehr deutlich reduziert.



**Abb. 4.16:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit (Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7$  m/s, Dichteparameter  $a = 1$ , Plättchendicke  $d = 3$  mm).

Der Einfluß eines zunehmenden Geschwindigkeitsverhältnisses  $v/u_0$  im Falle von Richtungsverkehr ist in Abb. 4.16 dargestellt. Es wird deutlich, daß die Konzentrationen in der Straßenschlucht mit zunehmenden  $v/u_0$  - Verhältnis abnehmen. Der Transport entlang der Straße, und damit auch der Abtransport der Schadstoffe aus der Straßenschlucht, nimmt zu. Ein ähnliches Verhalten wurde, wie in Abb. 4.17 zu sehen ist, auch bei zunehmender Verkehrsdichte beobachtet. Aufgrund der geringen Anzahl von Versuchen war es nicht möglich, zu überprüfen, inwiefern die Ergebnisse durch ein Ähnlichkeitskriterium analog zu Gl. (4.8) beschrieben werden können.

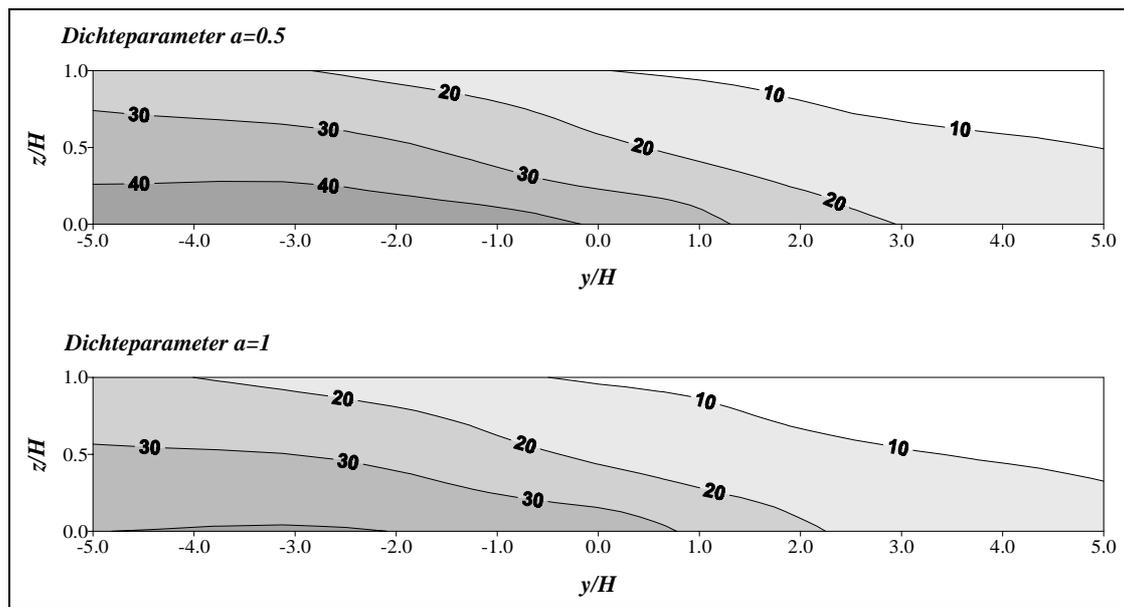


Abb. 4.17: Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr in Abhängigkeit vom Dichteparameter  $a$  (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 43 \text{ km/h}$ , Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7 \text{ m/s}$ , Plättchendicke  $d = 3 \text{ mm}$ ).

#### 4.4 Einfluß auf die Konzentrationsverteilung in einer Straßenschlucht mit $H/S = 1/2$ und $H/S = 1/3$ bei senkrechter Anströmung

Die Versuche wurden für zwei Situationen mit größeren Abständen der Gebäude fortgesetzt. Das Ziel war zu überprüfen, ob auch in breiteren Straßen ein Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Konzentrationsverteilung an den Gebäudewänden beobachtet werden kann. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4.18 skizziert. Die Geometrie der Gebäude wurde nicht verändert. Untersucht wurden die Straßenbreiten  $S = 24 \text{ cm}$  und  $S = 36 \text{ cm}$ , so daß für die Verhältnisse von Gebäudehöhe zur Straßenbreite  $H/S$  die Werte  $1/2$  und  $1/3$  resultieren. Zu beachten ist, daß die Fahrrichtungen bei Gegenverkehr entgegengesetzt zu den Fahrrichtungen bei den Versuchen mit  $H/S = 1$  waren. Dies ist in Abb. 4.18 festgehalten. Die Quelle und die beiden Zahnriemen mit den Metallplättchen waren jeweils in der Mitte der Straßenschlucht angebracht. Der Abstand zwischen den Metallplättchen betrug  $5 \text{ cm}$  ( $a = 2$ ) und ihre Dicke entsprach  $d = 3 \text{ mm}$ . Die dimensionslosen Konzentrationen wurden entsprechend

$$c_M^* = \frac{c_M \cdot u_0 \cdot S}{Q_{M,T} / L_{M,Q}} \text{ berechnet.}$$

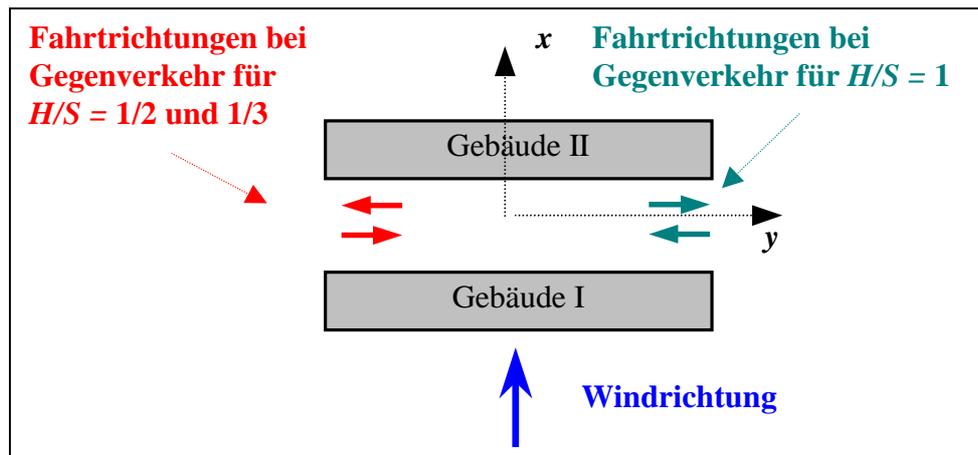
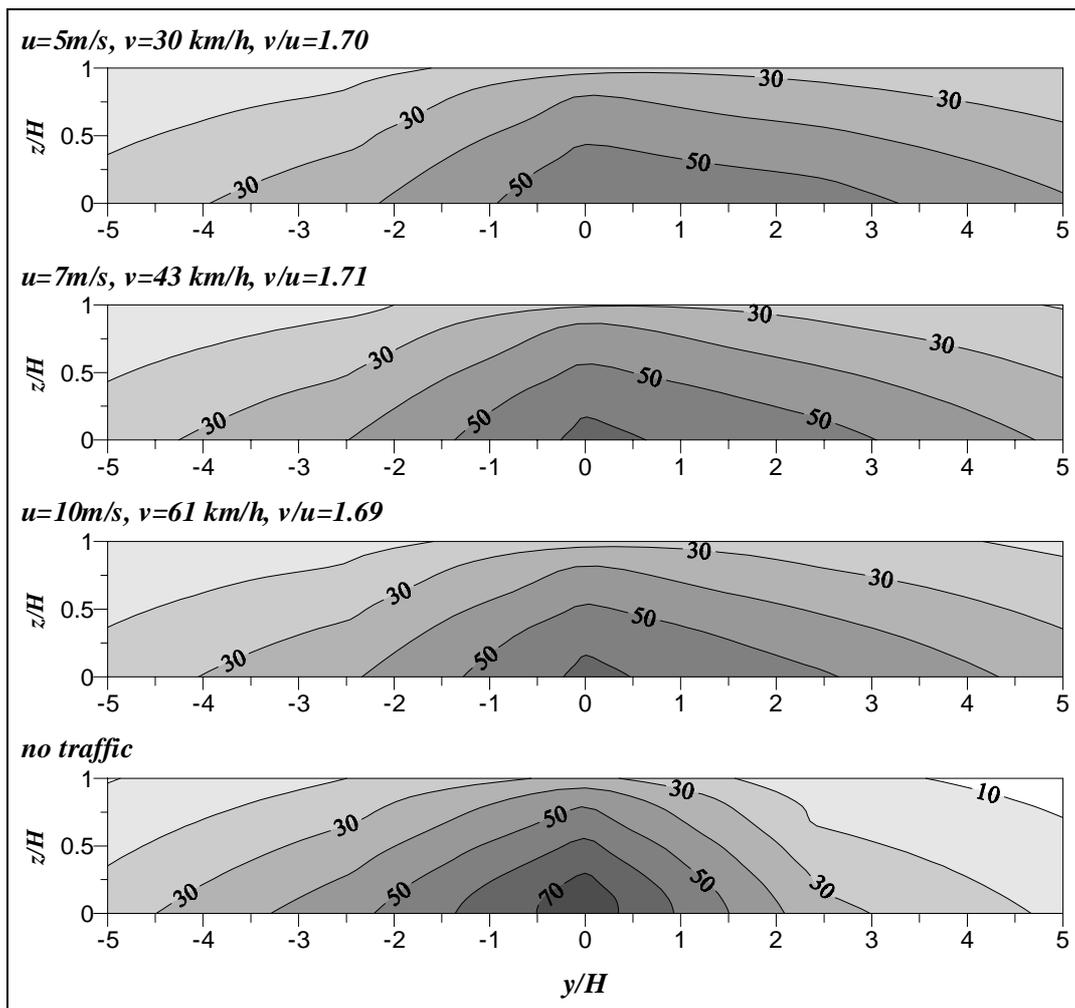


Abb. 4.18: Versuchsaufbau bei den Experimenten mit senkrechter Anströmung und  $H/S = 1/2$  und  $H/S = 1/3$ . Zum Vergleich sind die entgegengesetzten Fahrtrichtungen bei Gegenverkehr bei der Studie mit  $H/S = 1$  mit eingezeichnet.

Konzentrationsverteilungen an der leeseitigen bzw. luvseitigen Schluchtwand für die 24 cm bzw. 36 cm breite Straßenschlucht sind in den Abb. 4.19-4.22 dargestellt. Die unterste Abbildung zeigt jeweils das Ergebnis im Referenzfall, d.h. bei stehendem Verkehr. Die oberen drei Abbildungen zeigen die Ergebnisse aus jeweils drei Meßreihen mit unterschiedlichen Werten der Windgeschwindigkeit und Fahrzeuggeschwindigkeit aber konstantem Geschwindigkeitsverhältnis  $v/u_0$ . Bei beiden Straßenbreiten war die Symmetrie der Konzentrationsverteilung im Referenzfall schlechter als bei den Versuchen mit  $S = 12$  cm. Eine Verbesserung konnte auch in umfangreichen Vorversuchen nicht erzielt werden. Das Positionieren des Modells ist immer mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet und bereits geringste Abweichungen z.B in der Windrichtung, bewirken nicht exakt symmetrische Strömungsverhältnisse.

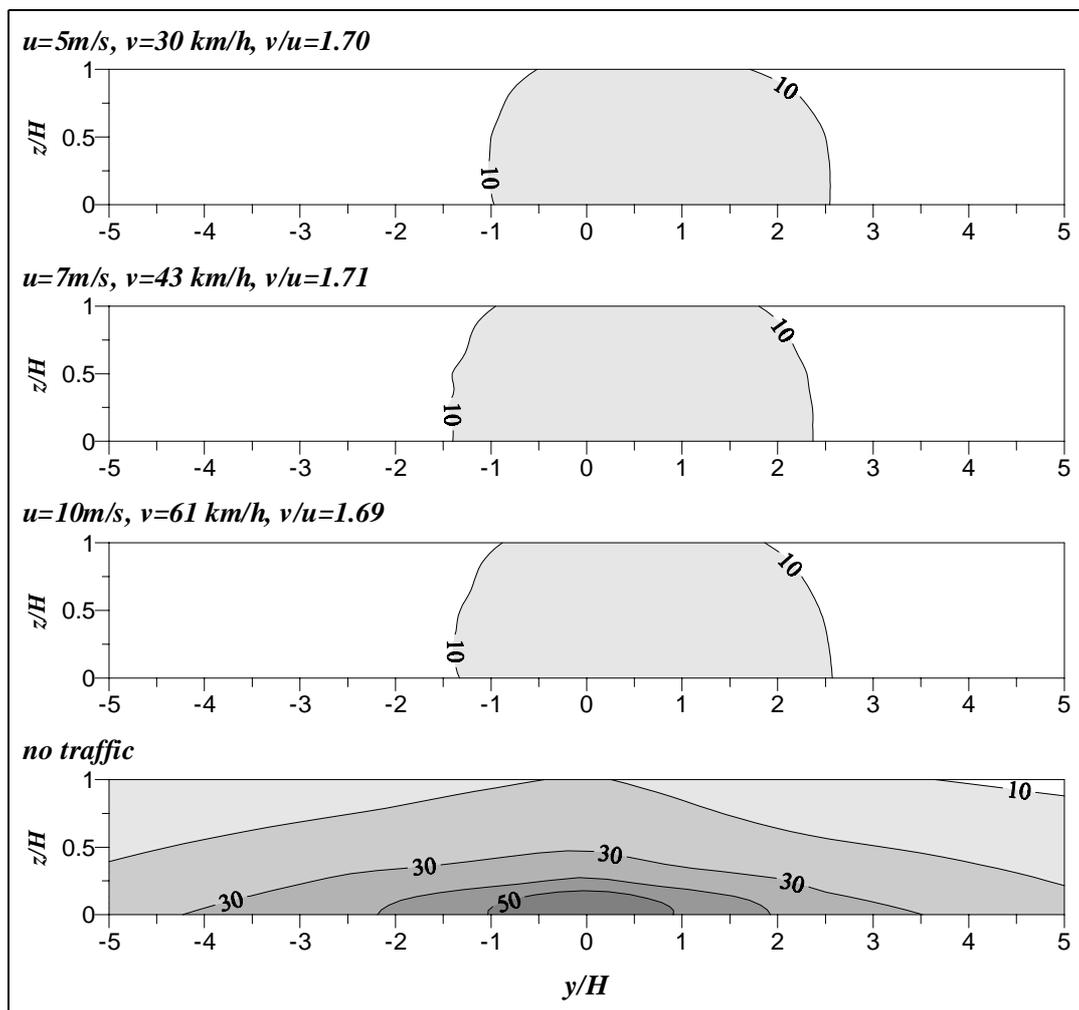
Grundsätzlich werden ähnliche Ergebnisse wie im Falle der Straßenschlucht mit  $H/S = 1$  erzielt. An der leeseitigen Schluchtwand wird in Bodennähe in der Gebäudemitte ein Maximum beobachtet. Dieser Maximalwert der normierten Konzentrationen liegt in der gleichen Größenordnung (bei einer Verwendung der Straßenbreite als Längenskala zur Normierung). Unterschiede sind insbesondere an der luvseitigen Schluchtwand festzustellen. Bei der Straßenschlucht mit  $S = 36$  cm tritt dort bereits im Referenzfall nahezu keine Schadstoffbelastung auf, während für den Fall  $S = 24$  cm relativ hohe Konzentrationswerte an der luvseitigen Schluchtwand gemessen wurden.



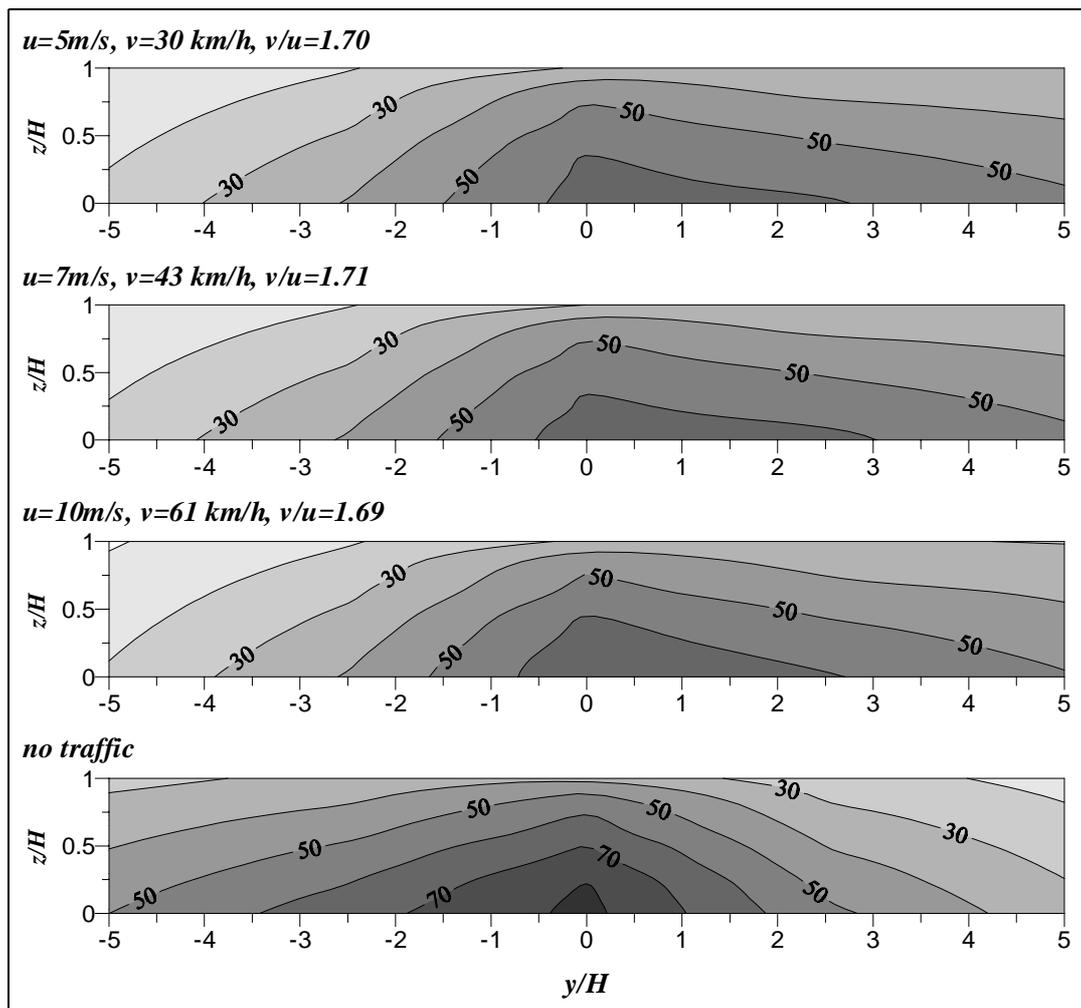
**Abb. 4.19:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Grafik) und Gegenverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 24 \text{ cm}$  ( $H / S = 1/2$ ).

Für beide Straßenbreiten zeigen die Konzentrationsverteilungen für die Situationen mit Gegenverkehr bei einem konstanten Geschwindigkeitsverhältnis eine gute Übereinstimmung. Die Modellierung der Fahrzeugbewegung bewirkt eine Abnahme der Maximalkonzentrationen in der Schluchtmitte. Dies verdeutlichen auch die in der Abb. 4.23 dargestellten vertikalen Konzentrationsprofile. Mit steigenden Geschwindigkeitsverhältnis nehmen die in der Schluchtmitte gemessenen Konzentrationen ab. Ein Vergleich der Konzentrationsabnahme mit den Ergebnissen der Studie mit  $S = 12 \text{ cm}$  ist in der Abb. 4.24 zu sehen. Letztere werden durch die gestrichelt eingezeichnete Linie wiedergegeben, welche der an die Daten angepaßten Kurve (siehe Diskussion im vorhergehenden Abschnitt) entspricht. Die bodennahen Kon-

zentrationenwerte in der Schluchtmitte sind dabei jeweils bezogen auf den Konzentrationswert an dieser Stelle im Referenzfall (stehender Verkehr) und aufgetragen über dem mit dem Dichteparameter kombinierten Geschwindigkeitsverhältnis. Für die Versuche mit  $S = 24$  cm und 36 cm wurde der Parameter  $a=2$  berücksichtigt, da der Abstand der Metallplättchen 5 cm betrug. Die Abnahme liegt für beide Straßenbreiten in ähnlicher Größenordnung und im Vergleich zu den Ergebnissen für  $S = 12$ cm ist die Abnahme nur geringfügig schwächer.



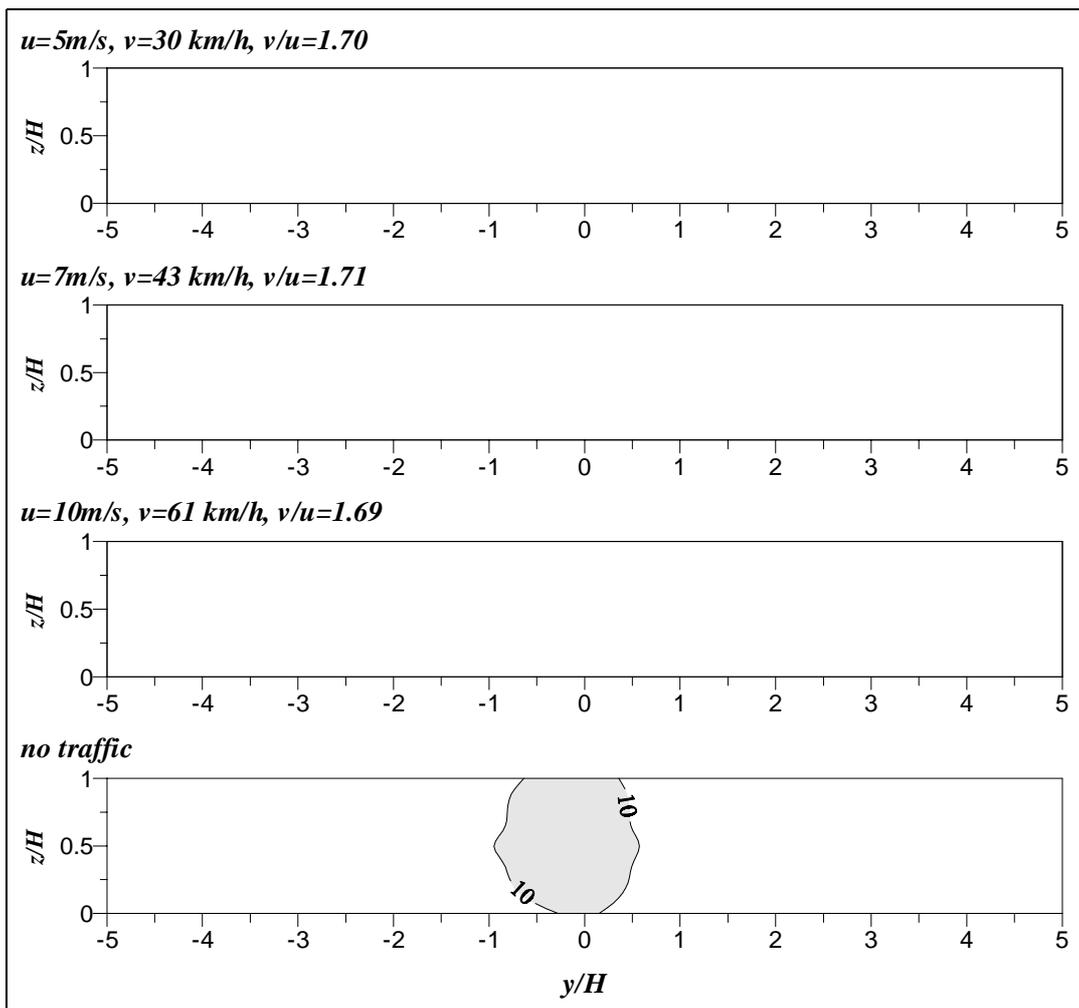
**Abb. 4.20:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen (Geb. II) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Grafik) und Gegenverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 24$  cm ( $H / S = 1/2$ ).



**Abb. 4.21:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Grafik) und Gegenverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 36\text{ cm}$  ( $H/S = 1/3$ ).

An den luvseitigen Schluchtwänden wurde für beide Straßenbreiten kein Anstieg der Konzentrationen wie im Falle der Straße mit  $S = 12\text{ cm}$  ein beobachtet, sondern die Konzentrationen werden deutlich abgeschwächt.

Insgesamt ist festzuhalten, daß bei den Modellversuchen bei Gegenverkehr ein Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Konzentrationsverteilung in senkrecht angeströmten Straßenschluchten auch in breiteren Straßen festgestellt wurde.



**Abb. 4.22:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen (Geb. II) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Grafik) und Gegenverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 36\text{ cm}$  ( $H / S = 1/3$ ).

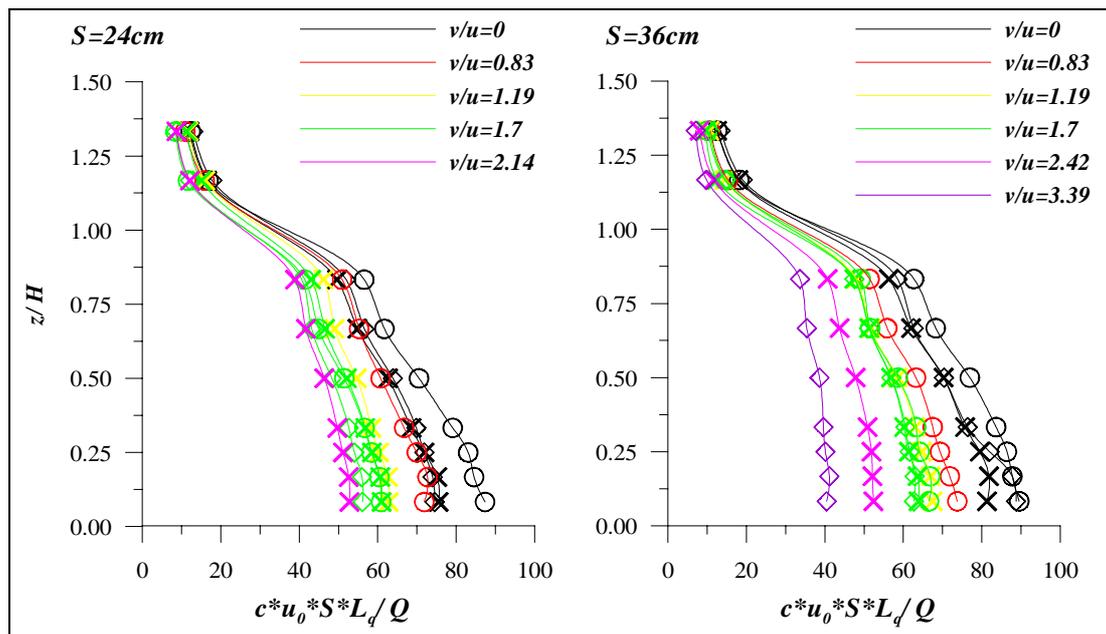


Abb. 4.23: Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit für die Straßenbreiten  $S = 24\text{ cm}$  und  $S = 36\text{ cm}$ .

