

PEF - Projekt „Europäisches Forschungszentrum
für Maßnahmen zur Luftreinhaltung“

Forschungsbericht FZKA-PEF

Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von KFZ- bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten

von

P. Kastner-Klein, E.J. Plate

Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe

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

Förderkennzeichen: 2 95 001

99 Seiten
62 Abbildungen
12 Tabellen
37 Literaturstellen

März 1998

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	3
3 Ziele und Vorgehensweise	7
4 Windkanalmodellierung	9
4.1 Grenzschichtwindkanal	9
4.2 Anströmbedingungen	11
4.3 Modellierung von KFZ - Emissionen	14
4.4 Umrechnung der Windkanalergebnisse auf Naturverhältnisse	15
4.4.1 Berechnung von Momentanwerten	15
4.4.2 Berechnung statistischer Kenngrößen	16
4.5 Meßtechnik	17
4.5.1 Konzentrationsmessungen	17
4.5.2 Geschwindigkeitsmessungen	17
4.5.3 Visualisierung	19
5 Überprüfung der Quellbedingungen	20
5.1 Linienquelle in homogener Rauigkeit	20
5.2 Testmessungen mit einer Straßenschluchtkonfiguration	24

6	Untersuchung der Ausbreitungsverhältnisse in Straßenschluchten	28
6.1	Versuchsaufbau	28
6.2	Ergebnisse für eine beidseitig bebaute zweidimensionale Straßenschlucht (Referenzfall)	30
6.3	Vergleich einseitig und beidseitig bebaute Straßenschlucht	32
6.4	Einfluß der Gebäudegeometrie	34
	6.4.1 Variation der Gebäudelänge	34
	6.4.2 Variation der Gebäudebreite	37
6.5	Einfluß der Umgebungsbebauung	39
6.6	Einfluß der Windrichtung	40
7	Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen mit Linienquellen in Karlsruhe und Hamburg	46
7.1	Versuchsbedingungen	46
7.2	Vergleich der Ergebnisse für Linienquellen in homogener Rauigkeit	46
	7.2.1 Vergleich der Vertikalprofile	47
	7.2.2 Anpassung der Vertikalprofile mit einem modifizierten Gaußansatz	49
	7.2.3 Vergleich der Lateralprofile	55
7.3	Vergleich der Ergebnisse aus den Straßenschluchtuntersuchungen	56
8	Untersuchung der Ausbreitungsverhältnisse in Straßenkreuzungen	60
8.1	Versuchsaufbau und Versuchsprogramm	60
8.2	Diskussion der Ergebnisse	62
	8.2.1 Referenzfall bei senkrechten Anströmrichtungen	63
	8.2.2 Einfluß der Dachform und Gebäudehöhe	67

9	Untersuchung der Strömungsverhältnisse in Straßenkreuzungen	74
9.1	Laser - Lichtschnitt - Aufnahmen	74
9.2	Laser - Doppler - Anemometrie - Messungen	75
9.2.1	Versuchsaufbau und Versuchsprogramm	75
9.2.2	Einfluß des Versuchsaufbaus	79
9.2.3	Ergebnisse der Strömungsfeldmessungen der zweiten Versuchsphase (Herbst 97)	82
9.2.4	Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Versuchsphasen und Schlußbetrachtung	95
	Literaturverzeichnis	97

Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von KFZ- bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten

P. Kastner-Klein, E.J. Plate

Zusammenfassung

Das Ziel des vorgestellten Projektes war, eine Datenbasis über die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in Stadtgebieten zu schaffen, welche die Verifizierung und Verbesserung numerischer mikroskaliger Modelle ermöglicht. Hierzu wurden im Windkanal typische urbane Bebauungsstrukturen (Straßenschluchtsituationen und Straßenkreuzungen) untersucht. Die Emission von Kraftfahrzeugen wurde durch ein Tracergas, welches bodennah aus Linienquellen freigesetzt wurde, modelliert.

Im Rahmen umfangreicher Voruntersuchungen wurden zunächst die Quellbedingungen überprüft und es konnte die Reynoldsunabhängigkeit der Ergebnisse nachgewiesen werden. Daraus folgt, daß die Versuche nur für eine Windgeschwindigkeit durchzuführen sind, und daß eine Darstellung der Ergebnisse in der Form von dimensionslosen Konzentrationen

$c_m^* = \frac{c_m \cdot u_{ref} \cdot H}{Q_m / L_{m,Q}}$ sinnvoll ist. Hierbei wird die im Windkanal gemessene

Tracergaskonzentration c_m bezogen auf die Quellstärke $Q_m / L_{m,Q}$ des Tracergases und mit einer Referenzgeschwindigkeit u_{ref} und einer Referenzlänge, in diesem Falle die Gebäudehöhe H , multipliziert.

Während einer ersten intensiven Versuchsphase wurden Konzentrationsmessungen in Straßenschluchten durchgeführt. Das Versuchsprogramm beinhaltet eine Parameterstudie, ausgehend von einfachen Modellen typischer Straßenschluchten. Als Referenzfall wird eine senkrecht angeströmte, zweidimensionale Straßenschlucht betrachtet. Die Konzentrationsverteilung kann wie folgt beschrieben werden:

- Die Konzentrationen am leeseitigen Gebäude sind deutlich höher als die am luvseitigen Gebäude. In Bodennähe werden bis zu achtmal höhere Konzentrationen beobachtet.
- Am leeseitigen Gebäude treten hohe vertikale Konzentrationsgradienten auf. Das Konzentrationsmaximum liegt in Bodennähe. In halber Gebäudehöhe haben die Werte teilweise bereits um mehr als die Hälfte abgenommen.
- Am luvseitigen Gebäude sind die Konzentrationen vertikal gleichmäßig verteilt.
- Die Position der Quelle hat einen starken Einfluß auf die Konzentrationsprofile am leeseitigen Gebäude, während kein Einfluß am luvseitigen Gebäude festgestellt wurde.
- Auf dem Dach des leeseitigen Gebäudes wurden Konzentrationen gemessen, die höher waren als die Konzentrationen an der Wand des luvseitigen Gebäudes.

Anschließend wurde der Einfluß der Gebäudegeometrie, der Umgebungsbebauung und der Windrichtung untersucht. Ebenso liegen Informationen für einseitig bebaute Straßenschluchten vor. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Eine beidseitig bebaute Straßenschlucht stellt bei senkrechter Anströmung den „worst - case“ hinsichtlich der Schadstoffbelastung dar. An der leeseitigen Schluchtwand werden Konzentrationen gemessen die deutlich höher sind als bei einseitiger Bebauung.
- Bei einseitig bebauten Straßenschluchten stellt die Konfiguration Quelle im Lee eines Gebäudes den ungünstigeren Fall dar als Quelle im Luv eines Gebäudes. Der Konzentrationsunterschied in Bodennähe beträgt etwa Faktor 3.
- Für den Fall Quelle im Lee des Gebäudes wird nur im unteren Wandbereich (ca. 30%) ein Einfluß der Quellposition beobachtet. Im Fall der luvseitigen Quelle sind Unterschiede über den gesamten Wandbereich zu erkennen.
- Die Variation der Gebäudelänge hat einen signifikanten Einfluß auf die Konzentrationsverteilung in Straßenschluchten. Beim Übergang von zweidimensionalen Situationen zu dreidimensionalen, bei welchen ein seitliches Einströmen in die Straßenschlucht möglich ist, steigen die Konzentrationen in der Schluchtmitte zunächst an und nehmen dann bei einer weiteren Abnahme der Gebäudelänge wieder ab.
- Die Variation der Gebäudebreite beeinflusst die Strömungsvorgänge im Dachbereich des leeseitigen Gebäudes. Durch die Ablösung der Strömung an der leeseitigen Gebäudekante bildet sich auf dem Dach ein Wirbel mit Rückströmung aus. Bei schlanken Gebäuden kann die Strömung auf dem Dach des Gebäudes nicht wieder anlegen. Es kommt zu einem signifikanten Transport von Schadstoffen auf das Dach des leeseitigen Gebäudes. Mit zunehmender Gebäudebreite wird dieser Transport abgeschwächt, da die Strömung auf dem Dach des leeseitigen Gebäudes wieder anlegt. Die Konzentrationen an den Dachpunkten sind deutlich geringer, während die Konzentrationen an den Gebäudewänden in der Straßenschlucht zunehmen. Die Ergebnisse lassen vermuten, daß das Verhältnis $B/H=1$ einen kritischen Wert darstellt, ab welchem ein Wiederanlegen der Strömung möglich ist.
- Ein ähnlicher Einfluß kann beim Anbringen von zusätzlichen Gebäuden stromaufwärts der Straßenschlucht beobachtet werden. Es kommt zu einer Konzentrationserhöhung an den Gebäudewänden und zu einer Konzentrationsabnahme auf den Gebäudedächern. Zu erklären ist dieser Effekt durch das Abheben der ankommenden Strömung.
- Die Variation der Windrichtung hat gezeigt, daß nur im Falle der Senkrechtanströmung das Konzentrationsmaximum in der Schluchtmitte liegt. Bereits bei einer Veränderung der Windrichtung um 15° kommt es zu einem Transport von Schadstoffen entlang der Straße und das Konzentrationsmaximum wird am Schluchtende beobachtet. Je nach Länge der Gebäude, können die am Schluchtende auftretenden Konzentrationen den Wert in der Schluchtmitte bei senkrechter Anströmung übersteigen.

Die Ergebnisse der Straßenschluchtuntersuchungen wurden dem Ingenieurbüro Lohmeyer zur Verfügung gestellt und ein Vergleich der Windkanalergebnisse mit numerischen Berechnungen wurde von Schädler et al. (1996) im Rahmen des Abschlußberichtes zum Projekt PEF 2 93 001 *Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle* zusammengefaßt.

In einer nächsten Versuchsphase wurden Studien über die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in der Umgebung von Straßenkreuzungen durchgeführt. Als Bebauungsstruktur wurde eine Straßenkreuzungssituation mit zwei sich rechtwinklig schneidenden Straßen ausgewählt. Im Referenzfall war die Bebauung in allen vier, an die Kreuzung grenzenden Quadranten gleich. Die Gebäude entsprechen aufgrund ihrer Form und ihren Abmessungen typischen Blockrandbebauungen, wie sie in Innenstädten häufig

vorzufinden sind. Zunächst wurden die Konzentrationsverteilungen an den Gebäudewänden ermittelt. Ähnlich wie im Falle der Straßenschluchtstudie wurden systematische Parametervariationen durchgeführt. Untersucht wurde der Einfluß der Windrichtung, der Dachform und der Gebäudehöhe im Kreuzungsbereich.

Als Ergebnis für den Referenzfall kann festgehalten werden, daß im Falle einer Straßenkreuzung bei einer senkrechten Anströmung der belasteten Straße, die Maximalkonzentrationen nicht im Kreuzungsbereich auftreten, sondern etwa um die halbe Gebäudelänge seitlich versetzt von der Kreuzungsmitte. Analog zu den Straßenschluchtkonfigurationen treten an den leeseitigen Wänden deutlich höhere Konzentrationen auf als an den luvseitigen. Vertikale Konzentrationsgradienten sind ebenfalls an den leeseitigen Wänden zu beachten und die Quellposition hat einen ähnlichen Einfluß wie im Falle einer Straßenschlucht. Konzentrationswerte aus Straßenschluchtuntersuchungen unterschätzen die Maximalkonzentrationen, welche im Falle der Straßenkreuzung gemessen wurden.

Der Einfluß der Windrichtung, der Dachform und der Gebäudehöhe im Kreuzungsbereich kann wie folgt zusammengefaßt werden:

Die in Bodennähe auftretenden Maximalkonzentrationen in der Umgebung von Straßenkreuzungen hängen stark von der Windrichtung ab. Im Referenzfall liegen die Werte der dimensionslosen Maximalkonzentration je nach Windrichtung zwischen 30 und 100. Fälle mit Spitzdächern führen bei den meisten Windrichtungen zu geringeren Maximalkonzentrationen, der Verlauf der Windrichtungsabhängigkeit bleibt aber ähnlich zum Referenzfall. Die Abschwächung liegt in der Größenordnung von 20%. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für einen Fall gefunden, bei welchem zwei der Gebäude um 2 cm erhöht wurden. Anders verhält es sich bei Fällen mit asymmetrischen Gebäudekonfigurationen, d.h. bei Fällen mit einer deutlichen Erhöhung eines Gebäudes. Sie führen zu signifikanten Konzentrationserhöhungen und einer Verschiebung der kritischen Windrichtungen. Bei ausgewählten Windrichtungen ergeben sich dadurch nahezu doppelt so hohe Maximalkonzentrationen wie im Referenzfall.

Abschließend wurden Strömungsfelder mit einer LDA - Anlage gemessen. Nach anfänglichen meßtechnischen Problemen, ist es gelungen, für drei Windrichtungen Datensätze über die mittleren und turbulenten Geschwindigkeiten im Kreuzungsbereich, aufzunehmen. Die Ergebnisse für die mittleren Windgeschwindigkeiten werden auszugsweise in Form von Pfeildiagrammen und Isolinien darstellungen präsentiert. Sie verdeutlichen die komplexen, dreidimensionalen Strömungsvorgänge innerhalb urbaner Bebauungsstrukturen. Die Vorgänge im Kreuzungsbereich werden durch die Wirbelablösungen an den Gebäudekanten beeinflusst. In den Straßenschluchten zwischen den Gebäuden bilden sich je nach Windrichtung typische "Canyon - Vortex" - Systeme mit signifikanten Vertikalkomponenten aus.

Alle aufgenommenen Datensätze wurden dem Partnerprojekt unter der Leitung der TÜV Energie und Umwelt GmbH zur Verfügung gestellt und werden zum Vergleich mit Ergebnissen aus Berechnungen mit numerischen Ausbreitungsmodellen verwendet.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß es gelungen ist, eine umfangreiche Datenbasis über die Ausbreitungs - und Strömungsverhältnisse in Straßenschluchten und in der Umgebung von Straßenkreuzungen zu erzeugen, welche eine gute Grundlage für die Evaluierung und Verbesserung numerischer Ausbreitungsmodelle bildet. Die Ergebnisse liefern neue Erkenntnisse über die Strömungs - und Transportvorgänge in bebauten Gebieten. Es wurde deutlich, daß lokale Veränderungen der Gebäudegeometrie zu signifikanten Veränderungen der Schadstoffbelastung führen können. Dabei wird nicht nur die bodennahe Verteilung der Schadstoffe beeinflußt, sondern auch der vertikale Austausch zwischen der Strömung innerhalb der Bebauung und der darüberliegenden, atmosphärischen Grenzschicht. Die Höhe der zu erwartenden Konzentrationsmaxima in einem Stadtgebiet, ist somit abhängig von den kleinskaligen Parametern der Bebauungsstruktur

Wind-tunnel study of vehicle emissions dispersion in urban areas

P. Kastner-Klein, E. Plate

Summary

The idea of the presented project was to study flow and dispersion in the vicinity of street-canyon intersections. Wind-tunnel experiments with models of typical street-canyon intersections were carried out. Traffic emissions were simulated by line sources. The datasets will be used for verification and improvement of numerical microscale models.

During first tests the source conditions were checked and the Reynolds-number independence was proved. As a next step concentration measurements in street canyons were performed. We were asked to extend this part of the studies by colleagues working on a PEF project comparing numerical solutions for street canyons with *in situ* measurements. They found that reliable datasets for street-canyon situations were still not available. Beginning with a reference case of a two-dimensional street canyon with a perpendicular approach flow, the effects of building geometry, surrounding buildings, and the wind direction were studied. Cases with a single row of buildings have also been investigated.

Finally concentration and flow fields around a street-canyon intersection were studied. The reference model configuration consisted of two perpendicular street canyons separating four building blocks of the same geometry. All model buildings were of the same height and had flat roofs. The dimensions and shapes of the buildings are representative of a typical block structures which can be often found in city centers. The effects of wind direction, roof shape, and building height near the intersection on concentration fields were examined. Flow-field measurements were conducted with a LDA-system. Datasets with mean values of velocity components and their r.m.s. values are available for three wind directions.

All measured datasets were submitted to the partner project of TÜV-Energy and Environment and will be compared with numerical model data.

An extensive database of flow and dispersion characteristics in the neighborhood of street-canyon intersections has been acquired. The results provide new information about the flow and transport processes in built up areas. Small-scale features of building design and composition (building shape, roof configuration, upwind building arrangement) were found to be important factors of concentration field modification.

Lage sind, die Schadstoffbelastung verursacht durch Kraftfahrzeugemissionen in dicht bebauten Gebieten, wie z.B.. Innenstädten oder Wohnvierteln, zu prognostizieren. Es soll aufgezeigt werden, mit welcher Genauigkeit Konzentrationen in Gebäudenähe berechnet werden können und welche Verbesserungen an den Modellen zu empfehlen sind. Hierbei wird an das Projekt 92/003/02, welches in Zusammenarbeit mit der TÜV Energie und Umwelt GmbH durchgeführt wurde, angeknüpft. Die Ergebnisse aus diesem Projekt hatten gezeigt, wie wichtig eine Verifikationsbasis für numerische Modelle im Hinblick auf Anwendungen in bebauten Gebieten und bei Nahfelduntersuchungen ist (Klein et al. 1994). Datensätze aus Windkanalversuchen können aufgrund ihrer Genauigkeit und der kontrollierten Versuchsbedingungen einen wesentlichen Beitrag leisten. Es wurde deshalb eine Erweiterung der Verifikationsbasis, die mit den Messungen am U-Gebäude und BASF-Gelände begonnen wurde, als allgemeines Ziel des vorgestellten Projektes formuliert. Konkret sollten Datensätze geschaffen werden, welche im Bezug zu praktischen Fragestellungen aus dem Bereich Ausbreitung von Kfz-Emissionen in Innenstadtbereichen stehen. Typische Gebäudekonfigurationen bei solchen Fragestellungen sind Straßenschluchten und Straßenkreuzungen. Straßenschluchtkonfigurationen wurden im Rahmen von umfangreichen Vorversuchen untersucht. Als Untersuchungsschwerpunkt des Projektes wurde im Antrag der wichtige Fall einer Straßenkreuzung (3D- Struktur) ausgewählt. Daten über die turbulenten Geschwindigkeitsfelder und Konzentrationsverteilungen im Kreuzungsbereich wurden ermittelt. Der Einfluß von verschiedenen Windrichtungen und Dachvarianten, d.h. Veränderungen der Dachform und Gebäudehöhe, auf die Verhältnisse im Kreuzungsbereich kann dokumentiert werden. Die Ergebnisse werden im Rahmen eines Parallelprojektes mit Berechnungen mit den schon im vorhergehenden Projekt verwendeten, numerischen Modellen verglichen und sollen bei Bedarf die Verbesserung der Modelle ermöglichen.

2. Stand der Forschung

In den letzten Jahren gab es zahlreiche Veröffentlichungen zum Thema Schadstoffbelastung in Stadtgebieten. Eine gute Einführung in die Problematik dieses Themengebietes und eine Klassifizierung der zu beachtenden physikalischen Vorgänge, in Abhängigkeit von der Skala, liefert der Beitrag von Mestayer und Anquetin (1995). So sind bei der Betrachtung der Schadstoffbelastung einer ganzen Stadt und deren Auswirkung auf das Umland, thermische Effekte, wie z.B. städtische Wärmeinseln zu berücksichtigen. Von Interesse für das beantragte Vorhaben sind Arbeiten, welche sich mit der Ausbreitung von Schadstoffen und den Strömungsverhältnissen in komplexen Strukturen beschäftigen, d.h. vorrangig lokale Fragestellungen bezüglich der Verhältnisse innerhalb einzelner Straßenzüge oder Stadtteile. Thermische Effekte sind bei diesen Fragestellungen in der Regel zu vernachlässigen. Zu unterscheiden sind die betrachteten und vorgestellten Untersuchungsmethoden. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen: Durchführung von Naturmessungen, Modellierung im Windkanal und die numerische Modellierung. An dieser Stelle soll ein kurzer Überblick über die aus Veröffentlichungen bekannten Zusammenhänge gegeben werden und die offenen Fragen aufgezeigt werden.

Ein wesentliches Phänomen der Strömungsvorgänge in Straßenzügen ist der sogenannte „Canyon - Vortex“, welcher sich in Straßenschluchten bei Windrichtungen senkrecht zur Straßennachse ausbildet, so daß die Windrichtung in der Straße in Bodennähe entgegengesetzt zur Windrichtung im Dachniveau ist. Die ersten Nachweise für dieses Wirbelsystem wurden bereits von Albrecht (1933) erbracht. Später wurden sie von Georgii et al. (1967) verifiziert. Die Folge des „Canyon - Vortex“, ist eine Anreicherung der Schadstoffe in der Straße, da die Luft oft mehrere Umdrehungen in der Straße durchläuft bevor es zu einem Austausch mit der Umgebung kommt. Zudem kommt es zu einem starken Konzentrationsgradienten quer zur Straßennachse, so daß die leeseitigen Konzentrationen deutlich höher sind als die luvseitigen.

Ein wesentliches Kriterium für die Ausbildung des „Canyon - Vortex“ ist der Abstand der Gebäude. Nach Oke (1988) kann bei der Umströmung von Gebäuden in Abhängigkeit vom Verhältnis der Gebäudehöhe zum Abstand zwischen den Gebäuden H/S eine Klassifizierung in drei typische Strömungsregime vorgenommen werden. Analog zu Abb. 2.1 werden sie bezeichnet als:

- *Regime 1: Isolierte Rauheitsströmung:* Der Abstand zwischen den Gebäuden ist größer als die Zonen der Gebäudenachlaufströmung und des Frontwirbels des folgenden Gebäudes. Die Umströmung der Einzelgebäude wird gegenseitig nicht gestört.
- *Regime 2: Wirbelüberlagerungsströmung:* Zwischen den Gebäuden kommt es zu einer Überlagerung der Gebäudenachlauf- und Frontwirbelsysteme. Ein Wiederaanlegen der Strömung am Boden ist nicht mehr möglich.
- *Regime 3: Abgehobene Strömung:* Für geringe Gebäudeabstände kommt es zu einer Art Entkopplung zwischen der Strömung oberhalb der Gebäude und der Strömung zwischen den Gebäuden. Die ankommende Strömung hebt ab und zwischen den Gebäuden bilden sich aufgrund der Scherkräfte die „Canyon - Vortex“ Systeme aus.

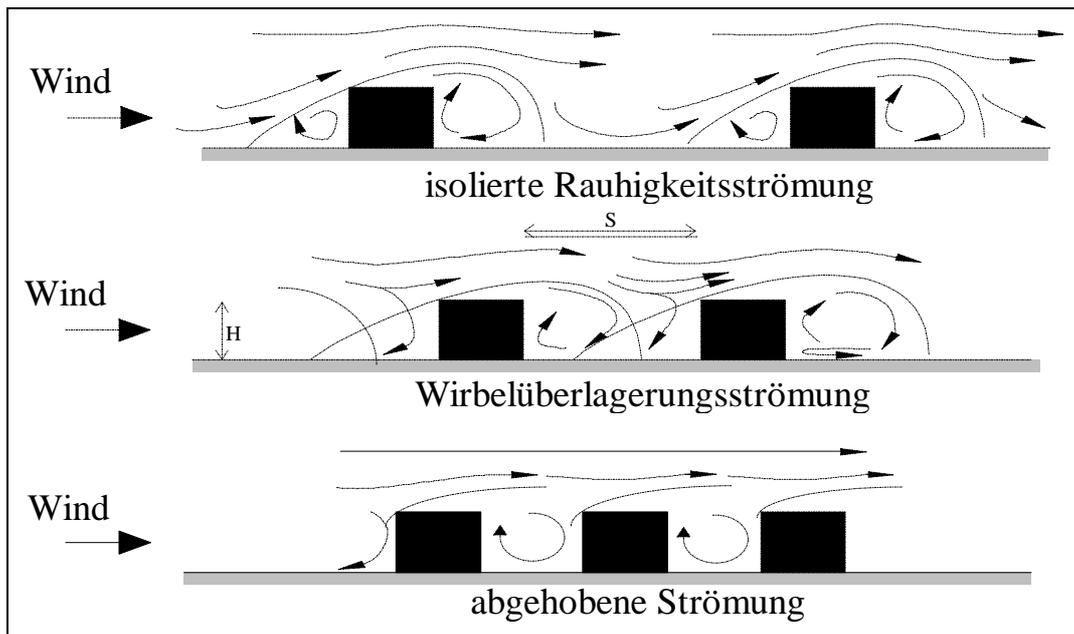


Abb. 2.1 Typische Strömungsregime bei hintereinander stehenden Bauwerken

Die Übergänge zwischen den beschriebenen Strömungsregimen sind abhängig von den geometrischen Verhältnissen der Gebäude. Ein wichtiges Maß stellt neben dem Abstand der Gebäude, das Verhältnis Gebäudehöhe zur Gebäudelänge H/L dar. Hunter et al. (1990/1991) haben aus numerischen Berechnungen mit einem $k-\epsilon$ -Modell, für verschiedene H/L -Werte, die H/S -Verhältnisse, welche die Übergänge zwischen den Strömungsregimen kennzeichnen, definiert. Die berechneten Strömungsfelder zeigen deutlich den dreidimensionalen Charakter der Strömungsverhältnisse in den Straßenschluchten, mit seitlichen Wirbelgebiete, die durch die horizontale Gebäudeumströmung verursacht werden. Nur für sehr lange Gebäude ($H/L > 7$) kann in der Schluchtmitte von zweidimensionalen Verhältnissen ausgegangen werden. Die Ausdehnung der Wirbel an den Schluchttenden beträgt etwa zwei bis drei Gebäudehöhen.

Neben den bereits diskutierten geometrischen Verhältnissen der Gebäude beeinflusst die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in Straßenschluchten. In Schädler et al. (1996) sind die aus der Literatur bekannten Gesetzmäßigkeiten zusammengefaßt. Im Falle der Windgeschwindigkeiten sind im wesentlichen zwei Situationen zu unterscheiden. Für Windgeschwindigkeiten größer als ca. 1.5m/s bilden sich die beschriebenen Wirbelsysteme. Sie dominieren die Ausbreitungsverhältnisse und thermische Effekte sind zu vernachlässigen. Letztere sind bei Schwachwindsituationen (Windgeschwindigkeiten kleiner als 1.5m/s) zu beachten, bei welchen durch das Aufheizen der Gebäudewände induzierte Strömungen, sowie die durch die Kraftfahrzeuge erzeugte Turbulenz, die Schadstoffverdünnung regulieren. Für beide Mechanismen gibt es bisher keine eindeutigen Aussagen über ihren quantitativen Einfluß. Sie sind Thema aktueller Forschungsarbeiten, sowohl im Bereich der numerischen Modellierung (Sini et al. 1996) als auch im Bereich der Windkanalmodellierung. Versuche wurden in Hamburg und Karlsruhe durchgeführt, wobei die Experimente noch nicht abgeschlossen sind und noch keine Veröffentlichungen vorliegen. Beim Einfluß der Windrichtung ist die Frage zu klären, ab welchen Schräganströmungen die Strömung entlang der Straße gegenüber dem „Canyon - Vortex“ dominiert. In diesen Fällen hängt die Schadstoffkonzentration an einem bestimmten Punkt in der Straße sehr stark von der Länge der Ge-

bäude ab. Es gibt Fälle mit niedrigeren aber auch höheren Konzentrationen im Falle einer straßenparallelen Anströmung im Vergleich zu einer senkrechten Anströmung.

Nach der Beschreibung der allgemeinen Problematik werden abschließend noch Arbeiten aus dem Bereich der Windkanalmodellierung und der Modellvalidierung aufgeführt:

Die Grundlagen und die Methodik der Modellierung von Ausbreitungsvorgängen im Windkanal wurde in zahlreichen Arbeiten beschrieben. Exemplarisch können die Beiträge von Plate (1982), (1995) und Bächlin und Theurer (1995) genannt werden. Ergebnisse umfangreicher Untersuchungen über die Ausbreitung von Schadstoffen in Straßenschluchten und an Straßenkreuzungen wurden von Hoydysysh und Dabberdt (1988, 1994) veröffentlicht. Desweiteren sind die Arbeiten von Leisen et al. (1982) zu nennen, welche auch erstmals den Vergleich von Naturmessungen mit berechneten Ergebnissen und Windkanalsimulationen beinhalten. Grundlegende Phänomene der Vorgänge in Straßenschluchten, wie z. B: die Ausbildung des sogenannten „Canyon - Vortex“ Wirbelsystems, sind aus diesen Studien bekannt. Probleme entstehen bei der Quantifizierung der Ergebnisse und der Integration in numerische Modelle, da die Versuchsbedingungen nicht vollständig dokumentiert sind und neuere Versuche Probleme bei der Modellierung von Linienquellen aufgezeigt haben, welche in diesen Arbeiten nicht diskutiert werden.

Als Ausgangspunkt für die Windkanalstudien der letzten Jahre ist der Beitrag von Meroney et al. (1996) zu nennen. Im Rahmen von Versuchen am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg wurden die Anforderungen an Linienquellen für die Windkanalmodellierung von Kfz - Emissionen definiert, verschiedene Quelltypen getestet und die beste Realisierung beschrieben. An diese Testreihen anschließend, wurden Messungen der Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in idealisierten Straßenschluchten mit unterschiedlichen Längen - zu Breitenverhältnissen, Dachvarianten und Umgebungsbebauungen durchgeführt (Pavageau et al. 1996). Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen sind für diese Datensätze die Versuchsbedingungen gut dokumentiert und es wurden systematische Parametervariationen durchgeführt. Ein Vergleich mit den im Rahmen des vorgestellten Vorhabens erzielten Ergebnissen erfolgt in Kapitel 7. Als Ergebnisse der umfangreichen Versuche können genannt werden:

Es hat sich gezeigt, daß bei einer senkrechten Anströmung einer idealisierten Straßenschlucht die Konzentrationen an der Leeseite der Schlucht deutlich höher sind als an der Luvseite. Eine Quantifizierung des Unterschiedes ist möglich. Die Strömungsverhältnisse und damit auch die Konzentrationsfelder in der Straßenschlucht sind sehr stark von den Gebäudegeometrien (z. B. Dachformen) abhängig. Je nach Konfiguration tritt das Konzentrationsmaximum nicht mehr an der leeseitigen sondern an der luvseitigen Gebäudewand auf. Die Umgebungsbebauung beeinflusst den Austausch zwischen Straßenschlucht und Außenströmung. Im Falle einer Straßenschlucht in urbaner Bebauung treten an den Gebäudewänden höhere Konzentrationen auf als bei einer freistehenden Straßenschlucht. Die Konzentrationen auf den Gebäudedächern nehmen ab.

Einen guten Überblick über den aktuellen, internationalen Forschungsstand im Bereich der numerischen Modellierung liefert der Bericht „Modelling traffic pollution in streets“ (Berkowicz et al., 1997). Hierin wird auch die Notwendigkeit aufgezeigt, numerische Modelle mit Meßdaten zu validieren und zu verifizieren. In Deutschland wurden einige, stark praxisorientierte Modelle entwickelt. Sie lassen sich unterteilen in diagnostische und prognostische Modelle

(siehe z. B: Röckle und Richter 1995). Im Rahmen der bisherigen PEF - Projekte wurde die Modellvalidierung begonnen, welche durch das vorgestellte Vorhaben fortgeführt wird. Ein Modellvergleich und eine Bewertung der Modelle erfolgt in Röckle und Richter (1995) und Schädler et al. (1996). Darüber hinaus wurden die Datensätze von anderen Forschergruppen zum Vergleich mit numerischen Ergebnissen verwendet. Beispielhaft können die Arbeiten von Götting et al. (1996) und Leitl et al. (1997) genannt werden.

3. Ziele und Vorgehensweise

Das Ziel des Projektes ist, eine Datenbasis über die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in der Umgebung von Straßenkreuzungen zu schaffen, welche die Verifizierung und Verbesserung numerischer mikroskaliger Modelle ermöglicht. Hierzu sollten im Windkanal typische Straßenkreuzungen untersucht werden, wobei die Kraftfahrzeugemissionen, wie später noch detaillierter erläutert wird, durch den Einbau von Linienquellen modelliert werden. Bevor jedoch mit den Windkanalversuchen für die Straßenkreuzungssituationen begonnen werden konnte, waren eine Serie von Vorversuchen notwendig. Der Projektablauf läßt sich wie folgt beschreiben:

1. Bau der Linienquelle und der Modelle
2. Vorversuche zur Überprüfung der Quellbedingungen und Reynoldsabhängigkeit
3. Untersuchung der Konzentrationsverteilung in Straßenschluchten
4. Messung von Konzentrationsfeldern im Bereich einer Straßenkreuzung
5. Auswahl einiger Fälle, anhand der experimentell und numerisch ermittelten Konzentrationsfelder, für welche das Strömungsfeld bestimmt wird.

Schwerpunkt des Projektes sollten die beiden zuletzt genannten Punkte darstellen. Bei der Projektdurchführung ergab sich jedoch, daß die unter Punkt 3 aufgeführten Untersuchungen der Straßenschluchtkonfigurationen, welche ursprünglich nur im Rahmen der Vorversuche als kurze Projektphase eingeplant waren, wesentlich intensiver untersucht wurden, als es im Antrag vorgesehen war. Daraus resultierte insgesamt eine gewisse Verschiebung der Projektschwerpunkte. Das vorgesehene Programm für die Untersuchung der Strömungsverhältnisse in Straßenkreuzungen wurde etwas gekürzt. Die Gründe hierfür können wie folgt beschrieben werden.

Die Ausdehnung der Straßenschluchtuntersuchungen resultierte aus dem Kontakt zu den Mitarbeitern des Ingenieurbüro Lohmeyer, welche im Rahmen eines weiteren PEF - Vorhabens, den Vergleich numerischer Berechnungen mit Meßergebnissen für Straßenschluchten durchführten. Bei der Datenbeschaffung im Rahmen dieses Projektes, zeigte sich ein Bedarf für Datensätze, welche aus systematischen Untersuchungen unter bekannten und kontrollierten Versuchsbedingungen erzielt wurden. Im Kontakt mit dieser Projektgruppe, wurde deshalb das Versuchsprogramm mit den Modellen typischer Straßenschluchten erweitert, indem einzelne Parameter gezielt variiert wurden. Die gewonnenen Daten wurden dem Ingenieurbüro Lohmeyer zur Verfügung gestellt und ein Vergleich der Windkanalergebnisse mit numerischen Berechnungen wurde von Schädler et al. (1996) im Rahmen des Abschlußberichtes zum Projekt PEF 2 93 001 *Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle* zusammengefaßt. Die vollständige Diskussion und Dokumentation der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.

Die Messungen der Strömungsfelder im Bereich von Straßenkreuzungen, welche in der zweiten Projekthälfte geplant waren, mußten reduziert werden da es Probleme bei der Beschaffung der erforderlichen Meßtechnik gab. Die notwendige Sende- und Empfangsoptik für die vor-

handene LDA - Meßanlage konnte nicht vollständig durch das Projekt finanziert werden und dem Institut standen die verbleibenden Mittel erst Ende 1996 zur Verfügung, so daß die Sonde erst am Projektende beschafft werden konnte. Die Dauer der Messungen, erstreckte sich dann trotz des gekürzten Versuchsprogramms noch über die bewilligte Projektdauer hinaus. Eine erste Meßphase konnte im April 1997 abgeschlossen werden. Aufgrund von meßtechnischen Problemen, die im Kapitel 9 diskutiert werden, wurde das Projekt dann ohne zusätzliche Kosten für den Projektträger verlängert und eine 2. Meßphase Ende 1997 durchgeführt. Die Zusammenarbeit mit dem Projektpartnern IMA und TÜV Energie und Umwelt GmbH wurde durch den um ein Jahr verzögerten Start des Parallelprojektes im Januar 96 etwas erschwert. Eine Auswahl besonders interessanter Fälle konnte nicht immer, wie es im Antrag vorgesehen war, auf der Basis der numerischen Berechnungen und dem Vergleich der Ergebnisse für die Konzentrationsfelder getroffen werden.

Letztlich läßt sich der Ablauf der Versuche mit den Straßenkreuzungsmodellen wie folgt beschreiben:

1. Ermittlung der Konzentrationsverteilung und Strömungsverhältnisse für den Referenzfall bei verschiedenen Windrichtungen
2. Variation der Dachform: Untersuchung des Einflusses von Spitzdächern auf die Konzentrationsverteilung für einige ausgewählte Fälle.
3. Variation der Gebäudehöhe: Untersuchung des Einflusses auf die Konzentrationsverteilung bei einer Veränderung der Gebäudehöhe im Kreuzungsbereich.

Zusätzlich wurden Lichtschnittaufnahmen zur qualitativen Ermittlung der Strömungsverhältnisse im Kreuzungsbereich für verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Gebäudehöhen durchgeführt. Die Ergebnisse werden zusammen mit den Ergebnissen der Strömungsfeldmessungen für den Referenzfall bei verschiedenen Windrichtungen in Kapitel 9 dargestellt. Die Diskussion und Dokumentation der Ergebnisse aus den Konzentrationsmessungen erfolgt in Kapitel 8.

4. Windkanalmodellierung

4.1 Grenzschichtwindkanal

Unter dem Begriff Windkanalversuche bzw. Windkanalmodellierung versteht man im Zusammenhang mit Immissionsprognosen die physikalische Modellierung der zu untersuchenden Situation in einem atmosphärischem Grenzschichtwindkanal. Abb. 4.1 zeigt eine Skizze des Grenzschichtwindkanals am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft an der Universität Karlsruhe.

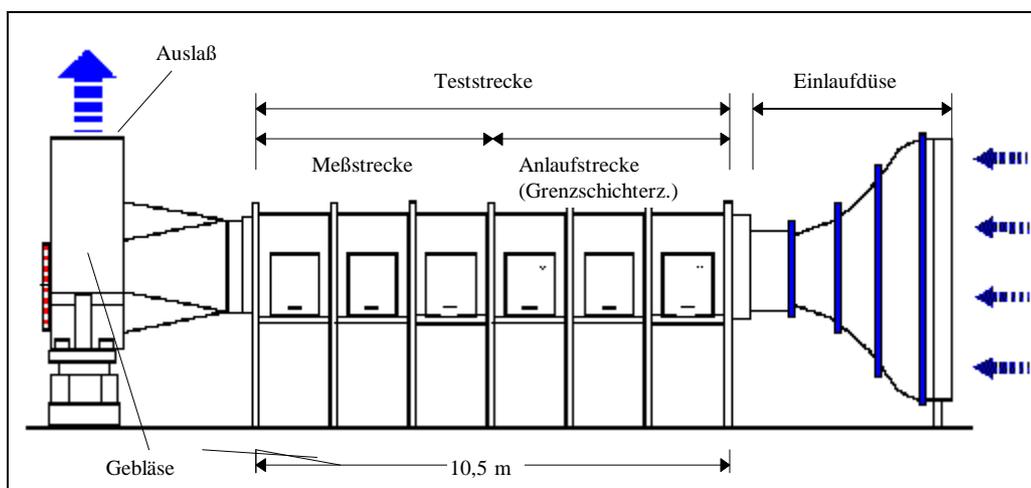


Abb. 4.1: Grenzschichtwindkanal am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe

Entlang der Anlaufstrecke des Windkanals werden die atmosphärischen Antrömbedingungen wie z.B. das mittlere Windprofil und die Turbulenzintensitäten naturähnlich in einem bestimmten Maßstab nachgebildet (Plate, 1982). Abb. 2 zeigt den schematischen Aufbau im Grenzschichtwindkanal des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, mit den für die Grenzschichterzeugung notwendigen Einbauten. Das am Einlauf zunächst gleichförmige Geschwindigkeitsprofil $u(z)=konstant$ wird durch Wirbelgeneratoren, eine Sägezahnschwelle und Bodenrauigkeiten verändert und am Beginn der Meßstrecke kann das Geschwindigkeitsprofil durch einen Potenzansatz der Form

$$\frac{u(z)}{u_{ref}} = \left(\frac{z - d_0}{z_{ref} - d_0} \right)^a \quad (4.1)$$

beschrieben werden, mit:

- $u(z)$: Windgeschwindigkeit in der Höhe z in m/s.
- u_{ref} : Referenzgeschwindigkeit in der Höhe z_{ref} in m/s.
- z_{ref} : Referenzhöhe im Windkanal in mm
- d_0 : Verdrängungsdicke im Windkanal in mm
- a : Profilexponent.

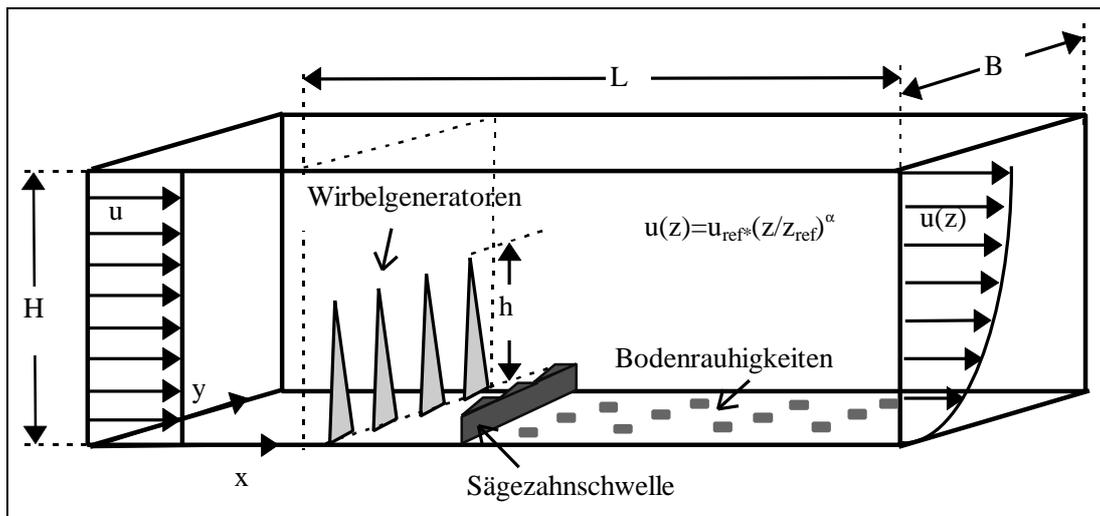


Abb. 4.2: Prinzipskizze zur Grenzschichterzeugung am Grenzschichtwindkanal des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe

Im unteren Teil der Grenzschicht, bis etwa zu einer Höhe von 20% der Grenzschichthöhe, kann das Windprofil mit dem logarithmischen Wandgesetz angepaßt werden:

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{z - d_0}{z_0} \quad (4.2)$$

mit:

- $u(z)$: Windgeschwindigkeit in der Höhe z in m/s,
- u_* : Schubspannungsgeschwindigkeit in m/s,
- z_0 : Rauigkeitshöhe in mm,
- d_0 : Verdrängungsdicke im Windkanal in mm,
- k : Karmansche Konstante ≈ 0.4 .

Die Profilparameter, die von der Wirkung der Reibung des Windes am Boden und damit von der Rauheit der Anlaufstrecke abhängen, sind im Falle des Potenzprofils der Profilexponent a und im Falle des logarithmischen Wandgesetzes die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und die Rauigkeitshöhe z_0 . Die Größe d_0 stellt eine Verschiebung des Profilmullpunktes dar.

Aus den im Windkanal realisierten Anströmbedingungen, läßt sich der Modellmaßstab für die Untersuchungen ableiten. Ein geometrisch maßstäbliches Modell, mit allen strömungsmechanisch relevanten Hindernissen des Untersuchungsgebietes, wird erstellt und am Ende der Anlaufstrecke in den Windkanal eingebaut. Die Einhaltung bestimmter Modellgesetze garantiert, daß die Strömungsverhältnisse innerhalb der Bebauung naturähnlich abgebildet werden. Auf eine ausführliche Beschreibung aller maßgeblichen Modellgesetze für die physikalische Modellierung von Ausbreitungsvorgängen in bebauten Gebieten wird in diesem Bericht verzichtet. Sie ist z.B. in Bächlin u. Theurer (1995); Bächlin u. Klein (1994) und Plate (1982) zu finden. Die Anströmverhältnisse, d.h. das mittlere Windprofil und die Turbulenzintensität, bei den Versuchen werden aber im nächsten Abschnitt präsentiert.

4.2 Anströmbedingungen

Das mittlere Windprofil und das Profil der Turbulenzintensitäten I_u in Längsrichtung, gemessen am Ende der Anlaufstrecke im Grenzschichtwindkanal des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft, sind in Abb. 4.3 zu sehen. Im linken Diagramm sind die Windgeschwindigkeiten bezogen auf die Geschwindigkeit in Grenzschichthöhe $z=450\text{mm}$ über der Höhe z aufgetragen. Der Wert der Geschwindigkeit in Grenzschichthöhe $z=450\text{mm}$ betrug bei den Versuchen $u(450\text{mm})=7\text{m/s}$. Zusammen mit den Meßwerten ist ein nach dem Potenzansatz (siehe Gleichung 4.1) berechnetes Profil mit eingezeichnet. Es zeigt sich, daß das gemessene Windprofil gut durch ein Potenzprofil mit den Parametern

$$\begin{array}{ll} \text{Verdrängungsdicke:} & d_0 = 2\text{mm}, \\ \text{Profilexponent:} & a = 0.23 \end{array}$$

angepaßt werden kann. In beiden Diagrammen sind die Werte in der Gebäudehöhe $H=120\text{mm}$ angegeben. Die mittlere Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe beträgt in etwa 75% des Wertes in der Grenzschichthöhe und der Turbulenzgrad in Gebäudehöhe ist $I_u = 0.15$.

