

Erzeugung von Validierungsdaten
für wirbelauflösende mikroskalige
Strömungs- und Ausbreitungsmodelle

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften im Department Geowissenschaften
der Universität Hamburg

vorgelegt von

Ilona Bastigkeit,
geb. Herbst
aus Lichtenfels

Hamburg
2011

Als Dissertation angenommen vom
Department Geowissenschaften der Universität Hamburg

aufgrund der Gutachten von

Prof. Dr. Michael Schatzmann
und
Prof. Dr. Bernd Leidl

Hamburg, den 30.11.2011

Prof. Dr. Jürgen Oßenbrügge
(Leiter des Department Geowissenschaften)

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Modellierung von städtischen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnissen	5
2.1 Charakteristiken der städtischen Grenzschicht	5
2.2 Physikalische Modellierung	8
2.3 Numerische Modellierung	11
3 Validierungsdaten.....	15
3.1 Anforderungen von RANS- und LES-Modellen.....	15
3.2 Bestehende Validierungsdatensätze.....	16
3.3 Validierungsdaten aus Feldversuchen	20
3.4 Validierungsdaten aus Windkanalexperimenten	22
3.5 Fazit bezüglich LES-Validierungsdaten	25
4 Anforderungen an Validierungsdatensätze für LES-Modelle.....	27
4.1 Testfälle mit unterschiedlicher Komplexität.....	27
4.2 Ausführliche Dokumentation.....	29
4.3 Vollständigkeit und Qualität der Daten	31
4.3.1 Anströmbedingungen	33
4.3.2 Strömungs- und Konzentrationsmessungen.....	37

5	Erzeugung eines LES-Validierungsdatensatzes im Grenzschichtwindkanal	43
5.1	Entwurf der „Michel-Stadt“	44
5.1.1	Städtische Rauigkeitsstrukturen	44
5.1.2	Idealisierte Stadtstrukturen.....	46
5.1.3	Geometrie der Michel-Stadt.....	48
5.2	Experimentelle Strategie und Versuchsdurchführung	52
5.2.1	Grenzschichtwindkanal	52
5.2.2	Umfang der Experimente	54
5.2.3	Eigenschaften der Emissionsquelle	55
5.2.4	Messraster	56
5.2.5	Messverfahren.....	59
5.3	Qualität der Daten.....	63
5.3.1	Strömungsmessungen	64
5.3.2	Konzentrationsmessungen	69
6	Modellierung einer städtischen Grenzschicht	73
7	Auswertung der Messungen in Michel-Stadt.....	81
7.1	Analyse des Strömungsfeldes von Michel-Stadt	81
7.1.1	Mittlere Strömungsverhältnisse.....	82
7.1.2	Klassifizierung der Geschwindigkeitsverteilungen.....	89
7.1.3	Ensemble-Analyse der Zeitserien	96
7.2	Einfluss der Dachform auf die Strömungsphänomene	100
7.2.1	Mittlere Strömungseigenschaften	101
7.2.2	Zeitreihen-Analyse	108
7.3	Einfluss der Dachform auf das Ausbreitungsverhalten.....	110
7.4	Korrelation zwischen Strömung und Ausbreitung	116

7.5	Fazit zur Simplifizierung von Stadtmodellen.....	118
8	Exemplarischer Datenvergleich mit einem LES-Modell.....	121
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	125
	Anhang A: Aufbau zur Grenzschichtmodellierung von Michel-Stadt	129
	Anhang B: Modell der stark idealisierten urbanen Rauigkeit	130
	Anhang C: Mittleres Strömungsfeld in Michel-Stadt mit Spitzdach.....	132
	Anhang D: Ergänzung zur Ensemble-Analyse.....	133
	Anhang E: Regressionsanalyse	135
	Literaturverzeichnis	137
	Danksagung	145

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Größen:

A...E	Approximationskonstanten
B	Bestimmtheitsmaß [%]
c	Stoffmengenkonzentration in Volumenanteil [ppm _v]
c*	dimensionslose Konzentration [-]
d ₀	Nullpunktverschiebung [m]
f	Frequenz [Hz]
f _{red}	reduzierte Frequenz [-]
flatness	engl., Kurtosis (Wölbung) einer statistischen Verteilung [-]
Fr	Froude-Zahl [-]
g	Schwerebeschleunigung (= 9,81 m/s ²)
H	Gebäudehöhe [m]
i, j, k	Indizes
I _u , I _v , I _w	Turbulenzintensität der jeweiligen Geschwindigkeitskomponente [-]
k _R	messbare Höhe der Rauigkeitselemente [m]
L _{ref}	Referenzlänge [m]
L _{ux} , L _{uy} , L _{uz}	integrales Längenmaß der jeweiligen Raumrichtung [m]
n	normierte Frequenz [-]
p	Druck [Pa]
p*	dimensionsloser Druckgradient [-]
PTM-ratio	peak-to-mean ratio [-]
Q	Emissionsvolumenstrom [m ³ /s]
r	Korrelationskoeffizient [-]
Re	Reynoldszahl [-]
Ro	Rossby-Zahl [-]
skewness	engl., Schiefe einer statistischen Verteilung [-]
S	Straßenbreite [m]

$S_{ii}(f,z)$	spektrale Dichteverteilungsfunktion der Energie ($i = u, v, w$) [$J \cdot s/m^3$]
t	Zeit [s]
t^*	dimensionslose Zeit [-]
u^*	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
u, v, w	Geschwindigkeitskomponenten der Hauptströmung [m/s]
u_{ref}	Referenzwindgeschwindigkeit [m/s]
W	Gebäudebreite [m]
x, y, z	kartesische Koordinaten
x_m, y_m, z_m	kartesische Koordinaten im Modellmaßstab [mm]
x_{fs}, y_{fs}, z_{fs}	kartesische Koordinaten im Naturmaßstab (engl. full scale) [m]
z_0	Rauigkeitslänge [m]
z_{fs}	Höhe über dem Boden im Naturmaßstab (engl. full scale) [m]
z_{ref}	Referenzhöhe [m]
α	Profilexponent [-]
δ	Grenzschichthöhe [m]
δ_{ij}	Kronecker-Delta (für $i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1$, sonst $\delta_{ij} = 0$)
κ	von Kármán-Konstante (= 0.4)
μ	dynamische Viskosität [$kg/m \cdot s$]
ν	kinematische Viskosität [m^2/s]
ρ	Dichte der Luft bzw. des Fluids [kg/m^3]
σ	Standardabweichung
τ	Reynoldsspannungen [m^2/s^2]
u_δ	Referenzgeschwindigkeit am Oberrand der Grenzschicht [m/s]

Abkürzungen:

CEDVAL	Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models
CFD	Computational Fluid Dynamics
COST	European Cooperation in Science and Technology
DAPPLE	Dispersion of Air Pollution and its Penetration into the Local Environment
DNS	Direkte Numerische Simulation
FID	Flammenionisationsdetektor
GIS	Geoinformationssystem
JU2003	Joint Urban 2003 Atmospheric Dispersion Study
LDA	Laser Doppler Anemometer
LES	Large Eddy Simulation
LSE	Linear Stochastic Estimation
MUST	Mock Urban Setting Test
OKC	Oklahoma City
PALM	Parallelized Large Eddy Simulation Model
PIV	Particle Image Velocimetry
POD	Proper Orthogonal Decomposition
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes Equation
TRAPOS	Optimisation of Modelling Methods for Traffic Pollution in Streets
VALIUM	Development and Validation of Tools for the Implementation of European Air Quality Policy in Germany

1 Einleitung

Strömungs- und Ausbreitungsprozesse in Städten hängen vom lokalen Windfeld zwischen den Gebäuden bzw. Hindernissen ab. Die Strömungsrichtung und ihre Geschwindigkeit sind die Folge von Wechselwirkungen zwischen der Anströmung und der Bauart sowie der lokalen Anordnung der Gebäude. Sowohl numerische als auch physikalische Modelle versuchen, Strömungs- und Ausbreitungsprozesse in urbanen Gebieten zu simulieren. Im Bereich der Mikro-Meteorologie und des Wind-Ingenieurwesens gewinnen die Entwicklung und der Einsatz von mikroskaligen numerischen Modellen als Planungs- und gutachterliches Werkzeug immer mehr an Bedeutung. Um die Strömungs- und Ausbreitungsphänomene innerhalb und oberhalb von städtischen Rauigkeiten verstehen zu können, betrachten Britter & Hanna (2003) vier verschiedene Längenskalen, die bezüglich ihrer physikalischen Prozesse interpretiert werden: die regionale Skala (bis zu 100-200 km), die Stadtskala (bis zu 10-20 km), die Umgebungsskala (bis zu 1-2 km) und die Straßenskala (weniger als 100-200 m). Jedes numerische Modell besitzt sein spezielles Anwendungs- und Genauigkeitsgebiet. Die Effekte einer Skala werden üblicherweise parametrisiert, um Prozesse auf der nächstgrößeren Skala explizit modellieren zu können. Die regionale und die Stadtskala umfassen die Strömungs- und Ausbreitungsphänomene des gesamten Stadtgebietes, wie beispielsweise Effekte der städtischen Wärmeinsel oder die Ausbreitung oberhalb des Dachniveaus. Die genaue Gebäudestruktur spielt hierbei eine untergeordnete Rolle und wird meistens räumlich gemittelt betrachtet. Bei der Umgebungs- und Straßenskala dagegen liegt das Interesse in den Strömungs- und Ausbreitungsprozessen innerhalb der städtischen Rauigkeitsschicht bzw. in der direkten Umgebung von einzelnen Gebäuden. Mikroskalige numerische Modelle werden in diesem Zusammenhang beispielsweise zur Untersuchung des Windkomforts im Fußgängerbereich oder der Luftverschmutzung durch Fahrzeugabgase herangezogen.

In den letzten Jahren wurde die Notwendigkeit und Signifikanz einer Verifizierung und Validierung von numerischen Modellen erkannt. Die Abschätzung der Präzision ist ein

wichtiger Bestandteil der Qualität der Modellergebnisse. Zahlreiche Wissenschaftler beschäftigen sich auf diesem Gebiet wie z.B. Schatzmann et al. (1997), Schlünzen (1997), Adrian (2000), Oberkampf & Trucano (2002) und Britter et al. (2007a+b). Um eine Qualitätssicherung zu erlangen, setzen sich zunehmend allgemein anerkannte, standardisierte Datensätze durch. Sie werden aus Feldexperimenten und Simulationen in Grenzschichtwindkanälen gewonnen (Britter & Hanna, 2003). Hierbei bieten die unter kontrollierten Randbedingungen in Grenzschichtwindkanälen durchführbaren Laborexperimente wesentliche Vorteile gegenüber den Naturmessungen. Die Randbedingungen können im Laborversuch zeitlich konstant gehalten, exakt bestimmt und umfassend dokumentiert werden. Strömungs- und Ausbreitungsphänomene in urbanen Gebieten können in Grenzschichtwindkanälen zeitlich und räumlich hochaufgelöst vermessen und als Referenzdaten für numerische Modelle zur Verfügung gestellt werden. Das Strömungsfeld im Windkanalversuch ist dabei ein reales Strömungsfeld, das den entsprechenden Erhaltungsprinzipien genügt. Jedoch ist nachzuweisen, dass es sich im Einzelfall tatsächlich um ein skaliertes Modell der atmosphärischen Grenzschichtströmung handelt (Plate, 1999).

Sowohl für die Erzeugung von Validierungsdaten in Grenzschichtwindkanälen als auch für die Validierungsstrategien selbst fehlten bisher standardisierte Vorgehensweisen, so dass unterschiedlichste Ergebnisse bei der Evaluierung von numerischen Modellen erzielt wurden. Als eines der ersten Projekte mit breiter Beteiligung von Modellentwicklern, Modellanwendern und Referenzdaten-Erzeugern befasste sich die COST-Action 732 (Britter et al., 2007a+b) mit der Erstellung von Richtlinien zur Qualitätssicherung und Verbesserung von mikroskaligen Modellen. Der Schwerpunkt lag hierbei auf der Validierung von Modellen, die auf den Reynolds-Averaged-Navier-Stokes-Gleichungen (RANS-Modelle) basieren. Da diese Modelle die komplexen Strömungsverhältnisse innerhalb der bodennahen Hindernisschicht jedoch nur vereinfacht im zeitlichen Mittel abbilden, wurden in den letzten Jahren vermehrt Large-Eddy-Simulationen (LES-Modelle) zur Untersuchung von Strömungs- und Transportvorgängen in urbanen Gebieten entwickelt und angewendet. Zur Validierung von diesen wirbelauflösenden Strömungs- und Ausbreitungsmodellen sind zeitlich gemittelte Referenzdaten nicht ausreichend. In Bezug auf die Datenqualität und -quantität sind deutlich höhere Anforderungen an die Erzeugung von LES-Validierungsdaten, zum Beispiel in einem Grenzschichtwindkanal, zu stellen. Bisher fehlen sowohl allgemein akzeptierte Standards zur Erstellung solcher Daten als auch Methoden und Ver-

fahren zum Vergleich von Modellergebnissen mit entsprechenden LES-Validierungsdaten. Die bisher existierenden Datensätze eignen sich lediglich zur Validierung von RANS-basierten Modellen.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Strategie zur Erzeugung qualitätsgesicherter Referenzdatensätze und die Erzeugung erster Validierungsdatensätze, die interessierten Nutzern in Form einer modell- und anwendungsspezifischen LES-Validierungsdatenbank zur Verfügung gestellt werden sollen. Die Arbeiten wurden im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes SPP 1276 „MetStröm“ erbracht. Ein Anforderungsprofil für Windkanalexperimente wurde entwickelt, welches eine ausreichende Qualität und Quantität der Validierungsdaten gewährleistet. Darin enthalten sind unter anderem Empfehlungen zum Umfang derartiger Datensätze, Informationen zur erforderlichen Dokumentation von Referenzmessdaten und zu den an die Messungen zu stellenden Qualitätsanforderungen.

Reale Städte sind in ihrer Struktur sehr komplex und werden häufig in Modellen stark idealisiert, um Strömungs- und Ausbreitungsvorgänge und ihre Abhängigkeit von unterschiedlichen Bebauungsstrukturen systematisch untersuchen zu können. Sowohl in physikalischen als auch in numerischen Modellen werden häufig Hindernisfelder mit regelmäßiger Anordnung als idealisierte urbane Rauigkeiten abgebildet. Zu diesem Thema ist zahlreiche Literatur zu finden, wie beispielsweise Rafailidis (1997), Cheng & Castro (2002), Cheng et al. (2007), Schultz (2008) und Bezpalcová et al. (2009). Bezüglich eines Validierungsdatensatzes gibt es einen großen Bedarf an weiteren Komplexitätsstufen in der städtischen Rauigkeitsstruktur, die die noch immer bestehende „Lücke“ zwischen stark idealisierten urbanen Gebieten und der Struktur von realen Städten schließen.

Die vorliegende Arbeit nimmt sich dieser Herausforderung an und stellt den Entwurf einer idealisierten, semi-komplexen „Michel-Stadt“ vor, der im Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg als Modell umgesetzt und systematisch untersucht wurde.

Die Dissertation ist wie folgt gegliedert: *Kapitel 2* stellt die Grundlagen der numerischen und physikalischen Modellierung zur Untersuchung von städtischen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnissen vor. Hierbei wird auf die Vorteile bzw. auch Einschränkungen in der Anwendung verschiedener Modelle hingewiesen.

In *Kapitel 3* wird ein Überblick gegeben, welche Anforderungen verschiedene Typen mikroskaliger numerischer Modelle an Validierungsdaten stellen. Am Beispiel einiger ausgewählter, bereits existierender Datensätze werden Probleme bei der Validierung von Strömungs- und Ausbreitungsprozessen in urbanen Gebieten veranschaulicht und die Anforderungen an zukünftige Datensätze entwickelt. Es werden Daten sowohl aus Feldmesskampagnen als auch aus Windkanalexperimenten bezüglich ihrer grundsätzlichen Anwendbarkeit als Validierungsdaten für wirbelauflösende Strömungs- und Ausbreitungsmodelle analysiert.

Das Anforderungsprofil an Windkanalexperimente zur Erstellung von Validierungsdatensätzen wird in *Kapitel 4* vorgestellt. Der Aufbau ist angelehnt an die erstellten Richtlinien von COST 732 (Britter et al., 2007a+b), wobei besondere Anforderungen für die Validierung von LES-Modellen ergänzt wurden. Die erforderliche Qualität der Daten wird besonders herausgestellt.

Kapitel 5 beschreibt die Erzeugung eines LES-Validierungsdatensatzes im Windkanal, wie er im „Environmental Wind Tunnel Laboratory“ des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg umgesetzt wurde. Nachdem reale Städte analysiert und typische idealisierte Stadtstrukturen vorgestellt wurden, erfolgt eine Dokumentation der Geometrie der entworfenen „Michel-Stadt“. Bei der Versuchsplanung im Windkanal werden mögliche experimentelle Strategien erläutert und für die Versuchsdurchführung der Michel-Stadt bewertet. Zusätzlich wird auf die Qualität der erzeugten Referenzdaten eingegangen.

Als Anströmung wurde eine städtische Grenzschicht gewählt, die in *Kapitel 6* charakterisiert und ausführlich dokumentiert wird.

Die durchgeführten Messungen im Modell der Michel-Stadt werden in *Kapitel 7* dargestellt und ausgewertet. Im Rahmen einer systematischen Analyse wird der Einfluss unterschiedlicher Dachformen auf die Strömungs- und Ausbreitungsphänomene in der Michel-Stadt dokumentiert.

In *Kapitel 8* werden anhand von Ergebnissen des LES-Modells „PALM“ der Universität Hannover (Raasch & Schröter, 2001) erste Ansätze für eine mögliche Vorgehensweise bei der Evaluation eines LES-Modells mit Daten aus dem Windkanal aufgezeigt.

Abschließend fasst *Kapitel 9* die Ergebnisse zusammen, zeigt Schlussfolgerungen auf und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Fragestellungen und Probleme.

2 Modellierung von städtischen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnissen

Städtische Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse sind sehr komplex. Ihre Messungen in der Natur sind daher im Idealfall hoch aufgelöst und somit sehr kosten- und zeitintensiv. Modelle bieten ein geeignetes Werkzeug diese Verhältnisse zu untersuchen. Es werden sowohl physikalische als auch numerische Modelle angewendet, um Klimaverhältnisse oder stadtplanerische Maßnahmen zu studieren. Beide Modelltypen haben Vorteile und auch Einschränkungen in ihrer Anwendung, die im folgenden Kapitel im Detail analysiert werden.

2.1 Charakteristiken der städtischen Grenzschicht

Die untere Grenze der Atmosphäre wird von der Erdoberfläche gebildet, welche einen Einfluss auf den Impuls- und Energieaustausch mit den bodennahen Luftschichten ausübt. Dieser spielt sich in den unteren 2000 m der Atmosphäre ab und bildet die atmosphärische bzw. planetarische Grenzschicht. Innerhalb dieser Grenzschicht zeichnet sich eine turbulente Strömung durch örtliche sowie zeitliche Schwankungen der Feldgrößen aus, für die dreidimensionale und instationäre Wirbel verantwortlich sind. Sie sorgen für intensive Mischungsvorgänge. Zur Beschreibung der momentanen turbulenten Strömung $\tilde{u}(x, y, z, t)$ wird diese in eine zeitlich gemittelte Hauptströmung $U(x, y, z)$ und eine überlagerte turbulente Schwankungsbewegung $u(x, y, z, t)$ zerlegt.

Die unteren 10 % der Grenzschicht entsprechen der Prandtlschicht. Diese Schicht wird auch „constant flux layer“ genannt, da die Gesamtschubspannung τ dort näherungsweise konstant ist. In der Prandtlschicht lässt sich bei neutraler Schichtung die Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit U mit der Höhe z durch das logarithmische Geschwindigkeitsgesetz beschreiben (VDI 3783/12, 2000):

$$\frac{U(z)}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right) \quad 2.1$$

Hierbei ist $U_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$ die Wandschubspannungsgeschwindigkeit mit τ_0 als Schubspannung am Boden und ρ als Dichte der Luft. Die von Karman'sche Konstante κ besitzt den Wert 0.4. Die Rauigkeitslänge z_0 stellt ein Maß für die Bodenrauigkeit dar, für die im Falle einer uniformen Landrauigkeit ungefähr $z_0 \approx 0.15 \cdot k_R$ gilt (k_R : messbare Höhe der Rauigkeitselemente, VDI 3783/12, 2000). Bei einer dicht gepackten Bodenrauigkeit wie beispielsweise bei Wäldern oder Siedlungen muss im Profilanatz die Verdrängungsdicke d_0 berücksichtigt werden, da sie eine mögliche Nullpunktsverschiebung des logarithmischen Windprofils um d_0 abbildet. Sie entspricht ungefähr dem 0.75-fachen der Bebauungshöhe (VDI 3783/12, 2000). Je größer z_0 ist, desto kleiner ist der vertikale Gradient der Windgeschwindigkeit in Bodennähe und desto höher ist die Grenzschicht. Während in ländlichen Gebieten Rauigkeitslängen von 0.005 m bis 0.01 m zu erwarten sind, nimmt z_0 in städtischen Gebieten Werte von etwa 0.1 m bis ungefähr 5 m an.

Die städtische Grenzschicht stellt einen Spezialfall der atmosphärischen Grenzschicht dar. Urbane Gebiete sind charakteristisch für einen stetigen und ggf. auch abrupten Wechsel in der Rauigkeitswirkung der Oberfläche. Für die Untersuchung der Strömungs- und Ausbreitungsprozesse in urbanen Gebieten ist es üblich, die städtische Prandtlschicht (engl. „surface layer“) als vereinfachte Modellvorstellung vertikal in einzelne Schichten einzuteilen (Abbildung 2-1), die auf der Klassifizierung von Oke (1987) basiert. Die Hindernisschicht (engl. „urban canopy layer“) reicht von der Erdoberfläche bis zu den Dächern der Gebäude. Dort spielen Um- und Überströmungen von einzelnen Gebäuden und lokale Strömungen in Straßenschluchten eine wichtige Rolle. Die Strömungs- und Ausbreitungsmuster sind meist sehr komplex. Die Rauigkeitsschicht (engl. „roughness sublayer“) erstreckt sich vom Boden bis in eine Höhe über Dachniveau, die noch von der Stadt beeinflusst wird. Hier ist der Nachlauf der Gebäude bemerkbar, so dass sich das horizontale Windfeld im Mittel noch stark inhomogen verhält. Darüber befindet sich die Trägheitsschicht (engl. „inertial sublayer“), für die die Veränderungen in den Eigenschaften der Oberfläche durch die Stadt keinen Einfluss mehr haben.

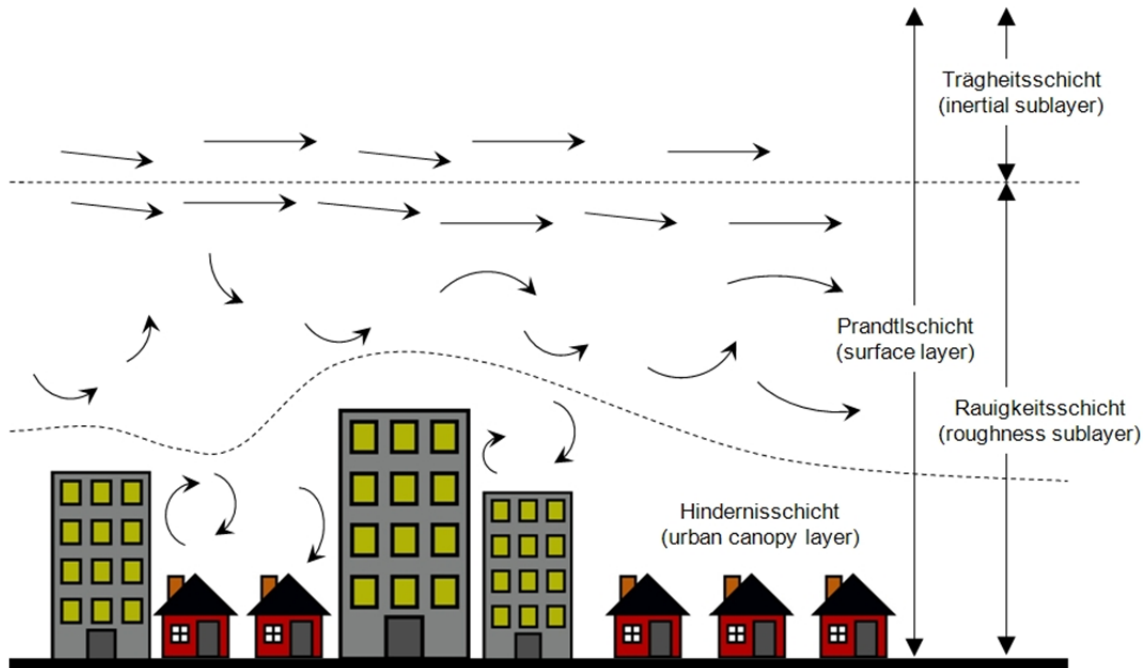


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung der einzelnen Schichten der städtischen Prandtlschicht (Harms, 2010).

Die Turbulenzcharakteristiken in einer Stadt zeichnen sich im Vergleich zur ländlichen Umgebung durch verschiedene Prozesse aus (Roth, 2000):

- Oberhalb der Hindernisse bildet sich eine starke Scherschicht aus, deren Turbulenzcharakteristiken sich signifikant zu denen in der darüber liegenden Schicht unterscheiden. Die kinetische Energie der Hauptströmung geht in turbulente kinetische Energie über, so dass hohe Turbulenzintensitäten entstehen.
- Der turbulente Nachlauf der einzelnen Gebäudestrukturen trägt zur Vermischung und Ausbreitung von Impuls, Wärme, Feuchtigkeit oder anderer skalarer Größen bei.
- Druckdifferenzen auf den einzelnen Hindernissen erhöhen den Impulstransport zu deren Oberfläche.
- Die Umströmung der einzelnen Gebäude und die differenzierten Wärme- und Feuchteverhältnisse auf den Gebäudeoberflächen, die z.B. durch Sonneneinstrahlung verursacht werden, führen zu hohen räumlichen und zeitlichen Inhomogenitäten im Energie- und Massentransport innerhalb der Stadt.
- Die extreme Heterogenität der städtischen Oberflächen macht die Definition einer gleichmäßigen, großräumigen Advektion unmöglich. Die Betrachtung der lokalen Advektion ist notwendig.

- Mögliche Regelmäßigkeiten in der Gebäudestruktur können zu kohärenten Strömungsmustern führen, z.B. „sweeps“ und „ejections“.
- Die erhöhte Durchmischung aufgrund der erhöhten Turbulenz kann im Zusammenhang mit dem Effekt der städtischen Wärmeinsel zu größeren Grenzschichthöhen führen.
- Die städtische Wärmeinsel und die verstärkte Scherproduktion führen in Bodennähe im Allgemeinen zu einer Reduzierung der atmosphärischen Stabilität.

Um diese Prozesse besser zu verstehen, wurden weltweit zahlreiche Studien durchgeführt, die sowohl auf Messungen in der Natur, als auch auf Ergebnissen von physikalischen und numerischen Modellen basieren. Hierauf wird im Rahmen dieser Arbeit noch detaillierter eingegangen.

2.2 Physikalische Modellierung

Für die Untersuchung von urbanen Windfeldern werden physikalische Modelle in Grenzschichtwindkanälen eingesetzt. „Die Leistungsstärke der physikalischen Modellierung beruht vor allem auf der physikalisch ähnlichen Simulation der maßgebenden Strömungs- bzw. Ausbreitungsvorgänge“ (VDI 3783/12, 2000). Hierbei wird die atmosphärische Grenzschicht im verkleinerten Maßstab im Grenzschichtwindkanal abgebildet.

Abbildung 2-2 veranschaulicht die Funktionsweise eines Windkanals. Die Luft wird durch den Windkanal gesaugt. Die Modellierung der atmosphärischen Grenzschicht in Grenzschichtwindkanälen kann durch zwei Vorgehensweisen erfolgen. Ist ein Windkanal ausreichend lang, so kann sich die Grenzschicht über einem rauen Boden selbst generieren. Reicht die Baulänge des Windkanals nicht aus, um eine natürlich gewachsene Wandgrenzschicht mit ausreichender Dicke zu erzeugen, so können mit Hilfe sogenannter Turbulenzgeneratoren und ggf. zusätzlicher Bodenrauigkeiten künstlich verdickte Windgrenzschichten generiert werden. Als Turbulenzgeneratoren dienen üblicherweise Gitter, „Spires“ oder aktive Generatoren. Im Bereich der Messstrecke bzw. des Modells muss sich die Grenzschicht voll entwickelt haben und im Gleichgewicht mit den Randbedingungen befinden. Eine verstellbare Decke verhindert eine Beschleunigung der Strömung aufgrund der Versperrung durch das Modell. Die meisten Windkanäle bieten außerdem die Möglichkeit, das Modell auf einer Drehscheibe zu befestigen, so dass verschiedene Windrichtungen simu-

liert werden können. Mit Hilfe eines 3D-Traversiersystems lassen sich die Messinstrumente mit einer hohen Genauigkeit im Modellgebiet zur Untersuchung des Strömungs- und Ausbreitungsverhaltens positionieren.

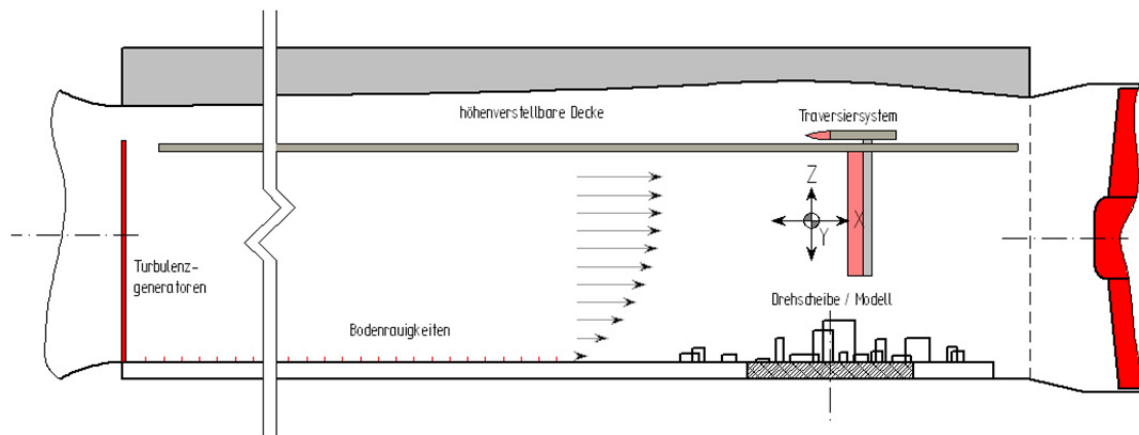


Abbildung 2-2: Physikalische Modellierung im Grenzschichtwindkanal.

Die VDI-Richtlinie 3783/12 (2000) und Snyder (1981) stellen Kriterien auf, die bei der Modellierung in einem Grenzschichtwindkanal erfüllt werden müssen. Grundsätzlich muss die modellierte Strömung naturähnlich sein (Ähnlichkeitstheorie). Sind alle dimensionslosen Kennzahlen, die ein physikalisches System beschreiben, zwischen Natur und Modell gleich, so ist sichergestellt, dass die beiden Systeme bei den ablaufenden Vorgängen physikalisch ähnlich sind. Ergebnisse aus dem Modell können dann ohne Einschränkung auf die Natur übertragen werden. Aus der Gleichheit der dimensionslosen Kennzahlen ergeben sich Anforderungen an das Modell, zu denen stets auch die geometrische Ähnlichkeit zwischen Natur und Modell gehört. Dabei müssen Details, die die Strömung erheblich beeinflussen können, im Modell umgesetzt werden. Snyder (1981) kommt zu der Schlussfolgerung, dass nicht die exakte geometrische Form von Hindernissen und Oberflächen wichtig ist, sondern die gleiche Rauigkeitseigenschaft bzw. die gleiche aerodynamische Wirkung. Für die Strömung in einem Grenzschichtwindkanal werden die dimensionslose Rossbyzahl, densimetrische Froudezahl und Reynoldszahl angewendet, die wie folgt definiert sind:

$$Ro = \frac{U_{ref}}{L_{ref} \cdot f} \quad 2.2$$

$$Fr = \frac{U_{ref}}{\sqrt{L_{ref} \cdot g \cdot (\rho - \rho_0) / \rho}} \quad 2.3$$

$$Re = \frac{L_{ref} \cdot U_{ref}}{\nu} \quad 2.4$$

Die Rossbyzahl Ro (Gleichung 2.2) gibt den Einfluss der Erdrotation auf die Advektion an, das heißt des Corioliseffekts. U_{ref} bzw. L_{ref} sind die charakteristische Geschwindigkeit bzw. Länge der Strömung und f ist der Coriolis-Parameter. Ist die Rossbyzahl groß aufgrund einer hohen Geschwindigkeit oder kleinskaliger Prozesse, können die Effekte der Erdrotation vernachlässigt werden.

Die densimetrische Froudezahl Fr (Gleichung 2.3) stellt das Verhältnis zwischen den Trägheits- und Auftriebskräften innerhalb einer Strömung dar, wobei g die Schwerebeschleunigung und ρ die Dichte des Fluids bzw. ρ_0 die Umgebungsdichte ist. Aufgrund der thermischen Effekte muss die Froudezahl bei der Modellierung einer stabilen bzw. instabilen Schichtung im Windkanal naturähnlich sein. Bei der Modellierung einer neutralen Schichtung kann sie dagegen vernachlässigt werden.

Die Reynoldszahl Re (Gleichung 2.4) gibt das Verhältnis der Trägheit zur Zähigkeit eines Fluids an. Hierbei bezeichnet ν die kinematische Viskosität eines Fluids. Wird eine kritische Reynoldszahl überschritten, so geht die laminare Strömung in eine turbulente Strömung über. Für turbulente Strömungen in der Atmosphäre gilt $Re_{krit} > 10\,000$. Um eine Ähnlichkeit in der Reynoldszahl bei einem verkleinerten Maßstab im Modell zu erreichen, müsste eine dementsprechend höhere Geschwindigkeit als in der Natur modelliert werden. Bei der Umsetzung von Modellmaßstäben, die im Windkanal üblich sind, könnte dieses Ähnlichkeitskriterium meist nicht erfüllt werden. Naturähnliche turbulente Strömungen lassen sich dennoch aufgrund der sog. Reynoldszahl-Unabhängigkeit im Windkanal modellieren, die u.a. von Snyder (1981) beschrieben wird. Demnach ist das Strömungsverhalten über geometrisch ähnlichen Rauigkeiten bei einer hinreichend großen Reynoldszahl ähnlich. Bei der Modellierung von Strömungen um scharfkantige Objekte sollte die Reynoldszahl $Re > 10\,000$ sein (VDI 3783/12, 2000), wobei als Referenzgeschwindigkeit die Geschwindigkeit auf Rauigkeitshöhe eingeht.

Im Vergleich zu Naturmessungen ist der zeitliche Aufwand für die Modellversuche viel geringer, da die Prozesse entsprechend dem geometrischen Modellmaßstab schneller ablaufen. Dennoch wirken Vereinfachungen gegenüber der physikalischen Realität beschränkend, da die Experimente in der Regel bei neutral geschichteter Grenzschicht und unter Vernachlässigung des Einflusses der Ekman-Windspirale durchgeführt werden. Dennoch haben Laborversuche im Grenzschichtwindkanal den wesentlichen Vorteil, dass die geometrische Komplexität des zu untersuchenden Problems frei gewählt werden kann und die Randbedingungen über einen beliebig langen Zeitraum konstant gehalten werden können. Daher ist es im Laborversuch möglich, für statistisch repräsentative Messergebnisse ausreichend lange Zeitreihen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung aufzunehmen. Für die Dokumentation der Messgenauigkeit lassen sich Wiederholungsmessungen durchführen, um eine Aussage über die Qualität der Ergebnisse treffen zu können.

2.3 Numerische Modellierung

Neben der Simulation von städtischen Strömungs- und Ausbreitungsprozessen in Grenzschichtwindkanälen werden numerische Modelle eingesetzt.

Sowohl für laminare als auch für turbulente Strömungen gelten die physikalischen Grundgesetze: der Massen-, Impuls- und Energieerhaltungssatz. Wirken bei konstanter Dichte nur Oberflächenkräfte auf ein Fluidelement, erhält man für die Momentangeschwindigkeit $\tilde{u}$ eines inkompressiblen Newtonschen Fluides an einem bestimmten Ort folgende Gleichung:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tilde{p} \delta_{ij} + 2 \mu \tilde{s}_{ij}) \quad 2.5$$

Hierbei beschreibt μ die dynamische Viskosität, p den thermodynamischen Druck, δ_{ij} das Kronecker-Delta und s_{ij} den Scherungstensor. Diese Gleichung ist nach den Mathematikern und Physikern Claude Louis Marie Henri Navier und George Gabriel Stokes „Navier-Stokes-Gleichung“ benannt. Je nach Modelltyp werden unterschiedliche Ansätze zu ihrer Lösung gewählt.

Nach der Modellvorstellung von Kolmogorov (1941) setzen sich turbulente Strömungen aus Wirbeln unterschiedlicher Größenordnung zusammen. Die großen Wirbel haben die Größe der Umgebungsbegrenzung. Sie erhalten ihre Energie von den von außen wirkenden Geschwindigkeitsgradienten der Strömung und geben sie an kleinere Wirbel weiter. Die kinetische Energie der Turbulenz wird von Wirbelgruppe zu Wirbelgruppe weitergegeben, bis sie durch die Wirkung der zunehmenden viskosen Kräfte schließlich in Wärme dissipiert. Dieser Vorgang wird Kaskadenprozess genannt, wobei es sich um eine idealisierte Netto-Energiebilanz handelt. In realen Strömungen ist zudem ein Energietransport in entgegengesetzter Richtung von den kleinen zu den großen Wirbeln möglich, den sog. „Backscatter“.

Abbildung 2-3 gibt einen Überblick über drei verschiedene numerische Modelle und klassifiziert sie anhand des Grades ihrer Turbulenz-Parametrisierung und ihres Rechenaufwands.

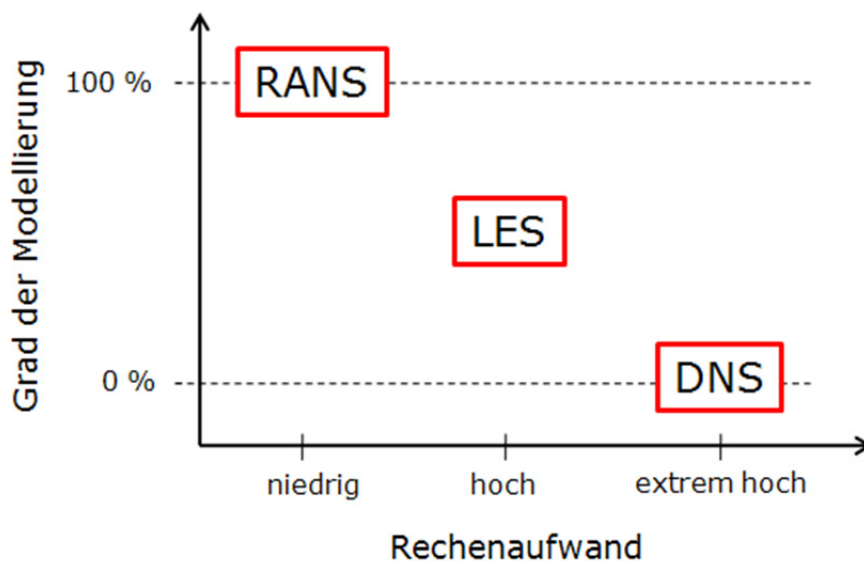


Abbildung 2-3: Überblick und Einordnung von RANS-, LES- und DNS-Modellen bezüglich des Grades ihrer Turbulenz-Parametrisierung und ihres Rechenaufwands.

Bei der direkten numerischen Simulation (DNS) wird die ungemittelte Navier-Stokes-Gleichung gelöst. Es sind keine Modellierungsannahmen erforderlich, daher ist es die allgemeingültigste Methode zur Berechnung turbulenter Strömungen. Da die turbulente

Strömung bis hin zu den kleinsten Wirbelstrukturen aufgelöst werden muss, ist ein sehr feines Gitter nötig. Der entstehende große Rechenaufwand limitiert die DNS auf die Untersuchung von Strömungen mit kleinen Reynolds-Zahlen bzw. auf Strömungen mit geringen Abmessungen. Da die Phänomene in der atmosphärischen Grenzschicht allerdings hohe Reynoldszahlen und große Abmessungen aufweisen, ist die Anwendung einer DNS ungeeignet. Die DNS ist dagegen als Werkzeug für die Grundlagenforschung geeignet, mit deren Hilfe u.a. statistische Turbulenzmodelle bzw. Feinstrukturmodelle bewertet und verbessert werden können.

Unter den mikroskaligen Modellen sind Modelle, die auf den Reynolds-Averaged Navier-Stokes Gleichungen (RANS-Modelle) basieren, am weitesten verbreitet. Sie werden am häufigsten zur Simulation von Strömungs- und Ausbreitungsphänomenen in städtischen Hindernisstrukturen herangezogen. RANS-Modelle berechnen die mittlere Hauptströmung, während die turbulenten Schwankungen parametrisiert werden. Bei der Reynoldsmittelung wird die Windgeschwindigkeit in einen zeitlich konstanten Mittelwert und in einen Schwankungsteil zerlegt: $\tilde{u}_i = U_i + u_i$. Die zeitlich gemittelte Impulsgleichung („Reynoldsgleichung“) ist wie folgt definiert:

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} + 2 \mu S_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) \quad 2.6$$

Der Reynoldssche Spannungstensor $\tau = \rho \overline{u_i u_j}$ beschreibt die Wirkung der turbulenten Schwankungen auf das gemittelte Strömungsfeld und wird durch verschiedene mögliche Schließungsansätze in sogenannten Turbulenzmodellen bestimmt („Schließungsproblem der Turbulenz“). Der RANS-Ansatz kann für viele Strömungsprobleme sinnvoll eingesetzt werden. Allerdings werden selbst mit Hilfe von aufwendigen statistischen Turbulenzmodellen bei komplexen, instationären Strömungsphänomenen häufig keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt, da diese nur im Mittel betrachtet werden können.

Die Large Eddy Simulation (LES) kombiniert beide Modelltypen und wird auf weiten Gebieten der Strömungsmodellierung erfolgreich angewendet. Während zunächst nur einfache geometrische bzw. physikalische Strömungsfälle modelliert wurden, konnte das An-

wendungsfeld durch den Anstieg verfügbarer Rechenleistung auf komplexere, turbulente Strukturen ausgedehnt werden. Dem Konzept der LES liegt eine Skalentrennung zugrunde (Abbildung 2-4). Das Energiespektrum wird in die zwei Bereiche, Grobstruktur und Feinstruktur, aufgeteilt, die getrennt voneinander mit unterschiedlichen Verfahren aufgelöst werden. Die Gitterweite wird so gewählt, dass die großen energiereichen Wirbel (Grobstruktur) vom numerischen Modell direkt aufgelöst werden können. Sie hängen von den Randbedingungen bzw. der speziellen Geometrie der betrachteten Hindernisstrukturen ab. Die kleinen, energieärmeren Wirbel (Feinstruktur) resultieren aus dem Zerfall der großskaligen Bewegungsformen. Sie sind bereits nahezu isotrop und werden im Modell in parametrisierter Form berücksichtigt.

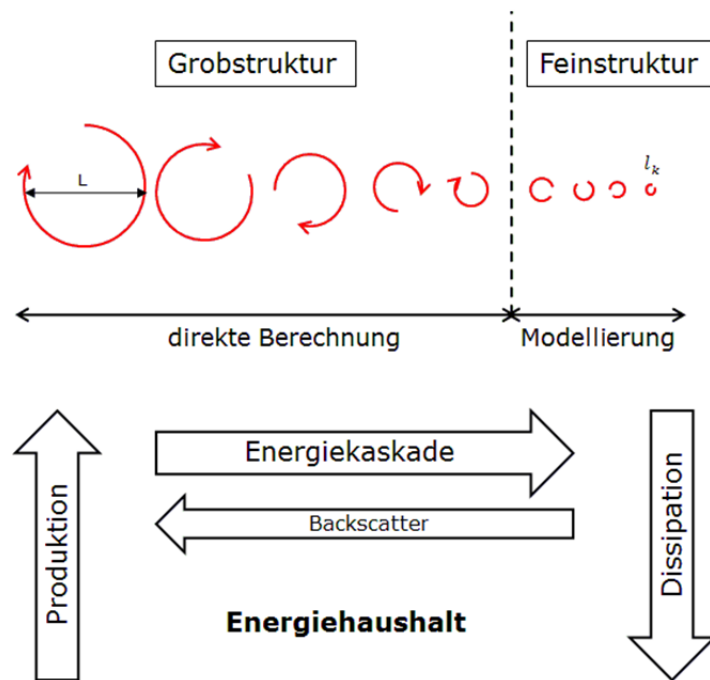


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung des Konzepts der Large-Eddy-Simulation und des Energiehaushaltes in einer (idealisierten) turbulenten Strömung (nach Breuer, 2001).

LES-Modelle weisen einen erheblichen Vorteil gegenüber den RANS-Modellen auf, da nur ein Teil und nicht das gesamte Turbulenzspektrum empirisch beschrieben werden muss. Sie werden zunehmend häufiger für städtische Anwendungen eingesetzt, da die Strömungs- und Ausbreitungsphänomene zeitlich aufgelöst untersucht werden können.

3 Validierungsdaten

Die Güte der Ergebnisse von numerischen Modellen ist stark abhängig von der Güte des Modells selbst. Um städtische Strömungs- und Ausbreitungsphänomene zuverlässig untersuchen zu können, sind die Verifikation des Modellcodes und die Validierung der Modellergebnisse unerlässlich. Validierungsdaten können sowohl aus Naturmessungen als auch aus Windkanalexperimenten gewonnen werden, wobei die Anforderungen der verschiedenen Modelltypen an die Art der Daten zu beachten sind. An LES-Validierungsdaten ergeben sich spezielle Anforderungen bezüglich der Qualität und Quantität, die sich wesentlich von einem Datensatz für RANS-Modelle unterscheiden.

3.1 Anforderungen von RANS- und LES-Modellen

Für eine Validierung von RANS-Modellen sind zeitlich und ggf. räumlich gemittelte Daten ausreichend. Eine Vielzahl modell- und anwendungsspezifischer Datensätze für unterschiedliche Testfälle existiert bereits (siehe Abschnitt 3.2) und wird erfolgreich zur Validierung von RANS-Modellen genutzt. Die Datensätze müssen ausführlich dokumentiert werden, um ein erfolgreiches Validieren zu ermöglichen. Dies betrifft sowohl die Lage der Messorte, als auch die genaue Beschreibung der Datengewinnung. Die Datensätze sollten systematische Messungen beinhalten, um das Verhalten der Ergebnisse der numerischen Modelle bei systematischen Änderungen der Randbedingungen testen zu können. Hierbei ist eine hohe räumliche Auflösung wünschenswert, um die Strömungs- und Ausbreitungsphänomene auflösen zu können.

Während bei RANS-Berechnungen turbulenter Strömungen zeitlich konstante Einströmdaten ausreichen, sind die erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen für LES-Modelle wesentlich komplexer. Da ein Teil der Wirbel direkt berechnet wird, ist eine realistische Beschreibung der dreidimensionalen, instationären und wirbelbehafteten Strömung am Einströmrund erforderlich. Für eine Validierung von LES-Modellen werden zeitabhängige

Daten mit charakteristischen Korrelationen der Geschwindigkeitskomponenten untereinander für die gesamte Einströmebene benötigt (Breuer, 2001 / Adrian et al., 2000). Bei der LES-Validierung in städtischen Rauigkeiten müssen die Strömungs- und Turbulenzfelder im Modellgebiet in Kombination mit Konzentrationsfeldern in hoher räumlicher sowie zeitlicher Auflösung vorliegen (Patnaik & Boris, 2005). Hierbei werden ausreichend lange Zeitserien benötigt (Adrian et al., 2000 / Bonnet, 1998), da singuläre Einzelereignisse für eine Validierung nicht ausreichend sind. Adrian et al. (2000) stellt fest, dass die Validierungsdatensätze für LES-Modelle somit weit höhere Anforderungen erfüllen müssen, als die meisten bestehenden Datensätze bezüglich Dokumentation und Umfang der Daten aufweisen.

3.2 Bestehende Validierungsdatensätze

In den letzten Jahren wurden verschiedene Datensätze zur Validierung von numerischen Strömungs- und Ausbreitungsmodellen erzeugt, wobei im Folgenden auf Daten eingegangen wird, die in urbanen Rauigkeiten gemessen wurden.

Ein Beispiel bietet der im Windkanal erzeugte CEDVAL-Datensatz (Leitl, 2000, <http://www.mi.uni-hamburg.de/CEDVAL-Valid.427.0.html>), welcher Validierungsdaten zur Umströmung von Einzelhindernissen wie zum Beispiel einem Würfel, und im Raster angeordneten Gebäuderingen umfasst. Zusätzlich werden Messungen zur Geruchsausbreitung eines Schweinestalls bereitgestellt. Es handelt sich um systematische Untersuchungen des Strömungs- und Ausbreitungsverhaltens, mit denen numerische Modellergebnisse getestet werden können. Da die Messdaten der Windkanalexperimente nur als Mittelwerte vorliegen, sind sie zu Validierungszwecken nur für RANS-Modelle ausreichend.

Viele Datensätze werden in Datenbanken zusammengetragen. Einige dieser Validierungsdatenbanken vereinen Messungen aus der Natur und aus dem Grenzschichtwindkanal. Das europäische Projekt TRAPOS („Optimisation of Modelling Methods for Traffic Pollution in Streets“, 1994 - 1998) befasste sich mit der Modellierung von Autoabgasen in Straßenschluchten und beinhaltet unterschiedliche Experimente. Erste Untersuchungen im Windkanal mit 2D-Modellen analysierten beispielsweise den Effekt verschiedener Dachformen. Messungen in realen städtischen Rauigkeitsstrukturen wurden in der Göttinger Straße in

Hannover, dem Jagtvej in Kopenhagen, der Podbielskistraße in Hannover oder der Rue de Strasbourg in Nantes sowohl in der Natur als auch im Windkanal durchgeführt. Zudem beinhaltet der Datensatz Messungen zum Effekt der Vereinfachung von Modellstrukturen in numerischen Modellen, die in Windkanälen umgesetzt wurden. In diesem Projekt erfolgte im Rahmen des „Podbi-Exercise“ (Lohmeyer et al., 2002) eine internationale Zusammenarbeit zwischen 24 Modellierern aus 21 verschiedenen Instituten, die verschiedene Modelle nutzten, um die Luftverschmutzung in einer Straßenschlucht in Hannover vorherzusagen. Die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung der verschiedenen Anwender unterschieden sich am Ende eines Konvergenzprozesses und nach Vereinheitlichung der Vorgehensweise dennoch bis um einen Faktor von vier, da ein standardisierter Prozess zur Modellierung von Luftverschmutzung auf Straßenniveau fehlte. Werden verschiedene Hilfsmittel in den verschiedenen Arbeitsschritten verwendet, erhält man verschiedene Ergebnisse. Abschließend wurde festgelegt, dass die Ergebnisse stets mit einer Unsicherheit angegeben werden müssen und ein hoher Bedarf an Richtlinien und Standardisierungen bezüglich der Ausbreitungsmodellierung und ihrer Validierung besteht. Eine weitere enge Zusammenarbeit zwischen den Teilnehmern des Projektes ist erforderlich, um die Unterschiede in den Ergebnissen der Ausbreitungsmodellierung zu erklären und diese zu reduzieren.

Die nachfolgenden Projekte VALIUM („Development and Validation of Tools for the Implementation of European Air Quality Policy in Germany“, Schatzmann et al., 2006) und DAPPLE („Dispersion of Air Pollution and its Penetration into the Local Environment“, Arnold et al., 2004) befassten sich in den darauffolgenden Jahren ebenfalls mit der Modellierung von Luftqualität in Städten. Aus beiden Projekten ging eine Datenbank zur Validierung von numerischen Modellen hervor, die auf Ergebnisse aus Natur- und Laborexperimenten zugreift. Während in DAPPLE Straßenzüge in London untersucht wurden, sind in VALIUM Experimente zum Strömungs- und Ausbreitungsverhalten in der Göttinger Straße in Hannover durchgeführt worden. Durch die Kombination von Feldmessungen mit Windkanalexperimenten und der numerischen Modellierung trugen beide Projekte zum besseren Verständnis der Schadstoffausbreitung in städtischen Gebieten und der Rolle der fahrzeugerzeugten Turbulenz bei. Zusätzlich bieten sie ein großes Potential für Validie-

rungen von numerischen Modellen, wobei keine standardisierten Verfahren zum direkten Vergleich der Ergebnisse festgesetzt wurden.

In der „COST Action 732“ (COST 732, 2005 - 2009) wurde daher auf die Entwicklung von Richtlinien zur Qualitätssicherung und -verbesserung von mikroskaligen meteorologischen Modellen fokussiert. Zusätzlich wurde ein Standard zur Erstellung von Validierungsdatensätzen durch experimentelle Versuche in enger Zusammenarbeit mit den numerischen Modellierern ausgearbeitet. In Schatzmann et al. (2010) sind die Vorgehensweise und erste Ergebnisse der Validierungsstudien zusammengefasst.