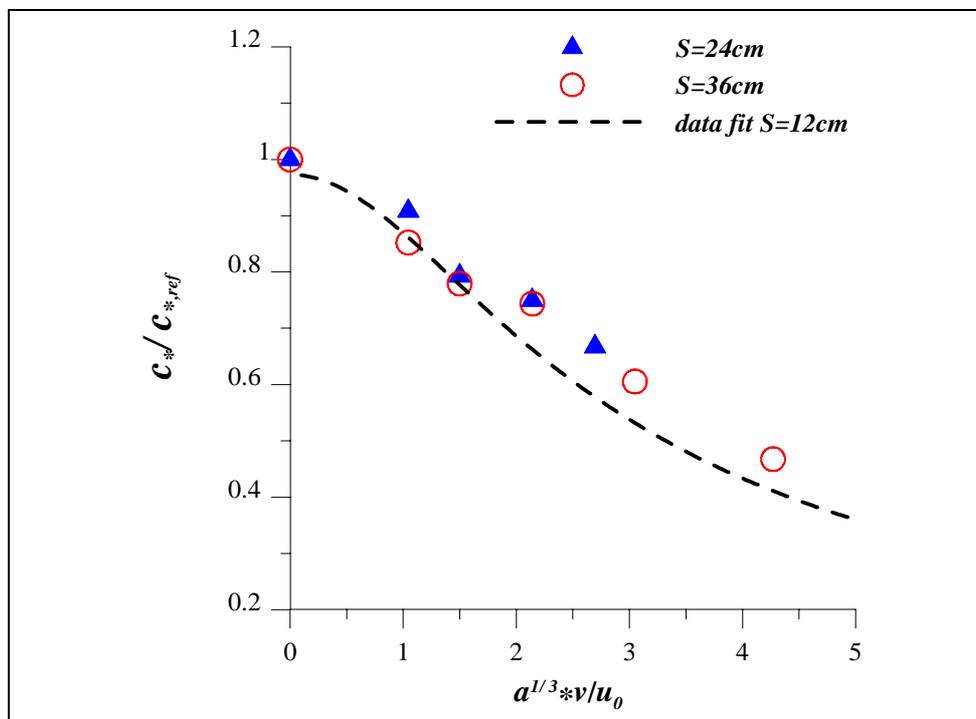
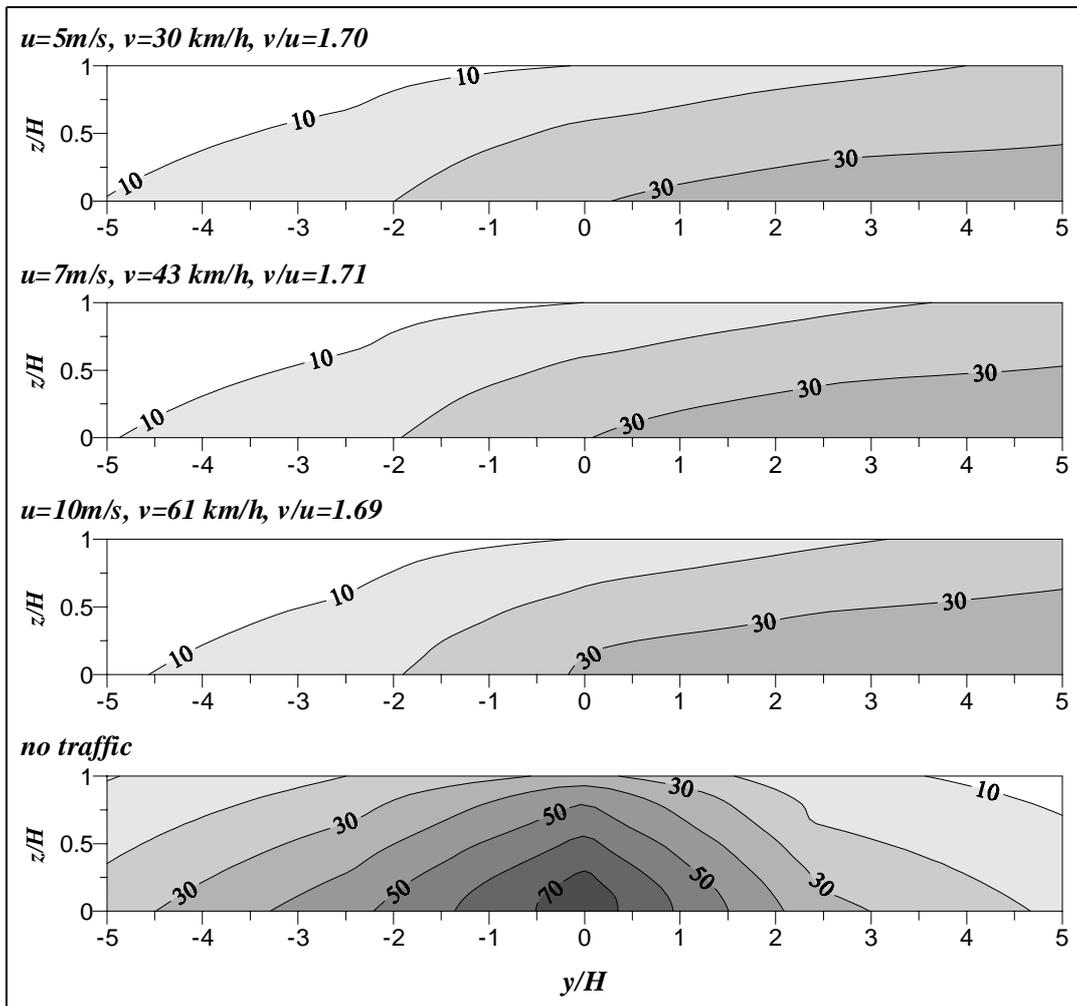


Abb. 4.24: Abhängigkeit des Konzentrationsmaximums an der leeseitigen Schluchtwand bei senkrechter Anströmung und bei Gegenverkehr vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit für  $H/S = 1/2$  und  $H/S = 1/3$  im Vergleich zu den Ergebnissen für  $H/S = 1$ .

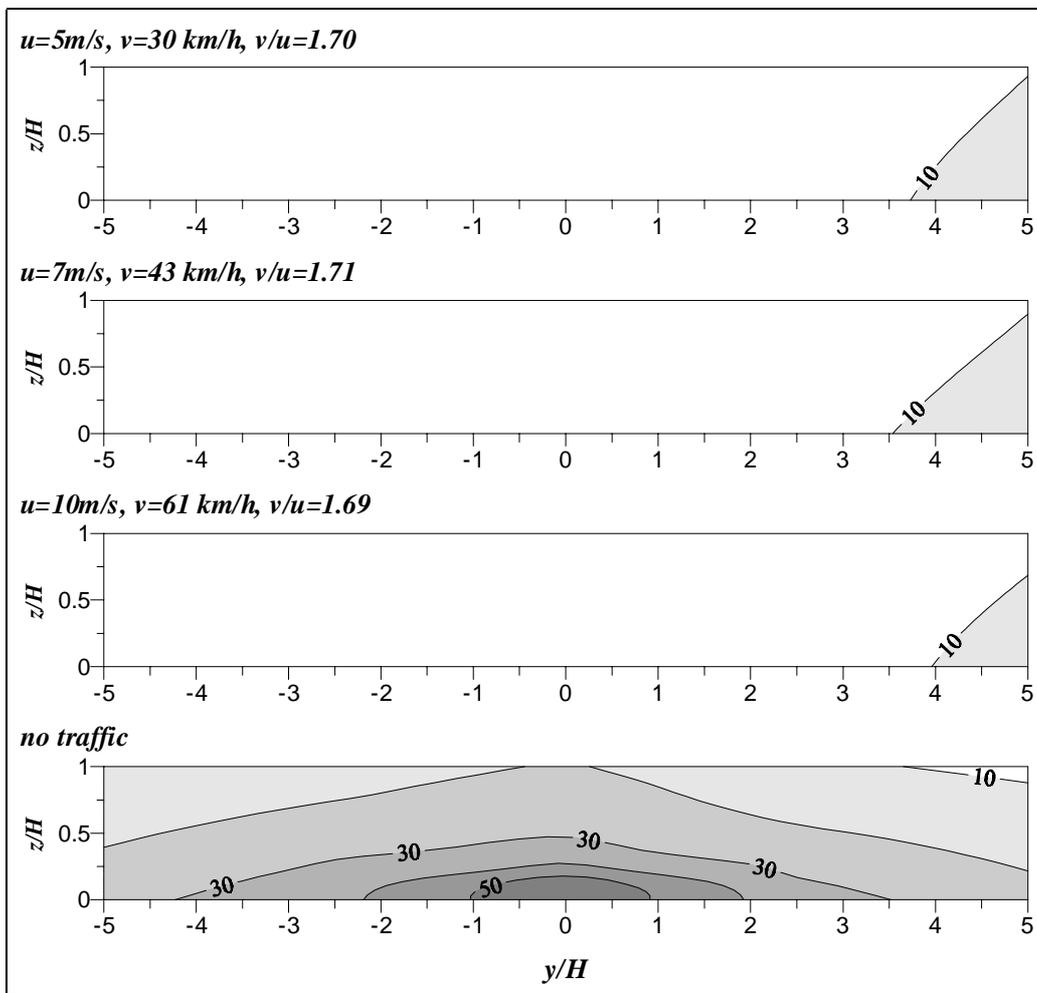


**Abb. 4.25:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Abb.) und Richtungsverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 24\text{ cm}$  ( $H/S = 1/2$ ).

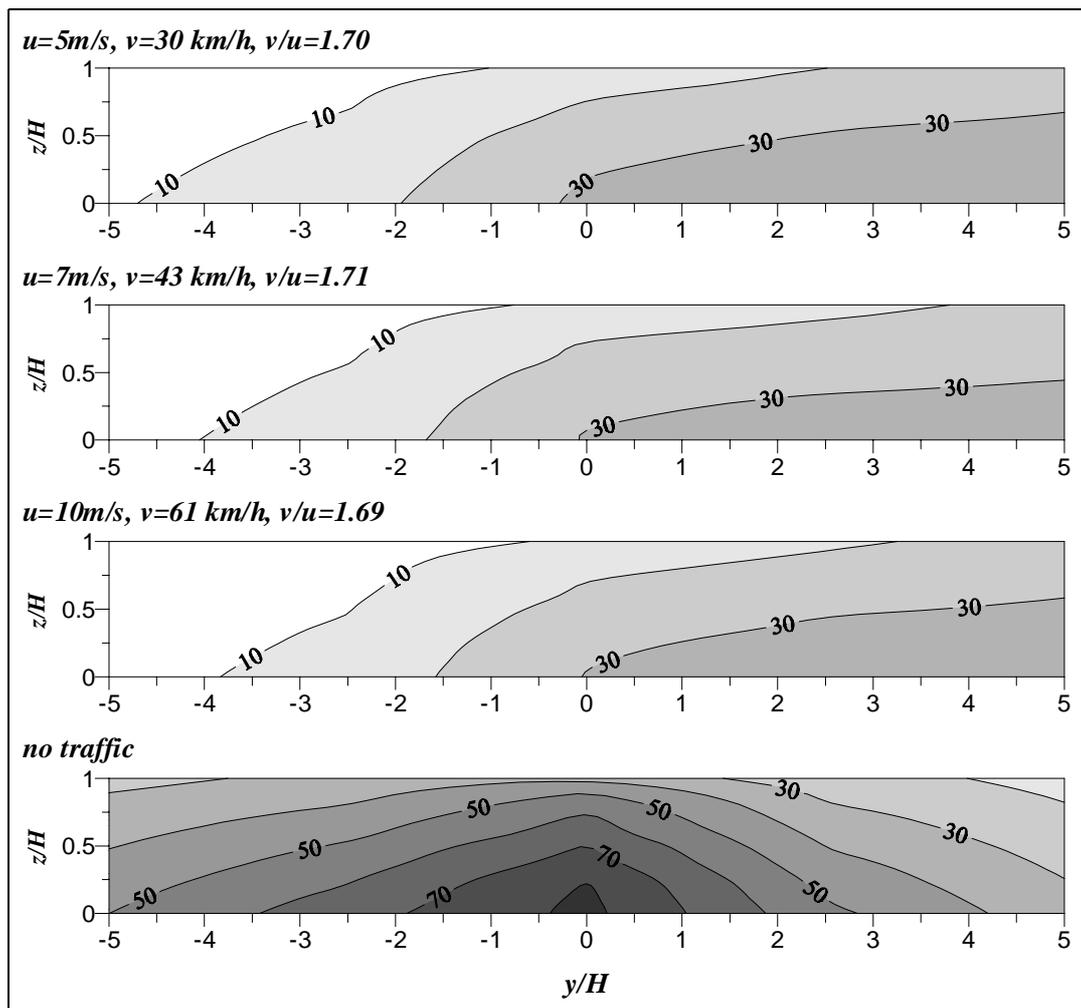
Die in den Abb. 4.25-4.27 dargestellten Konzentrationsverteilungen aus Versuchen mit Richtungsverkehr verdeutlichen, daß dieser Verkehrszustand auch im Falle der breiteren Straßen zu einer signifikanten Veränderung der mittleren Strömungsverhältnisse führt. Es wird eindeutig eine Strömung entlang der Straße durch die Bewegung der Metallplättchen erzeugt.

Es sollte im Rahmen von weiteren Studien geklärt werden, inwiefern diese Ergebnisse auf die Natur zu übertragen sind. Notwendig sind Vergleichsdaten aus Naturmessungen oder Simulationen mit numerischen Modellen, in welchen eine Berücksichtigung des Impulseffektes der

Fahrzeuge möglich ist. Im Rahmen des durchgeführten Projektes standen weder Naturdaten noch ein numerisches Modell, welche Informationen über die Verhältnisse bei Richtungsverkehr liefern könnten, zur Verfügung.



**Abb. 4.26:** Konzentrationsverteilung an der luvseitigen (Geb. II) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Abb.) und Richtungsverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 24\text{ cm}$  ( $H / S = 1/2$ ).



**Abb. 4.27:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen (Geb. I) Wand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (unterste Abb.) und Richtungsverkehr mit einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$  für die Straßenbreite  $S = 36\text{ cm}$  ( $H/S = 1/3$ ).

#### 4.5 Einfluß auf die Konzentrationsverteilung in einer Straßenschlucht mit $H/S = 1$ bei paralleler Anströmung

Nachdem für eine senkrecht angeströmte Straßenschlucht bei Situationen mit Gegenverkehr die Gültigkeit des Modellgesetzes von Plate (1982) nachgewiesen werden konnte, sollte überprüft werden, welchen Einfluß die Fahrzeugbewegung auf die Konzentrationsverteilung in Straßenschluchten bei paralleler Anströmung hat. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4.28 skizziert. Die Geometrie der Gebäude und die Breite der Straße blieb wiederum unverändert. Der Abstand zwischen den Metallplättchen betrug 5 cm ( $a = 2$ ) und ihre Dicke entsprach  $d = 3$  mm.

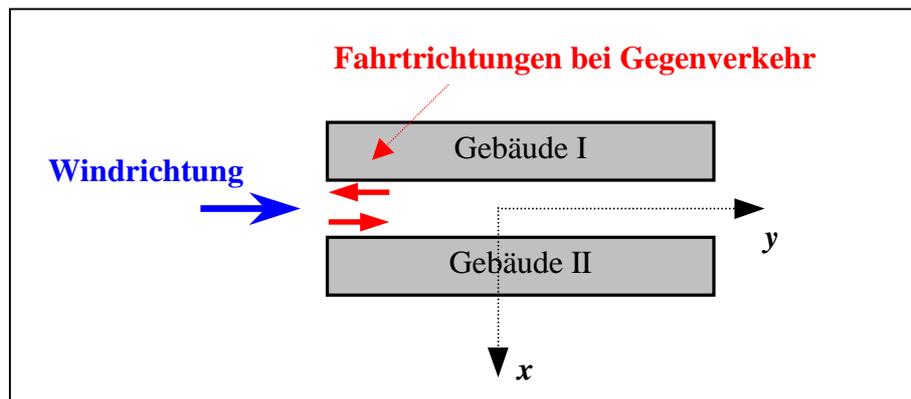


Abb. 4.28: Versuchsaufbau bei den Experimenten mit paralleler Anströmung

Die Konzentrationsverteilungen an den beiden Schluchtwänden für den Referenzfall, d.h. stehender Verkehr, sind in den Abb. 4.29 und 4.30 dargestellt. Zu sehen sind jeweils die Ergebnisse für drei verschiedene Windgeschwindigkeiten und der Mittelwert aus diesen drei Ergebnissen. Es ist zu erkennen, daß die Variation der Windgeschwindigkeit keinen signifikanten Einfluß auf die Verteilung der normierten Konzentrationen hat. Dies bedeutet, daß die Ergebnisse unabhängig von der Reynoldszahl sind. Die Konzentrationen an der rechten Schluchtwand (Geb. II) sind jedoch geringer als an der linken Schluchtwand. Auch bei dieser Windrichtung konnte aufgrund der hohen Sensitivität der Strömungsverhältnisse gegenüber kleinsten Abweichungen der Windrichtung keine Verbesserung der Ergebnisse erreicht werden.

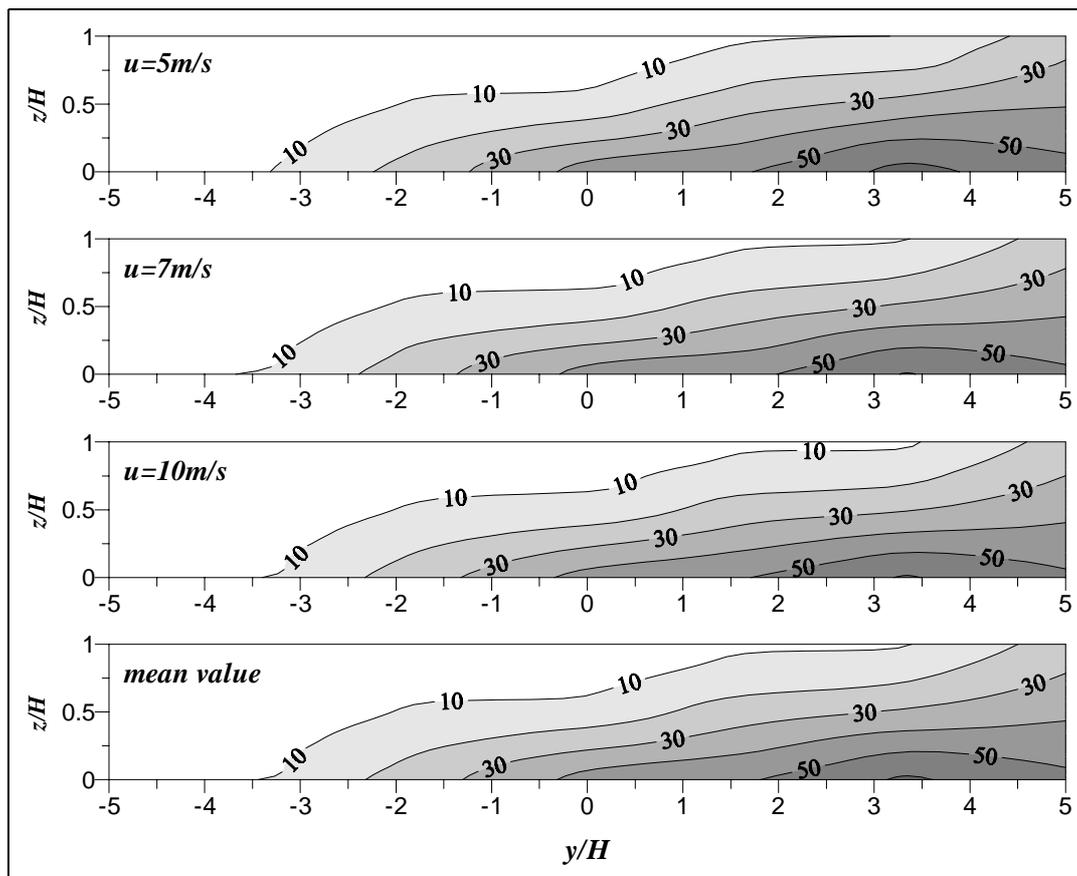
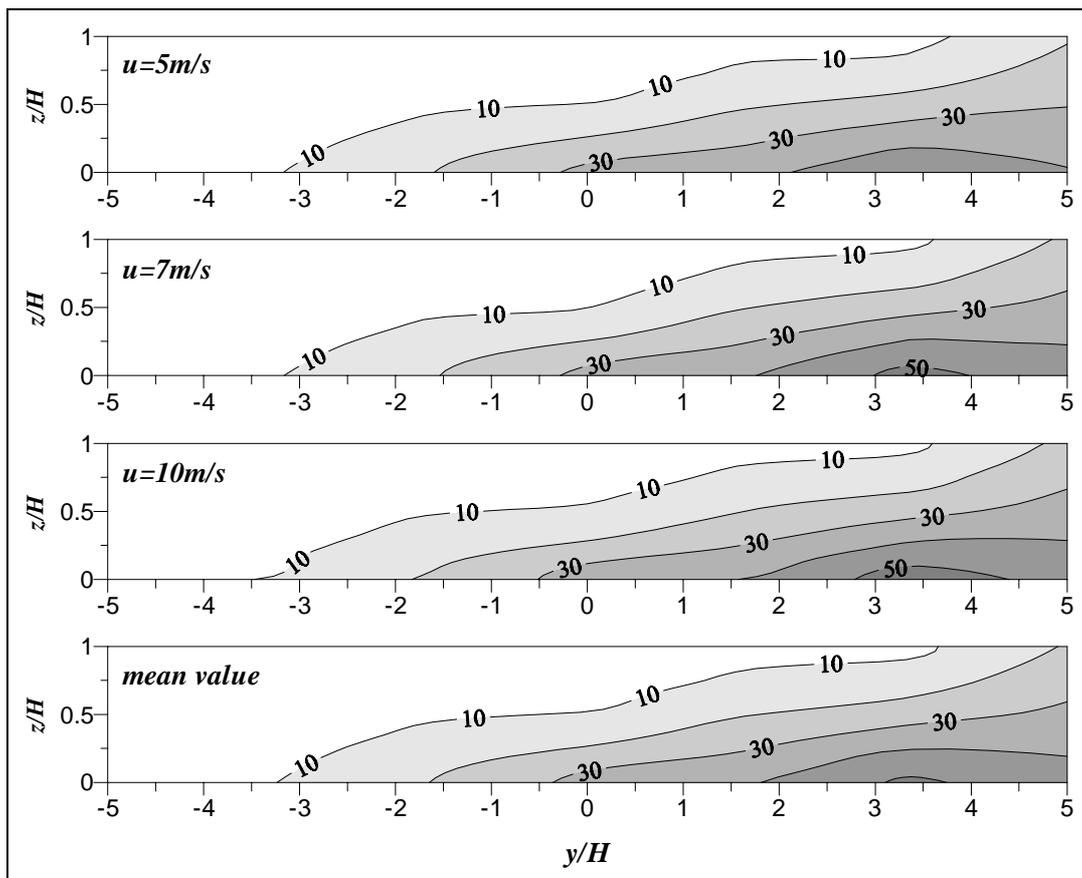


Abb. 4.29: Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. I) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr und variabler Windgeschwindigkeit.

Die Konzentrationsverteilungen für Situationen mit Gegenverkehr sind in den Abb. 4.31 und 4.32 dargestellt. Variiert wurde die Windgeschwindigkeit und die Fahrzeuggeschwindigkeit, wobei jedoch das Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit bei allen drei Messungen  $v/u_0 = 1.7$  betrug. An beiden Schluchtwänden stimmen die Konzentrationsverteilungen aus den drei Versuchen im Rahmen der Meßgenauigkeit überein. Im Vergleich zum Referenzfall mit stehendem Verkehr wird bei der Situation mit Gegenverkehr die relativ geringe Vermischung der Schadstoffe quer zur Straße verstärkt, welche die strahlartige Strömung kennzeichnet, die bei paralleler Anströmung und stehendem Verkehr in der Straßenschlucht entsteht. Dies verdeutlichen beispielsweise die höheren Konzentrationenwerte am Anfang der Straße bei den Situationen mit Gegenverkehr. Im Falle des stehenden Verkehrs liegen die Tracergaskonzentrationen an den Wänden erst nach einer Strecke von ungefähr zweimal der Gebäudehöhe im meßbaren Bereich.



**Abb. 4.30:** Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr und variabler Windgeschwindigkeit.

Insgesamt betrachtet bewirkt die Modellierung der Fahrzeugbewegung aber eher eine schlechtere Belüftung der Straße. Insbesondere am Gebäude I, welches an die Fahrspur mit Fahrtrichtung entgegen gesetzt zur Windrichtung angrenzt, wird durch die Fahrzeugbewegung der Abtransport der Schadstoffe mit der Windströmung abgeschwächt. Die in Abb. 4.33 dargestellten Ergebnisse der Konzentrationsverteilung an dieser Schluchtwand in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit verdeutlichen, daß sich bei geringen Fahrzeuggeschwindigkeiten zunächst die Lage des Konzentrationsmaximums vom Schluchtende bis in etwa zur Gebäudemitte verschiebt. Beim Verhältnis  $v/u_0 \approx 1.2$  werden sehr hohe bodennahe Konzentrationswerte beobachtet. Bei weiterhin zunehmendem Geschwindigkeitsverhältnis wird die Konzentrationsverteilung immer gleichmäßiger und die Werte nehmen ab. Es ist zu vermuten, daß die Bewegung der Fahrzeuge entgegengesetzt zur Windströmung die Strömungsgeschwindigkeit in der Straße zunächst abschwächen, bevor die durch die Fahrzeuge induzierten Strömungsvorgänge die Ausbreitungsver-

hältnisse dominieren und eine Erhöhung der Fahrzeuggeschwindigkeit folglich eine Konzentrationsabnahme bewirkt. Der Einfluß auf die Konzentrationsverteilung an der rechten Schluchtwand, welche neben der Fahrspur mit Fahrtrichtung in Windrichtung liegt, ist wie die Diagramme in Abb. 4.34 aufzeigen deutlich geringer. Tendenziell wird aber auch an dieser Schluchtwand mit steigendem Geschwindigkeitsverhältnis die belastete Fläche zunächst vergrößert und erst für relativ hohe Fahrzeuggeschwindigkeiten tritt eine signifikante Verbesserung der Konzentrationsbelastung auf.

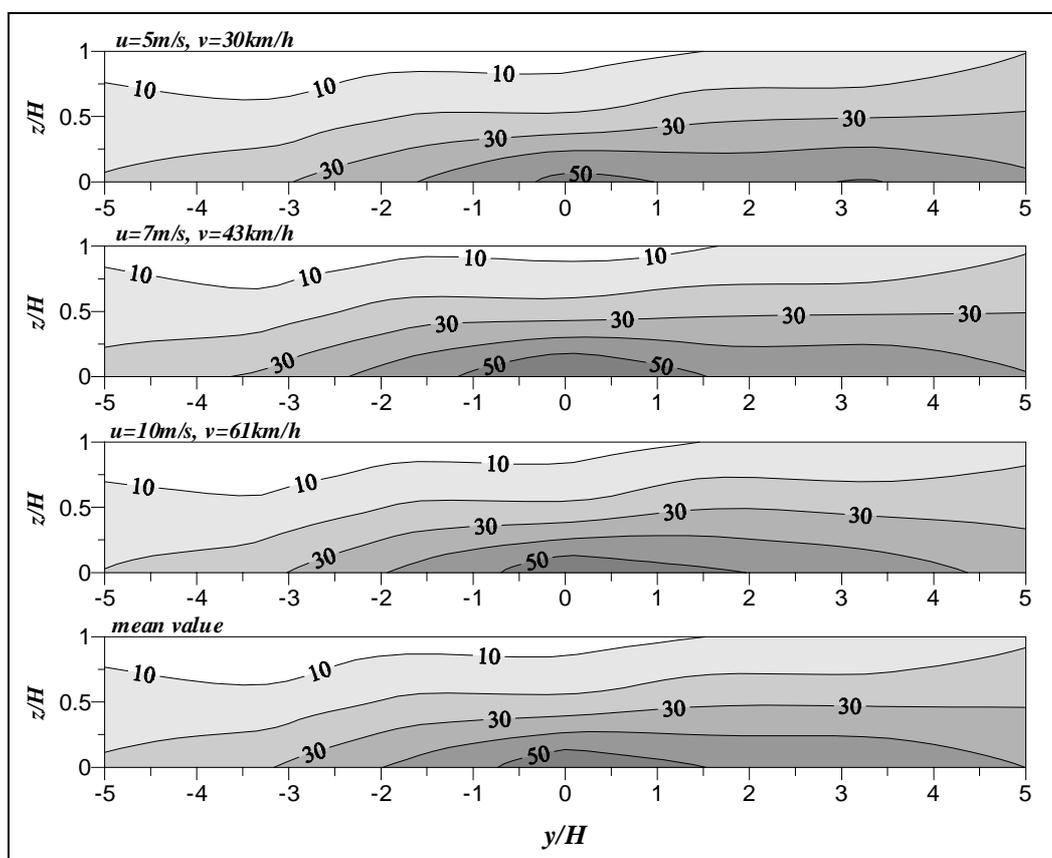
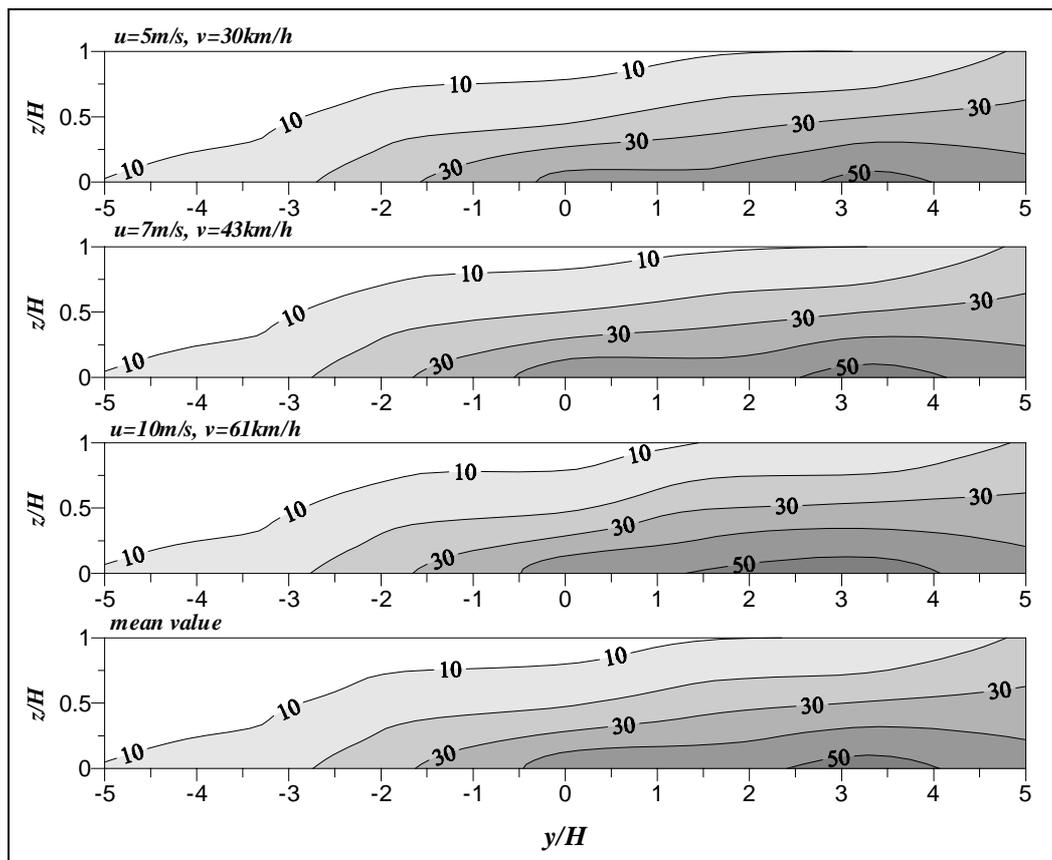


Abb. 4.31: Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. I) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr und einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$ .



