

Systematische Windkanaluntersuchungen zur Charakterisierung
instationärer Ausbreitungsprozesse einzelner Gaswolken in
urbanen Rauigkeitsstrukturen

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

vorgelegt von

Frank Harms
aus
Oldenburg (Oldb)

Hamburg
2010

Als Dissertation angenommen vom
Department Geowissenschaften der Universität Hamburg

auf Grund der Gutachten von

Prof. Dr. Michael Schatzmann
und
Prof. Dr. Bernd Leitl

Hamburg, den 25.06.2010

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

Inhaltsverzeichnis

SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	IV
1 EINLEITUNG.....	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	7
2.1 VERTIKALSTRUKTUR DER ATMOSPHERISCHEN/STÄDTISCHEN GRENZSCHICHT	7
2.2 CHARAKTERISIERUNG TURBULENTER STRÖMUNGEN	11
2.3 ÄHNLICHKEITSTHEORIE	14
2.4 TURBULENTE AUSBREITUNGSPROZESSE.....	16
2.5 NUMERISCHE BESCHREIBUNG VON TURBULENTEN AUSBREITUNGSPROZESSEN	20
2.6 STAND DER FORSCHUNG.....	26
3 EXPERIMENTELLER AUFBAU UND VERSUCHSTECHNIK	31
3.1 GRENZSCHICHTWINDKANAL „WOTAN“	31
3.2 STADTMODELL VON OKLAHOMA CITY.....	33
3.3 VERWENDETE MESSTECHNIK	36
4 VERSUCHSPLAN UND -STRATEGIE	43
4.1 GRENZSCHICHTMODELLIERUNG UND -DOKUMENTATION	43
4.2 STRÖMUNGSMESSUNGEN IM MODELLGEBIET	48
4.3 AUSBREITUNGSUNTERSUCHUNGEN EINZELNER GASWOLKEN	52
5 FELDKAMPAGNE JOINT URBAN 2003	57
5.1 PROJEKTZIELE	57
5.2 EXPERIMENTELLE DURCHFÜHRUNG.....	57
6 GRENZSCHICHTMODELLIERUNG.....	63

6.1	ATMOSPHERISCHE GRENZSCHICHT VON OKLAHOMA CITY	63
6.2	EIGENSCHAFTEN DER MODELLIERTEN WINDKANAL-GRENZSCHICHT	73
6.3	QUALITÄTSANFORDERUNGEN AN DIE MODELLIERTE STRÖMUNG	88
6.3.1	<i>Laterale Homogenität der Strömung</i>	88
6.3.2	<i>Versperrung und Druckkriterium</i>	90
6.3.3	<i>Reynoldszahlunabhängigkeit der modellierten Anströmung</i>	92
7	DATENQUALITÄT DER STRÖMUNGSMESSUNGEN IM MODELLGEBIET	97
7.1	VERTRAUENSBEREICH DER DURCHFÜHRTEN STRÖMUNGSMESSUNGEN.....	97
7.2	REYNOLDSZAHLUNABHÄNGIGKEIT IM MODELLGEBIET.....	102
8	KONZENTRATIONSMESSUNGEN	105
8.1	CHARAKTERISIERUNG DER PUFFAUSBREITUNG	105
8.2	DATENERFASSUNG	108
8.3	DATENQUALITÄT DER DURCHFÜHRTEN KONZENTRATIONSMESSUNGEN	110
8.3.1	<i>Vertrauensbereich der durchgeführten Konzentrationsmessungen</i>	110
8.3.2	<i>Repräsentativität der gemessenen mittleren Puff-Parameter</i>	113
8.3.3	<i>Bestimmungsgenauigkeit von Extremwertereignissen</i>	125
8.4	SKALIERBARKEIT DER AUSBREITUNGSVERSUCHE	129
8.4.1	<i>Einfluss der Quellstärke auf die Ergebnisse der Puff-Messungen</i>	131
8.4.2	<i>Einfluss der Freisetzungsdauer auf die Ergebnisse der Puff-Messungen</i>	135
8.4.3	<i>Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Ergebnisse der Puff-Messungen</i>	143
8.4.4	<i>Entdimensionalisierung der Puff-Parameter</i>	155
8.5	VERGLEICHENDE BEWERTUNG DER VARIABILITÄT TURBULENTER AUSBREITUNGSPROZESSE IN EINER URBANEN RAUIGKEIT	157

8.5.1	<i>Einfluss der Ensemblegröße auf die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter.....</i>	<i>158</i>
8.5.2	<i>Vergleich der Bestimmungsgenauigkeit der verschiedenen mittleren Puff-Parameter.....</i>	<i>163</i>
8.5.3	<i>Einfluss des Abstandes zwischen Messort und Quelle auf die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter.....</i>	<i>165</i>
8.6	BERECHNUNG DER PUFF-PARAMETER AUS MESSUNGEN DER JOINT URBAN 2003-KAMPAGNE ..	168
8.7	VERGLEICH ZWISCHEN WINDKANAL UND NATURDATEN	172
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	183
	ANHANG A: ABBILDUNGEN DER MESSKONFIGURATIONEN FÜR SÄMTLICHE KONZENTRATIONSMESSUNGEN.....	187
	LITERATURVERZEICHNIS	193
	DANKSAGUNG.....	201

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

ARLFRD	Air Resources Laboratory Field Research Division
at	arrival time [s]
at*	dimensionslose arrival time [-]
c	Stoffmengenkonzentration [ppm _v]
c*	dimensionslose Konzentration [-]
CST	Central Standard Time (USA/Canada)
D	Diffusionskoeffizient [m ² /s]
d*	dimensionslose Dosis [-]
d ₀	Nullpunktverschiebung [m]
DNS	Direkte Numerische Simulation
DPG	Dugway Proving Ground
f	Frequenz [Hz]
FFT	Fast Fourier Transformationen
FID	Flammenionisationsdetektor
f _m	Normierte Frequenz der maximalen Energiedichte im Spektrum
H	mittlere Gebäudehöhe [m]
i, j, k	Indizes
IOP	Intensive Operation Period
I _u , I _v , I _w	Turbulenzintensität der jeweiligen Geschwindigkeitskomponente [-]
JU2003	Joint Urban 2003
LDA	Laser-Doppler-Anemometer
LES	Large-Eddy-Simulation
L _{ref}	Referenzlänge [m]
l _t	leaving time [s]
l _t *	dimensionslose leaving time [-]
L _{ux} , L _{uy} , L _{uz}	Integrale Längenmaß der jeweiligen Raumrichtung [m]
n	normierte Frequenz [-]
p	Druck [Pa]

p^*	dimensionsloser Druckgradient
p_c	peak concentration [ppm _v]
p_c^*	dimensionslose peak concentration [-]
P_{dyn}	dynamischer Druck [Pa]
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory
ppm _v	parts per million by volume (Teile pro einer Million Volumenanteile)
ppt _v	parts per trillion by volume (Teile pro einer Billion Volumenanteile)
pt	peak time [s]
pt^*	dimensionslose peak time [-]
q	Teilchenstromdichte [$\text{mol} / \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
Q	Emissionsvolumenstrom [m^3/s]
Q_v	freigesetzte Gasvolumina pro Puff [m^3]
RANS	Reynolds-Averaged-Navier-Stokes
Re	Reynoldszahl
R_{if}	Fluss-Richardson-Zahl
$S_{ii}(f)$	Spektrale Energiedichte ($i = u, v, w$) [$\text{J} \cdot \text{s} / \text{m}^3$]
t	Zeit [s]
T	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
T_u	integrales Zeitmaß
u^*	Schubspannungsgeschwindigkeit [m/s]
u, v, w	Geschwindigkeitskomponenten der Hauptströmung [m/s]
u_1, u_2, u_3	Geschwindigkeitskomponenten der Hauptströmung in Kapitel 2 [m/s]
u_h	Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe [m/s]
UMT	Universal Transverse Mercator - Koordinaten
u_{ref}	Referenzwindgeschwindigkeit [m/s]
W_{dir}	Windrichtung [$^{\circ}$]
x, y, z	kartesische Koordinaten
x_m, y_m, z_m	Kennzeichnet kartesische Koordinaten im Modellmaßstab
x_{fs}, y_{fs}, z_{fs}	Kennzeichnet kartesische Koordinaten im Naturmaßstab
x_1, x_2, x_3	kartesische Koordinaten in Kapitel 2

z_0	Rauigkeitslänge [m]
z_{fs}	Höhe über dem Boden im Naturmaßstab (full scale) [m]
z_{ref}	Referenzhöhe [m]

Operatoren:

\sim	Kennzeichnet den Momentanwert der jeweiligen Variable
$\overline{(\dots)}$	Kennzeichnet die zeitliche Mittelung der jeweiligen Variable
\dots'	Kennzeichnet die Fluktuation der jeweiligen Variable

Griechische Symbole:

α	Profilexponent
δ	Grenzschichthöhe [m]
δ_{ij}	Kronecker-Delta (für $i=j \rightarrow \delta_{ij} = 1$, sonst $\delta_{ij} = 0$)
Θ	potentielle Temperatur [°C]
κ	Von-Karman-Konstante (0.4)
μ	dynamische Viskosität [kg /m·s]
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]
ρ	Dichte der Luft [kg/m ³]
σ_t	Standardabweichung der Konzentrationsverteilung
σ_x	Ausbreitungskoeffizient längs der mittleren Ausbreitungsrichtung
σ_{x0}	Anfangsausdehnung eines Puffs
τ	Reynoldsspannungen [m ² /s ²]
u_δ	Referenzgeschwindigkeit am Oberrand der Grenzschicht [m/s]

1 Einleitung

Die Möglichkeit, turbulente Prozesse und Ausbreitungsphänomene in der Atmosphäre zu verstehen und damit auch vorhersagen zu können, hat in der Vergangenheit eine Vielzahl von wissenschaftlichen Arbeiten motiviert. Theoretische Grundlagen auf dem Gebiet der Strömungslehre wurden von Wissenschaftlern wie Reynolds, Taylor oder Prandtl bereits Ende des 19. Jahrhunderts bzw. Anfang des 20. Jahrhunderts aufgestellt (Heidorn 1978). Eine der ersten umfangreichen Feldstudien zur Untersuchung von Luftverschmutzung außerhalb und in Städten fand 1937 in Leicester, England, statt (Pasquill & Smith 1974, p. 301).

Seitdem folgten zahlreiche weitere Studien, die das Verständnis über die physikalischen Prozesse in der Atmosphäre stetig weiterentwickelt haben. Durch diese Entwicklung lässt sich die Ausbreitung von Schadstoffen in ländlichen, hindernisfreien und ebenen Gebieten größtenteils erklären und anhand numerischer Modelle näherungsweise berechnen (Louka, Belcher & Harrison 2000; Pasquill & Smith 1974). Dies trifft bis heute nicht für urbane Gebiete zu (Louka, Belcher & Harrison 2000). Die physikalische Komplexität von Strömungs- und Ausbreitungsprozessen ist in Stadtgebieten wegen der ausgeprägt heterogenen Oberflächenstruktur signifikant höher. Doch insbesondere in diesen Gebieten ist der Bedarf an zuverlässigen Vorhersagemodellen hoch und wird aufgrund einer zunehmenden Urbanisierung stetig größer.

Der Anteil der Weltbevölkerung, die in Städten lebt, hat sich zwischen 1950 und 2008 von unter 30% auf etwa 50% erhöht (POPULATION REFERENCE BUREAU REPORT 2008). In Industrieländern wie den Vereinigten Staaten leben heute bereits über 80% der Bevölkerung in Städten. Damit steigt die Zahl der Menschen, die typisch städtischen Gefahren ausgesetzt sind, an. Laut WMO (Turbulent Diffusion in the Atmosphere 1958, p. 37) kann Luftverschmutzung insbesondere in industrialisierten urbanen Gebieten unter bestimmten meteorologischen Bedingungen erheblichen Einfluss auf die Gesundheit der Bürger nehmen.

Zudem besteht neben der Luftverschmutzung, die vor allem durch Abgase der Industrie oder des Straßenverkehrs hervorgerufen wird, die Gefahr von Freisetzungen toxischer, brennbarer oder radioaktiver Stoffe. Meist ist die Gefährdung bei derartigen Freisetzungen, die unter anderem durch Störfälle in Kraftwerken, Unfällen von Gefahrguttransportern oder auch durch terroristische Anschläge verursacht werden können, für die Bevölkerung ungleich höher. Somit ergibt sich für numerische Ausbreitungsmodelle ein breites Anwendungsgebiet.

Heutige Ausbreitungsmodelle unterscheiden sich insbesondere in ihrem Rechenaufwand und lassen sich grob in drei Klassen einteilen. Bei der direkten numerischen Simulation (DNS) werden selbst kleinskalige, turbulente Schwankungen durch Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen numerisch berechnet. Diese Methode stellt die höchsten Anforderungen an die zur Verfügung stehende Rechenleistung und findet daher nur Anwendung bei Strömungsberechnungen auf sehr kleinen Modellgebieten. Strömungs- und Ausbreitungsberechnungen in urbanen Gebieten sind im Fall der DNS selbst für moderne Großrechner zu komplex (Schatzmann & Leitl 2009).

Im Gegenzug dazu wird bei RANS (englisch für Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen) basierten Modellen nur die mittlere Strömung berechnet und der Effekt der turbulenten Schwankungen modelliert. Turbulente Strömungsberechnungen sind so selbst in großen Modellgebieten mit vergleichbar geringem Zeitaufwand möglich. Daher haben sich RANS basierte Modelle auch bei Strömungs- und Ausbreitungssimulationen in urbanen Gebieten etabliert. Nachteil dieser Modelle ist, dass zeitlich veränderliche Prozesse nicht aufgelöst werden. RANS basierte Modelle sind nicht geeignet, von Natur aus instationäre Ausbreitungsprozesse in Stadtgebieten zu berechnen (Patnaik, Boris & Grinstein 2003).

Eine effektive Zwischenlösung zwischen DNS- und RANS-Modellen stellen LES (Large Eddy Simulation) basierte Modelle dar (Sagaut 2004). Im Fall von LES werden die großen Wirbelstrukturen wie bei DNS direkt berechnet und nur die kleinen Wirbel über ein Turbulenzmodell abgebildet. Damit verfügen LES-Modelle über das Potential, instationäre Prozesse bei vergleichsweise geringerem Rechenaufwand vorhersagen zu können. In der Me-

teorologie war der Anwendungsbereich der LES-Modelle bisher im Wesentlichen auf durch von besonders großen Wirbeln geprägte Phänomene (z.B. Wolkenkonvektion) beschränkt. Inzwischen sind die Rechner jedoch so leistungsfähig geworden, dass auch LES-Modelle mit sehr hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung für städtische Anwendungen entwickelt werden können (Patnaik, Boris & Grinstein 2003; Letzel, Kanda & Raasch 2006).

In der Praxis haben numerische Ausbreitungsmodelle Einfluss auf Entscheidungen mit profunden politischen und ökonomischen Konsequenzen. Die Qualitätsüberprüfung dieser Modelle ist daher von entscheidender Bedeutung. Hierfür sind Vergleichsdatensätze erforderlich, die eine abgesicherte Bewertung der Modell-Qualität ermöglichen. Die Validierungsstrategie richtet sich nach der Komplexität und dem Aufgabengebiet des jeweiligen numerischen Modells. Aufgrund verschiedener Labor- und Feldexperimente stehen Referenzdatensätze zur Verfügung, die in der Regel auf Mittelwerten von Strömungs- und Ausbreitungsprozessen basieren und sich damit insbesondere zur Validierung von RANS Modellen eignen. Die Erstellung von geeigneten Referenzdatensätzen erfordert ausreichend lange Simulationssequenzen, um repräsentative Mittelwerte zu erhalten, und unterliegt besonders großen Anforderungen, wenn kleinskalige Prozesse in Stadtgebieten abgebildet werden sollen (Schatzmann & Leitl, 2002).

Die Entwicklung von LES basierten Modellen erhöht die Anforderungen an geeignete Referenzdatensätze zusätzlich. In der Regel liegt der Bestimmungszweck dieser Modelle bei der Simulation von zeitabhängigen, nicht stationären Prozessen. Dementsprechend sind Vergleichsdatensätze gefordert, die neben repräsentativen Mittelwerten und Standardabweichungen auch Informationen über die zeitliche Entwicklung von Strömungs- und Ausbreitungsprozessen beinhalten. Bis heute gibt es keine etablierten Validierungsstrategien für LES-Modelle.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, instationäre Strömungs- und Ausbreitungsphänomene in Stadtgebieten zu untersuchen, um anhand der Ergebnisse einen Referenzdatensatz erstellen zu können, der sich zur Validierung von LES basierten Modellen eignet. Der Schwerpunkt dieser Arbeit wurde insbesondere auf die Untersuchung von Ausbreitungs-

prozessen einzelner Schadstoffwolken in einer urbanen Umgebung gelegt. Hierfür wurden systematische Versuche in einem detaillierten Modell der Stadt Oklahoma City im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ der Universität Hamburg durchgeführt.

Das nachfolgende Kapitel 2 geht zunächst auf die theoretischen Grundlagen turbulenter Strömungs- und Ausbreitungsprozesse in der städtischen und atmosphärischen Grenzschicht ein. Desweiteren werden in diesem Kapitel Ähnlichkeitstheorien angesprochen, die die Voraussetzungen für die Modellierung einer naturähnlichen Grenzschicht in einem Windkanal sind. Das Kapitel gibt zudem einen kurzen Überblick darüber, wie heutzutage turbulente Ausbreitungsprozesse numerisch abgebildet werden können.

Kapitel 3 beinhaltet die Beschreibung der Versuchstechnik, des experimentellen Aufbaus und des Windkanals „Wotan“, in dem sämtliche Messungen stattgefunden haben. In zwei 6 monatigen Messkampagnen wurden zahlreiche Strömungs- und Ausbreitungsuntersuchungen durchgeführt. Der Versuchsplan dieser Messungen wird detailliert in Kapitel 4 erläutert.

Oklahoma City wurde als Modellstadt ausgesucht, da hier im Jahr 2003 eine umfangreiche Naturmesskampagne stattgefunden hat, bei der unter anderem auch die Ausbreitung einzelner Schadstoffwolken untersucht wurde. Hierdurch wird ein Vergleich zwischen Windkanal- und Naturdaten ermöglicht. In Kapitel 5 wird diese Feldkampagne (Joint Urban 2003) vorgestellt.

Voraussetzung für die Windkanalversuche war die Modellierung einer Grenzschicht deren Charakteristiken im Maßstab von 1:300 mit denen der Naturkampagne übereinstimmen. In Kapitel 6 wird die im Windkanal modellierte Grenzschicht im Detail beschrieben.

Kapitel 7 beinhaltet die Überprüfung der Datenqualität der im Modellgebiet durchgeführten Strömungsmessungen. Es wurden Strömungsmessungen im gesamten Innenstadtbereich von Oklahoma City mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung durchgeführt, um das Strömungsfeld, welches die Ausbreitung der einzelnen Schadstoffwolken maßgeblich beeinflusst, so genau wie möglich bestimmen zu können.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Untersuchung von Ausbreitungsprozessen einzelner Schadstoffwolken innerhalb von städtischen Bebauungsstrukturen. Die Ergebnisse der systematischen Untersuchungen werden in Kapitel 8 präsentiert. Auf Basis der zahlrei-

chen Strömungs- und Ausbreitungsversuche wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Referenzdatensatz erstellt, der sich speziell an den hohen Anforderungen der LES-Validierung orientiert.

Die Arbeit wird mit einer ausführlichen Zusammenfassung sämtlicher Ergebnisse der Messkampagnen in Kapitel 9 sowie mit einem Ausblick auf den bestehenden Forschungsbedarf abgeschlossen.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit relevanten theoretischen Grundlagen erläutert. Es wird hierbei auf turbulente Strömungseigenschaften in der atmosphärischen und städtischen Grenzschicht eingegangen. Desweiteren gibt dieses Kapitel den derzeitigen Erkenntnisstand über turbulente Ausbreitungsprozesse in einer urbanen Umgebung wieder und beschreibt, wie diese Prozesse gegenwärtig durch numerische Modelle abgebildet werden können. Der Anspruch dieses Kapitels liegt nicht darin, eine vollständige und systematische Beschreibung der Grenzschichttheorie zu geben, sondern den Leser in die für diese Arbeit relevanten Grundlagen einzuführen.

2.1 Vertikalstruktur der atmosphärischen/städtischen Grenzschicht

In der vorliegenden Arbeit werden Strömungs- und Ausbreitungsprozesse untersucht, die sich auf die atmosphärische Grenzschicht beziehen. Als atmosphärische Grenzschicht bezeichnet man den Teil der Atmosphäre, der direkt durch die Erdoberfläche beeinflusst wird. Die Höhe der Grenzschicht ist variabel. Sie hängt von den jeweiligen Schichtungsverhältnissen ab und kann von wenigen hundert Metern bis hin zu mehreren Kilometern reichen. Snyder (1981) gibt an, dass die Grenzschichthöhe unter neutralen Bedingungen zwischen 500 m und 2 km variiert.

Oberhalb der Grenzschicht schließt sich die freie Atmosphäre an. Sie bleibt von der Beschaffenheit der Erdoberfläche unbeeinflusst. Reibungskräfte können in dieser Höhe vernachlässigt werden. Somit kommt es in der freien Atmosphäre zu einem Gleichgewicht zwischen der Druckgradient-Kraft und der Coriolis-Kraft (Geostrophie).

In der atmosphärischen Grenzschicht erfolgt der Übergang von der geostrophischen Strömung an ihrem Oberrand mit einer endlichen Windgeschwindigkeit zu einer Strömungsgeschwindigkeit von Null an der Erdoberfläche. Die obersten 90% der Grenzschicht werden als Ekman-Schicht bezeichnet. Vom Oberrand der Grenzschicht bis hin zum Boden wächst der Einfluss der Reibung. Damit ist das Gleichgewicht zwischen Druckgradient-Kraft und Coriolis-Kraft gestört und der Windvektor weicht vom geostrophischen Wind ab. Durch die Höhenabhängigkeit des Reibungseinflusses erfährt der Windvektor mit zu-

nehmender Höhe eine Drehung in Richtung des geostrophischen Windes. Diese Winddrehung mit der Höhe wird Ekman-Spirale genannt.

Die unteren etwa 10% der atmosphärischen Grenzschicht nimmt die so genannte Prandtl-Schicht ein, die auch als „surface layer“ bezeichnet wird. Innerhalb dieser Schicht ist die Summe von turbulenten und molekularen Spannungen annähernd konstant, weshalb diese auch häufig als „constant flux layer“ bezeichnet wird.

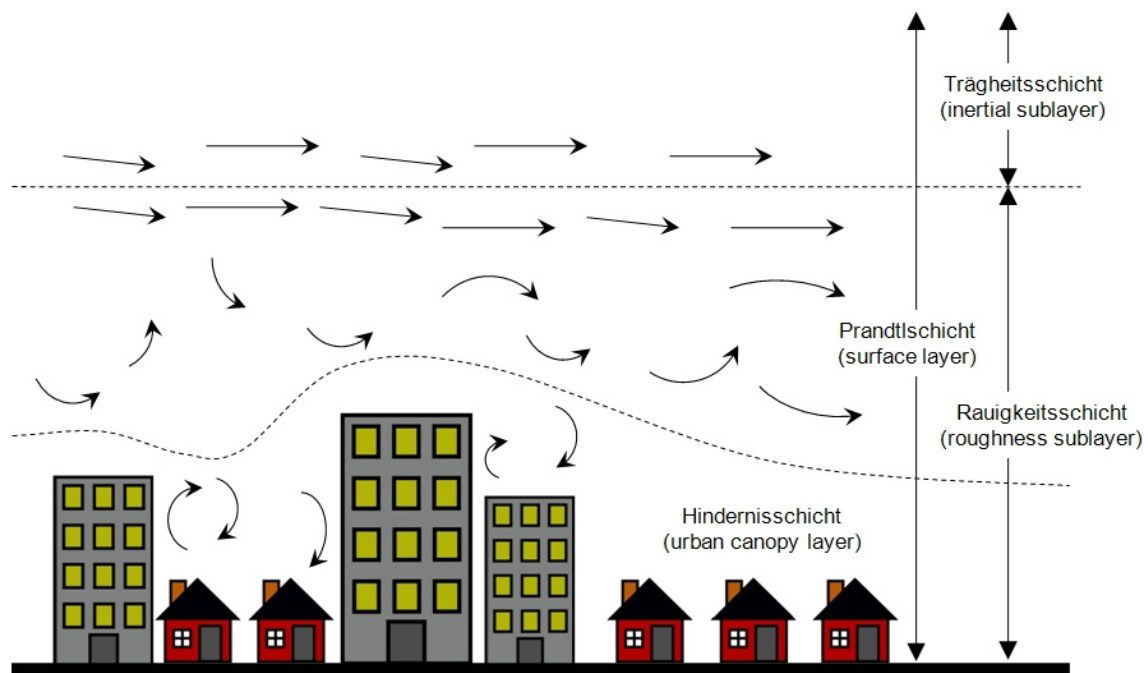


Abbildung 1: Schematische Darstellung der einzelnen Schichten der städtischen Prandtl-Schicht.

Dieses Modell der Prandtl-Schicht wird bei mesoskaliger Betrachtungsweise (ca. 20 km und größer) bzw. dann angewendet, wenn die Oberflächenbeschaffenheit des jeweiligen Geländes als relativ homogen angesehen werden kann. Bei kleinräumiger Betrachtungsweise der städtischen Grenzschicht hat sich hingegen aufgrund der ausgeprägt heterogenen und komplexen Oberflächenbeschaffenheit von Stadtgebieten (Gebäude unterschiedlicher Höhe, Bäume und andere Rauigkeitselemente) ein mehrschichtiges Modell etabliert, wie es z.B. von Grimmond & Oke (2002) beschrieben wird (siehe Abbildung 1).

Die unterste Schicht ist in diesem Modell die Hindernisschicht (engl. „urban canopy layer“). Ihre Höhe entspricht etwa der mittleren Gebäudehöhe H oder auch der Nullpunktverschiebung d_0 (die Nullpunktverschiebung d_0 korrigiert den durch die Bodenrauig-

keiten verursachten Versatz des Geschwindigkeitsprofils, wobei d_0 von der Form, Höhe und Anordnungsdichte der Bodenrauigkeiten abhängt; VDI Richtlinie 2000). In dieser Schicht wird die Strömung unmittelbar von unterschiedlichen Boden- und Rauigkeitsbeschaffenheiten geprägt. Die Strömung ist daher durch hohe Turbulenzgrade gekennzeichnet und immer ausgeprägt instationär. Die von Hindernissen erzeugten individuellen mikroklimatischen Effekte bestehen über eine kurze Distanz und werden schließlich von turbulenten Wirbeln verwischt (Oke 2006). Die Distanz, in der die Effekte verwischen, hängt von der Stärke der Effekte, der Windgeschwindigkeit und den jeweiligen Schichtungsverhältnissen ab. Diese Effekte können auf einer horizontalen Skala von bis zu wenigen hundert Metern bestehen. Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Ausbreitungsprozesse einzelner Schadstoffwolken im Nahbereich zum Freisetzungsort (etwa 100 m bis ungefähr 1 km) werden größtenteils durch instationäre Strömungsphänomene innerhalb der Hindernisschicht geprägt.

Die Hindernisschicht ist eingebettet in die sogenannte Rauigkeitsschicht (engl. „roughness sublayer“). Die vertikale Mächtigkeit der Rauigkeitsschicht wird von der jeweiligen Oberflächenrauigkeit bestimmt und reicht bis zu einer Höhe, in der individuelle, von einzelnen Rauigkeiten geprägte Strömungseigenschaften verwischen und die Strömung als horizontal homogen angesehen werden kann. Feldmessungen, Windkanaluntersuchungen und grobe Abschätzungen geben für die Höhe der Rauigkeitsschicht das 1.5- bis 4-fache der mittleren Gebäudehöhe an (Grimmond & Oke 2002; Rotach 1999; Feddersen 2005; Schultz 2008).

Oberhalb der Rauigkeitsschicht schließt die Trägheitsschicht (engl. „inertial sublayer“) an, die den obersten Abschnitt der städtischen Prandtschicht darstellt. In der Trägheitsschicht gilt das logarithmische Wandgesetz, welches bei einer horizontal homogenen Oberflächenrauigkeit für die gesamte Prandtschicht angewendet wird.

Es ist allerdings bei Betrachtung der Vertikalstruktur der Grenzschicht zu berücksichtigen, dass sich nach einem Rauigkeitswechsel (z.B. Land-Stadt-Übergang) die veränderten Oberflächeneinflüsse nicht unmittelbar auf die gesamte Grenzschicht auswirken. Erst mit zunehmender Überstreichungslänge wächst die aus einem Rauigkeitswechsel resultierende neue interne Grenzschicht mit der Höhe an. Nur innerhalb dieser internen Grenz-

schicht entsteht eine Gleichgewichtsschicht, in der sich wiederum die zuvor angesprochene Rauigkeitsschicht und Trägheitsschicht ausbildet. Wie schnell sich die Grenzschicht an eine veränderte Rauigkeit anpasst, hängt von der Höhe der Rauigkeitselemente und den jeweiligen Schichtungsverhältnissen ab.

Für eine urbane Rauigkeit, wie sie bei der vorliegenden Arbeit Anwendung fand, werden die Schichtungsverhältnisse in der Regel als neutral angesehen, da thermischen Effekte gegenüber mechanischer Turbulenzproduktion in Stadtgebieten aufgrund der signifikanten Rauigkeitsstrukturen vernachlässigbar klein sind. Dennoch finden sich in der Literatur unterschiedliche Angaben bezüglich der Frage, welche Überstreichungslänge bei einer homogenen Rauigkeit erforderlich ist, bis sich ein Gleichgewichtszustand bis zum Oberrand der Rauigkeitsschicht einstellt. Guilloteaum und Mestayer (2000) zeigen auf Basis von numerischen Simulationen, dass Überstreichungslängen von über 5.5 km Länge erforderlich sind, bis sich eine Trägheitsschicht ausbildet. Bottema (1997) empfiehlt eine Überstreichungslänge von 250 H (H entspricht der mittleren Gebäudehöhe), um die Rauigkeitslänge z_0 und die Nullpunktverschiebung d_0 sicher bestimmen zu können. Die Rauigkeitslänge z_0 gibt hierbei die Höhe über Grund an, in der die Windgeschwindigkeit auf den Wert Null zurückgegangen ist. Sie lässt sich aus gemessenen Windprofilen bestimmen. Nach Cheng und Castro (2002) ist eine Überstreichungslänge von 300 H nötig, bis sich ein Gleichgewichtszustand bis zum Oberrand der Rauigkeitsschicht ausbilden kann. Schultz (2008) zeigt auf Basis von Windkanaluntersuchungen, dass eine Überstreichungslänge von etwa 100 H (H entspricht in dieser Studie der Würfelhöhe der idealisierten Rauigkeit) erforderlich ist, bis sich eine Gleichgewichtsschicht mit nahezu konstanter Dicke einstellen kann.

In der Regel treten in Stadtgebieten mehrere Rauigkeitssprünge auf, die durch unterschiedliche Bebauung (wie z.B. Vororte, Stadtkerne und Industriegebiete) verursacht werden. Daher reichen in Stadtgebieten die Überstreichungslängen in der Regel nicht aus, damit sich eine im Gleichgewicht befindliche städtische Prandtlsschicht ausbilden kann, wie sie in Abbildung 1 dargestellt ist.

Der in der vorliegenden Studie betrachtete Innenstadtbereich von Oklahoma City, dessen Rauigkeit sich bei einer mittleren Gebäudehöhe von 19.4 m (De Wekker et al. 2004) signi-

fikant von der umliegenden Vorstadt unterscheidet, hat einen maximalen Durchmesser von knapp einem Kilometer. Aufgrund der relativ kleinen horizontalen Ausdehnung des Stadtkernes sind die zuvor genannten Überstreichungslängen, die eine Ausbildung der Gleichgewichtsschicht bis zum Oberrand der Rauigkeitsschicht ermöglichen, nicht gegeben. Dies verdeutlicht, dass sich insbesondere in Stadtgebieten die Vertikalstruktur der Grenzschicht häufig nicht mit einfachen Modellvorstellungen beschreiben lässt.

Der Innenstadtbereich von Oklahoma City ist von einem etwa 10 Kilometer breiten, horizontal relativ homogenen Gelände umgeben. Dieser Bereich, der vor allem durch Einfamilienhäuser geprägte ist, lässt sich als Vorstadt charakterisieren. Damit ist für die Strömung, die auf den Innenstadtkern trifft, nach den oben genannten Literaturangaben eine hinreichend lange Überstreichungslänge gegeben, die die Ausbildung einer sich im Gleichgewicht befindlichen Prandtlsschicht erwarten lässt.

2.2 Charakterisierung turbulenter Strömungen

Turbulente Strömungsprozesse haben einen wesentlichen Anteil an den in dieser Arbeit untersuchten Ausbreitungsprozessen. Bei der Turbulenz handelt es sich um einen Strömungszustand, der durch dreidimensionale, instationäre Bewegungen der Fluidteilchen geprägt ist. Aufgrund der Instationarität der Strömung führen Einzelmessungen der Windgeschwindigkeit zu Zufallswerten und zu nicht reproduzierbaren Einzelergebnissen. Folglich müssen zur Beschreibung turbulenter Strömungen statistische Verfahren herangezogen werden, auf die später im Text eingegangen wird.

Die turbulente Strömung lässt sich nach Reynolds in eine mittlere Strömung (Hauptströmung) und in eine dieser überlagerten, aus Wirbeln bestehenden Nebenströmung aufteilen. Durch die Einwirkung der Scherung wird der Hauptströmung stetig Energie entzogen, die insbesondere von den großen Wirbeln der Nebenströmung aufgenommen wird. Die Nebenströmung besteht aus einem breiten Spektrum von Wirbeln unterschiedlicher Größe, wobei die aus der Hauptströmung gewonnene Energie von den großen Wirbeln an kleinere übertragen wird. Sind die Turbulenzelemente schließlich so klein, dass molekulare Kräfte wirksam werden können, wird die kinetische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Dieser beschriebene Energieumwandlungsprozess wird Kaskadenprozess genannt.

Ob sich in einem Fluid Turbulenz ausbilden kann, hängt vom Verhältnis der Trägheitskraft zur Zähigkeit des jeweiligen Mediums ab. Dieses Verhältnis wird von der sogenannten Reynoldszahl

$$Re = \frac{u_h \cdot L_{ref}}{\nu} \quad 2.1$$

beschrieben, wobei u_h die Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe (in m/s), L_{ref} die Referenzlänge (in m) und ν die kinematische Viskosität ($\frac{m^2}{s}$) ist. Erst bei hinreichend großen Reynoldszahlen kann Turbulenz entstehen.

Die Grundgesetze der Strömungsmechanik stellen der Massenerhaltungssatz, der Impulserhaltungssatz (Navier-Stokes-Gleichung) und der Energieerhaltungssatz dar. Die Navier-Stokes-Gleichung ist eine nichtlineare Differentialgleichung 2. Ordnung. Für ein inkompressibles Newtonsches Fluid konstanter Temperatur hat die Impulserhaltungsgleichung die Form:

$$\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-\tilde{p} \delta_{ij} + 2\mu \tilde{s}_{ij}) \quad 2.2$$

Das Symbol \sim bezeichnet, dass es sich um einen Momentanwert der jeweiligen Variable handelt. In turbulenten Strömungen ist zu berücksichtigen, dass sich Strömungsgeschwindigkeiten an einem Ort selbst dann ändern, wenn der statistische Mittelwert der Strömungsgeschwindigkeit konstant ist. In Gleichung 2.2 bezeichnet μ die dynamische Viskosität, p den thermodynamische Druck und ρ die Dichte der Luft. δ_{ij} stellt das sogenannte Kronecker-Delta (für $i=j \rightarrow \delta_{ij} = 1$, sonst $\delta_{ij} = 0$) dar und s_{ij} den Scherungstensor. In diesem Theoriekapitel werden die drei Raumrichtungen des kartesischen Koordinatensystems mit x_1 , x_2 und x_3 und die Geschwindigkeitskomponenten der Hauptströmung mit \bar{u}_1 , \bar{u}_2 und \bar{u}_3 bezeichnet.

Bei allgemeinen Betrachtungen der atmosphärischen Grenzschicht ist in Gleichung 2.2 zudem die Corioliskraft enthalten. Der Coriolis-Term wird in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt, da der Coriolis-Term innerhalb der Prandtlschicht sehr klein gegenüber den

Impulsflüssen ist (Holton 1992; Garrat 1994). In der vorliegenden Studie werden ausschließlich Strömungsprozesse untersucht, die innerhalb der Prandtl-Schicht stattfinden. Desweiteren kann nach Snyder (1981) die Corioliskraft vernachlässigt werden, wenn die horizontale Ausdehnung des Untersuchungsgebietes unter 5 Kilometern liegt. In der vorliegenden Arbeit hat das Untersuchungsgebiet eine vergleichsweise begrenzte horizontale Ausdehnung von etwa einem Quadratkilometer.

Es gibt bis heute keine analytische Lösung der Navier-Stokes-Gleichung. Mit numerischen Näherungsverfahren hingegen kann die Navier-Stokes-Gleichung gelöst werden. Bei der sogenannten direkten numerischen Simulation (DNS) werden selbst kleinskalige turbulente Schwankungen in Raum und Zeit aufgelöst. Die Anforderungen der DNS an die zur Verfügung stehende Rechenleistung sind allerdings derart hoch, dass DNS bis heute nur in der Grundlagenforschung Anwendung findet. Zur Berechnung von komplexen Strömungsprozessen haben sich daher in der Praxis Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichung wie die reynoldsgemittelte Navier-Stokes Gleichung (RANS), die auch Reynoldsgleichung genannt wird, etabliert:

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (-P \delta_{ij} + 2S_{ij} \mu - \rho \overline{u_i u_j}) \quad 2.3$$

Die Reynoldsgleichung ist eine Impulserhaltungsgleichung, auf die unter Berücksichtigung der Massenerhaltung die Reynoldsmittelung angewandt worden ist, wobei der Momentanwert der Strömung \tilde{u} in einen Anteil der Hauptströmung \bar{u} und einen Anteil der überlagerten Schwankungsbewegungen u' aufgeteilt wurde. Der in Klammern stehende Gesamtspannungstensor setzt sich aus den Normal- und Scherspannungen (1. und 2. Term), die auf ein Fluidelement wirken, sowie den Reynoldsspannungen $\tau = \rho \overline{u_i u_j}$ zusammen. Die Reynoldsspannungen treten, hervorgerufen durch die statistische Mittelwertbildung, als zusätzlicher Term mit zusätzlichen Variablen in der Reynoldsgleichung auf. Dies hat zur Folge, dass die Variablenzahl die Anzahl der zur Lösung des Systems vorhandenen Gleichungen übersteigt und damit das Gleichungssystem nicht mehr geschlossen ist. Die Schließung des Gleichungssystems gelingt durch zusätzliche Annahmen für die Komponenten des Reynolds'schen Spannungstensors in Form von Gleichungen. Diese Annahmen

werden als Turbulenzmodelle bezeichnet, die sich durch ihre Ordnung der Schließung voneinander unterscheiden. Verschiedene Turbulenzmodelle werden z.B. von Stull (1989) beschrieben.

Da RANS-Modelle nur die mittlere Strömung berechnen, während der Effekt der turbulenten Schwankungen modelliert wird, können turbulente Strömungsvorgänge so selbst in großen Modellgebieten mit vergleichbar geringem Zeitaufwand berechnet werden. RANS basierte Modelle haben sich daher auch bei Strömungssimulationen in urbanen Gebieten etabliert. Nachteil dieser Modelle ist, dass turbulente zeitlich veränderliche Prozesse nicht aufgelöst werden können.

Eine Zwischenlösung zwischen RANS und DNS stellen LES (Large Eddy Simulationen) basierte Modelle dar. Bei LES Modellen werden die großen Wirbelstrukturen einer Strömung durch Lösen der Navier-Stokes-Gleichungen direkt berechnet, während für die Bestimmung aller hochfrequenten Anteile des Turbulenzspektrums auf Turbulenzmodelle zurückgegriffen wird. Die in den 60er Jahren entstandene LES Modellierung basiert auf der Annahme, dass der individuelle Charakter eines Strömungsszenarios von großen Wirbeln geprägt wird, während die kleinen Wirbelstrukturen als nahezu isotrop angesehen werden können. Dementsprechend kann durch die numerische Abbildung der kleinen Wirbel durch Turbulenzmodelle Rechenzeit eingespart werden, ohne dass hierdurch wesentliche transiente Strömungseigenschaften verloren gehen.

2.3 Ähnlichkeitstheorie

Damit Windkanalversuche naturähnliche Prozesse simulieren, müssen nicht nur die geometrischen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes, sondern auch die turbulenten Strömungseigenschaften maßstabverkleinert im Windkanal modelliert werden. Eine Übertragung der turbulenten Charakteristiken auf unterschiedliche Maßstäbe wird z.B. durch das Buckingham π -Theorem ermöglicht. Gemäß dieser Ähnlichkeitstheorie kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen n dimensionsbehafteten Größen in eine Gleichung mit $n-m$ dimensionslosen Größen umgeschrieben werden, wobei m die Anzahl der verwendeten unabhängigen Grundgrößen ist. Anhand von geeigneten Referenzgrößen lässt sich so die Impulserhaltungsgleichung (Gleichung 2.2) oder die Reynoldsgleichung (Glei-

chung 2.3) in eine dimensionslose Form übertragen. Die Ähnlichkeitstheorie wird z.B. von Stull (1989) beschrieben.

Die charakteristischen Referenzgrößen, die beispielsweise zur Entdimensionalisierung der Reynoldsgleichung benötigt werden, sind die Länge L_{ref} und die Geschwindigkeit U_{ref} . Beliebige turbulente Strömungen, die sich durch die dimensionslose Reynoldsgleichung beschreiben lassen, weisen die gleichen dimensionslosen turbulenten Charakteristiken auf, wenn sowohl die dimensionslosen Kennzahlen als auch die Randbedingungen übereinstimmen.

Als dimensionslose Kennzahl tritt in der dimensionslosen Reynoldsgleichung allein die bereits in Gleichung 2.1 erwähnte Reynoldszahl auf.

Ein Vergleich zwischen Reynoldszahlen, die in der Natur und im Windkanal beobachtet werden, zeigt jedoch, dass aufgrund des größeren Maßstabes deutlich höhere Reynoldszahlen in der Natur auftreten. Bei der Joint Urban 2003 Naturmesskampagne in Oklahoma City hat die Reynoldszahl für typische Werte von $L_{ref} = 19.4$ m, $U_{ref} = 5$ m/s, $P = 1.013$ bar und $T = 20^\circ\text{C}$ einen Wert von etwa $Re_{Natur} \approx 5.329.670$, während die Reynoldszahl im Windkanal für $L_{ref} = 0.064$ m, $U_{ref} = 5$ m/s, $P = 1.013$ bar und $T = 20^\circ\text{C}$ einen Wert von $Re_{Windkanal} \approx 17.765$ hat. Bei der ausgewählten Referenzlänge L_{ref} handelt es sich um die von De Wekker et al. (2004) angegebene mittlere Gebäudehöhe im Innenstadtbereich von Oklahoma City. Bei dem verwendeten Maßstab von 1:300 müsste die Windgeschwindigkeit im Kanal demnach 300-mal höher sein als in der Natur, damit die Reynoldszahlen in beiden Systemen identisch sind. Die zuvor beschriebene Reynoldszahlähnlichkeit ist daher in der Regel bei Windkanalversuchen nicht gegeben.

Dennoch ist es möglich, gemäß des Konzepts der Reynoldszahlunabhängigkeit naturähnliche turbulente Strömungen in Windkanälen zu modellieren. Hiernach sind Strömungen über geometrisch gleichen Rauigkeiten ähnlich, wenn die Reynoldszahl hinreichend hoch ist. Die Reynoldszahlunabhängigkeit wird z.B. von Townsend (1976) beschrieben. In Kapitel 6.3.3 wird die in dieser Versuchskampagne modellierte Windkanalgrenzschicht auf Reynoldszahlunabhängigkeit geprüft.

Unter der Voraussetzung der Reynoldszahlunabhängigkeit können demnach alle wesentlichen Charakteristiken einer atmosphärischen Grenzschicht maßstabsverkleinert in Wind-

kanälen rekonstruiert werden. In der vorliegenden Kampagne wurden die Grenzschichtcharakteristiken modelliert, die sich in der Natur stromaufwärts des Innenstadtbereiches von Oklahoma City vorfinden. Die theoretischen Grundlagen der Grenzschichtcharakterisierung werden in Kapitel 6.2 zusammen mit der Dokumentation der in dieser Arbeit modellierten Grenzschicht erläutert.

2.4 Turbulente Ausbreitungsprozesse

In der vorliegenden Arbeit werden Ausbreitungsprozesse in einer urbanen Rauigkeit unter neutralen Schichtungsverhältnissen untersucht. Da sich aufgrund der starken Turbulenzproduktion in Stadtgebieten im Allgemeinen nahezu neutrale Schichtungsverhältnisse bis etwa zur zweifachen mittleren Gebäudehöhe einstellen (Hanna, Britter & Franzese, 2003), ist die Beschränkung der Windkanaluntersuchungen auf neutrale Schichtungsverhältnisse gerechtfertigt.

Desweiteren ist die Dichte des freigesetzten Gases im Verhältnis zur Dichte der Umgebungsluft für Ausbreitungsuntersuchungen relevant. Besteht zwischen ihnen ein signifikanter Dichteunterschied, wie es beispielsweise bei schweren Gasen der Fall ist, besitzt die freigesetzte Gaswolke eine Eigenbewegung, die sich von der atmosphärischen Bewegung unterscheidet. In der vorliegenden Studie werden ausschließlich Ausbreitungsprozesse untersucht, bei denen die Dichte des freigesetzten Gases etwa der der Umgebungsluft entspricht und dementsprechend Effekte, verursacht durch Dichteunterschiede, vernachlässigt werden können.

In dieser Windkanalstudie werden zudem keine chemischen Reaktionen des freigesetzten Gases in der Umgebungsluft modelliert. Es werden ausschließlich Ausbreitungsprozesse in Quellnähe (die Distanz zwischen Messort und Quelle beträgt weniger als 1 km) betrachtet. Hierdurch entspricht die Ausbreitungsdauer dieser Prozesse im Naturmaßstab nur wenigen Minuten. Auf dieser kurzen Zeitskala sind signifikante chemische Veränderungen für viele Gase nicht relevant. Ausbreitungsprozesse von Gasen, die ihren chemischen Zustand in sehr kurzen Zeiträumen verändern, wie es beispielsweise bei Stickstoffdioxid oder Stickstoffmonoxid der Fall ist, werden dementsprechend von den durchgeführten Windkanalversuchen dieser Kampagne nicht abgebildet.

Bei turbulenten Ausbreitungsprozessen in einer urbanen Umgebung handelt es sich um ein ausgesprochen komplexes physikalisches Phänomen. Ein in die Atmosphäre freigesetztes Gas breitet sich durch molekulare Diffusion, Advektion und insbesondere Turbulenz aus. Bei Windstille wird die Ausbreitung eines Gases allein durch molekulare Diffusion bestimmt. Diese wird durch das erste Fick'sche Gesetz beschrieben. Für die Ausbreitung eines Gases in x_1 Richtung gilt:

$$q = -D \frac{\partial c}{\partial x_1} \quad 2.4$$

Hierbei ist q die Teilchenstromdichte, c die Stoffmengenkonzentration und D der Diffusionskoeffizient. Die Ausbreitung eines Gases, verursacht durch molekulare Diffusion, ist demnach direkt proportional zum Konzentrationsgradienten der jeweiligen Raumrichtung.

Ist das umgebende Fluid selbst in Bewegung, wird die Ausbreitung eines Gases hierdurch maßgeblich beeinflusst. Für laminare Strömungen wird die Verlagerung eines Gases mit der herrschenden Strömung bei gleichzeitiger molekularer Diffusion durch die Advektions-Diffusions-Gleichung beschrieben (für Details hierzu siehe Roberts & Webster 2002).

In der Atmosphäre werden in der Regel aufgrund zu hoher Reynoldszahlen keine laminaren Strömungen beobachtet (siehe Kapitel 2.3), daher wird die Ausbreitung von Gasen hier nicht nur durch molekulare Diffusion und Advektion sondern auch immer von Turbulenz geprägt.

Innerhalb einer turbulenten Strömung sorgen Wirbel für eine effiziente Vermischung eines freigesetzten Gases mit der Umgebungsluft. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, ist in der atmosphärischen Grenzschicht ein breites Spektrum unterschiedlicher Wirbelgrößen vorhanden, deren Größe insbesondere von der Bodenrauigkeit bestimmt wird. Große Wirbel, die in der Grenzschicht einen Durchmesser von mehreren hundert Metern besitzen, können Gaswolken quer zur mittleren Strömungsrichtung verlagern, ohne hierbei die Gaswolke mit der Umgebungsluft zu vermischen. Bei kontinuierlichen Freisetzungen sorgen die großen Wirbel für mäanderförmige Ausbreitungsmuster, wie sie beispielsweise bei Abgasfahnen aus Schornsteinen zu beobachten sind.

Die lokale Vermischung eines freigesetzten Gases mit der Umgebungsluft wird insbesondere von den kleinen Wirbeln verursacht, deren Abmessungen der Größe einer Gaswolke entsprechen. Die turbulente Strömung führt dazu, dass sich eine freigesetzte Gaswolke über ein zunehmend größer werdendes Volumen verteilt, wodurch die mittlere Konzentration eines Stoffes mit der Reisezeit sinkt. Nach Roberts et al. (2002) hat Turbulenz hierbei keinen Einfluss auf die an einem Ort möglichen Höchstkonzentrationen (im engl. auch als peak concentrations bezeichnet). Die Reduzierung dieser „peak concentrations“ ist wiederum abhängig von der molekularen Diffusion.

In der vorliegenden Studie wird ausschließlich die Ausbreitung von instantan freigesetzten Gaswolken in einer urbanen Umgebung untersucht. Diese instantanen Freisetzungen, die beispielsweise bei Störfällen in Kraftwerken, Unfällen von Gefahrguttransportern oder auch bei terroristischen Anschlägen auftreten können, werden im englischsprachigen Raum auch als „Puffs“ bezeichnet. Im Gegensatz zu einer kontinuierlich freigesetzten Gasfahne (im engl. plume), wird bei einem Puff eine einzelne Gaswolke freigesetzt. Ab wann eine Freisetzung als Puff bezeichnet wird, hängt dementsprechend insbesondere von der Länge der Freisetzung ab. Nach Pasquill und Smith (1974) bezeichnet man die Freisetzung eines Gases als Puff, wenn seine Freisetzungsdauer klein gegenüber der Reisezeit ist. Unter der Reisezeit versteht man die Dauer, die ein freigesetztes Gas benötigt, um von der Quelle zu einem ausgewählten Messort zu gelangen. Die Definition von Pasquill & Smith (1974) hat zur Folge, dass dieselbe Wolke in Quellnähe als Plume und in größeren Entfernungen jedoch als Puff bezeichnet wird. In der vorliegenden Arbeit werden ausschließlich Puffs untersucht, bei denen die Reisezeit jeweils signifikant länger war, als die Freisetzungsdauer.

Abbildung 2 zeigt ein Konzentrationssignal, welches beim Vorbeiziehen eines Puffs an einem städtischen Messort aufgenommen wurde. Das aufgezeichnete Konzentrationssignal weist ein für Puff-Freisetzungen typisches schnelles Ansteigen und langsames Abklingen der Konzentration auf. Bei kontinuierlichen Freisetzungen ist hingegen die Ausbildung eines Plateaus im Messsignal charakteristisch. Dieses Plateau könnte ebenfalls beobachtet werden, wenn eine Reihe von Puffs in infinitesimal kurzen Zeitschritten hintereinander

freigesetzt würde. Dementsprechend kann eine kontinuierliche Freisetzung auch als Superposition unendlich vieler Puffs aufgefasst werden.

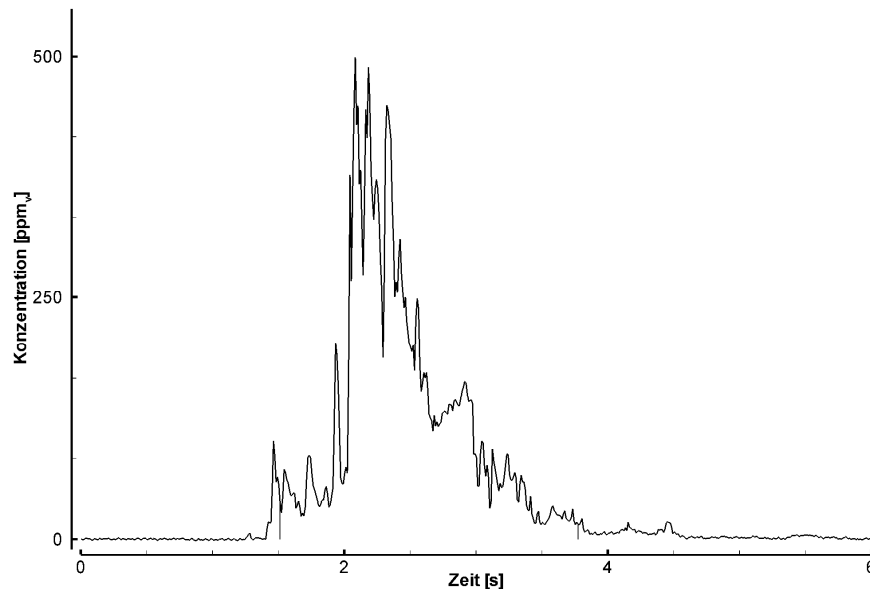


Abbildung 2: Typisches Konzentrationssignal, welches beim Vorbeiziehen einer Gaswolke (Puff) an einem ausgewählten Messort aufgezeichnet wurde.

Die Ausbreitung von Gaswolken in einer urbanen Umgebung ist ein ausgesprochen komplexes Phänomen. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass eine freigesetzte Gaswolke räumlich und zeitlich signifikante Variationen bezüglich des Ausbreitungsverlaufes aufweist. Zudem nimmt bei Puff-Ausbreitungen der Strömungszustand der Umgebungsluft zum Zeitpunkt der Freisetzung Einfluss auf die Ausbreitung der Wolke. In einer turbulenten Strömung wächst der Effekt eines geringfügig unterschiedlichen Anfangszustandes mit der Zeit an (Serafin et al. 2003). Dementsprechend wird sich der Ausbreitungsverlauf zweier Gaswolken voneinander unterscheiden, wenn der Strömungszustand zum Zeitpunkt ihrer Freisetzung nicht identisch ist. Nun weist eine turbulente Strömung selbst dann ein Spektrum von unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen auf, wenn der mittlere Strömungszustand konstant bleibt (siehe Kapitel 2.2). Dementsprechend zeigen Gaswolken, die am gleichen Ort unter gleichen mittleren Randbedingungen freigesetzt wurden, ein Spektrum von unterschiedlichen Ausbreitungsverläufen.

2.5 Numerische Beschreibung von turbulenten Ausbreitungsprozessen

Bei der numerischen Modellierung von Ausbreitungsphänomenen sind zwei Koordinatensysteme gebräuchlich. Die Lagrangesche Betrachtungsweise geht von einem teilchen- bzw. fluidelementfesten, also mitbewegten Bezugssystem aus. Diese Betrachtungsweise ermöglicht es, den Weg eines Partikels (Trajektorie) zu verfolgen. Im Gegensatz hierzu werden bei der Eulerschen Betrachtungsweise die Strömungszustände an einem festen Ort beschrieben, unabhängig davon, welches Teilchen sich dort gerade befindet.

Numerische Ausbreitungsmodelle, die auf die Eulersche Betrachtungsweise zurückgreifen, sind heute weiter verbreitet als Lagrangesche Modelle. Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass Referenzdaten aus Natur- oder Laborversuchen, die zur Validierung numerischer Modelle herangezogen werden, in der Regel den Strömungszustand an festen Orten angeben.

Bei der Modellierung von urbanen Ausbreitungsprozessen wird zwischen unterschiedlich großen horizontalen Skalen unterschieden. Ziel dieser Einteilung ist es, die Komplexität dieser Prozesse zu verringern, indem abhängig von der Größe des Untersuchungsgebietes nur die für die jeweilige Skala relevanten Prozesse modelliert werden. Ein freigesetztes Gas kann in der Atmosphäre abhängig von der freigesetzten Menge noch bis zu hundert von Kilometern vom Freisetzungsort entfernt nachgewiesen werden. Während allerdings die Ausbreitung einer Gaswolke in Quellnähe sensitiv auf die Geometrie einzelner Gebäude reagiert, ist der Einfluss eines Gebäudes auf den Ausbreitungsverlauf fern der Quelle relativ gering. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass sich die freigesetzte Wolke mit wachsendem Quellabstand auf ein größeres Volumen verteilt und die Konzentrationsgradienten innerhalb der Wolke abnehmen. Dementsprechend müssen numerische Modelle, die Ausbreitungsprozesse in Quellnähe vorhersagen, die Geometrie des Untersuchungsgebietes entsprechend detailliert abbilden. Britter und Hanna (2003) unterscheiden 4 Skalen: die „Regional“ Skala (bis 100 km oder 200 km), die „City“ Skala (bis 10 km oder 20 km), die „Neighbourhood“ Skala (bis 1 km oder 2 km) und die „Street“ Skala (unter 100 m bis 200 m).

Die „Regional“ Skala löst nur die stärksten durch Städte hervorgerufenen Effekte auf (Wärmeinseleffekt einer Stadt, verminderte Luftqualität), die noch in Entfernungen von

100 km bis 200 km zur Stadt beobachtet werden können. Dieser „Regional“ Skala werden beispielsweise Wettervorhersagemodelle mit horizontalen Auflösungen von etwa 20 km - 40 km zugeordnet.

Die horizontale Ausdehnung der „City“ Skala entspricht in etwa der durchschnittlichen Größe von Städten. Auf dieser Skala werden im Vergleich zur „Regional“ Skala deutlich mehr von der städtischen Rauigkeit hervorgerufene Effekte berücksichtigt. Anhand von Rauigkeitsklassen wird der Einfluss der städtischen Rauigkeit auf das Strömungsfeld parametrisiert. Allerdings werden auf dieser Skala Variationen des Strömungs- oder Konzentrationsfeldes innerhalb der Stadt, hervorgerufen durch einzelne Gebäude oder Gebäudekomplexe, nicht aufgelöst.

Die „Neighbourhood“ Skala hat eine horizontale Ausdehnung von etwa 1 km - 2 km. Auf dieser Skala wird der unterschiedliche Charakter von verschiedenen Stadtteilen (Vorstadt, Industriegebiete oder Innenstädte) berücksichtigt. Am Boden freigesetzte Gase verbleiben bei dem betrachteten Ausbreitungsgebiet größtenteils innerhalb der Hindernisschicht. Dies ist von besonderer Bedeutung, wenn die Gefahren von Freisetzungen toxischer Gase innerhalb der Stadt untersucht werden.

Die horizontale Ausdehnung der „Street“ Skala liegt bei 100 m – 200 m. Der Einfluss einzelner Gebäude auf das Strömungs- und Konzentrationsfeld ist auf dieser Skala signifikant. Zudem weisen Konzentrationsfelder in Quellnähe starke räumliche und zeitliche Variationen auf.

Die vorliegende Windkanalstudie untersucht Ausbreitungsprozesse über Entfernungen von etwa 50 m - 1000 m zum Quellort. Die hier vorgestellten Untersuchungen werden demnach der von Britter und Hanna (2003) definierten „Street“ Skala und „Neighbourhood“ Skala zugeordnet.

Die turbulenten Prozesse, die die Ausbreitung von Gasen in der „Street“ Skala und „Neighbourhood“ Skala bestimmen, haben eine räumliche und zeitliche Auflösung, die heutzutage von numerischen Modellen aufgrund des hohen Rechenaufwandes nicht vollständig abgebildet werden kann. Damit die Prozesse dennoch numerisch beschrieben werden können, muss die Komplexität der vom Modell berechneten Prozesse minimiert

werden. Diese Vereinfachungen der Navier-Stokes-Gleichungen, die die turbulenten Prozesse mathematisch beschreiben, wurden bereits ausführlich in Kapitel 2.2 beschrieben. Im nachfolgenden Text soll darauf eingegangen werden, welche Auswirkungen diese Vereinfachungen auf die numerische Abbildung von Ausbreitungsprozessen nehmen. Es wird zwischen numerischen Modellen unterschieden, die Vereinfachungen durch Ensemblemittelung oder durch eine räumliche Filterung der Navier-Stokes Gleichungen erzielen. Ergebnisse von Ensemblemittelungen führen zu einer statistischen Betrachtungsweise der Ausbreitungsprozesse. Abbildung 3 (a) zeigt eine Momentaufnahme einer kontinuierlich freigesetzten Rauchfahne stromabwärts des Quellortes, während in Abbildung 3 (b) ein zeitlich gemittelt Bild dieser Freisetzung dargestellt ist.

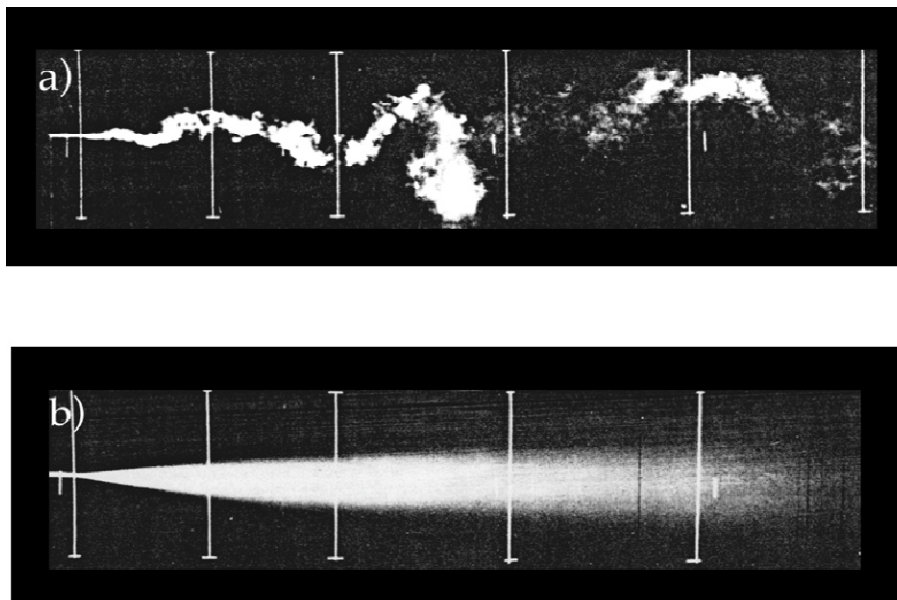


Abbildung 3: (a) Momentaufnahme einer kontinuierlich freigesetzten Rauchfahne stromabwärts des Quellortes. (b) Zeitlich gemittelt Darstellung derselben kontinuierlichen Freisetzung (Quelle: EPA Fluid Modeling Facility).

Diese zeitliche gemittelte Rauchfahne ist identisch mit dem Ensemble von sehr vielen einzelnen Momentaufnahmen. Die Abbildung verdeutlicht, dass der Unterschied zwischen einer einzelnen Realisierung/Momentaufnahme gegenüber dem Ensemblemittelwert signifikant ist. Gauß-Modelle gehören zu den ältesten und einfachsten Beispielen für ensemblegemittelte Ausbreitungsmodelle. Sie erfordern ein Minimum an Eingangsinforma-

tionen, wie die mittlere Windgeschwindigkeit und mittlere Windrichtung, um die gaußförmige Ausbreitung der freigesetzten Wolke stromabwärts zu berechnen.

Der Effekt der räumlichen Filterung der Navier-Stokes Gleichungen auf die numerische Abbildung der Ausbreitungsprozesse unterscheidet sich von dem der Ensemblemittelung. Numerische Modelle, die auf eine räumliche Filterung der Navier-Stokes Gleichungen zurückgreifen, erhalten den turbulenten Charakter einer Strömung für Skalen, die größer sind als die der räumlichen Filterung. Hierdurch ist eine zeitlich hochaufgelöste Berechnung der in Abbildung 3 (a) dargestellten Ausbreitungssituation möglich. Die bereits beschriebenen LES Modelle gehören zu den numerischen Modellen, die auf eine räumliche Filterung der Navier-Stokes Gleichungen zurückgreifen.

Betrachtet man die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Ausbreitungsprozesse von Schadstoffwolken in Stadtgebieten, dann liegt das Aufgabengebiet von numerischen Modellen, die diese Prozesse abbilden, insbesondere im Störfallmanagement. Hier besteht beispielsweise der Bedarf, Risiken für mögliche Gefahrenszenarien abzuschätzen oder in einer Notfallsituation Informationen über den möglichen Ausbreitungsverlauf toxischer Gaswolken zu liefern. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, weisen Gaswolken, die am gleichen Ort unter gleichen mittleren Randbedingungen freigesetzt werden, ein Spektrum von unterschiedlichen Ausbreitungsverläufen auf. Um mögliche Risiken abzuschätzen zu können, die für Bürger durch freigesetzte toxische Gaswolken entstehen, ist dementsprechend nicht allein die Vorhersage des wahrscheinlichsten, sondern auch jedes einzelnen möglichen Ausbreitungsverlaufes der Wolke von Bedeutung. Ensemblegemittelte Ausbreitungsmodelle können die Variabilität dieser Ausbreitungsverläufe nicht abbilden und sind damit für die oben genannten Aufgabengebiete ungeeignet.

Nach Serafin et al. (2003) haben LES-Modelle das Potential, die Bandbreite möglicher Ausbreitungsverläufe einer freigesetzten Gaswolke für eine gegebene Situation vorhersagen zu können. Dies lässt sich mit LES-Modellen realisieren, indem eine große Anzahl von unabhängigen Freisetzungen in einem Modelllauf für das gleiche Freisetzungsszenario durchgeführt wird. Da LES-Modelle kein stationäres Strömungsfeld berechnen, sondern turbulente Strömungsprozesse direkt auflösen, lässt sich so die Variabilität der turbulen-

ten Ausbreitungsprozesse abbilden. Es ist allerdings anhand geeigneter Referenzdaten zu überprüfen, ob die modellierten Prozesse auch naturähnlich sind.

In der Vergangenheit wurde eine große Anzahl von prognostischen und diagnostischen Modellen entwickelt, die urbane Ausbreitungsprozesse simulieren. Aufgrund steigender Rechnerleistungen konnten die räumlichen und zeitlichen Auflösungen der Modelle stetig verbessert werden. Dieser Prozess führte dazu, dass die ersten LES-Modelle, deren Rechenaufwand vergleichsweise hoch ist, für urbane Ausbreitungssimulationen entwickelt werden konnten.

Numerische Modelle können atmosphärische Ausbreitungsprozesse aufgrund der hohen Komplexität nicht perfekt abbilden. Die notwendigen Vereinfachungen, auf die die Modelle zurückgreifen müssen, führen zwangsläufig zu Unterschieden zwischen Modellergebnissen und der Realität. Damit der Anwender den Ergebnissen eines Modells dennoch vertrauen kann, ist die Überprüfung eines Modells hinsichtlich seiner Vorhersagegüte von besonderer Bedeutung. Dies gilt insbesondere für Modelle, deren Ergebnisse herangezogen werden, um Entscheidungen mit profunden politischen und sozialen Konsequenzen zu fällen.

Es bestehen allerdings bis heute keine allgemeingültigen Standards, nach denen ein numerisches Ausbreitungsmodell zu validieren ist. Deshalb liegt es häufig in der Hand des Modellentwicklers zu entscheiden, welche Tests ausreichen, um ein Modell als validiert bezeichnen zu können. Hierbei besteht die Gefahr, dass sich die Validierungsstrategien nach den Möglichkeiten des Modells richten und nicht nach den Aufgaben, die das Modell zu erfüllen hat. Um einheitliche Qualitätsstandards und Validierungsrichtlinien festzulegen, wurde die europäische „COST action 732“ (Schatzmann & Britter, 2005) durchgeführt.

Die Festlegung von einheitlichen Validierungsstandards ist allerdings schwierig. Da die verschiedenen Modelle zum Teil für unterschiedliche Anwendungsgebiete entwickelt wurden, müssen sich die Validierungsstandards nach dem jeweiligen Anwendungsgebiet richten. Bei einem Modell, das beispielsweise zur Abschätzung von Gefährdungsrisiken im Falle einer toxischen Wolkenfreisetzung eingesetzt wird, werden höhere Anforderungen

an die zeitliche Auflösung gestellt, als bei einem Modell, das die mittlere Belastung der Bevölkerung durch Autoabgase vorhersagt. Zudem muss sich die Validierungsstrategie nach dem jeweiligen Modelltyp richten. Während beispielsweise gemittelte Referenzdaten zur Validierung von Gauß- oder RANS-Modellen ausreichen, da diese Modelle allein Mittelwerte vorhersagen, sind zur Validierung zeitabhängiger, wirbelauflösender Modelle Referenzdaten erforderlich, die transiente Prozesse auflösen. Nur so kann sichergestellt werden, dass beispielsweise ein LES-Modell, welches mittlere Ausbreitungsprozesse zuverlässig vorhersagen kann, auch zeitabhängige Prozesse korrekt abbildet. Folglich sind modell- und anwendungsspezifische Validierungsstrategien erforderlich.

Für die Validierung numerischer Modelle sind zudem geeignete Referenzdatensätze von Bedeutung. Die Notwendigkeit einer modell- und anwendungsspezifischen Validierungsstrategie erfordert ebenso einen modell- und anwendungsspezifischen Referenzdatensatz. Es stehen heute insbesondere Vergleichsdaten zur Verfügung, die Ausbreitungsprozesse über ebenem, hindernisfreiem Gelände wiedergeben. Numerische Modelle, die mit diesen Referenzdaten übereinstimmen, dokumentieren allein die Fähigkeit, gaußförmige Ausbreitungssituationen über ebenem Gelände ohne nennenswerte Hindernisse simulieren zu können.