Eine Anpassung des Windprofils an das logarithmische Wandgesetz nach Gleichung 4.2 ist in Abb. 4.4 dargestellt. Die Windgeschwindigkeiten sind über der logarithmisch skalierten, mit der Gebäudehöhe H normierten Höhe aufgetragen. Es wird deutlich, daß das Profil im Bereich bis zur Gebäudehöhe dem logarithmischen Profil entspricht. Die aus der Anpassung ermittelten Werte für die Profilparameter lauten ($d_0 = 2\text{mm}$):

$$\begin{array}{ll} \text{Schubspannungsgeschwindigkeit:} & u_* = 0.38\text{m/s}, \\ \text{Rauigkeitshöhe:} & z_0 = 0.7\text{mm}. \end{array}$$

Abschließend ist noch die Frage des Modellmaßstabes zu klären. Der Modellmaßstab, welcher sich aus den oben gezeigten Profilen der mittleren Geschwindigkeit und der Turbulenzintensität ableiten läßt liegt in der Größenordnung von 1:500 bis 1:1000. Geht man von einer mittleren Gebäudehöhe im Innenstadtbereich von etwa 20m aus, so würde dies bedeuten, daß die Modellgebäude bei einem Maßstab von 1:500 im Windkanal eine Höhe 4cm hätten. Der gleiche Wert würde dann bei einer Straßenschlucht mit einem Verhältnis von H/S für die Breite der Straßenschlucht resultieren. Bei der Wahl dieser Modellgrößen hat man dann den Nachteil, daß das Untersuchungsgebiet sehr klein ist, und die Auflösung der Verhältnisse in der Straßenschlucht sehr schwierig wird. Die Größe der Meßsonden kann nicht beliebig verkleinert werden und auch die Positionierung der Sonden ist mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet. Aus diesen Gründen wurde eine Gebäudehöhe von 120mm für die Modelle im vorgestellten Projekt ausgewählt. Daraus resultiert, daß nur ein Teil der atmosphärischen Grenzschicht bei den Versuchen modelliert wurde und der geometrische Maßstab, welcher ja basierend auf einer mittleren Gebäudehöhe von 20m in der Größenordnung von 1:150 liegt, nicht exakt dem Maßstab aus der Anströmung entspricht. Versuche mit Kuben unterschiedlicher Gebäudehöhen haben gezeigt, daß in Fällen bei welchen die Strömungsverhältnisse maßgeblich durch die geometrischen Verhältnisse der Gebäude bestimmt sind, Meßungenauigkeiten aufgrund kleiner Untersuchungsgebiete einen größeren Einfluß haben, als eine Abweichung vom Maßstab in der Anströmung. Im Falle von Straßenschluchten wird der „Canyon-Vortex“ im wesentlichen durch die geometrischen Verhältnisse bestimmt. Informationen über die Abweichungen des Wind-

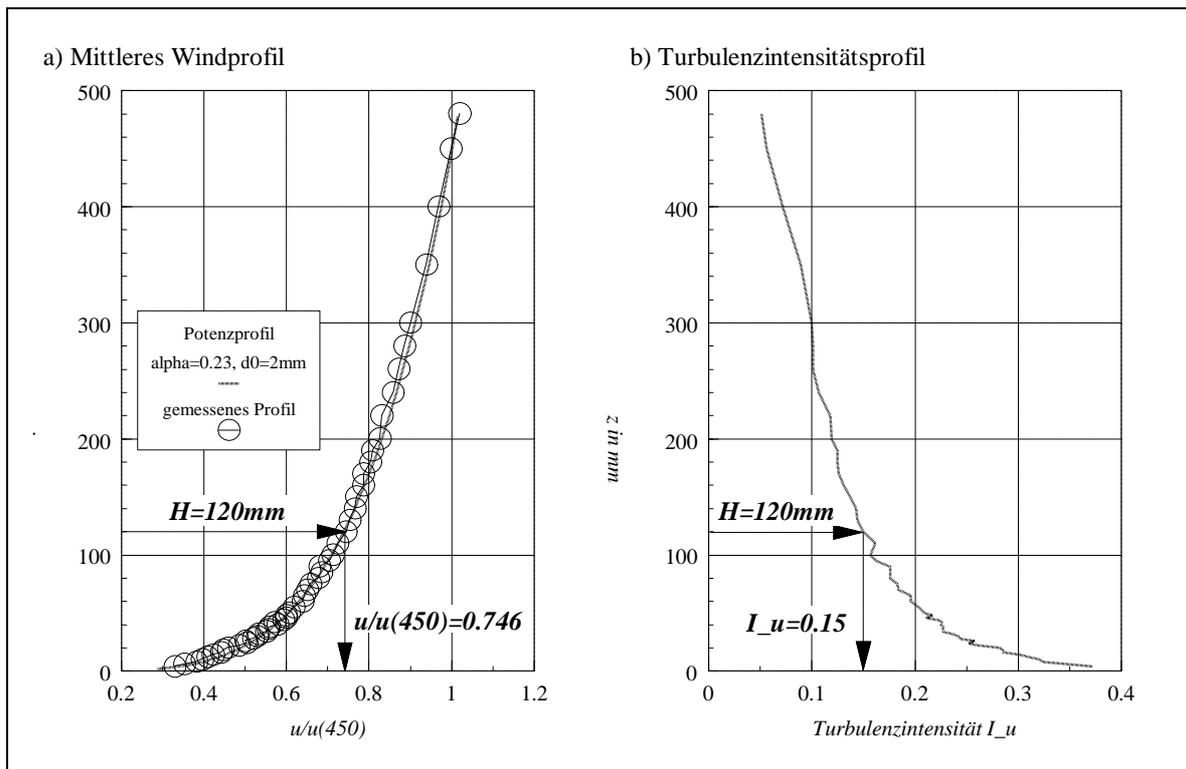


Abb. 4.3: (a) Mittleres Windprofil und (b) Profil der Turbulenzintensitäten I_u gemessen am Ende der Anlaufstrecke im Windkanal des Instituts für Hydrologie und Wasserwirtschaft

kanalprofils der Turbulenzintensitäten im Einflußbereichs des Gebäudes im Vergleich zu Profilen mit Naturdaten liefert Abb. 4.5. Die ESDU-Daten für die Rauigkeitshöhen $z_0 = 0.1\text{m}$ und $z_0 = 0.03\text{m}$ wurden für jeweils drei verschiedene Modellmaßstäbe (1:150, 1:300 und 1:600) umgerechnet und mit dem gemessenen Profil verglichen. Entsprechend dem ermittelten Proflexponent $a = 0.23$ repräsentiert das gemessene Windprofil den Geländetyp Vorstadt, für welche die typischen z_0 -Werte in der Größenordnung von 0.1m liegen. Die Abbildung macht deutlich, daß das Windkanalprofil einen stärkeren vertikalen Gradienten aufweist, so daß die Werte der Turbulenzintensität schneller abfallen als in der Natur. In Gebäudehöhe beträgt der Wert aus den Windkanalversuchen 0.15 während aus den Naturdaten für $z_0 = 0.1\text{m}$ ein Wert von 0.2 resultiert. Eine bessere Übereinstimmung liefert der Vergleich mit den Naturdaten für $z_0 = 0.03\text{m}$, welche dem Geländetyp Vegetationsflächen mit Einzelgebäuden entsprechen.

Für den direkten Vergleich der Meßergebnisse mit numerischen Berechnungen wurden die gemessenen Profile dem Parallelprojekt zur Verfügung gestellt, so daß die numerischen Berechnungen mit den gleichen Eingangsbedingungen wie die Modellversuche durchgeführt werden konnten.

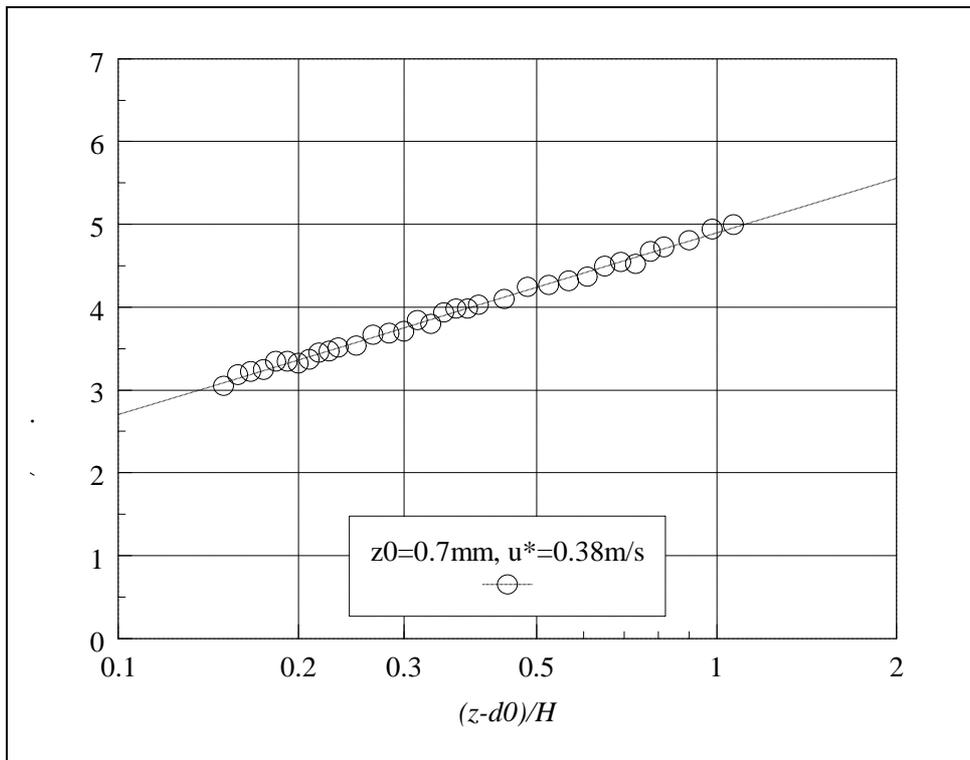


Abb. 4.4: Anpassung des mittleren Windprofils an das logarithmische Wandgesetz

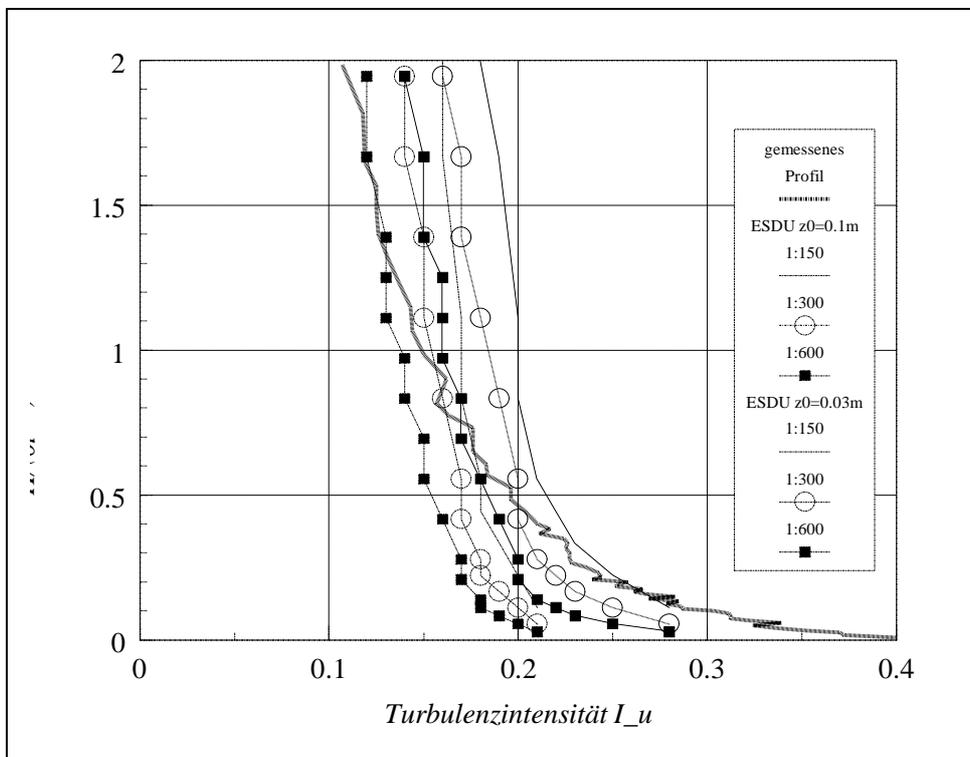


Abb. 4.5: Vergleich der Turbulenzintensität I_u mit Naturdaten

4.3 Modellierung von KFZ - Emissionen

Neben den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Anströmbedingungen ist noch die Frage der Modellierung der Emissionen zu klären. Hierfür müssen zunächst die Verhältnisse für Kraftfahrzeugemissionen, wie sie in der Natur vorzufinden sind, beschrieben werden. Die Schadstoffe werden bodennah von den einzelnen Kraftfahrzeugen emittiert. Die Schadstoffmengen und deren Zusammensetzung ist abhängig vom Motortyp und der Motorleistung. Die Fahrzeugbewegung führt sehr schnell zu einer Vermischung der einzelnen Abgasfahnen, so daß die Gesamtemission in einer Straße als bodennahe, linienförmige Freisetzung betrachtet werden kann. Die emittierte Menge für die einzelnen Schadstoffe ist dann abhängig von der Flottenzusammensetzung und dem Verkehrsverhalten. Daraus resultiert ein zeitabhängiger Verlauf der Emission, welcher in enger Korrelation zum Tagesgang des Verkehrsaufkommens steht.

Bei der Modellierung von Ausbreitungsvorgängen mit numerischen oder physikalischen Modellen ist es nicht möglich und nicht notwendig, die Emission direkt zeitabhängig und einzeln für alle auftretenden Schadstoffkomponenten zu modellieren. Folgende Vorgehensweise bei der Modellierung von KFZ - Emissionen hat sich in der Praxis durchgesetzt:

Die Emissionen des KFZ - Verkehrs werden durch linienförmige Quellen mit bodennaher Freisetzung beschrieben. Die Ausbreitungsmodellierung, physikalisch oder numerisch, liefert die Verdünnung, d.h. die Immissionskonzentration eines Tracergases an den interessierenden Punkten. Die Ergebnisse werden in der Form dimensionsloser Konzentrationen dargestellt:

$$c_m^*(\mathbf{a}, u_{m,ref}) = \frac{c_m(\mathbf{a}, u_{m,ref}) \cdot u_{m,ref} \cdot L_{m,ref}}{Q_m / L_{m,Q}} \quad (4.3)$$

Dabei bedeuten (bezogen auf eine Windkanalmodellierung):

- $c_m(\mathbf{a}, u_{m,ref})$: Tracergaskonzentration an einem Punkt im Modell in ppm für eine bestimmte Windrichtung \mathbf{a} und Referenzgeschwindigkeit $u_{m,ref}$
- $u_{m,ref}$: Referenzgeschwindigkeit im Modell in m/s
- $L_{m,ref}$: Referenzlänge im Modell in m
- $Q_m / L_{m,Q}$: Quellstärke pro Längeneinheit im Modell

Für die Umrechnung dieser dimensionslosen Konzentrationen auf Konzentrationswerte der verschiedenen Schadstoffkomponenten des KFZ - Verkehrs werden Informationen über die meteorologischen Bedingungen und die Verkehrsverhältnisse als Eingangsgrößen benötigt. Die Vorgehensweise wird im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

4.4 Umrechnung der Windkanalergebnisse auf Naturverhältnisse

Bei der Beschreibung der Umrechnung dimensionsloser Konzentrationen c^* aus Windkanalversuchen, in Konzentrationen verschiedener Schadstoffe in der Natur ist zwischen der Berechnung von Momentanwerten und der Berechnung statistischer Kenngrößen zu unterscheiden (Plate u. Kastner-Klein, 1995).

4.4.1 Berechnung von Momentanwerten

Der Momentanwert der Konzentration eines Schadstoffes, für einen bestimmten Wert der Referenzgeschwindigkeit $u_{n,ref}$ und eine bestimmte Windrichtung α , kann mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$c(\mathbf{a}, u_{n,ref}) = c_m^*(\mathbf{a}, u_{m,ref}) \cdot \left(\frac{E_n / L_{n,Q}}{u_{n,ref} \cdot L_{n,ref}} \right) \quad (4.4)$$

Die erforderlichen Eingangsdaten für die Umrechnung der c^* -Werte in Konzentrationen eines Schadstoffes in der Natur sind in diesem Falle:

- $u_{n,ref}$: Referenzgeschwindigkeit in der Natur in m/s.
- $L_{n,ref}$: Wert der ausgewählten Referenzlänge in der Natur in m.
- $E_n / L_{n,Q}$: Emissionsdaten für die verschiedenen Schadstoffe

Bei der Wahl dieser Eingangsgrößen ist zu berücksichtigen, daß die Naturgrößen mit den bei der Berechnung der c^* -Werte eingesetzten Modellgrößen, korrespondieren. Im Falle der Referenzgeschwindigkeit bedeutet dies, daß der Aufnahmeort in der Natur dem im Modell entsprechen muß. Wird bei den Modellversuchen als Referenzgeschwindigkeit eine Geschwindigkeit $u_{m,A}(z_{ref})$ in einer bestimmten Höhe $z_{m,ref}$ aus dem ungestörten Profil (Index A) ausgewählt, so ist auch als Naturreferenzgeschwindigkeit $u_{n,A}(z_{ref})$ eine Geschwindigkeit aus dem ungestörten Anströmprofil in der entsprechenden Höhe $z_{n,ref} = z_{m,ref} \cdot M$ ($M = \text{Maßstab}$) einzusetzen. Unzulässig wäre einen Geschwindigkeitswert $u_{n,B}(z_{ref})$ aus Messungen innerhalb oder oberhalb der Bebauung (Index B) einzusetzen, auch wenn die Referenzhöhe $z_{n,ref}$ mit der im Modell korrespondiert. Der Wert der Geschwindigkeit in der Natur muß dagegen nicht dem Wert bei den Modellversuchen entsprechen. Die Modellversuche wurden zunächst für verschiedene Geschwindigkeiten (5m/s, 7m/s, 9m/s, 12m/s) durchgeführt und es konnte nachgewiesen werden, daß die c^* -Werte in diesem Bereich vom Wert der Geschwindigkeit unabhängig sind. Für die Übertragung auf die Natur bedeutet dies, daß die c^* -Werte für beliebige Windgeschwindigkeiten, mit der Ausnahme von Schwachwindsituationen, umgerechnet werden können.

Anders verhält es sich im Falle der Referenzlänge. Bei Modellversuchen wird häufig die Gebäudehöhe H_m als Referenzlänge $L_{m,ref}$ verwendet. Bei der Übertragung der c^* -Werte auf Na-

turverhältnisse, muß dann als Referenzlänge $L_{n,ref}$ wieder die Gebäudehöhe H_n eingesetzt werden. Diese darf aber im Gegensatz zur Windgeschwindigkeit keinen beliebigen Wert haben, sondern es muß zunächst gelten:

$$H_n = H_m \cdot M \quad (4.5)$$

Geht man von einem Modellmaßstab bei den Untersuchung von $M=1:150$ aus, so entspricht die Gebäudehöhe $H=12\text{cm}$ in der Natur $\approx 18\text{m}$. Wie im vorhergehenden Abschnitt bei der Beschreibung der Anströmverhältnisse erläutert wurde, gibt es bei der Definition des Modellmaßstabes einen gewissen Spielraum, so daß die Ergebnisse auch auf Situationen mit höheren Gebäuden zu übertragen sind. Voraussetzung ist dann aber, daß alle dimensionslosen Kenngrößen mit den bei den Modellversuchen eingestellten Werten übereinstimmen. Für unsere Versuche bedeutet dies, daß z.B. bei einem in der Natur 25m hohen Gebäude auch die Straßenbreite $S1=25\text{m}$ betragen muß, da $S1/H=1$ zu erfüllen ist. Entsprechend sind auch die anderen geometrischen Größen umzurechnen.

Die Emissionsdaten für die verschiedenen Schadstoffe $E_n / L_{n,Q}$ werden aus den Emissionsfaktoren für die unterschiedlichen Kraftfahrzeugtypen, dem Verkehrsaufkommen und der Flottenzusammensetzung bestimmt. Im Detail kann hier nicht auf diesen Punkt eingegangen werden, da die Emissionsmodellierung ein eigenes Forschungsgebiet darstellt.

4.4.2 Berechnung statistischer Kenngrößen

Die Berechnung statistischer Kenngrößen, wie z.B. Jahresmittelwerte beschreibt die Gleichung:

$$\bar{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \left[\sum_{j=1}^p n(i,j) \cdot c(\mathbf{a}_i, u_{ref,j}) \right] \quad (4.6)$$

Zusätzlich zu den Eingangsdaten für die Berechnung von Momentanwerten nach Gleichung (3) ist hier die Windstatistik mit

k :	Anzahl der Sektoren der Windrose
j :	Anzahl der Windgeschwindigkeitsklassen pro Sektor
$n(i,j)$:	Häufigkeit pro Jahr der Windstärke in Sektor i und Klasse j
N :	Summe aller Häufigkeiten in allen Sektoren und Klassen

erforderlich.

4.5 Meßtechnik

4.5.1 Konzentrationsmessungen

Im Modell wird aus der Linienquelle ein Tracer (Schwefelhexafluorid SF_6) mit einem konstanten Volumenstrom $Q_m / L_{m,Q}$ pro Längeneinheit freigesetzt. Die bei der Konstruktion der Linienquelle und bei der Wahl der Menge des Volumenstroms zu beachtenden Punkte werden in Kapitel 5 diskutiert. 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_6 - Gehaltes analysiert werden. 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_6 - Konzentration kalibriert.

4.5.2 Geschwindigkeitsmessungen

Für Messungen der mittleren und turbulenten Geschwindigkeitsfelder in baulich eng begrenzten Gebieten, wie sie im Falle von Straßenschluchten oder Straßenkreuzungen gegeben sind, kommt als geeignete Meßtechnik nur die Laser - Doppler - Anemometrie (LDA) in Frage. Sie ist ein optisches und somit berührungsloses Meßverfahren, zur punktuellen Messung von Strömungsgeschwindigkeiten mit hoher Genauigkeit und hoher zeitlicher Auflösung. Die Strömung wird in der Regel nicht durch eine eingebrachte Sonde gestört. Zudem kann mit Hilfe einer Frequenzshift der Sendestrahlen die Strömungsrichtung eindeutig bestimmt werden. Auch die Nullgeschwindigkeit (ruhendes Medium) kann auf diese Weise ermittelt werden. Im Vergleich zur Hitzdrahtanemometrie sind zudem keine zeitintensiven Eichungen erforderlich, da alle Proportionalitätsfaktoren in der Bestimmungsgleichung für die Geschwindigkeit, bekannte Konstanten sind.

Als indirektes Meßverfahren führt die LDA die Messung der Strömungsgeschwindigkeit auf die Messung der Geschwindigkeit kleinster mit der Strömung mitbewegter Partikel zurück. Diese müssen der Strömung meistens zugegeben werden und sollten der Strömung möglichst schlupffrei folgen.

Auf die Grundlagen und die technischen Details der verschiedenen LDA - Systeme kann hier im einzelnen nicht eingegangen werden. Als Literaturstellen mit ausführlichen Beschreibungen können Durst et al. (1987) und Ruck (1986) angegeben werden. Die genaue Beschreibung der am IHW vorhandenen LDA - Anlage, welche im folgenden nur kurz zusammengefaßt wird, kann aus Kaiser (1996) entnommen werden.

Der grundlegende physikalische Vorgang der LDA ist der optische Dopplereffekt. Die am IHW vorhandene Anlage basiert auf der Realisierung nach dem Zweistrahlverfahren. Bei diesem Verfahren wird ein Laserstrahl in zwei kohärente Strahlen gleicher Intensität aufgespalten, die unter einem Winkel (2θ) zum Schnitt gebracht werden. Das entstehende Schnittvolumen stellt das Meßvolumen dar. Eine einfache Erklärung zur Bestimmung der Partikelgeschwindig-

keit stellt das Interferenzstreifenmodell dar. Im Schnittvolumen interferieren die beiden kohärenten Laserstrahlen. Es bilden sich parallel zur optischen Achse abwechselnd helle und dunkle Lichtebenen (Interferenzstreifen) aus. Der Abstand zwischen den Interferenzstreifen d_f berechnet sich aus der Geometrie der Strahlanordnung und der Wellenlänge λ des Laserlichtes:

$$d_f = \frac{l}{2 \sin j} \quad (4.7)$$

Kreuzt ein Partikel die Hell-Dunkel-Ebenen, so sendet es Lichtimpulse mit einer Frequenz aus, die der Dopplerfrequenz Δf_D entspricht. Die Komponente der Partikelgeschwindigkeit senkrecht zur optischen Achse läßt sich dann berechnen nach:

$$u_s = \Delta f_D \cdot d_f \quad (4.8)$$

Das Streulichtsignal, welches ein Partikel beim Durchqueren des Meßvolumen sendet, wird als Burst bezeichnet. Abb. 4.6 zeigt einen typischen Burst.

Die obere Einhüllende des Bursts gibt den Gaußschen Intensitätsverlauf des Laserstrahls im Meßvolumen wieder. Der Gaußsche Verlauf der unteren Einhüllenden entsteht, wenn die Intensität der beiden interferierenden Laserstrahlen nicht genau gleich groß ist, so daß sie sich in den Dunkelebenen nicht vollständig auslöschen und in den Hellebenen nicht die maximal mögliche Intensität erreicht wird. Die Schwingung zwischen den Einhüllenden stellt als Schwebungsmodulation der beiden überlagerten Streulichtstrahlen die Burstfrequenz dar, aus der die Partikelgeschwindigkeit bestimmt wird.

Eine Frequenzverschiebung bei einem der beiden interferierenden Laserstrahlen ermöglicht die Bestimmung der Geschwindigkeitsrichtung aus der Burstfrequenz des detektierten Streulichts. Die Methode ist in Kaiser (1996) und Ruck (1986) beschrieben.

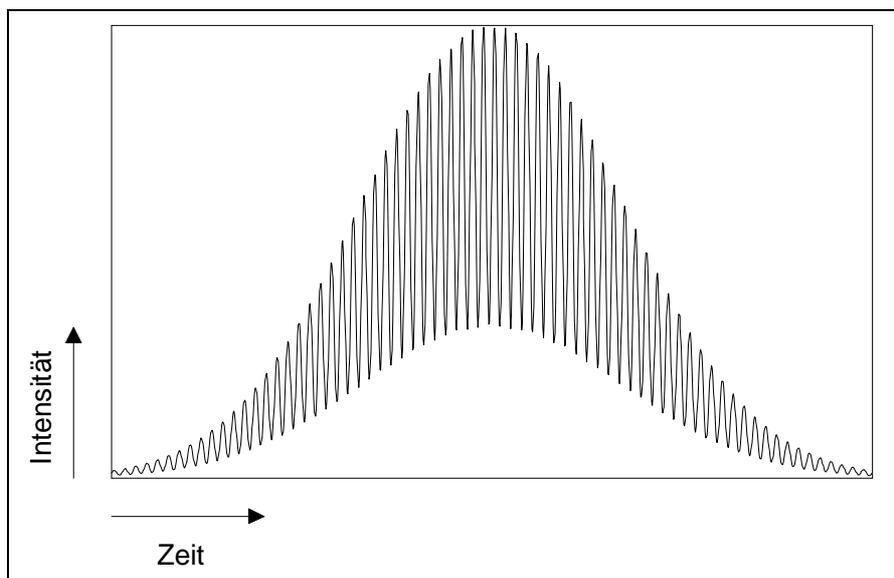


Abb. 4.6 LDA - Burst

Bei den im Kapitel 9 beschriebenen Versuchen wurde die am IHW vorhandene 4-strahlige 2-Komponenten-LDA-Anlage eingesetzt. Damit kann die Strömungsgeschwindigkeit in 2 Raumrichtungen zeit- und ortsgleich gemessen werden. 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 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 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 der Optik außerhalb des Kanals durchgeführt. Die Laserstrahlen wurden dann von außen durch die Windkanalfenster eingestrahlt. Mit dieser Methode konnten für den Fall senkrecht angeströmter Straßenschluchten Messungen durchgeführt werden. Der Vergleich der Meßergebnisse mit den zwei Versuchsaufbauten (Optiksonde im Windkanal bzw. Einstrahlung der Laserstrahlen durch das Windkanalfenster) wird in Kapitel 9 aufgezeigt. Die aufgetretenen Abweichungen und Probleme bei den Messungen werden im Detail diskutiert.

4.5.3 Visualisierung

Zur Strömungsvisualisierung wurde die Laser - Lichtschnittmethode eingesetzt, um qualitative Aussagen über die Strömungsverhältnisse im Kreuzungsbereich zu erhalten. Mit einem Laserlichtschnitt wird hierbei eine dünne Lichtebene hoher Intensität durch die Strömung gelegt und durch Zugabe geeigneter Streupartikel die Wirbelstrukturen sichtbar gemacht. Mit einer Videokamera werden die Bilder aufgenommen und anschließend mit der Methode der Bildverarbeitung bearbeitet. Einzelne Bilder können dadurch vom Videoband zur weiteren Verarbeitung auf dem PC digitalisiert werden. Anschließend können Bilder gemittelt werden und durch verschiedene Filtermethoden und Falschfarbeneinfärbung die Wirbelstrukturen hervorgehoben werden, so daß sie für das menschliche Auge besser zu erfassen sind.

5. Überprüfung der Quellbedingungen

Beim Design der Linienquelle wurde an die Ergebnisse von Meroney et al. (1996) angeknüpft. Im Rahmen dieser Arbeit wurden zahlreiche Versuchsaufbauten getestet und letztlich eine Linienquelle entworfen, welche die Anforderungen zur Modellierung von Kfz - Emissionen erfüllt. Dünne Kanülen mit einem Innendurchmesser von 0.25mm und einer Länge von 25mm stellen die Austrittsöffnungen der Quelle dar. Sie sind in einem Abstand von 3mm angeordnet und gewährleisten durch die Druckdifferenz von ca. 450Pa bei einem Durchfluß von 100l/h, daß die austretende Gasmenge nicht von lokalen Druckunterschieden in der Straßenschlucht abhängt. Dadurch wird die Homogenität der Quelle, d.h. gleichmäßige Quellbedingungen über die gesamte Quelllänge, im Vergleich zu bisherigen Versuchsaufbauten deutlich verbessert. Zu beachten sind noch mögliche Störungen der Strömung durch den vertikalen Impuls der aus den Kanülen austretenden Luft, insbesondere in Straßenschluchten, in welchen mit geringen Windgeschwindigkeiten (im Mittel ca. 10% der Überdachwindgeschwindigkeit) zu rechnen ist. Um dies zu vermeiden werden Metallstreifen als Abdeckung über die Austrittsöffnungen gelegt, so daß der Impuls abgeschwächt und horizontal umgelenkt wird. Zusätzlich sind verschiedene Kombinationen von Windgeschwindigkeiten u und Austrittsgeschwindigkeiten v_Q , welche durch den Volumenstrom Q_L in der Quelle reguliert werden, zu untersuchen.

Die Linienquellen für die Versuche im vorgestellten Projekt wurden nach dem von Meroney et al. (1996) beschriebenen Prinzip gebaut. Die wichtigen Daten lauten wie folgt:

Länge der Quelle	$L_Q = 1.42\text{m}$,
Innendurchmesser der Kanülen	$D = 0.5\text{mm}$,
Abstand zwischen den Kanülen	$a = 5\text{mm}$.

Im folgenden werden die Nachweise geliefert, daß die Linienquellen die Anforderung homogener Quellbedingungen erfüllen und daß bei den Straßenschluchtuntersuchungen zweidimensionale Verhältnisse in der Straßenschlucht realisiert wurden. Desweiteren wird die Reynolds-unabhängigkeit, d.h. die Bedingung

$$c_m^* = \frac{c_m \cdot u_{m,ref} \cdot L_{m,ref}}{Q_m / L_{m,Q}} = \text{konstant wenn } u_{m,ref} \text{ variiert} \quad (5.1)$$

überprüft. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus den Versuchen in Hamburg erfolgt in Kapitel 7.

5.1 Linienquelle in homogener Rauigkeit

Bei den Tests zur Überprüfung der Quellbedingungen wurden verschiedene Kombinationen von Windgeschwindigkeiten u und Volumenströme Q_L eingestellt, um letztlich die besten Bedingungen für die folgenden Untersuchungen festzulegen. Die Windgeschwindigkeiten wurden variiert zwischen $u=5\text{m/s}$, 7m/s , 9m/s oder 12m/s . Die Werte der Volumenströme Q_L und die entsprechenden Austrittsgeschwindigkeiten der Luft aus den Kanülen sind in Tab. 5.1 einge-

tragen. Die Serie wurde mit Messungen von Vertikalprofilen stromab der Quelle begonnen. Die Quelle befand sich dabei in homogener Umgebungsrauigkeit, d.h. es waren nur die Le-gesteine als Bodenrauigkeiten im Kanal eingebaut. In Tab. 5.2 sind die Abstände der Profile von der Linienquelle aufgelistet.

Tab. 5.1: Variationen des Luftvolumenstromes Q_L durch die Quelle und die dazu gehörenden Austrittsgeschwindigkeiten der Luft aus den Kanülen der Quelle

Volumenstrom Q_L :	212l/h	158l/h	105l/h	52l/h
Austrittsgeschwindigkeit v_Q :	1.05m/s	0.79m/s	0.52m/s	0.25m/s

In Abb. 5.1 sind exemplarisch die Ergebnisse für die vier Abstände $x=45\text{mm}$, 90mm , 180mm und 450mm dargestellt. In den Diagrammen sind jeweils vier Kurven zu sehen, welche unterschiedliche Kombinationen von u und Q_L repräsentieren. Die Ergebnisse sind in der Form dimensionsloser Konzentrationen

$$c^* = \frac{c \cdot u_\infty \cdot d}{Q_L / L}, \quad (5.2)$$

mit: u_∞ : Geschwindigkeit in Grenzschichthöhe d
 d : Grenzschichthöhe,
 Q_L / L : längenbezogene Tracergasemission.

dargestellt. Mit dieser Art der Normierung müssen bei Einhaltung der Reynoldsunabhängigkeit und der Anforderungen an die Modellierung der Quelle, für verschiedene Windgeschwindigkeiten und Volumenströme gleiche Ergebnisse erzielt werden. Es wird deutlich, daß nur im unmittelbaren Nahfeld der Quelle Abweichungen zwischen den Ergebnissen beobachtet wurden. Es ist aber keine Systematik im Bezug auf die Variation der Versuchsbedingungen zu erkennen. Aufgrund der starken Konzentrationsgradienten haben im Nahfeld Ungenauigkeiten in der Positionierung der Meßsonden einen großen Einfluß. Aus den guten Übereinstimmungen der Kurven in den Abständen mit $x > 100\text{mm}$ kann geschlossen werden, daß die konstruierten Linienquellen die beschriebenen Anforderungen erfüllen. Auf die Diskussion der Profilform wird in diesem Kapitel verzichtet. Sie erfolgt in Kapitel 7 im Zusammenhang mit dem Vergleich der Ergebnisse aus Hamburg.

In Abb. 5.2 sind Längsprofile in der Höhe $z=10\text{mm}$ eingezeichnet. Sie wurden aus den Vertikalprofilmessungen bestimmt. Die Kurven veranschaulichen erneut, daß nur im Nahfeld der Quelle ein Einfluß der unterschiedlichen Quellbedingungen zu erkennen ist.

Tab. 5.2: Abstände der gemessenen Vertikalprofile von der Linienquelle (in mm)

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
Karlsruhe	25	45	90	135	180	270	360	450	900

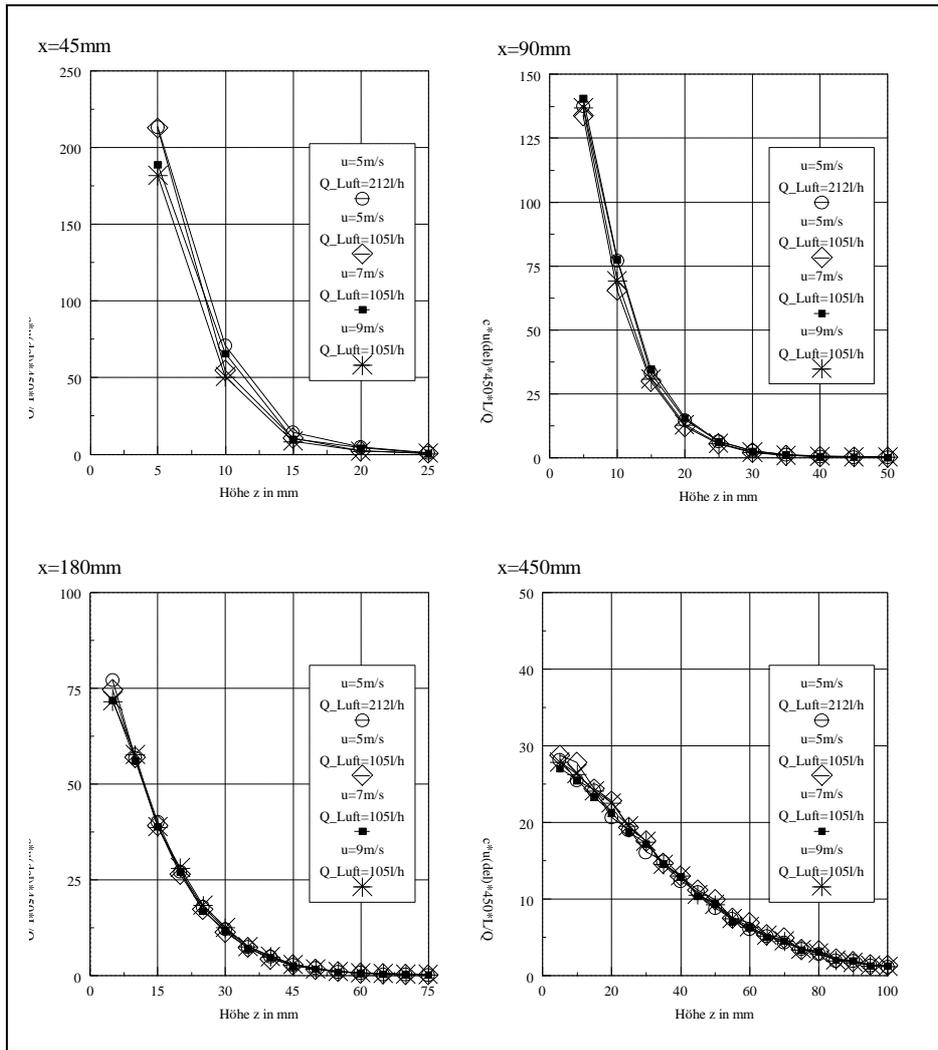


Abb. 5.1 Vertikalprofile stromab der Linienquelle in vier exemplarisch ausgewählten Abständen für vier verschiedene Versuchsbedingungen.

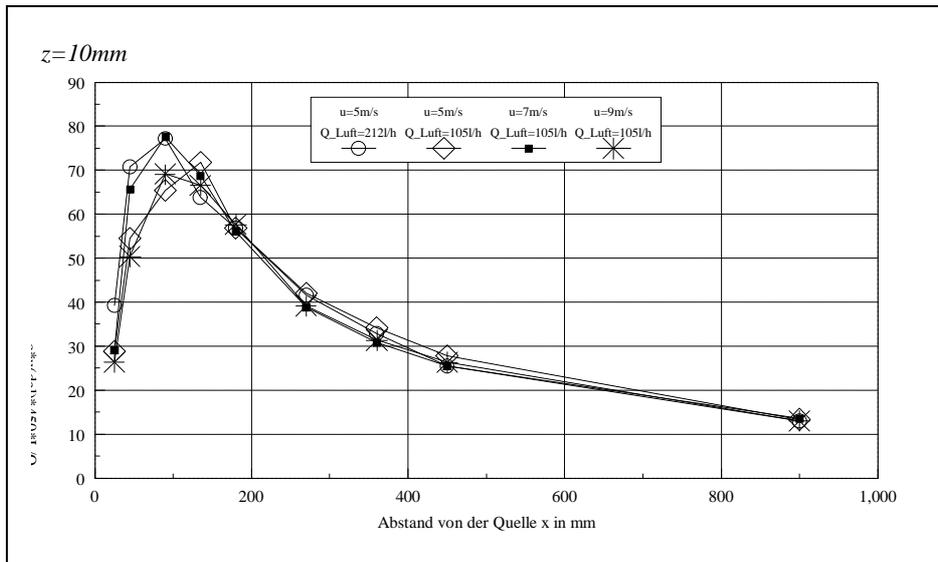


Abb. 5.2 Längsprofile stromab der Linienquelle in exemplarisch ausgewählter Höhe $z=10mm$ für vier verschiedene Versuchsbedingungen.

Das Kriterium der Homogenität der Quelle läßt sich am besten durch Messungen von Lateralprofilen stromab der Quelle überprüfen. In den Abständen $x=90\text{mm}$ und $x=180\text{mm}$ wurden für die vier Windgeschwindigkeiten $u=5\text{m/s}$, 7m/s , 9m/s oder 12m/s und jeweils zwei Volumenströme ($Q_L=212\text{l/h}$ und 105l/h) Konzentrationen über eine Breite von insgesamt 1.20m gemessen. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.3 zu sehen. Zusätzlich sind in Abb. 5.4 für jede Meßreihe die Mittelwerte und Standardabweichungen, gebildet aus den Ergebnissen an allen Meßpunkten, in Form von Balkendiagrammen aufgetragen. Betrachtet man zunächst die mittleren Verhältnisse, die aus allen Meßreihen resultieren so erhält man:

$x=90\text{mm}$	mittlere Konzentration	$\bar{c}^* = 63.7$
	mittlere Standardabweichung	$\bar{S} = 5.3$
	Variationskoeffizient	$\bar{S} / \bar{c}^* = 0.08$
$x=180\text{mm}$	mittlere Konzentration	$\bar{c}^* = 49.2$
	mittlere Standardabweichung	$\bar{S} = 3.4$
	Variationskoeffizient	$\bar{S} / \bar{c}^* = 0.07$

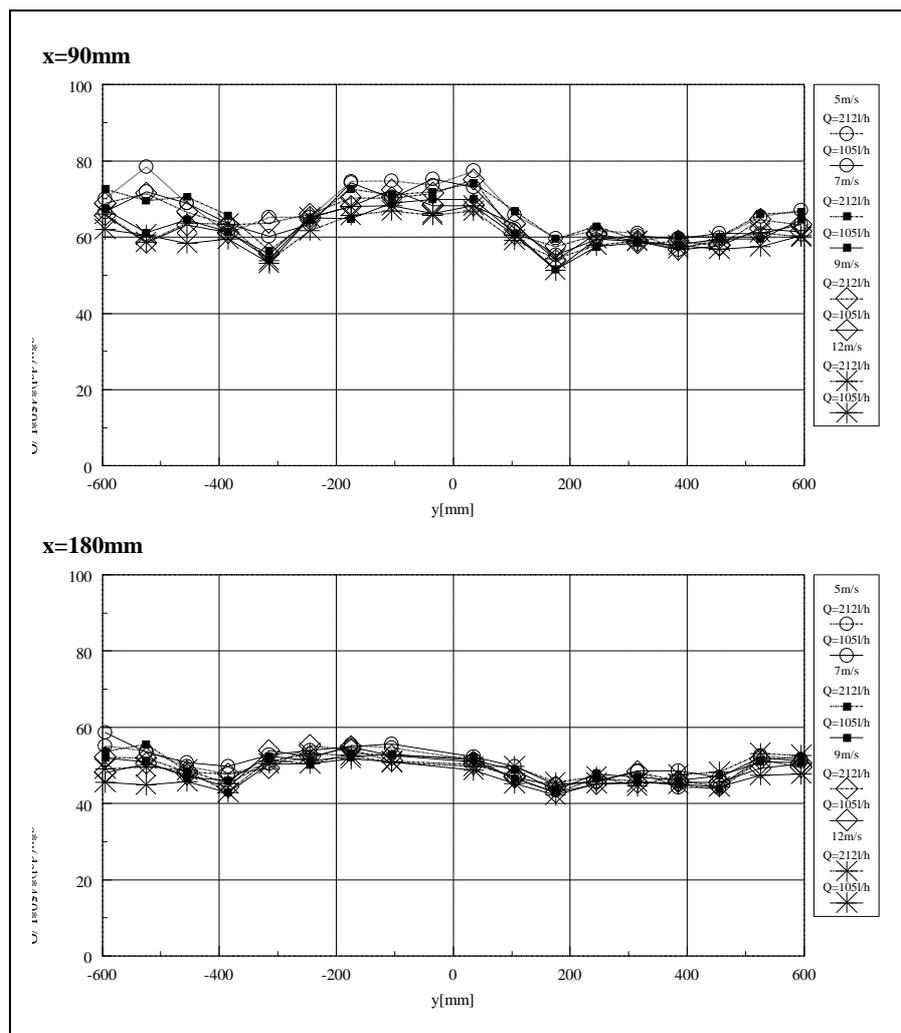


Abb. 5.3 Lateralprofile stromab der Linienquelle in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit u und dem Volumenstrom Q_L .

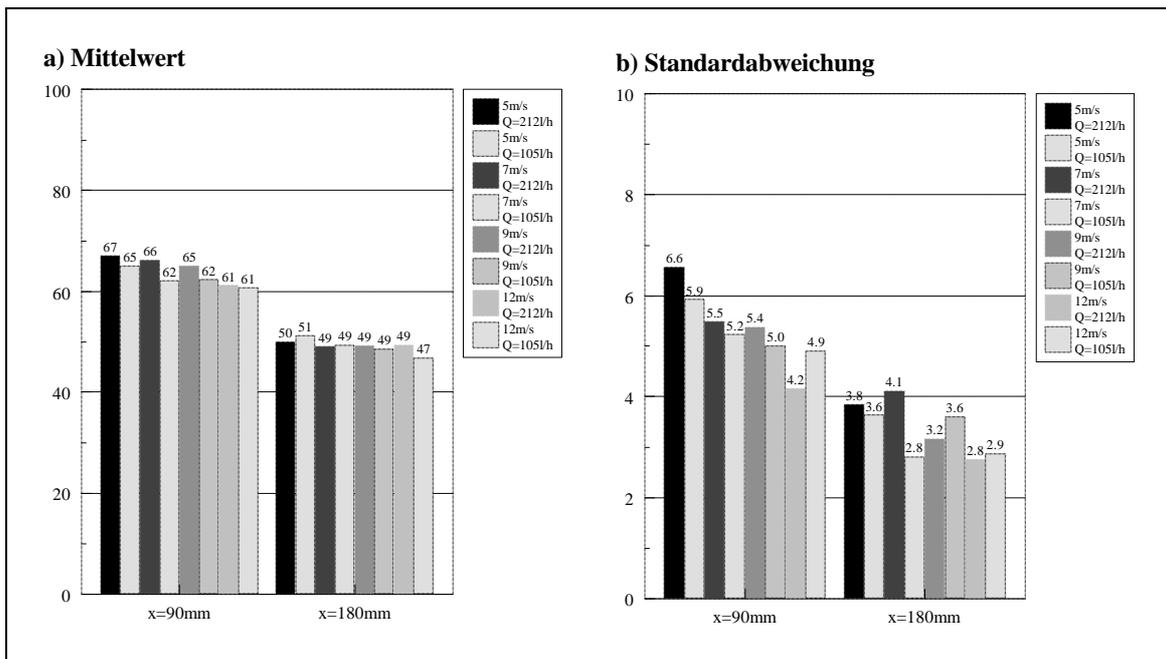


Abb. 5.4 Mittelwert und Standardabweichung der Konzentrationen bei den Messungen der Lateralprofile für verschiedene Versuchsbedingungen.

Dies bedeutet, daß die lateralen Schwankungen im Mittel 8% betragen. Die Werte liegen etwas über den von Meroney et al. (1996) angegebenen lateralen Schwankungen, stellen aber immer noch eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu früheren Untersuchungen dar. Aus Abb. 5.4 wird deutlich, daß eine gewisse Systematik zu erkennen ist. Die Messungen mit Windgeschwindigkeiten größer als 7m/s zeigen geringe Schwankungsanteile als die Messungen mit 5m/s. Für den direkten Vergleich mit den Ergebnissen aus Hamburg in Kapitel 7 werden als Referenzdatensatz die Ergebnisse der Messungen mit $u=7\text{m/s}$ und $Q_L=105\text{l/h}$ ausgewählt. Die Festlegung der Versuchsbedingungen für das vorgestellte Projekt erfolgte nach Abschluß der Testmessungen mit einer Straßenschluchtkonfiguration, welche im nächsten Abschnitt zusammengefaßt werden.

5.2 Testmessungen mit einer Straßenschluchtkonfiguration

Zur Überprüfung der Zweidimensionalität der Verhältnisse in einer Straßenschlucht, welche auch Aussagen über die Homogenität der Linienquelle liefern, und der Reynoldsunabhängigkeit wurden zunächst Versuche mit einfachen Holzmodellen durchgeführt. Die Länge der Gebäude betrug 1.80m, d.h. die Gebäude erstreckten sich über die gesamte Breite der Meßstrecke im Windkanal. Zusätzlich wurden an den Gebäudeenden Holzplatten angebracht, um ein seitliches Einströmen in die Straßenschlucht zu verhindern. Das Ziel war, möglichst zweidimensionale Strömungsverhältnisse in der Straßenschlucht zu realisieren. Neben einem Profil in der Gebäudemitte ($y=0\text{mm}$), wurden zwei weitere Meßpositionen seitlich versetzt bei $y=450\text{mm}$ $y=-450\text{mm}$ festgelegt. Der Vergleich der Ergebnisse an den drei Meßpositionen liefert dann die Aussagen über die Homogenität der Quelle und der Zweidimensionalität in der Straßenschlucht. Es wurden jeweils Vertikalprofile der Konzentrationen an den Häuserwänden gemessen und drei Meßpunkte auf den Gebäudedächern installiert. Die Werte der Windgeschwindigkeiten betragen wieder $u=5\text{m/s}$, 7m/s , 9m/s oder 12m/s und die Werte der Volumenströme Q_L

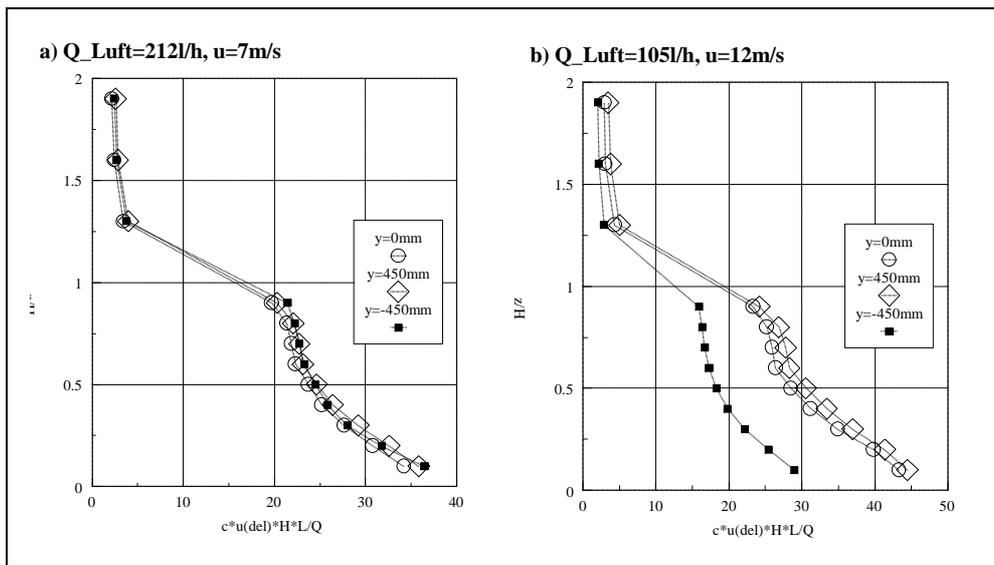


Abb. 5.5 Zusammenhang zwischen der Zweidimensionalität in einer Straßenschlucht und den Versuchsbedingungen.

wurden entsprechend Tab. 5.1 variiert. Es wurden insgesamt 16 verschiedene Zustände untersucht. Die Gebäudehöhe bei diesen Versuchen betrug im Gegensatz zu den Modellen, welche für die eigentlichen Straßenschluchtstudien eingesetzt wurden nur 10cm, so daß das Verhältnis der Gebäudehöhe zur Straßenbreite (12cm) $H/S=0.83$ betrug. Die Absolutwerte der dimensionslosen Konzentrationen sind deshalb nicht mit den Werten der Straßenschluchtstudien, die in Kapitel 6 zusammengefaßt werden, vergleichbar.