Die COST-Datenbank (<http://www.mi.uni-hamburg.de/Home.484.0.html>) enthält zwei verschiedene Datensätze, zum einen Messungen aus dem MUST-Experiment („Mock Urban Setting Test“) sowie aus JU2003 („Joint Urban 2003 Oklahoma City Atmospheric Dispersion Study“, Allwine et al., 2004), die von numerischen Modellentwicklern und -anwendern aus einer Vielzahl von europäischen Ländern getestet wurden. MUST stellt hierbei einen eher einfachen geometrischen Testfall dar, bei dem 120 Schiffscontainer von einheitlicher Größe in einem regelmäßigen Raster im flachen Terrain der Wüste von Utah (USA) aufgestellt wurden. Im Gegensatz zu dieser idealisierten Struktur liefern die Messungen von JU2003, die im Central Business Distrikt von Oklahoma City (OKC, USA) stattfanden, einen sehr komplexen Testfall zur Validierung. Zu beiden Feldexperimenten wurden entsprechende Versuche im Grenzschichtwindkanal der Universität Hamburg durchgeführt. Die Windkanalmessungen beinhalten für beide Testfälle sowohl Strömungs- als auch Ausbreitungsdaten mit hoher räumlicher Auflösung zur Validierung von numerischen Modellen, wobei für das MUST-Experiment auch Messungen mit verschiedenen Windrichtungen (Bezpalcová, 2006) vorliegen. Es wurde darauf geachtet, dass bei allen Validierungsdaten ein Vertrauensbereich angegeben ist, der die Unsicherheit der Messinstrumente, die Unsicherheit bedingt durch die variablen Randbedingungen bei Naturmessungen und durch den begrenzten Messzeitraum (bzw. die begrenzte Ensemble-Größe) beinhaltet. Die Referenzdaten wurden zusätzlich in eine Excel-Arbeitsmappe integriert, die eine effiziente und zielorientierte Analyse der Validierungsergebnisse ermöglicht.

Durch die Arbeit von COST 732 wurden Probleme und Herausforderungen bei der Erstellung von Validierungsdaten deutlich gemacht (Schatzmann et al., 2009).

Es wurde festgestellt, dass sowohl Feld- als auch Laborexperimente speziell zur Erstellung von Validierungsdaten entworfen werden müssen, wobei eine enge Zusammenarbeit zwischen den Experimentatoren und den numerischen Modellieren erfolgen sollte. Hierbei muss überprüft werden, welche Daten für welche Anwendungen benötigt werden, um gezielt Messungen planen zu können und die Entstehung von Datenlücken zu vermeiden. Beim MUST-Fall wurden beispielsweise fehlende vertikale Profile bemängelt, so dass die Lücke in den Daten Freiraum zur subjektiven Interpretation der Modelldaten zulässt. Zudem wurde festgestellt, dass die Validierung erschwert wird, wenn sich eine Quelle in der Nähe eines Gebäudes befindet. Es ist zu vermuten, dass sich die Ausbreitung im Gegensatz zu einer Quellposition in der Straßenmitte weniger kohärent verhält. Daher sollten verschiedene Quellorte mit unterschiedlichen Ausbreitungscharakteristiken umgesetzt werden, so dass zur Validierung der Ausbreitung von Gaswolken in Abhängigkeit vom Quellort auch nützliche Analysen, z.B. Gauß-Ansatz, herangezogen werden können.

Ein weiteres Problem stellten besonders bei OKC die Geometriedaten dar. Die Gebäudeinformationen des Geoinformationssystems (GIS) stimmten nicht zufriedenstellend mit der realen Stadtstruktur und dem Windkanalmodell überein, so dass die exakten Gebäudepositionen häufig nur sehr schwer ermittelt werden konnten. Daher ist bei Validierungsdaten auf eine genaue Überprüfung und eine korrekte Dokumentation der Testgeometrie zu achten, da sie einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse der Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse haben kann.

Die Stadtstruktur von OKC weist zudem durch die hohe Bebauung eine sehr hohe Komplexität auf und stellt durch die instationären Strömungs- und Ausbreitungsphänomene einen schwierigen Testfall für numerische Modellierer dar. Der MUST-Testfall eignet sich durch die geringere Komplexität zur Validierung von RANS-Modellen. Außerdem lassen die Datensätze von MUST und JU2003 nur sehr spezielle Aussagen zu Strömungs- und Ausbreitungscharakteristiken in urbanen Gebieten zu. Eine weitere Komplexitätsstufe zwischen stark idealisierten Stadtraumigkeiten und einer realen Stadtstruktur wäre somit für Validierungszwecke sinnvoll.

Als eine weitere Herausforderung für zukünftige Datenbanken wurde die Erzeugung von Validierungsdaten für wirbelauflösende Strömungs- und Ausbreitungsmodelle (LES) gesehen, bei denen mittlere Windfelder und Ausbreitungscharakteristiken nicht ausreichend

sind, sondern zeitlich aufgelöste und räumlich korrelierte Daten als Referenz benötigt werden.

3.3 Validierungsdaten aus Feldversuchen

Werden numerische Modelle zur Untersuchung von Strömungs- und Ausbreitungsverhältnissen in der atmosphärischen Grenzschicht angewendet, werden zur Validierung häufig Messungen aus Feldversuchen herangezogen.

Um die Verhältnisse in der Natur mit den Ergebnissen von numerischen Modellen vergleichen zu können, müssen sie mit einer Windgeschwindigkeit in der Anströmung skaliert werden. Daher sind detaillierte Informationen über die Anströmbedingungen in ausreichender Qualität erforderlich. Klein & Clark (2007) untersuchten die während des Feldexperiments JU2003 in Oklahoma City (USA) gewonnenen Daten bezüglich des Einflusses der atmosphärischen Stabilität auf die Strömung in einer Straßenschlucht. Sie stellten große Unterschiede bei der Interpretation in Abhängigkeit von der Skalierungshöhe fest. Werden die Daten mit der Windgeschwindigkeit in großen Höhen der atmosphärischen Grenzschicht (250 m) skaliert, könnte man darauf schließen, dass die Strömungsverhältnisse innerhalb der Straßenschlucht stark von der Stabilität der Anströmung beeinflusst werden. Im Gegensatz dazu wird nur ein geringer Stabilitätseffekt beobachtet, wenn die Strömungsdaten mit dem Wind auf mittlerem Dachniveau (80 m) normiert werden. Dies bedeutet, dass die Strömung in einer Straßenschlucht hauptsächlich durch das Windfeld auf Dachniveau angetrieben wird und daher Stabilitätseffekte eine untergeordnete Rolle spielen. Die Analyse von Klein & Clark (2007) zeigt, dass die Wahl der Skalierungshöhe zu unterschiedlichen Interpretationen der Messdaten führen kann. Die verwendete Skalierungshöhe muss somit in einem Validierungsdatensatz ausführlich begründet und dokumentiert werden, so dass die Ergebnisse der numerischen Modelle in der gleichen Weise normiert werden können. Andernfalls erhält man keine zuverlässigen Ergebnisse.

JU2003 war ein sehr umfangreiches Feldexperiment mit vergleichsweise konstanten Randbedingungen, die ausführlich dokumentiert wurden. Dennoch haben kleine Änderungen in der Windrichtung einen großen Einfluss auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in den Straßenschluchten des Central Business Districts (Klein & Clark, 2007). Daher ist

eine genaue Analyse der Naturdaten bezüglich Windrichtungsschwankungen notwendig, bevor Interpretationen bzw. Vergleiche der Ergebnisse erfolgen können. Im Rahmen von JU2003 wurden unter anderem Gaswolken störfallartig freigesetzt. Hertwig (2008) stellte einen großen Einfluss der vorherrschenden Windrichtung in der Anströmung von Oklahoma City auf die Ausbreitungscharakteristiken der Gaswolke innerhalb der städtischen Bebauung fest. Durch die begrenzte Anzahl an Freisetzungen im Feldexperiment sind für eine bestimmte Wettersituation oft nur die Ergebnisse von einer einzelnen freigesetzten Gaswolke erhältlich. Da diese Messungen statistisch nicht repräsentativ sind, ist eine allgemeine Beurteilung des Ausbreitungsverhaltens der Gaswolke nicht möglich. Eine Validierung mit solchen gemessenen Einzelereignissen ist daher nicht aussagekräftig.

Schatzmann & Leitl (2002) untersuchten Messungen aus Feldexperimenten auf ihre Anwendbarkeit zur Validierung von mikroskaligen numerischen Modellen. Sie stellten heraus, dass die Messgeräte heutzutage eine sehr hohe Messgenauigkeit haben und die Unsicherheit in den Naturdaten hauptsächlich eine Frage der Repräsentativität der Messungen ist. Das Fehlen der zeitlichen Repräsentativität wird dadurch verursacht, dass die atmosphärische Turbulenz größere Zeitskalen aufweist als die übliche Dauer von einzelnen Messungen mit einer Mittelungszeit von 10 oder 30 Minuten. Messungen unter scheinbar identischen Randbedingungen können gemäß Schatzmann & Leitl (2011) um einen Faktor 2 oder mehr variieren.

Zur Verdeutlichung des Problems sind in Abbildung 3-1 exemplarisch Ergebnisse von Naturmessungen in einer viel befahrenen Straße in der Innenstadt von Hannover dargestellt. Die Messwerte wurden während des Projektes VALIUM (Schatzmann et al., 2006) in der Göttinger Straße im Zeitraum von einem Jahr aufgenommen. Jeder Punkt stellt einen gemessenen Halbstunden-Mittelwert der normierten Konzentration des Tracergases NO_x in Abhängigkeit zur Windrichtung dar. Die rote Kurve repräsentiert eine zeitliche Mittelung über alle Halbstunden-Mittelwerte in der jeweiligen Windrichtung. Die Daten wurden mit den Bedingungen gefiltert, dass mehr als 120 Fahrzeuge im Messintervall passieren mussten. Außerdem wurden nur Daten zur Analyse herangezogen, bei denen eine Windgeschwindigkeit von mehr als 3.9 m/s in 100 m Höhe herrschten, um eine neutrale Schichtung annehmen zu können. Dennoch lässt sich eine große Streubreite in den gemessenen Daten bei bestimmten Windrichtungen erkennen.

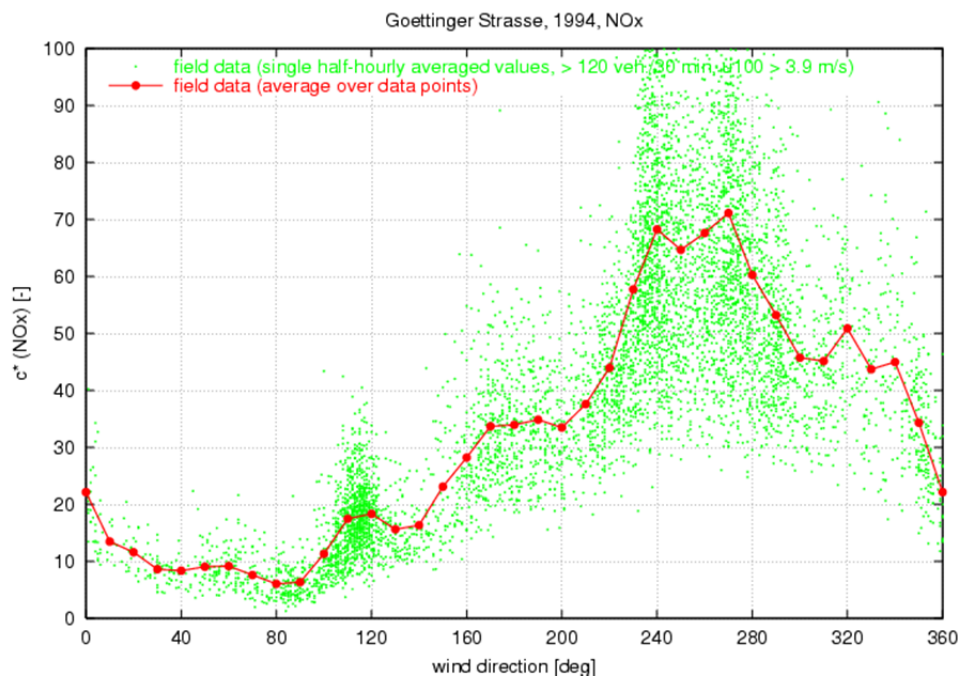


Abbildung 3-1: Halbstunden-Mittelwerte der normierten Konzentration in Abhängigkeit von der Windrichtung (grüne Punkte) und Mittel der Daten (rote Kurve), gemessen in der Göttinger Straße in Hannover (Schatzmann & Leitl, 2011).

Es wird deutlich, dass Messergebnisse aus Feldexperimenten nicht als mittlere Bedingungen interpretiert werden dürfen, sondern als mehr oder weniger variable Einzelereignisse zu werten sind. Eine längere Messdauer in der Natur stellt keine Lösung des Problems dar, da man bei einem Zeitraum von über 30 Minuten einen systematischen Trend in den meteorologischen Randbedingungen erwarten muss (Schatzmann & Leitl, 2011). Daher können Naturdaten aus Messungen in komplex bebauten Gebieten keine ausreichend langen Zeitserien für eine Analyse des Raum- und Zeitverhaltens der Strömung bereitstellen, die eine zuverlässige Validierung von Large-Eddy-Simulationen ermöglichen würde.

3.4 Validierungsdaten aus Windkanalexperimenten

Während die Validierung von numerischen Modellen mit den Ergebnissen aus Feldexperimenten zu starken Einschränkungen führt, sind Windkanalexperimente eine weitere anerkannte Möglichkeit zur Erzeugung von Validierungsdaten.

Ein großes Potenzial der Windkanalexperimente liegt in der Möglichkeit, mit ihrer Hilfe Naturdaten besser beurteilen zu können. Während des Projektes VALIUM (Schatzmann et al., 2006) wurden neben Naturmessungen auch Untersuchungen im Windkanal der Universität Hamburg durchgeführt. In Abbildung 3-2 sind die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen in der Göttinger Straße in Hannover zu sehen, auf die im vorherigen Kapitel bereits eingegangen wurde. Die Streubreite der Messdaten für Halbstunden-Mittelwerte der Konzentration bei bestimmten Windrichtungen wurde auch in den Windkanalexperimenten beobachtet. Die Streubalken in den jeweiligen Windrichtungen wurden an die Kurve mit den mittleren Konzentrationen der Naturdaten angetragen. Es lässt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den Natur- und Windkanaldaten erkennen, wobei dennoch eine höhere Variabilität in der Natur als in den Ergebnissen aus den Laborexperimenten zu finden ist. Dies kann einerseits daran liegen, dass in der atmosphärischen Grenzschicht noch größere Schwankungen existieren als sie im Windkanal modelliert wurden. Andererseits könnten spezielle Idealisierungen wie beispielsweise die neutral geschichtete Grenzschicht nicht den realen Bedingungen entsprechen (Schatzmann & Leitl, 2011).

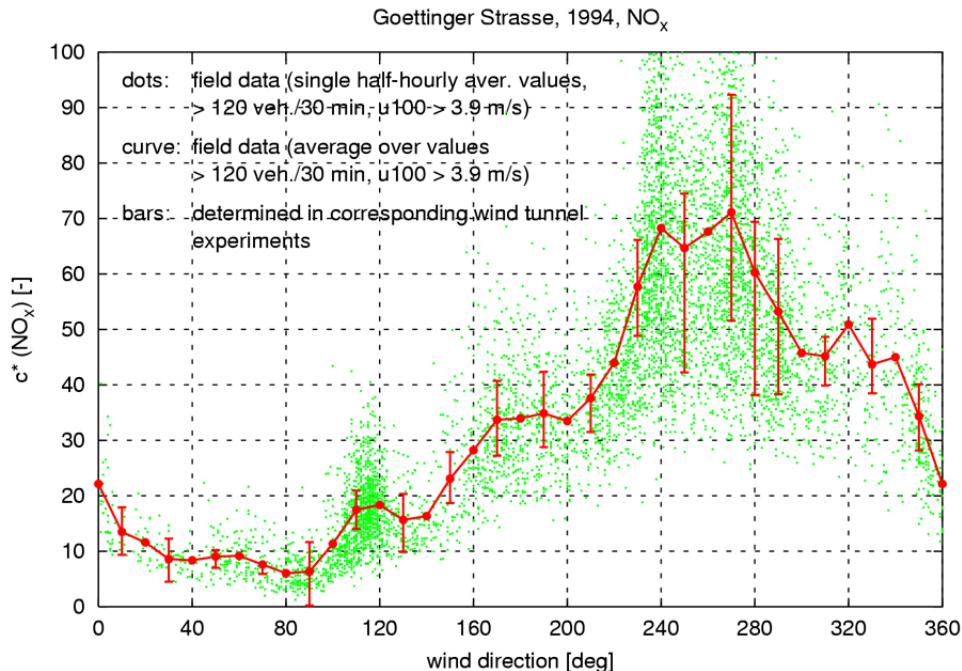


Abbildung 3-2: Halbstunden-Mittelwerte der normierten Konzentration in Abhängigkeit von der Windrichtung (grüne Punkte) und Mittel der Daten (rote Kurve), gemessen in der Göttinger Straße in Hannover; Streubalken abgeschätzt durch Windkanalexperimente (Schatzmann & Leitl, 2011).

Die Ergebnisse aus Windkanalmessungen wurden u.a. auch bei der Beurteilung der Konzentrationsmessungen aus JU2003 hinzugezogen, die bereits im vorherigen Kapitel erwähnt wurden. In Abbildung 3-3 ist beispielhaft die normierte Häufigkeitsverteilung der dimensionslosen „peak concentration“, die auf Basis von 338 Puff-Freisetzen im Windkanal ermittelt wurde, dargestellt (Harms, 2010). Der blaue Punkt gibt das Ergebnis einer entsprechenden Freisetzung einer Gaswolke in der Natur wieder. Der Grafik kann man entnehmen, dass der Naturwert mindestens einmal im Windkanal reproduziert wurde. Sie macht aber auch die geringe Aussagekraft der Naturmessung bei der Vorhersage von Einzel- oder gar Extremereignissen deutlich, die bei der Untersuchung von Schadstoffausbreitungen von Bedeutung sind.

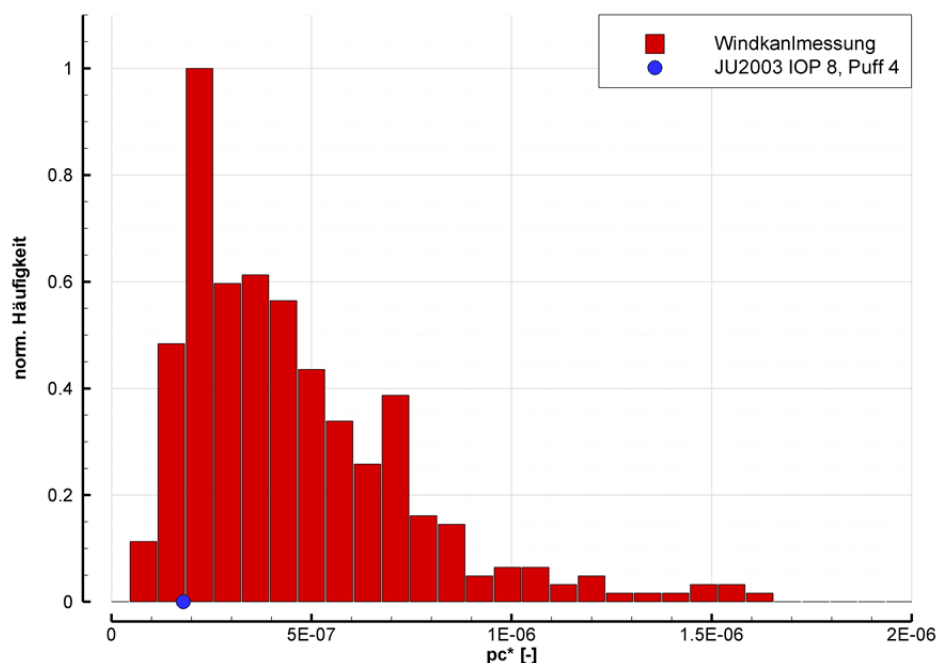


Abbildung 3-3: Normierte Häufigkeitsverteilung der dimensionslosen „peak concentration“ pc^* , ermittelt auf Basis von 338 Puff-Freisetzen im Windkanal (rote Balken). Der blaue Punkt gibt das Ergebnis einer korrespondierenden Naturmessung der Feldkampagne JU2003 an (Harms, 2010).

Beide Beispiele verdeutlichen, dass Daten aus Feldexperimenten nur Einzelereignisse sind, die aber mit Hilfe von statistisch repräsentativen Messungen im Windkanal interpretiert werden können. Naturmessungen stellen eine gute Ergänzung zu Windkanalexperimenten dar, da sie das Vertrauen in die Ergebnisse aus dem Labor stärken können. Die Ergebnisse

haben aber auch gezeigt, dass Windkanalexperimente ein großes Potential zur Erzeugung von Validierungsdaten für numerische Modelle enthalten. Da die Randbedingungen über einen langen Zeitraum kontrolliert werden können, lassen sich Daten mit einer hohen statistischen Repräsentativität erzeugen. Testfälle lassen sich in verschiedenen Komplexitäten und in Abstimmung auf die jeweilige Anforderung des numerischen Modells realisieren. Dabei muss beachtet werden, dass auch die physikalische Modellierung ihre Grenzen hat, weshalb ein genaues und umfangreiches Überprüfen und Dokumentieren der Randbedingungen im Windkanal notwendig ist. Dies gilt besonders bei der Erzeugung von Validierungsdatensätzen, da diese höhere Anforderungen erfüllen müssen als standardisierte Labormessungen. In Kapitel 4 werden die Anforderungen an Windkanalexperimente im Detail vorgestellt.

3.5 Fazit bezüglich LES-Validierungsdaten

Validierungsdaten für LES-Modelle müssen spezielle Anforderungen erfüllen. Bei der Nutzung von Naturmessungen zur Validierung müssen die Daten sorgfältig ausgewertet werden. Es handelt sich nur um Einzelereignisse der Strömungs- und Ausbreitungsphänomene, die nur bedingt einer Validierung von LES-Modellen dienen können. Im Zusammenhang mit Messungen aus dem Windkanal können diese allerdings besser beurteilt und sicherer im Rahmen der Modellvalidierung angewendet werden. Windkanalexperimente stellen in Bezug auf LES-Validierungsdaten die beste Möglichkeit dar, um zeitlich und räumlich hochaufgelöste Daten zu erhalten. Allerdings muss auch hier die Erzeugung der Daten hohen Qualitätsanforderungen entsprechen, um eine zuverlässige Validierung eines LES-Modells zu gewährleisten.

In dieser Arbeit wurde nur eine Auswahl von bestehenden Datenbanken aufgezeigt. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die oben vorgestellten Datensätze, über die beinhalteten Messungen und ihre Eignung zur Nutzung für RANS- und LES-Modelle. Die meisten bereits existierenden Datensätze können gar nicht oder nur bedingt zur Validierung von LES-Modellen genutzt werden, da die Anströmbedingungen nur als zeitlich gemittelte Daten vorliegen. Im Rahmen von JU2003 existiert lediglich ein im Windkanal erzeugter Datensatz, der zeitlich aufgelöste Datenreihen beinhaltet (Harms, 2010). Allerdings handelt es

sich um eine sehr komplexe Rauigkeit, die die LES-Modelle durch ihre instationären Strömungsprozesse vor große Herausforderungen stellt.

Tabelle 3-1: Überblick über bestehende Validierungsdatensätze und ihre Eignung zur Nutzung für RANS- und LES-Modelle(+ geeignet, - ungeeignet).

Datensätze	Windkanal-Messungen	Naturmessungen	geeignet für RANS	geeignet für LES
CEDVAL	+	-	+	-
TRAPOS	+	+	+	-
VALIUM	+	+	+	-
DAPPLE	+	+	+	-
MUST	+	+	+	-
JU2003	+	+	+	-/+

Bei der Wahl eines geeigneten Datensatzes zur Validierung seines Modells muss der numerische Modellierer die Qualität dieses Datensatzes beurteilen können. Es lassen sich folgende Punkte zusammenfassen:

- Eine ausführliche Dokumentation lässt darauf schließen, dass die Validierungsdaten sorgfältig erstellt wurden.
- Es muss ersichtlich sein, für welche Modelle sich die Referenzdaten zur Validierung eignen, so dass eine zuverlässige Modellvalidierung möglich ist.
- Die Datenaufbereitung bzw. -auswertung muss nachvollziehbar sein, um ein besseres Verständnis für die Zahlen zu bekommen.
- Werden Aktualisierungen am Datensatz im Laufe der Jahre vorgenommen, müssen diese gut ersichtlich für die Nutzer vermerkt werden.

4 Anforderungen an Validierungsdatensätze für LES-Modelle

Validierungsdaten für wirbelauflösende Strömungs- und Ausbreitungsmodelle müssen höheren Anforderungen genügen als solche für RANS-Modelle. Die von COST 732 (Britter et al. 2007a+b) erstellten Richtlinien für mikroskalige numerische Modelle wurden diesbezüglich ergänzt. Der Aufbau des Anforderungsprofils für LES-Validierungsdaten ist in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt und gibt eine Übersicht über die Inhalte. Die Qualitätsanforderungen an die Windkanalexperimente spielen eine entscheidende Rolle und werden im Folgenden ausführlich behandelt.

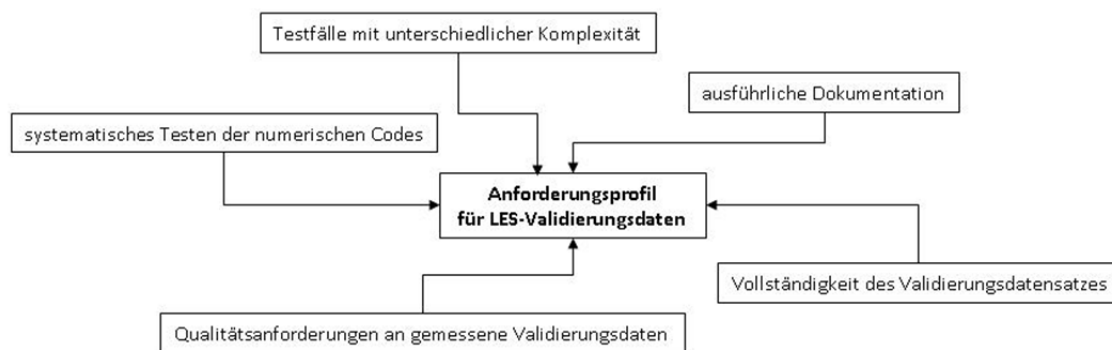


Abbildung 4-1: Übersicht über die Inhalte des Anforderungsprofils für LES-Validierungsdaten.

4.1 Testfälle mit unterschiedlicher Komplexität

Nach Oberkampf et al. (2002) müssen Validierungsdatenbanken Testfälle mit unterschiedlicher Komplexität enthalten. Dies ermöglicht die Evaluierung eines Modells im Laufe seiner Entwicklung. Mittels *einfacher Strukturen* lassen sich Modellcodes in den ersten Entwicklungsstufen testen. Freistehende Einzelhindernisse wie beispielsweise ein Würfel oder Gebäuderhing stellen die ersten Testfälle dar.

Für die Beurteilung des Verhaltens, der Genauigkeit und Anwendbarkeit der Modelle sind *komplexere Strukturen* erforderlich, die sich der realen Komplexität von urbanen Gebieten in genau definierten Stufen annähern sollen. Ausgehend von einer regelmäßigen Anordnung von Einzelhindernissen, die zudem in einer weiteren Komplexitätsstufe mit verschiedenen Dachformen versehen werden können, nähert sich die Struktur der Modelle realen städtischen Rauigkeiten an (Abbildung 4-2).

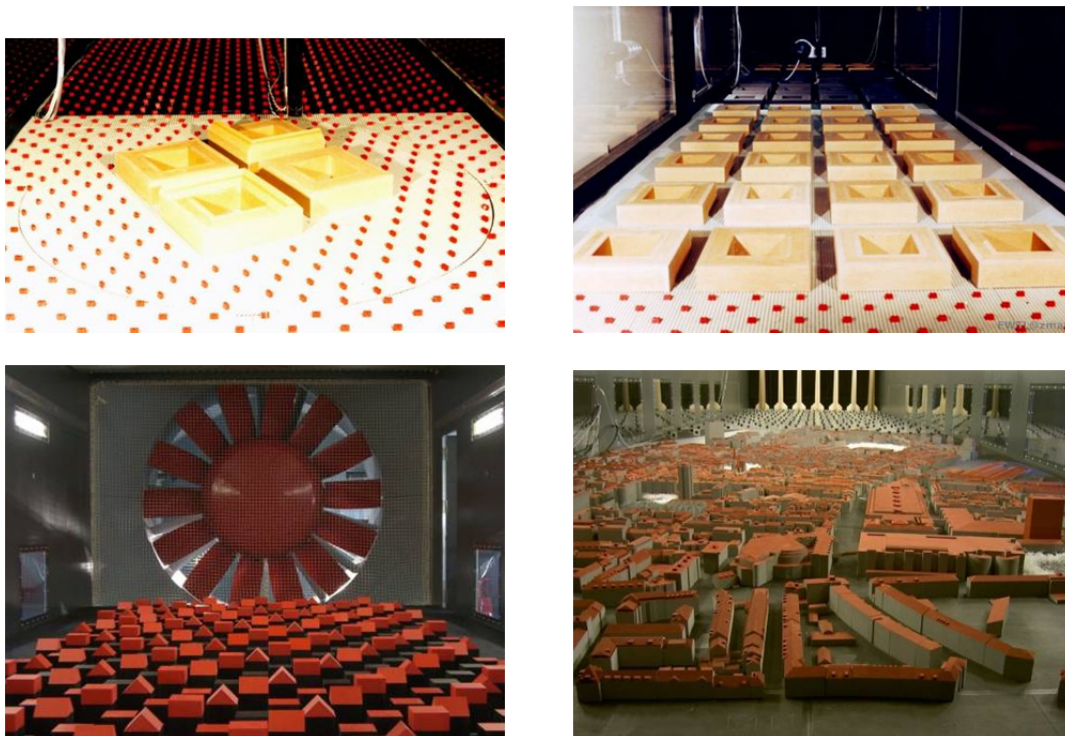


Abbildung 4-2: Mögliche Testfälle von einfachen Strukturen über stark idealisierte städtische Gebiete bis hin zu Modellen von realen Städten (Meteorologisches Institut der Universität Hamburg).

Im Rahmen einer Modellvalidierung ist einerseits die Sensibilität des untersuchten Problems bezüglich sich verändernder Randbedingungen zu ermitteln, andererseits muss der Einfluss von Unsicherheiten in den Anfangsbedingungen auf das mathematische Modell quantifiziert werden (Britter et al., 2007a). Daher müssen die Modellergebnisse auf ihr sinnvolles physikalisches Verhalten getestet werden, indem eine *systematische Variation der Randbedingungen* vorgenommen wird. Testfälle mit einer einfachen geometrischen Struktur sind hierfür gut geeignet. Durch ein räumlich hochaufgelöstes Messen ist beispielsweise der Einfluss einer Windrichtungsänderung auf die Strömungsverhältnisse zu

ermitteln und zu validieren. Die Auswirkungen einer *systematischen Änderung der Geometrie* auf das Strömungs- und Ausbreitungsverhalten im Modellgebiet lassen sich durch höhere Komplexitätsstufen in den Validierungsdaten untersuchen.

Diese Vorgehensweise wurde bereits beim Aufbau der Internet-Datenbank CEDVAL (Leitl, 2000) verwirklicht. Sie enthält nicht nur Daten von der Umströmung eines Einzelhindernisses, sondern stellt auch Daten zur Verfügung, mit denen sich die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in einem regelmäßig angeordneten Raster von Einzelhindernissen validieren lassen. In der Evaluierungsrichtlinie der COST Action 732 (Britter et al., 2007a+b) sind Testfälle mit unterschiedlicher Komplexität als Bestandteil einer Validierungsdatenbank aufgenommen worden.

4.2 Ausführliche Dokumentation

Um die Validierungsdaten effizient nutzen zu können, ist eine ausführliche Dokumentation der Versuchsdurchführung und Datenaufbereitung unverzichtbar.

Im Hinblick auf die Nutzer des Datensatzes sind die *Verfahren zur Datenaufbereitung und die Art der Archivierung* zu bestimmen. Die Rohdaten können im Natur- oder Modellmaßstab bzw. in dimensionsloser Form oder dimensionsbehaftet archiviert werden, wobei das Verfahren zur Umrechnung für den Datenanwender nachvollziehbar sein muss. Hinweise zur weiteren möglichen Datenaufbereitung erhöhen die Anwendbarkeit der Validierungsdaten. Werden die aufbereiteten Daten als Zeitserien zur Verfügung gestellt, ist eine individuelle Nachbearbeitung und Berechnung von abgeleiteten Strömungsgrößen durch den Nutzer möglich. Eine statistische Auswertung der Messgrößen ermöglicht eine erste Übersicht über die Ergebnisse (Adrian et al., 2000).

Gemäß der Anforderungsliste für Validierungsdaten der COST Action 732 (Schatzmann et al., 2005 / Britter et al., 2007a) müssen mindestens folgende *Informationen des Datensatzes* beschrieben werden:

- Größe des modellierten Gebietes
- Lage und Ausrichtung des Referenz-Koordinatensystems
- Messraster bzw. Lage von Messpunkten
- verwendete Messinstrumente

Eine weitere Grundvoraussetzung zur Nutzung eines Datensatzes ist die detaillierte Dokumentation der *Geometrie der Testfälle* (Britter et al., 2007a / Kaltenbach et al., 1999).

Diese muss enthalten:

- Maße und Anordnung der Elemente bzw. Gebäude
- Orientierung der Bauwerksoberflächen zum Wind / Windrichtung
- Art und Form von Oberflächenrauigkeiten

In Abhängigkeit von der verwendeten Vermessungsmethode sind Ungenauigkeiten in den Geometriedaten zu erwarten. Daher muss der Vertrauensbereich der Daten für den Modellierer bekannt sein, um mögliche Fehlerquellen bei der Validierung ermitteln zu können (Britter et al., 2007a).

Enthält ein Validierungsdatensatz die Ergebnisse von Konzentrationsmessungen, müssen folgende *Eigenschaften der verwendeten Emissionsquellen* spezifiziert werden:

- Anzahl und Lage der Quelle(n)
- Art der Quelle(n), z.B. Punkt- oder Linienquelle
- verwendeter Tracer
- Quellstärke und Emissionsdauer

Sie sind ebenso zu dokumentieren wie die Genauigkeit dieser Emissionsdaten.

Ein weiterer Punkt im Anforderungsprofil ist die Dokumentation der *Messgenauigkeit*. Eine Diskussion der Ähnlichkeitsparameter zeigt, welche Parameter erfüllt werden und welche im Rahmen von kleinskaligen Experimenten möglicherweise vernachlässigbar sind (Schatzmann et al., 1997). Zudem muss die Reynoldszahl-Unabhängigkeit der Strömung bzw. der Ausbreitung überprüft werden, um die Naturähnlichkeit zu dokumentieren. Die zu generierenden Validierungsdatensätze müssen zudem Informationen enthalten zur:

- Messgenauigkeit der Instrumente
- Unsicherheit der Messwerte bzgl. ihrer räumlichen und zeitlichen Repräsentativität
- Wiederholbarkeit der Ergebnisse unter ähnlichen Randbedingungen
- Zuverlässigkeit von berechneten statistischen Messgrößen

Erst mit diesen Angaben kann die Qualität der Daten vom Nutzer beurteilt und bei der Validierung des LES-Modells entsprechend berücksichtigt werden. Die speziellen Anforderungen bezüglich der Messgenauigkeit werden im nächsten Abschnitt erläutert.

4.3 Vollständigkeit und Qualität der Daten

LES-Modelle stellen bezüglich der Vollständigkeit an Informationen besondere Anforderungen an einen Validierungsdatensatz. Dies betrifft sowohl die Modellierung der Anströmbedingungen als auch die Vermessung der Strömungs- und Ausbreitungsvorgänge im Modellgebiet. Im Folgenden werden die Qualitätsanforderungen an im Grenzschichtwindkanal gemessenen Validierungsdaten detailliert vorgestellt. Sie sind von mehreren Faktoren abhängig.

Zunächst müssen Bedingungen zur *Vermeidung von Fehlern beim Umgang mit den Daten* geschaffen werden. Dies betrifft den Ablauf der Versuche sowie die anschließende Datenauswertung. Bei einem Validierungsdatensatz für LES-Modelle stellt die Aufbereitung der zeitlich und räumlich hochaufgelösten Messungen eine große Herausforderung dar. Daher wurde im Windkanallabor der Universität Hamburg ein umfangreiches Software-Paket zur Datenverarbeitung und –auswertung von Fischer (2011) entwickelt, das ausführlich validiert wurde. Ein fehlerfreier Umgang mit den Daten wird somit erleichtert und die Zuverlässigkeit und Qualität der Daten erhöht.

Um einen Vergleich der Einzelmessungen untereinander oder mit Ergebnissen aus der Natur bzw. von Modellen zu ermöglichen, müssen die Daten auf ihre *Skalierbarkeit* überprüft werden. Die Messgrößen können daraufhin beispielsweise in dimensionsloser Form betrachtet werden. Bei Strömungsmessungen wird die Windgeschwindigkeit mit der Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} skaliert, die an einem bestimmten Messort gemessen und dokumentiert wird. Bei der dimensionslosen Konzentration c^* gehen gemäß Gleichung 4.1 neben der Windgeschwindigkeit U_{ref} auch die Quellstärke Q und die Referenzlänge L_{ref} ein (VDI 3783/12, 2000).

$$c^* = \frac{c \cdot U_{ref} \cdot L_{ref}^2}{Q} \quad 4.1$$

Werden die Windgeschwindigkeiten und Freisetzungsmengen im Rahmen von Wiederholungsmessungen systematisch variiert, so kann die Skalierbarkeit und damit die Allgemeingültigkeit der Messergebnisse festgestellt werden. Harms (2010) beschäftigte sich intensiv mit der Skalierbarkeit von einzelnen Gaswolken. Er zeigt auf, dass die „arrival time“, „peak time“ und „leaving time“ sich antiproportional zur jeweiligen mittleren

Windgeschwindigkeit verhalten und unabhängig von der freigesetzten Gasmenge sind. Die gemessene mittlere „dosage“ verhält sich ebenfalls antiproportional zur jeweiligen mittleren Windgeschwindigkeit und proportional zu der freigesetzten Gasmenge. Die „peak concentration“ steigt proportional mit zunehmender freigesetzter Gasmenge an und ist unabhängig von der jeweiligen Windgeschwindigkeit.

Neben den genannten Messgrößen ist auch die Zeit t dimensionsbehaftet, die durch die Windgeschwindigkeit U_{ref} und die Referenzlänge L_{ref} skalierbar ist (Gleichung 4.2).

$$t^* = \frac{t \cdot U_{ref}}{L_{ref}} \quad 4.2$$

Das Komitee der „American Society of Mechanical Engineers“ (ASME, 2005) legt die regelmäßige *Kalibration der Messinstrumente* als eine Anforderung an die Experimente fest. Eine Kalibration (z.B. mit einer Druckwaage, Abbildung 4-3) muss unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt werden, wie sie während der Messungen zu erwarten sind. Die herrschende Temperatur und der bestehende Druck sind zudem während der laufenden Experimente zu dokumentieren. Reagieren Messgeräte empfindlich auf die Umgebungsbedingungen, muss bei sich stark ändernden Umgebungsbedingungen die Messgenauigkeit wiederholt überprüft werden. Dies erfordert beispielsweise eine mehrmalige Kalibration eines Fast-FID (Flammenionisationsdetektor, Abbildung 4-3) pro Tag.



Abbildung 4-3: Feindruck-Prüfwaage für Kalibrierungszwecke (links), Fast-FID reagiert empfindlich auf sich verändernde Umgebungsbedingungen (rechts).

4.3.1 Anströmbedingungen

Die Anströmbedingungen müssen bezüglich ihrer Qualität überprüft und ausführlich dokumentiert werden. Abweichungen in der Anströmung können die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse im Modellgebiet erheblich beeinflussen.

Herbst (2006) untersuchte den Einfluss von unterschiedlichen Randbedingungen auf die Strömungsverhältnisse in der komplexen städtischen Rauigkeit des Central Business District von Oklahoma City. Hierfür wurden neben der Referenzgrenzschicht fünf weitere Grenzschichten mit variierten Randbedingungen modelliert und dokumentiert. Durch die Verstellung der Windkanaldecke wird eine vom Gleichgewichtszustand abweichende Verteilung des vertikalen Impulsflusses hervorgerufen. Dieser Einfluss wurde mit Hilfe von drei verschiedenen Einstellungen näher untersucht. Um die Auswirkungen von Grenzschichten mit unterschiedlicher Rauigkeitsklasse auf die Strömung im Modellgebiet abschätzen zu können, wurde einerseits eine Grenzschicht mit höheren Turbulenzgraden modelliert und andererseits wurde gänzlich auf eine Grenzschichtsimulation verzichtet.

Die größte Sensitivität der Messgrößen auf variierende Anströmverhältnisse wurde innerhalb der hohen Bebauung des Zentrums von Oklahoma City gefunden. Daher werden die Ergebnisse aus der Anströmung im Folgenden mit einer repräsentativen Messung innerhalb einer schmalen Straßenschlucht quer zur Hauptströmungsrichtung verglichen. Zunächst werden die vertikalen Profile der mittleren Windgeschwindigkeit von der Anströmung mit den gemessenen Profilen innerhalb des Stadtgebietes betrachtet (Abbildung 4-4). Vor der Stadt weichen die Profile im Mittel um ca. 5 % für die Grenzschichten ohne Gleichgewichtszustand, 10 % für die Strömung mit höheren Turbulenzgraden und 20 % ohne Grenzschicht-Simulation von der Referenzgrenzschicht ab. Die Unterschiede in der mittleren Windgeschwindigkeit verringern sich deutlich um mehr als die Hälfte innerhalb der Stadtbebauung auf maximal 12 % ohne Grenzschicht-Simulation; für die anderen Grenzschichten liegen die Abweichungen im Rahmen der Reproduzierbarkeit.

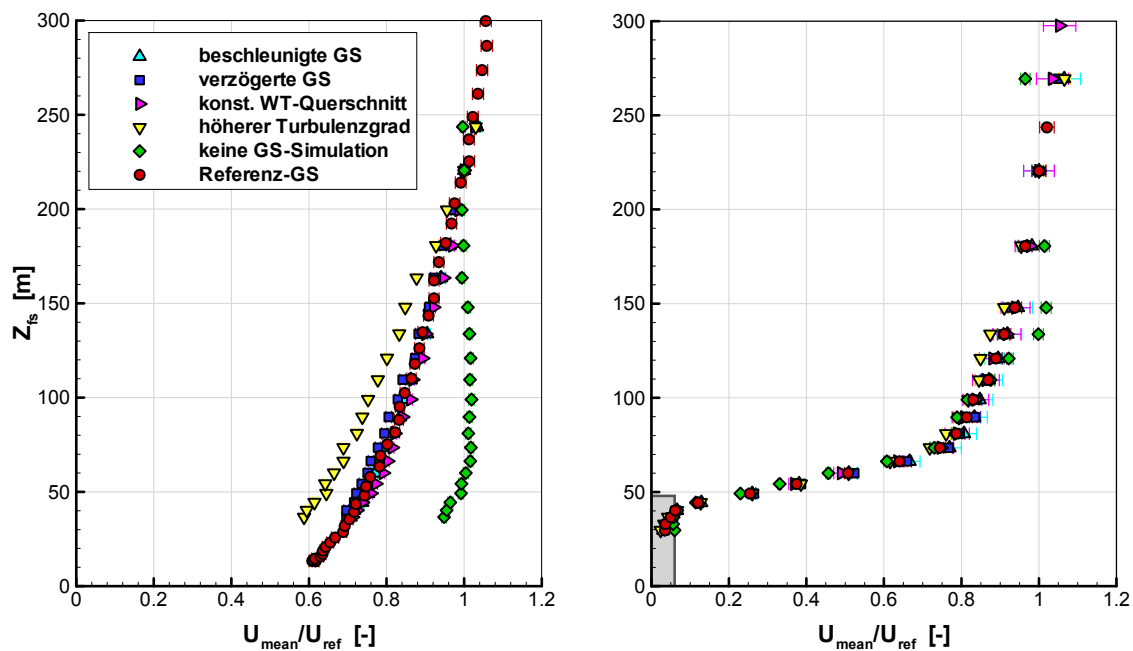


Abbildung 4-4: Vergleich der vertikalen Profile der mittleren Windgeschwindigkeit von fünf verschiedenen Grenzschichten zu einer Referenz-Grenzschicht, gemessen in der Anströmung (links) und innerhalb der Bebauung (rechts), grauer Balken: mittlere Gebäudehöhe (Herbst, 2006).

Bei der Analyse der Profile der vertikalen turbulenten Impulsflüsse werden im Mittel in der Anströmung Unterschiede von 10 - 30 % für die Grenzschichten ohne Gleichgewichtszustand, 80 % für die Strömung mit höheren Turbulenzgraden und 95 % ohne Grenzschicht-Simulation ermittelt (Abbildung 4-5). Die Abweichungen innerhalb des Stadtgebietes verringern sich für die beiden zuletzt genannten Grenzschichten, ähnlich wie es bei den mittleren Windgeschwindigkeiten beobachtet wurde. Dagegen wirkt sich die Abweichung in den vertikalen Impulsflüssen bei den Grenzschichten ohne Gleichgewichtszustand signifikant auf die Strömung in der städtischen Bebauung aus, so dass hier Unterschiede von 10 - 40 % zu finden sind. Hierbei werden die größten Abweichungen im Bereich des Dachniveaus festgestellt.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass größte Sorgfalt bei der Modellierung der Anströmbedingungen unerlässlich ist. Es dürfen nicht nur die mittleren Windprofile betrachtet werden, da sich Abweichungen in den Profilen der Impulsflüsse trotz der sehr hohen Bebauung von Oklahoma City auf die Strömung innerhalb der Straßenschlucht auswirken.

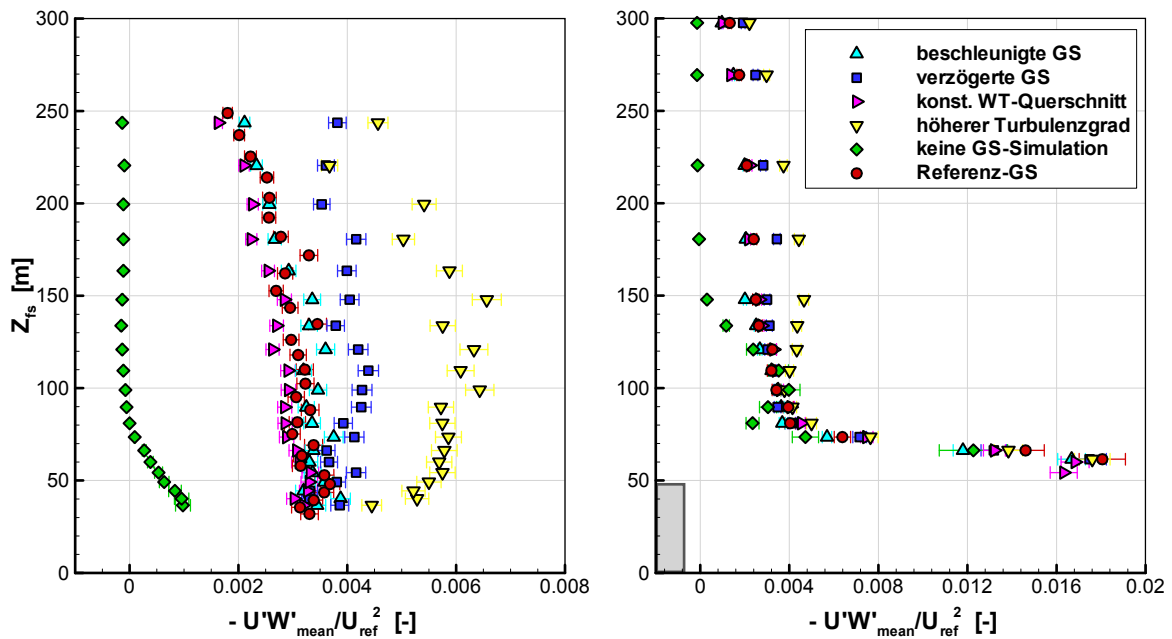


Abbildung 4-5: Vergleich der vertikalen Profile der vertikalen turbulenten Impulsflüsse von fünf verschiedenen Grenzschichten zu einer Referenz-Grenzschicht, gemessen in der Anströmung (links) und innerhalb der Bebauung (rechts), grauer Balken: mittlere Gebäudehöhe (Herbst, 2006).

In der Literatur sind zahlreiche Anforderungen bezüglich der Anströmdaten zu finden, wie beispielsweise bei Schatzmann et al. (1997), Kaltenbach et al. (1999), Adrian et al. (2000), Leidl (2000), Oberkampf & Trucano (2002) oder Britter et al. (2007a). Sie werden im Folgenden zusammengefasst und ergänzt. Zudem wird auf die jeweiligen Qualitätsanforderungen eingegangen.

Bei Laborexperimenten im Grenzschichtwindkanal ist besondere Sorgfalt beim *Überprüfen des longitudinalen Druckgradienten* anzuwenden, da eine beschleunigte bzw. verzögerte Strömung erheblichen Einfluss auf die turbulenten Flüsse im Modellgebiet haben kann (Herbst, 2006). Daher ist der statische Druck entlang der Messstrecke möglichst konstant zu halten. Laut VDI-Richtlinie 3783/12 (2000) sind am oberen Rand der modellierten Grenzschicht Druckgradienten mit Werten von

$$p^* = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta \right)}{\frac{\rho}{2} \cdot u_\delta^2} \leq 0.05 \quad 4.3$$

zulässig, wobei δ die Höhe der modellierten Grenzschicht und u_δ die Geschwindigkeit der Strömung am oberen Rand der modellierten Grenzschicht ist. Zusätzlich ist die Ausbildung einer „constant flux layer“ in der ungestörten Anströmung vor dem Modellgebiet zu überprüfen, da sie die eigentliche Anforderung für realistische Grenzschichtbedingungen darstellt und als ein strengeres Kriterium als der longitudinale Druckgradient anzusehen ist. Ist der statische Druck entlang der Messstrecke nahezu konstant und eine „constant flux layer“ vorhanden, sollte im Modellgebiet $p^* \leq 0.02$ (Gleichung 4.3) unterschritten werden.

Die Anströmung im LES-Modell kann durch eine Simulation des Aufbaus im Grenzschichtwindkanal durchgeführt werden. Daher sind Daten aus der Anlaufstrecke des Windkanals erforderlich. Die *longitudinale Entwicklung* der Grenzschicht lässt sich validieren, indem die Strömungsgrößen in vertikalen Ebenen im Kanalquerschnitt vermessen und zur Verfügung gestellt werden.

Die Anströmung des Modellgebietes muss lateral homogen sein, so dass „in der gesamten Messstrecke die zeitlich gemittelten vertikalen Geschwindigkeitsprofile (außerhalb der Seitenwandgrenzschicht des Windkanals) gleich sind“ (VDI 3783/12, 2000). Um die *laterale Homogenität der Strömung* zu garantieren, müssen Lateralprofile in repräsentativen Höhen gemessen werden. Auch hierbei haben eigene Erfahrungen gezeigt, dass durch eine genaue Ausrichtung der Turbulenzgeneratoren und Rauigkeitselemente durchaus eine Standardabweichung der Windgeschwindigkeit von weniger als $\pm 2\%$ über die Breite des Modellgebiets zu erreichen ist.

Durch die *lateralen und vertikalen Schwankungen des Windvektors* lässt sich die Turbulenz der Strömung zusätzlich charakterisieren. Deren Dokumentation ist ebenfalls ein wesentlicher Bestandteil des LES-Validierungsdatensatzes.

Die *integralen Längenmaße* der Turbulenz dienen der weiteren Beurteilung der Anströmungsbedingungen (Kempf et al., 2005) und müssen daher zur Validierung vorliegen. Sie stellen ein Maß für die Größenordnung der energiereichen Wirbel der Strömung dar.

Aus den gemessenen Zeitserien lassen sich die *spektralen turbulenten Charakteristiken* ermitteln, die dem Datensatznutzer bereits aufbereitet zur Verfügung zu stellen sind.

Für die Charakterisierung der Zuströmbedingungen für LES-Modelle muss das zeitlich hochaufgelöste Verhalten der drei Komponenten des Windvektors erfasst werden. Wie anfangs erwähnt, müssen die Messdaten in *ausreichend langen Zeitserien* zur Verfügung

gestellt werden, um eine Validierung des Raum- und Zeitverhaltens der Strömungsgrößen zu ermöglichen. Eine Validierung ausgehend von Mittelwerten ist hier nicht ausreichend. Kondo et al. (1997) beschreibt statistische Verfahren zur Erzeugung der Einstrombedingungen in LES-Modellen. Neben den Windkomponenten muss ebenso das zeitliche Verhalten der Turbulenzparameter in hoher Auflösung dokumentiert werden. Sowohl die horizontalen als auch die vertikalen turbulenten Impulsflüsse sind in ausreichend langen Zeitserien für eine Validierung des Raum- und Zeitverhaltens zu archivieren.

Ferner sind zeitlich und räumlich hochaufgelöste *Korrelationen* der Geschwindigkeitskomponenten zur Validierung von LES-Modellen erforderlich (Breuer, 2001). Bonnet et al. (1998) und ebenso Druault et al. (2005) nutzen korrelierte Messungen, um Wirbelstrukturen der Strömung zu untersuchen. Die Ergebnisse führen zu einer besseren Charakterisierung der Anströmverhältnisse.

4.3.2 Strömungs- und Konzentrationsmessungen

Die *Strömungsmessungen* müssen zur Nutzung als Validierungsbasis für LES-Modelle ähnlichen Anforderungen entsprechen wie die Messungen der Anströmbedingungen. Der Datensatz muss das statistisch repräsentative Windfeld durch Messungen an einer ausreichenden Anzahl von Orten beschreiben, wobei die Daten als ausreichend lange Zeitserien für die statistische Validierung der Strömungseigenschaften zur Verfügung zu stellen sind. Die Windkomponenten müssen zudem ausreichend zeitlich hochaufgelöst sein, um die Turbulenzeigenschaften der Strömung erfassen und validieren zu können. Zeit- und raumkorrelierte Messungen der Windkomponenten sind auch im Modellgebiet durchzuführen. Die Visualisierung des Strömungsfeldes darf in keinem Datensatz fehlen. Sie kann zusätzlich wertvolle Informationen bieten und einen Einblick in das Verhalten des Strömungsfeldes geben (Oberkampf & Trucano, 2002).