**Abb. 4.32:** Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr und einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$ .

Insgesamt ist aus den Ergebnissen zu schließen, daß die Fahrzeugbewegung im Falle einer parallel angeströmten Straßenschlucht auch bei Gegenverkehr einen Einfluß auf das mittlere Strömungsfeld hat. Die resultierenden Strömungsverhältnisse sind äußerst komplex und die Symmetrie wird durch die zwei Fahrspuren mit unterschiedlicher Fahrtrichtung aufgehoben. Die Konzentrationsverteilungen an den Wänden ändern sich signifikant. Die Angabe von einfachen Formeln, die beispielsweise die Änderung der Maximalkonzentration durch Fahrzeugbewegung beschreiben, ist nicht möglich. Für konstante Verhältnisse von Windgeschwindigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit wurden im Rahmen der Meßgenauigkeit übereinstimmende Ergebnisse erzielt. Die Fahrzeugdichte wurde nicht variiert, so daß keine Aussagen möglich sind, inwiefern ein aus Geschwindigkeitsverhältnis und Fahrzeugdichte kombiniertes Ähnlichkeitskriterium bei dieser Windrichtung gültig ist.

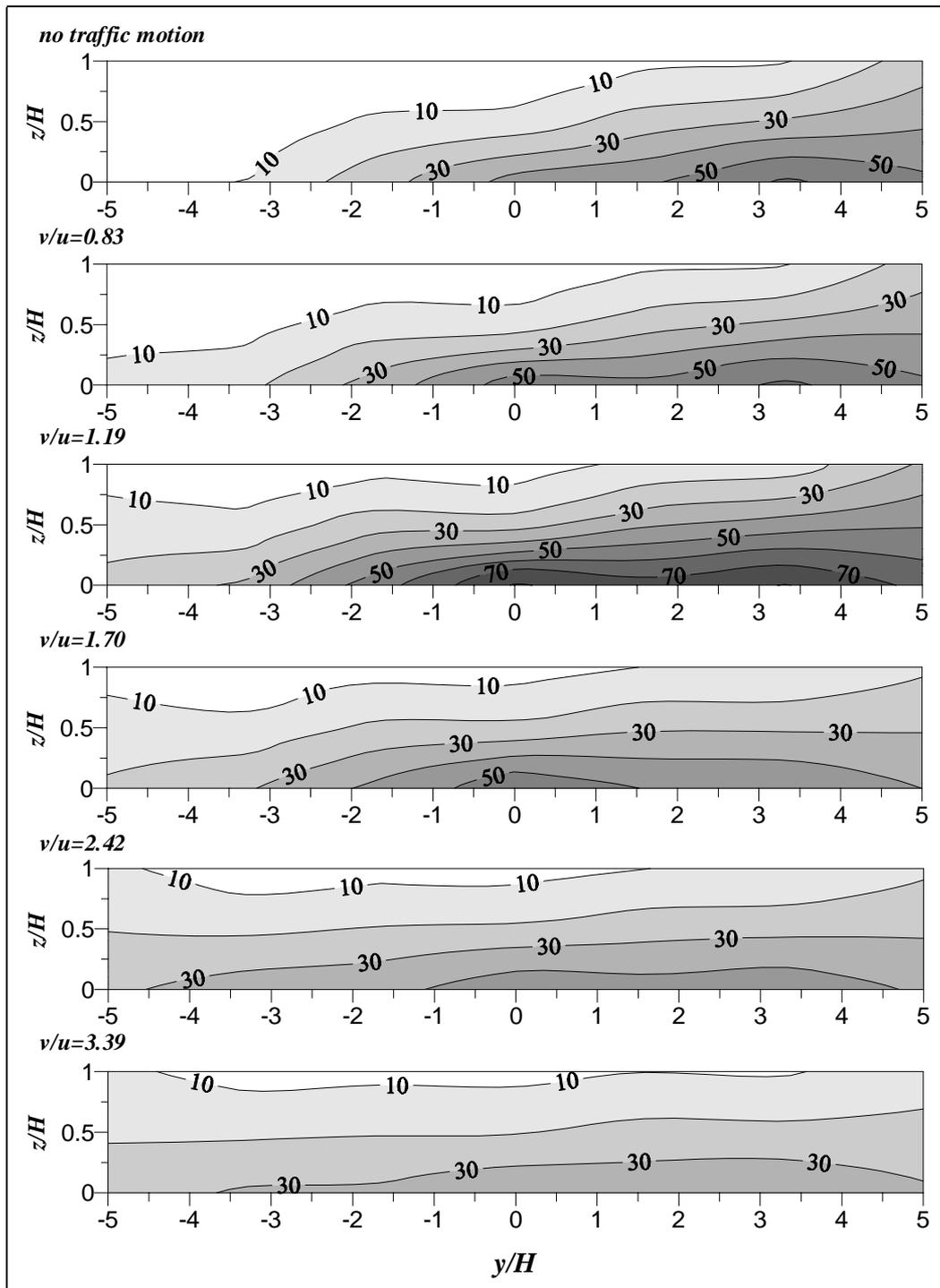


Abb. 4.33: Konzentrationsverteilung an der linken Wand (Geb. I) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit.

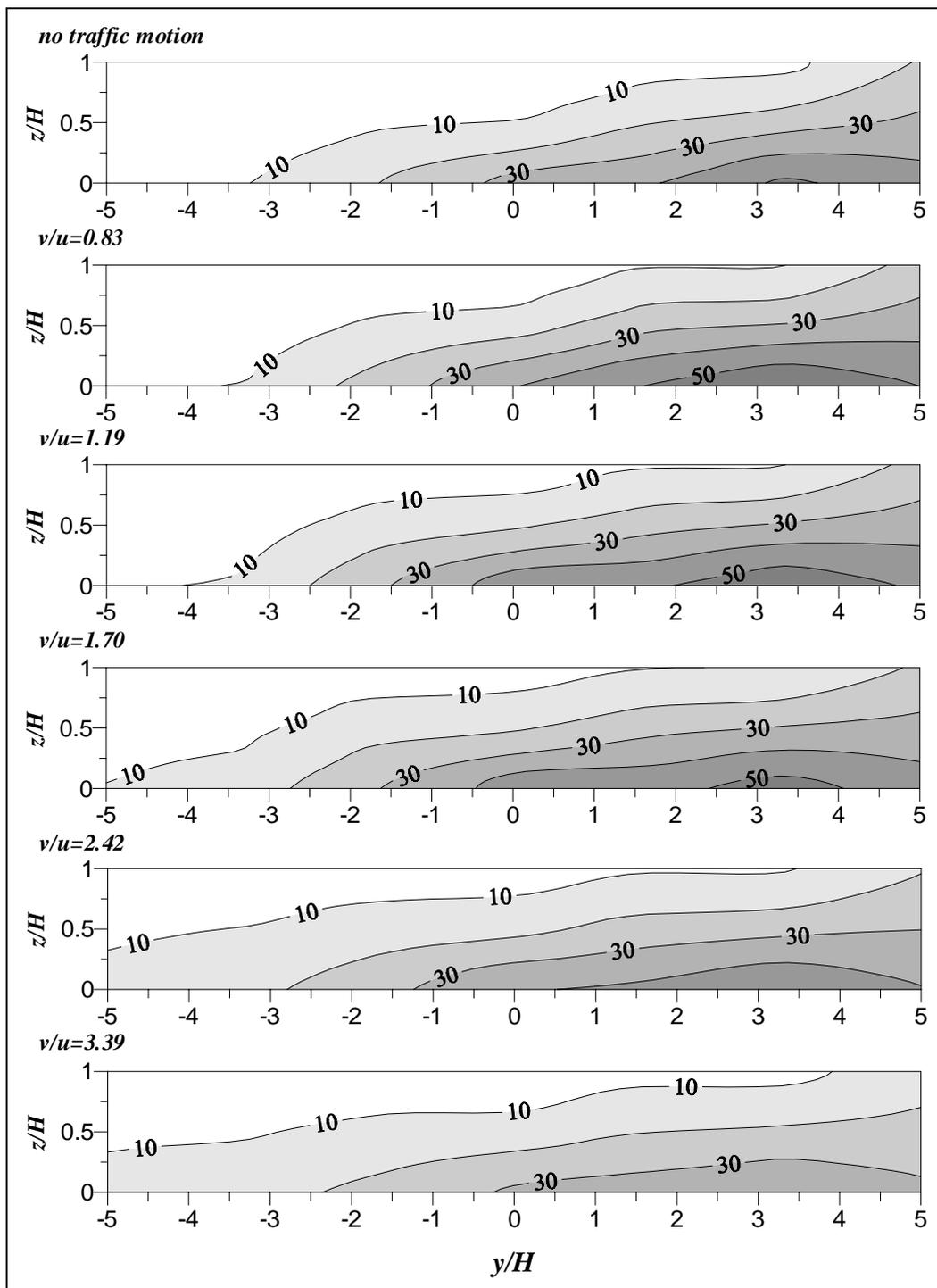
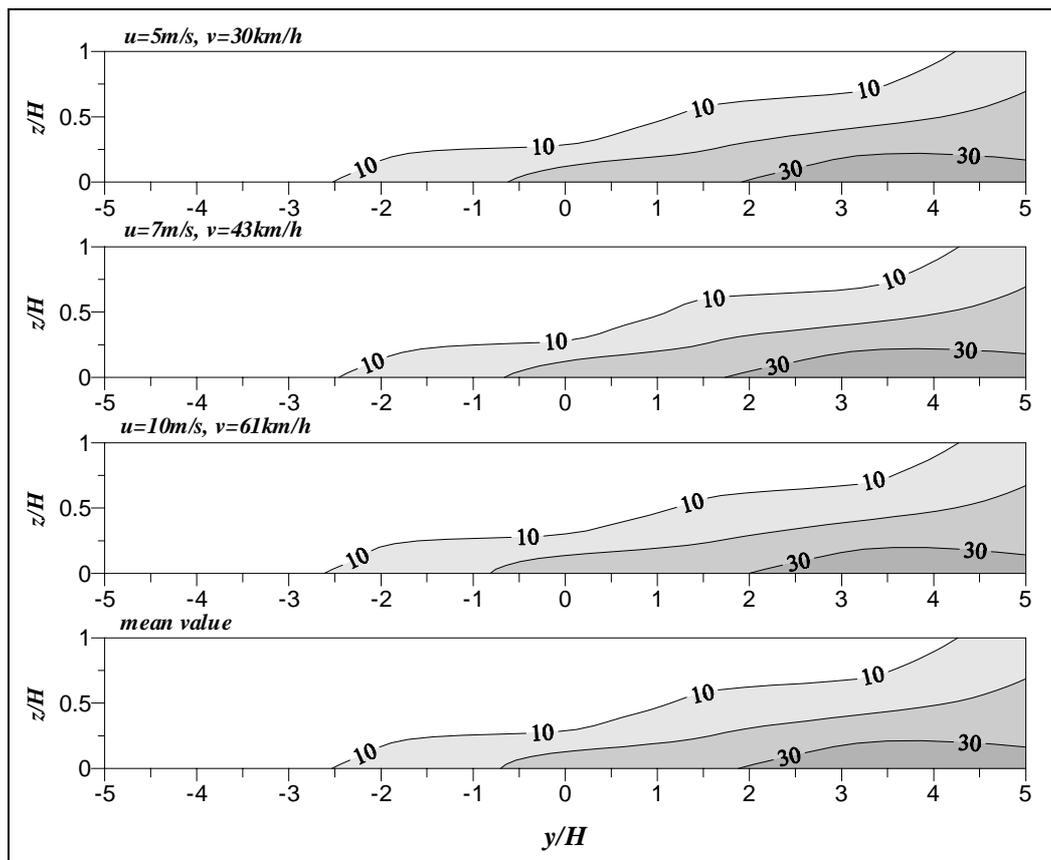
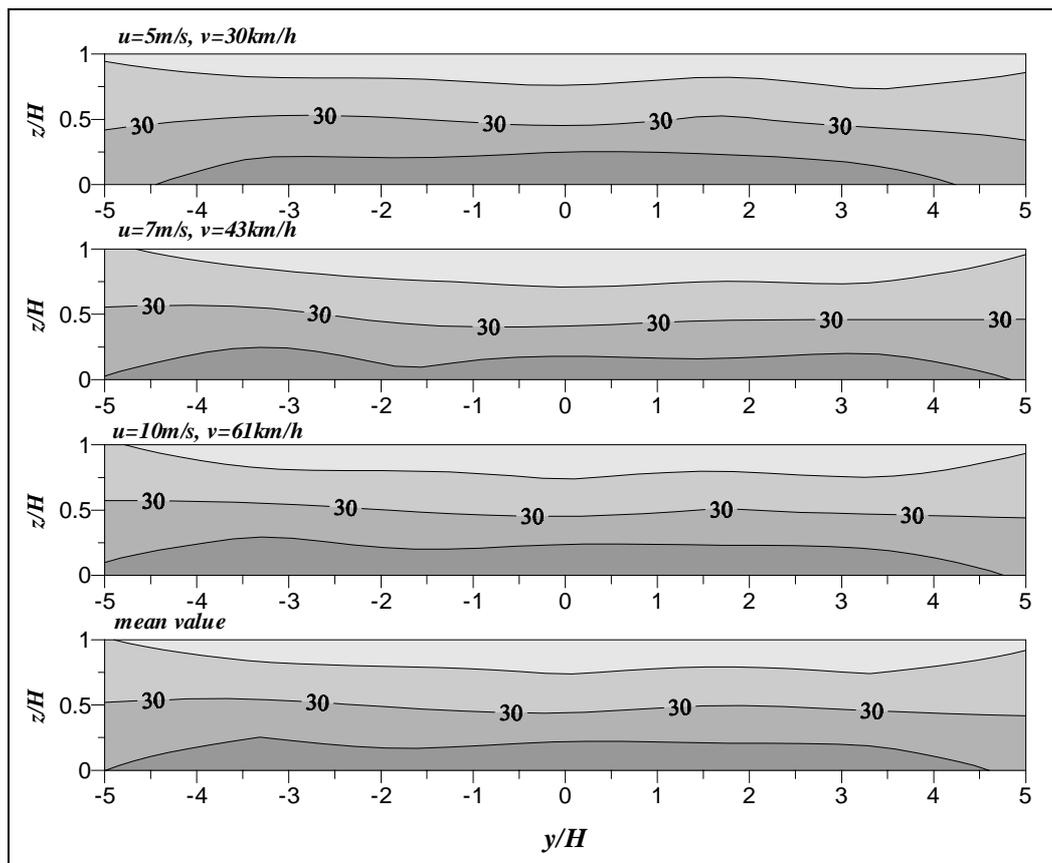


Abb. 4.34: Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit.



**Abb. 4.35:** Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr in Windrichtung und einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$ .

Bei Richtungsverkehr ist zwischen den Fällen Fahrtrichtung in Windrichtung und entgegengesetzt zur Windrichtung zu unterscheiden. Ergebnisse für den ersten Fall sind in der Abb. 4.35 zu sehen, für den letzteren in Abb. 4.36. Dargestellt sind wiederum Konzentrationsverteilungen an der rechten Schluchtwand für drei Situationen mit konstantem Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit. Für beide Situationen stimmen die Ergebnisse im Rahmen der Meßgenauigkeit aus den jeweils drei Messungen überein. Eine separate Betrachtung der zweiten Schluchtwand ist im Falle von Richtungsverkehr nicht notwendig, da die Symmetrie in der Straßenschlucht durch die Fahrzeugbewegung nicht verändert wird. Bei Situationen mit Fahrtrichtung in Windrichtung verstärkt die Fahrzeugbewegung die Strömung entlang der Straße und den Transport der Schadstoffe am Ende der Straßenschlucht. Die Konzentrationen an der Gebäudewand sind geringer als im Referenzfall mit stehendem Verkehr.



**Abb. 4.36:** Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr entgegen der Windrichtung und einem konstanten Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0 = 1.7$ .

Eine signifikante Abschwächung der Strömung entlang der Straße wird bei den Situationen mit Fahrtrichtung entgegengesetzt zur Windrichtung beobachtet. Die Konzentrationsverteilungen in Abb. 4.37 für drei verschiedene Geschwindigkeitsverhältnisse zeigen auf, daß bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit die in etwa 1.5 mal dem Wert der Windgeschwindigkeit in der Anströmung entspricht, ein Konzentrationsgradient entlang der Straße nicht mehr vorhanden ist. Die durch die Fahrzeuge induzierte Strömung kompensiert die Windströmung, ein signifikanter Transport von Schadstoffen zum Schluchtende ist nicht mehr vorhanden. Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt aufgeführt wurde, muß diese relativ starke Wirkung der Fahrzeugbewegung auf die mittleren Strömungsverhältnisse im Rahmen von weiteren Versuchen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf die Natur überprüft werden. Erforderlich sind Ergebnisse aus Naturmessungen in Einbahnstraßen um Informationen zu erhalten, inwiefern die in den Modellversuchen eindeutig beobachtete Kolbenwirkung der Fahrzeuge realistisch ist.

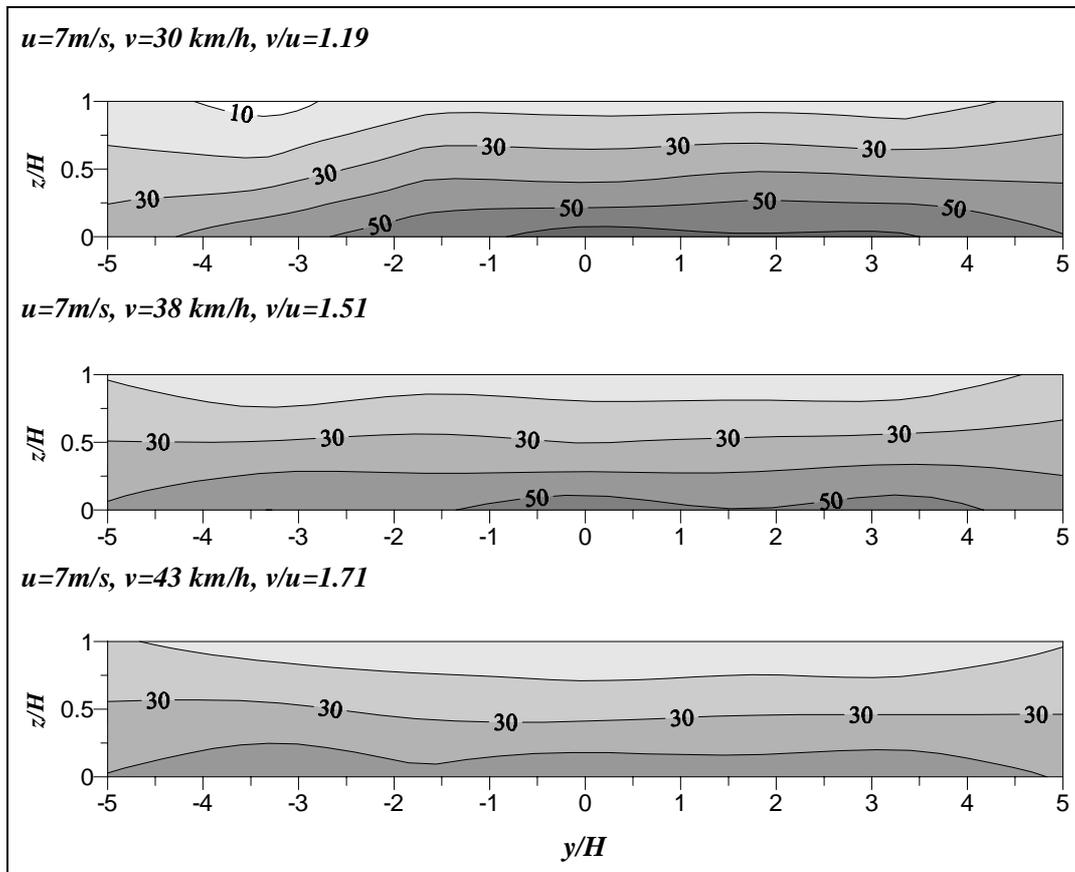
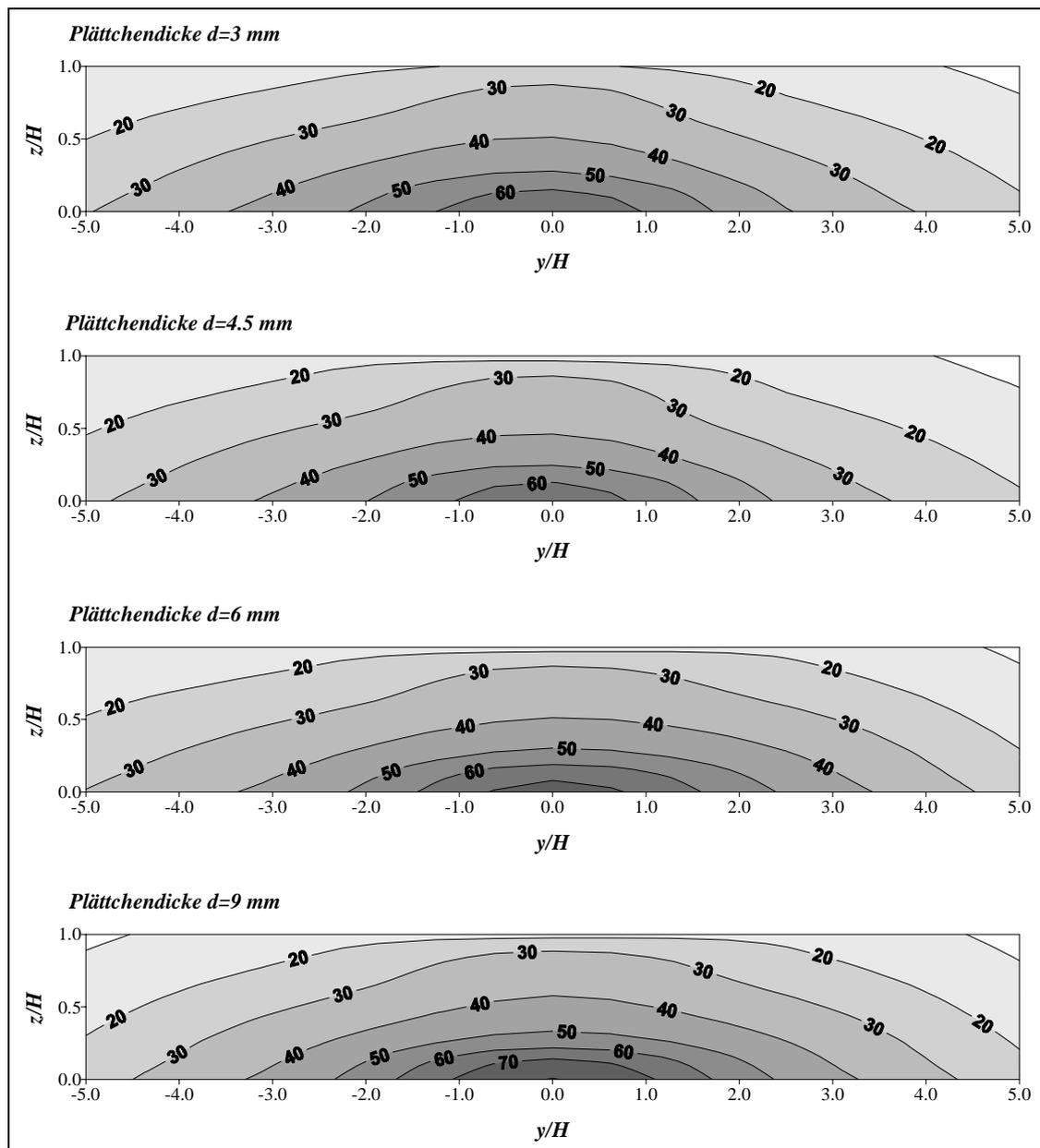


Abb. 4.37: Konzentrationsverteilung an der rechten Wand (Geb. II) einer parallel angeströmten Straßenschlucht bei Richtungsverkehr entgegen der Windrichtung in Abhängigkeit vom Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit.

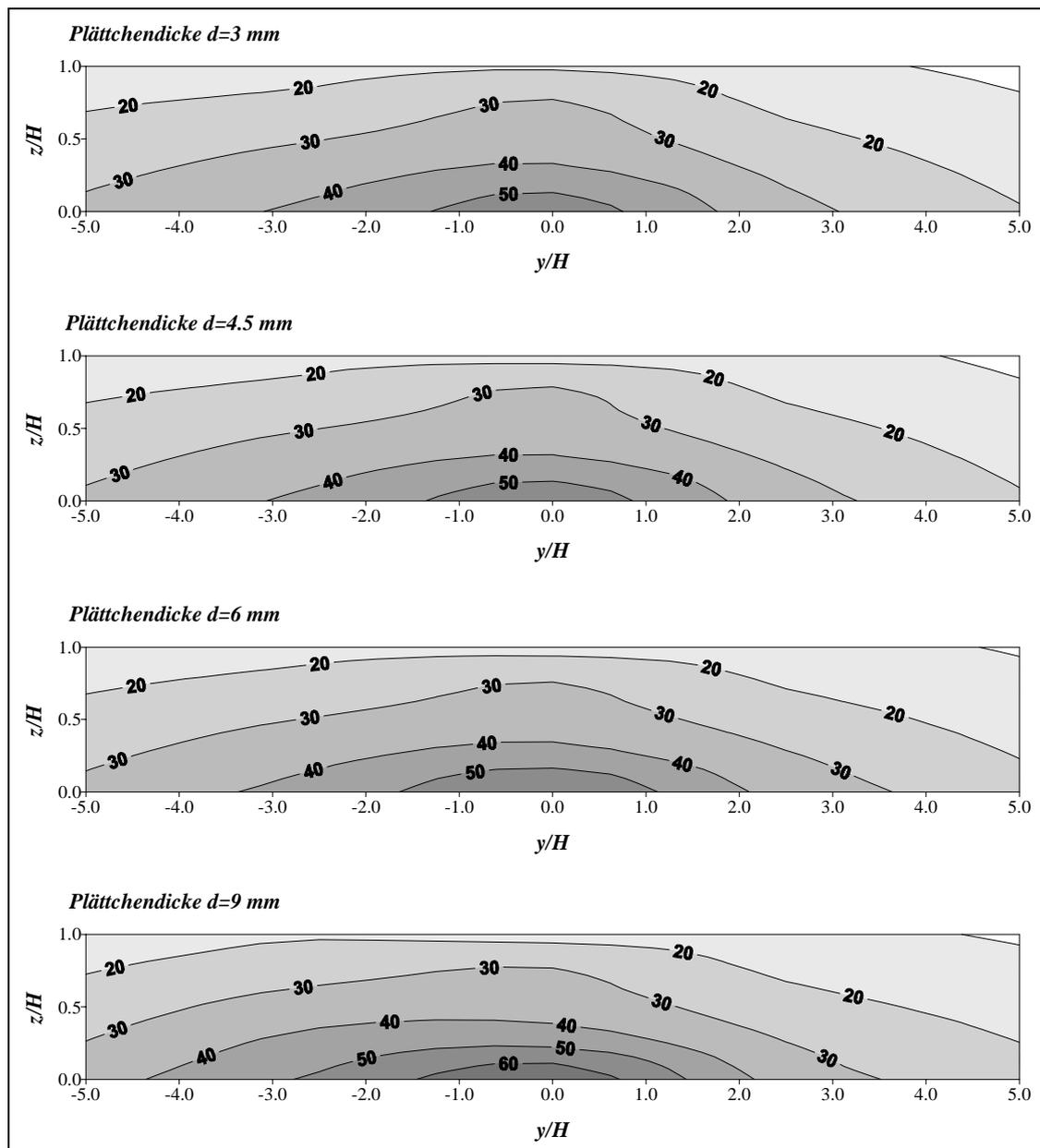
#### 4.6 Einfluß von Variationen der Plättchendicke auf die Konzentrationsverteilung

In einer weiteren Windkanalstudie wurde der Einfluß von Variationen der Plättchendicke  $d$  betrachtet. Untersucht wurde wieder die Situation einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht mit  $H/S = 1$ . Neben den Ergebnissen aus den Versuchen der ersten Studie (siehe Abschnitt 4.3), welche mit einer Plättchendicke von  $d = 3\text{ mm}$  durchgeführt wurden, liegen Ergebnisse aus Versuchen mit einer Plättchendicke von  $d = 4.5\text{ mm}$ ,  $6\text{ mm}$  und  $9\text{ mm}$  vor.