Im Gegensatz zu den Messungen in homogener Rauigkeit, wurde bei den Versuchen ein eindeutiger systematischer Zusammenhang zwischen den Versuchsbedingungen und den Ergebnissen beobachtet. Die Abweichungen der Ergebnisse an den drei Meßpositionen wurde deutlich durch das Verhältnis von Windgeschwindigkeit u und Volumenstrom Q_L beeinflusst. In Abb. 5.5 sind die Ergebnisse für zwei exemplarisch ausgewählte Bedingungen dargestellt. Bei den Ergebnissen für die Bedingungen $u=7\text{m/s}$ und $Q_L=212\text{l/h}$, welche im linken Diagramm zu sehen sind, wurde eine gute Übereinstimmung der Profile an den drei Meßpositionen beobachtet, während das rechte Diagramm aufzeigt, daß im Falle von $u=12\text{m/s}$ und $Q_L=105\text{l/h}$ große Abweichungen zwischen den Konzentrationen der drei Profile auftreten. Bei hohen Windgeschwindigkeiten und kleinen Volumenströmen können keine homogenen Quellbedingungen gewährleistet werden. Die Druckdifferenz an den Kanülen ist nicht ausreichend um lokale Druckunterschiede im Strömungsfeld auszugleichen. Die Quelle emittiert nicht gleichmäßig verteilt Tracergas über die gesamte Länge.

In Abb. 5.6 sind die Ergebnisse der 16 Versuchsreihen zusammengefaßt. In allen Meßhöhen wurde die Differenz zwischen der Konzentration an der Stelle $y=450\text{mm}$ bzw. -450mm und bei $y=0\text{mm}$ gebildet und das Maximum dieser beiden Betragswerte ermittelt. Diese Abweichung wurde dann jeweils in Bezug zur Konzentration an der Stelle $y=0\text{mm}$ gesetzt und letztlich der Mittelwert aus allen Meßhöhen gebildet. Die Ergebnisse dieser mittleren prozentualen Abweichung der seitlichen Werte vom Konzentrationswert in der Gebäudemitte wurde in Abhängigkeit von u für die verschiedenen Q_L aufgetragen. Es zeigt sich, daß mit abnehmendem Volu-

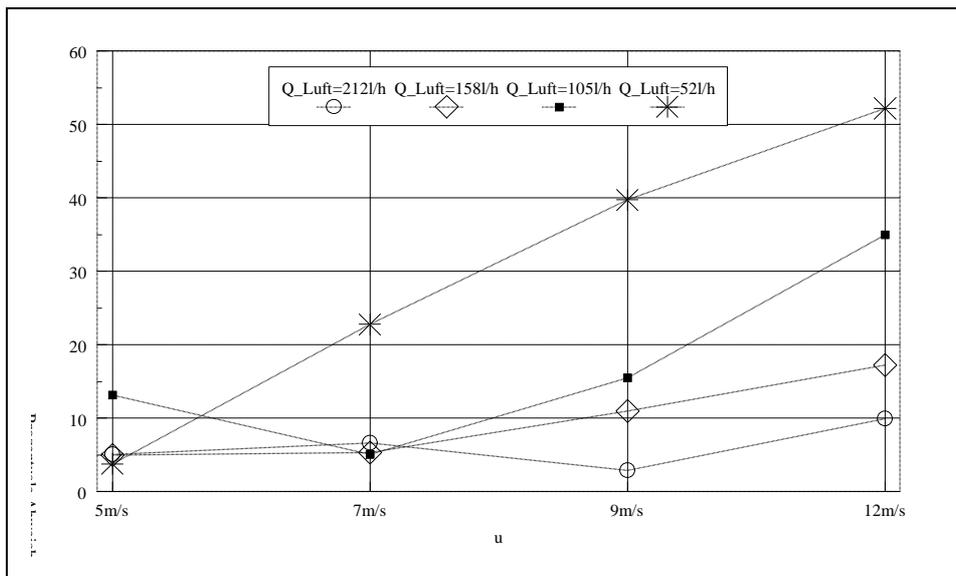


Abb. 5.6 Einfluß verschiedener Versuchsbedingungen auf die Abweichung zwischen Konzentrationsprofilen an drei unterschiedlichen horizontalen Meßpositionen in einer Straßenschlucht.

menstrom Q_L der Einfluß der Windgeschwindigkeit größer wird. Letztlich wurde aus dieser Abbildung die Kombination von u und Q_L ermittelt, mit welcher die Straßenschluchtstudien durchgeführt werden. Als Einstellungen wurden gewählt:

Windgeschwindigkeit $u=7\text{m/s}$
 Volumenstrom $Q_L=212\text{l/h}$.

In Abb. 5.7 ist der Einfluß der Windgeschwindigkeit auf die Konzentrationsprofile in der Gebäudemitte für die Fälle mit $Q_L=212\text{l/h}$ dargestellt. Die Ergebnisse liefern Aussagen über die Reynoldsunabhängigkeit. Für $u=12\text{m/s}$ wurden Abweichungen von 10-15% zu den Werten für $u=7\text{m/s}$ beobachtet. Für die beiden anderen Windgeschwindigkeiten lagen die Abweichungen in der Größenordnung von 5%, so daß ab 5m/s von einer Reynoldsunabhängigkeit der Ergebnisse ausgegangen werden kann. Dieses Ergebnis erlaubt die Beschränkung auf eine Windgeschwindigkeit bei den weiteren Studien und die Darstellung der Ergebnisse in Form dimensionsloser Konzentrationen nach Gleichung 4.3, welche die Umrechnung der Ergebnisse für andere Windgeschwindigkeiten ermöglichen.

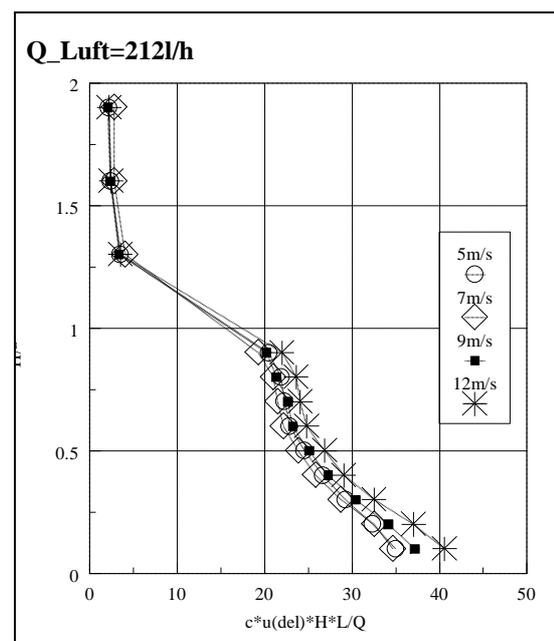


Abb. 5.7 Reynoldsunabhängigkeit

Abschließend ist in Abb. 5.8 noch ein Ergebnis der Überprüfung der Zweidimensionalität in den

Straßenschluchten mit den Modellen der Straßenschluchtstudien (Plexiglasmodelle mit $H=12\text{cm}$ und $H/S=1$, detaillierte Beschreibung im nächsten Kapitel) zu sehen. Es wurden Vertikalprofile an insgesamt 9 Meßpositionen gemessen. Die Meßpunkte sind durch Kreuze markiert und die eingetragenen Werte entsprechen den Konzentrationswerten am Meßpunkt normiert mit der Konzentration in der Gebäudemitte. Die Länge der Quelle (1.42m) betrug nur 80% der Gebäudelänge (1.80m), so daß die beiden äußeren Profile schon außerhalb des Quellbereichs lagen. Im Zentrum der Straßenschlucht werden mit dem gewählten Versuchsaufbau zweidimensionale Verhältnisse sehr gut realisiert.

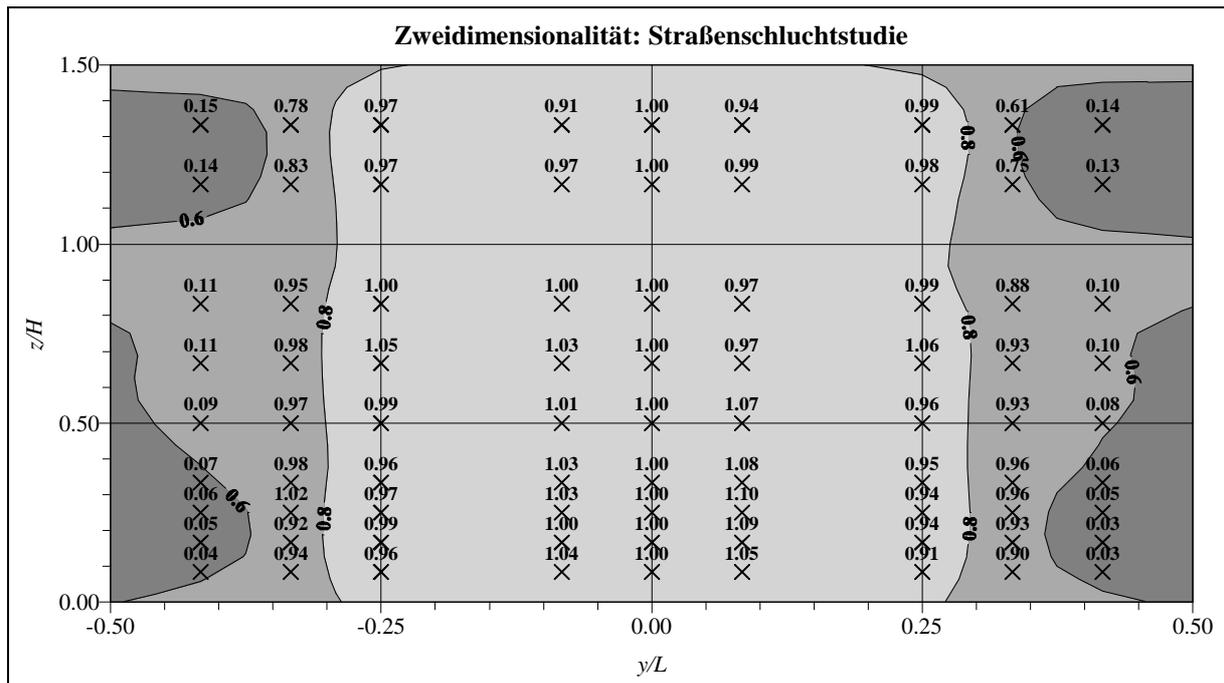


Abb. 5.8: Überprüfung der Zweidimensionalität bei den Straßenschluchtstudien mit 180cm langen Gebäuden ($L/H=15$; $S/H=1$)

6. Untersuchung der Ausbreitungsverhältnisse in Straßenschluchten

6.1 Versuchsaufbau

Für die Bestimmung der Konzentrationsverteilungen in Straßenschluchten wurden Modelle idealisierter Randbebauungen hergestellt. In Abb. 6.1 ist das im Windkanal eingebaute Modell einer beidseitig bebauten Straßenschlucht ohne Umgebungsbebauung zu sehen. Zusätzlich verdeutlicht eine Definitionsskizze den Versuchsaufbau. Die Meßstellen befinden sich an den Wänden von Gebäude I und II. Es wurden zwei Quellen betrieben, die einen Abstand von 35mm (Quelle A) und 85 mm (Quelle B) zu Gebäude I hatten. Die Festlegung der Quellbedingungen ist im vorhergehenden Kapitel ausführlich beschrieben. Auf die Modellierung KFZ-erzeugter Turbulenz wurde bei den Versuchen verzichtet. Der Einfluß dieses Parameters wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (Rastetter, 1997) untersucht. Die Arbeiten werden im Verlauf eines PEF - Folgeprojektes fortgesetzt.

Die bei senkrechter Anströmung ($= 90^\circ$) untersuchten Bebauungssituationen sind in Tab. 6.1 zusammengefaßt. Tab. 6.2 gibt einen Überblick über die Variationen der geometrischen Größen des Modells. Es wurden nicht alle Kombinationen untersucht, sondern nur ausgewählte Fälle. Neben den Modelldaten in cm sind die entsprechenden dimensionslosen Kenngrößen der Bebauungsstrukturen angegeben. Die Auswahl des Modellmaßstabes wurde in Kapitel 4 diskutiert. Ausgehend von einem Modellmaßstab von $M=1:150$ entspricht die Gebäudehöhe $H=12\text{cm}$ in der Natur $\approx 18\text{m}$. Da es bei der Wahl des Modellmaßstabes jedoch einen gewissen Spielraum gibt, können die Ergebnisse auch auf Situationen mit höheren Gebäuden übertragen werden. Voraussetzung ist dann, daß alle dimensionslosen Kenngrößen mit den bei den Mo-

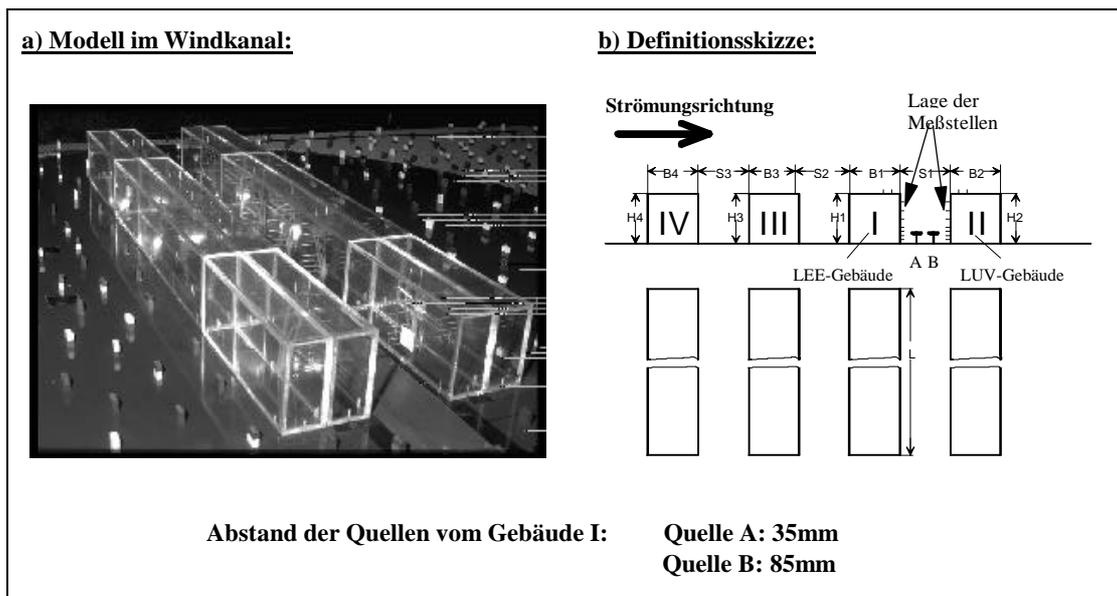


Abb. 6.1: Versuchsaufbau bei den Konzentrationsmessungen in Straßenschluchten

a) Modell eingebaut in den Windkanal

b) Definitionsskizze zur Anordnung der Gebäude

Tab. 6.1: Versuchsaufbau bei den Messungen der Konzentrationsverteilungen in Straßenschluchten bei senkrechter Anströmung

Bebauungssituation	Eingebaute Gebäude			
	Gebäude I	Gebäude II	Gebäude III	Gebäude IV
Einseitig bebaute Straßenschlucht (nur Lee-Gebäude)	ja	nein	nein	nein
Einseitig bebaute Straßenschlucht (nur Luv-Gebäude)	nein	ja	nein	nein
Beidseitig bebaute Straßenschlucht ohne Umgebungsbebauung	ja	ja	nein	nein
Beidseitig bebaute Straßenschlucht mit Umgebungsbebauung	ja	ja	ja	ja

dellversuchen eingestellten Werten übereinstimmen. Für unsere Versuche heißt dies, daß z.B. bei einem in der Natur 25m hohen Gebäude auch die Straßenbreite $SI=25m$ betragen muß, da $SI/H=1$ zu erfüllen ist. Entsprechend sind auch die anderen geometrischen Größen umzurechnen.

Die Ergebnisse werden in der Form dimensionsloser Konzentrationen

$$c_m^* = \frac{c_m \cdot u_{100} \cdot H}{Q_m / L_{m,Q}} \quad (6.1)$$

dargestellt. Als Referenzgrößen wurden die Geschwindigkeit u_{100} und die Gebäudehöhe H (120mm) eingesetzt. Die Geschwindigkeit u_{100} entspricht der Geschwindigkeit in der Höhe 100m in der Natur, bei einem Windprofil in der ungestörten Anströmung mit einem Profilexponent $\alpha=0.23$. Die Auswahl dieser Geschwindigkeit als Referenzgeschwindigkeit erfolgte in Absprache mit den Bearbeitern des PEF - Projektes am Ingenieurbüro Lohmeyer. Dadurch war ein direkter Vergleich mit den numerischen Ergebnissen aus diesem Projekt möglich, welche in dieser Form dargestellt wurden.

Die Versuchsreihe wurde mit Messungen für eine beidseitig bebaute, zweidimensionale Straßenschlucht bei senkrechter Anströmung begonnen. Diese Konfiguration stellt den Referenzfall für alle Versuche im Rahmen der Straßenschluchtstudie dar. Die Situation wurde im Windkanal durch 180cm lange Gebäude realisiert, welche zusätzlich an den Gebäudeenden mit Platten versehen waren um ein seitliches Einströmen zu verhindern. Im Zentrum der Schlucht kann, wie in Abb. 5.8 dokumentiert wurde, von zweidimensionalen Verhältnissen ausgegangen werden. Die Zone ohne Einfluß von Randeffekten erstreckt sich bis zu einem Abstand von etwa $0.3L$ zu beiden Seiten der Schluchtmitte. Die dimensionslosen Kenngrößen, welche die Gebäudekonfiguration des Referenzfalls beschreiben, lauten:

Tab. 6.2: Variationen der geometrischen Größen des Modells

Geometrische Größe	Modelldaten in cm I	entsprechende dimensionslose Größe
Gebäudehöhen	$L_{m,ref}=H1=H2=H3=H4=H=12$	
Gebäuelängen	$L=60, 120, 180$	$L/H=5, 10, 15$
Gebäudebreiten	$B1=6, 12, 18, 24$ $B2=6, 12$ $B3=6, 12$ $B4=6, 12$	$B1/H=0.5, 1, 1.5, 2$ $B2/H=0.5, 1$ $B3/H=0.5, 1$ $B4/H=0.5, 1$
Breiten der Straßenschluchten	$S1=12$ $S2=12, 18$ $S3=12$	$S1/H=1$ $S2/H=1, 1.5$ $S3/H=1$
Abstand der Quellen von Gebäude I	Quelle A: $s_a=3.5$ Quelle B: $s_b=8.5$	$s_a/H \gg 0.3$ $s_b/H \gg 0.7$

$$L/H=15,$$

$$B1/H=1,$$

$$S1/H=1.$$

Nach Abschluß dieser 1. Versuchsreihe wurde das Versuchsprogramm erweitert und der Einfluß folgender Parameter auf die Schadstoffbelastung untersucht:

- Untersuchung einseitig bebauter Straßenschluchten
- Variation der Hausbreite und Hauslänge. Die dimensionslosen Kenngrößen der Gebäudegeometrie wurden entsprechend Tab. 6.2 eingestellt. Es wurden jedoch nicht alle Kombinationsmöglichkeiten untersucht.
- Einfluß von zusätzlichen Gebäuden (Gebäude III und IV) für den Fall einer beidseitig bebauten Straßenschlucht mit der Hauslänge $L=180\text{cm}$.
- Einfluß der Windrichtung für den Fall einer beidseitig bebauten Straßenschlucht mit den Hauslängen $L=60\text{cm}$ und $L=120\text{cm}$.

Die Ergebnisse werden in den nächsten Abschnitten vorgestellt.

6.2 Ergebnisse für eine beidseitig bebaute zweidimensionale Straßenschlucht (Referenzfall)

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben wurde, wird als Referenzfall der Straßenschluchtstudie, eine beidseitig bebaute Straßenschlucht mit zweidimensionalen Strömungsverhältnissen betrachtet. Für diesen Fall sind in Abb. 6.2 Konzentrationsprofile in der Gebäudemitte ($y=0\text{mm}$) entlang der Wände und Dächer der Gebäude I und II eingetragen. Variiert wurde die Position der Quelle. Es wurden die in Abb. 6.1 skizzierten Positionen A und B untersucht. Die Abstände der Quellen von Gebäude I sind in Tab. 6.2 aufgelistet. Die Konzentrationswerte sind über der mit der Gebäudehöhe H normierten Koordinate z , welche entlang der Gebäudeoberfläche läuft und ihren Ursprung am Boden der Straßenschlucht hat, aufgetragen.

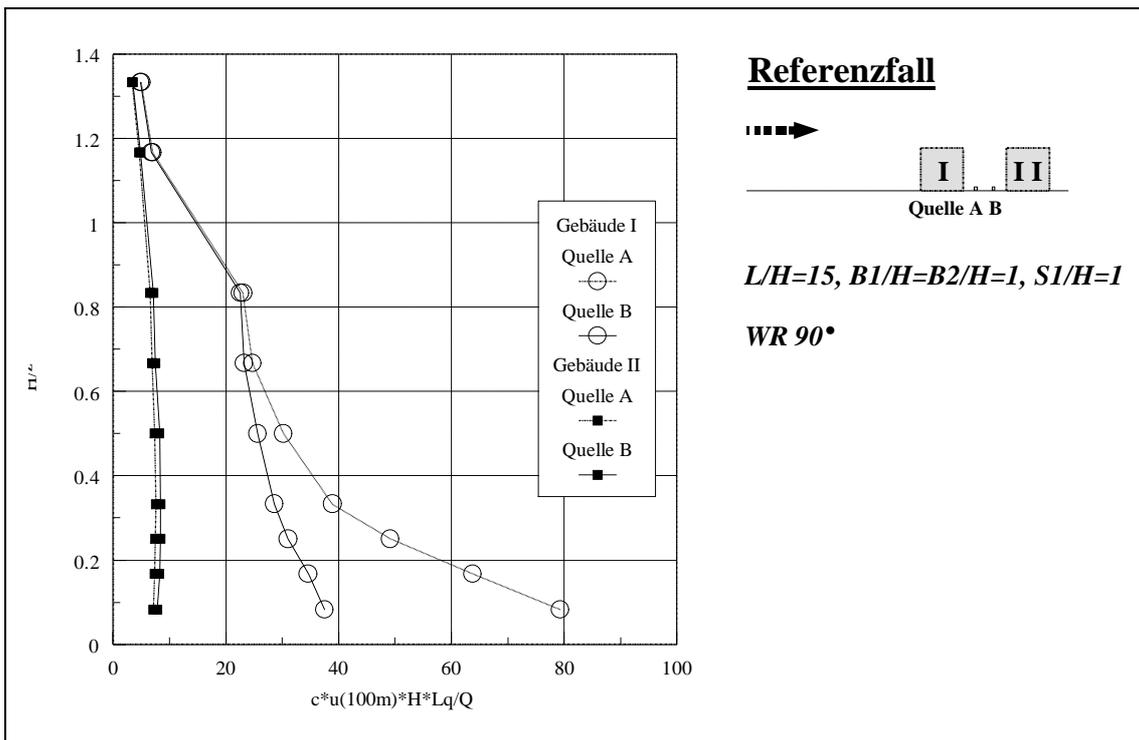


Abb. 6.2: Konzentrationsprofile an den Wänden und Dächern der Gebäude einer beidseitig bebauten, zweidimensionalen Straßenschlucht bei senkrechter Abströmung in Abhängigkeit von der Quellposition ($y=0\text{mm}$).

Meßpunkte mit $z/H > 1$ entsprechen Meßpunkten auf den Gebäudedächern. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die leeseitigen Konzentrationen am Gebäude I sind deutlich höher als die luvseitigen am Gebäude II. In Bodennähe werden bis zu achtmal höhere Konzentrationen beobachtet.
- Am Gebäude I treten hohe vertikale Konzentrationsgradienten auf. Das Konzentrationsmaximum liegt in Bodennähe. In halber Gebäudehöhe haben die Werte teilweise bereits um mehr als die Hälfte abgenommen.
- Am Gebäude II sind die Konzentrationen vertikal gleichmäßig verteilt.
- Die Position der Quelle hat einen starken Einfluß auf die Konzentrationsprofile am Gebäude I. Am Boden wurden für Position A etwa doppelt so hohe Konzentrationen gemessen wie für Position B. In Gebäudehöhe lagen die Unterschiede im Bereich der Meßgenauigkeit.
- Am Gebäude II wird kein Einfluß der Position der Quelle festgestellt.
- Auf dem Dach von Gebäude I wurden Konzentrationen gemessen, die höher waren als die Konzentrationen in der Schlucht an der Wand vom Gebäude II.

Die Ergebnisse korrespondieren mit den aus der Literatur bekannten Zusammenhängen für senkrecht angeströmte Straßenschluchten, in welchen die Strömungsverhältnisse durch die Ausbildung eines „Canyon - Vortex“ bestimmt werden.

6.3 Vergleich einseitig und beidseitig bebaute Straßenschlucht

Neben dem Fall einer beidseitig bebauten Straßenschlucht wurden auch einseitig bebaute Straßenschluchten, d.h. Situationen mit einer Quelle im Luv oder Lee eines einzelnen Gebäudes, untersucht. Die Länge der Gebäude betrug zunächst wieder 180cm, so daß im Zentrum der Gebäude wieder von zweidimensionalen Verhältnissen ausgegangen werden kann. Analog zu Abb. 6.2 sind in Abb. 6.3 vertikale Konzentrationsprofile in der Gebäudemitte ($y=0\text{mm}$) aufgetragen. Die Anordnung der Gebäude und Quellen für die beiden untersuchten Fälle ist in der Abbildung skizziert. Im Fall I befanden sich die Quellen im Lee des Gebäudes, im Fall II im Luv des Gebäudes. Variiert wurde wieder die Position der Quelle. Obwohl im Fall II der Wind direkt von der Quelle auf das Gebäude bläst, werden in diesem Fall deutlich geringere Konzentrationen beobachtet als im Fall I. Bei letzterer Konfiguration werden die Schadstoffe in den Leewirbel des Gebäudes eingemischt und entgegen der Anströmrichtung an die Gebäudewand transportiert. Dort kommt es zu einer vertikalen Vermischung. Zum Vergleich der Ergebnisse mit dem Referenzfall sind in Abb. 6.4 die Konzentrationen in der Höhe $z=10\text{mm}$ und der Mittelwert der Konzentrationen aus den Meßpunkten an den Gebäudewänden ($z/H < 1$) in Form von Balkendiagrammen dargestellt.

Zusammenfassend können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

- Bei einseitig bebauten Straßenschluchten stellt die Konfiguration Quelle im Lee eines Gebäudes den ungünstigeren Fall dar als Quelle im Luv eines Gebäudes. Der Konzentrationsunterschied in Bodennähe beträgt etwa Faktor 3.
- Für den Fall Quelle im Lee des Gebäudes wird nur im unteren Wandbereich (ca. 30%) ein

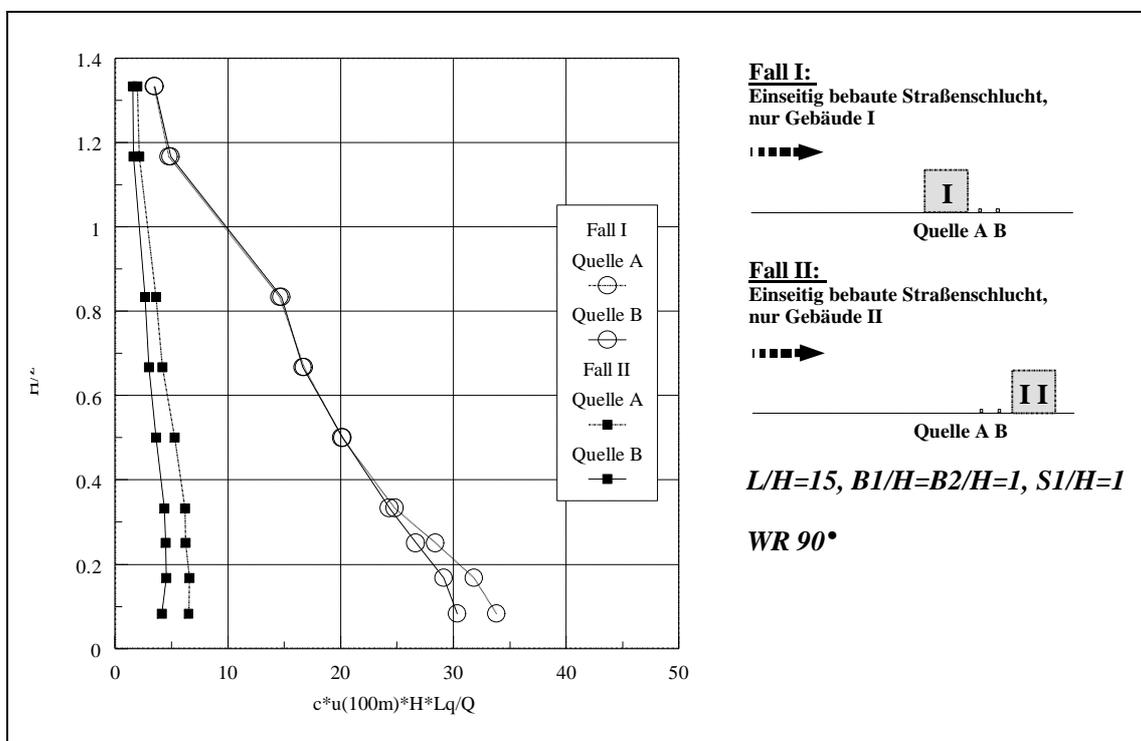


Abb. 6.3: Konzentrationsprofile an den Wänden und Dächern der Gebäude von einseitig bebauten, zweidimensionalen Straßenschluchten bei senkrechter Abströmung in Abhängigkeit von der Quellposition ($y=0\text{mm}$).

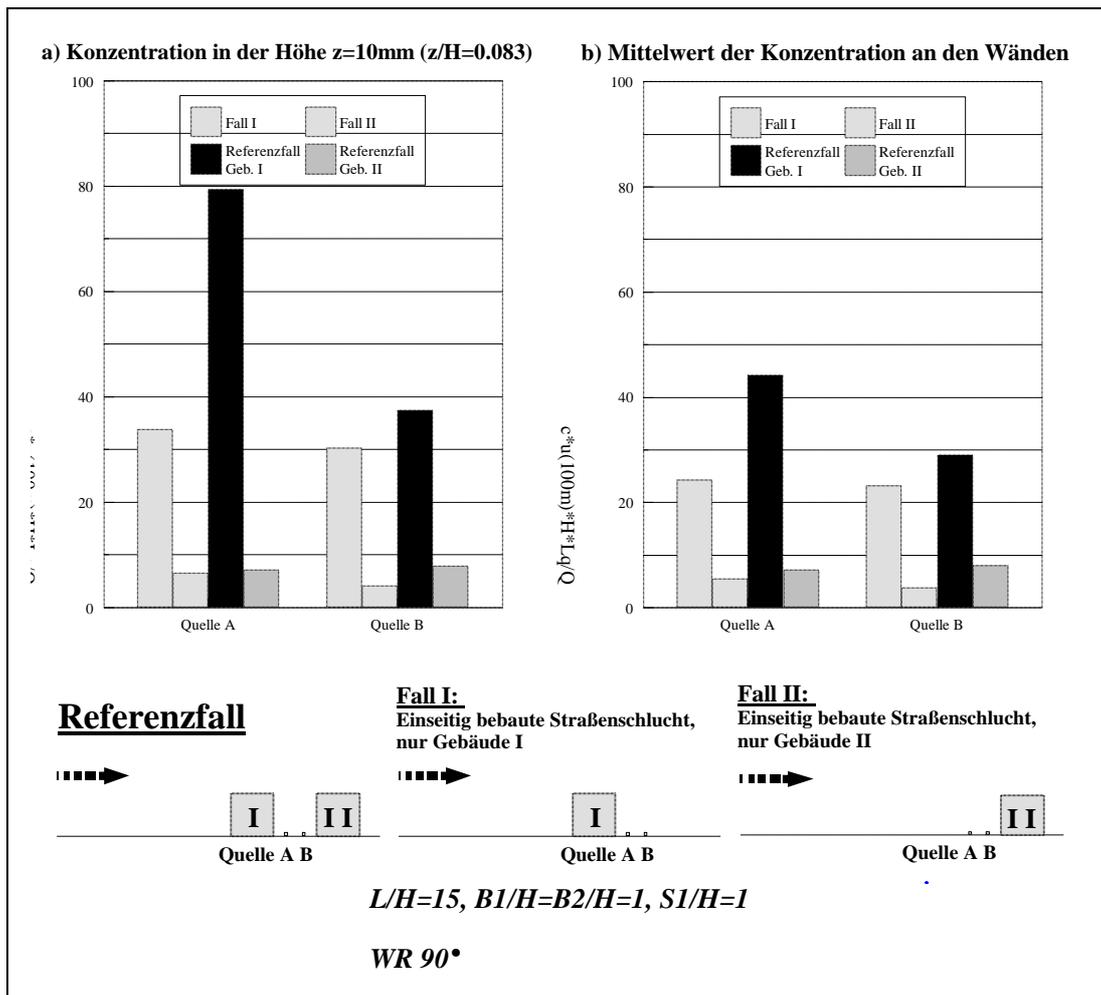


Abb. 6.4: Vergleich der Ergebnisse für einseitig und beidseitig bebaute, zweidimensionale Straßenschluchten bei senkrechter Abströmung.

Einfluß der Quellposition beobachtet. Im Fall der luvseitigen Quelle sind Unterschiede über den gesamten Wandbereich zu erkennen.

- Beidseitig bebaute Straßenschluchten stellen den „worst - case“ hinsichtlich der Schadstoffbelastung dar. An der leeseitigen Schluchtwand werden Konzentrationen gemessen die deutlich höher sind als bei einseitiger Bebauung.

6.4 Einfluß der Gebäudegeometrie

6.4.1 Variation der Gebäudelänge

Die Studien wurden fortgesetzt, indem zunächst die Längen der Gebäude variiert wurden. Nachdem bei den Gebäudekonfigurationen mit dem Längen zu Höhen Verhältnis $L/H=15$ durch zusätzlichen Einbauten zur Abschwächung der Seitenwirbel an den Gebäudeenden, die beschriebenen zweidimensionalen Verhältnisse realisiert wurden, wurden Gebäude mit $L/H = 10$ (120cm lang) und $L/H = 5$ (60cm lang) im Windkanal untersucht. Bei diesen Konfigurationen ist ein seitliches Einströmen in die Schlucht möglich und es zu erwarten, daß sich an den Gebäudeenden Wirbel mit einer horizontalen Ausdehnung von $2-3H$ ausbilden. Auf die Diskussion der horizontalen Konzentrationsunterschiede wird jedoch in diesem Kapitel verzichtet. Sie erfolgt bei der Diskussion der Windrichtungsabhängigkeit im Kapitel 6.6. In den folgenden Abbildungen werden die Konzentrationen in der Gebäudemitte, d.h. bei $y=0$ mm präsentiert. Die Länge der Quelle betrug bei allen Versuchen $L_q = 142$ cm. Die Gebäudelänge wurde sowohl bei beidseitig als auch einseitig bebauten Straßenschluchten variiert.

In Abb. 6.5 sind zunächst wieder vertikale Konzentrationsprofile an den Gebäude I und II einer beidseitig bebauten Straßenschlucht zu sehen. Das linke Diagramm zeigt die Ergebnisse für Quellposition A, das rechte für Quellposition B. Die unterschiedlichen L/H - Verhältnisse sind durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet. Gestrichelte Linien entsprechen den Werten am Gebäude II, durchgezogene repräsentieren Gebäude I. Mittelwerte der Konzentrationen aus den Meßpunkten an den Wänden (ohne Meßpunkte auf dem Dach) normiert mit dem entsprechenden Wert im Referenzfall ($L/H = 15$) sind in Abb. 6.6 eingezeichnet. Die beiden Abbildungen zeigen auf, daß im Falle dreidimensionaler Strömungsverhältnisse in den Gebäudemitten teilweise höhere Konzentrationen auftreten als im Falle einer zweidimensionalen Straßenschlucht. An beiden Gebäuden und für beide Quellpositionen steigen die Konzentrationen in den Gebäudemitten bei einer Verkürzung der Gebäudelängen zunächst an und nehmen dann wieder ab. Eine mögliche Erklärung ist ein horizontaler Transport von Schadstoffen zur Schluchtmitte, welcher durch die Seitenwirbel an den Gebäudeenden induziert wird. Die Unterschiede zwischen den Fällen $L/H = 10$ und 5 können dadurch erklärt werden, daß im ersten Fall im Schluchtzentrum noch zweidimensionale Verhältnisse auftreten, welche durch einen „Canyon - Vortex“ mit geringem vertikalem Austausch bestimmt werden, während $L/H = 5$ den vollständig dreidimensionalen Fall darstellt, bei welchem sich die Ausdehnung der Seitenwirbel bis zur Schluchtmitte erstreckt. Die genaue Klärung der Vorgänge erfordert jedoch Informationen über die Strömungsfelder. Bei Berichterstellung lagen darüber keine Meßergebnisse vor.

In den Abb. 6.7 und 6.8 sind die Ergebnisse in gleicher Weise für die Fälle mit einseitiger Bebauung dargestellt. Bei einseitiger Bebauung wurden für alle Konfigurationen für die kürzeren Gebäude geringere Konzentrationen als im zweidimensionalen Fall beobachtet. Im Fall der leeseitigen Quelle wurde jedoch ein erneuter Anstieg der Konzentrationen für $L/H = 5$ festgestellt, während im Fall der luvseitigen Quelle bei diesem Verhältnis die geringsten Konzentrationen auftraten.

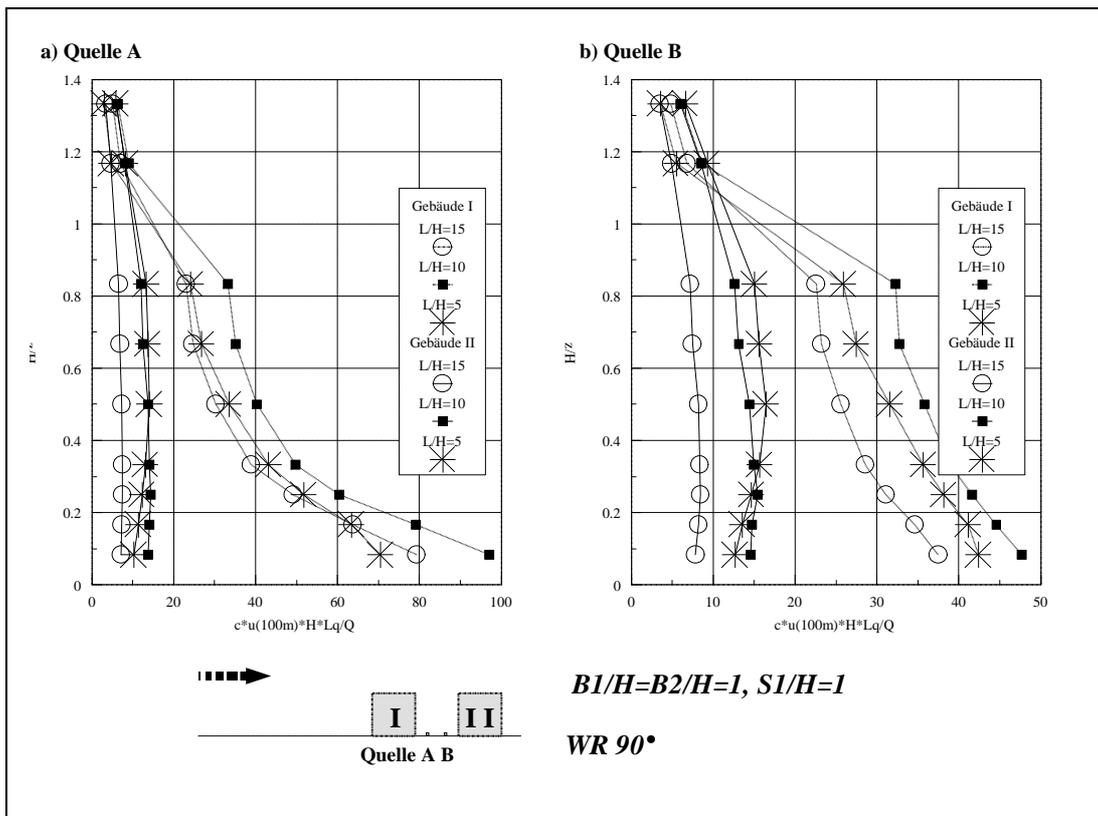


Abb. 6.5: Variation der Gebäudelänge für den Fall einer beidseitig bebauten Straßenschlucht bei senkrechter Anströmung.

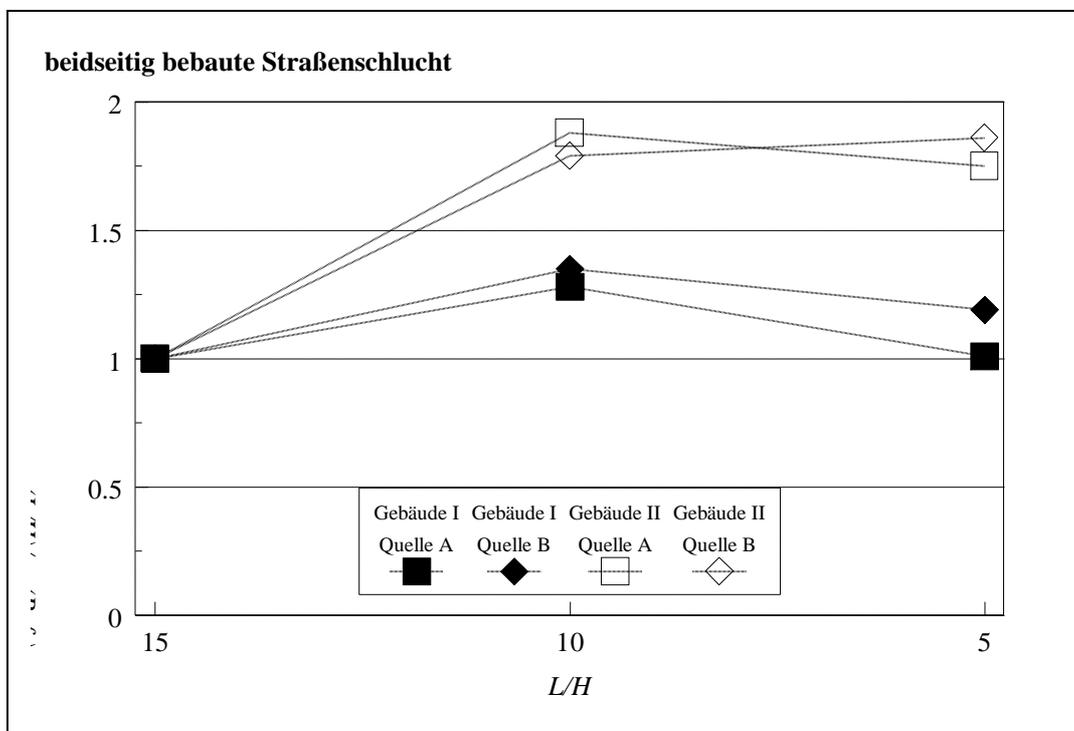


Abb. 6.6: Einfluß der Variation der Gebäudelänge auf den Mittelwert der Konzentration an den Wänden einer beidseitig bebauten Straßenschlucht bei senkrechter Anströmung.

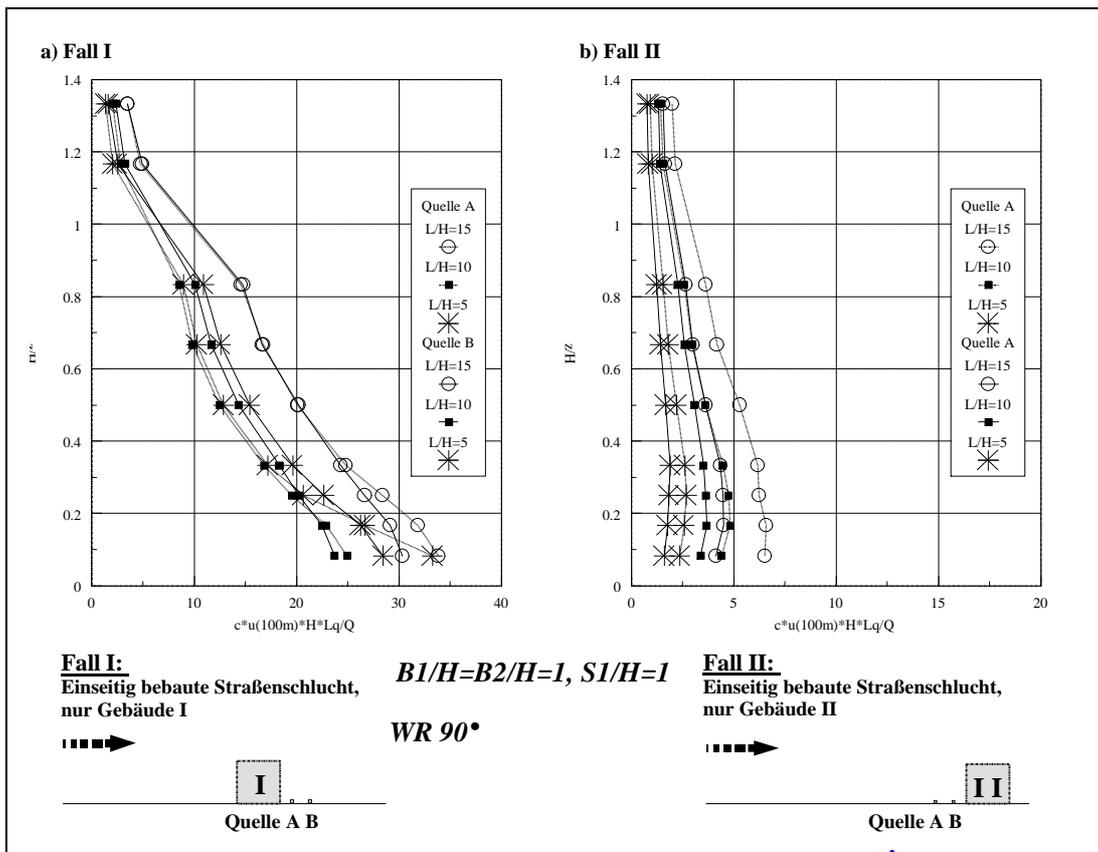


Abb. 6.7: Variation der Gebäudelänge für den Fall einseitig bebauter Straßenschluchten bei senkrechter Anströmung.