Es gibt nur wenige Referenzdaten, die Ausbreitungsprozesse in komplexer, urbaner Bebauung wiedergeben. Zudem verfügen sie in der Regel über eine geringere statistische Repräsentativität als Daten, die über offenem Gelände aufgenommen wurden. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass Strömungs- und Konzentrationsfelder in Stadtgebieten eine besonders hohe räumliche und zeitliche Variabilität aufweisen. Die räumlichen Unterschiede können durch Naturmessungen, bei denen die Zahl der Messorte limitiert ist, in der Regel nur eingeschränkt aufgelöst werden. Um an den Messorten statistisch repräsentative Mittelwerte der Windgeschwindigkeit oder Konzentration (bei einer kontinuierlichen Freisetzung) bestimmen zu können, sind in Stadtgebieten vergleichsweise lange Mittelungszeiten von mehreren Stunden erforderlich. Diese langen Mittelungszeiten wiederum bergen bei Naturmessungen das Problem, dass sich in diesen Zeiträu-

men die meteorologischen Randbedingungen verändern können, wodurch die Auswertung und Vergleichbarkeit der Messergebnisse erschwert wird.

Neben Naturmessungen eignen sich Messungen in Grenzschichtwindkanälen zur Erzeugung von Validierungsdatensätzen. Labormessungen bieten die Möglichkeit, die statistische Repräsentativität von Naturmessungen zu überprüfen und Naturdatensätze zu ergänzen. Der Vorteil der Labormessungen besteht insbesondere darin, dass Randbedingungen während der Messungen kontrolliert werden können. Folglich bieten Windkanalmessungen die Möglichkeit, verlässliche Referenzdaten urbaner Strömungs- und Ausbreitungsprozesse zu erzeugen, die nur mit hohem Aufwand durch Naturmessungen erfasst werden können (Leitl, 2008).

Besonders hohe Anforderungen an einen geeigneten Referenzdatensatz stellen Modelle, die Ausbreitungsprozesse einzelner Schadstoffwolken in Stadtgebieten vorhersagen. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben, weisen Gaswolken, die am gleichen Ort unter gleichen mittleren Randbedingungen freigesetzt werden, ein Spektrum von unterschiedlichen Ausbreitungsverläufen auf. Die Validierung von LES-Modellen, die das Potential besitzen, die mögliche Bandbreite der Ausbreitungsverläufe vorherzusagen, erweist sich in der Praxis allerdings als schwierig, da die Referenzdaten ebenfalls die gesamte Bandbreite der Ausbreitungsprozesse abbilden müssen. Zur Validierung dieser Modelle empfiehlt Serafin et al. (2003) daher, an ausgewählten Messorten, an denen die freigesetzten Gaswolken vorbeiziehen, Häufigkeitsverteilungen von bestimmten Referenzgrößen zu erstellen, die charakteristisch für Wolkenausbreitungen sind. Hierfür seien allerdings hunderte von individuellen Freisetzungen unter identischen mittleren Randbedingungen erforderlich. Entsprechende Messdaten können daher nur unter Laborbedingungen ermittelt werden.

2.6 Stand der Forschung

In den vergangenen Jahren hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass für das Verständnis von turbulenten Ausbreitungsprozessen in der Atmosphäre die Charakterisierung von mittleren Konzentrationsfeldern für bestimmte Anwendungszwecke (z.B. Katastrophenschutz) unzureichend ist. Vielmehr sind neben der Bestimmung von mittleren Konzentrationen auch Statistiken von Konzentrationsfluktuationen erforderlich, um die transienten Ausbreitungsprozesse in einer turbulenten Strömung verstehen und vorhersagen zu kön-

nen (Yee & Bilotto, 2004). Demzufolge wurde in den letzten Jahren eine Reihe von Feldstudien (z.B. Hanna, 1984; Sawford et al., 1985; Dinar et al., 1988; Yee et al., 1995) und Laborversuchen (z.B. Leitl et al., 2003; Feddersen, 2005; Bezpalcova, 2007) durchgeführt, die diese Konzentrationsfluktuationen im Fall von kontinuierlich freigesetzten Plumes untersucht haben.

Es wurden bisher ausgesprochen wenige Labor- und Feldstudien durchgeführt, die Ausbreitungsprozesse von einzelnen Gaswolken (Puffs) untersucht haben. Nach Yee et al. (1998) ist dies auf die besonderen Schwierigkeiten zurückzuführen, die im Zusammenhang mit der statistisch repräsentativen Charakterisierung von Puff-Ausbreitungsprozessen stehen. Da es sich bei der Wolkenausbreitung um ein nichtstationäres Phänomen handelt, erfordert die Charakterisierung dieser Prozesse eine große Anzahl von Realisierungen (Wolkenfreisetzungen) mit der Bedingung, dass die mittleren Strömungseigenschaften (Windrichtung und Turbulenzcharakteristiken) identisch für jede Realisierung des Ensembles sein müssen. Dies ist insbesondere für Feldversuche aufgrund nicht konstanter Randbedingungen in der Natur kaum realisierbar.

In den 80er und 90er Jahren war die Untersuchung von instantan freigesetzten Wolken vor allem auf die Ausbreitung von schweren Gasen ausgerichtet. Dies ist zum Teil auf einen Chemieunfall in Bhopal/Indien (1984) zurückzuführen, bei dem mehrere tausend Menschen durch Freisetzung des Schwergases Methylisocyanat das Leben verloren. Zu den Studien, die die Ausbreitung von Schwergaswolken untersuchen, zählen beispielsweise die Arbeiten von Meroney und Lohmeyer (1984), Zimmerman und Chatwin (1995) und Sweatman und Chatwin (1996), die jeweils auf Basis von Windkanaluntersuchungen statistische Eigenschaften von kurzzeitig freigesetzten Schwergaswolken beschreiben.

In der jüngeren Vergangenheit lag die Motivation verschiedener Studien darin, die Ausbreitung von toxischen Gaswolken in Stadtgebieten präzise vorhersagen zu können. Zu solchen Gefahrenszenarien kann es z.B. durch Störfälle in Industrieanlagen oder auch durch terroristische Anschläge kommen. In solchen Situationen ist die mögliche Gefahr nicht mehr auf die Ausbreitung von schweren Gasen beschränkt. Dementsprechend wurden bei den durchgeführten Studien auch Messgase verwendet, deren Dichte etwa der der Umgebungsluft entsprach. Hierdurch wurde die Interpretation der äußerst komplexen

Ausbreitungsprozesse nicht zusätzlich durch Dichteeffekte des verwendeten Messgases erschwert.

Britter et al. (2002) untersuchten Ausbreitungsprozesse innerhalb der „city“ Skala auf Basis von 3 kurzzeitigen Freisetzungen, die im Stadtgebiet von Birmingham/GB realisiert wurden. Es ist allerdings anzumerken, dass die bei den Versuchen gewählten Freisetzungsdauern (20 bis 45 Minuten) nicht wesentlich kürzer als die beobachteten Reisezeiten (20 – 150 Minuten) waren. Nach der oben angegebenen Definition für Puffs werden nur die Freisetzungen als Puffs charakterisiert, bei denen die Reisezeit groß gegenüber der Freisetzungsdauer ist. Dies war bei der Studie von Britter et al. (2002) nur für die Messorte mit den größten Quellabständen von fast 10 km gegeben. Es wurde bei diesen Versuchen beobachtet, dass der Konzentrationsanstieg, der jeweils beim Vorbeiziehen eines Puffs an ausgewählten Messpunkten aufgezeichnet wurde, ausgeprägter war als das Abfallen der Konzentrationskurve, nachdem das Konzentrationsmaximum den Messort passiert hatte. Gleiches wurde von Doran et al. (2007) und Zhou und Hanna (2007) beobachtet, die jeweils die Puff-Ausbreitungsversuche der Joint Urban 2003 Feldkampagne analysiert haben. Dieser asymmetrische Konzentrationsverlauf wird von Zhou und Hanna (2007) damit begründet, dass die Ausdehnung eines Puffs mit der Zeit stetig zunehme. Die Größe einer herannahenden Wolke sei demzufolge kleiner als die Größe einer vom Messort wegziehenden Wolke. Daher sei die Zeitspanne für den Konzentrationsanstieg an einem Messort jeweils kürzer bemessen als die für den Konzentrationsrückgang. Dieser asymmetrische Konzentrationsverlauf ist nach Zhou und Hanna (2007) in urbanen Gebieten ausgeprägter als in ländlichen Gebieten, da hier ein Teil des freigesetzten Gases in Strömungsnachläufen von Gebäuden aufgehalten werde.

Zhou und Hanna (2007) stellen zudem fest, dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer freigesetzten Wolke mit der Zeit erhöht. Sie führen dies darauf zurück, dass sich die am Boden freigesetzte Wolke mit der Zeit nicht nur horizontal sondern, auch vertikal ausbreite und so in Schichten mit höheren Windgeschwindigkeiten gelange.

Die Ausdehnung von Gaswolken mit der Zeit wurde von Hanna und Franzese (1999) auf Basis von Naturmessungen über ländlichem Gebiet parametrisiert. Für die Standardabweichung σ_t der Konzentrationsverteilung an einem bestimmten Messpunkt ermittelten

sie die Beziehung $\sigma_t = 0.1 \cdot t$ (t = Reisezeit des Puffs). Hierbei ist σ_t proportional zur Dauer, über die eine Gaswolke an einem Ort gemessen werden kann. Der sogenannte Ausbreitungskoeffizient σ_x längs der mittleren Ausbreitungsrichtung, der proportional zur Ausdehnung des Puffs in Strömungsrichtung ist, lässt sich nach Hanna und Franzese (1999) über die Beziehung $\sigma_x = 2u_* t$ (u_* = Schubspannungsgeschwindigkeit) bestimmen. Es ist allerdings anzumerken, dass die Naturdaten eine breite Streuung aufweisen und 50% der aufgenommenen Daten um einen Faktor 2 von der aufgestellten linearen Beziehung abweichen.

Die für ländliche Gebiete aufgestellten Beziehungen für σ_x und σ_t versuchten Zhou und Hanna (2007) anhand der Joint Urban 2003-Versuche auf urbane Gebiete zu übertragen. Sie geben an, dass dies über eine angenommene Anfangsausdehnung der Wolke möglich sei. Diese Anfangsgröße der Wolke sei abhängig von den typischen Gebäudeabständen der untersuchten Stadt und unabhängig von der tatsächlichen Anfangsgröße der Wolke. Anhand der Versuchsdaten der Joint Urban 2003 Kampagne bestimmen sie die Beziehung $\sigma_x = \sigma_{x0} + 0.14x$, wobei $\sigma_{x0} = 45m$ der Anfangsausdehnung des Puffs entspricht. Für die Standardabweichung σ_t der Konzentrationsverteilung gelte $\sigma_t = 42 + 0.1 \cdot t$. Hierbei werde der erste Term durch die Anfangsausdehnung des Puffs hervorgerufen.

Doran et al. (2007) geben an, für ihre Analysen eine im Vergleich zu Zhou und Hanna (2007) größere Anzahl der Joint Urban 2003 Puff-Versuche berücksichtigt zu haben. Die Ergebnisse der Puff-Feldversuche wandten sie unter anderem auf die von Zhou und Hanna (2007) aufgestellte Beziehung für den Ausbreitungskoeffizienten σ_x an. Aufgrund der zu großen Streuung der Ergebnisse konnten sie allerdings den linearen Zusammenhang zwischen σ_x und der Reisezeit nicht bestätigen.

Die wenigen durchgeführten Studien mit teilweise unterschiedlichen Schlussfolgerungen verdeutlichen, dass die komplexen Ausbreitungsprozesse von Gaswolken in urbanen Gebieten noch nicht hinreichend gut verstanden werden. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass bei Feldversuchen meist nur eine begrenzte Anzahl von Freisetzungen unter ähnlichen meteorologischen Bedingungen realisiert werden kann.

Eine statistische Interpretation dieser Prozesse ist somit nicht möglich. Bei den genannten Feldversuchen in Birmingham und in Oklahoma City wurden maximal 4 Puffs unter ähnlichen meteorologischen Randbedingungen freigesetzt.

Ziel der vorliegenden Studie ist die Erstellung eines Referenzdatensatzes auf Basis von systematischen Windkanalversuchen, der es ermöglicht, Wolkenausbreitungen in Stadtgebieten repräsentativ zu beschreiben und zu analysieren.

3 Experimenteller Aufbau und Versuchstechnik

In diesem Kapitel wird der Grenzschichtwindkanal „Wotan“ des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg, in dem sämtliche Modellversuche dieser Arbeit stattgefunden haben, das Stadtmodell von Oklahoma City und die eingesetzte Versuchstechnik beschrieben.

3.1 Grenzschichtwindkanal „WOTAN“

Der Grenzschichtwindkanal „Wotan“ (Abbildung 4) hat eine Gesamtlänge von 25 m. Die Versuchsstrecke ist 18 m lang, 4 m breit und zwischen 2.75 und 3.25 m hoch. Eine mögliche Reduzierung des Windkanalquerschnitts durch größere Versuchsmodelle lässt sich über eine höhenverstellbare Decke ausgleichen, um so den longitudinalen Druckgradienten entlang der Versuchsstrecke zu minimieren. Hierfür sind insgesamt 22 Druckmessstellen paarweise an beiden Seiten des Windkanals installiert. Der Windkanal ist mit zwei Drehscheiben ausgestattet, die die Simulation verschiedener Windrichtungen erlauben. Die Luft wird durch einen am Ende der Messstrecke angebrachten Axiallüfter, der einen Durchmesser von 3.2 Metern hat, in den Kanal gesaugt. Dies verhindert, dass die Strömung im Messgebiet durch vom Kanaltrieb ausgehende Störungen der Strömung beeinflusst wird. Im Eintrittsquerschnitt befindet sich ein Gleichrichter, der vertikale und laterale Turbulenzen dämpft und für eine gleichförmige Strömung sorgt. Die Modellgrenzschicht wird durch eine Kombination von Turbulenzgeneratoren am Eingangsbereich der Versuchsstrecke und Bodenrauigkeiten entlang der Anlaufstrecke erzeugt. Der Maßstab und die Eigenschaften der modellierten Grenzschicht werden über Größe, Anzahl und Anordnung der Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten beeinflusst. Dies ermöglicht es, die individuellen turbulenten Eigenschaften atmosphärischer Grenzschichten möglichst präzise nachzustellen. In der dieser Arbeit zugrunde liegenden Messkampagne wurde die atmosphärische Grenzschicht von Oklahoma City simuliert. Die Eigenschaften der modellierten Grenzschicht werden detailliert in Kapitel 6.2 beschrieben. Die mittlere Windgeschwindigkeit des Windkanals lässt sich stufenlos zwischen 0.5 m/s und 20 m/s einstellen, wobei die üblichen Windgeschwindigkeiten für die Strömungs- und Ausbreitungsversuche zwischen 2.5 m/s und 15 m/s liegen.

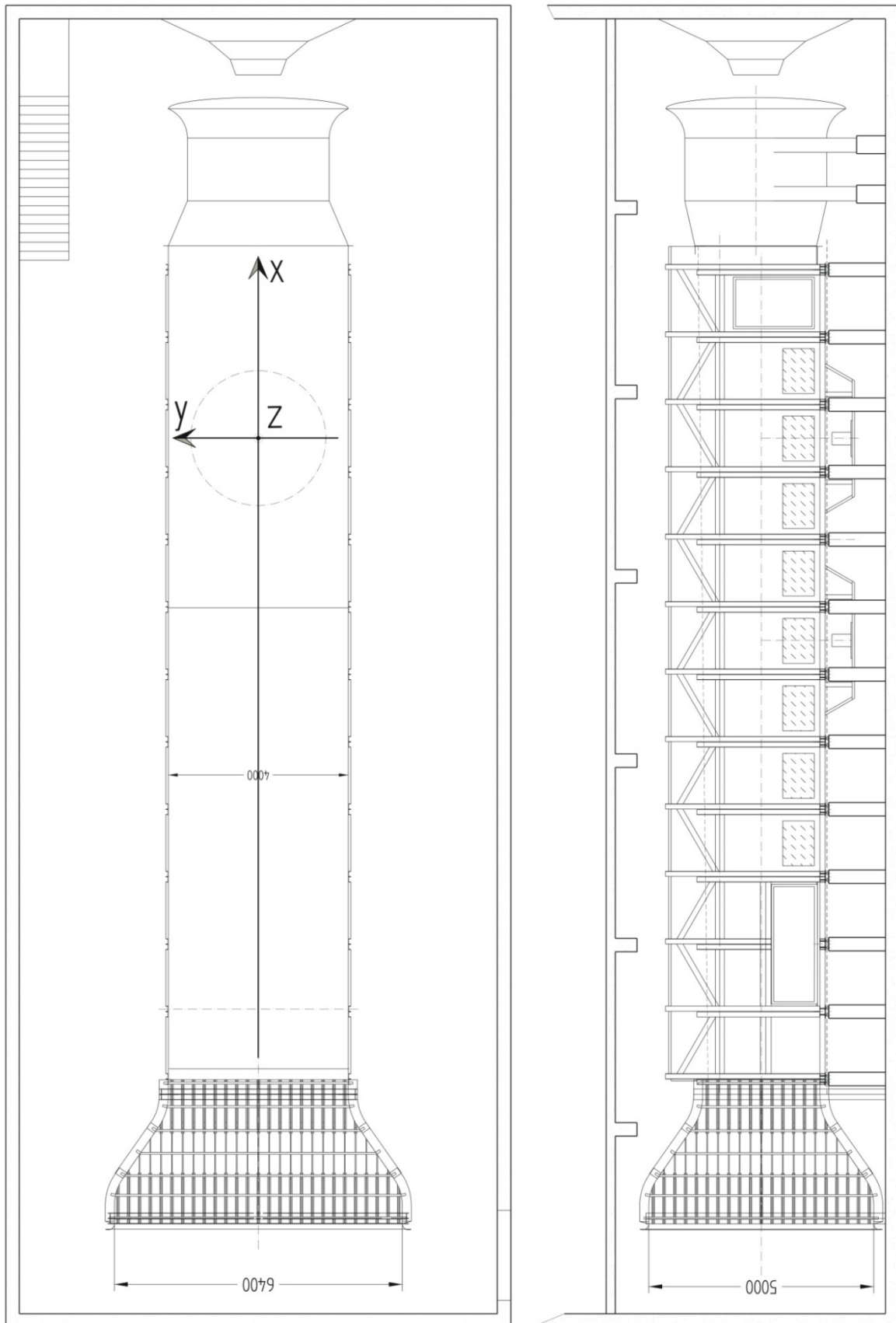


Abbildung 4: Technische Zeichnung des Grenzschichtwindkanals „Wotan“ des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg. Eingezeichnet sind zudem die x- und y-Achse des verwendeten Koordinatensystems.

Die Messstrecke des Windkanals ist mit einem computergesteuerten Traversen-System ausgestattet, welches eine Positionierung der verwendeten Messsonden mit einer Genauigkeit von etwa 0.1 mm für alle drei Raumrichtungen erlaubt.

Ein im Windkanallabor entwickeltes Softwarepaket ermöglicht den automatischen und halbautomatischen Betrieb des Traversen-Systems.

Sämtliche Positionsangaben werden in dieser Arbeit und in dem erstellten Referenzdatensatz in einem kartesischen Koordinatensystem mit den Raumrichtungen x , y und z angegeben. Der Ursprung des Koordinatensystems ist am Boden in der Mitte der hinteren Drehscheibe gewählt worden. Die Orientierung der x -Achse ist parallel zur longitudinalen Achse des Kanals ausgerichtet mit der positiven Orientierung in Hauptwindrichtung (siehe Abbildung 4). Die z -Achse ist, vom Windkanalboden ausgehend, in positive Richtung mit zunehmender Höhe definiert. Die Orientierung der y -Achse liegt so, dass das Koordinatensystem einem rechtsdrehenden orthogonalen Koordinatensystem entspricht. Die Geschwindigkeitskomponenten der Hauptströmung werden mit U , V und W bezeichnet.

3.2 Stadtmodell von Oklahoma City

Für sämtliche Windkanalversuche der vorliegenden Arbeit wurde ein Modell der Innenstadt von Oklahoma City verwendet. Dieses Stadtmodell (Abbildung 5) im Maßstab von 1:300 wurde bereits für eine frühere Kampagne des Windkanallabors (Leitl, Pascheke & Schatzmann 2003) erstellt und für diese Untersuchungen wieder aufbereitet. Die Erstellung des detaillierten, geometrischen Modells basiert auf GIS- und LIDAR-Daten. Einzelne Details der Gebäudestrukturen wurden anhand zahlreicher Fotos abgeleitet. Parkanlagen und signifikante Baumbestände innerhalb der Stadt wurden auf Basis eines am Hamburger Windkanallabor entwickelten Verfahrens (Aubrun & Leitl 2004) modelliert. Das Modell enthält, abgesehen vom Botanischen Garten (Myriad-Gardens), keine Topographie. Um den Umgang mit dem Modell während der umfangreichen Testserien zu vereinfachen, wurde nur der Stadtbereich, dessen Lage sich auf der Drehscheibe der Messstrecke befand, im Detail nachgebildet. Der Durchmesser der Drehscheibe und damit des detaillierten Modellbereiches beträgt 3.5 m, was einer Länge von 1050 m im Naturmaßstab entspricht. Diese Fläche deckt insbesondere die von Hochhäusern geprägte Innenstadt von Oklahoma City vollständig ab. Die umliegende niedrigere städtische Rauigkeit wurde

im Windkanal mit einfachen Blockstrukturen nachgestellt, die das Modell um weitere 2.25 m (etwa 675 m im Originalmaßstab) stromauf- und abwärts der Drehscheibe erweitert. Im detaillierten Teil des Modells wurden geometrische Strukturen ab einer Größe von etwa 0.5 m im Naturmaßstab nachgebildet. Bei komplexen Gebäuden wie Parkgaragen wurde die luftdurchlässige Gebäudestruktur im Modell berücksichtigt.

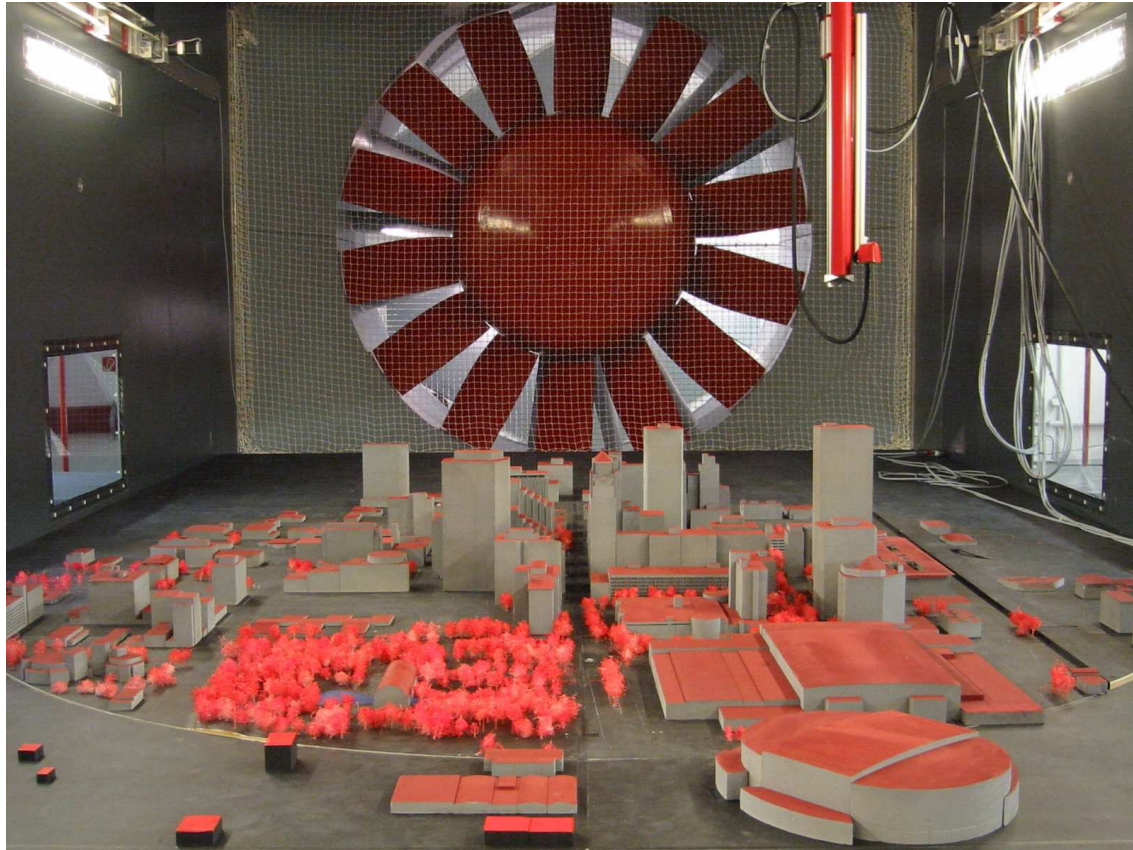


Abbildung 5: Modell von Oklahoma City im Maßstab 1:300 im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg.

Insgesamt wurden in das Modell 5 Emissionsquellen an unterschiedlichen Orten eingebaut. Die Quellen sind jeweils in die Bodenplatte eingelassen. Der Runde Freisetzungsbereich hat einen Durchmesser von 7 mm (2.1 m im Naturmaßstab). Die Quellen haben in einer Höhe von 3.5 mm (1.05 m im Naturmaßstab) einen Aufsatz, der selbst bei hohen Freisetzungsraten die Ausbildung eines Vertikalstrahls verhindert. Abbildung 6 zeigt zwei dieser Quellen, die in der Nähe des Westin Hotels eingebaut wurden. Vier Freisetzungsort-

te dieser Windkanalkampagne stimmen mit Freisetzungsorten der Naturmesskampagne Joint Urban 2003 überein.

Bei der Naturkampagne wurde eine instantane Freisetzung durch das Platzen eines mit Schwefelhexafluorid (SF_6) gefüllten Ballons ermöglicht. Dieses Freisetzungsprinzip war auf die Windkanalversuche nicht übertragbar. Um einzelne, genau definierten Gaswolken (im englischen „Puffs“) generieren zu können, wurden Quellen mit eingebautem Magnetventil verwendet. Hierdurch konnte das verwendete Messgas über zeitlich kurze, genau festzulegende Intervalle (in der Regel kürzer als 0.5 Sekunden) von einer Nebenleitung in die Quelle umgeleitet werden. Durch diesen Mechanismus wurde ein Druckaufbau in der Gasleitung bei geschlossener Quelle und eine hierdurch resultierendes unkontrolliertes Herausströmen des Gases beim Öffnen der Quelle verhindert.



Abbildung 6: Zwei in das Modell eingebaute Emissionsquellen in der Nähe des Westin Hotels.

3.3 Verwendete Messtechnik

Abbildung 7 zeigt schematisch den Versuchsaufbau für die Strömungsmessungen dieser Messkampagne. Die Referenzwindgeschwindigkeit wurde am Kanaleingang in einer Höhe von 1.8 m mit einem Prandtl-Rohr (Abbildung 8) gemessen. Mit Hilfe des Prandtl-Rohres werden Windgeschwindigkeiten über Druckdifferenzen ermittelt. Über eine Öffnung am Kopf des Prandtl-Rohres wird der Gesamtdruck, der sich aus dem dynamischen und dem statischen Druck zusammensetzt, gemessen. Der statische Luftdruck wird über zwei zur Strömungsrichtung senkrecht stehende Schlitze aufgenommen.

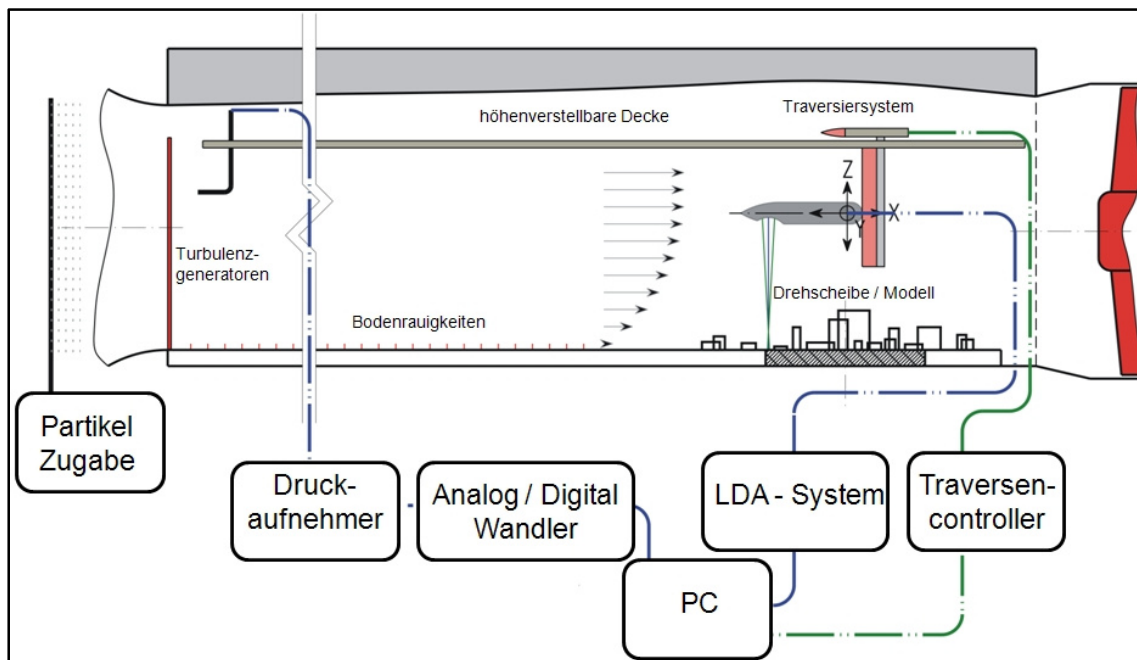


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für Strömungsmessungen.

Der dynamische Druck lässt sich aus der Differenz des Gesamtdruckes und dem statischen Druck ermitteln. Anhand des dynamischen Drucks P_{dyn} und der Luftdichte ρ kann die Windgeschwindigkeit U mit

$$U = \sqrt{2 \frac{P_{dyn}}{\rho}} \quad 3.1$$

bestimmt werden. Die Positionierung der Referenzmesssonde in der freien Anströmung, oberhalb des Einflussbereiches von Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten, erlaubt eine präzise Bestimmung der Referenzwindgeschwindigkeit.

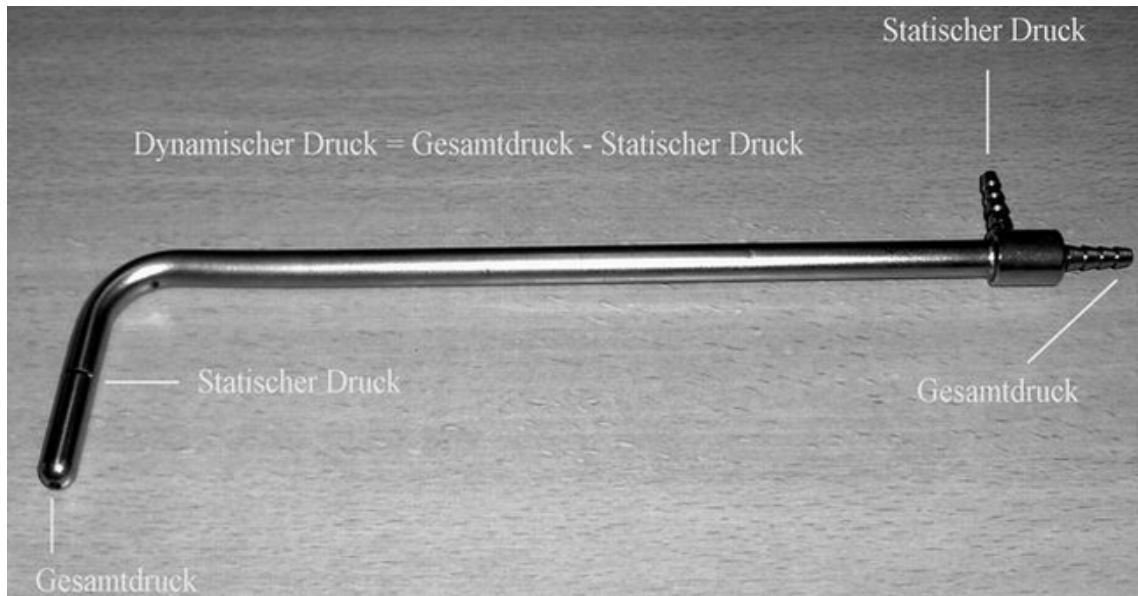


Abbildung 8: Zur Messung der Referenzgeschwindigkeit verwendetes Prandtl Rohr.

Das Drucksignal wurde mit einem Differenzdruckwandler (MKS-Baratron Typ 170M-26B) aufgenommen. Die Kalibrierung des Differenzdruckwandlers wurde regelmäßig mit einer Feindruck-Prüfwaage (Fa. Junkalor Dessau) überprüft und bei Bedarf erneuert. Dies sicherte über den gesamten Messzeitraum eine Messgenauigkeit von genauer als ± 0.1 Pa. Das Spannungssignal des Differenzdruckwandlers wurde mit einem Analog/Digital-Wandler (IOtech DAQBook 2000) in ein digitales Signal zur Weiterverarbeitung am PC umgewandelt.

Zur Skalierung der Windgeschwindigkeitsmessungen im Modellgebiet wurde die jeweilige Referenzwindgeschwindigkeit in einer Höhe von 267 mm (80.01 m im Naturmaßstab) in der modellierten Grenzschicht ($x = -2600$ mm, $y = 0$ mm) herangezogen. Diese wurde anhand der Messung des Prandtl-Rohrs und eines festen Verhältnisses zwischen der Windgeschwindigkeit am Prandtl-Rohr und der mittleren Windgeschwindigkeit in 267 mm Höhe in der Anströmung bestimmt. Voraussetzung hierfür ist, dass die Strömung für sämtli-

che Windgeschwindigkeiten, bei denen Versuche durchgeführt wurden, turbulent und dementsprechend Reynoldszahl unabhängig ist. Dies wird in Kapitel 6.3.3 nachgewiesen. Strömungsmessungen in dieser Messkampagne wurden mit einem 2D Laser Doppler Anemometer (LDA) System der Firma Dantec durchgeführt. LDA-Systeme ermöglichen berührungsfreie und damit störungsfreie Messungen der Windgeschwindigkeit mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Das Messprinzip beruht auf der Rückstreuung von Laserstrahlen an kleinen Partikeln. Die Laserstrahlen werden von einem Argon-Ion Laser erzeugt und über eine LDA-Sonde (Abbildung 9) emittiert.



Abbildung 9: Große LDA Sonde mit Umlenkspiegel.

Zwei kohärente Laserstrahlen der gleichen Wellenlänge sind so ausgerichtet, dass sie sich im Messvolumen kreuzen und dabei ein Interferenzmuster erzeugen. Dieses Muster von hellen und dunklen Ebenen ist bei kohärenten Laserstrahlen gleicher Wellenlänge stationär. Die Distanz zwischen den Ebenen lässt sich anhand der Wellenlänge der Strahlen und des Winkels zwischen den Strahlen berechnen (DANTEC Dynamics, 2006). Durchquert ein

Partikel das Messvolumen, wird an ihm Licht gestreut, welches entsprechend der lokalen Lichtintensität des Interferenzebenenfeldes moduliert ist. Dieses Streulichtsignal wird als „Doppler-Burst“ bezeichnet. Anhand der Frequenz der „Doppler-Bursts“ lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit der Partikel senkrecht zu den Interferenzstreifen bestimmen. Das rückgestreute Signal wird von der LDA-Sonde wieder aufgenommen und über eine Lichtleitfaser zum Photomultiplier weitergeleitet. Das Signal wird hier verstärkt und schließlich vom BSA Prozessor verarbeitet. Die Datenerfassung und Steuerung des Messablaufes am PC wurde mit der BSA Flow-Software (v 2.12) durchgeführt.

Da die Strömungsrichtung der Partikel bei einem ruhenden Interferenzstreifenmuster nicht eindeutig ist und, um Geschwindigkeiten im Bereich von 0 m/s mit hinreichender Genauigkeit bestimmen zu können, wird ein Laserstrahl mit Hilfe einer sogenannten Bragg-Zelle frequenzverschoben. Dies hat eine Bewegung des Streifenmusters zur Folge und die Geschwindigkeitsausrichtung der Partikel wird eindeutig.

Mit dem in dieser Arbeit verwendeten LDA-System konnten zwei Komponenten des Windvektors zeitgleich aufgenommen werden. Hierfür wurde der oben beschriebene Prozess mit Laserstrahlen unterschiedlicher Wellenlänge (488 nm und 514.5 nm) parallel durchgeführt. So werden von insgesamt 4 Laserstrahlen zwei Messvolumen von gleicher Größe am gleichen Ort erzeugt, deren Interferenzmuster senkrecht zueinander stehen. Je nach Orientierung des Messvolumens wurden die U- und V-Komponente, beziehungsweise die U- und W-Komponente, des Windvektors zeitgleich gemessen. Um alle drei Komponenten des Windvektors zu erfassen, wurden in diesem Projekt jeweils zwei Messungen (UV- und UW-Messungen) an einem Messpunkt durchgeführt. Allerdings waren UW-Messungen in Bodennähe, insbesondere in Straßenschluchten, nicht immer möglich, da die Laserstrahlen bei horizontaler Ausrichtung durch umstehende Gebäude abgeschirmt wurden. Das Messvolumen hat die Form eines Rotationsellipsoides, dessen Größe von der jeweils verwendeten Sonde und der Brennweite bestimmt wird.

Um möglichst viele Messorte erreichen zu können, wurden in diesem Projekt zwei Sonden unterschiedlicher Größe mit Brennweiten zwischen 160 mm und 800 mm eingesetzt. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die verwendeten Sonden, die Brennweiten und die Größe der jeweiligen Messvolumina. Die größte Ausdehnung weist das gebildete Messvolumen

mit einer Länge von 2.819 mm (0.85 m im Naturmaßstab) für UV-Messungen entlang der z-Achse auf. Abhängig von der Orientierung der Sonde kann dies insbesondere in Regionen mit sehr starken Geschwindigkeitsgradienten zu unterschiedlichen räumlichen Mittelungen führen. Hierauf wird in Kapitel 7.1 noch detailliert eingegangen.

	Sondendurchmesser	Brennweite	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]
Konfiguration 1	85 mm	800 mm	0.122	0.122	2.819
Konfiguration 2	85 mm	500 mm	0.077	0.077	1.102
Konfiguration 3	26 mm	160 mm	0.078	0.078	1.658

Tabelle 1: Größe der verwendeten Sonden und Brennweiten sowie der jeweiligen Messvolumina.

Die für die LDA-Messungen erforderlichen Partikel wurden mittels einer Nebelmaschine (Smoke Factory Tour Hazer) und einer gerätespezifischen Nebelflüssigkeit erzeugt und der Strömung beigefügt. Um systematische Messabweichungen, verursacht durch ungleichmäßig verteilte Partikelwolken, zu verhindern, wurde während der Messungen die gesamte Windkanalhalle mit Partikelmaterial versehen.

Abbildung 10 zeigt schematisch den Versuchsaufbau für die Konzentrationsmessungen. Als Messgas wurde Ethan (C_2H_6) verwendet. Die Dichte von Ethan ist mit der Dichte von Luft vergleichbar, so dass zwischen Messgas und Umgebungsluft praktisch keine Dichtedifferenzen auftreten.

Zur Messung des freigesetzten Gases wurden zwei Flammenionisationsdetektoren (FIDs) eingesetzt. Die Hintergrundkonzentration wurde mit einem Standard-FID (Rosemount Analytical, Model 400A) stromaufwärts des Modells registriert. Die Ausbreitung des freigesetzten Messgases im Modellgebiet wurde mit einem Fast-FID (Cambustion Ltd., HFR 400) gemessen. Hauptbestandteil eines FIDs ist die Brennkammer, deren Flamme durch Zufuhr von Wasserstoff und Sauerstoff betrieben wird. Über eine Vakuumpumpe wird im Inneren der Brennkammern ein Unterdruck erzeugt. Dieser saugt, im Fall des Fast-FID über eine dünne Kanüle und im Fall des Standard-FID über einen Schlauch, Luft aus dem Messgebiet in die Brennkammer. Gelangt Ethan in die Brennkammer werden beim Verbrennungsprozess positive Ionen und Elektronen generiert. Diese erzeugen ein elektrisches Signal, dessen Stärke proportional zur Masse des verbrannten Ethans ist. Kalibriert

man dieses Signal mit Messgasen, lässt sich die jeweilige Konzentration am Messort bestimmen.

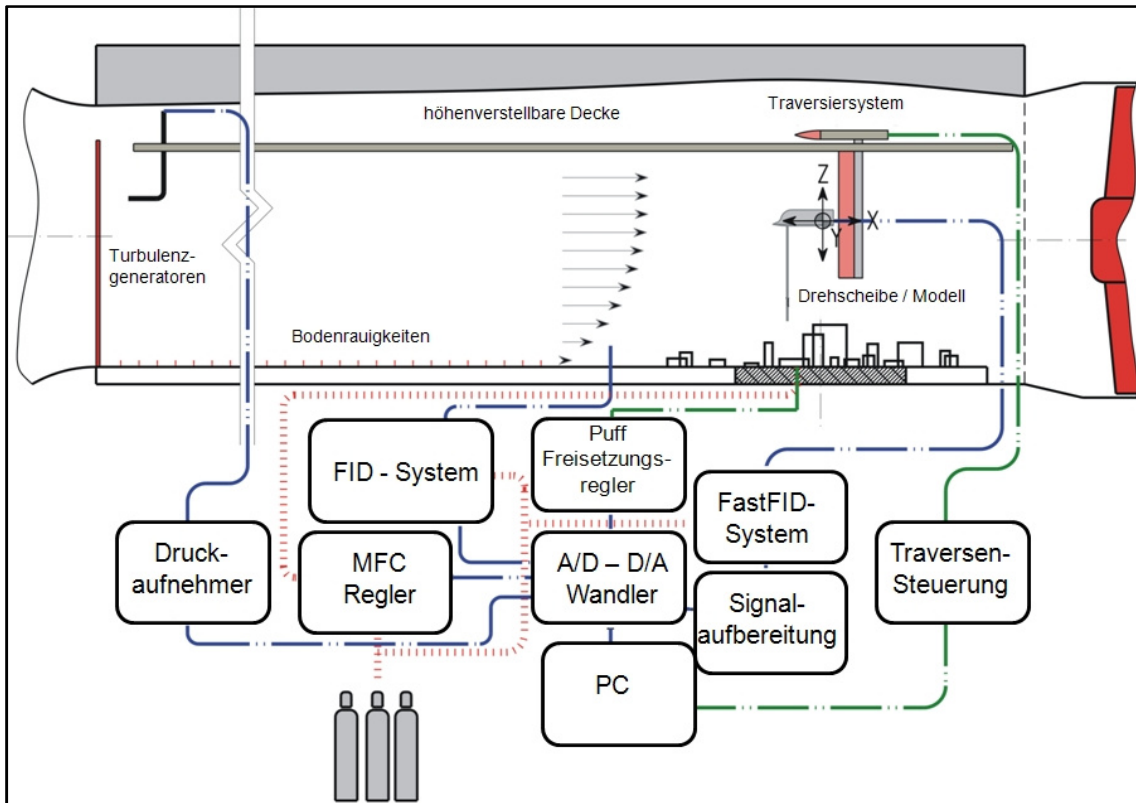


Abbildung 10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Konzentrationsmessungen.

Die Brennkammer des Standard-FID stand außerhalb des Windkanals und war mit dem Messort über einen mehrere Meter langen Schlauch verbunden. Die zeitliche Auflösung der Konzentrationsmessung ist bei nicht zu großen Schlauchlängen auf etwa 1 Hz begrenzt. Die Hintergrundkonzentration, die während einer 30-minütigen Messung nur um wenige ppm (parts per million) anstieg, ließ sich mit Hilfe des Standard-FIDs jedoch hinreichend genau registrieren.

Beim Fast-FID (Abbildung 11) wurde das Probevolumen über eine 295 mm lange Kanüle, die einen Innendurchmesser von 0.75 mm hat, direkt in die Brennkammer geführt. Für den verwendeten Aufbau wurde eine zeitliche Auflösung des Fast-FIDs von 80 Hz theoretisch berechnet und experimentell bestätigt. Die zeitliche Verzögerung betrug 0.111 Sekunden. Die Brennkammer war an der Traverse montiert. So konnte jeder Ort im Modellgebiet millimetergenau angesteuert werden.

Es muss berücksichtigt werden, dass die Detektoren sensibel auf äußere Veränderungen reagieren. Bereits geringe Temperatur- und Luftdruckveränderungen können das Messergebnis beeinflussen. Beide FIDs wurden daher täglich mehrfach kalibriert, um über den gesamten Versuchszeitraum Messungen mit einer Genauigkeit von besser als 1 ppm zu gewährleisten. Zur Kalibrierung der FIDs wurden 4 zertifizierte Referenzgase unterschiedlicher Konzentration verwendet. Im Kapitel 8.3 wird detailliert auf die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Konzentrationsmessungen eingegangen.



Abbildung 11: Blick entlang der Robinson Avenue im Windkanal Modell von Oklahoma City mit einem an der Traverse montierten Fast-FID.

4 Versuchsplan und -strategie

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die im Rahmen dieser Messkampagne durchgeführten Versuche und erläutert die Strategie der einzelnen Messungen. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, instationäre Ausbreitungsprozesse einzelner Schadstoffwolken in einem urbanen Gebiet zu untersuchen. Die Ergebnisse sollten es ermöglichen, einen Referenzdatensatz zu erstellen, der sich zur Validierung von LES-Modellen eignet. In zwei umfangreichen Messkampagnen von jeweils 6 Monaten Dauer wurden zahlreiche Strömungs- und Ausbreitungsversuche im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ der Universität Hamburg durchgeführt. Zur Strukturierung wird der umfangreiche Versuchsplan in die Kategorien Grenzschichtmodellierung und -dokumentation, Strömungsmessungen im Modellgebiet und Ausbreitungsuntersuchungen unterteilt.

4.1 Grenzschichtmodellierung und -dokumentation

Voraussetzung für die Windkanalversuche war die Modellierung einer Grenzschicht, deren Charakteristiken im Maßstab von 1:300 mit denen der atmosphärischen Grenzschicht von Oklahoma City übereinstimmen. Die Grenzschichtmodellierung basiert auf Ergebnissen der Naturmesskampagne Joint Urban 2003, bei der die umgebenden Windverhältnisse von Oklahoma City anhand von SODAR Messungen analysiert wurden. Allerdings ist bei der Interpretation der Naturmessungen zu berücksichtigen, dass diese von unterschiedlichen Schichtungsverhältnissen, vom Tagesgang der Temperatur und von veränderlichen Wetterbedingungen beeinflusst wurden. Feldmessungen erlauben daher in der Regel nur eine grobe Charakterisierung der atmosphärischen Grenzschicht. Die Auswertung dieser Naturmessungen wird in Kapitel 6.1 dargestellt.

Eine weitere Referenz bei der Grenzschichtmodellierung bieten Richtlinien des VDI (2000) oder der ESDU (1985), die die Eigenschaften unterschiedlicher Grenzschichten verschiedenen Rauigkeitsklassen zuordnen. So lässt sich überprüfen, ob die Charakteristiken der modellierten Grenzschicht dem Geländetyp der Naturkampagne entsprechen. In dieser Messkampagne konnte zudem auf die Erfahrungen zweier früheren Windkanaluntersuchungen (Leitl, Pascheke & Schatzmann 2003; Leitl & Schatzmann 2005), bei denen eben-

falls die atmosphärische Grenzschicht von Oklahoma City im Windkanal der Universität Hamburg modelliert wurde, zurückgegriffen werden.

In einem aufwendigen iterativen Prozess wurde die Anordnung der Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten systematisch verändert, bis die Eigenschaften der modellierten Grenzschicht den gewünschten Eigenschaften entsprachen. Hierfür wurde für jede Konfiguration ein vertikales Windprofil bestehend aus 20 Messpunkten in Höhen zwischen 65 mm und 959 mm über dem Boden im Modellmaßstab (19.5 m und 287.7 m über dem Boden im Naturmaßstab) am Ende der Messstrecke ($x = -2600$ mm, $y = 0$ mm im Modellmaßstab) aufgenommen (siehe roter Punkt in Abbildung 12). Der Abstand des Messortes zum Drehscheibenrand und damit zum Stadtmodell von Oklahoma City beträgt 850 mm (255 m im Naturmaßstab). Dieser Abstand wurde bewusst groß gewählt, um den Einfluss des Modells auf die Profilmessung zu minimieren. Die Eigenschaften der schließlich verwendeten Grenzschicht werden in Kapitel 6.2 dokumentiert.

Im nächsten Schritt wurde überprüft, ob die modellierte Grenzschicht den Qualitätsanforderungen des Hamburger Windkanallabors genügt. Zum einen galt es sicherzustellen, dass die modellierte Grenzschicht quer zur Hauptströmungsrichtung homogen ist. Hierfür wurden ebenfalls 255 m stromaufwärts der Drehscheibe vier laterale Profile in den Höhen 90 m, 150 m, 210 m und 270 m über dem Boden im Naturmaßstab aufgenommen (siehe schwarze Punkte in Abbildung 12). Jedes Profil besteht aus 13 Messpunkten, die von der Kanalmitte ausgehend einen Bereich von ± 1200 mm im Windkanalmaßstab (± 360 m im Naturmaßstab) quer zur Hauptströmungsrichtung abdecken.

Longitudinal auftretende Druckgradienten entlang der Teststrecke wurden mit insgesamt 22 Druckmessstellen, die paarweise an den Seiten des Windkanals installiert sind, überprüft und mit Hilfe eines Deckenabgleiches minimiert.

Desweiteren war zu überprüfen, ab welcher Windgeschwindigkeit die modellierte Grenzschicht Reynoldszahl unabhängig ist. Hierfür wurden mit einem LDA, wiederum 255 m stromaufwärts der Drehscheibe (siehe roter Punkt in Abbildung 12), Messungen in vier unterschiedlichen Höhen zwischen 8 m und 217 m über dem Boden im Naturmaßstab für

Windgeschwindigkeiten zwischen 2 m/s und 13 m/s durchgeführt. Die Ergebnisse der Qualitätsüberprüfung der Anströmung werden in Kapitel 6.3 dargestellt.

Um anhand der Windkanalmessungen einen zur Modellvalidierung geeigneten Referenzdatensatz erstellen zu können, wurde die modellierte Anströmung aufwendig vermessen und dokumentiert. Die exakte Bestimmung der Anströmbedingungen ist für das Erstellen eines Referenzdatensatzes wichtig, um Ungenauigkeiten oder Fehler bei der Modellvalidierung zu vermeiden.

Die Dokumentation der Anströmbedingungen beinhaltet zudem Messungen der kompletten Grenzschichtentwicklung. Abbildung 12 (blaue Markierungen) zeigt die genaue Lage der hierfür verwendeten 17 vertikalen Profile, die jeweils in der Mitte des Windkanals entlang der gesamten Versuchsstrecke angeordnet waren. Das erste Profil befindet sich 12,915 m (im Modellmaßstab) stromaufwärts der Drehscheibenmitte, die zugleich die Mitte des Stadtmodells darstellt. Die übrigen Profile sind jeweils mit einem Abstand von 940 mm (im Modellmaßstab) zueinander in Richtung Drehscheibenmittelpunkt angeordnet. Um neben der Grenzschichtentwicklung auch den Einfluss der Stadtrauigkeit analysieren zu können, wurde diese Profilebene über die Drehscheibe hinaus bis auf die Leeseite des Stadtmodells ausgedehnt. Jedes Profil besteht aus 20 Messpunkten, die sich in Höhen zwischen 9.6 m und 220 m über dem Boden (im Naturmaßstab) befinden.

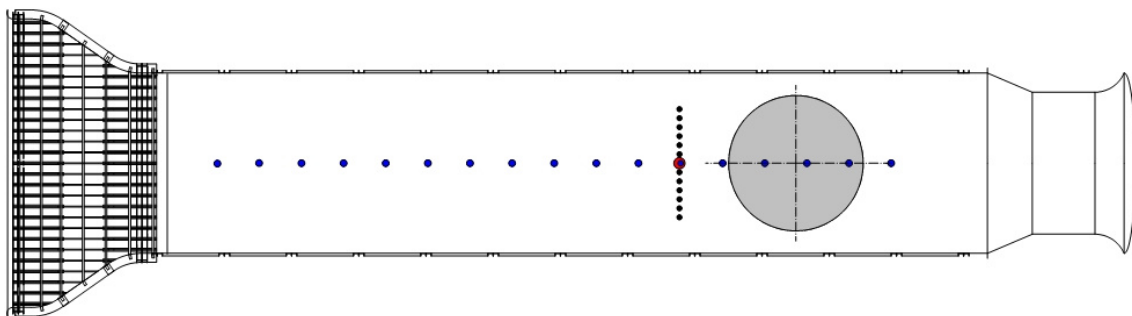


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Windkanals in einer Draufsicht. Der graue Kreis zeigt das Modellgebiet (Drehscheibe) an.

Um alle drei Komponenten des Windvektors zu messen, wurden an jedem Punkt 2 Zeitserien (UV- und UW-Messung) von jeweils 3 Minuten Dauer aufgenommen. Es ist zu berücksichtigen, dass aufgrund des Modellmaßstabes (1:300) sämtliche Prozesse im Wind-

kanal bei gleicher Windgeschwindigkeit 300-mal schneller ablaufen als in der Natur. Die zeitliche Repräsentativität einer 3-minütigen Windkanalmessung ist demnach bei gleicher Windstärke mit einer 15-stündigen Naturmessung unter konstanten meteorologischen Randbedingungen zu vergleichen.

Die Bedeutung einer sorgfältigen Grenzschichtmodellierung und -dokumentation wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (Herbst 2006), die in die vorgestellte Messkampagne eingebunden war, herausgestellt. Die Arbeit untersuchte den Einfluss der modellierten Grenzschicht auf das Strömungsfeld im Stadtgebiet. Eine verbreitete Annahme ist, dass sich Strömungsfelder in Städten mit signifikanten Gebäudehöhen und hohen Gebäudedichten, wie es im Business Distrikt von Oklahoma City der Fall ist, unabhängig von den Anströmbedingungen entwickeln. Für diese Untersuchungen wurden neben der beschriebenen Referenzgrenzschicht zwei weitere modelliert, deren Eigenschaften sich möglichst deutlich voneinander unterschieden. Um die erste dieser beiden zusätzlichen Grenzschichten zu generieren, wurden weder Turbulenzgeneratoren noch Bodenrauigkeiten verwendet. Die resultierende Grenzschicht hatte eine dementsprechend geringe vertikale Ausdehnung von nur etwa 50 m im Naturmaßstab. Eine Konfiguration mit vergleichbar breiten Turbulenzgeneratoren und großen Rauigkeitselementen erzeugte die dritte Grenzschicht. Sie wies höhere Turbulenzintensitäten auf als die vorher genannten Grenzschichten und lässt sich der Kategorie einer sehr rauen Grenzschicht zuordnen. Für jede dieser drei Grenzschichten wurden Strömungsmessungen an den gleichen Messpunkten im Modellgebiet durchgeführt, so dass sich die Ergebnisse dieser Messungen miteinander vergleichen ließen. Abbildung 13 markiert die Positionen im Business Distrikt von Oklahoma City, an denen vertikale Windprofile aufgenommen wurden. Der rot-graue Punkt in der Mitte der Abbildung markiert die Mitte der Drehscheibe und den Koordinatenursprung des verwendeten Koordinatensystems.

Jedes Profil bestand aus 29 Messpunkten in Höhen zwischen 15 m und 245 m über dem Boden im Naturmaßstab. An jeder Position wurden zwei Zeitserien (UV und UW Messung) von jeweils 3 Minuten Länge gemessen. Allerdings waren insbesondere für UW Messungen einige Messorte in Bodennähe nicht erreichbar, da die Laserstrahlen des LDA von umliegenden Gebäuden abgeschirmt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Strömungs-

verhältnisse im Stadtgebiet zwar zu einem großen Teil durch die Rauigkeitsstrukturen der Stadt geprägt wurden, der Einfluss der unterschiedlichen Anströmbedingungen aber dennoch im gesamten Stadtgebiet deutlich erkennbar blieb. Es wurde somit deutlich, dass eine sorgfältige Modellierung und Vermessung der Anströmbedingungen Voraussetzung für naturähnliche Strömungs- und Ausbreitungsuntersuchungen in Stadtgebieten sind. Eine detaillierte Auswertung dieser Versuche findet sich in der Arbeit von Herbst (2006). Die Messergebnisse dieser Arbeit wurden in die Referenzdatenbank, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit erstellt wurde, eingebunden.

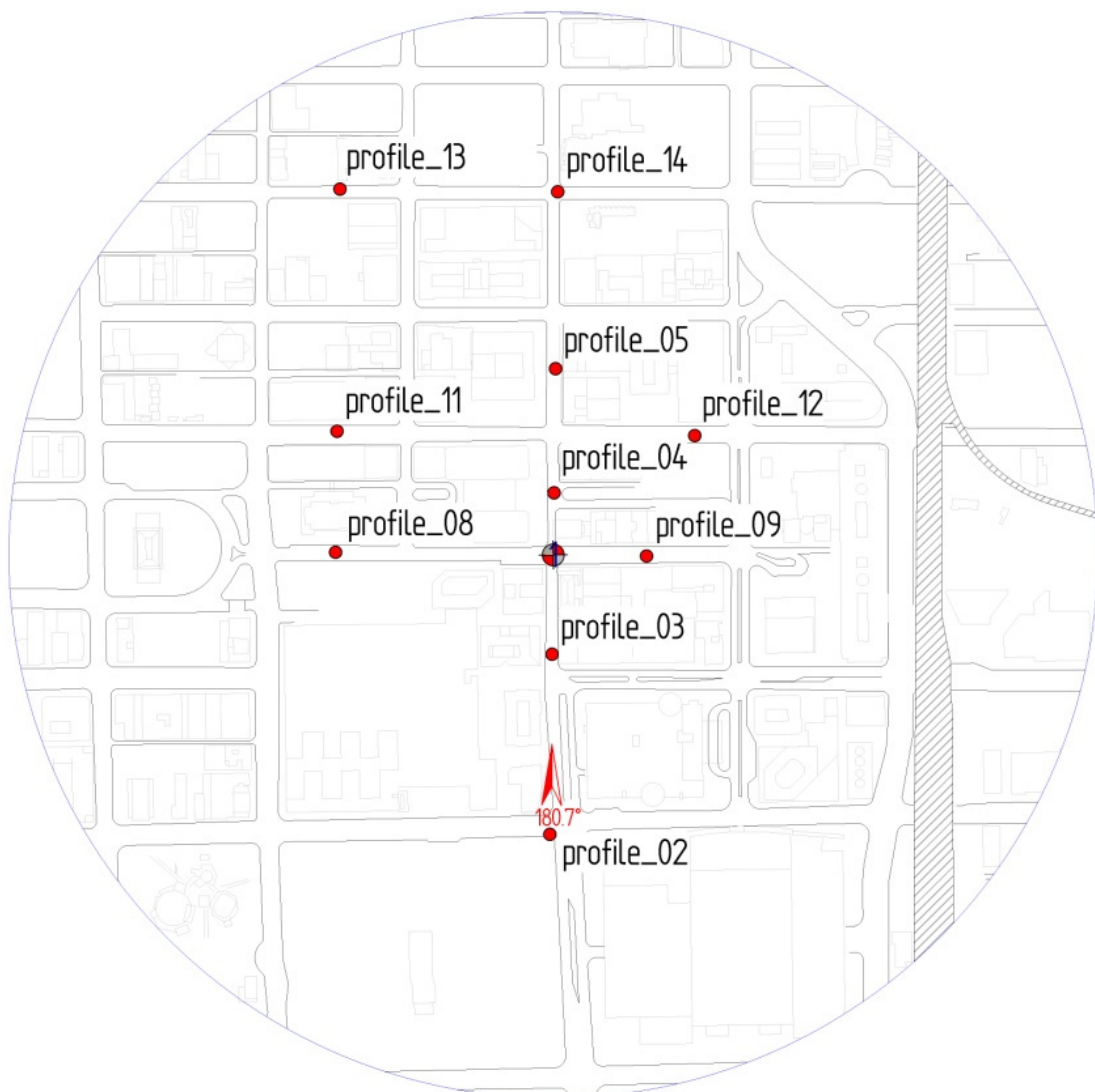


Abbildung 13: Messorte im Modellgebiet von Oklahoma City, an denen jeweils in verschiedenen Höhen Strömungsmessungen für drei unterschiedlich modellierte Anströmungen im Rahmen der Arbeit von Herbst durchgeführt wurden.

4.2 Strömungsmessungen im Modellgebiet

Die Ausbreitung von Schadstoffen wird vom jeweiligen Strömungsfeld geprägt. Voraussetzung für die Analyse von Ausbreitungsversuchen ist demnach eine möglichst exakte Bestimmung des Strömungsfeldes. In urbanen Gebieten ist die Strömung von starken lokalen Gradienten geprägt. Gerade im Innenstadtbereich von Oklahoma City, der von zahlreichen Hochhäusern mit Gebäudehöhen von bis zu 150 m bestimmt wird, ist ein ausgesprochen heterogenes Strömungsfeld zu erwarten. Um die räumlichen Unterschiede zumindest näherungsweise auflösen zu können, sind Strömungsmessungen mit einer entsprechend hohen räumlichen Dichte im Untersuchungsgebiet erforderlich.

Die Ausbreitungsprozesse im Innenstadtbereich von Oklahoma City, die in dieser Arbeit betrachtet werden, haben lediglich eine Dauer von wenigen Sekunden im Modellmaßstab (wenige Minuten im Naturmaßstab). Dementsprechend ist zu erwarten, dass kurzfristige Schwankungen der Windgeschwindigkeit und -richtung Einfluss auf die Ausbreitung der einzelnen Gaswolken nehmen. Um diese turbulenten Schwankungen auflösen zu können, sind Strömungsmessungen mit entsprechend hoher zeitlicher Auflösung erforderlich.

Daher war es das Ziel dieser Arbeit, repräsentative Strömungsmessungen im gesamten Innenstadtbereich von Oklahoma City für verschiedene Windrichtungen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung durchzuführen. Um den hohen zeitlichen Umfang dieser Versuche auf insgesamt 6 Monate zu reduzieren, wurden nur für eine ausgewählte Windrichtung Strömungsmessungen mit hoher räumlicher Auflösung im gesamten Innenstadtbereich durchgeführt. Da der Wind in Oklahoma City vorwiegend aus südlichen Richtungen weht, wurde für diese Aufgabe eine südliche Anströmung gewählt. Die exakte Windrichtung betrug bei diesen Versuchen 180.7° . Abbildung 14 zeigt die Positionen, an denen jeweils ein vertikales Windprofil aufgenommen wurde. Die insgesamt 66 Profile sind auf einem sternenförmigen Raster angeordnet, wobei die Profilabstände anwachsen, je weiter sich die Profile dem Rand der Drehscheibe nähern. Das gewählte Raster ermöglicht zum einen Messungen mit einer relativ hohen räumlichen Auflösung im Modellzentrum und deckt zugleich mit etwa einem Quadratkilometer den gesamten Innenstadtbereich von Oklahoma City ab. Jedes Profil besteht aus bis zu 23 Messpunkten, die sich im Naturmaßstab in Höhen zwischen 6 m und 260 m über dem Boden befinden. Da die einzelnen

Profile auf einem gleichmäßigen Raster angeordnet sind, befinden sie sich über Straßen, Parks oder Häusern. Dementsprechend konnten die bodennahen Messpunkte nicht bei allen Profilen erreicht werden.

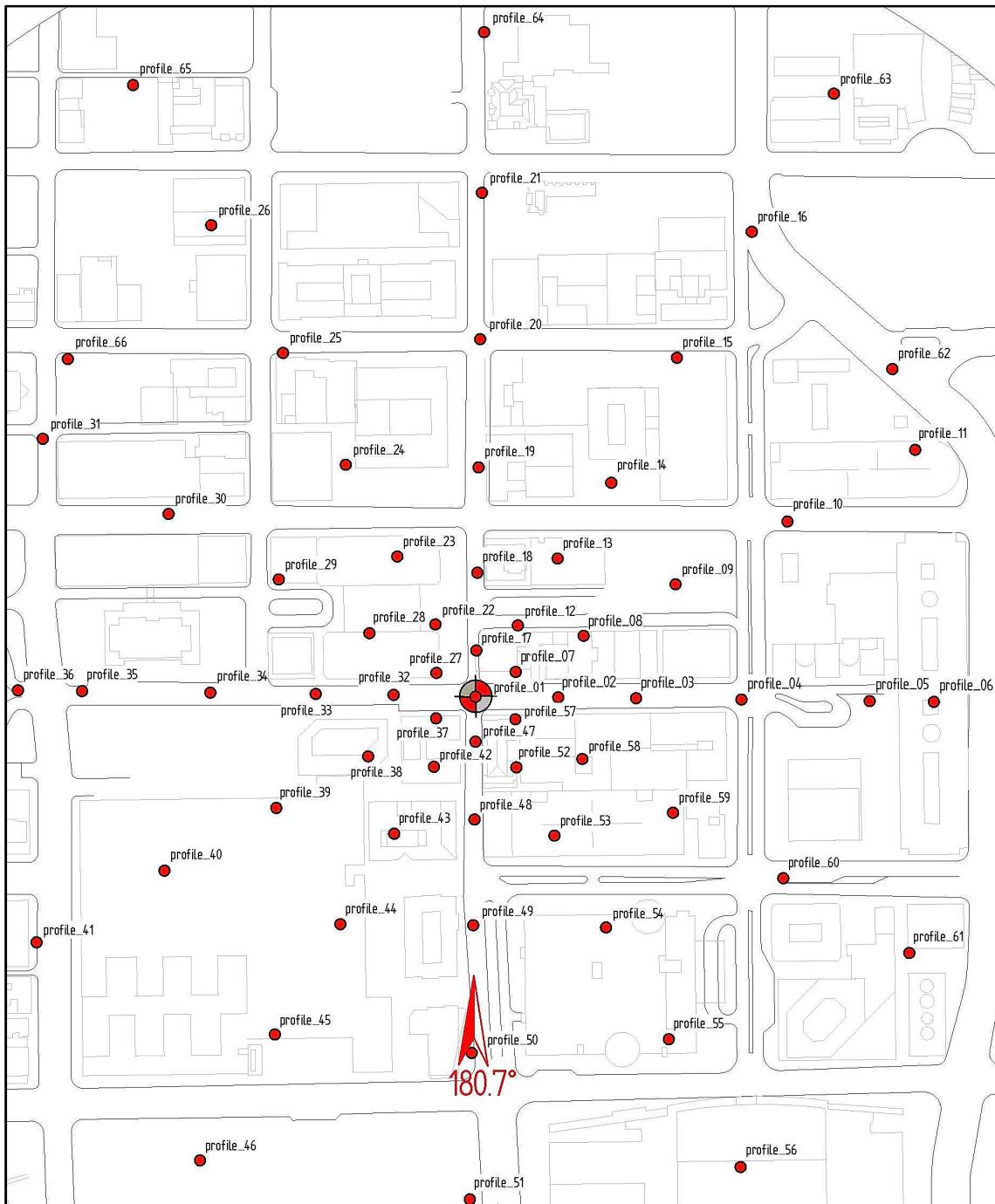


Abbildung 14: Positionen von 66 vertikalen Windprofilen im Stadtgebiet von Oklahoma City, an denen jeweils Strömungsmessungen in 23 Höhen zwischen 6 m und 260 m im Naturmaßstab über dem Boden für eine mittlere Windrichtung von 180.7° durchgeführt wurden.

Bei den insgesamt 66 Profilen wurde an 1289 Punkten die U- und V-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Von diesen Messpunkten waren 921 auch für UW Messungen geeignet. An jedem Messort wurde eine 3-minütige Zeitserie der U-, V- und wenn möglich der W-Komponente der Strömungsgeschwindigkeit aufgenommen.

Im nächsten Schritt wurde die Windrichtung variiert. Abbildung 15 a zeigt 13 Orte im Modellgebiet, an denen vertikale Windprofile für verschiedene Windrichtungen (150°, 170°, 180°, 190°, 200° und 220°) aufgenommen wurden. Nicht alle dieser Orte waren für UW Geschwindigkeitsmessungen zugänglich. Messergebnisse der W-Geschwindigkeitskomponente der Strömung stehen nur für 4 dieser Profile zur Verfügung (Abbildung 15 b). Der jeweils unterste Punkt eines jeden Profils stimmt mit Messorten der Feldkampagne Joint Urban 2003 überein. Die Bezeichnung der Windkanalprofile orientiert sich daher an den Namen der Feldkampagne (siehe hierzu auch Kapitel 5.2). Jedes dieser Windkanalprofile besteht aus 11 bis 13 Messpunkten, die in Höhen zwischen 2.5 m und 171 m im Naturmaßstab liegen. Für jede Windrichtung wurden etwa 190 Zeitserien von jeweils 3 Minuten Länge aufgenommen. Tabelle 2 fasst die Anzahl der in dieser Kampagne für Strömungsmessungen aufgenommenen Zeitserien und Windprofile zusammen.

In Kapitel 7 wird die Datenqualität der im Modellgebiet durchgeführten Strömungsmessungen überprüft.

Windrichtung	Anzahl der Profile / Zeitserien	
	UV	UW
150°	13 / 146	4 / 40
170°	13 / 146	4 / 44
180°	13 / 146	4 / 42
180.7°	66 / 1289	66 / 921
190°	13 / 146	4 / 42
200°	13 / 145	4 / 42
220°	13 / 146	4 / 44

Tabelle 2: Anzahl der Profile und gemessenen Strömungszeitserien dieser Versuchskampagne.