**Abb. 4.38:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Plättchendicke  $d$  (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 30$  km/h, Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7$  m/s, Dichteparameter  $a = 1$ ).

In Abb. 4.38 werden Konzentrationsverteilungen an der leeseitigen Wand für die vier verschiedenen Plättchendicken verglichen. Das Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit  $v/u_0$  betrug bei allen vier Versuchen 1.2 und der Dichteparameter  $a$  entsprach dem Wert eins. Es ist zu erkennen, daß die Konzentrationsabnahme in der Schluchtmitte mit zunehmender Plättchendicke abgeschwächt wird. Die verkehrsinduzierte Turbulenz, welche die bessere Vermischung der Schadstoffe bewirkt, ist geringer bei den Si-



**Abb. 4.39:** Konzentrationsverteilung an der leeseitigen Wand (Geb. I) einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei Gegenverkehr in Abhängigkeit von der Plättchendicke  $d$  (Fahrzeuggeschwindigkeit  $v = 49$  km/h, Windgeschwindigkeit  $u_0 = 7$  m/s, Dichteparameter  $a = 1$ ).

situationen mit dickeren Plättchen. Das gleiche Verhalten wurde, wie die Abb. 4.39 veranschaulicht, auch für das Geschwindigkeitsverhältnis  $v / u_0 = 1.9$  beobachtet.

In der Abb. 4.40 sind die Ergebnisse aus der Versuchsreihe mit 6 mm dicken Metallplättchen in Analogie zur Abb. 4.15 dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die grundsätzlichen Zusammenhänge bei zunehmender Plättchendicke unverändert bleiben. Auch bei einer Plättchendicke

von  $d = 6$  mm kann in der Gebäudemitte der leeseitigen Schluchtwand eine Konzentrationsabnahme beobachtet werden, die als Funktion  $c^* / c_0^* = f\left(\sqrt[3]{a} \cdot v/u\right)$  beschrieben werden kann. Der Vergleich einer an die Werte für  $d = 6$  mm angepaßten Kurve mit der Anpassung aus Abb. 4.15 an die Ergebnisse aus den Versuchen mit  $d = 3$  mm verdeutlicht jedoch erneut, daß die reduzierende Wirkung der verkehrsinduzierten Turbulenz im Falle der dickeren Plättchen geringer ist.

Es stellt sich nun die Frage, inwiefern dieses Ergebnis durch das Ähnlichkeitskriterium von Plate (1982) erfaßt wird. Betrachtet man als Ausgangspunkt wieder die sogenannte Turbulenzproduktionszahl nach Gl. (4.4), dann müssen für zwei Situationen, gekennzeichnet durch die Indizes 1 und 2, ähnliche Ergebnisse erzielt werden, wenn die Forderung

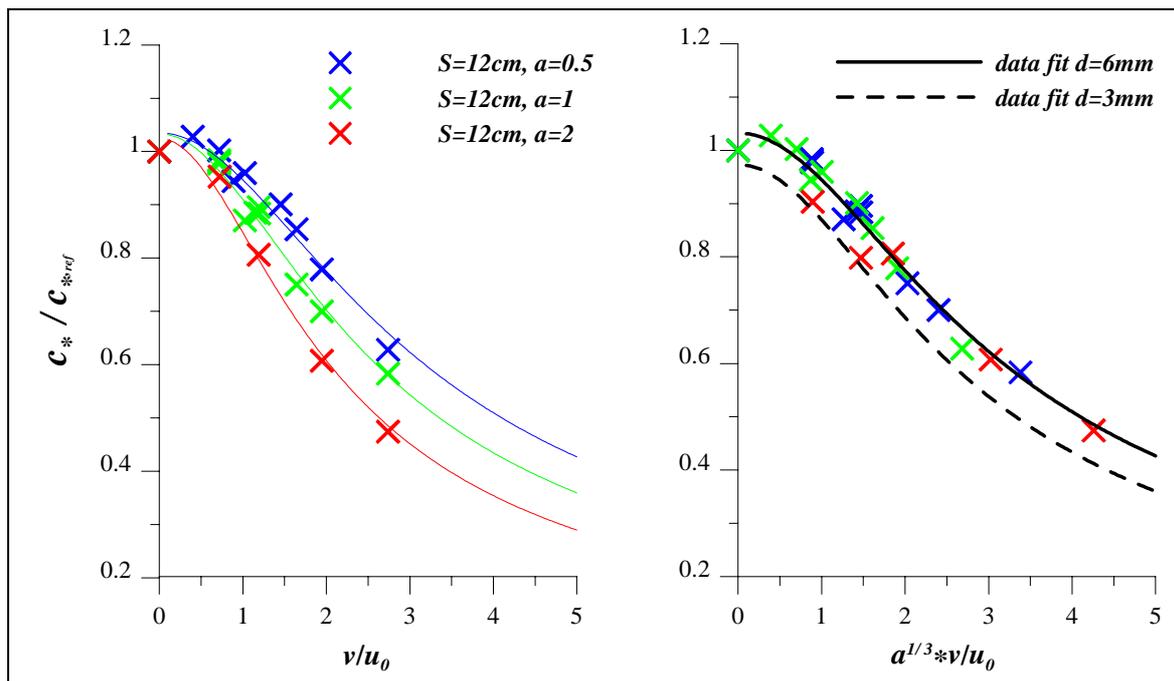
$$T_{T1} = T_{T2} \quad \Leftrightarrow \quad (4.9)$$

$$\underbrace{\left(\frac{C_{DT1} \cdot A_{T1} \cdot n_{T1}}{c_{f1} \cdot S_1}\right)}_{a_1} \cdot \left(\frac{v_1^3}{u_1^3}\right) = \underbrace{\left(\frac{C_{DT2} \cdot A_{T2} \cdot n_{T2}}{c_{f2} \cdot S_2}\right)}_{a_2} \cdot \left(\frac{v_2^3}{u_2^3}\right)$$

erfüllt ist. Der einzige Parameter in Gl. (4.9), welcher sich durch eine Zunahme der Plättchendicke möglicherweise verändert, ist der Widerstandsbeiwert  $C_{DT}$  der Metallplättchen. Unter der Annahme, daß der Einfluß der Plättchendicke durch einen veränderten Widerstandsbeiwert  $C_{DT}$  der Metallplättchen beschrieben werden kann, lautet das modifizierte Ähnlichkeitskriterium

$$\frac{(v_2 / u_2)^3}{(v_1 / u_1)^3} = \frac{a_1}{a_2} = \frac{C_{DT1}}{\underbrace{C_{DT2}}_b} \cdot \frac{n_{t1}}{\underbrace{n_{t2} \cdot M}_a} \equiv b \cdot a, \quad (4.10)$$

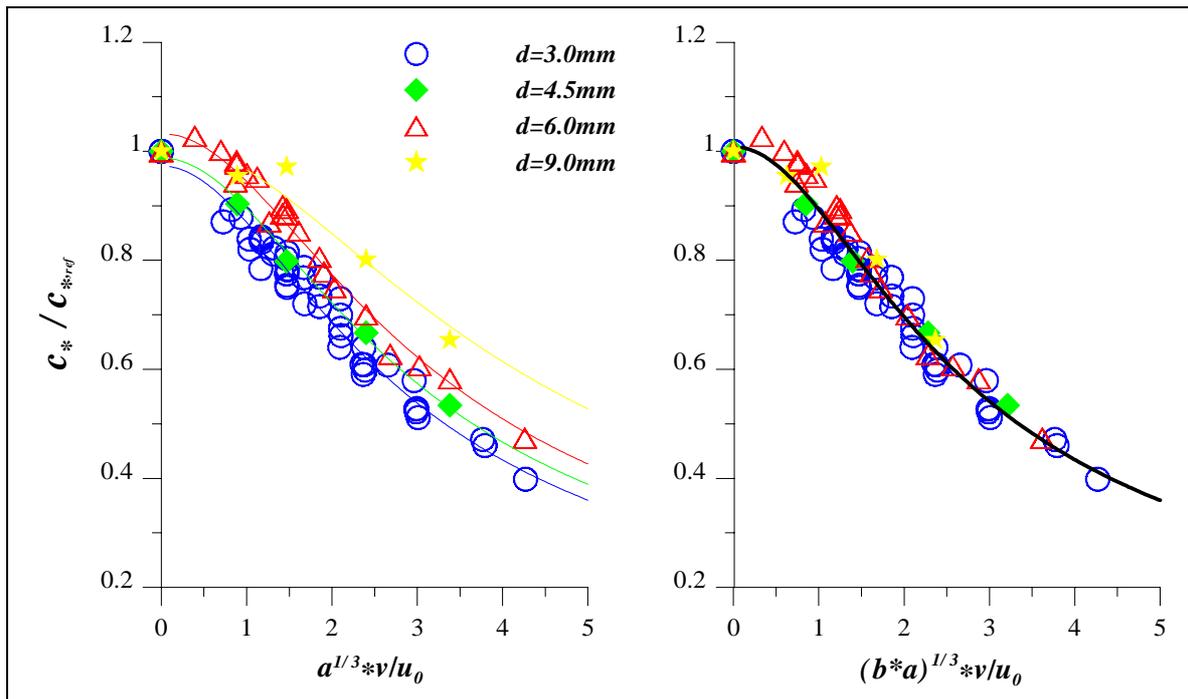
beziehungsweise



**Abb. 4.40:** Konzentrationen in der Schluchtmitte in Bodennähe an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis und der Verkehrsdichte (Plättchendicke  $d = 6\text{ mm}$ ). Dargestellt sind die Konzentrationen bezogen auf das Ergebnis im Referenzfall mit stehendem Verkehr ( $v = 0\text{ km/h}$ ).

$$\left(\frac{v}{u}\right)_2 = b^{1/3} \cdot a^{1/3} \cdot \left(\frac{v}{u}\right)_1 \quad (4.11)$$

Im Gegensatz zum Dichteparameter  $a$  kann der Parameter  $b$  nicht direkt berechnet werden, da die Widerstandsbeiwerte  $C_{DT}$  der Metallplättchen unterschiedlicher Dicke nicht explizit bekannt sind. Aufgrund der speziellen Geometrie der Metallplättchen sind keine Angaben in der Literatur über die Widerstandsbeiwerte  $C_{DT}$  zu finden. Es wurde deshalb versucht den Parameter  $b$  indirekt aus den Konzentrationsmessungen zu ermitteln und dann zu überprüfen ob die gefundenen Ergebnisse in einer physikalisch sinnvollen Größenordnung liegen. Betrachtet man Abb. 4.41 so sind im linken Diagramm die Konzentrationsverhältnisse aus den vier Versuchsreihen mit unterschiedlicher Plättchendicke als Funktion der Skalierungsgröße  $\sqrt[3]{a} \cdot v/u$  aufgetragen. Der Einfluß der Plättchendicke ist deutlich zu erkennen. Die eingezeichneten Kurvenanpassungen an die Versuchsergebnisse sind gut zu unterscheiden. Die Ergebnisse der vier Versuchsreihen fallen nicht zusammen auf eine Kurve. Im rechten Diagramm wurden die Kurven sozusagen durch Verschieben, d.h. durch Einführen des Parameters  $b$  in der Skalie-

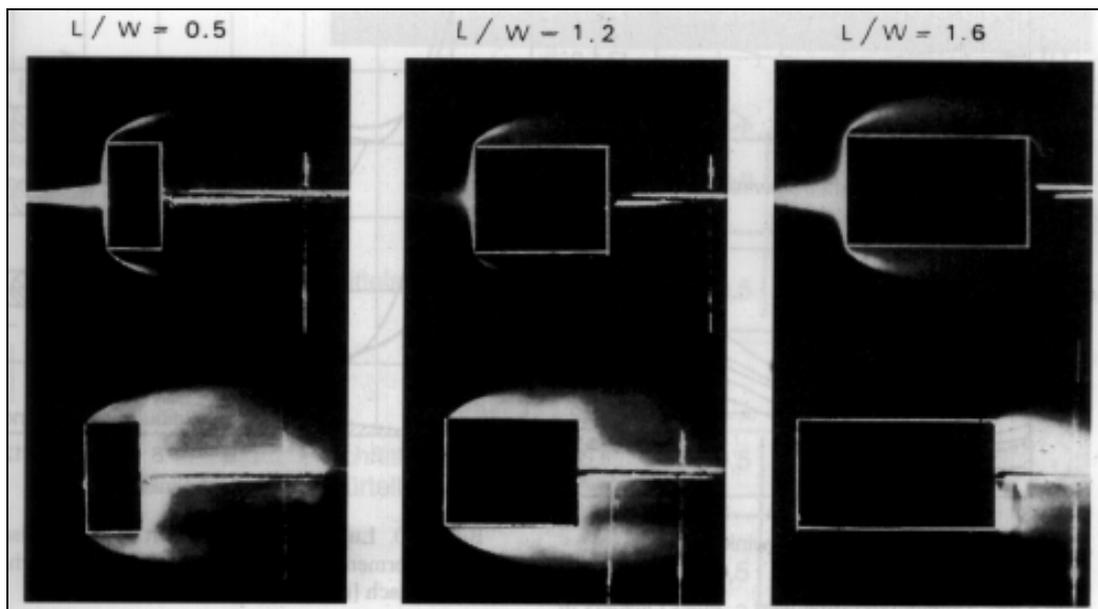


**Abb. 4.41:** Konzentrationen in der Schluchtmittle in Bodennähe an der leeseitigen Wand der Straßenschlucht in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis, der Verkehrsdichte und der Plättchendicke. Dargestellt sind die Konzentrationen bezogen auf das Ergebnis im Referenzfall mit stehendem Verkehr ( $v = 0$  km/h).

rung der  $x$  - Achse, zur Deckung gebracht. Als Referenzwerte wurden die Ergebnisse der Versuchsreihe mit einer Plättchendicke  $d$  von 3 mm definiert. Für die Plättchendicken 4.5 mm, 6 mm und 9 mm wurden die  $\sqrt[3]{a} \cdot v/u$  - Werte mit einem Faktor multipliziert, so daß sie mit der Kurve für  $d = 3$  mm zusammenfallen. Die auf diese Weise ermittelten Parameter  $b$  können wie folgt angegeben werden:

$$\begin{aligned}
 d = 4.5 \text{ mm: } & b^{1/3} = 0.95 \Rightarrow b = 0.86 & \Leftrightarrow C_{DT}(d = 4.5 \text{ mm}) = 0.86 \cdot C_{DT}(d = 3 \text{ mm}) \\
 d = 6 \text{ mm} & b^{1/3} = 0.85 \Rightarrow b = 0.61 & \Leftrightarrow C_{DT}(d = 6 \text{ mm}) = 0.61 \cdot C_{DT}(d = 3 \text{ mm}) \\
 d = 9 \text{ mm} & b^{1/3} = 0.7 \Rightarrow b = 0.34 & \Leftrightarrow C_{DT}(d = 9 \text{ mm}) = 0.34 \cdot C_{DT}(d = 3 \text{ mm})
 \end{aligned}$$

Die Zunahme der Plättchendicke würde entsprechend diesen Ergebnissen in einer Abnahme des Widerstandsbeiwertes  $C_{DT}$  resultieren. Eine Abnahme des Widerstandsbeiwertes  $C_{DT}$  ist sicherlich physikalisch sinnvoll, denn wie die Strömungssichtbarmachungen mit Rauch an



**Abb. 4.42:** Strömungsablösung bei Quadern mit verschiedenen Längen-Breiten-Verhältnissen nach Nakaguchi (1978). Die Zugabe des Rauches erfolgte vor (obere Aufnahmen) bzw. hinter dem Hindernis (untere Aufnahmen).

quaderförmigen Gebäuden in Abb. 4.42 (Nakaguchi, 1978) verdeutlichen, ist zu erwarten, daß die Strömung im Falle der dickeren Metallplättchen wieder am Hindernis anlegt und als Folge der Strömungswiderstand geringer ist als im Falle der dünnen Plättchen. Es stellt sich aber die Frage ob die Höhe der Abnahme in einem sinnvollen Bereich liegt. Vergleicht man die Ergebnisse mit Literaturergebnissen (Hoerner, 1965; Hucho, 1994; Roberson und Crowe, 1993) für Körper klassischer Geometrie, so findet man beispielsweise für einen parallel zur Achse angeströmten Kreiszyylinder die Werte:

$$C_{DT}(\text{Scheibe}) = 1.17, \quad C_{DT}(\text{Zylinder mit } l/d = 1) = 0.90 \Rightarrow b=0.77,$$

$$C_{DT}(\text{Zylinder mit } l/d = 2) = 0.82 \Rightarrow b=0.70,$$

und die Ergebnisse für den Fall eines Zylinders mit quaderförmigen Querschnitt liegen in der gleichen Größenordnung.

Die Abnahme des Widerstandsbeiwertes  $C_{DT}$  bei zunehmender Länge  $l$  eines Zylinders ist also geringer, als die aus den Konzentrationsergebnissen ermittelten Reduktionen für die untersuchten Metallplättchen. Dies läßt vermuten, daß die Wirkung bei zunehmender Dicke der Hindernisse nicht allein durch die Abnahme des Widerstandsbeiwertes  $C_{DT}$  zu erklären ist.

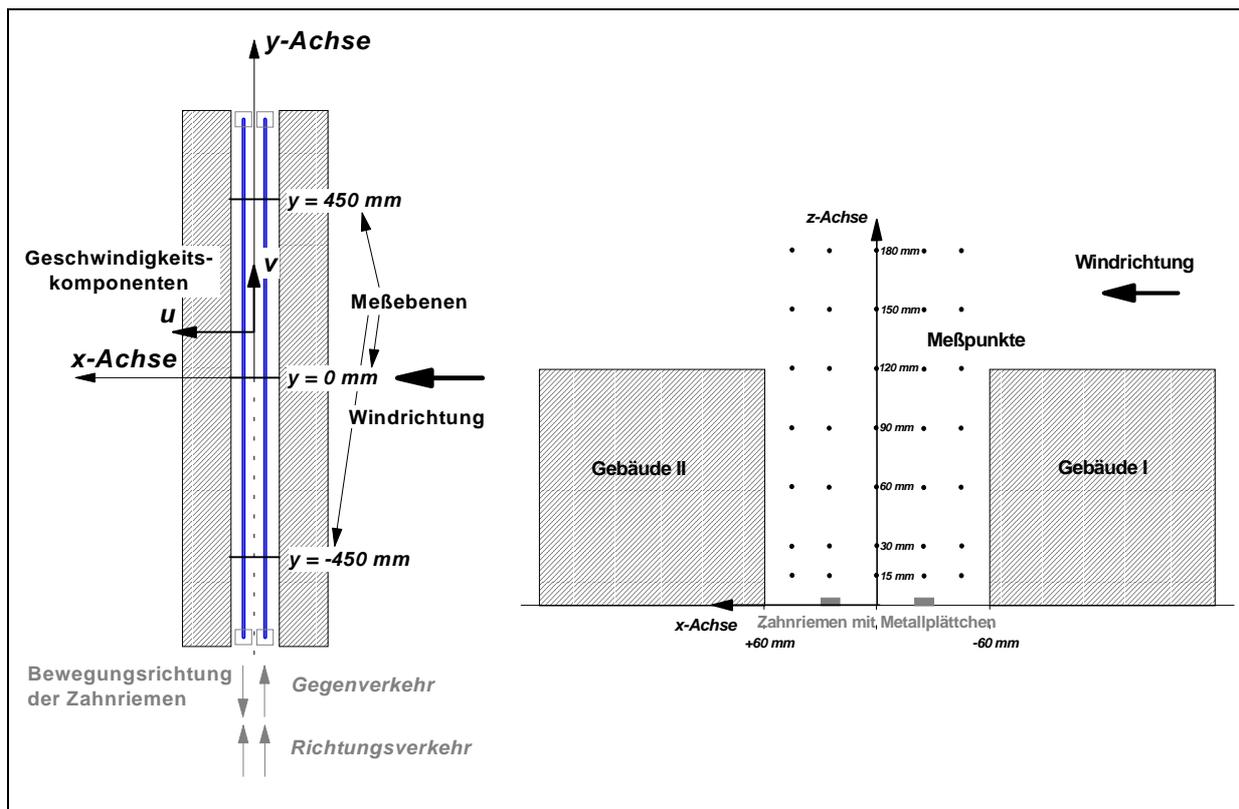
Eine genaue Analyse würde die Bestimmung der  $C_{DT}$  - Werte der verwendeten Metallplättchen erfordern. Dazu wäre der Nachbau der Hindernisse in einem größeren Maßstab erforderlich. Zusätzlich sollte ähnlich wie der zu Anfang dieses Kapitels angegebenen Windkanalstudie (Eskridge und Thompson, 1982) der Nachlauf der bewegten Hindernisse untersucht werden. Im Rahmen des vorgestellten Projektes waren diese Versuche nicht möglich. Es wurde aber versucht, mit Hilfe von LDA - Messungen der mittleren und turbulenten Strömungsfelder in der Straßenschlucht weitere Aussagen über die Wirkung der bewegten Hindernisse zu erhalten. Die Ergebnisse dieser Studien werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

#### **4.7 Beeinflussung des Strömungsfeldes in Straßenschluchten**

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen haben einige Fragen hinsichtlich der verwendeten Versuchstechnik zur Modellierung der Fahrzeugbewegung aufgeworfen. Es stellte sich beispielsweise die Frage, inwiefern die insbesondere im Falle des Richtungsverkehr beobachtete Strömung entlang der Straße durch die Zahnriemen, auf welchen die Metallplättchen befestigt waren, hervorgerufen wird. Ebenso sollten mögliche strömungsmechanische Ursachen für die Unterschiede bei verschiedenen Plättchendicken gefunden werden.

Zur Klärung dieser Fragen wurde ein Versuchsprogramm mit Messungen des Strömungsfeldes in der Straßenschlucht aufgestellt. Es wurden Geschwindigkeitsmessungen mit dem im 2 - Komponenten - LDA - System durchgeführt, wobei die Sende - und Empfangsoptik im Windkanal montiert war (Kastner-Klein, 1999). Die Lage der Meßpunkte und die Definition der Geschwindigkeitskomponenten ist in Abb. 4.43 zu erkennen. Die unterste Meßebeine lag in der Höhe  $z = 15$  mm. In diesem Bereich der Straßenschlucht sind Störungen der Strömungsverhältnisse durch die Sonde nicht vollständig auszuschließen. Diese Störungen sollten jedoch keinen Einfluß auf die Schlußfolgerungen aus der durchgeführten Studie zur Analyse des Einflusses der Fahrzeugbewegung haben, da bei dieser Studie nur die Änderungen im Vergleich zum Referenzfall (stehender Verkehr) betrachtet werden.

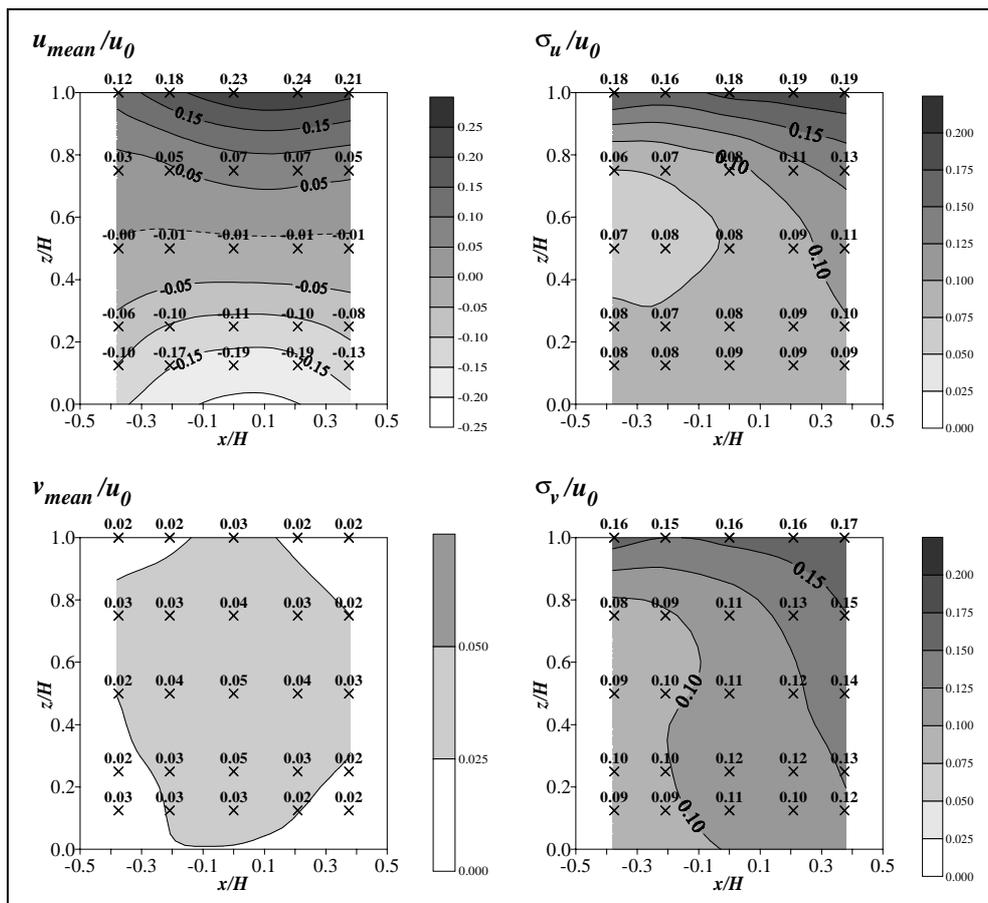
Die untersuchte Gebäudekonfiguration war die gleiche wie bei den Konzentrationsmessungen. Die Gebäude waren 120 cm lang, 12 cm hoch und 12 cm breit ( $L/H = 10$ ,  $B/H = 1$ ). Sie waren in einem Abstand von 12 cm angeordnet ( $H/S = 1$ ) und die Windrichtung war senkrecht zur



**Abb. 4.43:** Versuchsaufbau bei den Strömungsfeldmessungen in der Straßenschlucht mit einem 2 - Komponenten - LDA - System (links: Ansicht von oben, rechts: vertikaler Schnitt durch die Straßenschlucht).

Straßenachse. Die Bewegungsrichtungen der Zahnriemen bei den Situationen Richtungs- und Gegenverkehr sind in Abb. 4.43 durch Pfeile skizziert. Es ist zu beachten, daß die Bewegungsrichtungen bei den Konzentrationsmessungen mit  $H/S = 1$  genau entgegengesetzt waren. Die Windgeschwindigkeit  $u_0$  in der Referenzhöhe  $z = 480$  mm betrug 7 m/s. Mit dem 2 - Komponenten - LDA - System konnten gleichzeitig Mittelwerte und Turbulenzanteile der horizontalen Komponenten  $u_w$  und  $v_w$  des Windgeschwindigkeitsvektors aufgenommen werden.