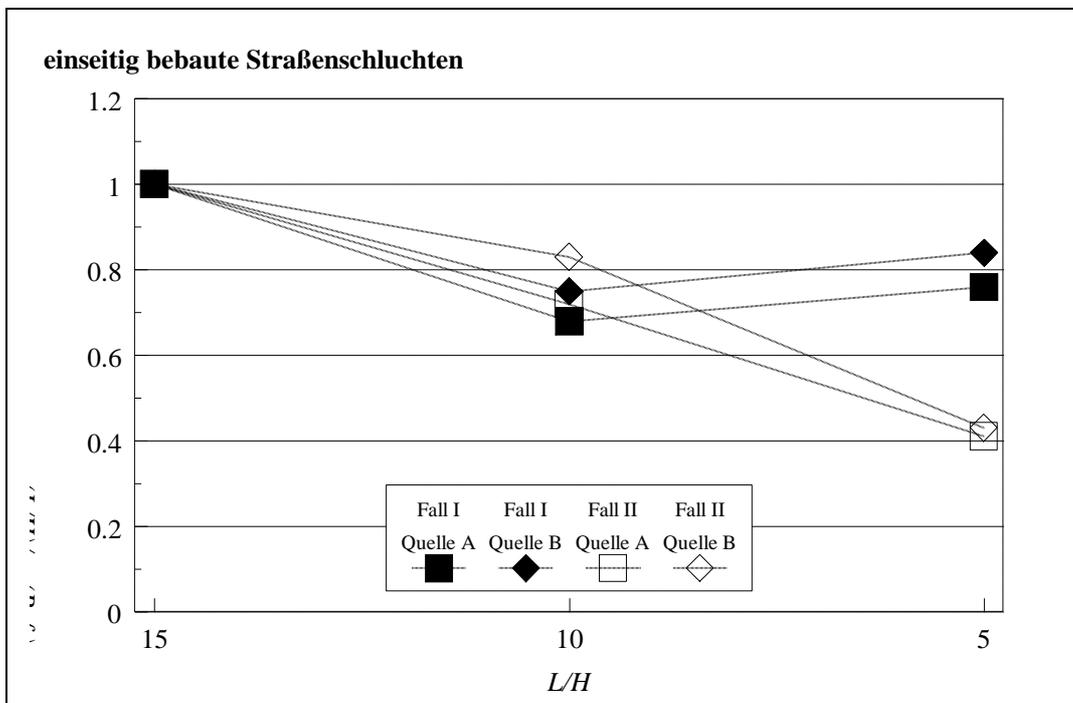


Abb. 6.8: Einfluß der Variation der Gebäudelänge auf den Mittelwert der Konzentration an den Wänden einseitig bebauter Straßenschluchten bei senkrechter Anströmung.

6.4.2 Variation der Gebäudebreite

Als weiterer Parameter der Gebäudegeometrie wurde das Verhältnis $B1/H$ der Gebäudebreite zur Gebäudehöhe des stromaufwärts liegenden Gebäudes I variiert. Untersucht wurden die Größen $B1/H=0.5$, 1, 1.5 und 2. Zu unterschieden sind die Fälle $B2/H=0.5$ (Breite von Gebäude II entspricht 6cm) und $B2/H=1$ (Breite von Gebäude II entspricht 12cm). Das Verhältnis L/H betrug 15, so daß die Variationen der Gebäudebreite für zweidimensionale Straßenschluchten durchgeführt wurden. Analog zu den vorhergehenden Abschnitten sind vertikale Konzentrationsprofile in den Diagrammen in Abb. 6.9 dargestellt. Der Vergleich der oberen und unteren Diagramme zeigt auf, daß erwartungsgemäß kein großer Einfluß der Breite des zweiten, stromab liegenden Gebäudes festgestellt wurde. Die Ergebnisse werden hier dennoch komplett gezeigt, da die beobachteten Effekte des Einflusses von $B1/H$ durch die zweite Meßreihe mit $B2/H=0.5$ bestätigt werden und sie auch Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse liefern. Der Einfluß der Breite von Gebäude I ist deutlicher in den rechten Diagrammen, d.h. den Ergebnissen für Quellposition B zu erkennen. Den größten Einfluß stellt man bezüglich der Dachkonzentrationen fest. Hier sind für die schmalen Gebäude mit $B1/H=0.5$ etwa um den Faktor 2 größere Konzentrationen gemessen worden als im Referenzfall. Im Falle von $B1/H=2$ dagegen wird nur noch ein minimaler Transport von Schadstoffen auf die Gebäudedächer beobachtet. An den Gebäudewänden liefert, wie die Darstellung der Mittelwerte bezogen auf den jeweiligen Mittelwert im Referenzfall ($B1/H=B2/H=1$) in Abb. 6.10 veranschaulicht, das Verhältnis $B1/H=1$ die geringsten Konzentrationen. Der Einfluß der Gebäudebreite läßt sich durch das Wiederanlegen der Strömung auf dem Dach von Gebäude I erklären. Die Ergebnisse lassen vermuten, daß das Verhältnis $B1/H=1$ einen kritischer Wert darstellt, ab welchem ein Wiederanlegen der Strömung möglich ist.. Genauere Aufschlüsse sind auch hier aus zusätzlichen Messungen der Strömungsfelder zu erwarten, welche im vorgestellten Projekt aber nicht durchgeführt werden konnten.

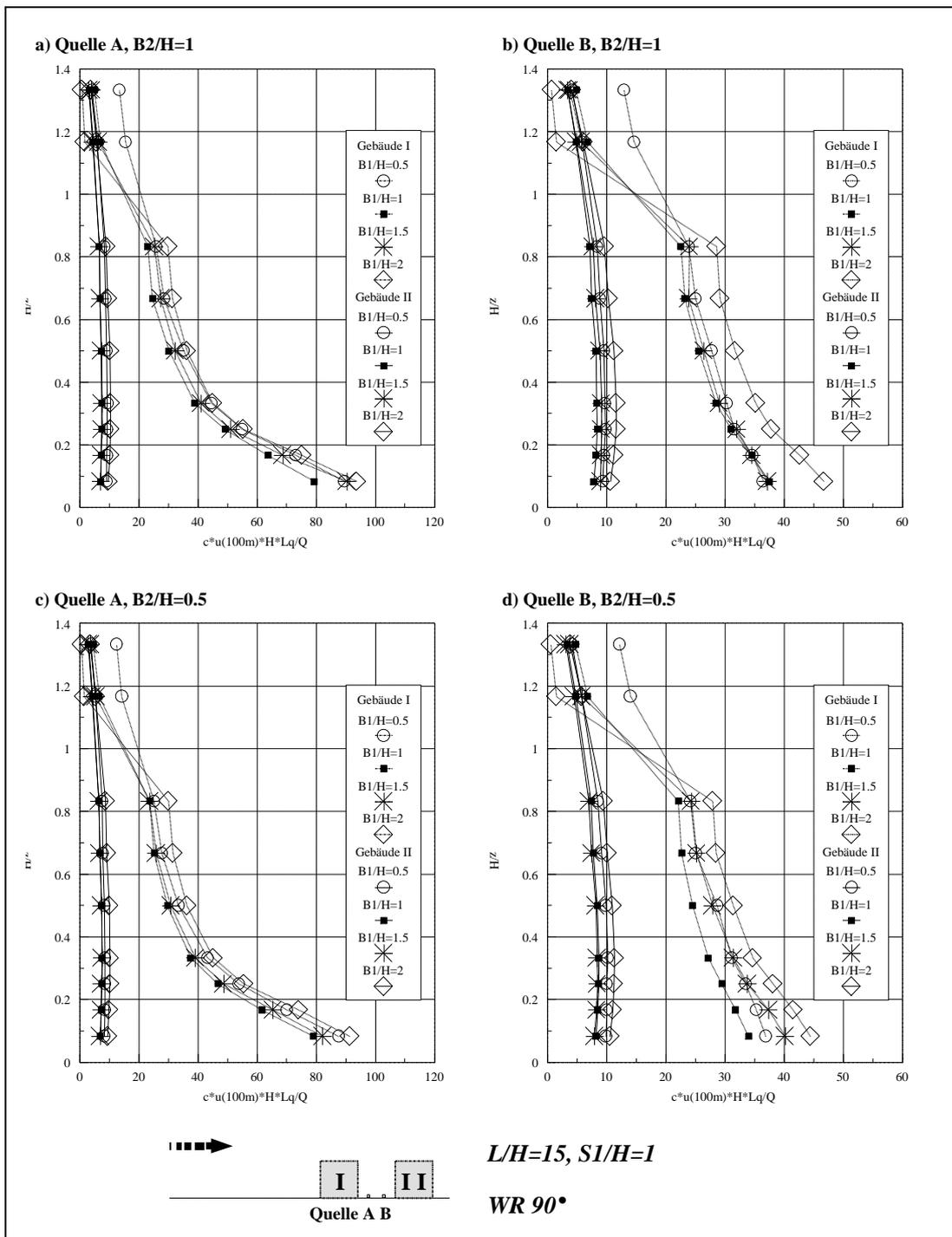


Abb. 6.9: Variation der Gebäudebreite für den Fall einer beidseitig bebauten Straßenschlucht bei senkrechter Anströmung.

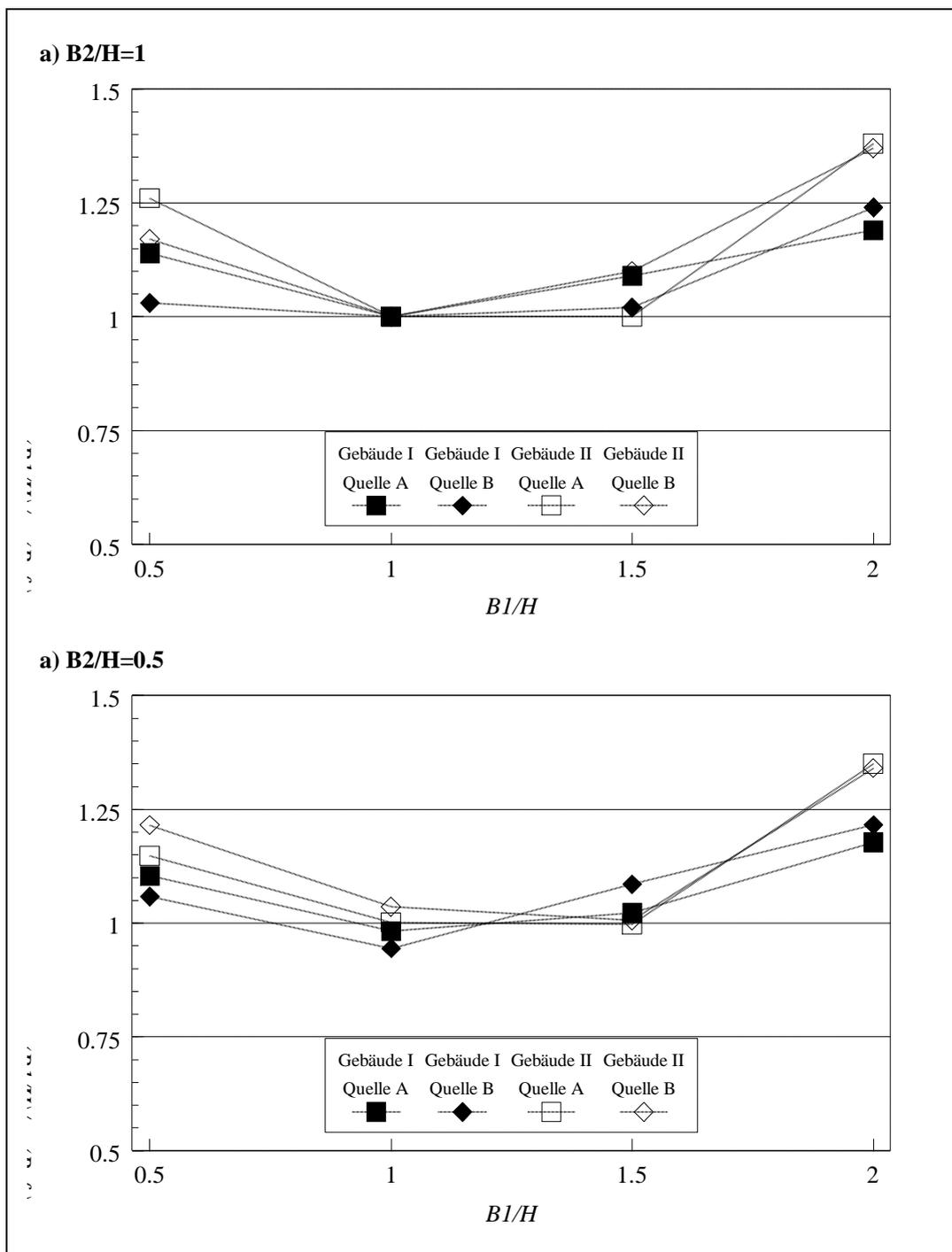


Abb. 6.10: Einfluß der Variation der Gebäudebreite auf den Mittelwert der Konzentration an den Wänden einer beidseitig bebauten Straßenschlucht bei senkrechter Anströmung.

6.5 Einfluß der Umgebungsbebauung

Der Einfluß der Umgebungsbebauung auf die Schadstoffbelastung in zweidimensionalen Straßenschluchten wurde mit den in Abb. 6.11 skizzierten Gebäudekonfigurationen untersucht.

Zusätzlich zu einer beidseitig bebauten Straßenschlucht, wurden eine oder zwei Gebäudereihen stromaufwärts der Schlucht eingebaut. Aus den eingezeichneten Konzentrationsprofilen für $y=0\text{mm}$ ist zu erkennen, daß das Anbringen zusätzlicher Gebäude zu einer Konzentrationserhöhung an den Gebäudewänden und zu einer Konzentrationsabnahme auf den Dächern führt. Der Effekt wird durch ein zweites Gebäude noch verstärkt. Zu erklären ist dieses Ergebnis durch das Abheben der ankommenden Strömung. Die Geschwindigkeiten an der leeseitigen Dachkante der Schlucht sind dadurch geringer als im Referenzfall und der Austausch zwischen der Strömung in der Schlucht und der darüberliegenden Grenzschicht ist schwächer.

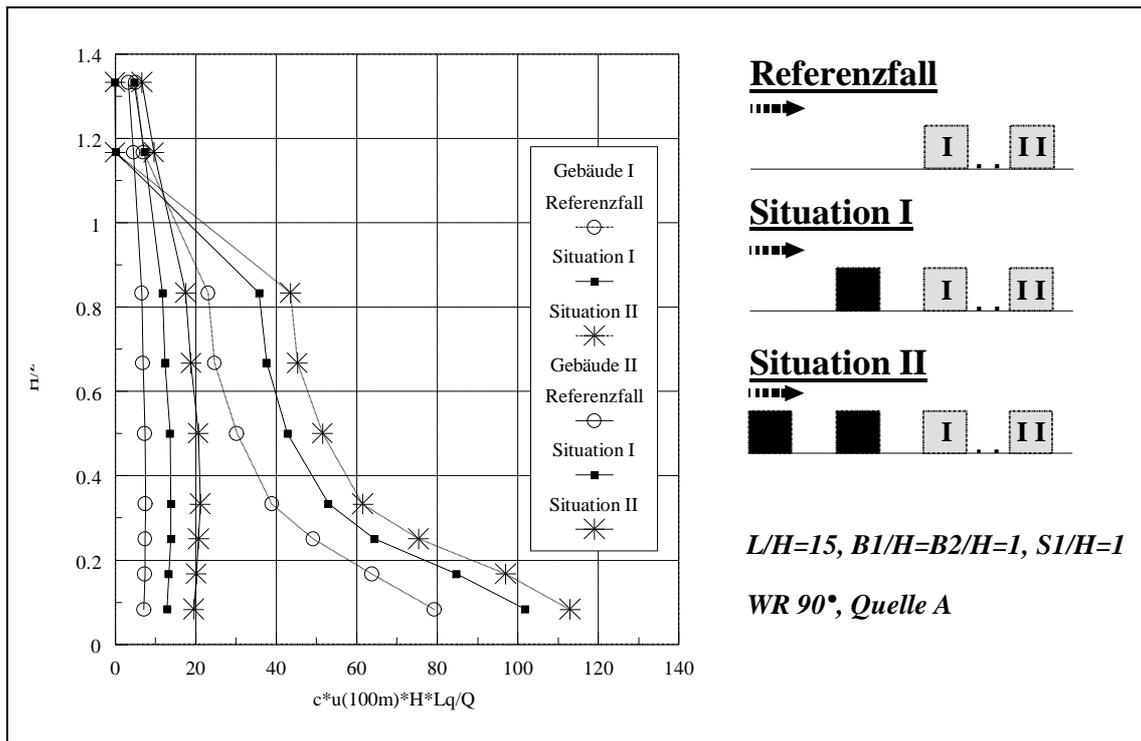


Abb. 6.11: Einfluß der Umgebungsbebauung im Fall einer beidseitig bebauten, zweidimensionalen Straßenschlucht bei senkrechter Anströmung.

6.6 Einfluß der Windrichtung

Abschließend wurde der Einfluß verschiedener Windrichtungen auf die Konzentrationsfelder in Straßenschluchten untersucht. Die Gebäudemodelle mit $L/H=5$ und 10 wurden in 15° Schritten gedreht. Betrachtet werden im folgenden Konzentrationen am Gebäude I, gemessen an drei horizontalen Positionen mit $y=0\text{mm}$ und $\pm(L/2-15\text{cm})$. Die Positionen sind in einer Skizze in Abb. 6.14 gekennzeichnet. Die beiden äußeren Profile hatten immer einen Abstand von 15cm von den Gebäudeenden, so daß für die 120cm langen Gebäude ($L/H=10$) die entsprechenden y -Werte -45cm und $+45\text{cm}$ lauten und im Fall der 60cm langen Gebäude ($L/H=5$) sich $y=-15\text{cm}$ und $+15\text{cm}$ ergeben. In den Abb. 6.13 und 6.14 sind die Konzentrationsprofile an den drei Positionen für drei exemplarisch ausgewählte Windrichtungen dargestellt. Windrichtung 0° entspricht einer Parallelanströmung, Windrichtung 45° einer Schräganströmung und Windrichtung 90° der bisher diskutierten Senkrechtanströmung.

Betrachtet man zunächst wieder die Ergebnisse für senkrecht angeströmte Straßenschluchten, so verdeutlichen die Konzentrationsprofile, jeweils in den Diagrammen (a) und (b), daß an den Positionen am Schluchtende deutlich niedrigere Konzentrationen als im Schluchtzentrum gemessen wurden. Die vier Diagramme zeigen jeweils eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse für $y=\pm(L/2-15\text{cm})$. Dies bestätigt, daß bei den Versuchen bei senkrechter Anströmung die Strömungsverhältnisse in der Schlucht symmetrisch waren. Die Unterschiede zwischen den Konzentrationen in den Zentrumsprofilen und in den Randprofilen sind im Falle der längeren Gebäude deutlich höher als im Falle der kurzen Gebäude. Dies bedeutet, daß im letzteren Falle geringere horizontale Konzentrationsgradienten beobachtet wurden. Eine mögliche Erklärung ist erneut (siehe auch Kap. 6.4.1), daß im Falle der kürzeren Gebäude eine bessere Vermischung durch vollständig dreidimensionale Strömungsverhältnisse auftritt, während im Falle der längeren Gebäude eine zweidimensionale Zone im Zentrum der Schlucht und die Zone der Seitenwirbel an den Gebäudeenden zu unterscheiden sind.

In den mittleren Diagrammen sind jeweils die Ergebnisse für parallel angeströmte Straßenschluchten dargestellt. Bei dieser Windrichtung ist eine Strömung parallel zu den Gebäuden, für die Schadstoffverdünnung verantwortlich. Entlang der Schlucht kommt es zu einer Anreicherung von Schadstoffen. Das Konzentrationsmaximum befindet sich am Schluchtende. Die Konzentrationswerte hängen stark von der Gebäudelänge ab. Für beide Längen zu Höhenverhältnisse wurden am Schluchtende geringere Konzentrationen gemessen als im Falle der Senkrechtanströmung im Schluchtzentrum. Im Falle der längeren Gebäude betragen die Unterschiede jedoch nur etwa 20%, während im Falle der kürzeren Gebäude die Konzentrationen bei senkrechter Anströmung in der Schluchtmitte mehr als doppelt so hoch sind als bei paralleler Anströmung am Schluchtende. Es ist somit zu erwarten, daß im Falle extrem langer Gebäude, bei Windrichtung 0° höhere Maximalkonzentrationen auftreten als bei senkrechter Anströmung.

Die Ergebnisse für eine schräge Anströmung der Schlucht sind in den untersten Abbildungen zu sehen. Es kommt zu einer Überlagerung aus Wirbelsystemen die an den Gebäudekanten ablösen und horizontaler Strömung entlang der Gebäudewände. Letztere bewirkt, daß auch bei dieser Windrichtung die höchsten Konzentrationen am Schluchtende auftreten und die gemessenen Profile für den Fall Quellposition A den Ergebnissen der Windrichtung 0° ähnlich sind. Unterschiede gibt es in den Profilen am Schluchtanfang ($y=+L/2-15\text{cm}$) und den Ergebnissen für Quellposition B. In diesen Fällen werden deutlich höhere Werte als bei Parallelanströmung beobachtet. Erklären lassen sich diese Effekte durch den Einfluß der Wirbelsysteme an den Gebäudekanten, welche den vertikalen und lateralen Transport quer zur Schluchtachse verstärken.

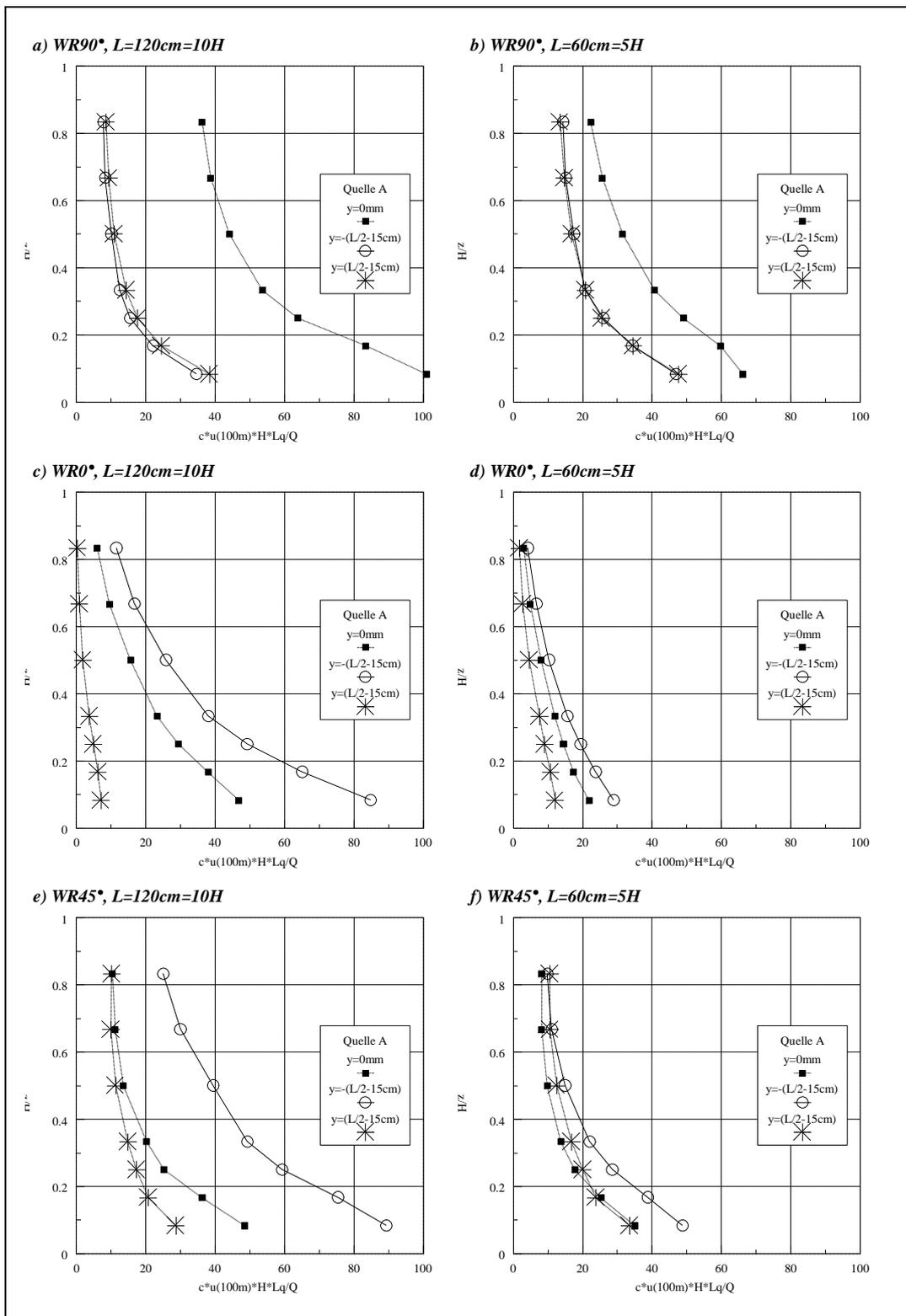


Abb. 6.12: Einfluß der Windrichtung auf die Konzentrationsprofile an der Wand von Gebäude I im Fall einer beidseitig bebauten Straßenschlucht mit Quellposition A und zwei verschiedenen L/H - Verhältnissen.

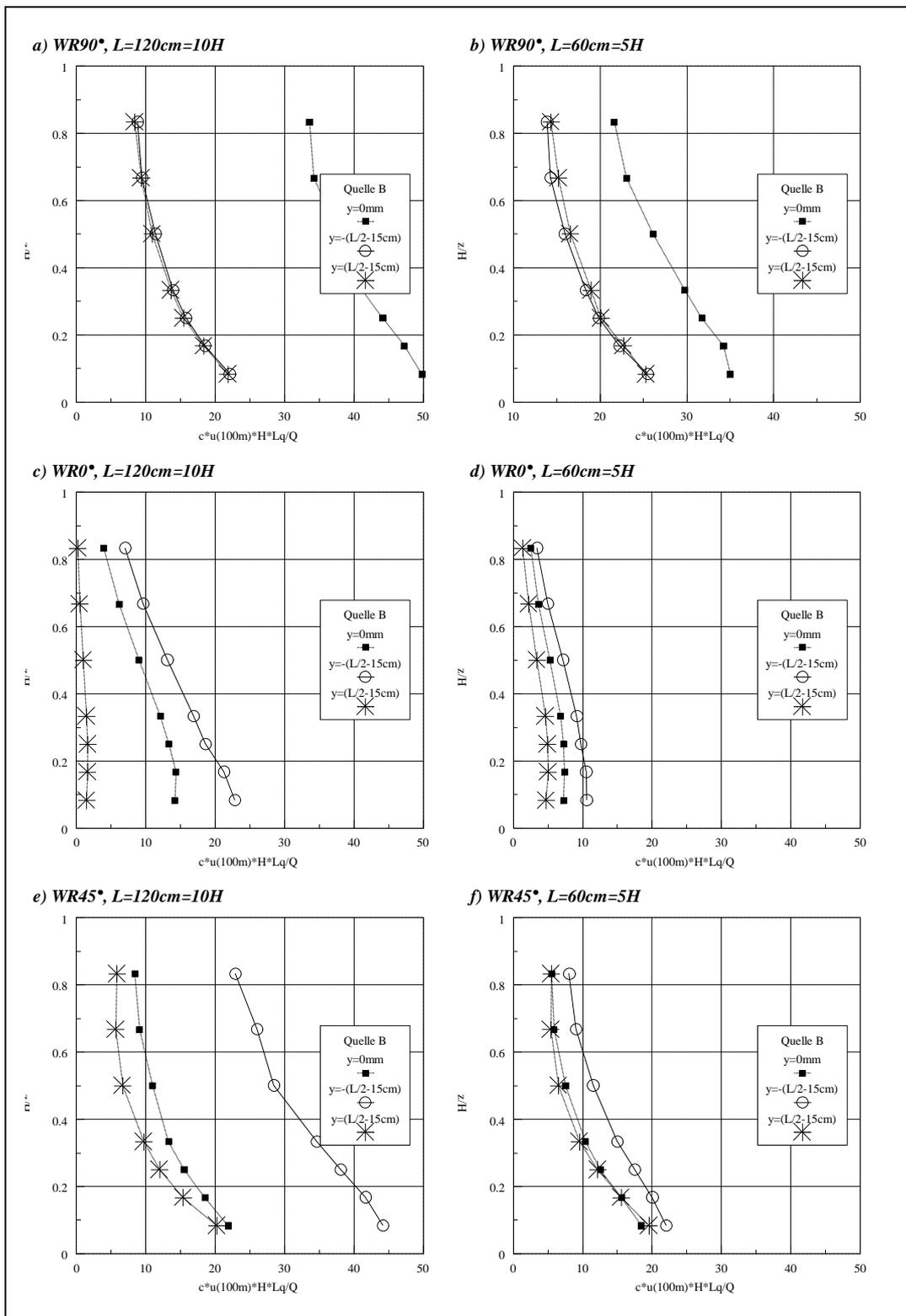


Abb. 6.13: Einfluß der Windrichtung auf die Konzentrationsprofile an der Wand von Gebäude I im Fall einer beidseitig bebauten Straßenschlucht mit Quellposition B und zwei verschiedenen L/H - Verhältnissen.

In Abb. 6.14 sind die Ergebnisse für alle untersuchten Windrichtungen zusammengefaßt. Dargestellt sind die Konzentrationen an den drei Meßpositionen in der Höhe $z=10\text{mm}$ in Abhängigkeit von der Windrichtung für die Fälle mit Quellposition A. Das linke Diagramm veranschaulicht die Verhältnisse für $L/H=10$, das rechte repräsentiert $L/H=5$. Zunächst wird deutlich, daß für beide Längen zu Höhen Verhältnisse bei allen Windrichtungen, mit Ausnahme der senkrechten Anströmung der Gebäude am Schluchtende höhere Konzentrationen auftreten als im Schluchtzentrum. Bereits eine Änderung der Anströmrichtung um 15° (Windrichtung 75°) führt zu einer starken Konzentrationsreduktion in der Schluchtmitte und zu einem Transport zum Schluchtende. Nach dieser Konzentrationsabnahme steigen die Werte in der Schluchtmitte erneut an, so daß bei den Windrichtungen 30° ($L/H=10$) bzw. 45° ($L/H=5$) ein zweites Maximum beobachtet werden kann. Danach nehmen die Konzentrationen wieder ab und bei den Windrichtungen, bei welchen die Quelle luvseitig von Gebäude I positioniert ist ($-15^\circ - -75^\circ$), wurden sehr geringe Konzentrationen am Gebäude I festgestellt. Ein leichter Anstieg wird bei

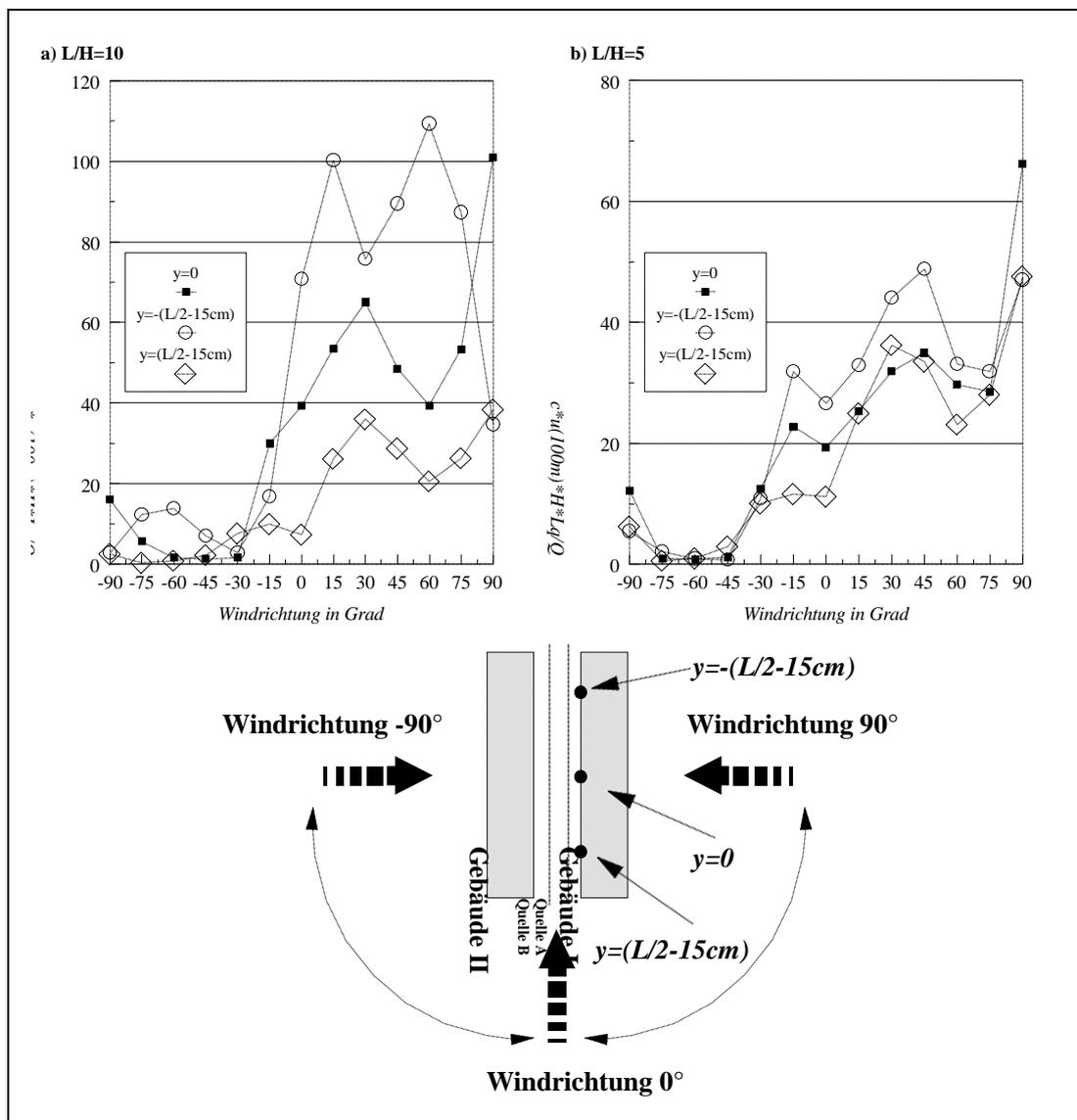


Abb. 6.14: Einfluß der Windrichtung auf die Konzentrationswerte an drei Meßpunkten in der Höhe $z=10\text{mm}$ an der Wand von Gebäude I im Fall einer beidseitig bebauten Straßenschlucht mit Quellposition A und zwei verschiedenen L/H - Verhältnissen.

der senkrechten Anströmung aus der Gegenrichtung (Windrichtung -90°) beobachtet, jedoch sind die Werte in der Schluchtmittle immer noch geringer als bei der Parallelanströmung. Auch hier verdeutlichen die Übereinstimmungen der Konzentrationswerte für $y=\pm(L/2-15\text{cm})$ die gute Symmetrie der Strömungsverhältnisse bei senkrechter Anströmung der Gebäude.

Abschließend liefert ein Vergleich der beiden in Abb. 6.14 gezeigten Diagramme einen weiteren Hinweis für die bereits diskutierten Unterschiede in den Strömungszonen für $L/H=10$ bzw. $L/H=5$. Die Unterschiede der Konzentrationen an den drei Meßpositionen sind im Falle der kürzeren Gebäude bei allen Windrichtungen geringer. Zusätzlich ist der Verlauf der drei Kurven ähnlich, während bei den längeren Gebäuden an den drei Meßpositionen unterschiedliche Veränderungen mit der Windrichtung auftraten.

7. Vergleich der Ergebnisse aus den Versuchen mit Linienquellen in Karlsruhe und Hamburg

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse aus den Windkanalversuchen mit Linienquellen in Karlsruhe und Hamburg verglichen. Der Vergleich dieser Ergebnisse wird besonders ausführlich behandelt, da die Versuche unter ähnlichen Versuchsbedingungen durchgeführt wurden. Ein weiterer Vorteil war der einfache Zugang zu den Datensätzen, welcher durch den Kontakt zu den Mitarbeitern des Meteorologischen Instituts in Hamburg ermöglicht wurde. Verglichen werden Ergebnisse aus Konzentrationsmessungen mit einer Linienquelle in homogener Rauigkeit und in einer 2-dimensionalen Straßenschlucht.

7.1 Versuchsbedingungen

Prinzipiell wurden die Datensätze unter ähnlichen Versuchsbedingungen generiert. Als Versuchsgerät stand jeweils ein Grenzschichtwindkanal zur Verfügung. In beiden Kanälen werden die üblichen Einbauten zur Erzeugung von naturähnlichen Anströmverhältnissen verwendet. Der genaue Kanalaufbau ist in Kapitel 4, bzw. für die Hamburger Experimente in Meroney et al. (1996) beschrieben. Für das Design der Linienquellen wurde jeweils der in Meroney et al. (1996) beschriebene Aufbau gewählt. Die Vorteile dieses Aufbaus sind in Kapitel 5 aufgeführt.

Im Detail betrachtet sind aber auch für diese beiden Datensätze Unterschiede bei den Versuchsbedingungen zu nennen. Abweichungen gibt es bei den Parametern zur Beschreibung der Anströmverhältnisse und auch bei den geometrischen Verhältnissen der Linienquelle und der Gebäude. In Tab. 7.1 sind die Größen zur Dokumentation der genauen Versuchsbedingungen zusammengefaßt.

7.2 Vergleich der Ergebnisse für Linienquellen in homogener Rauigkeit

Aus beiden Versuchsreihen liegen Datensätze über Vertikal- und Horizontalprofile im Lee einer Linienquelle in homogener Rauigkeit vor. Verglichen werden dimensionslose Konzentrationen berechnet nach

$$c^* = \frac{c \cdot u_\infty \cdot d}{Q/L}, \quad (7.1)$$

mit: u_∞ : Geschwindigkeit in Grenzschichthöhe d
 d : Grenzschichthöhe,
 Q/L : längenbezogene Tracergasemission.

Tab. 7.1: Vergleich der Versuchsbedingungen bei den Experimenten mit Linienquellen in Karlsruhe und Hamburg.

Parameter:		Karlsruhe	Hamburg
<u>I. Anströmung</u>			
Grenzschichtdicke	d	0.45m	0.5m
Profilexponent	a	0.23	0.28-0.29
Verdrängungsdicke	d_0	2mm	3mm
Rauhigkeitslänge	z_0	0.7mm	3mm
Schubspannungsgeschwindigkeit	u_* / u_{ref}	0.054	0.074
<u>II. Linienquelle</u>			
Länge der Quelle	L_q	1.44m	0.93m
Anzahl der Quellen (in der Straßenschlucht)		2	1
Abstand der Quelle(n) (zum Leegebäude)	s_q	35 bzw. 85mm	30mm
<u>III. Gebäudeabmessungen</u>			
Gebäudehöhe	H_B	120mm	60mm
Gebäudebreite	B_B	120mm	60mm
Abstand der Gebäude	S	120mm	60mm

7.2.1 Vergleich der Vertikalprofile

In Tab. 7.2 werden die Abstände der gemessenen Profile von der Quelle für die beiden Versuchsreihen Karlsruhe bzw. Hamburg gegenübergestellt. Es wird deutlich, daß die Meßpositionen der beiden Versuchsreihen nicht übereinstimmen. Dadurch wird der direkte Vergleich der Daten erschwert. Im Folgenden wird versucht, charakteristische Größen aus den beiden Versuchsreihen zu definieren und für diese den Vergleich der Daten durchzuführen. Abb. 7.1 zeigt zunächst die gemessenen Profile, unterteilt in Bereiche mit ähnlichen Abständen. In Abb.7.2 sind Längsprofile, generiert aus den Vertikalprofilaten, in zwei Höhen eingetragen. Es wird

Tab. 7.2: Abstände (in mm) der gemessenen Vertikalprofile von der Linienquelle für die Versuchsreihen Karlsruhe und Hamburg.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
Karlsruhe	25	45	90	135	180	270	360	450	900
Hamburg	60	150	300	600	1200				

deutlich, daß die Profile einen ähnlichen Verlauf zeigen, daß aber bei den Versuchen in Hamburg eine geringere vertikale Vermischung beobachtet wurde. Dies veranschaulichen insbesondere die in Abb. 7.2 eingezeichneten Längsprofile in der Höhe $z=40\text{mm}$. Die in Hamburg gemessenen Werte liegen für alle x Abstände unter den in Karlsruhe gemessenen Werten. Über die Lage der Maxima in den Längsprofilen können keine Aussagen getroffen werden, da das Raster der x - Abstände bei den Hamburger Messungen zu grob war um die Lage des Maximums zu bestimmen.

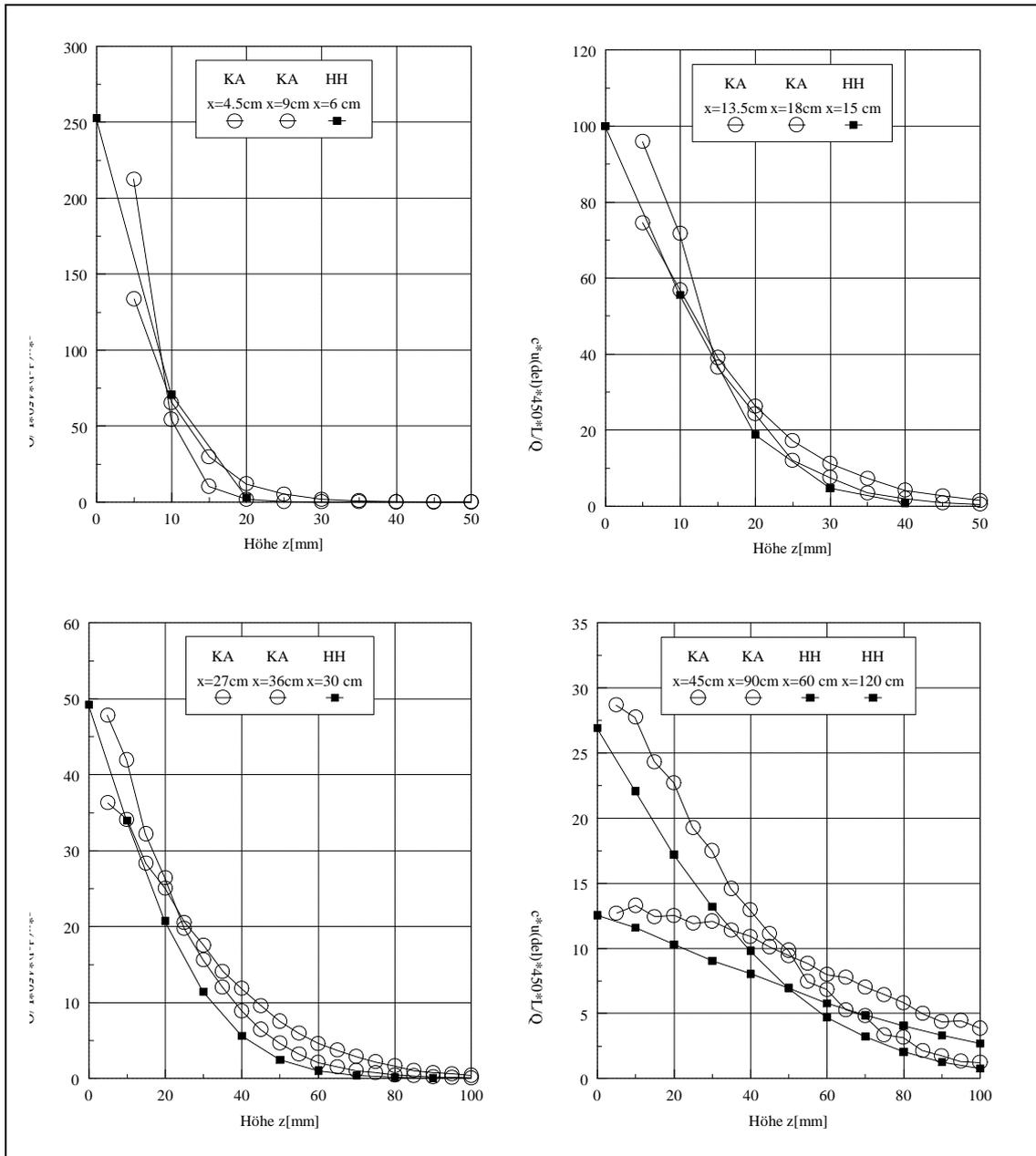


Abb. 7.1: Vertikalprofile im Lee einer Linienquelle in homogener Rauigkeit, gemessen in verschiedenen Abständen bei den Versuchen in Karlsruhe und Hamburg.

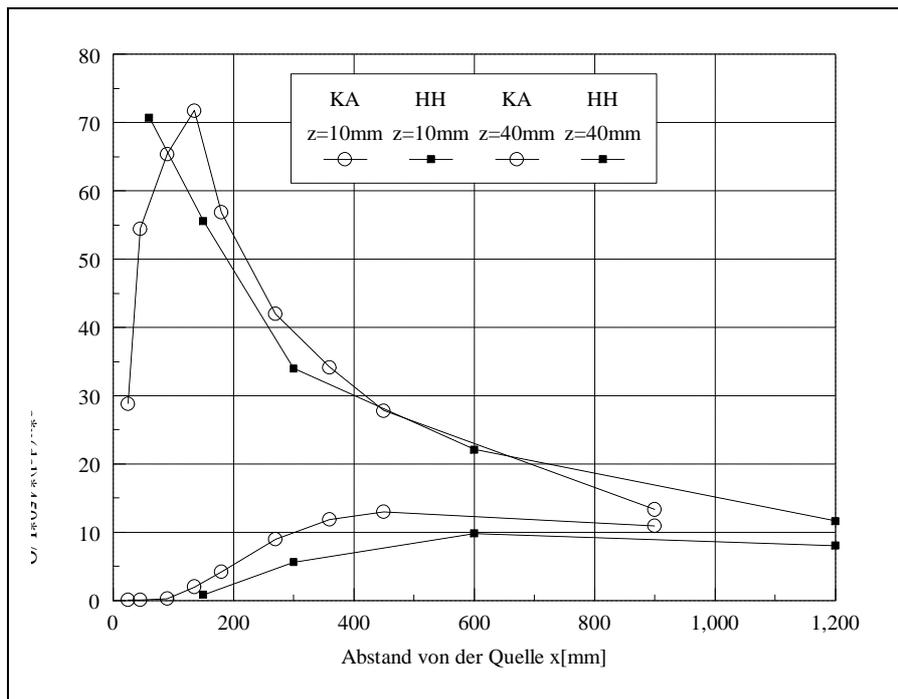


Abb. 7.2: Längsprofile im Lee einer Linienquelle in homogener Rauigkeit in zwei verschiedenen Höhen bei den Versuchen in Karlsruhe und Hamburg.

7.2.2 Anpassung der Vertikalprofile mit einem modifizierten Gaußansatz

In der Literatur (Huang, 1979) wird als analytische Lösung der Diffusionsgleichung für eine unendlich lange, quer angeströmte Linienquelle mit bodennaher Freisetzung eine modifizierte Gaußfunktion der Form:

$$c(x, z) = c_0(x) \cdot \exp\left(-\left[\frac{z}{B(x)}\right]^n\right) \quad (7.2)$$

mit: $c(x, z)$: Konzentration an einem Punkt P mit den Koordinaten (x, z) ,
 $c_0(x)$: Bodenkonzentration im Abstand x ,
 $B(x)$: vertikaler Austauschparameter im Abstand x .

angegeben. Voraussetzung für diese Lösung ist, daß die vertikalen Profile der Windgeschwindigkeit $u(z)$ und des Diffusionskoeffizienten $K(z)$ durch Potenzansätze beschrieben werden können:

$$u(z) \propto z^a \quad (7.3)$$

$$K(z) \propto z^p \quad (7.4)$$

Der Exponent n in Gleichung (7.2) kann dann aus der Beziehung

$$n = 2 + \mathbf{a} - p \quad (7.5)$$

ermittelt werden.