Für die Validierung von *Konzentrationsmessungen* sind sowohl die Ausbreitungsverhältnisse von kontinuierlichen Quellen von Interesse als auch von Quellen, die Tracer störfallartig über einen kurzen Zeitraum freisetzen (sog. Puffs). In Grenzschichtwindkanälen, die aufgrund ihrer Bauweise die Abluft erneut in den Einlauf einsaugen, muss bei allen Ausbreitungsexperimenten die Hintergrundkonzentration gemessen werden, so dass sie anschließend von der Messung subtrahiert werden kann. Es sind statistisch repräsentative Daten an einer ausreichenden Anzahl von Orten zu erfassen. Bei kontinuierlichen Quellen

müssen im Datensatz ausreichend lange Zeitserien vorliegen, während bei Puff-Messungen darauf geachtet werden muss, dass eine ausreichend große Ensemble-Anzahl für eine Validierung des Raum- und Zeitverhaltens der Schadstoffwolke benötigt wird. Ein singuläres Einzelereignis ist nicht aussagekräftig und daher für eine Validierung von LES-Modellen ungeeignet (Schatzmann et al., 1997). Des Weiteren ist ein zeitlich hochaufgelöstes Messen der Ausbreitung von Schadstoffwolken erforderlich. Die mittlere Konzentration an einem Ort über einen bestimmten Zeitraum ist für die Validierung eines Luftqualitätsmodells nicht ausreichend. Bei der Untersuchung von Schadstoffausbreitungen sind beispielsweise die maximale Konzentration an einem bestimmten Ort oder die Ankunfts- und Reisezeit der Wolke von Interesse (Chang & Hanna, 2004).

Korrelationsmessungen spielen bei der Validierung von LES-Modellen eine große Rolle. Neben *zeit- und raumkorrelierten Messungen* der Windkomponenten können folgende Korrelationen weitere Information für eine umfassende Validierung liefern:

- Druck – Strömungs - Korrelationen
- Strömungs – Konzentrations - Korrelationen

Die *räumliche Repräsentativität* der Strömungs- und Ausbreitungsmessungen ist für die Qualität der Validierungsdaten wichtig. Repschies (2006) untersuchte in einer idealisierten Stadtstruktur im Windkanal den erforderlichen Messpunktabstand, um ein bezüglich mittlerer Strömungsgrößen repräsentatives Windfeld in einer Straßenschlucht zu erhalten. Durch die höhere Variabilität im Strömungsmuster ist innerhalb der urbanen Rauigkeit eine höhere Dichte an Messpunkten notwendig als oberhalb der Rauigkeit. Es wird gezeigt, dass für die Hauptwindkomponente U das Messraster bei einer Gebäudehöhe h eine Weite von $0.08 h$ haben muss. Die Windkomponenten V und W weisen eine höhere räumliche Variabilität auf, so dass noch geringere Punktabstände benötigt werden.

Rix (2007) zeigt in ihrer Arbeit die hohe Variabilität der Strömung in einem detailgetreuen Modell einer Straßenschlucht von Oklahoma City. In Abbildung 4-6 ist die Geschwindigkeitsverteilung und der Mittelwert der V-Komponente zu sehen, die quer und längs der Straße im Windkanal gemessen wurde. Während sich längs der Straßenschlucht sowohl Verteilung und Mittelwerte ähneln, sind Unterschiede von bis zu 60 % in Strömungsrichtung quer zur Straße zu beobachten. Dies verdeutlicht die geringe Aussagekraft einer einzelnen Punktmessung in Straßenmitte. Für die Validierung eines numerischen Modells

muss eine deutlich höhere räumliche Repräsentativität der Daten gewährleistet sein, da die Unsicherheit bestimmt, mit welcher Genauigkeit ein Modell validiert werden kann.

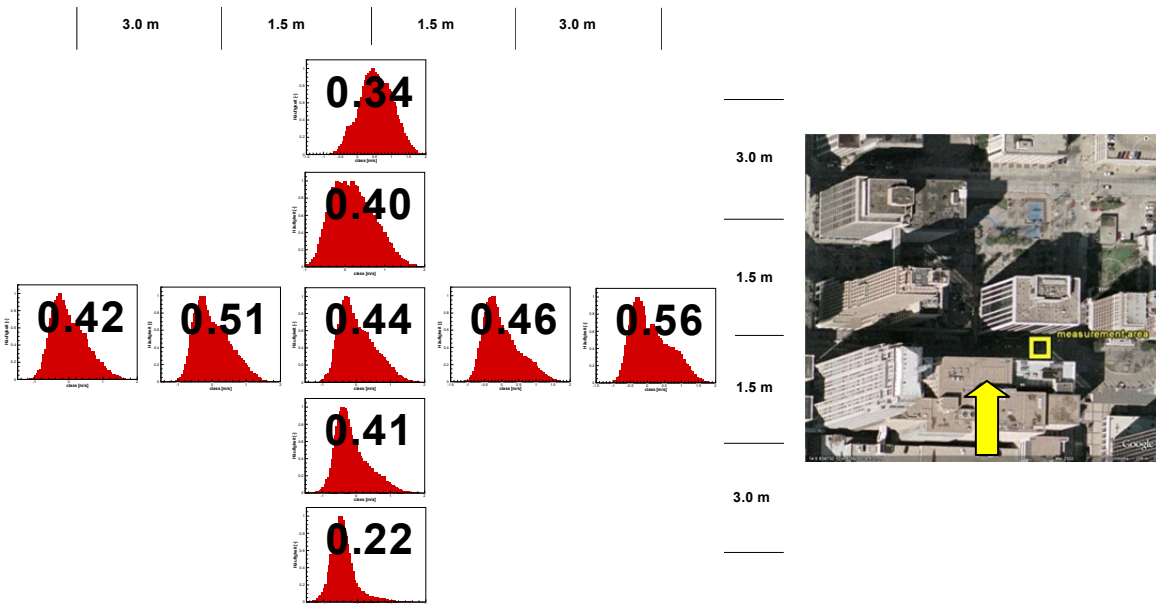


Abbildung 4-6: Geschwindigkeitsverteilung (rot) und Mittelwert der V-Komponente gemessen an neun verschiedenen Orten quer und längs einer Straßenschlucht (gelbes Quadrat rechts) von Oklahoma City, gemessen in 2 m Höhe im Naturmaßstab (Rix, 2007).

Ein weiteres Qualitätskriterium ist die *statistische Repräsentativität*, die eng mit der zeitlichen Repräsentativität zusammenhängt. Um den Anforderungen an LES-Validierungsdaten entsprechen zu können, muss garantiert werden, dass alle Langzeit-Schwankungen des Strömungsfeldes erfasst werden. Eigene Erfahrungen haben gezeigt, dass ein Konfidenzintervall des Mittelwertes sowohl für die Windkomponenten als auch für die turbulenten Flüsse von mehr als 98 % erreicht werden kann.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der benötigten Messdauer bietet die Ensemble-Analyse der Zeitserie. Hierzu wird die Zeitserie in verschiedene Zeitintervalle unterteilt und gemittelt, wodurch sich eine Streubreite der möglichen Mittelwerte ergibt. Trägt man diese gegeneinander auf, so lässt sich der Grafik entnehmen, ab welcher Messdauer die Streubreite der Mittelwerte der Zeitintervalle beispielsweise auf 5 % zurückgegangen ist.

Bei Untersuchungen zur Ausbreitung einer Gaswolke muss eine ausreichende Anzahl an Freisetzungen erfolgen, um das Raum- und Zeitverhalten der „Puffs“ repräsentativ zu er-

fassen. Die benötigte Anzahl an einzelnen Gaswolken ist von mehreren Faktoren abhängig, wie beispielsweise von der Entfernung des Messortes zur Quelle oder der Turbulenzintensität der Strömung. Für die sehr komplexen Strömungsverhältnisse von Oklahoma City untersuchte Harms (2010) die Variabilität von einzeln freigesetzten Gaswolken in einem detailgetreuen Modell im Grenzschichtwindkanal. Erst bei über 200 Freisetzungen ließen sich mittlere Reisezeiten mit Genauigkeiten von unter $\pm 3 \%$ bestimmen, wobei die Repräsentativität der einzelnen Puff-Parameter bei gleicher Ensemblegröße signifikante Unterschiede aufweist. Um für die Reisezeiten die gleiche statistische Repräsentativität der Mittelwerte zu erreichen, sind weniger Freisetzungen nötig als für die „dosage“ und „peak concentration“. Fischer (2007) zeigt in seiner Arbeit, dass sich die Variabilität in den Ensemble-Mittelwerten der Puff-Parameter in sehr guter Näherung umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Ensemblegröße n verhält. Damit wird eine Grundbeziehung der Statistik bestätigt.

Zur Qualitätssicherung müssen die Experimente Messungen beinhalten, durch die der *Vertrauensbereich der Ergebnisse* abgeschätzt werden kann. Sie sind ein wichtiger Bestandteil eines Validierungsdatensatzes. Anstelle einer Fehlerfortpflanzung der einzelnen Unsicherheitskomponenten bevorzugen Oberkampff & Trucano (2002) eine Methode, bei der verschiedene experimentelle Messungen für die gleiche Messgröße verglichen werden und anschließend die Wiederholbarkeit der Ergebnisse statistisch berechnet wird. Dieses Verfahren wird auch in der statistischen Modellanalyse angewendet. Der Messplan muss Messungen enthalten, die in unterschiedlicher Reihenfolge und an verschiedenen Tagen und zu verschiedenen Tageszeiten zu wiederholen sind. Möglicherweise ist ein Messfehler vom Betreiber des Windkanals abhängig, weshalb verschiedene Personen die Messungen wiederholen sollten. Falls bei der Berechnung der statistischen Unsicherheit der Ergebnisse große Fehler auftreten, muss die Versuchsdurchführung überprüft werden.

Eigene Erfahrungen zur Erstellung von Validierungsdaten haben gezeigt, dass für Strömungsmessungen mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von $U = 10 \text{ m/s}$ die mittlere Standardabweichung $\leq 2 \%$ erreicht werden kann. Bei 200 freigesetzten Schadstoffwolken unter gleichen Randbedingungen sind Reproduzierbarkeiten von bis zu $\pm 10 \%$ hinsichtlich der mittleren „dosage“ und $\pm 15 \%$ bezüglich der mittleren „peak concentration“ möglich (Harms, 2010). Durch die zunehmende Vermischung des Tracers mit der Umgebungsluft nimmt die Unsicherheit der mittleren Puff-Parameter bei gleicher Ensemblegröße jedoch

mit zunehmendem Quellabstand ab, so dass schon eine geringere Anzahl an Freisetzungen zu einer hohen Reproduzierbarkeit führt.

5 Erzeugung eines LES-Validierungsdatensatzes im Grenzschichtwindkanal

Das DFG-Schwerpunktprogramm „MetStröm“ befasst sich mit der Theorie und Methodik der skalenübergreifenden meteorologisch-strömungsmechanischen Modellierung. Begleitende experimentelle Untersuchungen ausgewählter Prozesse unterstützen hierbei die Validierung von wirbelauflösenden Strömungs- und Ausbreitungsmodellen. Im Windkanallabor der Universität Hamburg wurde eine Datenbank zur Validierung von wirbelauflösenden Strömungs- und Ausbreitungsmodellen gemäß des in Kapitel 4 aufgestellten Anforderungsprofils erzeugt. Die sogenannte Datenbank CEDVAL-LES ist über die Website der Arbeitsgruppe (<http://www.mi.uni-hamburg.de/windtunnel>) frei verfügbar. Fischer (2011) stellt in seiner Arbeit das Konzept der LES-Validierungsdatenbank im Detail vor.

Die Datenbank enthält fünf verschiedene Komplexitätsstufen, die sich von einfachen Strukturen an reale städtische Bebauungen annähern. In der Komplexität 0 wurden die Anströmbedingungen von drei Grenzschichten unterschiedlicher Rauigkeitsklassen dokumentiert. Die erste Komplexitätsstufe stellt Einzelhindernisse unter naturähnlichen Verhältnissen dar. Die Vermessung von Strömungsfeldern von im Raster angeordneten Einzelhindernissen bzw. Gebäuden bildet die Komplexitätsstufe 2. Die Gebäude wurden regelmäßig aufgestellt und haben unterschiedliche Dachformen (Mei, 2010). Der große Sprung in der Modellkomplexität von stark idealisierten städtischen Rauigkeiten zu realen Stadtmodellen wurde durch den Entwurf der sogenannten „Michel-Stadt“ geschlossen (siehe Kapitel 5.1). Die Komplexitätsstufe 3 bildet somit eine Hindernisstruktur, die schon typisch für mitteleuropäische Städte, aber dennoch stark idealisiert ist. Modelle von realen Städten stellen die Komplexitätsstufe 4 dar.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der entworfenen Komplexitätsstufe 3, die Michel-Stadt, vorgestellt. Hierbei wird ersichtlich, wie die erforderlichen Qualitätsanforderungen bei der Erzeugung eines LES-Validierungsdatensatzes im Grenzschichtwindkanal umgesetzt wurden.

5.1 Entwurf der „Michel-Stadt“

Die Komplexität der Michel-Stadt schließt die Lücke zwischen stark idealisierten städtischen Rauigkeiten wie Würfelfeldern und Modellen von realen Stadtbereichen. Um die Michel-Stadt in ihrer Komplexität einordnen zu können, werden zunächst reale und bereits untersuchte idealisierte Stadtstrukturen beschrieben. Daraufhin wird der Entwurf der Michel-Stadt im detailliert vorgestellt.

5.1.1 Städtische Rauigkeitsstrukturen

Eine erste Möglichkeit zur Charakterisierung von realen Stadtstrukturen bieten Satellitenbilder. Abbildung 5-1 zeigt Satellitenbilder (Google Earth) von vier verschiedenen deutschen Städten, die als Vorlage für den Grundriss der Michel-Stadt dienten und die die bevorzugte Bauweise von Häuserringen aufweisen. Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Komplexitätsstufen der Häuserringe, die von geschlossenen Ringen (z.B. Köln, Hannover) bis zu einzelnen Häusern, die in Ringen angeordnet sind (z.B. Würzburg), reichen. Die Innenstadt von München stellt eine bereits sehr komplexe städtische Rauigkeit dar, da es sich um eine Altstadt mit gebogenen Straßenzügen und verwinkelten Gassen handelt.

Weltweit beschäftigten sich verschiedene Autoren mit der Bebauungsstruktur von unterschiedlichsten Städten (Tabelle 5-1), um die Aerodynamik der Städte und ihre Effekte auf die Bevölkerung besser zu verstehen. Die Ergebnisse dienten als Orientierung beim Entwurf der Michel-Stadt. Stewart (2009) beschreibt verschiedene Klassen der Stadtstruktur als unterschiedliche städtische Klimazonen und charakterisiert sie an Hand von Parametern wie z.B. Rauigkeitshöhe, Albedo und anthropogenen Wärmefluss. Auch Oke (2006) entwickelte eine allgemein anerkannte Beschreibung der Stadtklimatologie mit Hilfe einer Klassifizierung von Stadtstrukturen, um die Verständigung zwischen den verschiedenen Fachrichtungen in diesem Bereich zu vereinheitlichen und zu erleichtern. Grimmond & Oke (1999) verglichen weltweit Städte mit unterschiedlichen Stadtstrukturen, um Methoden zur Abschätzung der aerodynamischen Charakteristiken von Städten zu entwickeln.

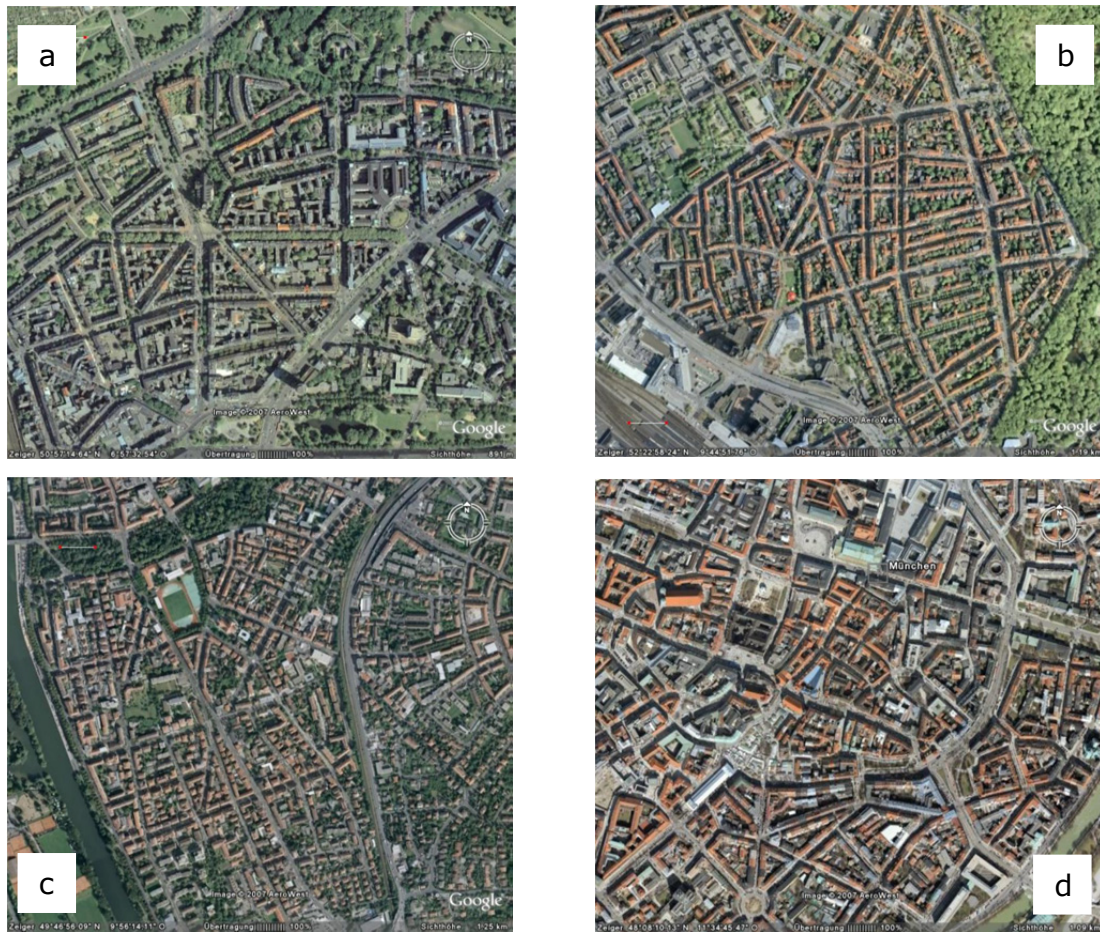


Abbildung 5-1: Satellitenbilder der deutschen Städte (a) Köln, (b) Hannover, (c) Würzburg und (d) München (Google Earth).

Theurer (1999) beschreibt typische Gebäudeanordnungen in städtischen Gebieten und ihre aerodynamischen Parameter. Er analysierte drei Städte mit 50.000, 160.000 und 300.000 Einwohnern im Südwesten Deutschlands. Im Mittel über die untersuchten Städte nehmen geschlossene Häuserblocks und Gewerbegebiete mit jeweils 20 % die größten Bereiche der Städte ein, gefolgt von Gebieten mit dichter urbaner Bebauung und mit Gebäudereihen von jeweils 15 %. Die Gebäude im Stadtkern haben eine durchschnittliche Höhe von 15 m in der Natur. Das Verhältnis der Gebäudehöhe H zur Straßenbreite S beträgt in süddeutschen Städten zwischen 0.5 und 0.7, in den Stadtzentren reichen die Gebäudehöhen etwa bis zum 1.5-fachen der Straßenbreite W . 90 % der Gebäudedächer sind in mitteleuropäischen Städten geneigt. Während bei Wohnhäusern vorwiegend Neigungen von 45° (sog. Neudeutsches Dach oder Winkeldach) bzw. 62° (sog. Altdeutsches Dach oder Gotisches Dach) zu

finden sind, weisen mehrgeschossige Häuser im Innenstadtbereich Neigungen von ca. 30° bzw. 38° auf.

Tabelle 5-1: Charakteristische Merkmale der Bebauungsstruktur von realen Städten, entnommen aus verschiedenen Studien.

	z0 [m]	H [m]	H/W [-]	H/S [-]	Klassifizierung
Grimmond & Oke (1999)	0.8 - 1.5	11 - 20	0.65 - 2.0		"high density"
Theurer (1999)		15 - 21		0.5 - 1.5	BEB / CC
Stewart (2009)		15 - 25	0.75 - 1.5		"compact midrise"

5.1.2 Idealisierte Stadtstrukturen

Da reale Stadtstrukturen sehr komplex sind, können Untersuchungen zum Einfluss bestimmter Randbedingungen teilweise nur schwer interpretiert werden. Zum besseren Verständnis der Strömung und Ausbreitung in Städten wird daher auf Vereinfachungen der Gebäudegeometrie zurückgegriffen. Eine Reihe von experimentellen Daten beschreibt die Umströmung von Einzelhindernissen. Einige Arbeiten wie beispielsweise Leitl et al. (1997), Meroney et al. (1999) und Gomes et al. (2005) untersuchten Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in der Umgebung von unterschiedlichen Gebäudeformen mit Hilfe von Messungen aus dem Grenzschichtwindkanal und verglichen sie mit Ergebnissen aus numerischen Modellen.

In den letzten Jahren wurden vermehrt Experimente durchgeführt, in denen die Stadtstruktur durch regelmäßig angeordnete Einzelhindernisse idealisiert wird, um das Verhalten des Strömungs- und Turbulenzfeldes in einer städtischen Rauigkeit charakterisieren zu können. Untersuchungen zur Auswirkung von veränderten Randbedingungen, wie unterschiedliche Packungsdichten und verschiedene Dachformen, wurden anhand vereinfachter städtischer Rauigkeitsstrukturen von verschiedenen Autoren durchgeführt.

Kastner-Klein et al. (2004) untersuchten den Einfluss der Straßenarchitektur auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in Straßenschluchten. Sie klassifizierten Modelle von städtischer Bebauung in sechs verschiedene Stufen, wobei reale städtische Rauigkeiten die letzte Stufe einnehmen.

- a) freistehende 2D-Straßenschluchten
- b) Reihen von 2D-Straßenschluchten
- c) Straßenschlucht als Aussparung
- d) variable Dachgeometrie bei 2D-Straßenschluchten
- e) uneinheitliche 3D-Geometrie
- f) reale städtische Oberflächen

Die ersten vier Stufen (a) – (d) stellen 2D-Straßenschluchten dar, die isoliert, in mehreren Reihen, als Aussparung bzw. mit unterschiedlicher Dachform versehen im Windkanal oder im numerischen Modell verwirklicht werden. Hier sind z.B. die Arbeiten von Rafailidis et al. (1997) und Kastner-Klein & Plate (1999) zu nennen. Für den Fall einer 2D-Straßenschlucht geht der größte Einfluss auf die Strömung von der Dachform der Gebäude aus. Die Gebäudedichte und Gebäudegeometrie spielen beim vertikalen Austausch zwischen der Strömung innerhalb der Straßenschlucht und der Überströmung der Rauigkeit eine Rolle. Da sich bei der Untersuchung von 2D-Straßenschluchten die Frage nach der Übertragbarkeit auf realistische Verhältnisse stellt, geht man in der nächsten Stufe (e) zu vereinfachten Gebäudekonfigurationen über, die eine variable 3D-Geometrie aufweisen und in Reihe bzw. versetzt angeordnet sind.

Auf diesem Gebiet wurden in den letzten Jahren viele Ergebnisse aus Untersuchungen im Windkanal veröffentlicht, wie z.B. von Cheng & Castro (2002), Cheng et al. (2007), Schultz (2008) und Bezpalcová et al. (2009). Aber auch Simulationen mit numerischen Modellen trugen zum Verständnis des Strömungs- und Ausbreitungsverhaltens in unterschiedlichen Gebäudekonfigurationen bei (z.B. Zhang et al., 2005 und Tseng et al., 2006). Hierbei werden meist Quader im regelmäßigen Raster angeordnet, wobei einerseits die Quader und andererseits die Anordnung in ihrer Komplexität verändert werden können. Um den Einfluss auf die Strömung in Stadtstrukturen zu verstehen und sich den Verhältnissen in realen Städten anzunähern, wurden systematische Untersuchungen zu verschiedenen Packungsdichten, Dachformen, Gebäudeformen oder Variationen in der Gebäudehöhe durchgeführt.

5.1.3 Geometrie der Michel-Stadt

Die Geometrie der Michel-Stadt ist zwischen den idealisierten urbanen Rauigkeiten und der Struktur von realen Städten einzuordnen. Das Modell der Michel-Stadt basiert auf vereinfachten Stadtstrukturen, die bezüglich der Hinderniskennzahlen typische mitteleuropäische Werte aufweisen. Der Grundriss der Michel-Stadt besteht aus geraden Straßenzügen, die beliebig zueinander angeordnet sind, um sich in der Komplexität realen Städten anzunähern. Die Michel-Stadt ist charakterisiert durch zwei verschiedene Straßenbreiten, verschiedene kleine Plätze und eine große Freifläche ohne Bebauung. Die Festlegung auf nur zwei Straßenbreiten und drei Gebäudehöhen erfolgte mit Blick auf eine möglichst einfache und zuverlässige Diskretisierung der Stadtgeometrie in Computermodellen.

Ausgehend von der Analyse von verschiedenen Satellitenbildern ist die grundlegende Struktur der Michel-Stadt der Gebäudering, der für Untersuchungen der Strömungsverhältnisse in der Komplexität systematisch variiert werden kann. Das Stadtgebiet der Michel-Stadt erstreckt sich im Naturmaßstab über 800 m x 1400 m.

Angelehnt an Literaturwerte von verschiedenen Autoren (Tabelle 5-2) werden folgende Maße bezüglich der Geometrie der Gebäude (Angaben im Naturmaßstab) umgesetzt:

- Straßenbreiten (S): 18 m, 24 m
- Gebäudehöhen (H): 15 m, 18 m, 24 m
- Gebäudebreite (W): 15 m
- Dachformen: Flachdach, Spitzdach mit 30° und 45° Neigung
- Freifläche: 10 % der Stadtfläche

Tabelle 5-2: Vergleich der charakteristischen Merkmale der Bebauungsstruktur aus verschiedenen Studien mit der Michel-Stadt.

	z0 [m]	H [m]	H/W [-]	H/S [-]	Klassifizierung
Grimmond & Oke (1999)	0.8 - 1.5	11 - 20	0.65 - 2.0		"high density"
Theurer (1999)		15 - 21		0.5 - 1.5	BEB / CC
Stewart (2009)		15 - 25	0.75 - 1.5		"compact midrise"
Michel-Stadt	1.53	15 - 24	1.0 - 1.6	0.6 - 1.3	

Im Fall der niedrigen Komplexität besitzen alle Gebäuderinge ein Flachdach. Der folgenden Abbildung 5-2 ist der Grundriss der Michel-Stadt und die Höhenverteilung der Gebäude zu entnehmen. Die Koordinaten sind im Naturmaßstab angegeben. Die Höhen der Gebäuderinge wurden beliebig über das Modellgebiet verteilt. Das Modell wurde in der Feinmechanischen Werkstatt der Universität Hamburg im Maßstab 1:225 angefertigt. Es wurde eine Genauigkeit bei den Gebäudemäßen von ± 1 mm erreicht. Dies entspricht im Naturmaßstab einer Unsicherheit von ± 0.225 m. Anschließend wurden die Gebäude mit Hilfe des Traversiersystems auf ihre exakten Positionen im Grenzschichtwindkanal der Universität Hamburg eingebaut. Abbildung 5-3 zeigt das Modell der Michel-Stadt im Windkanal. Stromauf des Stadtmodells ist die Modellierung der Anströmung sichtbar. Auf den Aufbau im Windkanal wird im nächsten Kapitel noch näher eingegangen.

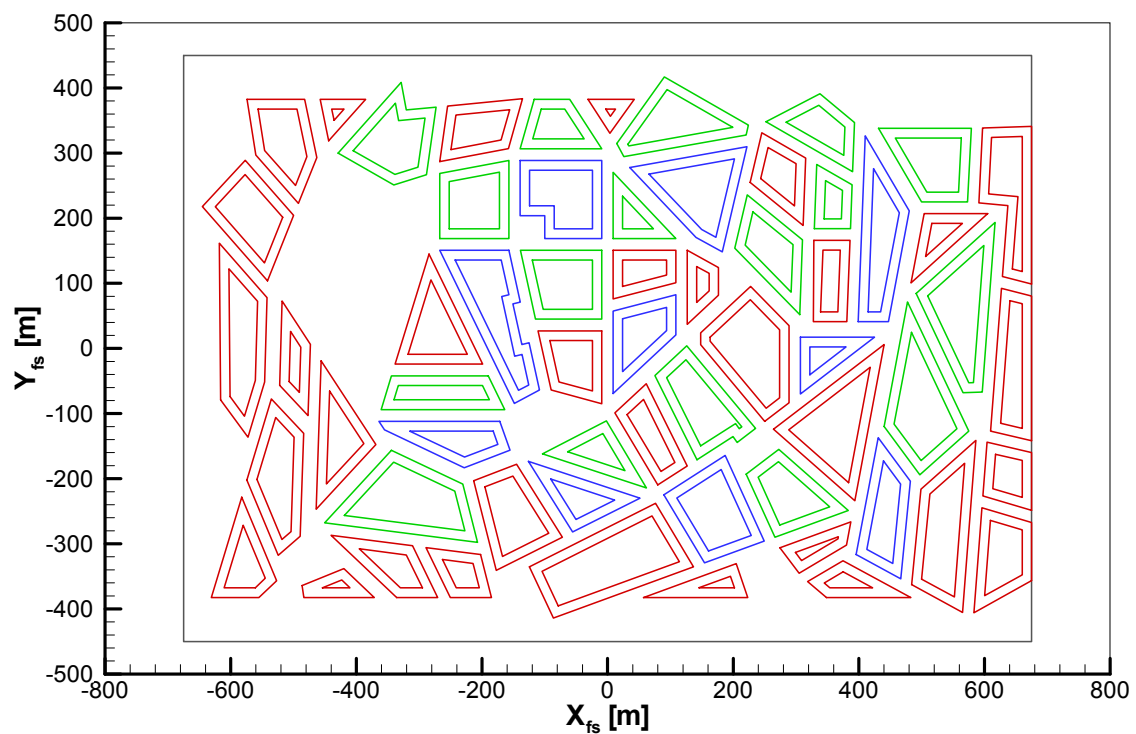


Abbildung 5-2: Entwurf der Michel-Stadt im Naturmaßstab, die Höhenverteilung der Michel-Stadt ist farblich dargestellt mit rot: 15 m, grün: 18 m und blau: 24 m.

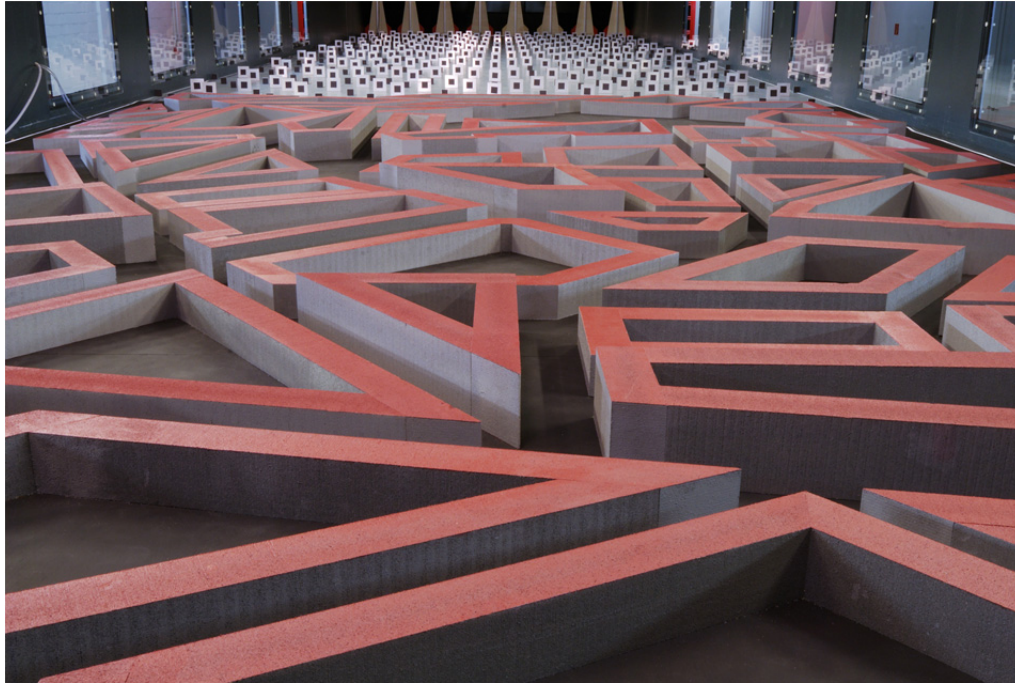


Abbildung 5-3: Modell der Michel-Stadt mit Flachdach (Konfiguration 1) im Windkanal der Universität Hamburg im Maßstab 1:225.

Bei der Modellierung von städtischen Gebieten ergeben sich für numerische Modellierer zwei Wege bei der Modellierung von verschiedenen Dachformen. Einerseits können Spitzdächer korrekt erfasst werden, wobei diese häufig aufgrund einer geringen Gitterauflösung in Stufen modelliert werden. Bei einer Gitterauflösung von beispielsweise 3 m würden drei bis vier große Stufen am Dach entstehen, die auf die Strömungsverhältnisse einen erheblichen Einfluss haben. Daher ist es besonders in kleinskaligen Modellen üblich, vorhandene Spitzdächer durch Flachdächer mit der halben Dachhöhe zu ersetzen. Um den Effekt dieser Vereinfachung untersuchen und einen möglichen Einfluss bei der Validierung von Modellergebnissen abschätzen zu können, werden bei der ersten Variation der Michel-Stadt die Flachdächer bei zwölf Gebäuderingen durch Spitzdächer mit 30° bzw. 45° ersetzt (Abbildung 5-4).

Die Grundhöhe der Gebäude wurde gemäß der Vorgehensweise bei der Diskretisierung von Stadtgeometrien in numerischen Modellen um die Hälfte der Spitzdachhöhe reduziert und dann mit einem Spitzdach versehen (Abbildung 5-5). Hierbei wurden die Gebäuderinge nur in Teilabschnitten mit einem Spitzdach versehen, wobei die Dachneigung eines Gebäuderinges konstant ist. In Abbildung 5-6 ist das modifizierte Modell der Michel-Stadt mit Spitzdächern im Windkanal der Universität Hamburg im Maßstab 1:225 zu sehen.

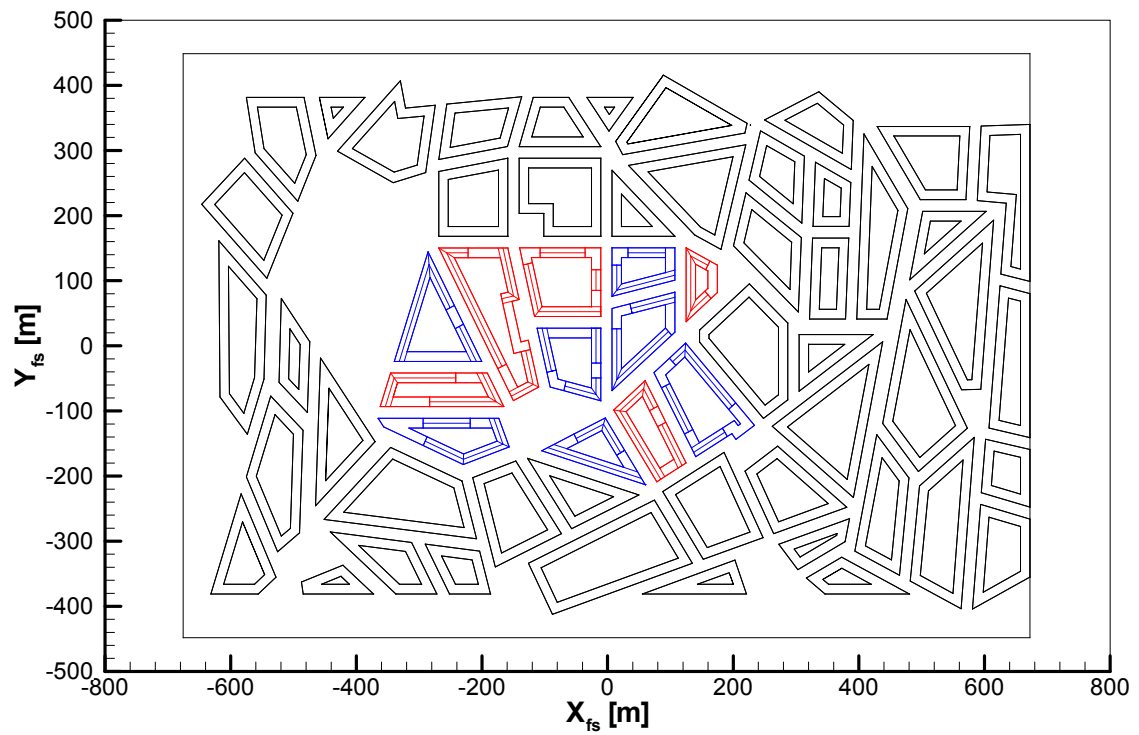


Abbildung 5-4: Entwurf der Michel-Stadt mit Spitzdächern im Naturmaßstab, die Dachneigung der Gebäuderinge ist farblich dargestellt mit rot: 30° und blau: 45°.

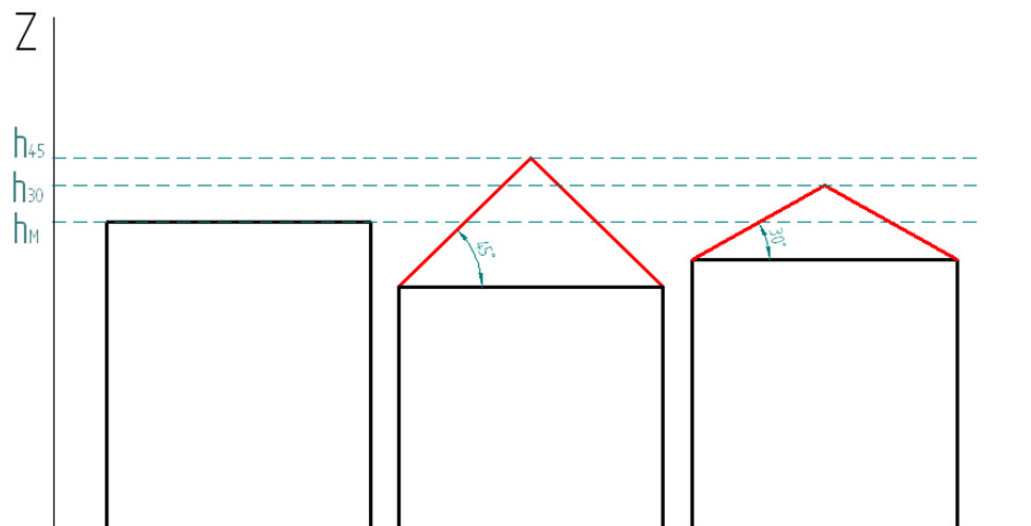


Abbildung 5-5: Höhenverhältnisse der Gebäuderinge mit Flachdach (h_M) und mit Spitzdach mit 30° (h_{30}) und 45° (h_{45}) Dachneigung.



Abbildung 5-6: Modell der Michel-Stadt mit Spitzdächern (Konfiguration 2) im Windkanal der Universität Hamburg im Maßstab 1:225.

5.2 Experimentelle Strategie und Versuchsdurchführung

Im folgenden Abschnitt wird die experimentelle Strategie vorgestellt, die gewählt wurde, um einen LES-Validierungsdatensatz zu erstellen. Hierbei wird die Versuchsdurchführung zu den Messungen in der Michel-Stadt erläutert.

5.2.1 Grenzschichtwindkanal

Die Größe des Windkanals legt den möglichen Maßstab des Modells fest. Das Meteorologische Institut der Universität Hamburg verfügt über drei Grenzschichtwindkanäle, die sich prinzipiell für die Erstellung von Validierungsdaten eignen. Im kleinen Grenzschichtwindkanal „Blasius“ mit einer Messstrecke von 8 m Länge, 1.5 m Breite und ca. 1 m Höhe können nur Modellmaßstäbe von 1:500 bis 1:1000 umgesetzt werden. Im großen Grenzschichtwindkanal „Wotan“ mit einer Messstrecke von 18 m Länge, 4 m Breite und ca. 3 m Höhe lassen sich städtische Grenzschichtströmungen auch in Maßstäben ab etwa 1:200 verwirklichen. Um eine möglichst hohe räumliche Auflösung gewährleisten zu können,

wurde das Modell der Michel-Stadt im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ (Abbildung 5-7) im Maßstab 1:225 umgesetzt.

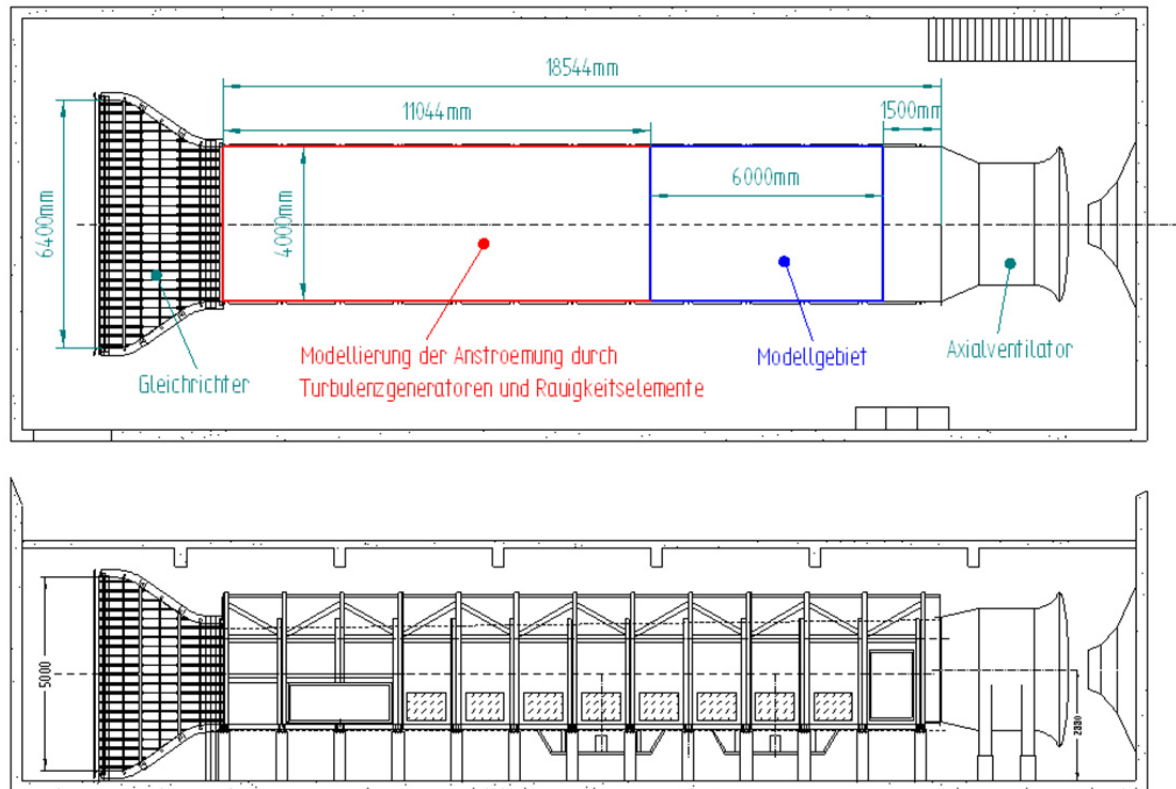


Abbildung 5-7: Technische Zeichnung des Grenzschichtwindkanals „Wotan“ des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg.

Nachdem die Strömung durch einen Gleichrichter homogenisiert wurde, generiert eine bestimmte Anordnung von Turbulenzgeneratoren (Anhang 1) und Rauigkeitselementen (Anhang 2), die sich auf dem Boden des Windkanals befinden, die städtische Anströmung für die Michel-Stadt. Das Modellgebiet der Michel-Stadt erstreckt sich stromabwärts über 6 m Länge. Der Kanal ist mit einer verstellbaren Decke ausgestattet, mit der sich die Höhe der Messstrecke zwischen 2.75 m und 3.25 m variieren lässt, um den Druckgradienten längs des Kanals zu minimieren. Durch insgesamt 22 Druckmessstellen, die auf beiden Seiten längs im Kanal angebracht sind, kann der Gradient des statischen Druckes entlang der Messstrecke überprüft werden. Die Modellversuche wurden typischerweise bei mittleren Windgeschwindigkeiten in der Anströmung von bis zu 15 m/s durchgeführt. Mit Hilfe

eines computergesteuerten 3D-Traversiersystems lassen sich die Messsonden räumlich mit einer Genauigkeit von 0.1 mm in der Messstrecke positionieren.

5.2.2 Umfang der Experimente

Die genaue Modellierung einer naturähnlichen Grenzschicht stellt den ersten Schritt dar, der mit großer Sorgfalt durchgeführt werden muss. Die Experimente wurden gemäß Kapitel 4.3.1 umgesetzt.

Die Experimente im Grenzschichtwindkanal müssen derart gewählt werden, dass sie einen möglichst hohen Nutzen bei der Validierung von numerischen Modellen haben. Es müssen nicht alle möglichen Experimente, wie z.B. Druck-, Strömungs-, Konzentrations- oder Korrelationsmessungen, in allen Komplexitäten durchgeführt werden. Eine einfache Geometrie ist geeignet, die Strömung bei systematischer Änderung der Randbedingungen, wie zum Beispiel der Windrichtung, zu untersuchen. Optional können hier Messungen der Druckverteilung auf Hindernisoberflächen analysiert werden. Die idealisierte Stadtstruktur der Michel-Stadt stellt für numerische Modellierer bereits eine anspruchsvolle Komplexität dar, so dass die Daten der Validierung des Strömungs- und Ausbreitungsverhaltens dienen sollen. Zudem kann der Einfluss der unterschiedlichen Dachform (Flach- bzw. Spitzdach) auf die Strömung innerhalb der Straßenschluchten und in der Überströmung der Michel-Stadt untersucht werden. Der Effekt von Änderungen der Randbedingungen zur Validierung steht hier im Hintergrund und kann aus Messungen niedriger Komplexität gewonnen werden.

Es wurden sowohl Strömungs- als auch Konzentrationsmessungen im Modellgebiet der Michel-Stadt durchgeführt. Für die Komplexität der Michel-Stadt mit Flachdach wurde ein Messraster mit einer hohen räumlichen Auflösung gewählt, so dass das räumliche Strömungs- und Ausbreitungsverhalten des numerischen Modells möglichst genau validiert werden kann. Für die Michel-Stadt mit Spitzdach wurde der Umfang der Experimente reduziert. Das Ziel ist es, den Effekt der veränderten Dachform im numerischen Modell an ausgewählten Messorten zu validieren. Die Festlegung des Messrasters wird in Kapitel 5.2.4 detailliert erläutert.

5.2.3 Eigenschaften der Emissionsquelle

Im Rahmen von Ausbreitungssimulationen kann sowohl das Ausbreitungsverhalten einer kontinuierlichen Freisetzung als auch einer instantanen, störfallartigen Emission (sog. Puff) eines Tracergases untersucht werden. In der Michel-Stadt wurde in dieser Kampagne eine kontinuierlich emittierende Punktquelle modelliert, die sich auf dem Flachdach eines Gebäuderingses mit einer Höhe von 15 m befindet (Abbildung 5-8). Die Quellposition blieb für beide Konfigurationen der Michel-Stadt (Flach- bzw. Spitzdach) unverändert. Die Koordinaten im Naturmaßstab sind

$$X_{fs} = -446.6 \text{ m}, Y_{fs} = -49.5 \text{ m} \text{ und } Z_{fs} = 15 \text{ m}.$$

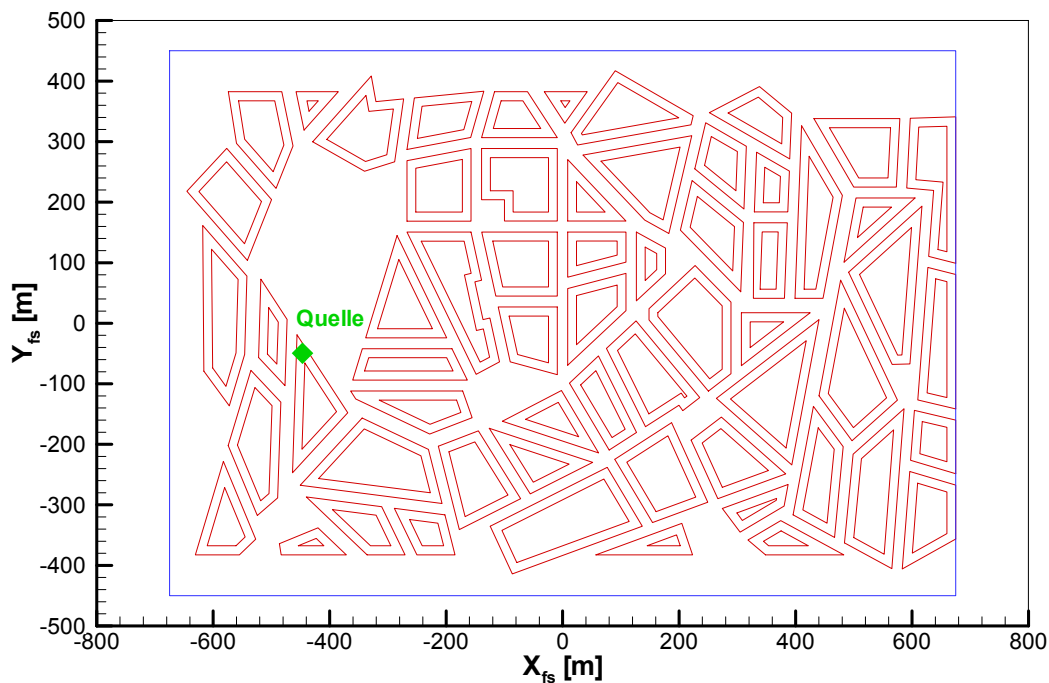


Abbildung 5-8: Lage der kontinuierlich emittierenden Punktquelle auf dem Flachdach eines Gebäuderingses mit einer Höhe von 15 m (Naturmaßstab) in der Michel-Stadt, Koordinaten im Naturmaßstab.

Die Emissionsquelle wurde so gestaltet, dass bei einem Massendurchfluss von 100 l/h und einem Quelldurchmesser von 7 mm die Austrittsgeschwindigkeit des Tracergases bei ungefähr 0.7 m/s liegt und damit wesentlich geringer als die vorherrschende Windgeschwindigkeit auf Dachniveau von ca. 3 m/s ist. Um eine Beeinflussung der Strömung durch einen durch die Einleitung verursachten Strahl zu verhindern, wurde die Quelle in einem Ab-

stand von 5 mm zur Austrittsöffnung zusätzlich mit einer Prallplatte (12 mm Durchmesser) versehen (Abbildung 5-9).



Abbildung 5-9: Einbau der Punktquelle auf dem Dach eines Gebäuderings in Michel-Stadt.

5.2.4 Messraster

Beim Erstellen des Versuchsplans muss ein Messraster festgelegt werden. Das großräumige Windfeld innerhalb und über der städtischen Bebauung kann durch ein vergleichsweise grobes Messraster charakterisiert und beurteilt werden. Das Messen von vertikalen Profilen, die über das ganze Modellgebiet verteilt sind, gibt beispielsweise Auskunft über die Entwicklung der Windprofile über der Stadt und deren Veränderung bei einer modifizierten Bebauungsstruktur. Um lokale Strömungs- und Transportphänomene hinreichend auflösen und validieren zu können, müssen lokale, räumlich hoch aufgelöste Messungen durchgeführt werden.

Zur Beurteilung der *großräumigen Um- und Überströmung* der urbanen Rauigkeit wurden 56 vertikale Windprofile, die in einem regelmäßigen Raster über das Stadtgebiet verteilt sind, gemessen. Vertikale Profile der Konzentration wurden an acht ausgewählten Positionen stromabwärts der Quelle durchgeführt (Abbildung 5-10). Der Koordinatenursprung befand sich für alle Messungen in der Mitte des Modellgebietes.

