

**Die physikalische Modellierung der Kraftfahrzeug-
induzierten Turbulenz im kleinskaligen Windkanalmodell**

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades der Naturwissenschaften im
Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg

vorgelegt von

Anke Kovar-Panskus

aus

Hamburg

Hamburg, 2001

Als Dissertation angenommen vom Fachbereich Geowissenschaften
der Universität Hamburg

auf Grund der Gutachten von Prof. Dr.-Ing. M. Schatzmann

und Prof. Dr. M. Dunst

Hamburg, den 17. April 2001

Prof. Dr. U. Bismayer
Dekan
des Fachbereichs Geowissenschaften

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Bisheriger Kenntnisstand	5
2.1	Dimensionsanalyse	5
2.2	Einflußparameter der KFZ-induzierten-Turbulenz	12
2.3	Naturstudien	14
2.4	Theoretische Ansätze	16
2.5	Windkanalstudien	18
2.6	Modellierungsansätze für die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz ...	21
2.7	Weiteres Vorgehen	24
3	Windkanalmodellierung	26
3.1	Funktionsweise und Aufbau des Göttinger Kanals	26
3.2	Funktionsweise und Aufbau des Grenzschichtwindkanals	27
3.3	Meßtechnik	29
3.3.1	Geschwindigkeitsmessung	29
3.3.2	Konzentrationsmeßverfahren	30
3.3.3	Strömungsvisualisierung	31
3.3.4	Meßgenauigkeit	32
4	Ableitung der Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz	33
4.1	Die konventionelle Modellierung mit einem Riemenantrieb	33
4.2	Vergleich des idealisierten Fahrzeugs mit dem Echtmodell durch Strömungsvisualisierung	36
4.3	Vergleich des Konzentrationsfeldes um Fahrzeuge und Plättchen ...	42
4.3.1	Versuchsaufbau	42
4.3.2	Einfluß der Plättchen	47
4.4	Neuskalierung der Plättchen mittels Strömungsvisualisierung	62
4.5	Überprüfung der Neuskalierung durch Turbulenzmessung	72
5	Schlußfolgerungen	82

5.1	Bestimmung der Größe und Form der Wirbelgeneratoren	82
5.2	Bestimmung der Geschwindigkeit der Wirbelgeneratoren	85
5.3	Die Nullwindsituation	85
6	Zusammenfassung und Ausblick	86
6.1	Zusammenfassung	86
6.2	Ausblick	87
Anhang A	Umströmung bodengebundener, scharfkantiger Einzelhindernisse und Fahrzeuge	89
Anhang B	Genauigkeit der verwendeten Meßgeräte	92
B.1	Genauigkeit der Flammenionisationsdetektoren	92
B.2	Genauigkeit des BROOKS Massendurchflußreglers	93
B.3	Genauigkeit der BROOKS Kolbenkalibratoren	93
B.4	Genauigkeit des Hitzdrahts	94
B.5	Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung mit Staurohr nach Prandtl und Differenzdruckdose	94
B.6	Genauigkeit des Laserlichtschnitts	95
Anhang C	Messung des Profilwiderstandes	97
	Symbolverzeichnis	100
	Abbildungsverzeichnis	102
	Literaturverzeichnis	107
	Danksagung	113

1 Einleitung

Weltweit sind ca. 150 Millionen Menschen Asthmatiker. Dies entspricht ungefähr der Bevölkerung Rußlands. Allein in den USA ist seit den frühen achtziger Jahren ein Anstieg von ca. 60% zu verzeichnen, während in Großbritannien in den letzten 30 Jahren eine Vervierfachung hinzunehmen war. Allergien haben ebenfalls stark zugenommen, in Deutschland leidet ca. 1/4 der Bevölkerung daran. Es ist allgemein anerkannt, daß neben Milben, Schimmelpilzen und Rauch, weitere Auslöser für diese Krankheiten Dieselruß und andere Schadstoffe darstellen, wie sie u.a. auch durch den Kraftfahrzeugverkehr erzeugt werden. Diese Situation wird durch die ständige Zunahme des Kraftfahrzeugverkehrs weiterhin verschärft. Der Bestand an Kraftfahrzeugen belief sich in der Bundesrepublik Deutschland am 01.07.1999 auf insgesamt 50.6 Millionen, wobei jedes Jahr um die ca. 3 Millionen Neuzulassungen registriert werden (Statistisches Bundesamt (1999)).

Die Emission einiger durch den Kraftfahrzeugverkehr erzeugten Schadstoffe, hat durch emissionsmindernde Maßnahmen wie z.B. die Verbreitung des geregelten Katalysators, den Austausch des verbleiten Kraftstoffs durch unverbleite Ersatzstoffe, der Absenkung des Schwefelgehaltes im Dieselmotorkraftstoff, stark abgenommen. Dies betrifft insbesondere Schadstoffe wie Schwefeldioxid (SO_2), Blei (Pb) und Benzol. Für andere Schadstoffe wie Kohlendioxid (CO_2), Dieselruß und Stickoxide (NO_x) werden wiederum leichte Erhöhungen der Emissionen oder nur ein leichter Rückgang verzeichnet. Dies begründet sich auf fehlende Verhaltensänderungen in Hinblick auf die Nutzung der Kraftfahrzeuge und darauf, daß verbrauchsbegrenzende Maßnahmen nicht zügig genug durchgesetzt werden. Im Nutzverkehr wird die positive Entwicklung der Schadstoffemissionen gebremst, da aufgrund zusätzlich entstehender Kosten im Transportwesen zu geringe Fortschritte erzielt werden (Statistisches Bundesamt (1999)).

Durch den Anstieg der Anzahl der Kraftfahrzeuge und den schädlichen Einfluß der damit verbundenen Schadstoffe auf die Umwelt wuchs das Interesse, wie sich die Schadstoffe, auch unter dem Einfluß der Fahrzeugbewegung selbst, ausbreiten. Besonderes Interesse wurde dabei auf urbane Gebiete mit komplexer Bebauung gelegt, da hier zum einen die Schadstoffe erzeugt werden, zum anderen die Schadstoffe bei bestimmten Vorausset-

zungen akkumulieren und dabei gesundheitsschädliche Grenzwerte überschreiten können. Dies tritt besonders innerhalb von Straßenschluchten auf, also Straßen, die beidseitig mehr oder weniger lückenlos bebaut sind. Bedingt durch die im mittleren Strömungsfeld erzeugte Rezirkulation zwischen den Gebäuden bei senkrechter Anströmung einer Straßenschlucht, wie sie von Albrecht (1933), Georgii et al. (1967) und DePaul und Sheih (1986) untersucht wurden, treten in Bodennähe an der Leeseite des luvseitigen Gebäudes die höchsten Konzentrationen auf.

Die Fahrzeuge, die entlang der Straßenachse bewegt werden, stellen Turbulenzquellen im mittleren Strömungsfeld dar, deren Einfluß auf die Dispersion der Schadstoffe, je nach Verkehrsaufkommen, Richtungs- oder Gegenverkehr und Fahrmodus, Unterschiede aufweisen. Um Aufschluß über diese unterschiedlichen Einflußfaktoren zu gewinnen, wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt. So wurden anfänglich Meßphasen in offenem Gelände, also ohne Gebäudeeinfluß (Cadle et al. (1977) und Chock (1977)) durchgeführt, bis hin zum operationellen Betrieb von Monitoring Stationen, die über mehrere Jahre hinweg kontinuierlich Daten über Schadstoffemissionen, Windgeschwindigkeiten oder Turbulenzintensitäten sammeln (Berkowicz (1997)).

Naturmessungen haben jedoch den Nachteil, daß die meteorologischen Umgebungsbedingungen durch z.B. Tagesgang, Frontdurchgänge etc., eine starke Instationarität aufweisen. Dies wird in den Messungen durch kurze Integrationszeiten, die in der Regel eine halbe Stunde betragen, reflektiert bzw. durch Datensätze, die lediglich aus wenigen aufeinanderfolgenden Mittelwerten bestehen. Zu der Schwierigkeit, repräsentative Meßdaten zu erhalten, kommt der erhebliche finanzielle Aufwand hinzu.

Eine weitere Möglichkeit, die Zusammenhänge zwischen Kraftfahrzeug-induzierter Turbulenz und ihres Einflusses auf die Schadstoffausbreitung zu erkennen, liegt in der numerischen Modellierung. Die numerische Simulation liefert ein komplett dreidimensionales Bild der Strömung im Gegensatz zu Windkanal und Natur, welche nur Punktmessungen ermöglichen. Desweiteren erlaubt die numerische Simulation die kostengünstige und schnelle Untersuchung verschiedener Einflußparameter durch deren Variation. In der Regel wird der Fahrzeugeinfluß durch Parametrisierung in dem verwendeten Turbulenzansatz berücksichtigt. Die Qualität und Anwendbarkeit solcher Mo-

delle ist jedoch nachzuweisen (Schatzmann et al. (1999a)) und vielfach nicht genügend, da einige dieser Modelle noch nicht ausreichend validiert sind und ihrerseits noch Eingangsdaten zur Überprüfung der Parametrisierungen benötigen (Schatzmann et al. (1999b)).

Die Richtigkeit der Untersuchungsergebnisse ist jedoch von eminenter Bedeutung, nicht zuletzt deshalb, weil diese Ergebnisse in die Entwicklung und Anwendung von Richtlinien und Gesetzen (z.B. VDI Richtlinie (2000), Bundes-Immissionsschutzgesetz BImSchG (1997)) einfließen. Diese ermächtigen die Straßenverkehrsbehörden, den Kraftfahrzeugverkehr auf Straßen zu beschränken oder zu verbieten, sofern vorgegebene maximale Grenzwerte überschritten werden.

Eine andere Möglichkeit der Untersuchung ist die physikalische Modellierung im Windkanal. Ein genereller Vorteil von Windkanalstudien gegenüber Naturmessungen besteht darin, daß Untersuchungen nicht nur unter stationären Bedingungen durchführbar, sondern auch weniger kostenintensiv als Naturmessungen sind. Bei Einhaltung physikalischer Ähnlichkeitsgesetze stellt der Windkanal ein geeignetes Mittel dar, viele Problemstellungen durch maßstäbliche Verkleinerung der untersuchten Körper direkt simulieren zu können. Die direkte numerische Simulation (DMS), bei der alle Wirbel aufgelöst werden, stößt zur Zeit noch an die Grenzen heutiger Rechnerleistungen. Als Vereinfachung wird daher in anwendungsbezogenen Modellen nur ein Teil des Wirbelspektrums aufgelöst und kleinere turbulente Prozesse durch Parameterisierungen beschrieben. Diese werden aus Messungen abgeleitet und stellen nur eine Annäherung an die Wirklichkeit dar.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Windkanaluntersuchung von Kraftfahrzeug-induzierter Turbulenz. Da die Modellierung allein durch die maßstabsgetreue Übertragung des Naturfalls auf den Windkanal nicht zur Lösung der betrachteten Problemstellung führt, ist somit ebenfalls eine Parametrisierung erforderlich, die in diesem Fall physikalisch modelliert werden muß.

Aus diesem Grunde wurde schon in der Vergangenheit (Brilon et al. (1987)) von der Verwendung maßstäblich verkleinerter Fahrzeuge abgesehen und eine Parametrisierung in

Form von scharfkantigen Plättchen verwendet. Für diese Modellierungsstrategie werden Modellkörper auf einem Bandlauf montiert, der über eine Linienquelle geführt wird. Hierdurch wird gleichzeitig die Bewegung der Fahrzeuge und ihre Emissionen simuliert. Da diese Plättchen wiederum gänzlich andere Umströmungseigenschaften aufweisen als aerodynamisch günstig geformte Fahrzeuge ist es naheliegend, daß ein besonderes Augenmerk auf die physikalische Ähnlichkeit der Strömung gelegt werden muß.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, die die Verbesserung der kleinmaßstäblichen, physikalischen Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz zum Ziel hat. Hierfür wird zunächst über eine Dimensionsanalyse das gestellte Problem und die hierfür relevanten Parameter erläutert. Anhand der Literaturstudie wird der aktuelle Kenntnisstand der Forschung beschrieben und der Überblick über das weitere Vorgehen gegeben (Kapitel 2). Auf die für die Untersuchungen genutzten Windkanäle und meßtechnischen Grundlagen wird in Kapitel 3 eingegangen. Die zur Ableitung einer physikalischen Modellierungsstrategie notwendigen Windkanalexperimente werden in Kapitel 4 erläutert. Abschließend wird die hier abgeleitete physikalische Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz diskutiert (Kapitel 5) und ein Ausblick auf weitere Arbeiten gegeben (Kapitel 6).

2 Bisheriger Kenntnisstand

2.1 Dimensionsanalyse

Um ein Modellierungskonzept zu entwickeln, wird zunächst über eine Dimensionsanalyse erfaßt, welche Größen eine Rolle spielen. In der Dimensionsanalyse (Buckingham'sches Pi Theorem) werden Parameter in dimensionslosen Gruppen bzw. Kennzahlen angeordnet, die empirische Beziehungen zwischen diesen Gruppen wieder spiegeln und sich dann auf das gestellte Problem anwenden lassen. Durch Experimente können die Werte dieser dimensionslosen Gruppen bestimmt werden. Konstante werden durch die Dimensionsanalyse nicht erfaßt und müssen ebenfalls experimentell bestimmt werden. Die Dimensionsanalyse bedarf bereits eines Vorwissens bzgl. der einflußnehmenden Parameter. Unvollständige Parameterkombinationen oder auch starkes Streuen der Ergebnisse in den Experimenten deuten als Kontrollmechanismus jedoch an, wenn die Liste der Einflußparameter entweder unvollständig gewesen ist oder mehr Variable als notwendig enthalten hat (Stull (1988)).

Da sich, wie vorher diskutiert, maßstäblich verkleinerte Fahrzeuge für die physikalische Modellierung ausschließen, wird als einfachster Fall für die Modellierung von vertikalen Plättchen ausgegangen. Diese werden gleichförmig mit der Geschwindigkeit U_v mit Hilfe eines Bandlaufes über einen Riemenantrieb bewegt.

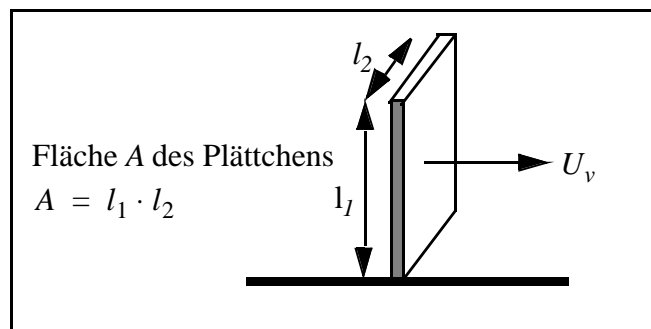


Abb. 1 Prinzipskizze eines Plättchens auf einem mit der Geschwindigkeit U_v bewegten Riemenantrieb.

Es wird angenommen, daß die gesamte Leistung P (Energie pro Zeit), die benötigt wird, um eine bestimmte Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten, in die Erzeugung von Turbulenz umgesetzt wird, bevor sie in Wärme dissipiert. Der Rollwiderstand von Fahrzeugen

wird hierbei vernachlässigt, es wird nur der durch den Vortrieb erzeugte Luftwiderstand berücksichtigt. Durch die Dimensionsanalyse wird nun die Turbulenzintensität I , die Fahrzeuge auf der Straße oder Wirbelgeneratoren auf einem Riemenantrieb erzeugen, abgeschätzt. Aus Grundüberlegungen können sich die Einzelparameter ableiten lassen, die eine Rolle für die Modellierung spielen:

$$I = f_1\{u_v, \rho, \mu, l_1, l_2, u(\delta), f, \delta, F_w, n, x, y, z\} \quad (1)$$

Hierbei bedeuten u_v die Fahrzeuggeschwindigkeit, ρ die Dichte der Luft, μ die Zähigkeit der Luft, l_1 und l_2 beschreiben Fahrzeugbreite und -höhe. Da es sich um ein Problem innerhalb der innerstädtischen Grenzschicht handelt, werden $u(\delta)$ die Anströmgeschwindigkeit und δ , die Grenzschichthöhe, mit in die Liste der Parameter aufgenommen. Ebenso wird f , die Frequenz, mit der die Fahrzeuge die Strecke bzw. den Meßpunkt passieren, eine Rolle spielen. F_w ist der Druck- oder Formwiderstand, den ein Körper auf die Strömung ausübt und der von der Form dieses Körpers abhängt. Dieser Formwiderstand ist bei Fahrzeugen entsprechend ihrer Form unterschiedlich, kann jedoch in erster Näherung ohne große Fehler mit einem Mittelwert angegeben werden. Für die Modellierung durch Körper anderer Formen, ändert sich dieser Wert jedoch beträchtlich. Insofern ist die Widerstandskraft keine allein von der Fahrzeuggeschwindigkeit und den Körperabmessungen l_1 und l_2 abhängige Größe, da trotz gleicher Aspektverhältnisse eines Körpers seine Form beträchtlich variieren kann und somit auch sein Widerstand in der Strömung ein gänzlich anderer sein kann. Desweiteren ist der Parameter n , der Profilexponent, von Bedeutung, da er bestimmt, wie die Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des logarithmischen Windprofils aussieht. Da die Turbulenzintensität lokal variiert, je nachdem, wo man sich zu einem etwaigen Meßpunkt befindet, hängt sie auch von den Ortskoordinaten x , y und z ab. Aus obiger Parameterliste ergeben sich die folgenden dimensionslosen Parameterkombinationen:

$$I = f_2 \left\{ \begin{array}{cccccccccccc} \frac{\Delta u_v l_1}{\rho / \mu} & \frac{l_2}{l_1} & \frac{\delta}{l_1} & \frac{l_1 f}{\Delta u_v} & \frac{u(\delta)}{\Delta u_v} & \frac{F_w}{1/2 \rho u_v^2 l_1 l_2} & n & x & y & z \\ I & II & III & IV & V & VI & VII & VIII & IX & X \end{array} \right\} \quad (2)$$

Die Turbulenzintensität, die die Kraftfahrzeuge bzw. die Plättchen erzeugen, hängt somit von der Reynoldszahl ab (Term I), welche das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften widerspiegelt, dem Verhältnis von Fahrzeugbreite zu -höhe (Term II), dem Verhältnis der Grenzschichthöhe zur Fahrzeughöhe (Term III), der Strouhalzahl (Term IV), dem Verhältnis der freien Anströmgeschwindigkeit zur Fahrzeuggeschwindigkeit (Term V), dem Widerstandsbeiwert c_w der in Term VI beschrieben ist und dem Profilexponenten n (Term VII). Die Terme VIII bis X bezeichnen die Ortskoordinaten.

Aus der Dimensionsanalyse lassen sich gleichzeitig die einzuhaltenden Ähnlichkeitsbedingungen ableiten. Demnach müßte sowohl für Modell (Index M) und Natur (Index N) gelten, daß die erzeugte Turbulenzintensität I gleich ist:

$$I_N = I_M \quad (3)$$

Die Querschnittsflächen müssen maßstäblich gleich groß sein:

$$\left(\frac{l_2}{l_1}\right)_N = \left(\frac{l_2}{l_1}\right)_M \quad (4)$$

Die Dimensionsanalyse erfordert weiterhin identische Reynolds-Zahlen

$$Re_N = Re_M \quad (5)$$

welche allerdings nicht notwendigerweise dieselben Zahlenwerte einnehmen müssen, solange im Windkanal vollturbulente Verhältnisse herrschen wie in der Natur auch. Bei Kenntniss der minimal notwendigen Reynoldszahlen können für verschiedene Problemstellungen die notwendigen Meßgeschwindigkeiten berechnet werden. Im Zweifelsfall ist die notwendige Mindestgeschwindigkeit im Windkanal durch Vorversuche zu bestimmen. Hieraus folgt, daß die Geschwindigkeit, mit der die Fahrzeugbewegung simuliert wird, deutlich niedriger gewählt werden kann, als es dem Naturfall entspricht.

Die Widerstandsbeiwerte müssen in Natur und Modell übereinstimmen, wobei hier die Querschnittsfläche $l_1 \cdot l_2$ mit A bezeichnet wird:

$$c_{w_N} = \left(\frac{F_w}{\frac{1}{2} \rho u_v^2 A} \right)_N = \left(\frac{F_w}{\frac{1}{2} \rho u_v^2 A} \right)_M = c_{w_M} \quad (6)$$

Bei Einhaltung des Modellmaßstabs der physikalischen Modellierung im Windkanal und Gewährleistung überkritischer Reynoldszahlen, kann Gl. (6) jedoch umgeformt werden zu:

$$c_w \cdot A = \text{const.} \quad (7)$$

Aus Gl. (7) folgt, daß ein Körper wie das Fahrzeug bei konstantem Produkt aus Widerstandsbeiwert und Fläche durch einen anderen Körper, wie z.B. ein Plättchen, ersetzt werden kann. Die Wirkung dieser beiden Körper muß dann also dieselbe sein, da über die Ähnlichkeitstheorie an dieser Stelle für beide Körper die gleichen Kräfte gefordert werden. Wenn mit anderen Körpern als maßstäblich verkleinerten Fahrzeugen modelliert wird, schließt sich somit die gleichzeitige Forderung nach exakt gleichen Widerstandsbeiwerten und gleichen Querschnittsflächen in Natur und Modell erstmal aus.

Weitere Ähnlichkeitsbedingungen erfordern die Modellierung einer naturähnlichen Grenzschicht, sowie eines naturähnlichen bzw. dem zu modellierenden Fall entsprechenden Verkehrsaufkommens, was auch die Anzahl der Fahrspuren und Richtungs- oder Gegenverkehr mit beinhalten.

Ein weiteres im Windkanal zu simulierendes Problem stellt die Fahrzeugemission an sich dar. Im Windkanal werden die KFZ-Emissionen durch Freisetzung eines Tracer-gases simuliert, welches auftriebsfrei der Strömung folgt. Die gemessenen Konzentrationen werden ebenfalls dimensionslos dargestellt, was den Vergleich von Messungen mit verschiedenen Volumenströmen, Geschwindigkeiten und letztlich auch mit Naturdaten ermöglicht. Da die Strömungsmuster um die Plättchen aufgrund der Reynoldszahlunabhängigkeit von der Geschwindigkeit unabhängig verlaufen sollen, wird die dimensions-

lose Konzentration c^* für Ausbreitungsprobleme als Funktion von der Windrichtung DD im allgemeinen dargestellt als:

$$c^* = \frac{c \cdot u \cdot H}{Q/L} = f\{DD\} \quad (8)$$

mit einer inversen Proportionalität zwischen der gemessenen Konzentration c und der Windgeschwindigkeit u , welches eine Extrapolation der gemessenen Konzentrationen für verschiedene Windgeschwindigkeiten erlaubt. Hierbei bezeichnen c die in Abhängigkeit der Windrichtung und Referenzgeschwindigkeit gemessene Tracergaskonzentration, u die Windgeschwindigkeit, gemessen in der sogenannten Referenzhöhe H oberhalb der Gebäude, Q die Linienquellstärke und L die Länge der Quelle. Die Referenzhöhe muß hierbei vom geographisch gleichen Ort in Modell und Natur stammen. Um die Windkanalmessungen mit Naturmessungen vergleichen zu können, werden ebenfalls dimensionslose Konzentrationen aus den Naturmessungen numerisch berechnet. Die Quellstärke Q wird über Emissionsfaktoren mit geeigneten Modellen berechnet. In diese Emissionsfaktoren gehen das Verkehrsaufkommen, der LKW-Anteil, die Flottenzusammensetzung, die Geschwindigkeit, der Anteil an Fahrzeugen mit kaltem Motor und der betrachtete Schadstoff mit ein (Schatzmann et al. (1999c)). Weitere statistische Kenngrößen können berechnet werden wie z.B. Jahresmittelwerte und Perzentilwerte (Plate und Kastner-Klein (1995)), darauf wird aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Gl. (8) besitzt jedoch nur Gültigkeit für den Fall ausreichend großer Windgeschwindigkeiten, deren Minimum durch Übersteigen der kritischen Reynoldszahl bestimmt wird und damit auch von dem Fakt, daß die Ausbreitung durch den Wind bestimmt wird und nicht durch die von den Kraftfahrzeugen und im Rahmen dieser Arbeit untersuchten induzierten Turbulenz. Die Ableitung einer gültigen Normierung für den Fall geringer Windgeschwindigkeiten bzw. den Einfluß der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz wäre also ein weiteres Ziel, daß sich im Anschluß aus der Weiterentwicklung und Verbesserung einer Windkanalmodellierungsvorschrift für die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz anschließen müßte. Dies kann allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr durchgeführt werden, findet hier aber der Vollständigkeit halber und, um die Grenzen dieser Normierung aufzuzeigen, Erwähnung.

Betrachtet man nun die Freisetzung von Kraftfahrzeugabgasen entlang einer Straße, stellt die kontinuierliche Bewegung der Fahrzeuge eine Ausbreitung der Emissionen entlang dieser Straße dar. Da, wie vorher beschrieben, die Modellierung einzelner Auspuffrohre im Windkanal technisch nicht realisierbar ist, wird sie durch die Modellierung einer Linienquelle ersetzt. Der durch die Bewegung der Fahrzeuge erfolgende Transport entlang der Straße, hier als x -Richtung definiert, wird durch die Anordnung der Linienquelle simuliert. Da Fahrzeuge permanent entlang ihrer Bewegungsrichtung emittieren, wird dies am besten durch eine linienförmige Anordnung der Quelle entlang der Straßenachse simuliert. Das bedeutet, daß kein Mechanismus mehr benötigt wird, der die Emissionen entlang der Straßenachse transportiert. Der Riemenantrieb, der ebenfalls entlang der Straße in x -Richtung bewegt wird, verstärkt diesen Transport in x -Richtung bzw. simuliert ihn doppelt. Der Transport der Emissionen wird in x -Richtung durch die Linienquelle bereits ausreichend simuliert, durch einen Modellierungsansatz der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz ist somit nur noch die Bewegung in y - (lateral) und z - (vertikal) Richtung zu beschreiben. Der Riemenantrieb wird jedoch benötigt, da stationäre Wirbelgeneratoren lokale Abhängigkeiten verursachen würden und die Meßergebnisse somit von ihrer Position abhängen. Dies wird durch die Bewegung des Bandlaufes vermieden.

Hieraus ergibt sich die Frage, ab was für einer Anzahl von Fahrzeugen das Linienquellenkonzept anwendbar und zulässig ist. Da die Linienquelle eine kontinuierliche, lückenlose Emission des Tracergases bedeutet, ist dieses Konzept für ein Einzelfahrzeug nur unter der einen Bedingung zulässig, daß absolute Windstille herrscht und die Fahrzeugemissionen für eine gewisse Zeit in der Luft des Fahrzeugnachlaufs und dessen Wirbeln verbleiben, bevor diese zerfallen. Dieses Einzelfahrzeug unter Nullwindbedingungen stellt jedoch keine allgemeingültige oder realistische Annahme dar. Um das Konzept zu verdeutlichen, kann man sich den Fall einer Straßenschlucht vorstellen, z.B. mit nur einer Spur Richtungsverkehr unter Seitenwindeinfluß. Der Wind verfrachtet die emittierten Abgase in Windrichtung, hier also senkrecht zum Straßenverlauf. Mit dem Bodenwind und den in der Straßenschlucht entstehenden Wirbeln etc. werden die Emissionen verfrachtet. Daraus läßt sich folgern, daß eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen pro Halbstundenmittelwert, was einer üblichen Mittelungsdauer entspricht, notwendig ist, damit dieses Verfrachten der Emissionen in Windrichtung in einem Meßsignal bei

Konzentrationsmessungen in Quellnähe nicht mehr durch ein An- und Abschwellen des Konzentrationsmittelwertes zu identifizieren ist. Es muß also zum einen eine bestimmte Anzahl überschritten werden und zum anderen muß sich ein möglichst konstanter, gleichförmiger Verkehrsfluß einstellen. Ebenfalls kann man hieraus folgern, daß ab Überschreiten einer bestimmten Anzahl von Fahrzeugen der Konzentrationsmeßwert nicht mehr weiter ansteigt, genauso wie sich der Verkehrsfluß nicht endlos steigern läßt. Ab Überschreiten dieser Anzahl von Fahrzeugen muß sich dann auch ein relativ konstanter Konzentrationsmeßwert einstellen, da sich eine mehr oder minder gleichmäßig „verwaschene“ linienförmige Emissionen hieraus ergibt. Bevor der Wind nennenswerte Emissionen verfrachtet, trägt das nächste Fahrzeug bereits neue Emissionen ein. Bei welcher Anzahl dieser Grenzwert liegt, hängt nun von mehreren Faktoren ab. Die Breite der Straßenschlucht spielt eine Rolle, da es zu Reflektionen an den Gebäudewänden kommen kann. Von Einfluß ist auch wie der Wind überhaupt angreifen kann bzw. ob es zu der Ausbildung eines Rezirkulationssystems innerhalb der Straßenschlucht kommt, welches wie der vorher beschriebene Seitenwind wirken kann. Selbst unter der Annahme einer bestimmten mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit und einer bestimmten mittleren Fahrzeuglänge läßt sich kein allgemeingültiger Grenzwert bestimmen. Es wäre also unabdingbar, daß ein solcher aus vorhandenen Naturdatensätzen abgeleitet würde, um den Geltungsbereich für dieses Konzept festzusetzen. Es läßt sich lediglich ableiten, daß dieses Konzept für ein höheres Verkehrsaufkommen gültig ist, wie es für Stadtverkehr typisch ist.

Die Linienquelle selbst besteht aus einer lückenlosen Aneinanderreihung einzelner Punktquellen, die durch dünne Kapillaren realisiert werden (Schatzmann et al. (1999c)). Diese werden bündig mit dem Boden der Straßenschlucht eingebaut. Durch diese Kapillaren wird das Tracergas freigesetzt. An das Design der Linienquelle werden hierbei verschiedene physikalische Anforderungen gestellt. Die Quelle muß über ihre gesamte Länge homogen emittieren, d.h. an den Rändern muß die gleiche Menge emittiert werden, wie in der Mitte der Quelle. Dies muß auch der Fall sein, wenn sich lokale Druckunterschiede oberhalb der Quelle einstellen, die durch Geschwindigkeitsunterschiede durch Gebäudeumströmung erzeugt werden. Der Volumenstrom bzw. die Austrittsgeschwindigkeit durch die Röhrchen muß so gering sein, daß keine Jets entstehen, da das Tracergas der Strömung trägheitsfrei folgen muß und das Meßergebnis nicht vom Eigen-

impuls der Quelle abhängen darf. Eine Linienquelle, die diese Kriterien erfüllt, besteht aus einer lückenlosen Aneinanderreihung dünner Kapillaren mit einem Innendurchmesser von $\phi = 0.2 \text{ mm}$ und einer Länge L von 42 mm . Der Druckverlust beträgt bei einem Volumenstrom von 8.3 kg/h ca. 480 Pa , was zu einer homogenen Emission entlang der Quelle führt. Die Abweichung vom Mittel beträgt hierbei $\pm 15\%$. Der vertikale Impuls der Quelle ist mit 0.2 m/s ebenfalls gering (Schatzmann et al. (1999c)).

Ist die Austrittsgeschwindigkeit aus der Quelle zu hoch, kann oberhalb der Linienquelle in einem bestimmten Abstand eine dünne Prallplatte montiert werden (Meroney et al. (1996), Kastner-Klein (1999)), die den Impuls und die Richtung aus dem Jet nimmt. Dieses stellt ein legitimes technisches Hilfsmittel dar, mit dem ein gewünschtes Resultat erzielt wird.

2.2 Einflußparameter der KFZ-induzierten-Turbulenz

Aus der oben durchgeführten Dimensionsanalyse wurden die Parameter abgeleitet, die für die maßstäbliche Simulierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz im Windkanal eine Rolle spielen. Diese Parameter konnten benannt werden als die Geschwindigkeit und Richtung der Anströmung, die Fahrzeuggeschwindigkeit und -anzahl, die Querschnittsfläche der Fahrzeuge und Profilexponent bzw. der Art der Grenzschicht. Weitere Parameter wie z.B. Einflüsse durch Schichtung sind denkbar. Anhand der Literaturstudie werden nun diese Parameter nochmals genauer auf ihre Relevanz in Hinblick auf die Umsetzung für eine Windkanalmodellierungsstrategie beleuchtet. Hierzu wurde die verfügbare Literatur gesichtet, deren Anzahl an sich jedoch immer noch eher begrenzt ist.

Die wichtigste Einflußgröße auf die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz stellt die Anzahl der Fahrzeuge dar, die, je nach Häufigkeit und Geschwindigkeit der Fahrzeuge, unterschiedliche Fahrmodi widerspiegelt. Die Anzahl von Personenkraftwagen (Pkw) und Lastkraftwagen (Lkw) ist hierbei von entscheidender Bedeutung, da Lkw's aufgrund ihrer Verdrängungsfläche ein größeres Umfeld beeinflussen als Personenkraftwagen und durch die unterschiedliche Bauart ein von Pkw's verschiedenes Emissionsverhalten besitzen. Aus diesem Grunde wird, immer noch nur vereinzelt, neben den Meßstationen auch eine kontinuierliche Verkehrszählung betrieben, die über eine Induktionsschleife in

der Straße Aufschluß über die Anzahl der passierenden Pkw und Lkw gibt (z.B. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie NLÖ (1993)).

Windgeschwindigkeit und -richtung stellen insofern relevante Einflußparameter dar, da nur bei niedrigen Windgeschwindigkeiten der durch die Kraftfahrzeuge induzierte Anteil der Turbulenz überhaupt von der atmosphärischen Turbulenz unterschieden werden kann (Watkins et al. (1995)). Bei hohen Windgeschwindigkeiten ist davon auszugehen, daß die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz vollständig überdeckt wird, bzw. eine umgekehrte Proportionalität zwischen Windgeschwindigkeit und Fahrzeugturbulenzeffekten besteht (Sedefian et al. (1981)). Die Windrichtung ist entscheidend für den Transport der Wirbel (Watkins et al. (1995)) und eine Seitenanströmung der Fahrzeuge führt zu einem höheren Blockierungseffekt als eine Frontalanströmung.

Ein weiterer untersuchter Einflußparameter ist die atmosphärische Schichtung. Stabile Schichtungen stellen eine natürliche Dämpfung der atmosphärischen Turbulenz dar. Dies wirft die Frage auf, ob die Auswirkungen der Fahrzeug-induzierten Turbulenz durch die stabile Schichtung unterdrückt wird oder entgegengesetzt, die Schichtung durch Kraftfahrzeug-induzierte Wirbel aufgelöst würde. Instabile Schichtungen, die sich durch höhere Windgeschwindigkeiten und einer guten Durchmischung innerhalb der Grenzschicht charakterisieren lassen, werden im allgemeinen der neutralen Schichtung zugerechnet und somit nicht weiter von der neutralen Schichtung unterschieden. Kitabayashi et al. (1976) führten Windkanalexperimente in einer Straßenschlucht in neutraler und leicht stabiler Schichtung durch. Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen in beiden Situationen waren so ähnlich, daß der Schluß gezogen wurde, daß stabile Schichtungen bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit $>2 \text{ m/s}$ keine Rolle spielen. Sedefian et al. (1981) werteten Daten aus dem General-Motors-Ausbreitungsexperiment von Cadle et al. (1976 und 1977) und Chock (1977) aus. An mindestens einem Meßpunkt wird eine Unabhängigkeit von Schichtungseffekten deutlich, aber es konnte aus diesen Naturmessungen nicht eindeutig geklärt werden, ob diese Unabhängigkeit repräsentativ ist oder nicht. Leisen (1982) beschrieb weitere Einflußgrößen auf die Höhe von Schadstoffkonzentrationen wie Straßenbreite, Windrichtung und -geschwindigkeit. Schichtungseffekte wurden auch hier für nicht wesentlich erachtet, da angenommen wurde, daß die Fahrzeug-induzierte Turbulenz für eine Durchmischung innerhalb der Straßenschlucht sorgt.

(Leisen et al. (1982)). Berkowicz et al. (1997) belegten dann mit Langzeit-Naturmessungen in einer Straßenschlucht in Dänemark durch gleichzeitiges Messen der Globalstrahlung, daß die stabile Schichtung für die Kfz-induzierte Turbulenz keine Rolle spielt.

Weitere Untersuchungen, die vielfach im Bereich der Automobilindustrie durchgeführt wurden, beziehen sich auf die Fahrzeugaerodynamik (siehe z.B. Bearman et al. (1982), Bearman (1984), Hucho (1987)) oder Design-Verbesserungen durch z.B. Unterbodengestaltung von Fahrzeugen (u.a. Rauser und Eberius (1987)). Diese Untersuchungen sind sowohl für die Modellierungsstrategie als auch für den direkten Einfluß auf das Strömungsfeld in Bezug auf ihre spätere Anwendung im Windkanal von untergeordneter Bedeutung. Dies gilt ebenso für die Aerodynamik von Fahrzeugen. In dieser Arbeit wird nicht auf die Unterschiede verschiedener Fahrzeugtypen oder ihrer Weiterentwicklung eingegangen, sondern auf die Erfassung und Modellierung ihrer Auswirkung in Bezug auf z.B. Turbulenzproduktion und damit verbunden, die Schadstoffausbreitung. Für eine Modellierungstechnik der Fahrzeug-induzierten Turbulenz wird nicht das Einzelfahrzeug betrachtet, sondern die Turbulenz, die eine durchschnittliche Fahrzeugflotte bzw. ein bestimmter Fahrmodus auf die Strömung ausübt.

2.3 Naturstudien

Eines der ersten Naturexperimente zur Klärung des Einflusses der Kfz-induzierten Turbulenz ist das General-Motors-Ausbreitungsexperiment von Cadle et al. (1977) und Chock (1977). Hierbei fuhren auf einer Teststrecke in ebenem, offenem Gelände Autokolonnen mit konstanter Geschwindigkeit von 80 km/h in 29-s -Intervallen an einer Reihe von Meßtürmen vorbei. Die Meßtürme befanden sich in einem Abstand von 3.8 m bis 15 m zu beiden Seiten der Straße. Die Messungen wurden unter stabilen und neutralen/instabilen Situationen durchgeführt. Sowohl im mittleren Strömungsfeld wie auch in den turbulenten Größen wurde ein Einfluß durch die Fahrzeugbewegung sichtbar. Es wurde für eine senkrechte Anströmung der Straße die Beziehung abgeleitet, daß der durch die Kraftfahrzeuge induzierte Anteil der Turbulenz sich umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit verhält, d.h. je geringer die Windgeschwindigkeit, desto stärker der Einfluß der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz. Für parallele Anströmung entlang der Straße verhält sich die Turbulenz direkt proportional zur Windgeschwindigkeit. Aus den Ergebnissen dieses Experiments wurde abgeleitet, daß der Verkehr einen zusätzlichen

Eintrag in das Energiespektrum bei hohen Frequenzen bringt und somit die Fahrzeugturbulenz einen meßbaren Effekt hat (Sedefian et al. (1981)). Da sich die Meßstrecke jedoch im offenen Gelände befand und die Meßtürme einen Abstand von 3.8 m bis 15 m von den Fahrzeugen hatten, läßt sich diese Untersuchung nicht auf eine städtische Bebauung übertragen. Für diesen Fall wäre es von Interesse zu wissen, wie sich die Fahrzeuge im direkten Nahfeld bzw. genau auf diesen ersten Metern auswirken, da dann zu beiden Seiten bereits die Bebauung zu finden ist, die ihrerseits eine Begrenzung darstellt und zu Reflexionen führen kann.

Eskridge und Hunt (1979) stellten für Windgeschwindigkeiten deutlich unterhalb der Fahrzeuggeschwindigkeit einen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsfluktuationen im Fahrzeugnachlauf und der Entfernung längs des Nachlaufs her. Diese Effekte werden ebenfalls überdeckt, wenn die Windgeschwindigkeit zunimmt.

Chock (1977) stellte fest, daß die kinetische Energie durch die Fahrzeugturbulenz mindestens 15 m stromab transportiert wird, bevor sie dissipiert wird. Ebenso zeigten sich signifikante Auf- und Abwärtsbewegungen, insbesondere bei niedrigen Windgeschwindigkeiten. Dies resultierte sowohl aus der Hinderniswirkung der Fahrzeuge, als auch durch vertikale Scherung, die einsetzt, wenn Windrichtung und Verkehr sich überlagern und, bedingt durch das logarithmische Windprofil, die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt.