Die Ergebnisse für den Referenzfall, d.h. stillstehender Verkehr, in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0$  mm, welche im weiteren Verlauf als Referenzwerte verwendet werden, sind in der Abb. 4.44 dargestellt. Die linken Diagramme zeigen Ergebnisse für die Mittelwerte der  $u_w$  - (oben) bzw.  $v_w$  -Komponente (unten) bezogen auf die Referenzgeschwindigkeit  $u_0$ . Die Standardabweichungen bezogen auf die Referenzgeschwindigkeit  $u_0$  sind in den rechten Dia-



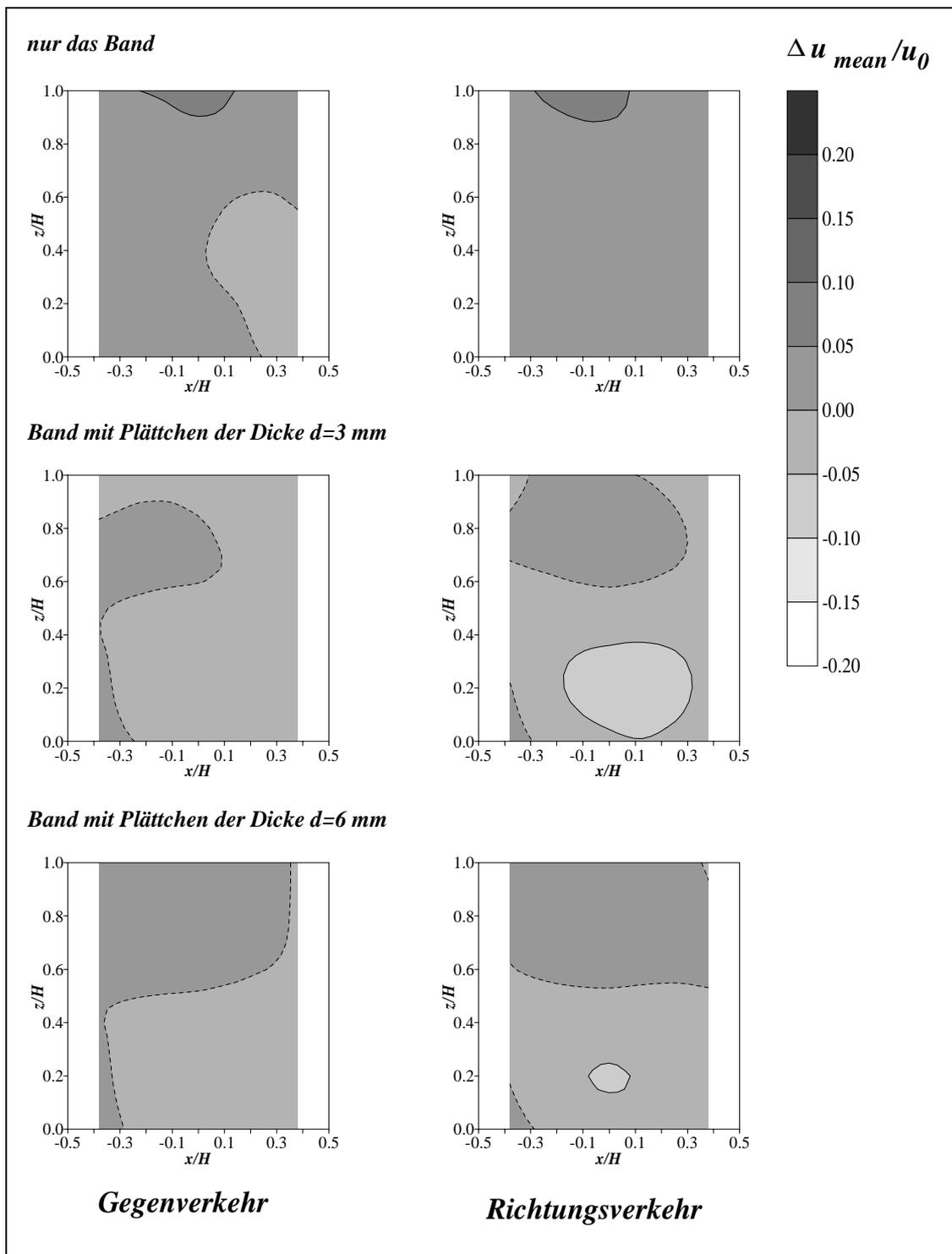
**Abb. 4.44:** Mittlere und turbulente, horizontale Geschwindigkeitskomponenten in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0$  mm einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht bei stehendem Verkehr (Referenzfall).

grammen zu sehen. Neben den gemessenen Werten sind jeweils berechnete Isolinien in den Diagrammen eingezeichnet.

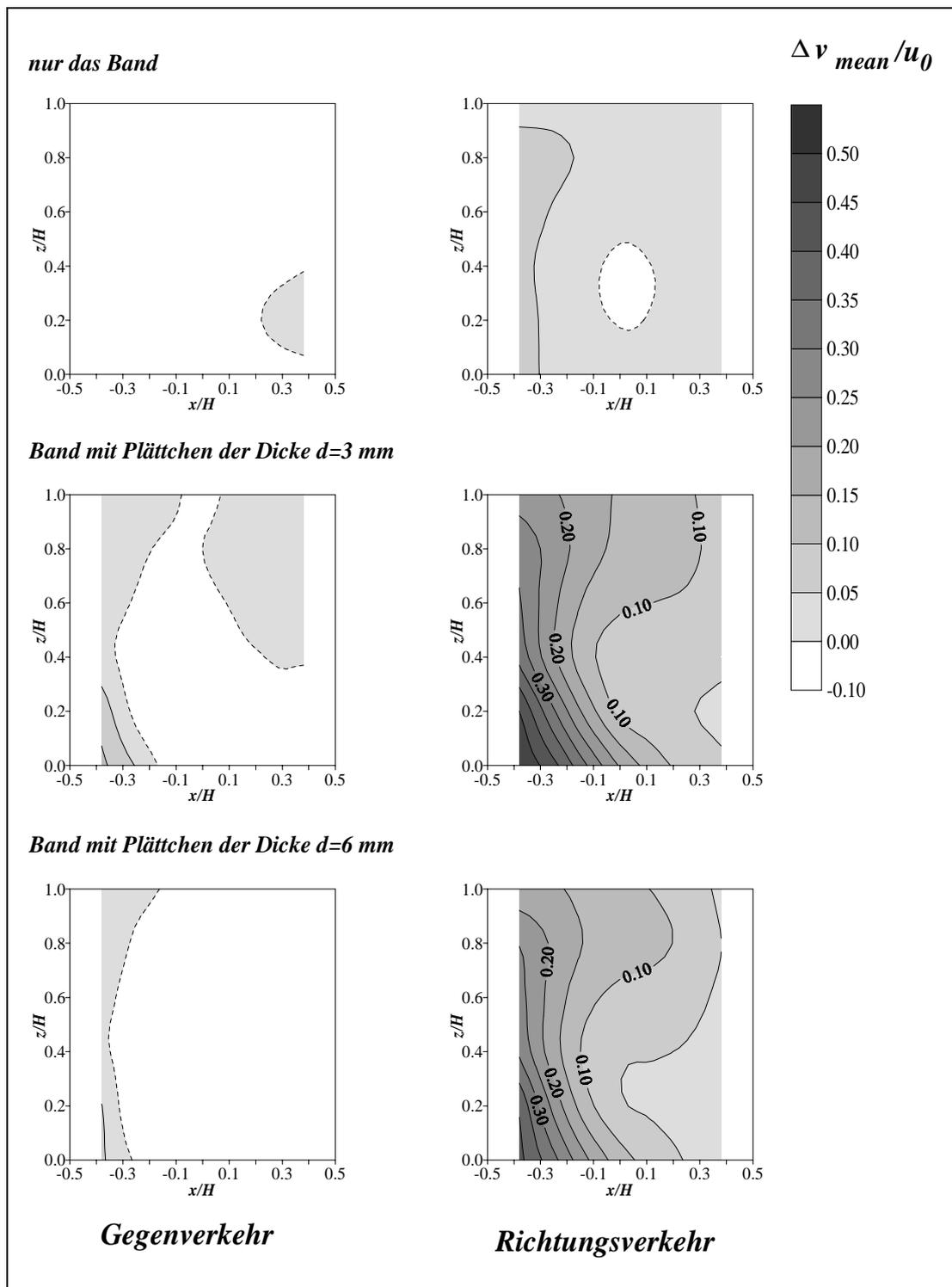
Die Veränderungen des mittleren und turbulenten Strömungsfeldes durch die Fahrzeugbewegung veranschaulichen die in den Abb. 4.45 - 4.48 gezeigten Isoliniendarstellungen. Aufgetragen sind die Differenzbeträge zwischen den Ergebnissen der jeweils untersuchten Situation und dem Referenzfall. Untersucht wurden insgesamt 6 verschiedene Zustände der Bandbewegung. Zunächst wurden nur die Bänder, ohne Metallplättchen bewegt. In einer zweiten Versuchsreihe wurden die 3 mm dicken Metallplättchen montiert, welche für die dritte Versuchsreihe durch die 6 mm dicken Plättchen ersetzt wurden. Die Bänder wurden dabei jeweils im Gegenverkehr und im Richtungsverkehr betrieben. Die Bandgeschwindigkeit  $v$  betrug bei al-

len Messungen 49 km/h, so daß das Verhältnis aus Bandgeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit mit  $v / u_0 = 1.9$  angegeben werden kann.

Die Diagramme verdeutlichen, daß die Bandbewegung alleine keinen nachweisbaren Einfluß auf die mittleren und turbulenten Strömungsverhältnisse in der Straßenschlucht hat. Veränderungen sind nur für die Situationen mit bewegten Metallplättchen zu beobachten. Unabhängig von der Verkehrssituation und der Hindernisgeometrie wurde jedoch keine Wirkung der Fahrzeugbewegung auf den Mittelwert der  $u_w$  - Komponente (Geschwindigkeit quer zur Straßenachse) festgestellt. Anders verhält es sich bei der  $v_w$  - Komponente der Windgeschwindigkeit. Bei Situationen mit Richtungsverkehr wird eine Strömung entlang der Straße induziert, die im unteren Schluchtbereich eine mittlere Geschwindigkeit von  $0.5 \cdot u_0 \approx 3.5$  m/s erreichen kann. Diese Strömung wird eindeutig durch die Metallplättchen erzeugt, wobei deren Dicke nur einen geringen Einfluß auf die Höhe der mittleren Geschwindigkeit hat. Bei Situationen mit Gegenverkehr ist der Einfluß auf die Strömung entlang der Straße zu vernachlässigen. Die unterschiedliche Plättchendicke wirkt sich auf die turbulenten Strömungskomponenten aus. Diese sind sowohl bei Richtungsverkehr als auch bei Gegenverkehr höher im Falle der Metallplättchen mit der Dicke  $d = 3$  mm. Bei Situationen mit Gegenverkehr führt die Fahrzeugbewegung zu höheren turbulenten Anteilen als bei Richtungsverkehr. Der Einfluß bleibt aber im Gegensatz zum Richtungsverkehr auf den unteren Schluchtbereich begrenzt.



**Abb. 4.45:** Einfluß der Fahrzeugbewegung auf den Mittelwert der  $u_w$  - Komponente der Geschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0\text{ mm}$  einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht.



**Abb. 4.46:** Einfluß der Fahrzeugbewegung auf den Mittelwert der  $v_w$  - Komponente der Geschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0\text{ mm}$  einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht.

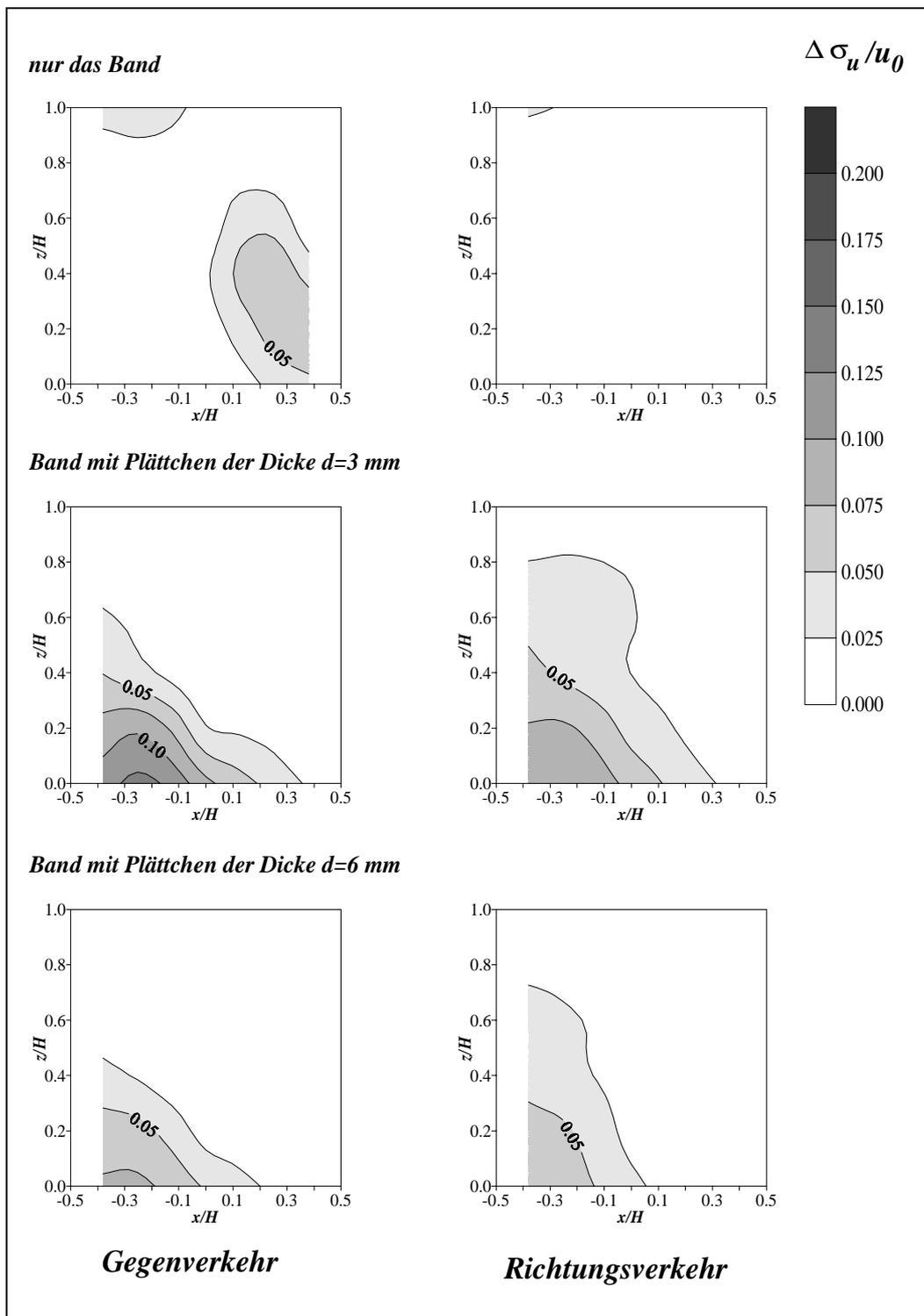
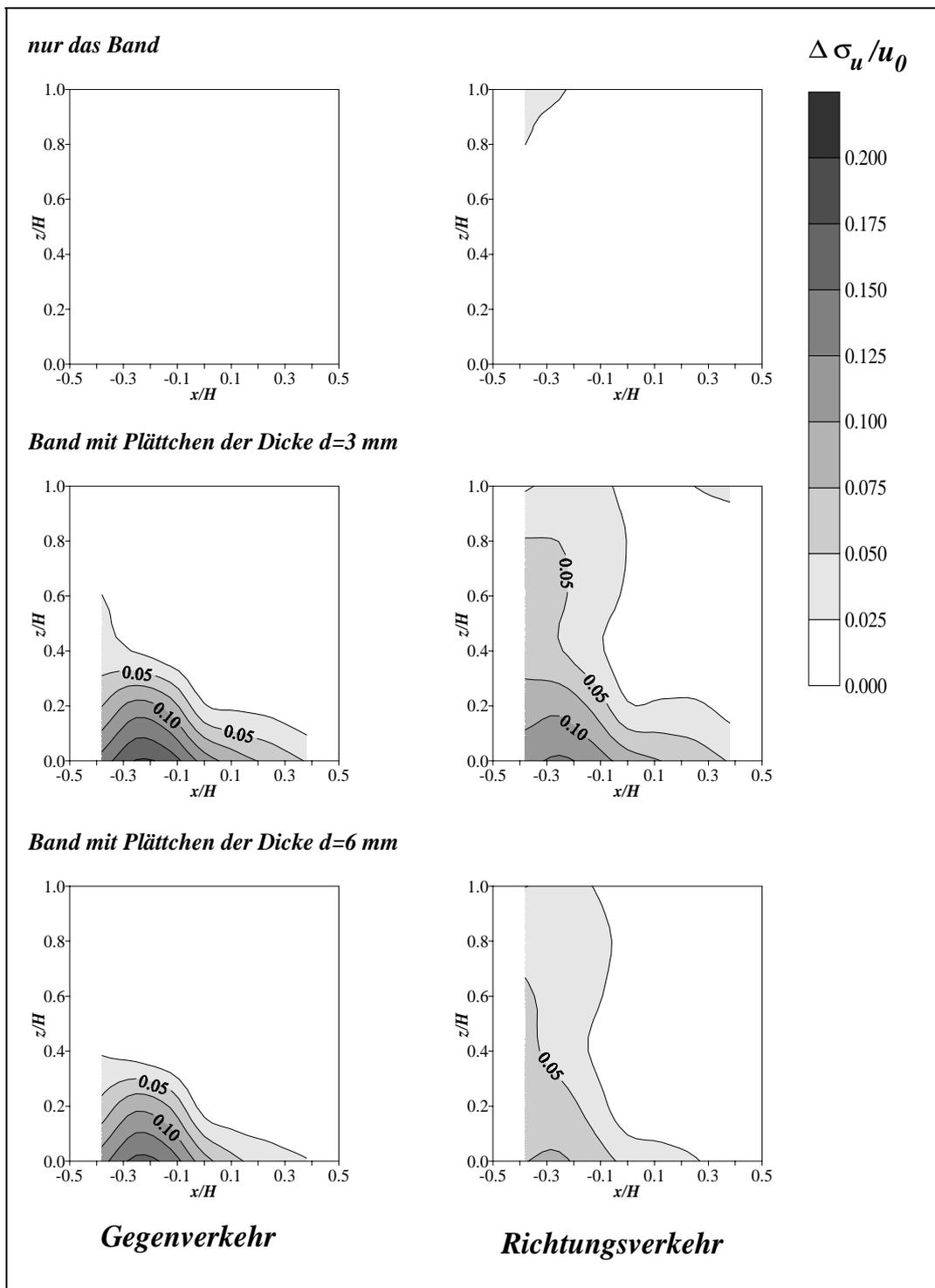


Abb. 4.47: Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Standardabweichung der  $u_w$  -Komponente der Geschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0\text{ mm}$  einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht.



**Abb. 4.48:** Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Standardabweichung der  $v_w$  - Komponente der Geschwindigkeit in der vertikalen Symmetrieebene  $y = 0\text{ mm}$  einer senkrecht, angeströmten Straßenschlucht.

## 4.8 Vergleich der Windkanalergebnisse mit Literaturergebnissen

Es stellt sich nun die Frage, inwieweit die aus den Windkanalversuchen erzielten Ergebnissen mit Literaturergebnissen übereinstimmen. Wie zu Beginn dieses Kapitels bereits diskutiert wurde, sind leider keine Datensätze aus Naturmessungen bekannt, welche den Einfluß der Fahrzeugbewegung direkt wiedergeben. Eine andere Möglichkeit stellt der Vergleich der Windkanalergebnisse mit Ergebnissen aus numerischen Modellberechnungen dar. Ein numerisches Ausbreitungsmodell, welches einen Ansatz zur Berücksichtigung der verkehrsinduzierten Turbulenz enthält ist das Operational Street Pollution Model (OSPM) von Berkowicz et al. (1997). Schadstoffkonzentrationen in Straßenschluchten werden mit Hilfe einer Kombination aus einem "Plume - Ansatz" und einem "Box - Ansatz" berechnet. Letzterer beschreibt den Anteil an der Schadstoffkonzentration an einem bestimmten Aufpunkt infolge der in der Schlucht rezirkulierenden, belasteten Luft. Mit dem "Plume - Ansatz" wird der direkte Beitrag ermittelt. Es wird angenommen, daß der Ausbreitungsparameter  $\sigma_z$  nur durch mechanisch erzeugte Turbulenz beeinflusst wird, wobei zwei Mechanismen berücksichtigt werden, winderzeugte Turbulenz ( $\sigma_{ww}$ ) und verkehrsinduzierte Turbulenz ( $\sigma_{wt}$ )

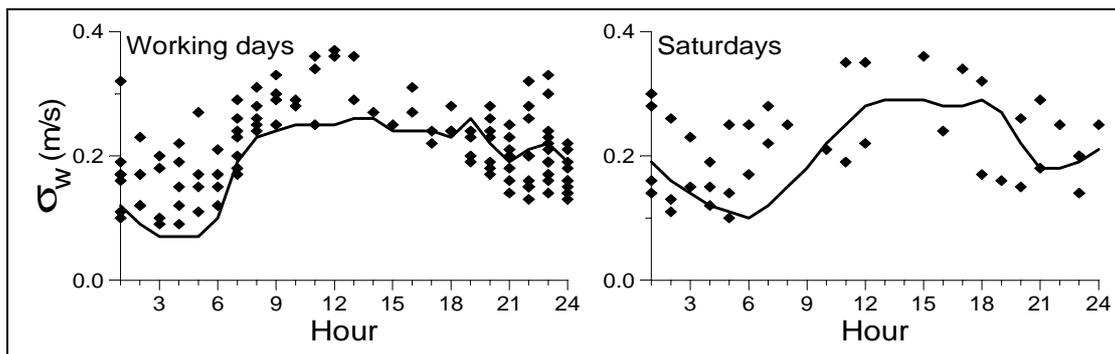
$$\sigma_w = (\sigma_{ww}^2 + \sigma_{wt}^2)^{1/2} = [(a_w u_b)^2 + \sigma_{wt}^2]^{1/2}. \quad (4.13)$$

Die Größe  $u_b$  entspricht der Windgeschwindigkeit im Straßenbereich und  $a_w$  einer Konstanten. Ein typischer Wert von  $a_w$  kann mit 0.1 angegeben werden.

Im Falle schwacher Windgeschwindigkeiten kann die Konzentration im Straßenbereich durch die Beziehung

$$C \propto \frac{Q}{\sigma_w \cdot S}, \quad (4.14)$$

abgeschätzt werden, wobei  $Q$  der Emissionstärke pro Längeneinheit und  $S$  der Straßenbreite entspricht. Ein einfacher Ansatz zu Modellierung der verkehrsinduzierten Turbulenz wurde



**Abb. 4.49:** Tagesgang des Turbulenzparameters  $\sigma_w$  für Schwachwindsituationen mit  $u < 1.5$  m/s an Werktagen und Samstagen an einer Straße in Kopenhagen, Dänemark. Die eingezeichneten Linien entsprechen dem gerechneten Verlauf der verkehrsinduzierten Turbulenzintensität mit dem Modell OSPM.

von Hertel und Berkowicz (1989) eingeführt. Die Fahrzeuge in der Straße werden als bewegte Störkörper betrachtet, welche zusätzlich Turbulenz erzeugen:

$$\sigma_{wt}^2 = b^2 v^2 D^2, \quad (4.15)$$

mit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ , der Dichte  $D$  der bewegten Hindernisse und einer empirischen Konstante  $b$ . Die Dichte der Fahrzeuge wird aus dem Verhältnis der von den Fahrzeugen eingenommen Fläche im Bezug zur Straßenfläche berechnet:

$$D = \frac{N_{veh} \cdot S_{veh}^2}{v \cdot S}. \quad (4.16)$$

Die Größe  $N_{veh}$  entspricht der Anzahl der Fahrzeuge die pro Zeiteinheit die Straße passieren und  $S^2$  stellt die horizontale Grundfläche der Fahrzeuge dar. Für die Anzahl  $N_{veh}$  der Fahrzeuge, die pro Zeiteinheit die Straße passieren, kann die Beziehung  $N_{veh} = n_t \cdot v$  angegeben werden, wobei  $n_t$  der Anzahl der Fahrzeuge pro Längeneinheit der Straße darstellt. Daraus folgt letztlich:

$$\sigma_{wt} = b \left( \frac{N_{veh} \cdot v \cdot S_{veh}^2}{S} \right)^{1/2} = b \left( \frac{n_t \cdot v^2 \cdot S_{veh}^2}{S} \right)^{1/2}. \quad (4.17)$$

Ein Vergleich des berechneten Tagesganges der verkehrsinduzierten Turbulenzintensität  $\sigma_{wt}$  mit Meßergebnissen für eine Straße (Jagtvej) in Kopenhagen, Dänemark wird in Abb. 4.49 gezeigt. Eingetragen sind die Daten für Situationen mit geringen Windgeschwindigkeiten. Es zeigt sich, daß der berechnete Verlauf relativ gut mit den Meßergebnissen übereinstimmt. Abweichungen treten in den Nachtstunden auf. Die höheren Werte aus den Messungen lassen vermuten, daß andere Effekte, wie z.B. thermisch erzeugte Turbulenz, hier eine Rolle spielen.

Als Ähnlichkeitskriterium kann das Verhältnis der Turbulenzintensitäten, die durch den Wind bzw. Verkehr erzeugt werden, angegeben werden:

$$\frac{\sigma_{wt}^2}{\sigma_{ww}^2} \propto S_{veh}^2 \cdot n_t \cdot \frac{v^2}{u^2}. \quad (4.18)$$

Im Gegensatz zu dem aus dem Modellgesetz von Plate (1982) abgeleiteten Ähnlichkeitskriterium (Gl. 4.8) folgt aus Gl. 4.18 eine Abhängigkeit vom Quadrat des Geschwindigkeitsverhältnisses (anstelle der dritten Potenz in der Beziehung von Plate). Ein weiterer Unterschied, ist die Abhängigkeit von der horizontalen Grundfläche der Fahrzeuge anstelle der Frontfläche in Gl. (4.8).

Trotz dieser Unterschiede wurden mit dem OSPM Modell Berechnungen für eine mit den Windkanalversuchen vergleichbare Situation durchgeführt (Kastner - Klein et al., 1998). Betrachtet wurde wieder der Einfluß von Variationen der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v$ , der Windgeschwindigkeit  $u_0$  und der Verkehrsdichte, ausgedrückt durch den Dichteparameter  $a$ . In Analogie zur Abb. 4.15 sind in der Abb. 4.50 die berechneten Konzentrationsverhältnisse bezogen auf den Referenzfall mit stehendem Verkehr als Funktion der Skalierungsgröße  $\sqrt[3]{a} \cdot \frac{v}{u}$  aufgetragen. Eine lineare Anpassung an die Windkanaldaten aus Abb. 4.15 ist als gestrichelte Linie mit eingezeichnet. Aufgrund der diskutierten Unterschiede der Ähnlichkeitsbeziehung in OSPM bzw. nach Plate (1982) liegen die berechneten Ergebnisse bei einer Auftragung über  $\sqrt[3]{a} \cdot \frac{v}{u}$  nicht zusammen auf einer Kurve. Grundsätzlich stimmen die berechneten Ergebnisse jedoch sehr gut mit den Windkanalergebnissen überein. Die Wirkungsweise ist gleich und die Konzentrationsreduktionen liegen in der selben Größenordnung.

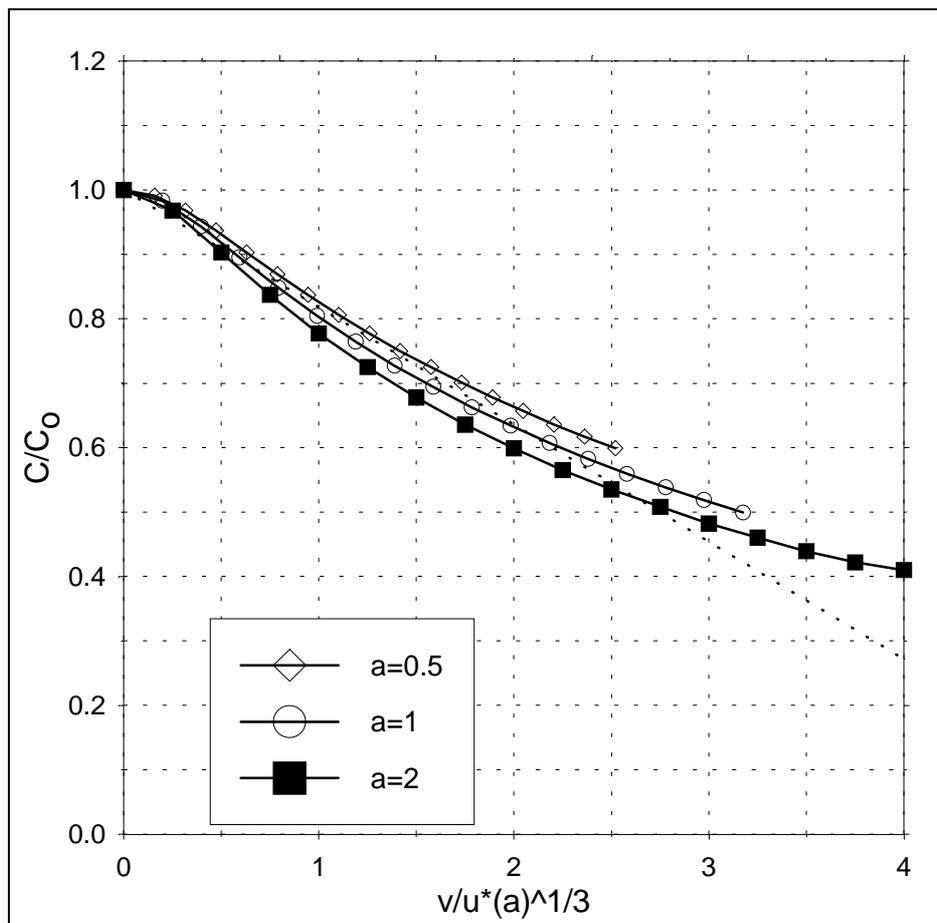


Abb. 4.50: Mit OSPM berechnete Abhängigkeit der Konzentration in einer Straßenschlucht an der leeseitigen Wand in Bodennähe von Variationen des Geschwindigkeitsverhältnisses und der Verkehrsdichte.