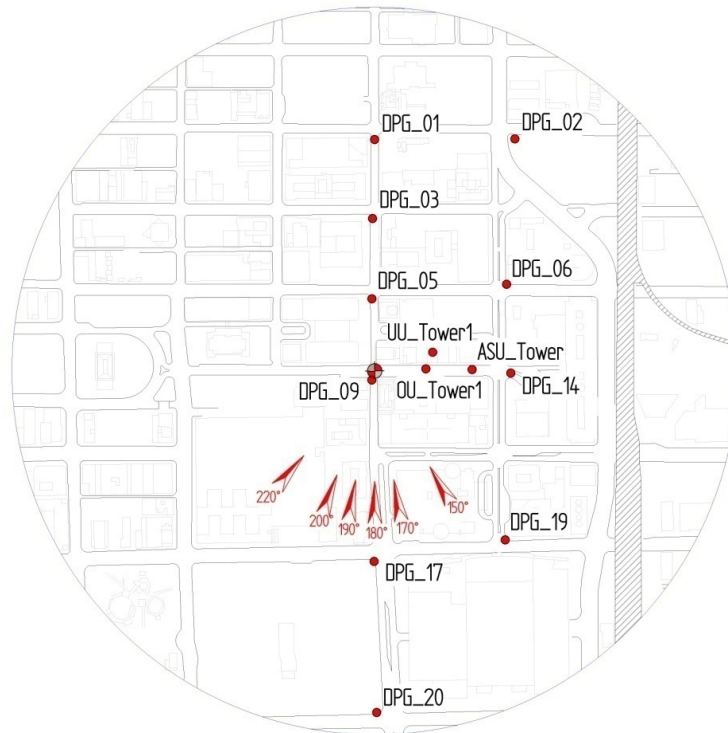


Abbildung 15 a: Lage von 13 Messorten im Stadtgebiet von Oklahoma City, an denen jeweils in bis zu 13 Höhen die U- und V- Komponente der Strömungsgeschwindigkeit für 6 unterschiedliche Windrichtungen (150°, 170°, 180°, 190°, 200° und 220°) gemessen wurden.

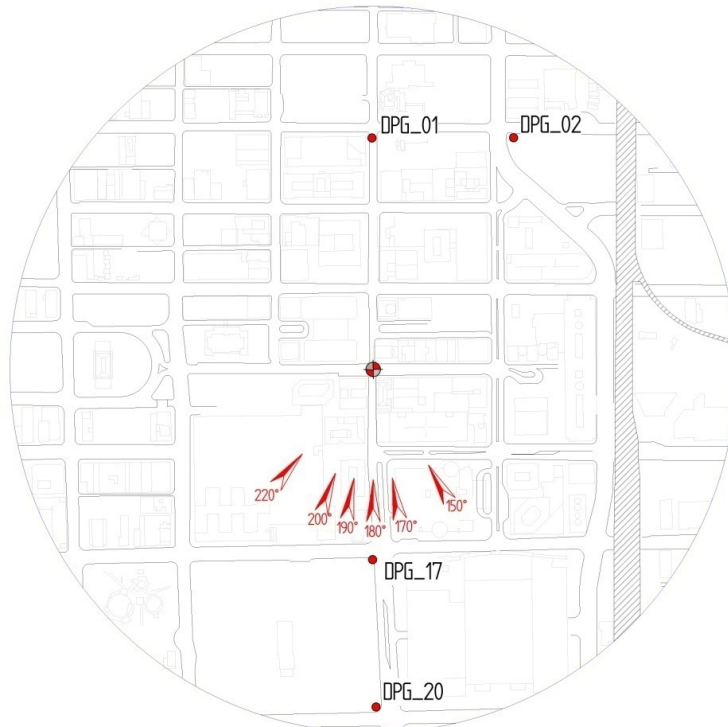


Abbildung 15 b: Lage von 4 Messorten im Stadtgebiet von Oklahoma City, an denen jeweils in bis zu 13 Höhen die U- und W- Komponente der Strömungsgeschwindigkeit für 6 unterschiedliche Windrichtungen (150°, 170°, 180°, 190°, 200° und 220°) gemessen wurden.

4.3 Ausbreitungsuntersuchungen einzelner Gaswolken

Den Ausbreitungsuntersuchungen der vorliegenden Arbeit ging eine Reihe von Testversuchen voraus. Diese sollten zunächst festlegen, wie viele Wiederholungsmessungen erforderlich sind, um die mögliche Bandbreite der Ausbreitungsverläufe sicher bestimmen zu können. Hierfür wurden Gaswolken gleichen Volumens unter gleichen mittleren Randbedingungen nacheinander freigesetzt und deren Konzentrationssignal an verschiedenen Messorten im Modellgebiet mit einem Fast-FID aufgezeichnet. Diese Versuche wurden so oft wiederholt, bis anhand der aufgenommenen Messergebnisse eine hinreichend glatte Häufigkeitsverteilung der einzelnen Puff-Parameter ermittelt wurde, die auch eine Bestimmung von selten vorkommenden Messwerten (z.B. besonders hohe Konzentrationen oder kurze Reisezeiten) ermöglichte. Damit die Ergebnisse nicht allein für einen Messort gültig sind, wurden diese Versuche für verschiedene Messorte im gesamten Modellgebiet durchgeführt. Tabelle 3 gibt an, für welche Quellen, Windrichtungen und Messorte dieser Test durchgeführt worden ist. Abbildung 16 (links) zeigt die genaue Lage dieser Messpositionen an. Die Ergebnisse dieser Versuche werden in Kapitel 8.3.2 (Seite 113 ff.) dargestellt.

Quelle	Windrichtung	Bezeichnung des Messortes	Messhöhe Modell [mm]	Messhöhe Natur [m]
S2 Westin (west)	170	AP 26	6.7	2
S2 Westin (west)	170	FP 15	6.7	2
S4 Park Avenue	170	AP33	6.7	2
S4 Park Avenue	170	FP17	6.7	2

Tabelle 3: Test-Konfigurationen, bestehend aus Quellort, mittlerer Windrichtung und Messposition, für die überprüft wurde, welche Anzahl an Wiederholungsmessungen erforderlich ist, um die Bandbreite von möglichen Ausbreitungsverläufen unter konstanten mittleren Randbedingungen sicher bestimmen zu können.

Desweiteren war bei den Ausbreitungsversuchen zu überprüfen, ob sich die Ergebnisse der einzelnen Messungen, die jeweils für eine bestimmte Windgeschwindigkeit und freigesetzte Gasmenge durchgeführt wurden, auf beliebige Windgeschwindigkeiten und Freisetzungsmengen skalieren lassen. Die einzelnen Gaswolken wurden über sehr kurze Freisetzungsdauern generiert. Die freigesetzte Gasmenge hing von der Quellstärke und von der Freisetzungsdauer ab.

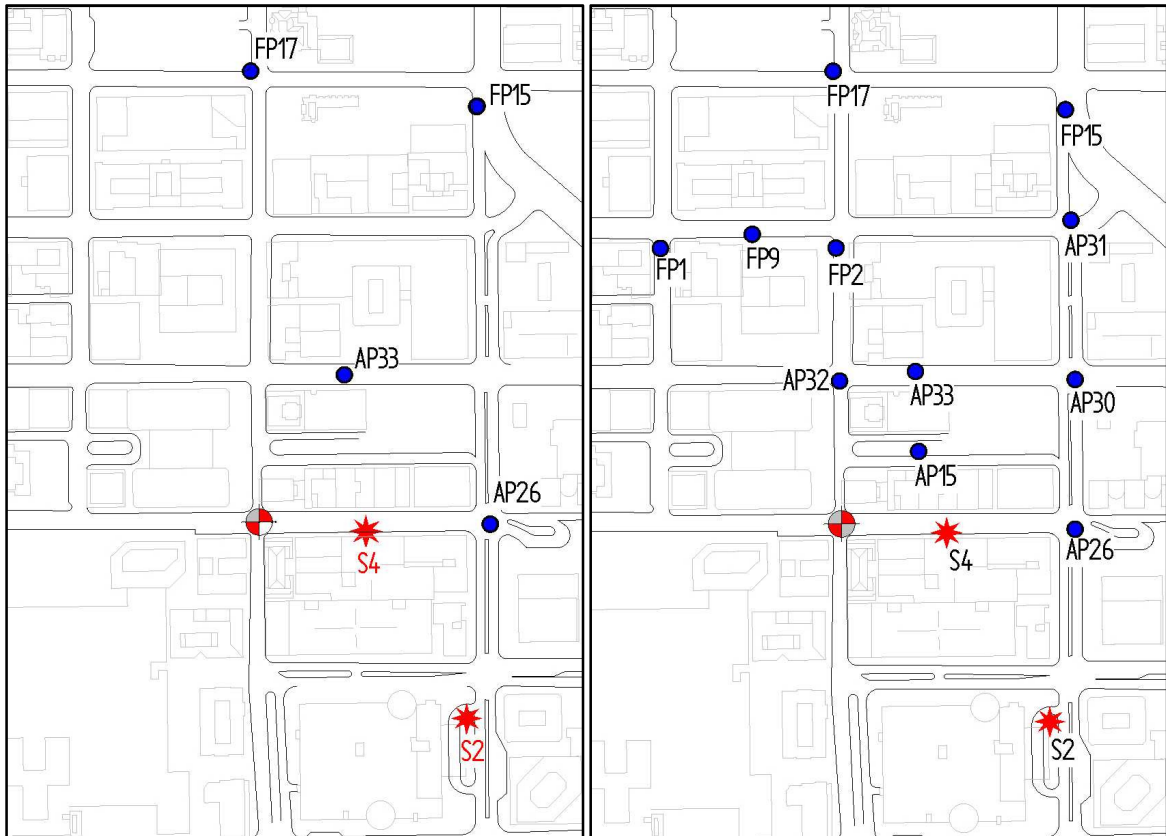


Abbildung 16: Lage aller bei den Vorversuchen (Wiederholungsmessungen links, Versuche zur Skalierbarkeit rechts) verwendeten Quell (eingezeichnete Sterne)- und Messorte (eingezeichnete blaue Punkte).

Die Skalierbarkeit der Ergebnisse bezüglich Windgeschwindigkeit, Quellstärke und Freisetzungsdauer wurde überprüft, indem eine Reihe von Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden, bei denen jeweils 2 dieser genannten Parameter konstant gehalten und der dritte systematisch variiert wurde.

Tabelle 4 gibt an, für welche Quellorte, mittleren Windrichtungen und Messpunkte diese Tests durchgeführt worden sind. Abbildung 16 (rechts) zeigt die genaue Lage der Quell- und Messorte. Die Ergebnisse dieser Versuche werden in Kapitel 8.4 beschrieben.

Auf Basis der Vorversuchsergebnisse wurden systematische Ausbreitungsversuche für 5 verschiedene Quellorte und 6 unterschiedliche Windrichtungen durchgeführt. Insgesamt ergaben sich 15 Konfigurationen, bei denen sich jeweils die Kombination aus Quellort und Windrichtung voneinander unterschied. Tabelle 5 fasst die genaue Lage (in UTM-Koordinaten) und Bezeichnung der in dieser Kampagne verwendeten Quellen zusammen.

4 Quellorte (Botanical Garden, Hotel Westin (west), Hotel Westin (ost) und Park Avenue) stimmen mit denen der Feldkampagne Joint Urban 2003 überein.

Variierter Parameter	Quelle	Windrichtung	Bezeichnung des Messortes	Messhöhe [mm]
Quellstärke	S2 Westin (west)	170	AP26	6.7
Quellstärke	S2 Westin (west)	170	FP15	6.7
Freisetzungzeit	S2 Westin (west)	170	AP26	6.7
Freisetzungzeit	S2 Westin (west)	170	FP15	6.7
Freisetzungzeit	S2 Westin (west)	150	FP09	6.7
Freisetzungzeit	S2 Westin (west)	150	AP27	6.7
Freisetzungzeit	S4 Park Avenue	170	AP33	6.7
Freisetzungzeit	S4 Park Avenue	170	FP17	6.7
Freisetzungzeit	S4 Park Avenue	150	FP01	6.7
Freisetzungzeit	S4 Park Avenue	150	AP28	6.7
Windgeschwindigkeit	S2 Westin (west)	170	AP26	6.7
Windgeschwindigkeit	S2 Westin (west)	170	FP15	6.7
Windgeschwindigkeit	S2 Westin (west)	170	AP26	100
Windgeschwindigkeit	S2 Westin (west)	170	AP30	6.7
Windgeschwindigkeit	S2 Westin (west)	170	AP30	200
Windgeschwindigkeit	S2 Westin (west)	170	AP31	6.7
Windgeschwindigkeit	S4 Park Avenue	170	FP02	6.7
Windgeschwindigkeit	S4 Park Avenue	170	AP32	6.7
Windgeschwindigkeit	S4 Park Avenue	170	AP32	200
Windgeschwindigkeit	S4 Park Avenue	170	AP15	6.7
Windgeschwindigkeit	S2 Westin (west)	170	AP26	100
Windgeschwindigkeit	S2 Westin (west)	170	AP26	6.7

Tabelle 4: Test-Konfigurationen bestehend aus Quellort, mittlerer Windrichtung und Messposition, für die die Skalierbarkeit der Ergebnisse bezüglich der Freisetzungsdauer, Windgeschwindigkeit und Quellstärke überprüft wurde.

An jeweils 10 bis 15 Messpunkten pro Konfiguration wurde die Konzentration der freigesetzten Gaswolken aufgezeichnet. Die Lage der Quell- und Messorte sind für sämtliche Konfigurationen in Abbildung 71 a-o dargestellt (siehe Anhang A auf Seite 187 ff.). Insgesamt wurden bei diesen Messungen 167 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien untersucht. Als Ausbreitungsszenario wird in dieser Arbeit die Kombination aus der mittleren Windrichtung, des Quellortes und des jeweiligen Messortes bezeichnet. Das Konzentrationsignal wurde bei den Messungen in der Regel in einer Höhe von 2 m im Naturmaßstab

aufgenommen, da insbesondere das bodennahe, für Passanten relevante Konzentrationsfeld untersucht werden sollte.

Bezeichnung der Quellen		UTM Koordinaten (Zone 14)	
		Easting	Northing
Quelle S1	Hotel Westin (east)	634789.3	3925877.2
Quelle S2	Hotel Westin (west)	634772.2	3925887.0
Quelle S3	Botanical Garden	634603.0	3925763.8
Quelle S4	Park Avenue	634686.0	3926036.8
Quelle S5	Bank One	634836.4	3926021.0

Tabelle 5: Bezeichnung und Lage in UTM-Koordinaten der im Windkanal verwendeten Quellen.

Die gemessenen Konzentrationszeitserien sämtlicher 167 Ausbreitungsszenarien sind in die erstellte Referenzdatenbank eingebunden. Details zu dieser Referenzdatenbank gibt der zugehörige Bericht von Leitl et al. (2009). Desweiteren fließen die Ergebnisse dieser 167 Konzentrationsmessungen in die Untersuchungen zur Variabilität turbulenter Ausbreitungsprozesse in einem urbanen Hindernisgebiet ein (siehe Kapitel 8.5) und werden bei einem Vergleich zwischen Ergebnissen von Windkanal- und Naturversuchen herangezogen (siehe Kapitel 8.7).

5 Feldkampagne Joint Urban 2003

Oklahoma City wurde als Modellstadt für die Windkanalkampagne ausgewählt, da in dieser Stadt im Jahr 2003 eine umfangreiche Feldstudie stattfand, bei der unter anderem auch die Ausbreitung einzelner Schadstoffwolken untersucht wurde. Hierdurch bietet sich die Möglichkeit, die Ergebnisse der Windkanal- und Naturmessungen miteinander zu vergleichen. Dieses Kapitel gibt eine kurze Übersicht über die Feldkampagne Joint Urban 2003 (JU2003).

5.1 Projektziele

Joint Urban 2003 (Allwine et al. 2004) gehört, ebenso wie die Kampagnen Urban 2000 (Allwine et al. 2002) und Mock Urban Setting Tests (Yee & Bilstoft, 2004), zu einer Serie von groß angelegten Feldstudien, die vom U.S. Department of Homeland Security (DHS) und der U.S. Defense Threat Reduction Agency (DTRA) finanziert und in Kooperation mit zahlreichen universitären Einrichtungen und Forschungsinstituten durchgeführt wurden. Hauptziel dieser Kampagnen war es, das Verständnis von komplexen Ausbreitungsprozessen speziell in urbanen Gebieten zu verbessern. Im Rahmen der JU2003-Kampagne sollten Ausbreitungsuntersuchungen in Oklahoma City unter verschiedenen meteorologischen Randbedingungen durchgeführt werden. Oklahoma City wurde für diese Kampagne ausgesucht, da die Stadtstruktur, die sich insbesondere durch einen etwa 1 Quadratkilometer großen, von Hochhäusern geprägten Innenstadtbereich (Central Business District) auszeichnet, typisch für viele amerikanische Städte ist. Dies sollte dazu führen, dass die gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere amerikanische Städte übertragbar sind. Ziel der Messungen war es zudem, einen qualitativ hochwertiger Datensatz zu erstellen, der zur Evaluierung numerischer Ausbreitungsmodelle geeignet ist (Leach 2005).

5.2 Experimentelle Durchführung

Die Feldkampagne Joint Urban 2003 fand vom 28. Juni bis 31. Juli 2003 in Oklahoma City statt. In 34 Tagen wurden 10 sogenannte „intensive operation periods“ (IOPs) durchgeführt, bei denen jeweils über einen Zeitraum von etwa 8 Stunden mehrere Ausbreitungsversuche stattfanden. Hierbei handelte es sich sowohl um kontinuierliche als auch um

Puff-Freisetzungen. Als Messgas wurde Schwefelhexafluorid (SF_6) verwendet, welches gleichmäßig über einen Zeitraum von 30 Minuten bei den kontinuierlichen Freisetzungen und instantan bei den Puff-Versuchen freigesetzt wurde. Die kontinuierlichen Freisetzungen werden in dieser Arbeit nicht diskutiert. Die einzelnen SF_6 -Freisetzungen wurden im zeitlichen Abstand von etwa 20 Minuten durchgeführt, um zu verhindern, dass sich Konzentrationen von unterschiedlichen Versuchen im Messgebiet überlagern. Die ersten 6 IOPs fanden tagsüber zwischen 8:00 Uhr und 16:00 Uhr CST (CST = UTC-6) und die letzten 4 nachts zwischen 22:00 Uhr und 6:00 Uhr CST statt. Die verschiedenen Versuchszeiten wurden gewählt, um Ausbreitungsversuche bei unterschiedlichen Schichtungsverhältnissen durchführen zu können. Bei den 10 IOPs der Feldkampagne wurden insgesamt 40 einzelne Puffs freigesetzt, wobei 25 dieser Ausbreitungsversuche am Tag und 15 in der Nacht stattfanden. Für die Puff-Freisetzungen wurden mit SF_6 gefüllte Ballone jeweils in einer Höhe von 1 bis 2 Metern über dem Boden zum Platzen gebracht. Bei jedem Versuch wurden in Abhängigkeit von den meteorologischen Rahmenbedingungen zwischen 300 und 1000 Gramm SF_6 freigesetzt. Insgesamt wurden bei JU2003 4 Quellorte verwendet, deren Bezeichnung und Lage mit 4 Quellen der Windkanalkampagne übereinstimmen (siehe Tabelle 5 in Kapitel 4.3).

Die Ausbreitung der Gaswolken im Stadtgebiet wurde mit 10 TGA-4000-Systemen, die vom Air Resources Laboratory Field Research Division (ARLFRD) betrieben wurden, gemessen. Das verwendete System ist speziell für das Detektieren von SF_6 in Umgebungsluft konstruiert und verfügt über eine zeitliche Auflösung von etwa einem Hertz (Clawson et al. 2005). Der Messbereich reicht von 10 Teilen pro einer Billion Volumenanteilen (ppt_v) unter Laborbedingungen bis zu 10.000 ppt_v . Vor und nach jeder Messung wurden die Geräte mit 8 Referenzgasen, deren Konzentration zwischen 0 und 10.000 ppt_v lag, kalibriert. Anhand der Kalibrierungsergebnisse wurde für jede Messung die minimal detektierbare Konzentration bestimmt, die zum Teil deutlich über dem angegebenen Laborwert von 10 ppt_v lag.

Die verwendeten Systeme waren auf 10 Kraftfahrzeugen verteilt, wobei während der Versuche 9 Fahrzeuge jeweils an einem festen Ort blieben und das zehnte Fahrzeug die 4th

und 8th Straße entlangfuhr, um Informationen über die Ausdehnung der Wolken zu sammeln. Die Standorte der übrigen 9 Fahrzeuge richteten sich nach den jeweiligen Windverhältnissen und wurden bevorzugt an Straßenkreuzungen gewählt.

Insgesamt wurden 16 Puff-Versuche der Naturkampagne im Windkanal nachgestellt. Tabelle 6 fasst die Quellorte und Freisetzungzeitpunkte dieser Versuche zusammen und zeigt, an wie vielen Messorten pro Freisetzung die Ergebnisse der Natur- und Windkanalkampagne miteinander verglichen werden konnten.

IOP	Quelle	Datum	Puff Nr.	Freisetzungszeit [CST]	Anzahl der korrespond. Messorte
3	Botanical Garden	7. Juli 2003	1	9:00	1
			2	9:20	3
			3	9:40	2
			4	10:00	3
4	Botanical Garden	9. Juli 2003	1	9:00	3
			2	9:20	2
			3	9:40	3
6	Botanical Garden	16. Juli 2003	1	15:00	1
			3	15:40	1
8	Westin (west)	24. Juli 2003	2	5:20	1
			3	5:40	1
			4	6:00	2
9	Park Avenue	27 Juli 2003	1	5:00	2
			2	5:20	1
			3	5:40	2
			4	6:00	2

Tabelle 6: Puff-Freisetzungen der Feldkampagne JU2003, die im Windkanal nachgestellt wurden. Zudem ist die Anzahl der Messorte pro Freisetzung angegeben, an denen die Ergebnisse der Natur- und Windkanalkampagne miteinander verglichen wurden.

Nicht alle verfügbaren Daten der Naturkampagne wurden für diesen Vergleich herangezogen. Die Auswahl der verwendeten Daten aus der JU2003-Kampagne richtete sich nach der Qualität der bereitgestellten Daten. Jede Messung ist von ARLFRD mit einer Qualitätsangabe versehen, die Angaben über erkannte Fehler und Messungenauigkeiten beinhaltet. Abgesehen von nicht nutzbaren Daten gibt es Messdaten, deren Qualität vermindert ist. Hierzu zählen Messungen, bei denen die aufgetretene Konzentration außerhalb

des kalibrierten Messbereiches lag. ARLFRD gab in solchen Situationen Konzentrationswerte an, die lediglich einen Schätzwert darstellen.

Für den Vergleich von Natur- und Windkanalmessungen wurden ausschließlich Naturdaten verwendet, deren Qualität von ARLFRD als gut eingestuft wurde. Die Ergebnisse dieses Vergleiches werden in Kapitel 8.7 dargestellt.

Eine Vielzahl von In-situ- und Fernerkundungsmessungen wurde von den teilnehmenden Organisationen ARLFRD, Dugway Proving Ground (DPG) und dem Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) durchgeführt, um die meteorologischen Bedingungen während der Versuche möglichst präzise charakterisieren zu können. Insgesamt wurden 142 3-D- und 9 2-D-Ultraschallanemometer verwendet, die an verschiedenen Messmasten und Ampeln im gesamten Innenstadtbereich angebracht waren, um das bodennahe Strömungsfeld zu bestimmen. Desweiteren wurden zur Charakterisierung der Grenzschicht 2 LIDAR- und 9 SODAR-Fernerkundungssysteme eingesetzt und in regelmäßigen Abständen Radiosonden gestartet. 29 Wetterstationen, die Parameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftdruck aufzeichneten und 3 Ceilometer, die zur Bestimmung der Wolkenuntergrenze eingesetzt wurden, komplettierten die umfangreiche Messausrüstung der Kampagne.

Innerhalb des Innenstadtbereiches korrespondiert die Messposition von 21 Ultraschallanemometern der Feldkampagne mit Messpunkten der Windkanalkampagne. Abbildung 15 (Kapitel 4.2) und Tabelle 7 geben eine Übersicht über die Bezeichnung und Lage dieser Messpunkte.

Aufgrund der korrespondierenden Lage dieser Messpositionen können sie im Falle eines Vergleiches zwischen Ergebnissen der Natur- und Windkanalmessungen prinzipiell als Referenzorte herangezogen werden. Die am Referenzort gemessene Windgeschwindigkeit ermöglicht es, Ergebnisse von Ausbreitungsuntersuchungen oder Strömungsmessungen zu entdimensionalisieren. Hierdurch lassen sich Ergebnisse miteinander vergleichen, die bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten aufgenommen wurden. Die Entdimensionalisierung der bei den Windkanalmessungen aufgenommenen Ergebnisse wird in Kapitel 6.2 (für die Strömungsmessungen) und in Kapitel 8.4.4 (für die Ausbreitungsmessungen) ausführlich beschrieben.

Institution	Bezeichnung		Messort in UTM-Koordinaten		
	JU2003	Windkanal	Easting	Northing	Höhe [m]
University of Oklahoma	OU Tower 1	OU Tower 1	634680	3926047	1.5
			634680	3926047	3
			634680	3926047	6
			634680	3926047	10
			634680	3926047	15
University of Utah	UU 3D Sonic 2	UU Tower 1	634690	3926071	19
	UU 3D Sonic 4		634690	3926071	20.5
	UU 3D Sonic 9		634690	3926071	22
Arizona State University	ASU sonics (3) / surface temp	ASU Tower	634747	3926046	2.5
			634747	3926046	5
			634747	3926046	8.5
Dugway Proving Ground	SuperPWIDS 1	DPG 01	634605	3926378	8
	SuperPWIDS 2	DPG 02	634809	3926379	8
	SuperPWIDS 3	DPG 03	634603	3926264	8
	SuperPWIDS 5	DPG 05	634602	3926148	8
	SuperPWIDS 6	DPG 06	634797	3926169	8
	SuperPWIDS 9	DPG 09	634602	3926031	8
	SuperPWIDS 14	DPG 14	634803	3926031	8
	SuperPWIDS 17	DPG 17	634605	3925769	8
	SuperPWIDS 19	DPG 19	634795	3925800	8
	SuperPWIDS 20	DPG 20	634609	3925551	8

Tabelle 7: Ultraschallanemometer der Feldkampagne JU2003, deren Lage mit Messpunkten der Windkalkampagne korrespondiert.

6 Grenzschichtmodellierung

Dieses Kapitel behandelt die Modellierung einer naturähnlichen Windkanalgrenzschicht. Ziel war es, eine Grenzschicht zu modellieren, deren Eigenschaften maßstabsverkleinert mit denen der atmosphärischen Grenzschicht von Oklahoma City übereinstimmen. Es sollten dabei die Anströmbedingungen nachgestellt werden, die sich stromaufwärts der Innenstadt von Oklahoma City einstellen, bevor sie von den Hochhäusern der Stadt geprägt werden.

Im Windkanal wurde eine Grenzschicht modelliert, die sich in der Natur unter neutralen Schichtungsverhältnissen einstellt. Die Beschränkung auf neutrale Grenzschichten ist möglich, weil bei der vorliegenden Studie ausschließlich Strömungs- und Ausbreitungsprozesse in Bodennähe auf einem relativ kleinen Gebiet von etwa einem Quadratkilometer untersucht werden. Hierdurch ist der Einfluss von thermischen Effekten gegenüber mechanischer Turbulenzproduktion auf die zu untersuchenden Prozesse vernachlässigbar klein.

Um die Grenzschichteigenschaften von Oklahoma City im Windkanal nachmodellieren zu können, galt es zunächst, die Charakteristiken der atmosphärischen Grenzschicht zu bestimmen. Hierfür werden im nachfolgenden Abschnitt 6.1 Messungen der JU2003 Feldkampagne analysiert.

In Kapitel 6.2 werden die Eigenschaften der modellierten Windkanalgrenzschicht dokumentiert. Auf Basis von Richtlinien bzw. Referenzen (VDI Richtlinie 2000, ESDU 1985, Snyder 1981 und Counihan 1975) wird überprüft, ob die einzelnen Parameter der modellierten Grenzschicht untereinander stimmig sind und dem Geländetyp von Oklahoma City entsprechen.

Abschließend wird in Kapitel 6.3 analysiert, ob die modellierte Grenzschicht den Qualitätsanforderungen des Hamburger Windkanallabors genügt.

6.1 Atmosphärische Grenzschicht von Oklahoma City

Der Verlauf der mittleren Horizontalgeschwindigkeit $\bar{u}(z)$ über die Höhe lässt sich mit dem Potenzansatz

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_{ref}} = \left(\frac{z - d_0}{z_{ref} - d_0} \right)^\alpha \quad 6.1$$

beschreiben. Hierbei ist α der Profilexponent, z die Höhe über Grund, z_{ref} die Referenzhöhe, u_{ref} die mittlere Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe und d_0 die Nullpunktverschiebung. In der bodennahen Atmosphäre (unterste 100 m über Grund; Kraus 1970) wird zur Beschreibung des Windprofils das logarithmische Wandgesetz

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) \quad 6.2$$

empfohlen (VDI Richtlinie 2000). Es bedeuten u_* die Schubspannungsgeschwindigkeit, z_0 die Rauigkeitslänge und κ die Von-Karman-Konstante, die einen Wert von 0,4 hat.

Demnach lässt sich ein bodennahes Windprofil durch die Kenntnis der Parameter α , z_0 , u_* und d_0 beschreiben. Ziel war es, diese Parameter für ein mittleres Windprofil der JU2003-Kampagne zu bestimmen. Die Ermittlung dieses Windprofils aus den Felddaten wird im Folgenden näher erläutert.

Im Rahmen der JU2003-Kampagne wurden Windprofile an verschiedenen Orten im Gebiet von Oklahoma City aufgenommen. Zur Charakterisierung der mittleren Anströmbedingungen wurden SODAR-Messungen des Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) der JU2003-Kampagne herangezogen, die etwa 2 Kilometer südlich des Stadtkerns von Oklahoma City durchgeführt wurden. Dieser Messort wurde ausgewählt, um die Anströmbedingungen charakterisieren zu können, bevor die Strömung von Hochhäusern der Innenstadt beeinflusst wird. Die Lage südlich der Innenstadt war günstig, da bei allen IOPs der Naturkampagne Südwinde vorherrschten und der Messort dementsprechend immer in Luv der Innenstadt lag. Das SODAR wurde auf einem ebenen Feld in Flussnähe platziert (in UTM-Koordinaten: East 633824, North 3924274), welches wiederum in der von Einfamilienhäusern geprägten Vorstadt von Oklahoma City gelegen ist.

Der zur Verfügung stehende Datensatz dieser SODAR-Messungen beinhaltet 15-Minuten-Mittelwerte der Windgeschwindigkeit, die 24 Stunden pro Tag während der gesamten Kampagne in Höhen zwischen 30 m und 500 m über dem Boden mit einer vertikalen Auflösung von 10 m gemessen wurden. Windprofile, die in der Natur aufgenommen werden,

weisen erfahrungsgemäß eine breite Streuung bezüglich ihrer Form und turbulenten Eigenschaften auf. Diese Variabilität der einzelnen Messergebnisse ist insbesondere auf Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsfluktuationen sowie unterschiedliche Schichtungsverhältnisse zurückzuführen. Die Windrichtung kann Einfluss auf die an einem Ort vorherrschenden Grenzschichteigenschaften nehmen, wenn sich in der Umgebung des Messortes unterschiedliche Geländestrukturen vorfinden.

Neben den wechselnden Randbedingungen kann die beobachtete Variabilität auch durch zu kurze Mittelungszeiten selbst bei konstanten Randbedingungen verursacht werden. Wie von Rix (2007) und Schultz (2008) anhand von Windkanalstudien gezeigt, sind in urbanen Gebieten Mittelungszeiten von mehreren Stunden erforderlich, um repräsentative mittlere Windgeschwindigkeiten bestimmen zu können. Demnach ist zu erwarten, dass die über 15 Minuten gemittelten Profile des JU2003-Datensatzes sich allein aufgrund der zu kurzen Mittelungszeit voneinander unterscheiden. Allerdings muss bei Mittelungszeiten von mehreren Stunden bei Naturmessungen berücksichtigt werden, dass sich innerhalb dieser Zeitspanne die meteorologischen Randbedingungen verändern. Messdaten, die bei ähnlichen Randbedingungen aufgenommen wurden, können im Fall von Naturmessungen meist nur dann über mehrere Stunden gemittelt werden, wenn die Messungen über einen sehr langen Zeitraum durchgeführt wurden und die Daten vor der Mittelung entsprechend der jeweiligen meteorologischen Randbedingungen (Windrichtung und Schichtungsverhältnisse) sortiert werden.

Um ein repräsentatives mittleres Profil aus den Felddaten der JU2003-Kampagne bestimmen zu können, welches sich bei neutralen Schichtungsverhältnissen einstellt, wurden bestimmte Messungen aus dem verfügbaren Datensatz anhand der nachfolgend beschriebenen Kriterien herausgesucht.

Zunächst galt es, die jeweiligen Schichtungsverhältnisse während der Naturmessungen zu analysieren. Für diese Analyse liegen vertikale Temperaturprofile vor, die allerdings nur am Tag von Radiosonden jeweils stündlich aufgenommen wurden. Rückschlüsse auf die nächtlichen Bedingungen gibt die Arbeit von De Wecker et al. (2004). Demnach stellte sich in nahezu jeder Nacht während der JU2003-Kampagne eine sehr stabile Grenzschicht

ein. Zudem bildete sich nachts in Höhen zwischen 300 m und 500 m über dem Boden ein Windmaximum (low level jet), was typisch für eine stabil geschichtete Grenzschicht in den Great Plains ist (Bonner 1968). Dementsprechend wurden sämtliche nächtlichen Profilmessungen für die Bestimmung der mittleren Anströmbedingungen der Naturgrenzschicht bei neutraler Schichtung nicht berücksichtigt.

Die Radiosondenaufstiege dienten dazu, die potentielle Temperatur in verschiedenen Höhen zu bestimmen. Die Änderung der potentiellen Temperatur mit der Höhe ist ein Indikator für die jeweiligen Schichtungsverhältnisse. Eine neutrale Schichtung korrespondiert mit einem konstanten Verlauf der potentiellen Temperatur mit der Höhe.

Abbildung 17 zeigt Profile der potentiellen Temperatur Θ , die am 2. Juli 2003 im Rahmen der JU2003-Kampagne in Oklahoma City zu unterschiedlichen Tageszeiten aufgenommen wurden. Die dargestellten Profile geben beispielhaft die Schichtungsverhältnisse am Tag über den Versuchszeitraum der JU2003-Kampagne wieder.

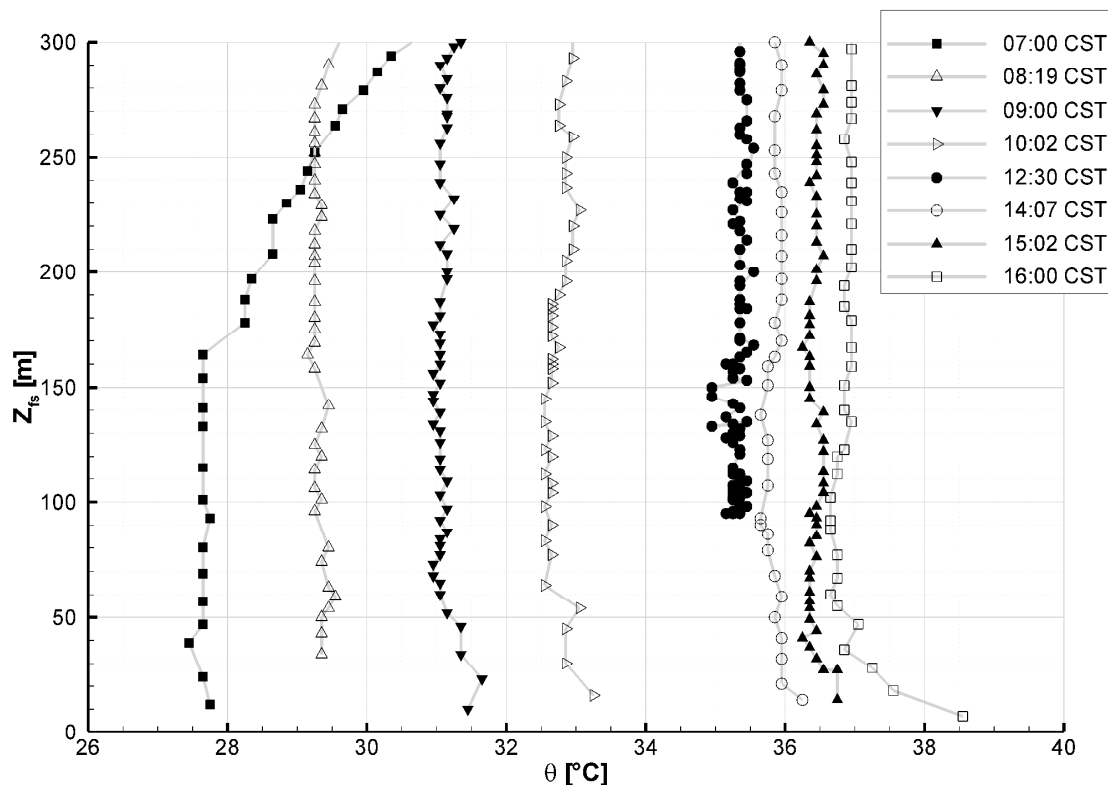


Abbildung 17: Profile der potentiellen Temperatur Θ , die im Rahmen der JU2003-Kampagne anhand von Radiosondenaufstiegen am 2. Juli 2003 gemessen wurden.

Die Messungen der Radiosonden zeigen jeweils eine Zunahme der potentiellen Temperatur mit der Höhe in den frühen Morgenstunden an, was auf Reste der nächtlichen stabilen Grenzschicht zurückzuführen ist. Zudem weisen die Profile jeweils am späten Nachmittag eine Abnahme der potentiellen Temperatur mit der Höhe in Bodennähe auf, was auf eine leicht labile Schichtung schließen lässt, die auf eine im Tagesverlauf zunehmend erwärmte Erdoberfläche zurückzuführen ist. Die durchschnittliche Änderung der potentiellen Temperatur mit der Höhe ist bei allen Radiosondenaufstiegen, die zwischen 8:00 Uhr und 15:00 Uhr CST durchgeführt wurden, relativ gering und beträgt auf den untersten 200 m weniger als ± 0.15 °C pro 100 m. Dementsprechend war während der Naturmesskampagne der Einfluss thermischer Effekte in dem oben genannten Zeitabschnitt am geringsten.

Allerdings ist hervorzuheben, dass die stündlichen Radiosondenstarts nur eine sehr oberflächliche Bewertung der jeweiligen Schichtungsverhältnisse ermöglichen. Eine genauere Analyse der Schichtungsverhältnisse, wie etwa die Bestimmung der Fluss-Richardson-Zahl konnte auf Basis der Radiosondendaten nicht durchgeführt werden. Hierfür fehlten Messungen der vertikalen Geschwindigkeitskomponente, um den turbulenten Wärmefluss bestimmen zu können. Die Fluss-Richardson-Zahl (Ri_f) beschreibt das Verhältnis von Auftriebsproduktion zur Scherproduktion. Ist Ri_f klein, überwiegt die mechanische Produktion von Turbulenz. Die Strömung verhält sich in diesem Fall bezüglich der Turbulenzcharakteristika unabhängig vom tatsächlichen Gradienten der potentiellen Temperatur, also wie eine neutral geschichtete Strömung. Auch wenn eine Bestimmung der Ri_f nicht möglich war, sollte sichergestellt werden, dass die mechanische Produktion von Turbulenz möglichst groß ist. Diese nimmt umso größere Werte an, je höher die Windgeschwindigkeit ist. Zur Bestimmung der Naturgrenzschichtcharakteristika wurden daher nur 4 Versuchstage der Feldkampagne (IOP 2, IOP 3, IOP 4 und IOP 9) ausgewählt, an denen die durchschnittlich höchsten Windgeschwindigkeiten verzeichnet wurden. Von diesen 4 Versuchstagen wiederum wurden nur Messungen berücksichtigt, bei denen die durchschnittliche Windgeschwindigkeit zwischen 40 m und 100 m über dem Boden mindestens 4 m/s betrug.

Das SODAR des PNNL hat an den Versuchstagen knapp 1000 Windprofile aufgezeichnet, von denen 102 die oben genannten Kriterien erfüllen und zur Grenzschichtanalyse herangezogen wurden. Zur Bestimmung des Profilexponenten α wurde zunächst überprüft, ob die Strömung für verschiedene Windrichtungen von unterschiedlichen Geländetypen geprägt wurde. Bei sämtlichen Versuchen der JU2003-Kampagne lag die Windrichtung zwischen 160° und 240° . Für diesen Windrichtungssektor wurde die Strömung auf den etwa letzten 10 km vor dem Messort vom Geländetyp einer Vorstadt und von ebenen, meist landwirtschaftlich genutzten Flächen weiter stromaufwärts geprägt. Aus diesem Grund wurden zur Bestimmung des Profilexponenten α die 102 gemessenen Windprofile nicht nach den jeweiligen Windrichtungen sortiert.

Abbildung 18 zeigt für die 102 ausgewählten Windprofile den Verlauf der mittleren Horizontalgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe. Um die Profile, die bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten gemessen wurden, miteinander vergleichen zu können, wurden sie mit der jeweiligen Windgeschwindigkeit, die in einer Höhe von 220 m über dem Boden gemessen wurde, skaliert. Rot dargestellt ist das aus den gemessenen Windprofilen berechnete mittlere Windprofil. Die SODAR Messungen wurden nur bis zu einer Höhe von 300 m analysiert, da der Datensatz dieser Messungen oberhalb von 300 m zahlreiche Lücken aufweist.

Die durchgezogene Line in Abbildung 18 zeigt ein mit dem Potenzansatz berechnetes Profil, für das ein Profilexponent von 0.2 und eine Nullpunktverschiebung von 0 m angenommen wurde. Die Referenzhöhe z_{ref} des Potenzansatzes wurde an den oberen Rand der Grenzschicht gelegt, für die wiederum eine Grenzschichthöhe von 1000 m ausgewählt wurde. Da die Grenzschichthöhe zum Zeitpunkt einer jeden Profilmessung nicht vorliegt, konnte sie für diese Untersuchungen nur abgeschätzt werden. Die Referenzwindgeschwindigkeit u_{ref} in der Referenzhöhe wurde so gewählt, dass das berechnete Windprofil mit dem mittleren Windprofil der Naturmesskampagne in einer Höhe von 220 m über dem Boden korrespondiert. Abbildung 18 zeigt, dass das mittlere gemessene Windprofil gut mit dem über den Potenzansatz bestimmten Profil in Höhen zwischen 50 m und 300 m über dem Boden übereinstimmt.

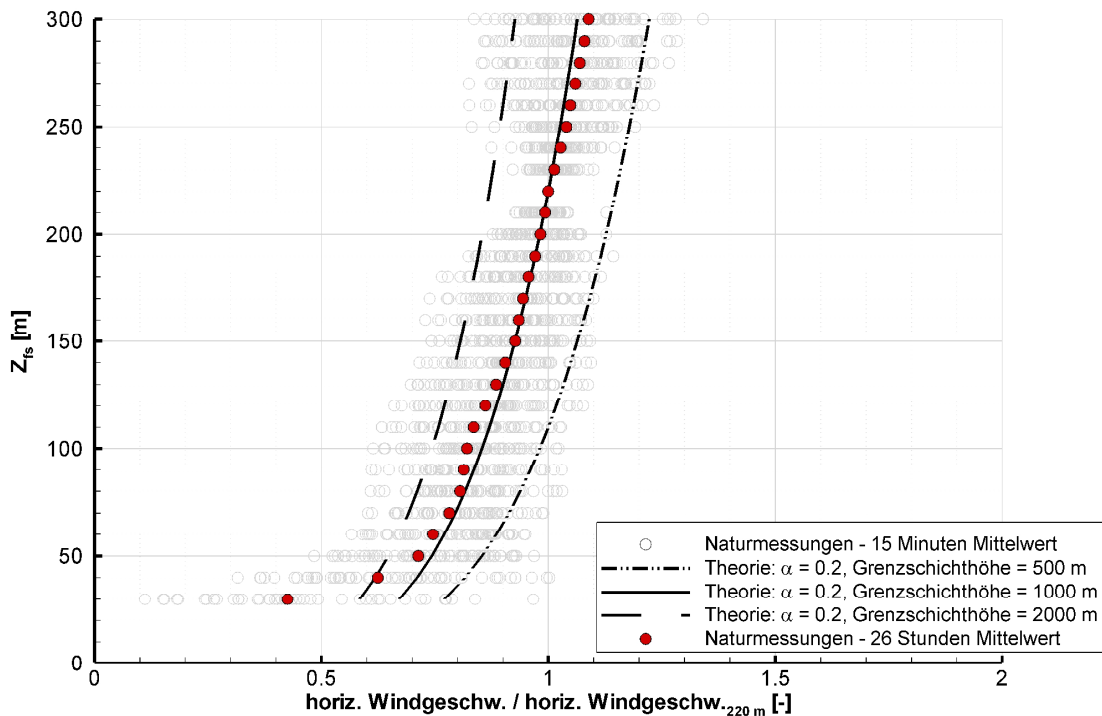


Abbildung 18: Ausgewählte Windprofile, die im Rahmen der JU2003-Kampagne 2 km südlich des Stadtzentrums von Oklahoma City mit einem SODAR des PNNL an 4 Versuchstagen (IOP2, IOP3, IOP4 und IOP9) gemessen wurden. Zudem sind drei theoretische, mit dem Potenzansatz bestimmte Kurven eingezeichnet (siehe Legende).

Es soll an dieser Stelle jedoch hervorgehoben werden, dass bei einem Vergleich von Windprofilen neben der Skalierung auf eine einheitliche Windgeschwindigkeit in einer ausgewählten Referenzhöhe auch die Kenntnis über die Grenzschichtdicke zum Zeitpunkt der Profilmessung von Bedeutung ist. Um dies zu veranschaulichen sind in Abbildung 18 die Verläufe zwei weiterer Kurven dargestellt, die ebenfalls mit dem Potenzansatz berechnet wurden. Die Werte, die hierbei für den Profilexponenten, die Nullpunktverschiebung und die Referenzwindgeschwindigkeit angenommen wurden, sind mit der oben beschriebenen Berechnung für den Potenzansatz identisch. Lediglich die Referenzhöhe, die mit der abgeschätzten Grenzschichthöhe korrespondiert, befindet sich für diese beiden Berechnungen in 500 m bzw. 2000 m über dem Boden. Die für die Berechnungen angenommenen Grenzschichthöhen sind auf Basis der Angaben von De Wecker (2004) ausgewählt worden. Dieser gibt an, dass die Grenzschichthöhe während der JU2003-Kampagne eine starke Variabilität aufgewiesen habe. Die Grenzschichthöhe sei jeweils im Tagesver-

lauf von einigen hundert Metern in den Morgenstunden deutlich angestiegen und habe im Schnitt eine Höhe von 1500 m – 2000 m am späten Nachmittag erreicht.

Abbildung 18 zeigt, dass sich die drei theoretisch berechneten Kurven deutlich voneinander unterscheiden, obwohl der für die Berechnungen jeweils herangezogene Profilexponent, die Nullpunktverschiebung und die Referenzwindgeschwindigkeit übereinstimmen. Ein Vergleich dieser drei theoretischen Kurven ist dementsprechend ohne die Kenntnis der jeweiligen Grenzschichtdicken nicht möglich. Dementsprechend ist ein Vergleich der in der Natur gemessenen Windprofile nur dann sinnvoll, wenn die Grenzschichtdicke zum Zeitpunkt der Messung bekannt ist. Es kann nach den Angaben von De Wecker (2004) davon ausgegangen werden, dass sich das in Abbildung 18 dargestellte mittlere Windprofil aus einzelnen Windprofilen zusammensetzt, bei denen die jeweilige Grenzschichthöhe signifikant unterschiedlich war. Eine zur Grenzschichtcharakterisierung erforderliche Skalierung der einzelnen Windprofile auf eine einheitliche Grenzschichthöhe konnte anhand des vorliegenden Datensatzes nicht vorgenommen werden. Da die hieraus resultierenden Ungenauigkeiten nicht abgeschätzt werden können, wird davon abgesehen, die Naturgrenzschicht anhand des Potenzansatzes zu charakterisieren.

Im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ werden bei dem ausgewählten Maßstab von 1:300 nur die untersten 200 m bis 300 m einer Grenzschicht modelliert. Dementsprechend hat das logarithmische Wandgesetz, welches den Verlauf der Horizontalwindgeschwindigkeit mit der Höhe in der Prandtl-Schicht (etwa die untersten 10% der Grenzschicht) beschreibt, gegenüber dem Potenzansatz, welcher zur Beschreibung des Windprofils über die gesamte Grenzschichthöhe empfohlen wird, für die Grenzschichtmodellierung des unteren Teils der Grenzschicht eine höhere Bedeutung. Es gilt, die Rauigkeitslänge z_0 , die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und die Nullpunktverschiebung d_0 des logarithmischen Wandgesetzes anhand der zuvor beschriebenen ausgewählten Messungen der JU2003-Kampagne zu bestimmen.

Abbildung 19 zeigt für die ausgewählten 102 Windprofile der Naturkampagne JU2003 den Verlauf der mittleren Horizontalgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe in halb-logarithmischer Darstellung. Rot dargestellt ist das aus den 102 Windprofilen bestimmte

mittlere Windprofil für die untersten 100 m der Atmosphäre. Um Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Profile mit der jeweiligen Windgeschwindigkeit, die in einer Höhe von 100 m über dem Boden gemessen wurde, skaliert.

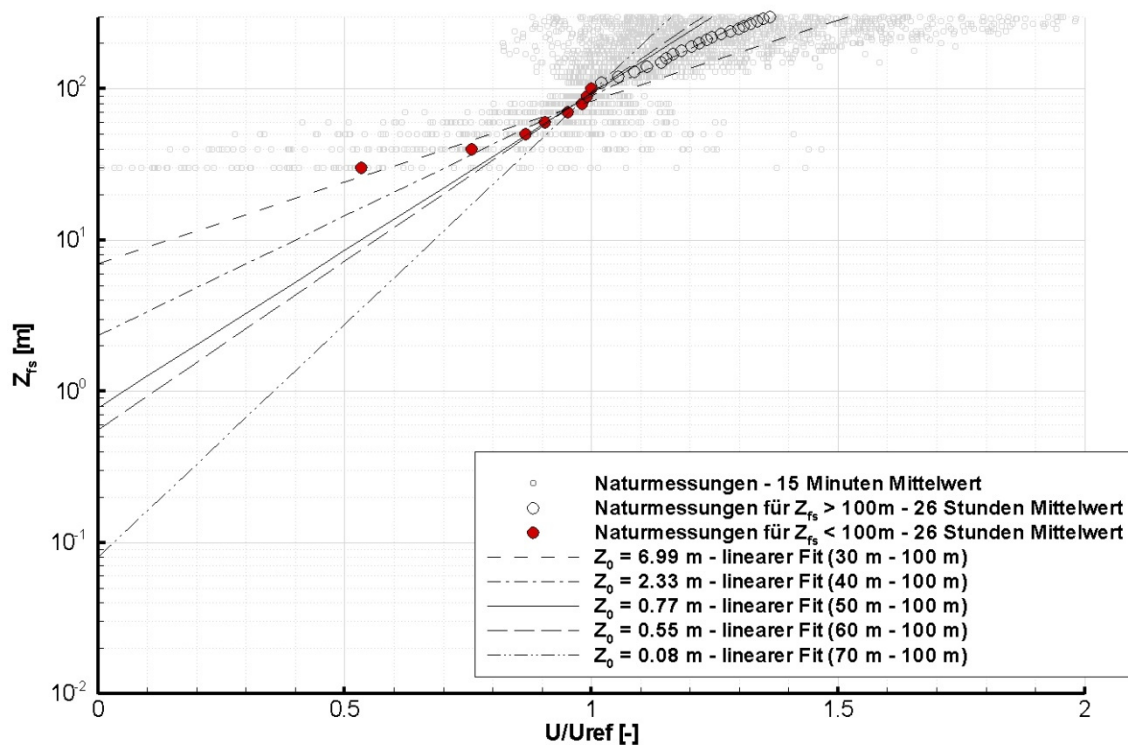


Abbildung 19: Ausgewählte Windprofile in halb-logarithmischer Darstellung, die im Rahmen der JU2003-Kampagne 2 km südlich des Stadtzentrums von Oklahoma City mit einem SODAR des PNNL an 4 Versuchstagen (IOP2, IOP3, IOP4 und IOP9) gemessen wurden. Dargestellt ist zudem die über einen linearen Fit bestimmten Rauigkeitslänge z_0 für eine angenommene Prandtl-Schichthöhe von 100 m (siehe Legende).

Gemäß der Theorie liegen in halb-logarithmischer Darstellung die Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Höhe innerhalb der Prandtl-Schicht für eine neutral geschichtete Atmosphäre auf einer Geraden. Anhand des Schnittpunktes dieser Geraden mit der Ordinatenachse lässt sich die Rauigkeitslänge z_0 bestimmen.

Ebenso wie die Höhe der atmosphärischen Grenzschicht ist die vertikale Mächtigkeit der Prandtl-Schicht in der Natur variabel und wird insbesondere von den jeweiligen Schichtungsverhältnissen geprägt. Es liegen allerdings zur Analyse der Naturdaten keine Angaben vor, anhand derer sich die vertikale Mächtigkeit der Prandtl-Schicht zum Zeitpunkt der jeweiligen Naturmessung abschätzen ließe. Hierfür wären Angaben über die vertika-

len turbulenten Flüsse erforderlich, die innerhalb der Prandtl-Schicht konstant sind und erst oberhalb der Prandtl-Schicht mit der Höhe abnehmen. Aus diesem Grund konnte die Höhe der Prandtl-Schicht nur abgeschätzt werden. Für sämtliche Naturmessungen wurde eine Prandtl-Schichthöhe von etwa 100 m angenommen. Dieser Wert richtete sich nach den Angaben von Kraus (1970), der für eine neutral geschichtete Atmosphäre grob eine Prandtl-Schichthöhe von 100 m abschätzt.

Wie Abbildung 19 verdeutlicht, ist in der Praxis die Bestimmung eines konstanten Geschwindigkeitsverlaufes mit der Höhe innerhalb der Prandtl-Schicht anhand von Messdaten nicht eindeutig. Insbesondere bodennah aufgenommene Messwerte können vom logarithmischen Windprofil abweichen, wenn sich einzelne Rauigkeitselemente wie Bäume oder Häuser in unmittelbarer Nähe zum Messort befinden. In einem solchen Fall sind die entsprechenden Messwerte zur Bestimmung der Rauigkeitslänge z_0 nicht geeignet. Abbildung 19 zeigt, dass im vorliegenden Fall eine Berücksichtigung der untersten Messpunkte des mittleren Geschwindigkeitsprofils in 30 m und 40 m zu einer signifikanten Streuung bei der Bestimmung der Rauigkeitslänge z_0 führt. Allerdings ist auch bei einer Nichtberücksichtigung der unteren beiden Messhöhen die Bestimmung der Rauigkeitslänge nicht eindeutig. Abhängig von den Messhöhen, welche zwischen 50 m und 100 m über dem Boden zur Bestimmung der Rauigkeitslänge berücksichtigt werden, lässt sich über einen linearen Fit eine Rauigkeitslänge von 0.08 m bis 0.77 m bestimmen.

Diese Unsicherheit bei der Bestimmung der Rauigkeitslänge ist voraussichtlich darauf zurückzuführen, dass die vertikale Mächtigkeit der Prandtl-Schicht zum Zeitpunkt der einzelnen Profilmessungen nicht der abgeschätzten Prandtl-Schichtdicke von 100 m entsprach. Nach den Angaben von De Wecker (2004) über die Grenzschichthöhe während der JU2003-Kampagne kann angenommen werden, dass die Prandtl-Schicht eine vertikale Mächtigkeit von einigen Dekametern in den Morgenstunden bis hin zu 200 m am Nachmittag einnahm. Da eine genaue Zuordnung der einzelnen Messungen nach der jeweiligen Schichtdicke nicht möglich war, ist anzunehmen, dass das in Abbildung 19 dargestellte mittlere Windprofil aus einzelnen Windprofilen besteht, bei denen die Prandtl-Schichthöhe größer oder kleiner als die angenommenen 100 m war.

Aufgrund der breiten Streuung der Ergebnisse ist eine belastbare Bestimmung der Rauigkeitslänge z_0 , der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und der Nullpunktverschiebung d_0 auf Basis der vorliegenden Daten der JU2003-Kampagne nicht zuverlässig.

6.2 Eigenschaften der modellierten Windkanal-Grenzschicht

Wie bereits in Kapitel 4.1 kurz beschrieben, wird im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ mittels Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten eine Grenzschicht modelliert. Die Turbulenzgeneratoren sind am Anfang der Anlaufstrecke eingebaut, während die Bodenrauigkeiten in Hauptwindrichtung vor dem Stadtmodell über eine etwa 10.5 m lange Anlaufstrecke platziert sind. Die Größe, Anzahl und Form der Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten kann nahezu beliebig variiert werden und richtet sich bei jeder Windkanalkampagne nach dem ausgewählten Modellmaßstab und den zu modellierenden Grenzschichteigenschaften. Um die für eine Kampagne passende Konfiguration von Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten zu bestimmen, können nach Erfahrungen des Hamburger Windkanallabors bis zu 50 Testkonfigurationen erforderlich sein, was im ungünstigsten Fall einem Messzeit-Aufwand von 2 bis 3 Monaten entspricht. Bei der vorliegenden Arbeit konnte bei der Grenzschichtmodellierung auf Erfahrungen zweier früherer Windkanalkampagnen (Leitl, Pascheke & Schatzmann 2003; Leitl & Schatzmann 2005) zurückgegriffen werden, bei denen ebenfalls die atmosphärische Grenzschicht von Oklahoma City im Windkanal der Universität Hamburg modelliert wurde. Hierdurch beschränkte sich der zeitliche Aufwand der Grenzschichtanpassung für die Messungen zu dieser Arbeit auf nur 2 Wochen.

Um die zu modellierenden Grenzschichteigenschaften zu definieren, konnte bei der vorliegenden Kampagne nicht auf Naturdaten zurückgegriffen werden, da keine repräsentativen Ergebnisse aus Naturmessungen vorlagen (siehe Kapitel 6.1). Die Grenzschichtmodellierung basierte daher auf Vorgaben aus Richtlinien der physikalischen Modellierung von Strömungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht. Diese Richtlinien und entsprechenden Literaturangaben (VDI Richtlinie 2000, ESDU 1985, Snyder 1981 und Counihan 1975) teilen die in der Natur vorkommenden Bodenrauigkeiten in Rauigkeitsklassen ein und ordnen diesen Klassen die von den Bodenrauigkeiten bestimmten Grenzschichteigenschaften zu.

Im vorliegenden Fall war eine ebene, mäßig raue Grenzschicht zu erzeugen, denn der Innenstadtbereich von Oklahoma City ist in der Natur von einem etwa 10 Kilometer breiten Gürtel mit lockerer Vorstadtbebauung umgeben. In physikalischen Modellen wird für die Grenzschichtmodellierung typischerweise eine Kombination aus Wirbelgeneratoren und Bodenrauigkeiten verwendet. Abbildung 20 zeigt die in dieser Arbeit verwendete Konfiguration.

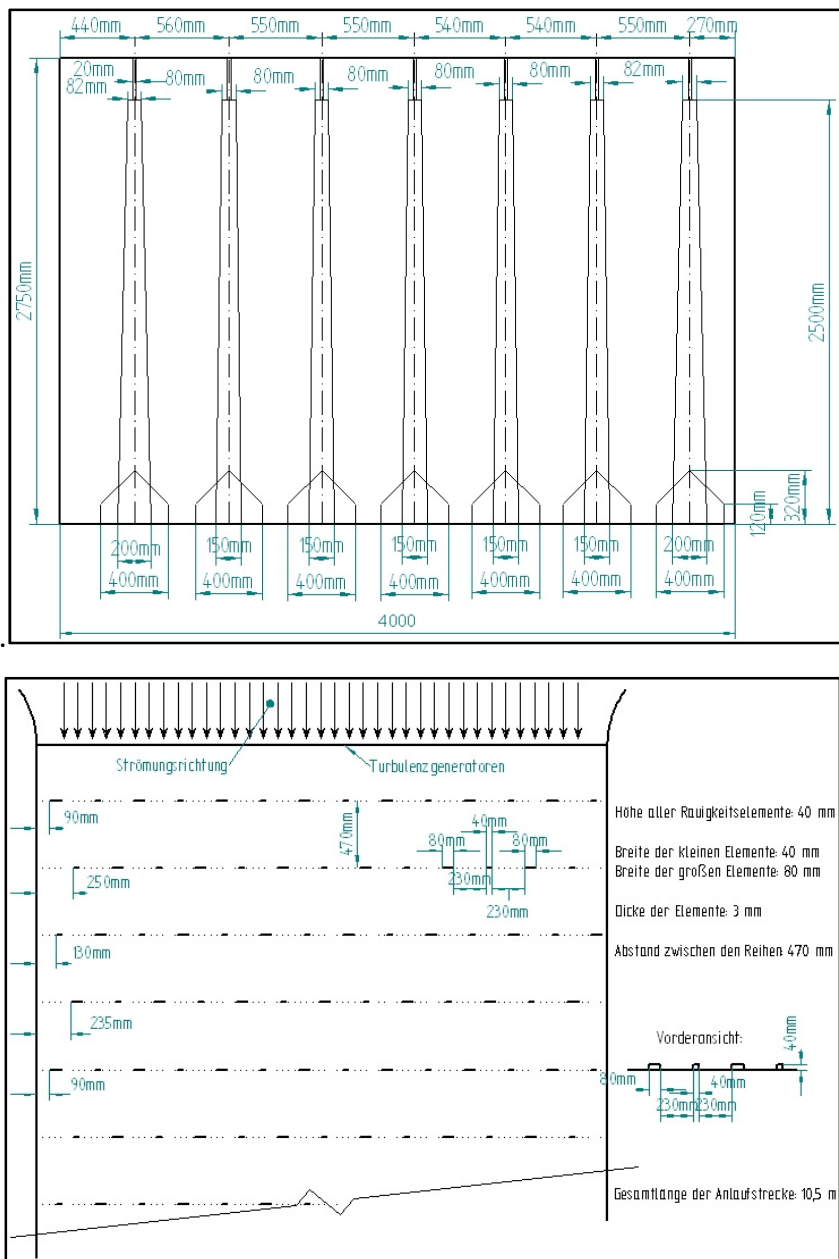


Abbildung 20: Schematische Darstellung der verwendeten Turbulenzgeneratoren (oben) und Konfiguration der Bodenrauigkeiten in einer Draufsicht (unten).

In Abbildung 21 (a) sind zwei durch diese Konfiguration modellierte Windprofile (Geschwindigkeitskomponente der Hauptströmungsrichtung in Abhängigkeit von der Höhe im Naturmaßstab (z_{fs})) dargestellt, die am Ende der Anlaufstrecke stromaufwärts vom Stadtmodell in der Mitte des Windkanals gemessen wurden (Messort: $x = -2600$ mm, $y = 0$ mm). Abbildung 21 (b) zeigt dieselben Profile in halb-logarithmischer Darstellung. Die Windgeschwindigkeitsmessungen wurden mit der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit in einer Höhe von 267 mm (80.01 m im Naturmaßstab) entdimensionalisiert. Die Referenzwindgeschwindigkeit wurde anhand der Messung des Prandtl-Rohrs sowie eines festen Verhältnisses zwischen der Windgeschwindigkeit am Prandtl-Rohr und der mittleren Windgeschwindigkeit in 267 mm Höhe in der Anströmung bestimmt. Die eingezeichneten Streubalken geben den Vertrauensbereich der Strömungsmessungen an. Die Bestimmung dieses Konfidenzintervalls wird detailliert in Kapitel 7.1 beschrieben [siehe Konfiguration 2 in Abbildung 32 auf Seite 101].

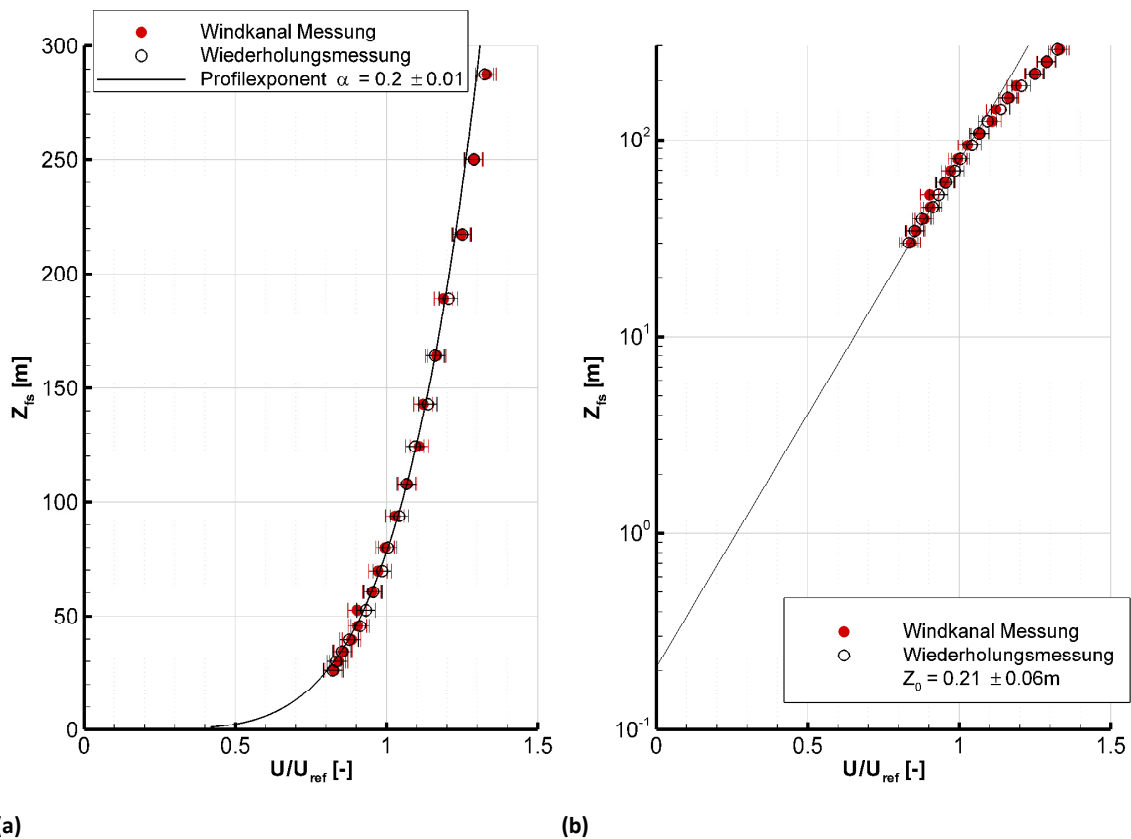


Abbildung 21: Mittleres Windprofil, welches am Ende der Anlaufstrecke stromaufwärts vom Stadtmodell in der Mitte des Windkanals gemessen wurde, in linearer (a) und halb-logarithmischer Darstellung (b).

Anhand der in Abbildung 21 (a) dargestellten Profile wurde über eine Ausgleichskurve (best fit) der Profilexponent α (Gleichung 6.1) bestimmt. Werden alle Messungen in Höhen zwischen 19.7 m und 287 m im Naturmaßstab berücksichtigt, ergibt sich ein Profilexponent α von 0.2. Werden einzelne Messhöhen bei dieser Bestimmung ausgenommen, schwankt dieser Wert um ± 0.01 . Zu den gemessenen Windprofilen ist in Abbildung 21 (a) ein mit dem Potenzansatz berechnetes Profil für einen Profilexponenten $\alpha = 0.2$ und einer Nullpunktverschiebung $d_0 = 0$ eingezeichnet. Nach der Rauigkeits-Klassifizierung der VDI Richtlinie (2000) ist diesem Profilexponenten ein raues Gelände zuzuordnen, für das der Profilexponent einen Wert zwischen 0.18 und 0.24 einnehmen muss.

Wie zuvor erläutert, wird zur Beschreibung des Windprofils innerhalb der Prandtl-Schicht das logarithmische Windgesetz (Gleichung 6.2) empfohlen. Um das gemessene Windprofil anhand des logarithmischen Windgesetzes beschreiben zu können, gilt es zunächst, die Höhe der modellierten Prandtl-Schicht zu kennen. Hierfür sind die vertikalen turbulenten Flüsse zu analysieren, die innerhalb der Prandtl-Schicht konstant sind. Nach Snyder (1981) weichen die vertikalen turbulenten Flüsse in der Prandtl-Schicht um maximal 10% von den bodennah gemessenen Werten der vertikalen turbulenten Flüsse ab.

Abbildung 22 zeigt die gemessenen mittleren vertikalen turbulenten Flüsse der modellierten Grenzschicht in Abhängigkeit von der Höhe (Messort: siehe roter Punkt in Abbildung 12 auf Seite 45). Die eingezeichneten Streubalken geben die über alle Messhöhen gemittelte Streubreite der beiden Profilmessungen wieder. Um eine individuelle Beeinflussung der bodennahsten Messungen durch einzelne Rauigkeitselemente zu vermeiden, ist die Höhe des untersten Messpunktes eines jeden Profils so gewählt, dass sie mindestens der 1 ½ fachen Höhe der Rauigkeitselemente entspricht. Bei der vorliegenden Kampagne haben die Rauigkeitselemente eine Höhe von 4 cm im Modellmaßstab (12 m im Naturmaßstab).