Gronski (1988) führte weitere Naturmessungen auf schneebedeckter Straße mit 2 Fahrzeugen durch, die ein Tracergas aus 1.3 m Höhe emittierten, was ungefähr der Höhe der Fahrzeuge entspricht. Die Fahrzeuge waren soweit voneinander entfernt und die Geschwindigkeiten wurden so unterschiedlich gewählt, daß die beiden Nachläufe sich nicht überlagern konnten. Aus dieser Untersuchung wurde geschlossen, daß die Vertikaldispersion und die Fahrzeugschleppe ebenfalls mit zunehmender Fahrzeuggeschwindigkeit ansteigen. Es konnte jedoch keine Gesetzmäßigkeit hierfür ermittelt werden. Die Emission aus 1.3 m Höhe stellt jedoch eine eher unrealistische Annahme dar, da Fahrzeuge im allgemeinen in Bodennähe emittieren. Es wurde angenommen, daß bei Anwesenheit von Häusern, Bäumen etc. der Einfluß der Fahrzeuge nur noch direkt am Straßenrand bedeutend ist. Dies deckt sich mit den von Sedefian et al. (1981) gewonnenen Ergebnissen

und zeigt auch, daß die Effekte der Fahrzeuge räumlich sehr begrenzt sind und schon in wenigen Metern Entfernung von der Straße kaum mehr meßbar sind.

Watkins et al. (1995) beschäftigten sich mit Prozessen die in der Natur Turbulenz erzeugen wie z.B. Windscherung oder lokale Hindernisse wie Bäume, Brücken und Gebäude. Aus Naturmessungen wurden Größenordnungen der lateralen und longitudinalen Windturbulenzintensitäten abgeleitet, denen ein Fahrzeug für Fahrzeuggeschwindigkeiten von bis zu 100 km/h bei bestimmter Windgeschwindigkeit ausgesetzt ist. Typische Werte atmosphärischer Turbulenz für Vorstadt-Rauhigkeit wurden aus Flay (1978) entnommen. Die Ergebnisse der Naturmessungen dienten zur Initialisierung eines numerischen Modells, welches eingesetzt wurde, um für die gemessenen Situationen Vorhersagen zu machen. Hierbei wurde unterschieden zwischen Messungen entlang einer 2 km langen Strecke ohne Bebauung, Bäumen und Verkehr und einer anderen 20 km langen Strecke mit Bebauung, Bäumen und Verkehr. Als Haupteinflußgrößen wurden somit auch hier die Windgeschwindigkeit und -richtung festgelegt, neben der Bebauungsstruktur an der Straße und der Fahrzeuggeschwindigkeit selbst. Das Modell berechnete mit guter Übereinstimmung zur Naturmessung die atmosphärische Turbulenz des ungestörten Falles, aber eine Abweichung von bis zu 30% des Falles mit Verkehr, Bäumen und Bebauung. Dieses Ergebnis kann auch dahingehend interpretiert werden, daß der Effekt von Bewuchs in Straßen noch keinesfalls fehlerfrei modelliert wird und ihrerseits eine weitere Unbekannte darstellt neben dem Einfluß des Verkehrs.

2.4 Theoretische Ansätze

Eines der bislang am weitesten entwickelten numerischen Ausbreitungsmodelle, die die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz mit berücksichtigt, ist das **Operational Street Pollution Model** (OSPM) von Berkowicz et al. (1997). Dieses Modell wurde an Meßdaten validiert, die im Jagtvej in Kopenhagen (Dänemark) durchgeführt worden sind. In diesem Modell werden Schadstoffkonzentrationen in Straßenschluchten mittels eines kombinierten „Plume“- und „Box“-Ansatzes berechnet. Der Ausbreitungsparameter σ_z wird als nur durch mechanisch erzeugte Turbulenz beeinflußt betrachtet, wobei σ_z als Überlagerung von winderzeugter Turbulenz σ_w und verkehrsinduzierter Turbulenz σ_v berechnet wird:

$$\sigma_z = (\sigma_w^2 + \sigma_v^2)^{1/2} = [(a_w u_b)^2 + \sigma_v^2]^{1/2} \quad (9)$$

u_b ist hierbei die Windgeschwindigkeit im Straßenbereich und a_w eine Konstante (≈ 0.1). Der Anteil der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz σ_v^2 wird berechnet nach

$$\sigma_v^2 = b^2 u_v^2 D^2 \quad (10)$$

Hierbei bedeuten u_v die Fahrzeuggeschwindigkeit, D die Dichte der Fahrzeuge und b ist eine empirische Konstante. Die Fahrzeugdichte D wird parameterisiert aus der horizontalen Fläche S^2 , die ein Fahrzeug auf der Straße einnimmt:

$$D = \frac{N \cdot S^2}{u_v \cdot B} \quad (11)$$

N ist hier die Anzahl der Fahrzeuge pro Zeiteinheit und B die Straßenbreite. Im Originalansatz findet die horizontale Fläche der Fahrzeuge Berücksichtigung. Resultierend aus einer Weiterentwicklung des Ansatzes innerhalb des Europäischen Netzwerk-Projekts TRAPOS wird nunmehr ebenfalls die Querschnittsfläche des Fahrzeugs zusammen mit seinem Widerstandsbeiwert c_w berücksichtigt, wie bei Plate (1982) und Kastner-Klein (1999). Die Abhängigkeit der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz von der Fahrzeuggeschwindigkeit wird in diesem Ansatz als quadratisch angegeben. Dies steht im Gegensatz zu dem von Kastner-Klein (1999) diskutierten Ansatz, der eine Abhängigkeit von der dritten Potenz aufweist. Dieser Ansatz wird im nachfolgenden Kapitel der Windkanalstudien weiter diskutiert.

Die Konzentration c wird im windschwachen Falle und für ein einzelnes Fahrzeug im zeitlichen Mittel als ungefähr gleich zur Emissionsstärke pro Längeneinheit Q angegeben, dividiert durch die Turbulenz σ_z und die Straßenbreite B :

$$c \approx \frac{Q}{\sigma_z \cdot B} \quad (12)$$

Mit dem Modell wurde ein Tagesgang der verkehrsinduzierten Turbulenzintensität berechnet und mit Naturmeßdaten aus Kopenhagen, Dänemark verglichen. Für Situationen

mit geringen Windgeschwindigkeiten zeigt sich eine gute Übereinstimmung des Vergleichs. Wie jedoch schon erwähnt, wurde das Modell im wesentlichen an diesem Datensatz auch validiert, insofern ist die gute Übereinstimmung des Vergleichs auch zu erwarten. In der Nacht auftretende Abweichungen wurden durch Effekte aus thermisch erzeugter Turbulenz begründet, die durch den Modellansatz nicht erfaßt wird. Gerade in der Nacht unter sich verstärkend stabilen Bedingungen wird die thermische Turbulenz jedoch zunehmend gedämpft. Von Berkowicz et al. (1997) wurde aber auch geschlossen, daß die Globalstrahlung bzw. Schichtungseffekte keine Rolle spielen. Dieses steht im Widerspruch zu dem dort getroffenen Erklärungsansatz.

Aus den dargestellten Ergebnissen früherer Arbeiten läßt sich jedoch kaum etwas für eine Windkanalmodellierung ableiten. Auswirkungen der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz werden so unterschiedlich interpretiert, daß eine Größenordnung des Effektes nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann, ein ungefährender Einflußbereich wird jedoch relativ übereinstimmend angegeben. Genauere Vorgaben finden sich jedoch in der Windkanalmodellierung.

2.5 Windkanalstudien

Während Gebäude, maßstäblich verkleinert und scharfkantig ausgelegt (engl. bluff body), direkt als Windkanalmodell dienen können, zeigt sich, daß sich bei Fahrzeugen aufgrund der sehr günstig gestalteten Aerodynamik zur Minimierung des Kraftstoffbedarfs die kritische Reynoldszahl auf ein schwer einhaltbares Niveau erhöht. In der Fahrzeug-aerodynamik wird aus diesem Grunde um reale Fahrzeugkarosserien im Windkanal oftmals mit Geschwindigkeiten von über 50 m/s (Lienhart et al. (1995)) gemessen, jeweils in Abhängigkeit von den zu vermessenden Parametern. Grenzschichtwindkanäle sind für diese Geschwindigkeiten in der Regel nicht ausgelegt. Es ist deshalb nicht sinnvoll, Fahrzeuge maßstäblich verkleinert in Windkanalmodelle zu implementieren, auch wenn dies teilweise versucht wurde (Gowda (1998), Kitabayashi et al. (1976)). Ein weiterer Grund von der Verwendung von Echtfahrzeugmodellen Abstand zu nehmen, besteht in der Schwierigkeit der technischen Umsetzung, bewegte Fahrzeuge mit Tracergas-emittierenden, realen Auspuffrohren zu versehen. Es wird also ein Modellkörper gesucht, der die gleiche Strömung und damit auch Konzentrations- und Turbulenzverteilung erzeugt wie ein reales Fahrzeug, aber eine niedrigere Reynoldszahl-Abhängigkeit besitzt, um

hohe Meßgeschwindigkeiten zu vermeiden. Aus diesen Gründen wird von der Verwendung realer Fahrzeuge abgesehen und auf andere Strömungskörper zurückgegriffen, die auf umlaufenden Bändern montiert werden und so die Fahrzeugbewegung simulieren. Durch mehrere Bänder können auf diese Weise unterschiedliche Fahrtrichtungen, Richtungs- und Gegenverkehr simuliert werden.

Die ersten Untersuchungen im Windkanal, die die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz mitberücksichtigen, wurden von Kitabayashi et al. (1976) durchgeführt. Die Windkanalexperimente wurden im Maßstab $1:100$ modelliert. Es wurde eine in einer Straßenschlucht ($H/B=1.2$) liegende 4-spurige Einbahnstraße mit Echtmodell-Fahrzeugen modelliert, die mit $0-4\text{ m/s}$ durch einen Riemenantrieb bewegt wurden. Die Anströmgeschwindigkeit lag zwischen 0.5 und 2 m/s bei senkrechter Anströmung. Über die verwendete Konstruktion wurden keine weiteren Angaben gemacht. Die Fahrzeugabmessungen und -zusammensetzung wurde naturähnlich übertragen. Es wurden reale aerodynamisch geformte Fahrzeugmodelle verwendet, sowie eine Fahrzeuggeschwindigkeit, aus der eine maximale Reynoldszahl von ca. 4000 resultiert. Es wurde keine Aussage darüber getroffen, ob die Ergebnisse bereits unabhängig von der gewählten Geschwindigkeit sind und damit keine Änderung der Ergebnisse mit Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit zu erwarten ist. Die Windkanalexperimente wurden mit Naturmessungen verglichen, die aus einer 3-tägigen Meßperiode im Winter stammen. Es wurde eine gute Übereinstimmung mit den Naturmessungen gefunden, aber auf eine notwendige Verbesserung der Windkanalmodellierung verwiesen.

Eine ähnliche Untersuchung mit realen Fahrzeugmodellen an einem Nylonband über einer Linienquelle wurde von Gowda (1998) durchgeführt, aber auch hier muß die Naturähnlichkeit aufgrund zu geringer Reynoldszahlen in Frage gestellt werden.

Weitere Windkanaluntersuchungen wurden durchgeführt, um damit theoretische Ansätze zu überprüfen, die die Schadstoffausbreitung und den Nachlauf von Fahrzeugen beschreiben (Eskridge und Hunt (1979), Eskridge et al. (1979), Eskridge und Thompson (1982) und (Eskridge und Rao (1983)). Eskridge und Rao (1986) untersuchten im Windkanal ein idealisiertes, scharfkantiges Fahrzeug. Das Fahrzeug wurde stationär im Windkanal montiert und der Boden darunter mit Windgeschwindigkeit bewegt. Auf diese

Weise wird ein fahrendes Auto bei Windstille simuliert. Die idealisierte Form des Fahrzeugs wurde gewählt, um die notwendige Mindestgeschwindigkeit herabzusetzen und eine größere Unabhängigkeit vom verwendeten Fahrzeugtyp zu erzielen. In $30 H$ Höhen H Entfernung wurden Konzentrationsprofile gemessen. Diese Ergebnisse wurden genutzt, um ein numerisches Ausbreitungsmodell zu validieren, indem die Diffusionskoeffizienten modifiziert wurden. Für eine Entfernung von $60 H$ wurde dann das Ergebnis prognostiziert. Da das Modell an diesen Messungen eingestellt wurde, konnte somit erwartungsgemäß eine gute Übereinstimmung mit den Windkanalmessungen gezeigt werden. Ein ähnliches Ergebnis zeigte später Lienhart et al. (1995) bei der Windkanalmessung um einen Pkw, bei der eine geringere Konzentration mit geringeren Fahrzeuggeschwindigkeiten und umgekehrt zu beobachten war. Dies beschrieben Eskridge et al. (1991) mit einem weiteren Vergleich von Windkanalmessungen mit demselben numerischen Modell, welches auch vorher von ihnen verwendet wurde.

Thompson und Eskridge (1987) untersuchten im Windkanal nochmals das idealisierte scharfkantige Fahrzeug. Hierbei wurde das gegenläufig rotierende Wirbelpaar im Nachlauf des Fahrzeugs genauer betrachtet, welches sich im Mittel bei bestimmten Bedingungen einstellt. Dies ist allerdings für die Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz im Windkanal unwesentlich, da nicht notwendigerweise die Einzelheiten zwischen den Fahrzeugen simuliert werden müssen, sondern insgesamt der Einfluß der Fahrzeug-erzeugten Wirbel auf die Umgebung zu modellieren ist. Da dieser sogenannte Tütenwirbel durch bereits nachfolgende Fahrzeuge wieder zerstört wird, bleibt diese Struktur also nur für die Größenordnung einer Sekunde unverändert bestehen. Was verbleibt, ist eine Durchmischung im Nachlauf der Fahrzeuge, dieses ist der Aspekt, der für die Modellierung wichtig ist.

Der beobachtete vertikale Einflußbereich der Fahrzeuge wird in der Literatur mit guter Übereinstimmung angegeben unabhängig davon, ob die Daten aus einer Straßenschlucht stammen oder aus offenem Gelände. Dies ist auch plausibel, da es hier um den direkten vertikalen Einflußbereich um die Fahrzeuge geht, bei dem z.B. eine Bebauung am Straßenrand keine Rolle spielt. Bei Eskridge et al. (1991) wird er mit knapp der doppelten Fahrzeughöhe (entspricht ca. $2.6 m$) angegeben. Ab dort findet sich kein Unterschied mehr bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten. Bei Houseaux (1997) ist in den

Naturmessungen noch ein Effekt in ca. 3 m Höhe sichtbar, darüber ist er offensichtlich zu vernachlässigen. Bei Sedefian et al. (1981) wurde der Einflußbereich mit ca. 3 m angegeben.

2.6 Modellierungsansätze für die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz

Bislang gibt es für die kleinmaßstäbliche Modellierung im Windkanal nur einen Modellierungsansatz, der auf Ähnlichkeitstheoretischen Überlegungen basiert.

Brilon et al. (1987) entwickelten eine Windkanalmodellierung, bei der die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz durch auf umlaufenden Nylonbändern montierte Holzplättchen berücksichtigt wurde. Die Größe der Holzplättchen wurde aus Ähnlichkeitstheoretischen Überlegungen über die aerodynamische Querschnittsfläche der zu modellierenden Fahrzeuge definiert. Durch die Wahl dünner scharfkantiger Plättchen erhöht sich der Fahrtwiderstand gegenüber realer Fahrzeuge, wodurch das Verhältnis der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Anströmgeschwindigkeit geringer ausfallen kann als in der Natur. Gleichzeitig existiert durch die scharfkantige Auslegung der Plättchen eine kritische Reynoldszahl, so daß die Ergebnisse der Messungen für die gewählte Modellgeschwindigkeit von 85 km/h unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit sind. Aus Ähnlichkeitsgesetzen wurden weitere Modellierungsvorschriften abgeleitet, so daß Abstand, Verhältnis von Lkw- zu Pkw-Anteil, sowie Anzahl und Richtung der Spuren übereinstimmen müssen. Die Modellierung wurde für den Fall einer vierspurigen Autobahn durchgeführt, liefert aber keine Aussagen zur Modellierung oder zum Einfluß von Fahrzeugen in komplexen Bebauungsstrukturen. Die Modellierungsstrategie an sich wurde nicht weiter durch Parametervariationen oder anhand von Vergleichen mit realen Fahrzeugen getestet.

Plate (1982) stellte das erste Modellkonzept zur Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz auf. In diesem als Leistungsbilanz formulierten Ansatz wurde die Turbulenzproduktionszahl T_p definiert, die das Verhältnis von Turbulenzproduktion durch die Fahrzeugbewegung zur Turbulenzproduktion durch die Windströmung zugrunde legt. Gemäß der Ähnlichkeitstheorie muß demnach diese Turbulenzproduktionszahl T_p für Modell (Index M) und Natur (Index N) denselben Wert annehmen, um gültige Ergebnisse zu liefern:

$$T_{P_N} = \left[\frac{c_w \cdot n_v \cdot A_v}{c_f \cdot B} \cdot \frac{u_v^3}{u_\delta^3} \right]_N = \left[\frac{c_w \cdot n_v \cdot A_v}{c_f \cdot B} \cdot \frac{u_v^3}{u_\delta^3} \right]_M = T_{P_M} \quad (13)$$

Hierbei entsprechen c_f dem Reibungsbeiwert des Untersuchungsgebietes, c_w dem Widerstandsbeiwert der Fahrzeuge, n_v ihrer Anzahl, A_v der Querschnittsfläche der Fahrzeuge, u_v der Fahrzeuggeschwindigkeit, u_δ der Anströmgeschwindigkeit. B beschreibt eine charakteristische Länge, hier die Straßenbreite. Die Straßenbreite ist auch insofern ein wichtiger Parameter, da es zu Reflektionen der Turbulenz an begrenzenden Häuserwänden kommen kann. Für einen allgemeingültigen Parameterisierungsansatz ist er jedoch zweifelhaft, da Fahrzeuge immer Turbulenz erzeugen, unabhängig davon, ob eine Bebauung vorhanden ist oder nicht. Rastetter (1997), Kastner-Klein et al. (1998) und Kastner-Klein (1999) bauten auf diesem Ansatz auf und erweiterten ihn durch Grundsatzuntersuchungen. Über die Ähnlichkeitstheorie würden eigentlich gleiche Widerstandsbeiwerte für Natur und Modell gefordert:

$$c_{w_N} = \left[\frac{F_w}{1/2 \rho u^2 A_v} \right]_N = \left[\frac{F_w}{1/2 \rho u^2 A_v} \right]_M = c_{w_M} \quad (14)$$

F_w entspricht hierbei der Widerstandskraft von Fahrzeugen bzw. der Modellkörper. Nach Umformulierung dieser Gleichung und Berücksichtigung des Maßstabes wird die Fläche der verwendeten Modellkörper somit direkt über

$$A_{v_M} = \frac{A_{v_N}}{M^2} \cdot \frac{c_{w_N}}{c_{w_M}} \quad (15)$$

berechnet. M gibt hierbei den Maßstabsfaktor an. Werden jedoch für die Modellierung vom Naturfall unterschiedliche Körper verwendet, besitzen diese auch unterschiedliche Widerstandsbeiwerte. Dies wurde dann bei der Berechnung der Größe der Modellkörper kompensiert. Die schon aus Gl. (13) bekannten Terme können zu einem weiteren Ähnlichkeitskriterium umformuliert werden (Rastetter (1997), Kastner-Klein (1999)), wobei a_N und a_M zwei dimensionslose Faktoren bezeichnen:

$$\left[\underbrace{\left(\frac{c_w \cdot n_v \cdot A_v}{c_f \cdot B} \cdot \frac{u_v^3}{u_\delta^3} \right)}_{a_N} \right]_N = \left[\underbrace{\left(\frac{c_w \cdot n_v \cdot A_v}{c_f \cdot B} \cdot \frac{u_v^3}{u_\delta^3} \right)}_{a_M} \right]_M \quad (16)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{u_{v,N}/u_{\delta,N}}{u_{v,M}/u_{\delta,M}} \right)^3 = \frac{a_M}{a_N} \equiv a \quad (17)$$

Der Parameter a entspricht hierbei dem Verhältnis der Verkehrsdichte im Modell zur Natur. Rastetter (1997) und Kastner-Klein (1999) zeigten, daß gemäß dieses Ansatzes verschiedene Verkehrsdichten a im Vergleich zur Natur durch unterschiedliche Geschwindigkeitsverhältnisse kompensiert werden können. Die Geschwindigkeit, mit der die Plättchen durch einen Riemenantrieb bewegt werden, wird durch den obigen Ansatz ebenfalls festgelegt. Der Ansatz besagt, daß nicht die Fahrzeuggeschwindigkeit allein zu modellieren ist, sondern das Geschwindigkeitsverhältnis von Fahrzeug- zu Anströmgeschwindigkeit. Aus Gl. (17) wurde durch Umformulierung ebenfalls ein Potenzgesetz abgeleitet, was die Verteilung der dimensionslosen Konzentration bzw. der Schadstoffemission mit der Geschwindigkeit verbindet über:

$$c^* = f(\sqrt[3]{a} \cdot u_v/u_\delta) \quad (18)$$

In dem hier beschriebenen Ansatz nach Kastner-Klein (1999) wurde nicht nach Personen- und Lastkraftwagen unterschieden, sondern es wurde durch Wichtung des Widerstandsbeiwertes ein 10-%iger Anteil an Lastkraftwagen berücksichtigt. Es wurde somit für alle durchgeführten Meßfälle nicht unterschieden zwischen den verschiedenen Effekten, die Pkw's und Lkw's auf die Strömung ausüben. Eine Unterscheidung würde eine Überprüfung des Modellierungskonzeptes ermöglichen, in dem das Konzept anhand der Pkw's entwickelt und dann auf Lkw's angewendet wird.

Dieser beschriebene Modellierungsansatz der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz stellt den momentanen Kenntnisstand der Windkanalmodellierung dar und ist der bislang am besten dokumentierte und erprobteste Ansatz, der derzeit verfügbar ist. Die letzten Arbeiten, in denen dieser Ansatz zu Grunde gelegt wurde, beschäftigten sich weitgehend mit der Auswirkung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz auf die Schadstoffausbrei-

tung. Eine Überprüfung des Ansatzes fand statt durch theoretische Annahmen in Bezug auf das zu modellierende Geschwindigkeitsverhältnis von Riemenantrieb zu Anströmgeschwindigkeit, die durch Messungen bestätigt werden konnten (Kastner-Klein (1999)). Dieser Ansatz besitzt jedoch zwei wesentliche Einschränkungen, die die Motivation für die hier durchgeführte Arbeit gaben. Zum einen besitzt das hier beschriebene Konzept nur einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich, in dem der für die Modellierung wichtigste Fall der Windstille nicht abgedeckt wird. Zum anderen erzeugen die Plättchen auch aufgrund der hohen verwendeten Modellierungsgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s einen unrealistischen Transporteffekt, der so in der Realität von Fahrzeugen nicht erzeugt wird. Diese beiden Einschränkungen lassen es als notwendig und sinnvoll erscheinen, die Modellierungsstrategie erneut zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern.

2.7 Weiteres Vorgehen

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit besteht in der Überprüfung, Verbesserung und Weiterentwicklung einer Modellierungsstrategie für die physikalische Modellierung Kraftfahrzeug-induzierter Turbulenz im kleinskaligen Windkanalmodell. Aus der Dimensionsanalyse und der Literaturstudie kann nun das weitere Vorgehen abgeleitet werden. Die Dimensionsanalyse liefert als Modellkonzept die Verwendung von Wirbelgeneratoren auf einem Riemenantrieb, der über einer Linienquelle betrieben wird. Hieraus ergeben sich die folgenden, zunächst noch freien, Parameter: die Form, Größe und Abstand der Plättchen, sowie die Geschwindigkeit des Riemenantriebs. Die Form wurde bislang als Plättchen angenommen, hieran wird einstweilen festgehalten. Die Größe der Plättchen kann aus der Dimensionsanalyse mit der mittleren Querschnittsfläche von Fahrzeugen angegeben werden. Es wird keine Unterscheidung getroffen nach Fahrzeugform oder Fabrikat, sondern es wird ein mittlerer Wert bestimmt. Der Abstand und die Geschwindigkeit der Plättchen bzw. des Riemenantriebs sollte sich nach den Naturvorgaben richten, gemäß dessen später modelliert werden soll. Dies wird auch durch die Experimente überprüft.

Um sich einen Überblick über die Wirkungsweise von Plättchen und dem Riemenantrieb zu verschaffen, wurde ein Riemenantrieb in einer Straßenschlucht konstruiert, der mit Plättchen bestückt wurde. In einem Abstand, der der Position von realen Meßstationen zur Straße entspricht, wurden Turbulenzintensitäten gemessen. Hierbei wurden in Bezug

auf Geschwindigkeit, Fahrzeugdichte und Meßposition verschiedene Szenarien modelliert, die Aufschluß über die Wirkungsweise der Plättchen geben. In einem weiteren Experiment wurden dann Konzentrationsmessungen durchgeführt, da sich, wenn das Plättchenkonzept Gültigkeit besitzt, um Fahrzeuge und um die Plättchen die gleichen Konzentrationsverteilungen einstellen müssen. Anhand dieser Ergebnisse wurde eine Anpassung der Plättchen bzgl. ihrer Form, Größe und Abstände vorgenommen. Dies wurde dann durch Turbulenzmessungen überprüft. Im Ergebniskapitel werden dann die Schlußfolgerungen gezogen, die sich aus dieser Versuchserie ergeben haben.

3 Windkanalmodellierung

3.1 Funktionsweise und Aufbau des Göttinger Kanals

Die Untersuchungen zur Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz wurden in zwei Windkanälen des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg durchgeführt, die im folgenden beschrieben werden. Hierbei handelt es sich um einen Windkanal Göttinger Bauart (Abb. 2) und einen Grenzschicht-Windkanal (Abb. 3). Der Windkanal Göttinger Bauart besitzt ein, über den Austrittsquerschnitt betrachtet, weitgehend gleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil mit geringer Turbulenz, der aufgrund dieser Eigenschaft hauptsächlich zum kalibrieren von Meßgeräten genutzt wird. Durch die Umlaufbauweise werden Windgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s im Freistrahle erreicht.

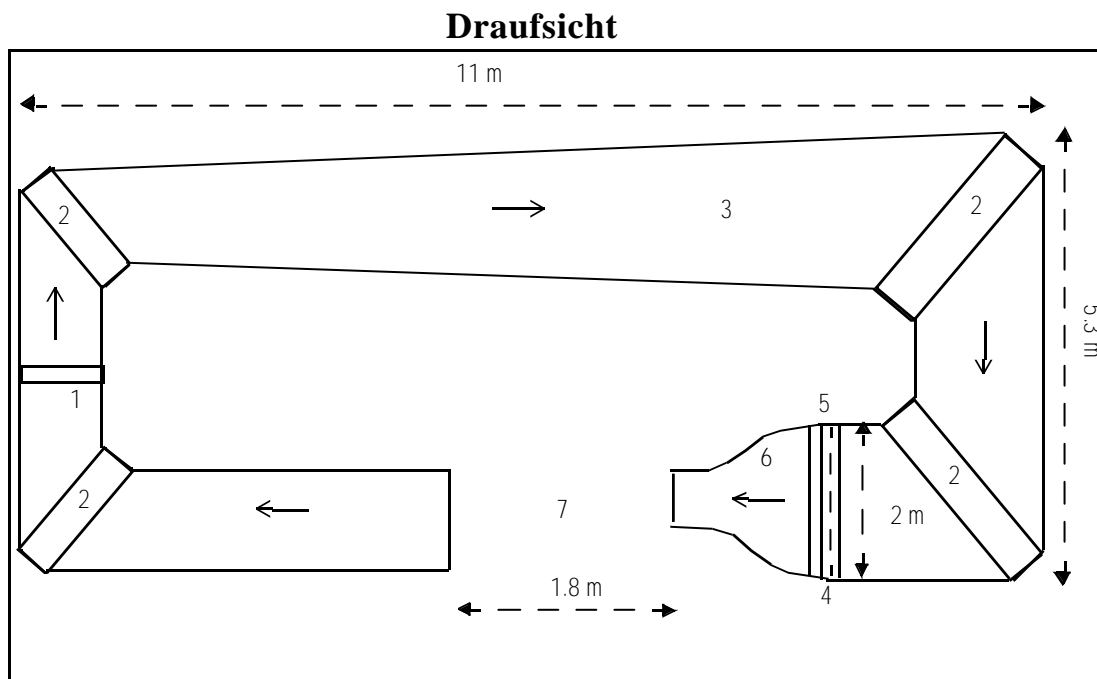


Abb. 2 Prinzipskizze des Umlauf-Kanals nach Göttinger Bauart des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg. Die Pfeile geben die Strömungsrichtung an.

Im Betrieb wird der Axialventilator, der den Luftstrom antreibt, (1) über einen Riemenwahlweise, je nach gewünschtem Geschwindigkeitsbereich, von einem Gleichstrommotor oder einem Wechselstrommotor angetrieben. Umlenkschaufeln (2) verhindern Ver-

wirbelungen der Strömung in den Krümmungen des Windkanals. Durch eine Querschnittserweiterung (3) des Rundlaufs wird die Geschwindigkeit herabgesetzt, um auf diese Weise den Energieverlust durch ein Abbremsen der Strömung an den Sieben (5) gering zu halten, mit denen Inhomogenitäten in der Strömung reduziert werden. Ein aus grobmaschigen Blechwaben bestehender Gleichrichter (4) zerstört größere Wirbel und Querbewegungen. Eine Kontraktion der Düse (6) von $4:1$ bewirkt eine Beschleunigung der Strömung und reduziert gleichzeitig verbliebene Querströmungen durch Streckung der Wirbelfäden.

Aufgrund der durch die geschlossene Führung des Windkanals entstehenden Windkanalkrümmung verläuft die Strömung in der rechten Hälfte des Strahlkerns (stromauf betrachtet) geringfügig schneller als in der linken Hälfte. Die relative Abweichung der Strömungsgeschwindigkeit vom Mittelwert innerhalb des Strahlkerns bleibt jedoch bei $\pm 1\%$. Die Meßstrecke (7) ist ca. 1.8 m lang, 1.2 m breit und von allen Seiten frei zugänglich.

3.2 Funktionsweise und Aufbau des Grenzschichtwindkanals

Ein weiterer Teil der Experimente wurde im vorher erwähnten Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg durchgeführt (Abb. 3). In diesem Windkanal werden neutrale Grenzschichten in Maßstäben zwischen $1:200$ - $1:1000$ simuliert.

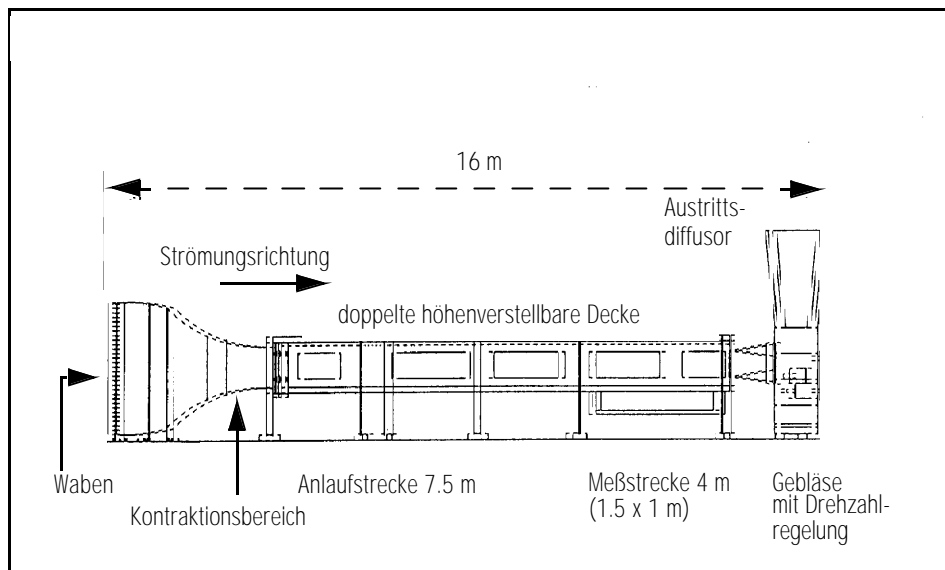


Abb. 3 Prinzipskizze des neutralen Grenzschichtwindkanals des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg (aus Donat (1995))

Der Windkanal arbeitet im Saugbetrieb. Hierdurch wird die Ausbreitung von Störungen, die durch ein nicht ganz gleichförmig laufendes Gebläse erzeugt werden können, minimiert. Die Kontraktion des Querschnitts von $4:1$ sorgt, wie im Falle des Windkanals Göttinger Bauart, vor der Einlaufdüse für eine Beschleunigung und Homogenisierung der Strömung. Die Strömung wird weiterhin gleichmäßig, indem die Strömung ein Wabengitter (engl. Honeycomb) und Turbulenzsiebe passiert. In der 7.5 m langen Anlaufstrecke mit austauschbaren Wirbelgeneratoren und Bodenrauigkeiten wird das Grenzschichtprofil geformt. Die Erzeugung der Grenzschicht für die genannten Maßstäbe basiert auf der Methode nach Standen (1972), durch weitergehende Untersuchungen im Hause modifiziert. Die Wirbelgeneratoren, die den Strömungsquerschnitt am Windkanalboden stärker verbauen als in der Höhe, setzen die Strömungsgeschwindigkeit in Bodennähe herab und erzeugen die großskaligen Wirbel. Durch die Kombination von Bodenrauigkeiten und Wirbelgeneratoren wird eine Scherturbulenz erzeugt, aus der als Folge ein naturähnliches Windprofil resultiert. Mit Hilfe einer verstellbaren Zwischendecke wird im Windkanal der Druckgradient in Strömungsrichtung ausgeglichen, so daß der Druck in Strömungsrichtung wie in der Natur isobarenparallel verläuft d.h. ohne Änderung in Strömungsrichtung. Somit stellt sich eine Gleichgewichtsgrenzschicht konstanter Höhe ein, wie sie in der Natur beobachtet wird.

Der Hauptteil der Untersuchungen der hier vorliegenden Arbeit wurde im Grenzschichtwindkanal durchgeführt, da dieser Windkanal mit der notwendigen Meßtechnik ausgerüstet und einer automatischen Traversierung versehen ist, die mit einer Genauigkeit von bis zu $1/10\text{ mm}$ die Meßpunkte ansteuert. Desweiteren sind die Versuchsbedingungen genauer kontrollierbar und konstant zu halten. Im Umlaufkanal Göttinger Bauart wurden die Laserlichtschnitte durchgeführt, die im Vergleich zum Grenzschichtwindkanal in diesem Kanal einfacher umzusetzen sind.

3.3 Meßtechnik

3.3.1 Geschwindigkeitsmessung

Die Geschwindigkeits- und Turbulenzmessungen wurden mittels Hitzdrahtanemometrie mit I -Draht-Sonden der Firma TSI durchgeführt. Die Messungen basieren auf der Konstanz der Temperatur bzw. eines bestimmten Widerstandswertes des Hitzdrahts. Durch die Anströmung wird dem Hitzdraht Wärme entzogen, was durch eine Änderung des zufließenden Stromes kompensiert wird (Methode des konstanten Widerstands). Die Messung der dazu notwendigen Spannung ist ein direktes Maß für die Abkühlung, die nur von der herrschenden Windgeschwindigkeit abhängt. Das King'sche Gesetz beschreibt das Prinzip der Wärmeübertragung in einer inkompressiblen Strömung bzw. den Zusammenhang der Anemometerausgangsspannung und der Windgeschwindigkeit

$$E^2 = A + B \cdot U^n \quad (19)$$

mit E = Ausgangsspannung des Anemometers [V], A , B , n = Eichkonstanten, U = mittlere Strömungsgeschwindigkeit [m/s]. Aus Gl. (19) kann somit durch die vorher zu bestimmenden Kalibrierkonstanten direkt die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden.

Zur Kalibrierung werden mehr als zwei verschiedene Geschwindigkeiten benötigt, da die Ausgangsspannung des Anemometers nichtlinear zur Geschwindigkeit verläuft. Mit zunehmender Anzahl an Kalibrierungspunkten verringert sich der Fehler bei der Bestimmung der Kalibrierkonstanten. Mit den Kalibrierkonstanten werden dann die ausgegebenen Spannungssignale in Geschwindigkeiten umgerechnet. Der Vorteil der Hitzdrahtanemometrie liegt in der nahezu trägheitsfreien Messung unter hoher zeitlicher Auflö-

sung. Die Grenzfrequenz liegt im Kilohertzbereich. Der Nachteil in der Messung mit *I*-Draht-Sonden besteht darin, daß keine Richtungsinformation der Geschwindigkeit vorliegt. Es wird somit der Betrag des resultierenden Vektors erfaßt, der nicht in die Einzelkomponenten getrennt werden kann. Fehler können durch die Probe selbst erzeugt werden, wenn die Strömung mit mehr als $20\text{-}30^\circ$ Abweichung zur Senkrechten der Probe eintrifft. In diesem Fall erzeugt die Probe selbst einen Störeinfluß. Zum anderen wird mit dem Hitzdraht die Turbulenzintensität bei turbulenten Strömungsvorgängen überschätzt, da keine Richtungsinformation mehr vorliegt (vgl. Müller (1982), Champagne et al. (1967)). Die Begrenzungen dieser Meßmethode sind für die Versuchsdurchführung berücksichtigt worden und stellen kein Problem für die durchgeführten Messungen dar.

3.3.2 Konzentrationsmeßverfahren

Um punktweise Konzentrationen zu messen, können Flammenionisationsdetektoren (FID) eingesetzt werden.

Beim in dieser Arbeit verwendeten Flammenionisationsdetektor handelt es sich um einen Kohlenwasserstoff-Analysator BECKMAN Modell 400 A, der nach der Flammenionisationsmethode den Gesamtkohlenwasserstoffgehalt eines Gases oder einer Gasmischung bestimmt. Hierbei werden in einen Brenner konstante Gasströme von Probegas, Brenngas (Wasserstoff 5.0, $C_{C_nH_m} \leq 0.5$ ppm) und Brennluft (Synthetische Luft, $C_{C_nH_m} \leq 0.1$ ppm) geleitet. Probegas und Brenngas gelangen durch die Brennerdüse in die Flamme, während die Brennluft die Flamme umströmt. Die Gasströme werden durch Druckregler eingestellt. Eine Probenpumpe gewährleistet einen stabilen Gasfluß durch das System. Der Probenfluß verringert sich bei Verringerung des Querschnittes oder Verlängerung der Zuleitungen zum Flammenionisationsdetektor hin. Ein bestimmter Teil des Probegases gelangt über einen Rückdruckregler und eine Probenkapillare in die Brennkammer des FID's. Der Überschuß an Probegas wird durch einen Bypass abgegeben und durch einen Durchflußmesser kontrolliert.

Bei der Verbrennung des Kohlenwasserstoffs entstehen Ionen. Eine Polarisationsspannung zwischen der Brennerdüse und einer Kollektorelektrode erzeugt ein elektrostatisches Feld, das eine Ionenwanderung hervorruft. Der auf diese Weise erzeugte Stromfluß durch die elektrischen Meßkreise ist direkt proportional zu der Kohlenwasser-

stoffkonzentration des Probengases (Donat (1995)). Die Anzeige am Analysator verläuft für die verwendeten Geräte über alle sieben Meßbereiche bis ungefähr 1500 ppm linear, weswegen nur zwei Punkte zur Kalibrierung benötigt werden. Der Nullpunkt wird durch kohlenstofffreie, synthetische Luft gegeben, ein weiterer Kalibrierpunkt mit Prüfgas (760 ppm Ethan). In dem kalibrierten Bereich wird das ausgegebene Spannungssignal direkt in Konzentrationen, hier in ppm , umgerechnet. Die zeitliche Auflösung dieses auch langsamer FID (engl. slow FID) genannten Analysators ist abhängig von der Länge und dem Durchmesser der Schlauchleitungen vom Meßort zum Analysator. Bei den hier durchgeführten Experimenten betrug die zeitliche Auflösung ca. 1 Hz und ist daher gut für die Bestimmung von Konzentrationsmittelwerten geeignet.