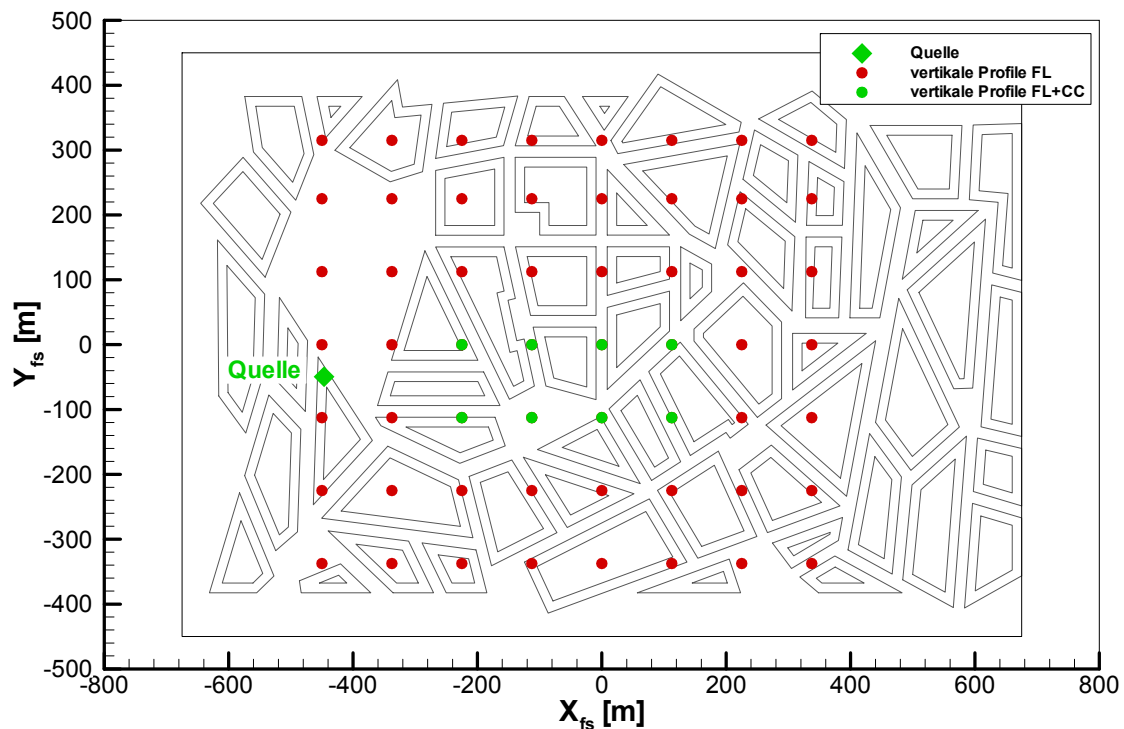


Abbildung 5-10: Verteilung der vertikalen Profile in der Michel-Stadt für Strömungs-(FL) und Konzentrations-(CC) Messungen für das großräumige Windfeld, Koordinaten im Naturmaßstab.

Die Messpunkte wurden vertikal logarithmisch verteilt, wobei die niedrigste Höhe bei 2 m in der Natur lag, falls sich kein Gebäuderhing an der Messposition befand. Der höchste Messpunkt lag in 110 m Höhe und wurde nach maximal 18 Messpunkten erreicht.

Nicht nur das Strömungs- und Ausbreitungsverhalten in einer einzelnen Straßenschlucht ist für einen Validierungsdatensatz von Interesse, sondern auch die Kreuzungsbereiche und Straßenzüge mit unterschiedlicher Ausrichtung zur Windrichtung. In der Michel-Stadt wurden daher Messungen mit hoher räumlicher Auflösung durchgeführt. Das *Intensivmessfeld* war in der Mitte des Modells angeordnet und umfasste einen Bereich von 340 m x 340 m. Unmittelbar über Dachniveau wurden die Strömungs- und Ausbreitungsvorgänge durch zwei horizontale Ebenen in 27.5 m und 30.2 m Höhe mit jeweils 225 Messpunkten vermessen (Abbildung 5-11). So können Veränderungen in der Wechselwirkung der Strömung oberhalb und innerhalb der Rauigkeit bei einer modifizierten Bebauungsstruktur untersucht werden. Die Messpunkte wiesen hierbei ein regelmäßiges Raster mit einem Abstand sowohl in x- als auch y-Richtung von 22.5 m (Naturmaßstab) auf.

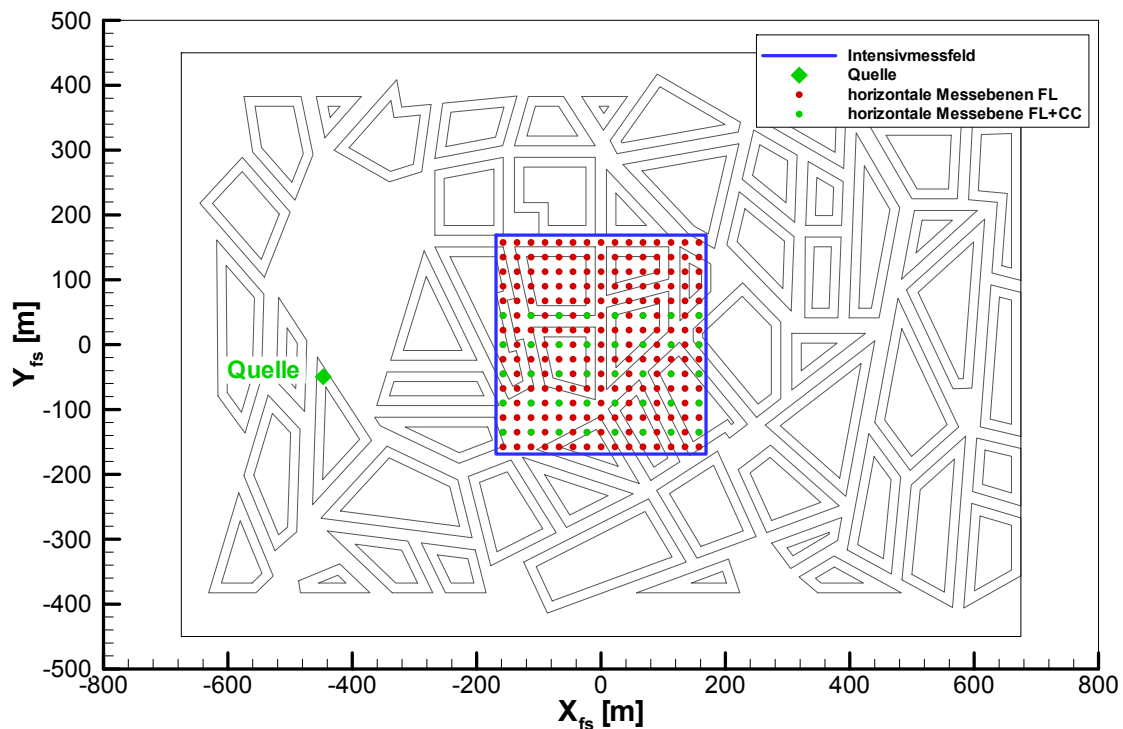


Abbildung 5-11: Verteilung der Messpunkte in der Michel-Stadt für Strömungs-(FL) und Konzentrations-(CC) Messungen im Intensivmessfeld über Dachniveau, Koordinaten im Naturmaßstab.

Innerhalb der Straßenschluchten und Gebäuderinge wurden Strömungsmessungen in den Höhen 2 m, 9 m (halbe Gebäudehöhe) und 18.2 m (mittleres Dachniveau) für die Konfiguration der Michel-Stadt mit Flachdach durchgeführt (Abbildung 5-12). Strömungsmessungen in der teilweise mit Spitzdächern versehenen Michel-Stadt und alle Konzentrationsmessungen liegen für die horizontale Messebene in 2 m Höhe vor. Für letztere wurden Messpositionen um einen Gebäudering stromabwärts der Quelle ausgewählt. Bei der Verteilung der Messpunkte wurde darauf geachtet, dass Strömungsphänomene innerhalb der städtischen Bebauung ausreichend erfasst werden (gemäß dem Anforderungsprofil, Kapitel 4.3.2). In Bereichen mit zu erwartenden starken Gradienten im Windfeld wie zum Beispiel in der Nähe von Kreuzungen, wurde daher eine höhere Messrasterdichte als innerhalb eines Straßenzuges und im Gebäudering umgesetzt. Quer zur Ausrichtung der Straßenschlucht wurden drei Messpunkte vorgesehen.

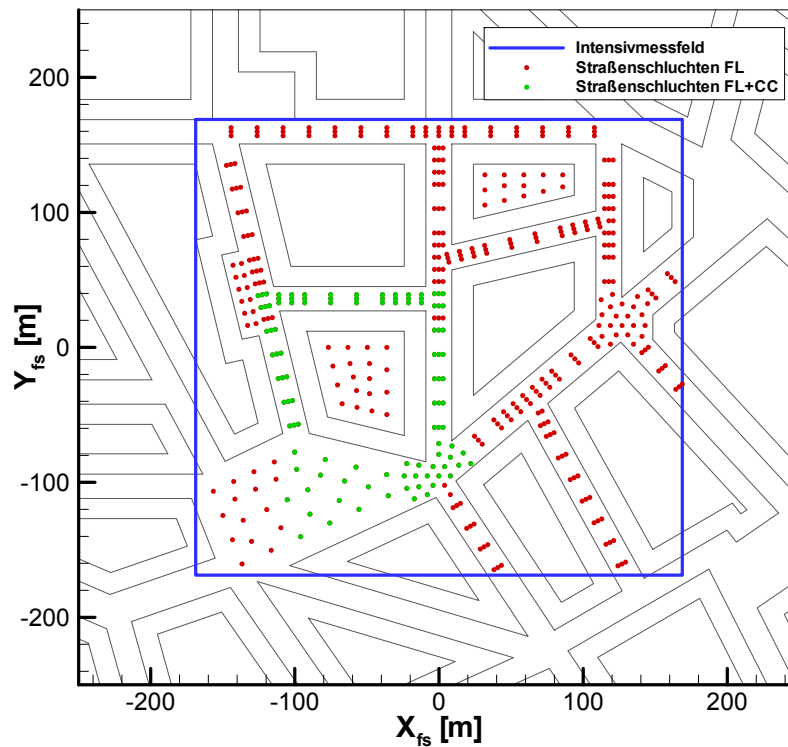


Abbildung 5-12: Verteilung der Messpunkte in der Michel-Stadt für Strömungs- (FL) und Konzentrations- (CC) Messungen im Intensivmessfeld innerhalb der Straßenschluchten, Koordinaten im Naturmaßstab.

5.2.5 Messverfahren

Nach der Festlegung der Messorte sind geeignete Messverfahren auszuwählen und die erreichbare Datenqualität ist zu bewerten. Zur Analyse von Ausbreitungsmessungen muss das Strömungsfeld bekannt sein, so dass mit Messungen der Windgeschwindigkeit im Modellgebiet zu beginnen ist.

Die *Laser-Doppler-Anemometrie* (LDA) ist ein optisches Messverfahren, das zur Bestimmung der Geschwindigkeitskomponenten von Fluidströmungen angewendet werden kann. Das grundlegende Funktionsprinzip des LDA basiert auf der Auswertung von Lichtreflexionen an mit der Fluidströmung schlupffrei mitbewegten Partikeln wie beispielsweise Theaternebel. Diese werden im Einlaufbereich des Windkanals zugegeben. So können zeitlich hochaufgelöste Messungen der Windkomponenten an einem Ort mit dem 2D- bzw. 3D-Laser-Doppler-Anemometer aufgenommen werden. Leitl & Schatzmann (2010) machten beim Messen mit einem 2D-LDA auf ein Problem aufmerksam, das beim zweimaligen

Messen der U-Komponente des Windes bei einer UV-Messung und bei einer UW-Messung auftreten kann. Obwohl an exakt dem gleichen Ort gemessen wurde, können die endliche Größe und die Orientierung des Messvolumens in der Strömung signifikante Unterschiede in den Werten der U-Komponente hervorrufen. Besonders in Regionen mit starken Geschwindigkeitsgradienten (wie z.B. auf Dachniveau) kann daher eine höhere Unsicherheit in den gemessenen Daten auftreten. Um die gewünschten Messorte innerhalb von Straßenschluchten erreichen zu können, ist bei UW-Messungen in urbaner Bebauung zudem ein Neigen der Sonde erforderlich. Dies führt zusätzlich zu einer Messungenauigkeit in der W-Komponente.

Im Windkanallabor der Universität Hamburg stehen LDA-Messsysteme mit diversen faseroptischen Sonden zur Verfügung, deren Brennweiten in Abhängigkeit von der Messanordnung von 50 mm bis 800 mm reichen. Die Größe des Messvolumens ist abhängig von der Brennweite der Sonde (je größer die Brennweite, desto größer das Messvolumen). In Abbildung 5-13 ist die im Projekt verwendete LDA-Sonde der Firma „Dantec“ zu sehen.

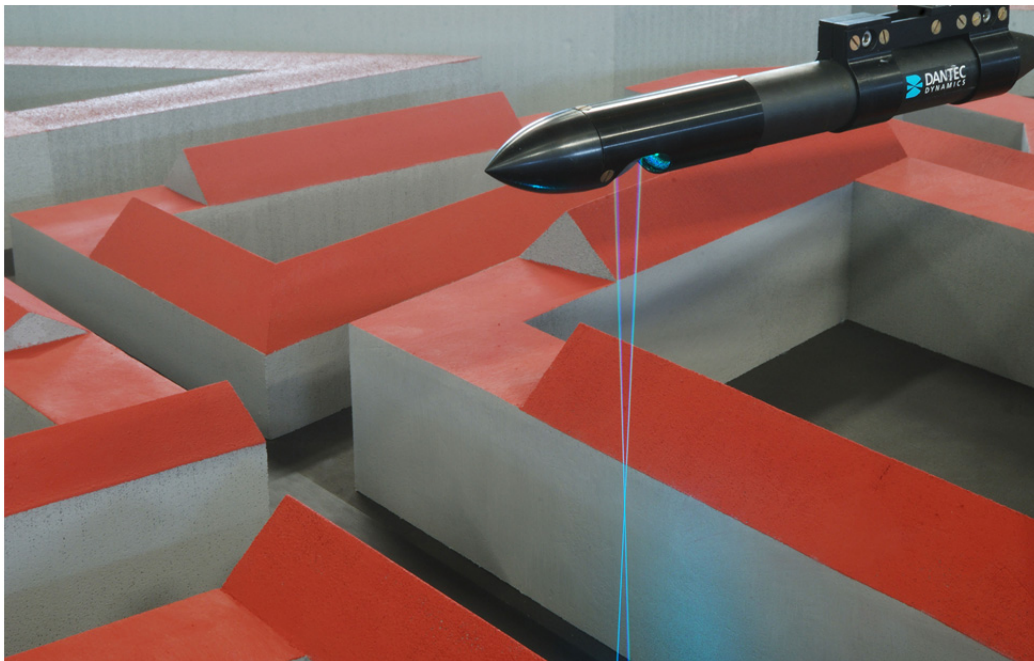


Abbildung 5-13: LDA-Sonde der Firma „Dantec“ mit einer Brennweite von 160 mm, versehen mit einem Umlenkspiegel, Einbau zur Messung der U- und V-Komponente der Strömung.

Bei den Messungen innerhalb der urbanen Rauigkeitsstruktur der Michel-Stadt wurden nur UV-Messungen durchgeführt. Die verwendete Sonde hatte eine Brennweite von 160 mm

und ein Messvolumen von $dx = 0.078$ mm, $dy = 0.078$ mm und $dz = 1.658$ mm. Umgerechnet auf die Verhältnisse in der Natur entspricht das einem Messvolumen von $dx = 1.8$ cm, $dy = 1.8$ cm und $dz = 37.3$ cm. Sie befand sich in genügend großem Abstand zum Dachniveau, um die Strömung innerhalb der Straßenschlucht nicht zu beeinflussen. Während der Messkampagne wurde eine mittlere Datenrate von ca. 600 Hz erreicht, so dass das Windfeld zeitlich hoch aufgelöst vermessen werden konnte.

Neben dem LDA steht dem Windkanallabor der Universität Hamburg das optische Messverfahren der *Particle-Image-Velocimetry* (PIV) zur Verfügung. Es wird eingesetzt, um die Windkomponenten zeitgleich mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung zu erfassen. Hierbei wird eine Laserebene aufgespannt, in der zugegebene Partikel fotografiert, und anschließend durch die Analyse der Bilderfolge Strömungsregime aufgezeigt werden. Die zeitliche Auflösung des PIV-Systems des Windkanallabors der Universität Hamburg ist im Vergleich zum LDA niedriger und liegt nur bei maximal 15 Hz. In der folgenden Tabelle 5-3 ist die zeitliche Auflösung im Windkanal- bzw. Naturmaßstab von PIV und LDA gegenübergestellt. Bei Zeitmaßstäben von 1:200 bis 1:500 wird bei LDA-Messungen im Naturmaßstab noch eine zeitliche Auflösung von 1 bis 3 Hz erreicht. Messungen mit dem PIV können dagegen nur alle 15 bis 30 s einen Wert erfassen. Die Qualität der PIV-Daten ist nicht ausreichend zur Analyse aller Strömungseigenschaften und kann daher nicht für die Validierung von komplexen, zeitlich instationären Strömungen verwendet werden. PIV wurde daher nicht in dieser Messkampagne der Michel-Stadt eingesetzt.

Tabelle 5-3: Zeitliche Auflösung von PIV und LDA im Windkanal- bzw. Naturmaßstab für zwei verschiedene Maßstäbe.

		PIV [Hz]	LDA [Hz]
1:225	WT-Maßstab	15	600
	Naturmaßstab	0.07	2.67
1:500	WT-Maßstab	15	600
	Naturmaßstab	0.03	1.20

Messungen mit dem PIV-System können dennoch dazu beitragen, die Anströmbedingungen oder die Umströmung von Einzelhindernissen für eine Validierung zu charakterisieren (Adrian et al., 2000). Mit Hilfe dieser Daten ermitteln beispielsweise Perret et al. (2006) Statistiken, um möglichst genaue turbulente Anströmbedingungen für LES-Modelle zu generieren. Durch das räumlich hoch aufgelöste Messen können kohärente Strukturen un-

tersucht werden, die ebenfalls zur Validierung von numerischen Modellen zur Verfügung gestellt werden können. Die Qualität der PIV-Messdaten sollte allerdings durch Messungen mit dem LDA ergänzt werden, um die Genauigkeit der Ergebnisse abschätzen zu können.

Für Konzentrationsmessungen werden *Flammenionisationsdetektoren* (FID) verwendet. Das Windkanallabor der Universität Hamburg verfügt über zwei verschiedene Ausführungen von FID-Systemen. Das Fast-FID (Cambustion Ltd., HFR 400) besitzt eine kompakte und mobile Brennkammer, die sich direkt über einer dünnen Kapillare befindet. So wird eine hohe zeitliche Auflösung gewährt. Die Brennkammer des Standard-FIDs (Rosemount Analytical, Model 400A) dagegen befindet sich außerhalb des Windkanals und wird zur Messung von mittleren Konzentrationen eingesetzt. Die zeitliche Auflösung der Konzentrationsmessungen liegt in diesem Fall bei ca. 1 Hz. Während der Messkampagne von Michel-Stadt wurde zur Messung der Hintergrundkonzentration ein Standard-FID verwendet. Zur Messung der Konzentration im Modellgebiet der Michel-Stadt wurde ein Fast-FID mit einer Kapillare von 295 mm Länge und einem Innendurchmesser von 0.75 mm eingesetzt (Abbildung 5-14).

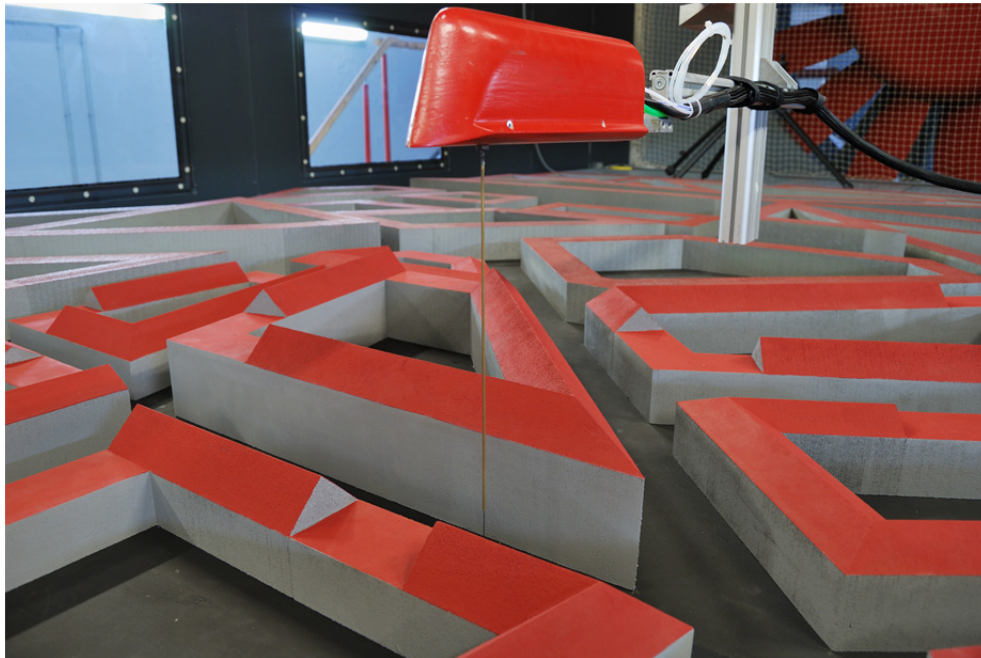


Abbildung 5-14: Fast-FID zur Messung der Konzentration im Modellgebiet der Michel-Stadt.

Instationäre Ausbreitungsprozesse in urbaner Bebauung lassen sich somit in hoher zeitlicher Auflösung messen und untersuchen. Als Messgas wurde Äthan (C_2H_6) verwendet. Es weist eine ähnliche Dichte wie die Umgebungsluft auf, so dass Dichteunterschiede nahezu vermieden werden können.

Zur Ermittlung der *Referenzwindgeschwindigkeit* für die Skalierung der Messergebnisse (gemäß Kapitel 4.3) wird ein Prandtl-Rohr verwendet. Es befindet sich während der gesamten Messkampagne im Eingangsbereich des Windkanals in einer Höhe von 1735 mm in der Kanalmitte, so dass die gemessene Windgeschwindigkeit nicht von den Turbulenzgeneratoren und Rauigkeitselementen beeinflusst wird. Ist die Strömung Reynoldszahlunabhängig, steht die gemessene Windgeschwindigkeit am Prandtl-Rohr in einem festen Verhältnis zur Windgeschwindigkeit in der Anströmung des Modells von Michel-Stadt.

Das Windkanallabor verfügt über unabhängige *Referenzmessinstrumente* und Referenznormale, mit denen die verwendeten Messinstrumente gegebenenfalls mehrmals täglich kalibriert werden. Zur regelmäßigen Kalibrierung des Differenzdruckwandlers (MKS-Baratron Typ 170M-26B) wurde eine Feindruck-Prüfwaage (Fa. Junkalor Dessau) verwendet. Die FIDs wurden mit Hilfe von vier zertifizierten Prüfgasen unterschiedlicher Konzentration mehrmals täglich kalibriert. So kann die Genauigkeit der gemessenen Daten im Windkanal erhöht werden (gemäß Kapitel 4).

5.3 Qualität der Daten

Eine hohe Qualität der gemessenen Daten innerhalb von kompakter urbaner Rauigkeit zu erhalten, erweist sich bei Windkanalexperimenten häufig als schwierig. In den nachfolgenden Abschnitten wird die Qualität der Strömungs- und Konzentrationsmessungen in Michel-Stadt aufgezeigt. Die Messgenauigkeit wird ausführlich analysiert und dokumentiert. Alle Messungen wurden mit einer Referenzgeschwindigkeit, die in 100 m Höhe (im Naturmaßstab) in der Anströmung gemessen wurde, und einer Referenzlänge von 1 m (im Naturmaßstab) skaliert.

5.3.1 Strömungsmessungen

Bei Strömungsmessungen spielt die *zeitliche Auflösung bzw. Abtastrate* eine große Rolle. Üblicherweise werden die Partikel im Eingangsbereich des Windkanals freigesetzt, so dass über den gesamten Querschnitt der Messstrecke eine gleichmäßige Verteilung gewährleistet wird. Innerhalb von Straßenschluchten sind, bedingt durch die Bebauung, eine geringere Partikelmenge und daher niedrigere Datenraten zu erwarten als über Dachniveau. Wird die Windgeschwindigkeit an einem Ort mit der Datenrate in Beziehung gesetzt, kann man Aussagen zur erreichten räumlichen Auflösung der gemessenen Wirbelstrukturen treffen. Mit einer hohen Datenrate bei hohen Windgeschwindigkeiten können die gleichen Wirbelgrößen aufgelöst werden, wie mit einer niedrigen Datenrate bei geringen Windgeschwindigkeiten. Werden bei 5 m/s im Windkanal in der freien Überströmung der Bebauung Datenraten von 500 Hz erreicht, werden Wirbel mit einer Größe von 0.01 m aufgelöst. In einer Straßenschlucht mit einer Windgeschwindigkeit von ungefähr 1 m/s ist daher eine Datenrate von 100 Hz ausreichend, so dass hier die gleichen Wirbelstrukturen aufgelöst werden können. Die Messungen innerhalb der Straßenschluchten in Michel-Stadt wurden immer mit einer Datenrate von über 100 Hz durchgeführt, so dass eine ähnliche Abtastrate wie über der urbanen Rauigkeit garantiert wird.

Um eine ähnliche *statistische Repräsentativität* bei allen Messungen zu erhalten, müsste man zeitlich dimensionslos messen: $t^* = \text{const.}$ Dies bedeutet gemäß Gleichung 4.2, dass längere Messzeiten an Orten mit niedrigen Windgeschwindigkeiten benötigt werden. Durch Ensemble-Analysen der Windgeschwindigkeit oberhalb der urbanen Rauigkeitsstruktur wurde eine Messzeit von 210 Sekunden im Windkanalmaßstab ermittelt, so dass eine hohe statistische Repräsentativität der Ergebnisse gewährleistet werden kann. Dies entspricht einem $t^* = 1000$. Nach obigem Beispiel müsste in der Straßenschlucht fünfmal länger gemessen werden als oberhalb der urbanen Rauigkeit, um die gleiche dimensionslose Zeit zu erreichen. Ensemble-Analysen der Windgeschwindigkeit innerhalb der Straßenschluchten in Bodennähe der Michel-Stadt haben allerdings gezeigt, dass für eine statistische Repräsentativität Messzeiten von 270 Sekunden ausreichend sind (Abbildung 5-15). Dies lässt sich durch die zeitliche Charakteristik der turbulenten Schwankungen innerhalb der Straßenschluchten erklären. Mit den gewählten Messzeiten wird somit eine für einen Datenvergleich ausreichende Datengenauigkeit realisiert.

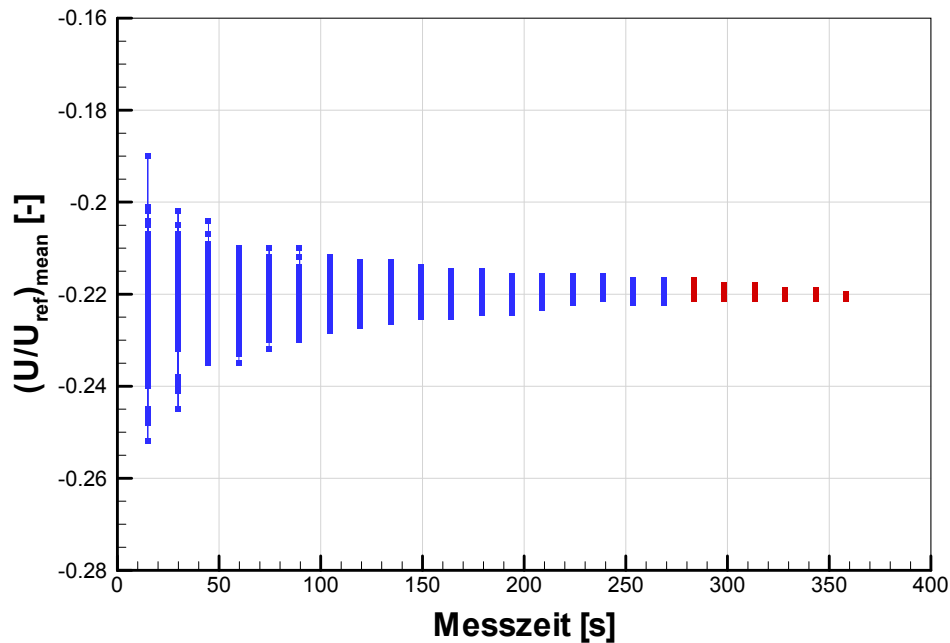


Abbildung 5-15: Ensemble-Analyse einer Geschwindigkeits-Zeitserie zur Bestimmung der benötigten Messdauer (im Modellmaßstab), blau: Streubreite der Messwerte $> 5\%$ und rot: Streubreite $< 5\%$.

Sowohl in der Anströmung als auch im Modellgebiet wurde ein Test zur *Reynoldszahl-Unabhängigkeit* durchgeführt. In Abbildung 5-16 sind die Ergebnisse zweier Messorte innerhalb der Bebauung von Michel-Stadt dargestellt, die jeweils in 2 m Höhe innerhalb eines Gebäuderings und einer Straßenschlucht liegen. Als Referenz wurde die vom Prandtl-Rohr gemessene Windgeschwindigkeit $U_{Prandtl}$ im Eingangsbereich des Windkanals angegeben. Bleibt das Verhältnis zwischen $U_{Prandtl}$ und der hiermit skalierten Geschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} am Messort konstant, ist die Strömung Reynoldszahl unabhängig. Dies trifft für die Strömung in der Bebauung von Michel-Stadt ab einer Windgeschwindigkeit von 5 m/s zu, wobei leichte Unsicherheiten am Messort in der Straßenschlucht ab 11 m/s zu vermerken sind. Daher wurden alle Messungen bei Windgeschwindigkeiten von ungefähr 9 m/s für $U_{Prandtl}$ durchgeführt.

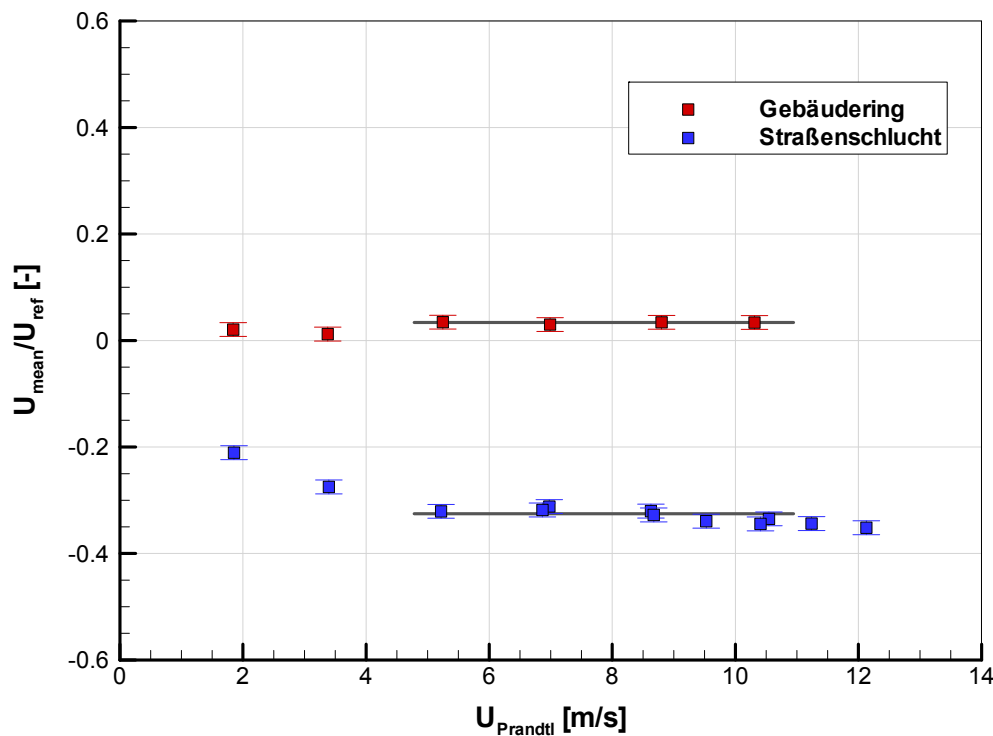


Abbildung 5-16: Test der Reynoldszahl-Unabhängigkeit, Windgeschwindigkeit am Prandtl-Rohr im Verhältnis zur skalierten Windgeschwindigkeit gemessen an zwei verschiedenen Messorten in 2 m Höhe in Michel-Stadt mit Flachdach.

Während der Messkampagnen wurde die Reproduzierbarkeit der Daten durch *Wiederholungsmessungen* ermittelt. Die Wiederholungsmessungen wurden in verschiedenen Höhen sowohl in der Anströmung als auch innerhalb der Straßenschluchten für beide Dachkonfigurationen durchgeführt. Hierbei wurde an unterschiedlichen Tagen und Tageszeiten gemessen. In der Anströmung beträgt die Standardabweichung von $U_{\text{mean}}/U_{\text{ref}}$ im Mittel über alle Höhen 1.3 %. Innerhalb der städtischen Rauigkeit wurde eine Straßenschlucht im Zentrum des Messgebietes als Messort gewählt, die quer zur Windrichtung orientiert ist und komplexe Strömungsbedingungen aufweist. In Abbildung 5-17 sind der Messort und die Ergebnisse zur Wiederholbarkeit der Messungen für die Michel-Stadt mit Flachdach und in Abbildung 5-18 für die Spitzdachkonfiguration graphisch dargestellt.

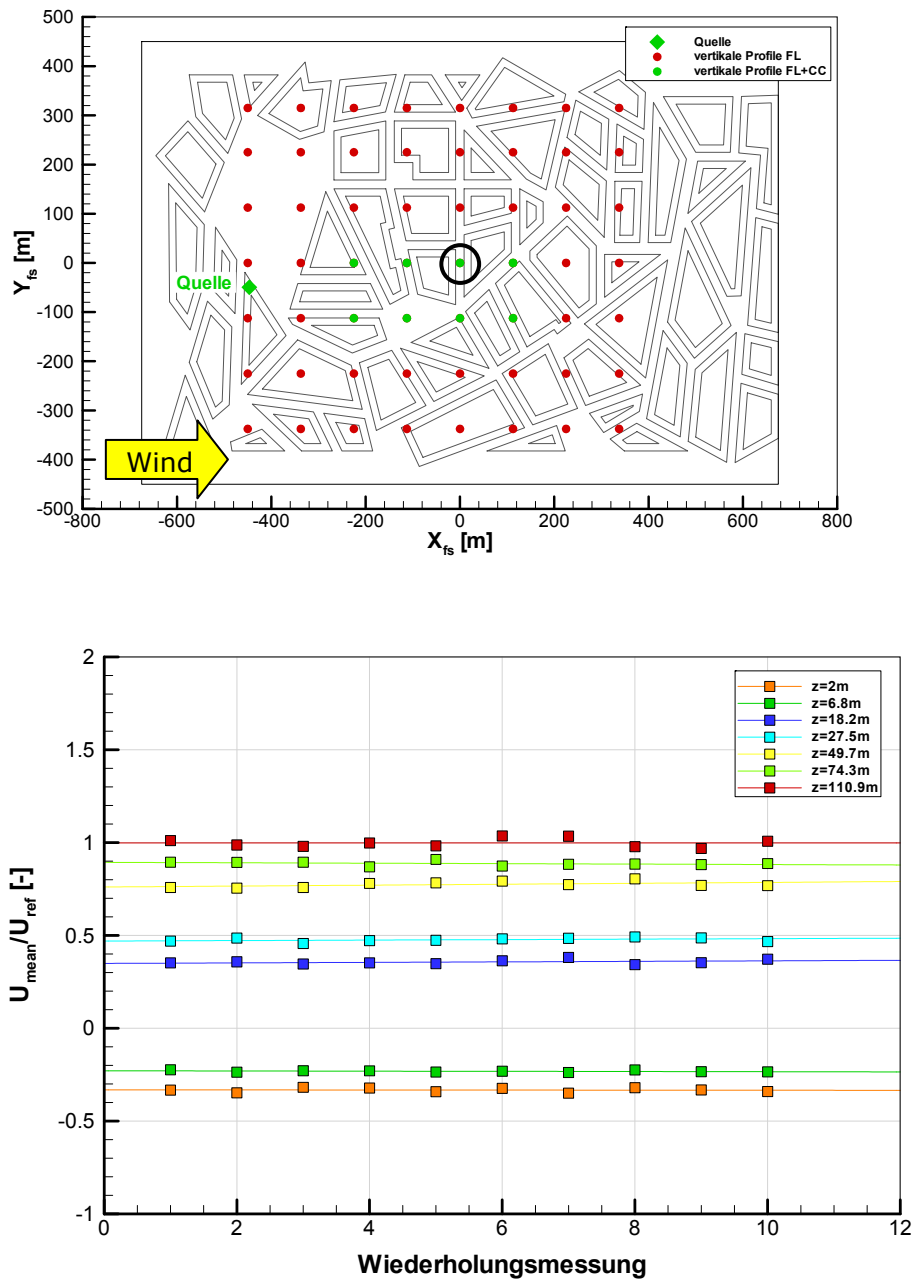


Abbildung 5-17: Messort (schwarzer Ring, oben) und Messergebnisse (unten) zur Ermittlung der Wiederholbarkeit in Michel-Stadt mit Flachdach in sieben verschiedenen Höhen.

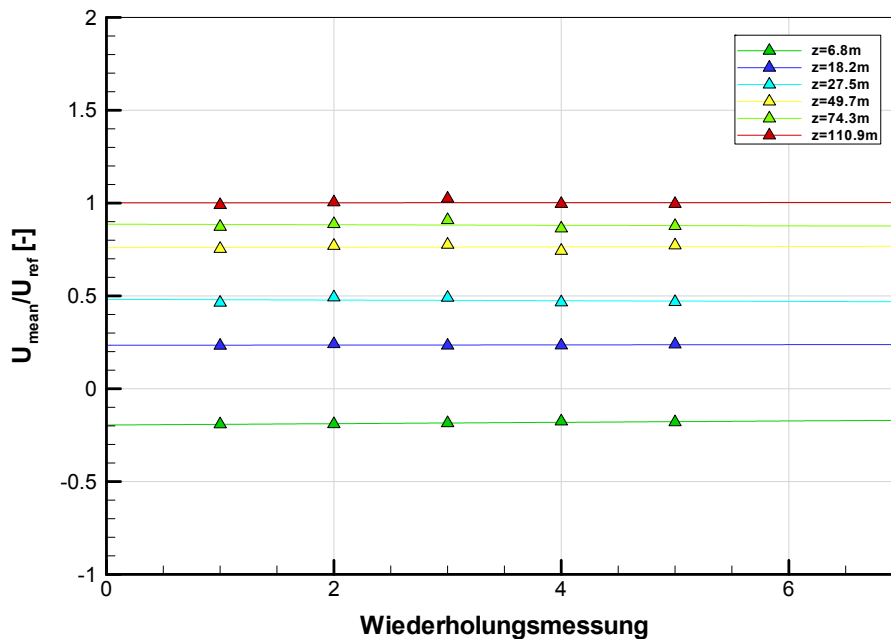


Abbildung 5-18: Messergebnisse zur Ermittlung der Wiederholbarkeit in Michel-Stadt mit Spitzdach in sechs verschiedenen Höhen (Messort siehe Abbildung 5-17, oben).

In Tabelle 5-4 ist die ermittelte Standardabweichung von $U_{\text{mean}}/U_{\text{ref}}$ in verschiedenen Höhen für die Michel-Stadt mit Flach- bzw. Spitzdach aufgelistet. In der Michel-Stadt mit Spitzdach konnten weniger Wiederholungsmessungen durchgeführt werden. Im Mittel konnte eine Standardabweichung von 2.3 % für die Windgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung erreicht werden. Der Tabelle ist zu entnehmen, dass bei den Messungen in Bodennähe und auf Dachniveau, bedingt durch die hohe Turbulenz, die größten Unsicherheiten auftreten. Der gewählte Messort weist typische Strömungsbedingungen innerhalb städtischer Bebauung auf. Daher wird die ermittelte Unsicherheit in den Messwerten auf alle Messungen in der Michel-Stadt übertragen.

Tabelle 5-4: Reproduzierbarkeit von U_{mean}/U_{ref} , gemessen in der Konfiguration mit Flach- und Spitzdach in verschiedenen Höhen und im Mittel.

Z fs [m]	Standardabweichung U_{mean}/U_{ref} [%]	
	mit Flachdach	mit Spitzdach
2.00	3.54	-
6.75	2.13	3.56
18.23	3.44	1.67
27.45	2.33	2.97
49.73	2.06	1.86
74.25	1.3	1.98
110.93	2.35	1.35
Mittel	2.45	2.23

5.3.2 Konzentrationsmessungen

Das FID für die Ausbreitungsmessungen in Michel-Stadt reagiert sehr sensibel auf sich ändernde Umgebungsbedingungen und muss daher mehrmals täglich sorgfältig kalibriert werden. Dieser zeitliche Mehraufwand ist aber unbedingt nötig, um eine hohe Qualität der Konzentrationsmessungen zu gewährleisten. Befinden sich Staub oder andere kleine Partikel in der Messstrecke, können diese in die Brennkammer gelangen und Fehlmessungen auslösen. Daher müssen die gemessenen Zeitserien diesbezüglich untersucht und bereinigt werden. Meist handelt es sich um vielfach höhere Konzentrations-Peaks als im eigentlichen Messsignal auftreten können. Außerdem lassen sie sich dadurch unterscheiden, dass sich Konzentrations-Peaks typischerweise aus mehreren einzelnen Messwerten zusammensetzen, während es sich bei Spikes meist nur um einen einzelnen Wert handelt. Fischer (2007) entwickelte eine Strategie, um Spikes automatisiert zu detektieren und zuverlässig aus der Zeitserie zu entfernen.

Ähnlich zu den Strömungsmessungen müssen die Messergebnisse auch bei Konzentrationsmessungen auf *Reynoldszahl-Unabhängigkeit* geprüft werden. In Abbildung 5-19 sind die Ergebnisse der mittleren dimensionslosen Konzentration C_{mean}^* dargestellt, die in 2 m Höhe innerhalb der städtischen Rauigkeit mit Spitzdach erfasst wurden. Zwischen einer Windgeschwindigkeit von 4 m/s bis 9 m/s, gemessen am Prandtl-Rohr im Eingangsbereich des Windkanals, ist das Ausbreitungsverhalten Reynoldszahl unabhängig. Bei Windgeschwindigkeiten über 9 m/s ist die Auflösung des Fast-FID nicht mehr ausreichend, so

dass zu niedrige Konzentrationen gemessen wurden. Alle durchgeführten Konzentrationsmessungen wurden daher bei Windgeschwindigkeiten von etwa 6 m/s für $U_{Prandtl}$ durchgeführt.

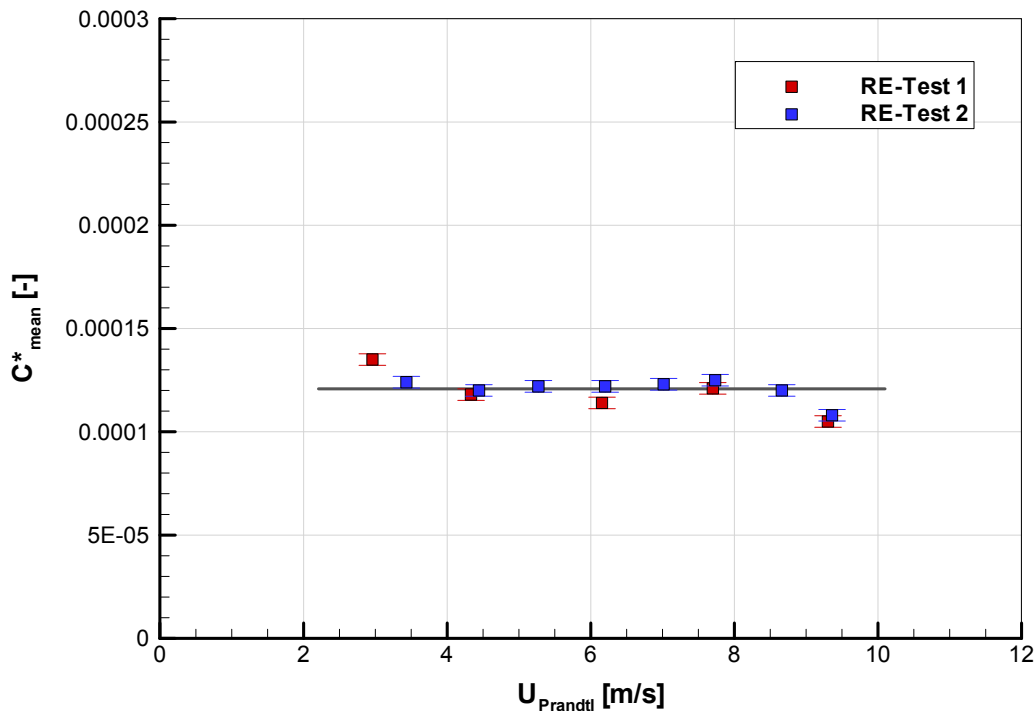


Abbildung 5-19: Test der Reynoldszahl-Unabhängigkeit, Windgeschwindigkeit am Prandtl-Rohr im Verhältnis zur skalierten Konzentration gemessen an einem Messort in 2 m Höhe in der Michel-Stadt mit Spitzdach.

Um einen ausreichend hohen Signalpegel in größerer Entfernung von der Quelle zu erhalten, wird der Emissionsvolumenstrom Q variiert. Da dies keinen Einfluss auf die Messergebnisse haben darf, ist die Ausbreitung auf ihre *Unabhängigkeit von der Quellstärke* zu überprüfen. Die gemessenen Konzentrationen werden daraufhin gemäß Gleichung 4.1 untereinander vergleichbar. Abbildung 5-20 zeigt die Ergebnisse des Tests für einen quellenahen und einen quellfernen Messort in Michel-Stadt mit Spitzdach. Für den quellenahen Messort wird eine Standardabweichung von 5.8 % und für den quellfernen von 4.5 % erreicht, was im Mittel einer Abweichung von 5 % für die mittlere Konzentration entspricht. Da beim Messort in Quellnähe noch eine geringe systematische Abhängigkeit vorliegt, wurden die Messungen in ausreichend großem Quellabstand durchgeführt.

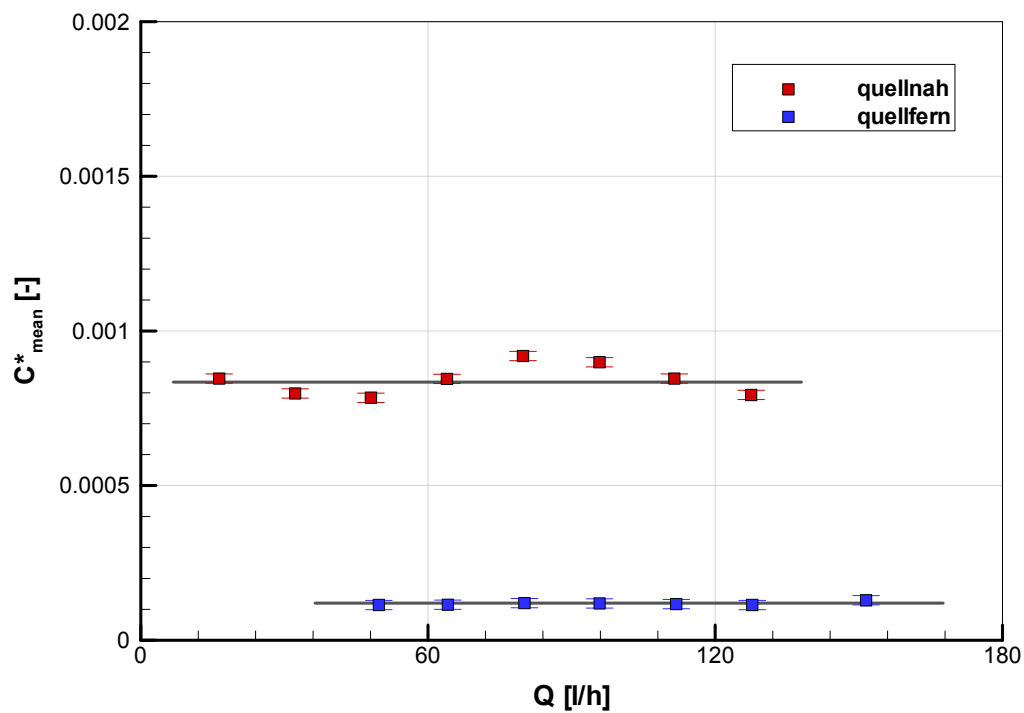


Abbildung 5-20: Test der Quellstärken-Unabhängigkeit an zwei verschiedenen Messorten (quellnah und quellfern) in 2 m Höhe in Michel-Stadt mit Spitzdach.

Um die Gesamtunsicherheit zu erfassen, wurden *Wiederholungsmessungen* durchgeführt, die sowohl an einem quellnahen als auch quellfernen Messort in der Michel-Stadt mit Spitzdach erfolgten. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5-21 dargestellt. Die Standardabweichung für die mittlere Konzentration beträgt hier für den quellnahen Messort 5.6 % und für den quellfernen 2.4 %, so dass im Mittel eine Unsicherheit von 4 % in der mittleren Konzentration erreicht wird.

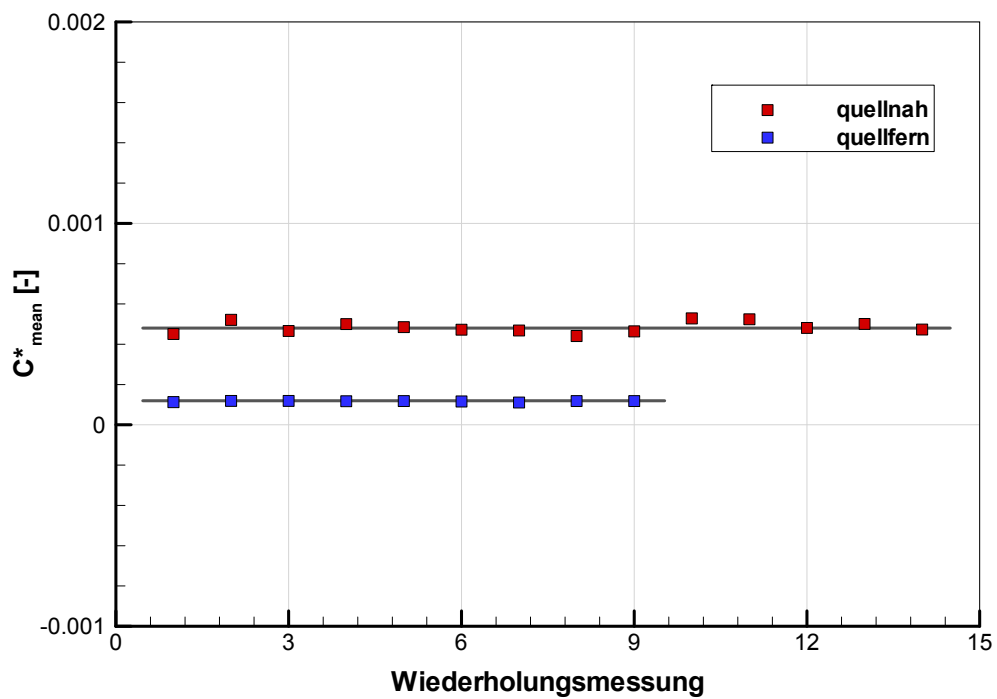


Abbildung 5-21: Messergebnisse zur Ermittlung der Wiederholbarkeit in Michel-Stadt mit Spitzdach an zwei verschiedenen Messorten (quellnah und quellfern) in 2 m Höhe.

6 Modellierung einer städtischen Grenzschicht

Das zu untersuchende Modellgebiet stellt einen Ausschnitt aus einer horizontal homogenen Stadtrauigkeit dar. Daher ist es erforderlich, dass die Anströmung bereits die Charakteristiken einer sehr rauen, städtischen Grenzschicht aufweist. Dies gewährleistet eine schnelle Anpassung der Strömung an die Rauigkeitsstruktur der Michel-Stadt. Die im Windkanal modellierte Windgrenzschicht wird im Folgenden ausführlich dokumentiert, um die naturähnlichen Verhältnisse der Anströmung nachzuweisen. Für eine vollständige Charakterisierung der Grenzschicht liegen sowohl UV- als auch UW-Messungen vor. Die Messungen wurden vor dem Einbau des Modells in der Messstrecke durchgeführt. Nach dem Einbau des Modells wurden die Anströmbedingungen nochmals überprüft, und eine Übereinstimmung der modellierten Windgrenzschicht im Rahmen der Messgenauigkeit wurde festgestellt. Diese Auswertungen konnten mit einem von Fischer (2007 & 2011) entwickelten Programmsystem schnell und effizient unmittelbar nach den Messungen vorgenommen werden.

In Kapitel 2.1 wurde beschrieben, dass die Windgeschwindigkeit in den unteren 100 m der Atmosphäre (Prandtlschicht) bei neutraler Schichtung logarithmisch verteilt ist. Die modellierte städtische Anströmung der Michel-Stadt weist dieses Verhalten oberhalb des direkten Einflusses der Rauigkeitselemente (ca. 1.5-fache Höhe) auf (rote Punkte in Abbildung 6-1, links). Die vertikalen Profile der vertikalen turbulenten Impulsflüsse für die Anströmung von Michel-Stadt sind in Abbildung 6-1 (rechts) dargestellt und zeigen eine ausgebildete „constant flux layer“ bis in eine Höhe von 100 m. Demnach ist die Kanaldecke optimal in der Höhe eingestellt und der longitudinale Druckgradient minimiert worden.