Die in Abbildung 22 schattierte Fläche kennzeichnet einen Bereich, in dem die Abweichung von dem am tiefsten Profilmesspunkt aufgezeichneten vertikalen turbulenten Fluss $\pm 10\%$ beträgt. Die Abbildung verdeutlicht, dass die vertikalen turbulenten Flüsse in den untersten 100 m nahezu konstant sind.

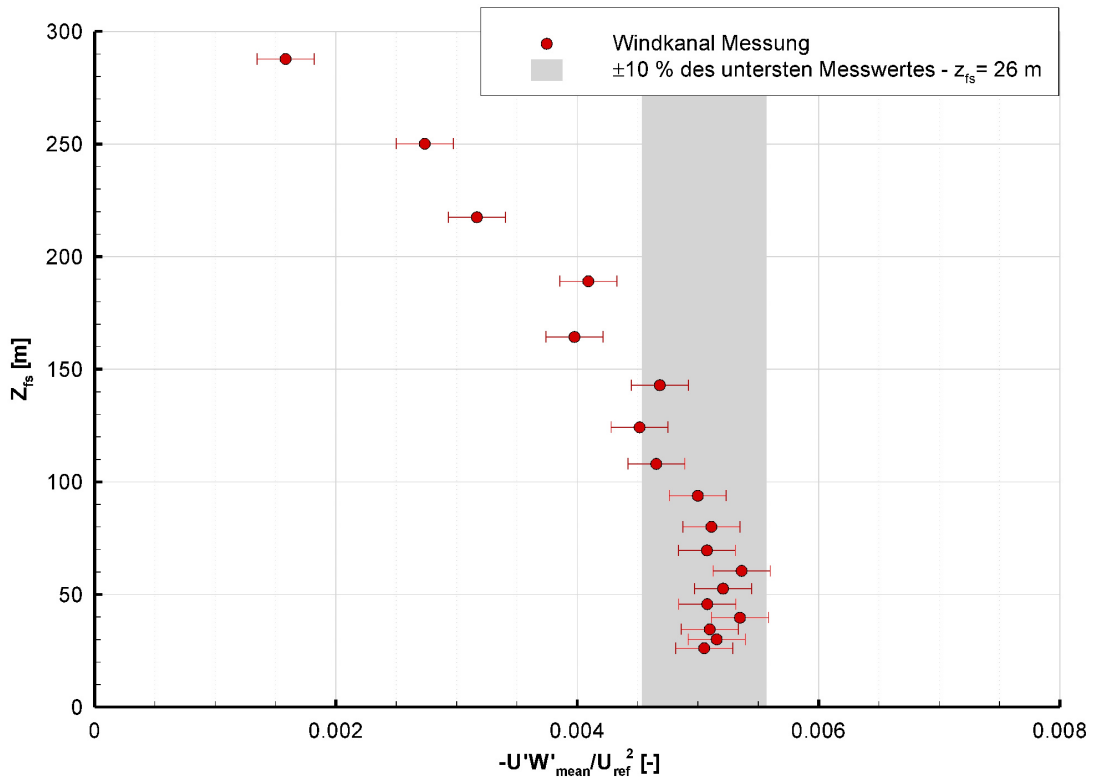


Abbildung 22: Vertikale turbulente Flüsse der modellierten Grenzschicht stromaufwärts des Stadtmodells (Messort: $x = -2600$ mm, $y = 0$ mm) von Oklahoma City in Abhängigkeit von der Höhe im Naturmaßstab (Z_{turb}).

In diesem Bereich weichen die Werte weniger als 5% von dem Messwert ab, der am tiefsten Profilpunkt gemessen wurde. Oberhalb der Prandtl-Schicht nehmen die vertikalen turbulenten Flüsse mit der Höhe ab. Dies ist im vorliegenden Fall für die Messungen oberhalb von 100 m im Naturmaßstab zu beobachten. Obwohl die zwischen 100 m und 130 m über dem Boden aufgenommenen Messwerte nur etwa 10 % von dem am tiefsten Messpunkt gemessenen Wert abweichen, ist dennoch ein signifikanter Rückgang gegenüber jenen Messwerten zu beobachten, die in Höhen unterhalb von 100 m registriert wurden. Die Höhe der modellierten Prandtl-Schicht beträgt daher etwa 100 m im Naturmaßstab.

Die halb-logarithmische Darstellung des gemessenen Windprofils in Abbildung 21 (b) zeigt einen für die Prandtl-Schicht zu erwartenden konstanten Verlauf der Horizontalwindgeschwindigkeit mit der Höhe für die untersten 100 m und bestätigt damit die über die vertikalen turbulenten Flüsse bestimmte Prandtl-Schichthöhe. Bestimmt man aus den Messwerten, die in der Prandtl-Schicht aufgenommen wurden, eine Ausgleichsgerade, lässt

sich anhand des Schnittpunktes dieser Geraden mit der Ordinate die Rauigkeitslänge z_0 bestimmen. Mit diesem Verfahren wurde für die modellierte Grenzschicht eine Rauigkeitslänge von $0.21 \text{ m} \pm 0.06 \text{ m}$ ermittelt. Die angegebene Unsicherheit wurde ermittelt, indem einzelne oder mehrere Messhöhen bei der Bestimmung der Ausgleichsgerade nicht berücksichtigt wurden.

Nach der Rauigkeits-Klassifizierung der VDI Richtlinie (2000) entspricht die ermittelte Rauigkeitslänge einem rauen Gelände, für das die Rauigkeitslänge einen Wert zwischen 0.1 m und 0.5 m im Naturmaßstab einnehmen muss. Sie wird damit dem Geländetypen einer Vorstadt zugeordnet. Auch die Rauigkeits-Klassifizierung von Snyder (1981) und der ESDU (1985), die verglichen mit der VDI-Richtlinie eine detailliertere Rauigkeits-Klassifizierung vornehmen, ordnet die modellierte Rauigkeitslänge dem Geländetypen einer Kleinstadt beziehungsweise den Außenbezirken einer Großstadt zu. Nach Snyder muss die Rauigkeitslänge hierfür einen Wert zwischen 0.2 m und 0.4 m sowie nach der ESDU Richtlinie einen Wert zwischen 0.1 m und 0.3 m im Naturmaßstab einnehmen.

Nun stehen die Rauigkeitslänge z_0 und der Profilexponent α einer Grenzschicht in einem funktionalen Zusammenhang, der von Panofsky et al. (1960), Davenport (1963, 1967), Helliwell (1970), der ESDU (1972) und Counihan (1975) jeweils auf Basis von Naturdaten ermittelt wurde (siehe Abbildung 23). Die Windkanalergebnisse sollen insbesondere mit dem von Counihan (1975) vorgeschlagenen funktionalen Zusammenhang verglichen werden, da die Arbeit von Counihan auf zuvor gewonnene Erkenntnisse der oben genannten Arbeiten zurückgreift.

Abbildung 23 zeigt, dass das Verhältnis zwischen dem Profilexponenten und der Rauigkeitslänge der modellierten Grenzschicht geringfügig von Counihans vorgeschlagenem funktionalen Zusammenhang (durchgezogene dicke Linie) abweicht, aber innerhalb des von Counihan angegebenen Streubereichs liegt (durchgezogene dicke, graue Linien).

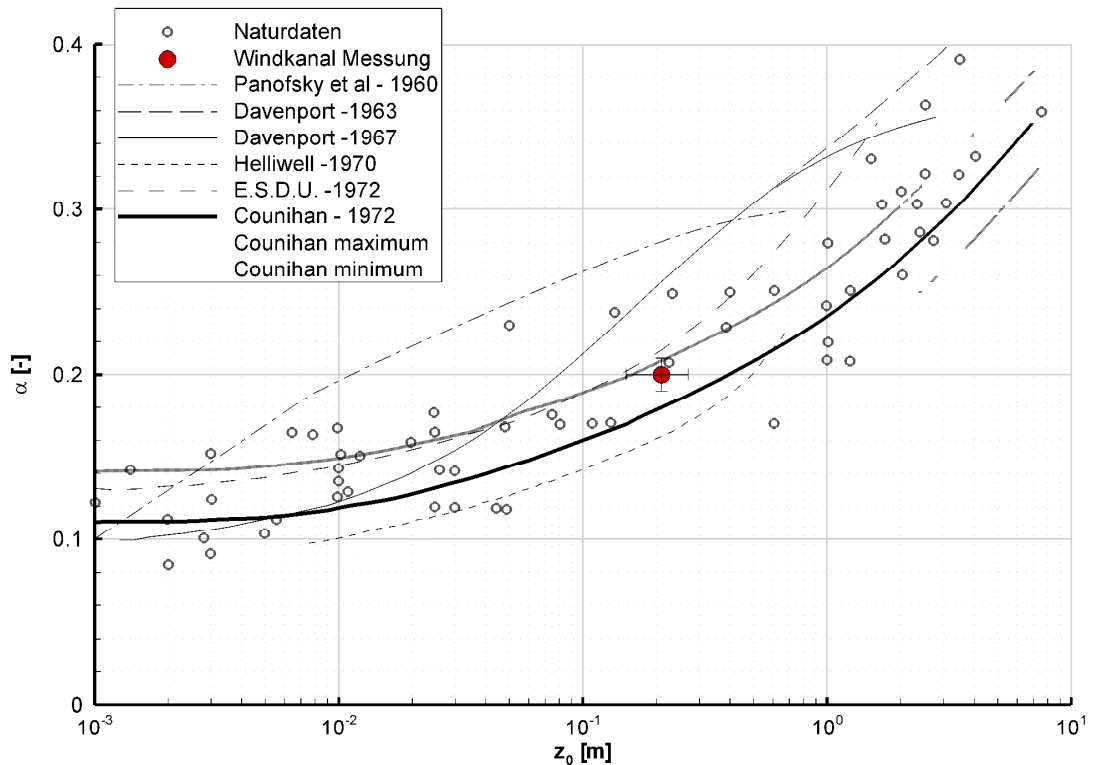


Abbildung 23: Von Counihan (1975) bestimmter funktionaler Zusammenhang des Profilexponenten α und der Rauigkeitslänge z_0 .

Desweiteren lässt sich eine Strömung durch ihre turbulenten Eigenschaften charakterisieren. Profile der vertikalen Turbulenzintensität für die i -te Komponente ($i = u, v$ oder w) des Windvektors, die stromaufwärts des Stadtmodells (Messort: $x = -2600$ mm, $y = 0$ mm) gemessen wurden, sind in Abbildung 24 dargestellt.

Die Turbulenzintensität $I_i(z)$ beschreibt das Verhältnis der Standardabweichung $\sigma_i(z)$ der jeweiligen Geschwindigkeitskomponente zur mittleren Windgeschwindigkeit $\bar{u}(z)$ der Hauptwindrichtung in gleicher Höhe z .

$$I_i = \frac{\sigma_i(z)}{\bar{u}(z)} \quad 6.3$$

Die Turbulenzintensitätsprofile der modellierten Grenzschicht korrespondieren für alle drei Komponenten des Windvektors in Form und Größe mit Werten, die nach der VDI Richtlinie (2000) der unteren Grenze der rauen Rauigkeitsklasse zuzuordnen sind.

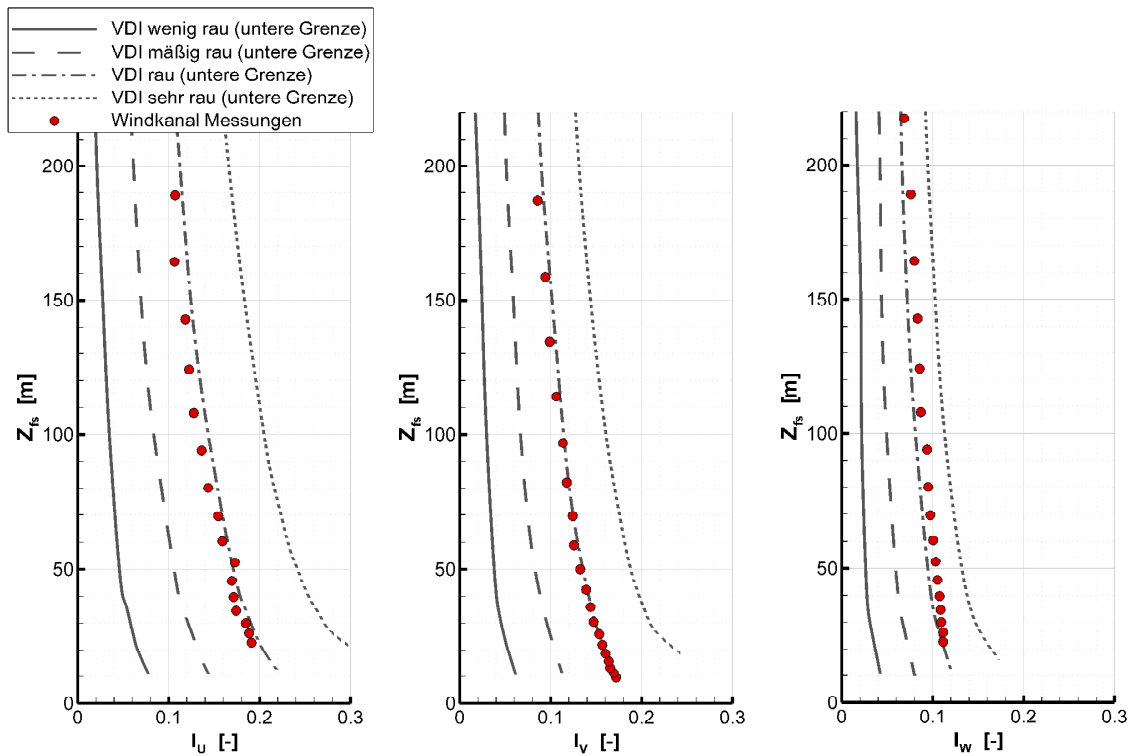


Abbildung 24: Profile der Turbulenzintensität für die U-, V- und W-Komponente der Strömung in der modellierten Grenzschicht stromaufwärts des Stadtmodells (Messort: $x = -2600$ mm, $y = 0$ mm).

Der funktionale Zusammenhang zwischen der Rauigkeitslänge und der in einer bestimmten Höhe vorkommenden Turbulenzintensität wurde von Counihan (1975) auf Basis von Naturdaten bestimmt. Counihan wählte für diese Untersuchungen eine Referenzhöhe von 30 m. Diese Höhe ist nach Counihan hoch genug, um lokale Beeinflussungen durch einzelne Rauigkeitselemente zu verhindern und gleichzeitig repräsentativ für den jeweiligen Geländetyp zu bleiben.

Abbildung 25 zeigt, dass das Verhältnis zwischen der im Windkanal modellierten Rauigkeitslänge und der in 30 m Höhe über dem Boden (Naturmaßstab) gemessenen Turbulenzintensität der Strömung in Hauptwindrichtung sehr gut mit dem von Counihan bestimmten Zusammenhang übereinstimmt.

Eine Strömung lässt sich zudem anhand von Spektren der turbulenten kinetischen Energie charakterisieren. Spektren beschreiben die Verteilung der Energiedichte über einen Frequenzbereich. Ein Turbulenzspektrum lässt sich in den Bereich der energiereichsten Wirbel (im niederfrequenten Bereich des Spektrums), den Trägheitsbereich (hochfrequenter Bereich) und den Dissipationsbereich unterteilen.

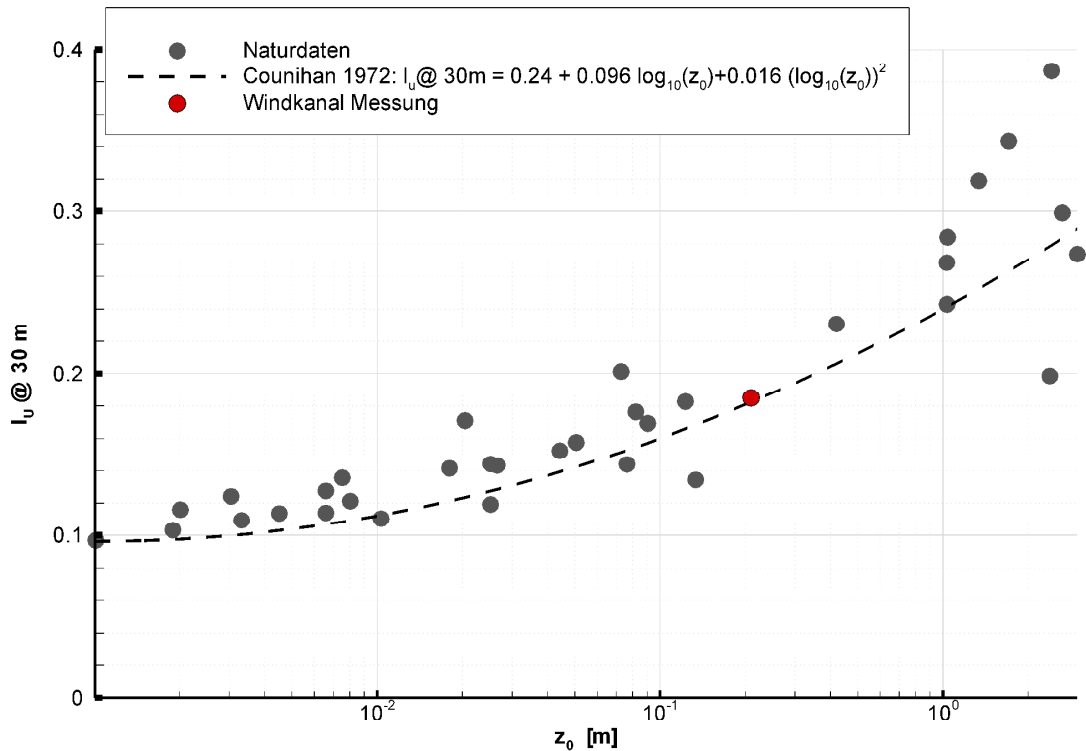


Abbildung 25: Von Counihan (1975) bestimmter funktionaler Zusammenhang zwischen der Turbulenzintensität der Geschwindigkeitskomponente in Hauptströmungsrichtung in 30 m über dem Boden und der Rauigkeitslänge z_0 .

Die in Abbildung 26 dargestellten Spektren wurden anhand von Fast Fourier Transformationen (FFT) aus stromaufwärts des Stadtmodells (Messort: $x = -2600 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$) gemessenen Geschwindigkeitszeitserien (LDA Messungen) berechnet. Hierfür wurde ein von Pascheke (2000) erstelltes Programm verwendet. Die normierte spektrale Verteilung der turbulenten kinetischen Energie ist als Funktion der reduzierten Frequenz für alle drei Komponenten des Windvektors dargestellt (Messhöhe von 35.7 m über Grund im Naturmaßstab). Die spektrale Verteilung der turbulenten kinetischen Energie wurde mit der Standardabweichung des Fluktuationsanteils der U-Komponente normiert.

Die auf der Abszisse aufgetragene Frequenz f wurde mit der Hauptströmungsgeschwindigkeit am Messort und der Höhe z des Messortes dimensionslos gemacht. Der aufgetragene dimensionslose Frequenzbereich reicht von 0.001 bis 5, was unterhalb der für die Zeitserien berechneten Nyquist-Frequenz liegt, die aus den mittleren Datenraten der Messungen bestimmt wurde.

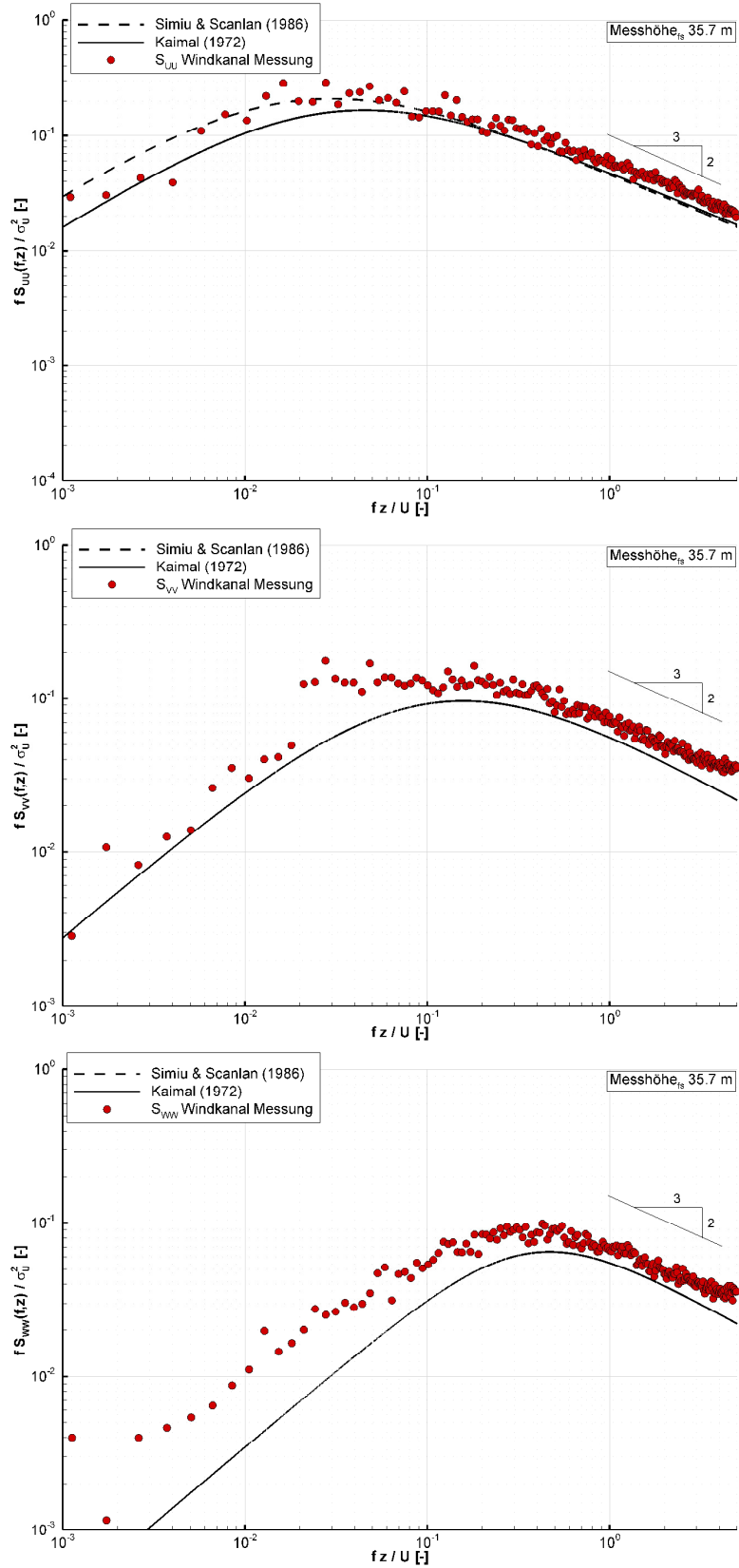


Abbildung 26: Normierte Spektren der turbulenten kinetischen Energie für die U-, V- und W-Komponente der Strömung, die im Windkanal in einer Höhe von 35.7 m über dem Boden im Naturmaßstab gemessen wurden (Messort: $x = -2600$ mm, $y = 0$ mm).

Die Nyquist-Frequenz entspricht der halben Abtastrate. Die dimensionslose Nyquist-Frequenz liegt für alle in der Anströmung aufgenommenen Zeitserien zwischen 7 und 14. Nach dem Nyquist-Shannonsche Abtasttheorem müssen alle Anteile in einem Signal kleinere Frequenzen als die Nyquist-Frequenz haben, damit das abgetastete Signal beliebig genau rekonstruiert werden kann. Abbildung 26 zeigt zudem die gebräuchlichsten Referenzspektren von Kaimal et al. (1972) und Simiu und Scanlan (1986).

Das im Windkanal gemessene Spektrum der turbulenten kinetischen Energie zeigt für die U-Komponente der Strömung eine sehr gute Übereinstimmung mit dem von Simiu und Scanlan (1986) vorgeschlagenen Referenzspektrum. Sowohl die Form der Spektren als auch die Lage der maximalen Energiedichte f_m ist nahezu identisch. Im Vergleich zum Referenzspektrum von Kaimal et al. (1972) weist das im Windkanal gemessene Spektrum geringfügig höhere Werte der turbulenten kinetischen Energie im Bereich der energiereichsten Wirbel auf. Für die V- und W-Komponente der Strömung liegt kein Referenzspektrum von Simiu und Scanlan (1986) vor. Die im Windkanal gemessenen Spektren weisen für die V- und W-Komponente der Strömung etwas höhere Werte der turbulenten kinetischen Energie auf, als das Referenzspektrum von Kaimal et al. (1972). Das gemessene W-Spektrum ist gegenüber dem Referenzspektrum von Kaimal zu niedrigeren Frequenzen verschoben.

Es ist allerdings bei dem Vergleich zwischen den gemessenen Windkanalspektren und den Referenzspektren zu berücksichtigen, dass die Referenzspektren von Kaimal et al. (1972) und Simiu und Scanlan (1986) auf Basis von Messungen über ländlichem Gebiet erstellt wurden, während die Windkanalmessungen über einer rauen Bodenrauigkeit durchgeführt wurden, die der einer Vorstadt gleicht. Hierzu gibt es in der Literatur verschiedene Studien, die Spektren einer städtischen Grenzschicht mit dem auf Basis von ländlichen Naturmessungen erstellten Referenzspektrum von Kaimal et al. (1972) vergleichen. Roth und Oke (1993) stellen generell eine gute Übereinstimmung dieser Spektren fest. Allerdings beobachten auch sie ebenso wie Oikawa und Meng (1995) im Vergleich zum Spektrum von Kaimal eine Verschiebung der W-Spektren zu niedrigeren Frequenzen. Feddersen (2005) beobachtet diese Verschiebung der W-Spektren einer städtischen Grenzschicht gegenüber dem Referenzspektrum von Kaimal zu niedrigen Frequenzen nur dann,

wenn bei Bestimmung der dimensionslosen Frequenz n die Nullpunktverschiebung d_0 berücksichtigt wird ($n=f(z-d_0)/U$). Feddersen empfiehlt daher, bei der Bestimmung der dimensionslosen Frequenz die Nullpunktverschiebung nicht zu berücksichtigen ($n=fz/U$). Die genannten Studien zeigen, dass ländlichen Referenzspektren insbesondere für die W-Komponente der Geschwindigkeit Unterschiede zu Spektren städtischer Grenzschichten aufweisen.

Im hochfrequenten Trägheitsbereich des Spektrums, in dem Produktion von Wirbeln nicht mehr stattfindet und in dem Dissipation noch nicht eingesetzt hat, lässt sich die Energiedichte anhand des Kolmogoroffschen $k^{-5/3}$ -Gesetzes beschreiben. Bei doppeltlogarithmischer Auftragung hat das Spektrum im Trägheitsbereich eine Steigung von $-5/3$. Aufgrund der in dieser Arbeit gewählten Darstellungsweise, bei der die Energiedichte mit der Frequenz multipliziert wurde, nimmt der Trägheitsbereich nun die Steigung von $-2/3$ an. Diese Steigung lässt sich gut bei allen im Windkanal gemessenen Spektren im Trägheitsbereich identifizieren.

Abbildung 27 zeigt die normierte spektrale Verteilung am Messort $x = -2600$ mm und $y = 0$ mm der turbulenten kinetischen Energie der U-Komponente für drei unterschiedliche Messhöhen (35.7 m, 80.1 m und 189 m über Grund im Naturmaßstab). Das Maximum der gemessenen spektralen Energiedichte verschiebt sich mit zunehmender Messhöhe in Richtung höherer normierter Frequenzen, während sich die Lage der Referenzspektren von Kaimal et al. (1972) und Simiu und Scanlan (1986) mit der Höhe nicht verändern. Diese Verschiebung mit der Höhe zu höheren dimensionslosen Frequenzen von Spektren städtischer Grenzschichten gegenüber den ländlichen Referenzspektren wurde bereits in verschiedenen Naturstudien beobachtet. Hierzu zählen die Arbeiten von Feigenwinter, Vogt und Parlow (1999), Roth (2000), Oikawa und Meng (1995) und die Windkanalstudie von Feddersen (2005).

Zusammenfassend kann bei dem Vergleich zwischen den im Windkanal gemessenen Spektren und den Referenzspektren von Kaimal et al. (1972) und Simiu und Scanlan (1986) festgehalten werden, dass sich für eine Messhöhe von 35.7 m Höhe im Naturmaßstab eine sehr gute Übereinstimmung für die U- und V-Komponente der Geschwindigkeit ergibt.

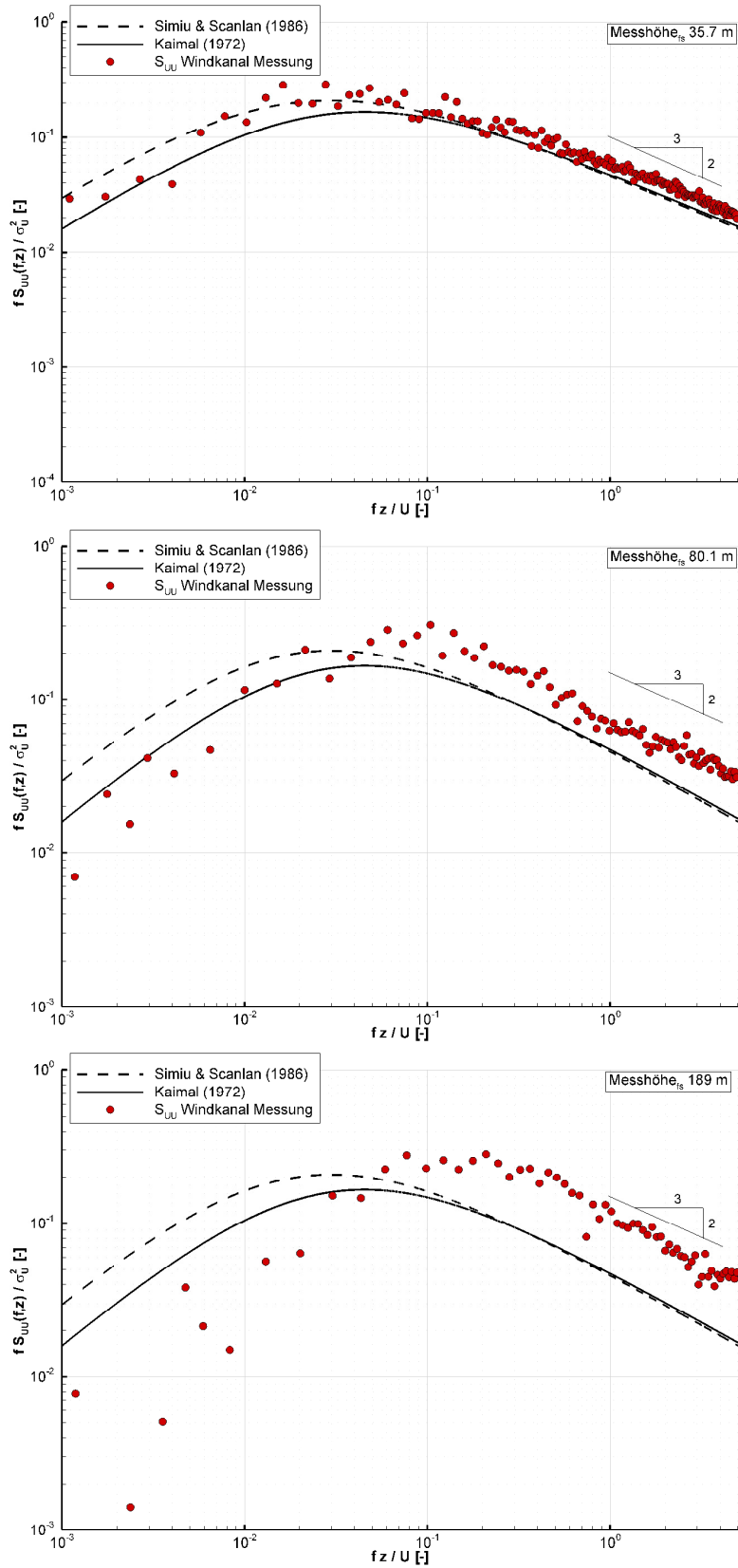


Abbildung 27: Normierte Spektren der turbulenten kinetischen Energie für die U-Komponente der Strömung, die im Windkanal in einer Höhe von 35.7 m, 80.1 m und 189 m über dem Boden im Naturmaßstab gemessen wurden (Messort: $x = -2600$ mm, $y = 0$ mm).

Die aufgezeigten Unterschiede, die für die W-Komponente der Geschwindigkeit in einer Messhöhe von 35.7 m Höhe im Naturmaßstab und für die U-Komponente der Geschwindigkeit in größeren Messhöhen beobachtet werden, entsprechen den Unterschieden, die auch schon von anderen Autoren festgestellt wurden, die ebenfalls Spektren einer städtischen Grenzschicht mit ländlichen Referenzspektren verglichen haben.

Die Untersuchung der Ursachen, die zu diesen Unterschieden führen, ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Um sicherzustellen, dass bei der vorliegenden Studie die turbulenten Charakteristiken der modellierten Anströmung auch für Messhöhen oberhalb von 35.7 m über dem Boden korrekt repräsentiert werden, sollen nachfolgend die integralen Längenmaße der modellierten Strömung untersucht werden.

Das integrale Längenmaß L_{ux} ist ein Maß für die charakteristische Wirbelgröße einer turbulenten Strömung. Es lässt sich aus einzelnen am Messort $x = -2600$ mm und $y = 0$ mm aufgenommenen Geschwindigkeitszeitserien bestimmen. Hierfür ist zunächst das integrale Zeitmaß T_u über das Integral der Autokorrelationsfunktion der Geschwindigkeitsfluktuationen u' zu bestimmen:

$$T_u = \int_0^{\infty} \frac{\overline{u'(t) \cdot u'(t + \tau)}}{\sigma_u^2} d\tau \quad 6.4$$

Mit der Taylorsche Annahme einer eingefrorenen Turbulenz lässt sich das integrale Zeitmaß T_u durch Multiplikation mit der mittleren Windgeschwindigkeit U in das räumliche integrale Längenmaß L_{ux} transformieren.

$$L_{ux} = T_u \cdot U \quad 6.5$$

Analog werden die integralen Längenmaße L_{uy} und L_{uz} für die V- und W-Komponente der Strömung bestimmt.

Die Größe der integralen Längenmaße wird durch die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Je rauer eine Oberfläche, desto geringer ist die Wirbelgröße. Mit zunehmendem Bodenabstand nehmen die Wirbelgrößen zu. Auf Basis von Naturmessungen wurde 1975

von Counihan ein funktionaler Zusammenhang zwischen den Wirbelgrößen, der Bodenrauigkeit und der Höhe über Grund erstellt. Abbildung 28 vergleicht die in der Windkanalströmung ermittelten integralen Längenmaße L_{ux} für Messhöhen zwischen 19 m und 287 m über dem Boden im Naturmaßstab mit dem von Counihan für 4 unterschiedliche Bodenrauigkeiten ($z_0 = 0.01$ m, $z_0 = 0.1$ m, $z_0 = 1$ m und $z_0 = 10$ m; siehe Abbildung 28) vorgeschlagenen, funktionalen Zusammenhang.

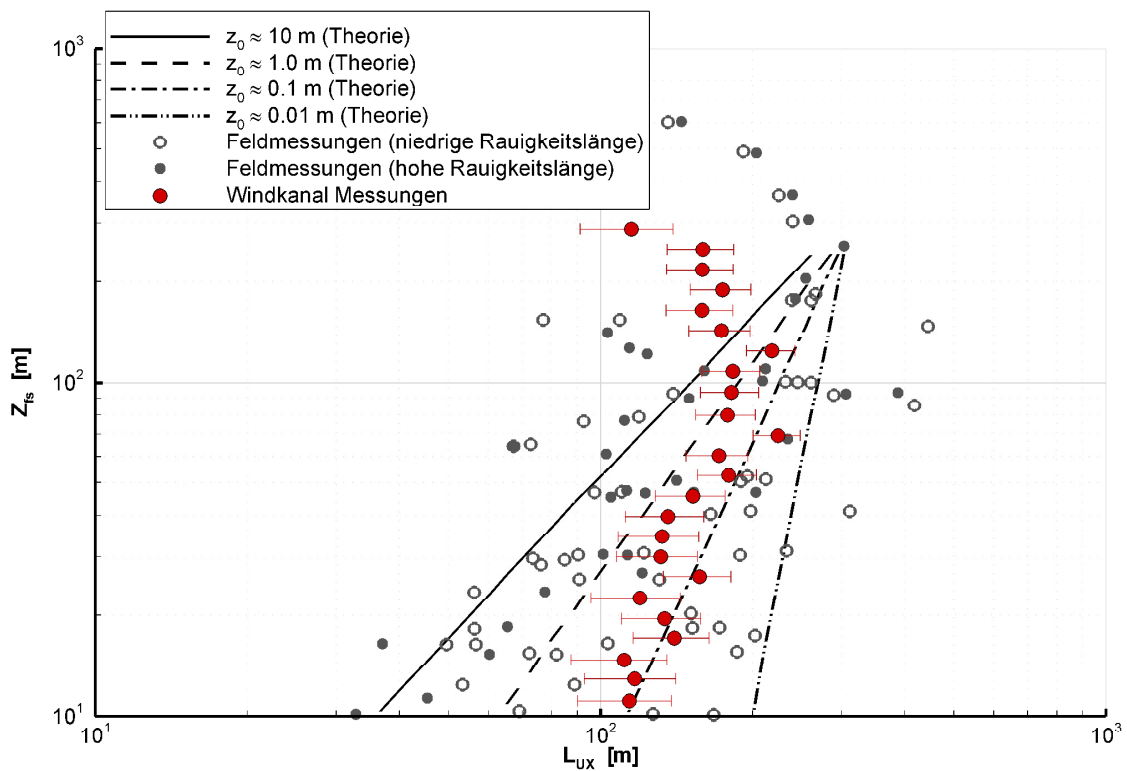


Abbildung 28: Vertikale Verteilung des integralen Längenmaßes L_{ux} . Die roten Punkte geben die im Windkanal gemessenen Längenmaße an. Grau dargestellt sind Werte, die Counihan(1975) anhand von Naturmessungen ermittelt hat.

Zunächst verdeutlicht die Abbildung, dass die Bestimmung der Wirbelgrößen sowohl aus Natur- als auch aus Windkanaldaten mit einer signifikanten Streuung behaftet ist. Die eingezeichnete Streubreite der Windkanalmessungen wurde auf Basis von Wiederholungsmessungen bestimmt. Trotz der auftretenden Streuung befinden sich nahezu alle Wirbelgrößen, die aus Windkanalmessungen unterhalb von 150 m Höhe im Naturmaßstab bestimmt wurden, in einem Korridor, der nach Counihan einer Rauigkeitslänge z_0 zwischen 0.1 m und 1 m zugeordnet wird. Die Rauigkeitslänge der modellierten

Strömung $z_0 = 0.21$ m stimmt demnach gut mit den beobachteten Wirbelgrößen der Anströmung überein.

Zuvor wurde bei der Analyse der Spektren eine Verschiebung der gemessenen Spektren zu höheren dimensionslosen Frequenzen gegenüber den Referenzspektren von Kaimal und Simiu & Scanlan für Messungen oberhalb von 35.7 m beobachtet. Bei den integralen Längenmaßen kann für Messungen oberhalb von 35.7 m kein signifikanter Rückgang der Wirbelgrößen mit der Höhe beobachtet werden. Erst oberhalb von 150 m über dem Boden im Naturmaßstab nehmen die Wirbelgrößen mit der Höhe ab. Diese Höhe ist allerdings etwas niedriger, als von Counihan vorgeschlagen. Nach Counihan nimmt die Wirbelgröße mit der Höhe bis etwa 200-300 m über dem Boden zu und nimmt anschließend mit der Höhe ab.

In diesem Kapitel wurde aufgezeigt, dass die Grenzschichtcharakteristiken der modellierten Strömung einem rauen Geländetypen zugeordnet werden können. Die funktionalen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Charakteristiken entsprechen dem, was von verschiedenen Richtlinien und Literaturreferenzen vorgeschlagen wird. In die modellierte Rauigkeitsklasse fällt unter anderem der Geländetyp einer Vorstadt. Es ist demnach zu erwarten, dass die modellierten Grenzschichtcharakteristiken denen entsprechen, die sich in der Natur stromaufwärts des Innenstadtkerns von Oklahoma City einstellen.

6.3 Qualitätsanforderungen an die modellierte Strömung

Nachdem in Kapitel 6.2 die Eigenschaften der Windkanalgrenzschicht dokumentiert wurden, ist zu überprüfen, ob die modellierte Strömung den qualitativen Anforderungen des Hamburger Windkanallabors genügt.

6.3.1 Laterale Homogenität der Strömung

Es ist zunächst sicherzustellen, dass die zuvor dargestellten Grenzschichteigenschaften nicht nur in der Windkanalmitte, sondern im gesamten Bereich quer zur Hauptwindrichtung, in dem Strömungs- und Konzentrationsmessungen durchgeführt werden sollen, vorhanden sind. Abbildung 29 zeigt 4 laterale Windkanal-Profile, die 850 mm (255 m im Naturmaßstab) stromaufwärts der Drehscheibe in den Höhen 90 m, 150 m, 210 m und 270 m über dem Boden im Naturmaßstab aufgenommen wurden. Jedes Profil besteht aus

13 Messpunkten, die von der Kanalmitte ausgehend einen Bereich von ± 1000 mm (± 300 m im Naturmaßstab) quer zur Hauptströmungsrichtung abdecken.

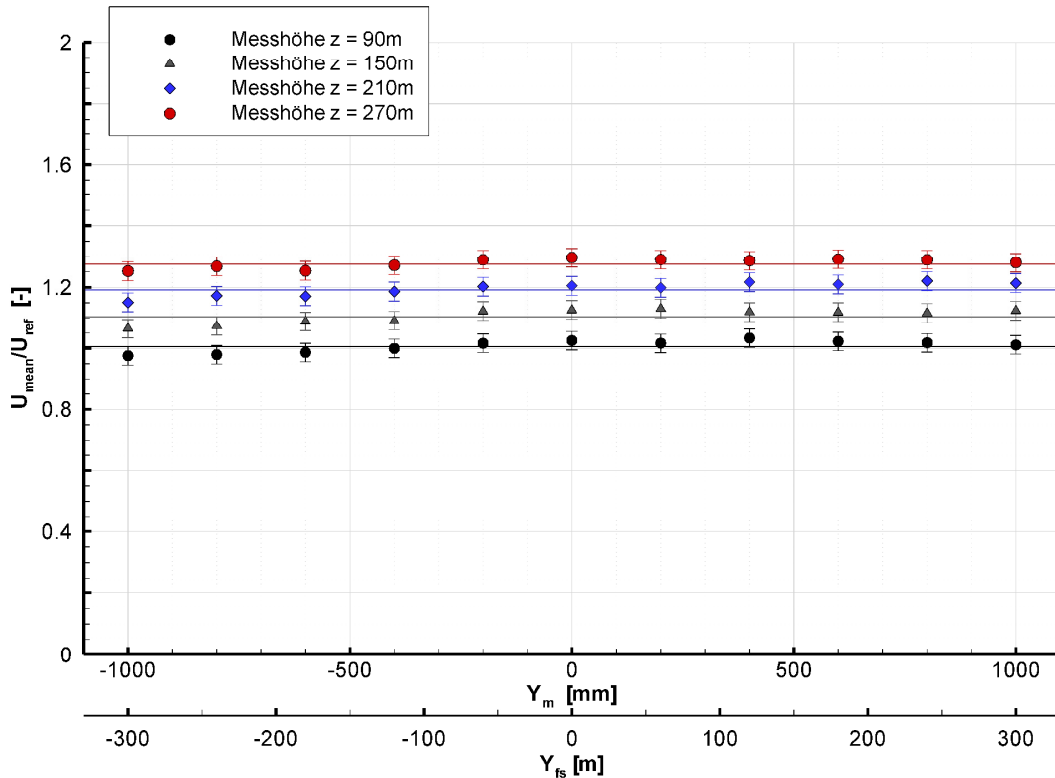


Abbildung 29: Laterale Windprofile, die in 4 unterschiedlichen Höhen über Grund stromaufwärts des Stadtmodells im Windkanal gemessen wurden. Die Abstände der Messpunkte zur Kanalmitte sind im Modellmaßstab (Y_m) und im Naturmaßstab (Y_{fs}) angegeben.

Die eingezeichneten Streubalken geben den Vertrauensbereich der Strömungsmessungen an. Die horizontalen durchgezogenen Linien stellen die mittlere dimensionslose Windgeschwindigkeit einer jeden Messhöhe dar. Die maximale Abweichung der gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten vom zugehörigen lateralen Mittelwert beträgt weniger als 3 % und liegt damit in der Größenordnung des für die Strömungsmessungen bestimmten Konfidenzintervalls. Dieses beträgt bei der hier verwendeten Messkonfiguration 2 (siehe Tabelle 1 auf Seite 40) in der Anströmung ± 0.0304 [-] (siehe Tabelle 8 auf Seite 102). Bezogen auf die mittlere Referenzwindgeschwindigkeit entspricht dies einer Unsicherheit von etwa ± 3 %.

6.3.2 *Versperrung und Druckkriterium*

Bei Windkanaluntersuchungen sollte die Querschnittsfläche des Modells klein gegenüber dem Windkanalquerschnitt sein. Im Gegensatz zu einer freien Atmosphäre ist im Windkanal der zur Verfügung stehende Raum für die Strömung begrenzt. Wird der Querschnitt des Kanals signifikant durch das Modell verengt, nimmt dies Einfluss auf die Strömung. Als Maß für die Versperrung wird das Verhältnis der Projektionsfläche des Modells in Hauptwindrichtung zur Querschnittsfläche des Kanals definiert. Die VDI-Richtlinie 3783/12 gibt an, dass die Versperrung kleiner als 5% sein muss, damit die Messungen nicht beeinflusst werden.

Bei der vorliegenden Kampagne kann die Projektionsfläche des Modells aufgrund der hohen Komplexität des Stadtmodells von Oklahoma City nur abgeschätzt werden. Während die Projektionsfläche der in der Kanalmitte befindlichen Hochhäuser für knapp die Hälfte des Windkanalquerschnittes berechnet werden konnte, wurde die Projektionsfläche der am Rand und außerhalb der Drehscheibe befindlichen kleinen Gebäude abgeschätzt. Für diesen Randbereich wurde eine einheitliche mittlere Gebäudehöhe von 19.4 m im Naturmaßstab angenommen. Diese Höhe wurde von De Wekker et al. (2004) als mittlere Gebäudehöhe für das Stadtzentrum von Oklahoma City angegeben und überschätzt die mittlere Gebäudehöhe der am Rand der Drehscheibe befindlichen Gebäude. Diese Schätzung der Gebäudehöhe wurde bewusst gewählt, um die so bestimmte Projektionsfläche eher zu überschätzen. Für eine mittlere Anströmung aus 180° (Wind aus Süden) ergibt sich so ein Versperrungsgrad von 4.6 %, der knapp unterhalb des von der VDI-Richtlinie vorgeschlagenen Maximums von 5 % liegt. Aufgrund der Einhaltung des VDI-Richtwertes ist eine mögliche Querschnittsvergrößerung anhand der höhenverstellbaren Decke nicht zwingend erforderlich.

Selbst wenn der Versperrungsgrad den von der VDI-Richtlinie vorgegebenen Höchstwert von 5% unterschreitet, kann es durch die Verengung des Windkanalquerschnittes zu Beschleunigungseffekten der Strömung kommen. Ist dies der Fall, können sich die in der Natur innerhalb der Prandtl-Schicht beobachteten konstanten Impulsflüsse nicht ausbilden. Die Auswirkungen einer beschleunigten oder verzögerten Strömung auf Strömungsmessungen wurden in einer Windkanalstudie von Herbst (2006) untersucht. Hiernach können

durch Beschleunigungseffekte Unsicherheiten der turbulenten Impulsflüsse von bis zu 30 % auftreten. Zur Vermeidung dieser Effekte ist im verwendeten Windkanal „Wotan“ eine höhenverstellbare Decke eingebaut. Diese ermöglicht es, Versperrungen durch eine Vergrößerung des Windkanalquerschnittes auszugleichen, um so den statischen Druck entlang der longitudinalen Achse des Windkanals möglichst konstant zu halten. Als Grenzwert für den dimensionslosen Druckgradienten p^* am Oberrand der modellierten Grenzschicht gibt die VDI-Richtlinie 3783/12

$$p^* = \frac{\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta}{\frac{\rho_a}{2} \cdot u_\delta^2} \leq 0.05 \quad 6.6$$

vor, wobei ∂p die gemessene Druckdifferenz, ∂x die longitudinale Distanz, δ die Höhe der modellierten Grenzschicht, ρ_a die Dichte der Luft und u_δ die Referenzgeschwindigkeit am Oberrand der Grenzschicht ist.

Der statische Druck wurde an insgesamt 22 Druckmessstellen, die entlang der Versuchsstrecke paarweise an beiden Seiten des Windkanals im regelmäßigen Abstand von $\partial x = 1.5$ m installiert sind, jeweils mit einem Setra PT239 Druckwandler gemessen. Auf Basis dieser Messungen wurde der dimensionslose Druckgradient p^* nach Gleichung 6.6 berechnet. In diese Berechnungen floss die Höhe der modellierten Grenzschicht $\delta = 0.956$ m im Modellmaßstab (287 m im Naturmaßstab) und die in dieser Höhe gemessene mittlere Windgeschwindigkeit u_δ ein. Abbildung 30 zeigt die berechneten dimensionslosen Druckgradienten p^* entlang der Versuchsstrecke. Der Nullpunkt der X-Achse befindet sich im Mittelpunkt der Drehscheibe (entspricht dem Zentrum des Stadtmodells). Die schattierte Fläche kennzeichnet den Bereich des Windkanals, über den sich das Modell von Oklahoma City erstreckt. Die Orientierung der X-Achse ist parallel zur Hauptwindrichtung und damit auch parallel zur longitudinalen Achse des Kanals ausgerichtet. Die eingezeichneten Streubalken geben die Unsicherheit des berechneten dimensionslosen Druckgradienten wieder, der von der Messgenauigkeit des verwendeten Druckwandlers bestimmt wurde. Die Abbildung zeigt, dass der gemessene Druckgradient über die gesamte Länge des Windkanals sowohl die von der VDI-Richtlinie vorgegebene Ober- als auch Untergrenze

des dimensionslosen Druckgradienten deutlich einhält. Lediglich der Druckgradient im vorderen Bereich der Messstrecke (10 m im Modellmaßstab stromaufwärts des Modellzentrums) erfüllt nur knapp das VDI-Richtlinien-Kriterium. In diesem vorderen Kanalbereich ist ein Deckenabgleich bei dem verwendeten Windkanal nicht möglich.

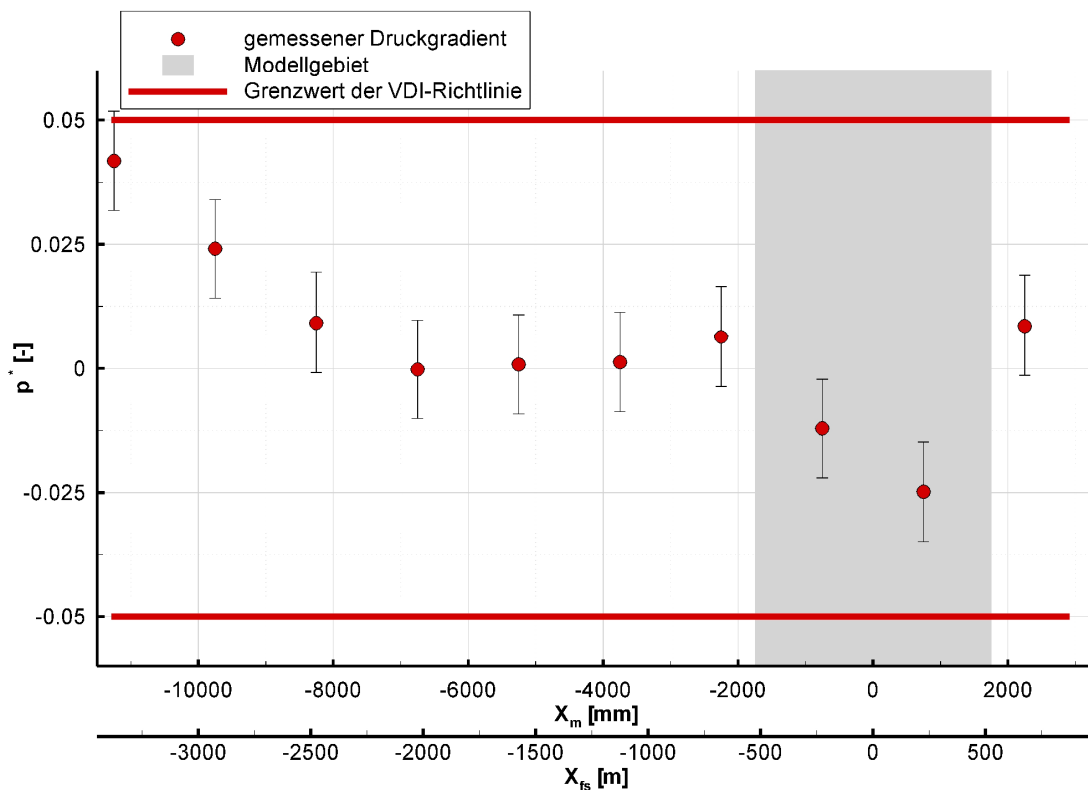


Abbildung 30: Dimensionsloser longitudinaler Druckgradient, der längs der longitudinalen Achse des Windkanals gemessen wurde. Die Abstände sind im Modellmaßstab (X_m) und im Naturmaßstab (X_{fs}) angegeben.

6.3.3 Reynoldszahlunabhängigkeit der modellierten Anströmung

Eine Grundvoraussetzung von Windkanaluntersuchungen ist der Nachweis, dass die Eigenschaften der modellierten Grenzschicht unabhängig von den jeweiligen bei den Untersuchungen verwendeten Windgeschwindigkeiten sind. Nur in diesem Fall ist die Übertragbarkeit der Windkanalergebnisse auf Naturbedingungen gewährleistet. Die Eigenschaften einer Strömung sind geschwindigkeitsunabhängig, wenn die Strömung voll turbulent ist. Dies ist der Fall, wenn die Reynoldszahl der Strömung ausreichend hoch ist. Die Reynoldszahl

$$Re = \frac{u_h \cdot L_{ref}}{\nu} \quad 6.7$$

beschreibt das Verhältnis der Trägheitskraft zur Zähigkeit des Mediums. Hierbei ist u_h die Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe (in m/s), L_{ref} die Referenzlänge (in m) und ν die kinematische Viskosität. Modellgrenzschichten weisen deutlich geringere Reynoldszahlen auf als atmosphärische Grenzschichten, da die Referenzlängen L_{ref} maßstabsbedingt bei Windkanaluntersuchungen deutlich kleiner sind (bei der vorliegenden Kampagne um das 300-fache) als in der Natur. Dennoch können nach dem Konzept der Reynoldszahlunabhängigkeit (siehe Townsend 1976) naturähnliche Strömungen im Windkanal erzeugt werden. Nach diesem Konzept sind Strömungen über geometrisch gleichen Rauigkeiten ähnlich, wenn die Reynoldszahl hinreichend hoch ist. Die Begründung liegt darin, dass sich die Zähigkeit des Mediums hauptsächlich auf den Bereich der kleinsten Wirbel im turbulenten Spektrum auswirkt, während der niederfrequente Bereich des Spektrums kaum beeinflusst wird. Die individuellen Charakteristiken einer Grenzschicht werden allerdings von den energiereichen großen Wirbeln einer Strömung, die im niederfrequenten Bereich des Spektrums liegen, geprägt.

Als hinreichend große Reynoldszahl schlägt die VDI-Richtlinie 3783 Blatt 12 für die Modellierung von Strömungsfeldern um Objekte mit scharfen Ablösekanten eine Reynoldszahl $Re > 10.000$ vor. Für die Grenzschicht der vorliegenden Kampagne bedeutet dies, dass ab einer Windgeschwindigkeit von $u_h = 2.32$ m/s in 19.4 m Höhe (entspricht der mittleren Gebäudehöhe des Stadtmodells von Oklahoma City) über dem Boden im Naturmaßstab die Reynoldszahl von 10.000 überschritten wird. Dies entspricht einer Windgeschwindigkeit von 2.98 m/s in der in dieser Studie verwendeten Referenzhöhe von 80.01 m über dem Boden im Naturmaßstab. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die von der VDI-Richtlinie vorgeschlagene minimale Reynoldszahl von 10.000 nur einen groben Richtwert darstellt. Strömungen mit geringeren Reynoldszahlen können durchaus ebenfalls Reynoldszahl unabhängig sein.

Da in dieser Windkanalkampagne Ausbreitungsversuche bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten und damit geringen Reynoldszahlen durchgeführt worden sind (auf die Gründe hierfür wird im späteren Text eingegangen), soll die Reynoldszahlunabhängigkeit

der modellierten Strömung für geringe Windgeschwindigkeiten explizit nachgewiesen werden. Hierfür wurden in der Anströmung (Messort: $x = -2600$ mm, $y = 0$ mm) in vier unterschiedlichen Höhen (8 m, 45 m, 94 m und 217 m im Naturmaßstab) jeweils Windgeschwindigkeitsmessungen für unterschiedliche Referenzwindgeschwindigkeiten durchgeführt. Ist die Strömung Reynoldszahl unabhängig, muss der Quotient aus der an einem Ort mit dem LDA gemessenen Windgeschwindigkeit und der über das Prandtl-Rohr bestimmten Referenzwindgeschwindigkeit für unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten identisch sein.

Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse dieses Reynoldszahl-Unabhängigkeitstests, der in den oben genannten 4 Höhen jeweils für Windgeschwindigkeiten zwischen 1 m/s und 6 m/s in der Referenzhöhe (80.01 m im Naturmaßstab über dem Boden) durchgeführt worden ist. Der Quotient aus der in den 4 Höhen gemessenen Windgeschwindigkeit und der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit in 80.01 m Höhe (im Naturmaßstab) ist auf der Ordinate aufgetragen. Die Abszisse zeigt die für die jeweiligen Messungen in mittlerer Gebäudehöhe ermittelten Reynoldszahlen.

Die dargestellten durchgezogenen horizontalen Linien geben für die jeweilige Messhöhe die mittlere dimensionslose Windgeschwindigkeit an. Die eingezeichneten vertikalen Streubalken stellen den Vertrauensbereich der Strömungsmessungen bei der hier verwendeten Messkonfiguration 2 dar (siehe Tabelle 8 auf Seite 102), während die horizontalen Streubalken die Unsicherheit der berechneten Reynoldszahl aufzeigen. Berücksichtigt wurden bei der Unsicherheitsangabe der Reynoldszahl Temperatur- und Druckschwankungen, die über die dynamische Viskosität Einfluss auf die Reynoldszahl nehmen. Durch die Kellerlage des verwendeten Windkanals „Wotan“ waren die beobachteten Temperaturschwankungen sehr gering. Im Verlauf der beiden jeweils 6-monatigen Messkampagnen änderte sich die Temperatur maximal um $\pm 1^\circ\text{C}$. Die maximalen täglichen Schwankungen des Luftdrucks betragen ± 3.5 Torr (etwa ± 5 hPa).

Die Abbildung 31 zeigt, dass die modellierte Strömung in den 4 ausgewählten Testhöhen für sämtliche verwendete Windgeschwindigkeiten Reynoldszahl unabhängig ist. Selbst bei Reynoldszahlen, die deutlich unter 10.000 liegen, befinden sich die normierten Windgeschwindigkeiten in allen 4 Höhen innerhalb der Streubreite von U/U_{ref} .

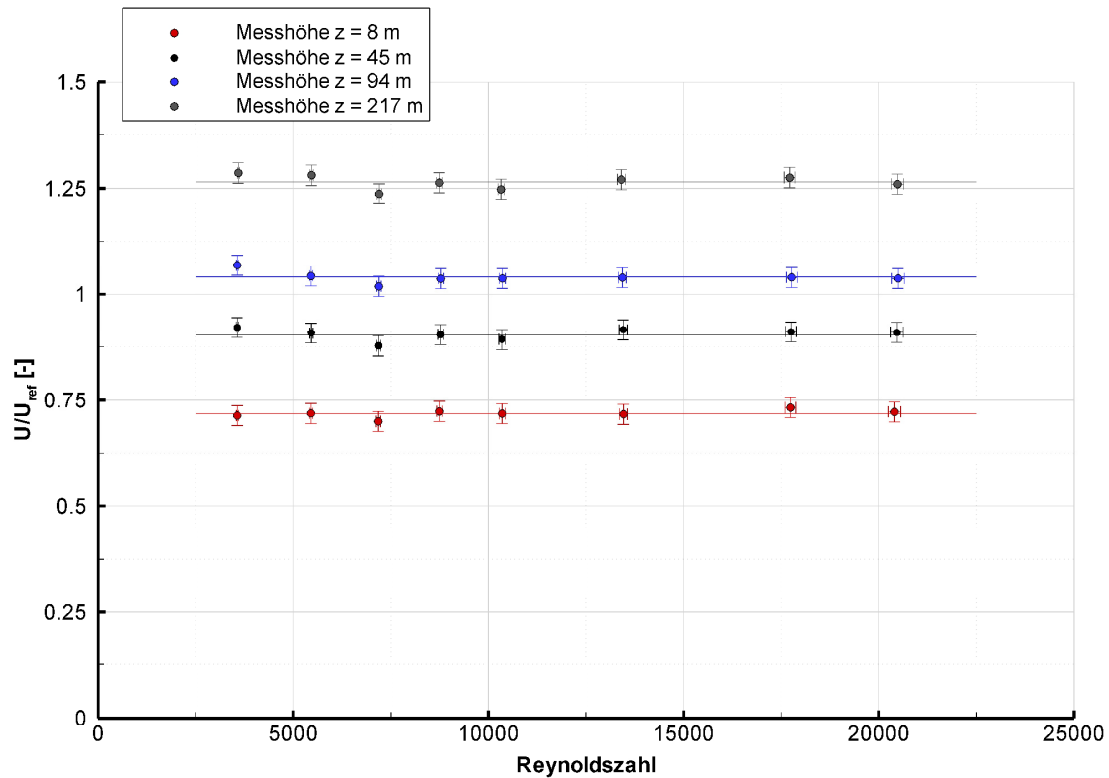


Abbildung 31: Reynoldszahl-Unabhängigkeitstest, der in 4 unterschiedlichen Höhen über Grund stromaufwärts des Stadtmodells für Windgeschwindigkeiten U_{ref} zwischen 1 m/s und 6 m/s in der Referenzhöhe von 80 m Höhe über Grund im Naturmaßstab durchgeführt wurde. Die angegebene Reynoldszahl wurde jeweils aus der mittleren Windgeschwindigkeit u_h bestimmt, die in 19.4 m Höhe (durchschnittliche Gebäudehöhe) gemessen wurde.

Wie bereits angesprochen, werden die Strömungsmessungen dieser Windkanalkampagne mit der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit in 266.7 mm über dem Boden im Modellmaßstab (80.01 m im Naturmaßstab) skaliert. Diese Höhe wurde ausgewählt, da auch während der JU2003-Feldkampagne Strömungsmessungen in dieser Höhe aufgenommen wurden (die exakte Messhöhe lag bei den Naturmessungen in 80 m Höhe über dem Boden). Hierdurch wird ein Vergleich zwischen Windkanal- und Naturergebnissen ermöglicht. Die genaue Lage des Messortes der JU2003-Kampagne wurde in Kapitel 6.1 beschrieben. Bei den Windkanaluntersuchungen konnten diese Messungen der Referenzwindgeschwindigkeit, die mit einem Prantl-Rohr durchgeführt wurden, allerdings nicht am entsprechenden Modellort durchgeführt werden. Da mit einem Prantl-Rohr die Strömungsgeschwindigkeit über den Staudruck ermittelt wird, ist eine komponentenaufgelöste Geschwindigkeitsmessung nicht möglich. Das Prantl-Rohr ist dementsprechend

zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit an Orten, die signifikante laterale oder vertikale Windrichtungsfluktuationen aufweisen, nicht geeignet. Diese Windrichtungsfluktuationen trafen allerdings für den gewählten Referenzort zu. Desweiteren würde die Installation des Prandtl-Rohres unmittelbar vor dem Stadtmodell einen signifikanten Einfluss auf die Anströmung nehmen. Das Prandtl-Rohr wurde daher am Kanaleingang in einer Höhe von 1.8 m oberhalb der modellierten Grenzschicht in der freien Anströmung, wo es möglichst wenig von turbulenten Schwankungen beeinflusst wurde, angebracht. Um die Messungen des Prandtl-Rohres dennoch auf den ausgewählten Referenzort übertragen zu können, wurde zu Beginn der Windkanaluntersuchungen das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen diesen beiden Orten anhand einer zeitgleichen LDA Messung am Referenzort und am Standort des Prandtl-Rohres ermittelt. Das Verhältnis der Windgeschwindigkeit am Referenzort zur der, die vom Prandtl-Rohr gemessen wurde, beträgt 0.5211. Aufgrund der zuvor nachgewiesenen Reynoldszahlunabhängigkeit der Strömung ist dieses ermittelte Verhältnis windgeschwindigkeitsunabhängig.

7 Datenqualität der Strömungsmessungen im Modellgebiet

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, wurden in dieser Versuchskampagne zahlreiche Strömungsmessungen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung im gesamten Modellgebiet von Oklahoma City durchgeführt. Ziel dieser Messungen war es, einen Referenzdatensatz zu erstellen, der sich zur Validierung von LES basierten Modellen eignet.

Dieses Kapitel dokumentiert die Datenqualität der aufgenommenen Windgeschwindigkeitszeitserien, indem auf Basis von Wiederholungsmessungen der Vertrauensbereich der Messergebnisse ermittelt und die Reynoldszahlunabhängigkeit der Strömung im Modellgebiet überprüft wird (im Kapitel 6.3.3 wurde die Reynoldszahlunabhängigkeit der Messungen allein in der Anströmung nachgewiesen).

7.1 Vertrauensbereich der durchgeführten Strömungsmessungen

Aufgrund von Messunsicherheiten, die beispielsweise von Ungenauigkeiten der verwendeten Messgeräte hervorgerufen werden, weichen die aufgenommenen Messergebnisse von den „wahren“ Werten ab. Die genaue Kenntnis über die Größe dieser Ungenauigkeiten ist dementsprechend für die Bewertung eines Messergebnisses von besonderer Bedeutung.

In der vorliegenden Kampagne wurde die mit einem LDA-System gemessene Windgeschwindigkeit jeweils mit einer von einem Prandtlrohr aufgenommenen Referenzwindgeschwindigkeit normiert. Es sind daher die Geräteungenauigkeiten beider Messsysteme zu berücksichtigen. Desweiteren haben nicht konstante Randbedingungen (z.B. Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Temperatur) Einfluss auf das Messergebnis. So beeinflusst die Luftfeuchtigkeit die Dichte des verwendeten Aerosolnebels und damit die Anzahl der für die LDA-Messungen zur Verfügung stehenden Streupartikel. Luftdruck- und Temperaturschwankungen können sich wiederum auf die Referenzmessungen des Prandtlrohres auswirken.

Windgeschwindigkeitsmessungen erfordern zudem eine präzise Bestimmung des jeweiligen Messortes. Dies ist insbesondere an Orten relevant, an denen das Strömungsfeld signifikante Geschwindigkeitsgradienten aufweist. Hier können geringe räumliche Abwei-

chungen vom vorgesehenen Messort zu unterschiedlichen Messergebnissen führen. Das in dieser Arbeit verwendete Traversen-System ermöglichte es, Messorte mit einer Genauigkeit von unter 0.1 mm (3 cm im Naturmaßstab) anzusteuern. Hierdurch sind mögliche Ungenauigkeiten, die aus einer unpräzisen Ortsbestimmung resultieren, vernachlässigbar klein.

Es muss zudem die Ausdehnung des Messvolumens berücksichtigt werden, über das bei LDA-Messungen die registrierte Windgeschwindigkeit gemittelt wird. Die Größe dieses Messvolumens hängt von der verwendeten Messsonde und der jeweiligen Brennweite (entspricht dem Abstand zwischen der Linse in der Messsonde und dem Messvolumen) ab. In dieser Messkampagne wurden zwei LDA-Sonden unterschiedlicher Größe und drei unterschiedliche Brennweiten verwendet (eine 85 mm Sonde mit 800 mm Brennweite, eine 85 mm Sonde mit 500 mm Brennweite und eine 26 mm Sonde mit 160 mm Brennweite), so dass 3 unterschiedlich große Messvolumina aufgespannt wurden (siehe Tabelle 1 auf Seite 40). Das Messvolumen hat jeweils die Form eines Ellipsoides. Die genauen Längen der beiden Nebenachsen (dx und dy) und der Hauptachse (dz) der drei unterschiedlich großen Ellipsoide sind ebenfalls Tabelle 1 zu entnehmen. Die Länge der beiden gleich großen Nebenachsen entspricht der Messauflösung des LDA-Systems. Bei den 3 verwendeten Messkonfigurationen hatten die Nebenachsen eine Länge von nur etwa 0.1 mm im Modellmaßstab (etwa 3 cm im Naturmaßstab). Aufgrund dieser hohen Messauflösung sind hieraus resultierende Ungenauigkeiten vernachlässigbar gering.