Für die Messung von Konzentrationsfluktuationen wird ein schneller Flammenionisationsdetektor (engl. fast FID) CAMBUSTION HFR400 verwendet. Die prinzipielle Funktionsweise entspricht im wesentlichen der des langsamen Flammenionisationsdetektors. Um jedoch zeitlich hoch aufgelöste Konzentrationsschwankungen messen zu können, wird das Absaugvolumen durch Verkürzung der Absaugröhrchen minimiert. Im Gegensatz zum langsamen FID befindet sich beim schnellen FID die Brennkammer außerhalb des Gerätegehäuses und in unmittelbarer Nähe des Meßortes. Die auflösbare Frequenz ist umgekehrt proportional zur Länge des Absaugröhrchens, das allerdings nicht so kurz gewählt werden darf, daß die Umströmung der Brennkammer die Strömung am Meßort beeinflusst. Mit einem extrem kurzen Absaugröhrchen von 40 mm Länge und einem Innendurchmesser von 0.2 mm werden Signalaufösungen von bis zu 400 Hz erreicht.

3.3.3 Strömungsvisualisierung

Die notwendigen Strömungsvisualisierungen wurden mittels Laserlichtschnitt-Verfahren durchgeführt. Strömungsvisualisierungen sind immer dann sinnvoll, wenn man sich einen Überblick über einen Strömungsvorgang z.B. innerhalb komplexer Bebauungen verschaffen will. Dieses Verfahren basiert auf dem Prinzip der Lichtstreuung an kleinen Partikeln. Der Strömung werden Streupartikel zugeführt, die der Strömung möglichst trägheitsfrei folgen sollen. Mit Hilfe einer Zylinderlinse wird ein Laserstrahl in eine Lichtfläche gebrochen. Die Rückstreuung der in der Strömung befindlichen Partikel beleuchten die Visualisierungsebene und machen auf diese Weise turbulente Strukturen im

interessierenden Strömungsgebiet sichtbar. Die Lichtschnitte werden mit einer *CCD*-Kamera erfaßt und über ein rechnergestütztes Bildverarbeitungssystem ausgewertet.

3.3.4 Meßgenauigkeit

Für sämtliche verwendete Meßsysteme befindet sich eine detaillierte Betrachtung der Fehlerquellen und eine Ableitung der Größenordnung des Fehlers in Anhang B. An dieser Stelle soll nur kurz auf das Ergebnis eingegangen werden, um die Genauigkeit der durchgeführten Messungen darzustellen. Für die Geschwindigkeitsmessungen ergibt sich unter Betrachtung der Einzelkomponenten des Meßsystems eine Meßgenauigkeit von ca. 3% vom Meßwert. Diese beinhaltet sowohl systematische Fehler wie Geräteungenauigkeiten und Kalibrierfehler als auch zufällige Fehler wie Druck- und Temperaturschwankungen oder Ableseungenauigkeiten, die in die Reproduzierbarkeit der Messungen eingehen. Diese beschreibt die Wiederholbarkeit der Versuche unter gleichen Bedingungen über einen längeren Zeitraum. Die Reproduzierbarkeit der Geschwindigkeitsmessungen wurde durch wiederholte Messungen mit ca. +/- 2.5% abgeschätzt.

Für die Konzentrationsmessungen ergibt sich auf dieselbe Weise ein Meßfehler von maximal 7% des Meßwertes, die Reproduzierbarkeit für diese Messungen beträgt ca. +/- 5%. Die Reproduzierbarkeit wurde für jede Meßart und jeden Meßfall einzeln durch wiederholte Messungen an speziellen Punkten zu verschiedenen Zeiten bestimmt. Die Reproduzierbarkeit wird ebenfalls durch die Mittelungsdauer der einzelnen Messungen beeinflusst. Für die durchgeführten Messungen wurde ein festes Mittelungsintervall (Block) vorgegeben, das der jeweiligen Meßart durch vorherige Tests (Tag-zu-Tag-Reproduzierbarkeit) angepaßt wurde. Während der Messungen wurden kontinuierlich messend mehrere Blöcke nacheinander durchlaufen, bis der Mittelwert des gerade durchlaufenen Blocks kleiner gleich einem vorzugebenden Fehlerkriterium (Abweichung zum Mittelwert des vorigen Blocks) wurde.

4 Ableitung der Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz

4.1 Die konventionelle Modellierung mit einem Riemenantrieb

Die Modellierungsstrategie der Simulation der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz baut auf der vorher durchgeführten Dimensionsanalyse auf. Hierfür wurden in einem ersten Versuch Plättchen auf einen Riemenantrieb montiert, der mit verschiedenen Geschwindigkeiten innerhalb einer Straßenschlucht bewegt wurde. Dieser Versuch wurde exemplarisch ausgeführt, um die sich durch die Plättchenform und den verwendeten Riemenantrieb ergebenden generellen Effekte aufzuzeigen. Die konventionelle Modellierung mit einem Riemenantrieb wurde im Windkanal Göttinger Bauart des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg umgesetzt. Mittels Hitzdrahtanemometrie wurden die Geschwindigkeiten gemessen und die aus der Standardabweichung resultierende Turbulenz für verschiedene Meßfälle verglichen.

Im Maßstab $M = 1:200$ wurde eine Straßenschlucht mit dem Verhältnis von Höhe H zu Breite B von $1:1$ modelliert. Entlang der Straßenachse wurde ein Riemenantrieb betrieben, auf dem Plättchen mit einer Kantenlänge von $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ montiert wurden. Dies entspricht einem Naturmaß von $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ Querschnittsfläche. Es wurde Richtungsverkehr mit zwei Fahrspuren und einer Verkehrsdichte entsprechend $1\text{ PKW}/30\text{ m}$ und *Fahrspur* simuliert. Der Abstand betrug im ersten Meßfall im Naturmaß 30 m und wurde im zweiten Meßfall verdoppelt auf 60 m . Dies entspricht einem Abstand von ca. 8 bzw. ca. 16 Fahrzeuglängen und somit einem auf die Natur bezogenen schwachen Verkehrsfluß. Dieser große Abstand zwischen den Plättchen erzeugt ein intermittentes Signal, welches aber durch ausreichend lange Mittelungszeiten kompensiert wird. Die für die Geschwindigkeitsmessung verwendete Hitzdrahtsonde wurde, umgerechnet auf Naturmaßstab, in 1.4 m Entfernung und 1 m Höhe positioniert (Meßpunkt $M1$ in Abb. 4). Dies entspricht ungefähr der Position von Fußgängern auf dem Fußweg parallel der Straße. Die Schleppwirkung des Bandes wurde durch eine Messung der Turbulenzintensität neben dem leeren laufenden Band bestimmt. Ein zweiter Meßpunkt wurde mit einer Entfernung von der Straße von im Naturmaßstab 2 m (Meßpunkt $M2$ in Abb. 4) und gleichbleibender Höhe gewählt. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 skizziert.

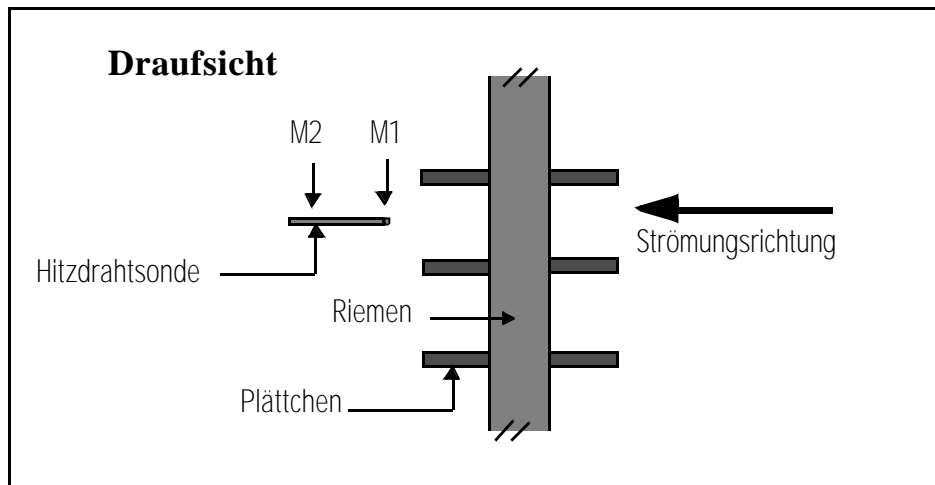


Abb. 4 Schematische Darstellung des Aufbaus für das konventionelle Experiment mit dem Riemenantrieb. Der Meßpunkt *M1* befindet sich in 1.4 m Abstand von der Außenkante der Plättchen. Für den Meßpunkt *M2* wurde die Probe stromab auf 2 m Entfernung im Naturmaß bewegt.

Die in Kapitel 2.6 beschriebene Theorie schätzt lediglich die zweidimensionale Querschnittsfläche der Plättchen ab und erfordert somit eigentlich infinitesimal dünne Plättchen, was hier mit 1 mm Dicke auch gut gegeben ist. In Kastner-Klein (1999) besaßen die Plättchen aus fertigungstechnischen Gründen eine Dicke von ca. 3 mm , die später ebenfalls variiert wurde. Um die Abhängigkeit der Effekte von der Körperform der verwendeten Turbulenzgeneratoren aufzuzeigen, wurden die Plättchen durch Quader mit einer Abmessung von $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ersetzt. Erwartet wird hiervon eine Abnahme des Widerstandes in der Strömung, da sich die Strömung wieder an die Quader anlegt. Sämtliche diskutierten Fälle wurden in der Nullwindsituation durchgeführt, um nur die reinen Effekte der Plättchen in der Strömung zu erfassen. In Abb. 5 werden die durchgeführten Parametervariationen dargestellt. Verglichen wurden von allen Messungen die Mittelwerte der Zeitreihen der Standardabweichung. Alle verwendeten Längenmaße sind im Naturmaß angegeben.

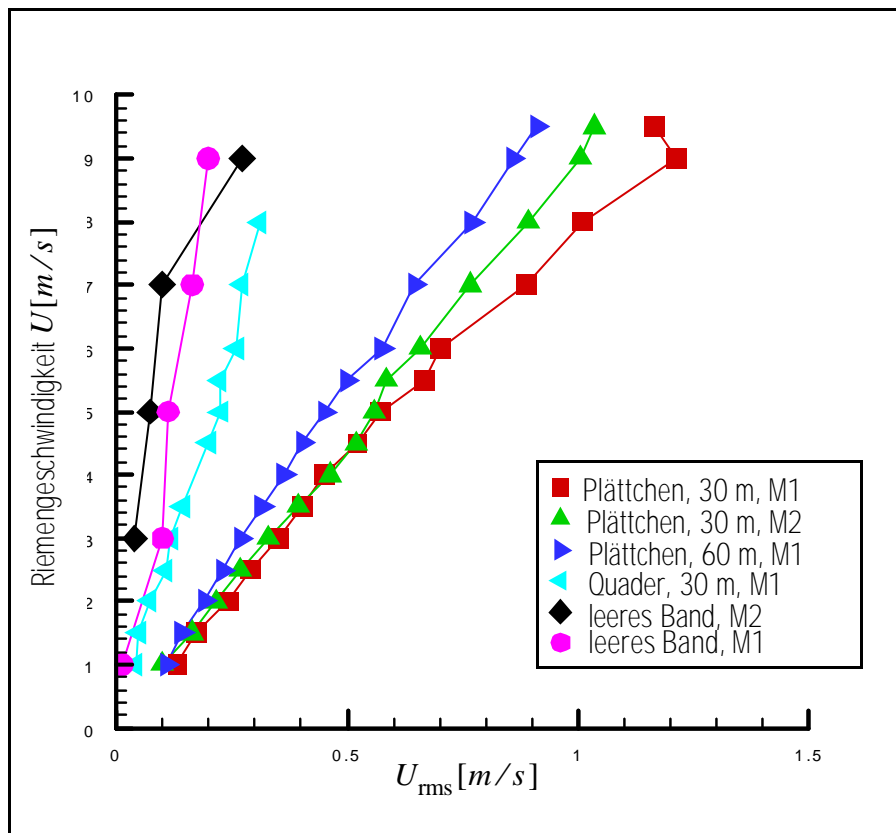


Abb. 5 Darstellung der Turbulenz (Standardabweichung der Geschwindigkeit) der Plättchen an den Meßpunkten *M1* und *M2* gegen die Riemen-geschwindigkeit. Variiert wurde die Geschwindigkeit und der Besetzungszustand des Riemen.

Wird nur das leere Band bei verschiedenen Geschwindigkeiten betrieben, sieht man die Scherungseffekte, die durch das Mitschleppen der über dem bewegten Band befindlichen Luftschichten entstehen. Der Einfluß wird auch noch in einer Entfernung von 2 m statt 1.4 m von den Plättchen gemessen. Die Turbulenzwerte sind hier jedoch deutlich reduziert und betragen für Meßgeschwindigkeiten zwischen 3 und 7 m/s etwa die Hälfte des Turbulenzwertes am dichter gelegenen Meßpunkt. Wird der Riemenantrieb nun mit den Wirbelgeneratoren bestückt, nehmen die Turbulenzwerte deutlich zu. Durch die Plättchen und die zunehmende Geschwindigkeit des Bandlaufs entsteht eine sich verstärkende Scherung. Die Plättchen schieben nun die Luft vor sich her und es setzt ein starker Transport in Bewegungsrichtung ein. Eine größere Plättchendichte erzeugt am weiter entfernten Meßpunkt ein größeres Turbulenzsignal, als eine geringere Plättchendichte in der geringeren Entfernung. Da dieser Versuch lediglich exemplarisch durchgeführt wur-

de um die entstehenden Effekte aufzuzeigen, wurde als Fahrzeugabstand 60 m respektive 30 m gewählt. Im innerstädtischen Verkehr verringern sich die Fahrzeugabstände auf ca. $10 - 15\text{ m}$, d.h. dieser Zustand würde mit einer 2 - 4-fachen Anzahl von Plättchen simuliert werden und es wird deutlich, daß die entstehende Transportwirkung dann noch stärker ausgeprägt wäre. Mit zunehmender Anzahl von Fahrzeugen bzw. Plättchen stellt sich auch eine Erhöhung der Turbulenzwerte ein. Dies geschieht bis zu dem Umkehrpunkt, wo sich die Einzelnachläufe komplett überlagern. Danach resultiert eine Abnahme der Turbulenz bei Überschreitung dieser „kritischen Dichte“ an Fahrzeugen bzw. Plättchen, da diese dann in der Strömung nicht mehr als viele, sondern als ein Körper wirken. Im Gegensatz zu den Plättchen ist zu erkennen, daß die Quader erwartungsgemäß eine deutlich geringere Turbulenz erzeugen, da sich die Strömung seitlich wieder anlegt und somit die Verdrängung und die Wirbelbildung und damit der Widerstand auf diese Weise reduziert wird.

Die Plättchen verdrängen zunehmend mit steigender Geschwindigkeit und abnehmenden Abstand und erzeugen einen kontinuierlich anwachsenden Luftstrom während der Versuchsdurchführung. Dies zeigt, daß die Effekte von aerodynamisch optimierten Fahrzeugen durch diese Plättchen unrealistisch modelliert werden. Aus den Versuchsergebnissen wurde deshalb abgeleitet, daß die Plättchen neu skaliert werden müssen.

4.2 Vergleich des idealisierten Fahrzeugs mit dem Echtmodell durch Strömungsvisualisierung

Um Turbulenzgeneratoren zu entwickeln, die die gleiche Wirkung wie reale Fahrzeuge erzielen, wurde ein vereinfachtes Fahrzeugmodell angefertigt, dessen Strömungsbild mit dem der neu abzuleitenden Turbulenzgeneratoren übereinstimmen muß. Hierfür wurde ein Modell ausgewählt, das eine möglichst charakteristische Pkw-Form in Deutschland repräsentiert. Als Vorlage diente ein Modell eines Ford Escort im Maßstab $1:24$. Um die Modellierung nicht von diesem speziellen Modelltyp abhängig zu machen und die kritische Reynoldszahl schneller zu überschreiten, wurde die Form leicht vereinfacht und als scharfkantiges, idealisiertes Modell aus Styropor nachgebaut. Dies ist eine gebräuchliche Modellierungsstrategie (Eskridge und Hunt (1979)). Die Ähnlichkeit des Originals mit dem Styropor-Modell wurde durch Laserlichtschnitt überprüft. Hierfür wurde das Echt-Modell und das idealisierte Styropor-Modell in einen Lichtschnitt gebracht und mit

einer Geschwindigkeit von ca. 5 m/s im Windkanal Göttinger Bauart angeströmt. Der Vergleich zwischen dem Echt-Modell und dem Styropor-Modell wurde nur für die Horizontale durchgeführt, da die Form der Fahrzeugoberseite für das Styropor-Modell unverändert vom Echt-Modell übernommen wurde.

Für den Lichtschnitt wurde mit dem Laser eine horizontale Ebene ausgeleuchtet. Hierbei wurde zur Raucherzeugung Glycerin verdampft und über eine dünne Kapillare (Innendurchmesser 0.5 mm) seitlich entlang des Echt-Modells bzw. des Styropor-Modells eingeleitet. Der Abstand der Quelle wurde lateral nach außen variiert. Auch hier sind alle Längenangaben im Naturmaß angegeben. Die erste Position gibt mit 0.24 m den Abstand des Meßortes von der Außenkante des Fahrzeugs an. Die nachfolgenden Schnitte wurden in einer Entfernung von 0.96 m , 1.68 m und 2.40 m von der Fahrzeugaußenkante durchgeführt. Die Einleitungspunkte sind mit einem Abstand von 0.72 m äquidistant gewählt worden. Der Meßaufbau ist in Abb. 6 skizziert.

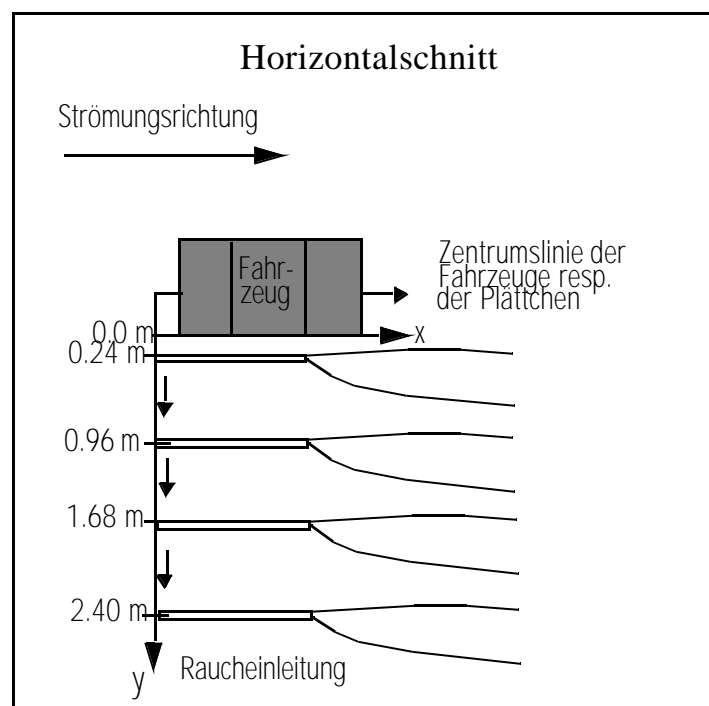


Abb. 6 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus des Laserlichtschnitts. Eingezeichnet ist die Position des Modells zur Einleitung sowie die laterale Verschiebung des Einleitungspunktes nach außen. Maßangaben im Naturmaß.

Mit einer *CCD*-Kamera mit Analog-Ausgang wurden Mittelwertbilder über 10 s aufgenommen. Über eine Auswertesoftware wurde das Mittelwertbild in Falschfarben dargestellt. Die Fläche, die durch den Laserlichtschnitt beleuchtet wurde, ist in Abb. 7 der Anschaulichkeit halber für den Vertikalschnitt exemplarisch dargestellt. Für den Horizontalschnitt wurden lediglich Kamera und Lasersonde miteinander vertauscht, so daß sämtliche Abstände, wie sie in der Abb. 7 angegeben sind, gewahrt bleiben.

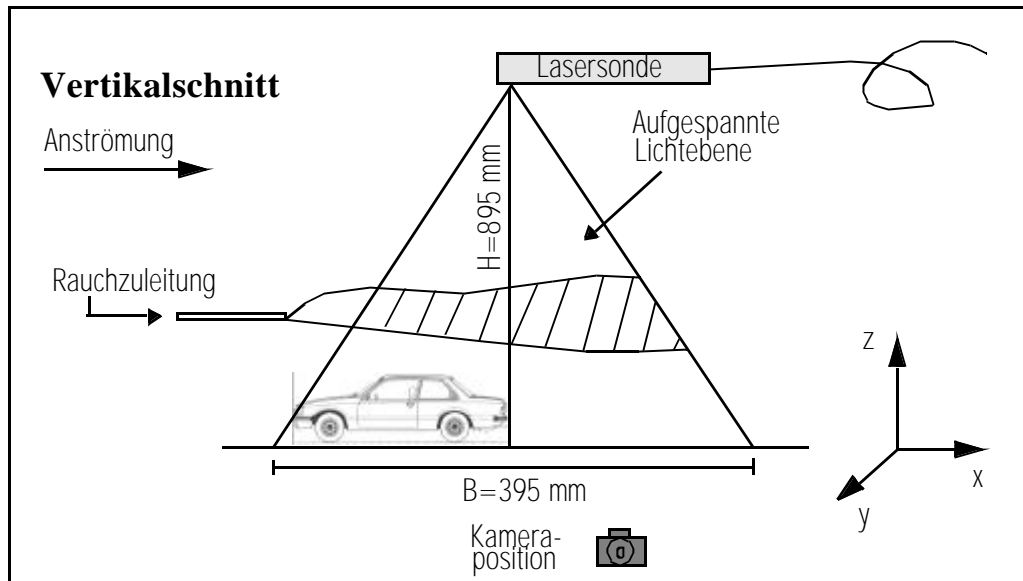


Abb. 7 Die Prinzipskizze des Lichtschnitts zeigt die Position der Lasersonde zum Boden bzw. dem Untersuchungsgegenstand. Die Kamera befand sich in eingezeichneter *y*-Richtung 607 mm vom ersten Meßpunkt entfernt. Maßangaben im Windkanalmaß.

Die verwendete *CCD*-Kamera besitzt eine Auflösung von 756 Bildpunkten (engl. pixel) horizontal und 581 Bildpunkten vertikal für den gesamten Bildausschnitt. Aus dieser geometrischen Kamera-Auflösung und der in Abb. 7 dargestellten Meßfläche mit einer Breite $B = 395\text{ mm}$ und Höhe $H = 895\text{ mm}$, die ebenfalls den gesamten Bildausschnitt repräsentiert, resultiert eine räumliche Auflösung oder Genauigkeit der Bilder von 0.5 mm horizontal und 1.5 mm vertikal. Dies entspricht der theoretischen Genauigkeit, mit der die Informationen aus den aufgenommenen Lichtschnitten gewonnen werden können. Eine weitere Unschärfe besteht darin, daß die Kamera im Bildmittelpunkt fokussiert und, im Gegensatz zum menschlichen Auge, nur zweidimensional „sieht“. Durch diese perspektivische Verzerrung werden die linearen, äquidistanten Abstände der Meßpunkte etwas verzerrt und die Meßpunkte scheinen, wie auf Abb. 9, in sich verringern den Abständen zu liegen. Diese Unsicherheit beträgt im Windkanalmaß mehrere Millimeter,

dies entspricht im Naturmaß einigen Zentimetern und wirkt sich jeweils zu den seitlichen Bildrändern aus.

Die Falschfarbenbilder, die der Auswertungsrechner liefert, zeigen einen Lichtkegel entlang des Fahrzeugs. Die Kegelform wird erzeugt durch die Dichte des eingeleiteten Rauchs. Informationen aus der Dicke des Lichtkegels können jedoch nicht gewonnen werden, da die Menge des Glycerins zur Raucherzeugung nicht exakt konstant gehalten werden konnte und der Lichtkegel somit unterschiedlich breit ausfällt. Für die Auswertung der Falschfarbenbilder wurde deshalb jeweils nur die Neigung der Fahnenachse zum Fahrzeugmodell betrachtet, die durch die Strömungsverhältnisse bestimmt wird. Da die Fahnenachse von der Breite des Lichtkegels unbeeinflusst bleibt, ist sie somit für die Auswertung nutzbar. Um die Fahnenachse bestimmen zu können, wurden über den Bildverarbeitungsrechner bestimmten Helligkeitsstufen in festen Intervallen bestimmte Farbwerte zugewiesen, anhand derer die Fahnenachsen ermittelt wurden. Diese Intervalle wurden für alle Messungen konstant gehalten, ebenso wie die Kameraposition zur Meßebeine. Somit können die Fahnenachsen aus den einzelnen Messungen direkt graphisch miteinander verglichen werden. Abb. 8 stellt das Mittelwertbild eines Lichtschnittes in Falschfarben dar.

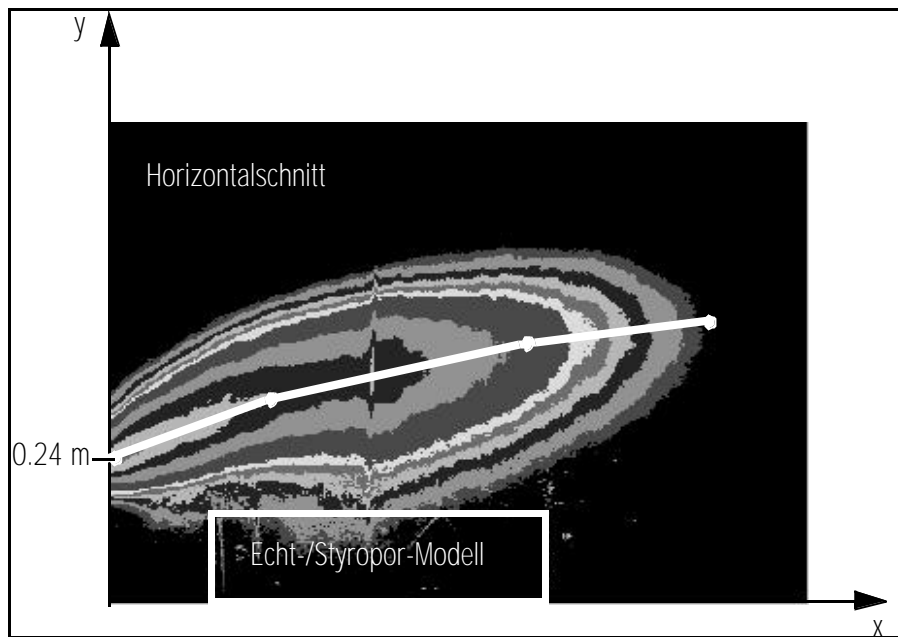


Abb. 8 Abbildung eines Falschfarbenbildes aus dem Horizontallaserlichtschnitt. Der weiße Kasten markiert die Position des Echt- bzw. des Styropor-Modells. Eingezeichnet wurde die Achse der Fahne. Der Meßpunkt (hier 0.24 m) gibt die Entfernung zur Fahrzeugaußenkante an.

Die nachfolgende Abb. 9 zeigt das Ergebnis des Vergleichs zwischen dem Echt-Modell und dem idealisierten Styropor-Modell.

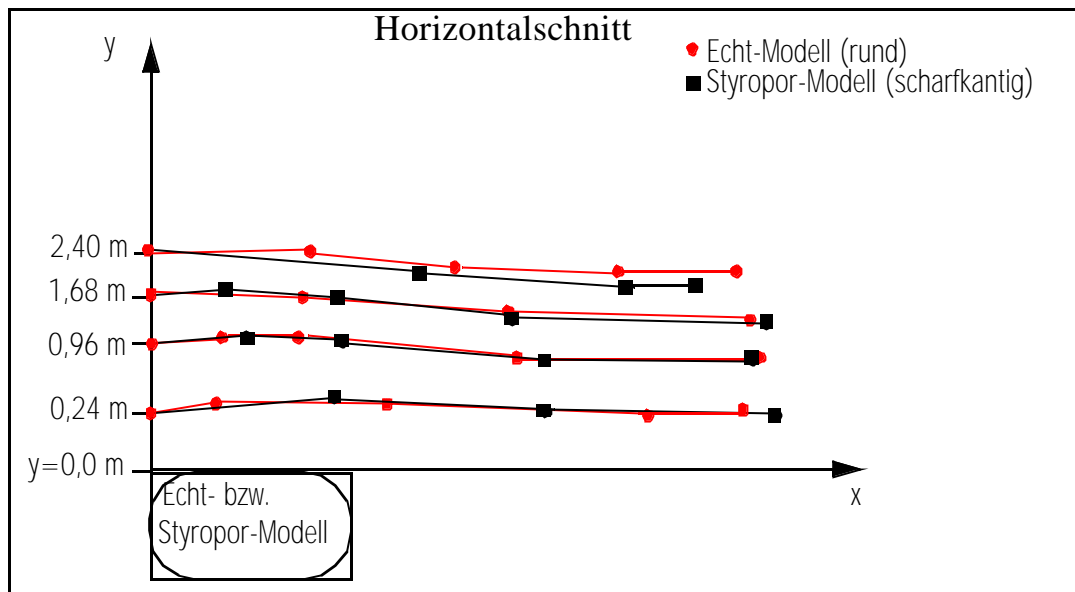


Abb. 9 Überprüfung der Ähnlichkeit zwischen Echt-Modell und dem Styropor-Modell (Maßstab 1:24). Das Rechteck links unten in der Grafik markiert die Position des Echt-Modells bzw. des idealisierten Styropor-Modells. Die Kurven beschreiben die aus den Laserlichtschnitten ermittelten Fahnenachsen entlang der Fahrzeuge.

Im direkten Vergleich des Echt-Modells mit dem idealisierten Modell auf Abb. 9 zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der Fahnenachsen auf allen vier Meßpositionen. In der unmittelbaren Nähe der Fahrzeuge auf Position eins und zwei liegen die beiden Kurven deckungsgleich aufeinander, in der schon entfernten dritten Position (1,68 m) zeigen sich ebenfalls kaum Abweichungen bzw. diese befinden sich innerhalb der vorher beschriebenen räumlichen Auflösung der durch die Bildverarbeitung erzeugten Bilder. In 2,40 m Entfernung zeigt sich eine geringe Abweichung im Naturmaß von ca. 15 cm zwischen Echt- und Styropor-Modell. Da diese Abweichung zum einen ebenfalls durch die räumliche Auflösung der Bilder und zusätzlich durch die perspektivische Verzerrung erzeugt wird und sich zum anderen am Rande des räumlichen Einflußgebietes des Fahrzeugs befindet, wird diese Abweichung bei der Modellierung des Modellkörpers vernachlässigt. Der Gesamtvergleich zeigt jedoch eine so gute Übereinstimmung des idealisierten Modells mit dem Echtmodell, daß die Verwendung des idealisierten Styropor-Fahrzeugs anstelle des Originalmodells zulässig ist.

Mit der gleichen Versuchstechnik wurde auch die kritische Reynoldszahl bestimmt, um die minimale Anströmgeschwindigkeit festzulegen. Hierfür wurde die Geschwindigkeit

soweit erhöht, bis keine Änderung im Strömungsbild mehr auftrat. Die minimale Anströmgeschwindigkeit wurde auf diese Weise mit $U = 3.7 \text{ m/s}$ festgelegt, was einer Reynoldszahl von knapp 14.000 entspricht. Als charakteristische Länge für die Reynoldszahl wurde die Fahrzeughöhe gewählt ($H=0.055 \text{ m}$).

4.3 Vergleich des Konzentrationsfeldes um Fahrzeuge und Plättchen

Im nächsten Schritt wurden Konzentrationsmessungen durchgeführt, um die Umströmungseigenschaften bzw. die -unterschiede der Pkw's und Plättchen detaillierter aufzuzeigen. Wenn die Plättchen die Eigenschaften von Fahrzeugen simulieren sollen, muß sich das Strömungs- bzw. Konzentrationsfeld um diese Plättchen genauso wie um die Fahrzeuge einstellen. Die meßbaren Konzentrationen im Nahfeld der Plättchen werden von den vier Parametern Skalierung (Größe), Abstand, Geschwindigkeit und Form der Plättchen bzw. Turbulenzgeneratoren gesteuert. Um weitere Effekte wie z.B. Transport aufgrund von Scherung entlang der Bewegungsrichtung von der Turbulenzbildung zu trennen und die Anzahl der offenen Parameter zu reduzieren, wurde im ersten Schritt die Modellierung der Fahrzeuggeschwindigkeit weggelassen und der Versuch mit stationären Fahrzeugen bzw. Plättchen ohne Riemenantrieb durchgeführt. Hierdurch entsteht eine Unsicherheit, da der Abtrieb nicht modelliert wird. Der Abtrieb wird durch die Fahrzeugbewegung erzeugt und sorgt, in Abhängigkeit von der Aerodynamik des Fahrzeugs, für den Anpreßdruck des Fahrzeugs auf den Boden. Die unter dem Fahrzeug entstehende Grenzschicht bildet sich nun anders aus als im bewegten Fall und bestimmt, zusammen mit dem Abtrieb, den Nachlauf des Fahrzeugs und damit die Turbulenzentwicklung. Eine geeignete Art der Modellierung besteht darin, das Fahrzeug auf einen beweglichen Boden zu montieren und den Boden mitzubewegen oder die entstehende Grenzschicht unter den Fahrzeugen abzusaugen. Beide Methoden sind jedoch so aufwendig, daß selbst für Fahrzeug-aerodynamische Untersuchungen häufig darauf verzichtet wird. Aus diesem Grund wird auch hier diese Vereinfachung hingenommen.

4.3.1 Versuchsaufbau

In der nachfolgenden Abb. 10 ist der Versuchsaufbau für die Konzentrationsmessungen dargestellt. Im Grenzschichtwindkanal wurden auf einer Grundplatte zehn der Styropor-Modelle in einer Reihe hintereinander mit jeweils zwei Fahrzeuglängen Abstand mon-

tiert. Dies entspricht einer Situation dichten Stadtverkehrs. Der Versuchsaufbau wurde so gewählt, daß Grenzschichteffekte so weit wie möglich reduziert wurden, um auch hier nur den Effekt der Fahrzeuge respektive der Plättchen zu betrachten. Das heißt, es wurde auf die zur Grenzschichterzeugung üblichen Wirbelgeneratoren im Einlauf der Meßstrecke verzichtet, ebenso auf die Lego-Rauhigkeiten auf dem Boden des Windkanals.

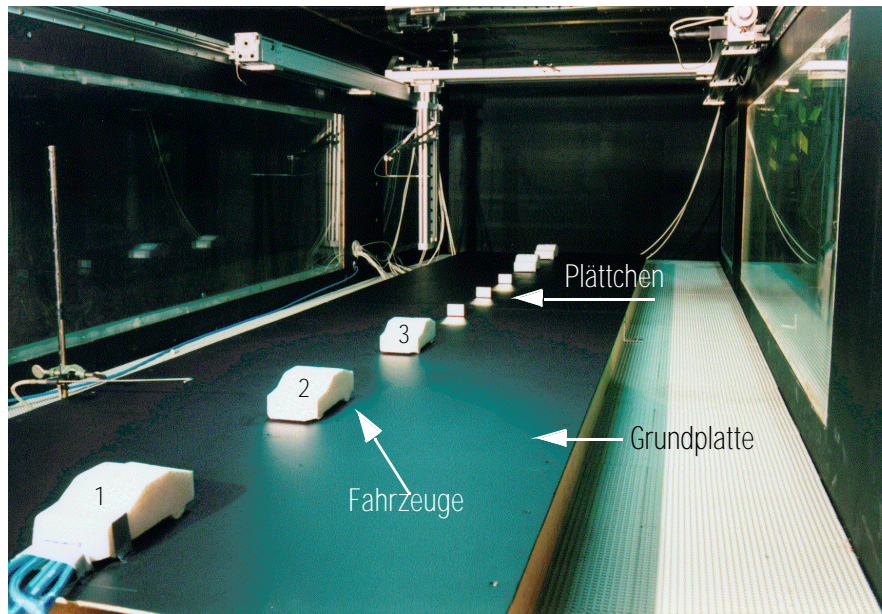


Abb. 10 Aufnahme des Meßaufbaus im Windkanal. Auf einer Grundplatte wurden zunächst in einer Reihe hintereinander die Styropor-Modelle montiert. Die Messungen wurden hinter dem dritten Fahrzeug durchgeführt. Für die nächste Meßreihe wurden dann zwischen dem dritten und sechsten Fahrzeug die Fahrzeugmodelle gegen Plättchen ausgetauscht.

Die für diese Untersuchung verwendete Grundplatte befand sich ca. 12 cm über dem eigentlichen Windkanalboden. Die Höhe der bis zur Grundplatte angewachsenen turbulenten Grenzschicht δ_{turb} auf nicht hydraulisch glattem Untergrund wurde nach Bohl (1998) mit ca. 13 cm abgeschätzt durch:

$$\delta_{turb} = 0.37 \cdot 5 \sqrt[5]{\frac{\nu \cdot x^4}{u(\delta)}} = 0.37 \cdot 5 \sqrt[5]{\frac{1.5 \cdot 10^{-5} \cdot 6.5^4}{5}} = 0.13\text{ m} \quad (20)$$

ν bezeichnet die kinematische Viskosität, x die Lauflänge bis zur Meßstelle und $u(\delta)$ die Freistromgeschwindigkeit in Grenzschichthöhe, 0.37 ist eine empirische Konstante. Die verwendete Grundplatte hebt den Versuchsaufbau somit aus der bereits entstandenen Grenzschicht heraus, um wie beabsichtigt, Grenzschichteffekte zu eliminieren.

Abb. 11 zeigt die Meßebenen. Es wurde in einer horizontalen Fläche auf Höhe der halben Fahrzeughöhe von 0.65 m im Naturmaßstab und einer vertikalen Ebene beginnend in einer Höhe in der Natur von 1.44 m die Konzentration gemessen. Dies entspricht einer Höhe von 12 cm über dem Fahrzeugdach.

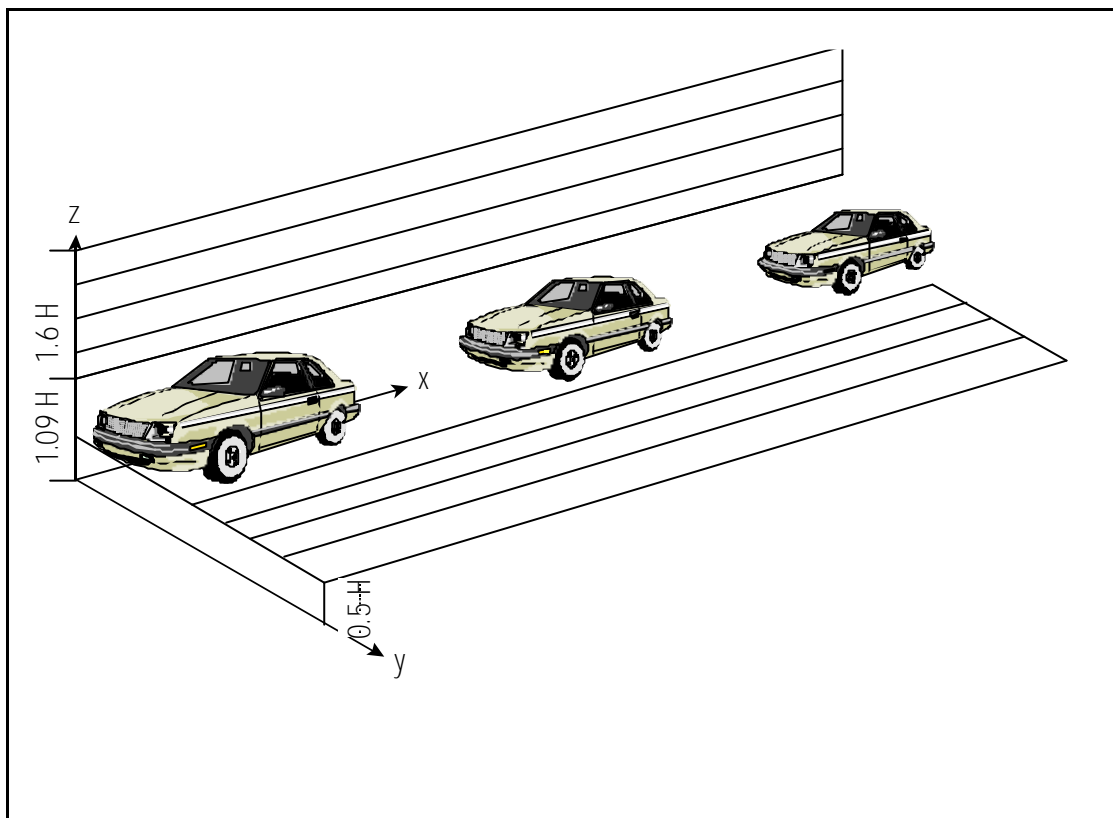


Abb. 11 Darstellung der horizontalen und vertikalen Meßebene. Die horizontale Meßebene lag in mittlerer Fahrzeughöhe, die Vertikale führte entlang der Mittelachse der Fahrzeuge. Die beiden Ebenen wurden in einem Abstand von 12 cm im Naturmaß von der Fahrzeugaußenkante begonnen.