Die Anforderung, daß das Windprofil durch einen Potenzansatz beschrieben kann, wird bei den Windkanalversuchen, wie im Kapitel 4.2 gezeigt wurde, erfüllt und der Exponent \mathbf{a} kann aus Geschwindigkeitsmessungen ermittelt werden. Der Exponent p des Profils des Diffusionskoeffizienten ist experimentell nicht so leicht zu bestimmen. In Huang (1979) werden zwei verschiedene analytische Methoden vorgestellt, um p und damit schließlich auch n abzuleiten:

Bei der ersten Methode geht man von dem Ansatz

$$\overline{u'w'} \propto K \frac{\mathcal{U}}{\mathcal{K}} \quad (7.6)$$

aus. Für $\overline{u'w'} = \text{konst.}$ und $u(z) \propto z^{\mathbf{a}}$ folgt mit $\mathcal{U}/\mathcal{K} \propto z^{\mathbf{a}-1}$

$$K \propto \overline{u'w'} \cdot \left(\frac{\mathcal{U}}{\mathcal{K}} \right)^{-1} \propto z^{1-\mathbf{a}} \quad (7.7)$$

und damit wiederum:

$$p = 1 - \mathbf{a} \quad (7.8)$$

$$n = 2 + \mathbf{a} - p = 1 + 2\mathbf{a} \quad (7.9)$$

Die zweite Methode basiert auf der Ähnlichkeitstheorie und für neutrale Schichtungen gilt:

$$p = 1 \quad (7.10)$$

$$n = 2 + \mathbf{a} - p = 1 + \mathbf{a} \quad (7.11)$$

Man erhält somit zwei Gleichungen für den Exponent n die sich um den Wert von \mathbf{a} unterscheiden. Mit dem im Kapitel 4.2 angegebenen Wert von $\mathbf{a} = 0.23$ bei den Versuchen in Karlsruhe, würde damit für den Exponent n des modifizierten Gaußansatzes nach Gleichung (7.9) $n \approx 1.5$ bzw. nach Gleichung (7.11) $n \approx 1.2$ folgen.

Im Folgenden soll nun überprüft werden, inwieweit eine Anpassung mit einem modifizierten Gaußansatz nach Gleichung (7.2) eine gute Übereinstimmung mit den Meßergebnissen aus Karlsruhe und Hamburg liefert und welche Werte für den Exponent n aus den Konzentrationsprofilen abgeleitet werden können.

Der Exponent n läßt sich aus den gemessenen Profilen bestimmen, indem $\ln(c(x, z) / c_0)$ doppelt logarithmisch über z aufgetragen wird. Die Kurven müssen dann Geraden mit einer Steigung n entsprechen. Die ermittelten Werte von n für die Daten aus Karlsruhe liegen zwischen $n=1.5$ und 1.8 (nur für das Profil bei $x=900\text{mm}$ wurde der Wert 2.4 ermittelt) und für die Da-

ten aus Hamburg zwischen $n=1.2$ und 1.5 . Es zeigt sich somit, daß die gemessenen Profile für beide Datensätze getrennt betrachtet mit einem modifizierten Gaußansatz beschrieben werden können, daß aber die bereits beobachteten Unterschiede in der vertikalen Vermischung zu unterschiedlichen Exponenten für die beiden Datensätze führen. Als Mittelwerte können angegeben werden:

$$\text{Karlsruhe:} \quad \bar{n} = 1.7 \quad (7.12a)$$

$$\text{Hamburg:} \quad \bar{n} = 1.3 \quad (7.12b)$$

In Meroney et al. (1996) wird eine Anpassung der Daten aus Hamburg an Gleichung (7.2) vorgestellt und als Exponent $n = 1.2$ angegeben. Die aus den Konzentrationsprofilen ermittelten, in Gleichung (7.12) angegebenen Werte, stimmen relativ gut mit den in Huang (1979) angegebenen Werten aus Naturmessungen $1.2 \leq n \leq 1.77$ überein. Der Vergleich mit den theoretischen Ansätzen liefert für die Daten aus Karlsruhe eine bessere Übereinstimmung mit Gleichung (7.9) ($n \approx 1.5$), während das Ergebnis für die Daten aus Hamburg besser zu Gleichung (7.11) ($n \approx 1.3$ für $a = 0.28 - 0.29$) paßt.

Abschließend werden die Parameter Bodenkonzentration $c_0(x)$ und Austauschparameter $B(x)$ in Gleichung (7.2) ermittelt und die berechneten Profile mit den gemessenen verglichen. Zur Bestimmung der Parameter wird die Gleichung (7.2) linearisiert:

$$\ln c(x, z) = \ln c_0 - \left(\frac{1}{B}\right)^n \cdot z^n \quad (7.13)$$

Die Parameter $c_0(x)$ und $B(x)$ lassen sich bei einer Auftragung von $\ln c(x, z)$ über z^n für jeden x - Abstand aus der Steigung b und dem y - Achsenabschnitt a der Ausgleichsgeraden bestimmen:

$$c_0 = e^a \quad (7.14a)$$

$$B = \left(\frac{1}{b}\right)^{1/n} \quad (7.14b)$$

Die Ergebnisse sind in Tab. 7.3 eingetragen. Die graphische Darstellung und die Anpassung von Potenzfunktionen an die Daten erfolgt in Abb. 7.3. Die ermittelten funktionalen Zusammenhänge für die Parameter $c_0(x)$ und $B(x)$ lauten:

Karlsruhe:

$$c_0(x) = 12671 \cdot x^{-1.02} \quad (7.15a)$$

$$B(x) = 0.324 \cdot x^{0.824} \quad (7.15b)$$

Hamburg:

$$c_0(x) = 20407 \cdot x^{-1.03} \quad (7.16a)$$

$$B(x) = 0.248 \cdot x^{0.781} \quad (7.16b)$$

In Abb. 7.4 werden exemplarisch für 2 Abstände die gemessenen Profile mit den berechneten Profilen verglichen. Neben den Meßwerten sind jeweils zwei berechnete Kurven in den Diagrammen zu sehen. Sie unterscheiden sich in der Bestimmung der Parameter $c_0(x)$ und $B(x)$.

Tab. 7.3: Nach dem modifizierten Gaußansatz berechnete vertikale Austauschparameter $B(x)$ und Bodenkonzentrationen $c_0(x)$ für die Versuchsreihen Karlsruhe und Hamburg.

Karlsruhe:				
z in mm	b	$B(x)$	a	$c_0(x)$
45	0.0316	7.63	-5.69	294.71
90	0.0135	12.58	-4.88	131.89
135	0.0070	18.52	-4.40	81.13
180	0.0047	23.41	-4.11	60.64
270	0.0026	33.16	-3.66	38.71
360	0.0018	41.17	-3.47	32.07
450	0.0013	49.85	-3.29	26.79
900	0.0005	87.45	-2.62	13.71
Hamburg:				
z in mm	b	$B(x)$	a	$c_0(x)$
60	0.0909	6.33	-5.73	308.89
150	0.0398	11.94	-4.76	116.86
300	0.0191	21.00	-3.97	52.72
600	0.0093	36.53	-3.38	29.46
1200	0.0044	64.97	-2.63	13.82

Einmal wurden direkt die in Tab. 7.3 aufgelisteten Werte, welche für jeden x - Abstand aus der linearen Regression bestimmt wurden, eingesetzt (Linien mit dem Rechteck - Symbol (■)). Linien mit dem Rauten - Symbol (◆) entsprechen den Ergebnissen mit berechneten Parametern $c_0(x)$ und $B(x)$ nach den Gl. (7.15) und (7.16). Die Unterschiede zwischen den beiden Kurven sind in allen gezeigten Diagrammen zu vernachlässigen. Dies verdeutlicht, daß die Potenzansätze nach den Gleichungen (7.15) und (7.16) gute Anpassungen für die Parameter $c_0(x)$ und $B(x)$ darstellen. Zusätzlich wird veranschaulicht, daß sich die gemessenen Profile mit einem modifizierten Gaußansatz nach Gleichung (7.2) beschreiben lassen.

Für eine abschließende Betrachtung wurden alle gemessenen Profile in normierter Form in Abb. 7.5 dargestellt. Auf der y -Achse sind die normierten Konzentrationen $c(z) / c_0(x)$ aufgetragen. Die normierten Höhen auf der x -Achse entsprechen $(z / B(x))^{1.7}$ bzw. $(z / B(x))^{1.3}$. Die Parameter $c_0(x)$ und $B(x)$ wurden nach den Gleichungen (7.15) und (7.16) berechnet. Für beide Datensätze liegen bei dieser Normierung die gemessenen Profile näherungsweise auf einer Kurve und es kommt zu einer guten Übereinstimmung mit der nach dem modifiziertem Gaußansatz berechneten Kurve. Es wird deutlich, daß die nach Gl. (7.15a) berechneten Bodenkonzentrationen für die Datensätze aus Karlsruhe die gemessenen Werte tendenziös unterschätzen, während im Falle der Hamburger Datensätze die nach Gl. (7.16a) berechneten Bodenkonzentrationen in der Regel höher sind als die Meßwerte.

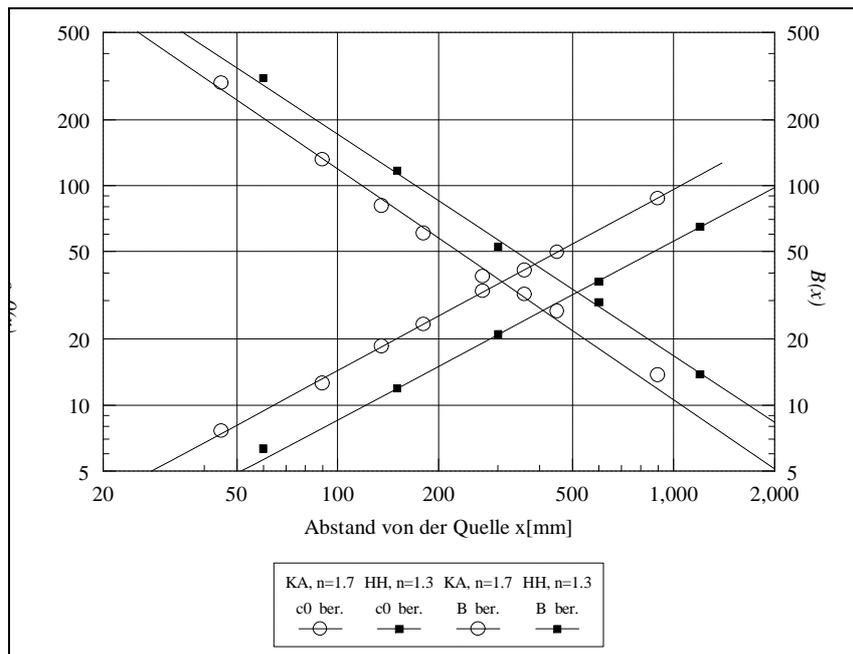


Abb. 7.3: Anpassung der Bodenkonzentrationen $c_0(x)$ bzw. und vertikalen Austauschparameter $B(x)$, berechnet mit einem modifizierten Gaußansatz und den Exponenten $n=1.7$ (Karlsruhe) und $n=1.3$ (Hamburg).

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

Eine Anpassung der Meßdaten an eine modifizierte Gaußfunktion nach Gl. (7.2) liefert für beide Datensätze eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Profilen. Es kommt nur in Bodennähe ($z < 10\text{mm}$) zu Abweichungen zwischen den Meßdaten und berechneten Werten. Die Unterschiede in der vertikalen Vermischung zwischen den Daten aus Hamburg und Karlsruhe führen aber zu folgenden Ergebnissen:

- Die optimale Anpassung der Meßdaten liefert unterschiedliche Werte für den in Gl. (7.2) eingeführten Exponenten n für die beiden Datensätze. Für Karlsruhe wurde ein Mittelwert aus den Anpassungen aller gemessenen Profile von $\bar{n} = 1.7$ ermittelt, während für Hamburg das Ergebnis $\bar{n} = 1.3$ lautet.
- Ausgehend von diesen Werten für den Exponenten n lassen sich die Meßdaten gut an Gl. (7.2) anpassen. Die Formeln für die Parameter Bodenkonzentration $c_0(x)$ und vertikaler Austauschparameter $B(x)$ zeigen jedoch Unterschiede zwischen Hamburg und Karlsruhe (siehe Gl. (7.15) und (7.16)). Dies bedeutet, daß nicht mit vereinheitlichten Formeln zur Bestimmung der Parameter gerechnet werden kann.
- Die normierte Darstellung der Profile liefert, beide Datensätze getrennt betrachtet, für alle x -Abstände eine gute Übereinstimmung zwischen den Meßdaten und dem Verlauf der Kurve nach dem modifiziertem Gaußansatz.

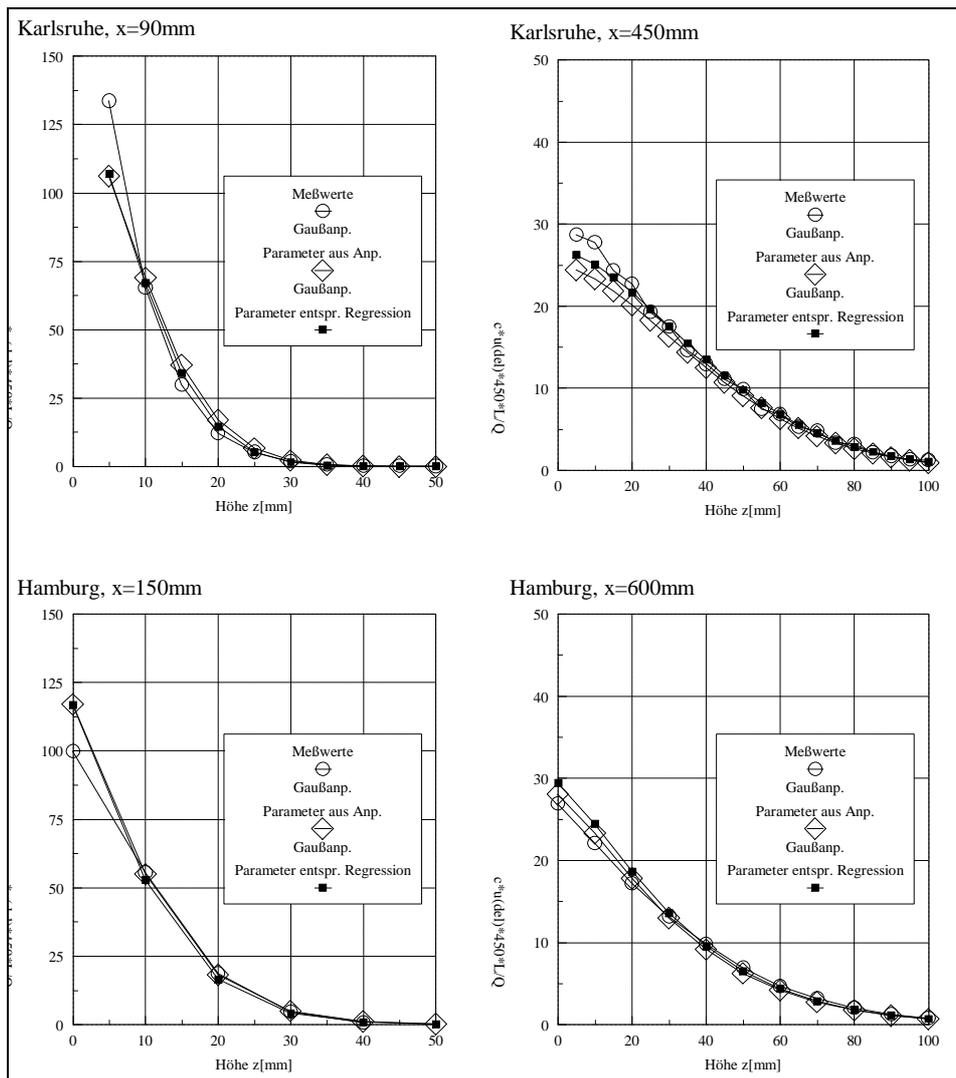


Abb. 7.4: Vergleich der gemessenen und der nach einem modifiziertem Gaußansatz berechneten Vertikalprofile für zwei jeweils exemplarisch ausgewählte Abstände.

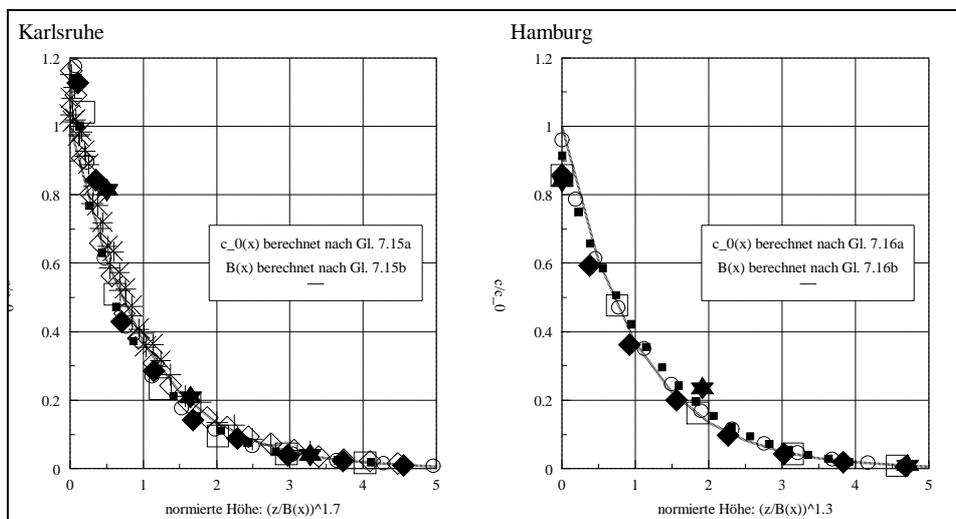


Abb. 7.5: Abschließende Betrachtung der modifizierten Gaußanpassung für die Datensätze Karlsruhe und Hamburg.

7.2.3 Vergleich der Lateralprofile

Bei der Modellierung der Schadstoffausbreitung von Linienquellen ist, wie im Kapitel 5 dargestellt wurde, die Homogenität der Quelle eine wichtige Voraussetzung. Eine Möglichkeit diese zu überprüfen, stellt die Aufnahme von Lateralprofilen im Nahfeld der Quelle dar. In Abb. 7.6 sind die Ergebnisse aus den Messungen in Karlsruhe und Hamburg zu sehen. Die linke Abb. entspricht den gemessenen dimensionslosen Konzentrationen in zwei (Karlsruhe) bzw. drei (Hamburg) Abständen im Lee der Quelle. Es ist sofort zu erkennen, daß die Werte aus dem Karlsruher Datensatz deutlich geringer sind als die in Hamburg gemessenen Werte. Dies läßt sich aber leicht durch die unterschiedliche Meßhöhe erklären. Wie die Diskussion der Vertikalprofile gezeigt hat, gibt es starke vertikale Gradienten in der Konzentrationsverteilung in Bodennähe. Um den Einfluß der Bodenrauigkeiten im Windkanal zu vermeiden, lagen die Meßpunkte bei den Versuchen in Karlsruhe in der Höhe $z=10\text{mm}$, während in Hamburg Bodenkonzentrationen ($z=0\text{mm}$) gemessen wurden. Das Diagramm liefert aber bereits erste Aussagen über die laterale Homogenität der Profile. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Schwankungen mit zunehmendem Abstand von der Quelle abnehmen. Eine Quantifizierung der Inhomogenität erlaubt das rechte Diagramm, in welchem die Konzentrationen jeweils mit dem Mittelwert aus allen Meßpunkten normiert sind. Die Messungen aus Hamburg zeigen geringere Konzentrationschwankungen, welche innerhalb der Grenzen $\pm 10\%$ vom Mittelwert liegen, als die Ergebnisse aus Karlsruhe. Es ist aber zu beachten, daß bereits geringe Unterschiede in der Höhe des Meßpunktes aufgrund der großen vertikalen Gradienten einen deutlichen Einfluß auf den gemessenen Wert haben, so daß auch die ermittelten Abweichungen $\pm 15\%$ vom Mittelwert in Karlsruhe akzeptabel sind. Sie stellen immer noch eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu bisher getesteten Quellkonfigurationen dar. In Tab. 7.4 sind zusätzlich die ermittelten Mittelwerte, Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der gezeigten Profilmessungen eingetragen.

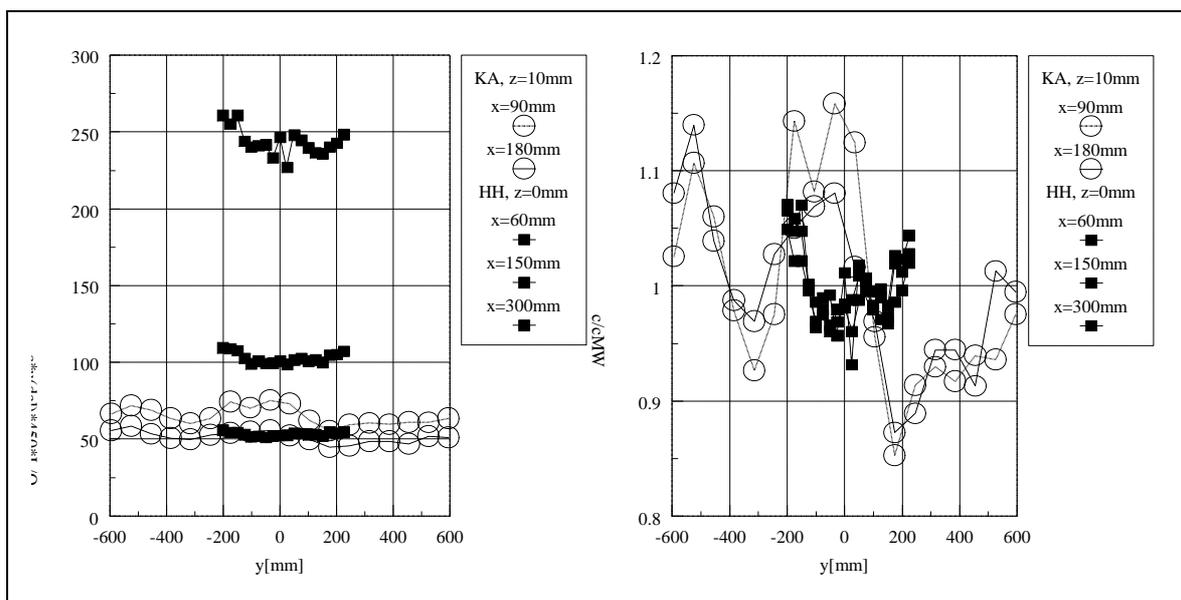


Abb. 7.6: Vergleich von Lateralprofilen für die Datensätze Hamburg und Karlsruhe.

Tab. 7.4: Daten zur Überprüfung der Homogenität der Lateralprofile.

	Karlsruhe x=90mm	Karlsruhe x=180mm	Hamburg x=60mm	Hamburg x=150mm	Hamburg x=300mm
Mittelwert:	65.02	51.40	243.71	102.80	53.21
Standardabweichung:	5.93	3.67	8.84	3.53	1.25
Variationskoeffizient:	0.09	0.07	0.04	0.03	0.02

7.3 Vergleich der Ergebnisse aus den Straßenschluchtuntersuchungen

Neben den Versuchen mit einer Linienquelle in homogener Rauigkeit wurden in Hamburg und Karlsruhe Messungen mit vergleichbaren Straßenschluchtkonfigurationen durchgeführt. In beiden Fällen wurden Konzentrationen an den Wänden und auf den Dächern von Gebäuden, die eine Straßenschlucht begrenzen, gemessen. Die Ergebnisse aus den beiden Versuchsreihen werden im Folgenden verglichen.

Der Versuchsaufbau war in beiden Fällen ähnlich. Für den Fall der Messungen in Karlsruhe ist er in Kapitel 6 skizziert. Es wurde eine beidseitig bebaute Straßenschlucht bei senkrechter Anströmung untersucht. Die Strömungsverhältnisse in der Schlucht können als zweidimensional betrachtet werden. Unterschiede gab es zunächst, wie in Tab. 7.1 zu sehen ist, bei den Gebäudeabmessungen. Die dimensionslosen Parameter zur Beschreibung der Gebäudekonfiguration waren jedoch gleich, denn das Verhältnis von Gebäudehöhe zur Gebäudebreite entsprach $H_B/B_B = 1$, ebenso das Verhältnis der Schluchtbreite zur Gebäudehöhe $S/H_B = 1$. Es sollten demnach ähnliche Ergebnisse aus den beiden Versuchsreihen zu erwarten sein. Zu beachten sind aber Unterschiede im Verhältnis der Gebäudehöhe zur Grenzschichthöhe und im Profilexponenten a des Anströmprofils. Die entsprechenden Werte sind ebenfalls aus Tab. 7.1 zu entnehmen. Beim Versuchsaufbau gab es zusätzlich Unterschiede im Abstand der Meßpunkte von den Gebäudewänden und in der Anzahl und in den Positionen der Linienquellen. Bei den Versuchen in Hamburg lagen die Meßpunkte direkt an der Gebäudewand und es wurde eine Linienquelle in der Mitte der Straßenschlucht plazierte. Bei den Versuchen in Karlsruhe lagen die Meßpunkte im Abstand von 7mm von den Häuserwänden und es wurden zwei Linienquellen, symmetrisch zur Schluchtmittle mit einem Abstand von 5mm, untersucht. Diese Unterschiede sind beim Vergleich und der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

In Abb. 7.7 sind die gemessenen Konzentrationsprofile entlang der Gebäudewände und auf den Gebäudedächern zu sehen. Das mit Gebäude I bezeichnete Gebäude liegt stromaufwärts, Gebäude II stromabwärts von der Linienquelle. Die auf den y-Achsen aufgetragene Koordinate z/H entspricht einer Koordinate entlang der Gebäudeoberfläche normiert mit der Gebäudehöhe. Punkte mit $z/H < 1$ stellen Meßpunkte an den Gebäudewänden dar, Meßpunkte mit $z/H > 1$ liegen auf den Gebäudedächern. Der Ursprung mit $z/H = 0$ liegt jeweils am Schnittpunkt von der die Schlucht begrenzenden Gebäudewand und dem Boden. Die aus den Karlsruher Experimenten eingezeichneten Werten, entsprechen Mittelwerten, gebildet aus den beiden Werten der Versuchsreihen mit zwei unterschiedlichen Quellpositionen. Der Fall einer Linienquelle in Schluchtmittle, wie er in Hamburg untersucht wurde, wird dadurch approximiert. Die Ergebnis-

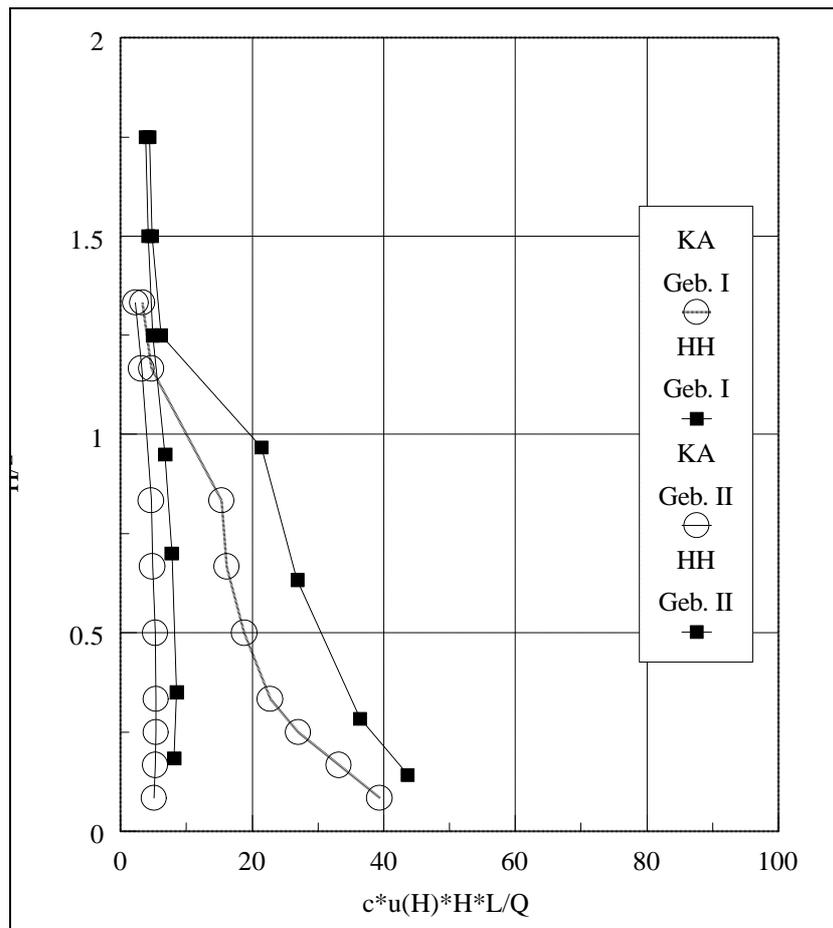


Abb. 7.7: Vergleich der Konzentrationsprofile entlang der Wände und Dächer der Gebäude einer Straßenschlucht für die Versuche in Karlsruhe und Hamburg.

se sind in der Form dimensionsloser Konzentrationen $c^* = \frac{c \cdot u_H \cdot H}{Q/L}$, mit der Referenzgeschwindigkeit u_H in Gebäudehöhe H dargestellt.

Es ist zunächst zu erkennen, daß in beiden Versuchsreihen qualitativ ähnliche Verhältnisse beobachtet wurden. In beiden Fällen waren die Konzentrationen am Gebäude I im Mittel um den Faktor 5 höher als am Gebäude II. Dies läßt sich wiederum durch den bereits diskutierten „Canyon - Vortex“ erklären, welcher die Schadstoffe zu Gebäude I transportiert und dort den vertikalen Transport ermöglicht. An Gebäude I wurde bei beiden Versuchsreihen ein starker Konzentrationsgradient, mit dem Konzentrationsmaximum am Boden und einer raschen Konzentrationsabnahme entlang der Gebäudewand, beobachtet. An Gebäude II zeigen die Profile eine über die Gebäudehöhe nahezu homogene Konzentrationsverteilung. Die auf den Gebäudedächern gemessenen Konzentrationen waren jeweils nahezu gleich an Gebäude I und II. Unterschiede zeigen sich jedoch zwischen den Absolutbeträgen der Meßergebnisse aus den beiden Versuchsreihen. Die in Hamburg ermittelten Werte (gestrichelte Kurven) sind an beiden Gebäuden höher als die Werte aus Karlsruhe (durchgezogene Linien). Betrachtet man den Mittelwert gebildet aus den Meßpunkten an den Wänden (Dachpunkte weggelassen), so sind die Ergebnisse am Gebäude I etwa 30% höher. Eine mögliche Ursache für die Abweichungen

können, die bereits diskutierten Unterschiede im Versuchsaufbau und in den Anströmbedingungen sein.

Um abschließend noch die Form der Profile zu diskutieren, sind in Abb. 7.8 normierte Kurven eingezeichnet. Die Konzentration an jedem Meßpunkt wurde dabei zum einen auf den Mittelwert aus den Meßpunkten an den Wänden bezogen (linkes Diagramm) und zum anderen auf den Maximalwert aus allen Meßpunkten (rechtes Diagramm). Die linke Abbildung wurde mit aufgenommen, da bei der Normierung mit dem Maximalwert die Kurven durch diesen einen Wert, welcher ja durch die Wahl des ersten Meßpunktes in gewisser Weise zufällig zustande kommt, bestimmt werden. Bei einer Normierung mit dem Mittelwert wird die Gefahr durch einen ungenauen Meßwert die Ergebnisse falsch zu interpretieren, abgeschwächt.

Die Form der Konzentrationsprofile am Gebäude II ist nahezu identisch. Abweichungen treten nur im Dachbereich auf, welche aber aufgrund der kleinen Absolutbeträge an diesen Meßpunkten nicht überbewertet werden sollten. Am Gebäude I sind neben den oben diskutierten Differenzen in den Absolutbeträgen, auch Unterschiede in der Profilform zu erkennen. Im Falle der Ergebnisse aus den Versuchen in Karlsruhe ist ein schnellerer Konzentrationsabfall zu beobachten. In halber Gebäudehöhe beträgt die Konzentration etwa 50% der Maximalkonzentration, während bei den Versuchen in Hamburg noch etwa 70% der Maximalkonzentration gemessen wurden.

Physikalische Erklärungen für die diskutierten Unterschiede zu suchen ist, aufgrund der verschiedenen Versuchsaufbauten, nur bedingt sinnvoll. Die Strömungsverhältnisse in der Schlucht werden durch den „Canyon - Vortex“ geprägt und der unterschiedliche Abstand der Meßpunkte von der Gebäudewand kann eine Ursache für die beobachteten Abweichungen in der Profilform und den Absolutbeträgen sein. Zu beachten ist auch, daß keine Informationen vorliegen, inwieweit die Mittelung der Ergebnisse für die zwei Quellpositionen, die bei den

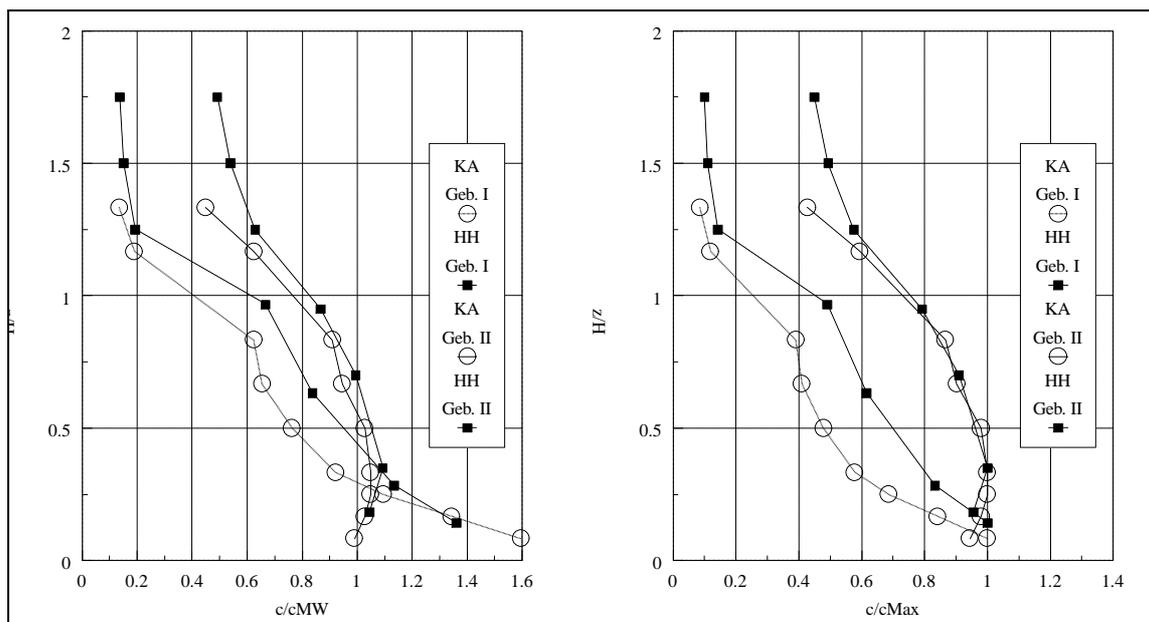


Abb. 7.8: Vergleich der Konzentrationsprofile entlang der Wände und Dächer der Gebäude einer Straßenschlucht für die Versuche in Karlsruhe und Hamburg in normierter Darstellung.

Versuchen in Karlsruhe untersucht wurden, tatsächlich eine gute Approximation der Situation mit nur einer Linienquelle in der Schluchtmittle darstellt. Eine mögliche physikalische Ursache ist der Unterschied in der Gebäudehöhe in Bezug zur Grenzschichthöhe. Daraus resultieren unterschiedliche Verhältnisse bzgl. des Turbulenzgrades und des Gradienten im Geschwindigkeitsprofil in Gebäudehöhe, welche die Ablösung an den Gebäudekanten und die Wirbelbildung in der Schlucht beeinflussen. Um diese Fragen zu klären und den Einfluß zu quantifizieren, sind weitere Versuche mit verschiedenen H/d -Verhältnisse, aber sonst gleichen Versuchsbedingungen, notwendig.

8. Untersuchung der Ausbreitungsverhältnisse in Straßenkreuzungen

8.1 Versuchsaufbau und Versuchsprogramm

Nach Abschluß der Straßenschluchtstudien, wurden Modelle für die im Antrag als Schwerpunkt vorgesehen, idealisierten Straßenkreuzungen erstellt und im Windkanal eingebaut. Die Anströmbedingungen wurden nicht verändert, so daß die in Kap. 4 dokumentierten Verhältnisse Gültigkeit haben. Zunächst wurden wieder Tracergasversuche mit Linienquellen zur Ermittlung der Konzentrationsverteilungen in Kreuzungsbereichen durchgeführt.

Den Referenzfall für die Untersuchungen bildet eine Straßenkreuzung folgender Konfiguration:

- 2 Straßen schneiden sich rechtwinklig
- gleiche Gebäudehöhe ($H = 12 \text{ cm}$) in allen 4 Quadranten
- gleiche Breite der Straßenschluchten ($S = 12 \text{ cm} \Rightarrow S/H = 1$)
- alle 4 Gebäude haben Flachdächer

Die genaue Anordnung der Gebäude und der Quellen ist in Abb. 8.1 zu erkennen. Die Emission von Schadstoffen erfolgte nur in einer Straßenschlucht (Straße 1). Die Bebauung entspricht in allen vier Quadranten einer Blockrandbebauung, welche in Innenstädten häufig vorzufinden ist. Die geometrischen Basisgrößen sind in Tab. 8.1 eingetragen. Die Parameter Gebäudelänge, Gebäudebreite und Breite der Straßenschluchten blieben bei allen Varianten unverändert. Verändert wurde nur die Dachform bzw. Firsthöhe einzelner Gebäude. Tab. 8.2 gibt eine Übersicht der Verhältnisse bei den untersuchten Varianten. Mit Firsthöhe wird der Abstand zwischen der Straße und dem höchsten Punkt des Gebäudes bezeichnet. Die in Tab. 8.1 angegebene mittlere Gebäudehöhe von 12 cm entspricht der Referenzlänge, welche bei der Normierung der Konzentrationen nach Gl. 4.3 unabhängig von der Bebauungsvariante eingesetzt wurde. Die Positionen der Meßpunkte sind durch schwarze Punkte markiert. Es wurde in den zwei Höhen $z=10 \text{ mm}$ und $z=80 \text{ mm}$ gemessen. Bei den meisten Versuchen wurde nur die Quelle B betrieben, die einen Abstand von 85 mm zu den Gebäuden A und B hatte. Bei einigen Varianten können aus Symmetriegründen die Ergebnisse der Messungen mit Quelle B auch als Ergebnisse für Quelle A (Abstand zu Haus A und B entspricht 35mm) interpretiert werden. Tab. 8.3 gibt eine Übersicht über alle Windrichtungen, für welche Informationen vorliegen. Zu beachten ist, daß im Gegensatz zur Straßenschluchtstudie eine andere Definition der Windrichtungen vorgenommen wurde. Abb. 8.1 veranschaulicht, daß der Fall der senkrechten Anströmung der Straße 1, in welcher sich die Quellen befinden, nun den Windrichtungen 180° bzw. 360° entspricht, während bei den Straßenschluchtstudien die senkrechte Anströmung mit Windrichtung 90° bzw. -90° benannt wurde.

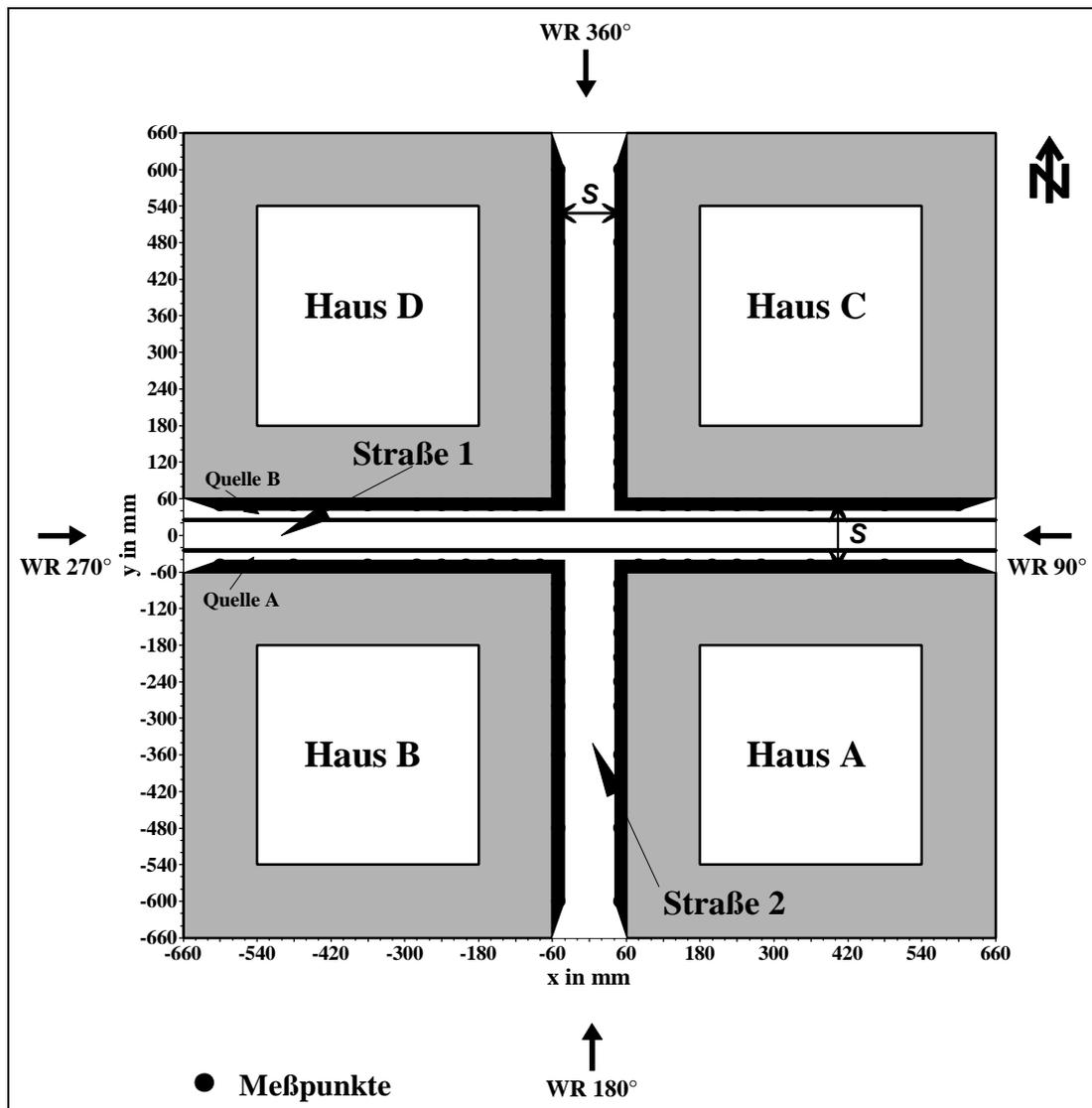


Abb. 8.1: Definitionsskizze zum Versuchsaufbau bei den Konzentrationsmessungen in der Umgebung von Straßenkreuzungen.

Tab. 8.1: Geometrische Basisgrößen des Modells idealisierter Straßenkreuzungen.

Geometrische Größe	Modelldaten in cm	entsprechende dimensionslose Größe
mittlere Gebäudehöhe	$L_{m,ref}=H=12$ cm	
Gebäudelänge	$L=60$ cm	$L/H=5$
Gebäudebreite	$B=12$ cm	$B/H=1$
Breiten der Straßenschluchten	$S=12$ cm	$S/H=1$

Tab. 8.2: Bebauungsvarianten bei den Messungen der Konzentrationsverteilungen an Straßenkreuzungen.

Bebauungssituation	Dachform/Firsthöhe			
	Gebäude A	Gebäude B	Gebäude C	Gebäude D
Referenzfall	Flachdach/12cm			
Fall A	Spitzdach/14cm			
Fall C	Flachdach/12cm		Spitzdach/14cm	
Fall D	Flachdach/12cm		Flachdach/14cm	
Fall F	Flachdach/12cm	Flachdach/18cm	Flachdach/12cm	
Fall G	Flachdach/12cm	Turmaufsatz/18cm	Flachdach/12cm	

Tab. 8.3: Untersuchte Windrichtungen bei der Studie zur Ermittlung der Konzentrationsverteilungen in der Nähe von Straßenkreuzungen.

Bebauungssituation	Untersuchte Windrichtungen Quelle B	Aus Symmetriegründen identische Windrichtungen	
		Quelle B	Quelle A
Referenzfall	180°, 195°, 210°, 225°, 240°, 255°, 270°, 285°, 300°, 315°, 330°, 345°, 360°	15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°, 105°, 120°, 135°, 150°, 165°	alle WR analog zu Quelle B
Fall A	180°, 195°, 225°, 255°, 270°, 285°, 315°, 345°, 360°	15°, 45°, 75°, 90°, 105°, 135°, 165°	alle WR analog zu Quelle B
Fall C	180°, 195°, 225°, 255°, 270°, 285°, 315°, 345°, 360°	15°, 45°, 75°, 90°, 105°, 135°, 165°	--
Fall D	180°, 195°, 225°, 270°, 315°, 360°	45°, 90°, 135°, 165°	--
Fall F	45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°, 360°	--	--
Fall G	45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270°, 315°, 360°	--	--

8.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen werden analog zur Straßenschluchtstudie, nach Gleichung 6.1, in der Form dimensionsloser Konzentrationen $c_m^* = \frac{c_m \cdot u_{100} \cdot H}{Q_m / L_{m,Q}}$ dargestellt. Als

Referenzgrößen werden wieder die Geschwindigkeit u_{100} und die mittlere Gebäudehöhe $H=12$ cm eingesetzt. Im folgenden Abschnitt werden zunächst einige Ergebnisse für den Referenzfall gezeigt und mit den Ergebnissen der Straßenschluchtstudie verglichen. Daran anschließend wird der Einfluß der Dachform und Gebäudehöhe aufgezeigt, wobei nur exemplarisch einige Fälle, für eine detaillierte Betrachtung ausgewählt werden können.

8.2.1 Referenzfall bei senkrechten Anströmrichtungen

In diesem Abschnitt werden Ergebnisse der Konzentrationsmessungen für den sogenannten Referenzfall bei einer senkrechten Anströmung von Straße 1, präsentiert. Es sollen die Unterschiede dargelegt werden, welche durch den Einfluß der Straßenkreuzung im Vergleich zu Straßenschluchten auftreten. Der Einfluß verschiedener Windrichtungen wird im nächsten Abschnitt, zusammen mit dem Einfluß der Dachform und Gebäudehöhe, diskutiert.

Wie in Abb. 8.1 zu erkennen ist, entsprechen die senkrechten Anströmrichtungen von Straße 1, den Windrichtungen 360° und 180° , wobei sich im Referenzfall diese beiden Situationen aus Symmetriegründen entsprechen, sofern Informationen für beide Quellpositionen vorliegen. In Abb. 8.3 sind die Ergebnisse für die Quelle B bei einer Windrichtung von 360° dargestellt. Die Lage der Meßpunkte ist durch Symbole gekennzeichnet, deren Größe proportional zu den gemessenen Konzentrationen ist. Zusätzlich sind die Meßwerte angegeben und verschiedene Grauschattierungen verdeutlichen die horizontalen Konzentrationsverteilungen. Das obere Diagramm zeigt die bodennahen Ergebnisse ($z=10\text{mm}=0.083H$), im unteren Diagramm sind die Ergebnisse für die zweite Meßebe in der Höhe $z=80\text{mm}=0.667H$ zu sehen. Es ist zu erkennen, daß sich im Referenzfall, bei einer Senkrechtanströmung, eine Walzenströmung in Straße 1, ähnlich wie im Falle einer zweidimensionalen Straßenschlucht ausbildet. An den leeseitigen Gebäuden C und D treten wesentlich höhere Konzentrationen auf, als an den luvseitigen Gebäuden A und B. Die Kreuzungssituation führt jedoch zu einer 3D-Struktur der Konzentrationsverteilung, wobei die Konzentrationsmaxima nicht an den Eckpunkten der Kreuzung, sondern etwa in den Gebäudemitten auftreten. Diese Struktur ist auch im unteren Diagramm für $z=80\text{mm}$ zu erkennen. In dieser Höhe sind die Maximalkonzentrationen an den Gebäuden C und D im Vergleich zu den Ergebnissen in Bodennähe etwa 50% geringer, während an den Gebäuden A und B nahezu die gleichen Werte wie für $z=10\text{mm}$ gemessen wurde. Dies bedeutet, daß analog zu einer senkrecht angeströmten Straßenschlucht an den leeseitigen Wänden große vertikale Gradienten auftreten, während an den luvseitigen Wänden die Konzentrationen vertikal nahezu gleichmäßig verteilt sind. Durch den Transport von Schadstoffen in die Querstraße treten im Kreuzungsbereich in dieser Straße Konzentrationen auf, die etwa 20-25% der Maximalkonzentration in Straße 1 betragen. In der Mitte der Gebäude, werden in der Querstraße noch etwa 15% der Maximalkonzentration in Straße 1 beobachtet.