Die registrierten Windgeschwindigkeiten werden jedoch für beide Strömungskomponenten, die gleichzeitig aufgenommen werden können, über die Länge der Hauptachse des Ellipsoides gemittelt. Bei den drei verwendeten Messkonfigurationen hatte die Hauptachse eine Länge von 1.1 mm, 1.65 mm und 2.81 mm im Modellmaßstab (33 cm, 49.7 cm und 84.5 cm im Naturmaßstab). Diese unterschiedlich große räumliche Ausdehnung der Messvolumina kann insbesondere in Regionen, in denen das Strömungsfeld hohe Geschwindigkeitsgradienten aufweist, wie es beispielsweise in unmittelbarer Gebäudenähe beobachtet wird, zu unterschiedlichen Mittelungen führen.

Desweiteren müssen bei Strömungsmessungen statistische Unsicherheiten berücksichtigt werden, die durch begrenzte Mittelungszeiten entstehen. Aufgrund der Instationarität

turbulenter Strömungen führen Einzelmessungen der Windgeschwindigkeit zu Zufallswerten und nicht zu reproduzierbaren Ergebnissen. Ein reproduzierbarer Geschwindigkeitsmittelwert kann nur durch eine repräsentative Anzahl von Einzelmessungen, die zudem über einen hinreichend langen Zeitraum aufgenommen wurden, bestimmt werden. Ist der Mittelungszeitraum zu kurz, werden seltene, niederfrequente Ereignisse nicht statistisch repräsentativ abgebildet.

In dieser Versuchskampagne konnten Strömungszeitserien mit Datenraten zwischen 50 Hz und 500 Hz im Modellgebiet aufgenommen werden. Die möglichen Datenraten wurden von der Lage des jeweiligen Messpunktes bestimmt. Aufgrund einer geringeren Anzahl von Streupartikeln in engen Straßenschluchten und durch ein verschlechtertes Signal-Rausch-Verhältnis des Messsignals, verursacht durch Reflexionen der LDA-Laserstrahlen an der Modelloberfläche, weisen insbesondere bodennahe Messpunkte geringere Datenraten auf. Um unabhängig von der Messposition repräsentative Messungen zu ermöglichen, wurden sämtliche Strömungszeitserien über einen vergleichsweise langen Zeitraum von mindestens 3 Minuten (entspricht etwa 15 Stunden im Naturmaßstab) aufgenommen. Dieser Messzeitraum wurde auf Basis der Arbeit von Rix (2007) gewählt, in der aufgezeigt wurde, dass im Stadtgebiet von Oklahoma City Mittelungsintervalle von mehreren Stunden (im Naturmaßstab) erforderlich sind, um repräsentative Geschwindigkeitsmittelwerte der Strömung bestimmen zu können.

Um Messfehler in dieser Arbeit gering zu halten, wurden ausschließlich Strömungsmessungen analysiert, die mindestens eine durchschnittliche Datenrate von 50 Hertz im Modellmaßstab aufweisen. Sämtliche aufgenommenen Strömungszeitserien, die den Qualitätsanforderungen genügen, wurden in eine Referenzdatenbank eingebunden.

Die resultierende Messunsicherheit, mit der die durchgeführten Strömungsmessungen behaftet sind, setzt sich aus den einzelnen, oben genannten Unsicherheiten zusammen. Bei genauer Kenntnis der einzelnen Unsicherheiten lässt sich die resultierende Messunsicherheit mathematisch bestimmen. Da allerdings die Größen der einzelnen Unsicherheiten zum Teil nur ungenau oder gar nicht abgeschätzt werden können, wird in dieser Arbeit die resultierende Messunsicherheit (beziehungsweise Messgenauigkeit) anhand von Wiederholungsmessungen ermittelt.

Wird eine Messung mehrfach wiederholt, können sich die Ergebnisse aufgrund der Messunsicherheiten voneinander unterscheiden. Wie stark die Ergebnisse der Einzelmessungen vom „wahren“ Wert abweichen können, lässt sich abschätzen, indem auf Basis von Einzelmessungen eine Häufigkeitsverteilung der Messergebnisse ermittelt wird. Anhand dieser Häufigkeitsverteilung kann ein Vertrauensbereich (Konfidenzintervall) der Strömungsmessungen bestimmt werden, in dem sich der „wahre“ (unbekannte) Mittelwert mit einer definierten Wahrscheinlichkeit befindet. Durch die Angabe eines Konfidenzintervalls lässt sich das Ergebnis einer Einzelmessung objektivieren.

An insgesamt 1603 unterschiedlichen Messorten wurden bei der durchgeführten Messkampagne je 2 Geschwindigkeitszeitserien aufgenommen (UV- und UW-Messungen), um mit dem verwendeten 2D-LDA-System alle drei Komponenten des Windvektors aufnehmen zu können. Dementsprechend stehen insgesamt 1603 Wiederholungsmessungen der U-Komponente der Strömung zur Verfügung, um den Vertrauensbereich der Strömungsmessungen bestimmen zu können. Diese Wiederholungsmessungen wurden während des gesamten Versuchszeitraumes an nahezu allen Messorten der Kampagne durchgeführt und fassen den Effekt sämtlicher zuvor beschriebener Messunsicherheiten zusammen.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Messsonde zwischen den UV- und UW-Messungen um 90° gedreht wurde. Hierdurch unterscheidet sich bei den Wiederholungsmessungen die Orientierung des Messvolumens um diesen Betrag. Die U-Komponente der Strömung wird je nach Ausrichtung der Sonde bei den Wiederholungsmessungen entweder über die vertikal oder horizontal ausgerichtete Hauptachse des Ellipsoides gemittelt. Mögliche hieraus resultierende Messungenauigkeiten werden von den durchgeführten Wiederholungsmessungen abgebildet. Die Messgenauigkeit wurde separat für die drei verwendeten Messkonfigurationen dieser Versuchskampagne bestimmt.

Für jeden Messort wurde anhand der $U_{(1)V}$ - und $U_{(2)W}$ -Messungen die Differenz zwischen den beiden an dem Ort gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten der U-Komponente bestimmt, die jeweils mit der Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} normierten wurden ($U_{(1)}/U_{ref} - U_{(2)}/U_{ref}$). Die 1603 ermittelten Messunterschiede wurden nach der jeweiligen Messkonfiguration sortiert. Abbildung 32 zeigt die normierte Häufigkeitsverteilung dieser Messunterschiede für die 3 Konfigurationen. Die Breite der dargestellten Häu-

figkeitsverteilungen gibt jeweils die Messgenauigkeit wieder, mit der die mittlere normierte U-Komponente der Windgeschwindigkeit bestimmt werden konnte. Auf Basis der ermittelten Messunterschiede wurde ein 90%-Konfidenzintervall definiert, in dem sich der „wahre“ (unbekannte) mit der Referenzwindgeschwindigkeit normierte Mittelwert der Windgeschwindigkeit (U/U_{ref}) mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% befindet (schwarze Balken in Abbildung 32). 10% der Wiederholungsmessungen, die für die Geschwindigkeitskomponente U die größten Messunterschiede aufweisen, liegen außerhalb des definierten Konfidenzintervalls (graue Balken in Abbildung 32).

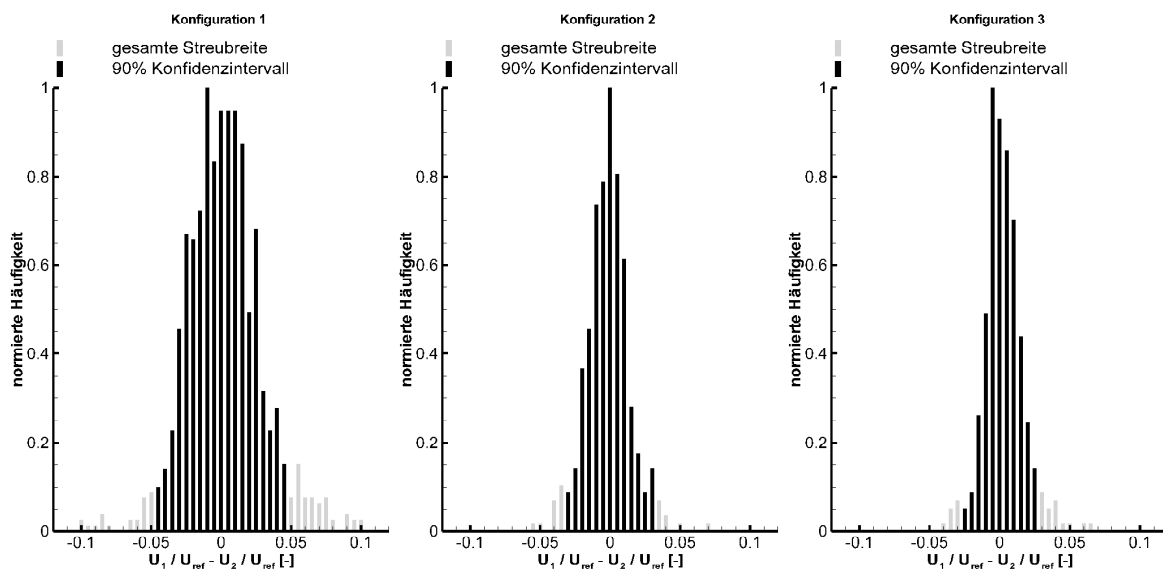


Abbildung 32: Normierte Häufigkeitsverteilung der aus insgesamt 1603 durchgeführten Wiederholungsmessungen ermittelten Messunterschiede der mittleren, mit der Referenzwindgeschwindigkeit normierten, Geschwindigkeitskomponente U für 3 unterschiedliche Messkonfiguration (85 mm Sonde mit 800 mm Brennweite (links), 85 mm Sonde mit 500 mm Brennweite (Mitte) und 26 mm Sonde mit 160 mm Brennweite (rechts)).

Im Vergleich zu der häufig zur Charakterisierung der Messunsicherheit verwendeten Standardabweichung, bei der 68,3 % der Realisierungen im angegebenen Intervall liegen, ist das in dieser Arbeit ausgewählte 90%-Konfidenzintervall als konservatives Maß für den Vertrauensbereich der Daten anzusehen. Tabelle 8 fasst die Größen der drei Konfidenzintervalle zusammen und zeigt an, aus wie vielen Wiederholungsmessungen dieser Wert jeweils bestimmt wurde.

	Sonden- durchmesser	Brennweite	Anzahl der Wiederholungs- messungen	90% Konfidenz- intervall für U/Uref
Konfiguration 1	85 mm	800 mm	940	± 0.0459 [-]
Konfiguration 2	85 mm	500 mm	344	± 0.0304 [-]
Konfiguration 3	26 mm	160 mm	319	± 0.0237 [-]

Tabelle 8: Aus Wiederholungsmessungen ermittelter Vertrauensbereich (Konfidenzintervall) der durchgeführten Strömungsmessungen für drei unterschiedliche Messkonfigurationen (2 unterschiedliche Messsonden und drei unterschiedliche Brennweiten).

Die größte Messunsicherheit und dementsprechend das breiteste Konfidenzintervall weist die Messkonfiguration auf, bei der die 85 mm Sonde mit 800 mm Brennweite verwendet wurde. Als mögliche Ursache hierfür ist die Ausdehnung des Messvolumens (2.819 mm im Modellmaßstab und 0.85 m im Naturmaßstab) anzuführen, die für diese Messkonfiguration am größten ausfiel. Wie zuvor beschrieben, kann ein relativ großer Mittelungsbereich in Regionen, in denen das Strömungsfeld signifikante Geschwindigkeitsgradienten aufweist, zu Verfälschungen durch Mittelung führen.

Voraussetzung für die Angabe eines Konfidenzintervalls ist die Normalverteilung der ermittelten Messunterschiede. Die Gauß'sche Normalverteilung beschreibt die Verteilung einer Zufallsgröße X , bei der die graphische Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte die Form einer Glockenkurve (Normalverteilungskurve) besitzt. Abbildung 32 zeigt, dass dies im Fall der Geschwindigkeitskomponente U für die Messunterschiede der 3 Messkonfigurationen der Fall ist.

7.2 Reynoldszahlunabhängigkeit im Modellgebiet

In Kapitel 6.3.3 wurde die Reynoldszahlunabhängigkeit der modellierten Anströmung stromaufwärts des Modellgebietes nachgewiesen. Aufgrund der signifikanten urbanen Rauigkeitsstrukturen im Modellgebiet weist die Strömung hier im Vergleich zur Anströmung deutlich geringere Windgeschwindigkeiten und dementsprechend lokal kleinere Reynoldszahlen auf. Da sämtliche Ausbreitungsversuche dieser Messkampagne im Modellgebiet durchgeführt wurden, wird in diesem Abschnitt die Strömung zusätzlich auf Reynoldszahlunabhängigkeit innerhalb des Stadtmodells überprüft.

Es wurden hierfür insgesamt 4 Messpunkte an verschiedenen Orten im Modellgebiet von Oklahoma City ausgewählt. Da bei den Ausbreitungsversuchen die Konzentration der freigesetzten Gaswolken jeweils in 6.7 mm Höhe über Grund im Modellmaßstab (2 m im Na-

turmaßstab) gemessen wurde, ist die Reynoldszahlunabhängigkeit an den 4 Messorten jeweils in dieser bodennahen Höhe überprüft worden. Drei Messorte befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Freisetzungsorten „Park Avenue“, „Bank One“ und „Hotel Westin (West)“ (siehe Abbildung 71 b (Quelle 2), 71 i (Quelle 4), 71 o (Quelle 5) auf Seite 187 ff. und Tabelle 5 auf Seite 55). Der vierte Messpunkt befindet sich in der Park Avenue und stimmt mit dem Messort „FP14“ überein (siehe Abbildung 71 c).

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse dieses Reynoldszahlunabhängigkeits-Tests, der an den 4 oben genannten Messorten für Windgeschwindigkeiten zwischen 1 m/s und 6 m/s in der Referenzhöhe (80.01 m im Naturmaßstab über dem Boden) durchgeführt worden ist. Der Quotient aus der horizontalen Windgeschwindigkeit U , die jeweils an den 4 Messorten gemessen wurde, und der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} in 80.01 m Höhe (im Naturmaßstab) ist auf der Ordinate aufgetragen.

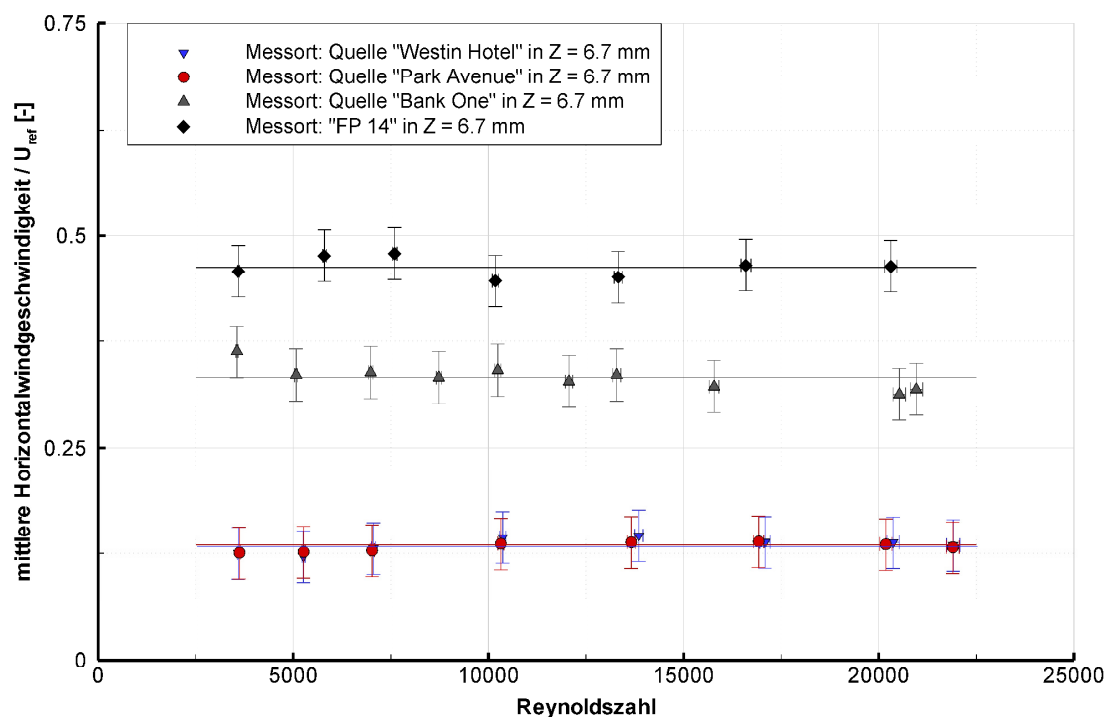


Abbildung 33: Reynoldszahl-Unabhängigkeitstest, der an 4 unterschiedlichen Messorten im Modellgebiet jeweils in 6.7 mm Höhe über Grund im Modellmaßstab (2 m über Grund im Naturmaßstab) für Windgeschwindigkeiten U_{ref} zwischen 1 m/s und 6 m/s in der Referenzhöhe von 80 m Höhe über Grund (im Naturmaßstab) durchgeführt wurde.

Die Abszisse zeigt die für die jeweilige Messung ermittelte Reynoldszahl, die anhand der mittleren Windgeschwindigkeit u_h in der durchschnittlichen Gebäudehöhe (19.4 m Höhe über Grund im Naturmaßstab) bestimmt wurde. Die durchgezogenen horizontalen Linien geben für jeden Messort die mittlere dimensionslose Horizontalwindgeschwindigkeit an. Die Strömungsmessungen wurden jeweils mit der großen Sonde (Sondengröße 85 mm) und einer Brennweite von 500 mm (Konfiguration 2) durchgeführt. Die eingezeichneten vertikalen Streubalken geben das für diese Konfiguration bestimmte Konfidenzintervall von ± 0.0304 [-] (siehe Kapitel 7.1) der Strömungsmessungen an, während die horizontalen Streubalken die Unsicherheit der berechneten Reynoldszahl aufzeigen.

Der Abbildung 33 ist zu entnehmen, dass die dimensionslosen Horizontalwindgeschwindigkeiten an jedem der 4 ausgewählten Messorte für sämtliche in dieser Kampagne verwendeten Windgeschwindigkeiten nahezu konstant sind. Die zu beobachtenden Differenzen liegen jeweils innerhalb des bestimmten Konfidenzintervalls. Die Versuche zeigen, dass die Strömung an verschiedenen Orten im Modellgebiet selbst in Bodennähe für alle in dieser Kampagne verwendeten Windgeschwindigkeiten von der Reynoldszahl unabhängig ist.

8 Konzentrationsmessungen

Dieses Kapitel untersucht die Ausbreitung von einzelnen Gaswolken (Puffs) in einer komplexen urbanen Umgebung. Hierfür werden in Kapitel 8.1 zunächst eine Reihe von Parametern (nachfolgend auch als Puff-Parameter bezeichnet) eingeführt, anhand derer die Ausbreitung der Gaswolken charakterisiert wurde. In Kapitel 8.2 wird die Datenerfassung und -verarbeitung erläutert, während in Kapitel 8.3 auf Basis von Wiederholungsmessungen die Datenqualität der durchgeführten Konzentrationsmessungen ermittelt wird.

Ziel der Windkanalversuche war zudem die Erstellung eines Referenzdatensatzes, der zur Validierung numerischer Modelle geeignet ist. Da Ausbreitungsversuche im Labor oder in der Natur in der Regel bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit stattfinden, bei denen eine definierte Menge Gas freigesetzt wird, gilt es zu überprüfen, ob die Ergebnisse dieser Versuche auch auf beliebige Windgeschwindigkeiten und Freisetzungsmengen übertragbar sind. Die Skalierbarkeit bezüglich dieser Parameter wird anhand systematischer Wiederholungsversuche in Kapitel 8.4 überprüft.

In Kapitel 8.5 wird die Variabilität der turbulenten Ausbreitungsprozesse analysiert, indem der Einfluss verschiedener Faktoren auf die Bestimmungsgenauigkeit der Ergebnisse überprüft wird.

In Kapitel 8.7 werden Ergebnisse der Feldkampagne JU2003, die in Kapitel 8.6 vorgestellt werden, mit korrespondierenden Ergebnissen der Windkanalversuche verglichen.

8.1 Charakterisierung der Puffausbreitung

Ausbreitungsuntersuchungen basieren bei Feld- und Laborversuchen in der Regel auf Konzentrationsmessungen, die an ausgewählten Messorten durchgeführt werden. Diese ermöglichen es, abhängig von der verwendeten Messtechnik, den Konzentrationsverlauf am jeweiligen Messort mit einer hohen zeitlichen Auflösung zu erfassen. Der Nachteil dieser Punktmessungen besteht darin, dass der räumliche Ausbreitungsverlauf der Wolke selbst anhand zahlreicher Messungen an verschiedenen Messorten nur abgeschätzt werden kann. Die exakte Erfassung des räumlichen Ausbreitungsverlaufes einer Gaswolke ist mit üblicher Messtechnik nicht möglich. Er kann zwar durch Rauchexperimente visualisiert werden, diese Visualisierung ist allerdings für einen quantitativen Vergleich zwischen

Referenz- und Modelldaten und damit für die Validierung numerischer Modelle ungeeignet. Desweiteren gibt es Bestrebungen, räumliche Ausbreitungsprozesse auf Basis von Infrarotaufnahmen zu quantifizieren (Min, Abernathy & Lundblad 2002). Hierbei wird von der thermischen Signatur des freigesetzten Messgases auf die Konzentration des Gases im Bildbereich geschlossen. Dieses Verfahren erfordert allerdings einen uniformen Hintergrund, wodurch die Ausbreitung einer Gaswolke nur bodenfern verfolgt werden kann. Ausbreitungsuntersuchungen in Stadtgebieten sind mit diesem Verfahren nicht möglich. Ziel der durchgeführten Untersuchungen war es, auf Basis der an verschiedenen Messorten aufgenommenen Konzentrationszeitserien den Ausbreitungsprozess der freigesetzten Gaswolken so genau wie möglich zu charakterisieren. Gleichzeitig sollte diese Charakterisierung für einen Vergleich mit Ergebnissen aus Naturmessungen und zur Validierung numerischer Ausbreitungsmodelle geeignet sein.

Es wurden mehrere Parameter definiert, die den Ausbreitungsprozess einer freigesetzten Wolke charakterisieren. Hierzu zählt z.B. das am Messort registrierte Konzentrationsmaximum (engl. „peak concentration“) oder die registrierte Dosis (engl. „dosage“) einer durchziehenden Gaswolke. Die Dosis ist abhängig von der Höhe der am Messort auftretenden Konzentration und von der Dauer, über die diese Konzentrationen am Messort registriert werden. Im Falle einer Schadstofffreisetzung ist die Dosis ein Maß für die Schadstoffbelastung, der Personen am Messort ausgesetzt sind.

Desweiteren wurde bei jeder Messung die Reisezeit ermittelt, die die freigesetzte Wolke benötigt, um den Messort zu erreichen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Wolke selbst eine räumliche Ausdehnung besitzt, die sich mit der Zeit vergrößert. Hierdurch stimmt in der Regel der Zeitpunkt, an dem das Konzentrationsmaximum den Messort erreicht, nicht mit dem Zeitpunkt überein, an dem die erste Konzentration der Wolke am Messort registriert wird. Aus diesem Grund wurden anhand der aufgenommenen Konzentrationszeitserien für jeden einen Messort passierenden Puff 3 charakteristische Zeiten bestimmt. Die „arrival time“ (at) gibt die Zeit an, die nach der Freisetzung der Wolke verstreicht, bis die Wolke den Messort erreicht hat. Die „peak time“ (pt) wird als die Zeit definiert, die nach Freisetzung der Wolke vergeht, bis das Konzentrationsmaximum am Messort registriert wird. Zuletzt wird für jeden Puff die „leaving time“ (lt) angegeben, die

den Zeitraum zwischen Freisetzung der Wolke und dem Moment angibt, an dem gerade der gesamte Puff am Messort durchgezogen ist.

Abbildung 34 zeigt ein typisches Konzentrationssignal, welches am Messort beim Durchziehen einer Gaswolke aufgezeichnet wurde. Dargestellt ist in dieser Abbildung zudem die ermittelte „arrival time“, „peak time“ und „leaving time“. Die Abbildung lässt erkennen, dass die „arrival time“ nicht exakt den Zeitpunkt markiert, an dem die erste Konzentration am Messort registriert wurde. Dies ist auf das verwendete Auswerteverfahren zurückzuführen, bei dem die „arrival time“ als der Zeitpunkt definiert wurde, an dem 5% der gesamten Dosis des jeweils gemessenen Puffs den Messort passiert haben. Analog hierzu gibt die „leaving time“ den Zeitpunkt an, an dem 95% der jeweiligen Dosis des Puffs den Messort passiert haben. Die Gründe für das angewandte Auswerteverfahren liegen in der zuverlässigen und einheitlichen Erfassung der „arrival time“ und „leaving time“.

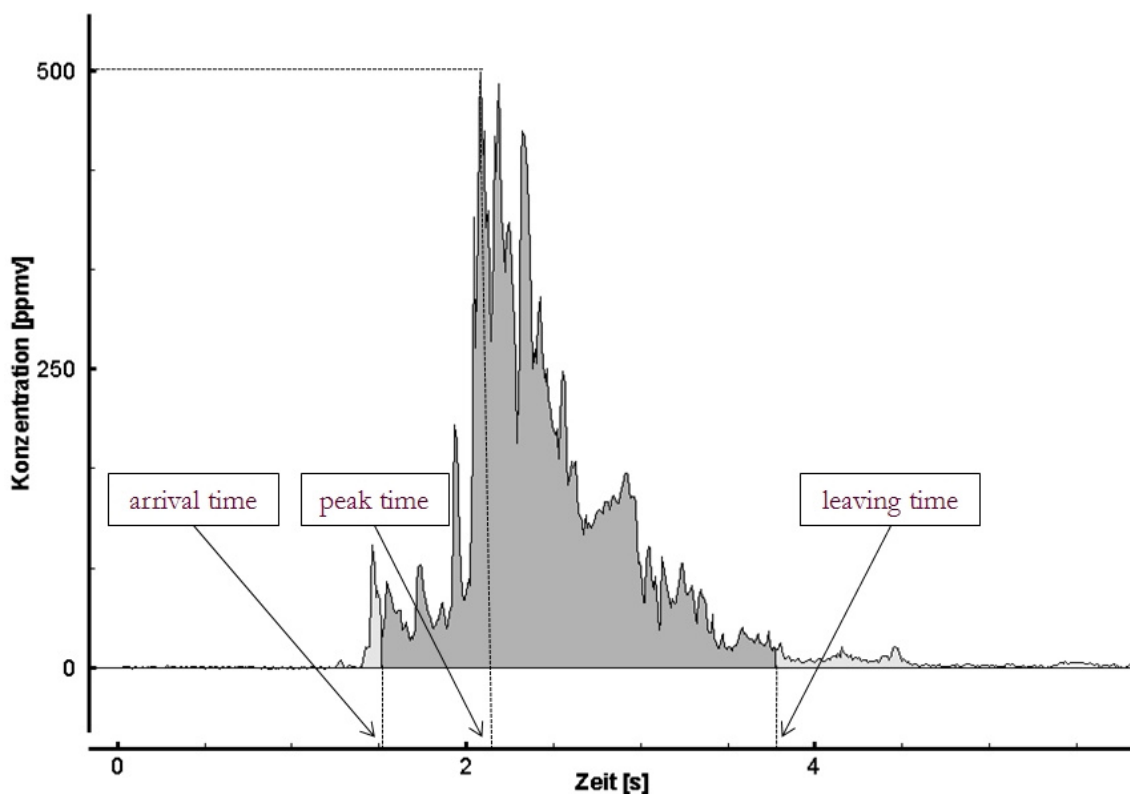


Abbildung 34: Typisches Konzentrationssignal, welches an einem Messort beim Durchziehen einer Gaswolke gemessen wurde. Dargestellt sind zudem die ermittelte „arrival time“ (at), „peak time“ (pt) und „leaving time“ (lt), die jeweils die Zeit angeben, die nach der Freisetzung der Wolke verstreicht, bis die Wolke den Messort erreicht hat („arrival time“), bis das Konzentrationsmaximum den Messort erreicht hat („peak time“) und bis die Wolke den Messort komplett passiert hat („leaving time“).

Desweiteren wurde die Dauer (engl. „duration“), die eine Wolke benötigt, um den Messort zu passieren, anhand der „arrival time“ und „leaving time“ ermittelt ($\text{duration} = \text{lt} - \text{at}$). Das von einem durchziehenden Puff hervorgerufene Konzentrationssignal lässt sich zudem sowohl über die Zeit charakterisieren, die nach der Ankunft der Wolke am Messort vergeht, bis das Konzentrationsmaximum diesen erreicht hat, als auch über die Zeit, die es nach dem Durchzug des Konzentrationsmaximums braucht, bis die komplette Wolke den Messort passiert hat. Diese beiden Zeitspannen werden nachfolgend als „ascent time“ („ascent time“ = $\text{pt} - \text{at}$) und „descent time“ („descent time“ = $\text{lt} - \text{pt}$) bezeichnet. Es wurden demnach für jede Messung 5 Puff-Parameter bestimmt („arrival time“, „peak time“, „leaving time“, „peak concentration“ und „dosage“), anhand derer wiederum 3 weitere abgeleitet wurden („duration“, „ascent time“ und „descent time“), um den Ausbreitungsprozess der freigesetzten Wolken im Stadtgebiet zu charakterisieren.

Desweiteren lässt sich anhand der ermittelten Reisezeiten und der Entfernung zwischen Quell- und Messort die Transportgeschwindigkeit (Advektionsgeschwindigkeit) der Gaswolke berechnen ($\text{Advektionsgeschwindigkeit} = \text{Entfernung vom Quell- zum Messort} / \text{Reisezeit}$). Hierbei lässt sich unterscheiden, mit welcher Geschwindigkeit sich die Wolkenfront, das Konzentrationsmaximum oder das Ende der Wolke ausbreitet, je nachdem, ob zur Berechnung der Advektionsgeschwindigkeit die „arrival time“, „peak time“ oder „leaving time“ herangezogen wird.

8.2 Datenerfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden Konzentrationszeitserien von jeweils 30 Minuten Dauer aufgenommen. Die Zeitspanne entsprach der maximalen Dauer, über die die aufgenommenen Daten am Stück vom verwendeten Rechnersystem aufgenommen werden konnten. In diesem Zeitraum wurden pro Messung zwischen 200 und 400 Gaswolken (Puffs) nacheinander freigesetzt. Die Anzahl der freigesetzten Wolken wurde insbesondere vom Abstand des Quellortes zum Messort bestimmt. Die Zeit zwischen 2 Freisetzungen wurde stets so lang gewählt, dass eine Wolke den Messort komplett passiert hat, bevor die nächste freigesetzt wurde. Je weiter der Messort vom Quellort entfernt lag und je länger die Reisezeit der Wolke andauerte, desto weniger Freisetzungen konnten innerhalb von 30 Minuten realisiert werden.

Jede Zeitserie wurde mit einer zeitlichen Auflösung von 1000 Hertz aufgenommen, wobei jeweils das Signal des Fast-FIDs (zur Messung der Konzentrationen stromabwärts der Quelle), des Standard-FIDs (zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration stromaufwärts der Quelle), des Prandtlrohres (zur Messung der Referenzwindgeschwindigkeit), des Mas-sendurchflussreglers (zur Bestimmung der freigesetzten Gasmenge) und des Puff-Freisetzungreglers (zur Bestimmung der jeweiligen Freisetzungsdauer) aufgezeichnet wurde.

Für die Weiterverarbeitung der aufgenommenen Zeitserien wurde eine von Fischer (2007) entwickelte Datenverarbeitungssoftware verwendet. Das verwendete Programm reduziert die zeitliche Auflösung der Zeitserien zunächst anhand einer Blockmittelung auf 100 Hertz, um hochfrequente Schwankungen des Signals, verursacht durch elektronisches Rauschen, zu minimieren. Anschließend werden von der Verarbeitungssoftware für jede Freisetzung die in Kapitel 8.1 beschriebenen Puff-Parameter bestimmt. Eine detaillierte Beschreibung der Datenerfassung und -verarbeitung ist in der Diplomarbeit von Fischer (2007) gegeben.

Die verwendete Software wurde allerdings in Bezug auf „arrival time“- und „leaving time“-Bestimmung gegenüber der ursprünglichen Softwareversion weiterentwickelt. Wie bereits in Kapitel 8.1 beschrieben, wurden in der vorliegenden Arbeit die „arrival time“ und „leaving time“ als Zeitpunkte definiert, an dem 5% („arrival time“) bzw. 95% („leaving time“) der gesamten Dosis des jeweils gemessenen Puffs den Messort passiert haben. In der ursprünglichen Softwareversion waren die „arrival time“ und „leaving time“ als Zeitpunkte definiert, an denen ein bestimmter Konzentrationsschwellenwert über- bzw. unterschritten wurde.

Der Nachteil der ursprünglichen Bestimmungsmethode bestand darin, dass die Wahl eines festen Schwellenwertes zu einer uneinheitlichen Puff-Detektierung führte. Dies ist darin begründet, dass die Messsignale der einzelnen Puff-Freisetzungen signifikante Unterschiede aufweisen. So sind bei Wiederholungsmessungen Unterschiede um den Faktor 10 bezüglich des Konzentrationsmaximums oder der Dosis keine Seltenheit. Ein festgelegter Schwellenwert fällt bezogen auf das Konzentrationsmaximum eines Puffs umso größer aus, je geringer das Konzentrationsmaximum des Puffs ist. Dies kann, wie in Kapitel 8.4.2

noch erläutert wird, zu einer uneinheitlichen „arrival time“- und „leaving time“-Bestimmung führen, wenn die Freisetzungsdauer bei den untersuchten Puffs variiert. Um eine einheitliche Puff-Detektierung zu gewährleisten, wurde die „arrival time“- und „leaving time“-Bestimmung angepasst. Die Veränderungen zur ursprünglichen Softwareversion wurden mit Hilfe synthetischer Zeitserien validiert.

Nicht jedes registrierte Konzentrationssignal wurde zur Bestimmung der Puff-Parameter herangezogen. Bei einigen Messungen zog die freigesetzte Wolke gar nicht oder nur zum Teil am Messort durch, wobei entweder keine oder nur eine sehr geringe Konzentration am Messort gemessen werden konnte. Bei zu geringen Konzentrationen ließen sich die genannten Puff-Parameter nicht mehr zuverlässig bestimmen. Dies war beispielsweise dann der Fall, wenn die Abweichung der gemessenen Konzentration vom Konzentrationswert Null über den gesamten Zeitraum einer Puff-Freisetzung im oder knapp über dem Bereich der Messunsicherheit lag (siehe Kapitel 8.3). Um zu verhindern, dass ungenau bestimmte Puff-Parameter in die Auswertungen dieser Arbeit einfließen, wurden kritische Ergebnisse herausgefiltert. Auf Basis der Analyse von mehreren hundert Freisetzungen wurden Puffs als kritisch eingestuft, wenn die gemessene Dosis unter 5 ppm_{v,s} lag. Es flossen daher ausschließlich Messungen in die Auswertungen dieser Arbeit ein, bei denen dieser Schwellenwert von 5 ppm_{v,s} überschritten wurde.

8.3 Datenqualität der durchgeführten Konzentrationsmessungen

In diesem Kapitel wird die Datenqualität der durchgeführten Konzentrationsmessungen analysiert. Hierbei wird zunächst in Kapitel 8.3.1 der Vertrauensbereich der durchgeführten Konzentrationsmessungen bestimmt. Im Anschluss wird in Kapitel 8.3.2 die Repräsentativität der gemessenen mittleren Puff-Parameter ermittelt. Zuletzt wird in Kapitel 8.3.3 überprüft, ob auf Basis der durchgeführten Ausbreitungsuntersuchungen auch seltene Extremwertereignisse abgeschätzt werden können.

8.3.1 Vertrauensbereich der durchgeführten Konzentrationsmessungen

Wie in Kapitel 7.1 beschrieben, können Messergebnisse z.B. durch Ungenauigkeiten der verwendeten Messgeräte oder durch statistische Unsicherheiten vom „wahren“ Wert abweichen. Für ein repräsentatives Ergebnis ist dementsprechend die Angabe eines Ver-

trauensbereiches, in dem der „wahre“ Wert mit einer definierten Wahrscheinlichkeit liegt, von Bedeutung.

Bei den durchgeführten Konzentrationsmessungen wurde die mit einem Fast-FID-System stromabwärts der Quelle gemessene Konzentration C jeweils um die Hintergrundkonzentration korrigiert. Die Hintergrundkonzentration wurde stromaufwärts der Quelle mit einem Standard-FID-System aufgenommen. Dementsprechend nehmen die Unsicherheiten beider Messgeräte Einfluss auf die Messgenauigkeit der Konzentration. Zur Minimierung dieser Unsicherheiten wurde die Kalibrierung der Geräte 2- bis 3-mal täglich überprüft. Bei einer Abweichung des Messergebnisses von über einem ppm_v im Vergleich zu einem ausgewählten Referenzgas wurden die Messgeräte neu kalibriert.

Der Vertrauensbereich (Konfidenzintervall) der durchgeführten Konzentrationsmessungen wurde auf Basis von Wiederholungsmessungen eines bekannten Konzentrationswertes bestimmt. Anhand der auftretenden Streuung der Messwerte wurde ein Konfidenzintervall definiert, in dem sich der tatsächliche („wahre“) Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % befindet. Für diese Untersuchungen wurden 3 Konzentrationszeitserien, die an unterschiedlichen Tagen aufgenommen wurden, aus sämtlichen Zeitserien der Versuchskampagne ausgewählt. Hierdurch wird der mögliche Einfluss von unterschiedlichen Randbedingungen (wie z.B. Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit) auf die Messgenauigkeit mit berücksichtigt. Von diesen jeweils 30-minütigen Zeitserien wurden einzelne Abschnitte ausgeschnitten, die zeitlich zwischen zwei am Messort durchziehenden Gaswolken lagen. Dies traf bei den ausgewählten Ausbreitungsversuchen am Messort jeweils für eine Zeitspanne von 0.2 Sekunden, die unmittelbar nach dem jeweiligen Freisetzungzeitpunkt (Zeitpunkt der Quellöffnung) der Gaswolke lag, zu. Über diesen Zeitraum war zum einen die Gaswolke der vorherigen Freisetzung komplett am Messort vorbeigezogen und zum anderen hatte die nachfolgend freigesetzte Gaswolke den Messort noch nicht erreicht. Dementsprechend ist über die insgesamt 850 ausgewählten jeweils 0.2 Sekunden langen Zeitintervalle der 850 Puff-Messungen keine Konzentration des verwendeten Messgases am Messort zu erwarten. Nach Blockmittelung der aufgenommenen Daten (siehe Kapitel 8.2) und Korrektur der gemessenen Konzentration um die jeweilige Hinter-

grundkonzentration stehen aus diesen Zeitintervallen insgesamt 17094 Einzelwerte für die Bestimmung des Konfidenzintervalls zur Verfügung.

Abbildung 35 zeigt die normierte Häufigkeitsverteilung dieser 17094 Konzentrationsmesswerte. Die ermittelte Verteilung entspricht mit einer Bestimmtheit von $r^2 \approx 0.997$ einer Gauß'schen Normalverteilung. Die schwarzen Balken markieren das ermittelte 95%-Konfidenzintervall, während die grauen Balken die gesamte Streubreite aufzeigen.

Die Wiederholungsmessungen ergaben, dass der tatsächliche („wahre“) Konzentrationswert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % in einem Intervall von ± 0.93 ppmv um den jeweils gemessenen Wert liegt.

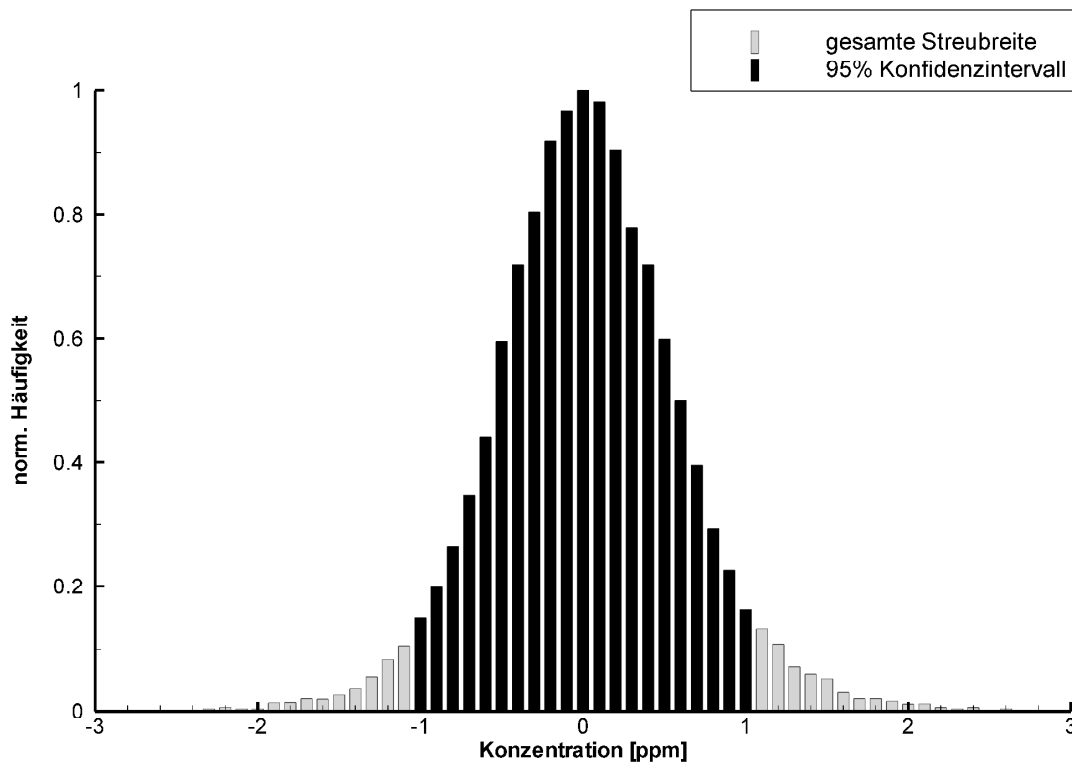


Abbildung 35: Normierte Häufigkeitsverteilung, die anhand von insgesamt 17094 Konzentrationsmesswerten ermittelt wurde. Sämtliche Konzentrationswerte wurden in Zeitabschnitten aufgenommen, an denen sich kein Messgas am Messort befand. Schwarze Balken markieren das ermittelte 95%-Konfidenzintervall der durchgeführten Konzentrationsmessungen.

8.3.2 *Repräsentativität der gemessenen mittleren Puff-Parameter*

In diesem Kapitel wird überprüft, mit welcher Genauigkeit die in Kapitel 8.1 eingeführten Puff-Parameter bestimmt werden konnten. Zunächst werden verschiedenen Faktoren diskutiert, von denen die Bestimmungsgenauigkeit der Puff-Parameter beeinflusst wurde. Die Bestimmung der Dosis und „peak concentration“ wird zum einen von der bereits ermittelten Messunsicherheit von ± 0.93 ppmv der verwendeten Messgeräte (Fast-FID und Standard-FID) beeinflusst. Desweiteren hat die Genauigkeit, mit der die jeweils freigesetzte Gasmenge festgelegt werden konnte, Auswirkungen auf diese beiden Puff-Parameter. Die freigesetzte Gasmenge wurde zum einen von der Quellstärke und zum anderen von der Öffnungszeit der Quelle bestimmt. Die Quellstärke wurde von einem Massendurchflussregler kontrolliert, der zu Beginn der Messkampagne kalibriert wurde. Für eine präzise Berechnung der jeweiligen Durchflussrate wurde die Raumtemperatur und der Luftdruck 2- bis 3-mal am Tag überprüft. Die aktuelle Durchflussrate wurde von der sich öffnenden und schließenden Quelle nicht beeinflusst, da das Messgas kontinuierlich durch eine Nebenleitung geführt wurde und nur über den Freisetzungszeitraum zur Quelle umgelenkt wurde. Ein möglicher Druckaufbau bei geschlossener Quelle und ein hieraus resultierendes unkontrolliertes Ausströmen des Gases konnte so umgangen werden.

Anhand eines bei geöffneter Quelle vom Puff-Freisetzungsregler ausgesandten elektrischen Signals, welches für jede durchgeführte Messung mit einer zeitlichen Auflösung von 1000 Herz aufgezeichnet wurde, konnte die Öffnungszeit der Quelle mit einer Genauigkeit von $1/1000$ s bestimmt werden. Diese Bestimmung des Freisetzungszeitpunktes hatte zudem Einfluss auf die Genauigkeit, mit der die Reisezeiten („arrival time“, „peak time“ und „leaving time“) ermittelt werden konnten.

Für die Bewertung der gemessenen Reisezeiten und der jeweiligen Dosis ist zudem die Kenntnis der zugehörigen Referenzwindgeschwindigkeit von Bedeutung (Details zur gemessenen Referenzwindgeschwindigkeit sind in Kapitel 3.3 beschrieben). Werden diese Puff-Parameter in dimensionsloser Form angegeben (hierauf wird ausführlich in Kapitel 8.4.4 eingegangen), nimmt die Bestimmungsgenauigkeit der Referenzwindgeschwindigkeit direkten Einfluss auf die Genauigkeit, mit der die Dosis und Reisezeiten ermittelt werden können.

Die resultierende Unsicherheit, mit der die einzelnen Puff-Parameter behaftet sind, setzt sich aus den einzelnen, oben genannten Unsicherheiten zusammen. Da allerdings die Größen der einzelnen Unsicherheiten zum Teil nur ungenau oder gar nicht abgeschätzt werden können, wird die resultierende Unsicherheit anhand von Wiederholungsmessungen abgeschätzt.

Erschwert wird diese Bestimmung allerdings dadurch, dass Ausbreitungsprozesse in einer turbulenten Strömung eine hohe Variabilität aufweisen. Dies wird durch folgendes Beispiel verdeutlicht:

Abbildung 36 (links) zeigt einen Ausschnitt einer am Messort „AP33“ aufgenommenen Konzentrationszeitserie (rote Linie), während aufeinanderfolgend 5 Gaswolken gleichen Volumens ($1.3 \cdot 10^{-5} \pm 1.2 \cdot 10^{-7} m^3$) am Quellort „S4“ (Quellort befindet sich in der Park Avenue) unter gleichen mittleren Randbedingungen freigesetzt wurden.

Die mittlere Windrichtung lag bei 170° , während die mittlere Windstärke 2.1 m/s in einer Höhe von 80.01 m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab am Referenzort stromaufwärts des Stadtmodells von Oklahoma City betrug. Die grau eingezeichneten Balken geben jeweils den exakten Freisetzungzeitpunkt und die Dauer der Freisetzung von 0.3 Sekunden wieder. Der Zeitraum zwischen zwei aufeinanderfolgenden Freisetzungen wurde jeweils so lang gewählt, dass die erste der beiden Wolken den Messort komplett passiert hat, bevor die nächste Wolke freigesetzt wurde. Die Abbildung 36 (rechts) zeigt in einer Draufsicht des Innenstadtbereiches von Oklahoma City die Lage der Quelle „S4“ in der Park Avenue und des Messortes „AP33“, der zwei Straßenschlucht weiter nördlich in der Robert S Kerr Avenue gelegen ist.

Die Abbildung 36 (links) zeigt, dass das am Messort „AP33“ aufgenommene Konzentrationssignal für die 5 durchgeführten Puff-Freisetzungen signifikante Unterschiede aufweist. Bei der dritten Freisetzung beispielsweise wird keine Konzentration am Messort registriert, was darauf hinweist, dass diese Gaswolke den Messort komplett verfehlt hat. Das von den 4 übrigen Puffs hervorgerufenen Konzentrationssignal zeigt deutliche Differenzen auf, was sich z. B. in unterschiedlichen Konzentrationsmaxima äußert. Diese liegen bei den 4 Versuchen zwischen 50 ppm_v und 720 ppm_v.

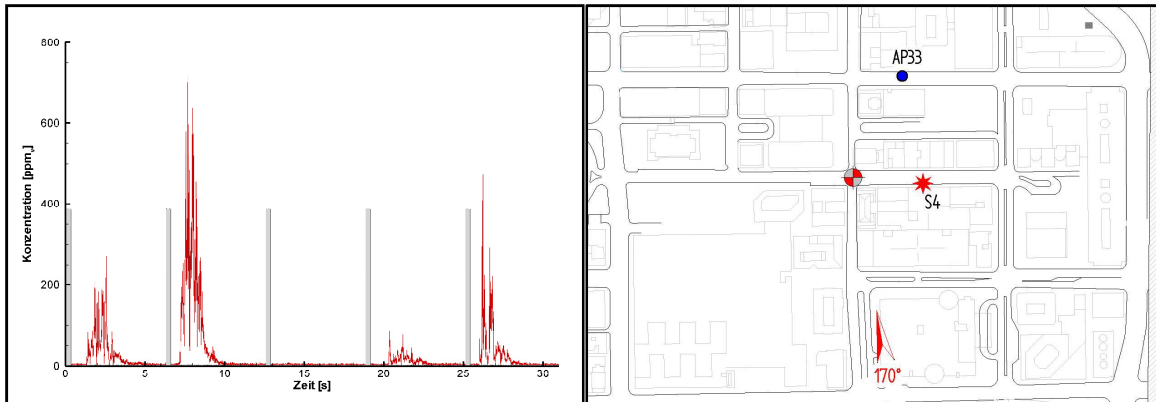


Abbildung 36: Ausschnitt einer am Messort „AP33“ aufgenommenen Konzentrationszeitserie (rote Linie), während aufeinanderfolgend 5 Puffs am Quellort „S4“ (Quellort befindet sich in der Park Avenue) unter gleichen mittleren Randbedingungen freigesetzt wurden. Die grau eingezeichneten Balken geben jeweils den exakten Freisetzungszeitpunkt und die Dauer der Freisetzung von 0.3 Sekunden wieder (linke Abbildung).

Die Lage des Messortes „AP33“ und der Quelle „S4“ im Stadtgebiet von Oklahoma City (rechte Abbildung).

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass es für mehrere identische Gaswolken, die unter gleichen mittleren Randbedingungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in einer turbulenten Strömung freigesetzt werden, ein Spektrum unterschiedlicher Ausbreitungsverläufe gibt. Die Messung einer einzelnen Puff-Freisetzung führt dementsprechend nicht zu einem reproduzierbaren Ergebnis, sondern entspricht lediglich einer von vielen möglichen Realisierungen.

Das gesamte Spektrum (Grundgesamtheit) der aufgenommenen Konzentrationssignale ist charakterisiert durch eine Menge von möglichen Ergebnissen, die mit gewissen Wahrscheinlichkeiten auftreten. Es ist zu erwarten, dass diese Grundgesamtheit aufgrund einer zu großen Ergebnismenge nicht komplett durch Wiederholungsmessungen abgebildet werden kann. Die Grundgesamtheit kann daher nur auf Basis von Stichproben abgeschätzt werden. Dementsprechend sind die durch Wiederholungsmessungen bestimmten mittleren Puff-Parameter mit einer statistischen Unsicherheit behaftet, deren Größe abhängig von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Stichproben ist.

Aus zeitlichen Gründen konnten bei den durchgeführten Versuchen nicht beliebig viele Wiederholungsmessungen realisiert werden. Wie bereits in Kapitel 8.2 beschrieben, entspricht eine 30-minütige Messung dem maximalen Messzeitraum, der vom verwendeten

Rechnersystem am Stück aufgenommen werden konnte. Es wurde daher zunächst überprüft, ob die 200 bis 400 Puff-Freisetzung, die innerhalb einer 30-minütigen Konzentrationsmessung durchgeführt werden konnten, für die repräsentative Charakterisierung der Ausbreitungsprozesse einer bestimmten Ausbreitungssituation ausreichen.

Die Reproduzierbarkeit der mittleren Puff-Parameter, die sich aus einer 30-minütigen Messung bestimmen lassen, wurde für 4 unterschiedliche Ausbreitungssituationen analysiert. Für zwei dieser Versuche wurde die Quelle S4 in der Park Avenue verwendet und für die anderen beiden Versuche die Quelle S2 in der Nähe des Westin Hotels. Für jede Quelle wurde die Ausbreitung der freigesetzten Wolken an je zwei unterschiedlichen Messorten untersucht. Die Lage der Quell- und Messorte wurde so ausgewählt, dass die Repräsentativität der mittleren Puff-Parameter für verschiedene typische Ausbreitungssituationen dieser Messkampagne analysiert werden konnte. Abbildung 37 zeigt die genaue Lage der ausgewählten Messpunkte im Modellgebiet von Oklahoma City, die jeweils unterschiedliche Abstände zu den beiden verwendeten Quellen aufweisen.

In Abbildung 37 sind die den Messorten jeweils zugehörigen Quellen durch gleiche Farben gekennzeichnet. Die mittlere Windrichtung betrug bei sämtlichen Versuchen 170° . Wie zuvor beschrieben, wurde die Anzahl der freigesetzten Wolken insbesondere vom Abstand des Quellortes zum Messort bestimmt. Bei den beiden relativ nah zur Quelle gelegenen Messorten AP26 und AP33 wurden innerhalb einer 30-minütigen Messung jeweils 340 Puff-Freisetzung realisiert, während bei den Messorten FP17 und FP15 in diesem Messzeitraum jeweils 220 Puff-Freisetzung durchgeführt wurden. Die 30-minütigen Messungen wurden für die Ausbreitungssituation S2_170_AP26 (S2 = Quellort, 170 = Windrichtung, AP26 = Messort) insgesamt 5-mal wiederholt, während für die übrigen 3 Messungen S4_170_AP33, S2_170_FP15 und S4_170_FP17 jeweils 6 Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden. In Tabelle 9 sind die mittlere Windgeschwindigkeit, die mittlere Freisetzungsdauer und das jeweils pro Ausbreitungsversuch im Mittel freigesetzte Gasvolumen dieser 4 Ausbreitungsszenarien zusammengefasst.

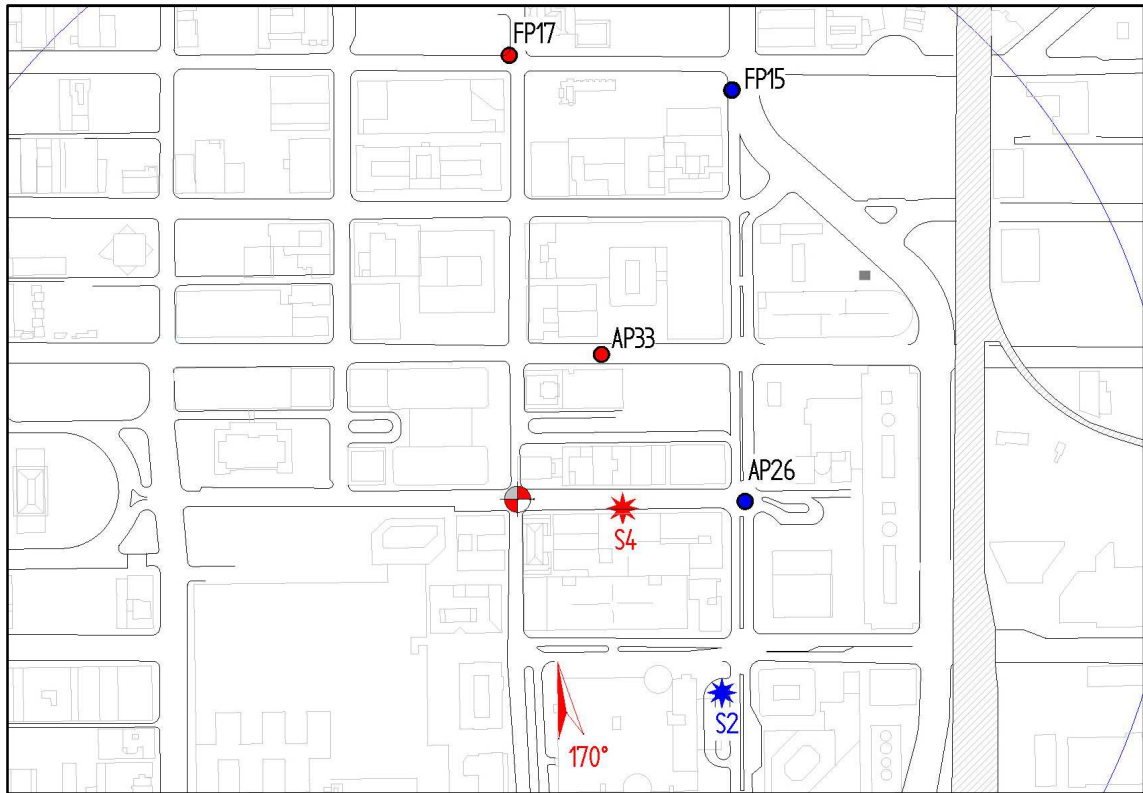


Abbildung 37: Lage der Messorte (eingezeichnete Kreise) im Stadtgebiet von Oklahoma City, an denen jeweils 5 bis 6 Konzentrationszeitserien von 30 Minuten Dauer aufgenommen wurden (Wiederholungsmessungen). In dem Versuchszeitraum von 30 Minuten wurden jeweils zwischen 200 bis 400 Gaswolken unter konstanten mittleren Randbedingungen von den Quellorten (eingezeichnete Sterne) S2 oder S4 freigesetzt (rot bzw. blau markiert sind die jeweils zugehörigen Quell- und Messorte). Die mittlere Windrichtung betrug für sämtliche Versuche 170°. Die Messhöhe betrug für alle Messorte 2 m über Grund im Naturmaßstab.

	Puffs pro Messung	Anz. der Messungen	mittl. Windgeschw.	Freisetzungsdauer	freigesetztes Gasvolumen
S2_170_AP26	340	5	3.45 ± 0.01 m/s	0.29 ± 0.004 s	3.91E-06 ± 1E-07 m ³
S2_170_FP15	220	6	2.42 ± 0.01 m/s	0.29 ± 0.004 s	1.30E-05 ± 1E-08 m ³
S4_170_AP33	340	6	3.49 ± 0.01 m/s	0.29 ± 0.004 s	1.27E-05 ± 1E-09 m ³
S4_170_FP17	220	6	3.11 ± 0.01 m/s	0.30 ± 0.004 s	1.31E-05 ± 1E-10 m ³

Tabelle 9: Mittlere Windgeschwindigkeit, mittlere Freisetzungsdauer und das jeweils pro Wolke im Mittel freigesetzte Gasvolumen der 4 Ausbreitungsszenarien, für die die Reproduzierbarkeit der mittleren Puff-Parameter analysiert wurde.

Abbildung 38 zeigt den mittleren Konzentrationsverlauf, der auf Basis von 220 Ausbreitungsversuchen für das Ausbreitungsszenario S4_170_FP17 insgesamt 6-mal bestimmt wurde. Die Abweichungen der mittleren Ausbreitungsverläufe zueinander liegen innerhalb der eingezeichneten Streubalken. Diese geben den zuvor ermittelten Vertrauensbereich der Konzentrationsmessungen von ± 0.93 ppm_v (siehe Abbildung 35) wieder. Diese

sehr gute Wiederholbarkeit des mittleren Konzentrationssignals, wird auch für die 3 übrigen Szenarien beobachtet.

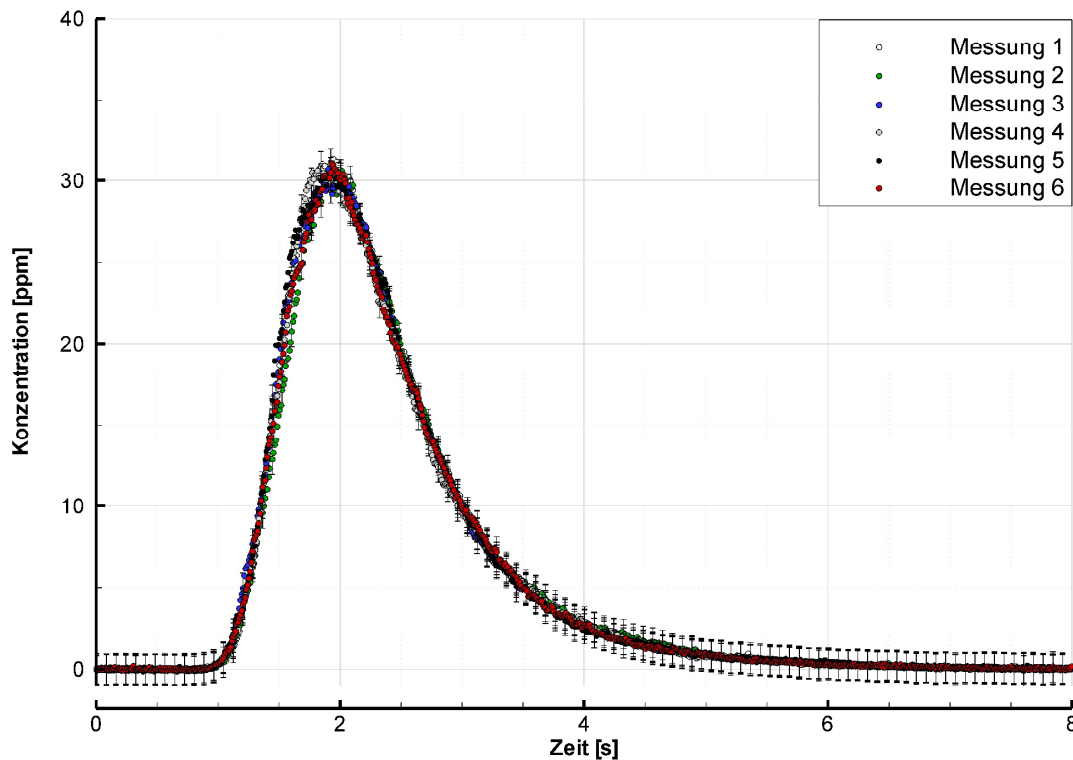


Abbildung 38: Mittlerer Konzentrationsverlauf, der auf Basis von 220 Puff-Freisetzungen für das Ausbreitungsszenario S4_170_FP17 insgesamt 6-mal bestimmt wurde. Die eingezeichneten Streubalken geben den ermittelten Vertrauensbereich der Konzentrationsmessungen von ± 0.93 ppm_v wieder.

Für alle 4 Ausbreitungsszenarien wurden die mittleren Puff-Parameter für sämtliche Wiederholungsmessungen bestimmt, um die Reproduzierbarkeit der Puff-Parameter quantifizieren zu können. Grafisch sind die Ergebnisse dieser Wiederholungsmessungen für die mittlere „arrival time“, mittlere „dosage“ und mittlere „peak concentration“ in den Abbildungen 39 bis 41 dargestellt. Die ermittelten Ergebnisse für die „peak time“ und „leaving time“ zeigen eine hohe Übereinstimmung zu denen der „arrival time“ auf und sind daher nicht grafisch dargestellt. Die eingezeichneten Streubalken geben jeweils für die 4 untersuchten Ausbreitungssituationen die aus den 5 bzw. 6 durchgeführten Wiederholungsmessungen ermittelte Streubreite wieder.

Zusätzlich zur grafischen Darstellung sind die Ergebnisse der Wiederholungsmessungen für sämtliche Puff-Parameter in Tabelle 10 zusammenfasst. Für alle vier Szenarien sind die

mittleren Puff-Parameter angegeben, die jeweils anhand sämtlicher gemessener Puffs der 5 bzw. 6 Wiederholungsmessungen bestimmt wurden. Die Unsicherheiten geben jeweils die Streubreite der 5 bzw. 6 Wiederholungsmessungen wieder. In Klammern ist die auf den jeweiligen mittleren Puff-Parameter bezogene relative Streubreite angegeben. Die ermittelten Streubreiten zeigen demzufolge an, mit welcher Genauigkeit die mittleren Puff-Parameter auf Basis einer 30-minütigen Messung bestimmt werden konnten.

Szenario	S2_170_AP26	S2_170_FP15	S4_170_AP33	S4_170_FP17
Puffs pro Messung	340	220	340	220
Anzahl der Messungen	5	6	6	6
mittlere at [s]	0.54 ± 0.01 (± 1.6 %)	1.67 ± 0.02 (± 1.5 %)	0.85 ± 0.02 (± 2.7 %)	1.37 ± 0.01 (± 1.0 %)
mittlere pt [s]	0.71 ± 0.01 (± 1.2 %)	2.08 ± 0.03 (± 1.4 %)	1.12 ± 0.03 (± 2.3 %)	1.77 ± 0.02 (± 1.3 %)
mittlere lt [s]	1.47 ± 0.01 (± 0.6 %)	4.35 ± 0.03 (± 0.7 %)	2.46 ± 0.06 (± 2.4 %)	3.95 ± 0.07 (± 1.7 %)
mittlere dosage [ppm _v]	50.6 ± 0.8 (± 1.5 %)	59.3 ± 1.7 (± 2.8 %)	24.4 ± 2.6 (± 10.7 %)	44.3 ± 1.5 (± 3.5 %)
mittlere pc [ppm _v]	209.6 ± 7.9 (± 3.8 %)	60.5 ± 2.9 (± 4.8 %)	61.9 ± 7.0 (± 11.3 %)	50.2 ± 2.2 (± 4.4 %)

Tabelle 10: Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter für 4 unterschiedliche Ausbreitungssituationen. Angegeben sind die mittleren Puff-Parameter, die anhand von 340 Ausbreitungsversuchen für die Ausbreitungssituationen S2_170_AP26 und S4_170_AP33 sowie auf Basis von 220 Ausbreitungsversuchen für die Ausbreitungssituationen S2_170_FP15 und S4_170_FP17 bestimmt wurden. Die zudem angegebene absolute und relative Streubreite gibt die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter wieder. Sie wurde auf Basis der 5 bis 6 Wiederholungsmessungen ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Bestimmungsgenauigkeit der verschiedenen mittleren Puff-Parameter unterschiedlich ausfällt. Für alle 4 Ausbreitungssituationen können die mittleren Reisezeiten („arrival time“, „peak time“ und „leaving time“) mit einer höheren Genauigkeit angegeben werden, als die mittlere „peak concentration“ und die mittlere „dosage“. Die ermittelte Streubreite der mittleren Reisezeiten liegt bei den 4 Ausbreitungssituationen zwischen ± 0.01 Sekunden und ± 0.07 Sekunden. Bezogen auf die jeweilige mittlere Reisezeit entspricht dies relativen Streubreiten von ± 0.6 % bis ± 2.7 %.

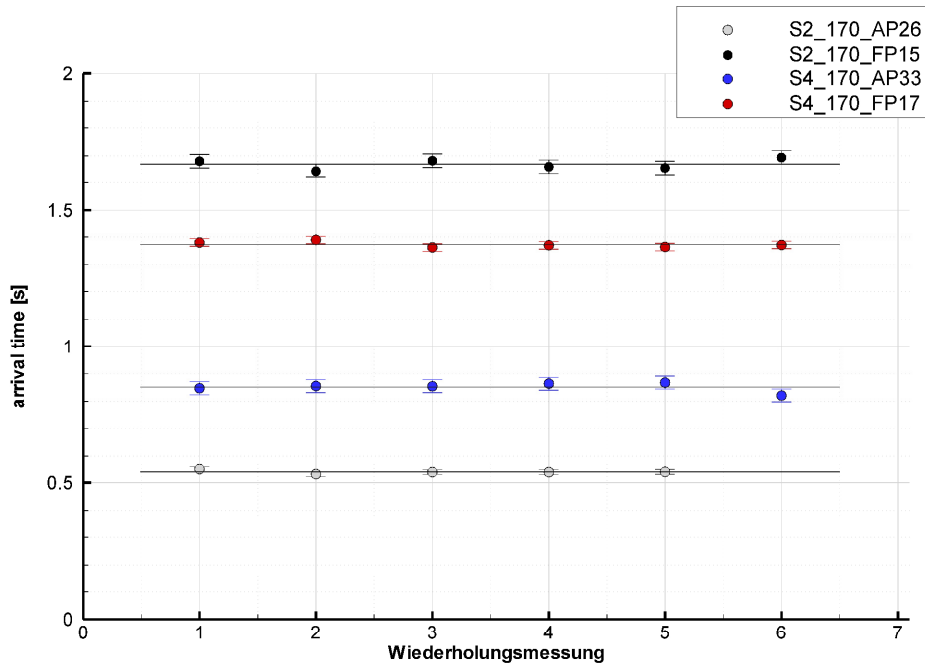


Abbildung 39: Experimentelle Überprüfung der Wiederholbarkeit der mittleren „arrival time“ auf Basis von 5 bis 6 Wiederholungsmessungen für 4 unterschiedliche Ausbreitungssituationen. Die mittlere „arrival time“ wurde bei jeder Messung anhand von 220 Ausbreitungsversuchen für die Ausbreitungssituationen S2_170_AP26 (S2 = Quellort, 170 = Windrichtung, AP26 = Messort) und S4_170_AP33 sowie auf Basis von 340 Ausbreitungsversuchen für die Ausbreitungssituationen S2_170_FP15 und S4_170_FP17 bestimmt.