Aus dem ersten Fahrzeug der Reihe wurde in Kofferraumhöhe reines Ethan mit einem Volumenstrom von 0.0017 kg/s emittiert. Die Mittelwerte der Konzentration wurden mit einem schnellen Flammenionisationsdetektor (Fast FID) auf den beschriebenen Ebenen an insgesamt 360 Positionen vermessen (siehe Abb. 12). Der Versuchsaufbau machte für den Flammenionisationsdetektor eine Absaugkapillare von einer Länge L von 650 mm notwendig, woraus eine Meßfrequenz f von knapp 30 Hz resultierte.

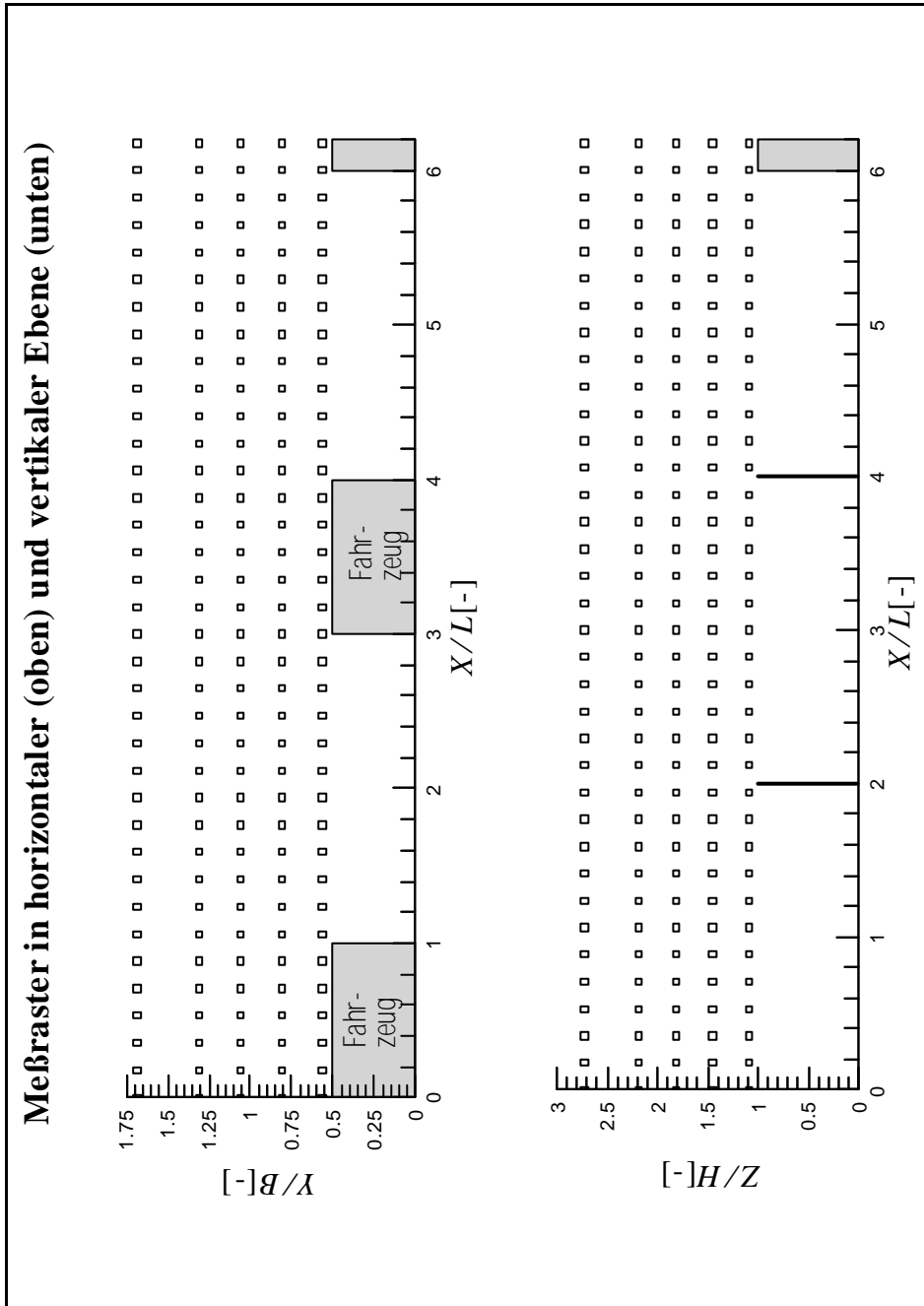


Abb. 12 Darstellung des verwendeten Meßrasters in der horizontalen (oben) und der vertikalen (unten) Ebene. Die Meßpositionen wurden für alle Messungen absolut gehalten, fanden also immer an denselben Positionen statt, unabhängig ob Fahrzeuge oder Plättchen vermessen wurden und unabhängig von der Position der Meßorte zur Position der Modellkörper.

Die Messungen wurden nach dem dritten Fahrzeug begonnen, um eine Verwirbelung der Strömung durch die Fahrzeuge und eine vorhergehende Ausbreitung des Tracergases zu berücksichtigen. Die Messungen wurden entlang der mittleren zwei Fahrzeuge durchgeführt. Diese mittleren zwei Fahrzeuge wurden im nachfolgenden Meßfall ersetzt gegen Plättchen und die Messungen an denselben Positionen wiederholt. Der Ursprung des verwendeten Koordinatensystems liegt im Mittelpunkt der Fahrzeug-Vorderkante (Längsachse) des ersten der beiden Fahrzeuge. Die Meßwerte werden, im Gegensatz zu den normierten Achsen, als unnormierte Konzentrationen c in (*ppm*) angegeben. Da alle Messungen unter den gleichen Bedingungen mit der gleichen Geschwindigkeit durchgeführt wurden, würde die Normierung nur eine Ursprungsverschiebung des Konzentrationswertes darstellen. Aus diesem Grunde wurde hier auf die Normierung der Konzentrationen verzichtet. Ein weiterer Grund wurde jedoch auch schon in Kapitel 2 beschrieben. Die gemessenen Konzentrationen werden mit der Anströmgeschwindigkeit normiert (Gl. (8)). Durch den Bezug auf den späteren Anwendungsbereich der Nullwind- bzw. Schwachwindsituationen stellt man fest, daß dieses eine ungeeignete Normierungsweise ist. Da bislang aber die Parameter, die die Kraftfahrzeug-induzierte Turbulenz bestimmen, noch nicht hinreichend und auch in Bezug auf mögliche wechselseitige Abhängigkeiten geklärt worden sind, wird eine Normierung nach diesem Ansatz hier nicht durchgeführt.

Die Konzentrationswerte wurden somit lediglich Hintergrund-korrigiert, d.h. am Einlauf der Meßstrecke wurde ein weiterer Flammenionisationsdetektor montiert, der die Hintergrundkonzentration c_0 aufzeichnet. Da der Windkanal keinen geschlossenen Kreislauf besitzt, sondern die Luft aus der Halle ansaugt und wieder in diese entläßt, wird die Umgebungsluft ebenfalls kontinuierlich mit dem Tracergas Ethan angereichert. Dieser Hintergrundwert wird zeitgleich mit den Konzentrationsmessungen aufgezeichnet und von diesen für die Auswertung subtrahiert, da sonst die gemessenen Konzentrationen überschätzt würden. Die jeweiligen Achsen wurden mit den entsprechenden Fahrzeugabmessungen normiert, d.h. X/L mit L =Fahrzeuglänge, Y/B mit B =Fahrzeugbreite und Z/H mit H =Fahrzeughöhe. Auf diese Weise werden sämtliche Abmessungen und Ergebnisse direkt auf die Fahrzeugabmessungen bezogen und somit übersichtlicher dargestellt.

4.3.2 Einfluß der Plättchen

Der Einfluß der Plättchen auf die Strömung wurde in einer Sensitivitätsstudie weitergehend untersucht. Hierbei wurden die Parameter Abstand und Größe variiert. Der Abstand der Plättchen wurde über ihre Anzahl (3 und 6) variiert, was ihren Abstand im Naturmaß von 8.16 m auf 4.08 m (zwei, respektive eine Fahrzeuglänge) verkürzt. Die Größe wurde trotz der über die Dimensionsanalyse angedeuteten Skalierung ebenfalls variiert, um diesen Einfluß ebenfalls zu untersuchen. In einem Fall besaßen die Plättchen die gleichen Außenabmessungen wie die Fahrzeuge, dies entspricht Naturmaßen von $B = 1.9\text{ m}$, $H = 1.44\text{ m}$, im weiteren mit „große“ Plättchen bezeichnet. Im anderen Fall wurden die Plättchenabmessungen verkleinert auf die nach Kastner-Klein (1999) berechneten Abmessung nach Gl. (15) mit Naturmaß Breite $B = 0.96\text{ m}$ und Höhe $H = 0.72\text{ m}$, im weiteren mit „kleine“ Plättchen bezeichnet. Die Variationen der überprüften Parameter wird in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der durchgeführten Versuchsserien

Modell	Größe $L \times B \times H$	Abstand
Fahrzeuge	$170\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 55\text{ mm}$	2 Fahrzeuglängen
Plättchen „klein“	$1\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 30\text{ mm}$	2 bzw. 1 Fahrzeuglängen
Plättchen „groß“	$1\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 55\text{ mm}$	2 bzw. 1 Fahrzeuglängen

Die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen für die oben genannten Parametervariationen in der horizontalen Ebene sind in Abb. 13 bis Abb. 20 dargestellt.

Abb. 13a) und b) zeigen den Vergleich der Konzentrationsverteilungen in der horizontalen Meßebeane entlang der x -Achse unter dem Einfluß der Styropor-Modelle bzw. der kleinen Plättchen mit zwei Fahrzeuglängen Abstand.

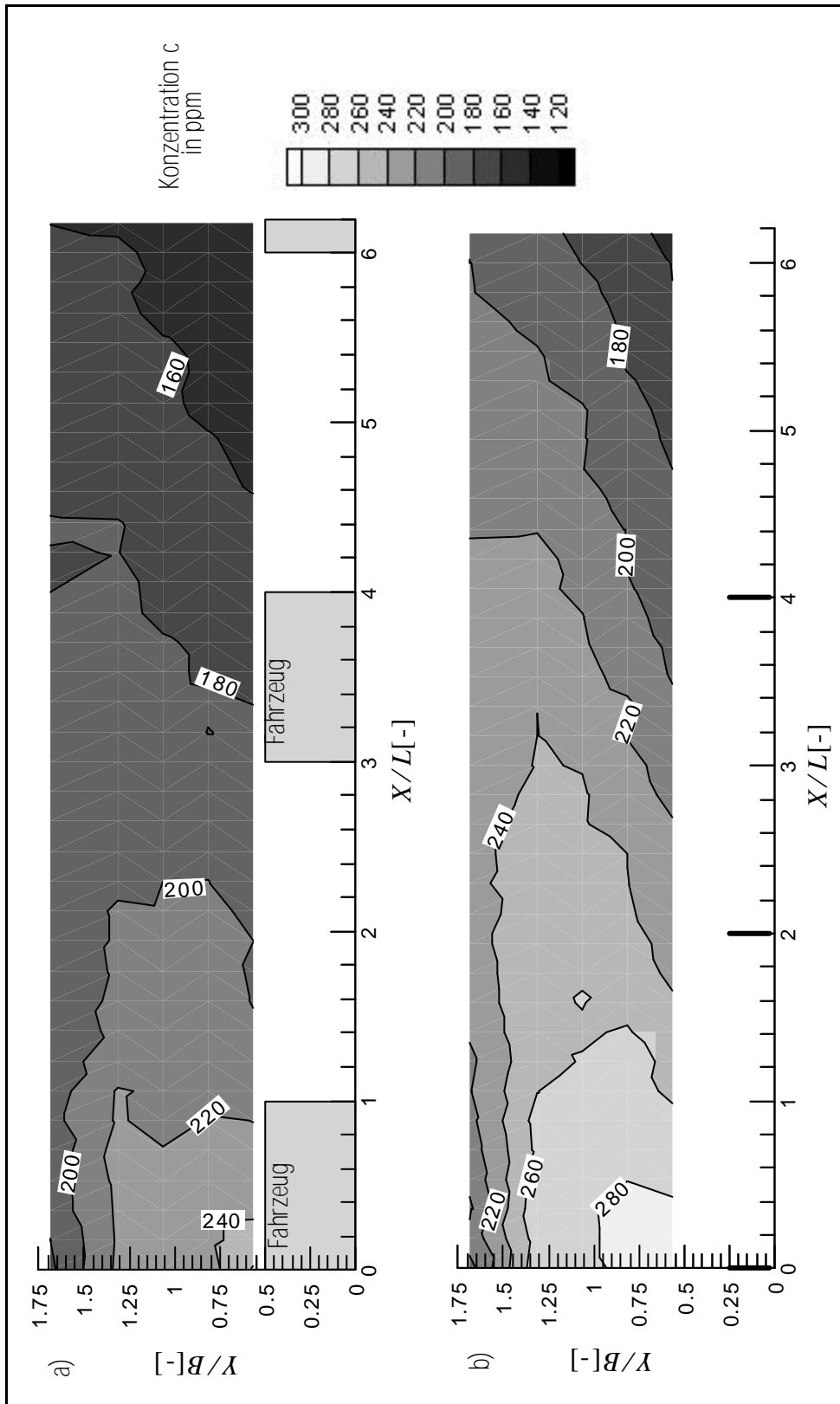


Abb. 13 Vergleich der Konzentrationsverteilung in der horizontalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den kleinen Plättchen (unten) mit jeweils zwei Fahrzeuglängen Abstand.

In Abb. 13a) wird der Kontrollzustand dargestellt. Dies ist die Konzentrationsverteilung, die durch die Fahrzeuge erzeugt wird und durch die Plättchen simuliert werden soll, also eigentlich bei erfolgreicher Modellierung dasselbe Muster der Konzentrationsverteilung erzeugen sollte. Im Vergleich mit Abb. 13b) wird deutlich, daß vor dem ersten Plättchen der Frontwirbel, der vor einem solchen Hindernis entsteht (siehe Anhang A), zusammen mit dem Hufeisenwirbel das Tracergas longitudinal verfrachtet. Die kleinen Plättchen erzeugen einen Aufstau und dann nachfolgend eine starke Verdrängung der Strömung nach außen. Zu Beginn der Meßebeine werden an lokal gleichen Orten die Konzentrationen um die Plättchen um ca. 17-20% im Vergleich zu den Fahrzeugen überschätzt. Diese erhöhten Konzentrationswerte werden über die gesamte Meßebeine gemessen. Zum Ende der Meßebeine, bevor die Fahrzeugreihe wieder einsetzt, beträgt die Abweichung ca. 12 und 25%.

Die Abb. 14b) beschreibt den Einfluß der Plättchen mit nur einer Fahrzeuglänge Abstand. Zum besseren Vergleich wurde erneut die Konzentrationsverteilung des Kontrollfalls mit eingefügt (Abb. 14a)). Prinzipiell werden dieselben Effekte beobachtet wie für den vorigen Fall, nur verstärkt in der Ausprägung. Da hier der Widerstand auf die Strömung durch die erhöhte Anzahl von Plättchen zunimmt, findet man besonders in der Zone um das erste Plättchen stärkere Abweichungen von ca. 25% im Vergleich zu ca. 17% bei der geringeren Plättchenanzahl. Lateral nach außen werden die Konzentrationen um ca. 40% im Gegensatz zu den Fahrzeugen überschätzt, im Falle der Plättchen mit dem größeren Abstand sind es nur ca. 20%. Die Konzentrationen weichen über das gesamte Meßfeld in longitudinaler Richtung um bis zu 44% von den Fahrzeugen ab, wohingegen sich die Abweichung bei der geringeren Anzahl an Plättchen bei ca. 25% hält.

Abb. 15a) zeigt die Konzentrationsverteilung um die Fahrzeuge und Abb. 15b) um die großen Plättchen im Abstand von zwei Fahrzeuglängen. Die darauffolgende Abb. 16a) und b) zeigt den Vergleich zwischen den Fahrzeugen und den großen Plättchen mit einer Fahrzeuglänge Abstand.

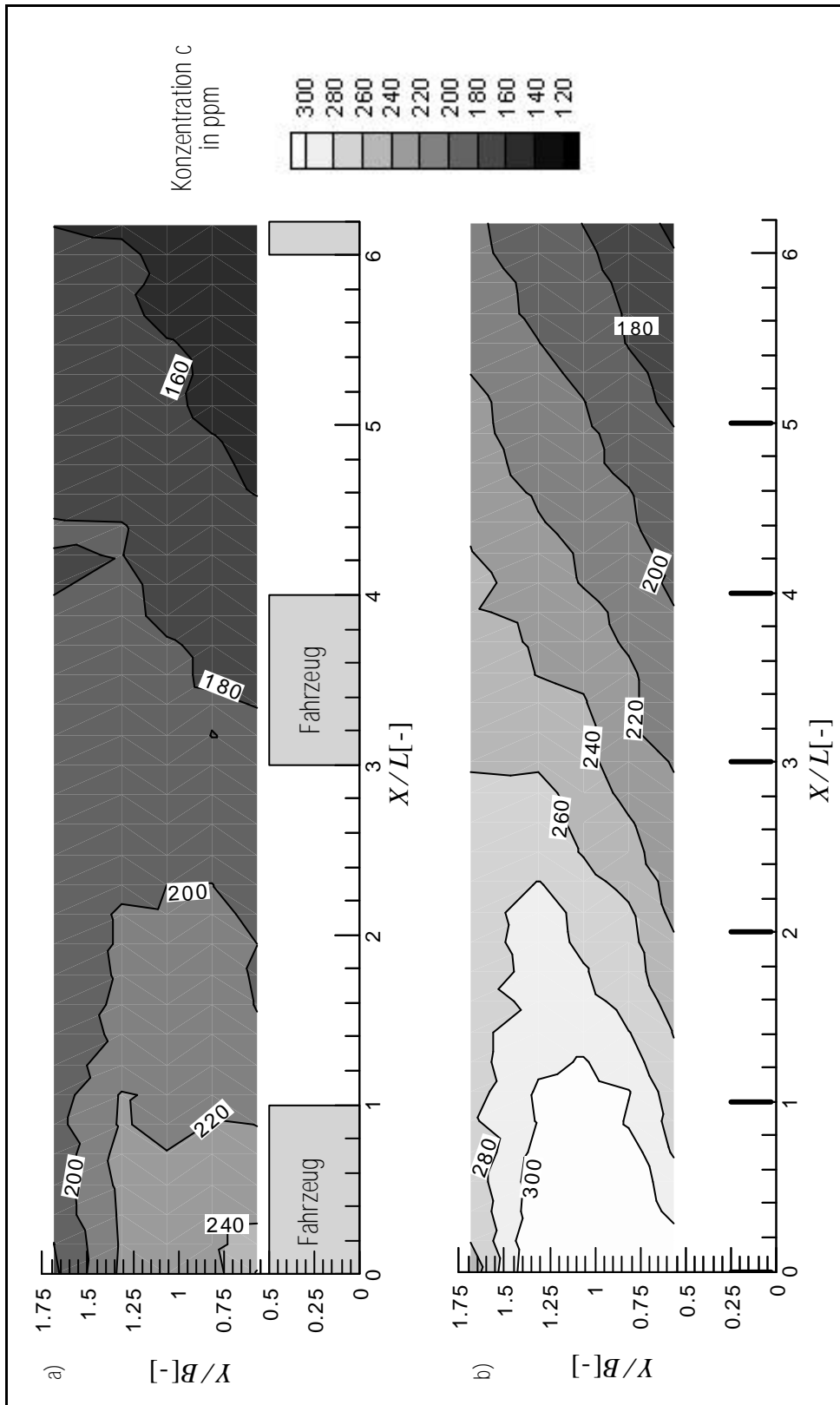


Abb. 14 Vergleich der Konzentrationsverteilung in der horizontalen Ebene zwischen den Fahrzeugen (oben) und den Plättchen mit denselben Abmessungen und auf eine Fahrzeuglänge halbierte Abstände (unten).

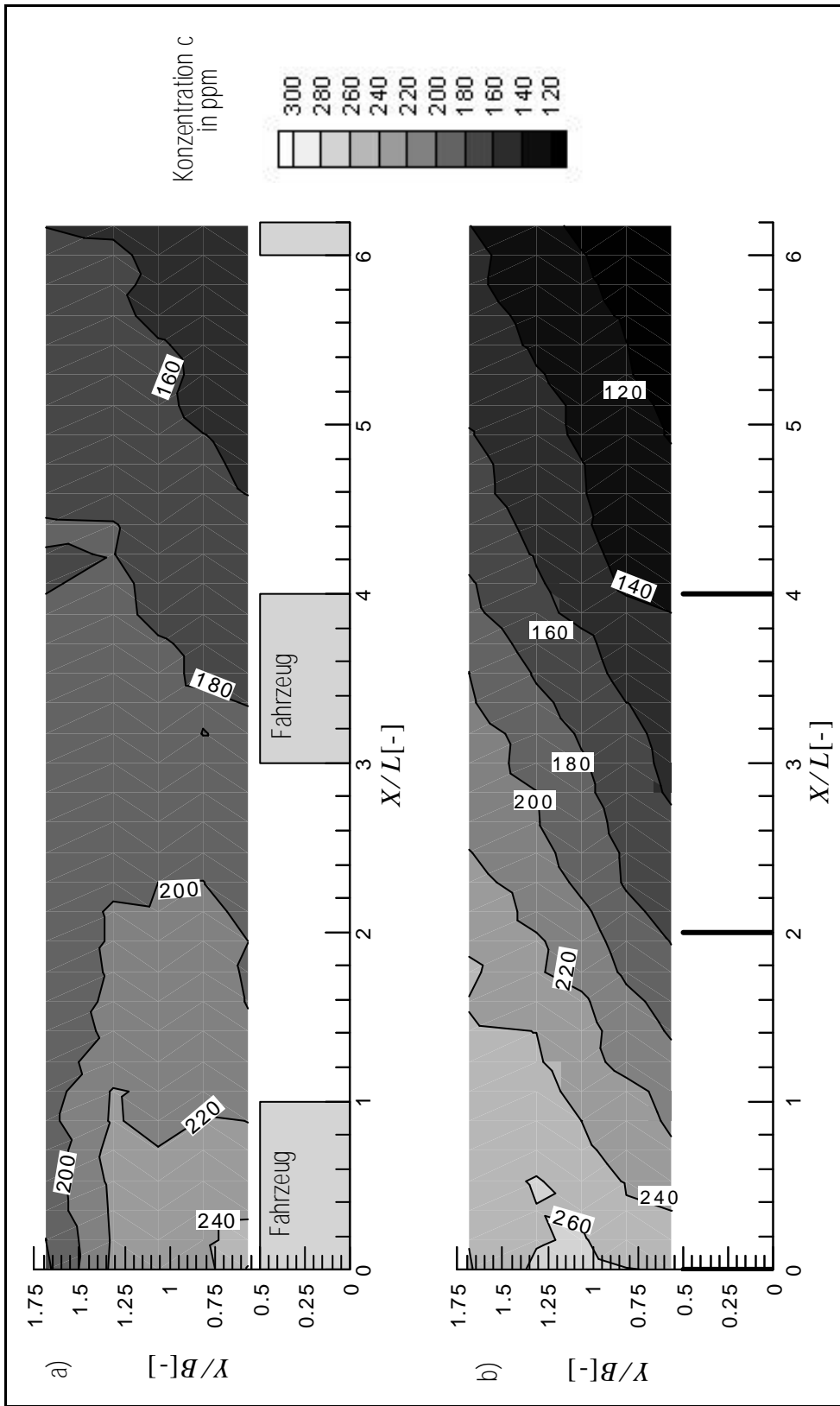


Abb. 15 Vergleich der Konzentrationsverteilung in der horizontalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den großen Plättchen, wieder mit jeweils zwei Fahrzeuglängen Abstand (unten).

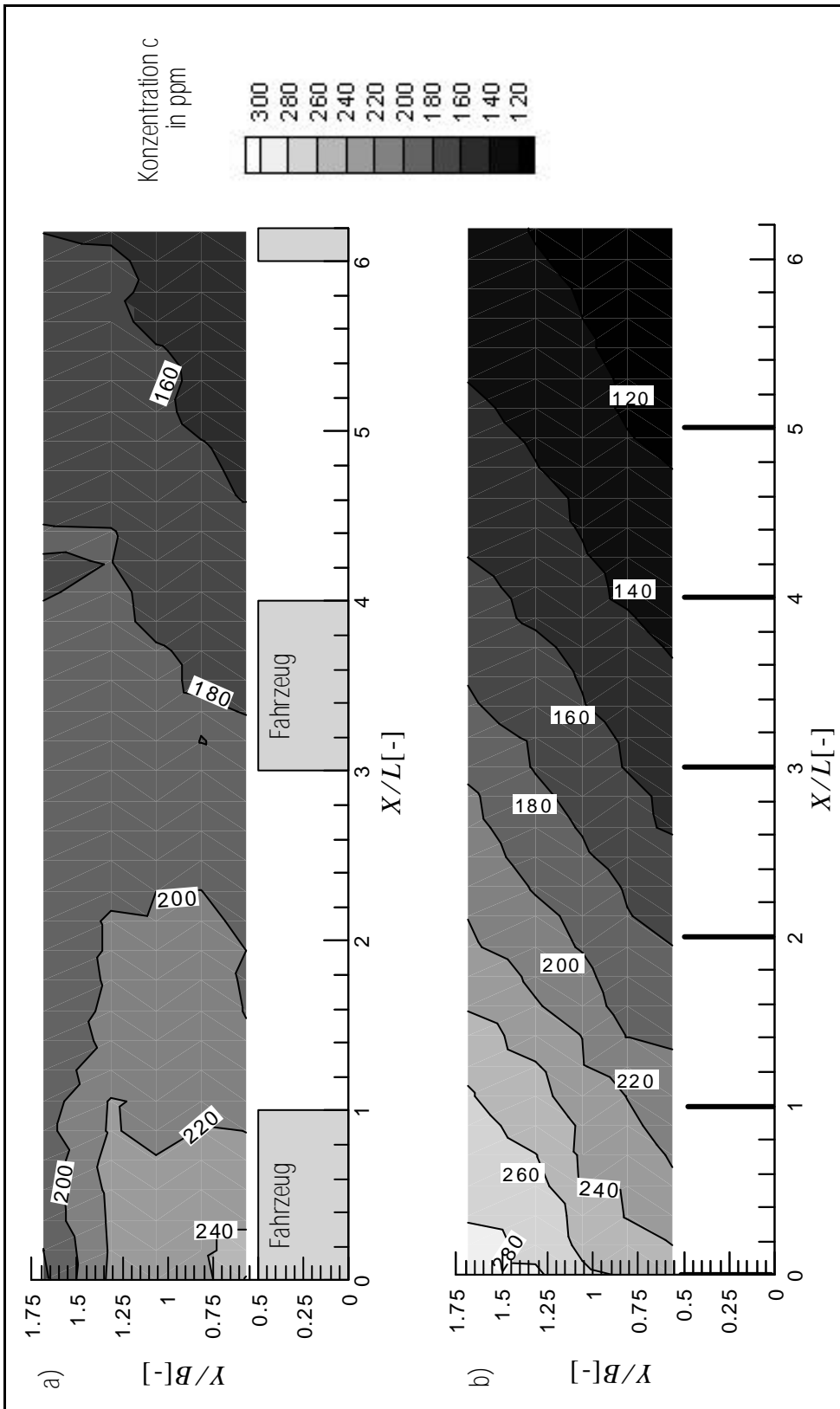


Abb. 16 Vergleich der Konzentrationsverteilung in der horizontalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den großen Plättchen mit denselben Abmessungen wie vorher und wieder auf eine Fahrzeuglänge halbierte Abstände (unten).

Auf diesen Abbildungen wird die Verdrängungswirkung der Plättchen besonders deutlich. Sowohl im Fall der Plättchen mit einer Fahrzeuglänge Abstand als auch mit zweien, tritt zu Beginn der Meßebeine ein Konzentrationsüberschuß von ca. 30 bzw. 40% auf. Gegen Ende der Meßebeine wird daraus in beiden Fällen eine Konzentrationsabnahme um ca. 25% im Vergleich zu den Fahrzeugen, da die starke Verdrängung der Strömung nach außen das Tracergas vorher seitlich wegtransportiert. Im Falle der dichteren Besetzung mit Plättchen tritt das Konzentrationsmaximum zu Beginn der Plättchenreihe weit lateral nach außen verschoben auf. Dies wird durch den Hufeisenwirbel hervorgerufen, der mit zunehmender Plättchenfläche ebenfalls zunächst in seiner horizontalen Erstreckung anwächst.

Der Unterschied in der Konzentrationsverteilung zwischen den Fahrzeugen und den unterschiedlichen Plättchenabmessungen und -abständen wird dadurch hervorgerufen, daß die Fahrzeuge auch unterströmt werden, die Plättchen hingegen bodengebunden sind. Da die Fahrzeuge auf Rädern stehen, die hier ebenfalls mitmodelliert wurden, unterströmt ein großer Teil des Tracergases die Fahrzeuge zusammen mit Frischluft. Dieser Anteil wird bei den wandgebundenen Plättchen direkt lateral nach außen verfrachtet. Die Schlußfolgerung hieraus ist, daß die Plättchen entweder nicht bodengebunden sein dürfen oder neu skaliert werden müssen.

In Abb. 17a) und b) und Abb. 18a) und b) ist die vertikale Meßebeine um die Styropor-Modelle und die kleinen Plättchen mit denselben Parametervariationen wie in der Horizontalen dargestellt.

Der Unterschied im Konzentrationsfeld zwischen den kleinen Plättchen und den Fahrzeugen ist hier nicht mehr so ausgeprägt. Bei den kleinen Plättchen mit zwei Fahrzeuglängen Abstand erkennt man, ähnlich wie bei den Fahrzeugen, ein Anheben der Strömung über dem Hindernis und ein geringfügiges Absinken dahinter, sichtbar an der wellenartigen Struktur der Konzentrationsverteilung. Bei dem Fall einer Länge Abstand wird die Strömung vor den Plättchen ebenfalls vom Boden abgehoben, der enge Abstand der Plättchenreihe führt aber nicht mehr zum Absinken hinter bzw. über dem Hindernis, da der Abstand nun zu dicht geworden ist. Auf allen drei Abbildungen erkennt man die Null-Konzentrationslinie und somit die Grenze des Einflußbereichs der Fahrzeuge bzw.

der Plättchen, welche sich ungefähr 2 m bzw. etwas mehr als 1 Fahrzeughöhe, über den Fahrzeugdächern befindet. Dies entspricht einer Gesamthöhe von ca. 3.3 m über dem Boden und zeigt somit gute Übereinstimmung mit den in Kapitel 2.5 beschriebenen Literaturwerten. Oberhalb dieser Grenze werden keine Konzentrationen mehr gemessen, die nur durch die von den Fahrzeugen bzw. Plättchen erzeugte Turbulenz dorthin gelangen könnten.

In Abb. 19a) und b) sowie Abb. 20a) und b) ist der Vergleich des Vertikalschnittes zwischen den Fahrzeugen und den großen Plättchen dargestellt.

Im Fall der großen Plättchen wird die Hinderniswirkung besonders deutlich. Das Tracer-gas wird in beiden Fällen vor dem ersten Plättchen nach oben verfrachtet, wo es das Hindernis überströmt und sich dann zum Ende der Meßstrecke wieder vertikal nach unten bewegt. Dieser Effekt ist bei dem reduzierten Abstand insofern noch stärker ausgeprägt, als daß hier die Konzentrationsisolines insgesamt vertikal weiter nach oben verschoben sind. In beiden Fällen wird die Null-Konzentrationsisolinie quasi nicht mehr im Meßgebiet erfaßt, womit deutlich wird, daß die großen Plättchen zu groß sind und die Effekte falsch wiedergeben.

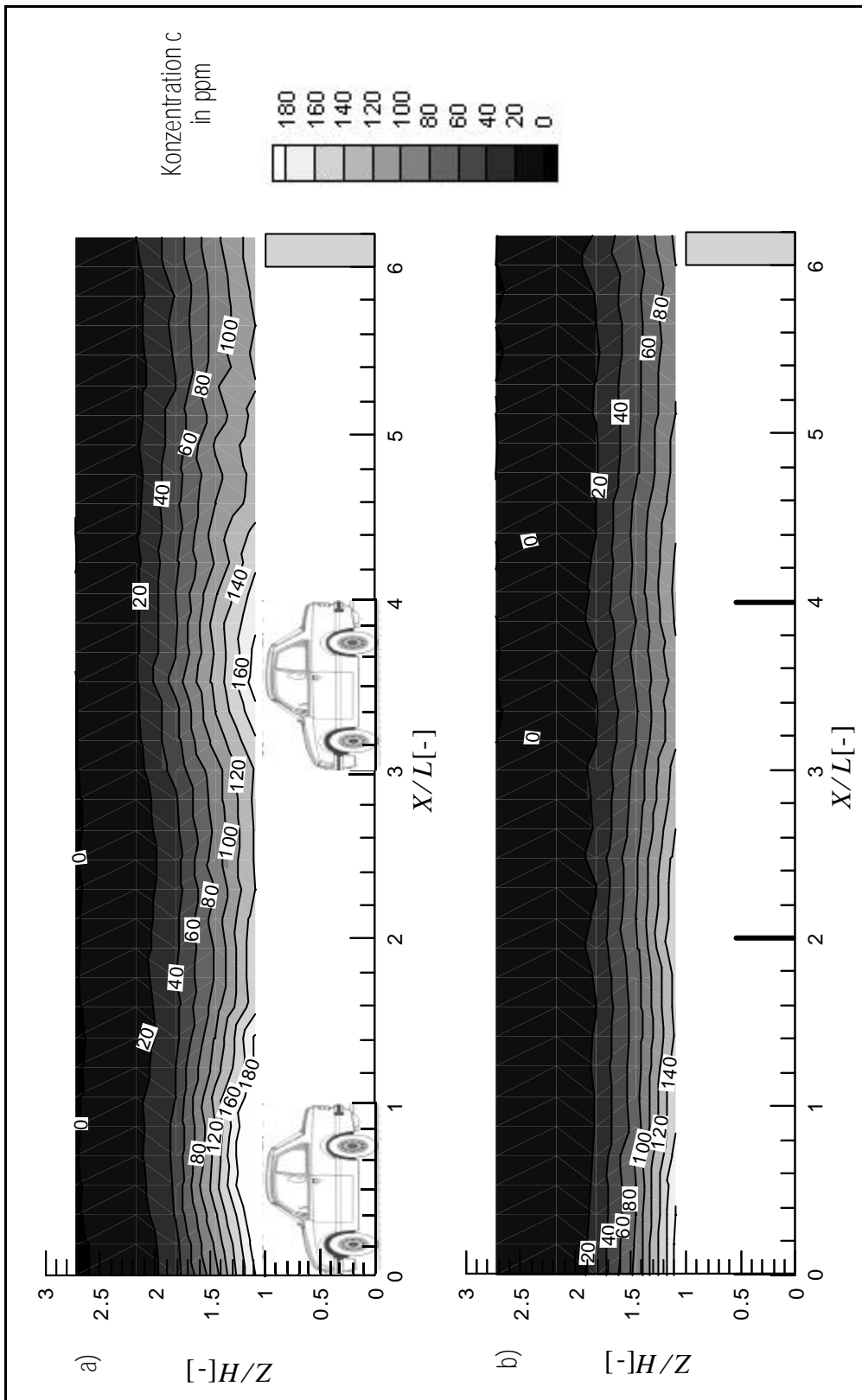


Abb. 17 Vergleich der Konzentrationsverteilung als Vertikalschnitt über den Fahrzeug-Modellen (oben) und den kleinen Plättchen mit jeweils zwei Fahrzeuglängen Abstand (unten).

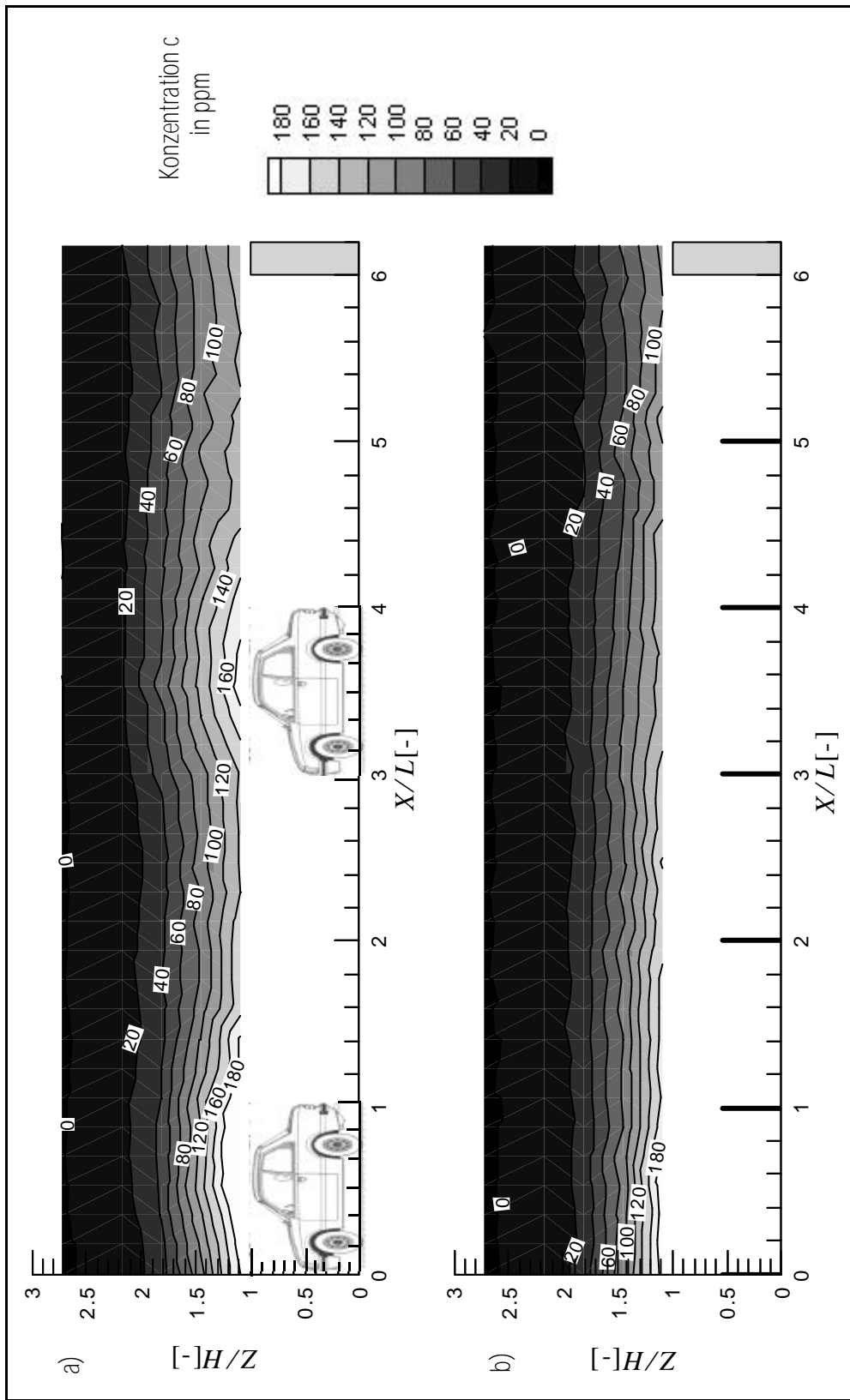


Abb. 18 Vergleich der Konzentrationsverteilung in der vertikalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den kleinen Plättchen mit auf eine Fahrzeuglänge halbierten Abstand (unten).