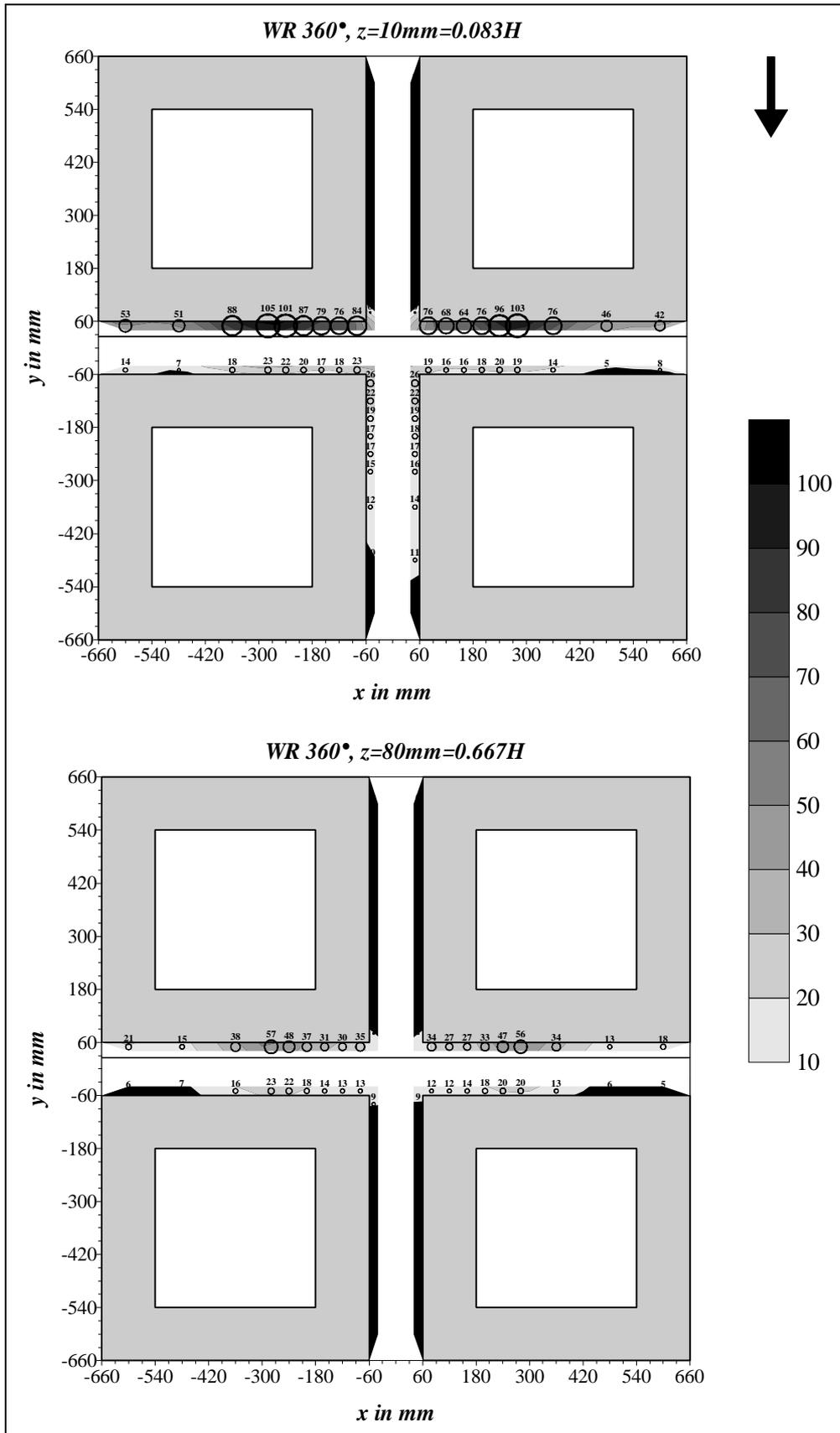


Abb. 8.2: Konzentrationsverteilung in einer Straßenkreuzung im Referenzfall bei einer senkrechten Anströmung der Straße 1 aus der Windrichtung 360° in den Meßhöhen $z=10\text{mm}$ und 80mm .

Abschließend sind zum Vergleich mit den Straßenschluchtergebnissen in Abb. 8.3 Profile entlang der Hauswände aufgetragen, welche mit den jeweils entsprechenden Ergebnissen für die senkrecht angeströmte Straßenschlucht mit $L/H=10$ verglichen werden. Dieses Verhältnis wurde ausgewählt, damit die Längen der Straßenschluchten ähnlich sind (Straßenkreuzung $L=132\text{cm}$, Straßenschlucht $L=120\text{cm}$). Im oberen Diagramm sind nochmals die Ergebnisse für die Versuche mit Quelle B zu sehen. Die Ergebnisse für Quelle A sind im unteren Diagramm eingezeichnet. Die mit Profil 1 gekennzeichneten Kurven stellen die Profile an den Wänden der Gebäude C und D dar und Profil 2 analog die an den Gebäuden A und B. Die geschlossenen Symbole repräsentieren bodennahe Konzentrationen, offene Symbole wurden für die Ergebnisse in der Höhe $z=80\text{mm}$ verwendet. Als Ergebnisse aus den Straßenschluchtmessungen sind horizontale Linien zu sehen, welche die Höhe der Konzentrationen in der Gebäudemitte ($y=0\text{mm}$) darstellen. Es ist zu erkennen, daß für beide Quellpositionen die Maximalwerte, welche im Falle einer Straßenkreuzung jeweils etwa eine halbe Gebäudelänge von der Kreuzung entfernt auftreten, höher sind als die Werte für die Straßenschlucht. Dies gilt sowohl für die leeseitigen, als auch für die luvseitigen Gebäudewände. Die Unterschiede betragen bis zu 80%.

Qualitative Übereinstimmungen der Ergebnisse für die Straßenkreuzung und eine Straßenschlucht, die bereits bei der Beschreibung von Abb. 8.2 aufgezeigt wurden, werden auch durch Abb. 8.3 bestätigt. Die Vergrößerung des Abstandes der Quelle führt, ähnlich wie im Falle einer Straßenschlucht, zu einer Abnahme der Konzentrationen an den leeseitigen Wänden in der Größenordnung von 50%. Die Betrachtung der Profile 2 verdeutlicht noch einmal, daß für beide Quellpositionen an den luvseitigen Wänden nur im Kreuzungsbereich Konzentrationsunterschiede für die beiden Meßhöhen beobachtet wurden, so daß wie im Falle der Straßenschlucht am Gebäude II, die Schadstoffe vertikal nahezu gleichmäßig verteilt sind. Die vertikalen Konzentrationsgradienten an den leeseitigen Wänden führen im Falle der Straßenkreuzung in der zweiten Meßebene zu einer Konzentrationsabnahme im Vergleich zu den Bodenkonzentrationen um etwa 50 % für die Quelle B, bzw. um 30% für Quelle A. Für die Straßenschlucht wurde im letzteren Falle ein ähnlicher Wert festgestellt, für die Quelle B betrug die Reduktion 70%.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, daß im Falle einer Straßenkreuzung die Maximalkonzentrationen, bei einer senkrechten Anströmung der belasteten Straße nicht im Kreuzungsbereich auftreten, sondern etwa um die halbe Gebäudelänge seitlich versetzt von der Kreuzungsmittle. Analog zu den Straßenschluchtkonfigurationen treten an den leeseitigen, Wänden deutlich höhere Konzentrationen auf als an den luvseitigen. Vertikale Konzentrationsgradienten sind ebenfalls an den leeseitigen Wänden zu beachten und die Quellposition hat einen ähnlichen Einfluß wie im Falle einer Straßenschlucht. Konzentrationswerte aus Straßenschluchtuntersuchungen unterschätzen die Maximalkonzentrationen, welche im Falle der Straßenkreuzung gemessen wurden.

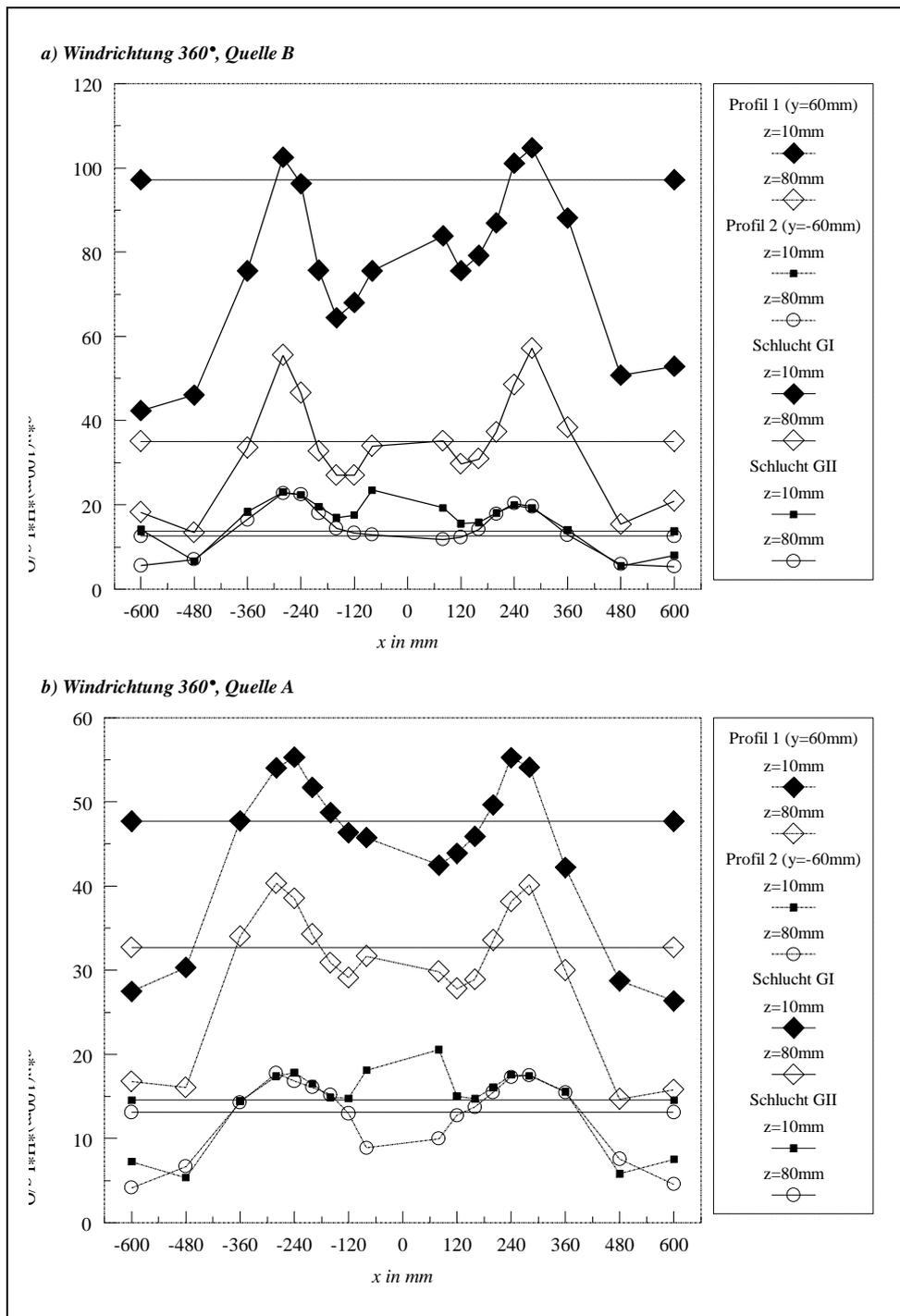


Abb. 8.3: Vergleich der Konzentrationsverteilungen im Falle einer Straßenkreuzung mit den Ergebnissen der Straßenschluchtstudie für 2 Quellpositionen bei senkrechter Anströmung.

8.2.2 Einfluß der Dachform und Gebäudehöhe

Die Diskussion der Ergebnisse für den Referenzfall, bei einer senkrechten Anströmung der belasteten Straße, hat deutlich gemacht, daß im Falle von Straßenkreuzungen die Konzentrationsverteilungen, aufgrund der komplexen dreidimensionalen Strömungsverhältnisse, große horizontale Gradienten aufweisen. Dies erschwert die systematische Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse. Im Rahmen dieses Berichtes können nicht alle untersuchten Varianten im Detail betrachtet werden. Das Ziel ist, den Einfluß von Veränderungen der Dachform und Gebäudehöhe, auf die Ausbreitungsverhältnisse im Kreuzungsbereich, bei verschiedenen Windrichtungen aufzuzeigen. Es wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

Es werden zunächst exemplarisch für fünf Windrichtungen Konzentrationsverteilungen in Bodennähe bei vier unterschiedlichen Bebauungssituationen verglichen. Ausgewählt wurden Fälle einer Senkrechtanströmung (WR 360° und WR 180°), einer Parallelanströmung (WR 90°) und zwei Schräganströmungen im Winkel von 45° (WR 45° und WR 225°) der Straße 1, in welcher sich die Quelle befindet. Abschließend werden die Ergebnisse in Form einer Konzentrationsrose der ermittelten Maximalwerte zusammengefaßt.

Die Konzentrationsverteilungen in Bodennähe (Meßhöhe $z=10$ mm) bei den genannten Windrichtungen sind in den Abb. 8.4-8.8 dargestellt. Neben den Ergebnissen für den Referenzfall, wird der Einfluß von Spitzdächern auf allen vier Gebäuden (Fall A) und der Erhöhung von Gebäude B auf $H_B = 18$ cm (Fall F) bzw. das Anbringen eines Turmes auf Gebäude B mit der Höhe $H_T = 18$ cm (Fall G) aufgezeigt. Analog zu Abb. 8.2 ist die Lage der Meßpunkte durch Symbole gekennzeichnet, deren Größe proportional zur gemessenen Konzentration ist. Zusätzlich verdeutlichen wieder verschiedene Grauschattierungen die Höhe der dimensionslosen Konzentrationen c^* .

Betrachtet man zunächst die Ergebnisse für die senkrechte Anströmung von Straße 1 aus den Windrichtungen 360° und 180°, so ist in den Abb. 8.4 und 8.5 in den linken, oberen Diagrammen wieder die bodennahe Konzentrationsverteilung im Referenzfall zu sehen. Die Kreuzungssituation führt bei dieser Situation, wie im vorhergehenden Abschnitt ausführlich diskutiert wurde, zu einer 3D-Struktur der Konzentrationsverteilung, wobei die Konzentrationsmaxima nicht an den Eckpunkten der Kreuzung, sondern etwa in den Gebäudemitten auftreten. Dieses Verhalten ändert sich, wie die rechten oberen Diagramme für den Fall A verdeutlichen, beim Anbringen vom Spitzdächern. Die Maximalkonzentrationen werden für diese Fälle an den Eckpunkten der Gebäude C und D gefunden, wobei die Werte niedriger sind als im Referenzfall. Zusätzlich wurden an den luvseitigen Wänden deutlich niedrigere Konzentrationen als im Referenzfall beobachtet. Die Veränderung der Dachform hatte keinen signifikanten Einfluß auf den Schadstofftransport in Straße 2. Zusammenfassend kann man festhalten, daß die Dachform die Wirbelbildung an den Gebäudekanten im Kreuzungsbereich und die Walzenströmung in der senkrecht angeströmten Straßenschlucht beeinflußt. Die Unterschiede zwischen den Windrichtungen 360° und 180° lassen sich für den Referenzfall und den Fall A durch die Position der Quelle erklären, welche nicht in der Mitte der Straßenschlucht liegt.

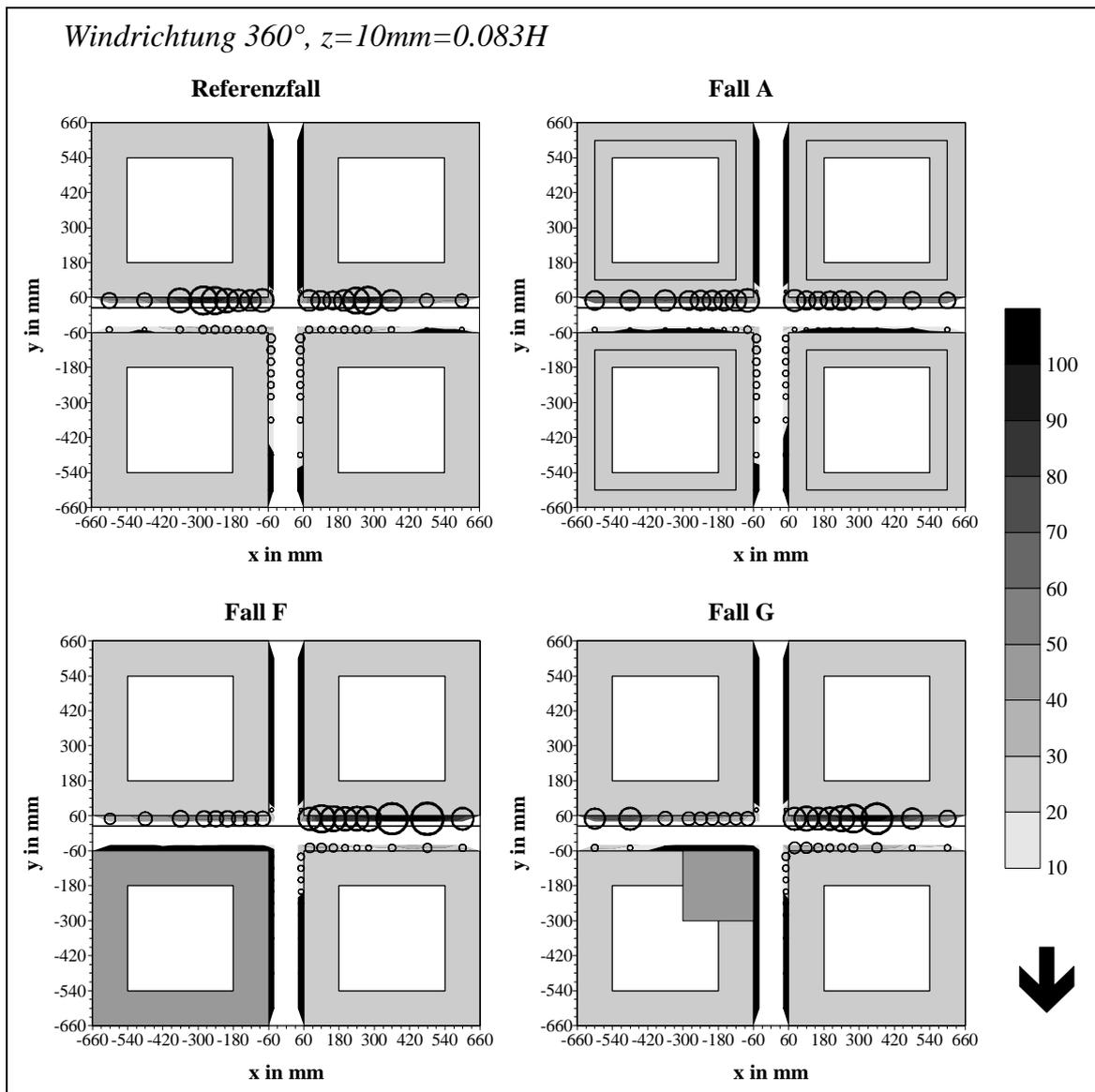


Abb. 8.4: Vergleich der Konzentrationsverteilungen in Bodennähe ($z=10\text{mm}$) für vier verschiedene Bebauungssituationen bei der Windrichtung 360° .

Die unteren Diagramme in den Abb. 8.4 und 8.5 veranschaulichen, daß die teilweise oder komplette Erhöhung von Gebäude B einen starken Einfluß, sowohl auf die Form der Konzentrationsverteilung, als auch auf die in Bodennähe vorkommende Maximalkonzentration hat. Aufgrund der asymmetrischen Gebäudekonfigurationen, ist bei den Fällen F und G ein deutlicher Unterschied zwischen den Windrichtungen 360° und 180° festzustellen, welcher nicht nur durch die Position der Quelle zu erklären ist. Bei der Windrichtung 360° befinden sich die erhöhten Gebäude stromabwärts von Straße 1. Die Gebäudeerhöhung führt zu einer signifikanten Querströmung entlang von Straße 1 und die Schadstoffe werden verstärkt vom erhöhten Gebäude weg, zu den Gebäuden A und C transportiert. Der Transport von Schadstoffen in Straße 2 wird nahezu vollständig blockiert. Im Bereich der erhöhten Gebäude kommt es durch die Querströmung zu signifikanten Konzentrationsreduktionen, dagegen werden insbesondere am Gebäude C höhere Konzentrationen als im Referenzfall beobachtet. Die Maximalkonzentration ist um etwa 20% höher als im Referenzfall. Bei einer Anströmung aus der Windrichtung 180°

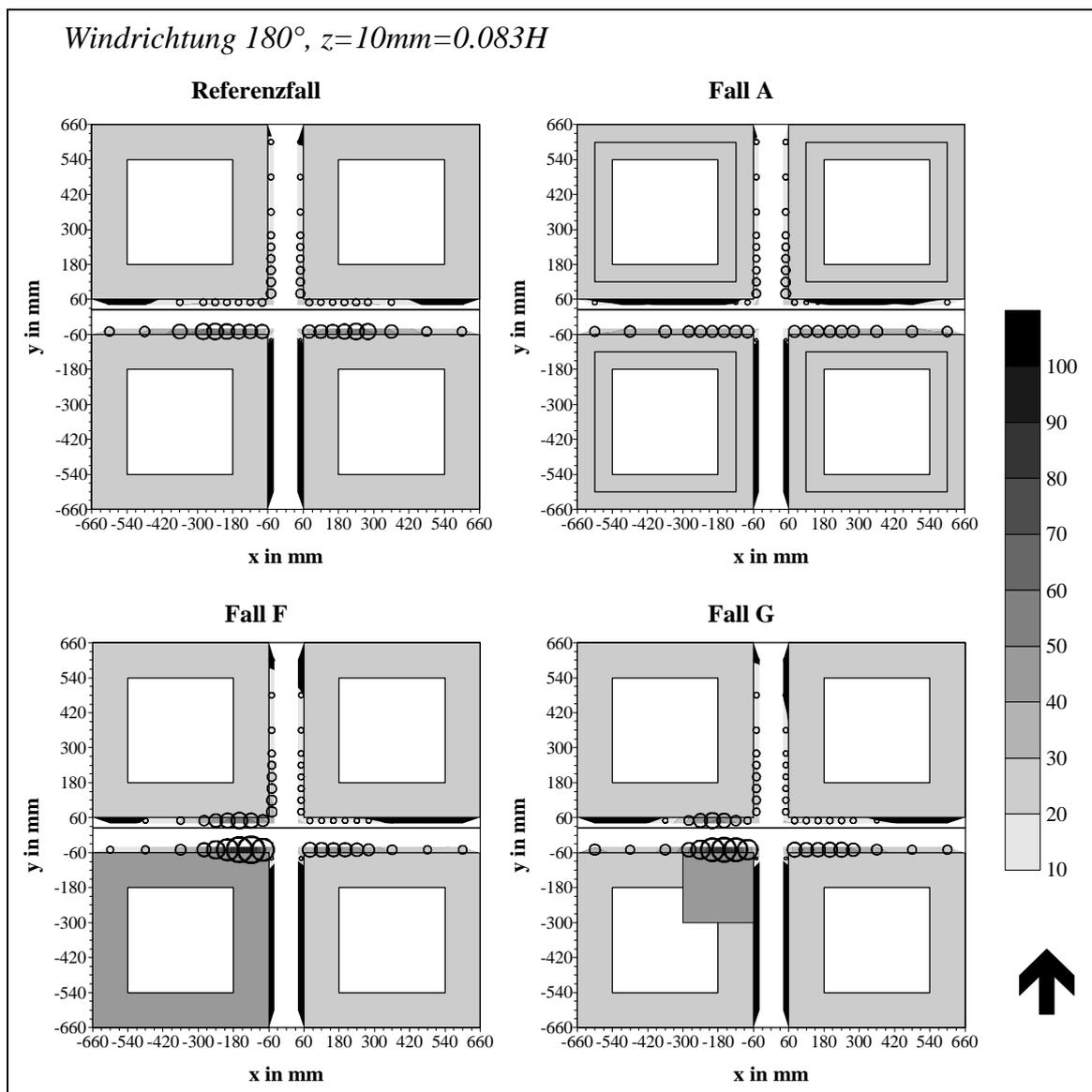


Abb. 8.5: Vergleich der Konzentrationsverteilungen in Bodennähe ($z=10\text{mm}$) für vier verschiedene Bebauungssituationen bei der Windrichtung 180° .

liegen die erhöhten Gebäude stromaufwärts von Straße 1. Das Überströmen der erhöhten Gebäude bewirkt in diesem Falle eine Verstärkung des Leewirbels von Gebäude B. Die Verdünnung der Schadstoffe in der hinter dem Gebäude liegenden Schlucht, wird dadurch abgeschwächt und es kommt im Bereich der erhöhten Gebäude zu deutlich höheren Konzentrationen als im Referenzfall. Im Gegensatz zur Windrichtung 360° sind bei dieser Anströmung die Auswirkungen der Gebäudeerhöhung auf den Nahbereich der erhöhten Gebäude beschränkt. Es wurde nur ein minimaler Einfluß auf den Transport von Schadstoffen in die Querstraße festgestellt. Die Maximalkonzentrationen betragen aber nahezu das doppelte wie im Referenzfall. Die beschriebenen Phänomene treten bei den Fällen F und G auf, d.h. bereits eine teilweise Erhöhung der Gebäude im Kreuzungsbereich führt bei einer Senkrechtanströmung zu anderen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnissen. Neben einer Verschiebung der Lage der Konzentrationsmaxima ändern sich auch deren Werte signifikant.

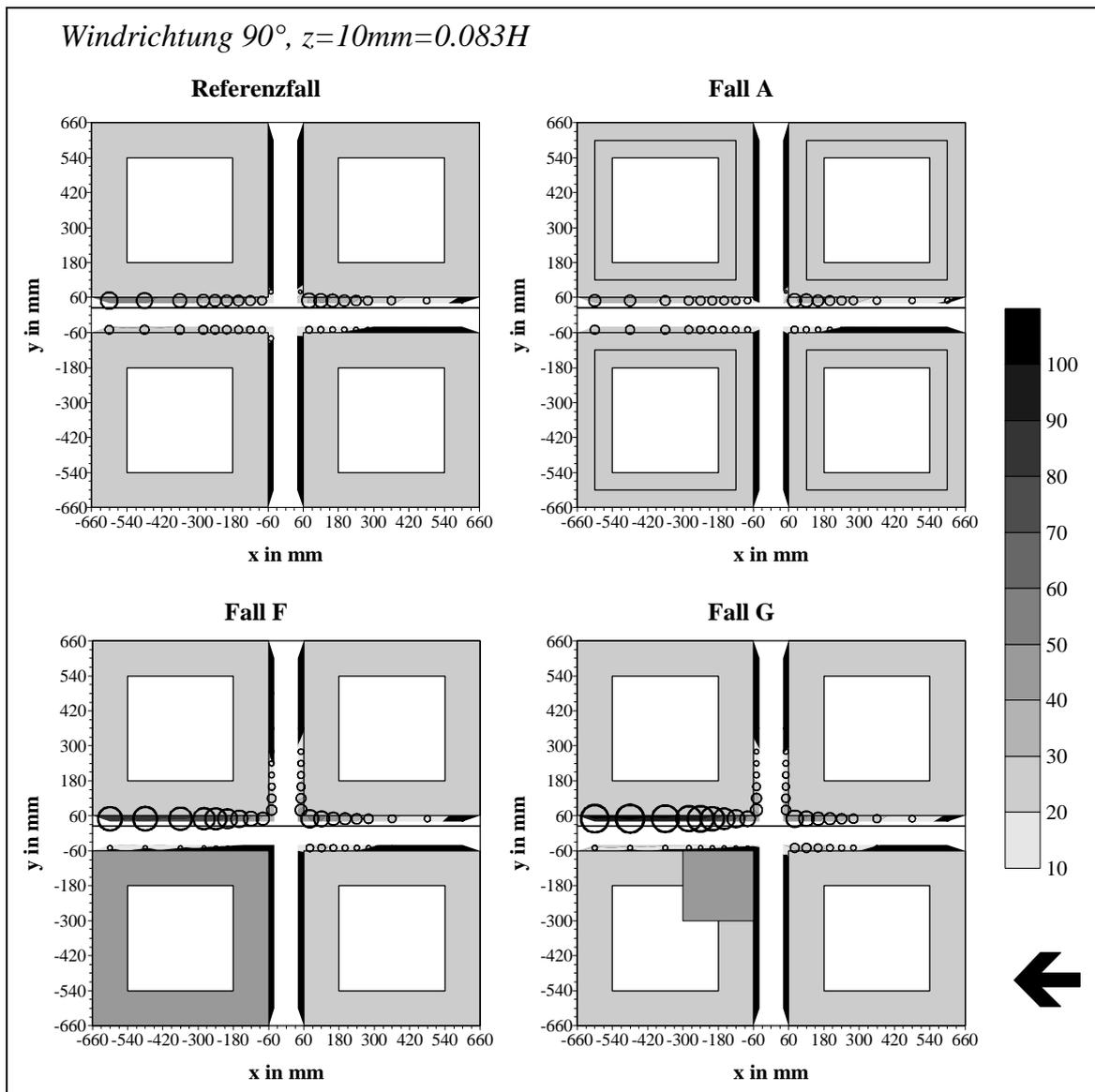


Abb. 8.6: Vergleich der Konzentrationsverteilungen in Bodennähe ($z=10\text{mm}$) für vier verschiedene Bebauungssituationen bei der Windrichtung 90° .

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen für die Windrichtung 90° , d.h. eine Parallelanströmung der Straße 1, sind in Abb. 8.6 dargestellt. Die oberen Diagramme mit den Ergebnissen für den Referenzfall und Fall A, machen deutlich, daß bei symmetrischen Gebäudekonfigurationen die Konzentrationen entlang von Straße 1 zunächst ansteigen, im Kreuzungsbereich etwas abfallen und dann weiter ansteigen. Die Maximalkonzentration tritt ähnlich wie im 2D-Fall einer Straßenschlucht am Ende der parallel angeströmten Straße auf. Die Wirbelbildung an den Gebäudekanten im Kreuzungsbereich führt zu keinem nachweisbaren Transport von Schadstoffen in die Querstraße. Die gemessenen Konzentrationen sind wie im Falle von Windrichtung 360° , d.h. Senkrechtsanströmung, geringer für die Variante mit Spitzdächern (Fall A). Die unteren Diagramme verdeutlichen erneut die signifikante Querströmung in der senkrecht angeströmten Straßenschlucht (bei dieser Windrichtung Straße 2, in welcher keine Schadstoffe freigesetzt werden) bei einer Gebäudeerhöhung im Kreuzungsbereich. Die Fälle F und G zeigen wieder ähnliche Konzentrationsverteilungen in Bodennähe, wobei die höhere

Maximalkonzentration für den Fall G gefunden wurde. Im Vergleich zum Referenzfall wurde neben der bereits erwähnten Ausbreitung von Schadstoffen in die Querstraße ein weiterer Unterschied beobachtet. In der parallel angeströmten Straßenschlucht wird der Transport von Schadstoffen zum erhöhten Gebäude behindert, so daß am Gebäude B geringere, jedoch am Gebäude D deutlich höhere Konzentrationen als im Referenzfall gemessen wurden.

Die Ergebnisse für schräge Anströmungen der Straßenkreuzung unter dem Winkel 45° sind in den Abb. 8.7 und 8.8 dargestellt. Die Windrichtungen 45° und 225° repräsentieren wieder Situationen, bei welchen in den Fällen F und G die erhöhten Gebäude stromabwärts bzw. stromaufwärts von der Kreuzung liegen. Betrachtet man zunächst die oberen Diagramme, welche die Ergebnisse für den Referenzfall und den Fall A beinhalten, so wird deutlich, daß bei diesen Windrichtungen der Einfluß der Spitzdächer auf den Gebäuden nahezu vernachlässigt werden kann. Im Vergleich zu einer senkrechten Anströmung der belasteten Straße, werden in beiden

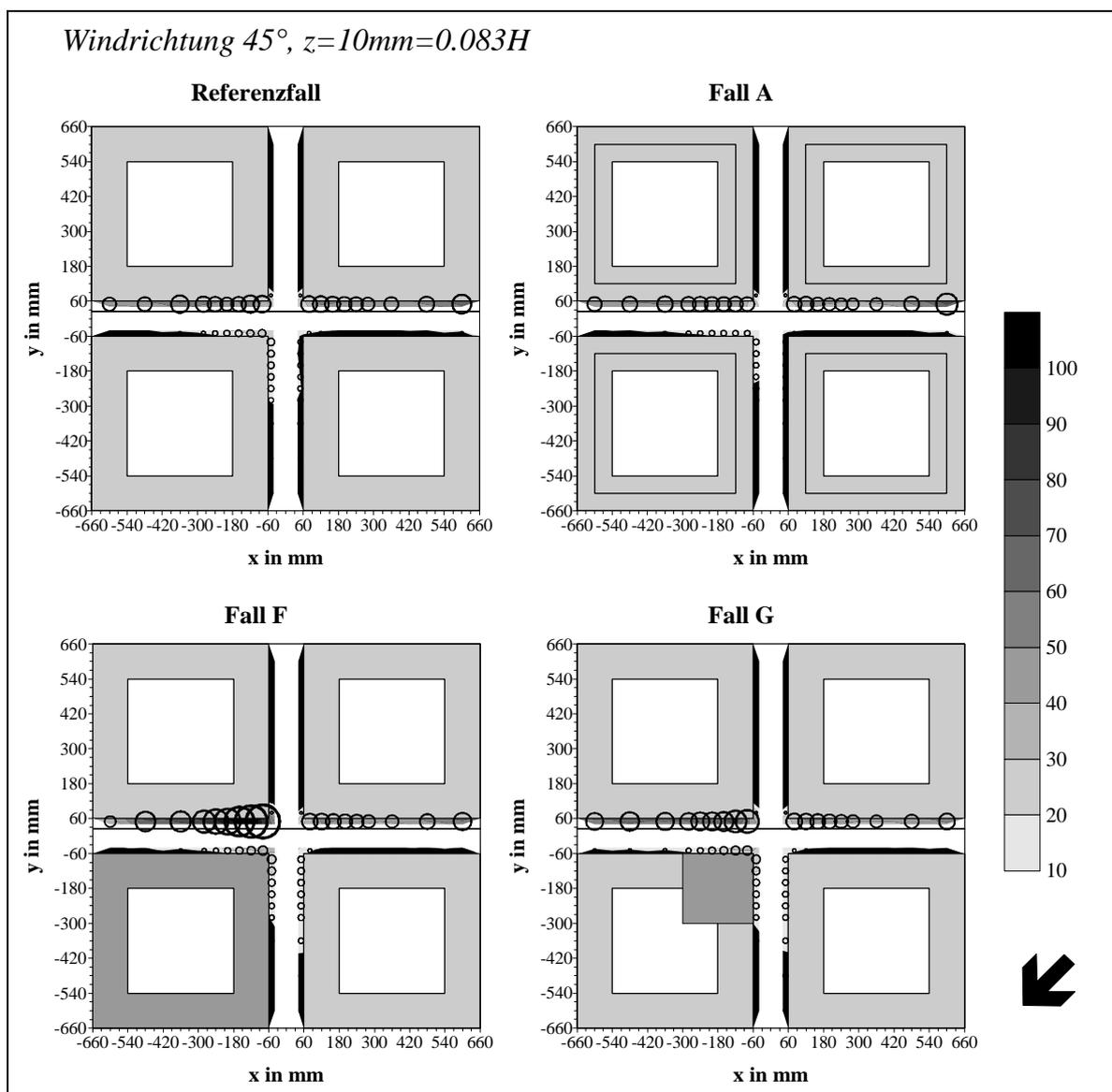


Abb. 8.7: Vergleich der Konzentrationsverteilungen in Bodennähe ($z=10\text{mm}$) für vier verschiedene Bebauungssituationen bei der Windrichtung 45° .

Fällen geringere Konzentrationen festgestellt. Die unteren Diagramme in den Abbildungen zeigen erneut, daß im Falle eine Gebäudeerhöhung die Position des erhöhten Gebäudes von großer Bedeutung ist. Bei der Windrichtung 45° führt die Erhöhung von Gebäude B, welches bei dieser Windrichtung stromabwärts von der Kreuzung liegt, zu Maximalkonzentrationen am Gebäude D, welche nahezu doppelt so hoch sind wie im Referenzfall. Im Fall G sind die Auswirkungen der teilweisen Gebäudeerhöhung auf die Maximalkonzentrationen geringer als im Fall F, resultieren aber in einer ähnlichen Konzentrationsverteilung. Bei Gebäudekonfigurationen mit einer Gebäudeerhöhung stromaufwärts von der Kreuzung, wie es im Falle der Windrichtung 225° gegeben ist, werden nur geringfügige Veränderungen der Konzentrationsverteilung in Bodennähe beobachtet. Sowohl die Verteilung der Schadstoffe, als auch die Höhe der gemessenen Konzentrationen ist ähnlich wie im Referenzfall. Abschließend werden in Abb. 8.9 die Ergebnisse aller untersuchten Fälle in Form einer Konzentrationsrose der Maximalwerte in Bodennähe, ermittelt aus jeweils allen Meßpunkten, zu-

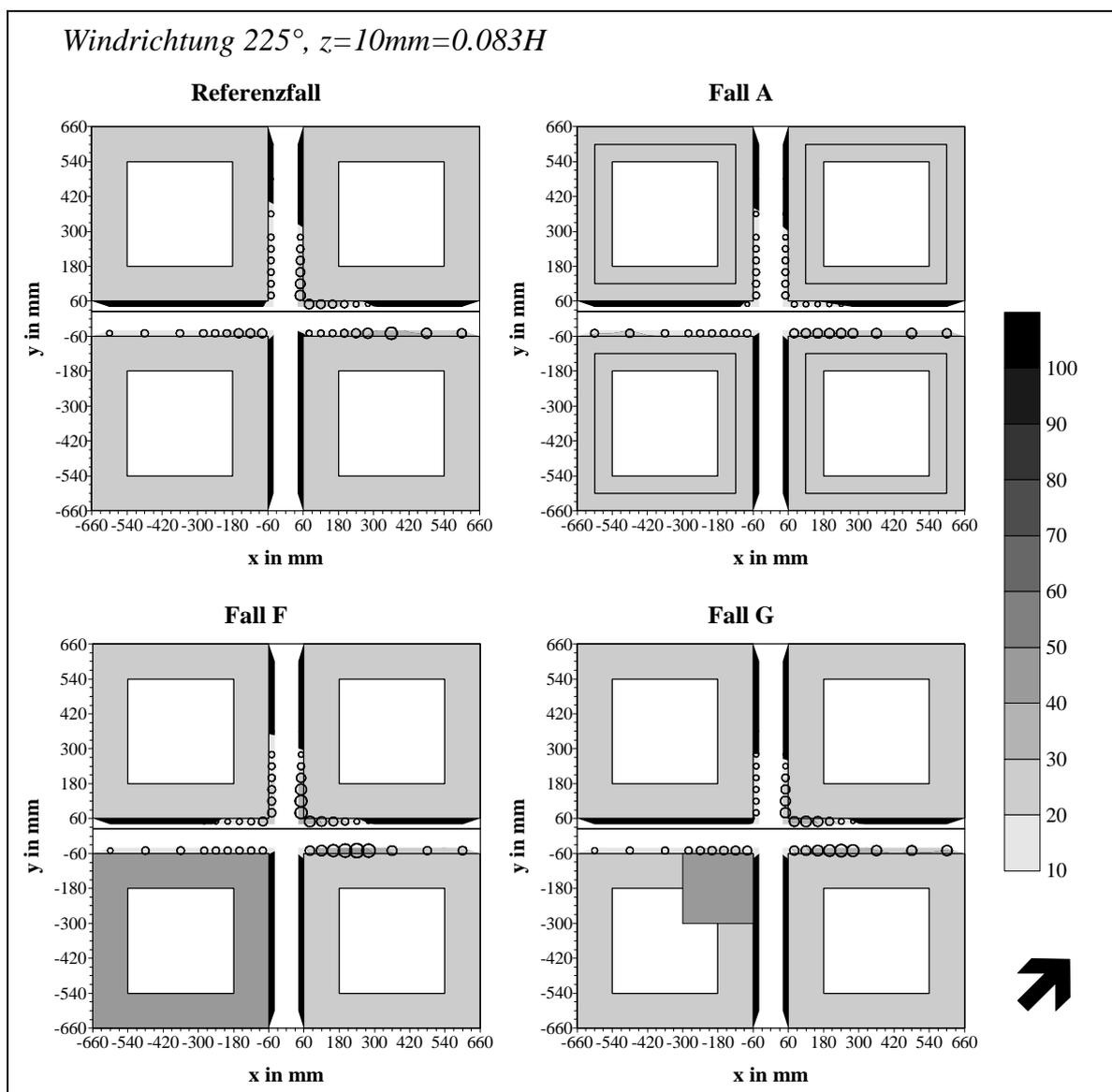


Abb. 8.8: Vergleich der Konzentrationsverteilungen in Bodennähe ($z=10\text{mm}$) für vier verschiedene Bebauungssituationen bei der Windrichtung 225° .

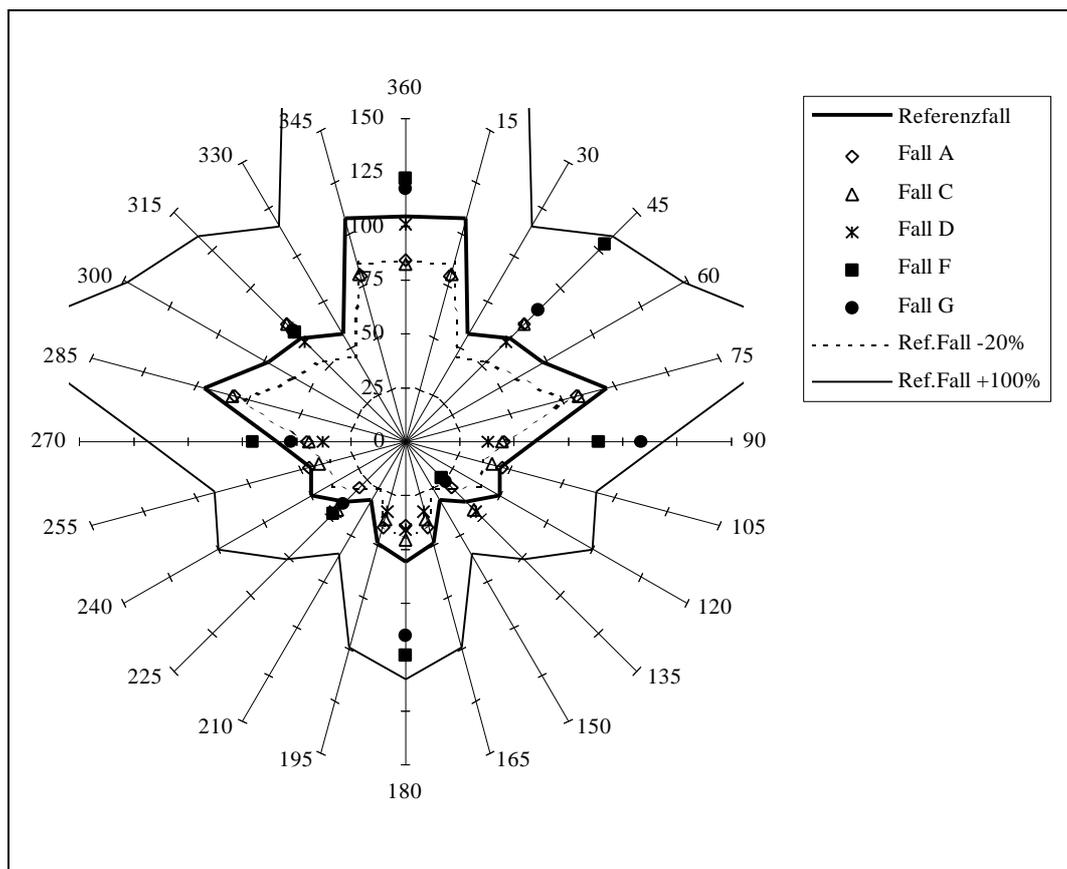


Abb. 8.9: Einfluß der Windrichtung und der Bebauungsvariante auf das Konzentrationsmaximum in Bodennähe

sammengefaßt. Die fett eingezeichnete Linie entspricht den Ergebnissen im Referenzfall. Bebauungsvarianten mit Spitzdächern werden durch offene Symbole dargestellt, geschlossene Symbole entsprechen den Varianten mit veränderten Gebäudehöhen. Zusätzlich sind Linien mit eingezeichnet, welche einer Abminderung der Ergebnisse im Referenzfall um 20% (gestrichelte Linie) bzw. Erhöhung um 100% (dünne ausgezeichnete Linie) entsprechen.

Zunächst wird deutlich, daß die in Bodennähe auftretenden Maximalkonzentrationen in der Umgebung von Straßenkreuzungen stark von der Windrichtung abhängen. Im Referenzfall liegen die Werte der dimensionslosen Maximalkonzentration je nach Windrichtung zwischen 30 und 100. Weiterhin ist zu erkennen, daß die Fälle mit Spitzdächern bei den meisten Windrichtungen zu geringeren Maximalkonzentrationen führen, der Verlauf der Kurve aber ähnlich zum Referenzfall bleibt. Die Abschwächung liegt in der Größenordnung von 20%. Ähnliche Ergebnisse wurden auch für den Fall D gefunden, bei welchem die Gebäude C und D um 2 cm erhöht wurden und somit die Gebäudehöhe $H=14$ cm hatten. Anders verhält es sich bei den Fällen F und G. Die asymmetrischen Gebäudekonfigurationen mit einer deutlichen Veränderung der Höhe von Gebäude B führen zu signifikanten Konzentrationserhöhungen und einer Verschiebung der kritischen Windrichtungen. Bei ausgewählten Windrichtungen ergeben sich dadurch nahezu doppelt so hohe Maximalkonzentrationen wie im Referenzfall.

9. Untersuchung der Strömungsverhältnisse in Straßenkreuzungen

9.1 Laser - Lichtschnitt - Aufnahmen

Zu Beginn der Strömungsfelduntersuchungen wurden Strömungsvisualisierungen mit der im Abschnitt 4.5.3 beschriebenen Laser - Lichtschnitt - Methode durchgeführt. Die Aufnahmen aus Laser - Lichtschnitt - Visualisierungen, ermöglichen qualitative Aussagen über die Strömungsverhältnisse im Kreuzungsbereich.