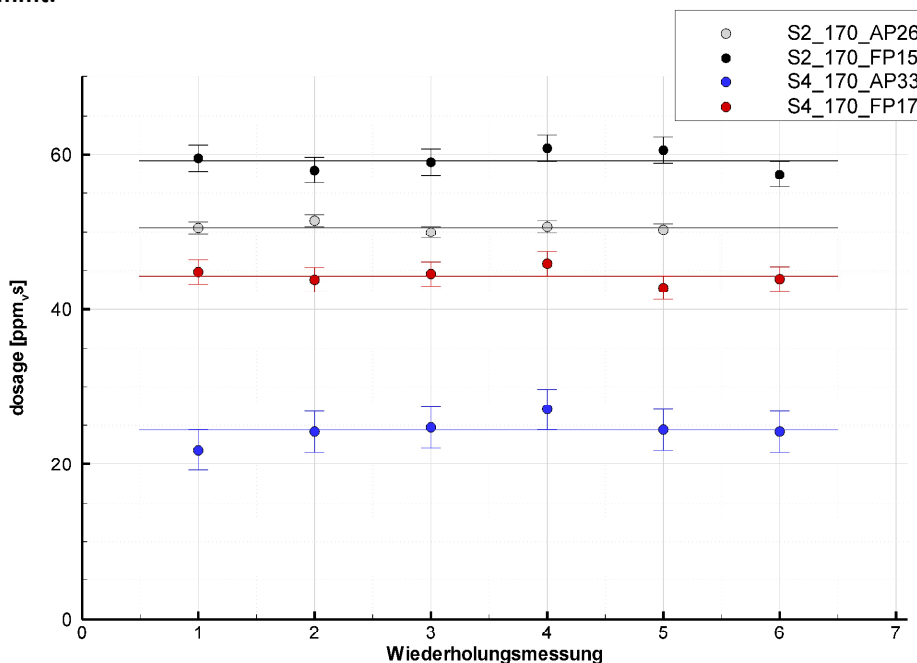


Abbildung 40: Experimentelle Überprüfung der Wiederholbarkeit der mittleren „dosage“ auf Basis von 5 bis 6 Wiederholungsmessungen für 4 unterschiedliche Ausbreitungssituationen. Die mittlere „dosage“ wurde bei jeder Messung anhand von 220 Ausbreitungsversuchen für die Ausbreitungssituationen S2_170_AP26 (S2 = Quellort, 170 = Windrichtung, AP26 = Messort) und S4_170_AP33 sowie auf Basis von 340 Ausbreitungsversuchen für die Ausbreitungssituationen S2_170_FP15 und S4_170_FP17 bestimmt.

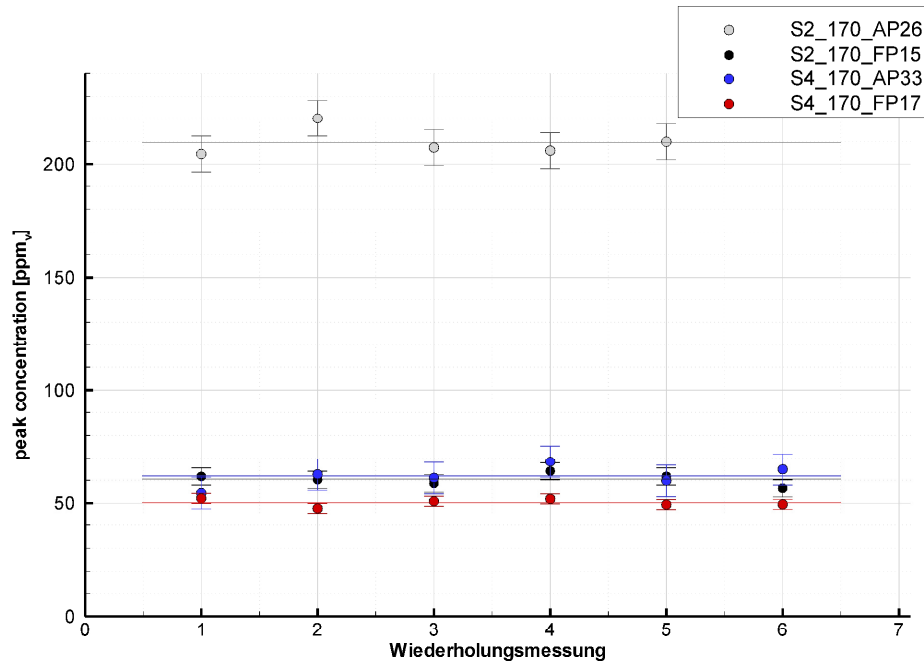


Abbildung 41: Experimentelle Überprüfung der Wiederholbarkeit der mittleren „peak concentration“ auf Basis von 5 bis 6 Wiederholungsmessungen für 4 unterschiedliche Ausbreitungssituationen. Die mittlere „peak concentration“ wurde bei jeder Messung anhand von 220 Ausbreitungsversuchen für die Ausbreitungssituationen S2_170_AP26 (S2 = Quellort, 170 = Windrichtung, AP26 = Messort) und S4_170_AP33 sowie auf Basis von 340 Ausbreitungsversuchen für die Ausbreitungssituationen S2_170_FP15 und S4_170_FP17 bestimmt.

Für die 4 Ausbreitungssituationen kann die mittlere „dosage“ mit einer Genauigkeit angegeben werden, die zwischen $\pm 0.8 \text{ ppm}_{\text{vS}}$ und $\pm 2.6 \text{ ppm}_{\text{vS}}$ liegt, während die Bestimmungsgenauigkeit der „peak concentration“ zwischen $\pm 2.2 \text{ ppm}_{\text{v}}$ und $\pm 7.9 \text{ ppm}_{\text{v}}$ liegt.

Bei einem Vergleich zwischen den Bestimmungsgenauigkeiten der mittleren Puff-Parameter muss allerdings berücksichtigt werden, dass zwar die Messzeit von 30 Minuten bei den Messungen identisch ausfiel, nicht aber die Anzahl der jeweils freigesetzten Puffs. Die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter kann von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Stichproben (Anzahl der freigesetzten Puffs) abhängig sein. Je geringer die Anzahl der Stichproben ist, desto höher ist die statistische Unsicherheit, mit der der jeweilige Mittelwert bestimmt werden kann. Die beiden Ausbreitungssituationen S4_170_AP33 und S2_170_AP26, die mit über $\pm 7 \text{ ppm}_{\text{v}}$ jeweils die größte Unsicherheit für den mittleren „peak concentration“-Parameter aufweisen, zählen zu den beiden Ausbreitungssituationen, bei denen mit jeweils 340 Freisetzungen die meisten Puffs innerhalb von 30 Minuten freigesetzt wurden.

Es ist zudem zu berücksichtigen, dass für die Ausbreitungssituation S4_170_AP33 nicht alle freigesetzten Wolken den Messort erreichen. Bei den insgesamt 6 durchgeführten 30-minütigen Messungen für diese Ausbreitungssituation sind von den jeweils 340 freigesetzten Wolken zwischen 25 und 37 nicht am Messort angekommen. Der Mittelwert der einzelnen Puff-Parameter wurde dementsprechend nur auf Basis der Wolken berechnet, die den Messort erreicht haben. Dies entsprach bei dieser Ausbreitungssituation im Mittel etwa 90 % der freigesetzten Wolken. Dennoch wurden für diese Ausbreitungssituation die mittleren Parameter über eine höhere Anzahl von Werten bestimmt, als bei den beiden Szenarien S2_170_FP15 und S4_170_FP17, die die höchste Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Parameter aufweisen. Die unterschiedliche Anzahl der berücksichtigten Stichproben erklärt dementsprechend nicht die unterschiedliche Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter.

Desweiteren hat die Variabilität der einzelnen Puffs innerhalb einer 30-minütigen Messung Einfluss auf die Bestimmungsgenauigkeit des Mittelwertes. Je höher die Variabilität der Werte ist und je breiter das Wertespektrum ausfällt, desto mehr Stichproben sind erforderlich, um den Mittelwert mit gleicher absoluter Genauigkeit angeben zu können. Die Variabilität der an einem Ort gemessenen Parameter lässt sich anhand der Standardabweichung der Messergebnisse aufzeigen. Tabelle 11 fasst die für die 4 unterschiedlichen Ausbreitungskonfigurationen ermittelten absoluten und relativen Standardabweichungen des „peak concentration“-Parameters zusammen. Hierbei wurde für jede Ausbreitungssituation die Standardabweichung der „peak concentration“ anhand der 220 bzw. 340 Versuche einer 30-minütigen Messung bestimmt und anschließend über die 5-6 durchgeführten Wiederholungsmessungen gemittelt. Die höchsten absoluten und relativen Standardabweichungen weisen für den „peak concentration“-Parameter die beiden Ausbreitungsszenarien auf, für die zuvor die größte Unsicherheit der mittleren „peak concentration“ ermittelt wurde (siehe Tabelle 10). Dies verdeutlicht, dass die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter von der Variabilität der Messergebnisse beeinflusst wird. In Tabelle 11 ist zudem die jeweils zugehörige mittlere „peak concentration“ und der jeweilige Abstand der Messorte zur Quelle angegeben.

Szenario	Mittelwert [ppm _v]	abs. Standardabw. [ppm _v]	rel. Standardabw. [%]	Abstand Quelle-Messort [m]
S2_170_AP26	209.6	± 136.0	± 64.9	153.8
S2_170_FP15	60.5	± 23.1	± 38.1	485.0
S4_170_AP33	61.9	± 54.6	± 88.2	129.0
S4_170_FP17	50.2	± 20.5	± 40.8	374.4

Tabelle 11: Variabilität einzelner Puff-Messungen am Beispiel des „peak concentration“-Parameters. Angegeben ist die mittlere „peak concentration“ sämtlicher durchgeführter Puff-Messungen (5-6 Wiederholungsmessungen mit jeweils 220 bzw. 340 Puffs pro Messung) für 4 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien. Die angegebene absolute und relative Standardabweichung der gemessenen „peak concentration“ wurde auf Basis der 220 bzw. 340 Puffs einer Messung bestimmt und anschließend über die 5-6 Wiederholungsmessungen gemittelt.

Verschiedene Faktoren können die Variabilität der Ausbreitungsprozesse und damit die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Parameter beeinflussen. Hierzu zählt z.B. die Turbulenzintensität der Strömung, die den Ausbreitungsprozess einer Wolke prägt. Bei hoher Turbulenzintensität einer Strömung, die durch signifikante Bodenrauigkeiten hervorgerufen wird, ist ein entsprechend breites Ausbreitungsspektrum der Wolken zu erwarten. Da sich allerdings die Rauigkeitsstrukturen, durch die die Wolken bei den 4 beschriebenen Szenarien ziehen, nicht wesentlich voneinander unterscheiden, kann die unterschiedliche Variabilität der Messergebnisse hierdurch nur zum Teil erklärt werden.

Eine mögliche Ursache für die unterschiedliche Variabilität der Messergebnisse ist durch den unterschiedlichen Quellabstand der Messorte bei den 4 Szenarien gegeben. In Tabelle 11 ist der jeweilige Quellabstand der 4 Ausbreitungsszenarien angegeben. Die größte absolute und relative Standardabweichung der gemessenen „peak concentration“ weisen die beiden Szenarien auf, bei denen der Abstand zwischen Quelle und Messort am kürzesten ist. Dies lässt sich damit erklären, dass die freigesetzte Konzentration einer Wolke in Quellnähe über ein relativ kleines Volumen verteilt ist. Dementsprechend weist die Wolke hier vergleichsweise hohe Konzentrationen und starke Konzentrationsgradienten auf. Mit zunehmender Zeit nach der Freisetzung und dementsprechend auch mit zunehmendem Quellabstand vermischt sich die freigesetzte Messgasmenge mit der Umgebungsluft und die Konzentrationsgradienten werden entsprechend geringer. Demzufolge ist zu erwarten, dass mit zunehmendem Abstand des Messortes zur Quelle die Variabilität der Puff-Parameter kleiner wird.

Es ist anzunehmen, dass in einem komplexen Stadtgebiet weitere Faktoren, wie beispielsweise die Lage des Quell- oder Messortes zu umliegenden Gebäuden, Einfluss auf die Variabilität der gemessenen Parameter nehmen. Dieser Einfluss kann nicht mit Hilfe der durchgeführten Messungen quantifiziert werden, da die Lage der Quell- und Messorte zu den umliegenden Gebäuden nicht systematisch variiert wurde.

Die bei den Wiederholungsmessungen ermittelte Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter (Tabelle 10) beinhaltet den Einfluss sämtlicher in diesem Kapitel beschriebenen Unsicherheiten, wie etwa die Unsicherheit der verwendeten Messgeräte oder die statistische Unsicherheit. Die Messungen haben gezeigt, dass die Güte der Wiederholbarkeit bezogen auf die mittleren Puff-Parameter sowohl vom jeweiligen Parameter, als auch vom Messort abhängig ist. Allerdings konnte aus zeitlichen Gründen nicht für jede Ausbreitungssituation die Reproduzierbarkeit der mittleren Puff-Parameter durch Wiederholungsmessungen bestimmt werden. Daher wurde die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter für alle Messungen auf Basis der 4 untersuchten Szenarien abgeschätzt. Sie liegt für die mittleren Reisezeiten (t_a , t_p und t_l) in einem Bereich von unter ± 0.07 Sekunden. Die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren „dosage“ liegt bei den durchgeführten 30-minütigen Messungen in einem Bereich von unter ± 2.6 ppm_{v,s}, während die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren „peak concentration“ unter ± 7.9 ppm_v liegt. Es ist hierbei anzumerken, dass die geringste Bestimmungsgenauigkeit bei dem Ausbreitungsszenario beobachtet wurde, bei dem der Abstand zwischen Quelle und Messort mit etwa 130 m am geringsten ausfiel. Dieser Abstand von 130 m zwischen Quelle und Messort zählt zu den kürzesten der gesamten Messkampagne. Unter der Annahme, dass die Wiederholbarkeit der mittleren Puff-Parameter insbesondere im Nahbereich der Quelle durch den geringen Quellabstand des Messortes negativ beeinflusst wird, ist die ermittelte Unsicherheit in etwa als oberer Grenzwert für die Messungen der vorliegenden Arbeit anzusehen.

Es ist zu berücksichtigen, dass die Wiederholbarkeit der mittleren Puff-Parameter für Ausbreitungssituationen ermittelt wurde, bei denen jeweils über 200 freigesetzte Wolken (Puffs) den Messort erreicht haben. Dies ist nicht für alle durchgeführten Ausbreitungs-

versuche der Fall. Von den insgesamt 167 durchgeführten 30-minütigen Messungen können die mittleren Puff-Parameter bei 139 dieser Messungen auf Basis von mindestens 200 Puffs bestimmt werden. Bei den übrigen 30 Messungen wurden weniger als 200 Puffs am Messort registriert. Dies trifft insbesondere für Messorte zu, die am Rand des mittleren Puff-Ausbreitungsbereiches für ein bestimmtes Szenario liegen. Es ist wahrscheinlich, dass diese Versuche aufgrund einer geringeren Anzahl von zur Verfügung stehenden Ergebnissen (Stichproben) eine höhere Unsicherheit bei der Bestimmung der mittleren Puff-Parameter aufweisen als die 4 Szenarien, für die die mittleren Puff-Parameter auf Basis von über 200 Puffs bestimmt wurden (siehe Tabelle 10). Die zuvor ermittelte Bestimmungsunsicherheit der mittleren Puff-Parameter ist dementsprechend nicht auf diese 30 Versuche zu übertragen. Da die Genauigkeit der Ergebnisse für diese 30 Einzelversuche nicht hinreichend gut quantifiziert werden kann, werden die Ergebnisse im Zuge der weiteren Betrachtungen nicht verwendet.

8.3.3 Bestimmungsgenauigkeit von Extremwertereignissen

Ziel der durchgeführten Ausbreitungsversuche war nicht allein die zuverlässige Bestimmung der mittleren Puff-Parameter, sondern auch die Abschätzung seltener Extremwertereignisse für eine bestimmte Ausbreitungssituation. Wie bereits erläutert, weisen identische Gaswolken, die unter gleichen mittleren Randbedingungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in einer turbulenten Strömung freigesetzt werden, ein Spektrum unterschiedlicher Ausbreitungsverläufe auf. Das gesamte Spektrum einer Ausbreitungssituation ist charakterisiert durch eine Menge von möglichen Ergebnissen, die mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten auftreten. Seltene Extremwertereignisse, wie z.B. besonders kurze oder lange Reisezeiten, treten mit einer entsprechend geringen Wahrscheinlichkeit auf. Es ist daher zu überprüfen, mit welcher Repräsentativität diese Ereignisse anhand der durchgeführten Messungen bestimmt werden konnten.

Abbildung 42 zeigt die normierten Häufigkeitsverteilungen für den „arrival time“-Parameter, die auf Basis von 1700 Ausbreitungsversuchen (links) und 340 Ausbreitungsversuchen (rechts) für das bereits zuvor beschriebene Ausbreitungsszenario S2_170_AP26 ermittelt wurden. Die 340 Freisetzungen wurden innerhalb einer 30-minütigen Messung

freigesetzt, während die 1700 Ausbreitungsversuche insgesamt in 5 Wiederholungsmessungen aufgenommen wurden.

Die Abbildung 42 (links) zeigt, dass anhand von 1700 Ausbreitungsversuchen eine relativ glatte Häufigkeitsverteilung für den „arrival time“-Parameter bestimmt werden konnte. Die ermittelte Verteilung entspricht näherungsweise einer Gauß'schen Normalverteilung. Diese kann anhand der 1700 Stichproben mit einer Bestimmtheit von $r^2 \approx 0.97$ angegeben werden. Die ermittelte Normalverteilung ist als durchgezogene Linie in der Abbildung dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass anhand von 1700 Stichproben das Ergebnispektrum gut abgeschätzt werden kann. Die ermittelte Häufigkeitsverteilung weist selbst an den Rändern des Spektrums eine gute Übereinstimmung zur Gauß'schen Normalverteilung auf. Extremwertereignisse, wie besonders kurze oder lange Reisezeiten, werden dementsprechend gut von den durchgeführten Versuchen abgebildet.

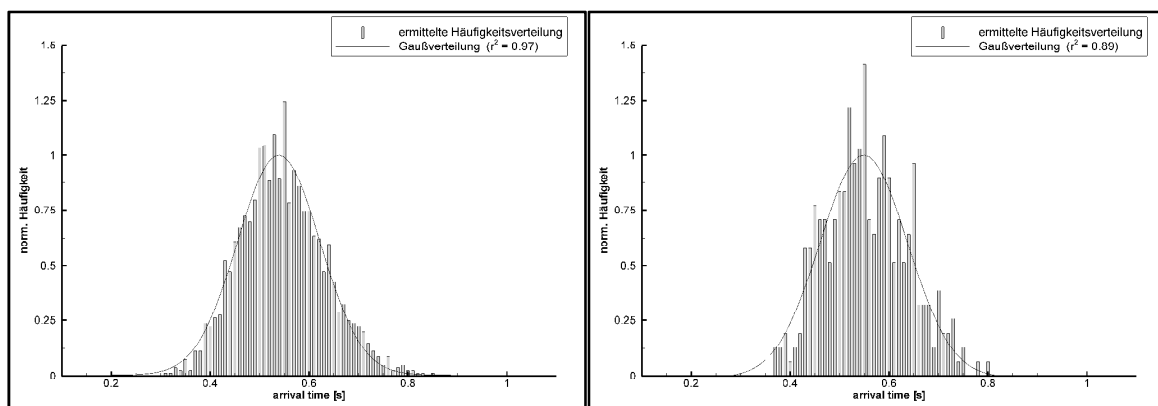


Abbildung 42: Ermittelte normierte Häufigkeitsverteilung für den „arrival time“-Parameter auf Basis von 1700 Ausbreitungsversuchen (links) und 340 Ausbreitungsversuchen (rechts) für das Szenario S2_170_AP26.

Wie zu erwarten, weist die auf Basis von 340 Freisetzungen ermittelte Häufigkeitsverteilung (Abbildung 42, rechts) gegenüber der Häufigkeitsverteilung, die anhand von 1700 Freisetzungen bestimmt wurde, aufgrund der geringeren Anzahl zur Verfügung stehender Stichproben einen weniger glatten Verlauf auf. In diesem Fall entspricht die ermittelte Verteilung mit einer Bestimmtheit von $r^2 \approx 0.89$ einer Gauß'schen Normalverteilung. Sie ist in dieser Abbildung als durchgezogene Linie dargestellt.

Die Abbildung 42 (rechts) zeigt, dass die ermittelten Werte einzelner Klassen deutliche Differenzen (Residuen) gegenüber der Normalverteilung aufweisen. Einzelne Klassen im Randbereich des Spektrums sind nicht besetzt. Dies hat beispielsweise zur Folge, dass die kürzeste gemessene „arrival time“ dieser 340 Freisetzungen bei 0.365 Sekunden liegt, während die kürzeste gemessene „arrival time“ aller 1700 Messungen 0.305 Sekunden beträgt. Bezogen auf die mittlere „arrival time“ aller 1700 Ausbreitungsversuche entspricht dies einer prozentualen Differenz von über 11%. Dieses Beispiel zeigt, dass die direkte Extremwertbestimmung anhand des kleinsten oder größten Messwertes auf Basis von 340 Ausbreitungsversuchen zu Ungenauigkeiten führen kann.

Es muss zudem berücksichtigt werden, dass auf Basis eines limitierten Datensatzes nicht mit absoluter Sicherheit der kleinste oder größte mögliche Wert bestimmt werden kann. Es bleibt stets die Möglichkeit, dass eine größere Anzahl von Stichproben zu einem noch kleineren bzw. größeren Wert führt. Mit einer zunehmenden Anzahl von Stichproben nimmt lediglich die Wahrscheinlichkeit ab, einen noch kleineren bzw. größeren Wert zu messen. Es ist daher nicht überprüfbar, ob die größten bzw. kleinsten gemessenen Werte der insgesamt 1700 durchgeführten Ausbreitungsversuche den möglichen Extremwerten für dieses Szenario entsprechen. Aus diesem Grund wurde davon abgesehen die Unsicherheit zu ermitteln, mit der sich der größte bzw. kleinste Wert bestimmen lässt.

Stattdessen wird nachfolgend die Unsicherheit bestimmt, mit der sich ein definierter Extremwertbereich ermitteln ließ. Da das Ergebnisspektrum der Puff-Parameter bei genügend hoher Stichproben-Anzahl eine Normalverteilung aufweist (siehe Abbildung 42), lässt sich die Wahrscheinlichkeit bestimmen, mit der ein Wert in einem ausgewählten Wertebereich liegt. Für die Bestimmung des Extremwertbereiches wurde ein 95%-Intervall definiert, in dem sich ein beliebiger Messwert mit einer 95-prozentigen Wahrscheinlichkeit befindet. Außerhalb der unteren und oberen Grenze dieses Intervalls befinden sich dementsprechend die Extremwertbereiche der 2.5% größten und kleinsten Werte des jeweiligen Ausbreitungsszenarios. Die 5 Wiederholungsmessungen, bei denen jeweils 340 Ausbreitungsversuche durchgeführt wurden, ermöglichen es, die Bestimmungsgenauigkeit der oberen und unteren Grenze des 95%-Intervalls zu quantifizieren. Hierfür wurde jeweils über einen „best fit“ die Normalverteilung aller 5 Puff-Parameter für die 5

Wiederholungsmessungen bestimmt. Anhand der ermittelten Normalverteilungen wurde anschließend die untere und obere Grenze des 95%-Intervalls ermittelt. Tabelle 12 fasst die mittleren unteren und mittleren oberen Grenzen der 95%-Intervalle für sämtliche Puff-Parameter zusammen. Angegeben sind zudem die aus den 5 Wiederholungsmessungen ermittelten absoluten und relativen Standardabweichungen der mittleren oberen und unteren Grenzen der 95%-Intervalle.

Tabelle 12 zeigt, dass die Grenzen eines 95%-Intervalls für sämtliche Reisezeiten („arrival time“, „peak time“ und „leaving time“) mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 1\%$ anhand der insgesamt 340 durchgeführten Ausbreitungsversuche bestimmt werden können. Beim „dosage“- und „peak concentration“-Parameter liegt diese Bestimmungsgenauigkeit bei unter $\pm 4\%$. Die ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die Extremwertbereiche (2.5% kleinsten und größten möglichen Werte) eines Ausbreitungsszenarios anhand von 340 Ausbreitungsversuchen für sämtliche Puff-Parameter mit einer Unsicherheit von unter 4 % relativ genau bestimmt werden können.

	95 % Intervall untere Grenze		95 % Intervall obere Grenze	
arrival time	0.41 \pm 0.005 s	($\pm 1.3\%$)	0.69 \pm 0.008 s	($\pm 1.1\%$)
peak time	0.49 \pm 0.004 s	($\pm 0.9\%$)	0.98 \pm 0.008 s	($\pm 0.8\%$)
leaving time	1.15 \pm 0.009 s	($\pm 0.9\%$)	1.83 \pm 0.018 s	($\pm 1.0\%$)
dosage	21.4 \pm 0.8 ppm _{v,s}	($\pm 3.9\%$)	89.6 \pm 0.9 ppm _{v,s}	($\pm 1.0\%$)
peak concentration	71.2 \pm 2.5 ppm _v	($\pm 3.5\%$)	458.8 \pm 15.0 ppm _v	($\pm 3.3\%$)

Tabelle 12: Angegeben sind die mittleren unteren und mittleren oberen Grenzen von 95%-Intervallen der Normalverteilungen, die bezogen auf die 5 angegebenen Puff-Parameter für das Ausbreitungsszenario S2_170_AP26 ermittelt wurden. Der Mittelwert der unteren und oberen Grenze sowie die angegebene absolute und relative Standardabweichung wurden auf Basis von 5 Wiederholungsmessungen ermittelt, bei denen jeweils 340 Ausbreitungsversuche durchgeführt wurden.

Sehr ähnliche Ergebnisse weisen die anderen analysierten Szenarien (S4_170_AP33, S2_170_FP15 und S4_170_FP17) auf, für die ebenfalls mehrere Wiederholungsmessungen durchgeführt wurden. Das Ausbreitungsszenario S4_170_AP33, bei dem ebenfalls 340 Versuche innerhalb einer Konzentrationsmessung durchgeführt wurden und bei welchem ein vergleichbarer Quellabstand des Messortes vorliegt (siehe Tabelle 11), weist eine nahezu identische Bestimmungsgenauigkeit des 95%-Intervalls auf. Die Grenzen des ausgewählten 95%-Intervalls lassen sich für sämtliche Reisezeiten mit einer Genauigkeit von

etwa $\pm 1\%$ und beim „dosage“- und „peak concentration“-Parameter mit etwa $\pm 4\%$ bestimmen.

Die beiden übrigen Szenarien S2_170_FP15 und S4_170_FP17 zeigen eine unwesentlich höhere Bestimmungsgenauigkeit für die Grenzen des 95%-Intervalls auf, obwohl bei diesen Szenarien lediglich 220 Ausbreitungsversuche in einer 30-minütigen Messung durchgeführt wurden. Bei diesen Szenarien konnten die unteren und oberen Grenzen der 95%-Intervalle für die Reisezeiten der Wolken wiederum mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 1\%$ bestimmt werden, während die Bestimmungsgenauigkeit dieser Grenzen für den „dosage“- und „peak concentration“-Parameter bei unter $\pm 3\%$ liegt. Eine mögliche Ursache für die etwas höhere Bestimmungsgenauigkeit, trotz einer geringeren Anzahl von zur Verfügung stehenden Stichproben, ist durch den größeren Quellabstand der beiden Messorte und die damit verbundene geringere Variabilität der Messergebnisse gegeben (siehe Tabelle 11). Da das Szenario S2_170_AP26 zu den Szenarien der Versuchskampagne zählt, deren Messorte den kürzesten Abstand zur Quelle aufweisen, sind die in Tabelle 12 für sämtliche Puff-Parameter angegebenen Unsicherheiten der unteren und oberen Grenzen der 95%-Intervalle diesbezüglich in etwa als größte mögliche Unsicherheiten sämtlicher Messungen der Kampagne anzusehen.

Die für unterschiedliche Ausbreitungsszenarien durchgeführten Wiederholungsmessungen haben aufgezeigt, dass anhand der durchgeführten 30-minütigen Konzentrationsmessungen, bei denen zwischen 200 und 400 Ausbreitungsversuche durchgeführt wurden, sowohl die mittleren Puff-Parameter als auch die Extremwertbereiche sämtlicher Puff-Parameter mit einer hohen Genauigkeit bestimmt werden konnten.

8.4 Skalierbarkeit der Ausbreitungsversuche

In diesem Kapitel wird die Skalierbarkeit der Puff-Parameter und damit die Allgemeingültigkeit der ermittelten Ergebnisse überprüft. Randbedingungen, wie etwa die vorherrschende Windgeschwindigkeit während eines Ausbreitungsversuches, nehmen Einfluss auf die Ergebnisse der Messungen. So führt beispielsweise eine höhere mittlere Windgeschwindigkeit zu einer schnelleren Ausbreitung einer freigesetzten Gaswolke. Ist der Einfluss der Randbedingungen auf das Ergebnis bekannt, können die bei bestimmten Rand-

bedingungen ermittelten Ergebnisse auf beliebige Bedingungen übertragen werden. Der Nachweis der Skalierbarkeit der Messergebnisse ist demzufolge für Labormessungen von fundamentaler Bedeutung, denn sonst besäßen die ermittelten Ergebnisse nur Gültigkeit für die jeweiligen Versuchsbedingungen.

Es ist daher üblich, Messergebnisse in dimensionsloser Form anzugeben, da sie hierdurch zum einen unabhängig von den jeweiligen Randbedingungen sind und zum anderen für den Vergleich mit anderen Messergebnissen leicht auf deren Randbedingungen skaliert werden können. Für Ausbreitungsuntersuchungen, bei denen kontinuierlich Gas freigesetzt wird, ist nach der VDI Richtlinie 2000 die dimensionslose Konzentration c^* gegeben durch:

$$c^* = \frac{c \cdot U_{ref} \cdot L_{ref}^2}{Q} \quad 8.1$$

Die gemessene Konzentration c wird in diesem Fall von der Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} , einer Referenzlänge L_{ref} , über die der Einfluss des jeweiligen Maßstabes einfließt, und von dem Emissionsvolumenstrom Q beeinflusst. Diese Formel ist allerdings auf die Ausbreitungsuntersuchungen der vorliegenden Kampagne nicht übertragbar, da das Messgas bei den Puff-Versuchen nicht kontinuierlich sondern kurzzeitig freigesetzt wurde. Es ist folglich zu überprüfen, ob die Ergebnisse der Puff-Versuche skalierbar sind und in eine dimensionslose Form überführt werden können. Neben dem gewählten Modellmaßstab nehmen die Windgeschwindigkeit und die jeweils freigesetzte Gasmenge Einfluss auf die Ergebnisse der Puff-Versuche. Da bei den durchgeführten Versuchen Puffs anhand sehr kurzer Freisetzungsdauern generiert wurden, hing die freigesetzte Gasmenge sowohl vom Emissionsvolumenstrom (Quellstärke) als auch von der jeweiligen Freisetzungsdauer ab. Es ist deshalb der Einfluss der Windgeschwindigkeit, der Quellstärke und der Freisetzungsdauer auf die Ergebnisse der Puff-Versuche zu untersuchen.

Wie in Kapitel 8.1 beschrieben, wird in dieser Arbeit der Ausbreitungsprozess einer Gaswolke anhand von fünf Puff-Parametern charakterisiert. Die Skalierbarkeit dieser Puff-Parameter bezüglich unterschiedlicher Randbedingungen wird separat überprüft. Es ist z.B. zu erwarten, dass die Freisetzungsmenge bei einem Versuch Einfluss auf die gemess-

sene Dosis nimmt, während dies die Reisezeiten der Wolke nicht beeinflusst. Um die Skalierbarkeit der Puff-Parameter zu überprüfen, wurden Wiederholungsmessungen durchgeführt, bei denen jeweils 2 der drei Randbedingungen (Windgeschwindigkeit, Quellstärke und Freisetzungsdauer) konstant blieben, während die dritte systematisch verändert wurde.

8.4.1 Einfluss der Quellstärke auf die Ergebnisse der Puff-Messungen

Der Einfluss der Quellstärke auf die Ergebnisse der Puff-Versuche wurde für zwei unterschiedliche Messszenarien (S2_170_AP26 und S2_170_FP15) überprüft. Abbildung 43 zeigt die genaue Lage der beiden Messorte (AP26 und FP15) und des Quellortes (S2) dieser beiden Szenarien im Stadtgebiet von Oklahoma City.

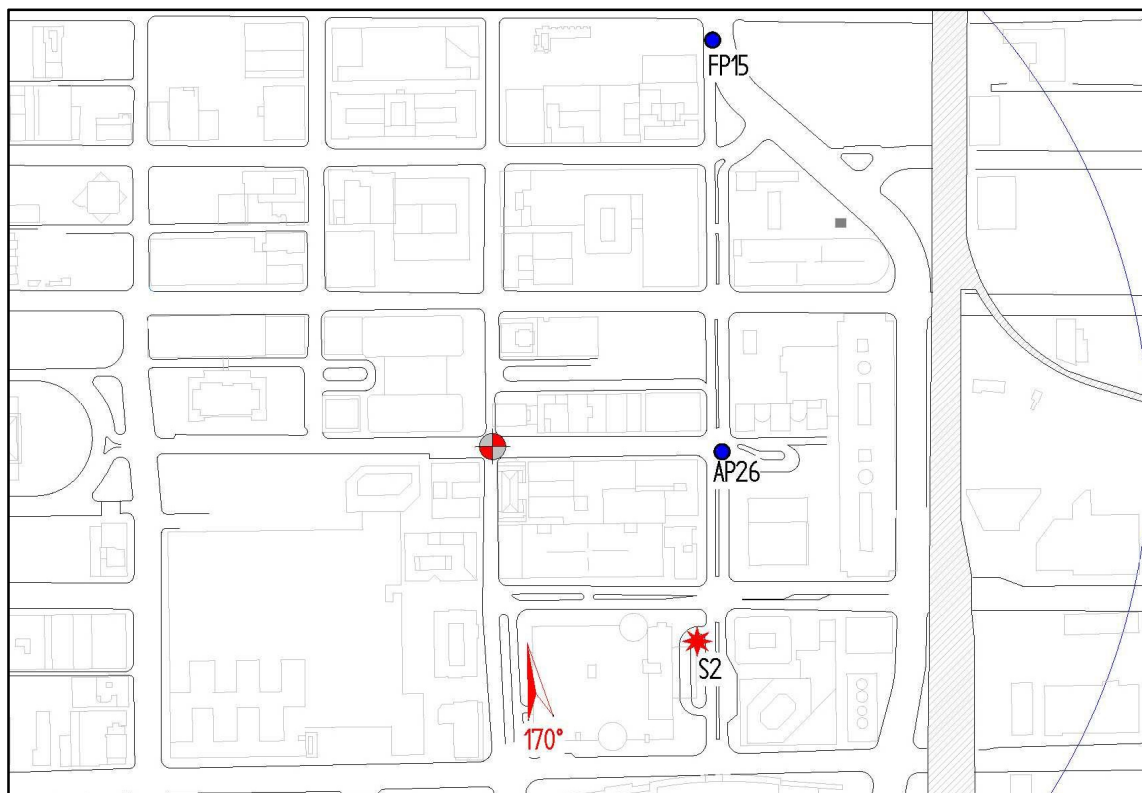


Abbildung 43: Lage der Messorte (blaue Kreise) und des Quellortes „S2“ (roter Stern) im Stadtgebiet von Oklahoma City im Fall von zwei Ausbreitungsszenarien (S2_170_AP26 und S2_170_FP15), für die der Einfluss der Quellstärke auf die Messergebnisse anhand mehrerer Wiederholungsmessungen mit unterschiedlichen Quellstärken untersucht wurde. Bei den jeweils 30-minütigen Wiederholungsmessungen wurden zwischen 210 und 400 Puffs freigesetzt. Die mittlere Windrichtung betrug für sämtliche Versuche 170°. Die Messhöhe betrug bei beiden Messorten 2 m über Grund im Naturmaßstab.

Tabelle 13 fasst die gewählte mittlere Windgeschwindigkeit U_{ref} (am Referenzort in 80 m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab stromaufwärts des Stadtmodells von Oklahoma City) und die mittleren Freisetzungsdauern der einzelnen Puffs für diese beiden Szenarien zusammen. Angegeben sind zudem die Anzahl der durchgeführten 30-minütigen Messungen und die Anzahl der pro Messung freigesetzten Puffs. Während die Windgeschwindigkeit und Freisetzungsdauer bei den Messungen jeweils konstant blieb, wurde die Quellstärke systematisch verändert. Die in Tabelle 13 angegebenen Unsicherheiten geben jeweils die Streubreite wieder, die anhand der 3 bzw. 5 Wiederholungsmessungen ermittelt wurde.

	Anzahl der Messungen	Puffs pro Messung	U_{ref} [m/s]	Freisetzungsdauer [s]
S2_170_AP26	5	415	4.20 ± 0.01	0.30 ± 0.004
S2_170_FP15	3	210	2.43 ± 0.01	0.49 ± 0.004

Tabelle 13: Ausbreitungsszenarien, für die der Einfluss der Quellstärke auf das Ergebnis der Puff-Versuche untersucht wurde. Angegeben ist die Anzahl der durchgeführten 30-minütigen Messungen, bei denen die Quellstärke systematisch verändert wurde, die Anzahl der Puffs, die pro Messung am Messort registriert wurden, die mittlere Windgeschwindigkeit U_{ref} in 80 m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab und die mittlere Freisetzungsdauer.

In Abbildung 44 ist die gemessene mittlere „dosage“ jeder Einzelmessung gegen die jeweils bei den Messungen ausgewählte Quellstärke aufgetragen. Die Quellstärke ist in Litern pro Stunde angegeben. Die Abbildung zeigt, dass für beide Szenarien mit zunehmender Quellstärke und dementsprechend mit zunehmender Freisetzungsmenge die gemessene mittlere „dosage“ erwartungsgemäß ansteigt. Eingezeichnet ist in der Abbildung für beide untersuchten Szenarien zudem die ermittelte Regressionsgerade, die die lineare Zunahme der gemessenen mittleren „dosage“ mit zunehmender Quellstärke aufzeigt. Die Abweichungen der mittleren Messwerte von den Regressionsgeraden liegen innerhalb der eingezeichneten Unsicherheiten, die im Kapitel 8.3 (siehe Tabelle 10 auf Seite 119) ermittelt wurden.

Die entsprechenden Ergebnisse für den „peak concentration“-Parameter dieser Messungen sind in Abbildung 45 dargestellt. Die in der Abbildung eingezeichnete Regressionsgerade zeigt den linearen Zusammenhang zwischen der Quellstärke und der gemessenen mittleren „peak concentration“ auf.

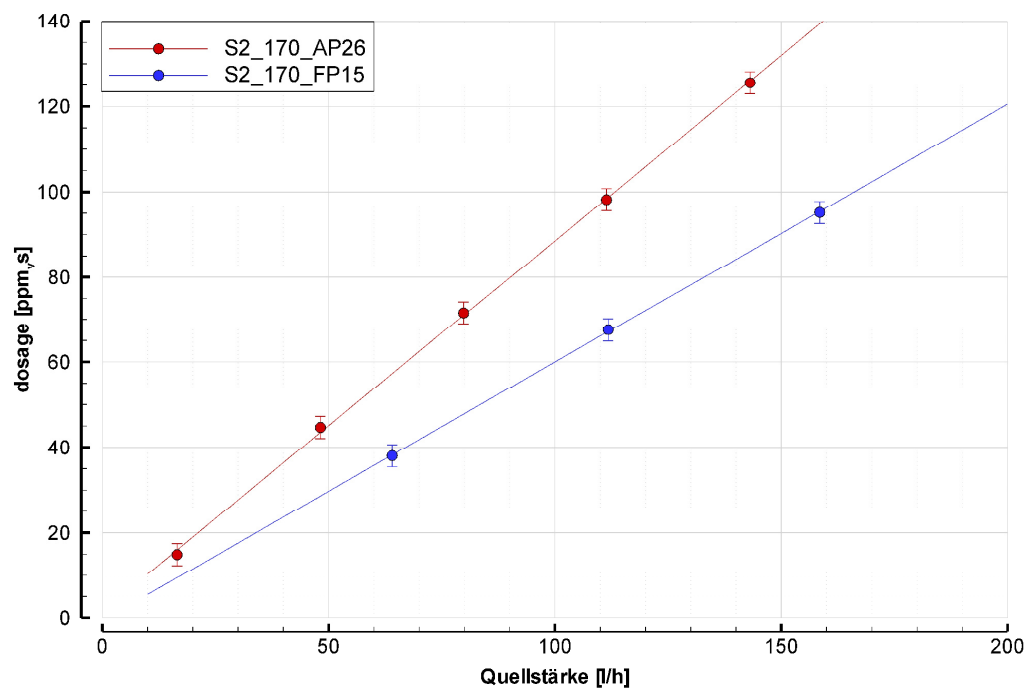


Abbildung 44: Bei systematisch variierten Quellstärken für 2 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (siehe Legende) gemessene mittlere „dosage“, aufgetragen gegen die jeweilige Quellstärke. Eingezeichnet ist für die beiden untersuchten Ausbreitungsszenarien zudem die jeweils ermittelte Regressionsgerade.

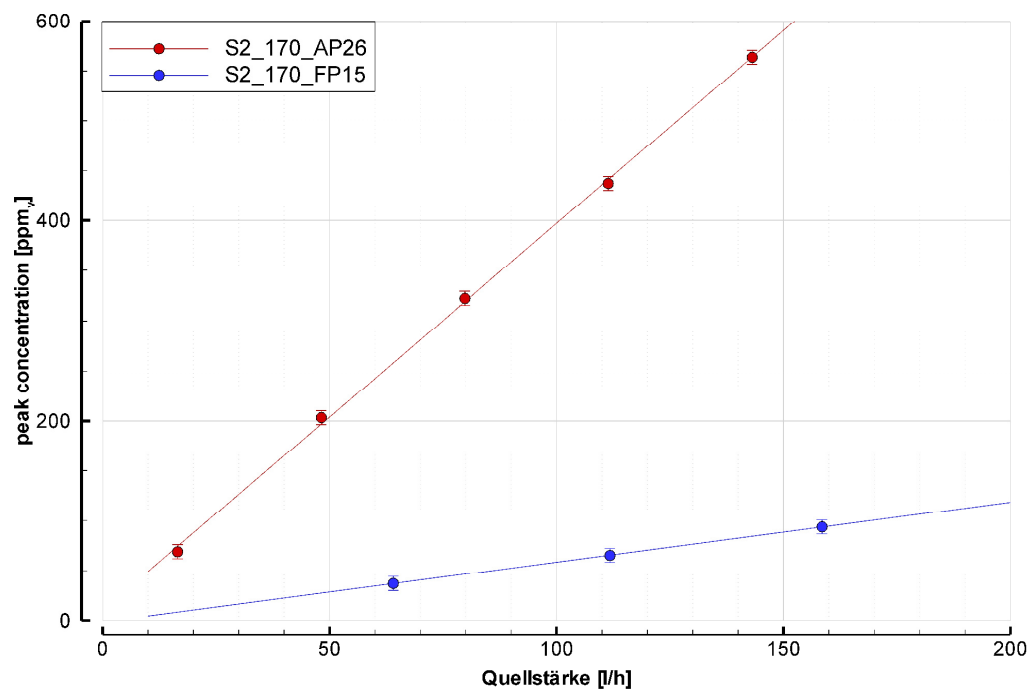


Abbildung 45: Bei systematisch variierten Quellstärken für 2 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (siehe Legende) gemessene mittlere „peak concentration“, aufgetragen gegen die jeweilige Quellstärke. Eingezeichnet ist für die beiden untersuchten Ausbreitungsszenarien zudem die jeweils ermittelte Regressionsgerade.

Die Abweichungen der mittleren Messwerte von der jeweils bestimmten Regressionsgerade liegen auch in diesem Fall innerhalb der ermittelten Unsicherheiten (siehe Tabelle 10 auf Seite 119).

In Abbildung 46 sind die Ergebnisse dieser Messungen für die Reisezeiten („arrival time“, „peak time“ und „leaving time“) zusammengefasst. Die in dieser Abbildung eingezeichneten horizontalen Linien geben jeweils die mittlere Reisezeit der bei unterschiedlichen Quellstärken durchgeführten Messungen wieder. Der Abbildung ist für beide untersuchten Ausbreitungsszenarien zu entnehmen, dass die mittleren Reisezeiten unabhängig von der jeweiligen Quellstärke sind.

Die durchgeführten Versuche, bei denen die Quellstärke systematisch variiert wurde, zeigen demnach, dass mit zunehmender Quellstärke die mittlere „dosage“ und mittlere „peak concentration“ linear ansteigt, während die mittleren Reisezeiten konstant bleiben.

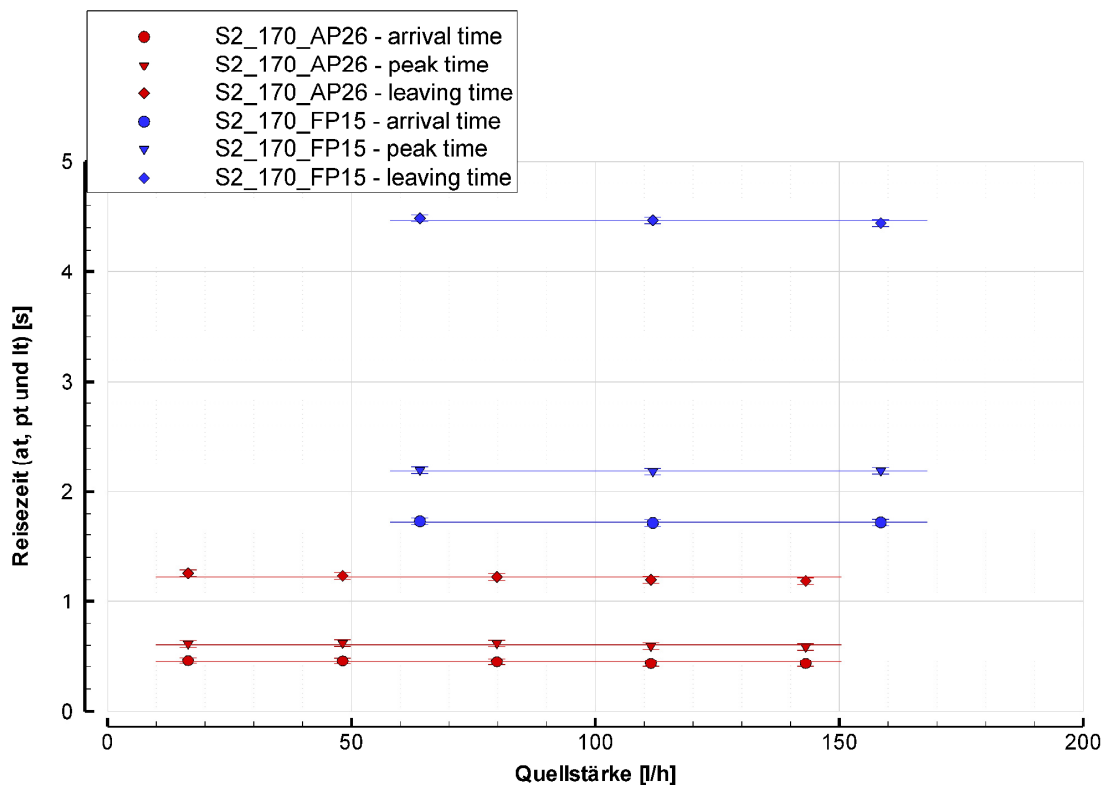


Abbildung 46: Bei systematisch variierten Quellstärken für 2 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (siehe Legende) gemessene mittlere Reisezeiten („arrival time“, „peak time“ und „leaving time“), aufgetragen gegen die jeweilige Quellstärke. Die durchgezogenen Linien geben jeweils die Mittelwerte aller Wiederholungsmessungen wieder.

8.4.2 Einfluss der Freisetzungsdauer auf die Ergebnisse der Puff-Messungen

Der Einfluss der Freisetzungsdauer auf die Ergebnisse der Puff-Versuche wurde für insgesamt 6 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien untersucht. Abbildung 47 (links) zeigt die Lage der Mess- und Quellorte der Szenarien, bei denen die mittlere Windrichtung 170° betrug, während Abbildung 47 (rechts) die Messkonfigurationen aufzeigt, bei denen eine mittlere Windrichtung von 150° vorherrschte. Korrespondierende Quell- und Messorte sind jeweils durch die gleiche Farbe gekennzeichnet. Die Anzahl der durchgeführten Wiederholungsmessungen pro Szenario und die Anzahl der hierbei pro Messung freigesetzten Puffs sind in Tabelle 14 zusammengefasst. In dieser Tabelle sind ebenfalls die mittlere Windgeschwindigkeit und die mittlere Quellstärke der durchgeführten Messungen aufgelistet. Die angegebenen Unsicherheiten der mittleren Windgeschwindigkeit und der mittleren Quellstärke geben jeweils die Streubreite der 5 bzw. 6 Wiederholungsmessungen wieder. Während die Windgeschwindigkeit und die Quellstärke bei den durchgeführten Wiederholungsmessungen jeweils konstant blieben, wurden für die Freisetzungsdauer Werte zwischen etwa 0.3 Sekunden und 2 Sekunden im Modellmaßstab gewählt. Übertragen auf den Naturmaßstab entspricht dies bei gleicher mittlerer Windgeschwindigkeit Freisetzungsdauern zwischen etwa $1\frac{1}{2}$ Minuten und 10 Minuten.

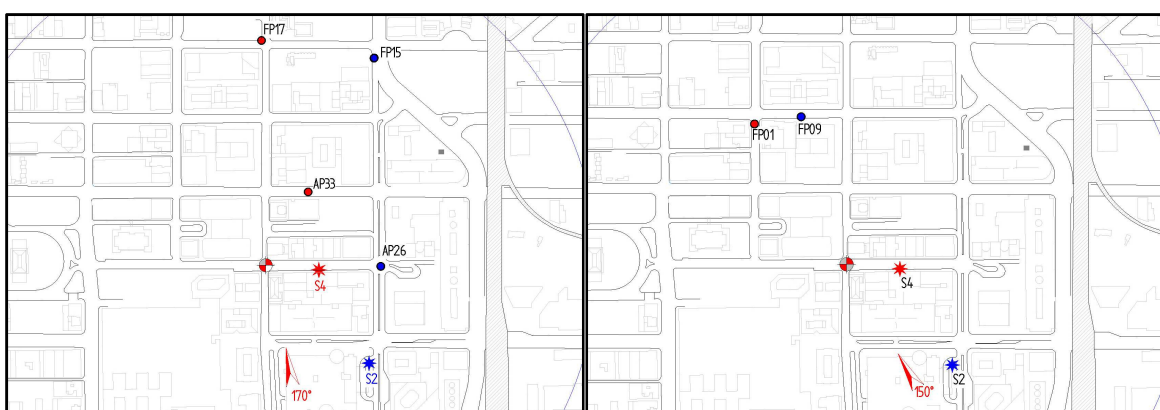


Abbildung 47: Lage der Mess- und Quellorte im Stadtgebiet von Oklahoma City der insgesamt 6 unterschiedlichen Ausbreitungsszenarien, für die der Einfluss der Freisetzungsdauer auf die Messergebnisse anhand mehrere Wiederholungsmessungen mit unterschiedlichen Freisetzungsdauern untersucht wurde (linke Abbildung für eine mittlere Windrichtung von 170° und in der rechten Abbildung für eine mittlere Windrichtung von 150°). Rot bzw. blau markiert sind die jeweils zugehörigen Quell- und Messorte. Die Messhöhe betrug bei sämtlichen Messorten 2 m über Grund im Naturmaßstab.

	Anz. der Messungen	Puffs pro Messung	U _{ref} [m/s]	Quellstärke [l]
S2_170_AP26	5	250-340	3.45 ± 0.01	48.5 ± 0.01
S2_170_FP15	6	200-220	2.42 ± 0.01	158.5 ± 0.01
S4_170_AP33	5	250-320	3.51 ± 0.01	158.5 ± 0.01
S4_170_FP17	5	200-215	3.10 ± 0.01	158.5 ± 0.01
S4_150_FP01	5	200-215	2.48 ± 0.01	158.5 ± 0.01
S2_150_FP09	5	220-280	2.46 ± 0.01	158.5 ± 0.01

Tabelle 14: Ausbreitungsszenarien, für die der Einfluss der Freisetzungsdauer auf das Ergebnis der Puff-Versuche untersucht wurde. Angegeben ist die Anzahl der durchgeführten 30-minütigen Messungen, bei denen die Freisetzungsdauer systematisch verändert wurde, die Anzahl der Puffs, die pro Messung am Messort registriert wurden, die mittlere Windgeschwindigkeit U_{ref} in 80 m Höhe über dem Boden (im Naturmaßstab am Referenzort) gemessen und die mittlere Quellstärke.

Abbildung 48 zeigt die für verschiedene Freisetzungsdauern gemessene mittlere „dosage“ der 6 untersuchten Szenarien, aufgetragen gegen die jeweils bei den Messungen ausgewählte Freisetzungsdauer. Die Abbildung zeigt, dass mit zunehmender Freisetzungsdauer die gemessene mittlere „dosage“ ansteigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Freisetzungsdauer bei konstanter Quellstärke die jeweils freigesetzte Gasmenge zunimmt. Die für die 6 Szenarien ermittelten Regressionsgeraden verdeutlichen jeweils den linearen Zusammenhang zwischen der Freisetzungsdauer und der gemessenen mittleren „dosage“. Die Abweichungen der gemessenen mittleren „dosage“ von der ermittelten Regressionsgeraden liegen jeweils innerhalb der ermittelten Unsicherheiten (siehe Tabelle 10 auf Seite 119).

Die zugehörigen Ergebnisse für den „peak concentration“-Parameter dieser Messungen sind in Abbildung 49 dargestellt. Auch für diesen Parameter ist ein Anstieg mit zunehmender Freisetzungsdauer zu beobachten. Die Abbildung verdeutlicht allerdings auch, dass dieser Anstieg nicht linear verläuft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit zunehmender Freisetzungsdauer die Puff-Freisetzung in eine kontinuierliche Freisetzung übergeht. Nach der Definition von Pasquill und Smith (1974) bezeichnet man die Freisetzung eines Gases als Puff, wenn seine Freisetzungsdauer klein gegenüber der betrachteten Reisezeit ist. Dieses Kriterium wird nicht von allen Versuchen erfüllt, die zur Untersuchung des Einflusses der Freisetzungsdauer auf die Messergebnisse durchgeführt wurden. Bei den 6 ausgesuchten Szenarien liegt die berechnete mittlere „arrival time“ zwischen 0.6 und 2 Sekunden.

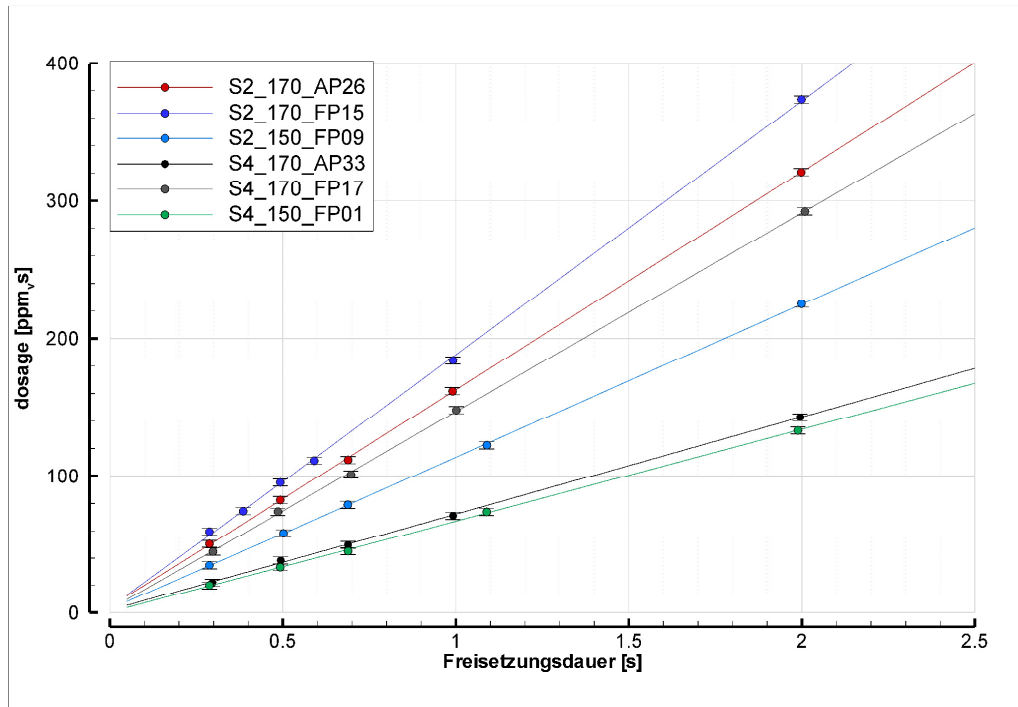


Abbildung 48: Bei systematisch variierten Freisetzungsdauern für 6 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (siehe Legende) gemessene mittlere „dosage“, aufgetragen gegen die jeweilige Freisetzungsdauer. Eingezeichnet ist zudem die für jedes Ausbreitungsszenario ermittelte Regressionsgerade.

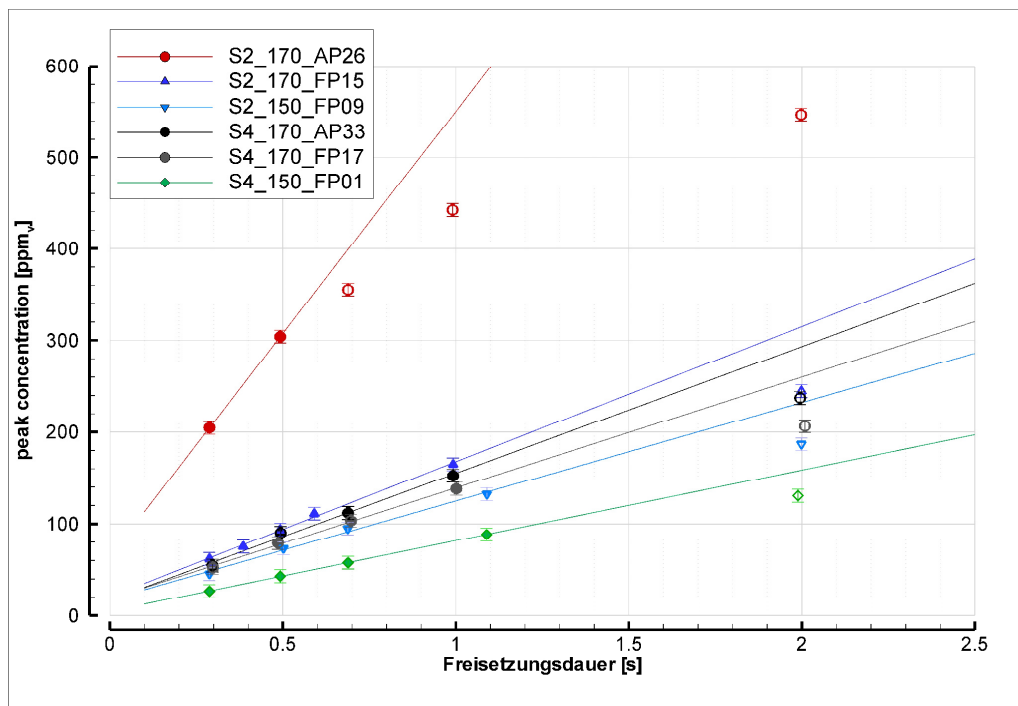


Abbildung 49: Bei systematisch variierten Freisetzungsdauern für 6 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (siehe Legende) gemessene mittlere „peak concentration“, aufgetragen gegen die jeweilige Freisetzungsdauer. Die eingezeichnete Regressionsgerade wurde für jedes Ausbreitungsszenario jeweils anhand der Messungen bestimmt, für die die „arrival time“ kürzer ausfällt, als die Freisetzungsdauer.

Dies hat z.B. für das Szenario S2_170_AP26, welches die kürzeste Reisezeit der untersuchten Szenarien aufweist, zur Folge, dass lediglich die beiden Messungen mit den kürzesten Freisetzungsdauern (Freisetzungsdauer < 0.6 Sekunden) die Definition von Pasquill und Smith (1974) erfüllen. Nun nähern sich mit zunehmender Freisetzungsdauer die Eigenschaften eines Puff-Ausbreitungsprozesses den Eigenschaften einer kontinuierlichen Freisetzung an. Dementsprechend reduziert sich mit zunehmender Freisetzungsdauer der Einfluss der Freisetzungsdauer auf die mittlere „peak concentration“ bis die „peak concentration“ schließlich bei hinreichend langer Freisetzungsdauer unabhängig von dieser ist.

Um in dieser Arbeit den Einfluss der Freisetzungsdauer auf die mittlere „peak concentration“ ausschließlich für Puff-Ausbreitungen bestimmen zu können, wurden für diese Analyse nur Versuche berücksichtigt, die die oben angegebene Definition eines Puffs erfüllen. Diese Messungen sind in Abbildung 49 als ausgefüllte Symbole dargestellt, während nicht gefüllte Symbole anzeigen, dass bei diesen Messungen die Freisetzungsdauer länger als die mittlere Reisezeit der Puffs ausfiel. Die in Abbildung 49 eingezeichneten Regressionsgeraden wurden für jedes Szenario nur anhand der Versuche bestimmt, die jeweils das genannte Puff-Kriterium erfüllen. Die Abbildung zeigt, dass bei Einhaltung des Puff-Kriteriums von Pasquill und Smith, der Anstieg der mittleren „peak concentration“ mit zunehmender Freisetzungsdauer linear verläuft. Für diese Messungen liegen die Abweichungen der mittleren „peak concentration“ von der ermittelten Regressionsgeraden innerhalb der eingezeichneten Unsicherheiten, die im Kapitel 8.3 (siehe Tabelle 10 auf Seite 119) bestimmt wurden.

Der Einfluss unterschiedlicher Freisetzungsdauern auf die mittleren Reisezeiten wird nachfolgend am Beispiel der „arrival time“ aufgezeigt, da die Ergebnisse dieses Puff-Parameters mit dem Einfluss unterschiedlicher Freisetzungsdauern auf die „peak time“ und „leaving time“ vergleichbar sind. Abbildung 50 zeigt die für verschiedene Freisetzungsdauern gemessene mittlere „arrival time“ der 6 untersuchten Szenarien, aufgetragen gegen die jeweils bei den Messungen ausgewählte Freisetzungsdauer. Es ist anzunehmen, dass die Freisetzungsdauer bei Ausbreitungsversuchen keinen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und damit auch keinen Einfluss auf die Reisezeiten der Wol-

ken nimmt. Entgegen dieser Annahme zeigt Abbildung 50 für sämtliche untersuchten Szenarien eine Zunahme der mittleren „arrival time“ mit zunehmender Freisetzungsdauer auf.

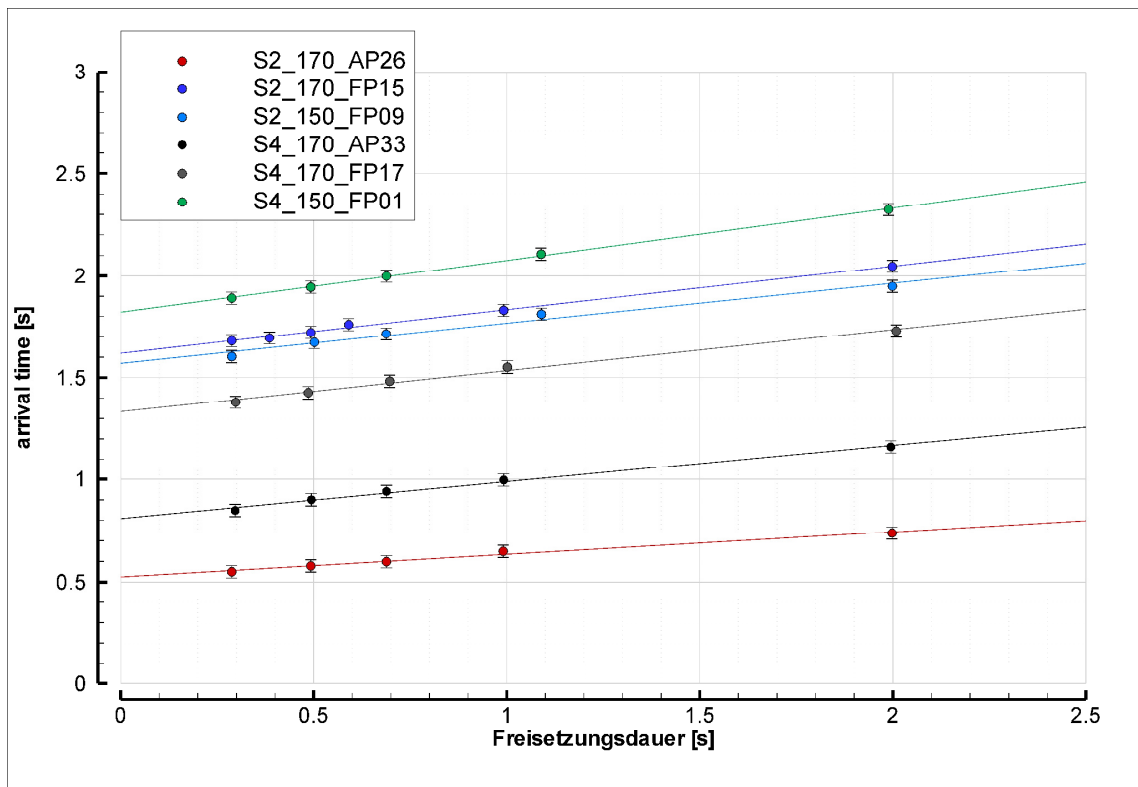


Abbildung 50: Bei systematisch variierten Freisetzungsdauern für 6 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (siehe Legende) gemessene mittlere „arrival time“, aufgetragen gegen die jeweilige Freisetzungsdauer. Eingezeichnet ist zudem die für jedes Ausbreitungsszenario ermittelte Regressionsgerade.

Diese Zunahme der mittleren „arrival time“ mit zunehmender Freisetzungsdauer beruht allerdings nicht auf physikalischen Ursachen, sondern ist auf die angewandte Bestimmungsmethode der „arrival time“ zurückzuführen. Um dies zu verdeutlichen, ist in Abbildung 51 der anhand sämtlicher Puffs einer Messung berechnete mittlere Konzentrationsverlauf bezüglich des Ausbreitungsszenarios S2_170_AP26 für unterschiedliche Freisetzungsdauern dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass für alle 5 untersuchten Freisetzungsdauern der Anstieg des mittleren Konzentrationsverlaufes zum gleichen Zeitpunkt (ca. bei 0.5 Sekunden) einsetzt. Dementsprechend ist die durchschnittliche Reisezeit der Wolken vom Quell- zum Messort für die 5 untersuchten Fälle gleich.

Die in Abbildung 50 zu beobachtende Zunahme der mittleren „arrival time“ mit zunehmender Freisetzungsdauer beruht auf der „dosage“-bezogenen „arrival time“-Bestimmung. Wie in Kapitel 8.1 beschrieben, wurde die „arrival time“ als Zeitpunkt definiert, an dem 5 % der gesamten Dosis des jeweils gemessenen Puffs den Messort passiert haben. Da sich allerdings mit zunehmender Freisetzungsdauer der mittlere gemessene Konzentrationsverlauf zeitlich nach hinten verschiebt (siehe Abbildung 51), verschiebt sich dementsprechend auch der Zeitpunkt nach hinten, an dem 5 % der Gesamtdosis den Messort passiert haben. Dieses Beispiel zeigt, dass die in dieser Arbeit angewandte Bestimmungsmethode der „arrival time“ zu Ungenauigkeiten führen kann, wenn Ausbreitungsversuche über unterschiedliche Freisetzungsdauern durchgeführt werden. Diese Bestimmungsungenauigkeiten treten insbesondere dann auf, wenn aufgrund der gewählten Freisetzungsdauer die Puff-Freisetzung in eine kontinuierliche Freisetzung übergeht.

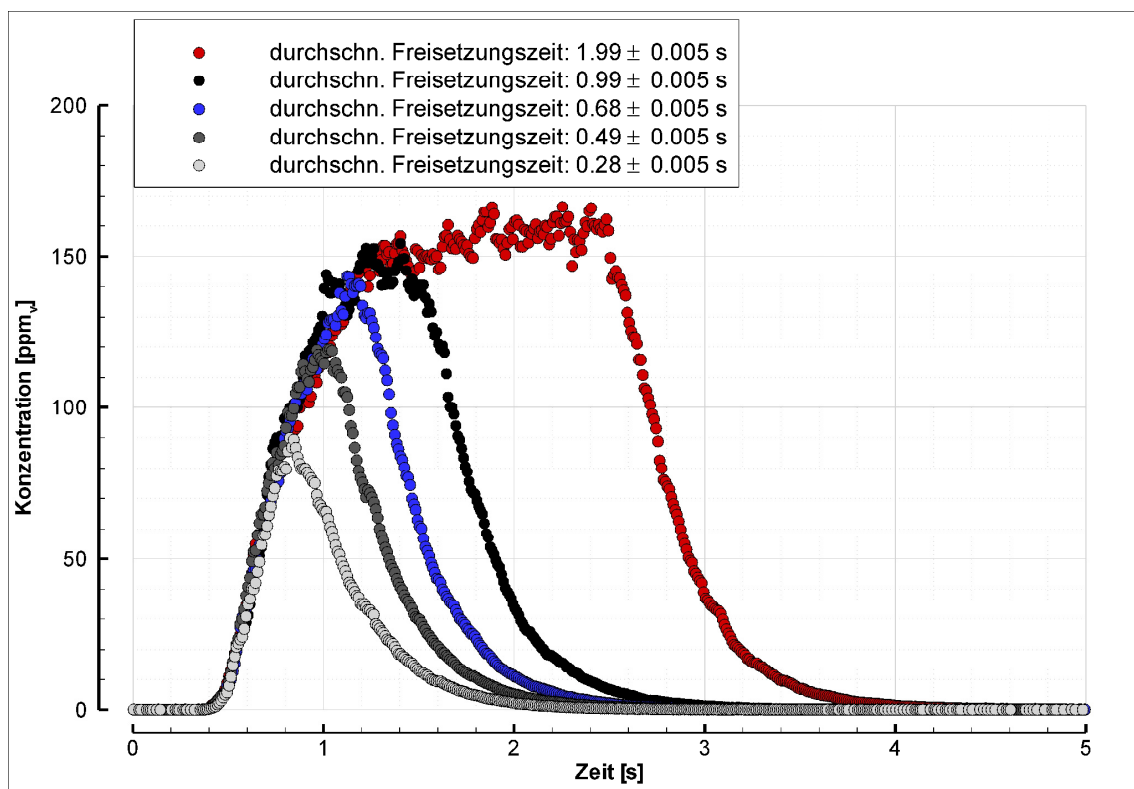


Abbildung 51: Anhand sämtlicher Puffs einer Messung bestimmter mittlerer Konzentrationsverlauf des Ausbreitungsszenarios S2_170_AP26 für unterschiedliche Freisetzungsdauern (siehe Legende).