Ähnliche Ergebnisse wurden auch beim Vergleich der Windkanalergebnisse mit Berechnungen aus dem Ausbreitungsmodell MICRO CALGRID, welche von Stern und Yamartino (1998) durchgeführt wurden, festgestellt. MICRO CALGRID ist ein numerisches Gittermodell. Die Produktion zusätzlicher turbulenter Energie infolge der Fahrzeugbewegung in den Gitterzellen, welche dem Volumen der Fahrzeuge entsprechen, beschreibt der Ansatz

$$P \propto C_{DT} \cdot A_T \cdot v^2. \quad (4.19)$$

Dies führt letztlich zu einer erhöhten Turbulenzintensität resultierend aus der Fahrzeugbewegung, für welche die Beziehung gilt:

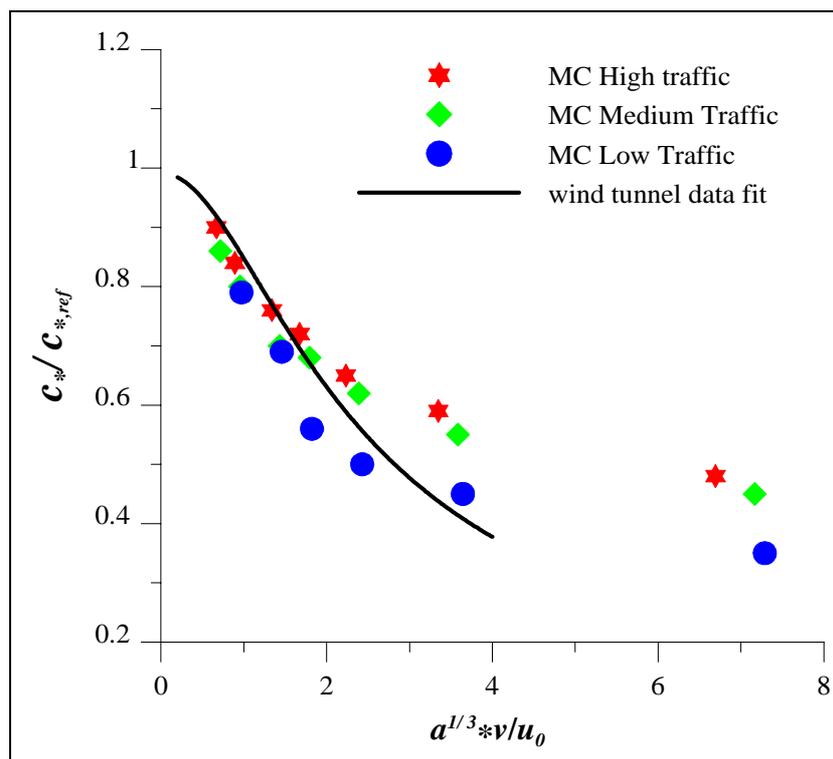
$$\sigma_{wt} \propto N_{veh} \cdot v^2 \quad (4.20)$$

Mit diesem Ansatz wurden für eine vierspurige Straße in Berlin Simulationen unter Berücksichtigung von drei verschiedenen Verkehrsszenarien, die in der folgenden Tabelle beschrieben sind, durchgeführt.

**Tab. 4.1:** Verkehrsszenarien bei den Berechnungen mit dem Modell MICRO CALGRID.

Bezeichnung	mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit $v$	Anzahl der Fahrzeuge pro Spur pro Stunde $N_{veh}$	Anzahl der Fahrzeuge pro Richtung pro Länge $n_t$	Parameter $a = n_t/n_{t,ref}$ ( $n_{t,ref} = 0.067 \text{ m}^{-1}$ )
HT	25km/h	750 Kfz/h	0.060 Kfz/m	0.9
MT	35km/h	470 Kfz/h	0.027 Kfz/m	0.4
LT	55km/h	200 Kfz/h	0.007 Kfz/m	0.1

Anschließend erfolgte ein Vergleich der berechneten Konzentrationsverhältnisse bezogen auf den Referenzfall mit den in Abb. 4.15 dargestellten Windkanalergebnissen. Die Ergebnisse sind in der Abb. 4.51 gegenübergestellt. Auch hier kann für kleine Werte des Turbulenzparameters  $\sqrt[3]{a} \cdot v/u$  eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen und numerischen Ergebnissen festgehalten werden. Für  $\sqrt[3]{a} \cdot v/u > 3$  treten Abweichungen zwischen der an die Windkanalergebnisse angepaßten Kurve und den Modellberechnungen auf. Es ist aber zu berücksichtigen, daß für diesen Bereich bereits keine experimentellen Daten mehr vorliegen. Die Modellrechnungen lassen vermuten, daß die maximale Konzentrationsreduktion in der Größenordnung von  $\approx 60\%$  liegt.



**Abb. 4.51:** Vergleich der Windkanalergebnisse mit Berechnungen, die mit dem numerischen Gittermodell MICRO CALGRID für eine vier-spurige Straße in Berlin durchgeführt wurden.

## **5. Modellierung der Ausbreitungsverhältnisse im Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße**

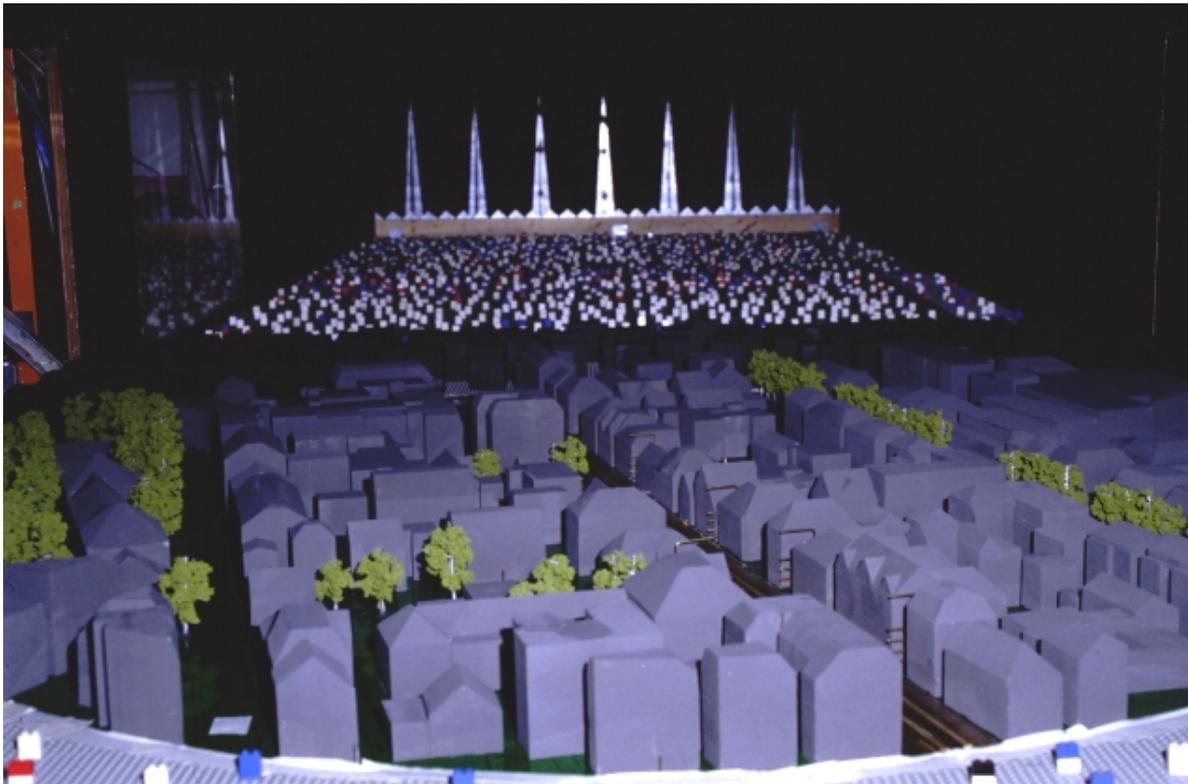
### **5.1 Untersuchungsgebiet**

Neben den Versuchen mit idealisierten Straßenschluchten wurden im Rahmen des vorgestellten Projektes die Ausbreitungsverhältnisse in einem Stadtteil von Stuttgart untersucht, welcher die Hauptstätter Straße im Bereich zwischen Fangelsbachstraße und Kolbstraße beinhaltet. Die Hauptstätter Straße ist die wichtigste Ein- und Ausfallstraße vom Süden zum Innenstadtgebiet von Stuttgart. Sie ist 4-spurig ausgebaut und das tägliche Verkehrsaufkommen beträgt etwa 45.000 Kfz/Tag. Der Schwerverkehrsanteil liegt bei ca. 8%. Im ausgewählten Bereich ist die Bebauung von beiden Seiten relativ dicht, wobei die Gebäude in der Regel eine Höhe von 15 - 20 m haben. Die Bebauung ist jedoch nicht geschlossen, sondern es gibt zahlreiche Unterbrechungen der Häuserfront durch Einfahrten in Hinterhöfe u.ä., so daß äußerst komplexe, durch die lokalen Verhältnisse geprägte, Strömungsverhältnisse zu erwarten sind.

Dieses Untersuchungsgebiet wurde ausgewählt, da Informationen über die Schadstoffbelastung an mehreren Naturmeßstellen, verteilt in diesem Gebiet, vorliegen. Zudem erfolgte parallel eine numerische Simulation der Immissionsbelastung im Rahmen des Projekts PEF 2 96 004 "Immissionsprognosen mit mikroskaligen Modellen - Vergleich von berechneten und gemessenen Größen" (Schädler et al., 1999). Ein Vergleich der Ergebnisse aus den Windkanalversuchen mit numerischen Simulationen erfolgt auszugsweise in Kapitel 8. Der ursprünglich geplante Vergleich mit Naturdaten konnte nicht durchgeführt werden, da die Meßdaten aus einer von der Daimler Benz AG betriebenen Meßstation während der Laufzeit des Projektes nicht als Vergleichsdaten zu Verfügung standen.

### **5.2 Versuchsbedingungen**

Abb. 5.1 zeigt das Windkanalmodell, welches die Umgebung der Hauptstätter Straße im Maßstab 1:200 mit allen strömungsmechanisch relevanten Hindernissen abbildet, eingebaut in den Grenzschichtwindkanal am Institut für Hydromechanik an der Universität Karlsruhe. Unter-



**Abb. 5.1:** Windkanalmodell des Gebietes Stuttgart Hauptstätter Straße

sucht wurde die Ausbreitung der Kfz-Emissionen von zwei Straßen, der Hauptstätter und der Tübinger Straße. Die Kfz-Abgase werden durch Linienquellen simuliert. Die Konstruktion der Linienquellen orientiert sich an dem in Meroney et al. (1996) beschriebenen Aufbau, welcher homogene Quellbedingungen über die gesamte Quelllänge sicherstellt. Umfangreiche Testversuche, welche die Anforderungen an Linienquellen zur Simulation von Kfz-Emissionen dokumentieren, sind in Kastner-Klein und Plate (1998) und Kastner-Klein (1999) veröffentlicht. Die Quellen können durch folgende Parameter beschrieben werden:

**Tab. 5.1:** Beschreibung der Linienquellen in der Windkanalstudie Stuttgart Hauptstätter Straße

Name der Quelle:	Abkürzung	Anzahl der Fahrspuren in der Natur	Anzahl der Linienquellen im Modell	Länge der Quelle pro Spur
Hauptstätter Straße	HS	4	2	150 cm
Tübinger Straße	TS	2	1	160 cm

Die Auswahl der Meßpositionen erfolgte unter Berücksichtigung der Informationen über die Lage der Naturmeßstellen. Neben zwei Dauermeßstellen, welche sich in der Hauptstätter Straße befinden, und von der Daimler-Benz AG und der Universität Stuttgart eingerichtet wurden, werden regelmäßig mobile Messungen vom Amt für Umweltschutz durchgeführt. Bei diesen Messungen werden mehrere Meßpunkte in der Hauptstätter, Tübinger und Römerstraße angefahren. Die Meßhöhe der Dauermeßstelle der Universität Stuttgart beträgt 3.7m, die der mobilen Messungen 3.5m. Als Referenzhöhe wurde für das Modell 1.8cm festgelegt. Dies entspricht in der Natur einer Höhe von 3.6m. Neben den Positionen der Naturmeßstellen wurden im Windkanalmodell zusätzlich Meßstellen angebracht und an den Meßpositionen in der Hauptstätter Straße wurden Vertikalprofile mit Meßpunkten in den Höhen 0.8, 1.8, 2.8, 3.8, und 6.8cm aufgenommen. Diese Erweiterung des Rasters der Meßpositionen ermöglicht Aussagen über die Variabilität von Schadstoffkonzentrationen in Stadtgebieten, über den Transport von Kfz-Emissionen aus Straßenschluchten in Seitenstraßen und Hinterhöfe, sowie einen Vergleich der Ergebnisse mit den Studien mit idealisierten Bebauungsstrukturen.

Abb. 5.2 zeigt einen skizzierten Lageplan des Untersuchungsgebietes. Eingezeichnet sind die Quellen, die Lage der Meßstellen im Modell und die Bezeichnung der Windrichtungen. Die Festlegung der Windrichtungen erfolgte unter Berücksichtigung der Orientierung der Hauptstätter Straße, welche um ca.  $27.8^\circ$  gegen Nord gedreht ist. Um bei den Untersuchungen die Fälle Senkrecht - und Parallelanströmung der Hauptstätter Straße abzudecken, wurde die Windrichtung  $30^\circ$  (bzw.  $210^\circ$ ) als Parallelanströmung und  $120^\circ$  (bzw.  $300^\circ$ ) als Senkrechtanströmung definiert. Daraus resultiert ein Versatz von ca.  $2.2^\circ$  im Vergleich zu den meteorologisch definierten Windrichtungen.

Die Windkanalversuche lassen sich in zwei Phasen unterteilen:

**Phase 1: Durchführung von Konzentrationsmessungen im Untersuchungsgebiet ohne Berücksichtigung des Einflusses der Kfz - erzeugten Turbulenz.**

Es wurden für insgesamt 24 Windrichtungen ( $15^\circ$ -Schritte) Konzentrationsmessungen durchgeführt, wobei jedoch alle in Abb. 5.2 eingezeichneten Meßpunkte nur für insgesamt 8 Wind-

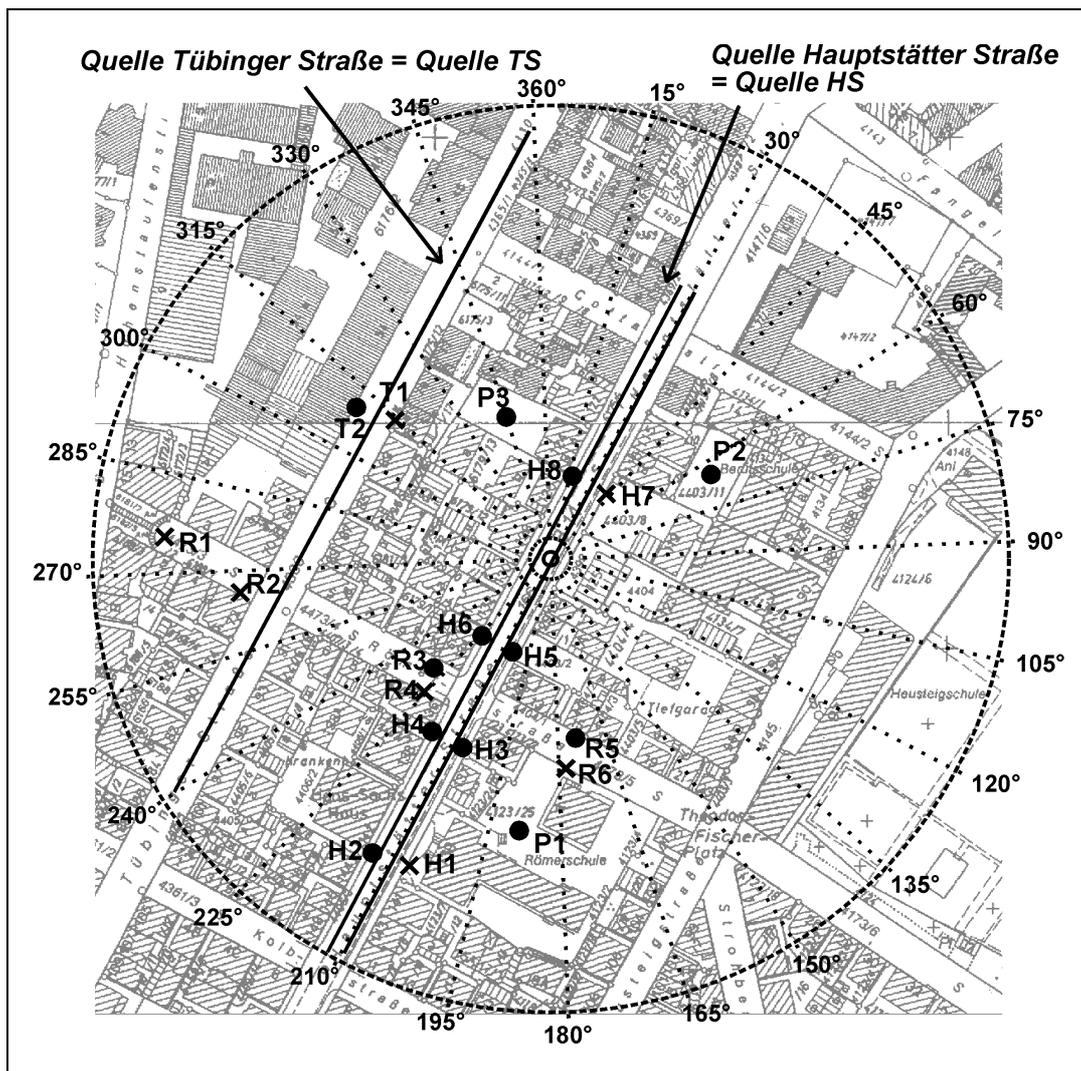


Abb. 5.2: Skizzierter Lageplan des Untersuchungsgebietes Hauptstätter Straße.

richtungen (45°-Schritte) berücksichtigt werden konnten. Alle notwendigen Informationen zur Beschreibung der Meßstellen sind in Tab. 5.2 aufgelistet.

**Phase 2: Untersuchung des Einflusses der Kfz - erzeugten Turbulenz auf die Konzentrationsverteilung in der Hauptstätter Straße.**

In das Windkanalmodell wurde in der Hauptstätter Straße eine Versuchstechnik zur Simulation der Kfz - erzeugten Turbulenz integriert und für ausgewählte Windrichtungen wurden Konzentrationsmessungen an den Meßpunkten in der Hauptstätter Straße (H1 - H8) durchgeführt. Die Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Experimente erfolgt in Kap. 7.

Tab. 5.2: Beschreibung der Meßstellen im Untersuchungsgebiet

Namen der Meßstellen	Typ	Meßhöhen im Modell	untersuchte Windrichtungen
H1, H7	Natur, permanent	0.8, 1.8, 2.8, 3.8, 6.8cm	24
R1, R2, R4, R6, T1	Natur, mobil	1.8cm	24
H1, H3, H4, H5, H6, H8	nur im Modell	0.8, 1.8, 2.8, 3.8, 6.8cm	8
R3, R5, P1, P2, P3	nur im Modell	1.8cm	8

Der Modellausschnitt wurde so festgelegt, daß sich die Meßstelle H7, für welche in der Natur die umfangreichsten Messungen durchgeführt, im zentralen Bereich des Modells befindet um den Einfluß von Randeffekten zu vermeiden. Die zweite Meßstelle, an welcher in der Natur permanent Meßwerte erfaßt werden (H1), liegt am äußersten Modellrand und es ist nicht auszuschließen, daß die Ergebnisse dadurch beeinträchtigt sind.

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen werden in der Form von dimensionslosen Konzentrationen  $c_m^* = \frac{c_m \cdot u_{10} \cdot H}{Q_m / L_{m,Q}}$ , mit den Referenzgrößen

$u_{10}$ : Geschwindigkeit in 10 m Höhe in der Natur. Der Wert wird ermittelt aus dem Windprofil in der ungestörten Anströmung, welches durch einen Potenzansatz mit einem Proflexponent von  $\alpha=0.23$  beschrieben werden kann,

$H$ : mittlere Gebäudehöhe = 10 cm. Bei einem Modellmaßstab von  $M = 1/200$  entspricht dies in der Natur einer Höhe von  $H = 20$  m,

dargestellt.

## **7. Konzentrationsverteilung im Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße unter Berücksichtigung der Kfz - erzeugten Turbulenz**

### **7.1 Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz in der Hauptstätter Straße**

Ziel der zweiten Versuchsphase der Windkanalstudie Stuttgart Hauptstätter Straße war die Untersuchung des Einflusses der Kfz - erzeugten Turbulenz auf die Schadstoffausbreitung. Als Grundlage wurden die im Kap. 4 vorgestellten Ergebnisse der Studien über den Einfluß der Fahrzeugbewegung in Straßenschluchten verwendet. Der in Abb. 4.5 gezeigte Versuchsaufbau zur Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz wurde an die Bedingungen des Windkanalmodells für das Gebiet Hauptstätter Straße angepaßt. Unverändert blieben der prinzipielle Aufbau und die Dimensionierung der Metallplättchen. Es wurde die Gültigkeit des Ähnlichkeitsgesetzes nach Gl. (4.8) angenommen. Daraus folgt, daß aus den Naturbedingungen charakteristische Werte für die Größen Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit und Verkehrsdichte abgeleitet werden müssen und basierend auf Gl. (4.8) die entsprechenden Werte bei der Windkanalmodellierung eingehalten werden müssen.

Die Windgeschwindigkeiten für das Gebiet Hauptstätter Straße werden aus den vorliegenden Windstatistiken für die Station Schwabenzentrum (Meßhöhe  $z_{Ms} = 31\text{m}$ ) übernommen (siehe Schädler et. al., 1999). Die Werte sind in der Regel kleiner als 4.5 m/s und die mittlere Windgeschwindigkeit beträgt 2m/s. Informationen über das Verkehrsaufkommen und die Fahrzeuggeschwindigkeiten in der Hauptstätter Straße sollten ursprünglich von der Daimler Benz AG, welche an der Meßstelle H7 permanent eine Immissions - und Verkehrsmeßstelle betreibt, zur Verfügung gestellt werden. Leider erfolgte keine Freigabe der Daten, so daß Annahmen basierend auf anderen Verkehrserhebungen getroffen werden mußten. Informationen über das mittlere Verkehrsaufkommen liegen aus Verkehrszählungen, welche die Stadt Stuttgart 1992 in der Hauptstätter Straße durchgeführt hat, vor: DTV=45.000 Kfz/Tag, LKW - Anteil  $\approx 8\%$ , mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit  $v=32\text{km/h}$ . Für den Tagesgang der Verkehrsstärke werden Informationen aus Verkehrserhebungen, die das Institut für Stra-

ßen -und Verkehrswesen der Universität Stuttgart im Heslacher Tunnel durchgeführt hat, zugrunde gelegt.

Betrachtet man die häufigsten Windgeschwindigkeiten und die mittlere bzw. zulässige maximale Fahrzeuggeschwindigkeit in der Hauptstätter Straße so ergeben sich für das Verhältnis von Fahrzeug - zur Windgeschwindigkeit folgende Werte:

**Tab. 7.1:** Typische Werte für das Verhältnis von Fahrzeug - zur Windgeschwindigkeit im Gebiet Hauptstätter Straße

$v / u(z_{Ms})$	$v=30km/h$	$v=50km/h$
$u = 1.0m/s$	<b>8.3</b>	<b>13.9</b>
$u = 1.5m/s$	<b>5.6</b>	<b>9.3</b>
$u = 3.0m/s$	<b>2.8</b>	<b>4.6</b>
$u = 4.5m/s$	<b>1.9</b>	<b>3.1</b>

Im Modell beträgt die maximal mögliche Fahrzeuggeschwindigkeit in etwa 60km/h und die Windgeschwindigkeit muß mindestens 3m/s betragen (die Unabhängigkeit der Ergebnisse von der Reynoldszahl wird explizit nachgewiesen, siehe Erläuterungen zu Abb. 7.2). Daraus folgt für das maximal mögliche Geschwindigkeitsverhältnis im Modell:

$$(v / u_0)_m = 5.6 \Leftrightarrow (v / u(z_{Ms}))_m = 7.2$$

Ein Vergleich mit Tab. 7.1 zeigt, daß eine direkte Modellierung aller in der Natur zu erwartenden Geschwindigkeitsverhältnisse nicht möglich ist. Entsprechend Gl. (4.8) erlaubt jedoch eine Modellierung mit im Vergleich zur Natursituation höheren Fahrzeugdichten im Modell die Berücksichtigung von größeren Werten von  $v/u$ .

Die Analyse des Tagesganges der Verkehrsstärke  $(N)_n$  (Kfz/h) liefert für die Verkehrsdichten  $(n_t)_n = (N)_n / v$  (Kfz/km) die in Tab. 7.2 aufgelisteten Wertebereiche. In Tab. 7.3 sind die entsprechenden Verkehrsdichten im Modell, resultierend aus einer direkten Umrechnung nach

**Tab. 7.2:** Ableitung der Verkehrsdichte  $(n_t)_n$  in der Natur (Anzahl der Kfz/km) aus den Verkehrsstärken und Fahrzeuggeschwindigkeiten.

Zeitraum	Gesamtverkehrsstärke $N_{ges}$ in Kfz/h	Verkehrsstärke pro Richtung $N$ in Kfz/h	$v=30km/h$ $v=50km/h$	
6.00-9.00	$\geq 2500$	$\geq 1250$	<b>41.7</b>	<b>25.0</b>
15.00-20.00				
9.00-15.00	$\approx 2000$	$\approx 1000$	<b>33.3</b>	<b>20.0</b>
20.00-24.00	$\approx 1000$	$\approx 500$	<b>16.7</b>	<b>10.0</b>
0.00-6.00	$\leq 500$	$\leq 250$	<b>8.3</b>	<b>5.0</b>

**Tab. 7.3:** Resultierende Verkehrsdichte im Modell  $(n_t)_m$  in Kfz/m.

Zeitraum	Gesamtverkehrsstärke $N_{ges}$ in Kfz/h	Verkehrsstärke pro Richtung $N$ in Kfz/h	$v=30km/h$ $v=50km/h$	
6.00-9.00	$\geq 2500$	$\geq 1250$	<b>8.3</b>	<b>5.0</b>
15.00-20.00				
9.00-15.00	$\approx 2000$	$\approx 1000$	<b>6.7</b>	<b>4.0</b>
20.00-24.00	$\approx 1000$	$\approx 500$	<b>3.3</b>	<b>2.0</b>
0.00-6.00	$\leq 500$	$\leq 250$	<b>1.7</b>	<b>1.0</b>

$(n_t)_m = M \cdot (n_t)_n$  eingetragen. Grau hinterlegt sind zwei Situationen, welche als typische Verkehrszustände betrachtet werden. Sie können wie folgt charakterisiert werden:

Situation 1: hohe Verkehrsstärke  $(N)_n = 2500$  Kfz/h und mittlere Verkehrsgeschwindigkeit  $v=30km/h \Rightarrow$  Verkehrsdichte umgerechnet auf die Modellverhältnisse:  $(n_t)_m = 8.3$  Kfz / m

Situation 2: geringe Verkehrsstärke  $(N)_n = 1000$  Kfz/h und maximale Verkehrsgeschwindigkeit  $v=50km/h \Rightarrow$  Verkehrsdichte umgerechnet auf die Modellverhältnisse:  $(n_t)_m = 2$  Kfz / m

Wie bereits erwähnt wurde, ist es nicht möglich bei der Modellierung im Windkanal beliebig große Werte des Geschwindigkeitsverhältnisses einzustellen. Zudem ist eine Veränderung der Verkehrsdichte im Modell mit einem großen Aufwand verbunden. Es wurde deshalb versucht, Veränderungen des Ähnlichkeitskriteriums nach Gl. (7) durch eine konstante Verkehrsdichte im Modell, welche im Vergleich zur Natursituation höher ist, und Variationen der Geschwindigkeitsverhältnisses  $v/u$  zu realisieren. Als Wert für die Verkehrsdichte im Modell wurde ausgewählt  $(n_t)_m = 20$  Kfz/m (dies entspricht einem Abstand der Metallplättchen von 5cm). Die Geschwindigkeitsverhältnisse  $(v/u_0)_m$  im Modell betragen 2, 2.8, 4.6 und 5.6. Die Bereiche der Geschwindigkeitsverhältnisse, welche die Modellexperimente in der Natur repräsentieren, sind in Tab. 7.4 für die exemplarisch ausgewählten Situationen 1 und 2 aufgelistet. Es ist zu erkennen, daß für beide Situationen, mit den gewählten Modellparametern, ein großer Bereich der möglichen Geschwindigkeitsverhältnisse abgedeckt wird.