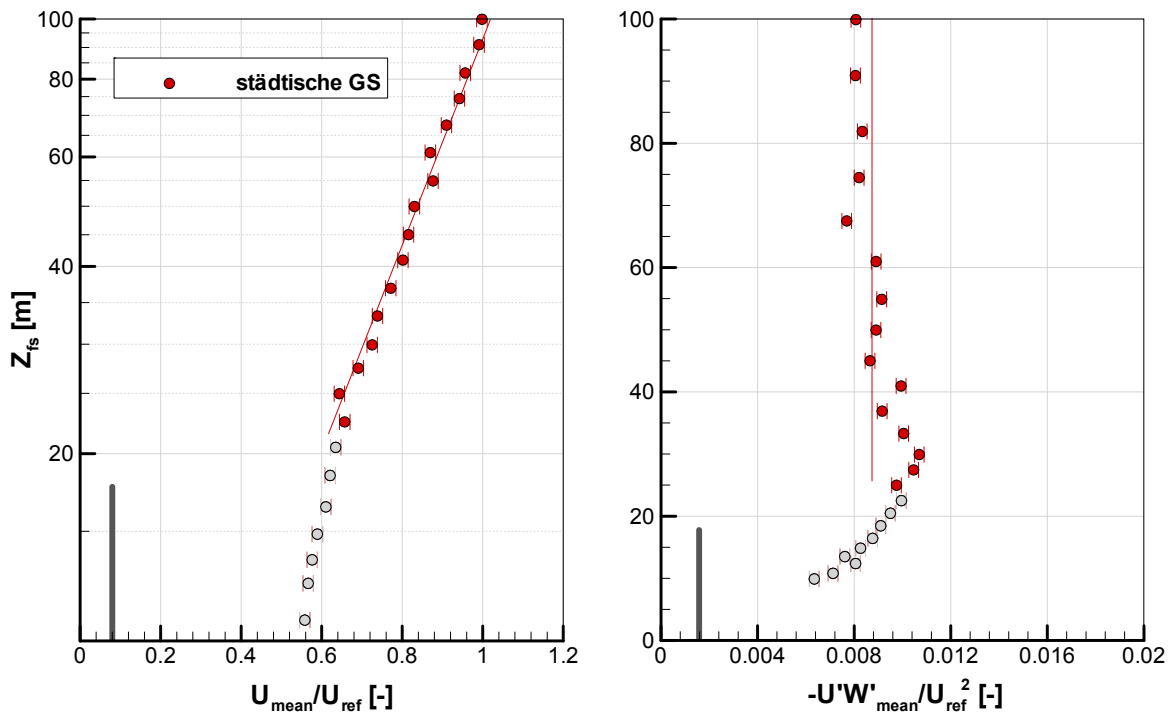


Abbildung 6-1: Vertikale Profile der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} (links) und der mittleren vertikalen turbulenten Flüsse $-U'W'_{mean}/U_{ref}^2$ (rechts) der städtischen Anströmung, grauer Balken: maximale Höhe der Rauigkeitselemente.

Für das Vertikalprofil der zeitlich gemittelten Geschwindigkeit über die gesamte Grenzschicht wird üblicherweise ein Potenzansatz verwendet:

$$\frac{U(z)}{U_{ref}} = \left(\frac{z - d_0}{z_{ref} - d_0} \right)^\alpha \quad 6.1$$

In Abbildung 6-2 ist das Verhältnis der Rauigkeitslänge z_0 zum Profilexponenten α des vertikalen Windprofils der Anströmung von Michel-Stadt zu sehen, das sehr gut mit den theoretischen und in der Natur gemessenen Werten übereinstimmt. Mit einer Rauigkeitslänge von 1.5 m und einem Profilexponenten von 0.27 liegt die Grenzschicht nach der VDI-Richtlinie 3783/12 (2000) im rauen bis sehr rauen Bereich und ist charakteristisch für dicht bebaute urbane Gebiete.

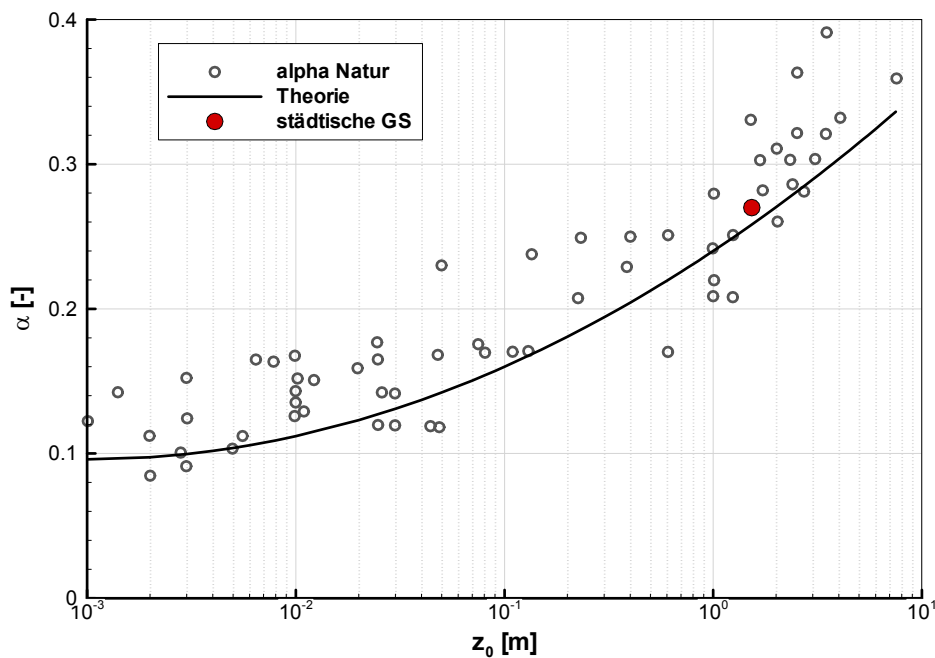


Abbildung 6-2: Verhältnis der Rauigkeitslänge z_0 zum Profilexponenten α der städtischen Anströmung der Michel-Stadt im Vergleich zu theoretischen und in der Natur gemessenen Werten (nach Counihan, 1975).

Da diese vom mittleren Windprofil abgeleiteten Größen nicht ausreichen, um die Eigenschaften der Grenzschicht vollständig zu beschreiben (siehe Kapitel 4.3.1), sind die Vertikalprofile der Turbulenz-Intensität in Abbildung 6-3 dargestellt. Die Turbulenz-Intensität I_i für die Windgeschwindigkeitskomponenten $i = u, v, w$ ist mit σ_i als Standardabweichung der Windgeschwindigkeitskomponenten wie folgt definiert:

$$I_i = \frac{\sigma_i(z)}{U(z)} \quad 6.2$$

In der Prandtl-Schicht der Anströmung der Michel-Stadt stimmen die Intensitätsprofile für die U-, V- und W- Windkomponente sowohl in ihrer Form als auch in der Größenordnung gut mit den nach der VDI-Richtlinie 3783/12 (2000) zu erwartenden Profilen für eine raue bis sehr raue Grenzschicht überein.

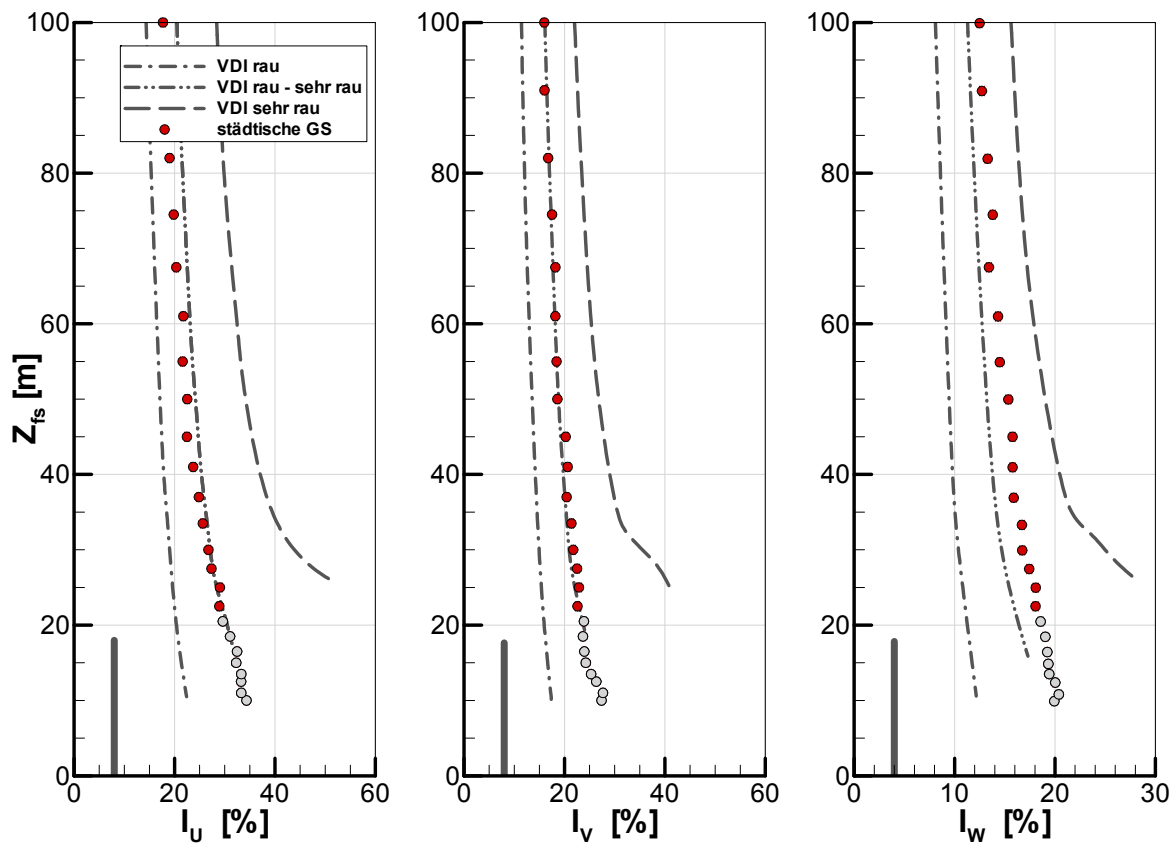


Abbildung 6-3: Vertikale Profile der Turbulenz-Intensitäten der U-, V- und W-Komponente der Windgeschwindigkeit, gemessen in der städtischen Anströmung der Michel-Stadt, im Vergleich zu den theoretischen Profilen der VDI-Richtlinie 3783/12 (2000), grauer Balken: maximale Höhe der Rauigkeitselemente.

Die Turbulenzintensität der U-Komponente steht nach Counihan (1975) in einem bestimmten Verhältnis zur Rauigkeitslänge. Sie ist für die städtische Grenzschicht in Abbildung 6-4 dargestellt und liegt ebenfalls im zu erwartenden Bereich.

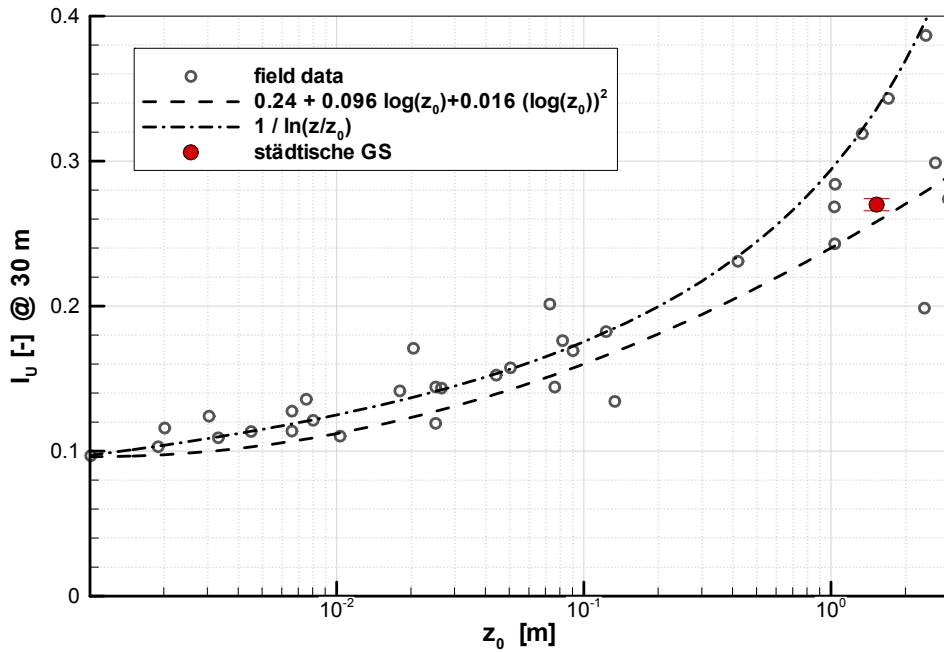


Abbildung 6-4: Verhältnis der Rauigkeitslänge z_0 zur Turbulenzintensität I_u in 30 m Höhe, gemessen in der städtischen Anströmung der Michel-Stadt, im Vergleich zu theoretischen und in der Natur gemessenen Werten (nach Counihan, 1975).

Aus zeitlich hoch aufgelösten Zeitreihen in verschiedenen Höhen wurde das integrale Längenmaß der Turbulenz L_{UX} in verschiedenen Höhen ermittelt (Abbildung 6-5). Es lässt sich wie folgt berechnen:

$$L_{UX} = \frac{U}{\sigma_U^2} \cdot \int_0^{\infty} R_{UU}(\Delta t) d(\Delta t) \quad 6.3$$

wobei U als mittlere Windgeschwindigkeit, σ_U als Standardabweichung der Geschwindigkeitsfluktuationen und R_{UU} als Autokorrelation von U definiert sind. Das integrale Längenmaß der Anströmung der Michel-Stadt stimmt mit den theoretisch abgeleiteten und in der Natur gemessenen Werten gut überein. Sie liegen in dem Bereich, der für Rauigkeitslängen in der Größenordnung von 1 m typisch ist. Auch die in der Natur beobachtete Zunahme des Längenmaßes L_{UX} mit zunehmender Höhe über Grund wird bis in etwa vierfache Gebäudehöhe qualitativ und quantitativ richtig abgebildet.

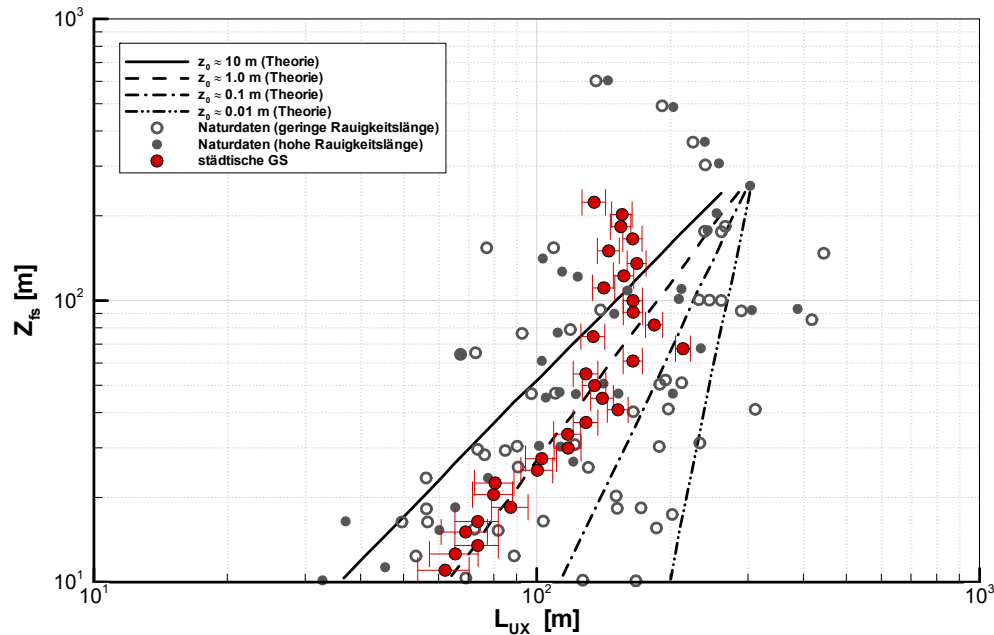


Abbildung 6-5: Vertikales Profil der integralen Längenmaße der Turbulenz L_{ux} , gemessen in der städtischen Anströmung der Michel-Stadt, im Vergleich zu theoretischen und in der Natur gemessenen Werten (nach Counihan, 1975).

In Abbildung 6-6 wird die spektrale Verteilung der kinetischen Energie der Turbulenz für die städtische Anströmung der Michel-Stadt in drei Höhen gezeigt, die aus zeitlich hochaufgelösten Zeitreihen ermittelt wurde. Für die spektrale Verteilung der turbulenten kinetischen Energie wurde die folgende Näherung nach der VDI-Richtlinie 3783/12 (2000) herangezogen:

$$\frac{f \cdot S_{uu}(f, z)}{\sigma_u^2(z)} = \frac{A \cdot f_{red}}{(E + B \cdot f_{red}^C)^D} \quad 6.4$$

wobei f die Frequenz der Geschwindigkeitsfluktuationen, $S_{uu}(f, z)$ die spektrale Dichteverteilungsfunktion der U-Komponente, f_{red} die reduzierte Frequenz und A bis E Approximationskonstanten sind. Zudem sind die Referenz-Spektren von Kaimal, Simiu & Scanlan und von Kármán abgebildet (berechnet nach VDI 3783/12, 2000). Die Spektren der im Windkanal vermessenen Grenzschicht treffen die auf Naturmessungen basierenden Erwartungswerte.

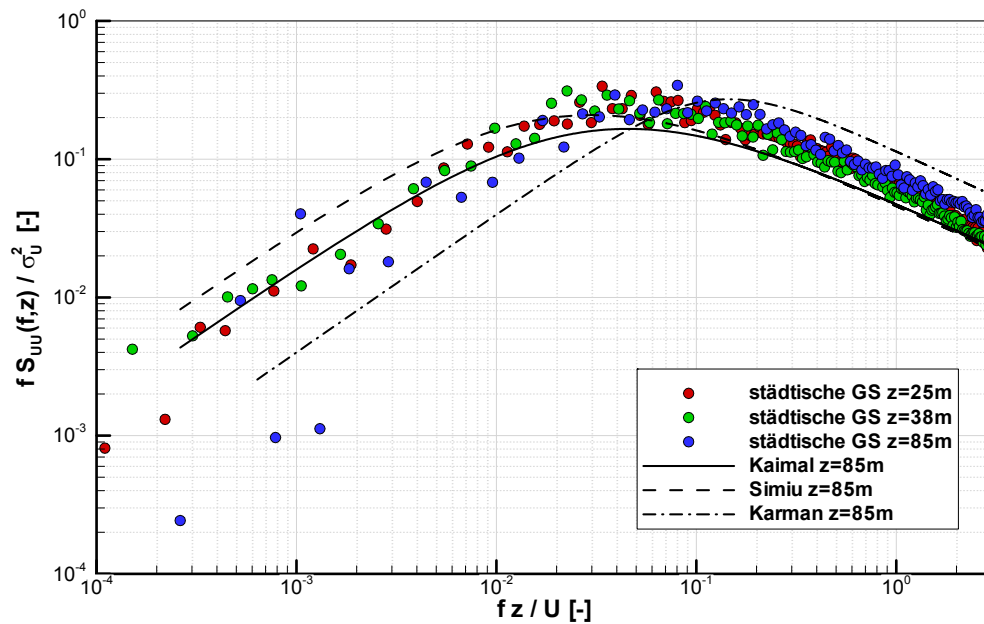


Abbildung 6-6: Normierte spektrale Verteilung der turbulenten kinetischen Energie, gemessen in der städtischen Anströmung der Michel-Stadt in drei verschiedenen Höhen, im Vergleich zu den Referenzspektren von Kaimal, Simiu & Scanlan und von Kármán (berechnet nach VDI 3783/12, 2000).

Ob die Grenzschichtmodellierung im Windkanal naturähnlich ist, kann außerdem mit Hilfe der lateralen Ablenkung des Windvektors von der Hauptwindrichtung überprüft werden. Die Ergebnisse geben Aufschluss über die niederfrequenten Schwankungen des Windvektors. Wie in der Natur ist mit der Höhe eine Abnahme der Schwankungen in der städtischen Grenzschicht zu beobachten (Abbildung 6-7).

Wie bereits Schultz (2008) und Harms (2010) in ihren Arbeiten bezüglich der Datenqualität von im Windkanal gemessenen Daten ausführlich dokumentierten, ist zudem die laterale Homogenität durch horizontale Windgeschwindigkeitsprofile in der Anströmung zu überprüfen (Abbildung 6-8). Die Standardabweichung über das gemessene laterale Windgeschwindigkeitsprofil in der Anströmung von Michel-Stadt beträgt in 55 m Höhe 1.6 % und in 100 m Höhe 1.1 %.

Hiermit wurde nachgewiesen, dass es sich um eine naturähnliche Grenzschicht handelt, die sich vor dem Modellgebiet der Michel-Stadt vollständig entwickelt hat.

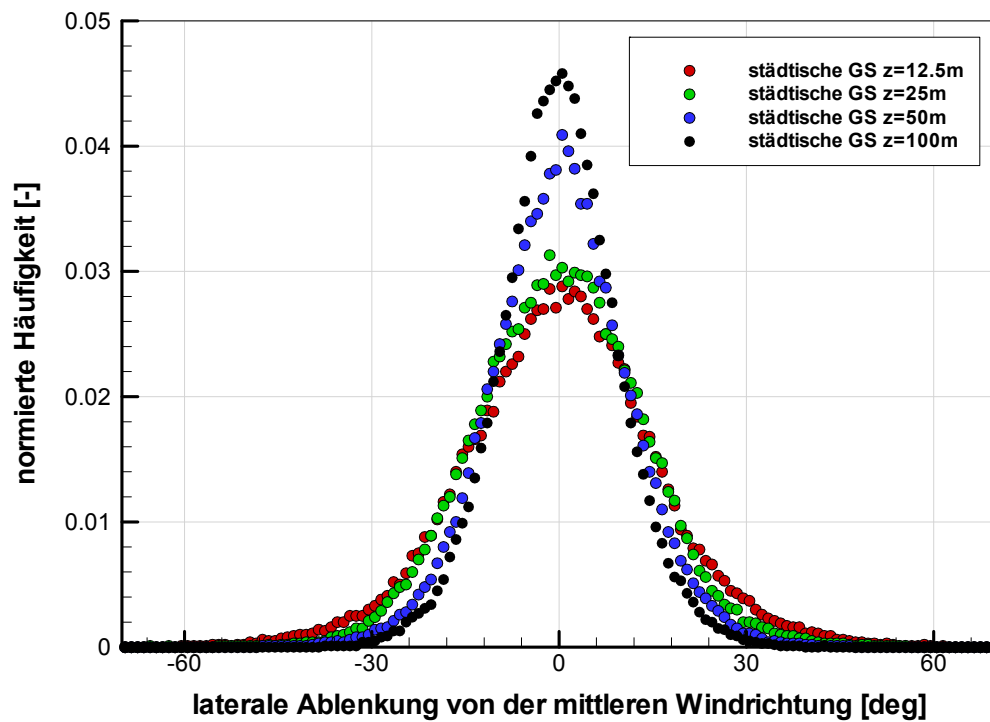


Abbildung 6-7: Laterale Ablenkung des Windvektors von der mittleren Windrichtung, gemessen in der städtischen Anströmung der Michel-Stadt in vier verschiedenen Höhen.

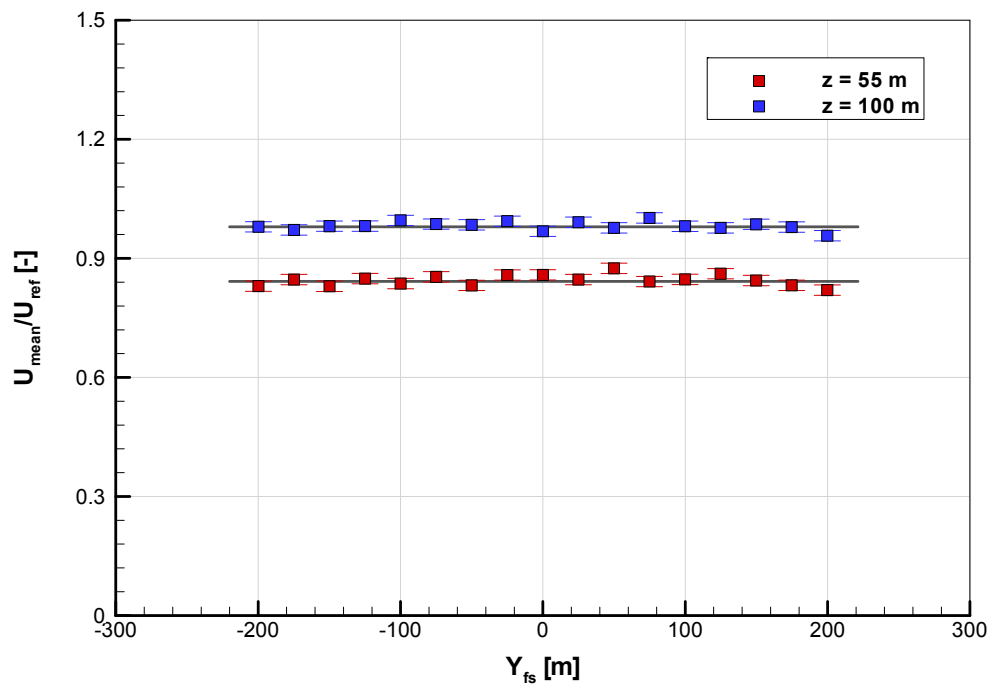


Abbildung 6-8: Lateralprofile der Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} in der Anströmung von Michel-Stadt, gemessen in zwei verschiedenen Höhen.

7 Auswertung der Messungen in Michel-Stadt

Nachdem der Umfang und die Qualität des Datensatzes vorgestellt wurde, werden nun verschiedene Möglichkeiten zu dessen Nutzung aufgezeigt. Die Analyse des Strömungs- und Ausbreitungsverhaltens in Michel-Stadt dienen einem besseren Verständnis von urbanen Strömungen. Hierzu wurden die Ergebnisse des Strömungsfeldes in Michel-Stadt mit einer urbanen Rauigkeit von niedrigerer Komplexität in Bezug gesetzt. Außerdem wurde der Einfluss einer unterschiedlichen Dachform auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in der Stadt untersucht. Hierbei ermöglichten die zeitlich hoch aufgelösten Messungen neben der Analyse des mittleren Strömungsfeldes ebenfalls die Auswertung der in der Datenbank CEDVAL-LES archivierten Zeitserien. Wie die Daten für einen Vergleich mit einem LES-Modell dienen können, wird exemplarisch in Kapitel 8 dargestellt.

7.1 Analyse des Strömungsfeldes von Michel-Stadt

Bei der Datenanalyse werden die Daten nach charakteristischen Kennwerten zusammengefasst. Folgende Maßzahlen lassen sich unterscheiden:

- Mittelungsmaße (mittlere bzw. häufigste Werte)
- Variationsmaße (Streubreite, Standardabweichung)
- Klassifizierung der Häufigkeitsverteilungen (uni- bzw. multimodal)
- Verteilungscharakteristiken (Schiefe, Wölbung)

Im ersten Schritt werden die mittleren Strömungsverhältnisse in Michel-Stadt aufgezeigt. Hierauf wird auf die Eigenschaften der Geschwindigkeitsverteilungen eingegangen. Eine Ensemble-Analyse der Zeitserien ermöglicht eine weitere Charakterisierung der Strömung. Die Ergebnisse aus der Michel-Stadt werden in diesem Zusammenhang mit den Messungen aus einer stark idealisierten Stadtstruktur (Abbildung 7-1) verglichen, die ebenfalls in der Datenbank CEDVAL-LES enthalten sind. Die Messungen wurden von Mei (2010) im Rahmen ihrer Diplomarbeit durchgeführt. Der geometrische Aufbau des Würfelfeldes ist

im Anhang zu finden (Anhang B). Das Modell befindet sich in derselben städtischen Anströmung im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ wie die Michel-Stadt, so dass die Unterschiede im mittleren Strömungsmuster zwischen den beiden Modellkomplexitäten analysiert werden können.

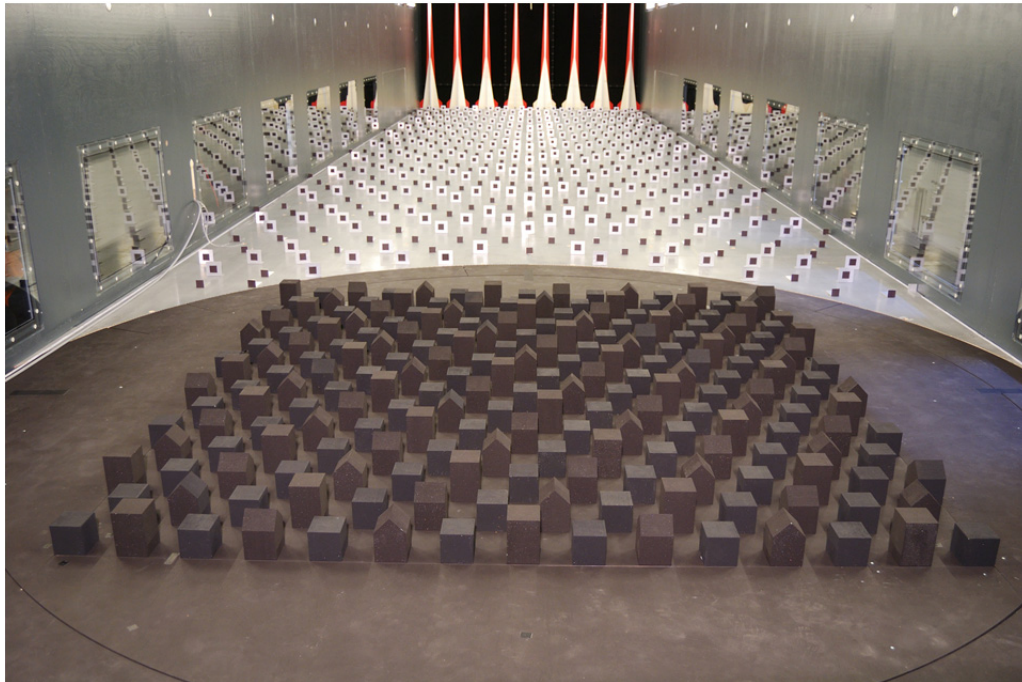


Abbildung 7-1: Modell einer stark idealisierten urbanen Rauigkeit (CEDVAL-LES: Komplexität 2) im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ der Universität Hamburg im Maßstab 1:225.

7.1.1 Mittlere Strömungsverhältnisse

Die hohe räumliche Auflösung der Messungen in Michel-Stadt mit Flachdach ermöglicht eine ausführliche Analyse der Strömungsphänomene innerhalb der städtischen Rauigkeit. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der Messebenen in 2 m, 9 m und 18.2 m Höhe innerhalb der Straßenschluchten sowie in 30.2 m Höhe oberhalb der Bebauung dargestellt (im Naturmaßstab). Die Pfeile repräsentieren die mittleren Windvektoren, deren Länge dem Betrag der Windgeschwindigkeit entspricht. Farblich dargestellt ist die Standardabweichung der U-Windkomponente. Das mittlere Strömungsfeld in der Michel-Stadt mit Spitzdach zeigt dieselben grundsätzlichen Charakteristika. In Anhang C sind die Windvektoren und die Standardabweichung der U-Komponente für die Messebenen in 2 m und 30.2 m Höhe für die Spitzdachkonfiguration ergänzend abgebildet.

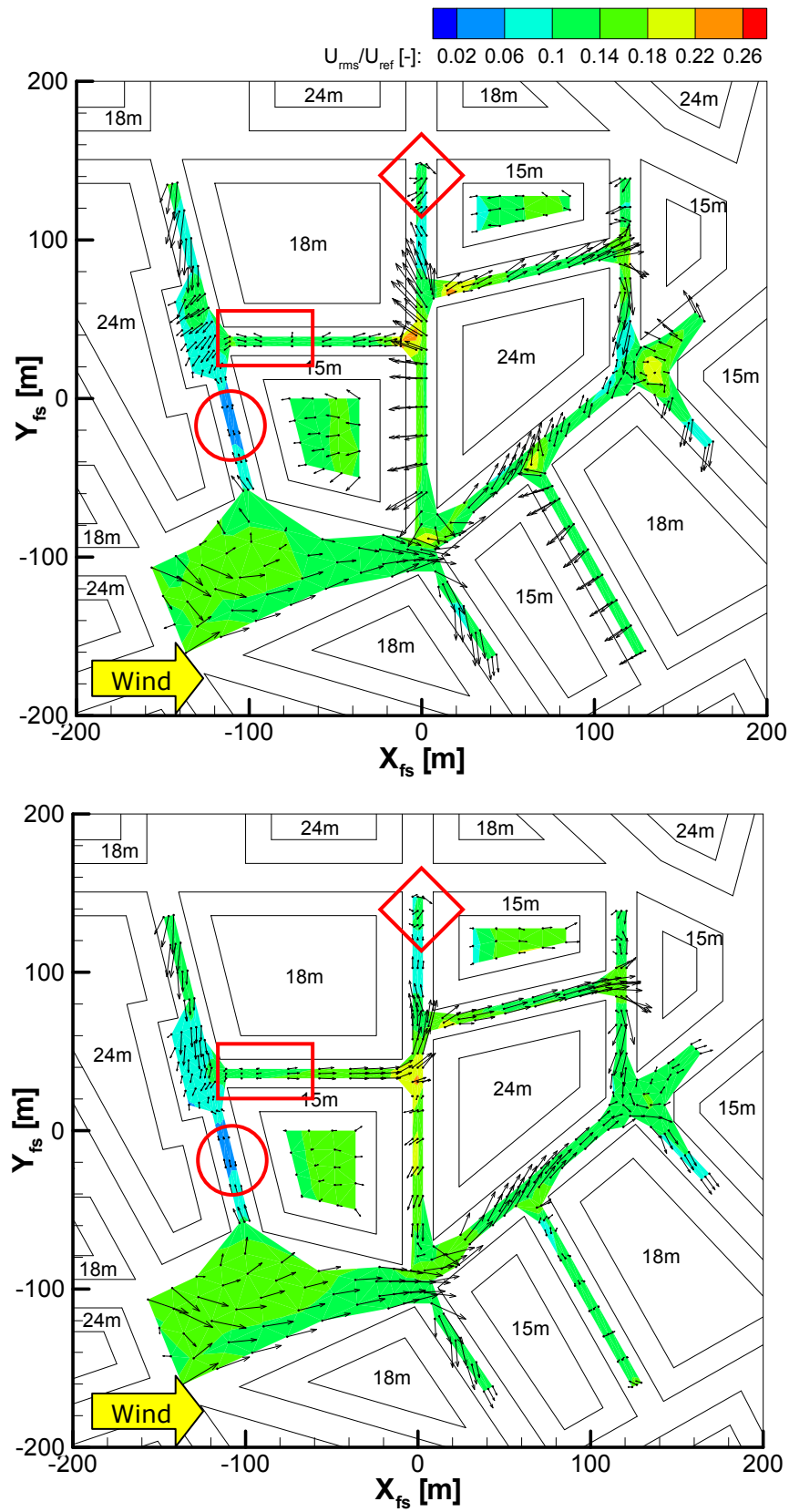


Abbildung 7-2: Mittlere Windvektoren und Standardabweichung der U-Windkomponente (farblich dargestellt) in Michel-Stadt mit Flachdach, gemessen in 2 m (oben) und 9 m (unten) Höhe.

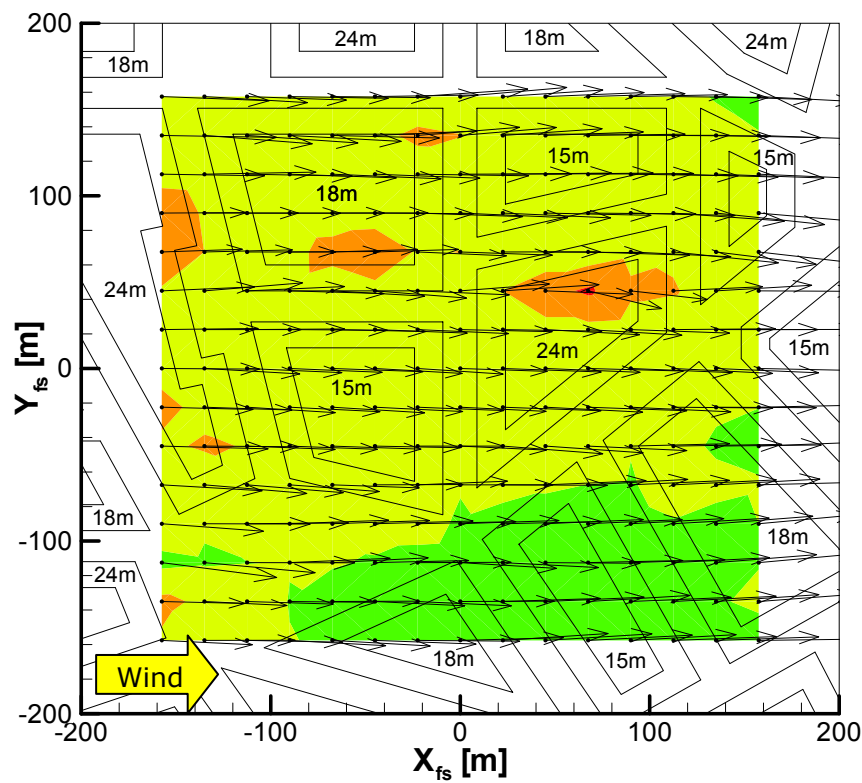
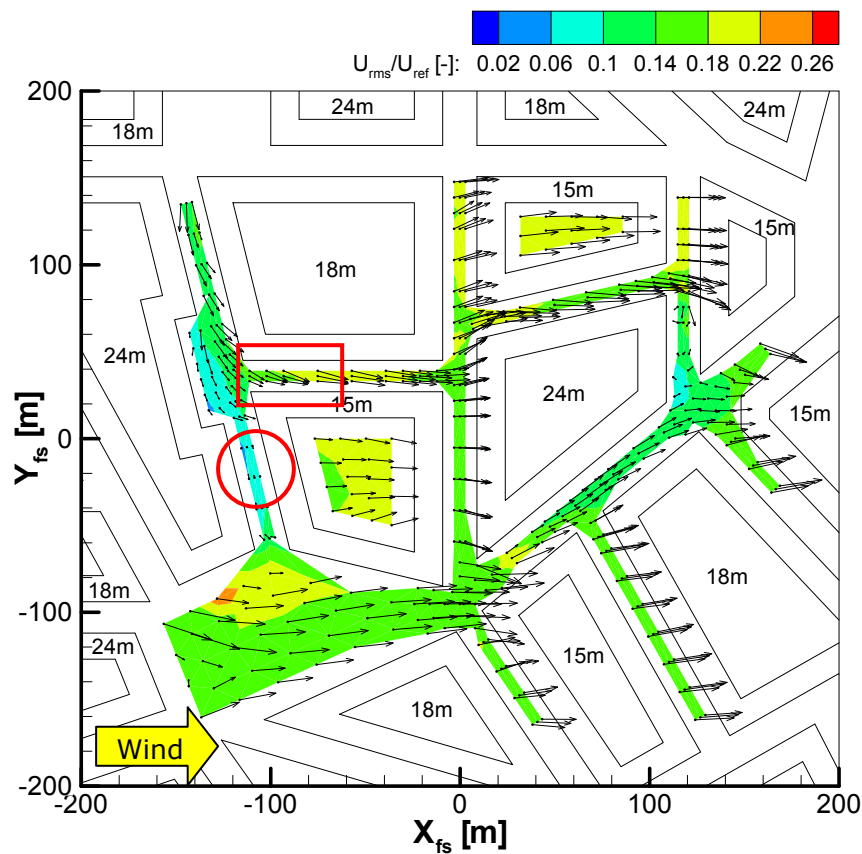


Abbildung 7-3: Wie vorherige Abbildungen, gemessen in 18.2 m (oben) und 30.2 m (unten) Höhe.

Innerhalb der meisten Straßenschluchten, die senkrecht zur Hauptwindrichtung ausgerichtet sind, und innerhalb der Gebäuderänge lassen die Messergebnisse in der mittleren Strömung auf die Ausbildung eines Wirbels schließen (Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3). Während auf Dachniveau (in 18.2 m Höhe) positive Windgeschwindigkeiten gemessen wurden, sind diese auf halber Dachhöhe (in 9 m Höhe) nahe null und in Bodennähe (in 2 m Höhe) negativ. In schräg zur Windrichtung verlaufenden Straßen oder in Kreuzungsbereichen besitzt die Strömung im Mittel meist in allen Höhen eine bevorzugte Richtung. Allerdings ergeben sich hinter den höchsten Gebäuden von 24 m Höhe bzw. in der Umgebung der Freifläche auch abweichende Strömungsmuster. Das hohe Gebäude von 24 m bei $X_{fs} = -150$ m wird beispielsweise überströmt, so dass sich im Nachlauf ein Rezirkulationsgebiet ausbildet, das sich zudem auf die Strömung der senkrecht dazu stehenden Straßenschlucht bei $Y_{fs} = 30$ m auswirkt (roter Kasten in Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3). Die Straßenschlucht bei $X_{fs} = -120$ m hinter dem Gebäude wird von beiden Seiten durchströmt, so dass bei $Y_{fs} = -20$ m in allen Höhen unterhalb des Dachniveaus der Betrag der gemessenen Windgeschwindigkeit nahezu Null ist (roter Kreis in Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3). Eine Ausbildung der Rezirkulationszonen an Gebäudeecken kann im Langzeitmittel nur bei $Y_{fs} = 150$ m beobachtet werden. Es handelt sich um rechtwinklig angeordnete Straßenzüge (rote Raute in Abbildung 7-2). An den anderen Gebäudekanten wird das Entstehen der Eckwirbel durch das Strömungsfeld unterdrückt. Über Dachniveau in 30.2 m Höhe dominiert im Mittel die Hauptwindrichtung, wobei noch leichte Ablenkungen in der Nähe der höchsten Gebäude zu finden sind (Abbildung 7-3, unten). In diesem Bereich sind die höchsten Turbulenzintensitäten sowohl für die U- als auch für die V-Windkomponente zu finden. In 2 m Höhe wurden ebenfalls in einzelnen Regionen hohe Turbulenzintensitäten gemessen.

Oke (1988) unterscheidet drei verschiedene Strömungsregime mit Hilfe des Verhältnisses der Straßenbreite S zur Gebäudehöhe H (Aspektverhältnis), die er durch Untersuchungen an Würfelfeldern ermittelt hat. Während bei weit auseinander stehenden Gebäuden mit einem Verhältnis von $S/H \gtrsim 3$ die Umströmung ähnlich zu isoliert stehenden Einzelgebäuden („isolated roughness flow“) ist, kommt es für $1.5 \lesssim S/H \lesssim 3$ zu Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Strömungsregimen der Gebäude („wake-interference flow“). Bei $S/H \lesssim 1.5$ geht die Gebäudeumströmung zum „skimming flow regime“ über.

Durch die Überströmung der Gebäudestruktur wird die Bildung eines Wirbels innerhalb der Straßenschlucht sichtbar. In Straßenschluchten mit einem hohen Aspektverhältnis entsteht meist ein Wirbel, in schmalen Straßen können sich dagegen auch komplexere Wirbelstrukturen bilden. Für Michel-Stadt beträgt das Verhältnis der Straßenbreite zur Gebäudehöhe 0.8 bis 1.7, so dass bedingt durch die komplexe Struktur der Gebäuderänge ein „skimming flow regime“ vorherrscht. Die Um- und Überströmung der einzelnen Gebäude beeinflussen sich gegenseitig und können in der komplexen Geometrie von Michel-Stadt nicht getrennt betrachtet werden. In senkrecht zur Windrichtung ausgerichteten Straßenschluchten kann im Strömungsmuster auch in Michel-Stadt mit Flachdach die Ausbildung eines Rezirkulationsgebietes im Langzeitmittel beobachtet werden.

Zur Untersuchung des Strömungs- und Ausbreitungsverhaltens in Stadtgebieten werden häufig Messungen in einer stark idealisierten urbanen Rauigkeit durchgeführt. Daher werden die Ergebnisse aus Michel-Stadt nun mit den von Mei (2010) durchgeführten Messungen der Komplexitätsstufe 2 der Datenbank CEDVAL-LES verglichen. Die Einzelhindernisse der stark idealisierten Stadtstruktur besitzen die Grundmaße von 18 m x 18 m x 18 m und sind teilweise mit Spitzdächern in unterschiedlicher Ausrichtung zur Windrichtung versehen (Anhang B). Sie entsprechen maßstabsgetreu möglichen Einzelgebäuden in Michel-Stadt. Es wurde überprüft, dass das ausgewählte Modellgebiet nicht von der Strömung außerhalb des begrenzten Modells beeinflusst wird, so dass ein Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Intensivmessfeld von Michel-Stadt möglich ist. Hierbei wird auf die Messungen in 2 m Höhe (im Naturmaßstab) zurückgegriffen, die in beiden Datensätzen vorhanden ist.

Die räumliche Auflösung der Daten in der stark idealisierten Stadtrauigkeit ist weitaus geringer und wurde von Mei (2010) aufgrund der Untersuchungen von Repschies (2006) ermittelt. Hierbei wurden aus einem räumlich hoch aufgelösten Messraster sukzessiv einzelne Messpunkte entfernt, worauf der Mittelwert erneut berechnet wurde. Mit dieser Methode wurde das vorliegende relativ grobe Messraster gewählt, bei dem die Abweichung des Mittelwertes gegenüber des Mittelwertes aller Messpunkte möglichst gering bleibt (± 0.05 für U_{mean}/U_{ref}). Das Strömungsfeld der zwei verschiedenen Komplexitätsstufen wird anhand der mittleren Windgeschwindigkeit der U-Komponente in Abbildung 7-4 gegenüber gestellt.

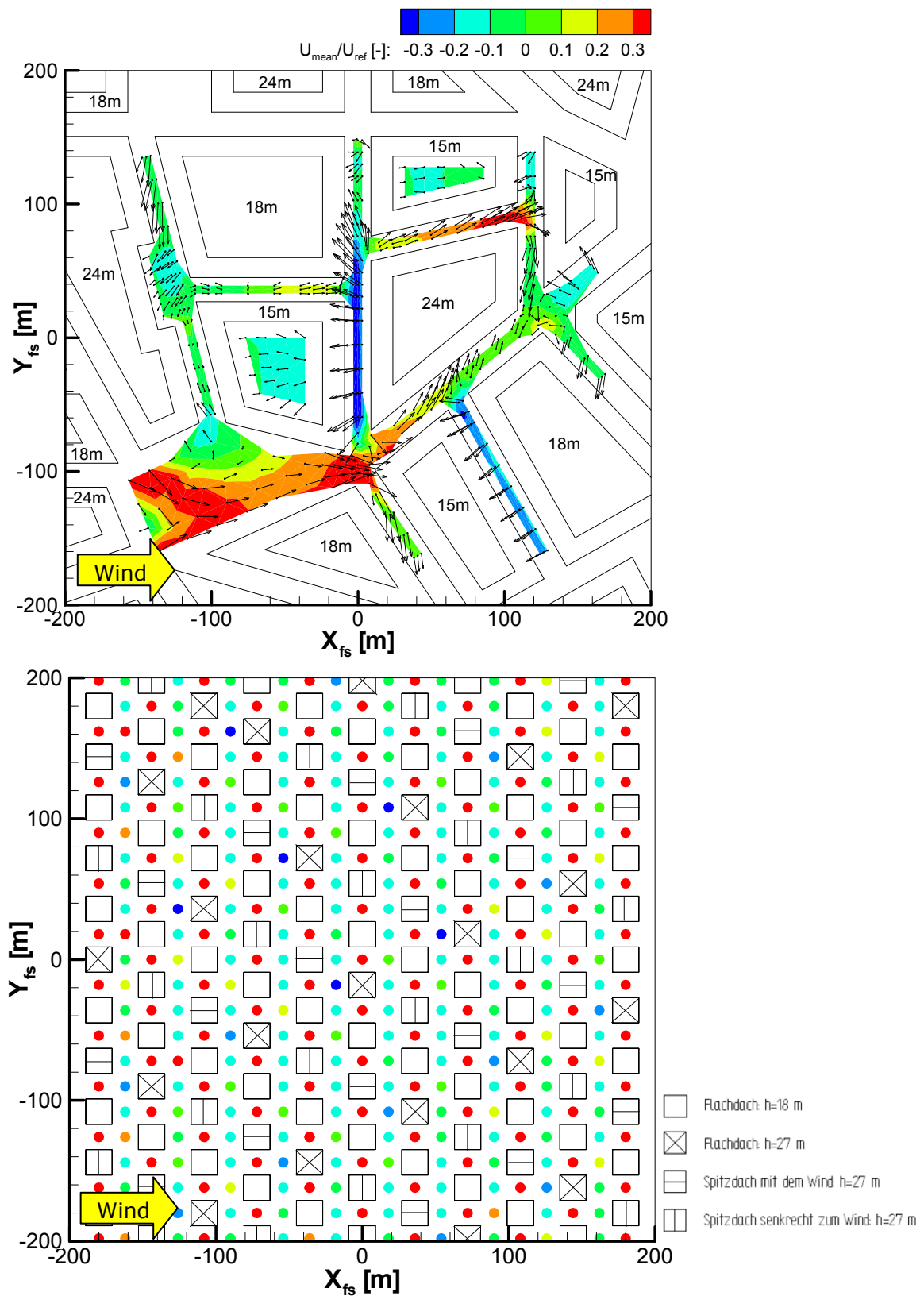


Abbildung 7-4: Mittlere Windgeschwindigkeit der U-Komponente innerhalb der Straßenschluchten von Michel-Stadt mit Flachdach (links) und in einer stark idealisierten urbanen Rauigkeit (rechts), gemessen in 2 m Höhe (Naturmaßstab).

Der Betrag der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe weist eine hohe Ähnlichkeit auf. Die höchste gemessene Windgeschwindigkeit liegt in beiden Fällen um etwa 0.4 und wird in Michel-Stadt in gut durchlüfteten Bereichen und im Würfelfeld zwischen den Einzelhindernissen erreicht. Die höchsten negativen Windgeschwindigkeiten in Bodennähe treten in beiden Modellen in den Rezirkulationsbereichen der Gebäude auf. Dies lässt darauf schließen, dass sowohl in der stark idealisierten Stadtstruktur als auch in einer komplexen Rauigkeit der Michel-Stadt im Mittel ähnliche Windbedingungen vorzufinden sind.

In Abbildung 7-5 ist die Standardabweichung der U-Komponente des mittleren Windes in der stark idealisierten Stadtstruktur in 2 m Höhe dargestellt, wobei die Farbgebung der aus den vorherigen Abbildungen von Michel-Stadt angepasst wurde. Für nahezu alle Messpositionen im Würfelfeld sind höhere Windschwankungen zu beobachten, die meist doppelt so groß sind als in den Straßenschluchten der Michel-Stadt mit Flachdach (Abbildung 7-2, oben).

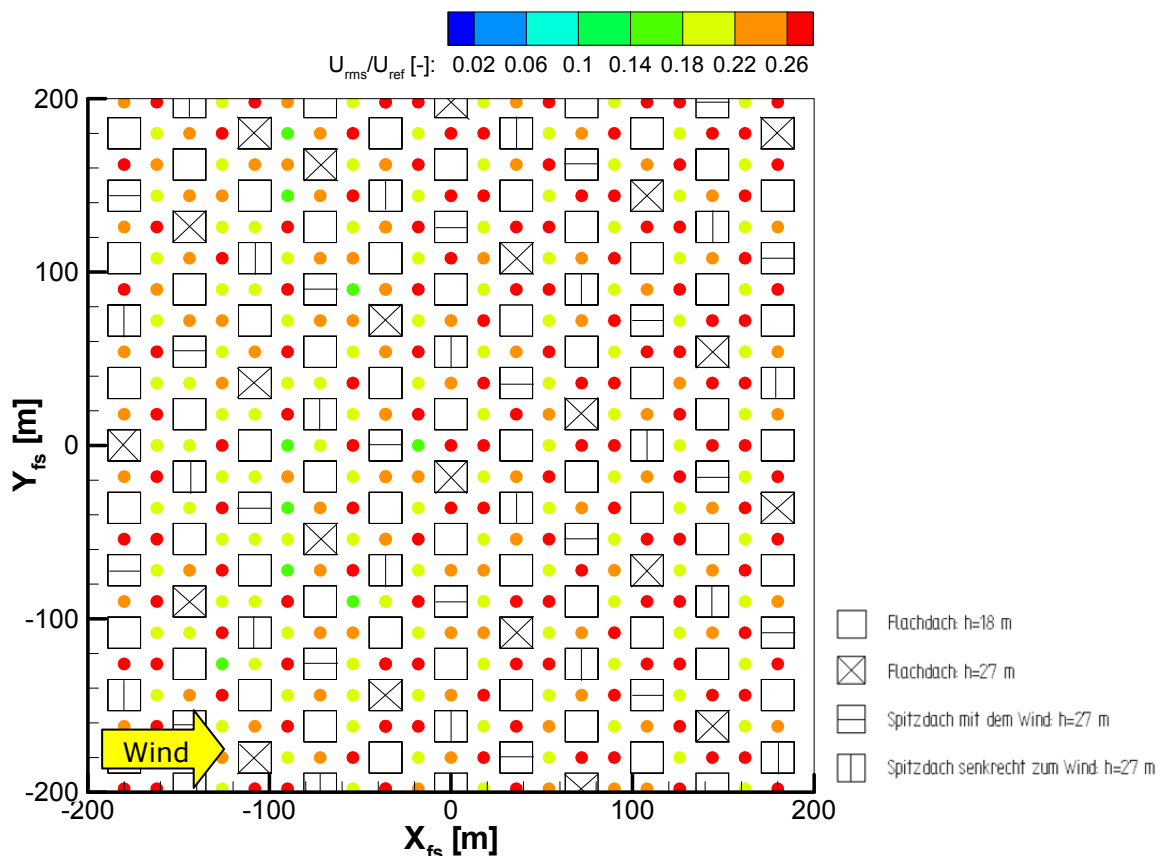


Abbildung 7-5: Standardabweichung der U-Windkomponente in einer stark idealisierten urbanen Rauigkeit (Komplexität 2), gemessen in 2 m Höhe (Naturmaßstab).

Obwohl in beiden Modellkomplexitäten ähnliche mittlere Windbedingungen vorzufinden sind, wird bei einer aus Einzelgebäuden bestehenden Rauigkeitsstruktur mehr Turbulenz erzeugt. In Bodennähe werden im Mittel doppelt so große Turbulenzintensitäten registriert, als sie in einer aus Gebäuderingen bestehenden Stadtstruktur gemessen werden.