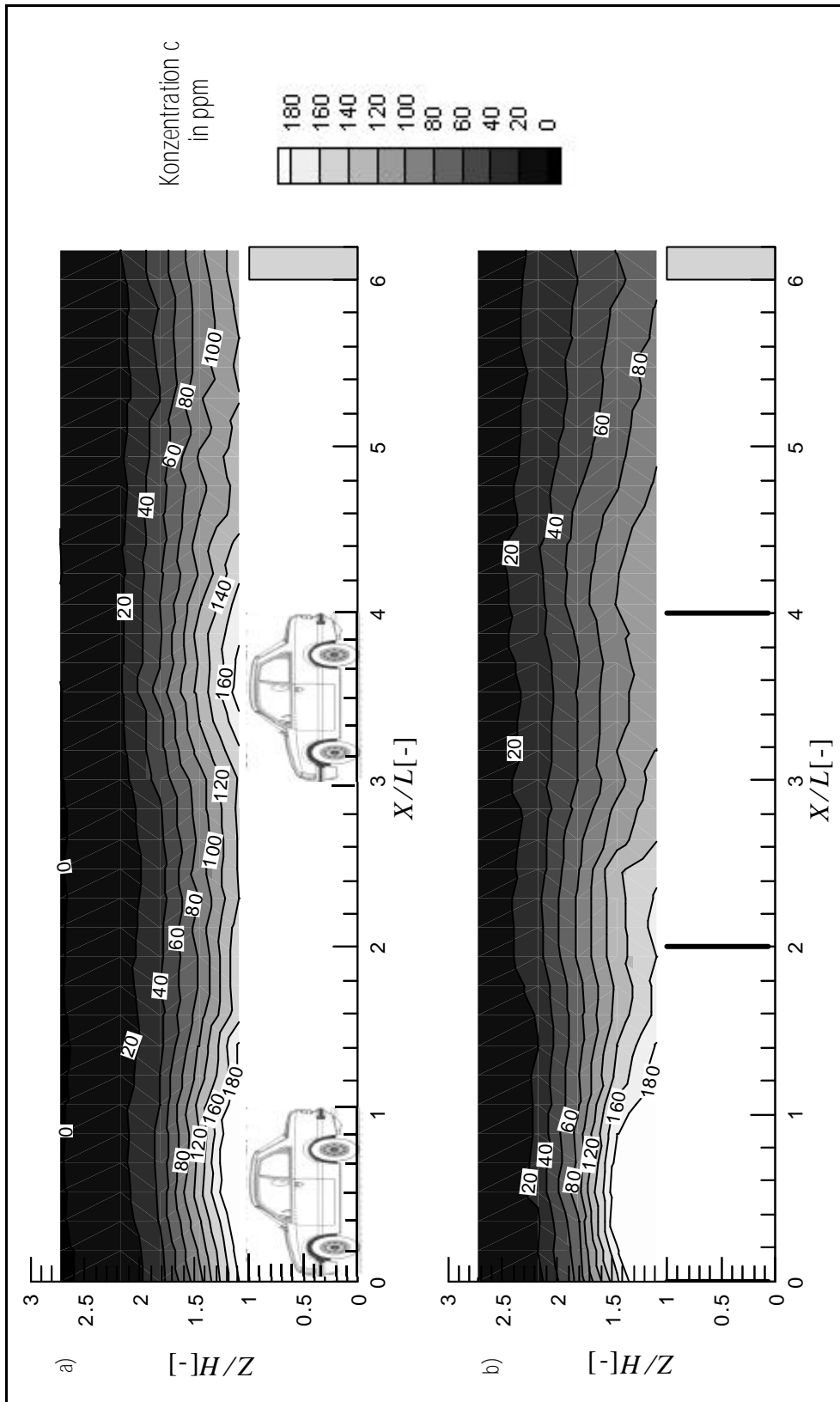


Abb. 19 Vergleich der Konzentrationsverteilung im Vertikalschnitt zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den großen Plättchen mit zwei Fahrzeuglängen Abstand (unten).

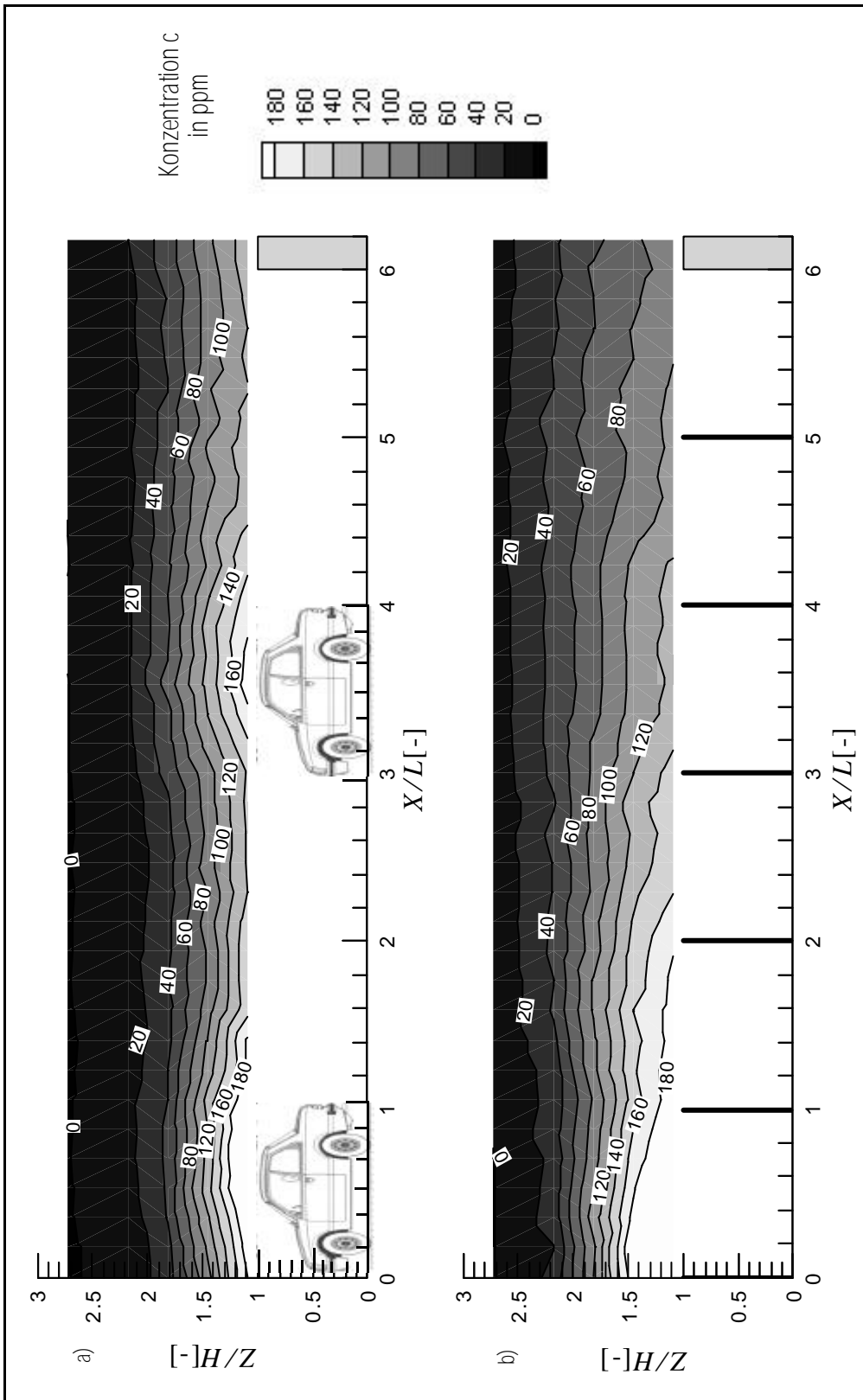


Abb. 20 Vergleich der Konzentrationsverteilung in der vertikalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den großen Plättchen mit auf eine Fahrzeuglänge halbierte Abstände (unten).

Für die weitere Auswertung wurde der mittlere Konzentrationsgradient für die einzelnen Meßreihen betrachtet. Hierbei wurde jeweils der Abstand der Front des ersten Fahrzeugs bis zur Front des nächsten Fahrzeugs als eine Einheit betrachtet. Dies wird auf Abb. 21 durch die Kästen dargestellt, die jeweils eine Einheit markieren. Auf diese Weise werden die Konzentrationsgradienten für die jeweils zwei Einheiten pro Meßreihe berechnet und dann gemittelt, so daß sich für die insgesamt fünf Meßreihen aus Abb. 21 jeweils ein Wert ergibt, der dann als Kurve gegen die Horizontale bzw. die Vertikale aufgetragen wurde. Die unterschiedlichen Kurven entsprechen den einzelnen Meßfällen. Aus der Betrachtung des Gradienten über eine Einheit ist der Einfluß abzulesen, den die Plättchen bzw. die Fahrzeuge auf die Strömung ausüben und zwar unabhängig von der Position zum Fahrzeug, Plättchen oder einer Lücke. Die Plättchen, die den Effekt der Fahrzeuge simulieren sollen, müssen den gleichen Gradienten zeigen wie die Fahrzeuge.

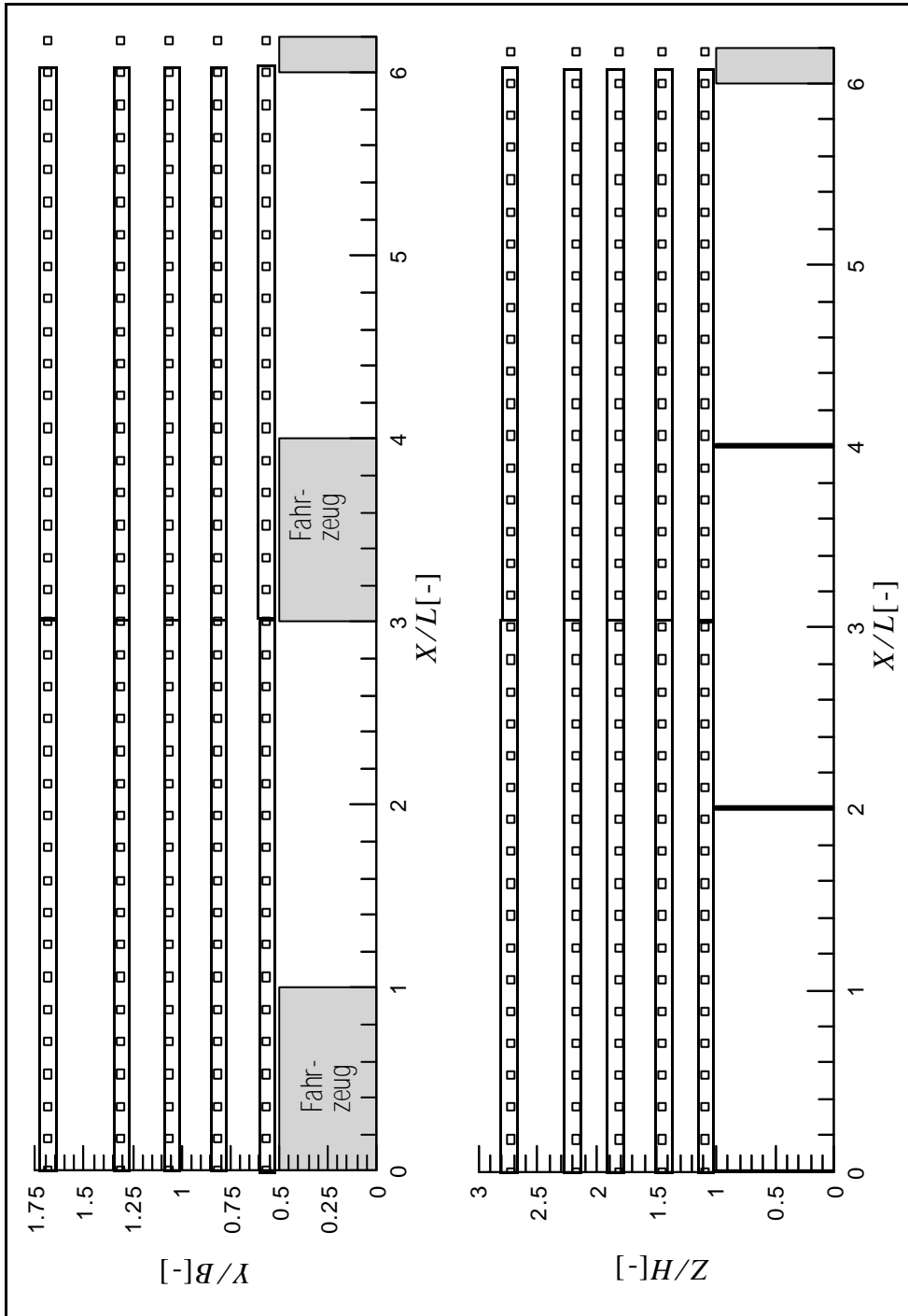


Abb. 21 Darstellung des verwendeten Messrasters für die Horizontale (oben) und die Vertikale (unten). Die Länge von der Front des einen Fahrzeugs bis zur Front des nachfolgenden Fahrzeugs wurde als eine Einheit betrachtet. Somit ergeben sich für jede der fünf Messreihen zwei Einheiten, über die dann gemittelt wurde.

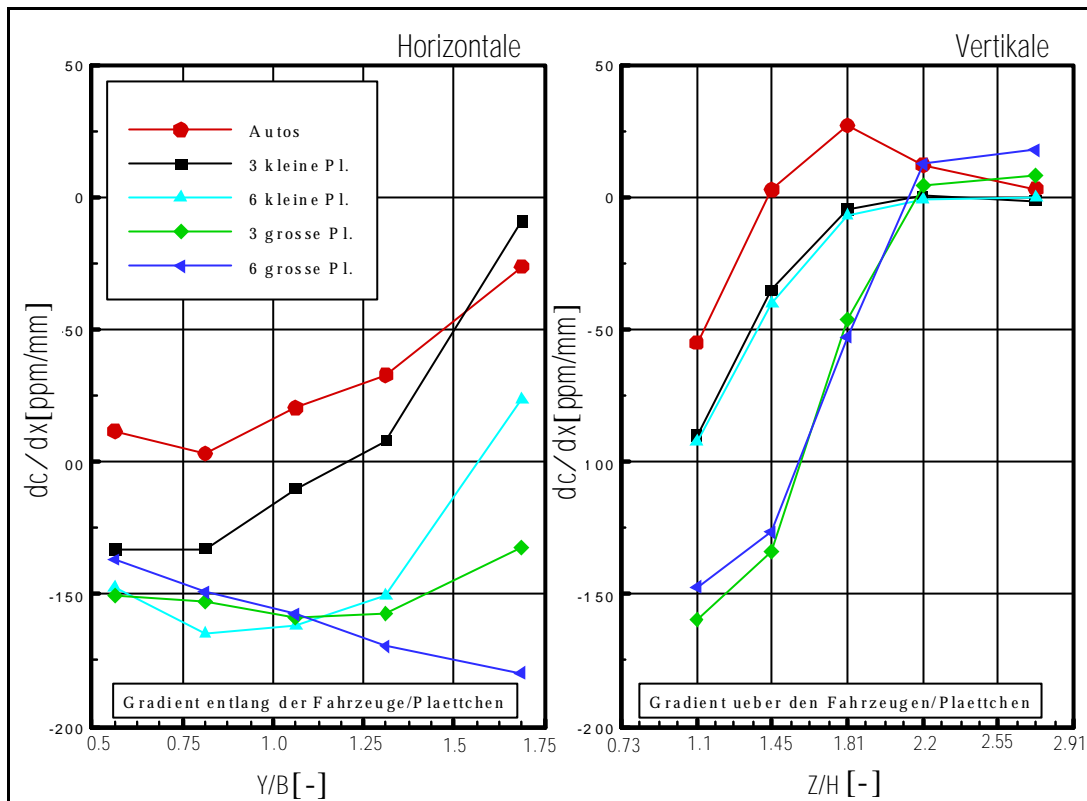


Abb. 22 Abbildung des mittleren Konzentrationsgradienten pro Meßreihe für die horizontale (links) und vertikale (rechts) Meßebeane.

In der Darstellung des horizontalen Gradienten in Abb. 22 wird deutlich, daß die großen Plättchen die Strömung und damit das Tracergas stark nach außen verdrängen. Während der Gradient der Konzentration um die Fahrzeuge mit zunehmenden Abstand gegen Null geht, weisen die Plättchen, in Abhängigkeit ihrer Größe und des Abstandes, einen sich abschwächenden negativen Gradient auf. Der Gradient für die doppelte Anzahl der großen Plättchen verstärkt sich sogar noch. Das bedeutet, daß sowohl der Abstand der Plättchen als auch die Größe wichtige Parameter sind. Der Gradient entlang der Fahrzeuge geht in ca. 2.4 m Entfernung von der Fahrzeugaußenkante gegen Null, ab dieser Entfernung wird die Strömung nicht mehr von der Anwesenheit der Fahrzeuge beeinflusst.

Im vertikalen Gradienten zeigt sich, daß die Konzentrationsverteilung unabhängig von dem Abstand der Plättchen ist. Der entscheidende Einflußparameter ist somit die Größe. Weiterhin zeigt der Gradient, daß der Bereich der ungestörten Anströmung in ca. 3.3 m Höhe anzusehen ist und somit in guter Übereinstimmung mit den Literaturwerten liegt (Eskridge et al. (1991), Sedefian et al. (1981)).

4.4 Neuskalierung der Plättchen mittels Strömungsvisualisierung

Im vorigen Kapitel konnte gezeigt werden, daß die Plättchen eine andere Konzentrationsverteilung im Nahfeld erzeugen als die Modell-Fahrzeuge. Hierbei erzielten die nach Kastner-Klein (1999) skalierten kleinen Plättchen die im Vergleich mit den Fahrzeugen ähnlicheren Resultate, als die gemäß der Dimensionsanalyse nach der Querschnittsfläche der Fahrzeuge skalierten Plättchen. Die Übereinstimmung der Ergebnisse war jedoch in keinem Fall zufriedenstellend. Ein wesentlicher Faktor in der Bemessung der Plättchen ist neben der Größe und dem Abstand also auch auf die unterschiedlichen Umströmungseigenschaften von Fahrzeugen und Plättchen zurückzuführen. Der bedeutsamste strömungsmechanische Unterschied hierbei ist wiederum, daß Fahrzeuge unterströmt werden, während die bodengebundenen Plättchen die gesamte Strömung seitlich und nach oben ablenken. Dieser Unterschied in der Umströmung ist nochmals genauer in Anhang A dargestellt.

Mit Hilfe von Strömungsvisualisierungen durch Laserlichtschnitt wurde nachfolgend eine weitere Sensitivitätsstudie durchgeführt, in der die Wirkung der Plättchen in Größe, Form und Abstand untersucht wurden, um das gleiche Strömungsfeld zu erzeugen wie durch die Modell-Fahrzeuge. Ein Mittel, um diese Ähnlichkeit im Strömungsfeld herbeizuführen, besteht darin, die Plättchen ebenfalls auf Füßchen zu stellen und somit eine Bodenfreiheit zu erzeugen, die eine Unterströmung ermöglicht. Hiervon wird jedoch abgesehen, da die scharfkantigen Plättchen in der Strömung insgesamt effizienter wirken als Fahrzeuge. Selbst bei einer möglichen Unterströmung der Plättchen werden aufgrund der fest vorgegebenen Abrißkanten Wirbel, wie z.B. der Hufeisenwirbel oder der Dachwirbel, erzeugt, die die Strömung in einem weiten Feld um die Plättchen beeinflussen. Ebenso könnte der Widerstand der Plättchen in der Strömung gesenkt werden, indem Löcher in die Plättchenfläche gebohrt werden. Spätestens hier endet man in einer für jeden Fall neu anzupassenden Designstudie. Ziel ist es jedoch, eine Lösung zu finden, die so allgemeingültig wie möglich ist.

In dem nachfolgenden Experiment wurde ebenfalls eine Reihe der idealisierten Styropor-Fahrzeuge mit einem Abstand von einer Fahrzeuglänge fest montiert. Es wurden nochmals mit der gleichen Methode wie in 4.2 die Fahnenachsen um die Fahrzeuge bestimmt. Das Ergebnis dieses Lichtschnitts stellte wiederum den Kontrollzustand für die

neu zu dimensionierenden Turbulenzgeneratoren dar. Die Fahrzeuge wurden dann jeweils ersetzt gegen Plättchen mit den verschiedenen Parametervariationen. Da die Turbulenzgeneratoren für die horizontale und die vertikale Richtung mit dem Strömungsbild der Fahrzeuge übereinstimmen müssen, sich die Horizontale aber als kritischer erwiesen hat als die Vertikale, wurden die umfangreichsten Untersuchungen für die horizontale Richtung durchgeführt. Die Ergebnisse sind vergleichend in den Abbildungen für die Horizontale und die Vertikale jeweils getrennt dargestellt. Der Versuchsaufbau entsprach für die Horizontale vollständig dem in 4.2 beschriebenen Aufbau des Lichtschnitts. In der Vertikalen befand sich die Raucheinleitung über dem Heck des vorhergehenden Fahrzeugs und wurde für alle Versuche an dieser x -Position gehalten und wiederum in der Höhe z variiert. Dies ist auf Abb. 23 nochmals für die Horizontale und die Vertikale schematisch dargestellt.

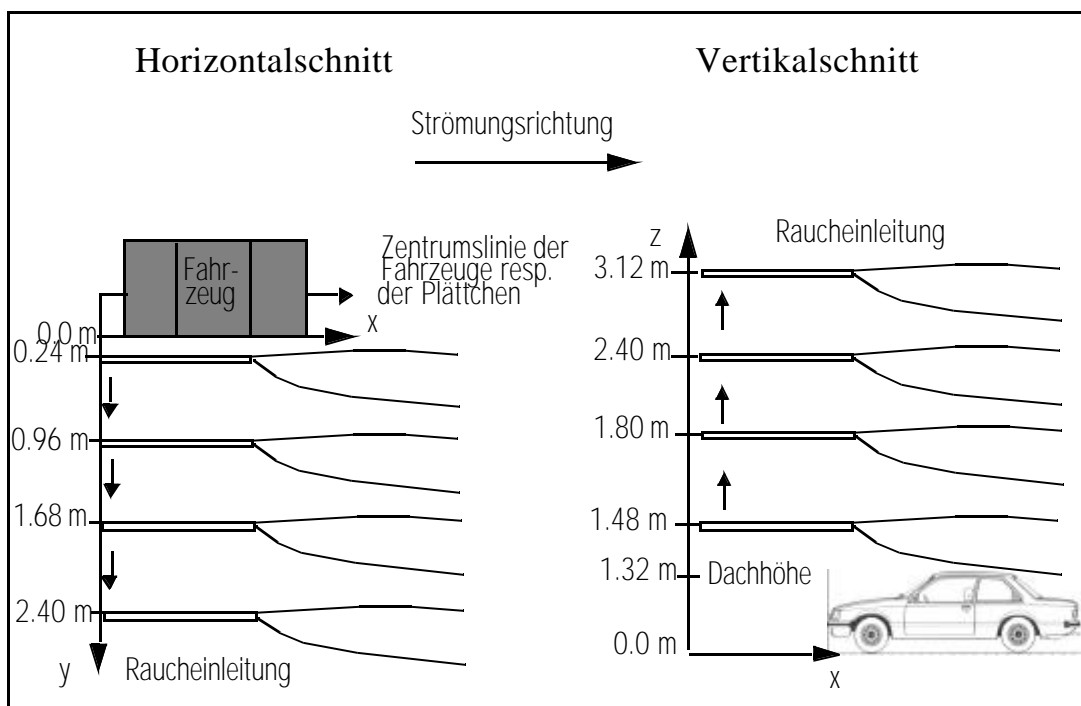


Abb. 23 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus des Laserlichtschnitts. Eingezeichnet ist die Position des Fahrzeug-Modells zur Einleitung sowie die laterale und vertikale Verschiebung des Einleitungspunktes nach außen (horizontal) und nach oben (vertikal).

In der nachfolgenden Abb. 24 ist der Vergleich für den ersten Lichtschnitt in $0,24\text{ m}$ Entfernung von der Außenkante des Fahrzeugs dargestellt. Im unteren Teil des Bildrandes

sind der hintere Teil des Fahrzeugs, der für die Kamera sichtbar ist, sowie zwei Plättchen eingezeichnet. Dies sind die Plättchenoberkanten, wie sie von der Kamera in der Schnittebene gesehen werden. An dieser Position befanden sich die Plättchen respektive Fahrzeuge. Die Plättchen bzw. Fahrzeuge wurden jeweils im Körpermittelpunkt befestigt, so daß die Plättchen an denselben Positionen wie die Fahrzeuge montiert wurden, die Fahrzeuge aufgrund ihrer größeren Breite jedoch in y -Richtung weiter über die Zentrumslinie herausstehen, dies ist durch die gestrichelten Linien angedeutet.

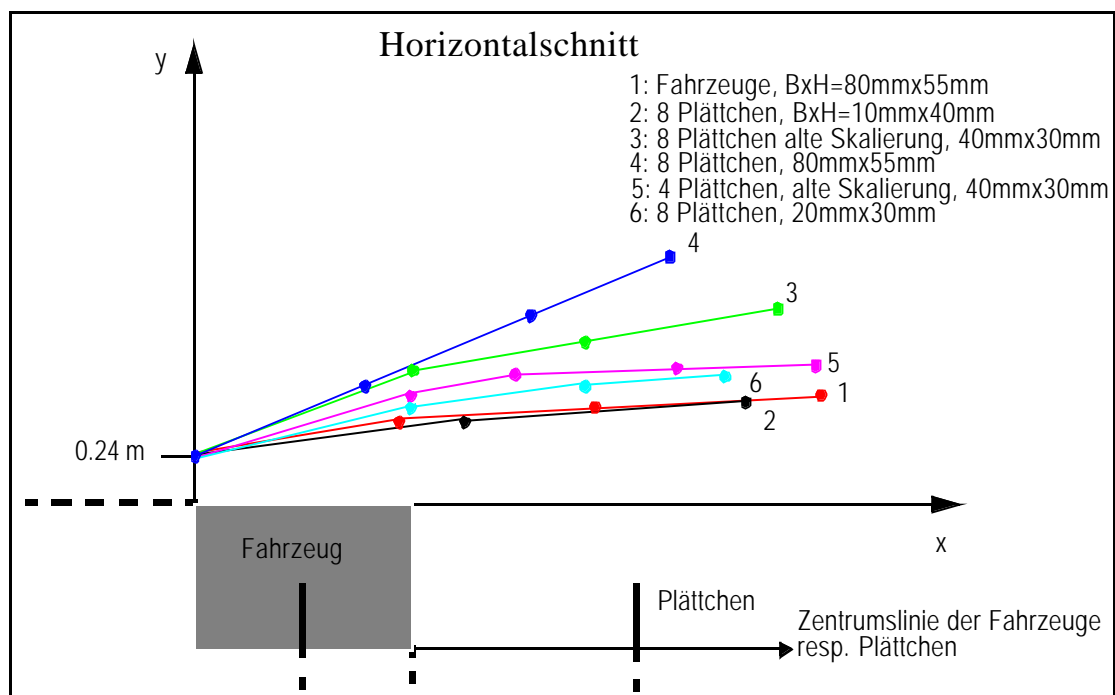


Abb. 24 Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Horizontalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und verschiedenen Parameterstudien von Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung von der Fahrzeugaußenkante $y=0,24\text{ m}$ (Naturmaßstab).

Kurve 1 zeigt die Fahnenachse entlang des Fahrzeugs. Kurve 4 zeigt das Strömungsbild, wie es sich einstellt, wenn das Plättchen dieselbe Querschnittsfläche besitzt wie das Fahrzeug. Die Verdrängungswirkung ist, wie schon durch die Konzentrationsmessungen in 4.3 gezeigt werden konnte, wesentlich stärker als bei den Fahrzeugen, da die Fahrzeuge auch unterströmt werden und die Strömung somit ausweichen kann. Dies wird sichtbar an der deutlichen Auslenkung der Kurve 4 nach außen. Kurve 3 zeigt das Strömungsbild, wie es von Turbulenzgeneratoren nach Kastner-Klein (1999) in Gl. (15)

produziert wird. Auch hier findet eine starke Verdrängung zu den Seiten statt, die sich durch einen größeren Ablenkwinkel der Fahnenachse im Vergleich zu den Fahrzeugen bemerkbar macht. Kurve 5 beschreibt das Strömungsbild der Turbulenzgeneratoren skaliert nach Gl. (15), hier wurde ein größerer Abstand (2 Fahrzeuglängen statt 1) gewählt. Dies bestätigt, daß der Abstand für die Horizontale einen zu beachtenden Parameter darstellt, bzw. eine größere Fläche der Turbulenzgeneratoren bis zu einem gewissen Grad durch einen größeren Abstand kompensiert werden kann. Die alte Skalierung würde offensichtlich einen deutlich verringerten Abstand im Vergleich zum Kontrollfall erfordern.

Den größten Einfluß auf die Strömung übt jedoch die Breite der Plättchen aus. Aus diesem Grund wurde die Breite weiterhin reduziert. In Kurve 6 wird deutlich, daß ein Abstand von einer Fahrzeuglänge und eine Reduktion der Breite geringere Abweichungen von den maßstäblich verkleinerten Modellfahrzeugen liefert. Eine weitere Reduktion der Plättchenfläche auf $1/4$ der alten Skalierung und einen Abstand, identisch mit dem Abstand der Fahrzeuge im Kontrollfall, lassen die Kurve 2 und die Kurve 1 der Fahrzeuge direkt aufeinanderfallen und erzeugen somit das gleiche Strömungsbild.

Abb. 25 zeigt dieselben Parametervariationen am zweiten Einleitungspunkt in einer Entfernung von 0.96 m von der Fahrzeugaußenkante.

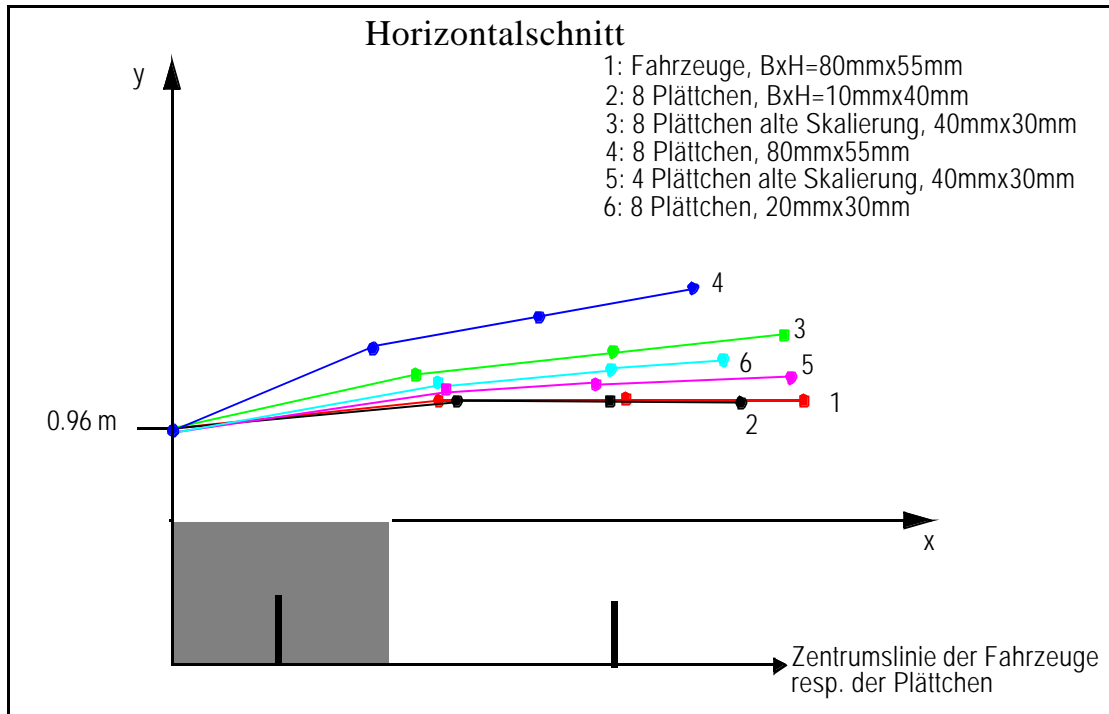


Abb. 25 Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Horizontalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und verschiedenen Parameterstudien von Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung von der Fahrzeugaußenkante $y = 0.96\text{ m}$ (Naturmaßstab).

An diesem Meßpunkt zeigen sich dieselben Ergebnisse für die unterschiedlichen Turbulenzgeneratoren wie am vorigen Einleitpunkt. Die Plättchen mit den Fahrzeugabmessungen und die Plättchen mit der Flächenabschätzung nach Gl. (15) zeigen wiederum die größten Abweichungen im Vergleich mit der Fahnenachse der Fahrzeuge. Interessanterweise sind hier lediglich die Kurven 5 und 6 vertauscht, d.h. die schmalere Plättchen scheinen das Fahrzeug nun schlechter zu simulieren als die Plättchen nach der alten Skalierung mit einem auf zwei Fahrzeuglängen vergrößerten Abstand. Kurve 2 liegt wieder deckungsgleich mit der Kurve 1 der Fahrzeuge aufeinander und zeigt somit volle Übereinstimmung der Strömungsbilder.

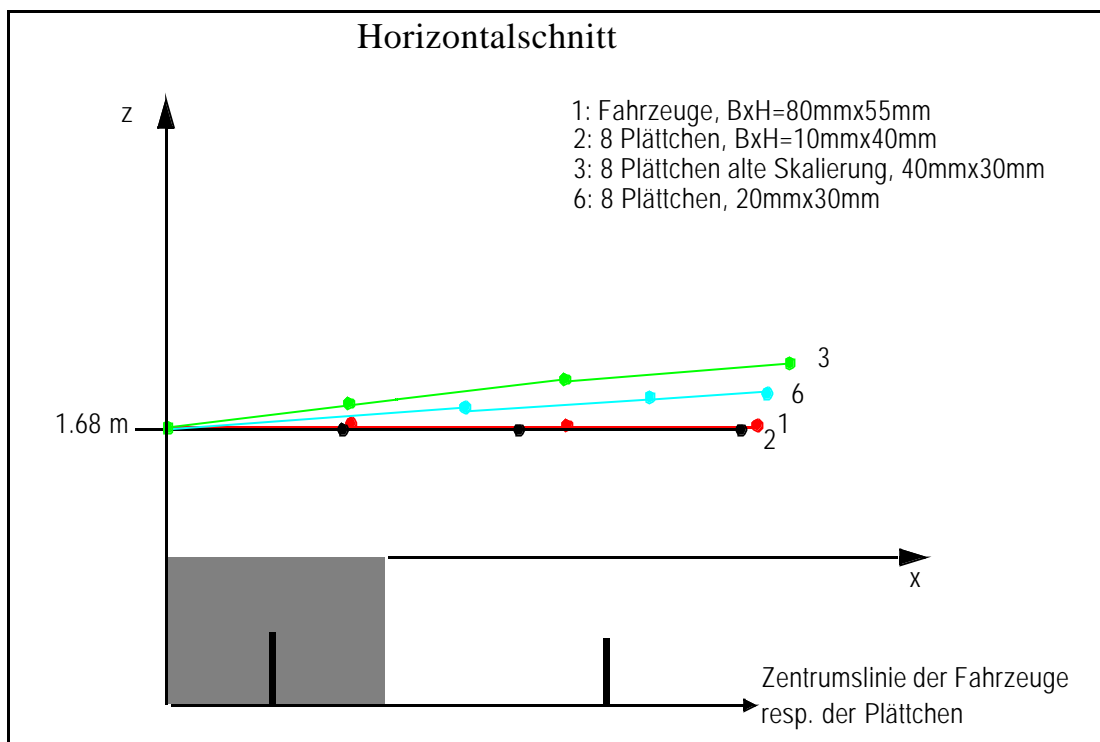


Abb. 26 Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Horizontalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und verschiedenen Parameterstudien von Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung von der Fahrzeugaußenkante $y=1.68\text{ m}$ (Naturmaßstab).

Für den Vergleich in 1.68 m und 2.40 m Entfernung im Naturmaßstab wurden die Parametervariationen Nr. 4 und 5 nicht mehr durchgeführt, da aus den ersten beiden Meßpunkten bereits deutlich wird, daß sie die Effekte der Fahrzeuge auf die Strömung nicht korrekt simulieren. Aus den bisherigen Ergebnissen und dem in Abb. 26 dargestellten Vergleich wurde der Abstand der Turbulenzgeneratoren auf 1 Fahrzeuglänge festgelegt. Die Kurve 3 beschreibt wieder den Fall der früheren Modellierung. Kurve 6 beschreibt die Plättchen, die in der Breite lediglich 10 mm breiter sind als die, die am besten mit den Fahrzeugen übereinstimmen (Kurve 2). Dennoch ist ihre Verdrängung der Strömung größer als die von den Fahrzeugen.

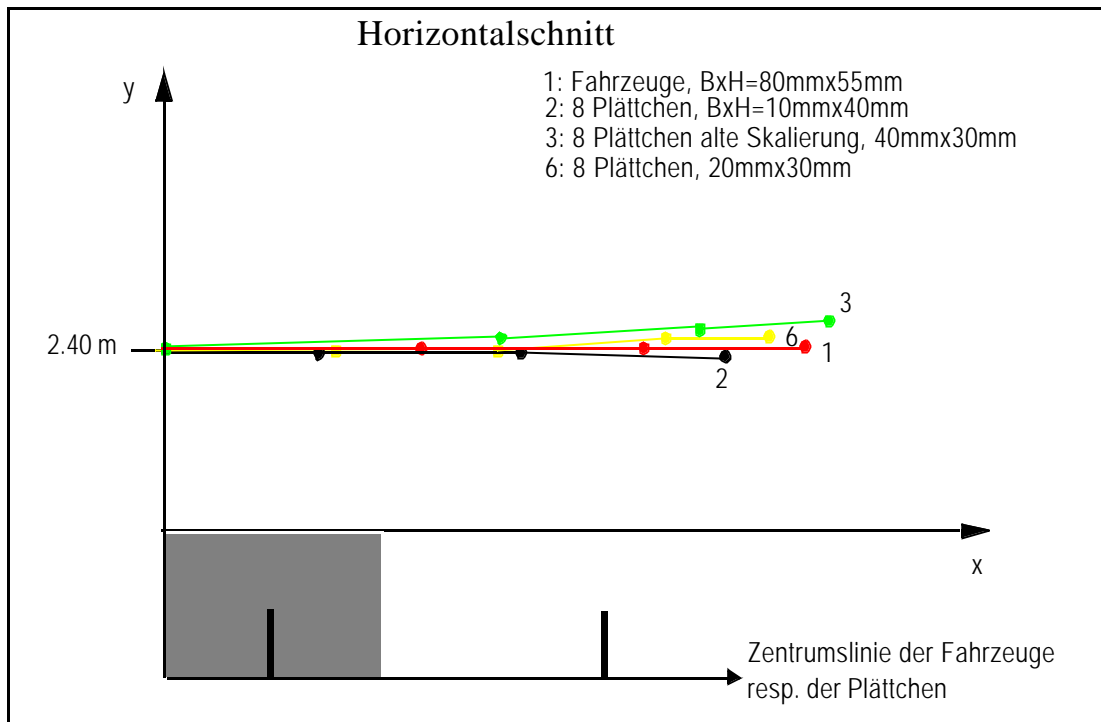


Abb. 27 Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Horizontalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und verschiedenen Parameterstudien von Plättchen. Die Entfernung der Rauchzuleitung beträgt $y = 2.40 \text{ m}$ (Naturmaßstab) von der Fahrzeugaußenkante.