**Tab. 7.4:** Übertragung der Modellparameter auf Naturverhältnisse.

	Verhältnis der Verkehrsdichten $a = \frac{(n_t)_m}{(n_t)_n \cdot M}$	Berechnete Geschwindigkeitsverhältnisse $\left(\frac{v}{u(z_{Ms})}\right)_n = a^{1/3} \cdot \left(\frac{v}{u(z_{Ms})}\right)_m$	Vergleichswerte aus Tab. 7.1 $\left(\frac{v}{u(z_{Ms})}\right)_n$
Situation 1	2.4	3.5 ↔ 9.7	1.9 ↔ 8.3
Situation 2	10	5.6 ↔ 15.6	3.1 ↔ 13.9

Als letzter Parameter, welcher bei den Modellversuchen variiert wurde, ist die Windrichtung zu nennen. Aufgrund der aufwendigen Versuchstechnik war eine Beschränkung auf einige ausgewählte Windrichtungen notwendig. In Abb. 7.1 ist das Untersuchungsgebiet schematisch dargestellt. Neben der Lage der Quellen, der modellierten Fahrzeugkolonnen und der Meßstellen sind auch die untersuchten Windrichtungen eingezeichnet. Bei der Auswahl wurden die in der Windstatistik am häufigsten vertretenen Windrichtungen (210° - 240°, 30° und 315°) und die aus strömungsmechanischen Aspekten interessanten Windrichtungen mit paralleler (30° und 210°) oder senkrechter (120° und 300°) Anströmung der Hauptstätter Straße berücksichtigt. Abschließend sind in der Tab. 7.5 die Versuchsbedingungen bei den Experimenten mit dem Modell Hauptstätter Straße zusammengefaßt:

**Tab. 7.5:** Auflistung der Versuchsbedingungen der Studie Stuttgart Hauptstätter Straße, Phase2.

---

Anzahl der Fahrspuren:	2
Länge der Linienquellen:	1.37m
Verkehrszustand:	Gegenverkehr
Verkehrsdichte im Modell:	$(n_t)_m = 20 \text{ Kfz/m}$
Geschwindigkeitsverhältnisse im Modell:	$(v/u_0)_m = 2, 2.8, 4.6, 5.6$
untersuchte Windrichtungen:	30°, 120°, 210°, 225°, 240°, 300°, 315°

---

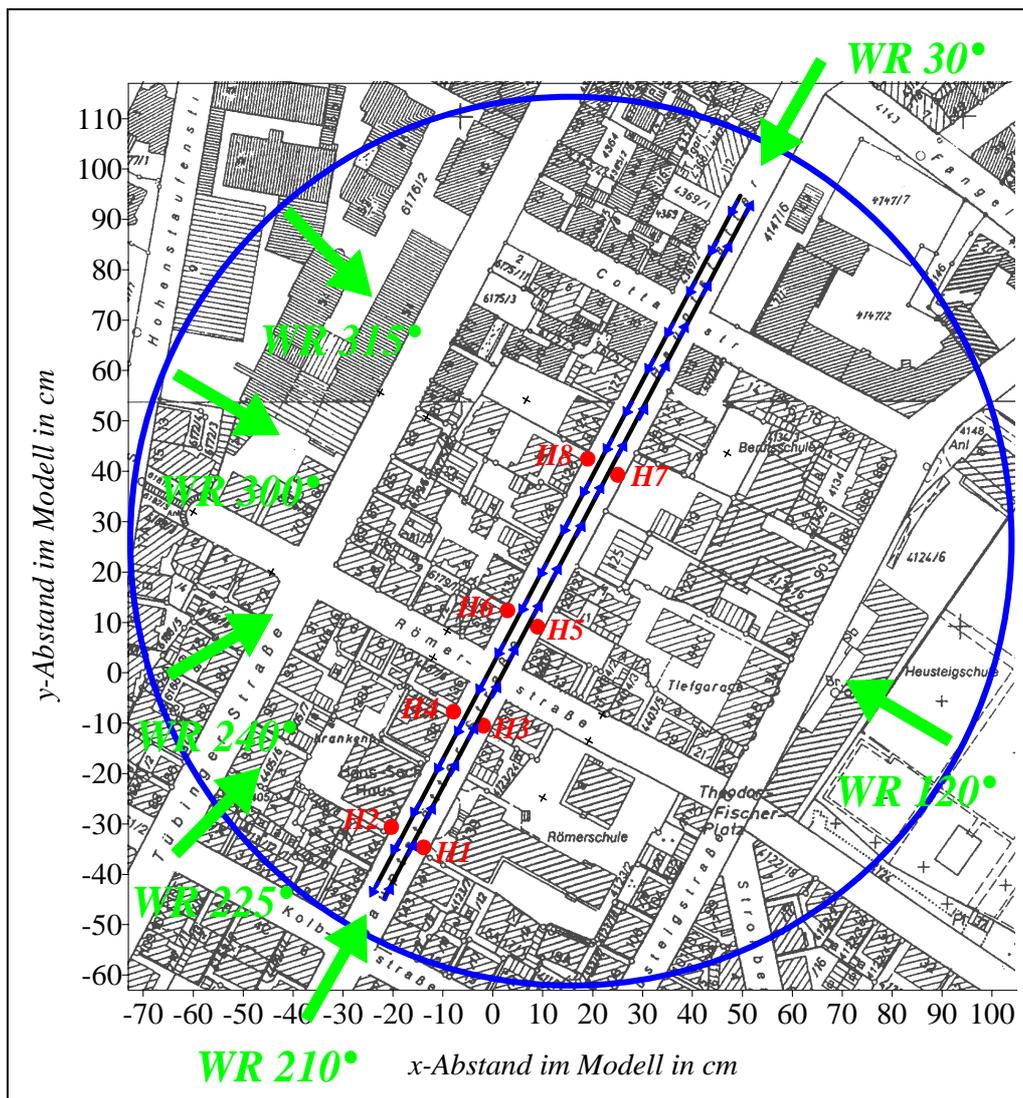
Im Vergleich zu den Versuchen der 1. Projektphase wurden folgende Veränderungen des Windkanalmodells durchgeführt:

- Das Anbringen der Versuchstechnik zur Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz machte eine Verkürzung der Linienquellen erforderlich. Anstelle einer Länge von 1.50 m betrug die Länge der Quellen 1.37 m pro Fahrspur.
- Alle Bäume wurden im Windkanalmodell entfernt, da bei den notwendigen relativ niedrigen Windgeschwindigkeiten eine naturähnliche Umströmung der runden, porösen Modellbäume nicht gewährleistet werden kann.

Aufgrund dieser Veränderungen sind Abweichungen zu den Ergebnissen der 1. Projektphase zu erwarten und ein direkter Vergleich ist nur bedingt möglich. Das Versuchsprogramm wurde deshalb so gestaltet, daß die Messungen immer paarweise durchgeführt wurden. Es wurde zu jeder Situation immer direkt eine Vergleichsmessung ohne Fahrzeugbewegung mit aufgenommen. Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse für die Windrichtung 120° im Detail dargestellt. Der Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Konzentrationen an der Meßstelle H7 bei den anderen untersuchten Windrichtungen wird im Kapitel 8 vorgestellt.

## **7.2 Einfluß auf die Konzentrationsverteilung**

Im folgenden werden Ergebnisse für die Windrichtung 120° vorgestellt, die einen Einblick geben, welche Veränderungen durch die Kraftfahrzeugbewegungen in der Konzentrationsverteilung in Stadtgebieten zu erwarten sind. Die Windrichtung 120° wurde ausgewählt, da sie



**Abb. 7.1:** Definitionsskizze zu den Versuchen im Untersuchungsgebiet Hauptstätter Straße mit integrierter Versuchstechnik zur Modellierung der Kfz - erzeugten Turbulenz.

einer senkrechten Anströmung der Hauptstätter Straße entspricht und somit ein Anknüpfen an die Ergebnisse der Versuche mit idealisierten Straßenschluchten möglich ist. Zudem liegt bei dieser Windrichtung die Meßstelle H7 im Lee der Quelle, so daß im Referenzfall, d.h. ohne Fahrzeugbewegung, hohe Konzentrationen auftreten. Der Einfluß der Modellierung der Fahrzeugbewegung auf die Konzentrationsprofile an dieser Meßstelle ist in Abb. 7.2 zu sehen. Es wurden folgende Parametervariationen durchgeführt (alle Angaben beziehen sich auf die Modellsituation, auf die Kennzeichnung durch den Index  $m$  wird im folgenden verzichtet):

Windgeschwindigkeit $u_0$	7m/s	5m/s	3m/s	5m/s	3m/s	3m/s	3m/s
Fahrzeuggeschwindigkeit $v$	50km/h	36km/h	22km/h	50km/h	30km/h	50km/h	60km/h
$v/u_0$	2	2	2	2.8	2.8	4.6	5.6
Symbole in der Abb. 7.2	blaue Raute	blauer Kreis	blaues Quadrat	pink Kreis	pink Quadrat	gelbes Quadrat	grünes Quadrat

Es ist zu erkennen, daß die Geschwindigkeitsverhältnisse  $v/u_\infty = 2$  und  $2.8$  durch 3 bzw. 2 verschiedene Kombinationen von Windgeschwindigkeiten und Fahrzeuggeschwindigkeiten realisiert wurden. Die Idee war die Überprüfung der Bedingung  $c^* = \text{konstant}$  für  $v/u = \text{konstant}$ , welche bei konstanter Verkehrsdichte aus dem Ähnlichkeitskriterium nach Plate (1982) folgt. Die schwarz eingezeichneten Kurven entsprechen den Messungen ohne Simulation der Fahrzeugbewegung. Sie wurden im direkten Anschluß zu den jeweiligen Messungen mit bewegtem Band aufgenommen, wobei die Windgeschwindigkeit immer entsprechend der Kfz - Situation gewählt wurde. Dies ermöglicht den direkten Vergleich zwischen der Situation mit Simulation der Fahrzeugbewegung und der Situation bei ruhendem Verkehr. Zudem liefern diese Messungen Aussagen über die Reproduzierbarkeit und Reynoldszahlunabhängigkeit der Ergebnisse, welche insbesondere bei den geringen Windgeschwindigkeiten, die aufgrund der erforderlichen Geschwindigkeitsverhältnisse notwendig waren, explizit nachzuweisen war. Zusätzlich sind noch die Kurven mit den Ergebnissen aus der ersten Projektphase mit eingezeichnet. Sie sind durch schwarze Linien mit Sternchen - Symbolen gekennzeichnet.

Die Modellierung der Fahrzeugbewegung führt an der Meßstelle H7 zu einer Konzentrationsabnahme, welche sich über nahezu den gesamten Profilbereich erstreckt. Es wurde eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus der ersten Projektphase und den Situationen mit ruhendem Verkehr festgestellt. Zudem konnte keine Verschlechterung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse für die Windgeschwindigkeit  $u_0 = 3\text{m/s}$  beobachtet werden und auch die Bedingung  $c^* = \text{konstant}$  für  $v/u = \text{konstant}$  wird für alle Parameterkombinationen gut erfüllt.

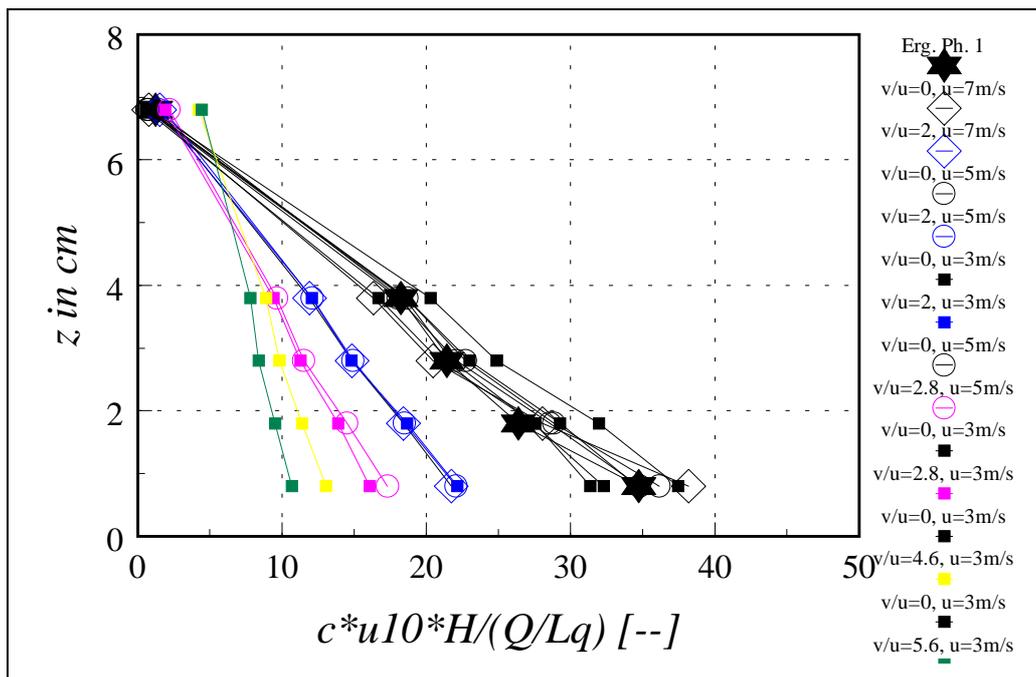


Abb. 7.2: Einfluß von Variationen der Fahrzeuggeschwindigkeit und Windgeschwindigkeit auf die Konzentrationsprofile an der Meßstelle H7 bei der Windrichtung  $120^\circ$ .

Eine interessante Frage ist auch inwiefern die horizontale Verteilung der Konzentrationen in der Hauptstätter Straße beeinflusst wird. In Abb. 7.3 sind die Konzentrationsprofile an allen Meßstellen (H1 - H8) in der Hauptstätter Straße in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis eingetragen. Eingezeichnet ist jeweils der Mittelwert aus allen aufgenommenen Messungen, d.h. im Falle des ruhenden Verkehrs ( $v/u = 0$ ) wurde der Mittelwert aus allen sieben in Abb. 7.2 eingezeichneten Kurven gebildet und für die Geschwindigkeitsverhältnisse  $v/u = 2$  und  $2.8$  der Mittelwert aus drei bzw. zwei Kurven. Die linken Diagramme zeigen jeweils die Ergebnisse für die Meßstellen, welche bei der Windrichtung  $120^\circ$  im Lee der Quelle liegen, die rechten Diagramme entsprechend die Ergebnisse an den Luv - Meßpunkten.

Die oberen Diagrammen veranschaulichen die Konzentrationsverteilung in der Hauptstätter Straße bei ruhendem Verkehr. Die horizontale Verteilung ist sehr stark durch die dreidimensionalen Strömungsverhältnisse infolge der komplexen Bebauungsstruktur geprägt. Die Konzentrationen an den einzelnen Meßstellen variieren stark. Die Profile an der Lee - Seite haben in der Regel ein ausgeprägtes Maximum in Bodennähe und sind durch einen hohen vertikalen

Gradienten gekennzeichnet, während an der Luv - Seite die vertikale Verteilung nahezu gleichmäßig ist. Betrachtet man die mittleren Diagramme, in welchen die Ergebnisse bei einer Modellierung der Fahrzeugbewegung mit einem Geschwindigkeitsverhältnis von  $v/u = 2$  dargestellt sind, so ist zu erkennen, daß die Konzentrationsverteilung infolge der Kfz - erzeugten Turbulenz (mit diesem Begriff werden die strömungsmechanischen Effekte durch die Modellierung der bewegten Kraftfahrzeuge bezeichnet) gleichmäßiger ist als im Falle des ruhenden Verkehrs. Die Profile an der Lee - Seite liegen deutlich näher zusammen. Betrachtet man die einzelnen Meßstellen so ist teilweise eine Konzentrationsabnahme (H7) zu beobachten, aber es treten auch Konzentrationserhöhungen (H3 und H5) auf. An der Luv - Seite nehmen die Konzentrationen ebenfalls zu und die Profilform ändert sich deutlich.

Die unteren Grafiken mit den Ergebnissen für  $v/u = 4.6$  zeigen, daß bei einer Erhöhung der Geschwindigkeitsverhältnisses an fast allen Meßstellen eine Konzentrationsabnahme beobachtet wird. Dies veranschaulichen auch die Diagramme in Abb. 7.4, in welchen die Konzentrationen in Bodennähe ( $z=0.8\text{cm}$ ) als Funktion des Geschwindigkeitsverhältnisses  $v/u$  aufgetragen sind. Im unteren Diagramm wurden die Konzentrationen bezogen auf den Wert der Ergebnisse für die Situation mit  $v/u = 2$  eingezeichnet. Diese Darstellung verdeutlicht, daß bei einer Modellierung der Fahrzeugbewegung in einem Stadtgebiet je nach Lage der Meßstelle die Konzentrationen zunächst abnehmen oder ansteigen. Bei einer weiteren Erhöhung des Geschwindigkeitsverhältnisses wurde an fast allen Meßstellen (Ausnahme bei den dargestellten Ergebnissen: Meßstelle H2) eine Absenkung der Konzentrationen beobachtet

Zusammenfassend läßt sich der Einfluß der Kfz - erzeugten Turbulenz wie folgt beschreiben:

Im Vergleich zur Situation mit ruhendem Verkehr sind die Gradienten der horizontalen Konzentrationsverteilung deutlich geringer. Die Unterschiede zwischen den Konzentrationen an den unterschiedlichen Meßstellen, welche bei ruhendem Verkehr durch die Umströmung der Gebäude (Luv - Lee Effekt in der Straßenschlucht, Wirbel im Kreuzungsbereich von Hauptstätter Straße und Römer Straße) verursacht werden, werden abgeschwächt. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch bei einer Integration eines Moduls zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung in das numerische Ausbreitungsmodell MISKAM für eine Straße in Frankfurt erzielt (Eichhorn et. al., 1998). Eine Absenkung des Konzentrationsniveaus in der Hauptstätter Stra-

ße wird bei hohen Geschwindigkeitsverhältnissen beobachtet. Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei den anderen untersuchten Windrichtungen festgestellt (siehe Kap. 8).

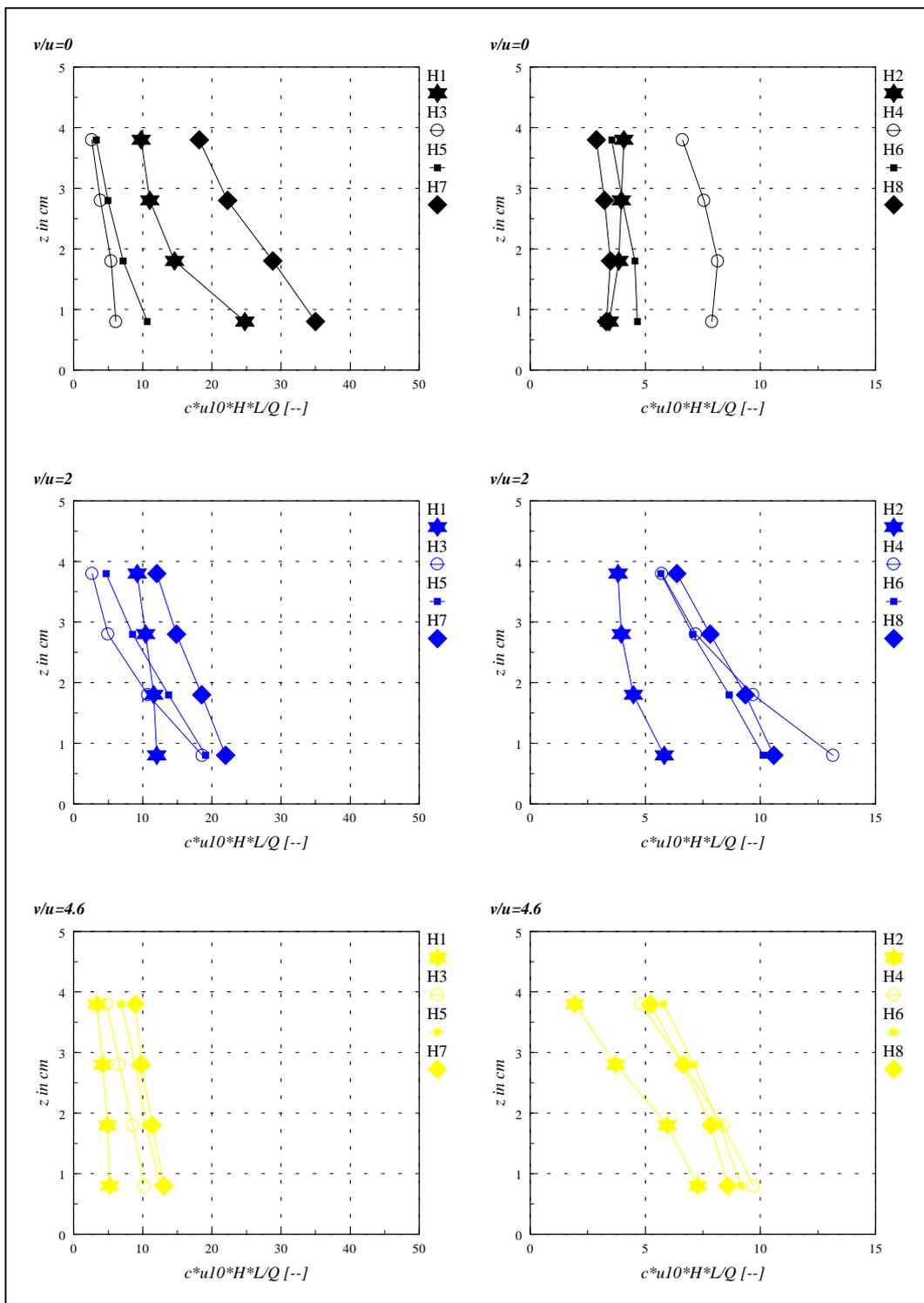


Abb. 7.3: Einfluß des Verhältnisses der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit auf die Konzentrationsprofile an den Meßstellen H1 - H8 bei der Windrichtung  $120^\circ$ .

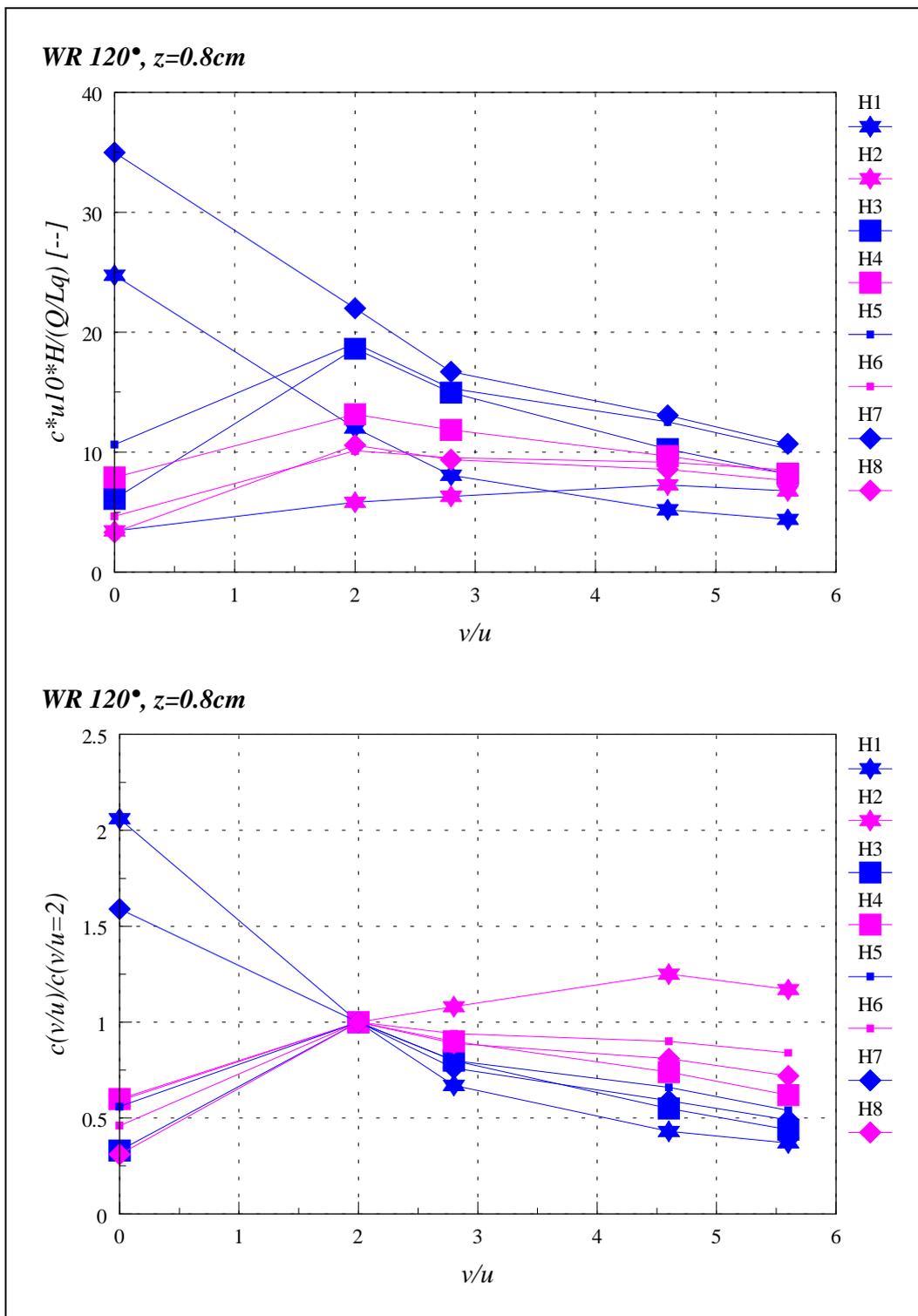


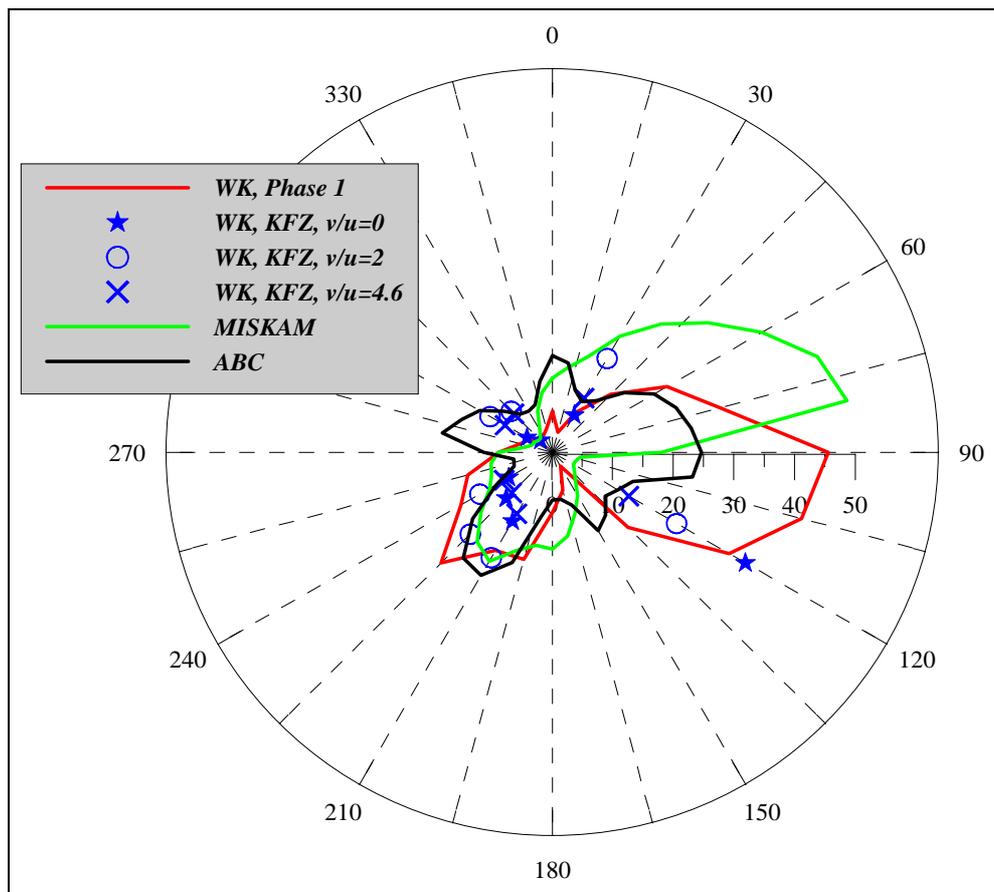
Abb. 7.4: Einfluß des Verhältnisses der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Windgeschwindigkeit auf die Konzentration in der Höhe  $z=0.8$  cm an den Meßstellen H1 - H8 bei der Windrichtung  $120^\circ$ .