Es wird daher für diese Fälle empfohlen (bei nicht instantanen Freisetzungen) anstelle einer „dosage“-bezogenen „arrival time“-Bestimmung die „arrival time“ anhand eines ausgewählten Konzentrationsschwellenwertes zu detektieren. Wie Abbildung 51 zeigt, ist der Anstieg des mittleren Konzentrationsverlaufes für alle 5 untersuchten Freisetzungsdauern nahezu identisch. Ein ausgewählter Konzentrationsschwellenwert, der z.B. einen Wert zwischen 0 ppm_v und 10 ppm_v einnehmen könnte, wird von allen Kurven der 5 mittleren Konzentrationsverläufe zum gleichen Zeitpunkt überschritten und führt dementsprechend für alle 5 Messungen zu einer identischen mittleren „arrival time“. Je kleiner der ausgewählte Schwellenwert ist, desto präziser lässt sich die Ankunft der Gaswolke am Messort bestimmen. Es muss hierbei allerdings berücksichtigt werden, dass der Schwellenwert stets größer als die Messunsicherheit ausfallen muss.

An dieser Stelle soll an einem Beispiel dargelegt werden, warum in dieser Arbeit dennoch auf eine „dosage“-bezogene „arrival time“-Bestimmung zurückgegriffen wird. Abbildung 52 zeigt den anhand sämtlicher Puffs einer Messung ermittelten mittleren Konzentrationsverlauf des Ausbreitungsszenarios S2_170_AP26 für 5 Messungen, bei denen nicht die Freisetzungsdauer, sondern die Quellstärke variiert wurde.

Die Ergebnisse dieser Messungen für die einzelnen Puff-Parameter wurden bereits in den Abbildungen 44 bis 46 dargestellt. Die Abbildung 52 zeigt, dass es bei Versuchen mit unterschiedlichen Freisetzungsmengen, bei denen allerdings die Freisetzungsdauer nahezu identisch ausfällt (0.3 ± 0.004 Sekunden), zu keiner zeitlichen Verschiebung des mittleren Konzentrationsverlaufes kommt. Unter der Voraussetzung, dass die gemessenen mittleren Konzentrationsverläufe der 5 Messungen proportional zueinander sind, führt eine „dosage“-bezogene „arrival time“-Bestimmung zu identischen Ergebnissen. Dies wird von den Ergebnissen der 5 bei unterschiedlichen Quellstärken durchgeführten Versuche bestätigt (siehe Abbildung 46 auf Seite 134).

Die Abbildung 52 zeigt zudem, dass der Anstieg des mittleren Konzentrationsverlaufes (Steigung der Kurve) der 5 durchgeführten Messungen sehr unterschiedlich ausfällt. Ein ausgewählter Konzentrationsschwellenwert wird in diesem Fall von den 5 eingezeichneten Kurven der mittleren Konzentrationsverläufe zu unterschiedlichen Zeitpunkten über-

schritten. Je größer der ausgewählte Schwellenwert ist, desto größer fallen diese Unterschiede aus. Dementsprechend würde die „arrival time“-Bestimmung anhand eines ausgewählten Konzentrationsschwellenwertes für die 5 durchgeführten Messungen zu unterschiedlichen Ergebnissen der „arrival time“ führen.

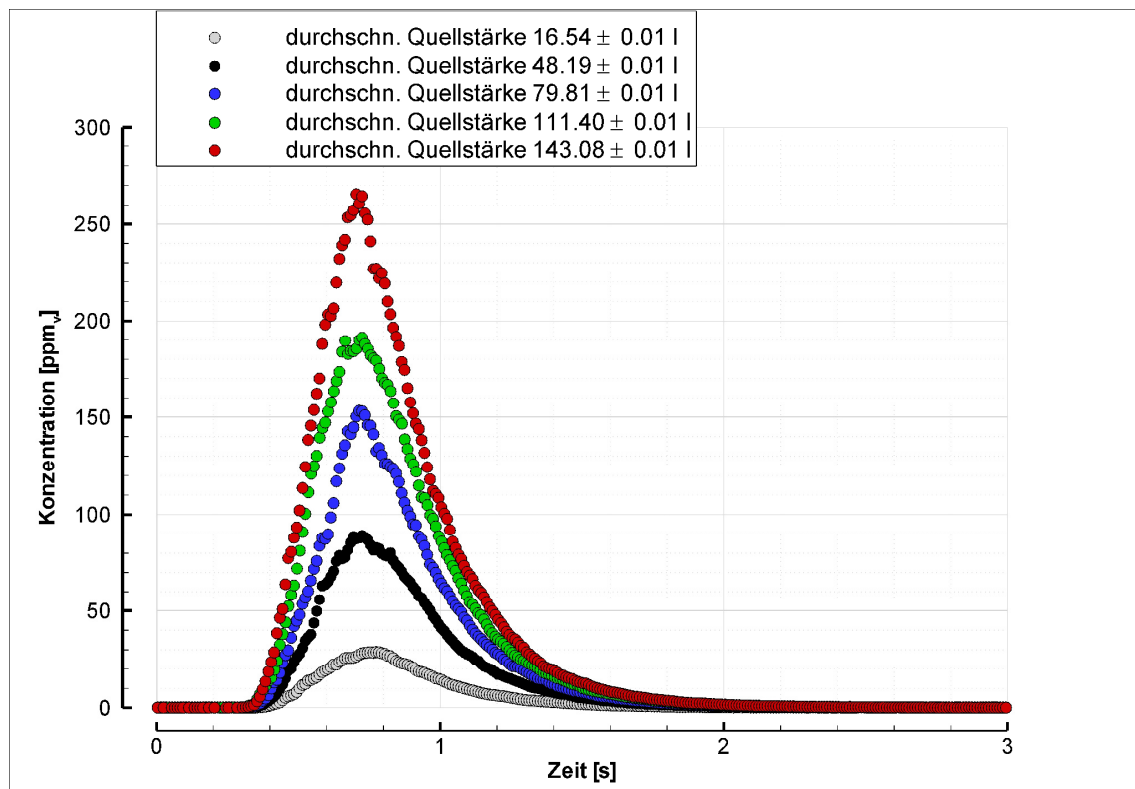


Abbildung 52: Anhand sämtlicher Puffs einer Messung berechneter mittlerer Konzentrationsverlauf des Ausbreitungsszenarios S2_170_AP26 für unterschiedliche Quellstärken (siehe Legende).

Die beiden gezeigten Beispiele verdeutlichen, dass abhängig von der Freisetzungart (instantan oder über längere Freisetzungsdauern) unterschiedliche Bestimmungsmethoden für die „arrival time“-Bestimmung geeignet sind.

Da ausschließlich die Ausbreitung von Puffs untersucht werden sollte, wurde die Freisetzungsdauer bei den Versuchen jeweils so kurz wie möglich gewählt. Wie zuvor beschrieben, konnten mit der verwendeten Versuchstechnik minimale Freisetzungsdauern von etwa 0.3 Sekunden realisiert werden. Diese Zeitspanne war für alle durchgeführten Versuche jeweils kürzer als die Reisezeiten der Wolken, so dass sämtliche Versuche das Puff-Kriterium von Pasquill und Smith erfüllen. Abgesehen von diesen Vorversuchen wurde die

Freisetzungsdauer von 0.3 Sekunden während der Versuchskampagne nicht variiert. Es wurde bei der Datenverarbeitung auf eine „dosage“-bezogene „arrival time“-Bestimmung zurückgegriffen, um bei gleichen Freisetzungsdauern, aber bei unterschiedlichen Freisetzungsmengen, eine einheitliche „arrival time“-Bestimmung zu gewährleisten.

8.4.3 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Ergebnisse der Puff-Messungen

Der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf die Ergebnisse der Puff-Versuche wurde für insgesamt 10 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien untersucht. Abbildung 53 zeigt die Lage der Mess- und Quellorte im Stadtgebiet von Oklahoma City.

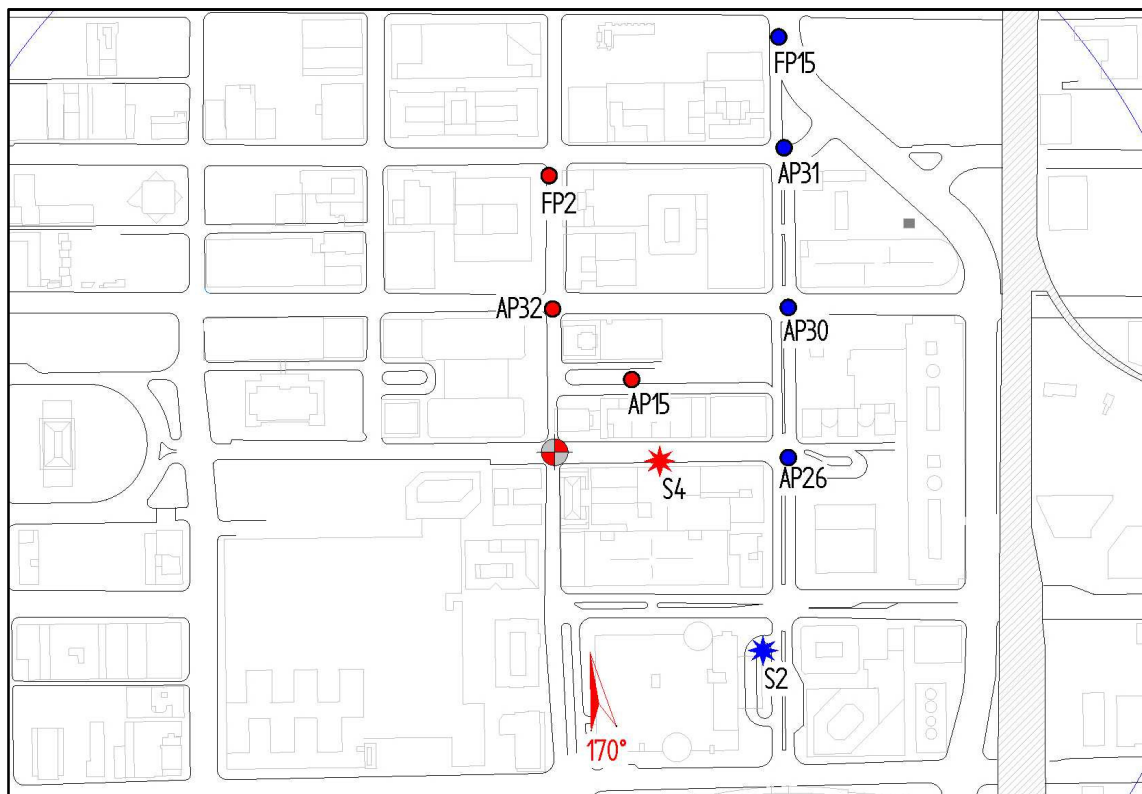


Abbildung 53: Lage der Messorte (eingezeichnete Kreise) im Stadtgebiet von Oklahoma City, an denen jeweils mehrere Wiederholungsmessungen bei unterschiedlichen mittleren Windgeschwindigkeiten durchgeführt wurden. Die eingezeichneten Sterne geben die Lage der beiden verwendeten Quellorte an. Rot bzw. blau markiert sind die jeweils zugehörigen Quell- und Messorte. Die mittlere Windrichtung betrug für sämtliche Versuche 170°. Die Messhöhe betrug für alle Messorte 2 m über Grund im Naturmaßstab. Zusätzlich wurden am Messort AP26 in 30 m und an den Messorten AP30 sowie AP32 in 60 m über dem Boden im Naturmaßstab Messungen durchgeführt.

Korrespondierende Quell- und Messorte sind auch in der Abbildung 53 durch die gleiche Farbe gekennzeichnet. Die Messhöhe lag bei sämtlichen in Abbildung 53 dargestellten

Messorten bei 2 m über Grund im Naturmaßstab. Zusätzlich wurden Messungen am Messort AP26 in 30 m und an den Messorten AP30 sowie AP32 in 60 m über Grund im Naturmaßstab durchgeführt. Die mittlere Windrichtung betrug bei sämtlichen Versuchen 170°. Die Anzahl der durchgeführten Wiederholungsmessungen pro Szenario und die Anzahl der hierbei pro Messung freigesetzten Puffs sind in Tabelle 15 zusammengefasst. In dieser Tabelle sind zudem die jeweilige Messhöhe, die mittlere Freisetzungsdauer und die mittlere Quellstärke der durchgeführten Messungen aufgeführt. Die angegebenen Unsicherheiten der mittleren Freisetzungsdauer und der mittleren Quellstärke geben jeweils die Standardabweichung der 3 bis 7 Wiederholungsmessungen wieder. Während die Freisetzungsdauer und die Quellstärke bei den durchgeführten Wiederholungsmessungen jeweils konstant blieb, wurde die mittlere Windgeschwindigkeit bei Werten zwischen etwa 1 m/s und 7 m/s am Referenzort von 266.7 mm über Grund im Modellmaßstab (80.01 m über Grund im Naturmaßstab) stromaufwärts des Modellgebiets (x = -2600 mm, y = 0 mm im Modellmaßstab) variiert.

	Messhöhe [m]	Anz. der Messungen	Puffs pro Messung	Freisetzungsdauer [s]	Quellstärke [l]
S2_170_AP26	2	7	220-420	0.30 ± 0.004	56.4 ± 0.01
S2_170_FP15	2	7	215	0.29 ± 0.004	158.6 ± 0.01
S2_170_AP26	30	3	420	0.29 ± 0.004	96.0 ± 0.01
S2_170_AP30	2	5	220-420	0.29 ± 0.004	158.2 ± 0.01
S2_170_AP30	60	6	220-420	0.29 ± 0.004	158.2 ± 0.01
S2_170_AP31	2	7	210-245	0.29 ± 0.004	158.6 ± 0.01
S4_170_FP02	2	5	210-246	0.29 ± 0.004	158.6 ± 0.01
S4_170_AP32	2	7	210-245	0.29 ± 0.004	158.6 ± 0.01
S4_170_AP15	2	7	200-280	0.29 ± 0.004	79.8 ± 0.01
S4_170_AP32	60	7	215-270	0.29 ± 0.004	158.4 ± 0.01

Tabelle 15: Ausbreitungsszenarien, für die der Einfluss der Windgeschwindigkeit auf das Ergebnis der Puff-Versuche untersucht wurde. Angegeben ist die Höhe des Messortes über Grund im Naturmaßstab, die Anzahl der durchgeführten 30-minütigen Messungen, bei denen die Windgeschwindigkeit systematisch verändert wurde, die Anzahl der Puffs, die pro Messung am Messort registriert wurde, die mittlere Freisetzungsdauer und die mittlere Quellstärke.

In Abbildung 54 ist die für unterschiedliche mittlere Windgeschwindigkeiten gemessene mittlere „dosage“ zweier ausgewählter Szenarien dargestellt, aufgetragen gegen die jeweilige mittlere Referenzwindgeschwindigkeit der Messungen. Die Abbildung zeigt, dass mit zunehmender Windgeschwindigkeit die gemessene mittlere „dosage“ abnimmt. Dies

ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass aufgrund der höheren Windgeschwindigkeit die freigesetzten Puffs die jeweiligen Messorte schneller passieren. In Abbildung 54 ist zudem für beide Szenarien die über einen „best fit“ ermittelte Ausgleichskurve dargestellt.

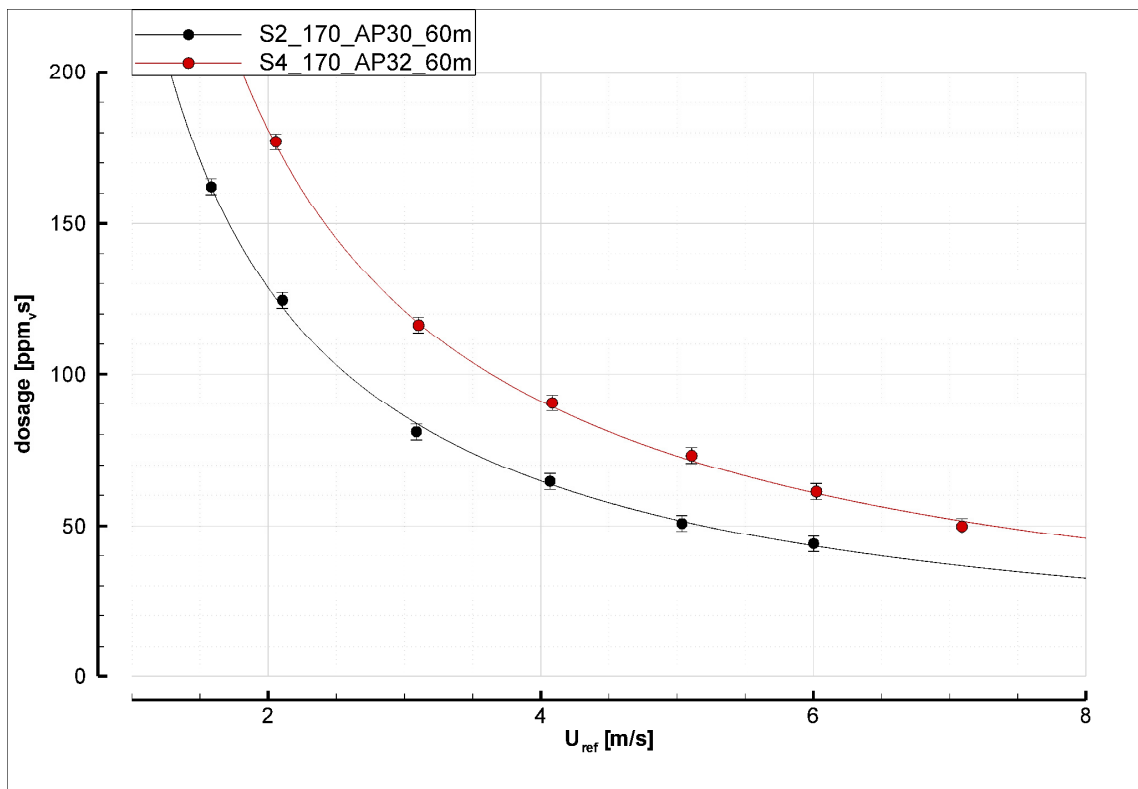


Abbildung 54: Bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für 2 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (siehe Legende) gemessene mittlere „dosage“, aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} (Referenzort: $x = -2600$ mm, $y = 0$ mm und $z = 266.7$ mm). Eingezeichnet ist zudem die über einen „best fit“ ermittelte Ausgleichskurve.

Die Abweichungen der jeweils gemessenen mittleren „dosage“ von dieser ermittelten Ausgleichskurve liegen für alle Messungen im Rahmen der ermittelten Unsicherheit von ± 2.6 ppm_vs der mittleren „dosage“. Erwartungsgemäß verhält sich die mittlere „dosage“ antiproportional zur mittleren Windgeschwindigkeit. Dementsprechend ist das Produkt dieser beiden Größen eine Konstante. Um diese konstante Beziehung grafisch zu verdeutlichen, ist bei den nachfolgenden Abbildungen jeweils das Produkt der mittleren Referenzwindgeschwindigkeit und des zu untersuchenden Puff-Parameters gegen die jeweilige Referenzwindgeschwindigkeit aufgetragen.

In Abbildung 55 und 56 ist die bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für die 10 untersuchten Ausbreitungsszenarien gemessene mittlere „dosage“ multipliziert mit der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} , aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} , dargestellt. Die Ergebnisse sind auf zwei Abbildungen aufgeteilt, um eine bessere Übersicht zu gewährleisten. Die Ergebnisse der Szenarien, bei denen der Messort 2 m über Grund im Naturmaßstab lag, sind in Abbildung 55 zusammengefasst, während die Ergebnisse der Szenarien, bei denen der Messort in 30 m bzw. 60 m über Grund lag, in Abbildung 56 dargestellt sind.

Die in den Abbildungen 55 und 56 dargestellten Streubalken geben die Gesamtunsicherheit wieder, die anhand der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung aus den jeweils ermittelten Unsicherheiten der mittleren „dosage“ (siehe Tabelle 10 auf Seite 119) und der mittleren Referenzwindgeschwindigkeit bestimmt wurde. Der Mittelwert sämtlicher Messungen eines Szenarios wird durch die horizontalen Linien wiedergegeben, die farblich mit den Ergebnissen der zugehörigen Szenarien korrespondieren.

Die Abbildungen 55 und 56 zeigen, dass das Produkt aus mittlerer „dosage“ und mittlerer Windgeschwindigkeit, unabhängig von der jeweiligen mittleren Referenzwindgeschwindigkeit, für alle untersuchten Szenarien nahezu konstant ist. Die zu beobachtenden Abweichungen vom jeweiligen Mittelwert eines Szenarios liegen im Bereich der dargestellten Unsicherheiten. Lediglich 3 Messungen des Szenarios S4_170_AP15_2m weisen größere Abweichungen auf. Eine mögliche Ursache hierfür ist durch den ausgesprochen kurzen Abstand des Messortes zur Quelle von nur 68 m im Naturmaßstab gegeben.

Wie in Kapitel 8.3 diskutiert, nimmt der Abstand des Messortes von der Quelle Einfluss auf die am Messort zu beobachtende Variabilität der Puffs und dementsprechend auf die Bestimmungsgenauigkeit der einzelnen mittleren Puff-Parameter.

Das Szenario S4_170_AP15_2m ist das einzige Szenario der durchgeführten Versuchskampagne, welches einen geringeren Quellabstand aufweist, als die Szenarien, für die die Unsicherheiten der mittleren Puff-Parameter bestimmt wurden (siehe Tabelle 10 und Tabelle 11). Es ist daher anzunehmen, dass die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren „dosage“ bezüglich des Szenarios S4_170_AP15_2m geringer ausfällt, als die der Szenarien, für die die Unsicherheiten in Tabelle 10 zusammengefasst sind.

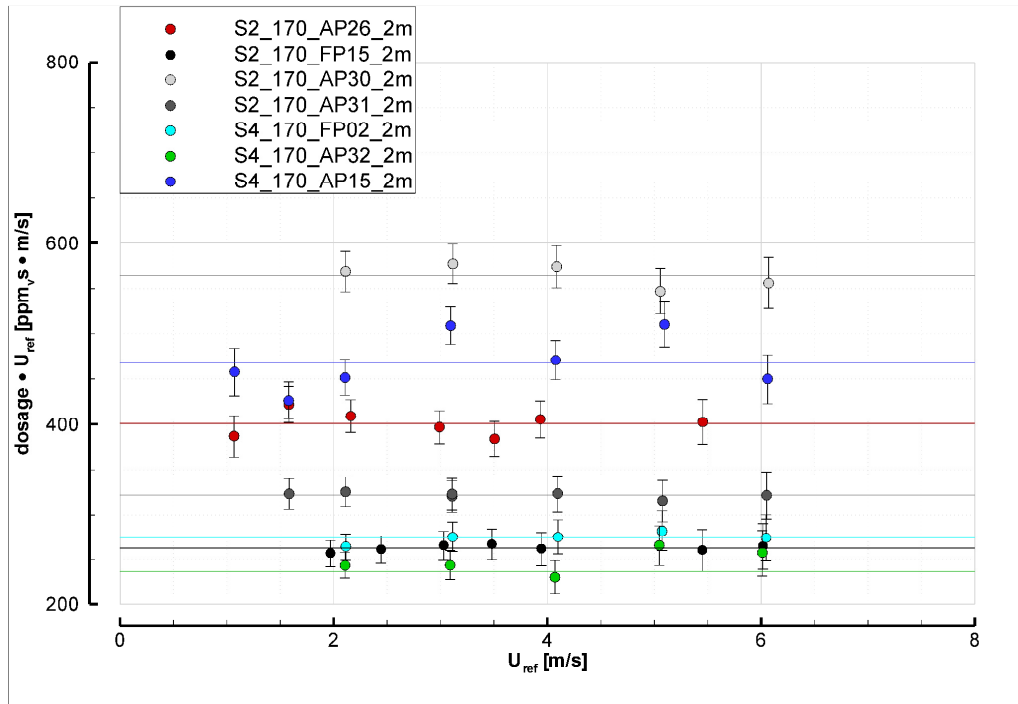


Abbildung 55: Bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für 7 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (bei denen der Messort jeweils in 2m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab lag) gemessene mittlere „dosage“, multipliziert mit der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} , aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} .

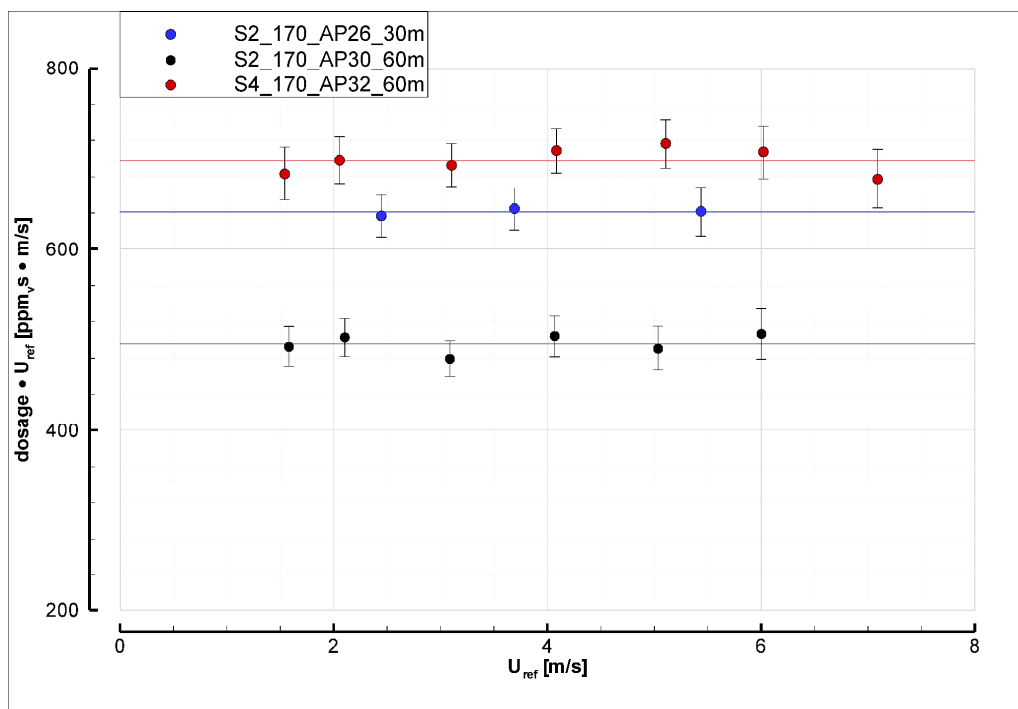


Abbildung 56: Bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für 3 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (bei denen der Messort jeweils in 30m bzw. 60m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab lag) gemessene mittlere „dosage“, multipliziert mit der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} , aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} .

Dementsprechend würden die in Abbildung 55 dargestellten Streubalken für dieses Szenario ein größeres vertikales Ausmaß annehmen, so dass auch die drei Messungen mit relativ großer Abweichung zur horizontalen Linie in Abbildung 55 noch im Bereich der ermittelten Unsicherheit lägen.

Die korrespondierenden Ergebnisse dieser Messungen für den „arrival time“-Parameter sind in Abbildung 57 und Abbildung 58 zusammengefasst. Dargestellt ist jeweils das Produkt der gemessenen mittleren „arrival time“ und der mittleren Windgeschwindigkeit, aufgetragen gegen die mittlere Windgeschwindigkeit der Messungen. Analog zum zuvor diskutierten „dosage“-Parameter sind die Ergebnisse der 10 untersuchten Szenarien auf zwei Abbildungen aufgeteilt.

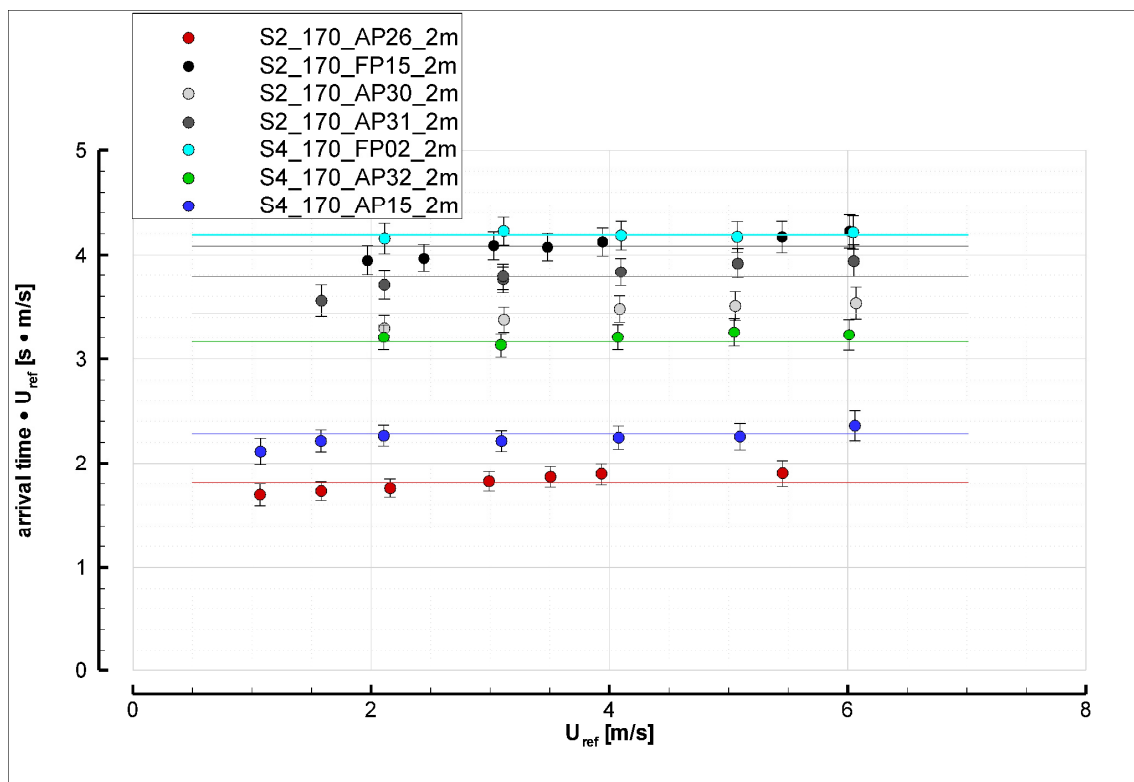


Abbildung 57: Bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (bei denen der Messort in 2m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab lag) gemessene mittlere „arrival time“, multipliziert mit der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} , aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} . Die durchgezogenen Linien geben jeweils den Mittelwert der Messungen eines Szenarios wieder.

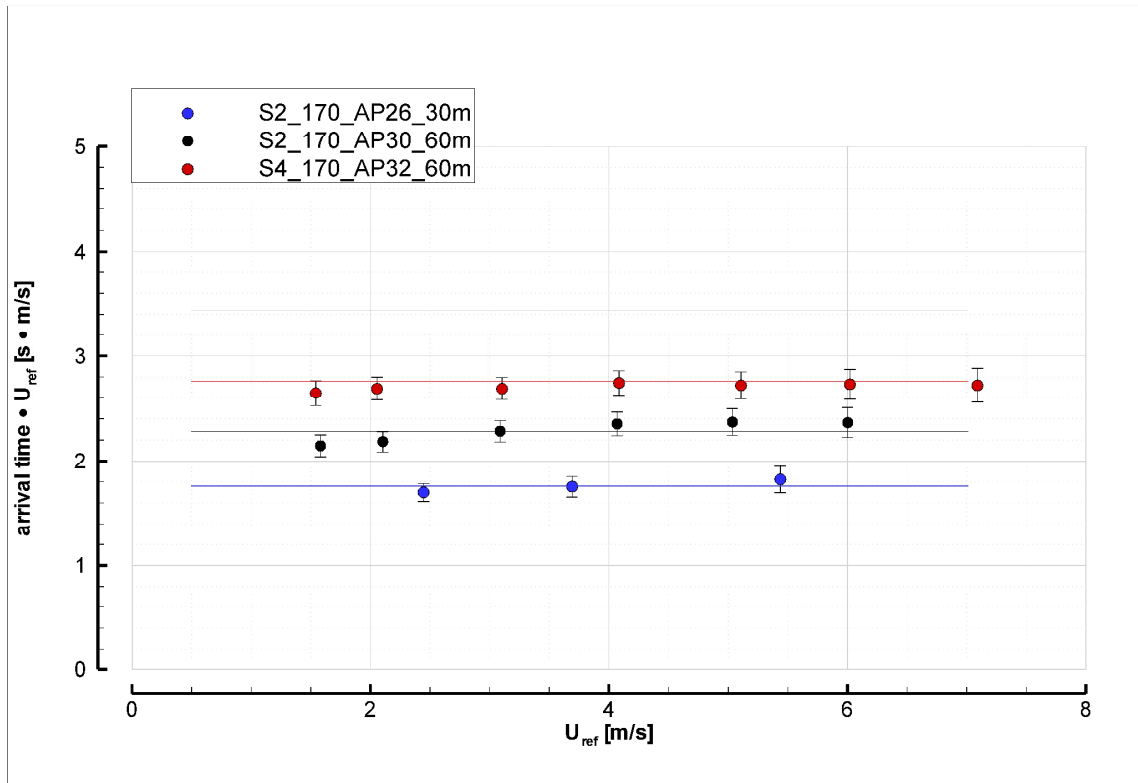


Abbildung 58: Bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (bei denen der Messort in 30m bzw. 60m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab lag) gemessene mittlere „arrival time“, multipliziert mit der jeweiligen Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} , aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} . Die durchgezogenen Linien geben jeweils den Mittelwert der Messungen eines Szenarios wieder.

Die dargestellten Streubalken geben auch hier die Gesamtunsicherheit wieder, die anhand der Fehlerfortpflanzung aus den jeweils ermittelten Unsicherheiten der mittleren „arrival time“ (siehe Tabelle 10 auf Seite 119) und der mittleren Referenzwindgeschwindigkeit bestimmt wurde. Die beiden Abbildungen zeigen, dass auch das Produkt aus der mittleren „arrival time“ und der Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} , unabhängig von der jeweiligen mittleren Windgeschwindigkeit, für alle untersuchten Szenarien nahezu konstant ist. Die Abweichungen vom Mittelwert sämtlicher bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten durchgeführten Messungen eines Szenarios liegen innerhalb der ermittelten Unsicherheiten.

Auch für die „peak time“ und „leaving time“ ist das Produkt der „peak time“ bzw. „leaving time“ und der jeweiligen Windgeschwindigkeit für alle untersuchten Windgeschwindigkeiten konstant. Da die Ergebnisse dieser beiden Parameter denen der „arrival time“ gleichen, sind sie in dieser Arbeit nicht grafisch dargestellt.

Zuletzt wird der Einfluss unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten auf den „peak concentration“-Parameter analysiert. In Abbildung 59 sind die Ergebnisse der durchgeführten Messungen dargestellt, bei denen der Messort jeweils in 2 m Höhe über Grund im Naturmaßstab lag.

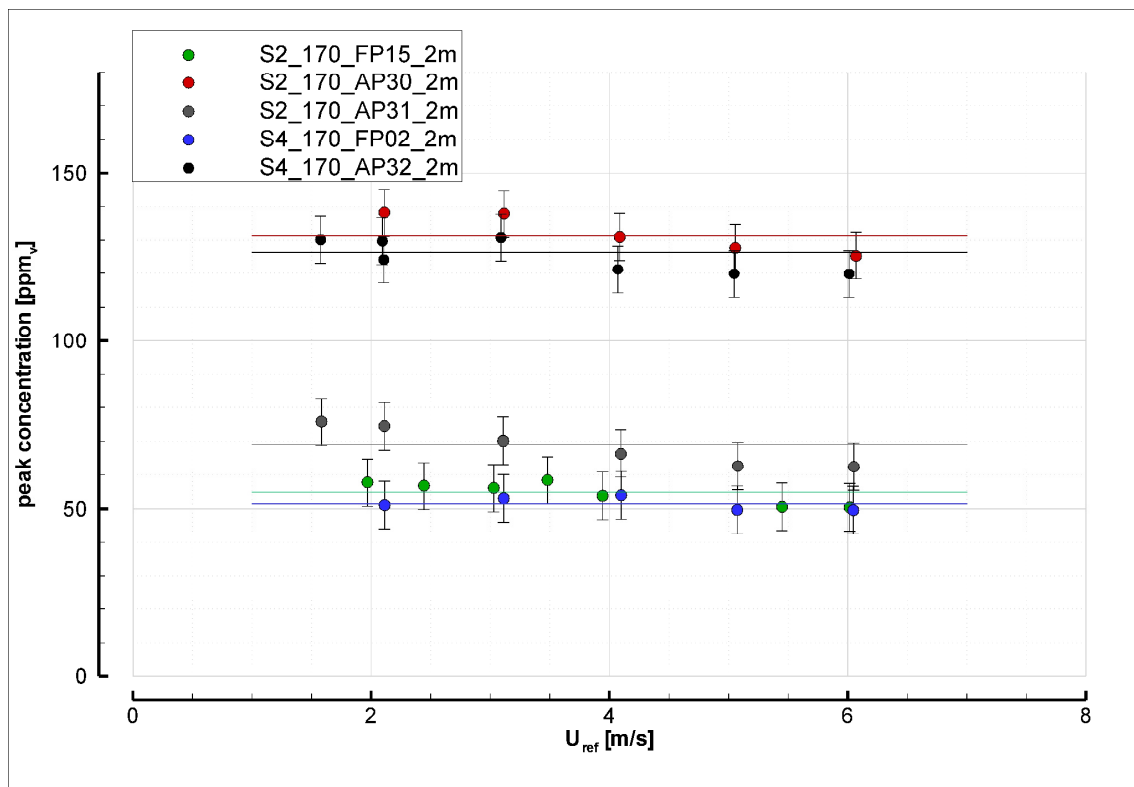


Abbildung 59: Bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für 5 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (bei denen der Messort jeweils in 2m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab lag) gemessene mittlere „peak concentration“, aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} . Die durchgezogenen Linien geben jeweils den Mittelwert der Messungen eines Szenarios wieder.

Im Gegensatz zu den 4 zuvor untersuchten Puff-Parametern ließ sich keine antiproportionale Beziehung zwischen der „peak concentration“ und der mittleren Windgeschwindigkeit ermitteln. Daher ist bei der graphischen Darstellung der Ergebnisse die bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten gemessene mittlere „peak concentration“ direkt gegen die jeweilige Windgeschwindigkeit der Versuche aufgetragen, ohne dass die Ergebnisse mit der jeweiligen mittleren Windgeschwindigkeit multipliziert wurden. Die eingezeichneten Streubalken geben die in Kapitel 8.3 (siehe Tabelle 10 auf Seite 119) ermittelte Bestimmungsgenauigkeit der mittleren „peak concentration“ wieder. Die dargestellten horizon-

talen Balken geben jeweils die über alle Messungen bei den untersuchten Windgeschwindigkeiten gemittelte „peak concentration“ eines Szenarios an.

Die Abbildung 59 zeigt, dass die gemessene mittlere „peak concentration“ der 5 dargestellten Szenarien nahezu unabhängig von der jeweiligen mittleren Windgeschwindigkeit ist. Die Abweichungen der gemessenen mittleren „peak concentration“ vom Mittelwert sämtlicher bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten durchgeführten Messungen (horizontalen Balken) liegen bei allen untersuchten Szenarien im Rahmen der angegebenen Unsicherheit.

Die Unabhängigkeit der gemessenen mittleren „peak concentration“ von der Windgeschwindigkeit ist mit dem in Kapitel 6.3.3 beschriebenen Konzept der Reynoldszahlunabhängigkeit zu erklären. Nach diesem Konzept sind die Eigenschaften einer turbulenten Strömung unabhängig von der jeweiligen Windgeschwindigkeit. Der Nachweis, dass die Strömung im Modellgebiet Reynoldszahl unabhängig ist, wurde in Kapitel 7.2 erbracht. Demzufolge sind die Strömungseigenschaften, die den Ausbreitungsprozess der freigesetzten Puffs prägen, für alle untersuchten Windgeschwindigkeiten gleich. So führen zwar höhere Windgeschwindigkeiten zu einer schnelleren Verteilung des freigesetzten Gases und demzufolge auch zu einer zeitlich schnelleren Reduzierung von möglichen Spitzenkonzentrationen („peak concentration“) der Wolke, dies wird bei den Messungen allerdings dadurch kompensiert, dass der Messort bei höheren Windgeschwindigkeiten zeitlich früher von der freigesetzten Wolke erreicht wird. Demzufolge ist im Fall von Puffmessungen, die bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten am gleichen Messort durchgeführt werden, kein Einfluss der jeweiligen Windgeschwindigkeit auf die mittlere „peak concentration“ zu erwarten.

Analog zum „dosage“- und „arrival time“-Parameter sind die ermittelten Ergebnisse der durchgeführten Messungen des „peak concentration“-Parameters auf zwei Abbildungen aufgeteilt. Nachdem in Abbildung 59 die Ergebnisse der Messungen dargestellt wurden, bei denen der Messort jeweils in 2 m Höhe über Grund im Naturmaßstab lag, zeigt Abbildung 60 die Ergebnisse der Messungen, bei denen sich der Messort in 30 m bzw. 60 m über Grund im Naturmaßstab befand.

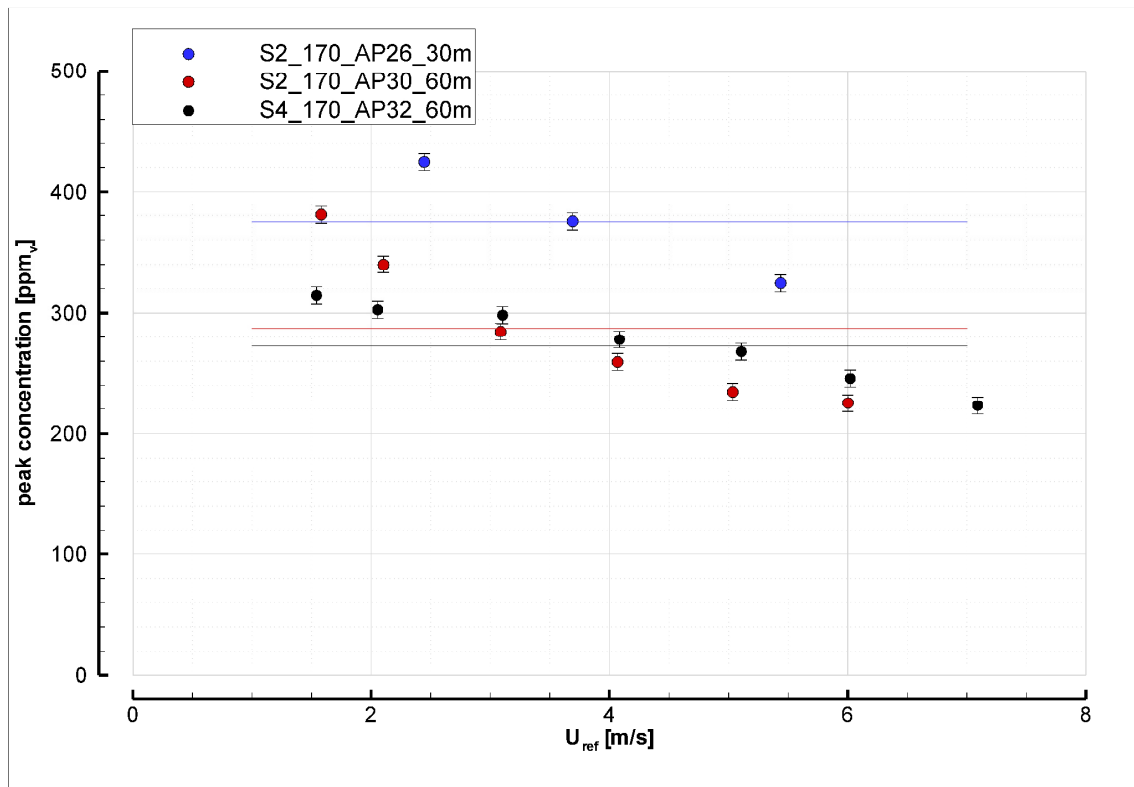


Abbildung 60: Bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für 3 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (bei denen der Messort in 30m bzw. 60m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab lag) gemessene mittlere „peak concentration“, aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} . Die durchgezogenen Linien geben jeweils den Mittelwert der Szenarien wieder.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen der bodennahen Messungen (Abbildung 59) zeigen die gemessenen Werte der mittleren „peak concentration“ für Messungen, die in 30 m bzw. 60 m über Grund im Naturmaßstab aufgenommen wurden, eine deutliche Abhängigkeit von der jeweiligen Windgeschwindigkeit. Die Abbildung 60 zeigt, dass für die drei dargestellten Szenarien die gemessene mittlere „peak concentration“ mit zunehmender Windgeschwindigkeit abnimmt. Bei allen drei Szenarien weichen die mittleren, bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten gemessenen Werte der „peak concentration“ jeweils signifikant vom Mittelwert (horizontaler Balken) sämtlicher Messungen eines Szenarios ab.

Die Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse der bodennahen Messungen in 2 m Höhe über Grund im Vergleich zu den Ergebnissen der Messungen, die in 30 m bzw. 60 m über Grund durchgeführt wurden, liegt in der zeitlichen Auflösung, mit der die Konzentrationen gemessen werden konnten. Wie in Kapitel 3.3 erläutert, wurden mit dem verwendeten Fast-FID-System Konzentrationen mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 100 Hz

gemessen. Die einzelnen Konzentrationsmesswerte werden demzufolge über einen Zeitraum von 0.01 Sekunden im Modellmaßstab gemittelt. Übertragen auf den Naturmaßstab entspricht dies bei gleicher Windgeschwindigkeit einem Mittelungsintervall von etwa 3 Sekunden. Da bei höheren Windgeschwindigkeiten die Ausbreitungsprozesse schneller ablaufen, reduziert sich mit zunehmenden Windgeschwindigkeiten die Auflösung, mit der die zu untersuchenden Prozesse gemessen werden können. Dementsprechend werden die Intervalle, über die die gemessenen Konzentrationswerte gemittelt werden, mit zunehmender Windgeschwindigkeit vergleichsweise länger. Nun ist allerdings bei der Bestimmung der „peak concentration“ die zeitliche Auflösung der Messungen von besonderer Bedeutung.

Wie Abbildung 34 auf Seite 107 andeutet, wird die Höchstkonzentration eines Puffs über einen sehr kurzen Zeitraum registriert. In der Regel ist die „peak concentration“ ein einzelner Konzentrationswert, der sich signifikant vom vorherigen und nachfolgenden Messwert unterscheidet. Eine geringere zeitliche Auflösung und ein entsprechend längeres Mittelungsintervall einer Messung führen demzufolge zu niedrigeren gemessenen Spitzenkonzentrationen.

Die bodennahen Messungen in 2 m Höhe über Grund unterscheiden sich von denen, die in 30 m oder 60 m über Grund durchgeführt wurden, insbesondere darin, dass in Bodennähe deutlich geringere Windgeschwindigkeiten beobachtet wurden. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde die Windgeschwindigkeit am Referenzort zwischen 1 m/s und 7 m/s variiert. Diese Variation der mittleren Windgeschwindigkeit am Referenzort führte an den verschiedenen Messorten in 2 m Höhe über Grund zu einer Änderung der mittleren Windgeschwindigkeit zwischen etwa 0.25 m/s und 1.8 m/s, während sich bei den Messorten in 30 m bzw. 60 m Höhe über Grund die Windgeschwindigkeit zwischen etwa 0.8 m/s und 5.6 m/s änderte. Dementsprechend lassen sich an den bodennahen Messorten aufgrund der geringeren Windgeschwindigkeiten die vorbeiziehenden Puffs mit einer im Vergleich etwa 3-fach höheren zeitlichen Auflösung messen als an den Messorten in 30 m bzw. 60 m Höhe über Grund.

Um den Einfluss des Mittelungsintervalls auf die Bestimmung der „peak concentration“ zu verdeutlichen, wurde die zeitliche Auflösung zweier bodennaher Messungen bei der Er-

mittlung der „peak concentration“ künstlich reduziert. Abbildung 61 zeigt die mittlere „peak concentration“ bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten zweier Szenarien (S2_170_FP15_2m, S2_170_AP30_2m), deren Ergebnisse bereits in Abbildung 59 vorgestellt wurden. Die dargestellten nicht ausgefüllten Symbole in Abbildung 61 entsprechen den zuvor gezeigten Ergebnissen, bei denen die mittlere „peak concentration“ über ein Mittelungsintervall von 0.01 Sekunden ermittelt wurde. Die ausgefüllten Kreise geben die mittlere „peak concentration“ dieser beiden Szenarien für ein Mittelungsintervall von 0.03 Sekunden wieder. Dieses dreimal längere Mittelungsintervall ist dimensionslos betrachtet mit den Mittelungsintervallen der Messungen zu vergleichen, die in 30 m bzw. 60 m über dem Boden mit 100 Hz gemessen wurden. Dies ist auf die etwa 3-mal höhere mittlere Windgeschwindigkeit der Messungen in 30 m bzw. 60 m Höhe über dem Boden gegenüber den Messungen in 2 m Höhe über dem Boden zurückzuführen.

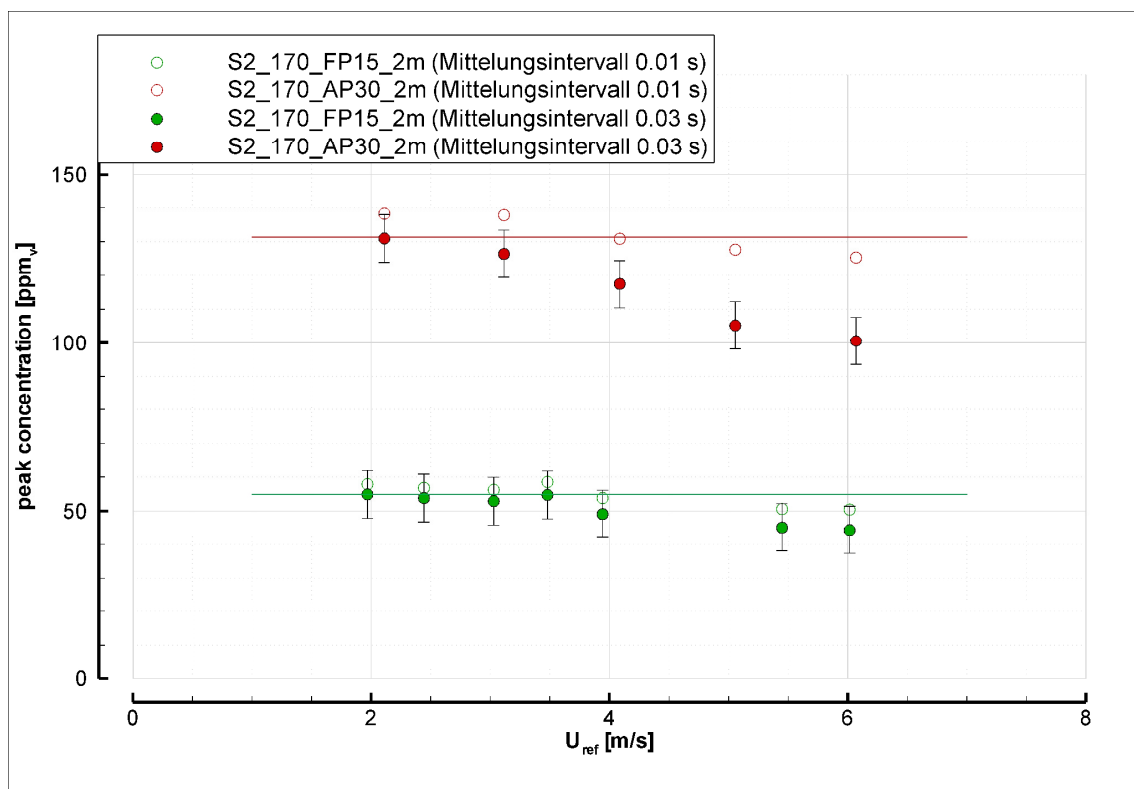


Abbildung 61: Bei systematisch variierten Windgeschwindigkeiten für 2 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (bei denen der Messort jeweils in 2m Höhe über dem Boden im Naturmaßstab lag) gemessene mittlere „peak concentration“, aufgetragen gegen die Referenzwindgeschwindigkeit U_{ref} .

Die Abbildung 61 zeigt, dass die mittlere „peak concentration“ der beiden Szenarien mit zunehmender Windgeschwindigkeit abnimmt, wenn die „peak concentration“ über ein Mittelungsintervall von 0.03 Sekunden bestimmt wird. In diesem Fall wird eine ähnliche Abhängigkeit der mittleren „peak concentration“ von der Windgeschwindigkeit beobachtet, wie sie zuvor für die Messungen aufgezeigt wurde, die in 30 m bzw. 60 m Höhe über dem Boden mit 100 Hz gemessen wurden.

Da mit einer zeitlichen Auflösung von 100 Hz bei den bodennahen Messungen keine Abhängigkeit der gemessenen mittleren „peak concentration“ von der jeweiligen Windgeschwindigkeit beobachtet wurde (siehe Abbildung 59 auf Seite 150), zeigt dies, dass die zeitliche Auflösung bei bodennahen Messungen aufgrund der geringen Windgeschwindigkeiten ausreichte, um selbst kurzzeitige Signale der „peak concentration“ auflösen zu können.

Sämtliche nachfolgende Messungen wurden bei vergleichsweise niedrigen mittleren Windgeschwindigkeiten von etwa 2.4 m/s am Referenzort ($x = -2600$ mm, $y = 0$ mm und $z = 266.7$ mm) durchgeführt, um eine möglichst hohe zeitliche Auflösung der Messungen gewährleisten zu können. Dennoch kann nicht sichergestellt werden, dass Messungen, die in Höhen über 2 m über Grund durchgeführt wurden, keine Abhängigkeit der gemessenen Spitzenkonzentration von der jeweiligen Windgeschwindigkeit aufweisen. Aus diesem Grund wurden in dieser Arbeit sämtliche Versuche, bei denen der Messort oberhalb von 2 m über Grund lag, nicht für Analysen bezüglich des „peak concentration“-Parameters berücksichtigt. Von den insgesamt 167 30-minütigen Hauptmessungen, die in der erstellten Referenzdatenbank abgespeichert wurden, trifft dies allerdings lediglich auf 9 Messungen zu.

8.4.4 Entdimensionalisierung der Puff-Parameter

Die Ergebnisse der Kapitel 8.4.1 bis 8.4.3 haben aufgezeigt, welchen Einfluss die Quellstärke, Freisetzungsdauer und Windgeschwindigkeit auf die einzelnen Puff-Parameter ausüben. Auf Basis dieser Erkenntnisse können die unter bestimmten Randbedingungen gewonnenen Messergebnisse auf beliebige Bedingungen übertragen werden. Um Messergebnisse angeben zu können, die unabhängig von den jeweiligen Randbedingungen sind, werden die Puff-Parameter nachfolgend in eine dimensionslose Form übertragen.

Da die Freisetzungsdauer bei den Messungen der Kampagne nicht variiert wurde (abgesehen von den in Kapitel 8.4.2 beschriebenen Vorversuchen) und da sie mit 0.3 Sekunden bei allen Versuchen jeweils klein gegenüber den Reisezeiten der Wolken ausfiel, ist der Einfluss der Freisetzungsdauer auf die Puff-Ergebnisse vernachlässigbar klein. Die durchgeführten Freisetzungen werden daher näherungsweise als instantane Freisetzungen betrachtet. Der Einfluss der Freisetzungsdauer auf die Puff-Ergebnisse wird daher nur insofern berücksichtigt, als dass die jeweils freigesetzte Gasmenge von der Quellstärke und der Freisetzungsdauer bestimmt wurde.

Die durchgeführten Versuche haben aufgezeigt, dass die „arrival time“ (at), „peak time“ (pt) und „leaving time“ (lt) sich antiproportional zur jeweiligen mittleren Windgeschwindigkeit verhalten und unabhängig von der freigesetzten Gasmenge sind. Unter Berücksichtigung des Maßstabes können die gemessenen Reisezeiten (at , pt oder lt) in eine dimensionslose Form (at^* , pt^* oder lt^*) durch die Beziehungen

$$at^* = \frac{at \cdot U_{ref}}{L_{ref}} \quad 8.2$$

$$pt^* = \frac{pt \cdot U_{ref}}{L_{ref}} \quad 8.3$$

$$lt^* = \frac{lt \cdot U_{ref}}{L_{ref}} \quad 8.4$$

übertragen werden. Hierbei ist U_{ref} die mittlere Windgeschwindigkeit (in m/s) am Referenzort ($x = -2600$ mm, $y = 0$ mm und $z = 266.7$ mm) und L_{ref} eine Referenzlänge (in m), über die der jeweilige Modellmaßstab berücksichtigt wird. In dieser Arbeit wurde eine Referenzlänge L_{ref} von (1/300) m im Modell gewählt. Dies ist zu berücksichtigen, wenn die dimensionslosen Ergebnisse auf einen anderen Maßstab (z.B. den Naturmaßstab) umgerechnet werden.

Die gemessene mittlere „dosage“ verhält sich ebenfalls antiproportional zur jeweiligen mittleren Windgeschwindigkeit und proportional zu der freigesetzten Gasmenge. Die gemessene „dosage“ lässt sich durch die Beziehung

$$d^* = \frac{\text{dosage} \cdot U_{ref} \cdot L_{ref}^2}{Q_V} \quad 8.5$$

in eine dimensionslose Form d^* übertragen. Hierbei ist U_{ref} die mittlere Windgeschwindigkeit (in m/s) am Referenzort, L_{ref} die gewählte Referenzlänge von (1/300) m und Q_V das freigesetzte Gasvolumen pro Puff (in m^3).

Zuletzt wurde für den „peak concentration“-Parameter ermittelt, dass er proportional mit zunehmender freigesetzter Gasmenge ansteigt und unabhängig von der jeweiligen Windgeschwindigkeit ist. Demnach lässt sich die gemessene „peak concentration“ pc durch die Beziehung

$$pc^* = \frac{pc \cdot L_{ref}^3}{Q_V} \quad 8.6$$

in eine dimensionslose Form pc^* übertragen. Hierbei ist L_{ref} wiederum die gewählte Referenzlänge von (1/300) m und Q_V das pro Puff freigesetzte Gasvolumen (in m^3). Diese Beziehung überführt nicht allein die „peak concentration“ in eine dimensionslose Form, sondern auch jeden gemessenen Konzentrationswert c in einen dimensionslosen Wert c^* . Nachfolgend werden sämtliche Puff-Parameter nur noch in dimensionsloser Form angegeben.

8.5 Vergleichende Bewertung der Variabilität turbulenter Ausbreitungsprozesse in einer urbanen Rauigkeit

Die repräsentative Charakterisierung turbulenter Ausbreitungsprozesse einzelner Gaswolken wird von der Variabilität dieser Prozesse erschwert. In Kapitel 8.3 wurde aufgezeigt, mit welcher Genauigkeit sich diese Prozesse im Rahmen der durchgeführten Messkampagne auf Basis von über 200 Wiederholungsversuchen charakterisieren ließen. Die in dieser Messkampagne erreichte Anzahl von Wiederholungsversuchen unter gleichen mitt-

leren Randbedingungen können in der Regel bei Naturmessungen aufgrund der sich stets verändernden meteorologischen Randbedingungen nicht realisiert werden. So waren es beispielsweise bei der zuvor beschriebenen Joint Urban 2003-Kampagne maximal 3 bis 4 Puffs, die unter ähnlichen Randbedingungen freigesetzt werden konnten. Für die Auswertung der jeweiligen Messergebnisse ist die Kenntnis, mit welcher Genauigkeit diese ermittelt wurden, von hoher Bedeutung. So ist ein aussagekräftiger Vergleich zwischen den Ergebnissen von mittleren Puff-Parametern aus Windkanalversuchen, aus numerischen Berechnungen oder aus Naturkampagnen nur möglich, wenn jeweils die Unsicherheit bekannt ist, mit der sich der mittlere Parameter ermitteln ließ.

Es soll daher in Kapitel 8.5.1 überprüft werden, welche statistische Bestimmtheit der mittleren Puff-Parameter zu erwarten ist, wenn der zur Verfügung stehende Datensatz über eine bestimmte, variierende Anzahl von Wiederholungsversuchen verfügt. Desweiteren wird die Abhängigkeit dieser Bestimmungsgenauigkeit vom jeweiligen Puff-Parameter (Kapitel 8.5.2) und vom jeweiligen Abstand des Messortes zur Quelle untersucht (Kapitel 8.5.3).

8.5.1 Einfluss der Ensemblegröße auf die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter

Um den Einfluss der Ensemblegröße (der Anzahl zur Verfügung stehender Wiederholungsmessungen) auf die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter zu überprüfen, wurden die mittleren Puff-Parameter für unterschiedliche Ensemblegrößen ermittelt. Die durchgeführten 30-minütigen Konzentrationsmessungen, die jeweils zwischen 200 bis 400 Puff-Freisetzungen beinhalten, bieten die Möglichkeit, die mittleren Puff-Parameter aus 2 bis hin zu 400 freigesetzten Puffs (in sog. Ensembles) zu berechnen. Desweiteren lassen sich die aus den jeweiligen Ensembles berechneten mittleren Puff-Parameter für jede Ensemblegröße aus unterschiedlichen Kombinationen der in die Berechnung einbezogenen Puffs einer 30-minütigen Messung bestimmen.

Der Einfluss der Ensemblegröße auf die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter wird zunächst anhand von 3 unterschiedlichen Ausbreitungsszenarien (S4_170_AP15, S3_180_FP04 und S1_170_FP05) aufgezeigt. Die genaue Lage der Messpunkte und Quellen im Stadtgebiet von Oklahoma City zeigen Abbildung 53 auf Seite 143

(Szenario: S4_170_AP15), Abbildung 71 a auf Seite 187 (Szenario: S1_170_FP05) und Abbildung 71 e auf Seite 188 (Szenario: S3_180_FP04). Die Messorte lagen bei den Versuchen jeweils in einer Höhe von 2 m über Grund im Naturmaßstab. Die mittlere Windgeschwindigkeit am Referenzort ($x = -2600$ mm, $y = 0$ mm und $z = 266.7$ m) betrug 2.11 m/s für Szenario S4_170_AP15, 2.46 m/s für Szenario S3_180_FP04 und 2.45 m/s für Szenario S1_170_FP05. Innerhalb der 30-minütigen Messungen wurden für alle drei Szenarien jeweils 285 Puffs freigesetzt, von denen alle am jeweiligen Messort registriert wurden.

Abbildung 62 (links) zeigt für die drei Szenarien die dimensionslose mittlere „arrival time“ (at^*), die anhand unterschiedlich vieler Puff-Freisetzen (Ensembles) aus der jeweils gleichen 30-minütigen Messung bestimmt wurde. Die Ensemblegrößen, für die jeweils die mittlere dimensionslose „arrival time“ ermittelt wurde, setzen sich aus minimal 3 Puffs und maximal 280 Puffs zusammen. Für jede Ensemblegröße wurde die mittlere „arrival time“ für 200 unterschiedliche Kombinationen aus den insgesamt 285 Puffs einer 30-minütigen Messung berechnet.

Die Abbildung 62 zeigt, dass für alle Ensemblegrößen die errechneten Mittelwerte von at^* annähernd symmetrisch um den Mittelwert streuen, der für die maximale Ensemblegröße ermittelt wurde. Der Mittelwert von at^* für die maximale Ensemblegröße beträgt $at(max)^* = 682.9$ [-] für Szenario S4_170_AP15, $at(max)^* = 984.3$ [-] für Szenario S3_180_FP04 und $at(max)^* = 1216.8$ [-] für Szenario S1_170_FP05. Die zu beobachtende Streubreite der berechneten Mittelwerte von at^* zeigt für jede Ensemblegröße die Bandbreite möglicher Mittelwerte von at^* auf und ist damit ein Maß für die Repräsentativität, mit der sich der Mittelwert von at^* auf Basis einer bestimmten Ensemblegröße bestimmen lässt.

Die Abbildung 62 zeigt, dass die Streubreite von at^* für die drei untersuchten Szenarien mit zunehmender Ensemblegröße kleiner wird. Erwartungsgemäß lässt sich demzufolge mit zunehmender Ensemblegröße die dimensionslose mittlere „arrival time“ mit einer höheren Repräsentativität bestimmen.

Wird beispielsweise für das Ausbreitungsszenario S4_170_AP15 die mittlere „arrival time“ allein aus 3 Puff-Ereignissen bestimmt, sind, abhängig von den für die Berechnung heran-

gezogenen Puff-Freisetzungen, Mittelwerte der dimensionslosen „arrival time“ zwischen 502 [-] und 952 [-] möglich.

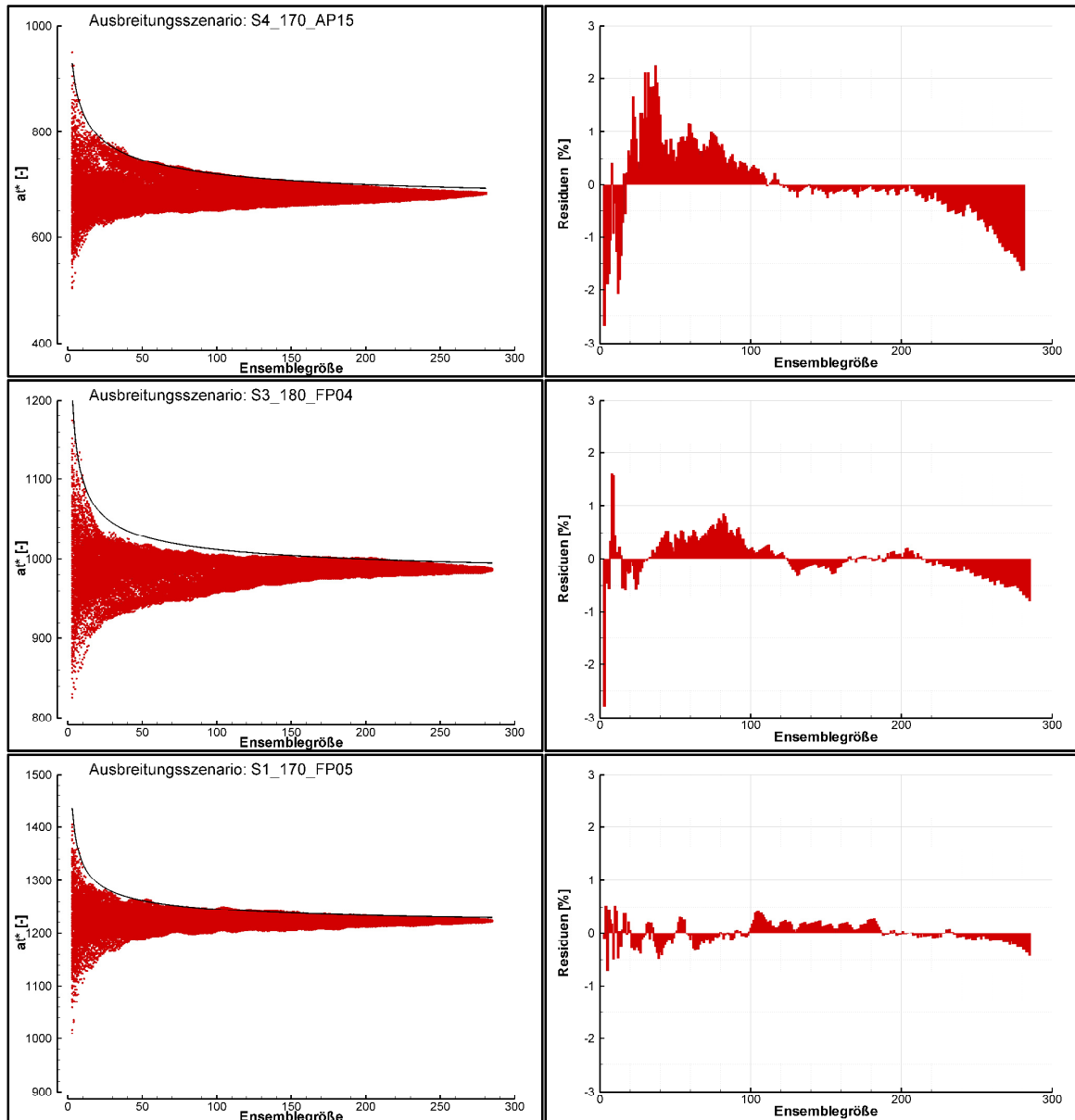


Abbildung 62: Dimensionslose mittlere „arrival time“ (at^*), die anhand unterschiedlich vieler Puff-Ergebnisse (Ensembles) für 3 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien (S4_170_AP15, S3_180_FP04 und S1_170_FP05) bestimmt wurden. Dargestellt sind für die 3 Szenarien zudem die über einen „best fit“ ermittelten Einhüllenden (links). Die rechten Abbildungen zeigen jeweils die zugehörigen Abweichungen (Residuen) der maximalen bzw. minimalen Mittelwerte von at^* für jede Ensemblegröße von der Einhüllenden (rechts).

Übertragen auf den Naturmaßstab bei einer Windgeschwindigkeit von 2.5 m/s am zuvor genannten Referenzort entspricht dies Werten der „arrival time“, die zwischen 200.8 Se-

kunden und 380.8 Sekunden liegen. Bezogen auf die mittlere dimensionslose „arrival time“ aller 285 Puffs, lässt sich die mittlere „arrival time“ auf Basis von 3 Puffs mit einer Unsicherheit von etwa $\pm 32.9\%$ bestimmen. Wird der Mittelwert von at^* hingegen aus insgesamt 100 Puffs berechnet, so schwanken die ermittelten Ergebnisse des Szenarios S4_170_AP15 nur noch um etwa $\pm 5.1\%$.