In Abb. 27, in 2.40 m Entfernung von der Fahrzeugaußenkante liegen die Kurve 1 der Fahrzeuge und die Kurve 2 der schmalen Plättchen sehr dicht beieinander. Der geringe Unterschied im cm -Bereich (Naturmaß) wird wiederum mit durch die räumliche Verzerrung verursacht. Die beiden verbliebenen Plättchenvariationen zeigen an diesem Meßpunkt somit nur sehr geringe Abweichungen, was auch zeigt, daß diese Meßposition den Rand des Einflußbereiches der Fahrzeuge widerspiegelt. Aus den in der Horizontalen durchgeführten Lichtschnitten kann abgeleitet werden, daß die Plättchen mit den Abmessungen von $B \times H = 10 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ die beste Übereinstimmung mit den Fahrzeugen zeigen. Diese Plättchen besitzen im Vergleich zu den Plättchen, wie sie sich aus Gl. (15) ergeben, eine stark reduzierte Breite.

Für die Vertikalschnitte wurde nun nur noch das Plättchen zum Vergleich herangezogen, das im Horizontalschnitt eine gute Übereinstimmung ergab. Auf Abb. 28 ist der erste Vertikalschnitt in der Höhe $z = 1.48 \text{ m}$ Höhe dargestellt. Kurve 1 beschreibt wieder die

Fahnenachse der Strömungsvisualisierung, wie sie durch die Fahrzeuge hervorgerufen wird.

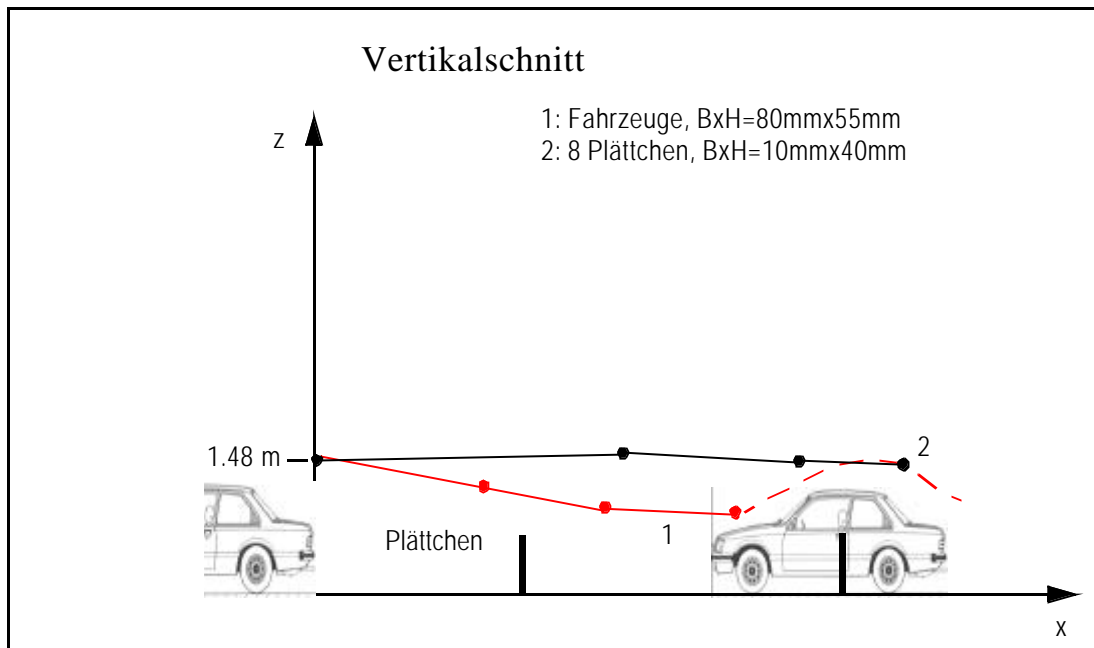


Abb. 28 Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Vertikalschnitt bzw. der Vergleich zwischen Fahrzeugen und dem vorher betrachteten Plättchen. Die Entfernung der Rauchzuleitung betrug vom Boden $z=1.48\text{ m}$ (Naturmaßstab). Die Kurve 1 wurde gestrichelt weitergezeichnet um darzustellen, daß die Trajektorie nicht vor dem nächsten Fahrzeug endet, wie es der Verlauf der Fahnenachse zu implizieren scheint. Die Fahnenachse konnte lediglich aus dem Lichtschnitt räumlich nicht weiter bestimmt werden, als mit der durchgezogenen Linie markiert.

Man erkennt, daß die Rauchfahne vor dem betrachteten Fahrzeug vertikal nach unten quasi auf die Motorhaube des betrachteten Fahrzeugs gezogen wird (Kurve 1). Dieses Verhalten erklärt sich durch den Nachlauf des vorigen Fahrzeugs, in dessen Verlauf sich zwei Wirbelzöpfe ausbilden, die aus der Überströmung des Fahrzeugs resultieren und von oben kommend seitlich an dem Fahrzeug vorbeigeführt werden (siehe auch Hucho (1994) in Anhang A). Desweiteren ist in Abb. 28, genau wie schon bei den Konzentrationsmessungen in 4.3 ersichtlich, daß die Höhe der Plättchen das Ergebnis weniger beeinflusst und das der verwendete Turbulenzgenerator mit einer Höhe von 40 mm (Kurve 2) ein zu den Fahrzeugen sehr ähnliches Strömungsbild auslöst.

In Abb. 29 ist das Plättchen für den Meßpunkt in 1.8 m Entfernung dargestellt. Der getestete Turbulenzgenerator zeigt nur sehr geringe Abweichungen im Naturmaß von nur einigen Zentimetern im Vergleich zu der Fahnenachse der Fahrzeuge und bestätigt abermals die geringere Sensitivität des Strömungsverlaufes von der Höhe der Plättchen bzw. der getesteten Konfiguration.

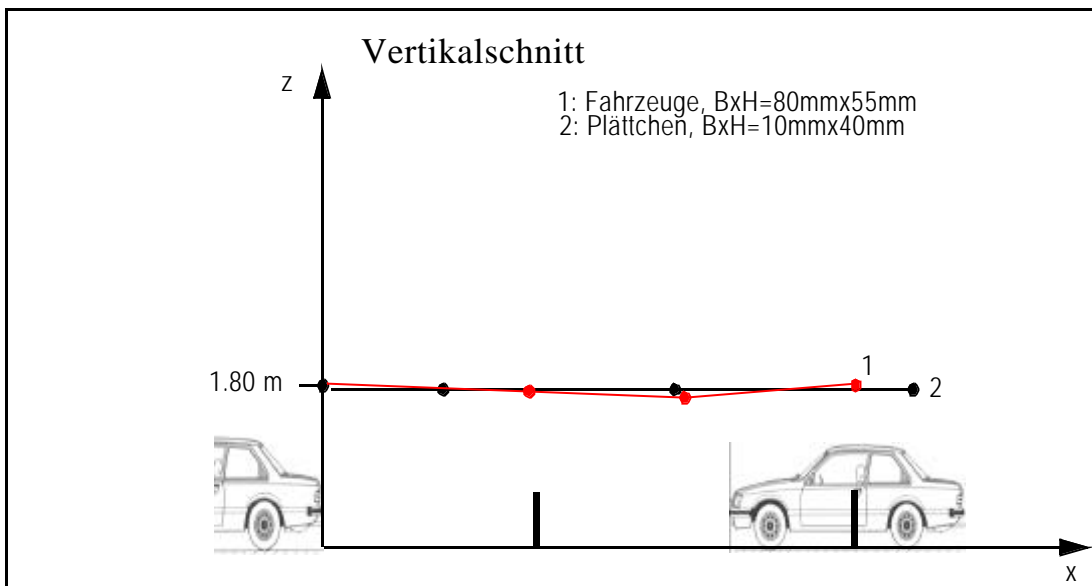


Abb. 29 Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Vertikalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und den Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung vom Boden $z=1.80\text{ m}$ (Naturmaßstab).

Abb. 30 zeigt die Fahnenachsen in 2.40 m Entfernung. Sowohl hier, als auch in Abb. 31 für die Entfernung von 3.12 m zeigt sich in dem Turbulenzgenerator ebenfalls kaum mehr ein Unterschied, bzw. dieser Unterschied liegt im Rahmen der Ungenauigkeiten.

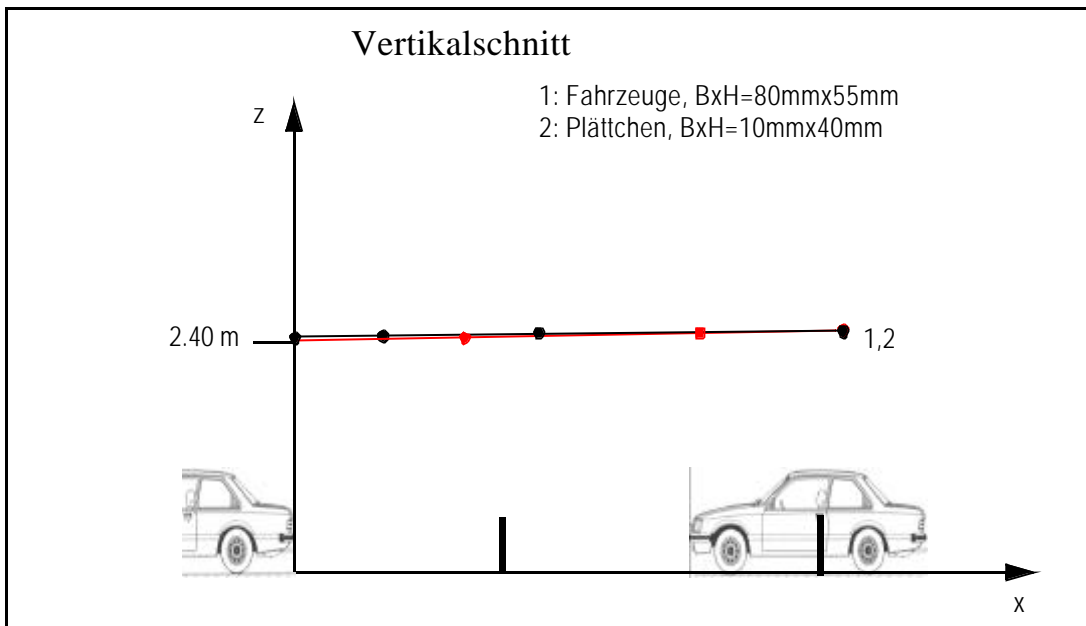


Abb. 30 Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Vertikalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und den Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung vom Boden $z=2.40\text{ m}$ (Naturmaßstab).

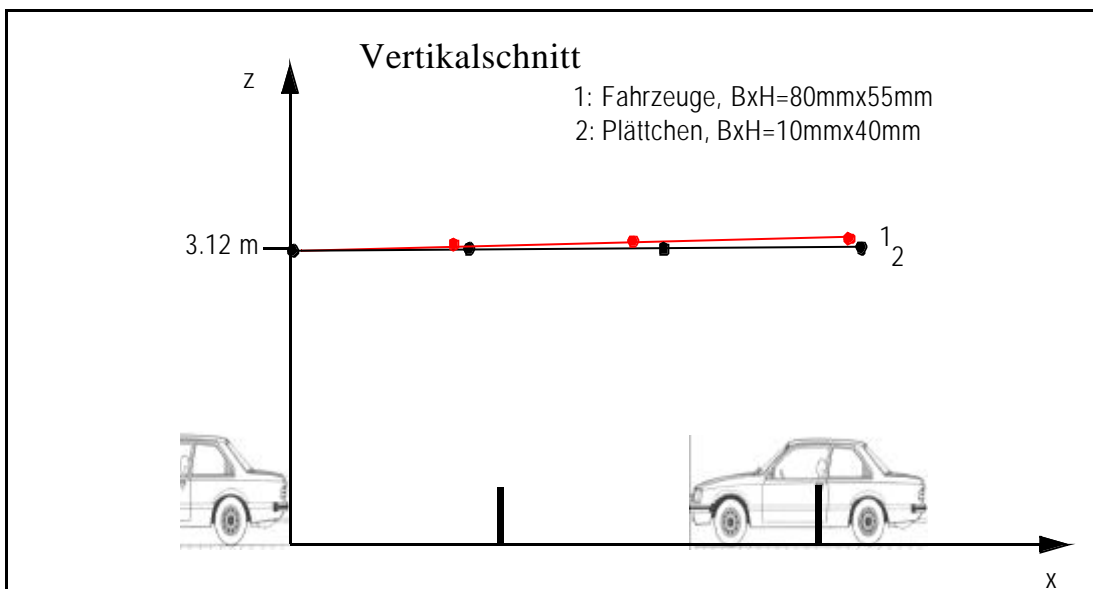


Abb. 31 Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Vertikalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und den Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung vom Boden $z=3.12\text{ m}$ (Naturmaßstab).

Maßgeblich ist somit, daß die Strömung durch das Hindernis vom Boden abgehoben wird. Ein einfaches Plättchen mit den Abmessungen $B \times H = 10 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ erzeugt also dasselbe Strömungsbild wie die für den Vergleich herangezogenen Fahrzeuge.

Mit Hilfe der Laserlichtschnitte wurde als neue Skalierung für die Plättchen die Abmessung der Breite $B = 10 \text{ mm}$ x Höhe $H = 40 \text{ mm}$ und einem Abstand von einer Fahrzeuglänge abgeleitet. Die Breite ergibt sich aus dem Fakt, daß die heranströmende Luft, die bei den Fahrzeugen durch Unterströmung abtransportiert wird, von den Plättchen zu den Seiten verdrängt wird. Durch die fehlende Unterströmung der wandgebundenen Plättchen erfolgt eine größere Beeinflussung des lateralen Strömungsfeldes durch die Plättchen, was durch eine Reduktion der Breite ausgeglichen wurde. Die vertikale Skalierung der Plättchen beruht auf der Höhe, in der bei den Fahrzeugen die Wirbel abgelöst werden. Dies geschieht an der Oberkante des Kofferraumes in Abhängigkeit von der Fahrzeugform (Hucho (1994)). Der Abstand ergibt sich aus dem vorgegebenen Referenzfall der Fahrzeuge.

Die reine Problematik der Ähnlichkeit der Umströmung von Fahrzeugen bzw. Plättchen kann also durch bodengebundenen Plättchen, d.h. ohne Berücksichtigung der Tatsache, daß Fahrzeuge auch unterströmt werden, gelöst werden. Dies geschieht dann, wie hier gezeigt, durch Kompensation durch eine geringere Plättchenbreite.

4.5 Überprüfung der Neuskalierung durch Turbulenzmessung

Die aus den Laserlichtschnitten abgeleitete neue Skalierung der Plättchen wurde anhand von Turbulenzmessungen überprüft, da die Skalierung aus den Lichtschnitten nur visuell bzw. graphisch bestimmt wurde. Dies ist notwendig, um zu überprüfen, ob auch die Turbulenzintensitäten durch die Plättchen realistisch modelliert werden.

Die Turbulenzmessungen wurden ebenfalls im Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg durchgeführt. Der Versuchsaufbau entspricht dem, der auch für die Konzentrationsmessungen gewählt wurde. Abb. 32 zeigt den Versuchsaufbau anhand der neuskalierten Plättchen. Der Abstand der Fahrzeuge bzw. der Plättchen betrug l Fahrzeuglänge.

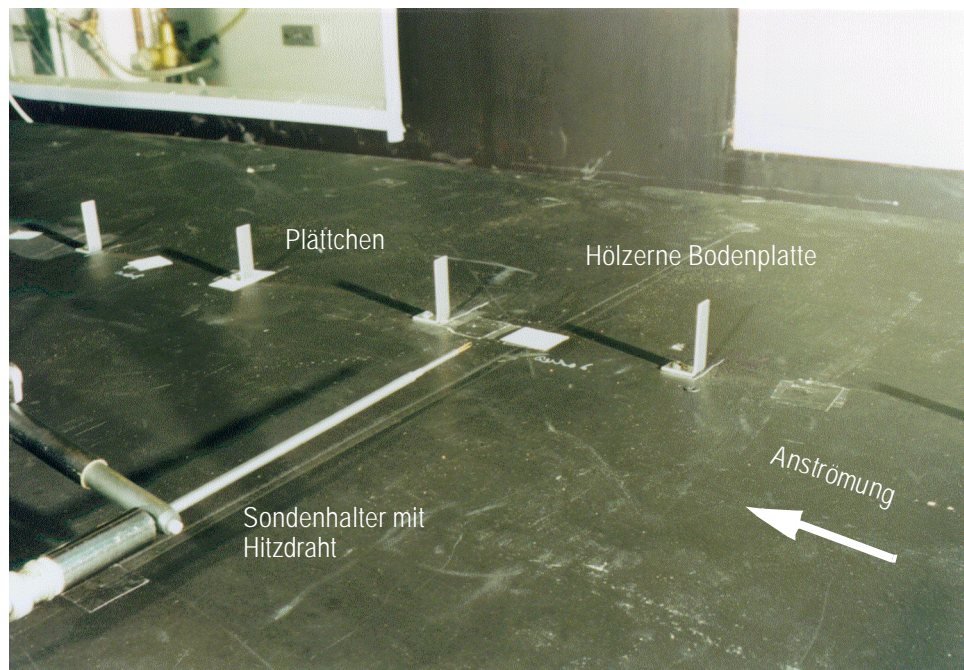


Abb. 32 Versuchsaufbau der Turbulenzmessungen. Mittig auf einer hölzernen Bodenplatte wurden die neuskalierten Plättchen mit einer Fahrzeuglänge Abstand montiert. Die Turbulenzmessungen wurden in Querschnitten zwischen den Plättchen respektive den Fahrzeugen durch Hitzdrahtanemometrie durchgeführt.

Die Messungen wurden mittels Hitzdrahtanemometrie und mit einem im Windkanal montierten traversierbaren Positionierungssystem durchgeführt. Um das ungestörte Windfeld der Fahrzeuge bzw. der Plättchen zu bestimmen, wurde über der hölzernen Bodenplatte, auf der später die Fahrzeuge montiert wurden, eine Reihe von Geschwindigkeitsprofilen aufgenommen. Zur Bestimmung des Fahrzeugeffektes wurde von den Messungen mit montierten Hindernissen das atmosphärische Hintergrundfeld subtrahiert.

Die Profile wurden über der Holzplatte an den in Abb. 33 eingezeichneten Positionen aufgenommen. Die Positionen Nr. 5, 6, 7 und 8, die lateral neben der Fahrzeugreihe liegen, wurden gemäß der vorher gewonnenen Ergebnisse ausgewählt und spiegeln den Bereich wieder, in dem die Fahrzeuge schon keinen Einfluß mehr zeigen sollten. Die Profile entlang der Fahrzeugreihenachse wurden mittig zwischen die Fahrzeuge gelegt.

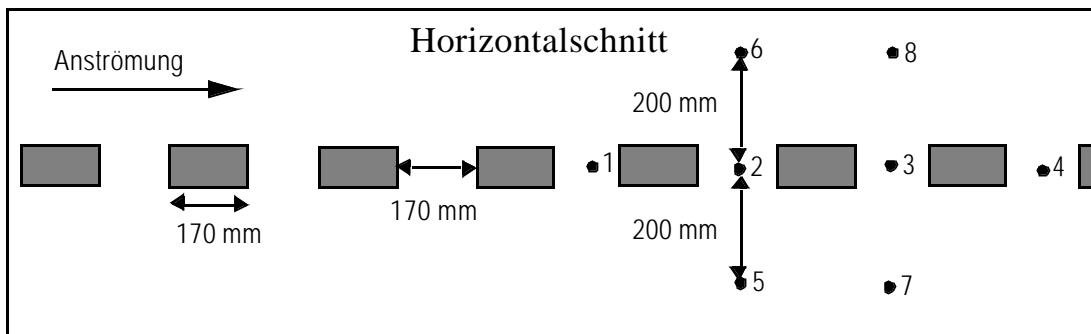


Abb. 33 Lage der Meßorte für die Vertikalprofile der mittleren Geschwindigkeit.

An den in Abb. 33 dargestellten Positionen wurden Vertikalprofile der mittleren Geschwindigkeit gemessen. Da die Messungen mit einem I -Draht-Hitzdraht durchgeführt wurden, wird kein Aufschluß über u - und w -Komponente getrennt gegeben, sondern nur über den Betrag des resultierenden Vektors. Die Profile entlang der x -Achse und auf den Positionen 6 und 8 (die beiden letztgenannten Profile sind hier nicht gezeigt) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zueinander, was bedeutet, daß sich die Geschwindigkeitsprofile entlang der x -Achse und in Strömungsrichtung blickend links zur Mittellinie des Kanals nicht mehr ändern. Die Profile auf den Positionen 5 und 7 zeigen eine Abweichung in der mittleren Geschwindigkeit von maximal 5% vom Mittelwert der übrigen Profile. Die Abweichungen im Geschwindigkeits- und ebenfalls im Turbulenzprofil entstanden aufgrund der für diesen Fall leicht seitlich verschoben eingebauten Positionierung im Windkanal und der dadurch erzeugten Versperrung. Dieser Einbau war notwendig, da die Versuche auf einem zweiten Boden durchgeführt wurden und die Positionierung anderenfalls nicht hätte genutzt werden können, was die Genauigkeit der Messungen erheblich herabgesetzt hätte. Die Turbulenzmessungen um die Fahrzeuge bzw. die Plättchen wurden jedoch auf dieselbe Weise gewonnen, d.h. die Positionierung befand sich für alle Messungen in dieser Konfiguration. Da die atmosphärische Turbulenzintensität $I_{Atmosph.}$ später von den Fahrzeug- bzw. Plättchensignalen abgezogen wurde, wurde auch dieser Versperrungseffekt damit bereinigt:

$$I_{Auto} = I_{Gesamt} - I_{Atmosph.} \quad (21)$$

Da dieser Effekt somit nicht mehr von Belang ist, wurden nur noch die Profile entlang der Mittellinie dargestellt. Aus Abb. 34 kann abgeleitet werden, daß sich das Geschwindigkeitsprofil nicht mehr über die Länge der Meßstrecke ändert.

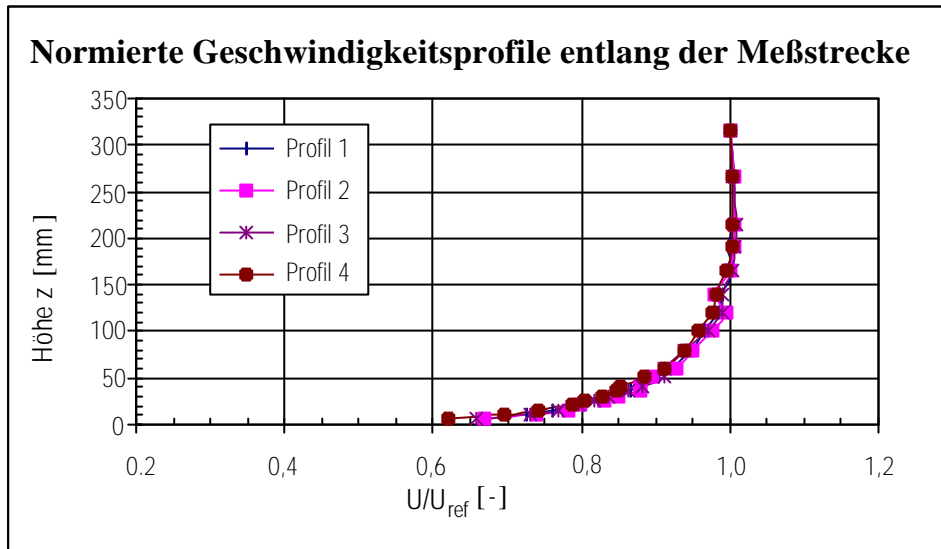


Abb. 34 Abbildung der Geschwindigkeitsprofile entlang der Meßstrecke an 4 ausgewählten Positionen. Aufgetragen ist die mit der Anström- oder Referenzgeschwindigkeit U_{ref} normierte mittlere gemessene Geschwindigkeit U gegen die Höhe z .

Auf Abb. 35 sind die Turbulenzprofile für dieselben Meßpunkte dargestellt. Auch hier ist die Übereinstimmung der gemessenen Profile relativ gut, mit einer Abweichung auf denselben beiden Positionen, die auch schon in der Geschwindigkeit eine Differenz gezeigt haben. Die Differenz beträgt hier im Maximum bis zu 30% vom Mittelwert der übrigen Profile. Auch in diesem Fall wurden nur noch die Profile entlang der Mittellinie dargestellt.

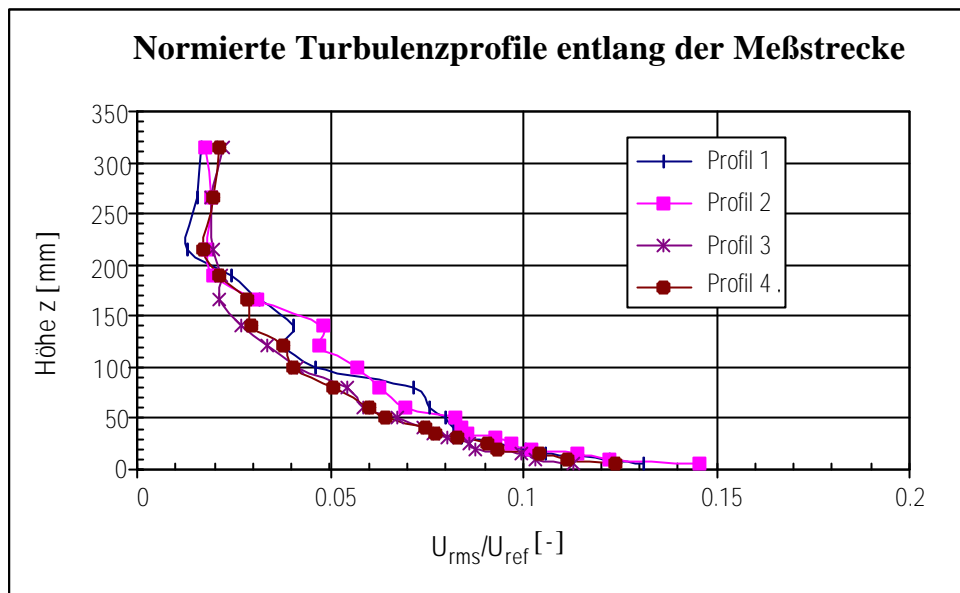


Abb. 35 Abbildung der Turbulenzprofile entlang der Meßstrecke an denselben 4 ausgewählten Positionen. Aufgetragen ist die mit Referenzgeschwindigkeit U_{ref} normierte Standardabweichung gegen die Höhe z.

Abb. 36 beschreibt das verwendete Meßraster. Hierbei handelt es sich um einen y-z-Schnitt, der jeweils an den gleichen x-Positionen zwischen den Fahrzeugen bzw. den Plättchen aufgenommen wurde.

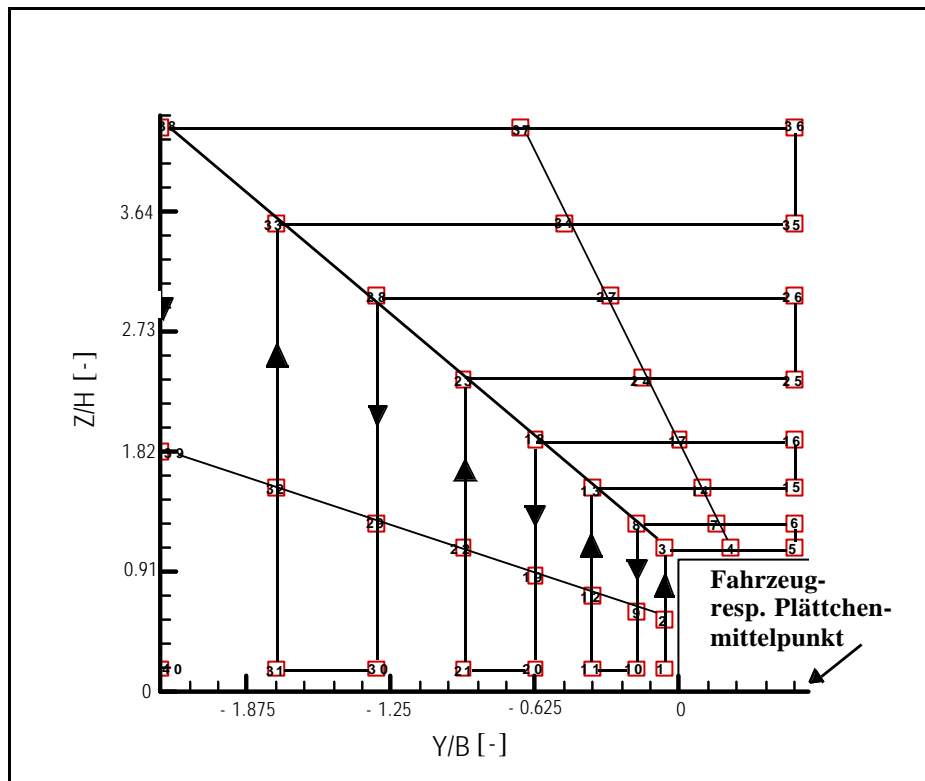


Abb. 36 Darstellung des verwendeten Meßrasters. Diese Querschnittsflächen wurden für die Fahrzeug- resp. die Plättchenmessungen an denselben absoluten Positionen durchgeführt.

Auf der nachfolgenden Abb. 37 ist die Anordnung des Meßrasters dargestellt. Die x -Achse liegt in Strömungsrichtung, die y -Achse lateral dazu, die z -Achse zeigt vertikal nach oben. Die Plättchen wurden gemäß der vorher bestimmten Konfiguration besetzt, das bedeutet, an den Positionen wo sich im ersten Versuch die Fahrzeuge befanden, wurden bei der Wiederholung mittig Plättchen montiert. Da diese Konfiguration einen Abstand von einer Fahrzeuglänge erforderte, befanden sich auch mittig zwischen den Fahrzeugen Plättchen. An den Punkten zwischen den Fahrzeugen wurden die Profile in Querschnitten seitlich heraus in lateraler/vertikaler Richtung gemessen.

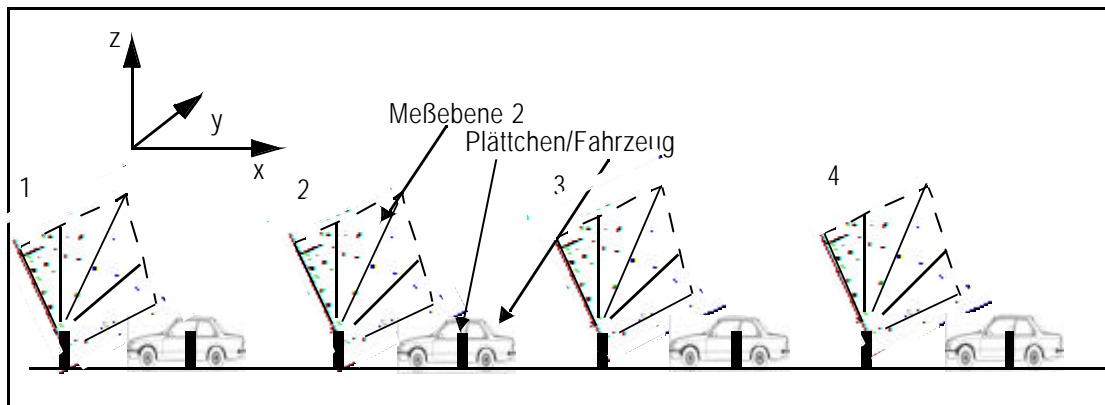


Abb. 37 Darstellung der Meßebenen zwischen den Fahrzeugen bzw. der Plättchen. Die Nummern geben die Anzahl der dargestellten Meßraster an.

In Abb. 38 und Abb. 39 sind die y - z -Schnitte der Verteilung der Differenz der Turbulenzintensitäten I zwischen den Fahrzeugen und den neuskalierten Plättchen dargestellt. Die grau eingezeichneten Fahrzeuge markieren die Position der Fahrzeuge in Relation zu den Meßebenen. Die Turbulenzintensität ergibt sich aus

$$I = \frac{\sqrt{u'^2}}{\bar{U}}, \quad (22)$$

mit $\sqrt{u'^2}$, der Standardabweichung (*rms*-Wert) der Geschwindigkeit und \bar{U} der mittleren Geschwindigkeit am Meßort. Von dem berechneten Wert wurde dieselbe Größe aus dem vorher gemessenen atmosphärischen Profil abgezogen, so daß die Turbulenzintensität nur jeweils die der Fahrzeuge bzw. der Plättchen darstellt.

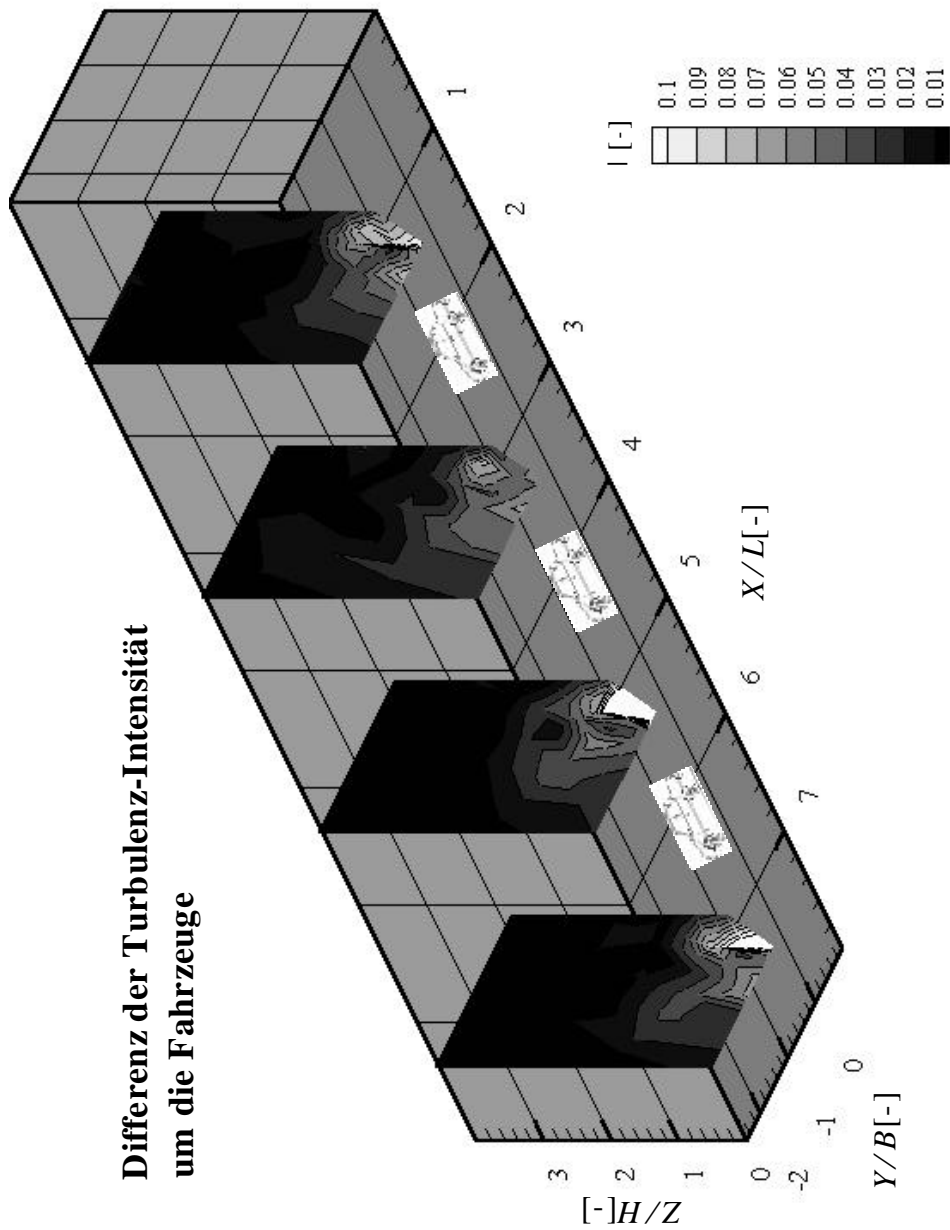


Abb. 38 Darstellung der Ergebnisse der Turbulenzintensitäten I in Querschnittprofilen jeweils zentriert zwischen zwei Fahrzeugen. Die Fahrzeuge wurden exemplarisch eingezeichnet, um die Meßrastrer relativ zur Fahrzeugposition zu verdeutlichen.

In Abb. 38 werden entlang der Mittelachse, in unmittelbarer Fahrzeugnähe, höhere Turbulenzintensitäten gemessen, als an denselben Stellen zwischen den Plättchen in Abb. 39.

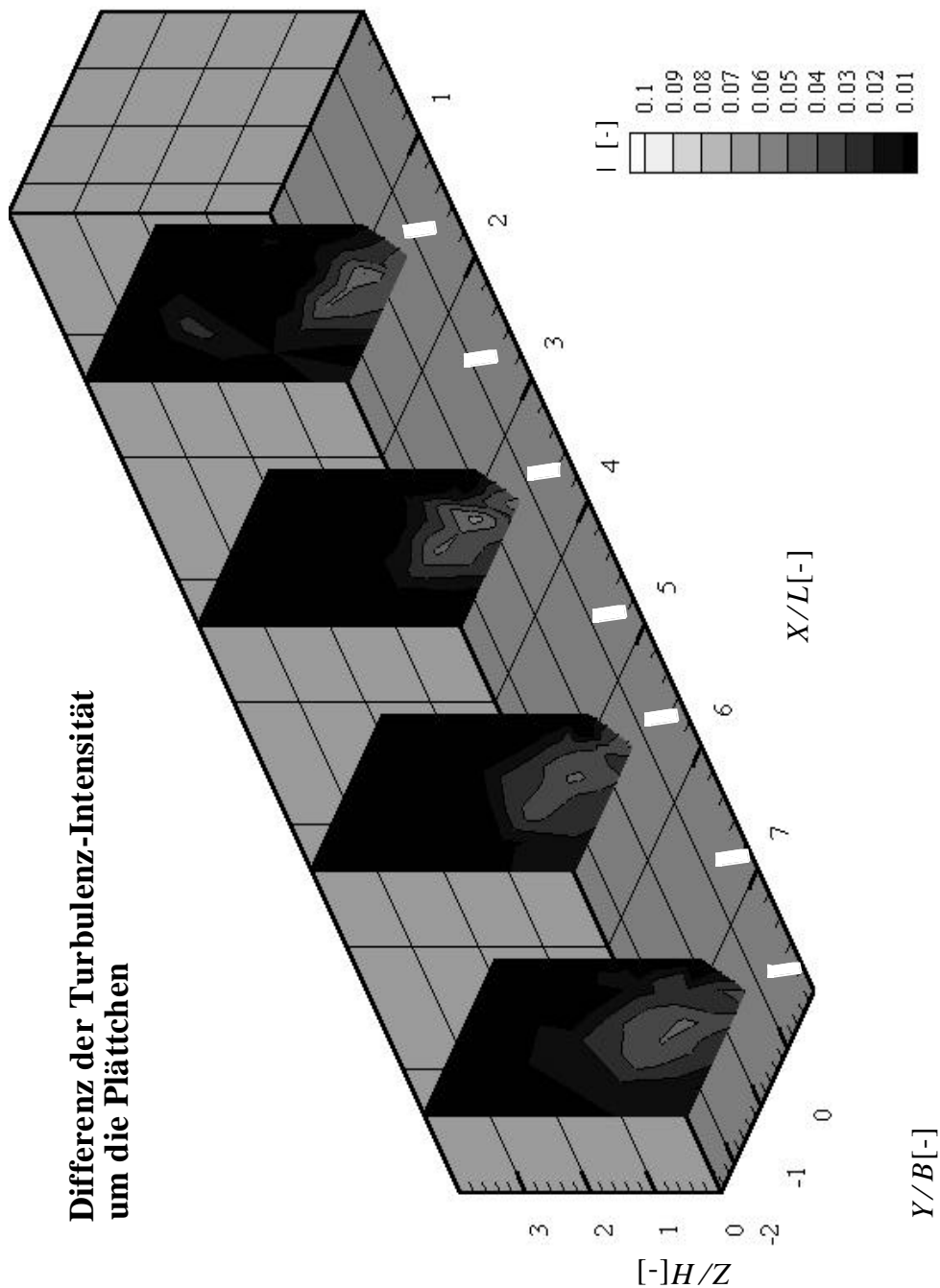


Abb. 39 Darstellung der Turbulenzintensitäten I um die Plättchen, die die durch die Laserlichtschnitte neu abgeleiteten Skalierung besitzen. Die Turbulenzintensitäten wurden an denselben Positionen wie im vorigen Meßfall bei den Fahrzeugen gemessen. Die weißen Rauten markieren lediglich die Position der Plättchen in Relation zu den Meßflächen, d.h. sie entsprechen nicht der neuen Skalierung.