## 8. Vergleich der Windkanalergebnisse für das Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße mit numerischen Berechnungen

Abschließend erfolgt ein Vergleich der Windkanalergebnisse mit Ergebnissen aus numerischen Berechnungen der Schadstoffbelastung im Untersuchungsgebiet mit den mikroskaligen Ausbreitungsmodellen Miskam und ABC. Die Berechnungen wurden im Rahmen des Projektes "Immissionsprognosen mit mikroskaligen Modellen - Vergleich von berechneten und gemessenen Größen" durchgeführt (Schädler, 1999). Ein Abgleich der Versuchsbedingungen hat stattgefunden, wobei jedoch nicht alle Parameter genau übereinstimmen.

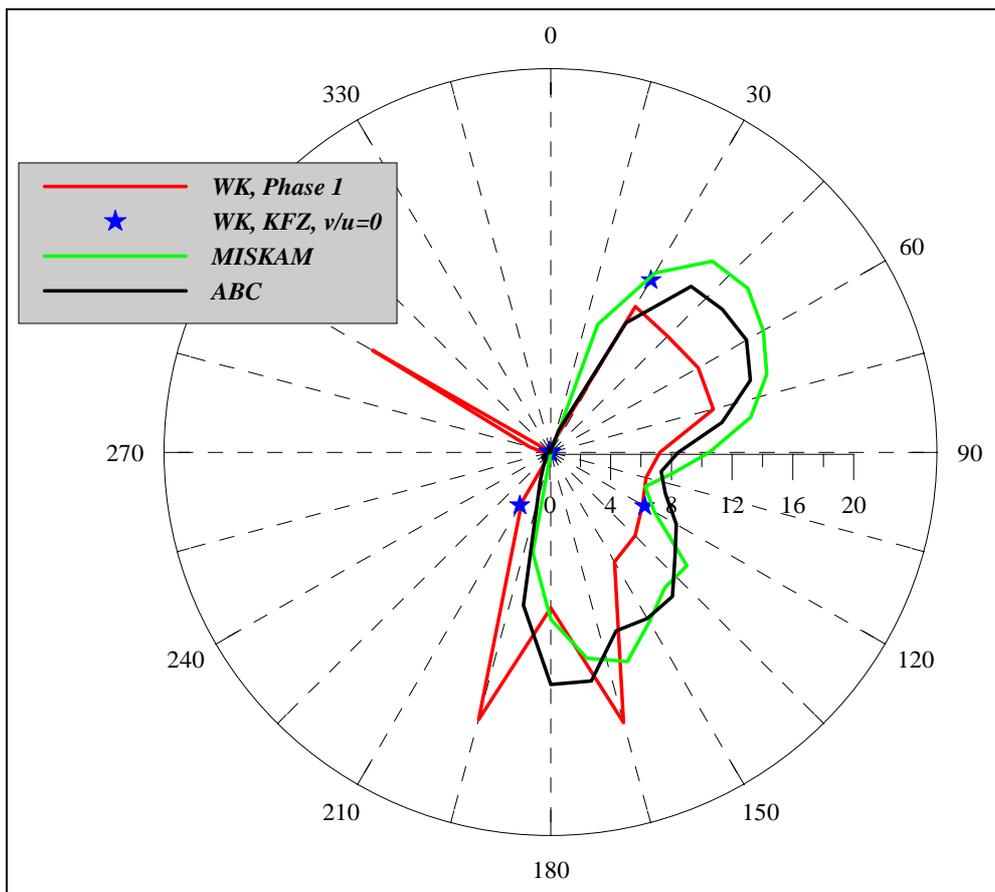
In Abb. 8.1 ist ein Vergleich der dimensionslosen Konzentrationswerte am Meßpunkt H7 in der Hauptstätter Straße zu sehen. Dargestellt ist der Verlauf der Konzentrationen in Abhängigkeit von der Windrichtung. Aufgetragen sind die Windkanalergebnisse aus der ersten Versuchsphase (rote Linie), d.h. den Messungen ohne Berücksichtigung der Kfz - erzeugten Turbulenz, Ergebnisse aus der Kfz - Turbulenz Studie bei stehenden Verkehr (blaue Sternchen) und den Geschwindigkeitsverhältnissen  $v/u = 2$  (blaue Kreise) und  $v/u = 4.6$  (blaue Kreuze), sowie Ergebnisse aus Ausbreitungsrechnungen mit den Modellen Miskam (grüne Linie) und ABC (schwarze Linie). Die Windrichtung wurde im Falle der numerischen Modellierung schrittweise in  $10^\circ$  - Schritten, bei den Windkanalversuchen in  $15^\circ$  - Schritten variiert.

Die Übereinstimmung zwischen den Windkanalergebnissen und den mit MISKAM berechneten Konzentrationen ist relativ gut. Sowohl der Verlauf der Konzentrationen als auch die Höhe der Konzentrationen sind ähnlich. Es ist jedoch ein Versatz der Kurven für die östlichen Windrichtungen zu beobachten. Der Vergleich mit Berechnungen mit dem Ausbreitungsmodell ABC liefert einer schlechtere Übereinstimmung. Die Modellsimulationen zeigen insbesondere hinsichtlich der zu erwartenden Maximalkonzentration deutliche Abweichungen zu den experimentellen Daten. Der mit ABC berechnete Maximalwert ist in etwa um den Faktor 2 niedriger als der im Windkanal gemessene Maximalwert. Die Modellierung der Fahrzeugbewegung bewirkt eine Abschwächung der Windrichtungsabhängigkeit der Konzentrationen.



**Abb. 8.1:** Vergleich der Windkanalergebnisse an dem Meßpunkt H7 mit Berechnungen mit den Ausbreitungsmodellen Miskam und ABC.

Informationen über den experimentell ermittelten und numerisch berechneten Transport von Schadstoffen in Seitenstraßen liefert Abb. 8.2. Zu sehen ist der Vergleich der Ergebnisse für den Meßpunkt R4 in der Römerstraße. Der berechnete Konzentrationsverlauf beider Modelle ist ähnlich wie der bei den Windkanalversuchen gemessene. Betrachtet man einzelne Windrichtungen können jedoch deutliche Unterschiede in der Höhe der prognostizierten Konzentrationen festgestellt werden. Der Transport von Schadstoffen bei der Windrichtung  $300^\circ$  entgegengesetzt zur Richtung der Anströmung, welcher bei den Windkanalversuchen in der ersten Versuchsphase reproduzierbar gemessen wurde, wird von den numerischen Modellen nicht prognostiziert. Der Vergleich mit Windkanalergebnissen aus der Kfz - Turbulenz Studie, in welcher dieser Transport ebenfalls nicht beobachtet werden konnte, deutet darauf hin, daß dieses Ergebnis sehr stark von lokalen Parametern abhängt und beispielsweise das Design der Linienquelle einen großen Einfluß hat.



**Abb. 8.2:** Vergleich der Windkanalergebnisse an dem Meßpunkt R4 in der Römer Straße mit Berechnungen mit den Ausbreitungsmodellen Miskam und ABC.

Dieser Vergleich der Windkanalergebnisse, auch für den Meßpunkt H7, aus der ersten Versuchsreihe und der Kfz - Turbulenz Studie verdeutlicht noch einmal die Sensitivität der Ergebnisse bezüglich kleinskaliger Veränderungen in der Straßenschlucht. Ein wichtiger Aspekt, welcher bei weiteren Studien noch einmal aufgegriffen werden sollte, ist die Frage der korrekten Modellierung der Freisetzung der Kfz - Abgase. Bei der üblichen Vorgehensweise Kfz - Abgase als möglichst exakt definierte Linienquelle zu modellieren, sind die an einzelnen Meßpunkten zu erwartenden Konzentrationen in komplexen Bebauungsstrukturen, wie beispielsweise in der Hauptstätter Straße, besonders stark von lokalen Parametern abhängig. Ist infolge der Verwirbelung durch die Kraftfahrzeuge eine eher gleichmäßige Anfangsverteilung der Schadstoffe über die Straßenbreite und gewisse vertikale Ausdehnung der Quelle vorhanden werden diese lokalen Einflüsse abgeschwächt.



## **9. Schlußfolgerungen und offene Fragen**

Bei der Modellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten wird üblicherweise die Bewegung der Kraftfahrzeuge nicht explizit berücksichtigt. Es stellt sich die Frage inwiefern strömungsmechanische Effekte, welche durch die fahrenden Kraftfahrzeuge induziert werden, die Transportvorgänge in Straßenschluchten beeinflussen. Eine Literaturstudie zeigt, daß in den Ergebnissen aus Naturmessungen ein Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die mittleren und turbulenten Strömungsbedingungen im Nahbereich von Straßen in freiem Gelände beobachtet wurde. Eine Übertragung der Ergebnisse auf innerstädtische Situationen ist jedoch nicht ohne zusätzliche Informationen durchzuführen. Möglicherweise ist der Einfluß in bebauten Gebieten gegenüber den turbulenten, komplexen Strömungsvorgängen im Nahbereich der Gebäude zu vernachlässigen. Die Klärung dieser Fragen bildete die Motivation für das vorgestellte Projekt. Es wurden Windkanalversuche mit Modellen von idealisierten und realen städtischen Bebauungsstrukturen durchgeführt, in welchen der Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die Transportprozesse in Straßenschluchten mit einer speziellen Versuchstechnik simuliert wurde.

Grundlage der Studie ist ein Modellgesetz für die Simulation von Kfz - erzeugter Turbulenz im Windkanal, welches von Plate (1982) beschrieben wurde. Im Rahmen von Vorarbeiten für das Projekt wurde dieses Modellgesetz systematisch überprüft. Es konnte nachgewiesen werden, daß bei Situationen mit Gegenverkehr ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Konzentrationsverteilung in einer Straßenschlucht und einem Ähnlichkeitskriterium besteht, welches aus dem Modellgesetz von Plate (1982) abgeleitet wurde. Das Konzentrationsmaximum an der leeseitigen Schluchtwand einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht nimmt mit zunehmendem Verhältnis von Fahrzeuggeschwindigkeit zu Windgeschwindigkeit und steigender Verkehrsdichte ab. Diese Abnahme der leeseitigen Maximalkonzentration wird auch bei den Versuchen mit größeren Straßenbreiten beobachtet. Die Änderungen liegen in der gleichen Größenordnung. Die Abnahme ist nur geringfügig schwächer im Falle der breiteren Straßen. Ein Vergleich der Windkanalergebnisse mit Ergebnissen aus numerischen Ausbreitungsmodellen, welche einen Ansatz zur Berücksichtigung der verkehrsinduzierten Turbulenz enthalten, liefert eine gute Übereinstimmung.

Bei einer parallelen Anströmung der Straßenschlucht führt die Modellierung der Fahrzeugbewegung im Falle von Gegenverkehr zu äußerst komplexen Strömungsverhältnissen in der Straßenschlucht. Die symmetrische strahlartige Strömung bei ruhendem Verkehr wird signifikant gestört und die daraus resultierenden Veränderungen der Konzentrationsverteilung können nicht mit einfachen Parametrisierungen beschrieben werden.

Signifikante Veränderungen der mittleren Transportprozesse werden bei allen untersuchten Situationen im Falle von Richtungsverkehr beobachtet. Die Windkanalergebnisse zeigen in diesen Fällen eine deutliche Strömung entlang der Straße, welche dazu führt, daß sich in einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht keine typische "Canyon - Vortex" Strömung bildet. Bei einer straßenparallelen Anströmung kann bei Situationen mit Fahrtrichtung entgegengesetzt zur Windrichtung eine signifikante Abnahme, bzw. im Falle hoher Fahrzeuggeschwindigkeiten sogar ein Blockieren des Transports der Schadstoffe entlang der Straße beobachtet werden. Ein Vergleich dieser Ergebnisse mit Naturmessungen oder Daten aus Modellrechnungen konnte leider nicht durchgeführt werden, da keine Informationen über die Strömungsverhältnisse für ähnliche Situationen in der Literatur veröffentlicht sind. Dieser Vergleich sollte ein Ziel zukünftiger Studien sein, um sicherzustellen, daß die Ergebnisse auf die Natur zu übertragen sind.

Eine Studie mit Variationen der Plättchengeometrie hat offene Fragen hinsichtlich der Dimensionierung der im Modell bewegten Hindernisse aufgezeigt. Es wird ein Einfluß der Dicke der Metallplättchen beobachtet, welcher nicht alleine durch Veränderungen der Widerstandsbeiwerte  $C_{DT}$  mit zunehmender Dicke erklärt werden kann. Möglicherweise ist die Wirkung dünner Metallplättchen im Vergleich zu Kraftfahrzeugen in der Natur zu groß.

Mit Hilfe von LDA - Messungen der horizontalen Geschwindigkeitskomponenten in der Straßenschlucht konnte nachgewiesen werden, daß die Veränderungen des Strömungsfeldes nicht durch den speziellen Versuchsaufbau, d.h. durch Zahnriemen, auf welchen die Modellfahrzeuge (scharfkantige, dünne Metallplättchen) montiert waren, verursacht werden. Die Bewegung der Zahnriemen alleine bewirkt keine nachweisbaren Veränderungen im Strömungsfeld. Die beobachteten Effekte werden eindeutig durch die Bewegung der Metallplättchen in der Straße hervorgerufen.

Die Modellierung der Fahrzeugbewegung in dem Gebiet Stuttgart Hauptstätter Straße bewirkte eine Abschwächung der horizontalen Gradienten in der Konzentrationsverteilung, welche im Falle ruhenden Verkehrs durch die komplexen Strömungsverhältnisse im Bereich der Straßenkreuzungen und Durchgängen zu Hinterhöfen o.ä. verursacht werden. Ein ähnliches Ergebnis wurde auch bei einer Integration eines Moduls zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung in das numerische Ausbreitungsmodell MISKAM für eine Straße in Frankfurt erzielt (Eichhorn et. al., 1998). Angaben inwiefern eine direkte Übertragung der untersuchten Werte der Ähnlichkeitskennzahl (Kombination aus Geschwindigkeitsverhältnis und Verkehrsdichte) auf die Natur möglich ist, können leider nicht gemacht werden, da der geplante Vergleich mit Naturmessungen aufgrund fehlender Daten nicht durchgeführt werden konnte. Möglicherweise sind bereits relativ niedrige Geschwindigkeitsverhältnisse, welche eine Anfangsverwirbelung des Tracergases bewirken und dadurch auch in dem beschriebenen Ausgleich der horizontalen Konzentrationsverteilung resultieren, ausreichend.

Abschließend kann festgehalten werden:

Die strömungsmechanische Wirkung der Fahrzeugbewegung ist bei der physikalischen oder numerischen Modellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten nicht zu vernachlässigen. Mit der vorliegenden Arbeit wurden wichtige Grundlagen für die Integration dieses Parameters in Immissionsprognosen geschaffen. Eine weitere Analyse der erzielten Datensätze wird derzeit im Rahmen eines EG - Projektes (Optimisation of Modelling Methods for Traffic Pollution in Streets, TRAPOS) durchgeführt. Die Windkanalergebnisse werden mit Naturmessungen verglichen und es werden Ansätze zur Parametrisierung bzw. Vorschläge zur Berücksichtigung der Fahrzeugbewegung in numerischen Ausbreitungsmodellen erarbeitet.

Gleichzeitig wurden durch die erzielten Ergebnisse aber auch neue, offene Fragen aufgeworfen. Insbesondere die signifikanten Veränderungen bei Situationen mit Richtungsverkehr sollten im Rahmen von weiteren Studien überprüft werden. Neben Windkanalversuchen sollten Experimente in der Natur und Ansätze in numerischen Modellen berücksichtigt werden, welche es auch ermöglichen den Einfluß der Fahrzeugbewegung auf die mittleren Strömungsverhältnisse zu beschreiben. Im Falle der numerischen Modellierung bedeutet dies, daß auch in den Impulserhaltungsgleichungen ein Term, welcher die Bewegung der Fahrzeuge be-

schreibt integriert werden muß. Die derzeit verwendeten Ansätze zur Berücksichtigung der Kfz - erzeugten Turbulenz beziehen sich in der Regel nur auf zusätzliche Terme in der Energieerhaltungsgleichung. Sinnvoll ist sicherlich auch den Einfluß von Variationen der Plättchengemetrie bei den Modellversuchen weiterzuverfolgen.

## 10. Literatur

- F. Albrecht, 1933.** Untersuchungen der vertikalen Luftzirkulation in der Grosstadt, *Met. Zt.*, **50**, pp.93-98.
- W. Bächlin, W. Theurer, 1995.** Der Einsatz von Windkanälen bei Umweltfragen, *Staub Reinhaltung der Luft*, **55**, pp. 383-388.
- R. Berkowicz, O. Hertel, S.E. Larsen, N.N. Sorensen, M. Nielsen, 1997.** Modelling Traffic Pollution in Streets. Danish Ministry of Environment and Energy, National Environmental Research Institute, Roskilde, Denmark, ISBN: 87-7772-307-4.
- A.K. Blackadar, 1997.** Turbulence and Diffusion in the Atmosphere. Lectures in Environmental Sciences, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- W. Brilon, H.J. Niemann, E. Romberg, 1987.** Windkanaluntersuchungen zur Ausbreitung von Abgasen an Autobahnen. *Straßenverkehrstechnik*, **31**, Nr. 4, pp. 122-133.
- J.E. Cermak, A.G. Davenport, E.J. Plate, D.X.F. Viegas, 1995.** Wind Climate in Cities, Kluwer Academic Publishers, NATO ASI Series, Series E: Applied Sciences - Vol. 227.
- D. Delaunay, N Houseaux , 1997.** Turbulence et Quantite de Mouvement induites par les Vehicules a proximite d'une Voie Urbaine: Mesures in situ. Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB), Nantes, Report EN-AEC 97.68 c.
- F. Durst, A. Melling, J.H. Whitelaw, 1987.** Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie. Verlag G. Braun.
- R.E. Eskridge, J.C.R. Hunt, 1979.** Highway Modeling Part I: Prediction of Velocity and Turbulence Fields in the Wake of Vehicles. *Journal of Applied Meteorology*, **18**, pp.387-400.
- R.E. Eskridge, F.S. Binkowski, J.C.R. Hunt, T.L. Clark, K.L. Demerjian, 1979.** Highway Modeling Part II: Advection and Diffusion of SF<sub>6</sub> Tracer Gas. *Journal of Applied Meteorology*, **18**, pp.401-412.
- R.E. Eskridge, R.S. Thompson, 1982.** Experimental and Theoretical Study of the Wake of a Block-shaped Vehicle in a Shear-Free Boundary Flow. *Atmospheric Environment*, **16**, pp. 2821-2836.
- R.E. Eskridge, S.T. Rao, 1983.** Measurement and Prediction of Traffic-Induced Turbulence and Velocity Fields Near Roadways. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, pp.1431-1443.
- R.E. Eskridge, S.T. Rao, 1986.** Turbulent Diffusion behind Vehicles: Experimentally Determined Turbulence Mixing Parameters. *Atmospheric Environment*, **20**, pp. 851-860.
- F. Fezer, 1995.** Das Klima der Städte, Justus Perthes Verlag Gotha.
- C. Gentil, 1998.** Experimentelle Studie über die Modellierung von Kfz - erzeugter Turbulenz in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal. Vertiefearbeit am Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe.

- H.W. Georgii, E. Busch, E. Weber, 1967.** Untersuchung über die zeitliche und räumliche Verteilung der Immissions - Konzentration des Kohlenmonoxids in Frankfurt am Main. Berichte des Instituts für Meteorologie und Geophysik der Universität Frankfurt am Main, Nr. 11.
- S.F. Hoerner, 1965.** Fluid dynamic Drag, 2<sup>nd</sup> Edition, published by the Author, Midland Park.
- R.P. Hosker, 1984.** Flow and Diffusion near Obstacles, *Atmospheric Science in power Production*, Editor D. Randerson, pp. 241-326, Tech. Info. Cent., U.S. Dept. Energy, Oakridge, Tennessee.
- W.-H. Hucho, 1994.** Aerodynamik des Automobils. VDI - Verlag GmbH, Düsseldorf.
- R. Kaiser, 1996.** Windkanalstudie konvektiver Grenzschichtströmungen mit angehobener Temperaturinversion, Dissertation, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 57.
- P. Klein, M. Rau, Z. Wang, E.J. Plate, 1994.** Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen (Experimente). Forschungsbericht KfK-PEF 124, Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- P. Kastner-Klein, E.J. Plate, 1995.** Belastungen durch Luftverunreinigungen an Straßen -- Untersuchungen im Windkanal, 8. ALS-Kolloquium "Ausbreitung von Luftverunreinigungen", Universität Stuttgart, 5. Oktober 1995.
- P. Kastner-Klein, E. Fedorovich, E. J. Plate, 1997.** Gaseous pollutant dispersion around urban-canopy elements: wind tunnel case studies. *Int. J. Environment and Pollution*, **8**, pp. 727-737.
- P. Kastner-Klein, E.J. Plate, 1998.** Strömungsmechanische Aspekte in der Stadtplanung im Hinblick auf eine Reduktion von Kfz-Immissionen. FZKA-BWPLUS 3 (Mai 1998): F. Horsch et al. (Hrsg.): Diskussionskreise "Maßnahmen zur Luftreinhaltung" (PEF) beim Statusseminar 1998.
- P. Kastner-Klein, R. Berkowicz, A. Rastetter, E.J. Plate, 1998.** Modelling of vehicle induced turbulence in air pollution studies for streets. *Proc. of the 5th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*. Rhodes, Greece, 18-21 May 1998.
- P. Kastner-Klein, E.J. Plate, 1999.** Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons. *Atmospheric Environment*, **33**, pp. 3973-3979.
- P. Kastner-Klein, E.J. Plate, 1999.** Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von Kfz-bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten. *Abschlußbericht zum Projekt PEF 2 95 001*, FZKA-BWPLUS 9 (Januar 1999), PEF; Forschungszentrum Karlsruhe.
- P. Kastner-Klein, 1999.** Experimentelle Untersuchung der strömungsmechanischen Transportvorgänge in Straßenschluchten. *Dissertationsreihe am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe*, ISSN 1439 - 4111, Heft 1999/2.
- A.N. Kolmogorov, 1941.** Energy dissipation in locally isotropic turbulence. *Doklady AN SSSR*, **32**, No. 1, 19 - 21.

- Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, 1993.** Lufthygiene und Klima, Ein Handbuch der Stadt- und Regionalplanung, Hrsg.: H. Schirmer, W. Kuttler, J. Löbel, K. Weber, VDI Verlag.
- B. Leidl, P. Kastner-Klein, M. Rau, R.N. Meroney, 1997.** Concentration and flow distributions in the vicinity of U-shaped buildings: Wind tunnel and computational data, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **67-68**, 745-755.
- P. Louka, 1998.** Measurements of Airflow in an Urban Environment. Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy at the University of Reading, UK.
- R.N. Meroney, M. Pavageau, S. Rafailidis, M. Schatzmann, 1996.** Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **62**, pp. 37-65.
- H. Nakaguchi, 1978.** Recent Japanese Research on Three-dimensional Bluff Bodies Flows relevant to Road-Vehicle Aerodynamics. Aerodynamic Drag Mechanisms of Bluff Bodies and Road Vehicles, G. Sovran, T. Morel, W.T. Mason, Eds., Plenum Press, New York, pp. 227-252.
- H.J. Niemann, 1995.** Das Merkblatt "Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik" der Windtechnologischen Gesellschaft, WTG - Berichte Nr. 3: *Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten*, Hrsg. E. Plate, Windtechnologische Gesellschaft, Aachen.
- T.R. Oke, 1987.** Boundary Layer Climates, Routledge, New York, 2nd edition, 1987.
- T.R. Oke, 1988.** Street design and the urban canopy layer climate, *Energy and Buildings*, **11**, pp. 103-113.
- M. Pavageau, S. Rafailidis, M. Schatzmann, 1997.** A comprehensive experimental databank for the verification of urban car emission dispersion models. *Int. J. Environment and Pollution*, **8**, pp. 738-746.
- E.J. Plate, 1982.** Engineering Meteorology. Elsevier Scientific Publishing Company.
- E.J. Plate, 1982.** Windkanalmodellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten. *Kolloquiumsbericht Abgasbelastungen durch den Straßenverkehr*, S. 61-83, Verlag TÜV Rheinland.
- E.J. Plate, 1995.** Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten, WTG - Berichte Nr. 3, Hrsg. E. Plate, Windtechnologische Gesellschaft, Aachen.
- E.J. Plate, 1995.** Windprofile in der Gebäudeaerodynamik, WTG - Berichte Nr. 3: *Windprobleme in dichtbesiedelten Gebieten*, Hrsg. E. Plate, Windtechnologische Gesellschaft, Aachen.
- E.J. Plate, P. Kastner-Klein, 1995.** Simulation der Ausbreitung von KFZ-Abgasen -- Fachliche Impulse durch Windkanalmessungen, Experten-Workshop "Verkehr und Immissionen", Forschungszentrum Karlsruhe, 12.7.1995.
- E.J. Plate, P. Kastner-Klein, 1998.** Wind tunnel modelling of traffic induced pollution in cities. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> German-Japanese meeting "Klimaanalyse für die Stadtplanung" 25.-27. September 1997, Research Center for Urban safety and Security Kobe University, Japan. Special Report No. 1, T. Okimura, M. Moriyama, H. Zimmermann (Eds.), pp. 206-221.

- E.J. Plate, 1999.** Methods of investigating urban wind fields – physical models. *Atmospheric Environment*, **33**, pp. 3981-3989.
- S.T. Rao, G. Sistla, R.E. Eskridge, W.B. Petersen, 1986.** Turbulent Diffusion behind Vehicles: Evaluation of Roadway Models. *Atmospheric Environment*, **20**, pp. 1095-1103.
- A. Rastetter, 1997.** Experimentelle Untersuchung in einem atmosphärischen Grenzschichtwindkanal über den Einfluß von Kfz - erzeugter Turbulenz auf die Schadstoffausbreitung in Straßenschluchten. Diplomarbeit am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe.
- J.A. Roberson, C. T. Crowe, 1993.** Engineering Fluid Mechanics. 5<sup>th</sup> Edition, Houghton-Mifflin, Boston.
- R. Röckle, C.-J. Richter, 1995.** Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PEF 136.
- B. Ruck, 1987.** Laser - Doppler - Anemometrie. AT - Fachverlag.
- G. Schädler, W. Bächlin, A. Lohmeyer, T. van Wees, 1996.** Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle, Forschungszentrum Technik und Umwelt, Karlsruhe, FZKA-PEF 138.
- M. Schatzmann, S. Rafailidis, M. Pavageau, 1997.** Some remarks on the validation of small - scale dispersion models with field and laboratory data., *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **67-68**, 885-893.
- J.F. Sini, S. Anquetin, P.G. Mestayer, 1996.** Pollutant Dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 30, pp. 2659-2677.
- R. Stern, R.J Yamartino, 1998.** Development and Initial Application of the MICRO CALGRID Photochemical Model for High-resolution Studies of Urban Environments. Preprints of the 23<sup>rd</sup> NATO/CCMS ITM on Air Pollution Modeling and its Application, 28.9-2.10.1998, Varna, Bulgaria.
- W. Theurer, 1999.** Typical building arrangements for urban air pollution modelling. *Atmospheric Environment*, **33**, pp. 4057-4066.
- VDI Richtlinie 3783, Blatt 12, 1999.** Umweltmeteorologie. Physikalische Modellierung von Strömungs - und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht. Kommission Reinhaltung der Luft im VDI und DIN, Vorentwurf vom 2.2.1999.
- R. von Kuhlmann, J. Eichhorn, 1998.** Parameterization of traffic induced turbulence in the three dimensional air pollution model MISCAM. *Proc. of the 5th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes.* Rhodes, Greece, 18-21 May 1998.