In Abb. 9.1 sind exemplarisch Aufnahmen für zwei Windrichtungen zu sehen. Die Versuche wurden mit einer Rauchquelle, plaziert im Kreuzungsmittelpunkt, durchgeführt. Ähnlich wie bei den Konzentrationsmessungen wurde die Höhe eines Gebäudes variiert. Die Anströmrichtung bei allen vier Aufnahmen war von oben. Die linken Abbildungen entsprechen dem Referenzfall. Die Unterschiede in diesen beiden Aufnahmen geben den instationären Charakter

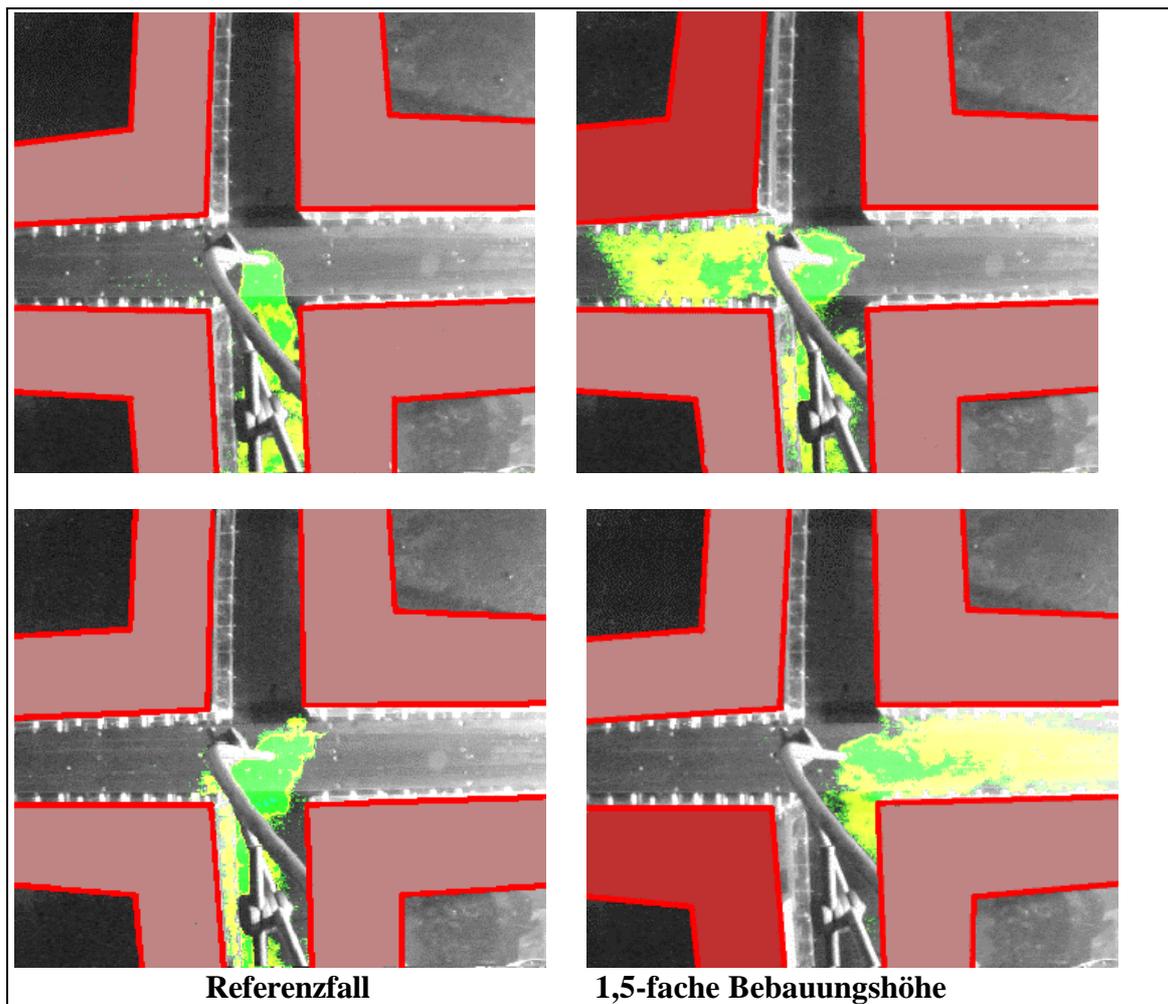


Abb. 9.1: Laserlichtschnittaufnahmen zur Dokumentation des Einflusses der Gebäudehöhe auf die Strömungsverhältnisse im Kreuzungsbereich.

der Strömungsverhältnisse im Kreuzungsbereich wieder. Bei den rechten Aufnahmen wurde, wie bei dem im Kapitel 8 definierten Fall F, die Höhe eines Gebäudes auf 18 cm (1.5-fache Höhe der anderen Gebäude) erhöht. Die Rauchquelle lag einmal im Lee dieses Gebäudes (obere Aufnahme) und einmal im Luv (untere Aufnahme). Die Situationen entsprechen den Windrichtungen 180° und 360° , für welche die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen in den Abb. 8.5 bzw. 8.4 dargestellt wurden. Die Aufnahmen bestätigen, die bei der Diskussion der Konzentrationsverteilungen beschriebenen Strömungsvorgänge. Der Transport von Rauch in die senkrecht angeströmte Querstraße, welcher im Referenzfall nicht zu beobachten ist, ist deutlich zu erkennen. Die Position des erhöhten Gebäudes hat einen großen Einfluß auf die Transportvorgänge im Kreuzungsbereich. Im Fall der Lee-Situation, d.h. der Windrichtung 180° , wird der Rauch zum erhöhten Gebäude transportiert, während im Fall der Luv-Situation, d.h. der Windrichtung 360° , der Rauch vom erhöhten Gebäude wegströmt. In diesem Fall ist auch eine Rauchausbreitung in der parallel angeströmten Straßenschlucht praktisch nicht mehr vorhanden.

9.2 Laser - Doppler - Anemometrie Messungen

Nach Abschluß der Konzentrationsmessungen und Strömungsvisualisierungen wurden, mit der im Kapitel 4.5.2 beschriebenen 2-Komponenten-LDA-Anlage des IHW, Versuche zur Ermittlung der Geschwindigkeiten im Bereich einer Straßenkreuzung durchgeführt. Die Messungen lassen sich in mehrere Versuchsphasen unterteilen und es wurde mit zwei verschiedenen Versuchsaufbauten gearbeitet. Die Gründe hierfür werden im folgenden aufgezeigt, die Versuchsaufbauten beschrieben, das Versuchsprogramm dokumentiert und die erzielten Ergebnisse diskutiert.

9.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsprogramm

Das Ziel der Messungen mit der 2-Komponenten-LDA-Anlage des IHW war, eine möglichst umfangreiche und genaue Datenbasis über die Geschwindigkeiten im Bereich einer Straßenkreuzung aufzunehmen und für den Vergleich mit numerisch berechneten Strömungsfeldern zur Verfügung zu stellen. Dies bedeutet, daß möglichst alle drei Komponenten des Windgeschwindigkeitsvektors gemessen werden sollten und am Ende nicht nur Informationen über die mittleren Windgeschwindigkeiten, sondern auch Informationen über den turbulenten Charakter der Strömungsfelder vorliegen sollten.

Die 2-Komponenten-LDA-Anlage des IHW ermöglicht es, gleichzeitig zwei Komponenten des Windgeschwindigkeitsvektors aufzunehmen. Um Informationen über alle drei Komponenten zu erhalten, sind jeweils zwei Messungen erforderlich, die nicht zeitgleich durchgeführt werden können.

Für die Versuche standen zwei Sende - und Empfangsoptiksonden mit unterschiedlichen Dimensionen und Brennweiten zur Verfügung. Sie werden in Tab. 9.1 als *große Optik* und *kleine Optik* bezeichnet und können durch die folgenden Angaben beschrieben werden:

	<i>Durchmesser</i>	<i>Länge</i>	<i>Brennweite</i>
große Optik	83 mm	ca. 500 mm	1200 mm
kleine Optik	25 mm	ca. 100 mm	110 mm

Es ist sofort zu erkennen, daß aufgrund der unterschiedlichen technischen Daten, unterschiedliche Versuchsaufbauten notwendig sind. Bei Messungen mit der großen Optik ist die Send- und Empfangs-sonde außerhalb vom Windkanal positioniert und die Strahlen müssen horizontal durch das Windkanalfenster eingestrahlt werden. Neben Problemen durch die Reflexion und Brechung der Laserstrahlen beim Durchgang durch das Windkanalfenster, treten bei dieser Art der Messungen vor allem Probleme auf, alle Meßpunkte in einem komplexen Untersuchungsgebiet, zu erreichen. Messungen mit der kleinen Optik haben den Vorteil, daß die Sonde im Windkanal plaziert werden kann und somit in der Regel alle Meßpunkte problemlos zu erreichen sind. Man hat aber den Nachteil, daß durch die relativ kurze Brennweite von 110 mm, die Sonde nur einen geringen Abstand vom Meßvolumen hat. Es kann eine Verfälschung der Ergebnisse auftreten, da die Sonde und die Sondenhalterungen einen Einfluß auf die Strömungsverhältnisse haben können. Der Versuchsaufbau muß deshalb in Abhängigkeit vom jeweiligen Untersuchungsgebiet und den zu messenden Größen abgestimmt werden.

Das für das vorgestellte Projekt ausgewählte Untersuchungsgebiet ist in Abb. 9.2 skizziert. Neben den Windgeschwindigkeiten im direkten Kreuzungsbereich, sollten auch die angrenzenden Straßenschluchten betrachtet werden, in welchen insbesondere im Falle einer senkrechten Anströmung, Wirbelsysteme mit signifikanten Vertikalkomponenten (w -Komponente) zu erwarten sind. Im Kreuzungsbereich sind vorrangig die horizontalen Komponenten (u - und v -Komponenten) des Windgeschwindigkeitsvektors von Interesse. Sie liefern Informationen über die Richtung des horizontalen Geschwindigkeitsvektors und der Ausdehnung

Tab. 9.1: Liste der durchgeführten LDA - Messungen zur Ermittlung der Geschwindigkeitsfelder im Untersuchungsgebiet Straßenkreuzung

	<i>Versuchsaufbau</i>	<i>untersuchte Windrichtungen</i>	<i>Art der Messungen</i>
1. Versuchsphase Frühjahr 97 $u_\infty = 10\text{m/s}$	kleine Optik	$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$	Felder mit Informationen über die horizontale Windgeschwindigkeit im Kreuzungsbereich und in den Straßenschluchten
	große Optik	0°	Vertikalprofile in den Straßenschluchten zur Bestimmung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente
2. Versuchsphase Herbst 97 $u_\infty = 10\text{m/s}$	kleine Optik	$0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$	Felder mit Informationen über die horizontale Windgeschwindigkeit im Kreuzungsbereich und in den Straßenschluchten
	kleine Optik schräge Einstrahlung	0°	Vertikalprofile in den Straßenschluchten zur Bestimmung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente

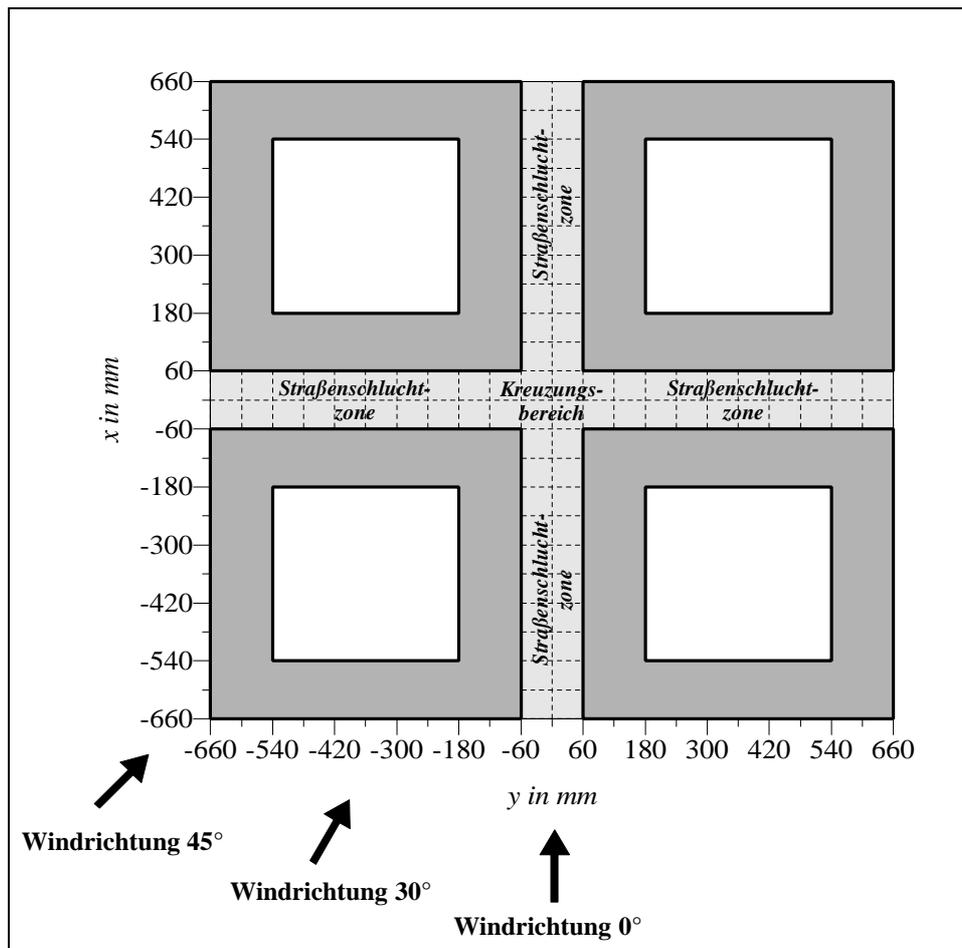


Abb. 9.2: Skizze des Untersuchungsgebietes Straßenkreuzung. Eingezeichnet sind die untersuchten Windrichtungen.

der Wirbelzonen infolge von Strömungsablösung an den Gebäudekanten. Neben der Windrichtung 0° , bei welcher die zwei sich kreuzenden Straßenschluchten parallel bzw. senkrecht angeströmt werden, sollten Messungen für zwei Schräganströmungen durchgeführt werden. Ausgewählt wurden die in Abb. 9.2 eingezeichneten Windrichtungen 30° und 45° . Aus Symmetriegründen können die Strömungsfelder für andere Windrichtungen aus den vorliegenden Ergebnissen abgeleitet werden.

Für die 1. Versuchsphase, welche im Frühjahr 97 durchgeführt wurde, wurde das in Tab. 9.1 beschriebene Versuchskonzept ausgewählt. Mit der kleinen Optik wurden die horizontalen Windgeschwindigkeiten für alle drei Windrichtungen, sowohl im Kreuzungsbereich als auch in den Straßenschluchten, aufgenommen. Für die Windrichtung 0° wurden die Vertikalkomponenten in der senkrecht angeströmten Straßenschlucht mit der großen Optik gemessen. Diese Vorgehensweise resultierte aus folgenden Einschränkungen bzw. Vorgaben. Messungen mit der großen Optik, bei welcher ja wie oben bereits erläutert wurde, die Strahlen von außen durch das Windkanalfenster eingeleitet werden, waren nur bei der Windrichtung 0° innerhalb der senkrecht angeströmten Straßenschlucht möglich. Bei allen anderen Windrichtungen bzw. Untersuchungsgebieten hätten die Laserstrahlen mindestens einen Durchgang durch die Plexiglasgebäude durchlaufen müssen. Dies hätte neben der Brechung und Reflexion am Windkanalfenster zu weiteren Intensitätsverlusten und Meßunsicherheiten geführt. Diese Problem e



Abb. 9.3: Blick in den Windkanal mit dem eingebauten Modell der Straßenkreuzung. Zu sehen ist der Versuchsaufbau bei den Messungen mit der Optiksonde im Windkanal (Bezeichnung kleine Optik) und die Anlaufstrecke mit den Rauhelementen und den Wirbelgeneratoren im Hintergrund.

konnten durch die Messungen mit der kleinen Optik umgangen werden. Hierbei sind jedoch Störungen durch den Versuchsaufbau der Sonde im Windkanal zu beachten. In Abb. 9.3 ist ein Photo sehen, welches den Versuchsaufbau der Messungen mit der kleinen Optik zeigt. Bei Messungen der horizontalen Komponenten des Windgeschwindigkeitsvektors ist die Sonde vertikal ausgerichtet und die Strahlen werden, wie die Detailansicht in Abb. 9.4 zeigt, von oben in die Untersuchungsgebiete zwischen den Gebäuden eingestrahlt. Um die Vertikalkomponente mit der kleinen Optik aufnehmen zu können, muß die Sonde horizontal ausgerichtet werden. Dies würde bedeuten, daß die Sonde entweder vollständig in die Straßenschluchten eingebracht wird und dadurch die Strömung erheblich stört oder in die Gebäude integriert werden muß und die Strahlen durch die Gebäudewände eingestrahlt werden. Letzterer Aufbau würde aber wieder zu den bereits genannten Problemen der Zugänglichkeit zum Meßpunkt und Unsicherheiten durch Reflexion und Brechung der Strahlen führen, so daß auf eine Messung der Vertikalkomponenten mit der kleinen Optik in der ersten Versuchsphase verzichtet wurde.

Bei den Messungen der Vertikalkomponente mit der großen Optik wurde gleichzeitig auch die u - Komponente mit aufgenommen. Dies ermöglichte für den Fall der Windrichtung 0° einen Vergleich der Ergebnisse für die zwei Versuchsaufbauten große bzw. kleine Optik. Die aufgetretenen Abweichungen und deren Ursachen werden im folgenden Abschnitt diskutiert. Daraus resultierend wurde der Versuchsaufbau für die Messungen mit der kleinen Optik verbessert und eine 2. Versuchsphase im Herbst 97 durchgeführt. Das Versuchsprogramm ist in der Tabelle 9.1 unten eingetragen. Die Ergebnisse werden im Abschnitt 9.2.3 präsentiert. Abschlie-

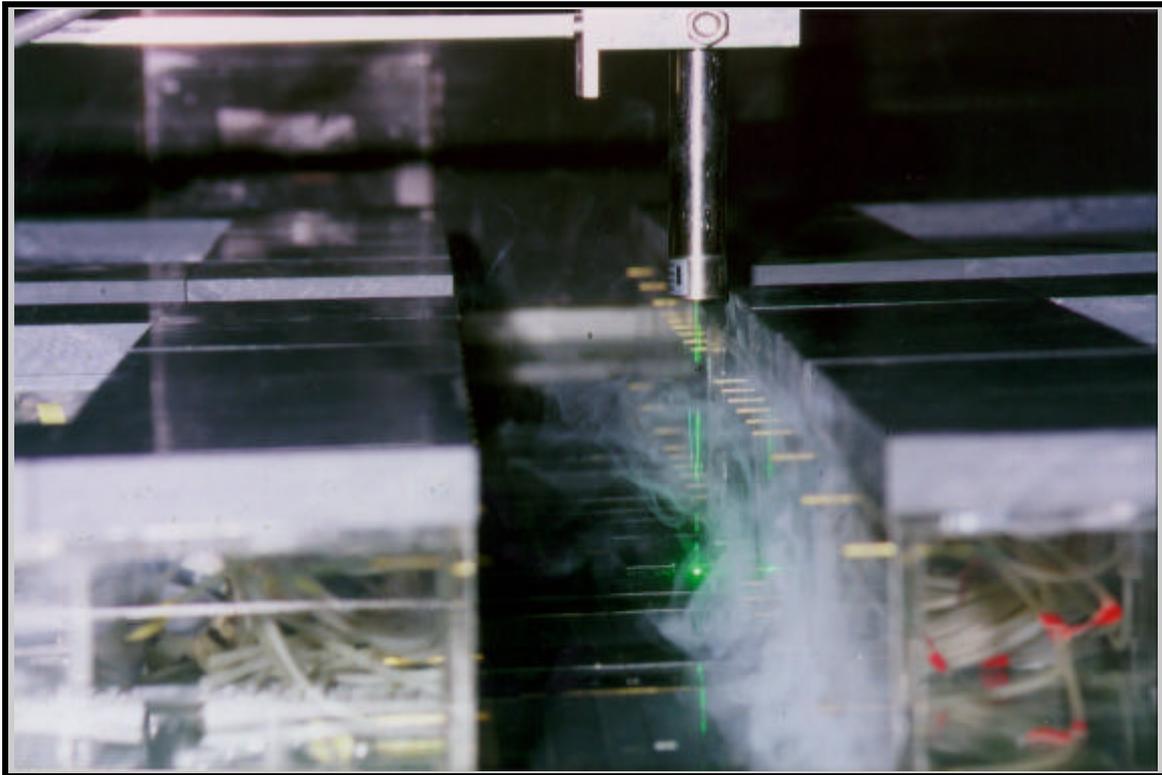


Abb. 9.4: Detailansicht der Optiksonde im Windkanal bei Messungen der horizontalen Windgeschwindigkeiten in den Straßenschluchten in Bodennähe ($z=15\text{mm}$). Der Rauch dient nur zur Sichtbarmachung.

ßend erfolgt im Kapitel 9.24 ein Vergleich der Datensätze, welche mit der kleinen Optik für die Windrichtungen 30° und 45° in der ersten bzw. zweiten Versuchsphase aufgenommen wurden.

9.2.2 Einfluß des Versuchsaufbaus

Ziel dieses Abschnitts ist, die bei den Messungen in der ersten Versuchsphase aufgetretenen Probleme, die zur Verzögerung des Projektes geführt haben, aufzuzeigen und zu diskutieren inwieweit diese Probleme bei den Messungen in der zweiten Versuchsphase durch einen verbesserten Versuchsaufbau beseitigt werden konnten. Hierzu werden die Ergebnisse für die u - Komponente des Windgeschwindigkeitsvektors aus den Messungen mit der kleinen und großen Optik bei der Windrichtung 0° verglichen. Die Windgeschwindigkeit in Grenzschichthöhe in der ungestörten Anströmung betrug bei allen Messungen $u_\infty = 10\text{m/s}$. Ausgewählt wurden Vertikalprofile, die an den drei in Abb. 9.5 eingezeichneten Positionen aufgenommen wurden. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen in Abb. 9.6 zu sehen. Die Bezeichnungen in den Legenden der Abbildungen werden in der folgenden Tabelle genauer erläutert:

<i>Bezeichnung in der Legende der Abbildungen:</i>	<i>Symbole in den Abbildungen:</i>	<i>Beschreibung:</i>
Große Optik, F97	offener Kreis	Messungen mit der großen Optik während der 1. Versuchsphase (Frühjahr 97). Eingezeichnet sind Ergebnisse aus 2 Messungen

Kleine Optik, F97	schwarzes Rechteck	(durchgezogene und gestrichelte Linie) Messungen mit der kleinen Optik während der 1. Versuchsphase (Frühjahr 97). Eingezeichnet sind teilweise Ergebnisse aus 2 Messungen (durchgezogene und gestrichelte Linie)
Große Optik, F97 Versuchsaufb. kl. Optik	Kreuz	Messungen mit der großen Optik während der 1. Versuchsphase (Frühjahr 97). Zusätzlich war die kleine Optik im Windkanal eingebaut, so daß der Versuchsaufbau dem bei den Messungen mit der kleinen Optik entsprach.
Kleine Optik, H97	offene Raute	Messungen mit der kleinen Optik mit einem verbesserten Versuchsaufbau während der 2. Versuchsphase (Herbst 97). Eingezeichnet sind teilweise Ergebnisse aus 2 Messungen (durchgezogene und gestrichelte Linie)

Das oberste Diagramm in Abb. 9.6 entspricht den Ergebnissen für die Position 1, welche im Kreuzungsmittelpunkt liegt. Bei der Windrichtung 0° werden die Ergebnisse an dieser Position durch die Strömung in der parallel angeströmten Straßenschlucht dominiert. Während der ersten Versuchsphase waren insbesondere an dieser Position sehr große Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus Messungen mit der kleinen und großen Optik aufgetreten. Wie im folgenden erläutert wird können diese Abweichungen auf den Versuchsaufbau bei den Messungen mit der kleinen Optik zurückgeführt werden.

Betrachtet man zunächst die Kurven mit den Ergebnissen aus der ersten Versuchsphase für die große Optik (Kreis - Symbole) und für die kleine Optik (Rechteck - Symbole), so sieht man deutlich einen Versatz der Linien, wobei bei den Messungen mit der kleinen Optik die gemessenen Werte der u - Komponente in allen Höhen etwa um 0.8 m/s höher waren als bei den Messungen mit der großen Optik. Eine Wiederholung der Messungen, nach einer Überprüfung der Einstellungen und Versuchsbedingungen, lieferte das gleiche Ergebnis. Daraufhin wurden die Messungen mit der großen Optik, unter gleichen Bedingungen wie bei den Messungen mit der kleinen Optik durchgeführt, d.h. es wurde die kleine Sonde am Meßwagen im Windkanal montiert und an die entsprechende Position im Modell gebracht. Diese Messungen lieferten dann ähnliche Ergebnisse (Linie mit Kreuz - Symbolen) wie die Messungen mit der kleinen Optik, so daß die zuvor beschriebenen Unterschiede eindeutig durch den Versuchsaufbau bei den Messungen mit der kleinen Optik verursacht wurden. Der zusätzliche Verbau durch das Positionieren des Meßwagens, an welchem die Sonde justiert ist, über dem Modell führt zu einer Beschleunigung der Strömung in der parallel angeströmten Straßenschlucht. Als Verbesserung für die zweite Versuchsphase, wurde deshalb die Sonde nicht direkt unter dem Meßwagen justiert, sondern an einem etwa 30 cm langen Ausleger, welcher in den Abb. 9.3 und 9.4 zu erkennen ist. An der Position 1 konnte durch diese Verbesserung des Versuchsaufbaus, wie die in den Diagrammen in Abb. 9.6 eingetragenen Ergebnisse aus der zweiten Versuchsphase (Linie mit Rauten - Symbolen) zeigen, eine gute Übereinstimmung zu den Messungen mit der großen Optik erzielt werden.

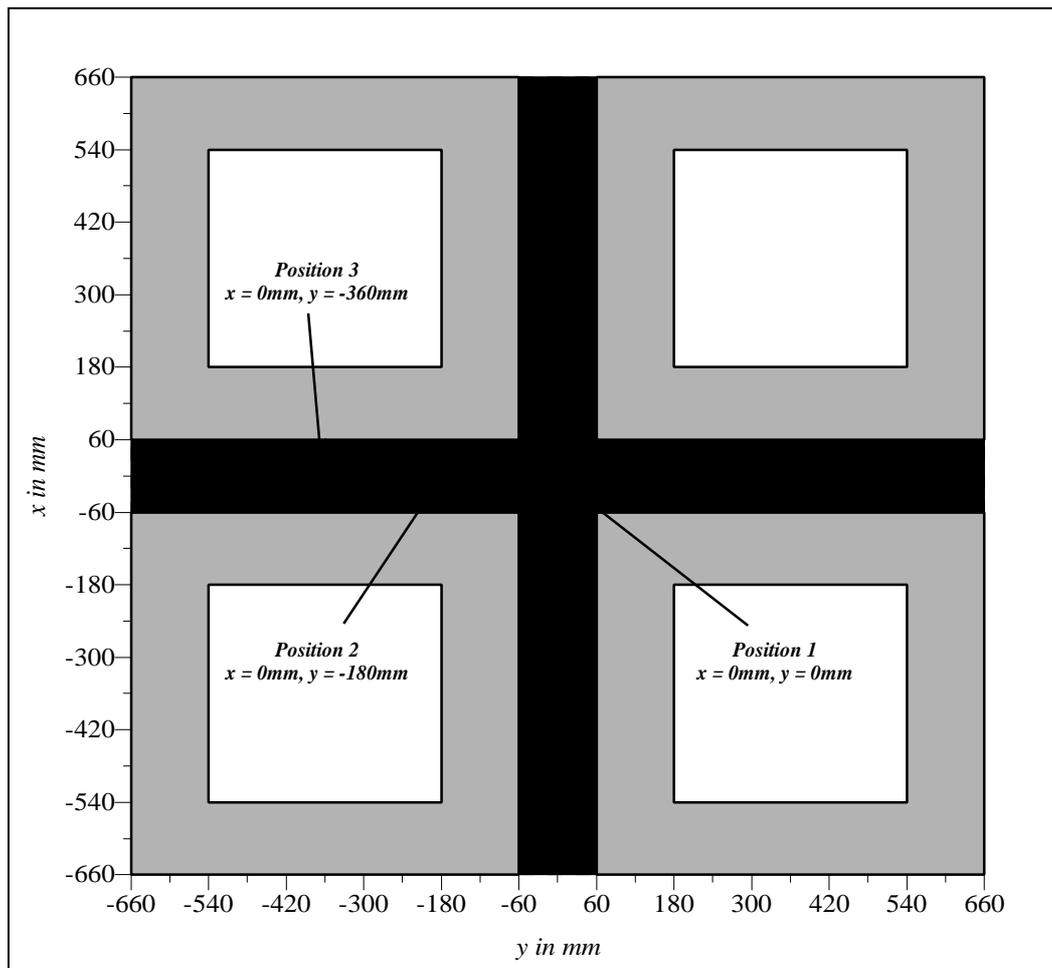


Abb. 9.5: Lage der Meßpositionen der Vertikalprofile, die zum Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Versuchsphasen ausgewählt wurden.

Die Ergebnisse an den Positionen 2 und 3, welche bei der Windrichtung 0° im Übergangsbereich zwischen Kreuzungsbereich und Straßenschluchtzone, bzw. im Zentrum der senkrecht angeströmten Straßenschluchtzone liegen, zeigen ein etwas anderes Verhalten. Zunächst ist zu erkennen, daß bei allen Messungen im unteren Schluchtbereich negative Werte für die u -Komponente des Windgeschwindigkeitsvektors festgestellt wurden. Diese können durch die Ausbildung eines "Canyon-Vortex" erklärt werden. Der Profilverlauf war bei allen Messungen ähnlich, Abweichungen gab es wieder in der Höhe der ermittelten Werte. Die während der ersten Versuchsphase aufgetretenen Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus den Messungen mit der kleinen bzw. großen Optik konnten jedoch nur teilweise durch den Versuchsaufbau erklärt werden. Insbesondere im bodennahen Bereich lieferten die Messungen mit der großen Optik, unter den Versuchsbedingungen der Messungen mit der kleinen Optik, nicht die gleichen Ergebnisse wie die Messungen mit der kleinen Optik. Ebenso zeigen die Ergebnisse aus der zweiten Versuchsphase mit einem verbesserten Versuchsaufbau, Abweichungen zu den Ergebnissen für die große Optik. Mögliche Ursachen können Reflexionen sein, welche die Ergebnisse im bodennahen Bereich bei den Messungen mit der großen Optik verfälschen. Zu beachten ist aber auch, daß die kleine Optik, wie in Abb. 9.4 zu erkennen ist, bei den bodennahen Meßpunkten direkt an der Gebäudekante positioniert ist und ein Einfluß auf die Strömungsverhältnisse in der Straßenschlucht nicht auszuschließen ist. Eine weitere Ursache

für Abweichungen können Ungenauigkeiten im Positionieren der Sonde sein, welche insbesondere in Bereichen in denen große Geschwindigkeitsgradienten auftreten, wie z.B. in Dachkantenhöhe (siehe Abb. 9.6, Position 2 in der Höhe $z=120$ mm), einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß haben können.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen für die Messungen mit der kleinen Optik und den Messungen mit der großen Optik, durch die Veränderung des Versuchsaufbaus deutlich verbessert werden konnten. Die Störung der Strömungsverhältnisse durch das Anbringen der Versuchseinrichtungen im Windkanal konnte reduziert werden. Gewisse Unsicherheiten bestehen noch im bodennahen Bereich hinsichtlich der Absolutbeträge der ermittelten Werte. In diesem Bereich haben beide Sondensysteme Nachteile, so daß eine weitere Optimierung nicht möglich war, da nicht klar zu sagen ist, welche Ergebnisse die besseren sind. Messungen mit dem gleichen Sondensystem zeigen eine sehr gute Reproduzierbarkeit. Ungenauigkeiten beim Positionieren der Sonde können in Bereichen mit großen Gradienten einen Einfluß haben. Diese Frage wird im nächsten Abschnitt aufgegriffen und erneut diskutiert.

9.2.3 Ergebnisse der Strömungsfeldmessungen der zweiten Versuchsphase (Herbst 97)

Im vorhergehenden Abschnitt konnte dargelegt werden, daß durch einen verbesserten Versuchsaufbau, aus Messungen mit der kleinen Optik, Ergebnisse erzielt werden können, die in guter Übereinstimmung zu Ergebnissen aus Messungen ohne störende Versuchseinrichtungen im Windkanal sind. Im Anschluß an die beschriebenen Tests, wurden mit dem verbesserten Versuchsaufbau, in einer zweiten Versuchsphase im Herbst 97 Datensätze für drei Windrichtungen aufgenommen. Ergebnisse für die Mittelwerte der Geschwindigkeitskomponenten werden im folgenden vorgestellt. Die vorhandenen Datensätze beinhalten darüber hinaus, Informationen über RMS - Werte und über die Korrelationen $u_i u_j$ der zeitgleich aufgenommenen Komponenten. Diese Daten wurden komplett an den Projektpartner TÜV Energie und Umwelt weitergegeben, so daß für den Modellvergleich Informationen über die turbulenten Strömungsfelder im Untersuchungsgebiet vorliegen. Die Windgeschwindigkeit in Grenzschichthöhe in der ungestörten Anströmung betrug bei allen Messungen $u_\infty = 10 \text{ m/s}$.

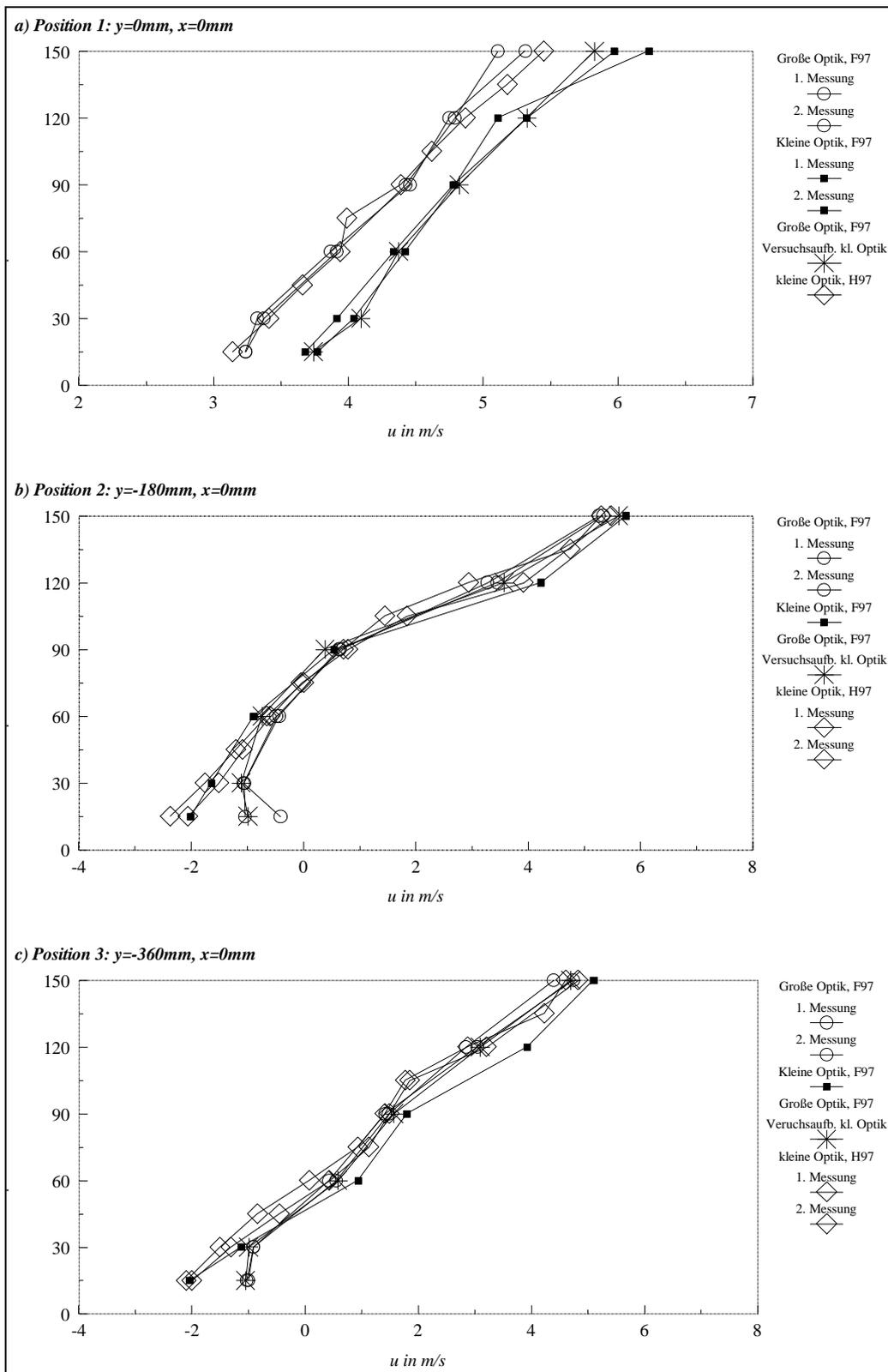


Abb. 9.6: Vergleich von Vertikalprofilen aufgenommen mit zwei unterschiedlichen LDA - Optik - Systemen an drei verschiedenen Meßpositionen. Eingezeichnet sind die Werte der u - Komponente des Windgeschwindigkeitsvektors.

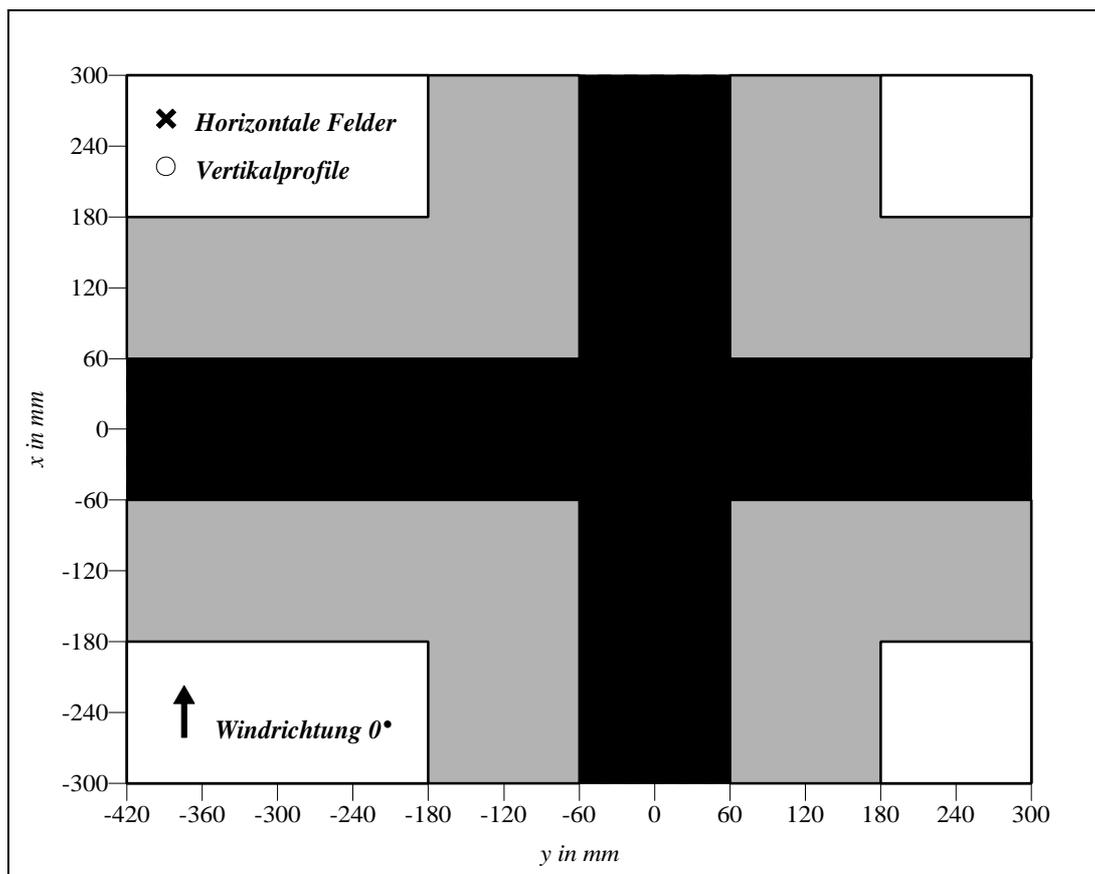


Abb. 9.7: Lageplan der Meßpositionen bei der Windrichtung 0° .

Windrichtung 0°

Der Lageplan der Meßpositionen zur Ermittlung der horizontalen Windgeschwindigkeiten (u - und v - Komponente des Windgeschwindigkeitsvektors) bei der Windrichtung 0° ist in Abb. 9.7 zu sehen. Zu unterscheiden sind Messungen von horizontalen Feldern im Kreuzungsbereich in den Höhen $z=30$, 60 , 90 und 120 mm und von Vertikalprofilen in den Straßenschluchtzonen bei $y=-90$, -180 und -360 mm. An diesen Positionen wurden zusätzlich Messungen mit einer schrägen Einstrahlung von oben durchgeführt. Aus den aufgenommen Meßdaten können die Vertikalkomponenten ermittelt werden.

In Abb. 9.7 ist zu erkennen, daß für $y=-90$ mm sowohl Ergebnisse aus Vertikalprofilen, als auch aus Horizontalfeldmessungen vorliegen. Die Ergebnisse für die u - Komponente werden in Abb. 9.8 verglichen, um die Reproduzierbarkeit und den Einfluß von Ungenauigkeiten beim Positionieren der Sonde zu überprüfen. Zu sehen sind fünf Diagramme mit Vertikalprofilen für die Positionen $x=-45$, -30 , -15 , 0 , 15 , 30 und 45 mm. Die Vertikalprofilmessungen wurden z.T. wiederholt, so daß Ergebnisse aus mehreren Messungen (Rechteck -, Kreis - bzw. Raute - Symbole) vorliegen. Die Daten aus den Horizontalfeldmessungen sind durch doppelte Kreuz - Symbole gekennzeichnet. Die dick eingezeichnete Linie entspricht einem Profilverlauf, wie er aus der Analyse aller Meßdaten zu erwarten ist. Qualitativ betrachtet zeigen die Ergebnisse eine gute Übereinstimmung. Die Messungen liefern immer einen ähnlichen Profilverlauf und auch die gemessenen Absolutbeträge zeigen in den unteren Profilbereichen keine großen Abweichungen.

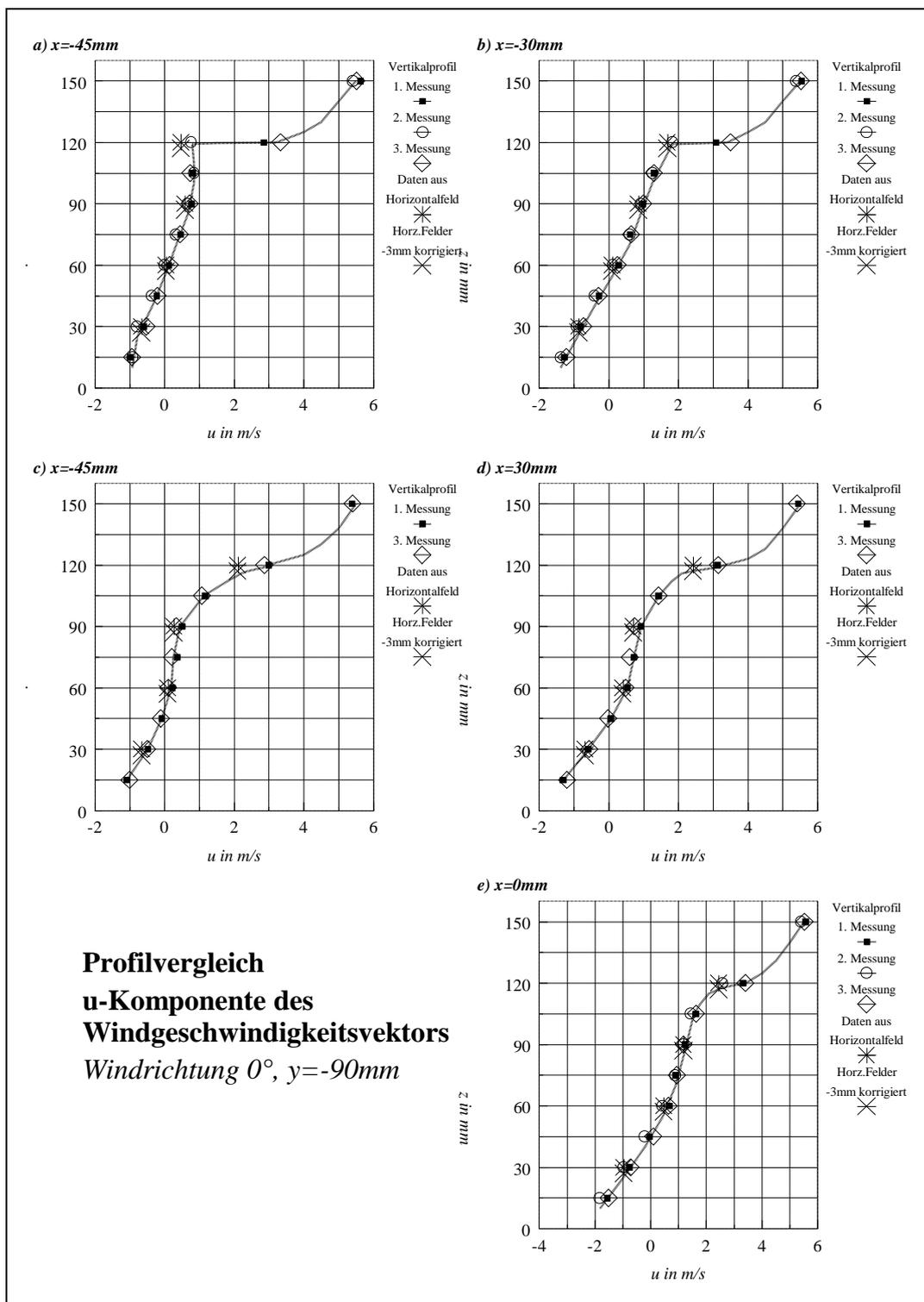


Abb. 9.8: Einfluß von Ungenauigkeiten beim Positionieren der Sonde, dargestellt anhand von Vertikalprofilen in der Ebene $y=-90\text{mm}$ bei der Windrichtung 0° .

Kritisch sind die Punkte in der Nähe der Gebäudehöhe ($z=120\text{ mm}$). Betrachtet man z.B. die Ergebnisse für $x=-45\text{ mm}$ (Diagramm a), so wurden für $z=120\text{ mm}$ bei einigen Messungen Werte von $u \approx 1\text{ m/s}$ festgestellt, während bei anderen Messungen $u \approx 3\text{ m/s}$ betrug. Diese beträchtlichen Unterschiede lassen sich jedoch durch den Profilverlauf relativieren. Im Dachkan-

tenbereich treten sehr große Geschwindigkeitsgradienten auf, so daß kleine Veränderungen der vertikalen Sondenpositionen einen sehr großen Einfluß auf den Meßwert haben. In diesen Bereichen macht es keinen Sinn Einzelwerte aus Messungen zu vergleichen. In den Diagrammen in Abb. 9.8 wurden zusätzlich Symbole (einfaches Kreuz) mit eingezeichnet, welche den Ergebnissen aus den Horizontalfeldmessungen mit einer um 3 mm korrigierten z - Achse entsprechen. Die Übereinstimmung der Ergebnisse kann durch diese Korrektur deutlich verbessert werden.

Die Ergebnisse für die horizontalen Windgeschwindigkeiten (Vektoren berechnet aus den gemessenen u , v - Komponenten) bei der Windrichtung 0° sind in Abb. 9.9 in Form von Pfeildiagrammen und Isolinien in den Höhen $z=30$, 60 und 90 mm zusammengefaßt. Auf die Darstellung der Ergebnissen in dieser Art für $z=15$ mm und $z=120$ mm, wird bei der Windrichtung 0° aufgrund der beschriebenen Unsicherheiten im bodennahen Bereich bzw. des Einflusses von Ungenauigkeiten beim Positionieren der Sonde in Dachkantenhöhe verzichtet. Die Pfeildiagramme liefern Aussagen über den Betrag und die Richtung des Vektors der horizontalen Windgeschwindigkeiten, wobei der in Abb. 9.8 unten rechts eingezeichnete Pfeil den Wert der Windgeschwindigkeit in Grenzschichthöhe in der ungestörten Anströmung $u_\infty = 10\text{ m/s}$ entspricht. Zusätzlich verdeutlichen Isolinien und Grauschattierungen den Betrag der horizontalen Windgeschwindigkeit im Kreuzungsbereich.