Die übrige Struktur der Turbulenzintensitätsverteilung ist in beiden Fällen vergleichbar. Die Turbulenzintensität klingt jeweils lateral und vertikal ab. In ca. 2-facher Fahrzeughöhe über den Fahrzeugen und in ca. 1.5-facher Fahrzeugbreite neben den Fahrzeugen entsprechen die Werte wieder den ungestörten Verhältnissen. Die gleichen Strukturen

der Turbulenzverteilung finden sich in Abb. 39 für die Plättchen, lediglich die hohen Werte, die in der unmittelbaren Nähe der Fahrzeuge gemessen werden, werden nicht wiedergegeben. Die Turbulenz, die durch die Plättchen entsteht, wird an dieser Stelle unterrepräsentiert. Allerdings ist dieser Effekt an dieser Stelle nicht so wesentlich, da Naturmessungen normalerweise in ca. 2-3 m Entfernung zur Straße und nicht in direkter Umgebung der Fahrzeuge durchgeführt werden. Wichtig ist also, daß die Turbulenz zwar richtig dargestellt wird, aber auch mit Hinblick darauf, an welcher Stelle sie mit der Natur verglichen wird.

Anhand der durchgeführten Lichtschnitte wurde die Skalierung der Plättchen auf eine Fläche von $B \times H = 10 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ bestimmt. Dies wurde durch das Ergebnis der Turbulenzmessungen in guter Näherung bestätigt. Die Höhenabmessungen für die Plättchen ergeben sich durch die Höhe, in der beim realen Fahrzeug die Wirbel abgelöst werden, welches in Kofferraumhöhe stattfindet. Dies wurde durch die Abmessungen nach der alten Modellierung geringfügig unterschätzt bzw. ist dann tatsächlich abhängig von der betrachteten Fahrzeugform. Bei der hier betrachteten Fahrzeugform (Stufenheck) lösen die Wirbel in einer Höhe von max. 30 mm ab, welches im Naturmaßstab in ca. 0.7 m und damit ca. 0.25 m unter dieser Höhe liegt. Die Breite der neuen Plättchenfläche hat sich jedoch um ca. den Faktor 8 in der Skalierung nach der Dimensionsanalyse von 80 mm entsprechend der Querschnittsfläche des Fahrzeugs auf 10 mm (0.24 m) reduziert. Dies ergibt sich dadurch, daß die Strömung vor den Plättchen, die bodengebunden sind, einen Hufeisenwirbel bildet, durch den die Strömung in einem weiten Bogen nach außen um das Hindernis herumgeführt wird und somit mitgeführte Schadstoffe nach außen verdrängt werden und ebenfalls für erhöhte Turbulenzwerte in dieser Region sorgen. Der Unterschied zum Fahrzeug besteht darin, daß reale Fahrzeuge nicht bodengebunden sind, sondern auf den Reifen mit Bodenfreiheit auf der Straße fahren und somit unterströmt werden. Hieraus resultiert eine stark reduzierte Verdrängung bzw. Transport in sowohl x - als auch y - und z -Richtung.

5 Schlußfolgerungen

5.1 Bestimmung der Größe und Form der Wirbelgeneratoren

Aus den im vorigen Kapitel beschriebenen Experimenten wurden zur Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz Plättchen mit einer neuen Skalierung abgeleitet. Diese Skalierung steht nun im Widerspruch sowohl zu der von Plate (1982) und Kastner-Klein (1999) abgeleiteten Skalierung, als auch zu der in dieser Arbeit durchgeführten Dimensionsanalyse. Die hier experimentell bestimmten Wirbelgeneratoren sind im Vergleich zu Kastner-Klein (1999) um einen Faktor von ungefähr 4, zur Dimensionsanalyse sogar um den Faktor 8, kleiner. Aus den Ergebnissen dieser Experimente und der Dimensionsanalyse lassen sich jedoch Rückschlüsse ziehen, die aufzeigen, daß die experimentell abgeleiteten Plättchen ebenfalls noch nicht richtig dimensioniert sind und, resultierend daraus, wie die korrekte Skalierung aussehen muß.

Aus der Dimensionsanalyse wird gefordert, daß die Wirbelgeneratoren dieselbe Querschnittsfläche besitzen müssen wie Fahrzeuge, da ansonsten die erzeugten Wirbel keine naturähnlichen Abmessungen besitzen. Dieser Fall ist im Ausbreitungsexperiment getestet worden und es konnte gezeigt werden, daß die Konzentrationsverteilung zwischen Fahrzeugen und Plättchen unter ansonsten gleichen Bedingungen sehr große Abweichungen aufweist. Diese Abweichung resultiert aus der starken Verdrängung der Strömung, da die Plättchen effizienter wirken als Fahrzeuge. In der Dimensionsanalyse wurde jedoch ebenso gefordert, daß der Widerstandsbeiwert der Wirbelgeneratoren genauso groß sein muß wie der von Fahrzeugen. Dies stellt für Plättchen einen nicht zu erfüllenden Widerspruch dar, da der Widerstandsbeiwert c_w für diese Plättchen bei ungefähr 0.75 und damit fast doppelt so hoch liegt, wie der von Fahrzeugen. Dies ergibt sich aus an der University of Surrey durchgeführte Experimente (Konarides (2000)), die in Anhang C genauer beschrieben sind.

In der nach Kastner-Klein (1999) geforderten Skalierung gehen in die Berechnung der Plättchenfläche die Querschnittsfläche der Fahrzeuge, aber auch die c_w -Werte von Plättchen und Fahrzeugen mit ein. Die daraus resultierende Plättchenfläche ist ebenfalls im Windkanal im Ausbreitungsversuch getestet worden und auch hier wurden deutlich unterschiedliche Ergebnisse in der Ausbreitung zwischen Fahrzeugen und Plättchen sichtbar.

Die im Rahmen dieser Arbeit abgeleitete Plättchenfläche zeigt in der Analyse der Turbulenzintensität sehr ähnliche Werte, widerspricht aber, wie erwähnt, der Dimensionsanalyse.

Aus den durchgeführten Experimenten und den Forderungen aus der Dimensionsanalyse läßt sich nun aber die Größe der Wirbelgeneratoren, und untrennbar damit verbunden, die Form der Wirbelgeneratoren bestimmen.

Die Größe der Plättchen ist vorgegeben, wie in der Dimensionsanalyse gezeigt, mit der Querschnittsfläche der Fahrzeuge. Dies ist notwendig, um Wirbel im Naturmaßstab einzustellen. Gleichzeitig wird hierdurch, bei der Verwendung von Plättchen, ein unrealistischer Transporteffekt in der Strömung erzeugt, der in einer von Fahrzeugen verschiedenen Ausbreitung resultiert. Die Dimensionsanalyse fordert ebenso gleiche Widerstandsbeiwerte und dies ist nur zu erreichen, wenn statt Plättchen andere Strömungskörper verwendet werden, die den c_w -Wert von Fahrzeugen besitzen. Maßstäblich verkleinerte Fahrzeuge kommen hierfür nicht in Frage, da diese wiederum in nicht zu erfüllenden hohen notwendigen Mindestreynoldszahlen resultieren und somit sehr hohe Bandlaufgeschwindigkeiten erfordern. Der Widerstandsbeiwert c_w von Fahrzeugen hängt von deren Form ab und liegt im Mittel bei ca. $0.35 \pm 10\%$ (White (1999)). Hieraus läßt sich auch eine Grenze für die Gültigkeit der Verwendung von anderen Strömungskörpern ableiten. Die Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz kann demnach als genügend betrachtet werden, wenn der verwendete Wirbelgenerator, neben der Abmessung einer naturähnlichen Querschnittsfläche, den Widerstandsbeiwert mit einer Grenze von $\pm 10\%$ einhält. Die durchgeführten Messungen lieferten als Ergebnis für die Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz die Verwendung von Plättchen, die eine Skalierung von Höhe H x Breite $B = 40\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ besitzen. Der Widerstandsbeiwert für diese Plättchen wird in der Literatur mit ca. 1.2 angegeben (Cook (1990)). Aus der Übereinstimmung der Ergebnisse der deutlich kleineren Plättchenfläche mit den Fahrzeugen, läßt sich schließen, daß ein höherer c_w -Wert durch eine kleinere Plättchenfläche kompensiert wurde, die aber falsche Wirbelmaße erzeugt. Dies wird aber in der Darstellung der Verteilung der Turbulenzintensitäten nicht sichtbar, hierüber hätte die Messung einer hochaufgelösten Zeitserie der Geschwindigkeitskomponenten und die Berechnung der charakteristischen Wirbelmaße für die einzelnen Komponenten Aufschluß gegeben. Dies war jedoch durch die Verwendung eines einzelnen Hitzdrahtes, der nur den Betrag des Geschwindigkeitsvektors liefert, nicht möglich.

Über die Form der Wirbelgeneratoren muß nun gleichzeitig der Transport entschärft und der Widerstandsbeiwert an Fahrzeuge angepaßt werden. Dies ist nur möglich, in dem ein stromlinienförmiger Körper gewählt wird. Auf der anderen Seite muß dieser Körper so gewählt werden, daß der c_w -Wert bei geringstmöglichen Geschwindigkeiten Reynoldszahlunabhängig wird, da, wie in der Dimensionsanalyse erläutert, der Transport in x -Richtung entlang der Straßenachse schon von der Linienquelle übernommen wird und der Wirbelgenerator nur für die Turbulenz in y - und z -Richtung benötigt wird. Der Körper, der diese Kriterien gleichzeitig am ehesten erfüllt, ist ein Halbrundprofil mit offenem Boden (Abb. 40). Bei der Abmessung des Halbrundprofils wird das Verhältnis der Fahrzeugabmessungen (Kühlerhaube, halbe Fahrgastzelle, Fahrzeugbreite) mit den oben angegebenen Maßen aufrechterhalten und mit ca. der halben Fahrzeuglänge festgelegt. In der Literatur wird für ein 3-dimensionales Halbprofil mit offenem Boden ein Widerstandsbeiwert von $c_w = 0.4$ angegeben und besitzt eine kritische Reynoldszahl von $Re \geq 10.000$ (White (1999)).

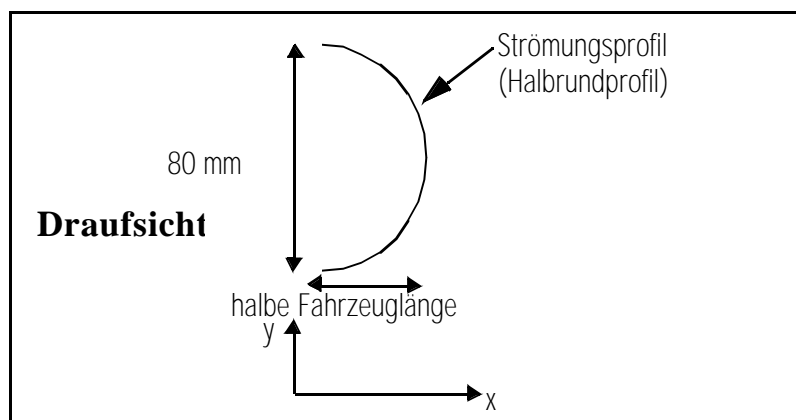


Abb. 40 Schematische Darstellung des neu zu modellierenden halbrunden Wirbelgenerators.

Der Abstand der Wirbelgeneratoren wird durch den zu modellierenden Naturfall bestimmt. Zum einen kann davon ausgegangen werden, daß die Nachläufe ähnlich zu denen von Fahrzeugen erzeugt sind, da die erzeugten Wirbelmaße naturähnlich sind und auch das Transportverhalten durch die Wahl des Körpers optimiert wurde. Desweiteren muß die Anzahl bzw. die Frequenz der Fahrzeuge des Naturfalls modelliert werden. Die Frequenz der Fahrzeuge ist gebunden an die Geschwindigkeit des Bandlaufes und hier

ist entscheidend, daß die Mindestgeschwindigkeit, die sich aus der Reynoldszahl des verwendeten Wirbelgenerators ergibt, eingehalten wird.

5.2 Bestimmung der Geschwindigkeit der Wirbelgeneratoren

Aus der Dimensionsanalyse geht hervor, daß das Geschwindigkeitsverhältnis von Riemenantrieb zu Anströmgeschwindigkeit modelliert werden muß. Wird der Riemenantrieb mit der Geschwindigkeit bewegt, bei der die Wirbelgeneratoren Reynoldszahlunabhängig werden, ändert sich nichts mehr am Strömungsbild und es wäre unnötig, höhere Geschwindigkeiten für die Modellierung zu benutzen. Ebenfalls darf eine Mindestgeschwindigkeit nicht unterschritten werden, die sich aus der Reynoldszahl ergibt. Für die gewählte Form liegt die entsprechende kritische Reynoldszahl bei ca. *10.000*, welche sich auf Bandlaufgeschwindigkeiten von ca. *2.7 m/s* umrechnen läßt (White (1999)). Prinzipiell ergibt sich die Bandlaufgeschwindigkeit aus dem zu modellierenden Naturfall. Da durch den beschriebenen Wirbelgenerator die unerwünschten Nebeneffekte weitgehend reduziert werden sollten, könnten nun auch höhere Bandlaufgeschwindigkeiten verwendet werden.

5.3 Die Nullwindsituation

Ein Defizit, welches sich aus der früheren Modellierungstechnik ergab, ist die dort nicht gelöste Nullwindsituation. Dieses Defizit tritt bei diesem Modellierungsansatz nicht auf, da nicht mehr nach der Turbulenzproduktionszahl, sondern nun direkt modelliert wird. Bei Windstille wird die Anströmgeschwindigkeit im Windkanal auf Null gesetzt. Aus diesem Grund ist der Riemenantrieb essentiell, da auf diese Weise etwaige lokale Abhängigkeiten der Turbulenz- oder Konzentrationswerte vermieden werden, die sich aus stationären Turbulenzgeneratoren ergeben würden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die physikalische Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz im kleinskaligen Windkanalmodell behandelt. In der Literatur sind hierbei frühere Arbeiten bekannt, die jedoch nur einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich besitzen (Plate (1982), Brilon et al. (1987), Kastner-Klein (1999)). Dies gab die Motivation, erneut die Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz im kleinskaligen Windkanalmodell zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern. Hierfür wurden, ausgehend von einer Dimensionsanalyse, die einflußnehmenden Parameter abgeleitet. Über einen exemplarisch durchgeführten Versuch, in dem Plättchen auf einem Riemenantrieb montiert wurden, wurde die Wirkungsweise der zuvor verwendeten Wirbelgeneratoren erläutert. In einem weiteren Experiment, in dem zur Markierung der Strömung ein Tracergas freigesetzt wurde, konnte aufgezeigt werden, daß sowohl die aus der Dimensionsanalyse als auch aus der früheren Modellierungsstrategie abgeleiteten Wirbelgeneratoren die falsche Skalierung besaßen, da der Kontrollfall wie er von Fahrzeugen erzeugt wird, nicht korrekt simuliert wurde. Eine Anpassung der Skalierung der Wirbelgeneratoren erzeugte dann zunächst die geforderte ähnliche Verteilung der Turbulenzintensität. Da die Wirbelgeneratoren jedoch keinen Bezug mehr zum Naturmaß besaßen, konnte daraus geschlossen werden, daß trotz ähnlicher Verteilung der Turbulenzintensität die erzeugten Wirbel keine Naturähnlichkeit mehr besitzen.

Obwohl aus den durchgeführten Experimenten somit zunächst widersprüchliche Ergebnisse gewonnen wurden, konnte anhand der Widersprüche dennoch eine Modellierungsstrategie abgeleitet werden, die die Kriterien der Ähnlichkeitstheorie erfüllt. Die Vorteile dieser verbesserten Modellierungsstrategie liegen zum einen darin, daß sie keinen limitierten Gültigkeitsbereich besitzt und somit ebenfalls in der Nullwindsituation angewendet werden kann. Eine wesentliche Verbesserung besteht jedoch darin, daß der vorher in früheren Modellierungsstrategien beobachtete Transporteffekt der Plättchen nun wegfällt und somit zu erwarten ist, daß der Einflußbereich der Plättchen nicht länger überschätzt, sondern realistisch modelliert wird.

6.2 Ausblick

Da die physikalische Modellierungsstrategie letztendlich eine theoretische Schlußfolgerung aus den durchgeführten Experimenten und der Dimensionsanalyse ist, müßte nun die experimentelle Bestätigung durchgeführt werden. In diesem Experiment müßte gemäß des Vergleichs der Turbulenzintensitäten ein Vergleich zwischen Fahrzeugen und den theoretischen bestimmten Wirbelgeneratoren erfolgen. Zu diesem Zweck der Überprüfung könnte auch ein Vergleich mit einem Naturdatensatz durchgeführt werden, der schon häufiger die Grundlage für numerische Modellvalidierungen war (Schatzmann et al. (1999c), NLÖ (1993)). Dies konnte aus Zeitgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr umgesetzt werden, wäre aber aus Gründen der Vollständigkeit notwendig und würde eine verlässliche Aussage geben.

Die hier präsentierte Modellierungsstrategie wurde anhand von Kraftfahrzeugen entwickelt, welche für Lastkraftwagen vervollständigt werden müßte. Der Widerstandsbeiwert für LKW's liegt bei ca. 0.8 (Bohl (1998)), hier müßte nach einem verwendungsfähigen Strömungskörper gesucht werden, der wiederum eine geringe Mindestgeschwindigkeit mit dem richtigen Widerstandsbeiwert verbindet. Gemäß der Literatur könnte man hier z.B. auf einen Zylinder zurückgreifen, dessen eine kurze Seite ebenfalls ein Halbrundprofil besitzt, ähnlich wie das für die Simulation der Fahrzeuge verwendete (White (1999)). Für einen solchen Körper beträgt, bei einem Aspektverhältnis von Länge L zur Breite $B = l$, der Widerstandsbeiwert ungefähr 0.9. Dieses bzw. ein verwendungsfähiger Körper kann gegebenenfalls aus Vorversuchen abgeleitet werden.

Aus einer systematischen Meßreihe, in der ein Naturfall im Windkanal simuliert wird, könnte dann auch ein Potenzgesetz abgeleitet werden, mit dem Konzentrationsverteilungen an einem Meßpunkt bei einer bestimmten Anströmgeschwindigkeit auf unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten umgerechnet werden können. Dies wäre notwendig, da aufgrund des unterschiedlichen Antriebs, hier die Fahrzeug-induzierte Turbulenz, nicht dem Potenzgesetz für lediglich vom Wind bestimmte Ausbreitungsfälle folgt. Hierzu gibt es in der Literatur bislang noch unterschiedliche Ansätze (Berkowicz (1997), Kastner-Klein (1999)), die auf diese Weise überprüft bzw. somit zu einer allgemeingültigen Lösung geführt werden könnten.

Aus den Turbulenzmessungen kann abgeleitet werden, daß die Fahrzeuge in ihrem Wirkungsbereich in dem hier modellierten Fall eine zusätzliche Turbulenz von ca. 60 % des atmosphärischen Turbulenzwertes erzeugen. Dieser Wert stellt jedoch eine konservative Schätzung dar, da die atmosphärische Grenzschicht für diese Untersuchungen bewußt weitgehend unterdrückt wurde, um die Fahrzeug-induzierte Turbulenz deutlicher hervorstreten zu lassen. Generell handelt es sich also nur um einen sehr kleinen Effekt. Ein Untersuchungsziel für die Zukunft müßte es also sein, herauszufinden, inwieweit es möglicherweise nur die LKW's sind, die von übergeordneter Bedeutung sind und für die Modellierung allein berücksichtigt werden müßten. Je nach betrachtetem Untersuchungsgebiet würde der Anteil des LKW-Verkehrs vorher durch z.B. eine Verkehrszählung erfaßt werden müssen und dann möglicherweise nur noch dieser Anteil modelliert werden. Weitere, von der Universität Hamburg im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführte Naturmessungen deuten an, daß der Kraftfahrzeugverkehr in der Tat nur eine untergeordnete Rolle in der Turbulenzproduktion auf Straßen spielt und es lediglich die Lastkraftwagen sind, die zu dieser Turbulenz meßbar beitragen (Frantz (2000)).

Anhang A Umströmung bodengebundener, scharfkantiger Einzelhindernisse und Fahrzeuge

Da sich die Umströmung bodengebundener, scharfkantiger Hindernisse grundlegend von der Umströmung von Fahrzeugen, die Bodenfreiheit besitzen, unterscheidet, werden diese Unterschiede in den nachfolgenden Abb. 41 und Abb. 42 erläutert. Auf Abb. 41 ist die Umströmung eines 3-dimensionalen, quaderförmigen, scharfkantigen Einzelhindernisses dargestellt.

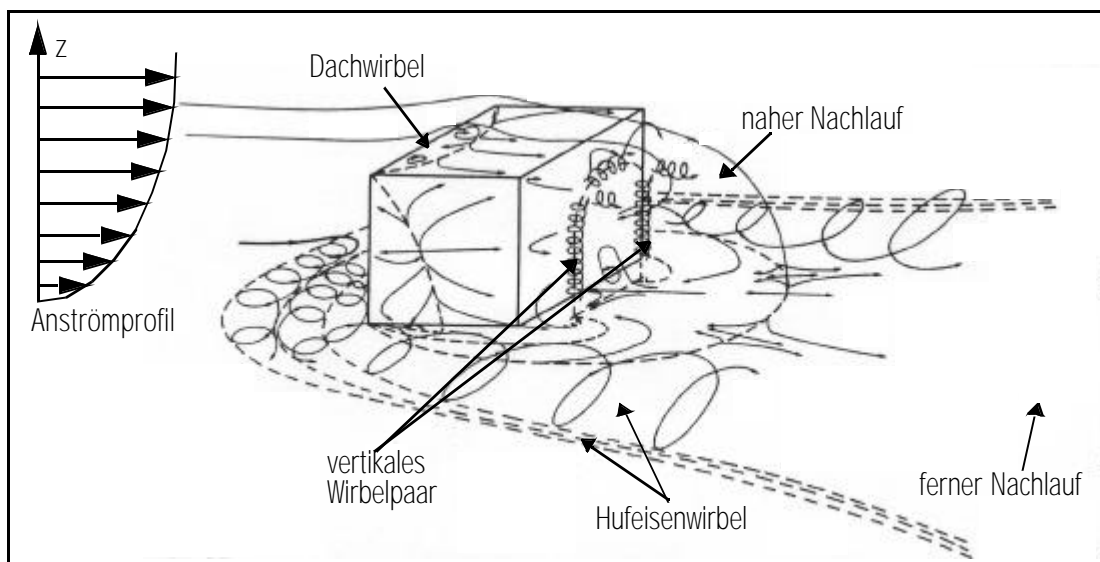


Abb. 41 Typische Strömungszonen um ein bodengebundenes, 3-dimensionales scharfkantiges Hindernis (nach Hunt et al. (1978))

Die Ablösezone ist durch die scharfkantigen Wände des Hindernisses vorgegeben. Vor dem Quader etabliert sich der Hufeisenwirbel, der um das Hindernis herumführt. Dieser Wirbel kann sich nur bei bodengebundenen Hindernissen ausbilden, da ein bodenfernes Hindernis anderenfalls unterströmt würde. Direkt an der frontalen Dachkante bildet sich der Dachwirbel aus, ausgelöst durch einen Strömungsabriß an der Dachkante. An der rückwärtigen Seite des Hindernisses bildet sich ein vertikales Wirbelpaar aus, welches durch die Ablösung an der Rückwand entsteht. Das Lee-Gebiet hinter dem Quader ist gekennzeichnet durch eine geringe mittlere Geschwindigkeit, jedoch extreme Geschwindigkeitsgradienten und eine hohe Turbulenzintensität. Das Strömungsgebiet, was sich an das Lee-Gebiet anschließt, wird als Nachlaufzone eines Hindernisses bezeichnet

und beschreibt den Bereich, in dem immer noch ein signifikanter Unterschied zur Anströmung besteht. Die Länge des Nachlaufes kann das *10-20*-fache der Quaderhöhe betragen, die vertikale Erstreckung das ca. *2-3*-fache der Quaderhöhe (Arya (1998)). Ab Streckungen des Hindernisses von Länge L zu Höhe H von 1 kann sich die Strömung wieder an das Hindernis anlegen, was zu einer Reduktion des Widerstandes in der Strömung führt, ebenfalls sichtbar an niedrigeren Widerstandsbeiwerten (Bohl (1998)).

In Abb. 42 ist die Umströmung eines Fahrzeugs dargestellt. Die wesentlichsten Unterschiede zur Umströmung des dargestellten Hindernisses ergeben sich durch die Bodenfreiheit des Fahrzeugs, die ein Fehlen des Hufeisenwirbels nach sich ziehen und für eine Unterströmung des Fahrzeugs sorgen. Die Ablösezonen bzw. Rückströmgebiete um das Fahrzeug sind ebenfalls weniger stark ausgeprägt und finden sich jeweils abhängig von der Wagenform am Übergang von der Motorhaube zur Windschutzscheibe und an der Heckscheibe zum Kofferraum. Im Nachlauf des Fahrzeugs bilden sich zwei Wirbelzöpfe aus, die gegenläufig rotieren. Die Ausprägung der einzelnen Wirbelsysteme hängt von der Fahrzeugform und somit der Aerodynamik des Fahrzeugs ab.

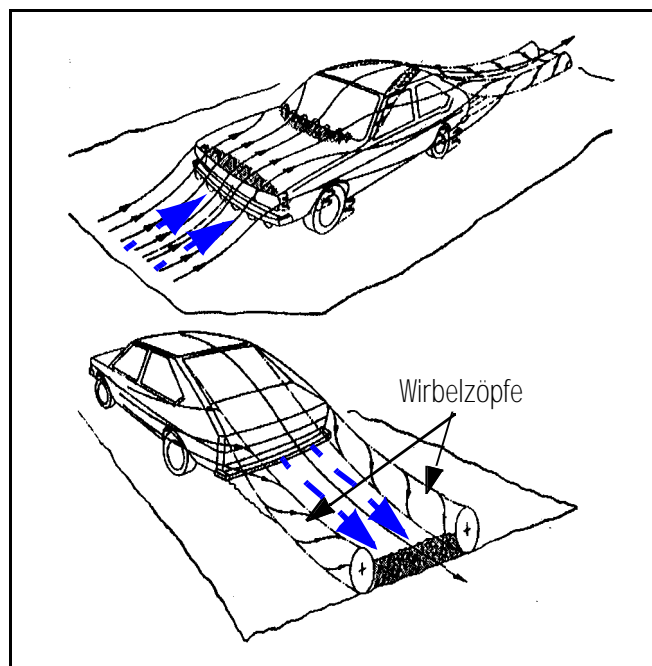


Abb. 42 Umströmung eines Fahrzeugs (nach Hucho (1994)). Die gestrichelten Pfeile zeigen die Unterströmung des Fahrzeugs an.

In Abb. 43 ist die Umströmung eines 2-dimensionalen Plättchens in Draufsicht vereinfacht dargestellt. Die Hufeisenwirbel führen in einem weiten Bogen um das Plättchen herum und zeigen exemplarisch den Bereich, in dem die Strömung durch das Plättchen beeinflusst wird.

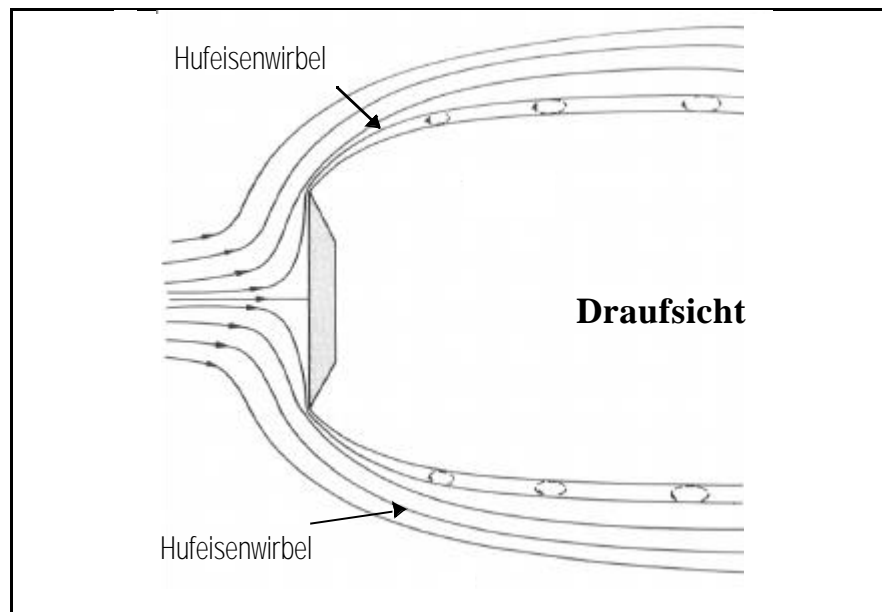


Abb. 43 Umströmung eines 2-dimensionalen Plättchens in der Draufsicht für Reynoldszahlen größer 1000. Vereinfacht dargestellt sind die Hufeisenwirbel, die eine Ablenkung der Strömung seitlich nach außen darstellen (Simiu und Scanlan (1996)).

In diesem Horizontalschnitt ist nicht sichtbar die Ablösung an der Oberkante des Plättchens, wo auch hier wieder die Ablösezone über die scharfkantige Dachkante definiert ist. Ein Anlegen der Strömung kann nicht stattfinden, da das Plättchen keine räumliche Ausdehnung besitzt. Dies wirkt sich, wie schon vorher beschrieben, auf den Widerstand in der Strömung aus und erhöht den Widerstandsbeiwert c_w . Für ausführlichere Erläuterungen zum Widerstandsbeiwert wird auf Anhang C verwiesen.

Anhang B Genauigkeit der verwendeten Meßgeräte

Sämtliche durchgeführten Messungen unterliegen einem Fehler, deren Größenordnung per Fehlerfortpflanzungsrechnung oder Abschätzung der eingehenden Fehler bestimmt werden kann, um die Aussagekraft dieser Messungen einschätzen zu können. Hierbei werden die systematischen Fehler von den zufälligen Fehler unterschieden. Die systematischen Fehler entstehen durch Unvollkommenheit der Meßgeräte und -verfahren, (Funktions- und Eichfehler), sowie Vernachlässigung äußerer Einflüsse wie z.B. Druck und Temperatur oder auch der Einfluß des Meßgerätes auf das Meßobjekt. Werden die Messungen unter den gleichen Bedingungen wiederholt, tritt ein systematischer Fehler in gleichbleibender Größe und mit gleichem Vorzeichen auf. Die systematischen Fehler werden nicht Gegenstand einer Fehlerrechnung und erst durch eine Korrektur im Meßergebnis (als Meßunsicherheit) berücksichtigt, wenn sie nicht vermieden oder nicht tolerierbar klein gehalten werden können. Zufällige Fehler beinhalten Ablesefehler, Temperaturschwankungen oder Druckänderungen, Reibung oder toter Gang bei mechanischen Bewegungen der Meßgeräte. Diese zufälligen Fehler haben statistischen Charakter und besitzen beiderlei Vorzeichen, d.h. bei wiederholter Durchführung unter gleichen Bedingungen streuen die Meßwerte um einen Mittelwert.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird für die verwendeten Meßsysteme die Ungenauigkeit der Messungen abgeschätzt. Auf eine Fehlerfortpflanzungsrechnung wird verzichtet, da die zufälligen Fehler durch die Reproduzierbarkeit der Messungen bekannt ist. Die nachfolgenden Fehlerabschätzungen beschreiben die systematischen Fehler, die Größenordnung der zufälligen Fehler ist durch die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse bekannt.

B.1 Genauigkeit der Flammenionisationsdetektoren

Die Ansprechzeit des FastFID wird herstellerseitig angegeben mit *0-90%* des Vollausschlags innerhalb *1-2 ms*. Die Genauigkeit des Gerätes liegt bei *+/- 2%* des Meßwertes. Dies entspräche bei einer Gaskonzentration von Prüfgas mit *760 ppm* ca. *15 ppm*. Der tatsächlich entstehende Fehler wird jedoch weiter reduziert, da nur Relativkonzentrationen gemessen werden. Das heißt, das FID wird auf den Nullpunkt mit dem sogenannten „Nullgas“ und auf den Vollausschlag mit dem Gas kalibriert, welches ebenfalls für die

Messung verwendet wird. Die für die Gasfreisetzung zugeführten Volumenströme werden mit Hilfe von BROOKS Durchflußmessern konstant gehalten und die Analysatoren darüber auch kalibriert. Die auf diese Weise sorgfältig und mehrfach durchgeführte Kalibrierung vor, während und nach der Messung läßt die Gerätegenauigkeit auf deutlich unter 1% des Meßwertes bzw. auf 1-3 ppm schrumpfen. Die Genauigkeit des SlowFID konnte durch wiederholtes Kalibrieren und Vergleichen beider Meßgeräte untereinander ebenfalls auf ca. 2-3 ppm bestimmt werden.

B.2 Genauigkeit des BROOKS Massendurchflußreglers

Die Freisetzung des zu detektierenden Tracergases erfolgte mittels elektronischer Massendurchflußregler der Firma FISHER ROSEMOUNT. Über zwei Regler wurde eine konstante Menge an kohlenstofffreier, synthetischer Luft und Ethan hoher Reinheit (Reinheitsgrad 99.5%) in die Strömung freigesetzt. Der Fehler der Durchflußregler variiert mit der Durchflußmenge. Liegt der gewünschte Durchfluß unter 10% des Gesamtdurchsatzes ist der Fehler mit ca. 4% bezogen auf den Gesamtdurchsatz am größten. Oberhalb von 10% der Gesamtdurchsatzes reduziert er sich auf maximal 2% des Gesamtdurchsatzes (Brooks Instrument BV, 1994). Für die durchgeführten Versuche wurden die Durchflußregler stets so gewählt, daß die eingestellte Durchflußmenge mehr als 10% des möglichen Gesamtdurchflusses betrug und somit der Fehler bei max. 2% lag. Die Fehler wurden bestätigt durch eine weitere unabhängig durchgeführte Kalibrierung gegen zwei Kolbenkalibratoren der Firma BROOKS Instrument.

B.3 Genauigkeit der BROOKS Kolbenkalibratoren

Der Kolbenkalibrator wurde zur volumetrischen Messung inerte Gase für die Kalibrierung von Durchflußmessern mit niedrigen Durchflußraten entwickelt. Die BROOKS Durchflußregler wurden jeweils mit einem Kolbenkalibrator verbunden. Für das Prüfgas Ethan wurde eines mit einem Endvolumen von 450 ml und für die synthetische Luft ein Kolbenkalibrator mit einem Endvolumen von 12000 ml gewählt. Durch die Durchflußregler strömt ein bestimmtes Volumen in die Kolben, ablesbar an der außen befindlichen Milliliter-Skala. Die dafür benötigte Zeit wird mit einer Stoppuhr gemessen. Wiederholte Messungen eines bestimmten Volumens ergaben eine Abweichung von max. 0.1 s des Mittelwertes. Die Kolben bewegen sich in einem Präzisionszylinder aus Borosilikat auf-

wärts. Eine Abdichtung zwischen Kolben und Zylinder wird durch eine Dichtung aus flüssigem Quecksilber gewährleistet, die gleichzeitig eine nahezu reibungsfreie Bewegung des Kolbens im Zylinder ermöglicht (Donat (1995)). Bei jeweils sorgfältiger mehrfacher Kalibrierung der Volumenströme oberhalb der empfohlenen minimalen Integrationszeit von 30 s, wurde für den Ethanvolumenstrom ein maximaler Fehler von ca. 2% und für synthetische Luft von <1% bestimmt. Hierbei ist allerdings zu beachten, daß dieses der Ungenauigkeit der BROOKS und dem Fehler in der Zeitmessung entspricht. Der Fehler des Kolbenkalibrators selbst wird herstellerseitig deutlich unter dieser Grenze liegend angegeben und ist demzufolge vernachlässigbar.

B.4 Genauigkeit des Hitzdrahts

Der eigentliche Sensor besteht aus einem dünnen Wolframdraht mit einem Durchmesser von 5 μm . Dies macht ihn extrem anfällig für Staub und andere Verunreinigungen, die allerdings meist sofort zum vollständigen Versagen des Hitzdrahtes führen. Bei der Kalibrierung muß auf eine ausreichende Anzahl von Kalibrierpunkten geachtet werden, da die Spannungskurve durch ein Polynom ausgeglichen wird. Eine Anpassung zwischen nur zwei Meßpunkten zieht leicht Fehler von +/- 5% des Meßwertes nach sich. Bei einer ausreichenden Anzahl kann dieser Fehler auf deutlich unter 1% Abweichung gesenkt werden. Die Kalibrierung des Hitzdrahtes erfolgt immer gegen ein anderes Geschwindigkeitsmeßverfahren, in diesem Falle gegen das mit einem Differenzdruckaufnehmer verbundenen Prandtl-Rohr. Dieser Fehler von ebenfalls ca. 1% des Meßwertes schlägt sich somit auch in der Hitzdrahtanemometrie nieder.

B.5 Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung mit Staurohr nach Prandtl und Differenzdruckdose

Stau- oder Prandtlrohre werden in Verbindung mit einem differentiell beschalteten, kapazitiven Differenzdruckaufnehmer, in diesem Falle von der Firma MKS BARATRON, zur Bestimmung von Geschwindigkeiten oder Drücken strömender Gase verwendet. Sie bestehen aus zwei konzentrisch angeordneten Metallrohren, deren Ende um 90° gebogen ist, damit die Stauöffnung senkrecht in die Strömung gehalten werden kann. Das innere Rohr führt von der Stauöffnung an der Spitze zu einem Anschlußstutzen am oberen Ende des Staurohres. Das äußere Rohr führt von den kreisförmig angeordneten Bohrungen für den statischen Druck zu dem zweiten Anschlußstutzen. An der Stauöffnung wird der aus

dynamischem und statischem Druck bestehende Gesamtdruck gemessen (Airflow Lufttechnik GmbH (ohne Erscheinungsdatum) und Wilh. Lambrecht KG (1999)). Über den Differenzdruckmesser wird der statische Druck subtrahiert, so daß der dynamische Druck, auch Stau- oder Geschwindigkeitsdruck, resultiert. Dieser ist gleichbedeutend mit dem Druckunterschied, der benötigt wird, um das Gas aus der Ruhe in die betreffende Geschwindigkeit zu versetzen. Mit der für dieses Meßsystem gültigen Beziehung

$$U = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p[V] \cdot Range \cdot 100}{\rho}} \quad (23)$$

wird das dem Druck proportionale Spannungssignal des Baratrons in die Strömungsgeschwindigkeit umgerechnet. Hierbei entspricht U der Geschwindigkeit, $\Delta p[V]$ dem Spannungssignal, $Range$ ist der Meßbereich, ρ die Luftdichte. Die vom Hersteller garantierte Kalibriergenauigkeit des Differenzdruckmessers wird mit 0.25% des Meßwertes angegeben.

Das Staurohr ist aus Messing gefertigt und für Betriebstemperaturen bis ca. 300°C geeignet. Es besitzt keine beweglichen oder dem Verschleiß unterliegenden Teile und einmal vom Hersteller auf entweder Volumenstrom oder Geschwindigkeit kalibriert, besitzt diese Sonde eine Sondenspezifische Kalibrierung, die vom Hersteller (Sonden-)lebenslang garantiert wird. Abweichungen zwischen der Achse des Staurohrkopfes und der Strömungsrichtung von bis zu 15° beeinflussen die Messung praktisch nicht. Die untere Ansprechgrenze ist abhängig von der Empfindlichkeit des angeschlossenen Differenzdruckmessers, sowie bei Geschwindigkeits- und Mengemessungen von der Dichte des strömenden Gases (Airflow Lufttechnik GmbH (ohne Erscheinungsdatum), Wilh. Lambrecht KG (1999)). Bei dem hier verwendeten Staurohr wird sie mit 0.8 m/s herstellereitig angegeben. Der Fehler wird für Gasgeschwindigkeiten von bis zu 50 m/s mit einer Unterschätzung von -1% des Meßwertes angegeben.