7.1.2 Klassifizierung der Geschwindigkeitsverteilungen

Üblicherweise werden bei der Auswertung von Messdaten arithmetische Mittelwerte betrachtet, die für gaußverteilte monomodale Geschwindigkeitsverteilungen ein geeignetes Mittelungsmaß sind. In der Anströmung und in der freien Überströmung von urbanen Gebieten können diese angewendet werden. Innerhalb der städtischen Rauigkeit dagegen treten häufig schiefe oder bimodale Häufigkeitsverteilungen der Windgeschwindigkeit auf. Der arithmetische Mittelwert kann hier von geringer Aussagekraft sein, da er nicht die häufigste auftretende Windgeschwindigkeit repräsentiert. Durch die Analyse der Schiefe und der Form der Verteilung können die Ergebnisse besser charakterisiert werden.

Die Schiefe (engl. skewness) ist ein Maß für die Asymmetrie der Geschwindigkeitsverteilung zum Mittelwert. Ist die Verteilung nach rechts bzw. links geneigt, so ist die Schiefe positiv bzw. negativ. Die Schiefe der Windkomponente u wird nach Gleichung 7.1 berechnet, wobei N die Anzahl der in der Zeitserie gemessenen Einzelgeschwindigkeiten u_i ist. Es handelt sich um eine dimensionslose Kennzahl. Ist die Schiefe null, so handelt es sich um eine symmetrische Verteilung.

$$skewness = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{u_i - \bar{u}}{\sigma} \right)^3 \quad 7.1$$

Abbildung 7-6 zeigt die Schiefe der Geschwindigkeitsverteilungen der U- und V-Komponente des Windes, die innerhalb der Straßenschluchten von Michel-Stadt mit Flachdach in 2 m Höhe gemessen wurden. Sowohl für die U- als auch für die V-Windkomponente treten in Michel-Stadt in 2 m Höhe bei etwa 60 % der Messpunkte Geschwindigkeitsverteilungen mit einer Schiefe von kleiner als -0.2 bzw. größer als +0.2 auf. Der Bereich von ± 0.2 wurde gewählt, da ab diesen Werten eine signifikante Abweichung

der am häufigsten auftretenden Windgeschwindigkeit zum arithmetischen Mittel zu beobachten ist. Bei dem gewählten Messraster in Michel-Stadt werden die außermittigen Messpunkte innerhalb der Straßenschluchten und die räumlich hochaufgelösten Kreuzungsbereiche in der Statistik überbewertet. Daher wurde die Analyse ebenfalls nur mit Messpunkten durchgeführt, die in Straßenmitte liegen. Es wurden nahezu die gleichen Ergebnisse erzielt (siehe Tabelle 7-1).

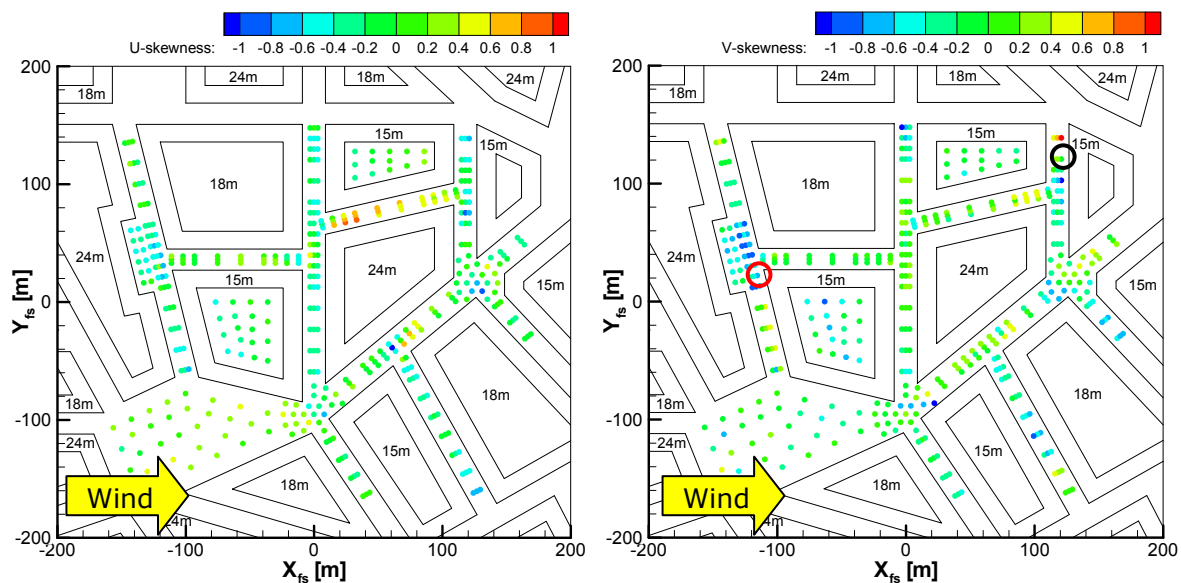


Abbildung 7-6: Schiefe der Geschwindigkeitsverteilung der U- Windkomponente (links) und der V-Windkomponente (rechts) der Messungen innerhalb den Straßenschluchten in 2 m Höhe von Michel-Stadt mit Flachdach, Koordinaten im Naturmaßstab.

Im Vergleich zum Strömungsfeld der Michel-Stadt sind in der stark idealisierten urbanen Rauigkeit (Würfelfeld) vor allem bei der V-Windkomponente deutlich weniger schiefe Geschwindigkeitsverteilungen zu finden (Abbildung 7-7). Während für die Verteilungen der U-Windkomponente bei 50 % der Messpunkte eine Schiefe von kleiner als -0.2 bzw. größer als +0.2 festgestellt wird, sind es für die V-Windkomponente nur 30 % der Messpunkte.

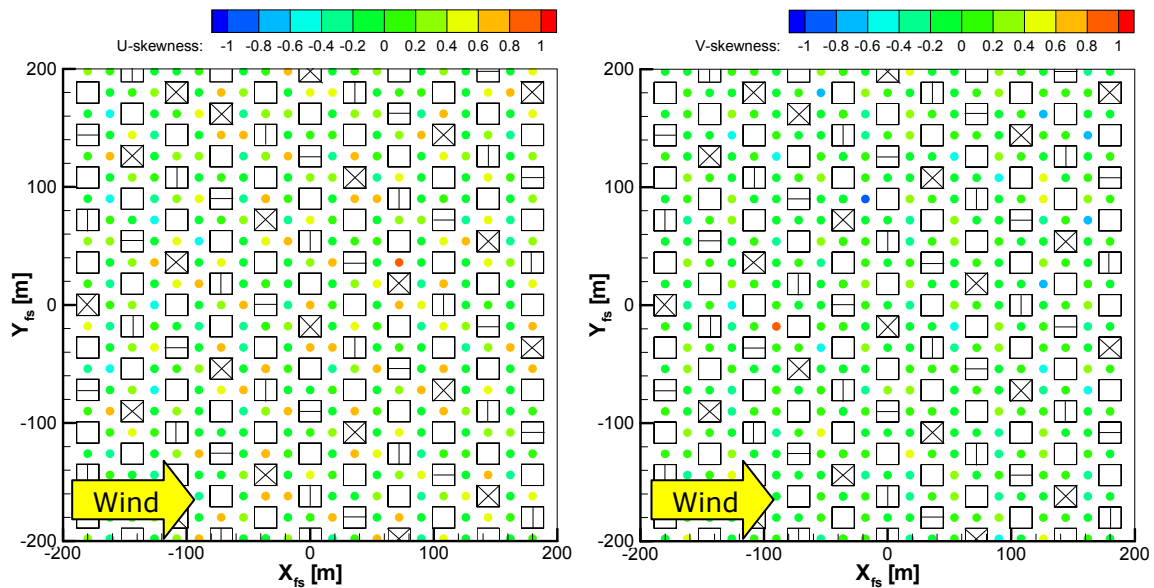


Abbildung 7-7: Schiefe der Geschwindigkeitsverteilung der U- Komponente (links) und der V- Komponente (rechts) in 2 m Höhe der stark idealisierten urbanen Rauigkeit, Koordinaten im Naturmaßstab.

Die folgende Abbildung 7-8 zeigt die Geschwindigkeitsverteilung der V-Komponente für einen Messort innerhalb der Straßenschlucht in 2 m Höhe in Michel-Stadt (roter Ring in Abbildung 7-6). Bereits die ermittelte Schiefe von -0.486 gibt einen Hinweis auf die Form der Verteilung, die eindeutig von der gaußverteilten Verteilung abweicht. Es ist anzunehmen, dass der arithmetische Mittelwert nicht die am häufigsten gemessene Windgeschwindigkeit angibt. Dies wird durch die dargestellte Geschwindigkeitsverteilung bestätigt.

Dagegen wurde an einem anderen Messort (schwarzer Ring in Abbildung 7-6) eine Schiefe von nur -0.036 berechnet. Erst die Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung (Abbildung 7-9) veranschaulicht die dort gemessene bimodale Verteilung, da die Schiefe kein Maß für den Verteilungsmodus ist. Die Strömung bevorzugt zwei Strömungsregimes, wobei das arithmetische Mittel nur auf eine Windgeschwindigkeit von ca. 0 m/s schließen lässt. Daher ist eine Analyse der Form der Geschwindigkeitsverteilungen nötig.

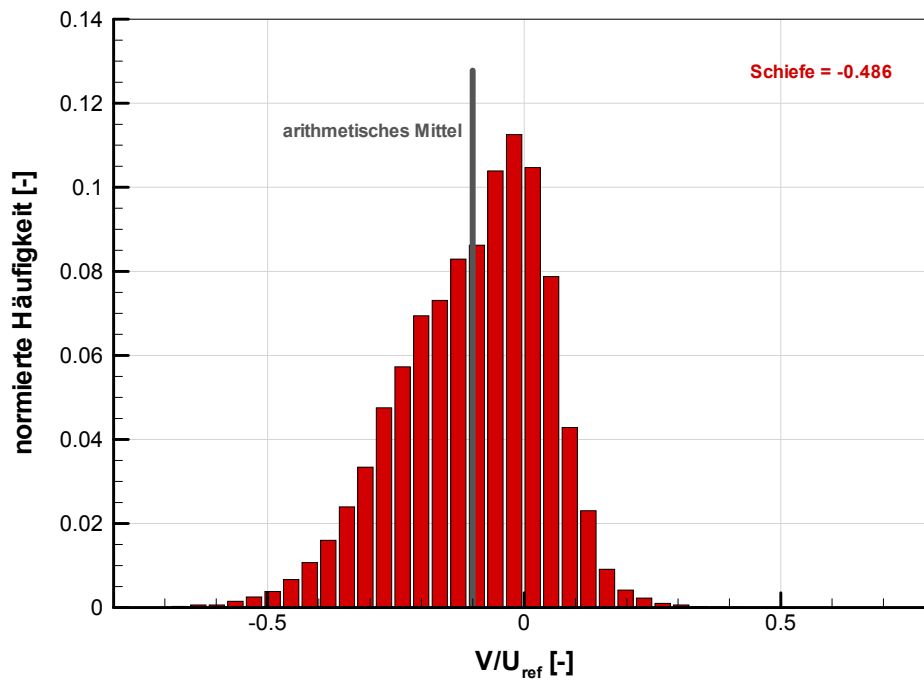


Abbildung 7-8: Geschwindigkeitsverteilung der V-Komponente mit arithmetischem Mittelwert und der Schiefe, gemessen innerhalb einer Straßenschlucht (roter Ring in Abbildung 7-6) in 2 m Höhe von Michel-Stadt mit Spitzdach.

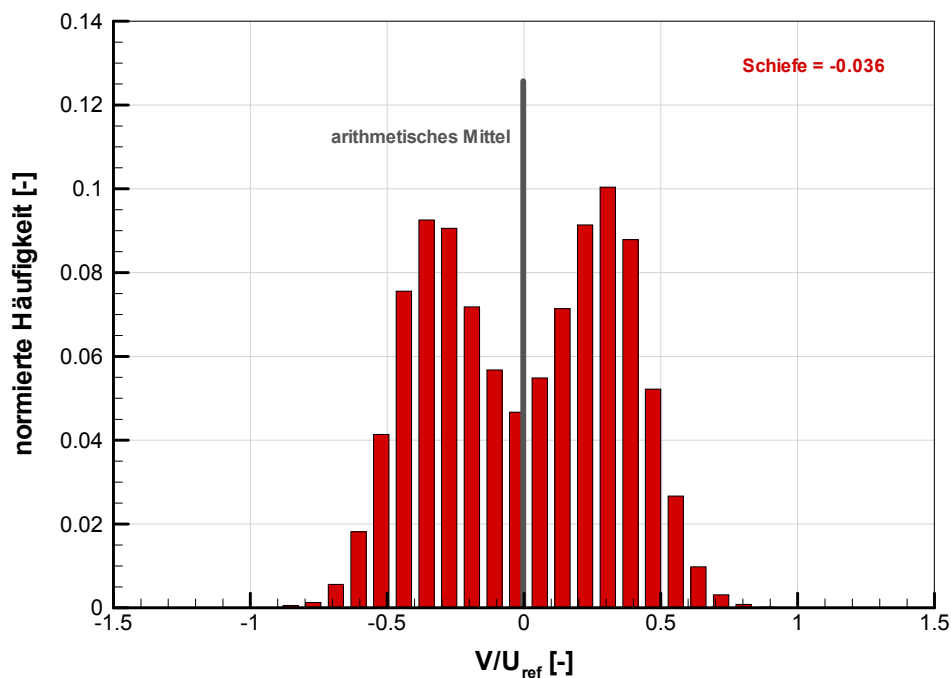


Abbildung 7-9: Geschwindigkeitsverteilung der V-Komponente mit arithmetischem Mittelwert und der Schiefe, gemessen innerhalb einer Straßenschlucht (schwarzer Ring in Abbildung 7-6) in 2 m Höhe von Michel-Stadt mit Flachdach.

Zur weiteren Beurteilung der Geschwindigkeitsverteilung wurde daher zusätzlich die Kurtosis (auch Wölbung, engl. flatness) analysiert, die ein Maß für die Steilheit der Geschwindigkeitsverteilung ist. Ist die Verteilung spitzer bzw. abgeflachter als eine Normalverteilung, so ist die Kurtosis positiv bzw. negativ. Die Kurtosis der Windkomponente u wird nach Gleichung 7.2 berechnet. Es handelt sich wie bei der Schiefe um eine dimensionslose Kennzahl. Die Normalverteilung besitzt eine Kurtosis von null, gleichverteilte Werte haben eine Kurtosis von -1.2. Weist eine Verteilung eine hohe negative Kurtosis ($\lesssim -0.8$) auf, so könnte dies ein Hinweis auf eine bimodale Verteilung sein.

$$flatness = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{u_i - \bar{u}}{\sigma} \right)^4 - 3 \quad 7.2$$

Tabelle 7-1 gibt eine Übersicht über die prozentuale Anzahl der Messorte in der Michel-Stadt und im Würfelfeld der idealisierten urbanen, die eine normalverteilte, schiefe oder bimodale Geschwindigkeitsverteilung für die Windkomponenten U und V aufweisen. Die Klassifizierung der Geschwindigkeitsverteilungen erfolgte über folgende Bedingungen:

- Normalverteilung: $-0.2 \leq skewness \leq +0.2$ und $-0.4 \leq flatness \leq +0.4$
- schiefe Verteilung: $-0.2 > skewness > +0.2$
- bimodale Verteilung: Analyse der Form der Verteilung

Die Analyse der Geschwindigkeitsverteilungen im Würfelfeld ergibt sowohl für die U - als auch für die V -Windkomponente bei einem Viertel der Messpunkte bimodale Verteilungen. Die Messpunkte unmittelbar vor einem Würfel weisen fast ausnahmslos eine bimodale Verteilung für die U -Komponente auf, während die Verteilung der V -Komponente direkt hinter einem Würfel bimodal verteilt ist. Dies bedeutet, dass die Strömung um die Würfel die charakteristischen Merkmale einer Strömung um einen isolierten Würfel aufweist. Unabhängig von der jeweiligen Dachform bildet sich vor dem Würfel ein Frontwirbel aus, wodurch in Bodennähe Windgeschwindigkeiten in entgegengesetzter Richtung zur Hauptströmung auftreten. Der Messpunkt hinter dem Würfel liegt im Bereich des Rezirkulationsbereiches, in dem die Strömung von der seitlichen Umströmung des Würfels beeinflusst wird. Alle anderen gemessenen Geschwindigkeitsverteilungen sind unimodal

bzw. normalverteilt. Für das verwendete Messraster ist die hohe Anzahl an schiefen Verteilungen der U-Komponente von 52 % dadurch zu erklären, dass nahezu alle bimodalen Verteilungen im Gegensatz zur V-Komponente nicht symmetrisch verteilt sind und so ebenfalls in diese Kategorie fallen.

Die beiden Konfigurationen der Michel-Stadt unterscheiden sich bezüglich der Anzahl an schiefen bzw. bimodalen Verteilungen kaum. Schiefe Verteilungen treten in dieser urbanen Komplexität mit einer Häufigkeit von 60 % auf, so dass für über die Hälfte der Messpunkte die größte Häufigkeit der Windgeschwindigkeit vom arithmetischen Mittel abweichen kann. Die Anzahl an Normalverteilungen der Geschwindigkeitskomponenten für die Michel-Stadt mit Spitzdach liegen mit 15 – 20 % in der gleichen Größenordnung wie im Würfelfeld. Dies könnte auf eine Homogenisierung der Strömung durch die erhöhte Turbulenz, die Spitzdächer hervorrufen, hindeuten. Bimodale Verteilungen sind dagegen für beide Konfigurationen von Michel-Stadt nur bei 5 – 8 % der Messpunkte zu finden.

Wird das Kriterium für eine schiefe Verteilung auf $-0.3 > skewness > +0.3$ gesetzt, so verringert sich die Anzahl für die Geschwindigkeitskomponenten aller Komplexitätsstufen um 15 %.

Tabelle 7-1: Anzahl der Messorte im Würfelfeld und in der Michel-Stadt mit einer normalverteilten, schiefen oder bimodalen Verteilung der U- und V-Windkomponente in 2 m Höhe (Naturmaßstab), in Klammern: Anzahl der Messorte nur in Straßenmitte.

Verteilung	Anzahl der Messorte [%]		
	normalverteilt	schief	bimodal
Würfelfeld (Komplexität 2)			
U-Windkomponente	15	52	28
V-Windkomponente	21	27	21
Michel-Stadt mit Flachdach (Komplexität 3-1)			
U-Windkomponente	7 (7)	64 (62)	5
V-Windkomponente	5 (7)	62 (64)	6
Michel-Stadt mit Spitzdach (Komplexität 3-2)			
U-Windkomponente	16 (18)	62 (64)	7
V-Windkomponente	20 (19)	56 (64)	8

Für die Michel-Stadt mit Flachdach liegen ebenfalls räumlich hochaufgelöste Messungen in 9 m (halbe Gebäudehöhe) und 18.2 m (Dachniveau) vor, so dass das vertikale Verhalten der Geschwindigkeitsverteilungen der Windkomponenten hier ebenfalls bestimmt werden konnte. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-2 dargestellt. Es ist festzustellen, dass sich die Klassifizierung der Verteilungsformen in den beiden Höhen bis auf die Anzahl an schiefen Verteilungen der U-Windkomponente kaum unterscheidet. Während auf halber Gebäudehöhe 40 % der Messorte eine schiefe Verteilung zeigen, sind es auf Dachniveau 70 %. Dies verdeutlicht den Einfluss der unterschiedlichen Gebäudehöhen der Michel-Stadt. Für die V-Windkomponente in 18.2 m Höhe ist ersichtlich, dass fast 50 % der Verteilungen nicht von der hier gewählten Klassifizierung erfasst werden, wohingegen für die Messungen in 9 m Höhe 35 % und in 2 m Höhe nur 25 % aus den Kategorien fallen. Dies deutet auf breite, symmetrische Geschwindigkeitsverteilungen hin. Der Vergleich zu den Verteilungsformen in 2 m Höhe zeigt außerdem, dass in Bodennähe für beide Windkomponenten im Mittel um ein Drittel weniger Normalverteilungen als in den beiden anderen Höhen zu finden sind. Dagegen erhöht sich die Anzahl an schiefen Verteilungen in 2 m Höhe um ca. 16 %. Auch die höhere Anzahl der bimodalen Verteilungen lässt auf die Komplexität der Strömungsverhältnisse in direkter Bodennähe schließen.

Tabelle 7-2: Anzahl der Messorte in der Michel-Stadt mit Flachdach mit einer normalverteilten, schiefen oder bimodalen Verteilung der U- und V-Windkomponente in 2 m, 9 m und 18.2 m Höhe (Naturmaßstab).

Verteilung	Anzahl der Messorte [%]		
	normalverteilt	schief	bimodal
Michel-Stadt mit Flachdach 2 m Höhe			
U-Windkomponente	7	64	5
V-Windkomponente	5	62	6
Michel-Stadt mit Flachdach 9 m Höhe			
U-Windkomponente	22	40	1
V-Windkomponente	17	44	4
Michel-Stadt mit Flachdach 18 m Höhe			
U-Windkomponente	14	70	0
V-Windkomponente	18	34	0

Diese Ergebnisse verdeutlichen die Probleme bei einem reinen Mittelwert-Vergleich für eine Modellvalidierung für Strömungs- und Ausbreitungsvorgänge innerhalb urbaner Rauhigkeiten. Wie die Messungen aus Michel-Stadt gezeigt haben, tritt eine Normalverteilung der Geschwindigkeitskomponenten nur in einem Bereich von 5 – 20 % auf. Besonders in Bodennähe treten komplexe Strömungsmuster mit bimodalen Geschwindigkeitsverteilungen auf, so dass der Mittelwert keine Aussagekraft über die Strömungsverhältnisse hat. Werden bei einer Validierung nur Mittelwerte zur Verfügung gestellt, können mögliche Abweichungen nicht erklärt werden. Bei LES-Modellen kann ein direkter Vergleich der Geschwindigkeitsverteilungen erfolgen, der hilfreich bei der Suche nach den Ursachen dieser Abweichungen sein kann.

7.1.3 Ensemble-Analyse der Zeitserien

Durch eine Ensemble-Analyse der Zeitserien lassen sich die Turbulenzeigenschaften der unterschiedlichen Komplexitätsstufen charakterisieren. Hierbei werden die Zeitserien in unterschiedlich große Ensemble-Größen zerlegt, so dass die Streubreite der einzelnen Mittelwerte einer Ensemble-Größe ermittelt werden kann. Für die folgende Analyse wurde ein Zeitschritt von 20 Einheiten gewählt, der in einer Zeitserie um 5 Einheiten verschoben wird. Hierbei handelt es sich um die mit der Windgeschwindigkeit und Referenzlänge skalierte Zeit (Gleichung 4.2), so dass ein Vergleich zwischen den verschiedenen Modellkomplexitäten möglich ist. Die Ensemble-Größe wird daraufhin um 20 Einheiten bis auf die Länge der gesamten Zeitserie erhöht. Die gemessenen Zeitserien der beiden urbanen Modelle umfassen folgende Messzeiten:

Tabelle 7-3: Länge der gemessenen Zeitserien im Würfelfeld und in der Michel-Stadt sowohl im Modell- als auch im Naturmaßstab.

	Maßstab	Messzeit (Modell) [s]	Messzeit (Natur) [h]
Würfelfeld	1:225	200	12.5
Michel-Stadt	1:225	270	17

Die Streubreite der ersten Ensemble-Größe gibt Hinweise auf die Geschwindigkeitsschwankungen der Windkomponenten bzw. die Turbulenzintensität an einem Messpunkt. Mit Hilfe der Ensemble-Analyse lässt sich weiterhin die Abklingrate der Streubreite mit

zunehmender Ensemble-Größe ermitteln, die Informationen über die Art der Turbulenz liefert. Weist eine Zeitserie ein schnelles Abklingen der Streubreite auf, so lässt dies auf eine hochfrequente Turbulenz schließen, da die Schwankungen bereits bei geringen Ensemble-Größen vom Mittelwert erfasst werden. Ein langsames Abklingen deutet dagegen auf niederfrequente Geschwindigkeitsschwankungen hin. Es wurden die Ensemble-Größen der einzelnen Zeitserien ermittelt, bei der die Streubreite der ersten Ensemble-Größe auf 10 % abgeklungen ist (*ESI0*). Als Beispiel wird in Abbildung 7-10 die Ensemble-Analyse von vier Zeitserien aus einem Kreuzungsbereich (roter Ring in Abbildung 7-11) in Michel-Stadt gezeigt. Es lassen sich sowohl unterschiedliche Streubreiten als auch variierende Abklingraten erkennen.

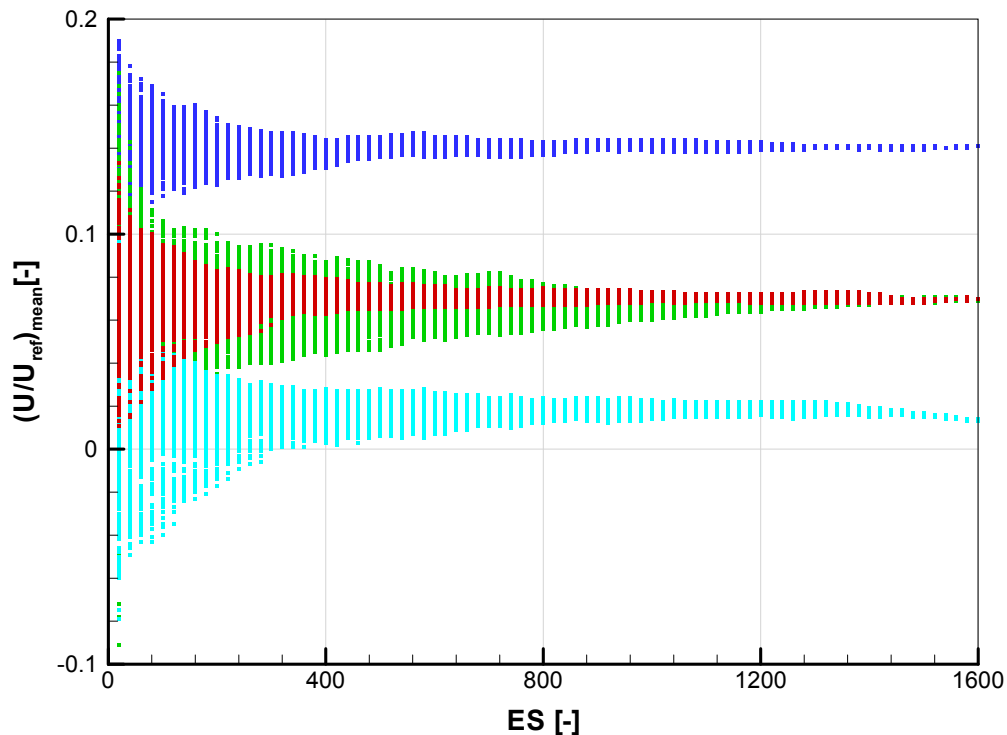


Abbildung 7-10: Ensemble-Analyse von vier Zeitserien der U-Windkomponente aus einem Kreuzungsbereich (roter Ring in Abbildung 7-11) in der Michel-Stadt mit Flachdach in 2 m Höhe (Naturmaßstab).

In Abbildung 7-11 ist die Streubreite der ersten Ensemble-Größe der Windkomponenten in der Michel-Stadt mit Flachdach dargestellt. Abbildung 7-12 zeigt die räumliche Verteilung der Ensemble-Größe, bei der die erste Streubreite auf 10 % abgeklungen ist.

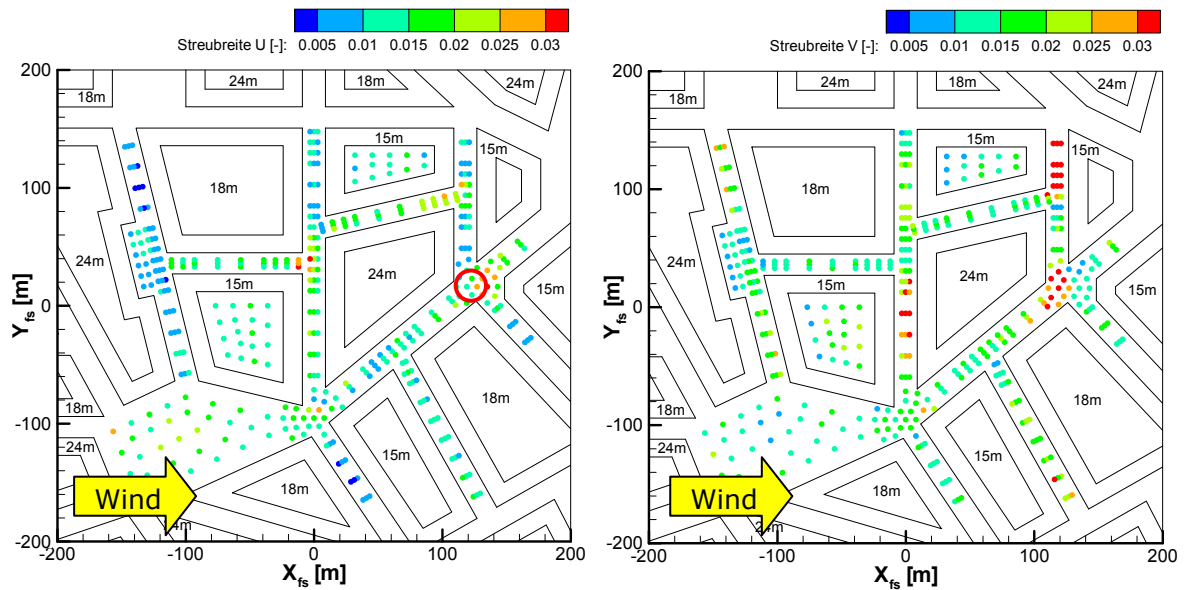


Abbildung 7-11: Streubreite der ersten Ensemble-Größe der U- Windkomponente (links) und der V-Windkomponente (rechts) in der Michel-Stadt mit Flachdach in 2 m Höhe, Koordinaten im Naturmaßstab.

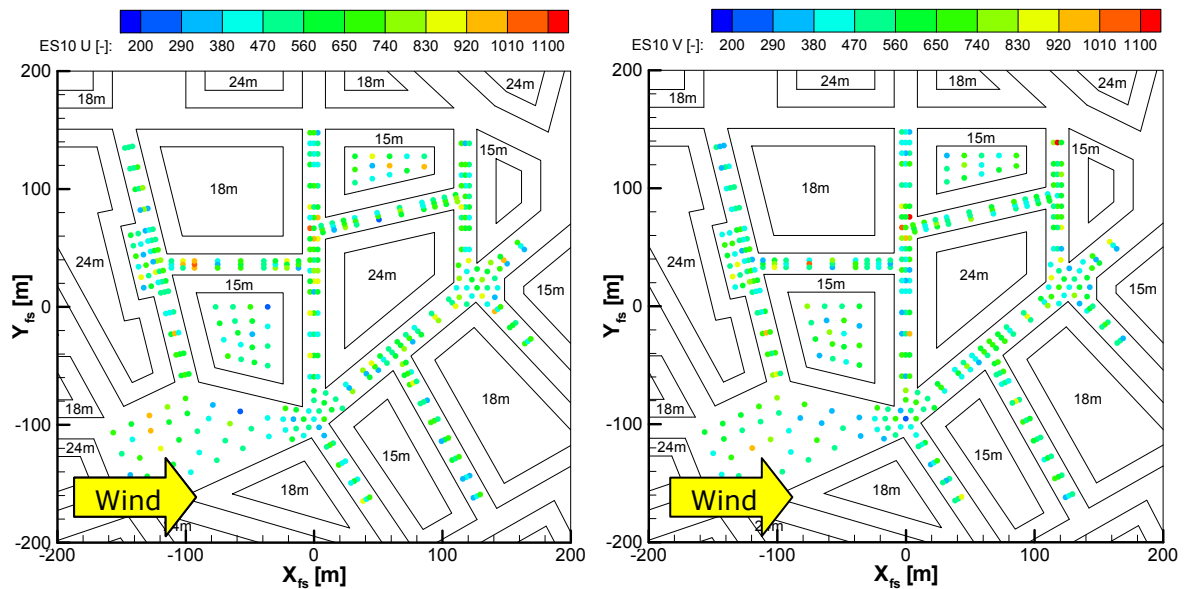


Abbildung 7-12: Ensemble-Größe ES10 der U- Windkomponente (links) und der V-Windkomponente (rechts), bei der die Streubreite auf 10 % abgeklungen ist, in der Michel-Stadt mit Flachdach in 2 m Höhe, Koordinaten im Naturmaßstab.

Es sind sowohl für die U- als auch für die V-Windkomponente Bereiche mit einer niedrigen bzw. mit einer hohen Streubreite zu erkennen (Abbildung 7-11). Die Straßenzüge bzw. Abschnitte einer Straßenschlucht weisen meist ähnliche Streubreiten auf. Die Zeitserien in Michel-Stadt umfassen eine Ensemble-Größe von maximal 1600 Einheiten. Die Streubreite der ersten Ensemble-Größe ist im Mittel bei 550 bis 600 Einheiten sowohl für die U- als auch für die V-Windkomponente auf 10 % abgeklungen (Abbildung 7-12). Die räumliche Verteilung hoher bzw. niedriger Abklingraten folgt im Gegensatz zur ersten Streubreite keinem erkennbaren Muster.

In Abbildung 7-13 wurde die Häufigkeit der ermittelten Abklingrate der U-Windkomponente für die Michel-Stadt mit Flach- und Spitzdach aufgetragen. Die gleiche Analyse wurde für alle Messpunkte, die nur in Straßenmitte liegen, durchgeführt. Sie ist neben der Häufigkeitsverteilung für die V-Windkomponente im Anhang D zu finden. Sie zeigen keine signifikanten Unterschiede zu den Verteilungen in der hier dargestellten Abbildung. Die Häufigkeitsverteilungen für die unterschiedlichen Dachformen in Michel-Stadt sind einander sehr ähnlich. Die geringste Ensemble-Größe für eine Abklingrate von 10 % liegt bei ca. 300 Einheiten, die größte bei ca. 1100 Einheiten. Außerdem ist die Verteilung von *ESI0* für die Zeitserien aus der stark idealisierten urbanen Rauigkeit (Würfel-feld) zu sehen. Im Gegensatz zur Michel-Stadt handelt es sich um eine schmalere Verteilung, die sich von ca. 200 bis 600 Einheiten der Ensemble-Größe erstreckt. Die anfängliche Streubreite klingt somit im Mittel bereits nach einer Ensemble-Größe von 350 Einheiten auf 10 % ab. Eine Ursache mag sicherlich in der Wahl der Messpunkte liegen, dennoch ist ein deutlicher Unterschied zu den Ergebnissen aus Michel-Stadt zu erkennen. Im Würfel-feld weisen die niedrigen Abklingraten darauf hin, dass die Turbulenz im Mittel eine höhere Frequenz aufweist, als sie in der Michel-Stadt zu beobachten ist. Diese wird durch die kompakteren Rauigkeiten (Würfel) hervorgerufen, während innerhalb der größeren Gebäuderinge in der Michel-Stadt die Turbulenz niederfrequenter ist.

Eine Ensemble-Analyse kann auch bei der Validierung eines numerischen Modells angewendet werden. Die Voraussetzung hierzu ist, dass die Zeitserien eine ähnliche Länge wie die Zeitserien im Datensatz aufweisen und mit den gleichen Kriterien analysiert werden. Daraufhin können die Zeitserien direkt bzw. die ermittelten Abklingraten miteinander verglichen und validiert werden.

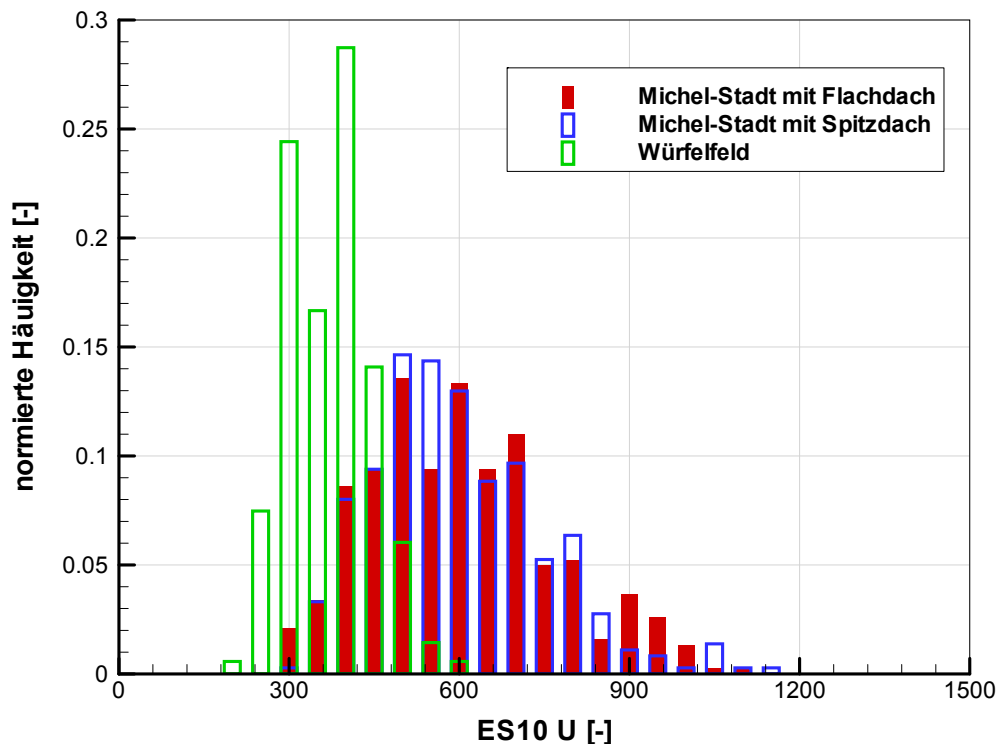


Abbildung 7-13: Verteilung der Ensemble-Größe ES10, bei der die Streubreite auf 10 % abgeklungen ist, für die Zeitserien der U-Windkomponente im Würfelfeld und in der Michel-Stadt in 2 m Höhe (Naturmaßstab).

7.2 Einfluss der Dachform auf die Strömungsphänomene

Aufgrund der Gitterweite von numerischen Modellen ist es häufig nur eingeschränkt bzw. gar nicht möglich, ein Spitzdach zu modellieren, so dass häufig auf halber Dachhöhe ein Flachdach angenommen wird. Hierbei stellt sich die Frage, wie groß der Einfluss einer solchen Annahme auf die Strömungsphänomene innerhalb und oberhalb der städtischen Rauigkeitsstruktur ist, und wie die Abschätzung der daraus erfolgenden Unsicherheit bei einer Validierung erfolgen kann.

Die Geometrie der Michel-Stadt liegt in zwei Komplexitätsstufen vor, so dass sich der Einfluss einer veränderten Dachform auf die Strömung noch detaillierter als bisher geschehen analysieren lässt. Für die Auswertung werden die Messungen in drei verschiedene Bereiche eingeteilt: Analyse der vertikalen Profile, der horizontalen Ebene über Dachniveau in 30.2 m Höhe und der horizontalen Ebene in 2 m Höhe innerhalb der Straßenschluchten.

Die Ergebnisse von Michel-Stadt werden zudem in die Resultate verschiedener Studien eingeordnet.

7.2.1 Mittlere Strömungseigenschaften

Streudiagramme vermitteln einen ersten Eindruck über den Einfluss der Dachform auf die Strömungsphänomene in Michel-Stadt. Im Streudiagramm der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} für alle vertikalen Profile liegen nahezu alle Messwerte auf der Regressionsgeraden, während für die Standardabweichung U_{rms}/U_{ref} Abweichungen zu sehen sind (Abbildung 7-14).

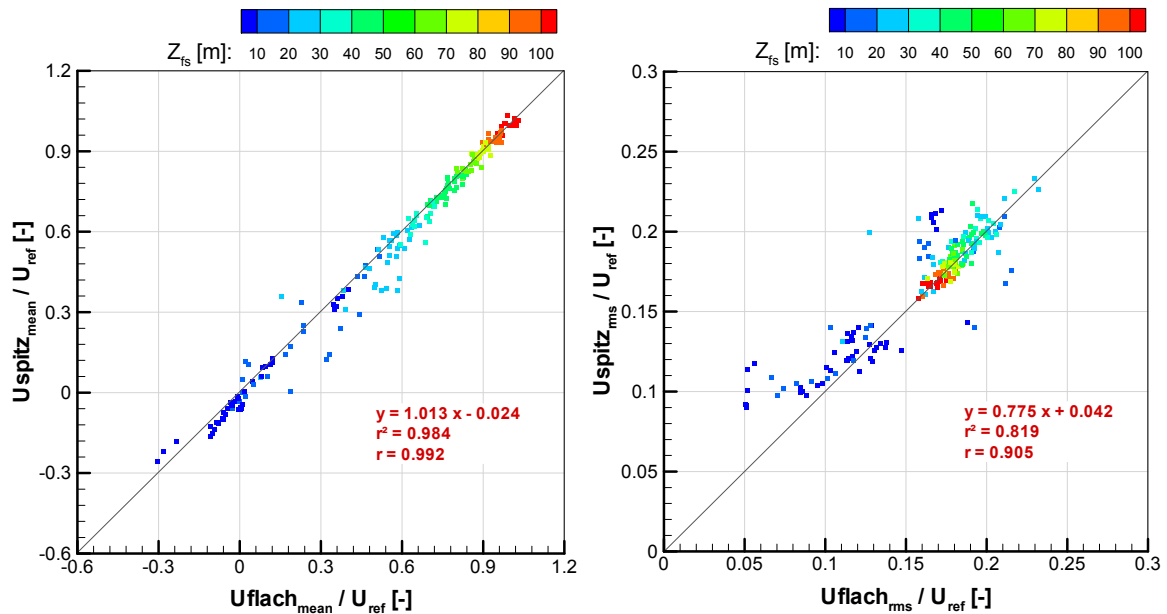


Abbildung 7-14: Streudiagramm der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} (links) und ihre Standardabweichung U_{rms}/U_{ref} (rechts) für alle vertikalen Profile.

Neben der Regressionsgeraden wurden das Bestimmtheitsmaß r^2 und der Korrelationskoeffizient r für verschiedene Variablen für alle Messungen berechnet (siehe Anhang E). Für $r = 0$ besteht kein Zusammenhang zwischen den Messwerten und das Streudiagramm zeigt eine kreisförmige Punktwolke. Nähert sich $r \rightarrow 1$, ist der Streubereich der Messwerte gering, bis alle Werte bei $r = 1$ auf einer Geraden liegen. Das Bestimmtheitsmaß gibt die Güte der Regressionsgeraden an.

In Anhang E ist eine Übersicht über die Korrelationskoeffizienten aller Variablen zu sehen. Die Messungen der vertikalen Profile zeigen eine hohe Korrelation zwischen 0.8 bis 0.9. Innerhalb der Rauigkeitsschicht treten bei U_{mean}/U_{ref} und V_{mean}/U_{ref} geringe Unterschiede auf Dachniveau auf. Zwei ausgewählte vertikale Profile für U_{mean}/U_{ref} und U_{rms}/U_{ref} verdeutlichen dies in Abbildung 7-15.

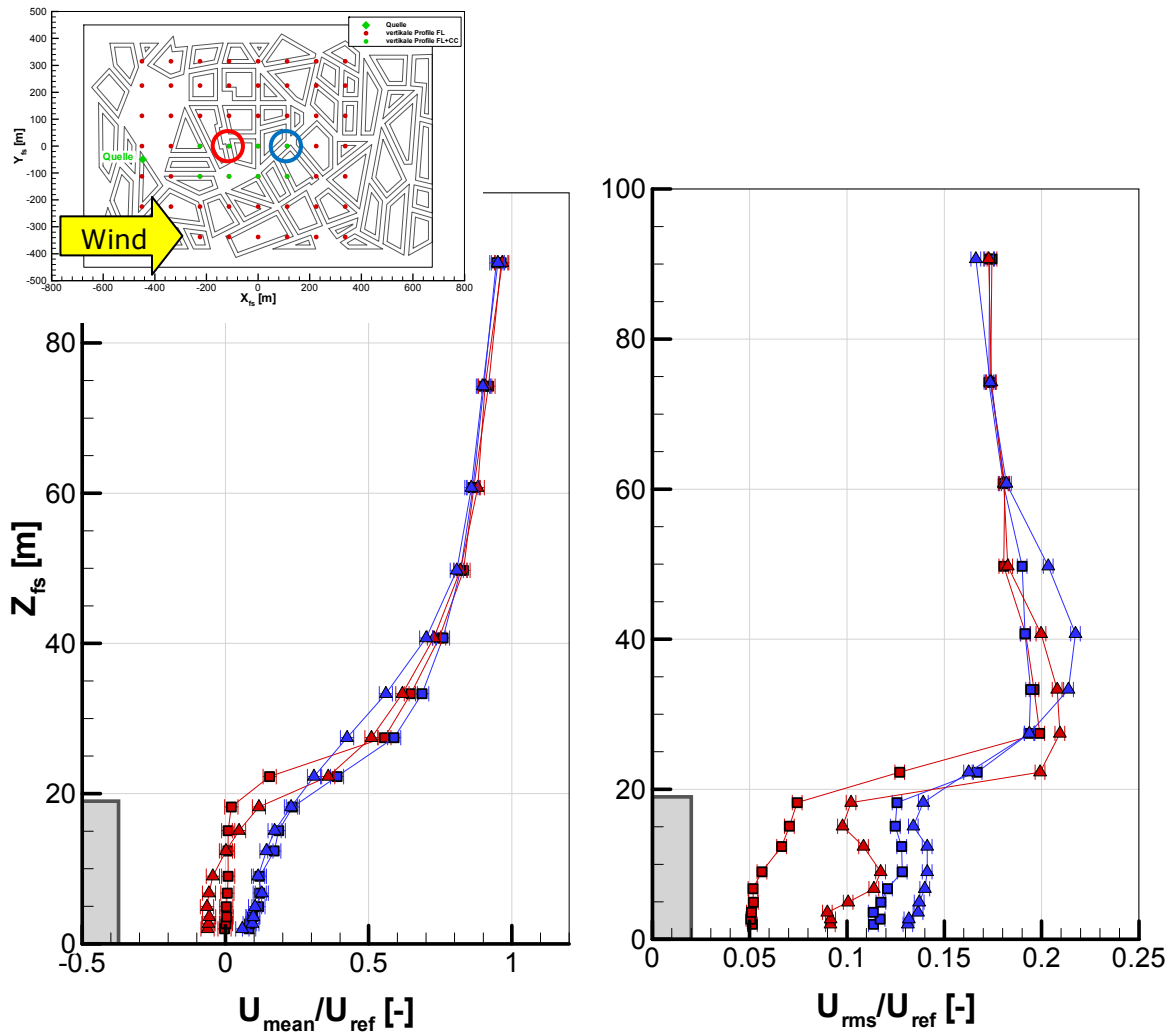


Abbildung 7-15: Vertikale Profile der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} (links) und ihre Standardabweichung U_{rms}/U_{ref} (rechts), gemessen in der Michel-Stadt mit Flachdach (Quadrate) und Spitzdach (Dreiecke) an zwei verschiedenen Messorten, grauer Balken: mittlere Gebäudehöhe.

In den vertikalen Profilen der mittleren Windgeschwindigkeit ist der Effekt der unterschiedlichen Dachform eindeutig auf Dachniveau zu erkennen. Die Strömung über Flach-

dächer weist größere Gradienten in diesem Bereich auf als bei der Spitzdachkonfiguration. Bei der Flachdach-Konfiguration sind innerhalb der Straßenschluchten geringere Werte für U_{rms}/U_{ref} und V_{rms}/U_{ref} festzustellen als bei der mit Spitzdächern versehenen Michel-Stadt. Eine Änderung der Dachform bewirkt somit vor allem in Bodennähe große Unterschiede für die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit. Die Spitzdächer produzieren höhere Windfluktuationen und Turbulenzintensitäten, die auch ein geringeres integrales Längenmaß L_{UX} hervorrufen. Der erhöhte Impuls wird in die Straßenschluchten hinein bis in eine Höhe von 2 m transportiert.

Die Farbgebung der Messpunkte in Abbildung 7-14 kennzeichnet zudem die Messhöhe. Aus beiden vorherigen Abbildungen ist ersichtlich, dass die Strömung ab einer Höhe von ca. 60 m kaum von der unterschiedlichen Dachform beeinflusst wird. In der dreifachen Gebäudehöhe endet die Rauigkeitsschicht der städtischen Grenzschicht. Die Ausprägung der Rauigkeitsschicht wird von der Komplexität der urbanen Rauigkeit beeinflusst. Schultz (2008) beobachtete bei ihren Messungen in unterschiedlich komplexen Würfelfeldern eine Dicke der Rauigkeitsschicht von 1.5- bis zweifacher maximaler Gebäudehöhe. Rafailidis (1997) stellte einen Einfluss der Gebäude auf die Strömung oberhalb von 2D-Straßenschluchten bis in zwei- bis dreifacher Gebäudehöhe fest. Die Ergebnisse aus einer Windkanalstudie über die detailgetreue Modellierung des Stadtgebietes von Basel zeigen einen Einfluss der Gebäude bis in die dreifache Gebäudehöhe (Feddersen, 2005). Dies stimmt mit den Ergebnissen aus der Michel-Stadt überein, so dass hier eine realitätsnahe Ausprägung der Rauigkeitsschicht festzustellen ist.

Der Vergleich der Messungen in der *horizontalen Ebene in 30.2 m* zeigt, bedingt durch die unterschiedliche Dachform, in dieser Höhe die größten Unterschiede im Strömungsmuster. Dem Streudiagramm (Abbildung 7-16) sowie der Abbildung 7-17 ist zu entnehmen, dass bei der Flachdach-Konfiguration weitaus höhere mittlere Windgeschwindigkeiten in dieser Höhe auftreten. Die Bestimmtheitsmaße der verschiedenen mittleren Strömungsparameter liegen folglich nur zwischen 0.2 und 0.5 (Anhang E). Der geringste Korrelationskoeffizient ist für U_{mean}/U_{ref} und das integrale Längenmaß L_{UX} festzustellen.

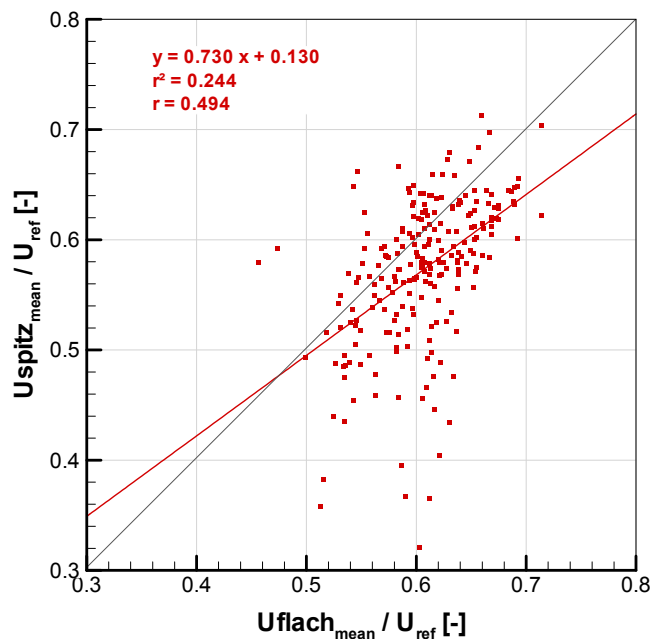


Abbildung 7-16: Streudiagramm der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} für die horizontale Ebene in 30.2 m Höhe.

Abbildung 7-17 zeigt die prozentuale Differenz der mittleren Windgeschwindigkeit zwischen den beiden Dachkonfigurationen. Die Abweichungen wurden auf die Windgeschwindigkeit am jeweiligen Ort der Michel-Stadt mit Flachdach bezogen und wie folgt berechnet:

$$(U_{flach_{mean}} - U_{spitz_{mean}}) / U_{flach_{mean}} \cdot 100\%$$

Nur in zwei kleinen Regionen wird die Strömung durch die Spitzdächer um ca. 20 % gegenüber der Flachdachkonfiguration beschleunigt. Die Überströmung der städtischen Rauigkeit mit Flachdach ist weitaus ungestörter in der Hauptwindrichtung als bei den Gebäuden mit Spitzdach, wodurch um 80 % höhere mittlere Windgeschwindigkeiten und niedrigere Turbulenzintensitäten hervorgerufen werden.

Unter anderem Rafailidis (1997) und Kastner-Klein et al. (2004) untersuchten 2D-Straßenschluchten, um den unterschiedlichen Einfluss von Spitz- bzw. Flachdach auf die Strömung oberhalb der Bebauung zu untersuchen. Rafailidis (1997) stellte fest, dass der Wind auf Dachniveau nur wenig von der Gebäudedichte, aber stark von der Dachform be-

einflusst wird. Bei den mit Spitzdach versehenen Gebäuden beobachtete er weitaus höhere Turbulenzintensitäten und geringere mittlere Windgeschwindigkeiten. Dieser Effekt wurde auch für die hier untersuchte Michel-Stadt festgestellt.