Die Ergebnisse zeigen deutlich die unterschiedlichen Strömungsregime. Im Kreuzungsbereich ist die Strömung in der parallel angeströmten Straßenschlucht mit strahlähnlichem Charakter dominant. Durch die Kanalisierung sind relativ hohe Windgeschwindigkeiten zu beobachten und innerhalb der Straßenschluchten wurden nur geringe horizontale Gradienten beobachtet. Innerhalb der senkrecht angeströmten Straßenschlucht zeigen die Ergebnisse typische Merkmale sogenannter "Canyon-Vortex" - Systeme. Die horizontalen Windgeschwindigkeiten sind deutlich geringer und es bilden sich Wirbel aus, welche vertikal innerhalb der Straßenschlucht rotieren. Im unteren Schluchtbereich ist die Strömungsrichtung entgegen der Anströmung, etwa in halber Gebäudehöhe befindet sich das Wirbelzentrum mit sehr geringen horizontalen Geschwindigkeiten und der Änderung der Strömungsrichtung. Die beobachteten Quer - Komponenten (v - Komponenten) verdeutlichen den dreidimensionalen Charakter der Strömung. Die horizontale Ausdehnung der Gebäude ($L=60\text{ cm}=5H$) ist nicht ausreichend um zweidimensionale Strömungsverhältnisse zu erhalten. In der Nähe der Gebäudekanten kommt es zu einem Übergangsbereich, mit zum Teil sehr geringen horizontalen Windgeschwindigkeiten, welche noch unterhalb der Werte in den Straßenschluchtzonen liegen. In Bodennähe ist die Strömungsrichtung von der senkrecht angeströmten in die parallel angeströmte Straßenschlucht, während bereits in halber Gebäudehöhe eine Strömung in die senkrecht angeströmte Straßenschlucht beobachtet wurde. Aufgrund des hohen dreidimensionalen Charakters der Strömungsvorgänge ist eine vollständige Beschreibung nur unter Berücksichtigung der vertikalen Geschwindigkeitskomponente (w - Komponente) möglich.

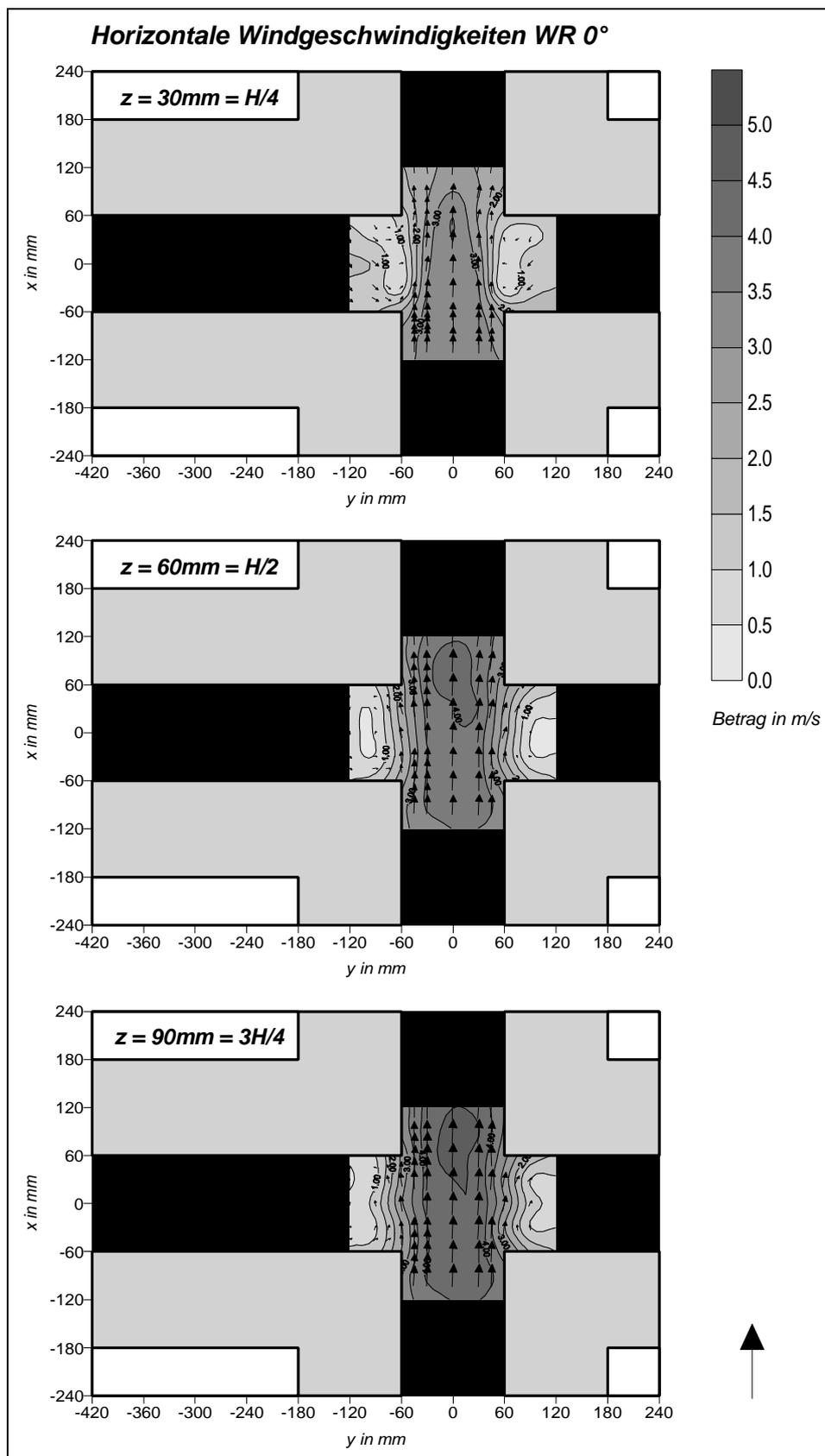


Abb. 9.9: Felder der horizontalen Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 0° in drei Höhen.

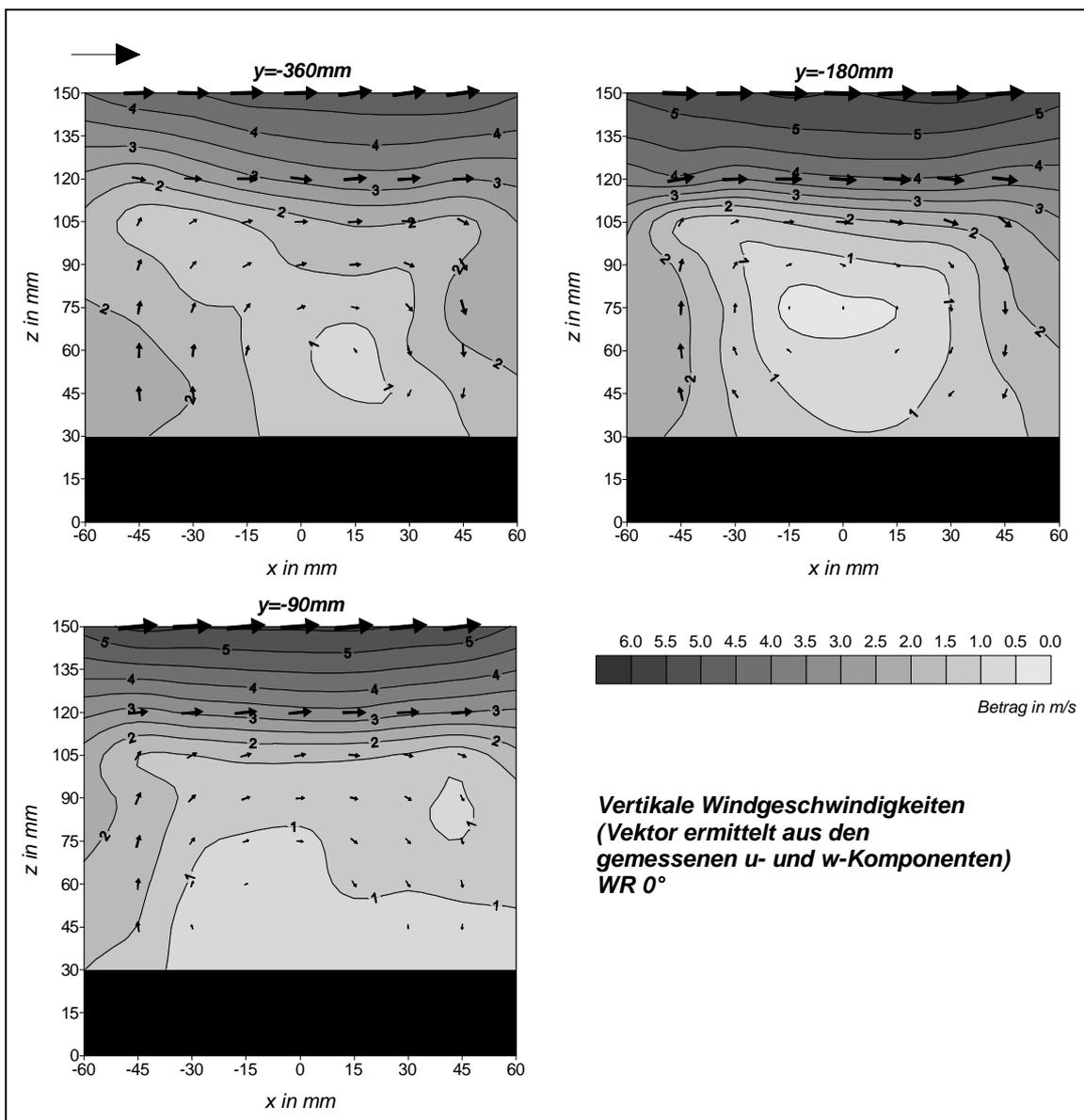


Abb. 9.10: Vertikale Windgeschwindigkeitsvektoren in drei Ebenen berechnet aus den gemessenen u - und w -Komponenten bei senkrechter bzw. schräger Einstrahlung bei der Windrichtung 0°.

Vertikalschnitte für die drei Meßebenen $y=-360$, -180 und -90 mm sind in Abb. 9.10 zu sehen. Eingetragen sind Vektoren berechnet aus den gemessenen u - Komponenten bei senkrechter Einstrahlung (vertikal von oben in die Straßenschluchten) und den w - Komponenten ermittelt aus den Ergebnissen bei schräger Einstrahlung von oben in die Straßenschlucht. Die Sonde wurde bei diesen Messungen um $q = 45^\circ$ bzw. -45° entgegen der z - Achse gekippt. Die bei diesen Messungen aufgenommenen Werte der Komponente in Strömungsrichtung (u') enthalten Anteile der w - Komponente des Windgeschwindigkeitsvektors. Zusammen mit den Ergebnissen für die u - Komponente bei senkrechter Einstrahlung kann die w - Komponente wie folgt berechnet werden:

$$w = \frac{u' - \cos \mathbf{q} \cdot u}{- \sin \mathbf{q}}$$

Ergebnisse für den unteren Bereich der Straßenschlucht fehlen, da diese Meßpunkte bei den Messungen mit schräger Einstrahlung nicht erreicht werden konnten. Dennoch lassen sich aus den erzielten Ergebnissen wesentliche Phänomene der Strömungsvorgänge ableiten. Die Abbildungen verdeutlichen erneut, daß sich innerhalb der Straßenschluchten rotierende Wirbelsysteme ausbilden, die ihr Zentrum etwa in halber Gebäudehöhe haben. In der Nähe der Gebäudewände kommt es zu Vertikalkomponenten deren Betrag bis zu 2 m/s erreichen kann. Vergleicht man die Ergebnisse in den drei Meßebenen, so sind Unterschiede in der Ausdehnung der Zone niedriger Windgeschwindigkeiten und des vertikalen Gradienten in Dachkantenhöhe ($z=120\text{mm}$) zu erkennen. So betrug bei $y=-360\text{ mm}$ der Betrag der Windgeschwindigkeit nahezu an allen Meßpunkten mindestens 1 m/s, während bei $y=-180\text{ mm}$ um das Zentrum der Straßenschlucht eine Zone (Ausdehnung etwa $H/2$) mit Windgeschwindigkeiten $\leq 1\text{ m/s}$ beobachtet wurde. Im unmittelbaren Übergangsbereich zwischen Kreuzung und Straßenschluchtzone ($y=-90\text{ mm}$) wirkt sich die Interaktion zwischen Ablösewirbel an den Gebäudekanten und den unterschiedlichen Strömungsregimen in der senkrecht bzw. parallel angeströmten Straßenschlucht insbesondere auf die Abwärtströmung im Luv - Bereich ($x=30-60\text{ mm}$) aus. Der Betrag der Geschwindigkeit ist kleiner als in den beiden anderen Meßebenen und nimmt nur geringfügig mit der Höhe zu.

Windrichtung 30° und 45°

Der Lageplan mit den Meßpositionen zur Ermittlung der horizontalen Windgeschwindigkeiten bei den beiden Schräganströmungen ist in Abb. 9.10 zu sehen. An jeder Meßposition wurden die u - und v -Komponente des Windgeschwindigkeitsvektors in 6 Höhen ($z=15, 30, 45, 60, 90, 120$ und 150 mm) aufgenommen. Die Ergebnisse für die horizontalen Windgeschwindigkeiten (Vektoren berechnet aus den gemessenen u, v - Komponenten) werden in den Abb. 9.12 und 9.14 wieder in Form von Pfeildiagrammen und Isolinien in den Höhen $z=15, 30, 60, 90$ und 120 mm zusammengefaßt. In den Abb. 9.13 und 9.15 sind zusätzlich die Ergebnisse für die Kreuzungsbereiche vergrößert dargestellt. Die unten in den Abbildungen eingezeichneten Pfeile entsprechen jeweils der Windgeschwindigkeit in Grenzschichthöhe in der ungestörten Anströmung, welche $u_\infty = 10\text{ m/s}$ betrug.

Betrachtet man die Ergebnisse für die Straßenschluchten, so ist in den Abb. 9.12 und 9.14 zu erkennen, daß bei einer schrägen Anströmung die Strömungsrichtung in Bodennähe in etwa der an der Straßenachse gespiegelten Anströmrichtung entspricht. In halber Gebäudehöhe sind dann straßenparallele Windvektoren vorherrschend und im oberen Viertel der Straßenschluchten erfolgt die Ausrichtung parallel zur Anströmrichtung. Die niedrigsten Geschwindigkeiten wurden in der Regel wieder in der Höhe $z=60\text{ mm}$, d.h. in halber Gebäudehöhe festgestellt. Der Betrag ist jedoch immer deutlich größer als im Falle der senkrecht angeströmten Straßenschlucht bei der Windrichtung 0° . Der Einfluß der an den Gebäudekanten ablösenden Wirbel ist auch noch in den Meßebenen im Abstand eine Gebäudehöhe von den Gebäudekanten entfernt ($x=180\text{ mm}$ und $y=180\text{ mm}$) zu sehen.

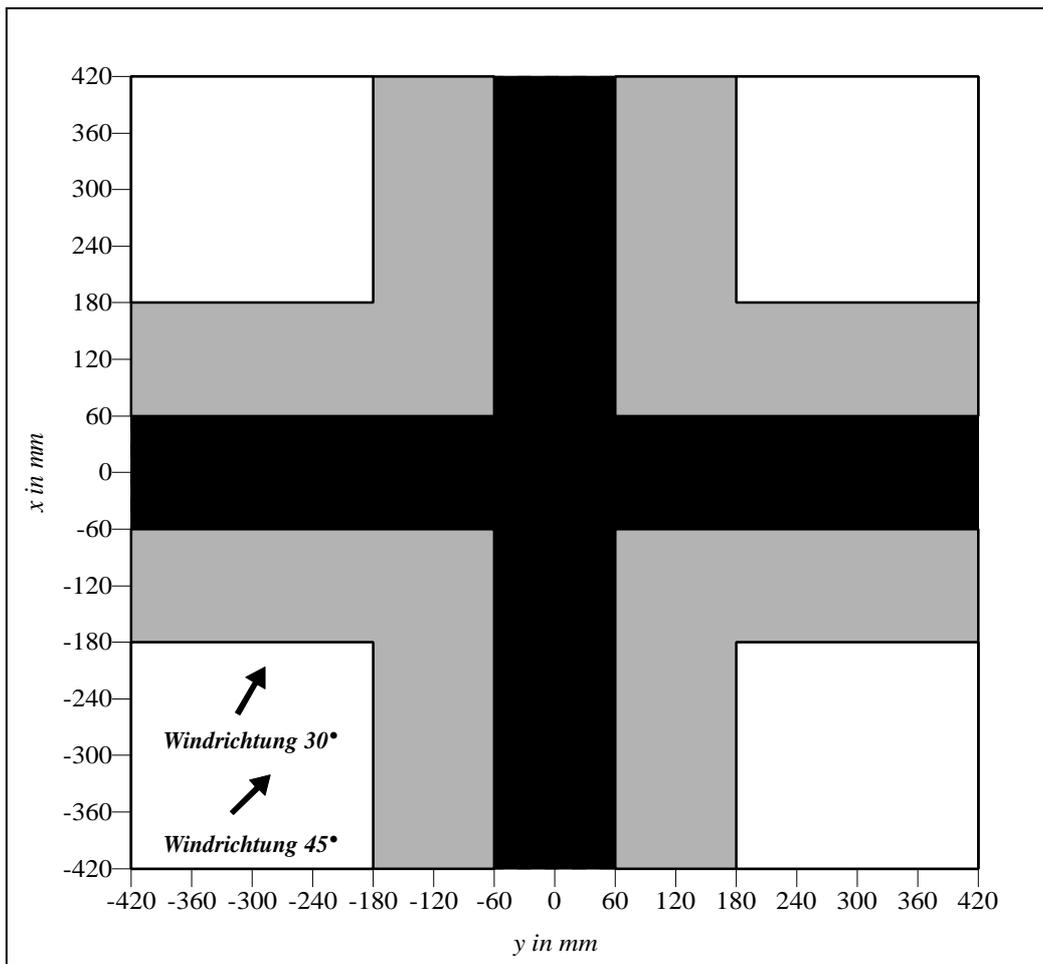


Abb. 9.11: Lageplan der Meßpositionen bei den Windrichtungen 30° und 45°.

Die Strömungsvorgänge im Kreuzungsbereich sind besser in den Abb. 9.13 und 9.15 zu erkennen. Im Falle der Windrichtung 30° kommt es in der Querstraße im linken Bereich zu Strömungsverzögerungen, auf der rechten Seite bildet sich am unteren Gebäude durch die Wirbelablösung an den Gebäudekanten eine Rückströmzone aus. In der längs orientierten Straße wird die Strömung durch das Einströmen aus der Querstraße, in Richtung linke obere Gebäudekante abgelenkt. Die Windgeschwindigkeiten variieren in dieser Straße nur sehr gering mit der Höhe. Im Kreuzungsmittelpunkt ist der Windvektor im bodennahen Bereich nahezu parallel zur längs orientierten Straße ausgerichtet ($\approx 10^\circ$). Mit zunehmender Höhe entspricht der Winkel dann immer mehr der Anströmrichtung ($z = 60 \text{ mm} = H/2: \approx 20^\circ$, $z = 90 \text{ mm} = 3H/4: \approx 30^\circ$).

Die Ergebnisse für die Windrichtung 45° zeigen im Kreuzungsbereich ein sehr schönes, symmetrisches Strömungsfeld. Im Vergleich zur Windrichtung 30° sind die Windgeschwindigkeiten in Bodennähe geringer. Der Windvektor im Kreuzungsmittelpunkt ist in allen Höhen etwa parallel zur Anströmrichtung ausgerichtet. Eine Zone mit reduzierten Windgeschwindigkeiten tritt an der linken unteren Gebäudeecke auf. Die Stromlinien laufen in diesem Bereich zusammen und es ist zu erwarten, daß nach oben gerichtete Vertikalkomponenten auftreten. An der gegenüberliegenden Gebäudeecke (rechts oben) teilen sich die Stromlinien auf, so daß

in diesem Bereich negative Vertikalkomponenten zu erwarten sind. Rückstromzonen wurden im Lee - Bereich der Gebäudekanten rechts unten und links oben beobachtet.

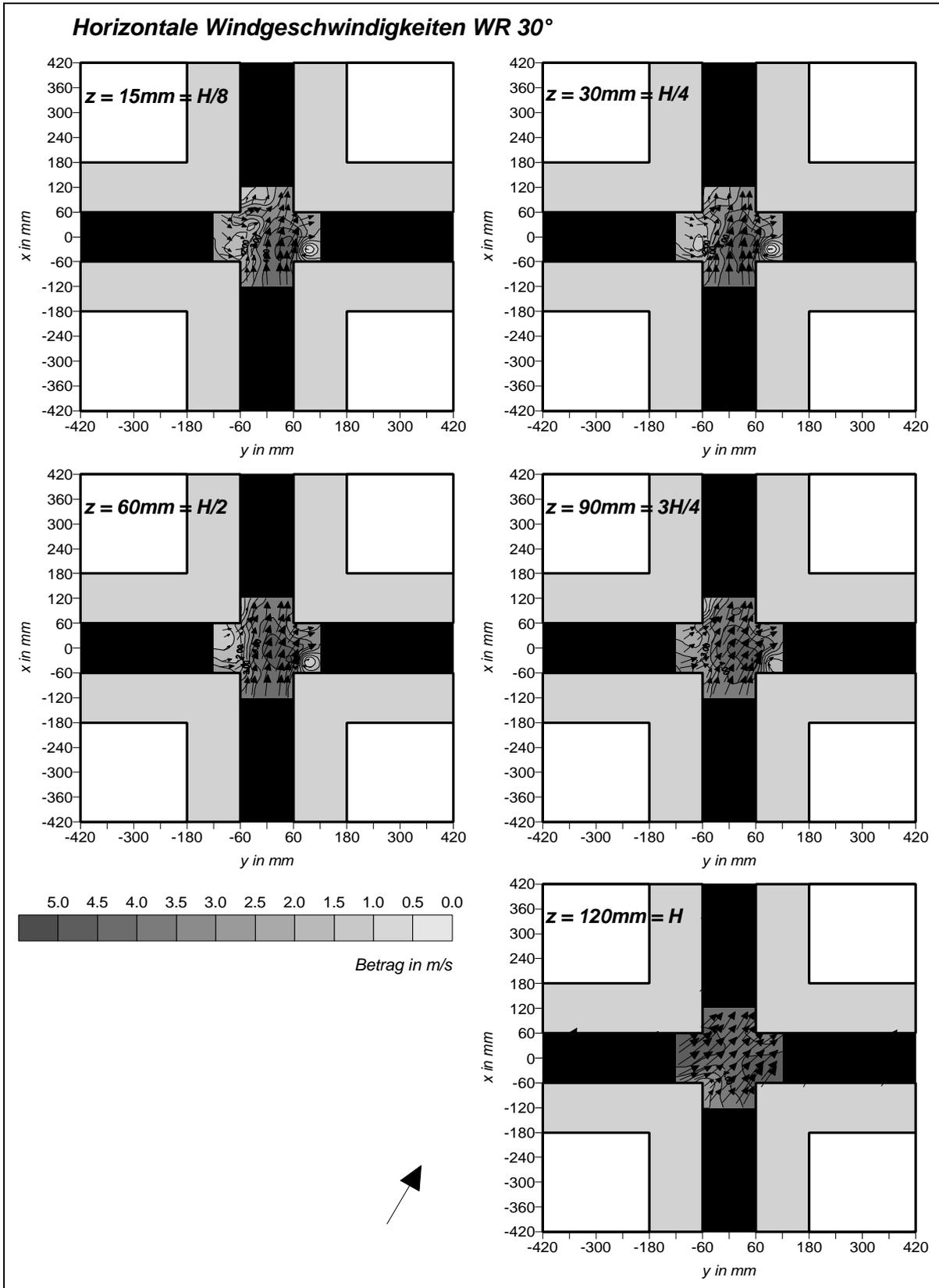


Abb. 9.12: Felder der horizontalen Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 30° in fünf Höhen.

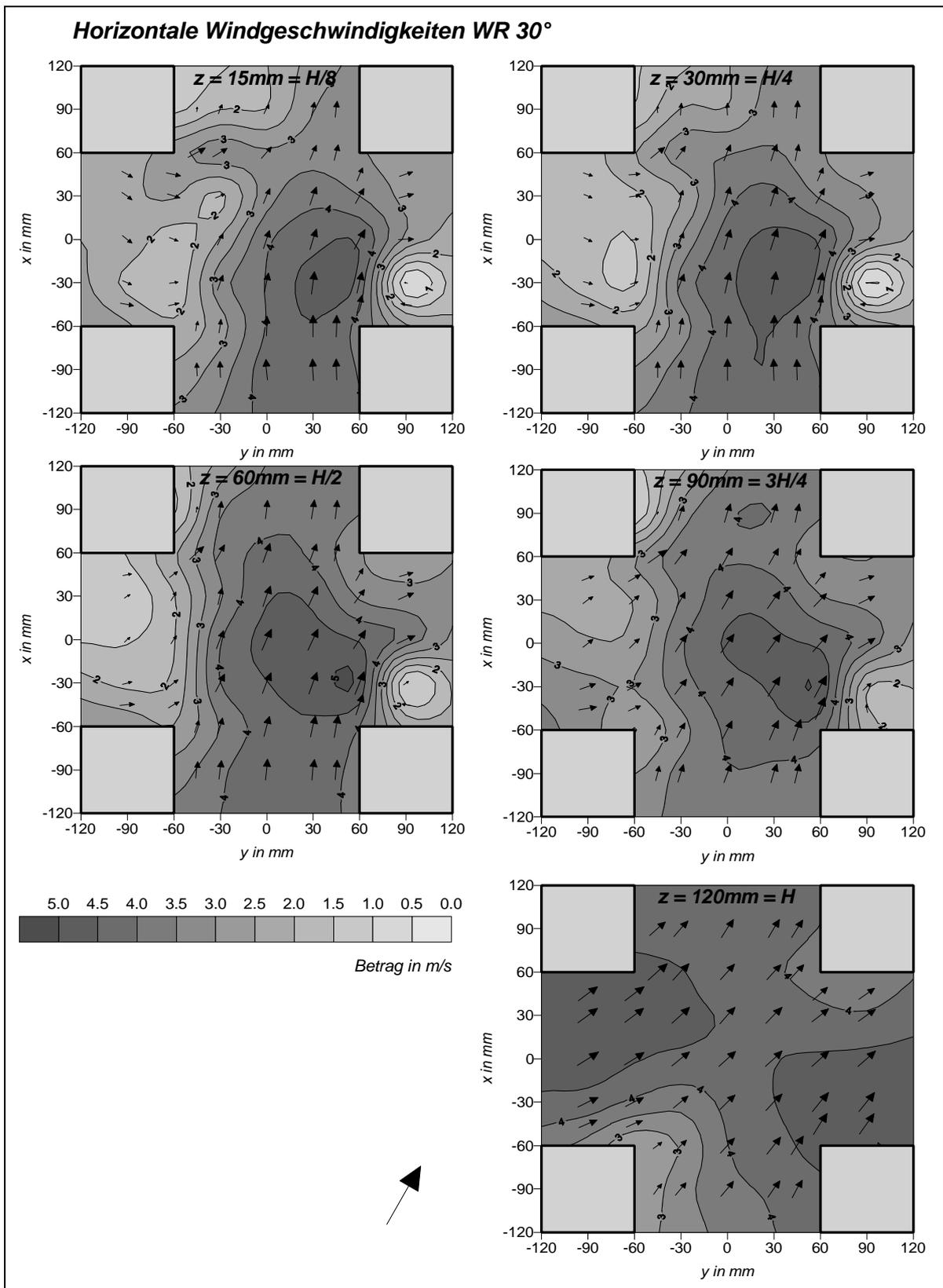


Abb. 9.13: Horizontale Windgeschwindigkeiten im Kreuzungsbereich bei der Windrichtung 30° in fünf Höhen.

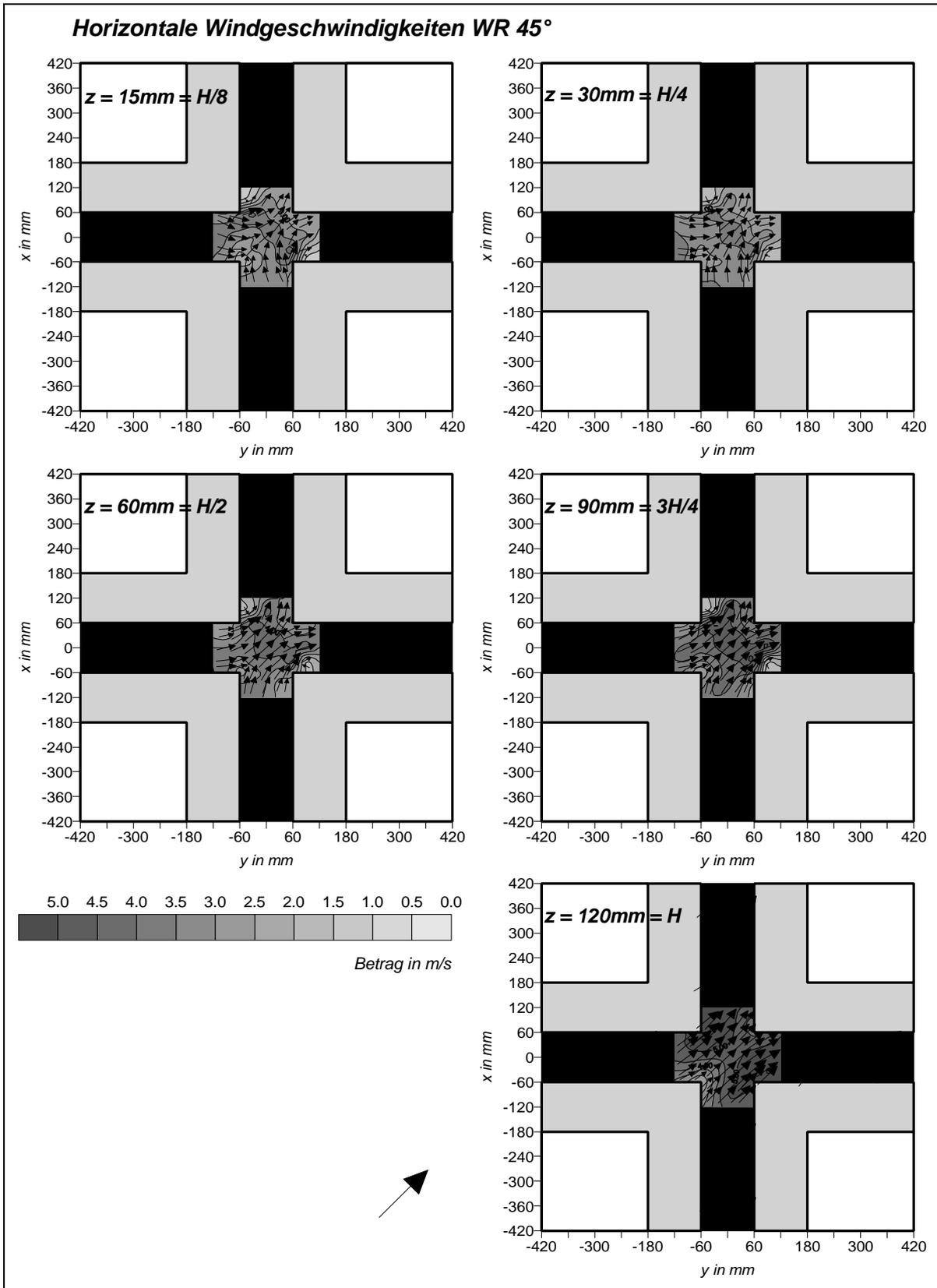


Abb. 9.14: Felder der horizontalen Windgeschwindigkeiten bei der Windrichtung 45° in fünf Höhen.

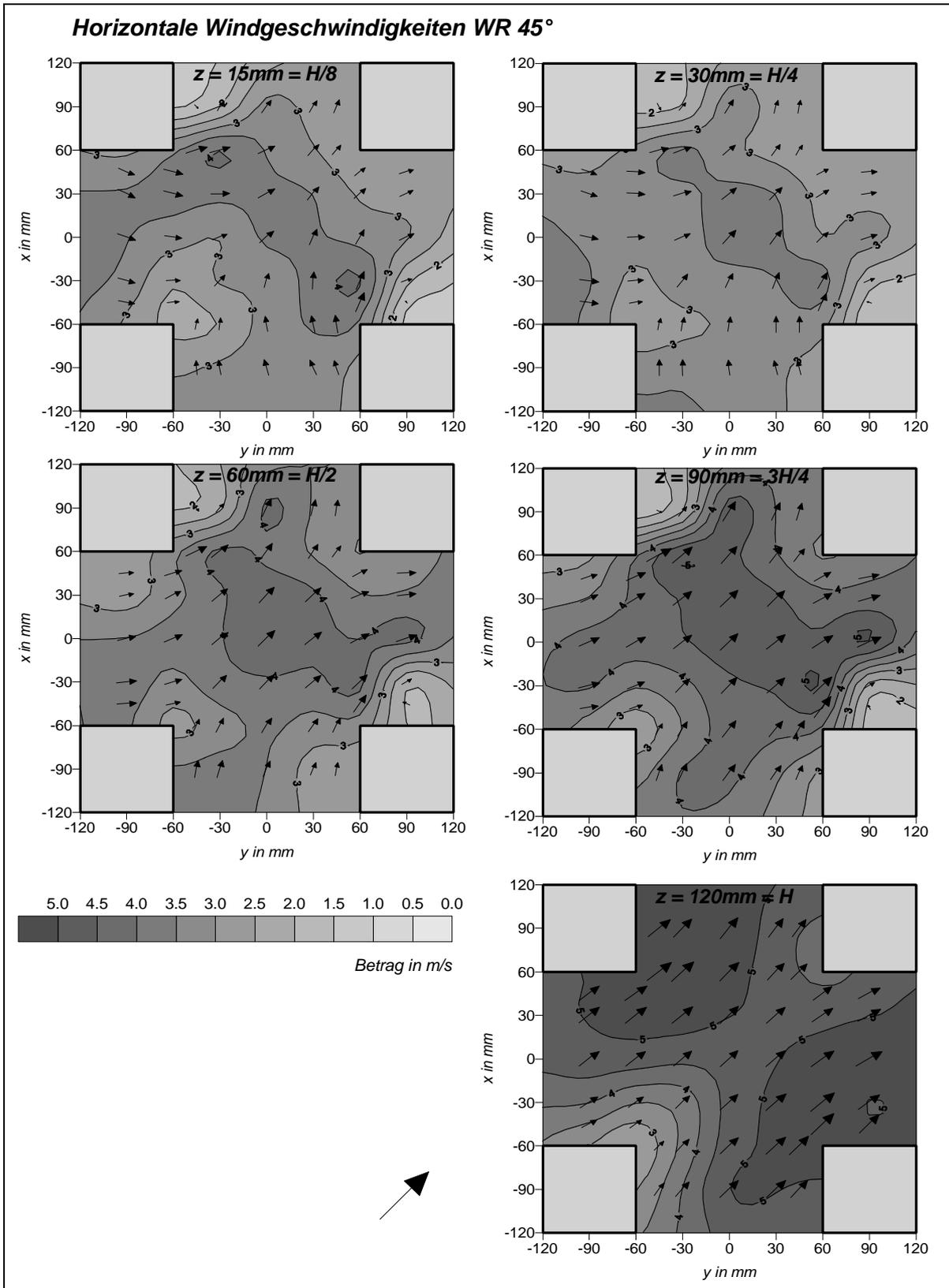


Abb. 9.15: Horizontale Windgeschwindigkeiten im Kreuzungsbereich bei der Windrichtung 45° in fünf Höhen.

9.2.4 Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Versuchsphasen (Frühjahr und Herbst 97) und Schlußbetrachtung

Die Ergebnisse aus der zweiten Versuchsphase, die auszugsweise im vorhergehenden Abschnitt vorgestellt wurden, wurden dem Projektpartner TÜV Energie und Umwelt GmbH zur Verfügung gestellt und werden als Referenzdatensätze für den Vergleich mit numerisch berechneten Strömungsfeldern verwendet.

Um abschließend noch einmal die Frage der Meßgenauigkeit aufzugreifen, sind in Abb. 9.16 die Ergebnisse aus der ersten und zweiten Versuchsphase für die beiden Schräganströmungen gegenübergestellt. Dargestellt sind jeweils der Betrag des horizontalen Windgeschwindigkeitsvektors und dessen Winkel. Auf der y -Achse sind die Ergebnisse aus der zweiten Versuchsphase (Herbst 97) aufgetragen, auf der x -Achse die Ergebnisse der ersten Versuchsphase (Frühjahr 97).

Bei beiden Windrichtungen wurden in der zweiten Versuchsphase generell eher kleinere Windgeschwindigkeiten festgestellt. Diese Unterschiede können das Resultat der Veränderung des Versuchsaufbaus in der zweiten Phase sein, da wie im Abschnitt 9.2.2 aufgezeigt wurde, das Positionieren des Meßwagens über dem Modell in der ersten Versuchsphase in der Regel zu Geschwindigkeitserhöhungen geführt hat. Ein weitere Ursache können auch geringfügige Abweichungen des Anströmprofils sein.

Bei der Windrichtung 30° wurden nur relativ kleine Streuungen beim Betrag der Windgeschwindigkeit beobachtet. Bei der Windrichtung 45° verschlechtern sich die Ergebnisse. Eine mögliche Ursache könnten Ungenauigkeiten bei der Ausrichtung des Modells sein. Dies kann insbesondere bei dieser Windrichtung mit einem idealerweise symmetrischen Strömungsfeld an Einzelpunkten zu deutlichen Unterschieden führen. Eine Abweichung von 1° kann bereits dazu führen, daß die Windgeschwindigkeiten in der einen Straßenschlucht größer sind als in der anderen. Die ermittelten Winkel zeigen für beide Windrichtungen eine gute Übereinstimmung.

Eine genauere Analyse, d.h. der Vergleich der Strömungsfelder hat gezeigt daß in beiden Versuchsphasen die gleichen Strömungsphänomene beobachtet wurden. Es wurden z. B. keine signifikanten Veränderungen der Ausrichtung der Windvektoren im Kreuzungsbereich oder der Ausdehnung der Rückstromzonen beobachtet.

Zusammenfassend kann man sagen, daß mit den in der zweiten Versuchsphase aufgenommenen Datensätze, eine gute Datenbasis für den Vergleich von gemessenen und numerisch ermittelten Strömungsfeldern in komplexen Bauwerksstrukturen geschaffen wurde. Es kann gewährleistet werden, daß die beschriebenen Unsicherheiten (Einfluß der Sonde auf die Strömungsverhältnisse) keinen Einfluß auf die beschriebenen Charakteristika der Strömungsfelder haben. Ein Vergleich basierend auf Einzelwerten an ausgewählten Meßpunkten ist jedoch nicht zu empfehlen, da aufgrund der Komplexität der Strömungsvorgänge Zonen mit großen Gradienten auftreten, in denen kleine Ungenauigkeiten beim Positionieren der Sonde einen großen Einfluß auf das Meßergebnis haben.

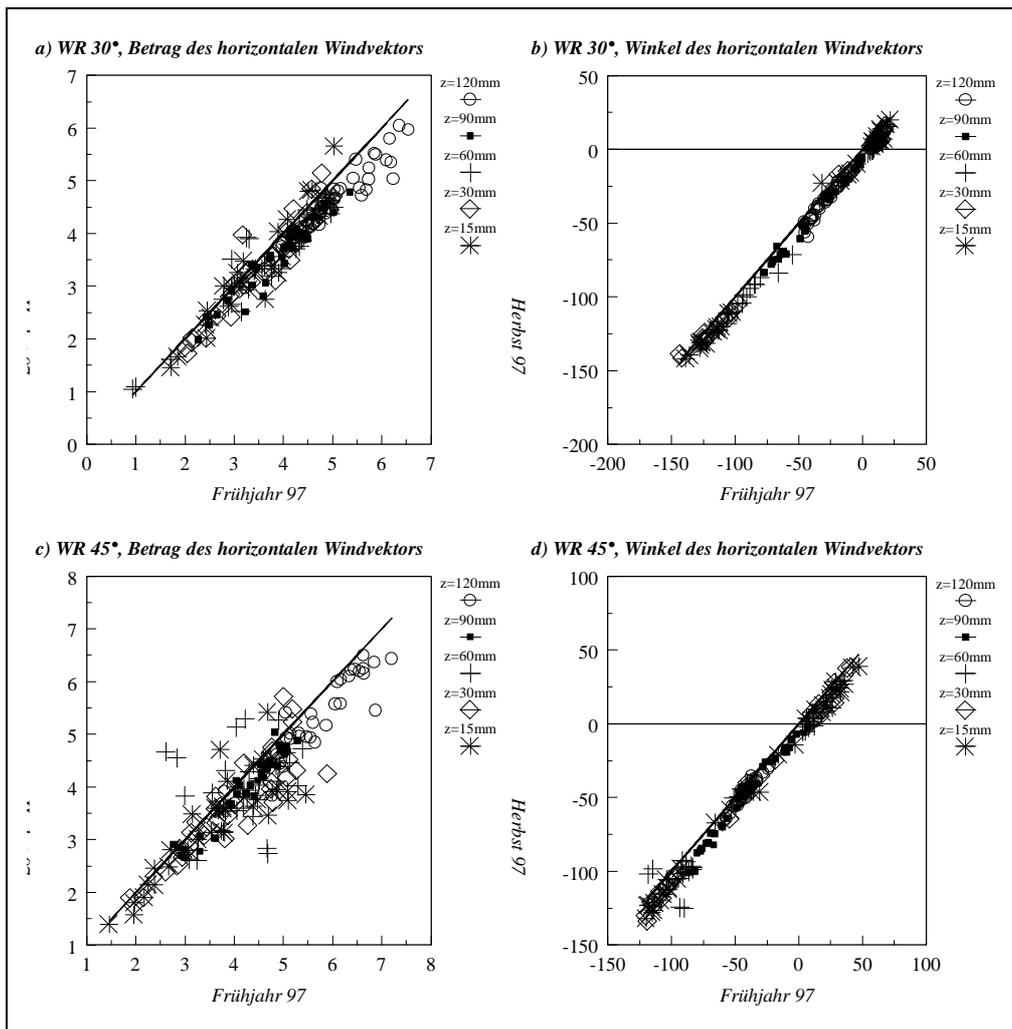


Abb. 9.16: Vergleich der Ergebnisse aus den beiden Versuchsphasen Frühjahr und Herbst 97 für die Windrichtungen 30° und 45°.

Literaturverzeichnis

- F. Albrecht, 1933.** Untersuchungen der vertikalen Luftzirkulation in der Großstadt, *Met. Zt.*, 50, 93-98.
- W. Bächlin, P. Klein, 1994.** Diffusion problems near tunnel portals in built-up areas. *The Science of the Total Environment* Vol. 146/147, pp. 377-385.
- 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.
- F. Durst, A. Melling, J.H. Whitelaw, 1987.** Theorie und Praxis der Laser-Doppler-Anemometrie. Verlag G. Braun.
- 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.
- J. Götting, C. Winkler, M. Rau, N. Moussiopoulos, G. Ernst, 1996.** Dispersion of a passive pollutant in the vicinity of an U-shaped building, Proceedings of the 4th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Oostende, Belgium, 6-9 May 1996.
- W.G. Hoydysh, W.F. Dabberdt, 1988.** Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmospheric Environment* Vol. 22, No. 12, pp. 2677-2689, 1988.
- W.G. Hoydysh, W.F. Dabberdt, 1994.** Concentration fields at urban intersections: fluid modeling studies. *Atmos. Environ.*, 28, pp. 1849-1860.
- C.H. Huang, 1979.** A theory of dispersion in turbulent shear flow. *Atmos. Environ.*, 15, pp. 453-463
- L.J. Hunter, I.D. Watson, G.T. Johnson, 1990/1991.** Modelling Air Flow Regimes in Urban Canyons, *Energy and Build.*, No. 15-16, pp. 315-324, 1990/1991.
- L.J. Hunter, G.T. Johnson, I.D. Watson, 1992.** An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment* Vol. 26B, No. 4, pp. 425-432, 1992.
- G.T. Johnson, L.J. Hunter, 1995.** A numerical study of dispersion of passive scalars in city canyons. *Boundary-Layer Meteorology* Vol. 75, No. 3, Aug. 1995, pp. 235-262.
- R. Kaiser, 1996.** Windkanalstudie konvektiver Grenzschichtströmungen mit angehobener Temperaturinversion, Dissertation, Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität Karlsruhe, Heft 57, 1996.
- 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. Klein, M. Rau, R. Röckle, E.J. Plate, 1994.** Concentration estimation around point sources located in the vicinity of U-shape buildings. *Air Pollution II, Vol. 2: Pollution Control and Monitoring*, Editors: J.M. Baldasano, C.A. Brebbia, H. Power, P. Zanetti, Computational Mechanics Publications 1994.
- 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, 1996.** Wind-tunnel case studies of atmospheric dispersion in the urban environment, *Proceedings of the 4th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, Oostende, Belgium, 6-9 May 1996.
- P. Kastner-Klein, E.J. Plate, 1996.** Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von Kfz - bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten. 12. Statuskolloquium des PEF, 12.-13. März 1996, Forschungszentrum Karlsruhe, Hrsg. F. Horsch et al., FZKA - PEF 142, pp. 279-290, April 1996.
- P. Kastner-Klein, E.J. Plate, 1997.** Windkanalversuche zur Verbesserung der Ermittlung von Kfz - bedingten Konzentrationsverteilungen in Stadtgebieten. 13. Statuskolloquium des PEF, 11.-12. März 1997, Forschungszentrum Karlsruhe, Hrsg. F. Horsch et al., FZKA - PEF 153, pp. 235-246, April 1997.
- 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*, Vol. 8, Nos. 3-6, pp. 727-737.
- P. Leisen, et al., 1982.** Die Abhängigkeit der Immissionsbelastung in Straßenschluchten von meteorologischen und verkehrsbedingten Einflußgrößen. *Kolloquiumsbericht Abgasbelastungen durch den Straßenverkehr*, Verlag TÜV Rheinland.
- B. Leitl, 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, pp. 745-755.
- 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*, No. 62, pp. 37-56, 1996.
- P.G. Mestayer, S. Anquetin, 1995:** *Climatology of cities. Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields*, A. Gyr and F.-S. Rys, Eds., Kluwer, 165-189.
- Th. Münchow, 1991.** Untersuchung von Ausbreitungsvorgängen in einer turbulenten Windkanalgrenzschicht, Immissionsbelastung in Straßenschluchten. Diplomarbeit, vorgelegt im Fachbereich Physik der Universität Hamburg.
- T.R. Oke, 1987.** *Boundary Layer Climates*, Routledge, NewYork, 2nd edition, 1987.
- T.R. Oke, 1988.** Street design and the urban canopy layer climate, *Energy Build.*, No. 11, pp. 103-113, 1988.

- M. Pavageau, S. Rafailidis, M. Schatzmann, 1996.** A comprehensive experimental databank for the verification of urban car emission dispersion models. Proceedings of the 4th Workshop on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Oostende, Belgium, 6-9 May 1996.
- E.J. Plate, 1982.** Engineering Meteorology. Elsevier Scientific Publishing Company.
- E.J. Plate, 1982.** Windkanalmodellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten. Kolloquiumsbericht Abgasbelastungen durch den Straßenverkehr, Verlag TÜV Rheinland.
- 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.
- 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.
- R. Röckle, C.-J. Richter, 1995.** Ermittlung des Strömungs- und Konzentrationsfeldes im Nahfeld typischer Gebäudekonfigurationen - Modellrechnungen. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PEF 136.
- B. Ruck, Schmitt, F., 1986.** "Das Strömungsfeld der Einzelbaumumströmung, Abschätzung von Depositionswahrscheinlichkeiten für Feinsttröpfchen", Forstwissenschaftliches Centralblatt, 105/86, 3, 178-196.
- B. Ruck, (Hrsg.), 1990.** "Lasermethoden in der Strömungsmeßtechnik", AT-Fachverlag Stuttgart, ISBN: 3-921 681-01-4
- G. Schädler, W. Bächlin, A. Lohmeyer and T. van Wees, 1996.** Vergleich und Bewertung derzeit verfügbarer mikroskaliger Strömungs- und Ausbreitungsmodelle, Forschungszentrum Technik und Umwelt, Karlsruhe, FZKA-PEF 138.
- J.F. Sini, S. Anquetin, P.G. Mestayer, 1996.** Pollutant Dispersion and thermal effects in urban street canyons. Atmospheric Environment, Vol. 30, No. 15, pp. 2659-2677.