B.6 Genauigkeit des Laserlichtschnitts

Beim Laserlichtschnittverfahren handelt es sich um ein rein visuelles Verfahren ohne quantitative Auswertung im Sinne absoluter Meßwerte. Somit kann nicht direkt von einer Fehlerabschätzung gesprochen werden. Die Güte des Lichtschnittes hängt aber trotzdem von mehreren Faktoren ab, die beachtet werden müssen. Generell sollte ein

möglichst kontrastreiches Bild erzeugt werden. Dies wird zum einen durch die Lichtintensität des Lasers bestimmt. Zum anderen muß die Fokussierung der Lichtebene durch die Zylinderlinse präzise eingestellt sein, da die beleuchtete Ebene sonst an Dicke gewinnt. Das Bild wird infolgedessen unschärfer, da nicht mehr nur eine zweidimensionale Ebene, sondern ein dreidimensionaler Raum beleuchtet wird. Für die hier durchgeführten Versuche betrug die Dicke ca. $1-2\text{ mm}$, was für ein scharfes Bild ausreichend ist. Ebenso muß eine ausreichende Partikelzugabe im interessierenden Versuchsgebiet gewährleistet werden, um die turbulenten Strukturen kennzeichnen zu können.

Anhang C Messung des Profilwiderstandes

In einem realen Fluid um einen Körper wird gegen die Bewegung auf diesen festen Körper Widerstand erzeugt. Die Untersuchung der durch die Reibung entstehenden Grenzschicht zeigt, daß unter bestimmten Umständen diese Grenzschicht von der Körperoberfläche ablöst, wodurch es zur Wirbelbildung hinter dem Körper kommt und somit ein Widerstand in der Strömung erzeugt wird. Um den Druckwiderstand eines Körpers zu minimieren, muß demzufolge die turbulente Region hinter dem Körper minimiert werden, d.h. der Ablösepunkt muß so weit hinten wie möglich auf der Körperoberfläche liegen. Bei Fahrzeugen unter Frontanströmung ist dies gut gegeben, die Ablösezone liegt auf der Heckscheibe im hinteren Drittel des Fahrzeugs. Obwohl die physikalischen Prozesse bekannt sind, die den Widerstand erzeugen, kann der Gesamtwiderstand eines beliebigen Körpers nicht theoretisch bestimmt werden. Der Widerstand hängt von der Form des Körpers ab, wobei die rückwärtige Form genauso wichtig wie die der Vorderfront des Körpers ist. Er hängt sowohl von der Reynolds-Zahl, als auch von der Beschaffenheit der Umgebung ab, in der der Körper sich befindet. Es macht also einen Unterschied, ob sich der Körper in einer atmosphärischen Grenzschicht oder einer scherungsfreien, uniformen Anströmung befindet.

Der Profil- oder Gesamtwiderstand setzt sich zusammen aus Reibungs- und Druckwiderstand, je nach Körperform kann der eine oder der andere Widerstand stark überwiegen. Der Druckwiderstand bei Fahrzeugen beträgt ca. 85% des Gesamtwiderstands (Ahmed et al. (1984)). Plättchen besitzen einen zu vernachlässigenden Reibungswiderstand, da der Gesamtwiderstand nahezu nur aus Druckwiderstand besteht.

Für den gegebenen Fall wird ein flaches Plättchen senkrecht zur Strömung betrachtet. Vor dem Plättchen herrscht die ungestörte Anströmgeschwindigkeit. Hinter dem Körper bildet sich eine Druckdelle aus, die in zunehmender x -Richtung (stromab) langsam verschwindet. Es besteht eine Beziehung zwischen eben jener Druckdelle und dem Widerstand des Plättchens. Messung der Geschwindigkeit bzw. des statischen Druckes und des Gesamtdruckes im Nachlauf des Körpers und die Integration über die gesamte Höhe des Meßprofils geben Aufschluß über den Profilwiderstand des Körpers. Dies läßt sich auf

willkürliche Querschnittsflächen anwenden, für die Nachlauf und Nachlaufdelle nicht nur von der Grenzschicht abhängen, sondern ebenso von möglichen Ablösepunkten.

Die zweite Methode, den Widerstandsbeiwert von Körpern zu bestimmen, besteht in einer Kraftmessung. Hierbei wird der zu vermessende Körper auf eine Lastzelle gesetzt und mit verschiedenen Windgeschwindigkeiten angeströmt (Abb. 44) um gleichzeitig die Reynoldszahlunabhängigkeit zu bestimmen.

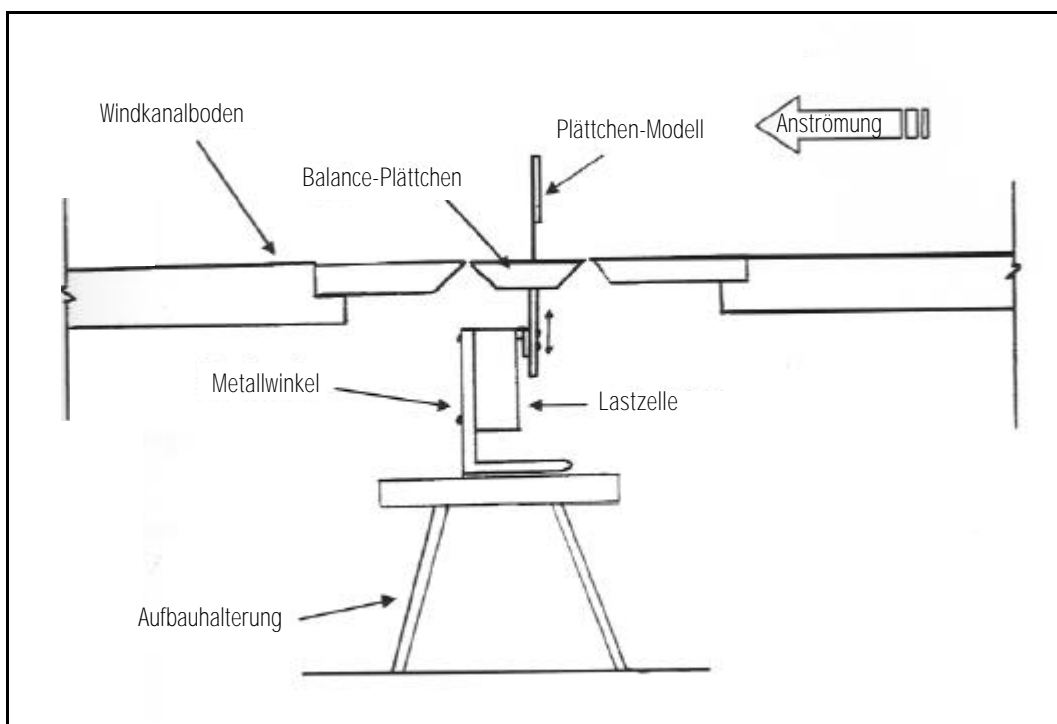


Abb. 44 Prinzipskizze zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes über eine Kraftmessung (aus Konnarides (2000)).

Der Körper wird hierbei in allen drei Komponenten Kräften und Momenten ausgesetzt, wie in Abb. 45 dargestellt. Diese Kräfte beinhalten Auftrieb, Widerstand und Seitenwindkraft. Die Dreh-, Roll- und Kippmomente werden durch die entsprechenden Kräfte erzeugt.

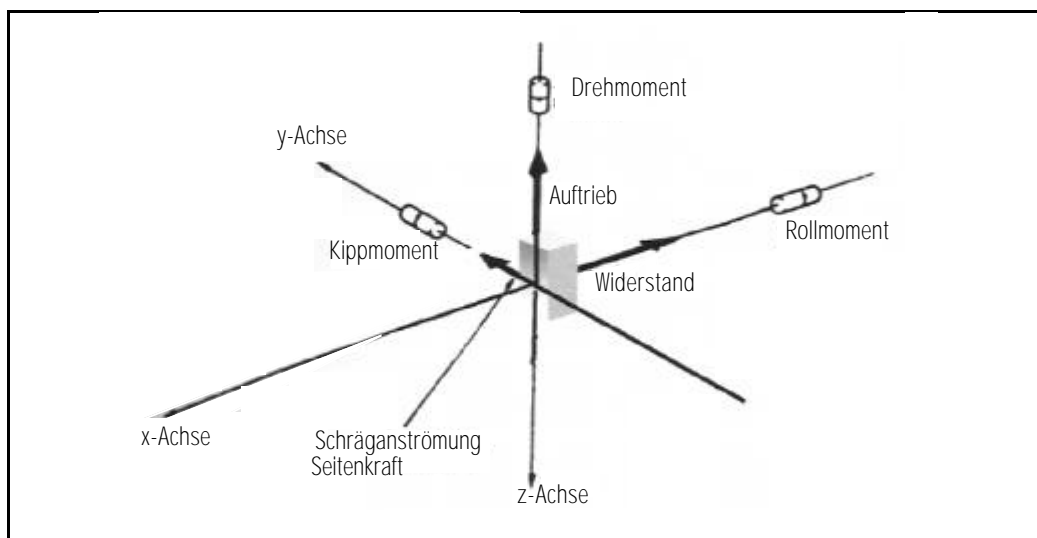


Abb. 45 Schematische Darstellung der angreifenden Kräfte auf einen der Strömung ausgesetzten Körper in allen drei Raumrichtungen (aus Konnarides (2000)).

Im Falle der Plättchen, die eine zu vernachlässigende Dicke im Vergleich zur Anströmfläche besitzen, wird die größte zu erwartende Kraft, der die Plättchen ausgesetzt sind, die Widerstandskraft sein. Aus der Messung der Kraft kann über den schon vorher benutzten Bezug

$$F = \frac{1}{2} \rho u_{\delta}^2 \cdot A_v \cdot c_w \quad (24)$$

direkt der Widerstandsbeiwert c_w abgeleitet werden. Der Widerstandsbeiwert wird auf die beschriebene Weise auf eine Genauigkeit von 0.1% des Meßwertes bestimmt.

Symbolverzeichnis

<u>Symbol</u>	<u>Einheit</u>	<u>Bedeutung</u>
Index N	-	Bezug auf Natur
Index M	-	Bezug auf Modell
Index V	-	Bezug auf Verkehr
Index W	-	Bezug auf atmosphärische Anströmung
A	-	Eichkonstante des Hitzdrahtanemometers
A_v	m^2	Aerodynamische Querschnittsfläche des Modells
B	m	Breite
B	-	Eichkonstante des Hitzdrahtanemometers
D	-	Parameterisierte (dimensionslose) Fahrzeugdichte
DD	°	Windrichtung
E	V	Ausgangsspannung des Hitzdrahtanemometers
F_w	$N = kg\ m / s^2$	Widerstandskraft
H	m	Höhe
L	m	Länge
L	m	Länge des turbulenten Nachlaufs
M	-	Maßstab
N	Fahrzeuge / Zeit	Anzahl
Q	kg / s	Volumenstrom
S	m^2	horizontale Fläche eines Fahrzeugs
T_p	-	Turbulenzproduktionszahl
V	m^3	Volumen
W	$J = Nm = kg\ m^2 / s^2$	Arbeit
a	-	Verkehrsdichte im Modell
b	-	empirische Konstante in OSPM
c	ppm	gemessene Konzentration
c^*	-	normierte Konzentration
c_f	-	Reibungsbeiwert
c_w	-	Widerstandsbeiwert
l_1	m	Länge
l_2	m	Länge

n	-	Profilexponent
n	Fahrzeuge / m	Fahrzeugdichte
n	-	Eichkonstante des Hitzdrahtanemometers
t	s	Zeit
u	m / s	Geschwindigkeit
$u(\delta)$	m / s	Freistromgeschwindigkeit in Grenzschichthöhe
u_v	m / s	Fahrzeuggeschwindigkeit
x	m	Koordinate longitudinal
y	m	Koordinate lateral
z	m	Koordinate vertikal

Gr. Symbole**Einheit****Bedeutung**

Index δ	entspr. der betr. Größe	Bezug auf Grenzschichthöhe
δ	m	Grenzschichthöhe
Δ	entspr. der betr. Größe	Differenz zweier Größen
ϕ	m	Durchmesser
ρ	kg / m ³	Dichte der Luft
σ	m / s	Turbulenzgröße
τ	s	Zeitscale des turbulenten Nachlaufs
ν	m ² / s	kinematische Viskosität von Luft
ν	m / s	charakteristischer Geschwindigkeitsscale im Nachlauf

Dimensionslose Kennzahlen**Bedeutung**

Re	-	Reynoldszahl, Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften
Str	-	Strouhalzahl, Frequenz der an rückwärtiger Seite von Körpern ablösende Wirbel

Abbildungsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Bisheriger Kenntnisstand	5
	Abb. 1 .. Prinzipskizze eines Plättchens auf einem mit der Geschwindigkeit U_v bewegten Riemenantrieb.....	5
3	Windkanalmodellierung	26
	Abb. 2 .. Prinzipskizze des Umlauf-Kanals nach Göttinger Bauart des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg. Die Pfeile geben die Strömungsrichtung an.	26
	Abb. 3 .. Prinzipskizze des neutralen Grenzschichtwindkanals des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg (aus Donat (1995))	28
4	Ableitung der Modellierung der Kraftfahrzeug-induzierten Turbulenz	33
	Abb. 4 .. Schematische Darstellung des Aufbaus für das konventionelle Experiment mit dem Riemenantrieb. Der Meßpunkt M1 befindet sich in 1.4 m Abstand von der Außenkante der Plättchen. Für den Meßpunkt M2 wurde die Probe stromab auf 2 m Entfernung im Naturmaß bewegt. ...	34
	Abb. 5 .. Darstellung der Turbulenz (Standardabweichung der Geschwindigkeit) der Plättchen an den Meßpunkten M1 und M2 gegen die Riemengeschwindigkeit. Variiert wurde die Geschwindigkeit und der Besetzungszustand des Riemens.	35
	Abb. 6 .. Prinzipskizze des Versuchsaufbaus des Laserlichtschnitts. Eingezeichnet ist die Position des Modells zur Einleitung sowie die laterale Verschiebung des Einleitungspunktes nach außen. Maßangaben im Naturmaß.....	37
	Abb. 7 .. Die Prinzipskizze des Lichtschnitts zeigt die Position der Lasersonde zum Boden bzw. dem Untersuchungsgegenstand. Die Kamera befand sich in eingezeichneter y-Richtung 607 mm vom ersten Meßpunkt entfernt. Maßangaben im Windkanalmaß.	38
	Abb. 8 .. Abbildung eines Falschfarbenbildes aus dem Horizontallaserlichtschnitt. Der weiße Kasten markiert die Position des Echt- bzw. des Styropor-Modells. Eingezeichnet wurde die Achse der Fahne. Der Meßpunkt (hier 0.24 m) gibt die Entfernung zur Fahrzeugaußenkante	

- an. 40
- Abb. 9 . . Überprüfung der Ähnlichkeit zwischen Echt-Modell und dem Styropor-Modell (Maßstab 1:24). Das Rechteck links unten in der Grafik markiert die Position des Echt-Modells bzw. des idealisierten Styropor-Modells. Die Kurven beschreiben die aus den Laserlichtschnitten ermittelten Fahnenachsen entlang der Fahrzeuge. 41
- Abb. 10 . Aufnahme des Meßaufbaus im Windkanal. Auf einer Grundplatte wurden zunächst in einer Reihe hintereinander die Styropor-Modelle montiert. Die Messungen wurden hinter dem dritten Fahrzeug durchgeführt. Für die nächste Meßreihe wurden dann zwischen dem dritten und sechsten Fahrzeug die Fahrzeugmodelle gegen Plättchen ausgetauscht. . 43
- Abb. 11 . Darstellung der horizontalen und vertikalen Meßebeane. Die horizontale Meßebeane lag in mittlerer Fahrzeughöhe, die Vertikale führte entlang der Mittelachse der Fahrzeuge. Die beiden Ebenen wurden in einem Abstand von 12 cm im Naturmaß von der Fahrzeugaußenkante begonnen. . . 44
- Abb. 12 . Darstellung des verwendeten Meßrasters in der horizontalen (oben) und der vertikalen (unten) Ebene. Die Meßpositionen wurden für alle Messungen absolut gehalten, fanden also immer an denselben Positionen statt, unabhängig ob Fahrzeuge oder Plättchen vermessen wurden und unabhängig von der Position der Meßorte zur Position der Modellkörper. 45
- Abb. 13 . Vergleich der Konzentrationsverteilung in der horizontalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den kleinen Plättchen (unten) mit jeweils zwei Fahrzeuglängen Abstand. 48
- Abb. 14 . Vergleich der Konzentrationsverteilung in der horizontalen Ebene zwischen den Fahrzeugen (oben) und den Plättchen mit denselben Abmessungen und auf eine Fahrzeuglänge halbierte Abstände (unten). . . . 50
- Abb. 15 . Vergleich der Konzentrationsverteilung in der horizontalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den großen Plättchen, wieder mit jeweils zwei Fahrzeuglängen Abstand (unten). 51
- Abb. 16 . Vergleich der Konzentrationsverteilung in der horizontalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den großen Plättchen mit denselben Abmessungen wie vorher und wieder auf eine Fahrzeuglänge halbierte Abstände (unten). 52
- Abb. 17 . Vergleich der Konzentrationsverteilung als Vertikalschnitt über den Fahrzeug-Modellen (oben) und den kleinen Plättchen mit jeweils zwei Fahrzeuglängen Abstand (unten). 55
- Abb. 18 . Vergleich der Konzentrationsverteilung in der vertikalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den kleinen Plättchen mit auf eine Fahrzeuglänge halbierten Abstand (unten). 56

- Abb. 19 . Vergleich der Konzentrationsverteilung im Vertikalschnitt zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den großen Plättchen mit zwei Fahrzeuglängen Abstand (unten). 57
- Abb. 20 . Vergleich der Konzentrationsverteilung in der vertikalen Ebene zwischen den Fahrzeug-Modellen (oben) und den großen Plättchen mit auf eine Fahrzeuglänge halbierte Abstände (unten). 58
- Abb. 21 . Darstellung des verwendeten Meßrasters für die Horizontale (oben) und die Vertikale (unten). Die Länge von der Front des einen Fahrzeugs bis zur Front des nachfolgenden Fahrzeugs wurde als eine Einheit betrachtet. Somit ergeben sich für jede der fünf Meßreihen zwei Einheiten, über die dann gemittelt wurde. 60
- Abb. 22 . Abbildung des mittleren Konzentrationsgradienten pro Meßreihe für die horizontale (links) und vertikale (rechts) Meßebe. 61
- Abb. 23 . Prinzipskizze des Versuchsaufbaus des Laserlichtschnitts. Eingezeichnet ist die Position des Fahrzeug-Modells zur Einleitung sowie die laterale und vertikale Verschiebung des Einleitungspunktes nach außen (horizontal) und nach oben (vertikal). 63
- Abb. 24 . Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Horizontalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und verschiedenen Parameterstudien von Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung von der Fahrzeugaußenkante $y=0.24$ m (Naturmaßstab). 64
- Abb. 25 . Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Horizontalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und verschiedenen Parameterstudien von Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung von der Fahrzeugaußenkante $y= 0.96$ m (Naturmaßstab).. 66
- Abb. 26 . Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Horizontalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und verschiedenen Parameterstudien von Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung von der Fahrzeugaußenkante $y=1.68$ m (Naturmaßstab). 67
- Abb. 27 . Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Horizontalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und verschiedenen Parameterstudien von Plättchen. Die Entfernung der Rauchzuleitung beträgt $y=2.40$ m (Naturmaßstab) von der Fahrzeugaußenkante. 68
- Abb. 28 . Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Vertikalschnitt bzw. der Vergleich zwischen Fahrzeugen und dem vorher betrachteten Plättchen. Die Entfernung der Rauchzuleitung betrug vom Boden $z=1.48$ m (Naturmaßstab). Die Kurve 1 wurde gestrichelt weitergezeichnet um darzustellen, daß die Trajektorie nicht vor dem nächsten Fahrzeug endet, wie es der Verlauf der Fahnenachse zu implizieren scheint. Die Fahnenachse konnte lediglich aus dem Lichtschnitt räumlich nicht wei-

- ter bestimmt werden, als mit der durchgezogenen Linie markiert. . . 69
- Abb. 29 . Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Vertikalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und den Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung vom Boden $z=1.80$ m (Naturmaßstab). 70
- Abb. 30 . Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Vertikalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und den Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung vom Boden $z=2.40$ m (Naturmaßstab). 71
- Abb. 31 . Darstellung der Trajektorien der Fahnenachsen im Vertikalschnitt. Vergleich zwischen Fahrzeugen und den Plättchen. Entfernung der Rauchzuleitung vom Boden $z=3.12$ m (Naturmaßstab). 71
- Abb. 32 . Versuchsaufbau der Turbulenzmessungen. Mittig auf einer hölzernen Bodenplatte wurden die neuskalierten Plättchen mit einer Fahrzeuglänge Abstand montiert. Die Turbulenzmessungen wurden in Querschnitten zwischen den Plättchen respektive den Fahrzeugen durch Hitzdrahtanemometrie durchgeführt. 73
- Abb. 33 . Lage der Meßorte für die Vertikalprofile der mittleren Geschwindigkeit. 74
- Abb. 34 . Abbildung der Geschwindigkeitsprofile entlang der Meßstrecke an 4 ausgewählten Positionen. Aufgetragen ist die mit der Anström- oder Referenzgeschwindigkeit U_{ref} normierte mittlere gemessene Geschwindigkeit U gegen die Höhe z 75
- Abb. 35 . Abbildung der Turbulenzprofile entlang der Meßstrecke an denselben 4 ausgewählten Positionen. Aufgetragen ist die mit Referenzgeschwindigkeit U_{ref} normierte Standardabweichung gegen die Höhe z 76
- Abb. 36 . Darstellung des verwendeten Meßrasters. Diese Querschnittsflächen wurden für die Fahrzeug- resp. die Plättchenmessungen an denselben absoluten Positionen durchgeführt. 77
- Abb. 37 . Darstellung der Meßebenen zwischen den Fahrzeugen bzw. der Plättchen. Die Nummern geben die Anzahl der dargestellten Meßraster an. 78
- Abb. 38 . Darstellung der Ergebnisse der Turbulenzintensitäten I in Querschnittsprofilen jeweils zentriert zwischen zwei Fahrzeugen. Die Fahrzeuge würden exemplarisch eingezeichnet, um die Meßraster relativ zur Fahrzeugposition zu verdeutlichen. 79
- Abb. 39 . Darstellung der Turbulenzintensitäten I um die Plättchen, die die durch die Laserlichtschnitte neu abgeleiteten Skalierung besitzen. Die Turbulenzintensitäten wurden an denselben Positionen wie im vorigen Meßfall bei den Fahrzeugen gemessen. Die weißen Rauten markieren lediglich die Position der Plättchen in Relation zu den Meßflächen, d.h. sie entsprechen nicht der neuen Skalierung. 80

5	Schlußfolgerungen	82
	Abb. 40 . Schematische Darstellung des neu zu modellierenden halbrunden Wirbelgenerators.....	84
6	Zusammenfassung und Ausblick	86
Anhang A Umströmung bodengebundener, scharfkantiger Einzelhindernisse und Fahrzeuge		89
	Abb. 41 . Typische Strömungszonen um ein bodengebundenes, 3-dimensionales scharfkantiges Hindernis (nach Hunt et al. (1978))	89
	Abb. 42 . Umströmung eines Fahrzeugs (nach Hucho (1994). Die gestrichelten Pfeile zeigen die Unterströmung des Fahrzeugs an.	90
	Abb. 43 . Umströmung eines 2-dimensionalen Plättchens in der Draufsicht für Reynoldszahlen größer 1000. Vereinfacht dargestellt sind die Hufeisenwirbel, die eine Ablenkung der Strömung seitlich nach außen darstellen (Simiu und Scanlan (1996)).	91
Anhang B Genauigkeit der verwendeten Meßgeräte		92
Anhang C Messung des Profilwiderstandes		97
	Abb. 44 . Prinzipskizze zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes über eine Kraftmessung (aus Konnarides (2000)).	98
	Abb. 45 . Schematische Darstellung der angreifenden Kräfte auf einen der Strömung ausgesetzten Körper in allen drei Raumrichtungen (aus Konnarides (2000))..	99
Symbolverzeichnis		100
Abbildungsverzeichnis		102
Literaturverzeichnis		107

Literaturverzeichnis

- [1] **Ahmed, S.R., G. Ramm, G. Faltin, 1984:**
„Some Salient Features of the Time-Average Ground Vehicle Wake“, SAE paper 840300, SAE International Congress and Exposition in Detroit, Michigan, Technical paper, 36 pp, Publisher SAE
- [2] **Airflow Lufttechnik GmbH, ohne Erscheinungsdatum:**
„Das Airflow-Staurohr“, Firmenkatalog
- [3] **Albrecht, F., 1933:**
„Untersuchungen der vertikalen Luftzirkulation in der Großstadt“, *Met. Zt.* **50**, 93-98
- [4] **Arya, S.P., 1988:**
„Introduction to Micrometeorology“, Academic Press, San Diego, California
- [5] **Bearman, P.W., J.P. Davis, J.K. Harvey, 1982:**
„Wind Tunnel Investigation of Vehicle Wakes“, in: Proceedings Band Nr. 5, ohne Seitenzahlen, Vehicle Aerodynamics, International Symposium, organised and sponsored by Volkswagenwerk AG, Research Division, Wolfsburg, December 2-3, 1982
- [6] **Bearman, P.W., 1984:**
„Some Observations on Road Vehicle Wakes“, SAE paper 840301, SAE International Congress and Exposition in Detroit, Michigan, Technical paper, 16 pp, Publisher SAE
- [7] **Berkowicz, R., O. Hertel, S.E. Larsen, N.N. Sørensen, 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
- [8] **Bohl, W., 1998:**
„Technische Strömungslehre: Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, Inkompressible Strömungen, Kompressible Strömungen, Strömungsmeßtechnik“, 11., durchges. Auflage, Würzburg, Vogel (Kamprath-Reihe)
- [9] **Brilon, W., H.J. Niemann, E. Romberg, 1987:**
„Windkanaluntersuchungen zur Ausbreitung von Abgasen an Autobahnen“, Son-

derdruck aus *STRASSENVERKEHRSTECHNIK* **31**, (4), 122-133

- [10] **Brooks Instrument BV, 1994:**
„Brooks Digital Series (TMF) Mass Flow Meters“, Installation and Operating Manual Series Digital MFC 4/94 Part no. 541-c-051-AAA Rev. A
- [11] **Bundes-Immissionsschutzgesetz BImSchG, 1997:**
„Verordnung über die Festlegung von Konzentrationswerten“. 23. BImSchV, Beck-Texte im Deutschen Taschenbuch Verlag, 3. Auflage, München
- [12] **Cadle, S.H., D.P. Chock, J.M. Heuss, P.R. Monson, 1976:**
„Results of the General Motors Sulfate Dispersion Experiments“, General Motors, Res. Publ. GMT-2107, Warren, MI, 140 pp
- [13] **Cadle, S.H., D.P. Chock, P.R. Monson, J.M. Heuss, 1977:**
„General Motors Sulfate Dispersion Experiment: Experimental Procedures and Results“, *APCA Journal*. **27**, No. 1, 33-38
- [14] **Champagne, F.H., C.A. Sleicher, O.H. Wehrmann, 1967:**
„Turbulence Measurements with Inclined Hot-Wires“, Part 1 and 2, *J. of Fluid Mech.* **28**, 153ff.
- [15] **Chock, D.P., 1977:**
„General Motors Sulfate Dispersion Experiment - An Overview of the Wind, Temperatur, and Concentration Fields“, *Atm. Env.* **11**, 553-559
- [16] **Cook, N.J., 1990:**
„The Designer's Guide to Wind Loading of Building Structures - Part 2 Static Structures“, Butterworths, Crown Copyright, 1990
- [17] **DePaul, F.T., C.M. Sheih, 1986:**
„Measurements of Wind Velocities in a Street Canyon“, *Atm. Env.*, **20**, 555-559
- [18] **Donat, J., 1995:**
„Windkanalexperimente zur Ausbreitung von Schwergasstrahlen“, Dissertation am Fachbereich Meteorologie der Universität Hamburg.
- [19] **Eskridge, R.E., J.C.R. Hunt, 1979:**
„Highway Modelling. Part I: Prediction of Velocity and Turbulence Fields in the Wake of Vehicles“, *J. of Appl. Met.* **18**, (4), 387-400
- [20] **Eskridge, R.E., F.S. Binkowski, J.C.R Hunt, T.L. Clark, K.L. Demerjian, 1979:**
„Highway Modelling Part II: Advection and Diffusion of SF6 Tracer Gas“, *J. of Appl. Met.* **18**, (4), 401-412

-
- [21] **Eskridge, R.E., R.S. Thompson, 1982:**
„Experimental Study of the Wake of a Block-shaped Vehicle in a Shear-Free Boundary Flow“, *Atm. Env.*, **16**, 2821-2836
- [22] **Eskridge, R.E., S.T. Rao, 1983:**
„Measurement and Prediction of Traffic-Induced Turbulence and Velocity Fields Near Roadways“, *J. of Climate and Applied Met.*, **22**, 1431-1443
- [23] **Eskridge, R.E., S.T. Rao, 1986:**
„Turbulent Diffusion Behind Vehicles: Experimentally Determined Turbulence Mixing Parameters“, *Atm. Env.* **20 (5)**, 851-860
- [24] **Eskridge, R.E., W.B. Petersen, S.T. Rao, 1991:**
„Turbulent Diffusion Behind Vehicles: Effect of Traffic Speed on Pollutant Concentrations“, *J. Air Waste Manage. Assoc.* **41 (3)**, 312-317
- [25] **Flay, R.G.J., 1978:**
„Structure of a Rural Atmospheric Boundary Layer Near the Ground“, PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Canterbury, New Zealand
- [26] **Frantz, H., 2000:**
„Erzeugung eines Naturdatensatzes zur Validierung hindernisauflösender mikroskaliger Anwendungen“, Diplomarbeit am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg
- [27] **Georgii, H.W., E. Busch, E. Weber, 1967:**
„Untersuchung über die zeitliche und räumliche Verteilung der Immissions-Konzentration des Kohlenmonoxids in Frankfurt am Main“, Berichte des Inst. für Met. und Geophysik der Universität Frankfurt am Main, Nr. 11
- [28] **Gowda Mahalinge, R.M., 1998:**
„Wind Tunnel Simulation Study of Line Source Dispersion for Heterogenous Traffic“, Abstract of a Doctoral Thesis, Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology, Delhi, India
- [29] **Groenskei, K.E., 1988:**
„The Influence of Car Speed on Dispersion of Exhaust Gases“, *Atm. Env.* **22 (2)**, 273-281
- [30] **Houseaux, N., 1997:**
„Turbulence et Quantite de Mouvement Induites par les Vehicules: Mesures in Situ“, Rapport de Stage du DEA „Dynamique des Fluides et du Transfert - Option Energetique de l'Environnement urbain“, Ecole Centrale de Nantes (EN-AEC 97.52R)

-
- [31] **Hucho, W.H., 1987:**
„Aerodynamics of Road Vehicles“, Butterworth-Heinemann, London
- [32] **Hucho, W.H., 1994:**
„Aerodynamik des Automobils“, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [33] **Hunt, J.C.R., C.J. Abell, J.A. Peterka, H. Woo, 1978:**
„Kinematical Studies of the Flow Around Free or Surface-Mounted Obstacles, Applying Topology to Flow Visualisation“, *J. of Fluid Mech.*, **86**, 176-200
- [34] **Kastner-Klein, P., R. Berkowicz, A. Rastetter, E.J. Plate, 1998:**
„Modelling of Vehicle Induced Turbulence in Air Pollution Studies for Streets“, Paper presented at 5th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 18-21 May 1998, Rhodes, Greece
- [35] **Kastner-Klein, P., 1999:**
„Experimentelle Untersuchung der strömungsmechanischen Transportvorgänge in Straßenschluchten“, Dissertation am Institut für Hydromechanik der Universität Karlsruhe
- [36] **Kitabayashi, K., K. Sugawara, S. Isomura, 1976:**
„A Wind Tunnel Study of Automobile Exhaust Gas Diffusion in an Urban District“, Proceedings of The 4th International Clean Air Congress, II-15, 192-195
- [37] **Konnarides, N., 2000:**
„Development of Wind Tunnel Instrumentation for the Measurement of Drag Forces on Plates“, BEng Project of University of Surrey, Department of Civil Engineering
- [38] **Leisen, P., 1982:**
„Windkanaluntersuchungen zur Simulation von Immissionssituationen in verkehrsreichen Straßenschluchten“, in: Abgasbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr, Kolloquiumsbericht TÜV Rheinland + BMFT
- [39] **Leisen, P., P. Jost, K.S. Sonnborn, 1982:**
„Modellierung der Schadstoffausbreitung in Straßenschluchten - Vergleich Außenmessungen mit rechnerischer und WK-Simulation“ in: Abgasbelastungen durch den Kraftfahrzeugverkehr, Kolloquiumsbericht TÜV Rheinland + BMFT
- [40] **Lienhart, H., S. Becker, J. Rußow, D. Bauser, 1995:**
„Untersuchung der Nachlaufströmung hinter einem PKW-Modell mit Drucksonden- und LDA-Messungen“, HdT-KFZ-Tagung, Essen
- [41] **Meroney, R.N., 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 Eng. and Ind. Aerodyn.* **62**, 37-56
- [42] **Müller, U.R., 1982:**
„On the Accuracy of Turbulence Measurements with Inclined Hot Wires“, *J. of Fluid Mech.* **119**, 155-172
- [43] **Niedersächsisches Landesamt für Ökologie (NLÖ), 1993:**
„Lufthygienisches Überwachungssystem Niedersachsen - Luftschadstoffbelastungen in Straßenschluchten“, Herausgeber NLÖ
- [44] **Oke, T.R., 1987:**
„Boundary Layer Climates“, Routledge, New York, 2nd edition
- [45] **Plate, E., 1982:**
„Windkanalmodellierung von Ausbreitungsvorgängen in Stadtgebieten“, Kolloquiumsbericht: Abgasbelastung durch den Straßenverkehr, Verlag TÜV Rheinland
- [46] **Plate, E., P. Kastner-Klein, 1995:**
„Simulation der Ausbreitung von KFZ-Abgasen-Fachliche Impulse durch Windkanalmessungen“, Experten-Workshop „Verkehr und Immissionen“, Forschungszentrum Karlsruhe
- [47] **Rastetter, A., 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
- [48] **Rauser, M., J. Eberius, 1987:**
„Verbesserung der Fahrzeugaerodynamik durch Unterbodengestaltung“, *Automobiltechnische Zeitschrift* **89 (10)**, 535-539
- [49] **Schatzmann, M., B. Leidl, J. Liedtke, A. Kovar, 1999a:**
„Modelling and Validation in an Urban Environment“, Proceedings of EURO-TRAC Symposium '98, Eds. P.M. Borrell and P. Borrell, WITpress, Southampton
- [50] **Schatzmann, M., J. Liedtke, B. Leidl, 1999b:**
„Dispersion Models for Urban Applications - A Critical Assessment of the Present 'State of Application'“. In: Neuere Entwicklungen bei der Messung und Beurteilung der Luftqualität. VDI-Kommission Reinhaltung der Luft, Bericht 1443, 99-115
- [51] **Schatzmann, M., B. Leidl, J. Liedtke, 1999c:**
„Ausbreitung von KFZ-Abgasen in Straßenschluchten“, Internet-Publikation, sie-

he: <http://bwplus.fzk.de/pef/diskpef98/schatzmann/schatzm.htm>

- [52] **Sedefian, L., S. Trivikrama Rao, U. Czapski, 1981:**
„Effects of Traffic-Generated Turbulence on Near-Field Dispersion“, *Atm. Env.* **15**, 527-536
- [53] **Simiu E., R.H. Scanlan, 1996:**
„Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design“, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc.
- [54] **Standon, N.M., 1972:**
„A Spire Array for Generating Thick Turbulent Shear Layers for Neutral Wind Simulation in Wind Tunnels“, Techn. Report LTR-LA-94, National Aeronautical Establishment, Ottawa, Canada
- [55] **Stull, R.B., 1988:**
„An Introduction to Boundary Layer Meteorology“, Kluwer Academic Publishers
- [56] **Statistisches Bundesamt, 1999:**
Internetseiten <http://www.statistik-bund.de/basis/verkehr/verktab2.htm>
- [57] **Thompson, R., R. Eskridge, 1987:**
„Turbulent Diffusion Behind Vehicles: Experimentally Determined Influence of Vortex Pair in Vehicle Wake“, *Atm. Env.*, **21 (10)**, 2091-2097
- [58] **VDI-Richtlinie 3783, Blatt 12, 2000:**
„Umweltmeteorologie. Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht - Windkanalanwendungen“, Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) im VDI und DIN - Normenausschuss, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b
- [59] **Watkins, S., J.W. Saunders, P.H. Hoffmann, 1995:**
„Turbulence Experienced by Moving Vehicles, Part I: Introduction and Turbulence Intensity“, *Journal of Wind Eng. and Ind. Aerodyn.* **57**, 1-17
- [60] **White, F.H., 1999:**
„Fluid Mechanics“, 4th Edition, The MacGraw-Hill Company
- [61] **Wilh. Lambrecht KG, 1999:**
„Staurohre nach Prandtl“, Betriebsanleitung

Meinen Eltern gewidmet.

Danksagung

Diese Promotion ist zeitlich und örtlich in zwei Teilen entstanden. Die ersten 2 1/2 Jahre habe ich an der Universität Hamburg im Meteorologischen Institut verbracht, hier sind auch die experimentellen Teile der Arbeit entstanden. Während der darauf folgenden 1 3/4 Jahre habe ich in Südengland gelebt und an der University of Surrey in Guildford gearbeitet. In dieser Zeit fand im wesentlichen das Zusammenschreiben statt.

Demzufolge gibt es in Hamburg und Guildford Menschen, denen mein ganzer Dank gebührt:

Prof. Dr.-Ing. M. Schatzmann für die Themenstellung, die Betreuung und die wissenschaftlichen Diskussionen um das Thema und die stets konstruktive Kritik bei der Anfertigung dieser Arbeit. Prof. Dr. M. Dunst für seine Bereitschaft das Korreferat zu übernehmen. Dr.-Ing. Bernd Leitl danke ich für die sehr fruchtbaren Diskussionen und das Korrekturlesen, aber auch das stets offene Ohr und jedwede moralische Unterstützung. Thomas Glanert und Jan Stofledt sei gedankt für die Anfertigung zahlreicher Fahrzeugmodelle, „wooden floors“ und immer wieder Plättchen. Für die intensive Unterstützung bei der Entstehung des ersten Teiles danke ich meinem Mann Heiko.

In England sind es Prof. Dr. Eur.-Ing. Norman Toy und Dr. Eric Savory, denen mein herzlicher Dank gilt, da sie mir sehr großzügig die Zeit für das Zusammenschreiben meiner Dissertation gegeben haben, jederzeit zur Diskussion bereit standen und mir, wo es notwendig war, ein „good grilling“ gegeben haben.

Stellvertretend für all die Freunde und Arbeitskollegen, die auf ihre Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, bedanke ich mich bei Julie.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die mir während der ganzen Zeit moralisch zur Seite gestanden haben.

Die Arbeit wurde finanziell gefördert durch das BMBF im Rahmen des Troposphärenforschungsprogramms sowie das europäische TMR-Projekt TRAPOS.

LEBENS LAUF

Anke Kovar - Pankus

- | | |
|----------------------|---|
| 13.03.1968 | Geboren in Hamburg |
| 1974-1978 | Grundschule in Hamburg |
| 1978-1987 | Gymnasium in Hamburg, Abitur Mai 1987 |
| 8/1987-7/1989 | Ausbildung zur Außenhandelskauffrau bei „Nordmann, Rassmann GmbH & Co.“ (NRC), Hamburg |
| 7/1989-3/1990 | Sachbearbeiterin für den Import und Export von Lebensmittelzusatzstoffen und pharmazeutischen Rohstoffen bei NRC |
| 4/1990-9/1996 | Studium der Meteorologie an der Universität Hamburg |
| 1/1997-7/1999 | Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Meteorologischen Institut, Abteilung Technische Meteorologie, der Universität Hamburg |
| 8/1999-4/2001 | Research Fellow im Department of Civil Engineering der University of Surrey, Guildford, England |