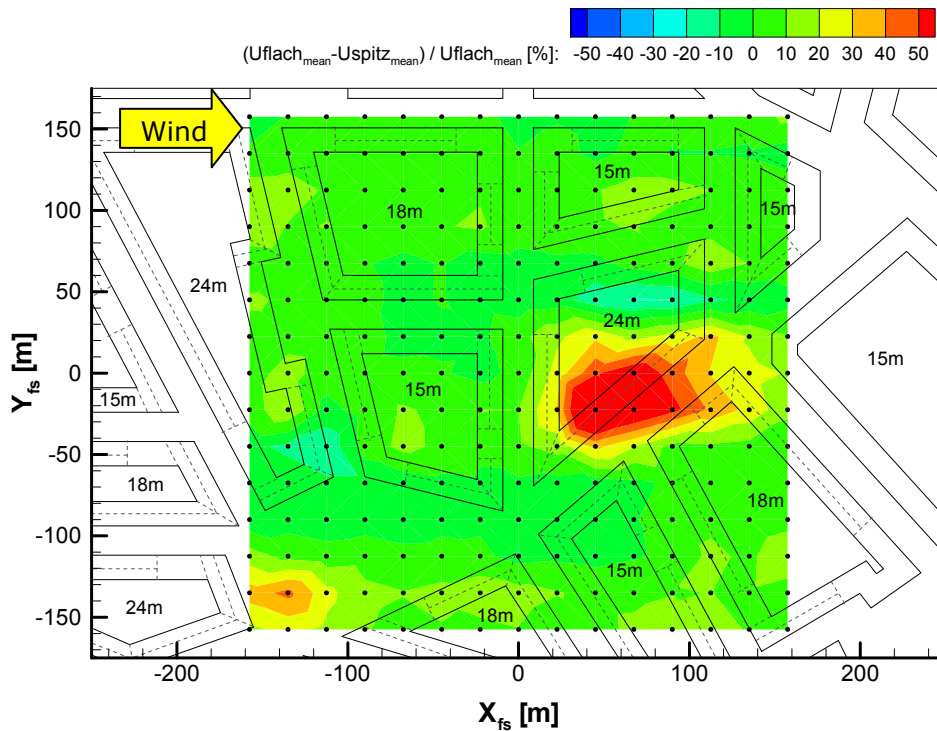


Abbildung 7-17: Prozentuale Differenz der Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} zwischen der Michel-Stadt mit Flach- und Spitzdach für die horizontale Ebene in 30.2 m Höhe.

Die Unterschiede im Strömungsverhalten auf Dachniveau wirken sich *innerhalb der Straßenschluchten* bis in 2 m Höhe aus, wie folgende Messungen in Michel-Stadt verdeutlichen. Abbildung 7-18 zeigt für die mittlere Windgeschwindigkeit der U-Komponente eine geringe Streubreite der Messwerte. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0.96. Die Standardabweichung für die Spitzdach-Konfiguration weist dagegen meist höhere Werte auf als für die Michel-Stadt mit Flachdach. Dies lässt im Mittel auf höhere Turbulenzintensitäten bei der Spitzdach-Konfiguration schließen.

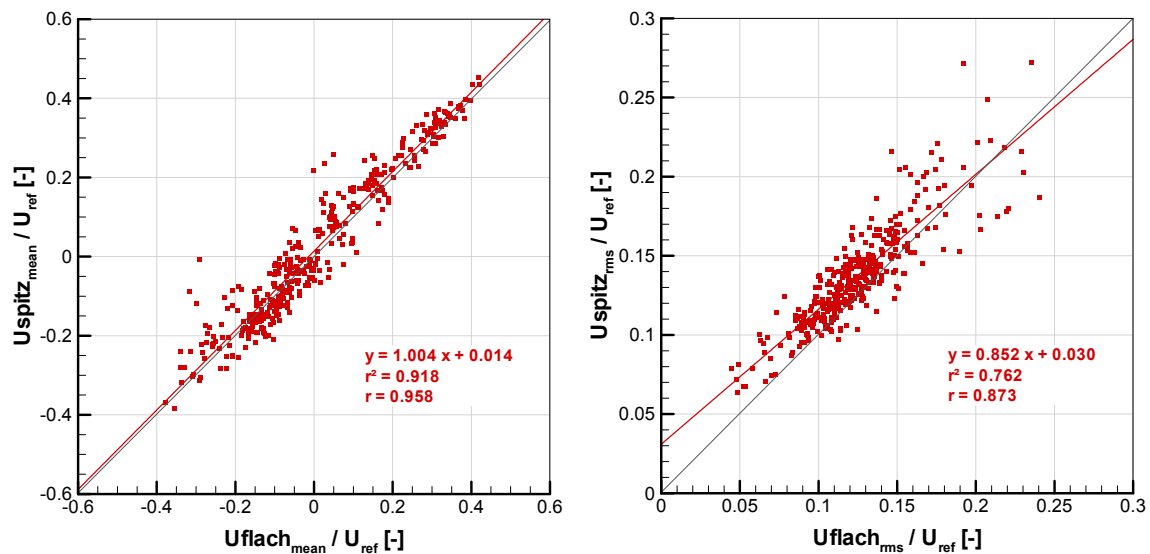


Abbildung 7-18: Streudiagramm der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} (links) und ihre Standardabweichung U_{rms}/U_{ref} (rechts) für alle Messungen innerhalb der Straßenschluchten in 2 m Höhe.

Da es von Interesse ist, an welchen Messorten der größte Einfluss der Dachform auf die Strömung auftritt, ist in Abbildung 7-19 die prozentuale Differenz der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} zwischen den beiden Dachkonfigurationen für alle Messorte dargestellt. Die Abweichungen wurden auf die Windgeschwindigkeit am jeweiligen Ort der Michel-Stadt mit Flachdach bezogen. Über große Bereiche hinweg liegen diese unter 10 %. In Kreuzungsbereichen bzw. innerhalb der Gebäuderinge können jedoch auch Abweichungen von über ± 50 % auftreten.

In Tabelle 7-4 ist ersichtlich, dass für die mittlere Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} lediglich 81 von 383 Messorte in Michel-Stadt eine Abweichung von weniger als ± 10 % in 2 m Höhe aufweisen. Diese Abweichung lässt sich für alle gemittelten Strömungsparameter nur für ein Viertel der Messpunkte feststellen. Somit ist bereits in den mittleren Strömungsbedingungen ersichtlich, dass die Dachform auf die Strömung innerhalb der Straßenschluchten einen erheblichen Einfluss hat. Bei der Modellierung eines Flach- statt Spitzdaches muss man bei ca. 75 % der Messpunkte Abweichungen von über 10 % erwarten.

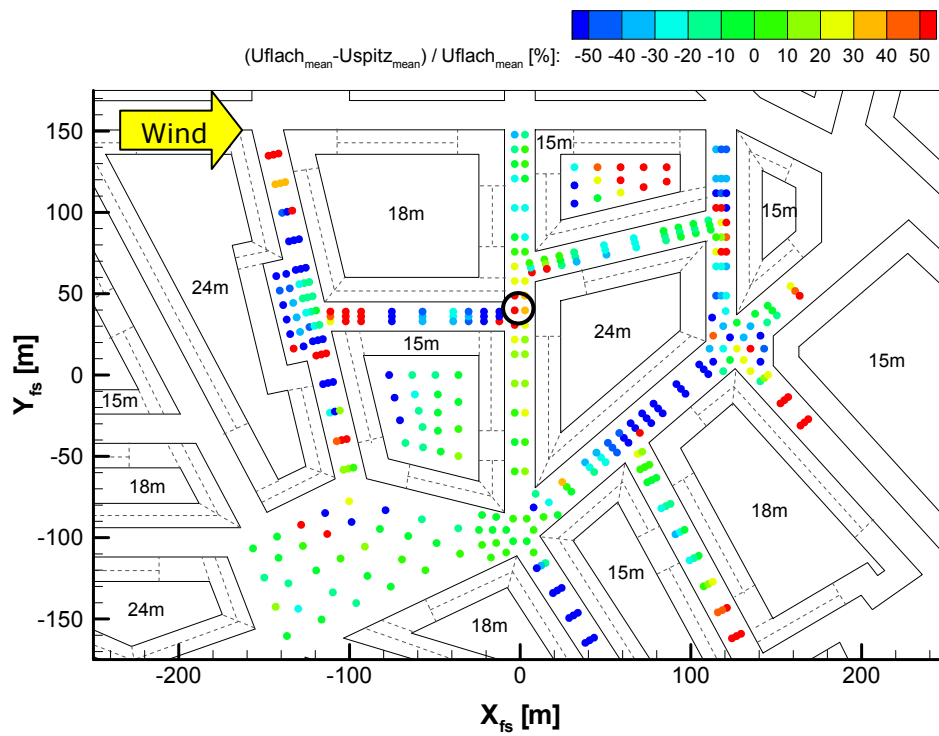


Abbildung 7-19: Prozentuale Differenz der Windgeschwindigkeit $U_{\text{mean}}/U_{\text{ref}}$ zwischen der Michel-Stadt mit Flach- und Spitzdach für die Messungen innerhalb der Straßenschluchten in 2 m Höhe.

Tabelle 7-4: Anzahl der Messorte in Michel-Stadt mit einer Abweichung von weniger als $\pm 10\%$ zwischen den Strömungsparametern der Flach- und Spitzdachkonfiguration, gemessen innerhalb der Straßenschluchten in 2m Höhe.

	Anzahl Messorte	Abweichung < $\pm 10\%$	in [%]
$U_{\text{mean}}/U_{\text{ref}}$	383	81	21
$V_{\text{mean}}/U_{\text{ref}}$	383	77	20
$U_{\text{rms}}/U_{\text{ref}}$	383	158	41
$V_{\text{rms}}/U_{\text{ref}}$	383	172	45
$U'V'_{\text{mean}}/U_{\text{ref}}^2$	383	39	10
Lux	383	57	15

7.2.2 Zeitserien-Analyse

Um Unterschiede in den Strömungsmustern erklären zu können, ist die Betrachtung der Mittelwerte nicht ausreichend. Daher wird ein ausgewählter Messort herausgegriffen und bezüglich seiner Geschwindigkeitsverteilung analysiert. Die in Abbildung 7-20 dargestellten Ergebnisse (schwarzer Ring in Abbildung 7-19) zeigen die Geschwindigkeitsverteilungen der U-Komponente für die Michel-Stadt mit Flach- bzw. Spitzdach. Die Mittelwerte haben eine hohe Abweichung, was durch die unterschiedliche Form der Häufigkeitsverteilung der gemessenen Windgeschwindigkeiten zustande kommt. Für beide Dachformen werden im Kreuzungsbereich positive sowie negative Windgeschwindigkeiten registriert. Für die Michel-Stadt mit Flachdach ist eine negative Windgeschwindigkeit vorherrschend, während positive Geschwindigkeiten nur mit einer geringen Häufigkeit auftreten. Es sind Ansätze einer bimodalen Verteilung ersichtlich. Bei der Spitzdachkonfiguration handelt es sich um eine ausgeprägte bimodale Verteilung, wobei eine positive Windgeschwindigkeit häufiger registriert wird.

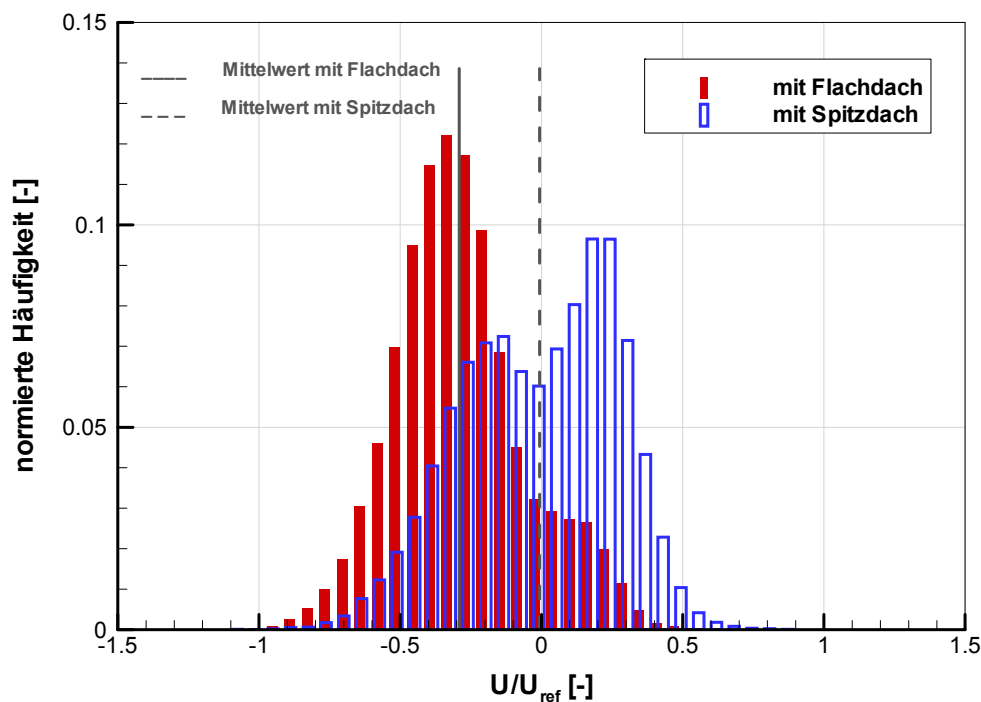


Abbildung 7-20: Geschwindigkeitsverteilung der U-Komponente für einen Messort (schwarzer Ring in Abbildung 7-19) in Michel-Stadt in 2 m Höhe mit Flach- und Spitzdach.

In Abbildung 7-21 sind die Verteilungen der Windrichtungen des UV-Windvektors in 2 m Höhe am gleichen Messort wie zuvor für beide Dachkonfigurationen zu sehen. Die Windrichtung wurde auf die Hauptwindrichtung der Anströmung (d.h. auf die Kanalausrichtung bzw. positive x-Richtung) bezogen, um einen Vergleich der Verteilungen unabhängig von der jeweiligen mittleren Windrichtung zu erhalten. Ähnlich wie bei den Geschwindigkeitsverteilungen sind große Unterschiede zu erkennen. Während für die Michel-Stadt mit Flachdach meist eine Windrichtung von ca. 155° bevorzugt wird, werden bei der Spitzdachkonfiguration zwei Windrichtungen, 35° und 140° , mit der nahezu gleichen auftretenden Häufigkeit registriert.

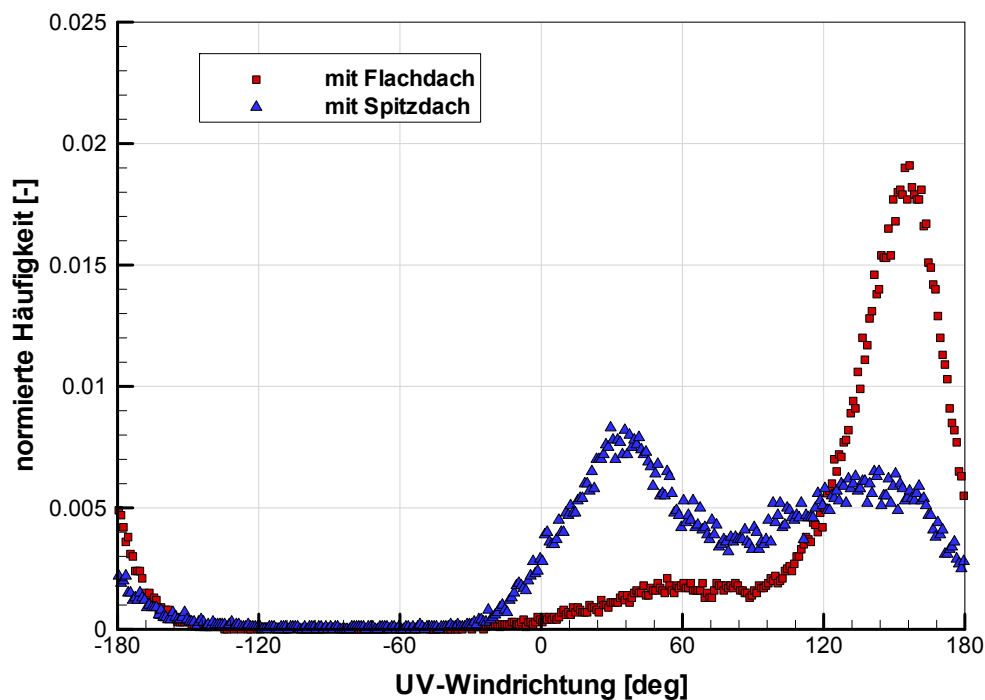


Abbildung 7-21: Verteilung der Windrichtung des UV-Windvektors für einen Messort (schwarzer Ring in Abbildung 7-19) in Michel-Stadt in 2 m Höhe mit Flach- und Spitzdach.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Dachform einen hohen Einfluss auf die unmittelbare Überströmung der städtischen Rauigkeit sowie auf die Strömung innerhalb der Straßenschluchten in einer Höhe von 2 m hat. Der höchste Einfluss ist auf Dachniveau zu finden, wo sich die geometrischen Unterschiede direkt auf die Strömungsphänomene auswirken. Hier entstehen durch einen Wechsel zwischen Flach- zu Spitzdach höhere Tur-

bulenzintensitäten und Ablenkungen von der Hauptwindrichtung. Diese können in der Michel-Stadt bis in eine Höhe von 2 m transportiert werden, so dass auch auf Straßenniveau unterschiedliche Strömungsregimes entstehen. Erst eine Analyse der Geschwindigkeitsverteilung und der Windrichtung des Windvektors bringen ein besseres Verständnis der unterschiedlichen Strömungsphänomene.

7.3 Einfluss der Dachform auf das Ausbreitungsverhalten

Neben Messungen der Strömungsverhältnisse liegen auch Konzentrationsmessungen für die Michel-Stadt mit Flachdach sowie mit Spitzdach vor. Durch die Wahl der Messpunkte wird ein möglicher Zusammenhang zwischen Strömungs- und Ausbreitungseigenschaften untersucht.

Da ein Einfluss der Dachform auf die Strömungsphänomene beobachtet wurde, ist es von Interesse, wie dieser sich auf das Ausbreitungsverhalten in der Michel-Stadt auswirkt.

Den *vertikalen Profilen* der mittleren Konzentration C_{mean}^* (Abbildung 7-22) ist zu entnehmen, dass signifikante Unterschiede zwischen der Ausbreitung mit Flachdach und Spitzdach bis zur zweifachen Gebäudehöhe registriert werden. Der Messort, gekennzeichnet mit einem roten Ring in Abbildung 7-22, liegt hinter einem 24 m hohen Gebäude, so dass ein Einfluss der Dachform bis in 60 m Höhe beobachtet wird. Der Messort, markiert mit einem blauen Ring, befindet sich dagegen hinter einem 15 m hohen Gebäude und weist bis in eine Höhe von 30 m Unterschiede in den Messergebnissen auf.

Die Messungen der *horizontalen Ebene in 30.2 m Höhe* zeigen den Einfluss der verschiedenen Dachformen auf das großräumige Ausbreitungsverhalten auf Dachniveau. Die Quelle befindet sich ca. 290 m stromauf des Messfeldes auf dem Dach eines 15 m hohen Gebäudes. Abbildung 7-23 zeigt die prozentuale Differenz der mittleren Konzentration zwischen den beiden Konfigurationen. Die mit Spitzdächern versehene Michel-Stadt erzeugt mehr Turbulenz auf Dachniveau als die Flachdachkonfiguration, so dass die Konzentration stärker lateral verteilt wird. In den Randbereichen wurden daher um ca. 20 % höhere mittlere Konzentrationen gemessen. Durch die relativ ungestörte Strömung bei der Michel-Stadt mit Flachdach wurden dagegen um ca. 10 % höhere Konzentrationen stromab der Quelle registriert.

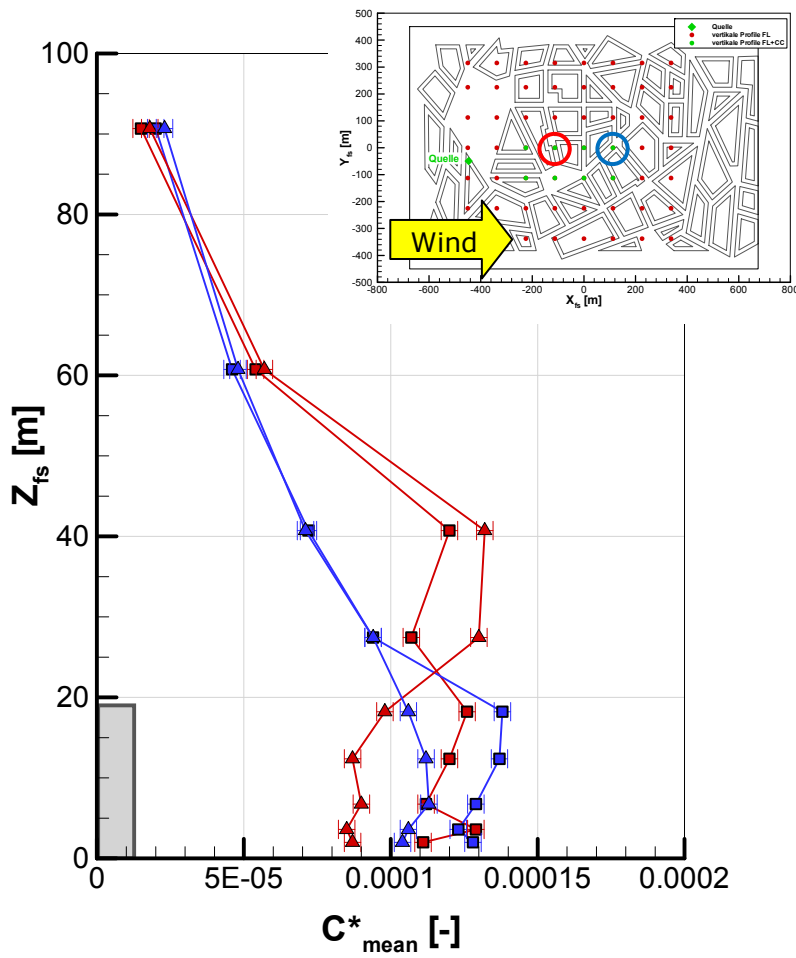


Abbildung 7-22: Vertikale Profile der mittleren Konzentration C_{mean}^* , gemessen in der Michel-Stadt mit Flachdach (Quadrate) und Spitzdach (Dreiecke) an zwei verschiedenen Messorten (oben), grauer Balken: mittlere Gebäudehöhe.

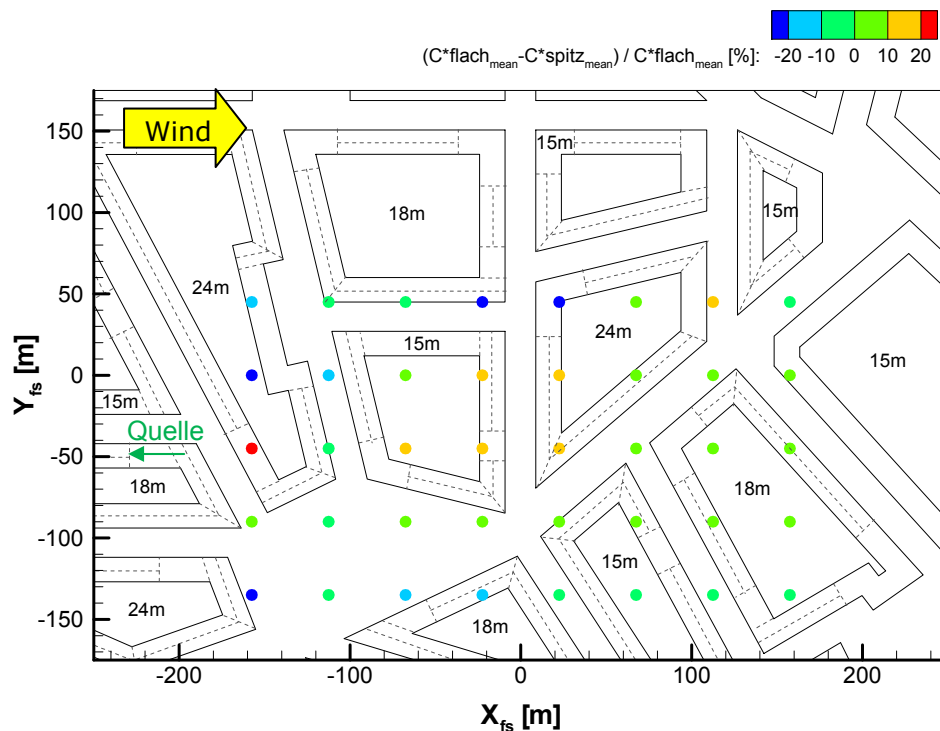


Abbildung 7-23: Prozentuale Differenz der mittleren Konzentration C^*_{mean} zwischen der Michel-Stadt mit Flach- und Spitzdach für die horizontale Ebene in 30.2 m Höhe.

Die Messungen *innerhalb der Straßenschluchten in 2 m Höhe* zeigen einen ähnlichen Einfluss der Dachform auf das Ausbreitungsverhalten. Mit Hilfe einer Regressionsanalyse wurden der Korrelationskoeffizient r und das Bestimmtheitsmaß r^2 ermittelt. Für eine hohe Korrelation zwischen den Messgrößen nähert sich $r \rightarrow 1$, bei einer geringen Korrelation geht $r \rightarrow 0$. Im Anhang E sind die Korrelationskoeffizienten für die Konzentrationsparameter in der Übersicht zu sehen. Die niedrigsten Korrelationen sind innerhalb der Straßenschluchten in 2 m Höhe für die maximale Konzentration bzw. die „peak-to-mean ratio“ (PTM) zu finden. In Abbildung 7-24 sowie in Abbildung 7-25 wird eine höhere laterale Vermischung der Konzentration bei der Spitzdachkonfiguration registriert. Den Streudiagrammen für die mittlere und maximale Konzentration ist zu entnehmen, dass bei der Flachdachkonfiguration höhere Werte für hohe Konzentrationen und geringere Werte für niedrige Konzentrationen festgestellt werden. Bei den vermeintlichen „Ausreißern“ handelt es sich um Messorte, die besonders von der unterschiedlichen Durchmischung betroffen sind. So werden für die mittleren Konzentrationen an einigen Messorten in der Michel-Stadt mit Flachdach nahezu doppelt so hohe Konzentrationen gemessen als bei Spitzdach.

Durch die erhöhte Turbulenz bei der Michel-Stadt mit Spitzdach werden Messorte mit einer 3-fach höheren maximalen Konzentration registriert.

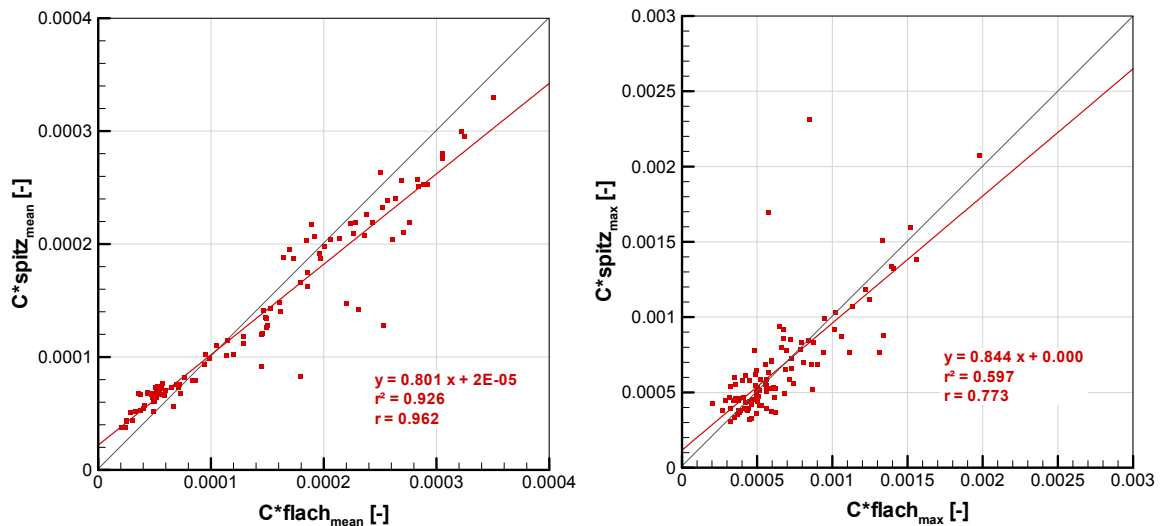


Abbildung 7-24: Streudiagramm der mittleren Konzentration C^*_{mean} (links) und der maximalen Konzentration C^*_{max} (rechts) für alle Messungen innerhalb der Straßenschluchten in 2 m Höhe.

In Abbildung 7-25 lassen sich die prozentualen Abweichungen zwischen den Ergebnissen bei Flach- und Spitzdach analysieren. Durch die bessere laterale Vermischung in der Michel-Stadt mit Spitzdach werden hauptsächlich in der Straßenschlucht längs der Windrichtung die größten Abweichungen von über 50 % gegenüber der Flachdach-Konfiguration registriert. Während die Unterschiede in der Ausbreitung auf Dachniveau nahezu symmetrisch zur Quelle zu finden sind, sind die lateralen Unterschiede in der Straßenschlucht weitaus signifikanter. Bei beiden Konfigurationen werden die höchsten mittleren Konzentrationen auf der Freifläche gemessen. Bei der Michel-Stadt mit Spitzdach findet ebenfalls eine stärkere laterale Ausbreitung in entgegengesetzter Richtung statt, so dass hier höhere Konzentrationen gemessen werden als bei Flachdächern. Für alle Konzentrationsparameter ist eine Abweichung von weniger als $\pm 10 \%$ bei 40 % aller Messorte innerhalb der Straßenschlucht in 2 m Höhe zu finden (Tabelle 7-5). Dieses Ergebnis geht somit nahezu konform mit den Strömungsmessungen.

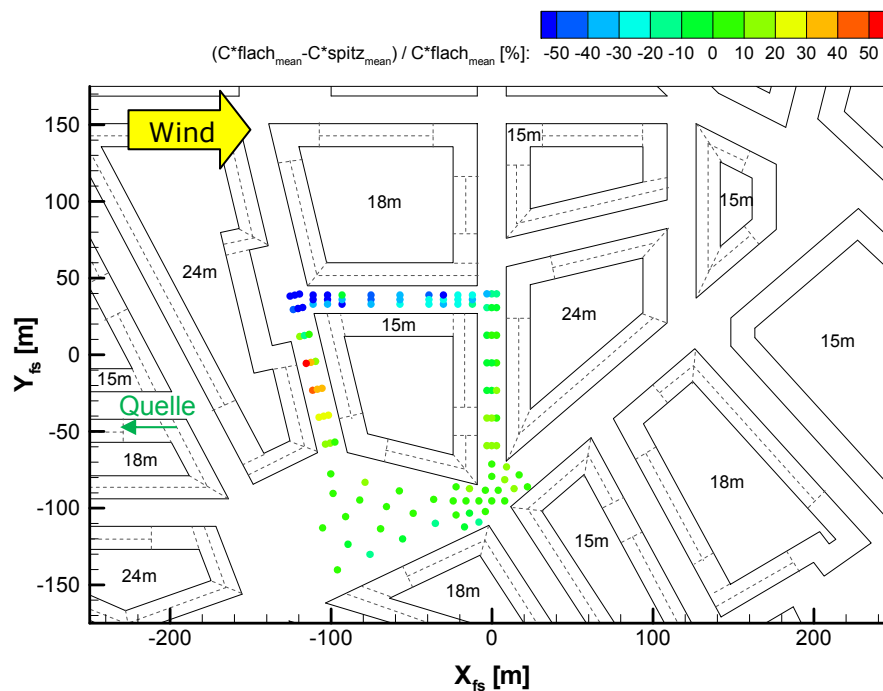


Abbildung 7-25: Prozentuale Differenz der mittleren Konzentration C_{mean}^* zwischen der Michel-Stadt mit Flach- und Spitzdach für die Messungen innerhalb der Straßenschluchten in 2 m Höhe.

Tabelle 7-5: Messorte in Michel-Stadt mit einer Abweichung von weniger als $\pm 10\%$ zwischen den Konzentrationsparametern der Flach- und Spitzdachkonfiguration, gemessen innerhalb der Straßenschluchten in 2m Höhe.

	Anzahl Messorte	Abweichung < $\pm 10\%$	in [%]
C*mean	106	43	41
C*rms	106	45	42
C*max	106	41	39
PTM-ratio	106	35	33

In Abbildung 7-26 werden die Verteilungen der dimensionslosen Konzentration der Flach- und Spitzdachkonfiguration verglichen. Es sind deutliche Unterschiede erkennbar. Bei der Michel-Stadt mit Flachdach werden häufiger niedrige Konzentrationen gemessen, während bei Spitzdach häufiger höhere Konzentrationen innerhalb der Straßenschluchten durch eine bessere Vermischung festgestellt werden. Die Verteilungen der am gleichen Ort gemessenen Geschwindigkeiten der beiden Konfigurationen sind in Abbildung 7-20 zu sehen.

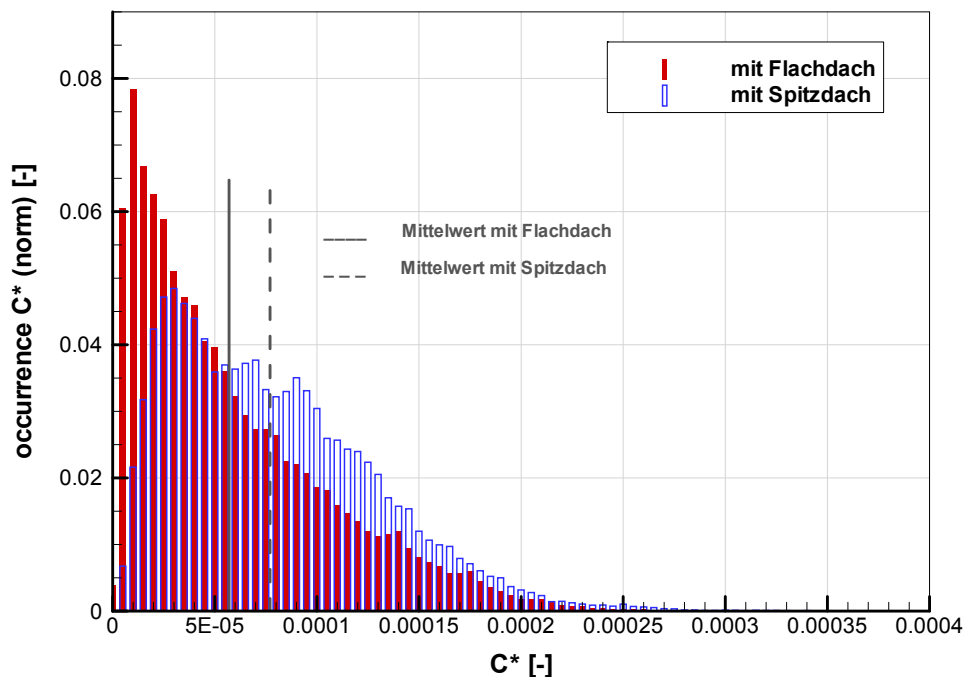


Abbildung 7-26: Konzentrationsverteilung der dimensionslosen Konzentration C^* für einen Messort (schwarzer Ring in Abbildung 7-19) in Michel-Stadt in 2 m Höhe mit Flach- und Spitzdach.

Durch die erhöhte Turbulenz bei einer städtischen Rauigkeit mit Spitzdächern entsteht eine große Vertikalbewegung zwischen der Strömung oberhalb und innerhalb der Rauigkeit. Der Dachform wird in diesem Zusammenhang ein großer Einfluss auf die Luftqualität innerhalb der städtischen Bebauung zugesprochen (Rafailidis, 1997). Wie auch die Messungen in Michel-Stadt zeigen, begünstigt eine städtische Bebauung mit Spitzdächern die Vermischung von freigesetzten Schadstoffen. Besonders innerhalb der städtischen Rauigkeit in Bodennähe sind große Unterschiede zwischen den Konfigurationen zu finden. Folglich ist eine exakte Modellierung der Dachform für eine gute Vorhersage des Ausbreitungsverhaltens von Schadstoffwolken in einer städtischen Rauigkeit unerlässlich.

7.4 Korrelation zwischen Strömung und Ausbreitung

Die Strömungsphänomene sowie das Ausbreitungsverhalten reagieren sensibel auf eine sich ändernde Dachkonfiguration in Michel-Stadt. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Strömung und der Ausbreitung könnte durch korrelierte Messungen untersucht werden, die im Rahmen dieser Arbeit leider aus Zeitgründen nicht durchgeführt werden konnten. Dennoch werden die Strömungs- und Ausbreitungsprozesse in der Michel-Stadt auf eine mögliche Korrelation mit den im hier vorgestellten Projekt gewonnenen Daten untersucht.

In Abbildung 7-27 wurden die vertikalen Profile der mittleren Standardabweichung der Windgeschwindigkeit U_{rms}/U_{ref} und der mittleren Konzentration C_{mean}^* für beide Dachkonfigurationen dargestellt. Die vertikalen Profile für die Flach- bzw. Spitzdachkonfiguration sehen sich sehr ähnlich. Die Profile der mittleren Windgeschwindigkeit weisen kaum Unterschiede zwischen Flach- und Spitzdach auf (Abbildung 7-15). Das Ausbreitungsverhalten ist somit weniger von der mittleren Windgeschwindigkeit abhängig, sondern mit den Windgeschwindigkeitsschwankungen korreliert. Bei der Michel-Stadt mit Spitzdach ist die Turbulenz höher, so dass die Schadstoffe stärker vermischt werden, was zu niedrigeren mittleren Konzentrationen führt. Dieser Effekt ist innerhalb der Straßenschluchten bis in eine Höhe von 2 m zu beobachten.

Werden alle Daten innerhalb der Straßenschluchten als Streudiagramm dargestellt (Abbildung 7-28, links), ist eine Korrelation zwischen U_{rms}/U_{ref} und C_{mean}^* dagegen nicht eindeutig feststellbar. Die Farbgebung in dieser Grafik gibt die Differenz der mittleren Konzentrationen der Flach- und Spitzdachkonfiguration an. Dem Streudiagramm für die mittlere Windgeschwindigkeit (Abbildung 7-28, rechts) ist zu entnehmen, dass für höhere Windgeschwindigkeiten bei der Spitzdachkonfigurationen auch die höheren mittleren Konzentrationen gemessen werden. Eine eindeutige Korrelation zwischen dem Strömungs- und Ausbreitungsverhalten lässt sich aufgrund dieser Datenlage lediglich schwer erkennen.

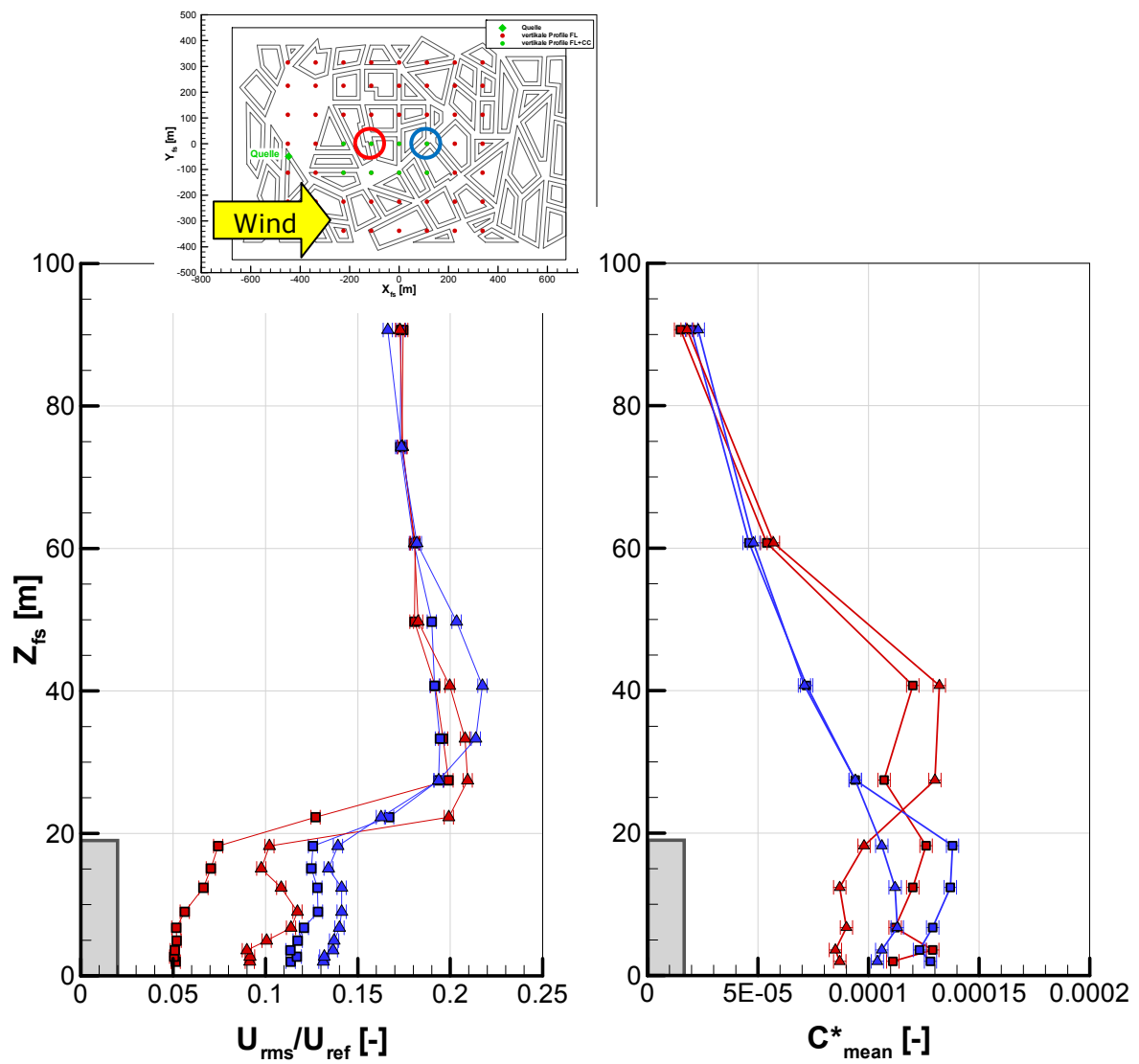


Abbildung 7-27: Vertikale Profile von U_{rms}/U_{ref} (links unten) und C_{mean}^* (rechts unten), gemessen in der Michel-Stadt mit Flachdach (Quadrate) und Spitzdach (Dreiecke) an zwei verschiedenen Messorten (oben), grauer Balken: mittlere Gebäudehöhe.

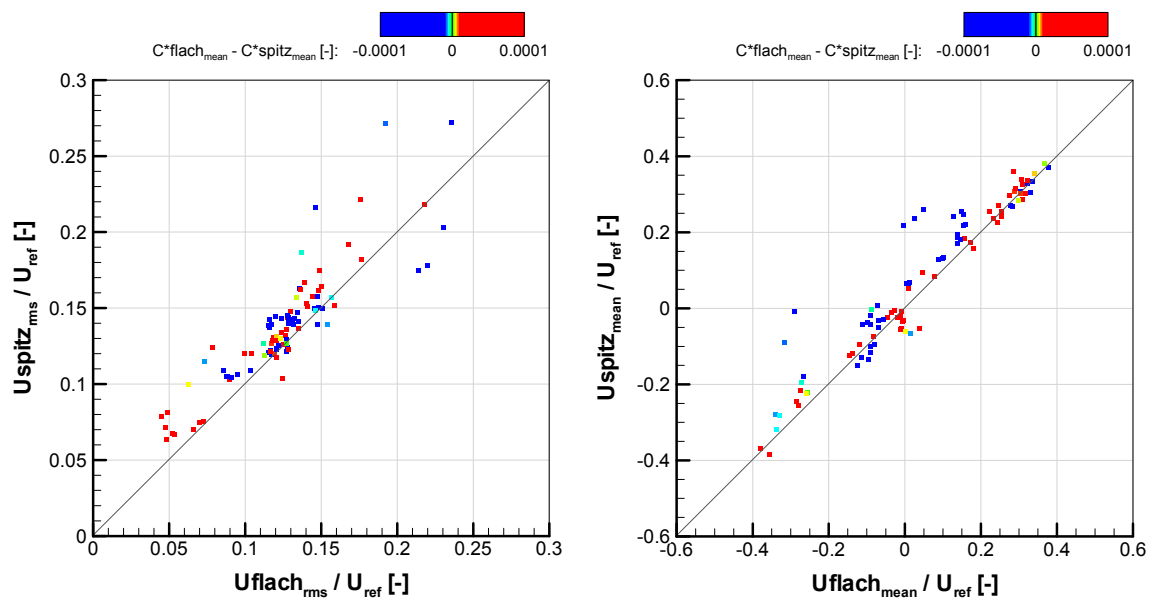


Abbildung 7-28: Streudiagramm von U_{rms}/U_{ref} (links) und U_{mean}/U_{ref} (rechts) innerhalb der Straßenschluchten in 2 m Höhe mit der Differenz der mittleren Konzentrationen C_{mean}^* als Farbgebung.

7.5 Fazit zur Simplifizierung von Stadtmodellen

Um das komplexe Strömungsverhalten in Städten zu untersuchen, werden häufig vereinfachte Modelle von urbanen Rauigkeiten verwendet.

Numerische Modelle greifen auf Vereinfachungen bezüglich der Geometrie zurück, da sie bedingt durch die Gitterweite bzw. Rechenleistung oft keine Spitzdächer auflösen können. Wie die Ergebnisse aus Michel-Stadt und anderen Studien (z.B. Rafailidis, 1997, Kastner-Klein et al., 2004) gezeigt haben, spielt vor allem die Dachform eine signifikante Rolle beim Strömungs- und Ausbreitungsverhalten in städtischer Bebauung. Leitl et al. (2001) untersuchten die Unterschiede zwischen einem vereinfachten Modell mit einer Boxstruktur und den Ergebnissen aus einem detaillierten Modell der Göttinger Straße bzw. Podbielskystraße in Hannover. Während hier große Abweichungen im Strömungsverhalten innerhalb der Straßenschluchten auftreten, sind bei der Vereinfachung von Oberflächenstrukturen der Gebäude (z.B. Balkone und Dachvorsprünge) nur noch geringe Unterschiede in der Strömung einer Straßenschlucht festzustellen. Bei geometrischen Vereinfachungen in wirbelauflösenden Modellen werden Unterschiede zu den Validierungsdaten evtl. nicht an-

hand der mittleren Strömungseigenschaften sichtbar. Diese können erst durch die Analyse von zeitabhängigen Variablen ermittelt werden.

Häufig werden regelmäßig angeordnete Hindernisse zur Validierung von numerischen Modellen verwendet. Allerdings stellt sich die Frage, inwieweit die Ergebnisse auf realistische Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in einer Stadt übertragen werden können. Kastner-Klein et al. (2004) verglichen ihre Ergebnisse von einer isolierten 2D-Straßenschlucht mit Messungen aus anderen Modellen, um die Allgemeingültigkeit ihrer Ergebnisse abschätzen zu können. Hierzu dienten ein detailliertes Modell der Innenstadt von Nantes (Frankreich) und eine Anordnung aus sechs 2D-Straßenschluchten. Es zeigte sich, dass die Charakteristika der Windströmung über einer realistischen irregulären Rauigkeit denen über idealisierten regelmäßig angeordneten Hindernissen ähneln. Dennoch ist die Wirbelbildung innerhalb der Straßenschluchten in der komplexen Realität weniger ausgeprägt, da Straßenzüge in der Regel endlich und Hindernisstrukturen unregelmäßig angeordnet sind. Oberhalb des Dachniveaus der unregelmäßigen Gebäudegeometrien wurden geringere Windgeschwindigkeiten durch eine erhöhte Reibung beobachtet. Feddersen (2005) untersuchte Turbulenzstrukturen über der realistischen urbanen Rauigkeit von Kleinbasel im Windkanal. Er stellte ebenfalls fest, dass hier die horizontale Variabilität größer als bei idealisierten Rauigkeitsstrukturen (z.B. bei Cheng & Castro, 2002) ist.

Im Gegensatz zu 2D-Straßenschluchten und regelmäßig angeordneten Würfelfeldern stellt das Strömungs- und Ausbreitungsverhalten in Michel-Stadt einen großen Schritt zu realistischen städtischen Strömungsverhältnissen dar. In Michel-Stadt spielt besonders bei der Spitzdach-Konfiguration die horizontale Variabilität eine große Rolle. Die Ausbildung eines Rezirkulationsgebietes innerhalb der Straßenschlucht kann nur an vereinzelten Orten im Langzeitmittel festgestellt werden. Es wurden deutliche Unterschiede im ersten Vergleich zwischen den Strömungsverhältnissen einer stark idealisierten urbanen Rauigkeit und Michel-Stadt festgestellt. Die Einordnung der Ergebnisse von Michel-Stadt in andere Studien zeigte eine deutliche Annäherung an realistische Verhältnisse, wie z.B. bei der Ausprägung der Rauigkeitsschichthöhe.

Um die komplexen urbanen Strömungs- und Ausbreitungsphänomene besser zu verstehen, ist es ratsam, von regelmäßig angeordneten Strukturen zu komplexeren Rauigkeiten über-

zugehen. Die Übertragbarkeit von stark idealisierten Modellen kann somit besser eingeschätzt werden. Auch zu Validierungszwecken werden komplexere Testfälle benötigt, um eine Eignung des numerischen Modells zur Vorhersage von realistischen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnissen feststellen zu können. Die Geometrie bzw. Daten der semi-idealisierten Michel-Stadt eignen sich nicht nur zur Validierung, sondern auch zur besseren Beurteilung der Strömung und Ausbreitung in typisch mitteleuropäischen Stadtstrukturen. Auf Großstädte mit einer sehr hohen Rauigkeit wie Frankfurt oder amerikanische bzw. japanische Mega-Cities sind die Ergebnisse von Michel-Stadt selbstverständlich nicht übertragbar.

8 Exemplarischer Datenvergleich mit einem LES-Modell

Die in der Datenbank CEDVAL-LES zur Verfügung gestellten Daten wurden im DFG-Schwerpunktprogramm „Metström“ für die Validierung des parallelisierten LES-Modells PALM der Universität Hannover (Raasch & Schröter, 2001) genutzt. Hierbei handelt es sich um einen exemplarischen Vergleich zwischen den Windkanaldaten und PALM, dessen Ergebnisse erste Ansätze für eine mögliche LES-Validierungsstrategie liefern.

Die Strömung der sehr rauen, städtischen Grenzschicht (Komplexitätsstufe 0, BL3) stellte den ersten Testfall bei der Validierung von PALM dar (Letzel et al., 2011). Mit den Windkanaldaten wurden drei Modellsetups von PALM mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen verglichen:

- PALM_c0_hires: Modellsetup mit einer hohen räumlichen Auflösung
- PALM_c0_lowres: Modellsetup mit einer niedrigeren räumlichen Auflösung
- PALM_c0_lowres_cfl: Modellsetup mit einer niedrigeren räumlichen Auflösung und mit einem speziellen Setup für die Erzeugung einer „constant flux layer“

Es wurde die Strategie verfolgt, dass die Modellergebnisse den gleichen Anforderungen im Vergleich mit der Natur genügen müssen wie die Windkanalexperimente. Wie in Kapitel 6 in Bezug auf die Dokumentation der Grenzschicht aufgezeigt wurde, ist nicht nur das mittlere Windprofil zu validieren. So wurden für die Modellvalidierung von PALM ebenfalls Turbulenzspektren, Fluktuationen des Windvektors und Geschwindigkeitsverteilungen der Windkomponenten verglichen.

Im Folgenden sind erste Ergebnisse des Vergleichs zwischen PALM-Daten und Windkanal-Referenzdaten dargestellt. Während die mittleren Windgeschwindigkeiten für alle drei PALM-Modellsetups einander sehr ähnlich sind und gut mit den Windkanaldaten übereinstimmen, lassen sich in den vertikalen turbulenten Flüssen Unterschiede feststellen (Abbildung 8-1). Erst durch die Einführung eines speziellen Setups in PALM (PALM_c0_lowres_cfl) konnte in der Prandtlschicht eine „constant flux layer“ innerhalb

der unteren 100 m Höhe modelliert werden. Es lässt sich ein deutlicher Einfluss der räumlichen Auflösung in PALM auf die Vertikalprofile des vertikalen turbulenten Impulsflusses erkennen. Daher ist der Einfluss der räumlichen Auflösung auf die Modellergebnisse anhand von weiteren Sensitivitätsstudien zu bestimmen.

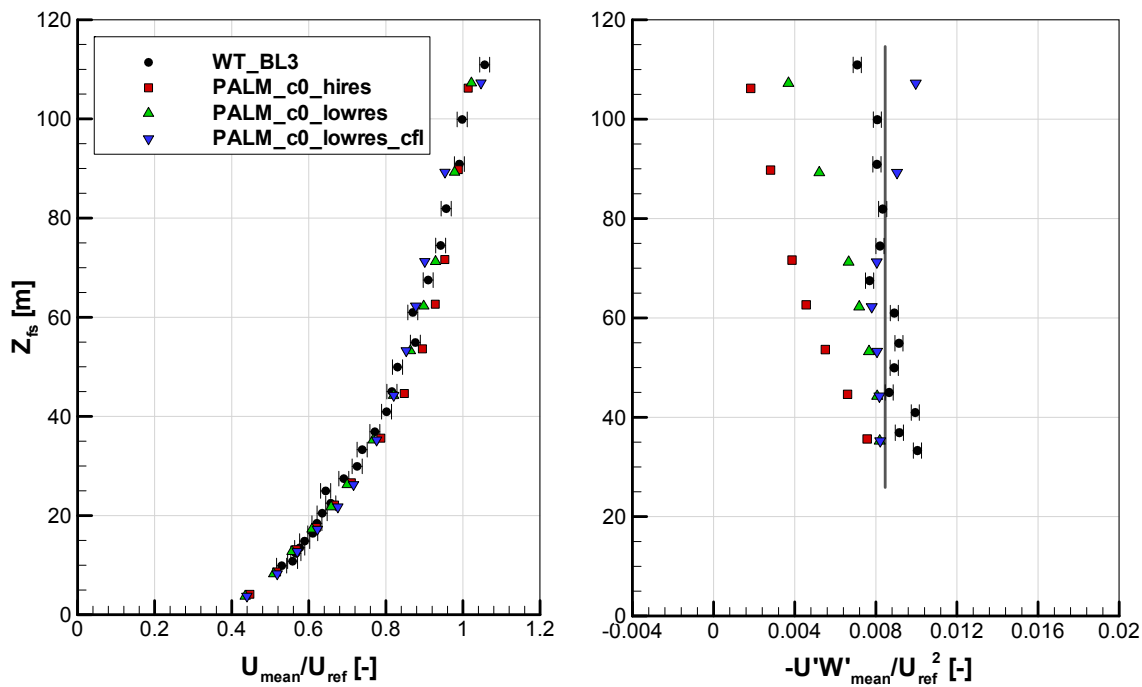


Abbildung 8-1: Vertikale Profile der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean}/U_{ref} (links) und der mittleren vertikalen turbulenten Flüsse $-U'W'_{mean}/U_{ref}^2$ (rechts) der städtischen Anströmung, Vergleich zwischen Windkanaldaten und PALM-Ergebnissen von drei verschiedenen Modellsetups.

In Abbildung 8-2 werden die vertikalen Profile des integralen Längenmaßes im Vergleich dargestellt. Die Modellergebnisse der beiden Modellsetups mit einer niedrigen räumlichen Auflösung weisen um einen Faktor 10 größere Wirbelstrukturen als die Referenzdaten auf. Für das Setup mit der hohen räumlichen Auflösung ist im Gegensatz zu den Setups mit geringer Auflösung eine gute Übereinstimmung mit den Referenzdaten in den unteren 20 m zu erkennen. Dies entspricht der Höhe der Rauigkeitselemente, die bei der Modellierung im Windkanal eingesetzt und ebenfalls im numerischen Modell simuliert wurden. Folglich ist eine hohe räumliche Auflösung erforderlich, um die Strömung innerhalb der Rauigkeitshöhe darstellen zu können.

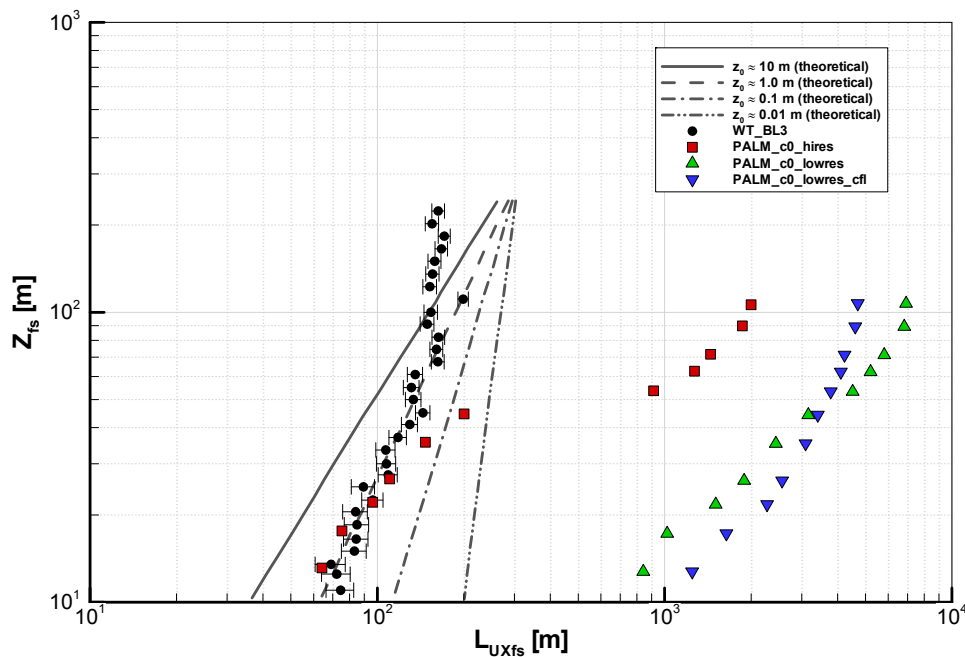


Abbildung 8-2: Vertikale Profile der integralen Längenmaße L_{ux} der städtischen Anströmung, Vergleich zwischen Windkanaldaten, auf Naturdaten basierenden Kurven (nach Counihan, 1975, vergleiche Abbildung 6-5) und PALM-Ergebnissen von drei verschiedenen Modellsetups.

Abbildung 8-3 zeigt die Verteilung der Energiedichte für das Modellsetup mit einer hohen räumlichen Auflösung. Den Turbulenzspektren der kinetischen Energie ist im Vergleich zu den Referenzspektren zu entnehmen, dass oberhalb des Einflusses der Rauigkeiten zu wenig Energie durch die Wirbel im mittleren Frequenzbereich transportiert wird. Dagegen weist der niederfrequente Bereich eine höhere Energiedichte auf. Mit der Höhe nehmen die Abweichungen in der Verteilung der Energie zu. Es ist anzunehmen, dass die Abweichungen durch die zyklischen Randbedingungen in PALM hervorgerufen werden. Die Energieverteilung zeigte sich relativ unabhängig von der Größe des Modellgebietes und dem Integrationszeitraum, so dass sich ihr Fehler über eine geeignete Wahl der beiden kaum verringern ließ. Der Vergleich der Windkanaldaten mit den Referenzspektren wurde bereits in Abbildung 6-6 dargestellt.

Durch die Analyse der Zeitserien können Probleme bei der numerischen Modellierung aufgezeigt und Ansätze zur Verbesserung der Modelle geprüft werden.

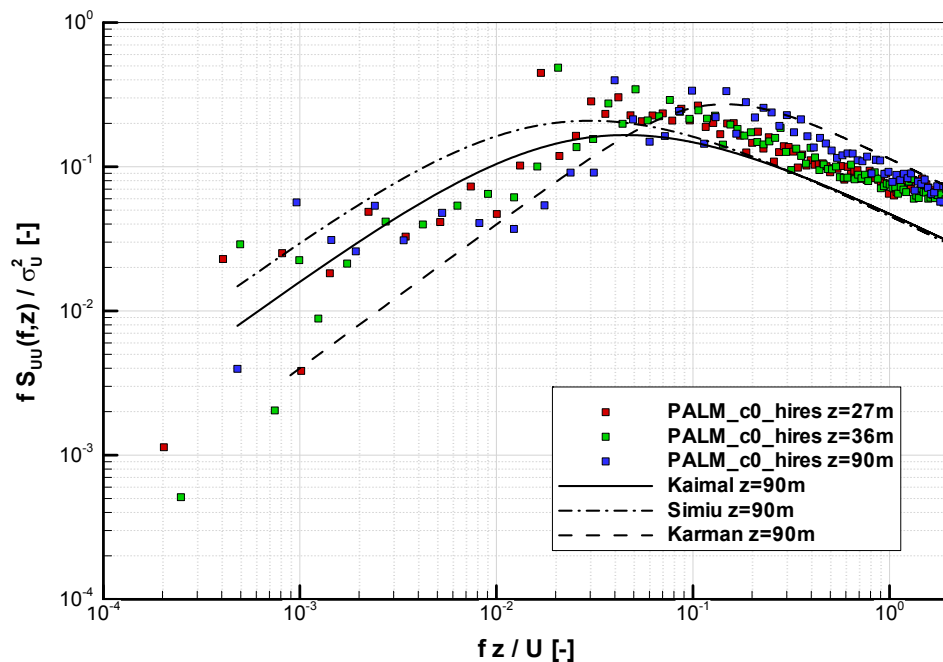


Abbildung 8-3: Normierte spektrale Verteilung der turbulenten kinetischen Energie für ein PALM-Modellsetup in drei verschiedenen Höhen, sowie die Referenzspektren von Kaimal, Simiu & Scanlan und von Kármán (berechnet nach VDI-Richtlinie 3783/12, 2000).

Folglich können für die Validierung einer naturähnlichen Grenzschicht bereits existierende Richtlinien als Referenz dienen (z.B. VDI 3783/12, 2000), mit deren Hilfe verschiedene Modellsetups beurteilt werden können. Um allerdings dieselben Anfangs- und Randbedingungen wie im Validierungsdatensatz zu modellieren, muss ein direkter Vergleich mit den Referenzdaten erfolgen. Hierzu ist eine Validierungsstrategie zu erstellen, so dass eine zuverlässige Aussage über die Qualität der Modellergebnisse gemacht werden kann.

In Hamburg fand im Rahmen des Projektes MetStröm der Workshop „Comparing eddy-resolving numerical simulations with corresponding laboratory and field data“ statt. Folgende Fragen wurden diskutiert:

- Wie können zeitabhängige Ergebnisse miteinander verglichen werden?
- Wie können auftretende Unterschiede in den Ergebnissen erklärt werden?

Um sich dieses Problems ausreichend annehmen zu können, ist ein sehr hoher Zeit- und Arbeitsaufwand nötig, so dass noch keine zufriedenstellende Validierungsstrategie entwickelt werden konnte.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Charakterisierung des Strömungs- und Ausbreitungsverhaltens in städtischer Bebauung werden zunehmend mikroskalige numerische Modelle herangezogen. Zur Qualitätssicherung ist einerseits die Validierung des Modells unerlässlich. Andererseits muss die Güte jeder einzelnen Simulation abgeschätzt und die Simulation gegebenenfalls durch eine geeignetere Wahl des Modellgebietes, der Modellauflösung oder der Parametrisierungsoptionen optimiert werden. Neben den bisher üblichen RANS-basierten Modellen werden, ermöglicht durch die steigende Rechnerleistung, immer häufiger LES-Modelle angewendet. LES-Modelle lösen die großen, energiereichen Strukturen der Strömung direkt auf, während die kleinen Wirbelstrukturen parametrisiert werden. Diese Modelle benötigen zum einen genaue Informationen über die Anströmbedingungen sowie zeitlich hochaufgelöste Daten im Modellgebiet für eine ausführliche Validierung der Modellergebnisse. Daher muss der Validierungsdatensatz ausreichend lange Zeitserien in der Anströmung sowie innerhalb der urbanen Rauigkeit beinhalten. Hierbei spielen u.a. Vergleiche der turbulenten Energiespektren, der Geschwindigkeitsverteilungen und der Windrichtungsfluktuationen eine wichtige Rolle, die durch Zeitserienanalysen gewonnen werden. Bestehende Validierungsdatenbanken stellen meist nur Mittelwerte zur Verfügung und können daher nur beschränkt zur Validierung von LES-Modellen dienen. Auch Daten aus Feldexperimenten können durch ihre hohe Variabilität die Qualitäts- und Quantitätsanforderungen nicht erfüllen und nur ergänzend genutzt werden.

Die Lösung sind speziell für Validierungszwecke durchgeführte Messungen im Grenzschichtwindkanal, die ein hohes Potential zur Erstellung eines Datensatzes für wirbelauf lösende Strömungs- und Ausbreitungsmodelle bieten. Die Randbedingungen können im Labor konstant gehalten und exakt dokumentiert werden.

Im Windkanallabor der Universität Hamburg wurde eine qualitätsgesicherte, systematische LES-Validierungsdatenbank in enger Zusammenarbeit mit numerischen Modellierern entwickelt und erstellt. Als erster Schritt wurde ein Anforderungsprofil an Windkanalexperi-

mente bezüglich Quantität und Qualität zur Erstellung von LES-Validierungsdaten herausgearbeitet. Verschiedene Komplexitätsstufen von urbaner Bebauung ermöglichen eine umfangreiche Validierung von mikroskaligen numerischen Modellen. Ausgehend von der Dokumentation von unterschiedlichen Anströmbedingungen sind Daten zum Strömungs- und Ausbreitungsverhalten in regelmäßig bzw. unregelmäßig angeordneten Würfeldern oder zu realen Stadtstrukturen erhältlich. Um den großen Schritt in der Komplexität der Stadtmodelle zu schließen, wurde im Rahmen dieser Arbeit die sog. „Michel-Stadt“ entworfen. Hierbei handelt es sich um eine semi-idealisierte mitteleuropäische Stadtstruktur, die aus Gebäuderingen unterschiedlicher Höhe besteht. Während sie in der ersten Konfiguration nur Flachdächer aufweist, wurden diese in einem weiteren Schritt teilweise durch Spitzdächer ersetzt, um sich den realistischen Verhältnissen einer urbanen Rauigkeit weiter anzunähern. Für beide Konfigurationen von Michel-Stadt wurden umfangreiche Strömungs- und Ausbreitungsmessungen durchgeführt, die zur systematischen Validierung von Modellen genutzt werden können.

Über die Bereitstellung der Messungen zu Validierungszwecken hinaus wurde mit ihnen eine Sensitivitätsstudie zum Einfluss der Dachform auf die Strömung und Ausbreitung innerhalb der Straßenschluchten von Michel-Stadt durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass im Fall der Michel-Stadt für das Windfeld bei ungefähr zwei Dritteln der Ergebnisse mit Abweichungen von über $\pm 10\%$ zu erwarten sind, wenn auf halber Dachhöhe ein Flach- statt Spitzdach modelliert wird. Durch die Analyse der gemessenen Zeitserien konnten die Geschwindigkeitsverteilungen und Windrichtungsfluktuationen verglichen werden. Hierbei war ersichtlich, dass das Strömungsverhalten innerhalb der Straßenschluchten durch die Dachform erheblich beeinflusst wird und sich grundlegend ändern kann. Dies wirkt sich ebenso auf die Ausbreitung von in der urbanen Rauigkeit freigesetzten Schadstoffen aus.

Ein Vergleich der Ergebnisse von Michel-Stadt mit anderen städtischen Rauigkeiten aus verschiedenen Studien zeigte Ähnlichkeiten beim Strömungs- und Ausbreitungsverhalten. Unabhängig von der Komplexität der untersuchten Stadtstrukturen wurde ein hoher Einfluss der Dachform auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse innerhalb der Rauigkeit festgestellt. Die Geometrie der Michel-Stadt stellt ein idealisiertes Modell der Realität dar. Das Strömungs- und Ausbreitungsverhalten ist ähnlich zu denen in typisch mitteleuro-

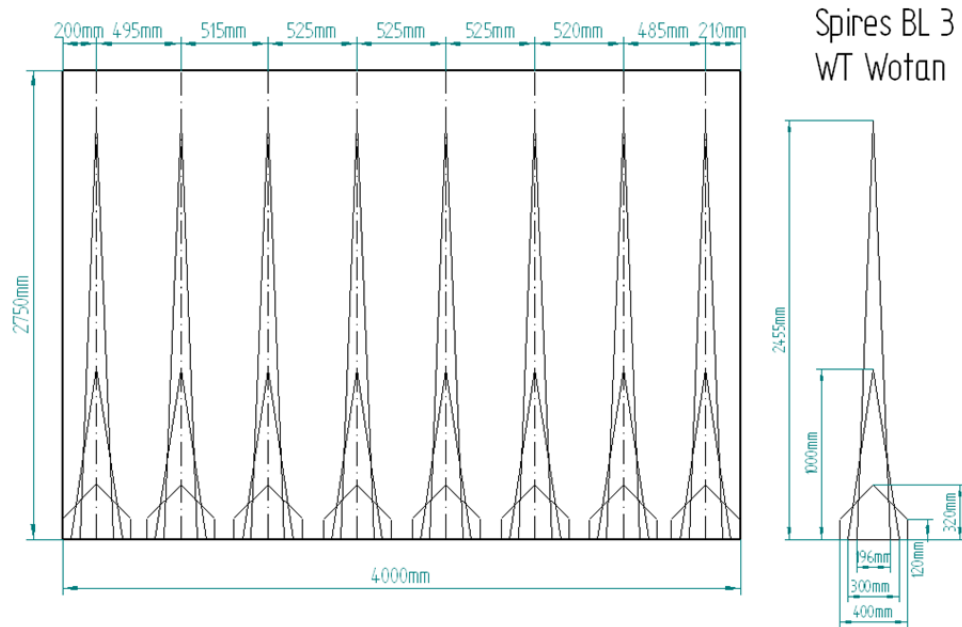
päischen Städten und im Allgemeinen übertragbar. Weitere Messungen mit Hilfe der Geometrie von Michel-Stadt können weitere Fragen zu Strömungs- und Transportvorgängen beantworten. Außerdem lässt sich die Gebäudestruktur beispielsweise durch im Ring angeordnete Einzelgebäude komplexer und realistischer gestalten und untersuchen.

Ein systematischer und qualitätsgeprüfter Datensatz ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Validierung von numerischen Modellen. Allerdings stellt die Validierung von wirbelauflösenden Modellen eine große Herausforderung dar. Erste Ansätze, wie mikroskalige LES-Modelle validiert werden können, wurden aufgezeigt und erprobt. Zukünftige Untersuchungen müssen zeigen, mit welchen Methoden ein direkter Vergleich von zeitabhängigen Ergebnissen möglich ist.

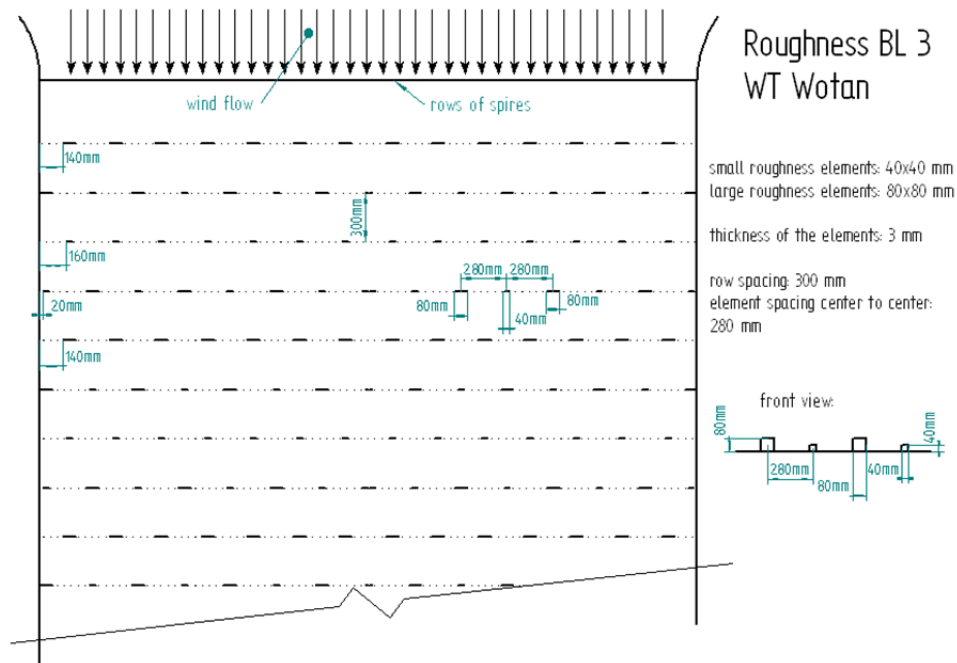
Ein zukünftiger Schritt bei der Validierung stellen die Auswertung und der Vergleich von Korrelationen dar. Räumliche und zeitliche Geschwindigkeitskorrelationen tragen zur besseren Charakterisierung des Windfeldes in der Anströmung bei. Innerhalb und oberhalb der Stadtraumigkeit lässt sich mit ihrer Hilfe beispielsweise das Gedächtnis der Strömung untersuchen und validieren. Mit zwei synchron betriebenen LDA-Systemen sind 2-Punkt-Korrelationen möglich. Messungen mit dem PIV-System sind, bedingt durch die geringe zeitliche Auflösung, zur Validierung nur begrenzt nutzbar. Eine weitere Möglichkeit bieten Druck-Strömungskorrelationen. Bewegen sich Wirbel über die Gebäude einer Stadt, hinterlassen sie Druckschwankungen auf den Oberflächen. Kennt man diesen Zusammenhang, können die skalaren Druckdaten im Vergleich zu den vektoriellen Windgeschwindigkeiten eine Validierung erheblich erleichtern.

Der Vergleich von kohärenten Strukturen kann eine weitere Stufe bei der Validierung von wirbelauflösenden Modellen darstellen. Durch statistische Analysen der Zeitserien durch beispielsweise „Proper Orthogonal Decomposition“ (POD), „Linear Stochastic Estimation“ (LSE) oder „Wavelets“ können turbulente Strukturen in der Strömung detektiert und charakterisiert werden.

Anhang A: Aufbau zur Grenzschichtmodellierung von Michel-Stadt



Anhang 1: Technische Zeichnung der Turbulenzgeneratoren für die Grenzschichtsimulation von Michel-Stadt, Maße im Modellmaßstab 1:225.

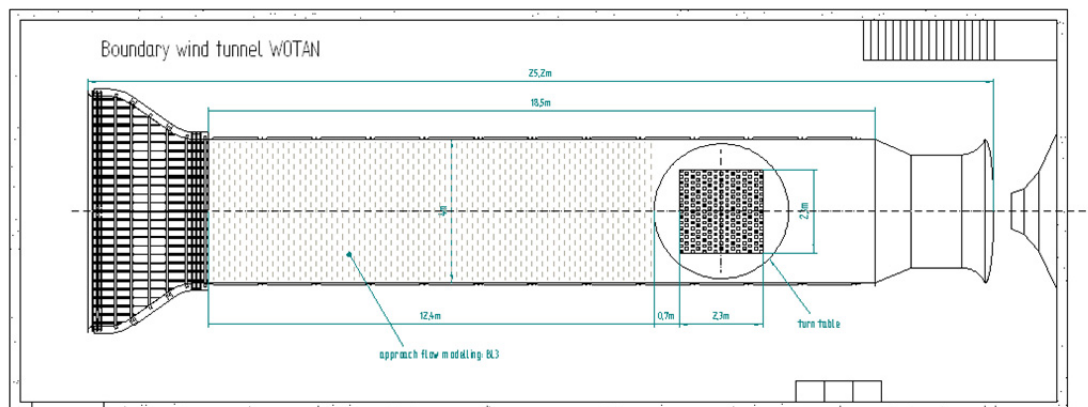


Anhang 2: Technische Zeichnung der Rauigkeitselemente für die Grenzschichtsimulation von Michel-Stadt, Maße im Modellmaßstab 1:225.

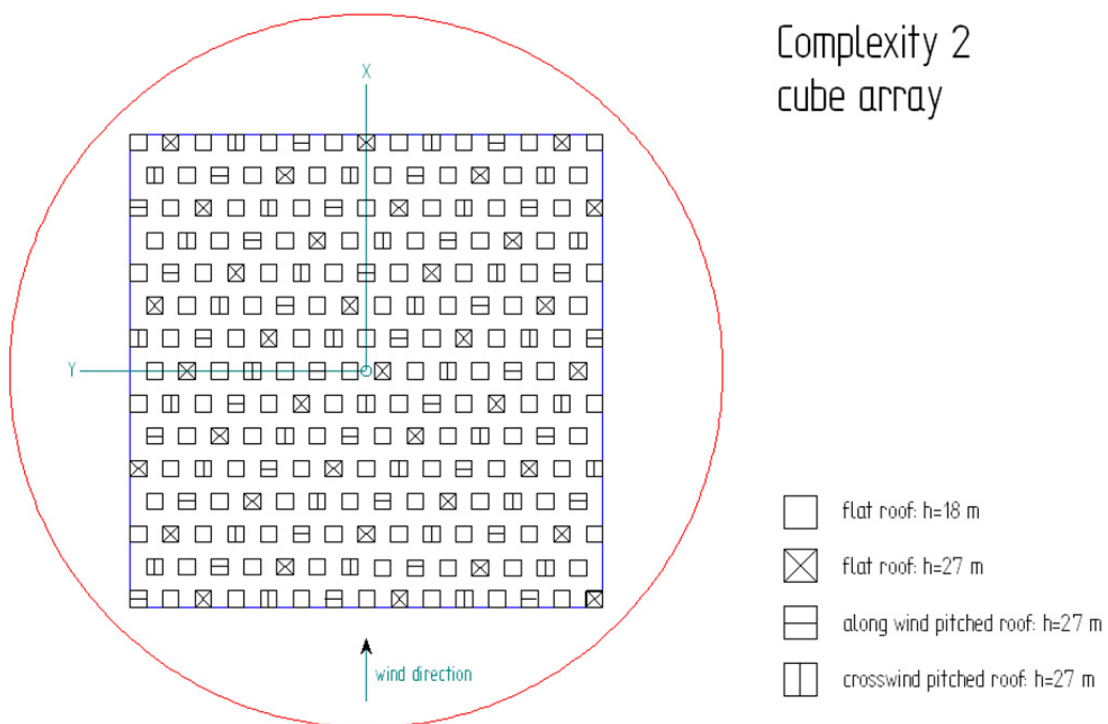
Anhang B: Modell der stark idealisierten urbanen Rauigkeit

Complexity 2 wind tunnel model

all dimensions in model scale 1:225

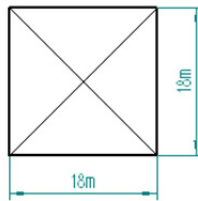


Anhang 3: Technische Zeichnung des Modellaufbaus der Komplexität 2, Maße im Modellmaßstab 1:225.

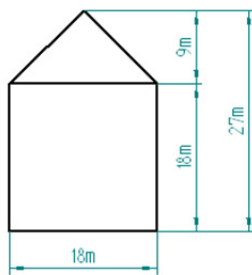


Anhang 4: Aufbau des Würfelfeldes der Komplexität 2, Maße im Naturmaßstab.

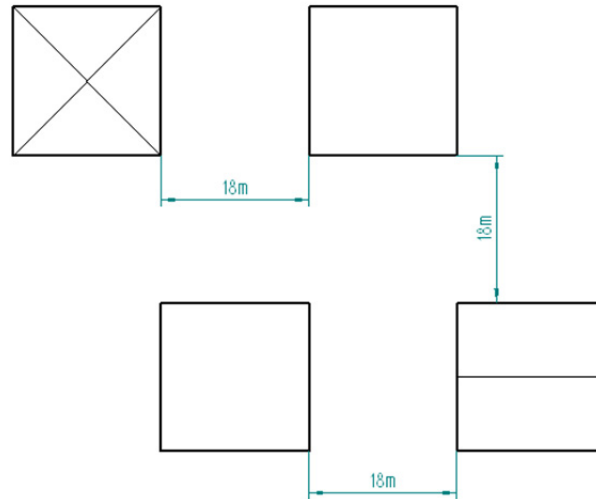
top view:



front view:

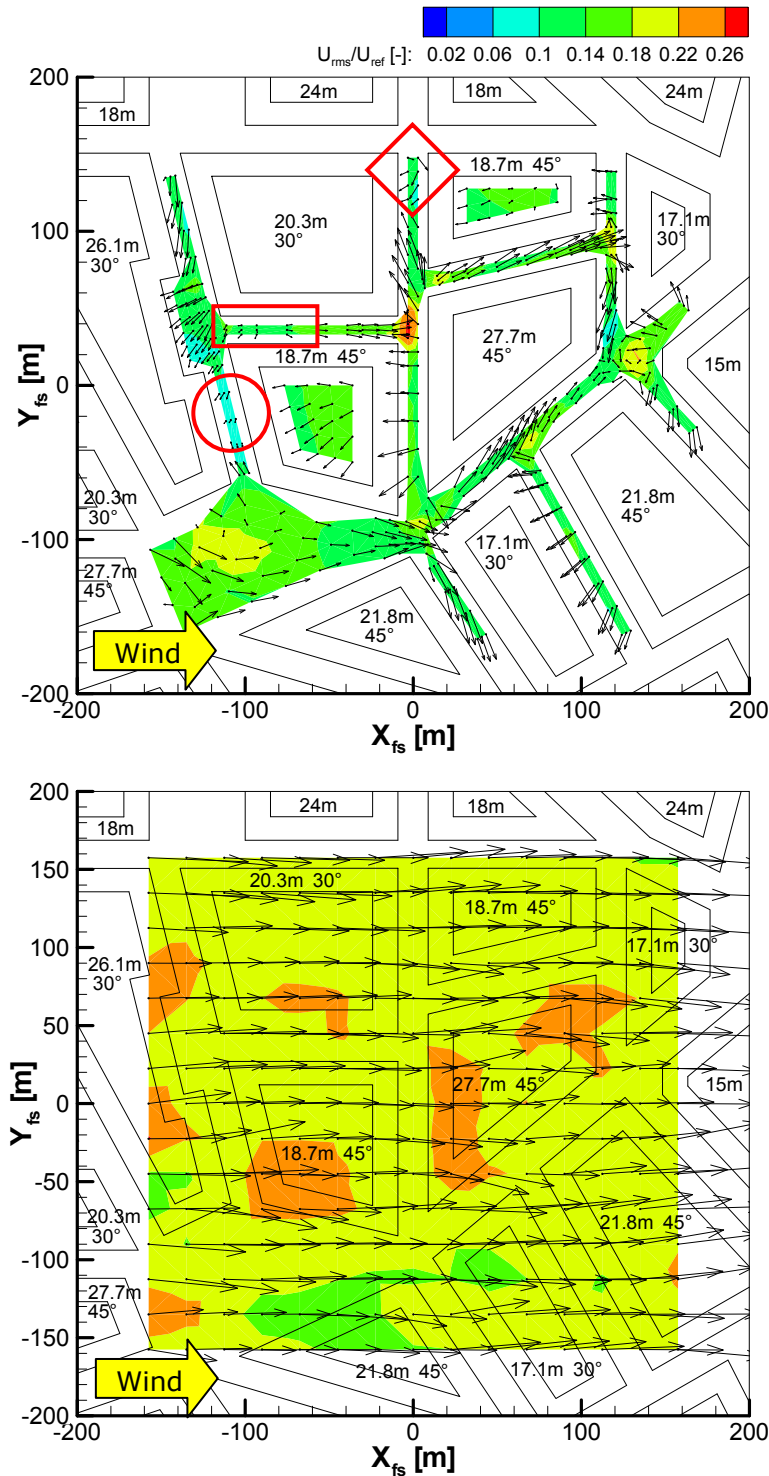


Complexity 2
cube array
all dimensions in full scale



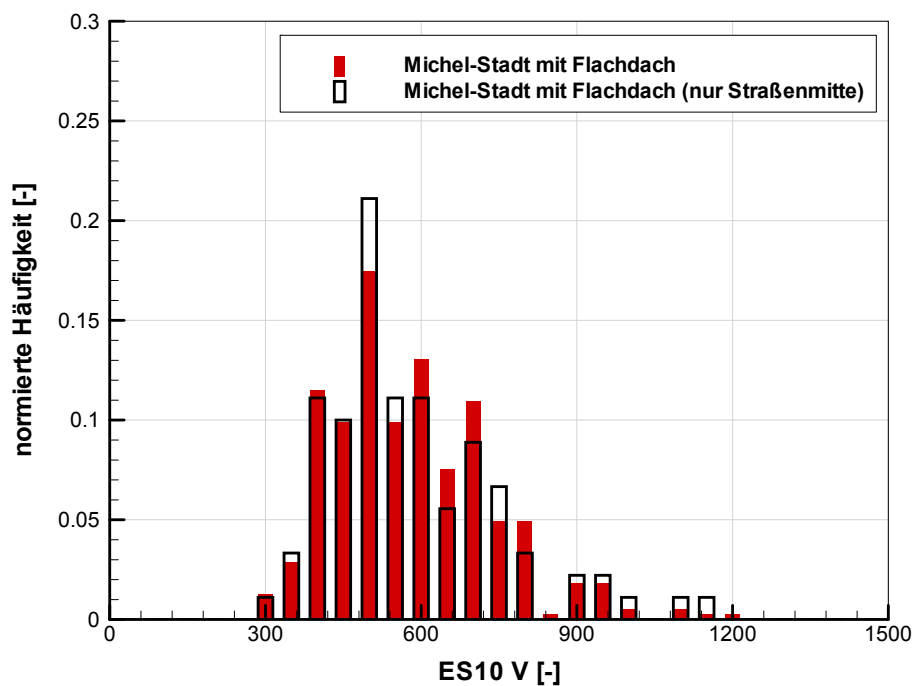
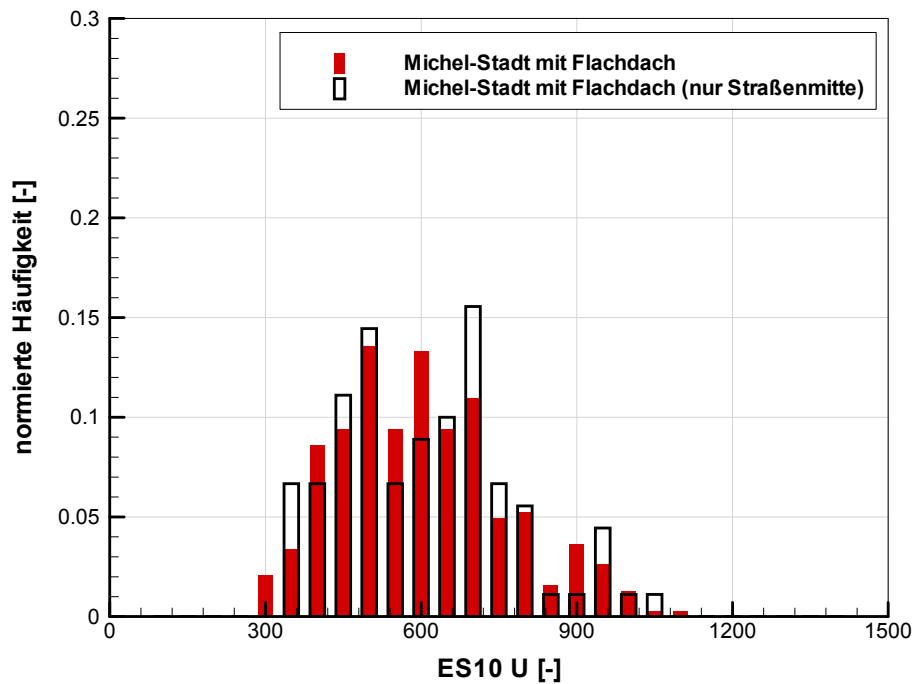
Anhang 5: Maße und Abstände der Einzelhindernisse der Komplexität 2 im Naturmaßstab.

Anhang C: Mittleres Strömungsfeld in Michel-Stadt mit Spitzdach

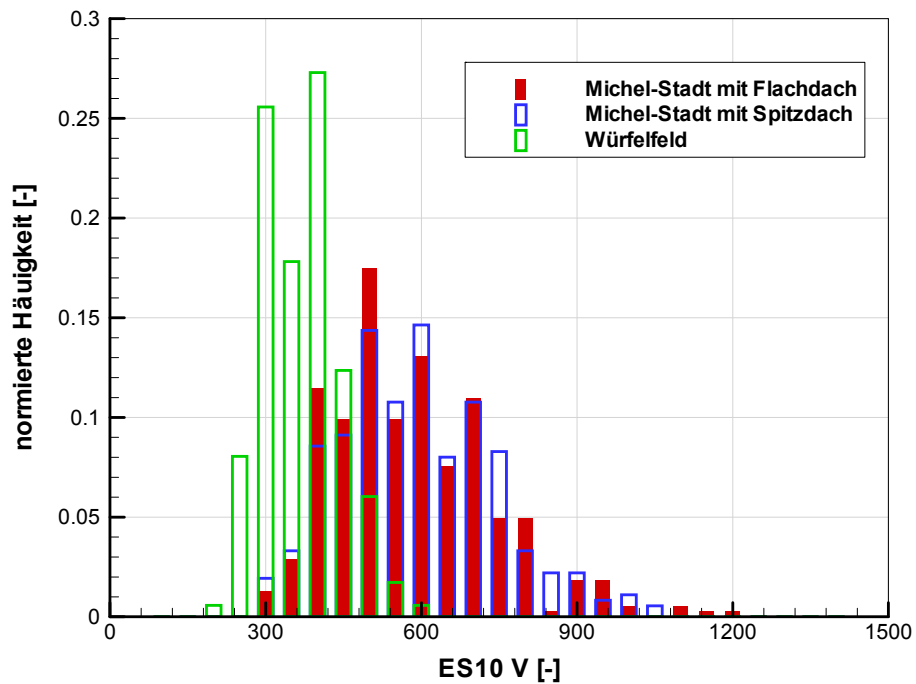


Anhang 6: Mittlere Windvektoren und Standardabweichung der U-Komponente (farblich dargestellt) in Michel-Stadt mit Spitzdach, gemessen in 2 m (oben) und 30.2 m (unten) Höhe.

Anhang D: Ergänzung zur Ensemble-Analyse



Anhang 7: Verteilung der Ensemble-Größe ES10, bei der die Streubreite auf 10 % abgeklungen ist, für die Zeitserien der U-Windkomponente (oben) und V-Windkomponente (unten) in der Michel-Stadt in 2 m Höhe (Naturmaßstab) mit allen Messpunkten und nur in Straßenmitte.



Anhang 8: Verteilung der Ensemble-Größe ES10, bei der die Streubreite auf 10 % abgeklungen ist, für die Zeitserien der V-Windkomponente im Würfelfeld und in der Michel-Stadt in 2 m Höhe (Naturmaßstab).

Anhang 9: Streubreite der ersten Ensemble-Größe und Ensemble-Größe, bei der die Streubreite auf 10 % abgeklungen ist, für die Zeitserien der U- und V-Windkomponente im Würfelfeld und in der Michel-Stadt in 2 m Höhe (Naturmaßstab).

	Streubreite U [-]	ES10 U [-]	Streubreite V [-]	ES10 V [-]
Würfelfeld				
Mittel	0.0143	351	0.0153	348
Standardabweichung	0.0049	73	0.0069	73
Michel-Stadt mit Flachdach				
Mittel	0.0136	582	0.0178	561
Standardabweichung	0.0055	162	0.0092	152
Michel-Stadt mit Spitzdach				
Mittel	0.0144	575	0.0175	570
Standardabweichung	0.0059	151	0.0087	149

Anhang E: Regressionsanalyse

In der zweidimensionalen linearen Korrelations- und Regressionsrechnung für zwei Wertepaare $\{x_i, y_i\}$ gleichen Umfangs n wird davon ausgegangen, dass die Regressionsgleichung $y = A \cdot x + B$ (Regressionsmodell) die optimale Näherung nach der Methode der kleinsten Quadrate darstellt. Der dimensionslose Korrelationskoeffizient r wird mit

$$r_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

abgeschätzt und beschreibt die Güte des Zusammenhangs der Variablen x und y . Dieser Koeffizient nimmt Werte zwischen $-1 \leq r \leq +1$ ein. Ist $r > 0$ besitzt die Gerade eine positive Steigung, ist $r < 0$ eine negative.

Das Bestimmtheitsmaß B wird häufig bei der Interpretation der Korrelationsanalyse verwendet und gibt die gemeinsame Varianz der analysierten Stichprobe an. Das Bestimmtheitsmaß ist somit die Schärfe, mit der die Gerade bestimmt wird. Diese Maßzahl wird varianzanalytisch wie folgt abgeschätzt:

$$B = r^2 \cdot 100 \% = \frac{\text{erklärte Varianz}}{\text{Gesamtvarianz}}$$

Hierbei ist die erklärte Varianz die durch das Regressionsmodell (im linearen Fall Regressionsgerade) erfasste Varianz und die Gesamtvarianz die übliche Varianz einer Stichprobe (Quadrat der Standardabweichung).

Anhang 10: Gleichung der Regressionsgeraden, Bestimmtheitsmaß r^2 und Korrelationskoeffizient r für die Strömungsmessungen in Michel-Stadt mit Flach- und Spitzdach.

	Regressionsgerade	r^2	r
vertikale Profile			
Umean/Uref	$y = 1.013 x - 0.024$	0.984	0.992
Vmean/Uref	$y = 0.861 x - 0.001$	0.723	0.850
Urms/Uref	$y = 0.775 x + 0.042$	0.819	0.905
Vrms/Uref	$y = 0.922 x + 0.017$	0.694	0.833
U'V'mean/Uref ²	$y = 0.978 x - 0.000$	0.588	0.767
Lux	$y = 0.960 x - 5.458$	0.937	0.968
horizontale Ebene z=30.2m			
Umean/Uref	$y = 0.730 x + 0.130$	0.244	0.494
Vmean/Uref	$y = 0.815 x + 0.005$	0.348	0.590
Urms/Uref	$y = 0.649 x + 0.074$	0.419	0.647
Vrms/Uref	$y = 0.890 x + 0.029$	0.495	0.704
U'V'mean/Uref ²	$y = 0.780 x - 0.000$	0.316	0.562
Lux	$y = 0.544 x + 15.92$	0.206	0.454
Straßenschluchten z=2m			
Umean/Uref	$y = 1.004 x + 0.014$	0.918	0.958
Vmean/Uref	$y = 0.973 x - 0.015$	0.924	0.961
Urms/Uref	$y = 0.852 x + 0.030$	0.762	0.873
Vrms/Uref	$y = 0.928 x + 0.021$	0.834	0.913
U'V'mean/Uref ²	$y = 1.167 x - 0.000$	0.766	0.875
Lux	$y = 0.883 x + 2.046$	0.782	0.884

Anhang 11: Gleichung der Regressionsgeraden, Bestimmtheitsmaß r^2 und Korrelationskoeffizient r für die Konzentrationsmessungen in Michel-Stadt mit Flach- und Spitzdach.

	Regressionsgerade	r^2	r
vertikale Profile			
C*mean	$y = 0.957 x + 5E-07$	0.952	0.976
C*rms	$y = 0.983 x - 1E-05$	0.926	0.962
C*max	$y = 0.924 x + 9E-05$	0.821	0.906
PTM-ratio	$y = 1.198 x - 2.367$	0.904	0.951
horizontale Ebene z=30.2m			
C*mean	$y = 0.820 x + 2E-05$	0.888	0.942
C*rms	$y = 0.898 x - 3E-06$	0.942	0.971
C*max	$y = 0.625 x + 0.000$	0.668	0.817
PTM-ratio	$y = 0.587 x + 3.132$	0.607	0.779
Straßenschluchten z=2m			
C*mean	$y = 0.801 x + 2E-05$	0.926	0.962
C*rms	$y = 0.794 x + 1E-05$	0.870	0.933
C*max	$y = 0.844 x + 0.000$	0.597	0.773
PTM-ratio	$y = 0.448 x + 2.978$	0.348	0.590

Literaturverzeichnis

- Adrian, R., Meneveau, C., Moser, R., Riley, J. (2000): Final Report on ‘Turbulence Measurements for LES’ Workshop.
- Allwine, K., Leach, M., Stockham, L., Shinn, J., Hosker, R., Bowers, J., Pace, J. (2004): Overview over Joint Urban 2003 - An atmospheric dispersion study in Oklahoma City. *Symposium on Planning, Nowcasting and Forecasting in the Urban Zone, 84th AMS Annual Meeting*. 11-15 January 2004, Seattle, WA, USA.
- Arnold, S., ApSimon, H., Barlow, J., Belcher, S., Bell, M., Boddy, J., Britter, R., Cheng, H., Clark, R., Colville, R., Dimitroulopoulou, S., Dobre, A., Greally, B., Kaur, S., Knights, A., Lawton, T., Makepeace, A., Martin, D., Neophytou, M., Neville, S., Nieuwenhuijsen, M., Nickless, G., Price, C., Robins, A., Shallcross, D., Simmonds, P., Smalley, R., Tate, J., Tomlin, A., Wang, H., Walsh, P. (2004): Introduction to the DAPPLE air pollution project. *Science of the Total Environment*, Vol. 332, pp. 139–153.
- ASME, Committee #60 (2005): Verification and Validation in Computational Solid Mechanics. Experimental data requirements for validation. <http://www.usacm.org/vnvcsm/> (Accessed 7 November 2007).
- Bezpalcová, K. (2006): Physical modeling of flow and dispersion in urban canopy. *Dissertation*, Charles University in Prag.
- Bezpalcová, K., Ohba, M., Janour, Z. (2009): Role of individual buildings in scalar transfer. *International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena (PHYSMOD 2009)*. 24-26 August 2009, Rhode-St-Genèse, Belgium.
- Bonnet, J., Delville, J., Glauser, M., Antonia, R., Bisset, D., Cole, D., Fiedler, H., Garem, J., Hilberg, D., Jeong, J., Kevlahan, N., Ukleiley, L., Vincendeau, E. (1998): Collaborative testing of eddy structure identification methods in free turbulent shear flows. *Experiments in Fluids*, Vol. 25, pp. 197–225.
- Breuer, M. (2001): Direkte Numerische Simulation und Large-Eddy Simulation turbulenter Strömungen auf Hochleistungsrechnern. *Habilitation*, Universität Erlangen-Nürnberg.

- Britter, R., Hanna, S. (2003): Flow and dispersion in urban areas. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 35, pp. 469–496.
- Britter, R., Schatzmann, M. (2007a): Background and justification document to support the model evaluation guidance and protocol. *COST 732 report*, European Science Foundation.
- Britter, R., Schatzmann, M. (eds) (2007b): Model evaluation guidance and protocol document. *COST 732 report*, European Science Foundation.
- Chang, J., Hanna, S. (2004): Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 87, pp. 167–196.
- Cheng, H., Castro, I. (2002): Near wall flow over urban like roughness. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 104, pp. 229–259.
- Cheng, H., Hayden, P., Robins, A., Castro, I. (2007): Flow over cube arrays of different packing densities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 95, pp. 715–740.
- Counihan, J. (1975): Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972. *Atmospheric Environment*, Vol. 9, pp. 871–905.
- Druault, P., Delville, J., Bonnet, J. (2005): Experimental 3D analysis of the large scale behaviour of a plane turbulent mixing layer. *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 74, pp. 207–233.
- Feddersen, B. (2005): Wind tunnel modelling of turbulence and dispersion above tall and highly dense urban roughness. *Dissertation*, Universität Zürich.
- Fischer, R. (2007): Ein Programm zur statistischen Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens instantan freigesetzter Schadstoffwolken in komplexer urbaner Bebauung. *Diplomarbeit*, Universität Hamburg.
- Fischer, R. (2011): Entwicklung eines problemorientierten Software-Pakets zur automatisierten Aufbereitung, Analyse und Dokumentation von im Windkanal produzierten Daten zur LES-Validierung. *Dissertation*, Universität Hamburg.

- Gomes, M., Rodrigues, A., Mendes, P. (2005): Experimental and numerical study of wind pressures on irregular-plan shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 741–756.
- Grimmond, C., Oke, T. (1999): Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 38, pp. 1262–1292.
- Harms, F. (2010): Systematische Windkanaluntersuchungen zur Charakterisierung instationärer Ausbreitungsprozesse einzelner Gaswolken in urbanen Rauigkeitsstrukturen. *Dissertation*, Universität Hamburg.
- Herbst, I. (2006): Experimentelle Bestimmung des Einflusses variierender Windgrenschichten auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in städtischer Bebauung. *Diplomarbeit*, Universität Hamburg.
- Hertwig, D. (2008): Dispersion in an urban environment with a focus on puff releases. *Studienarbeit*, Universität Hamburg.
- Kaltenbach, H., Fatica, M., Mittal, R., Lund, T., Moin, P. (1999): Study of flow in a planar asymmetric diffuser using large-eddy simulation. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 390, pp. 151–185.
- Kanda, M. (2006): Progress in the scale modeling of urban climate: Review. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 84, pp. 23–33.
- Kastner-Klein, P., Berkowicz, R., Britter, R. (2004): The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 87, pp. 121–131.
- Kastner-Klein, P., Fedorovich, E., Rotach, M. (2001): A wind tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 89, pp. 849–861.
- Kastner-Klein, P., Plate, E. (1999): Wind-tunnel study of concentration fields in street canyons. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3973–3979.
- Kempf, A., Klein, M., Janicka, J. (2005): Efficient generation of initial- and inflow-conditions for transient turbulent flows in arbitrary geometries. *Flow, Turbulence and Combustion*, Vol. 74, pp. 67–84.

- Klein, P., Clark, J.V. (2007): Flow variability in a north American downtown street canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 46, pp. 851–877.
- Klein, P., Young, D.T. (2011): Concentration fluctuations in a downtown urban area. Part I: analysis of Joint Urban 2003 full-scale fast-response measurements. *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 11, pp. 23-42.
- Klein, P., Leitl, B., Schatzmann, M. (2011): Concentration fluctuations in a downtown urban area. Part II: analysis of Joint Urban 2003 wind-tunnel measurements. *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 11, pp. 43-60.
- Kondo, K., Murakami, S., Mochida, A. (1997): Generation of velocity fluctuations for inflow boundary condition of LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67&68, pp. 51–64.
- Leitl, B. (2000): Validation data for microscale dispersion modeling. *EUROTRAC Newsletter*, Vol. 22, pp. 28–32.
- Leitl, B., Chauvet, C., Schatzmann, M. (2001): Effects of geometrical simplification and idealization on the accuracy of micro-scale dispersion modelling. *3rd International Conference on Urban Air Quality*. 19-23 March 2001, Loutraki, Greece.
- Leitl, B., Kastner-Klein, P., Meroney, R.N. (1997): Concentration and flow distributions in the vicinity of U-shaped buildings: wind-tunnel and computational data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67&68, pp. 745–755.
- Leitl, B., Schatzmann, M. (2010): Validation data for urban flow and dispersion models - are wind tunnel data qualified? *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*. May 23-27, 2010, Chapel Hill, North Carolina, USA.
- Letzel, M.C., Bastigkeit, I., Leitl, B., Raasch, S. (2011): Comparison of large-eddy simulation and wind tunnel data for a rough, urban-like boundary layer. *In preparation*.
- Lohmeyer, A., Müller, W., Bächlin, W. (2002): A comparison of street canyon concentration predictions by different modellers: final results now available from the Podbi-exercise. *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp. 157–158.
- Mei, M. (2010): Systematische Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens von Schadstoffwolken in einer idealisierten Stadtstruktur. *Diplomarbeit*, Universität Hamburg.

- Meroney, R.N., Leitl, B., Rafailidis, S., Schatzmann, M. (1999): Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 81, pp. 333–345.
- Oberkampf, W., Trucano, T. (2002): Verification and validation in computational fluid dynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, pp. 209–272.
- Oke, T. (1987): Boundary layer climates. London, Routledge.
- Oke, T. (1988): Street design and the urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, Vol. 11, pp. 103–113.
- Oke, T. (2006): Towards better scientific communication in urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 84, pp. 179–190.
- Patnaik, G., Boris, J. (2005): Evaluation requirements for LES models of urban flow and dispersion. *COST 732 - International Workshop on quality assurance of microscale meteorological models*. 28/29 July 2005, Hamburg, Germany.
- Perret, L., Delville, J., Manceau, R., Bonnet, J. (2006): Generation of turbulent inflow conditions for large eddy simulation from stereoscopic PIV measurements. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 27, pp. 576–584.
- Plate, E. (1999): Methods of investigating urban wind fields - physical models. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 3981–3989.
- Raasch, S., Schröter, M. (2001): PALM – A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 10, No. 5, pp. 363–372.
- Rafailidis, S. (1997): Influence of building areal density and roof shape on the wind characteristics above a town. *Boundary-Layer Meteorology*, Vol. 85, pp. 255–271.
- Repschies, D. (2006): Untersuchungen zur Repräsentativität lokaler Strömungsmessungen in einer idealisierten urbanen Rauigkeitsstruktur. *Diplomarbeit*, Universität Hamburg.
- Rix, M. (2007): Bestimmung repräsentativer Mittelungsintervalle für Naturmessungen in komplexer urbaner Bebauung. *Diplomarbeit*, Universität Hamburg.
- Roth, M. (2000): Review of atmospheric turbulence over cities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 126, pp. 941–990.

- Schatzmann, M., Bächlin, W., Emeis, S., Kühlwein, J., Leitl, B., Müller, W., Schäfer, K., Schlünzen, H. (2006): Development and validation of tools for the implementation of european air quality policy in Germany (Project VALIUM). *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol. 6, pp. 3077–3083.
- Schatzmann, M., Britter, R. (eds) (2005): Proceedings from the International Workshop on "Quality assurance of microscale meteorological models". *COST 732 report*, European Science Foundation.
- Schatzmann, M., Leitl, B. (2002): Validation and application of obstacle-resolving urban dispersion models. *Atmospheric Environment*, Vol. 36, pp. 4811–4821.
- Schatzmann, M., Leitl, B. (2009): Evaluation of numerical flow and dispersion models for applications in industrial and urban areas. *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 32, No. 2, pp. 241–246.
- Schatzmann, M., Leitl, B. (2011): Issues with validation of urban flow and dispersion CFD models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 99, pp. 169–186.
- Schatzmann, M., Olesen, H., Franke, J. (eds) (2010): Model evaluation case studies: approach and results. *COST 732 report*, European Science Foundation.
- Schatzmann, M., Rafailidis, S., Pavageau, M. (1997): Some remarks on the validation of small-scale dispersion models with field and laboratory data. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67&68, pp. 885–893.
- Schlünzen, H. (1997): On the validation of high-resolution atmospheric mesoscale models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67&68, pp. 479–492.
- Schultz, M. (2008): Systematische Windkanaluntersuchungen zur Evaluierung von Parametrisierungsansätzen für die städtische Rauigkeitsschicht. *Dissertation*, Universität Hamburg.
- Snyder, W. (1981): Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion. US EPA-600/8-81-009, Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development.

- Stewart, I. (2009): Classifying urban climate field sites by "local climate zones". *Urban Climate News - Quarterly Newsletter of the IAUC*, Vol. 34, pp. 8–11.
- Theurer, W. (1999): Typical building arrangements for urban air pollution modelling. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4057–4066.
- Tseng, Y., Meneveau, C., Parlange, M. (2006): Modeling flow around bluff bodies and predicting urban dispersion using large eddy simulation. *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, pp. 2653–2662.
- VDI 3783/12 (2000): Umweltmeteorologie – Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht, Windkanalanwendungen. *VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft*, Band 1b, Berlin, Beuth.
- Yassin, M.F., Elmi, A.A. (2011): Stochastic analysis of concentration field in a wake region. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol.18, pp. 270-281.
- Yee, E. (2009): Probability law of concentration in plumes dispersing in an urban area. *Environmental Fluid Mechanics*, Vol. 9, pp. 389-407.
- Zhang, A., Gao, C., Zhang, L. (2005): Numerical simulation of the wind field around different building arrangements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 93, pp. 891–904.

Danksagung

Diese Arbeit konnte aufgrund der finanziellen Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1276 „MetStröm“ angefertigt werden. MetStröm befasst sich mit der skalenübergreifenden Modellierung in der Strömungsmechanik und Meteorologie.

Prof. Schatzmann und Prof. Leitl möchte ich für die tatkräftige Unterstützung und die wertvollen Anregungen beim Verfassen dieser Arbeit danken, die zum Gelingen beigetragen haben. Die Arbeitsgruppe stand mir jederzeit hilfreich zur Seite, wofür ich besonders während der Messkampagne im Windkanal dankbar war.

Für den Bau der Gebäude von Michel-Stadt und den Umbau im Windkanal bedanke ich mich bei der Feinmechanischen Werkstatt der Universität Hamburg.