Die Streuung der arithmetischen Mittelwerte \bar{x} wird in der mathematischen Statistik als Standardfehler oder Stichprobenfehler $\sigma(\bar{x})$ bezeichnet (Precht, Kraft & Bachmaier 2005). Der Standardfehler ist ein Maß für die Streuung einer Stichprobenstatistik über alle möglichen Zufallsstichproben vom Umfang n aus der Grundgesamtheit. Es gilt die Beziehung:

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad 8.7$$

Hierbei bezeichnet σ die Standardabweichung der Einzelwerte und n die Ensemblegröße. Der Standardfehler wird kleiner je größer die Ensemblegröße und je geringer die Varianz der Grundgesamtheit ist.

Um auf Basis der durchgeführten Messungen die Abnahme der Streuung mit zunehmender Ensemblegröße zu bestimmen, wurden für jede Ensemblegröße die maximalen und minimalen Mittelwerte von at^* ermittelt. Die jeweils kleinsten Werte jeder Ensemblegröße wurden für das Szenario S4_170_AP15 an der Geraden $y = 682.9 [-]$ gespiegelt (mittlere dimensionslose „arrival time“ aller 285 Puffs). Analog wurde bei den beiden anderen genannten Szenarien verfahren. Verbindet man anschließend sämtliche ermittelte Extremwerte miteinander, erhält man eine einhüllende Kurve. Anhand des Programms „Table Curve“ wurde diese Kurve einer stetig differenzierbaren Funktion angenähert. Der Verlauf dieser Funktion lässt sich über die Beziehung

$$y = A + \frac{B}{\sqrt{n}} \quad 8.8$$

beschreiben. Für die jeweilige Ensemblegröße n beschreibt hierbei y die maximale Abweichung (Streuung) vom Mittelwert at^* , der aus allen Puffs einer Messung errechnet wurde.

Bei A und B handelt es sich um die jeweiligen Kurvenparameter, die Abhängig vom jeweiligen Szenario und vom jeweiligen Puff-Parameter unterschiedliche Werte annehmen können. Die auf Basis der durchgeführten Messungen ermittelte Beziehung für die Streuung y ist erwartungsgemäß proportional zu dem in Gleichung 8.7 angegebenen Standardfehler eines arithmetischen Mittels.

Die prozentualen Abweichungen (Residuen) der maximalen bzw. minimalen Mittelwerte jeder Ensemblegröße von der ermittelten Funktion y sind in Abbildung 62 (rechts) dargestellt. Die größten Residuen werden insbesondere bei den Szenarien S4_170_AP15 und S3_180_FP04 für relativ kleine Ensemblegröße $n < 50$ und relativ große Ensemblegrößen $n > 250$ beobachtet.

Die vergleichsweise großen Abweichungen bei kleinen Ensemblegrößen sind darauf zurückzuführen, dass die mittleren Puff-Parameter hier die größte Streubreite aufweisen. Wie bereits erwähnt, wurde die mittlere dimensionslose „arrival time“ bezüglich jeder Ensemblegröße für 200 unterschiedliche Kombinationen der insgesamt 285 während einer 30-minütigen Messung freigesetzten Puffs berechnet. Aus Abbildung 62 (links oben) ist im Fall des Szenarios S4_170_AP15 ersichtlich, dass sich diese 200 Werte für eine Ensemblegröße von 3 auf einen Wertebereich der mittleren dimensionslosen „arrival time“ zwischen 502 [-] und 952 [-] erstrecken. Wird hingegen die mittlere dimensionslose „arrival time“ für Ensemblegrößen von 100 berechnet, befinden sich die 200 ermittelten Werte lediglich in einem Wertebereich von at^* zwischen 650 [-] und 710 [-]. Die Bestimmungsgenauigkeit der Extremwerte (Maxima und Minima) ist demnach für die Ensemblegrößen am geringsten, die die größte Streubreite von at^* aufweisen. Demzufolge sind für kleine Ensemblegrößen größere Residuen von der ermittelten Einhüllenden zu erwarten, als für große Ensemblegrößen.

Die anwachsenden Residuen für Ensemblegrößen $n > 250$ sind hingegen auf den angewandten Algorithmus zurückzuführen. Nähert sich die Ensemblegröße der Anzahl insgesamt freigesetzter Puffs an, erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass sich die 200 pro Ensemblegröße für at^* berechneten Werte nicht mehr aus unterschiedlichen Puff-Freisetzen einer 30-minütigen Messung zusammensetzen, sondern vermehrt dieselben Puff-Ergebnisse für die Berechnung von at^* herangezogen werden. Die Folge ist, dass

sich die 200 errechneten Werte von at^* für eine Ensemblegröße zunehmend annähern. Die natürliche Variabilität, die bei der Bestimmung von at^* aus 200 Kombinationen unterschiedlicher Puff-Freisetzen auftritt, wird hier also bei höheren Ensemblegrößen zwangsläufig und unnatürlich verringert. Verringert sich die Streubreite der 200 Werte von at^* , wird die Abweichung zwischen den Extremwerten von at^* und der Kurve y größer. Somit werden bei hohen Ensemblegrößen auch große Residuen beobachtet, die jedoch auf den unnatürlichen Effekt einer begrenzten Puff-Menge pro 30-minütiger Messung zurückzuführen sind.

Bei sämtlichen untersuchten Szenarien traten diese großen Residuen jedoch erst für Ensemblegrößen $> 80\%$ der maximalen Ensemblegröße auf. Nachfolgend wird daher die Bestimmungsgenauigkeit (=Streubreite) von at^* nur für Ensemblegrößen $< 80\%$ der maximalen Ensemblegröße für das jeweilige Szenario bestimmt.

8.5.2 Vergleich der Bestimmungsgenauigkeit der verschiedenen mittleren Puff-Parameter

In Kapitel 8.5.1 wurde der Einfluss der Ensemblegröße auf die Bestimmungsgenauigkeit allein für den „arrival time“-Parameter untersucht. Nachfolgend wird die Bestimmungsgenauigkeit der übrigen 4 Puff-Parameter („peak time“, „leaving time“, „dosage“ und „peak concentration“) bei verschiedenen Ensemblegrößen untersucht. Bereits in Kapitel 8.3 wurde anhand sämtlicher freigesetzter Puffs einer 30-minütigen Messungen aufgezeigt, dass die Bestimmungsgenauigkeit der berechneten mittleren Puff-Parameter unterschiedlich für die einzelnen Parameter ausfällt (siehe Tabelle 10 auf Seite 119). Es ist demzufolge zu erwarten, dass dies auch für die Ergebnisse im Fall von beliebigen Ensemblegrößen zutrifft.

Für diese Untersuchungen wurden von den insgesamt 167 30-minütigen Messungen der Kampagne (siehe Abbildung 71 a bis o auf Seite 187 ff.) nur die berücksichtigt, bei denen mindestens 99 % der freigesetzten Puffs am Messort registriert wurden. Dieses Kriterium wurde aufgestellt, um eine bessere statistische Vergleichbarkeit von Messergebnissen unterschiedlicher Szenarien zu ermöglichen. Ohne dieses Kriterium hätten für einen repräsentativen Vergleich der Ergebnisse mittlerer Puff-Parameter gleicher Ensemblegröße, die jeweils nicht am Messort angekommenen Puffs mit berücksichtigt werden müssen.

Das 99 %-Kriterium wurde von 102 Messungen der insgesamt 167 durchgeführten Messungen erfüllt. Für diese 102 unterschiedlichen Ausbreitungsszenarien wurden die mittleren Puff-Parameter für ausgewählte Ensemblegrößen (5, 10, 20, 50, 100 und 200) bestimmt. Hierbei wurden, analog zur Vorgehensweise in Kapitel 8.5.1, anhand unterschiedlicher Kombinationen sämtlicher Puff-Freisetzungen einer 30-minütigen Messung insgesamt 200 Mittelwerte pro Ensemblegröße bestimmt. Bezieht man die Streubreite der 200 Mittelwerte einer bestimmten Ensemblegröße auf den Mittelwert, der bei Einbeziehung sämtlicher Puffs einer Messung berechnet wird, ist die Streubreite ein Maß für die Unsicherheit, mit der sich der Mittelwert eines Puff-Parameters auf Basis einer bestimmten Ensemblegröße bestimmen lässt. Diese Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter für die jeweilige Ensemblegröße wurde über sämtliche 102 Ausbreitungsszenarien gemittelt. Abbildung 63 zeigt die Ergebnisse dieser Berechnungen. Die eingezeichneten Streubalken geben jeweils die Standardabweichung der 102 einzelnen Bestimmungsgenauigkeiten wieder.

Die Abbildung 63 zeigt, dass die Bestimmungsgenauigkeit für alle mittleren Puff-Parameter mit zunehmender Ensemblegröße zunimmt. Es wird zudem deutlich, dass die mittleren Puff-Parameter unterschiedliche Bestimmungsgenauigkeiten für die gleiche Ensemblegröße aufweisen. Im Schnitt zeigt der „peak concentration“-Parameter für sämtliche untersuchte Ensemblegrößen die geringste Bestimmungsgenauigkeit auf. So lässt sich im Durchschnitt auf Basis von 5 Puffs die mittlere „peak concentration“ lediglich mit einer Genauigkeit von etwa $\pm 71\%$ des jeweiligen Mittelwertes angeben. Die eingezeichneten Streubalken in Abbildung 63 deuten allerdings an, dass einzelne Ausbreitungsszenarien weitaus geringere Bestimmungsgenauigkeiten für die mittlere „peak concentration“ aufweisen.

Die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren „dosage“ fällt im Durchschnitt geringfügig höher aus, als die der mittleren „peak concentration“. Die höchsten Bestimmungsgenauigkeiten zeigen die mittleren Reisezeiten auf, wobei im Durchschnitt die mittlere „peak time“ eine etwas geringere Bestimmungsgenauigkeit aufweist, als die der mittleren „arrival time“ und die der mittleren „leaving time“.

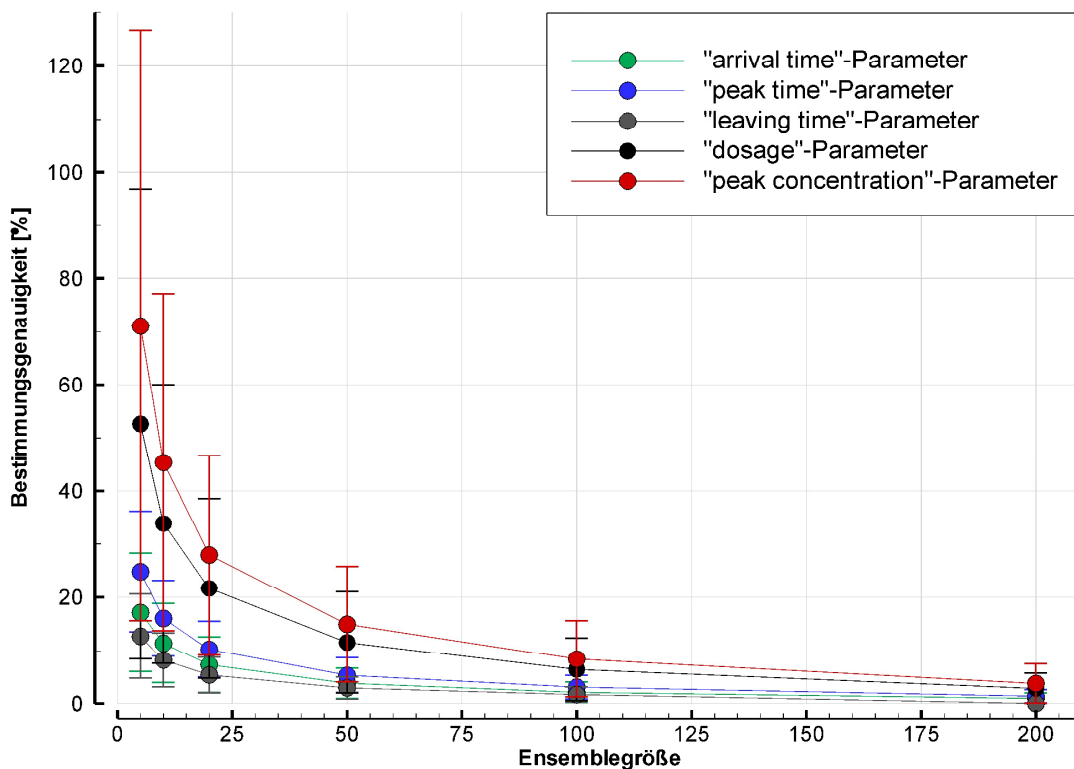


Abbildung 63: Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter für unterschiedliche Ensemblegrößen, ermittelt aus insgesamt 102 unterschiedlichen Ausbreitungsszenarien, bei denen jeweils sämtliche freigesetzte Puffs den Messort erreichten.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Bestimmungsgenauigkeit und damit die Repräsentativität der mittleren Puff-Parameter erwartungsgemäß von der Anzahl zur Verfügung stehender Wiederholungsmessungen abhängig ist. Es muss hierbei allerdings berücksichtigt werden, dass diese Repräsentativität bei gleicher Ensemblegröße signifikant unterschiedlich für die einzelnen Puff-Parameter ausfällt.

8.5.3 Einfluss des Abstandes zwischen Messort und Quelle auf die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter

In Kapitel 8.3 wurde die Datenqualität der durchgeführten Konzentrationsmessungen für 4 unterschiedliche Szenarien überprüft, indem jeweils 5-6 Wiederholungsmessungen der 30-minütigen Zeitserien aufgenommen wurden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen haben gezeigt, dass die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter unter anderem auch vom Abstand des Messortes zur Quelle abhängig ist. Diese Annahme soll in diesem Kapitel für die übrigen durchgeführten Konzentrationsmessungen überprüft wer-

den. Da für diese insgesamt 167 unterschiedlichen Szenarien keine Wiederholungsmessungen zur Verfügung stehen, wird die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter bei einer ausgewählten Ensemblegröße von 200 mit dem in Kapitel 8.5.1 beschriebenen Verfahren bestimmt. Um die Ergebnisse verschiedener Szenarien miteinander vergleichen zu können, wird die ermittelte Bestimmungsgenauigkeit jeweils auf den Mittelwert sämtlicher Puffs einer Messung bezogen. Für diese Untersuchungen werden wiederum nur die 102 Szenarien herangezogen, bei denen mindestens 99 % der freigesetzten Puffs den Messort erreicht haben. Für jedes dieser Szenarien wurde die Bestimmungsgenauigkeit sämtlicher Puff-Parameter bei einer Ensemblegröße von 200 Puffs ermittelt.

Abbildung 64 zeigt die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter bei einer Ensemblegröße von 200 für die untersuchten 102 Szenarien, aufgetragen gegen den jeweiligen Abstand des Messortes vom Quellort. Bei dem angegebenen Abstand handelt es sich um die Länge einer gedachten Geraden zwischen dem Quell- und Messort. Gebäude, die gegebenenfalls zwischen der Quelle und dem Messort gelegen sind und dementsprechend den Ausbreitungsverlauf der freigesetzten Wolken beeinflussen, wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Die Abbildung 64 zeigt, dass die höchsten Unsicherheiten für die Bestimmung der mittleren Puff-Parameter jeweils bei Messungen zu beobachten sind, die vergleichsweise nah zum Quellort durchgeführt wurden. Wie bereits in Kapitel 8.3 auf Seite 117 beschrieben, ist dies darauf zurückzuführen, dass sich mit zunehmender Zeit nach der Freisetzung eines Puffs die freigesetzte Konzentration mit der Umgebungsluft vermischt und die Konzentrationsgradienten innerhalb der Wolke zurückgehen. Hierdurch reduziert sich mit zunehmendem Quellabstand die Variabilität der Messergebnisse, was wiederum zu einer geringeren Unsicherheit für die Bestimmung der mittleren Puff-Parameter bei gleicher Ensemblegröße führt.

Allerdings weist die ermittelte Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter eine breite Streuung für sämtliche untersuchte Quellabstände der Messorte auf. So zeigen vergleichsweise quellnah durchgeführte Messungen zum Teil ähnlich hohe Bestim-

Bestimmungsgenauigkeiten der mittleren Puff-Parameter auf, wie Messungen, bei denen der Quellabstand zu den größten der durchgeführten Messungen zählt.

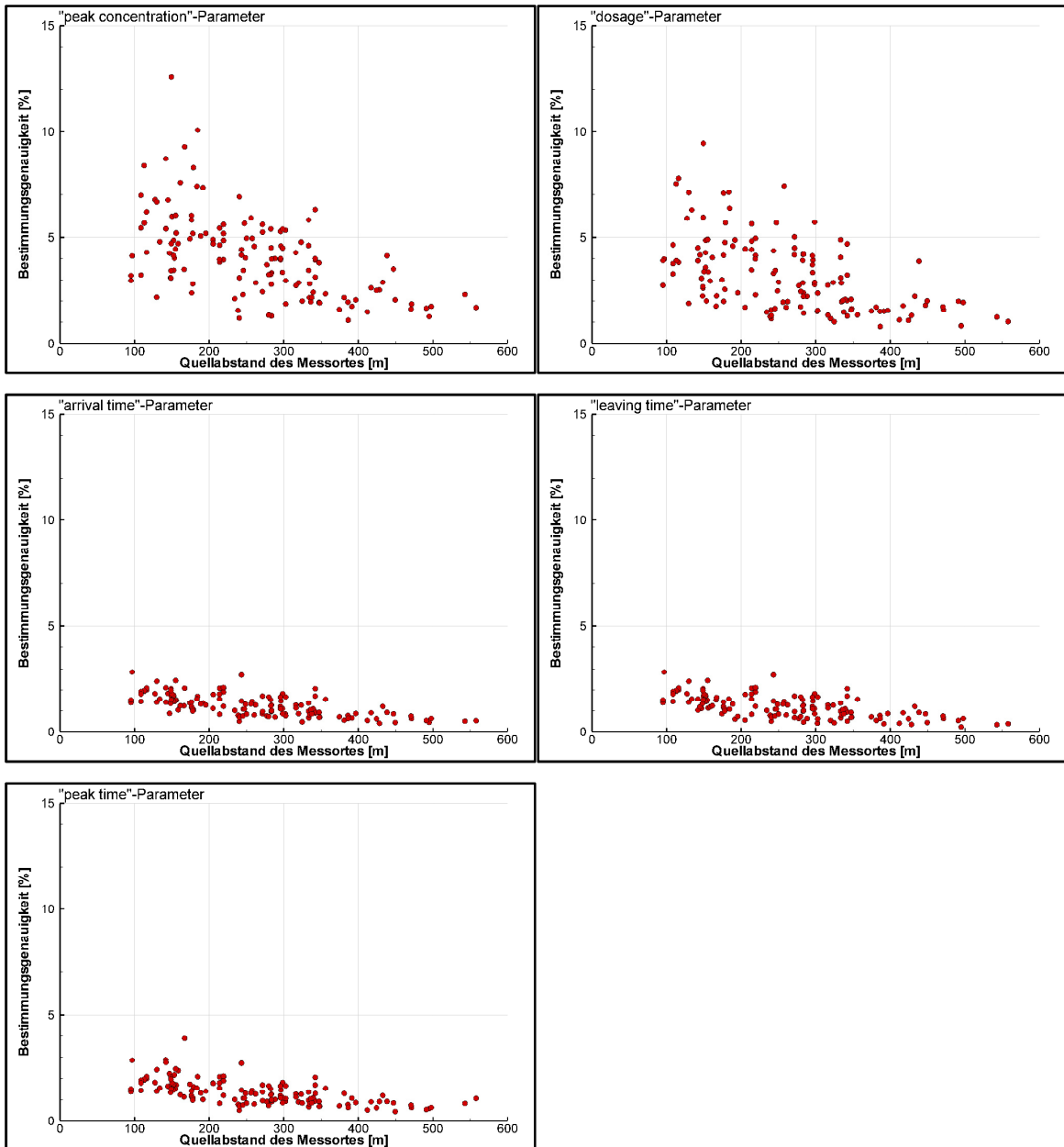


Abbildung 64: Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter bei einer Ensemblegröße von jeweils 200 Puffs, aufgetragen gegen den Abstand zwischen Messort und Quellort der Messungen. Dargestellt sind die Ergebnisse von 102 unterschiedlichen Ausbreitungsszenarien.

Es ist daher anzunehmen, dass die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter noch von weiteren Faktoren beeinflusst wird, als von denen, die in diesem Kapitel untersucht wurden. Hierzu könnten beispielsweise Faktoren zählen, die die Turbulenzintensität

einer Strömung erhöhen. Da eine Strömung insbesondere in Bodennähe oder in der Nähe von Hindernissen hohe Turbulenzintensitäten aufweist, wäre anhand systematischer Untersuchungen zu überprüfen, welchen Einfluss die Höhe des Messortes oder der Gebäudeabstand des Messortes auf die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter nimmt.

8.6 Berechnung der Puff-Parameter aus Messungen der Joint Urban 2003-Kampagne

Die bei der vorliegenden Arbeit analysierten Daten der Joint Urban 2003-Naturmesskampagne wurden von der Organisation „Dugway Proving Ground“, die zum amerikanischen Verteidigungsministerium gehört, zur Verfügung gestellt (<https://ju2003-dpg.dpg.army.mil>).

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, wurden 16 Puff-Freisetzungen der JU 2003-Feldkampagne für einen Vergleich mit Ergebnissen der Windkanalversuche ausgewählt. Abbildung 65 zeigt die Lage der Quellen und Messorte dieser Versuche im Stadtgebiet von Oklahoma City. Bei den Messorten ist sowohl die Windkanal- als auch die Feldkampagnen-Bezeichnung dieser Orte angegeben.

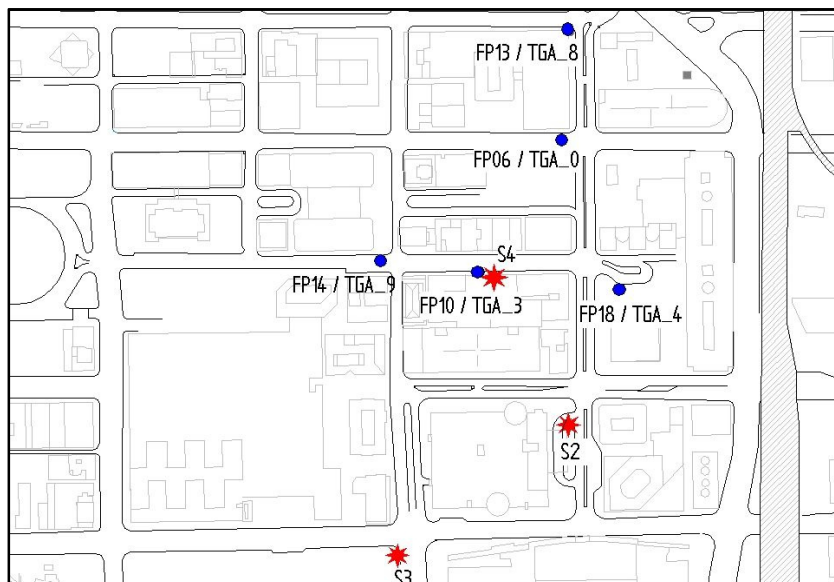


Abbildung 65: Lage der Quellen und Messorte von Puff-Freisetzungsversuchen, die sowohl während der JU 2003-Kampagne als auch bei der Windkanalkampagne untersucht wurden. Bei den Messorten ist neben der Windkanal- auch die Feldkampagnen-Bezeichnung dieser Orte angegeben.

Einige freigesetzte Puffs der Feldkampagne wurden nicht nur an einem, sondern an unterschiedlichen Messorten detektiert, so dass von den 16 freigesetzten Puffs 30 Messungen zur Verfügung stehen, bei denen jeweils die Konzentration eines durchziehenden Puffs aufgezeichnet wurde. Diese 30 Messungen wiederum lassen sich in 12 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien einteilen. Zu einem Ausbreitungsszenario werden die Puffs gezählt, die innerhalb eines IOPs (Intensive Operation Period) am selben Messort detektiert wurden. Für jede der 30 Messungen wurden die in Kapitel 8.1 beschriebenen Puff-Parameter bestimmt. Tabelle 16 fasst die Ergebnisse dieser Messungen zusammen. Hierbei ist für jede Messung angegeben, um welche Puff-Freisetzung (Puff Nr.) eines IOPs (Intensive Operation Period) es sich handelt. Innerhalb eines sogenannten IOPs wurden bei der Naturkampagne 3 bis 4 Puffs nacheinander in Abständen von 20 Minuten freigesetzt. Neben den ermittelten Puff-Parametern (pc [ppt_v], $dosage$ [ppt_v s], at [s], pt [s] und It [s]) ist in der Tabelle der Quell- und Messort einer jeden Messung angegeben. Hierbei sind für den Messort die bei der Naturmesskampagne verwendete Bezeichnung und die jeweilige Lage in UTM-Koordinaten angegeben. Desweiteren gibt die Tabelle die Freisetzungsmenge des Messgases SF₆ [g], die mittlere Windgeschwindigkeit U_{ref} [m/s] am Referenzort und die mittlere Windrichtung W_{dir} [°] am Referenzort der ausgewählten Messungen an. Bei den angegebenen Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen handelt es sich jeweils um einen 30-Minuten-Mittelwert, der mit einem SODAR in 80 m Höhe über dem Boden 2 km südlich des Stadtzentrums von Oklahoma City (in UTM-Koordinaten: East 633824, North 3924274) gemessen wurde. Die Lage dieses Referenzortes korrespondiert mit der Lage des Referenzortes der Windkanalkampagne ($x = -2600$ mm, $y = 0$ mm, $z = 266.7$ mm). Die einzelnen Puff-Freisetzungen der Naturkampagne fanden jeweils innerhalb der 30-Minuten-Intervalle statt, über die die Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemittelt wurde. Abhängig von der Windgeschwindigkeit und vom Abstand des Messortes zu der Quelle dauerte es bei den 16 ausgewählten Puff-Freisetzungen etwa 4 bis 18 Minuten, bis der freigesetzte Puff komplett am Messort durchgezogen war. Dementsprechend muss berücksichtigt werden, dass der Mittelungszeitraum der Windgeschwindigkeit und Windrichtung nicht mit der Dauer der Puff-Freisetzung übereinstimmt. Da allerdings nur 15-Minuten-Mittelwerte der SODAR-Messungen zur Verfügung stehen, deren Beginn zudem

nicht mit dem Freisetzungzeitpunkt der Puffs abgestimmt war, lässt sich nur über ein 30-Minuten-Mittelungsintervall sicherstellen, dass die Puff-Ausbreitung innerhalb des Mittelungszeitraumes der Windgeschwindigkeit und Windrichtung lag.

JU 2003 Feldversuch													korrespond. Windkanal- messung	
IOP	Puff Nr.	Quelle	Messort		Q _v	U _{ref}	W _{dir}	pc	dosage	at	pt	lt		
			Bez.	Easting [m]	Northing [m]	[g]	[m/s]	[°]	[pptv]	[pptvs]	[s]	[s]	[s]	
3	2	S3	TGA_0	634762	3926164	1005	5.01	196	12340	341435	208	214	515.5	S3_200_FP06
3	3	S3	TGA_0	634762	3926164	1000	6.72	194	19593	2231767	263.5	308	503.5	S3_200_FP06
3	4	S3	TGA_0	634762	3926164	1004	7.72	192	9141	1201729	198	203	504.5	S3_200_FP06
3	1	S3	TGA_3	634682	3926036	1000	7.50	196	10090	514067	101	114	224	S3_200_FP10
3	2	S3	TGA_3	634682	3926036	1005	5.01	196	1710	65529	139	153	520.5	S3_200_FP10
3	4	S3	TGA_3	634682	3926036	1004	7.72	192	4524	628365	175.5	253	377	S3_200_FP10
3	2	S3	TGA_9	634590	3926046	1005	5.01	196	329	6742	484.5	537	644.5	S3_200_FP14
3	3	S3	TGA_9	634590	3926046	1000	6.72	194	11674	195122	165	167	269.5	S3_200_FP14
3	4	S3	TGA_9	634590	3926046	1004	7.72	192	881	13856	130	271	276.5	S3_200_FP14
4	1	S3	TGA_0	634762	3926164	996	6.57	204	973	163595	218	379.5	606.5	S3_200_FP06
4	2	S3	TGA_0	634762	3926164	1002	6.91	209	11454	892232	209	220	453	S3_200_FP06
4	3	S3	TGA_0	634762	3926164	504	7.60	209	1161	82659	280.5	301.5	440.5	S3_200_FP06
4	1	S3	TGA_3	634682	3926036	996	6.57	204	2001	192223	136.5	187	279.5	S3_200_FP10
4	3	S3	TGA_3	634682	3926036	504	7.60	209	82	1332	783.5	784	1049	S3_200_FP10
4	1	S3	TGA_4	634819	3926021	996	6.57	204	25235	2378351	76.5	123	220.5	S3_200_FP18
4	2	S3	TGA_4	634819	3926021	1002	6.91	209	12261	719776	151	177.5	431.5	S3_200_FP18
4	3	S3	TGA_4	634819	3926021	504	7.60	209	25456	1590546	127.5	135	258	S3_200_FP18
6	3	S3	TGA_3	634682	3926036	510	6.91	171	3689	225877	187.5	291	464.5	S3_180_FP10
6	1	S3	TGA_9	634590	3926046	498	6.14	189	800	39645	127.5	172	252	S3_180_FP14
8	4	S2	TGA_3	634682	3926036	305	5.55	162	8635	936272	199	199	665	S2_170_FP10
8	2	S2	TGA_8	634769	3926268	500	6.23	164	12526	1733445	142	157.5	435	S2_170_FP13
8	3	S2	TGA_8	634769	3926268	300	4.86	170	11070	909390	160	184.5	403	S2_170_FP13
8	4	S2	TGA_8	634769	3926268	305	5.55	162	9612	958200	193.5	202.5	1010	S2_170_FP13
9	1	S4	TGA_0	634762	3926164	300	7.60	182	9464	944312	173.5	190	509.5	S4_190_FP06
9	3	S4	TGA_0	634762	3926164	300	8.08	186	22281	1227362	166.5	193.5	414.5	S4_190_FP06
9	4	S4	TGA_0	634762	3926164	300	7.66	182	7546	1103496	122	142.5	474	S4_190_FP06
9	1	S4	TGA_8	634769	3926268	300	7.60	182	7030	1496732	172	340	605	S4_190_FP13
9	2	S4	TGA_8	634769	3926268	300	6.70	183	17418	2045941	199.5	228	505	S4_190_FP13
9	3	S4	TGA_8	634769	3926268	300	8.08	186	8838	480888	200	248.5	524.5	S4_190_FP13
9	4	S4	TGA_8	634769	3926268	300	7.66	182	1049	231852	260.5	443.5	683.5	S4_190_FP13

Tabelle 16: Angegeben sind die für 30 unterschiedliche Messungen der Feldkampagne JU2003 ermittelten Puff-Parameter (pc [ppt_v], dosage [ppt_v s], at[s], pt [s] und lt [s]). Die Puff Nr. gibt jeweils an, um welche Puff-Freisetzung es sich innerhalb eines sogenannten IOPs (Intensive Operation Period) der JU2003-Kampagne handelt. Für jede Messung ist der Quell- und Messort, die Freisetzungsmenge Q_v [g], die mittlere Windgeschwindigkeit U_{ref} [m/s] am Referenzort, die mittlere Windrichtung W_{dir} [°] am Referenzort und das mit der Naturmessung korrespondierende Ausbreitungsszenario der Windkanalversuche angegeben. Die grau markierte Messung wird aufgrund zu geringer Konzentrationen am Messort und einer damit verbundenen ungenauen Puff-Parameter-Bestimmung nicht für einen Vergleich mit Ergebnissen der Windkanalmessungen herangezogen (siehe Erläuterungen hierzu im Text).

Da die Windrichtung bei den 3 bis 4 Puff-Freisetzungen eines IOPs nicht identisch war, wurde aus den geringfügig unterschiedlichen Windrichtungen eines IOPs ein Mittelwert errechnet. In der letzten Spalte der Tabelle 16 ist das jeweilige korrespondierende Aus-

breitungsszenario der Windkanalkampagne angegeben. Es ist zu berücksichtigen, dass bei den Windkanalversuchen die Ausbreitung der Puffs nur für bestimmte Windrichtungen untersucht wurde. Diese Windrichtungen stimmen in etwa mit der mittleren Windrichtung eines gesamten IOPs überein. Es treten jedoch Differenzen zwischen der mittleren Windrichtung eines Naturausbreitungsversuchs (30-Minuten-Mittelwert in 80 m Höhe am oben angegebenen Referenzort) und der mittleren Windrichtung des korrespondierenden Windkanalversuchs in der Größenordnung von etwa $\pm 10^\circ$ auf.

Bei der Analyse der Ergebnisse der Naturmessungen, fällt eine der dreißig Messungen durch ungewöhnlich lange Reisezeiten auf. Der dritte Puff des IOPs 4, der am Messort TGA_3 gemessen wurde (siehe graue Markierung in Tabelle 16), weist trotz höherer mittlerer Windgeschwindigkeit als die übrigen Freisetzungen des IOPs 4 mit 783.5 Sekunden eine fast 6-fach längere „arrival time“ auf, als der erste Puff des IOPs 4, der am gleichen Messort nach bereits 136.5 Sekunden registriert wurde. Zudem wurde derselbe Puff (Puff Nr. 3) des IOPs 4 bereits nach 280.5 Sekunden am Messort TGA_0 gemessen, der in Ausbreitungsrichtung etwa 2 Straßenschluchten weiter vom Quellort entfernt liegt als der Messort TGA_3. Es ist möglich, dass die freigesetzte Gaswolke (Puff Nr. 3) bei ihrer Ausbreitung den Messort TGA_3 größtenteils verfehlt hat, und ein kleiner Teil des freigesetzten Gases, der im Nachlauf von Häusern aufgehalten wurde, erst Minuten nach dem Durchzug der Hauptwolke den Messort TGA_3 erreicht hat. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass die gemessene Konzentration bei dieser Messung sehr gering ausfiel. Die „peak concentration“ liegt mit 82 ppt_v nur knapp oberhalb der minimalen Konzentration, die sich mit den verwendeten TGA-4000-Systemen detektieren ließ. Die minimal zu detektierende Konzentration eines TGA-4000-Systems beträgt 10 ppt_v unter Laborbedingungen. Sie kann nach (Allwine et al. 2004) bei Naturversuchen abhängig von den Kalibrierungsergebnissen auch deutlich oberhalb des angegebenen Laborwertes liegen. Da für diese Messung nicht ausgeschlossen werden kann, dass die gemessene Konzentration in der Größenordnung der Messungenauigkeit liegt, wird diese Messung nicht für einen Vergleich mit Ergebnissen der Windkanalversuche herangezogen.

8.7 Vergleich zwischen Windkanal und Naturdaten

Um einen Vergleich zwischen den Ergebnissen der Natur- und Windkanalmessungen zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse jeweils in eine dimensionslose Form übertragen. Diese Entdimensionalisierung wurde, wie in Kapitel 8.4.4 ausführlich beschrieben, für die Ergebnisse sämtlicher Puff-Parameter durchgeführt. Die dimensionslosen Werte der Natur- und Windkanalmessungen sind unabhängig von den jeweiligen Randbedingungen und können dementsprechend miteinander verglichen werden.

Für die Entdimensionalisierung der Puff-Parameter ist eine Referenzwindgeschwindigkeit erforderlich, die an einem ausgewählten Messort die mittlere Windgeschwindigkeit während eines Ausbreitungsversuches wiedergibt. Als Referenzort wurde für die Natur- und Windkanalversuche wiederum der Messort stromaufwärts des Innenstadtbereiches von Oklahoma City in 80 m über dem Boden ausgewählt (die genaue Lage des Referenzortes ist z.B. in Kapitel 8.6 beschrieben). Bei der Windkanalmessung wurde die Referenzwindgeschwindigkeit über einen Zeitraum von 3 Minuten gemittelt, was übertragen auf den Naturmaßstab bei gleicher Windgeschwindigkeit einem Mittelungszeitraum von etwa 15 Stunden entspricht.

Die Referenzwindgeschwindigkeit wurde bei der Naturmessung über einen Zeitraum von 30 Minuten gemittelt. Längere Mittelungszeiträume ließen sich bei der Feldkampagne nicht realisieren, da sich die Randbedingungen in der Natur stetig veränderten. Zu lange Mittelungszeiträume repräsentieren nicht mehr die mittleren Randbedingungen, die während eines Ausbreitungsversuches herrschten.

Desweiteren wurde für die Entdimensionalisierung eine Referenzlänge von 1 m im Naturmaßstab beziehungsweise $(1/300)$ m im Windkanalmaßstab gewählt.

Wie in Kapitel 8.3.3 aufgezeigt, lassen sich durch über 200 Puff-Wiederholungsmessungen Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Puff-Parameter bestimmen, anhand derer sich die mögliche Variabilität der Messergebnisse für bestimmte mittlere Randbedingungen aufzeigen lässt. Diese Möglichkeiten bieten die 1 bis 4 Puff-Wiederholungsmessungen, die bei der Feldkampagne unter meteorologisch ähnlichen Bedingungen durchgeführt wurden, nicht. Dementsprechend kann bei dem durchgeführten Vergleich zwischen den Ergebnissen der Natur- und Windkanalmessungen nur überprüft werden, ob die einzelnen

Ergebnisse der Naturmessungen innerhalb der Bandbreite der Windkanalergebnisse liegen.

Ein solcher Vergleich wurde am Beispiel des Ausbreitungsszenarios S2_170_FP10 in den Abbildung 66 bis 70 für sämtliche Puff-Parameter grafisch veranschaulicht. In diesen Abbildungen geben die roten Balken jeweils die aus 338 Puff-Freisetzungen ermittelten normierten Häufigkeitsverteilungen der dimensionslosen Messergebnisse der Windkanalmessungen wieder. Die zu diesem Ausbreitungsszenario korrespondierenden Naturversuche wurden während des IOP 8 am Messort TGA_3 (entspricht dem Windkanalmessort FP10) durchgeführt. Von den 4 Messungen der 4 freigesetzten Puffs des IOP8, die am Messort TGA_3 durchgeführt wurden, stuft die Air Resources Laboratory Field Research Division (ARLFRD) nur die Qualität der letzten Messung als gut ein (siehe Kapitel 5.2). Dementsprechend wird allein diese Messung für einen Vergleich mit korrespondierenden Windkanalmessungen herangezogen. In den Abbildung 66 bis 70 markiert für den jeweils untersuchten Puff-Parameter ein blauer Punkt das dimensionslose Ergebnis dieser einen Puff-Freisetzung.

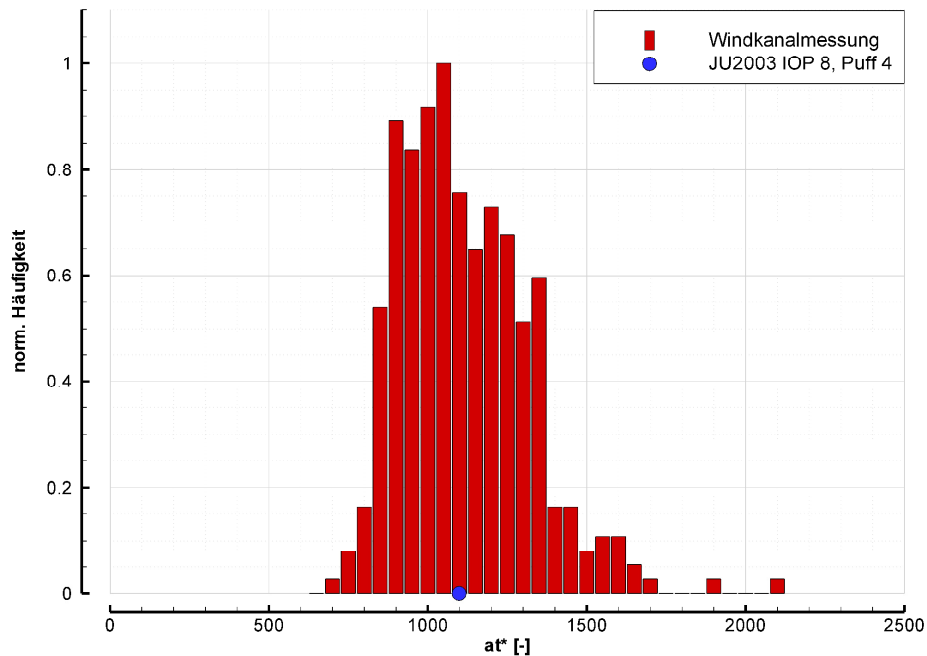


Abbildung 66: Normierte Häufigkeitsverteilung der dimensionslosen „arrival time“ $at^*[-]$, die auf Basis von 338 Puff-Freisetzungen im Windkanal für das Ausbreitungsszenario S2_170_FP10 ermittelt wurde (rote Balken). Der blaue Punkt gibt das Ergebnis der dimensionslosen „arrival time“ $at^*[-]$ einer korrespondierenden Naturmessung (Puff Nr. 4) des IOPs 8 der Feldkampagne JU2003 an. Der Messort der Naturmesskampagne JU2003 trägt die Bezeichnung TGA_3.

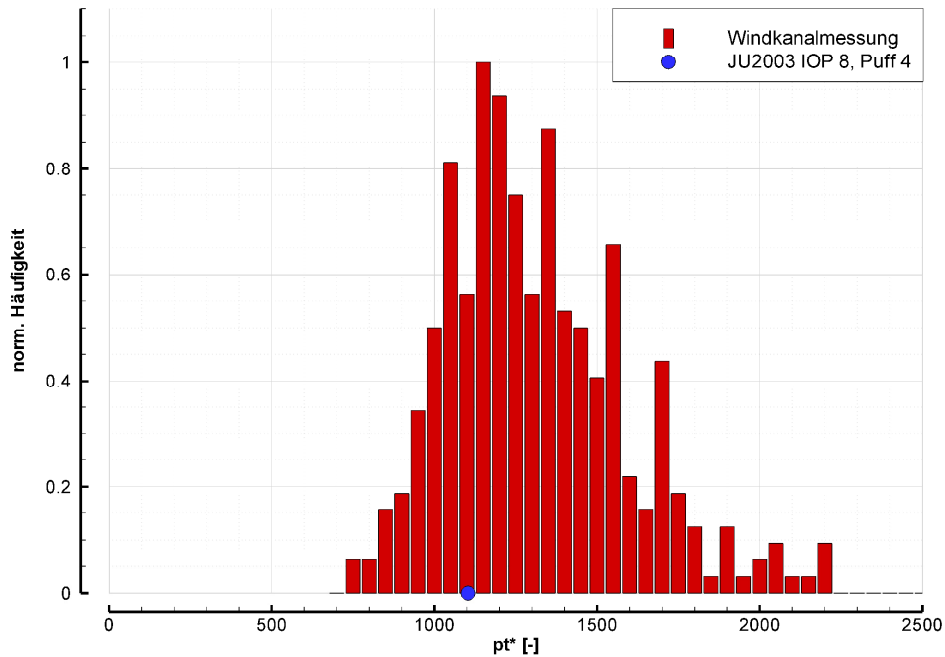


Abbildung 67: Normierte Häufigkeitsverteilung der dimensionslosen „peak time“ $pt^*[-]$, die auf Basis von 338 Puff-Freisetzungen im Windkanal für das Ausbreitungsszenario S2_170_FP10 ermittelt wurde (rote Balken). Der blaue Punkt gibt das Ergebnis der dimensionslosen „peak time“ $pt^*[-]$ einer korrespondierenden Naturmessung (Puff Nr. 4) des IOPs 8 der Feldkampagne JU2003 an. Der Messort der Naturmesskampagne JU2003 trägt die Bezeichnung TGA_3.

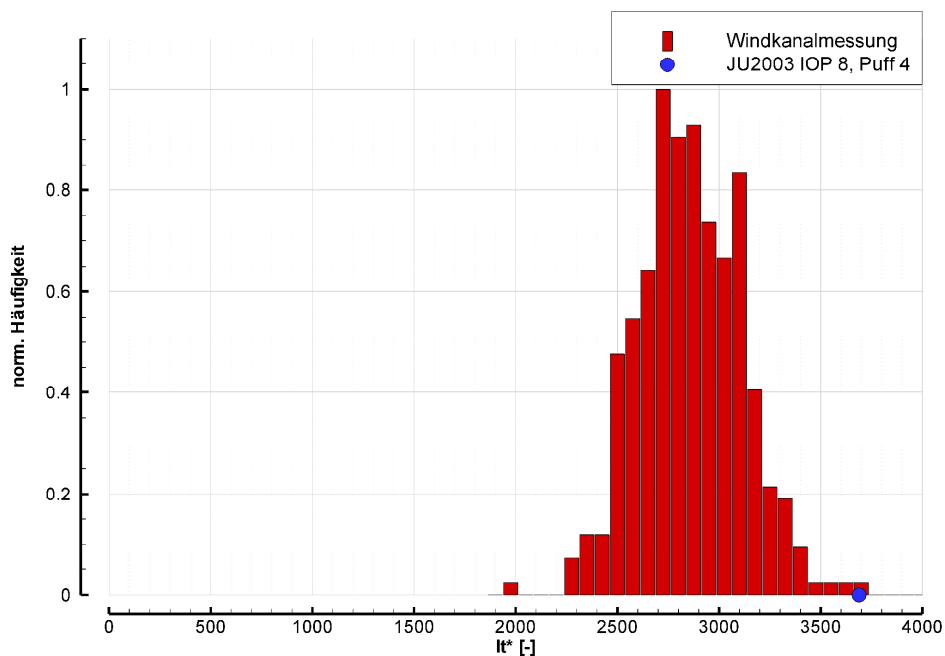


Abbildung 68: Normierte Häufigkeitsverteilung der dimensionslosen „leaving time“ $lt^*[-]$, die auf Basis von 338 Puff-Freisetzungen im Windkanal für das Ausbreitungsszenario S2_170_FP10 ermittelt wurde (rote Balken). Der blaue Punkt gibt das Ergebnis der dimensionslosen „leaving time“ $lt^*[-]$ einer korrespondierenden Naturmessung (Puff Nr. 4) des IOPs 8 der Feldkampagne JU2003 an. Der Messort der Naturmesskampagne JU2003 trägt die Bezeichnung TGA_3.

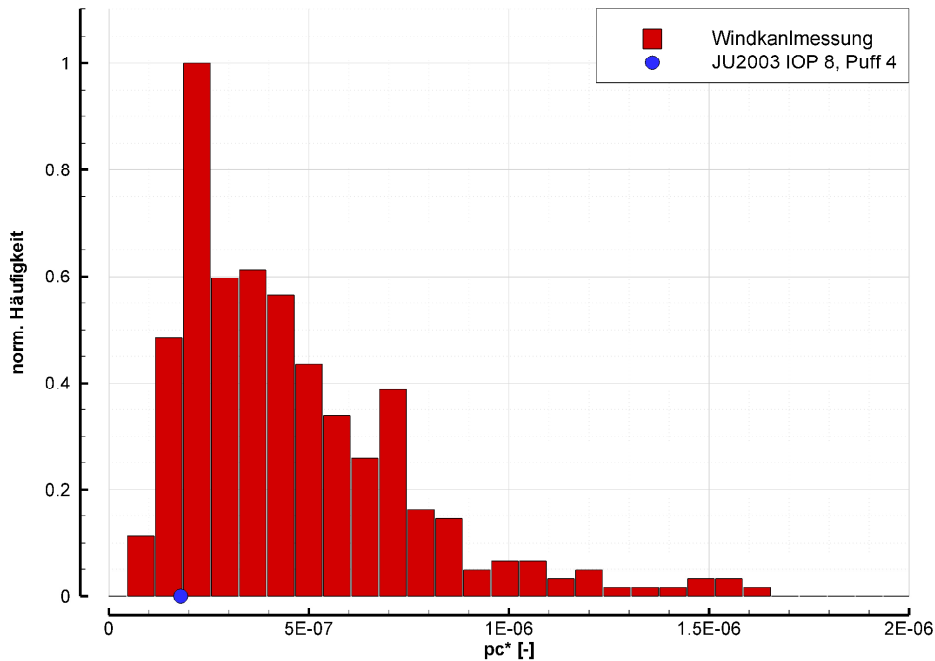


Abbildung 69: Normierte Häufigkeitsverteilung der dimensionslosen „peak concentration“ $pc^*[-]$, die auf Basis von 338 Puff-Freisetzungen im Windkanal für das Ausbreitungsszenario S2_170_FP10 ermittelt wurde (rote Balken). Der blaue Punkt gibt das Ergebnis der dimensionslosen „peak concentration“ $pc^*[-]$ einer korrespondierenden Naturmessung (Puff Nr. 4) des IOPs 8 der Feldkampagne JU2003 an. Der Messort der Naturmesskampagne JU2003 trägt die Bezeichnung TGA_3.

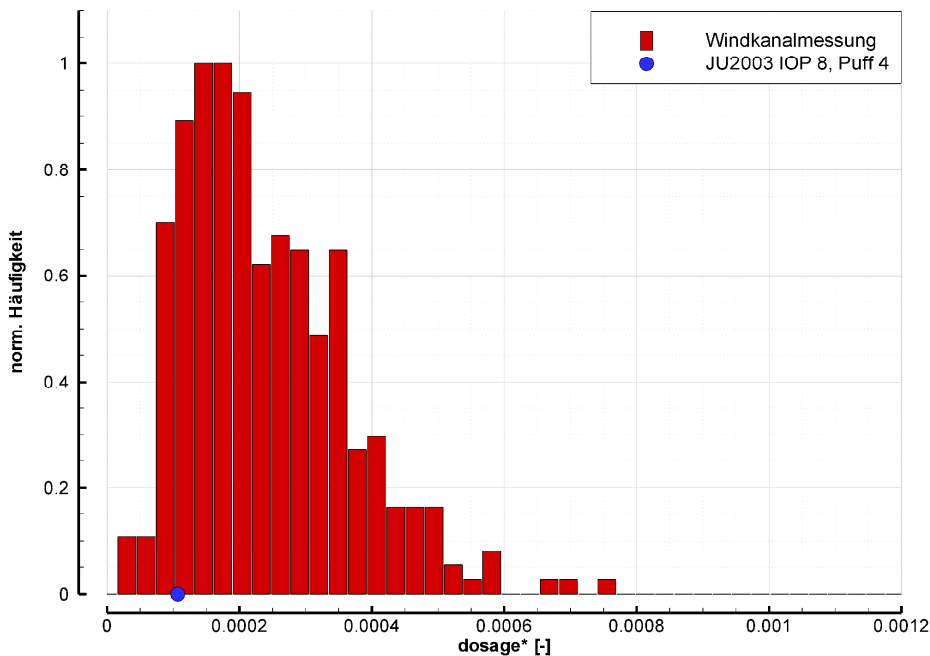


Abbildung 70: Normierte Häufigkeitsverteilung der dimensionslosen „dosage“ $dosage^*[-]$, die auf Basis von 338 Puff-Freisetzungen im Windkanal für das Ausbreitungsszenario S2_170_FP10 ermittelt wurde (rote Balken). Der blaue Punkt gibt das Ergebnis der dimensionslosen „dosage“ $dosage^*[-]$ einer korrespondierenden Naturmessung (Puff Nr. 4) des IOPs 8 der Feldkampagne JU2003 an. Der Messort der Naturmesskampagne JU2003 trägt die Bezeichnung TGA_3.

Der in den Abbildung 66 bis 70 dargestellte Vergleich zwischen den Ergebnissen der Natur- und Windkanalmessungen zeigt, dass für das ausgewählte Ausbreitungsszenario S2_170_FP10 das Ergebnis der Naturmessung für alle Puff-Parameter jeweils innerhalb der Häufigkeitsverteilung liegt, die anhand von 338 Puff-Freisetzungen im Windkanal ermittelt wurde. Es findet sich dementsprechend für alle Puff-Parameter mindestens ein Ergebnis der 338 Windkanal-Puff-Freisetzungen, das mit dem Messergebnis der Naturfreisetzung übereinstimmt.

Die Ergebnisse der Naturmesskampagne sowie der Windkanalkampagne werden bezüglich aller 12 korrespondierenden Ausbreitungsszenarien für die einzelnen Puff-Parameter in den Tabellen 17 bis 21 gegenübergestellt. Angegeben ist in diesen Tabellen der dimensionslose Mittelwert des jeweiligen Puff-Parameters, der bei den Naturmessungen anhand von 1 bis 4 Puff-Freisetzungen pro Szenario und bei den Windkanalmessungen anhand von 200 bis 400 Puff-Freisetzungen pro Szenario bestimmt wurde. Es ist in den Tabellen zudem jeweils der kleinste und größte Wert eines Puff-Parameters hinsichtlich des betreffenden Szenarios angegeben, der auf Basis der Windkanalversuche ermittelt wurde. Wenn die Ergebnisse der JU2003-Feldkampagne für einen Puff-Parameter nicht innerhalb des Wertebereiches liegen, der sich anhand der 200 bis 400 Wiederholungsmessungen der Windkanalkampagne bestimmen ließ, sind diese Werte in den Tabellen 17 bis 21 grau hinterlegt. In diesen Fällen stimmt dementsprechend für den jeweiligen Puff-Parameter das Ergebnis der Naturmesskampagne mit keinem Ergebnis der Windkanalkampagne überein. Diese Abweichungen werden für 2 Szenarien bezüglich des „leaving time“-Parameters, für 6 Szenarien bezüglich des „dosage“-Parameters sowie für 2 Szenarien hinsichtlich des „peak concentration“-Parameters beobachtet. Für den „arrival time“- und „peak time“-Parameter liegen sämtliche Ergebnisse der Feldkampagne jeweils innerhalb des Wertebereiches, der anhand der Windkanalversuche bestimmt wurde.

JU 2003 Feldversuch					Windkanalmessung			
IOP	Quelle	Messort	Anzahl der Puffs	mittlere at* [-]	Szenario	mittlere at* [-]	minimale at* [-]	maximale at* [-]
3	S3	TGA_0	3	1447.0	S3_200_FP06	1660.4	923.5	2543.8
3	S3	TGA_3	3	936.1	S3_200_FP10	1161.2	812.9	1814.4
3	S3	TGA_9	3	1513.6	S3_200_FP14	1212.1	739.6	2109.9
4	S3	TGA_0	3	1669.5	S3_200_FP06	1660.4	923.5	2543.8
4	S3	TGA_3	1	897.5	S3_200_FP10	1161.2	812.9	1814.4
4	S3	TGA_4	3	838.4	S3_200_FP18	1286.0	789.2	2229.6
6	S3	TGA_3	1	1296.4	S3_180_FP10	1279.7	829.7	1730.2
6	S3	TGA_9	1	783.4	S3_180_FP14	928.8	616.1	1286.7
8	S2	TGA_3	1	1103.9	S2_170_FP10	1089.6	690.1	2057.1
8	S2	TGA_8	3	912.2	S2_170_FP13	1172.9	770.0	1500.2
9	S4	TGA_0	3	1199.9	S4_190_FP06	1191.6	635.0	1860.2
9	S4	TGA_8	4	1564.1	S4_190_FP13	1329.0	706.4	2105.9

Tabelle 17: Vergleich der mittleren dimensionslosen „arrival time“ at* [-], die für 12 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien jeweils anhand von 1 bis 4 Puffs pro Szenario bei der Naturmesskampagne und anhand von 200 bis 400 Puffs pro Szenario bei der Windkanalmesskampagne bestimmt wurde. Für die Windkanalmessungen ist zudem jeweils die minimale und maximale „arrival time“ at* [-] sämtlicher Puff-Freisetzungen eines Szenarios angegeben.

JU 2003 Feldversuch					Windkanalmessung			
IOP	Quelle	Messort	Anzahl der Puffs	mittlere pt* [-]	Szenario	mittlere pt* [-]	minimale pt* [-]	maximale pt* [-]
3	S3	TGA_0	3	1569.5	S3_200_FP06	2028.4	923.5	4547.7
3	S3	TGA_3	3	1191.4	S3_200_FP10	1475.9	871.8	2418.2
3	S3	TGA_9	3	1968.6	S3_200_FP14	1521.2	798.6	5145.8
4	S3	TGA_0	3	2102.0	S3_200_FP06	2028.4	923.5	4547.7
4	S3	TGA_3	1	1229.5	S3_200_FP10	1475.9	871.8	2418.2
4	S3	TGA_4	3	1020.3	S3_200_FP18	1684.7	921.5	3221.7
6	S3	TGA_3	1	2012.0	S3_180_FP10	1608.9	881.3	2520.0
6	S3	TGA_9	1	1056.8	S3_180_FP14	1214.9	630.8	2083.5
8	S2	TGA_3	1	1103.9	S2_170_FP10	1296.1	741.9	2567.0
8	S2	TGA_8	3	1000.8	S2_170_FP13	1429.7	799.5	1935.4
9	S4	TGA_0	3	1366.9	S4_190_FP06	1477.1	751.7	3321.0
9	S4	TGA_8	4	2379.7	S4_190_FP13	1721.7	977.5	3190.3

Tabelle 18: Vergleich der mittleren dimensionslosen „peak time“ pt* [-], die für 12 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien jeweils anhand von 1 bis 4 Puffs pro Szenario bei der Naturmesskampagne und anhand von 200 bis 400 Puffs pro Szenario bei der Windkanalmesskampagne bestimmt wurde. Für die Windkanalmessungen ist zudem jeweils die minimale und maximale „peak time“ pt* [-] sämtlicher Puff-Freisetzungen eines Szenarios angegeben.

JU 2003 Feldversuch					Windkanalmessung			
IOP	Quelle	Messort	Anzahl der Puffs	mittlere It* [-]	Szenario	mittlere It* [-]	minimale It* [-]	maximale It* [-]
3	S3	TGA_0	3	3286.8	S3_200_FP06	4580.7	3243.4	5608.3
3	S3	TGA_3	3	2399.4	S3_200_FP10	2736.7	1954.3	3692.8
3	S3	TGA_9	3	2391.9	S3_200_FP14	2803.5	1756.3	5153.2
4	S3	TGA_0	3	3488.2	S3_200_FP06	4580.7	3243.4	5608.3
4	S3	TGA_3	1	1837.7	S3_200_FP10	2736.7	1954.3	3692.8
4	S3	TGA_4	3	2130.6	S3_200_FP18	3229.1	2009.1	4897.9
6	S3	TGA_3	1	3211.5	S3_180_FP10	3204.5	2520.0	3886.3
6	S3	TGA_9	1	1548.3	S3_180_FP14	2345.3	1781.0	2917.2
8	S2	TGA_3	1	3688.9	S2_170_FP10	2816.2	1961.1	3771.9
8	S2	TGA_8	3	3423.8	S2_170_FP13	2837.0	2296.8	3499.0
9	S4	TGA_0	3	3618.7	S4_190_FP06	3533.8	2131.8	4709.1
9	S4	TGA_8	4	4364.7	S4_190_FP13	3446.8	2237.8	4583.3

Tabelle 19: Vergleich der mittleren dimensionslosen „leaving time“ It* [-], die für 12 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien jeweils anhand von 1 bis 4 Puffs pro Szenario bei der Naturmesskampagne und anhand von 200 bis 400 Puffs pro Szenario bei der Windkanalmesskampagne bestimmt wurde. Für die Windkanalmessungen ist zudem jeweils die minimale und maximale „leaving time“ It* [-] sämtlicher Puff-Freisetzen eines Szenarios angegeben.

JU 2003 Feldversuch					Windkanalmessung			
IOP	Quelle	Messort	Anzahl der Puffs	mittlere dosage* [-]	Szenario	mittlere dosage* [-]	minimale dosage* [-]	maximale dosage* [-]
3	S3	TGA_0	3	5.42E-05	S3_200_FP06	1.18E-04	1.85E-05	4.07E-04
3	S3	TGA_3	3	1.88E-05	S3_200_FP10	1.31E-04	1.39E-05	4.67E-04
3	S3	TGA_9	3	3.03E-06	S3_200_FP14	3.48E-05	1.35E-05	1.42E-04
4	S3	TGA_0	3	1.77E-05	S3_200_FP06	1.18E-04	1.85E-05	4.07E-04
4	S3	TGA_3	1	7.96E-06	S3_200_FP10	1.31E-04	1.39E-05	4.67E-04
4	S3	TGA_4	3	9.33E-05	S3_200_FP18	7.59E-05	1.51E-05	3.57E-04
6	S3	TGA_3	1	1.92E-05	S3_180_FP10	1.62E-04	1.94E-05	4.40E-04
6	S3	TGA_9	1	3.07E-06	S3_180_FP14	1.20E-04	3.17E-05	3.73E-04
8	S2	TGA_3	1	1.07E-04	S2_170_FP10	2.24E-04	1.80E-05	7.43E-04
8	S2	TGA_8	3	1.12E-04	S2_170_FP13	1.78E-04	9.40E-05	3.43E-04
9	S4	TGA_0	3	1.78E-04	S4_190_FP06	2.75E-04	7.15E-05	1.09E-03
9	S4	TGA_8	4	1.61E-04	S4_190_FP13	7.81E-05	1.34E-05	3.13E-04

Tabelle 20: Vergleich der mittleren dimensionslosen „dosage“* [-], die für 12 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien jeweils anhand von 1 bis 4 Puffs pro Szenario bei der Naturmesskampagne und anhand von 200 bis 400 Puffs pro Szenario bei der Windkanalmesskampagne bestimmt wurde. Für die Windkanalmessungen ist zudem jeweils die minimale und maximale „dosage“* [-] sämtlicher Puff-Freisetzen eines Szenarios angegeben.

JU 2003 Feldversuch					Windkanalmessung			
IOP	Quelle	Messort	Anzahl der Puffs	mittlere pc* [-]	Szenario	mittlere pc* [-]	minimale pc* [-]	maximale pc* [-]
3	S3	TGA_0	3	8.56E-08	S3_200_FP06	1.25E-07	2.08E-08	7.47E-07
3	S3	TGA_3	3	3.41E-08	S3_200_FP10	1.92E-07	1.68E-08	6.13E-07
3	S3	TGA_9	3	2.69E-08	S3_200_FP14	1.42E-07	2.45E-08	1.44E-06
4	S3	TGA_0	3	3.07E-08	S3_200_FP06	1.25E-07	2.08E-08	7.47E-07
4	S3	TGA_3	1	1.26E-08	S3_200_FP10	1.92E-07	1.68E-08	6.13E-07
4	S3	TGA_4	3	1.84E-07	S3_200_FP18	1.48E-07	2.30E-08	5.69E-07
6	S3	TGA_3	1	4.53E-08	S3_180_FP10	1.70E-07	2.48E-08	5.01E-07
6	S3	TGA_9	1	1.01E-08	S3_180_FP14	2.65E-07	4.56E-08	1.56E-06
8	S2	TGA_3	1	1.78E-07	S2_170_FP10	4.16E-07	4.39E-08	1.55E-06
8	S2	TGA_8	3	1.95E-07	S2_170_FP13	2.54E-07	1.06E-07	7.81E-07
9	S4	TGA_0	3	2.74E-07	S4_190_FP06	4.12E-07	7.52E-08	2.02E-06
9	S4	TGA_8	4	1.79E-07	S4_190_FP13	1.23E-07	2.08E-08	4.29E-07

Tabelle 21: Vergleich der mittleren dimensionslosen „peak concentration“ pc* [-], die für 12 unterschiedliche Ausbreitungsszenarien jeweils anhand von 1 bis 4 Puffs pro Szenario bei der Naturmesskampagne und anhand von 200 bis 400 Puffs pro Szenario bei der Windkanalmesskampagne bestimmt wurde. Für die Windkanalmessungen ist zudem jeweils die minimale und maximale „peak concentration“ pc* [-] sämtlicher Puff-Freisetzungen eines Szenarios angegeben.

Für die aufgezeigten Differenzen zwischen den Ergebnissen der Natur- und Windkanalmessungen können verschiedene Ursachen verantwortlich sein. Es ist z.B. zu berücksichtigen, dass sich die Dichten der verwendeten Messgase voneinander unterscheiden. Während bei den Windkanaluntersuchungen Ethan als Messgas verwendet wurde, dessen Dichte 1.2 kg/m^3 bei einer Temperatur von 20°C und einem Luftdruck von 1.013 Bar beträgt, liegt bei gleicher Temperatur und gleichem Luftdruck die Dichte von SF_6 bei 6.1 kg/m^3 . Im Gegensatz zum Ethan unterscheidet sich damit die Dichte von SF_6 von der Dichte der Umgebungsluft. Welchen Einfluss Dichteunterschiede des Messgases zur Umgebungsluft auf die Ergebnisse der Puff-Ausbreitungen nehmen, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

Desweiteren ist zu berücksichtigen, dass die mittleren Windrichtungen der Windkanal- und Naturversuche bei den untersuchten Szenarien nicht exakt übereinstimmen. Wie zuvor beschrieben, wurden Ergebnisse von Messungen miteinander verglichen, bei denen sich die mittlere Windrichtung in einer Größenordnung von bis zu $\pm 10 \%$ voneinander unterschied. Es ist anzunehmen, dass unterschiedliche mittlere Windrichtungen zu unterschiedlichen Puff-Ausbreitungen und somit zu unterschiedlichen Messergebnissen führen.

Darüber hinaus muss bei Naturversuchen berücksichtigt werden, dass die Randbedingungen in der Regel nicht konstant sind. So ist es möglich, dass z.B. die mittlere Windrichtung, die sich aus einem 30-Minuten-Mittelwert bestimmen lässt, nicht der mittleren Windrichtung entspricht, die während einer 3-minütigen Puff-Ausbreitung vorherrschte. Dies führt zu der Frage, wie sich die meteorologischen Randbedingungen charakterisieren lassen, die die Ausbreitung eines Puffs beeinflussen. Diese Frage bezieht sich nicht allein darauf, welches zeitliche Mittelungsintervall für die repräsentative Charakterisierung der meteorologischen Randbedingungen am besten geeignet ist, sondern auch darauf, welcher Messort der Referenzwindgeschwindigkeit die Bedingungen während des Ausbreitungsprozesses am besten wiedergibt.

Die Arbeit von Hertwig (2007) untersucht 2 unterschiedliche Messstellen („PNNL Site 3“ in etwa 37 m Höhe über Grund und „DPG site 15“ in etwa 40 m Höhe über Grund) im Stadtgebiet von Oklahoma City, an denen jeweils Windgeschwindigkeitsmessungen während der Puff-Ausbreitungsversuche der Joint Urban 2003-Kampagne durchgeführt wurden. Die Arbeit von Hertwig (2007) zeigt auf, dass die beiden, wenige hundert Meter auseinanderliegenden Messstellen während derselben Puff-Freisetzung für ein 15-Minuten-Mittelungsintervall Differenzen der Windrichtung von bis zu 30° aufweisen. Bezüglich der Windgeschwindigkeit werden bei diesen Messungen Unterschiede von über 1 m/s beobachtet, wobei es sich hierbei nicht um einen konstanten Offset handelt. Diese Differenzen der zeitgleich durchgeführten Messungen sind insbesondere auf die Nähe der Messstellen zu den umliegenden Häusern zurückzuführen. Im hochhausgeprägten Innenstadtbereich von Oklahoma City ist der Einfluss der Häuser auf die Geschwindigkeitsmessungen zudem windrichtungsabhängig. Für weitere Details zu den Windgeschwindigkeitsmessungen im Innenstadtbereich von Oklahoma City siehe Hertwig (2007).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde zur Entdimensionalisierung der Puff-Parameter eine Referenzwindgeschwindigkeit herangezogen, die in 80 m Höhe über Grund 2 Kilometern südlich vom hochhausgeprägten Innenstadtkern von Oklahoma City gemessen wurde, um den Einfluss umliegender Rauigkeiten auf die Messungen zu minimieren. Es ist bei diesem Referenzmessort allerdings zu berücksichtigen, dass er auch etwa 2 Kilometer vom Freisetzungsort der Puffs entfernt lag. Demzufolge traten Ände-

rungen der Windrichtung oder Windgeschwindigkeit, die am Referenzmessort registriert wurden, nicht zeitgleich im Ausbreitungsgebiet der Puffs auf. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann nicht ermittelt werden welche Naturmessstelle der JU2003-Kampagne die meteorologischen Randbedingungen eines Ausbreitungsversuches am besten charakterisiert. Dies ließe sich z.B. über Korrelationen der Ausbreitungsgeschwindigkeit eines Puffs und der gemessenen Referenzwindgeschwindigkeit abschätzen. Die Anzahl der durchgeführten Puff-Freisetzungen in der Natur reicht allerdings aufgrund der hohen Variabilität von Puff-Ausbreitungsprozessen nicht aus, um den Ort mit der höchsten Korrelation zwischen Referenzwindgeschwindigkeit und Ausbreitungsgeschwindigkeit der Puffs zuverlässig bestimmen zu können.

Für den Vergleich der Ergebnisse aus Natur- und Windkanalmessungen ist die exakte Bestimmung der mittleren Windgeschwindigkeit von hoher Bedeutung, da die dimensionslose „arrival time“, die dimensionslose „peak time“, die dimensionslose „leaving time“ und die dimensionslose „dosage“ direkt von ihr bestimmt werden. Zieht man z.B. für die Entdimensionalisierung der gemessenen „leaving time“ im Fall des Ausbreitungsszenarios S3_180_FP14 die über 15-Minuten-gemittelte Windgeschwindigkeit des Messortes „SuperPWIDS site 17“ in 8 m Höhe über dem Boden (siehe Abbildung 15 auf Seite 51; Bezeichnung im Windkanal: DPG 17) anstelle der in dieser Arbeit ausgewählten Windgeschwindigkeit am Referenzortes heran, so liegt die dimensionslose „leaving time“ mit 755.0 [-] im Gegensatz zu den in Tabelle 21 gezeigten Ergebnissen innerhalb des Bestimmungsbereiches der Windkanalmessungen. Dieser reicht von 687.5 [-] bis 1126.1 [-], wenn zur Entdimensionalisierung die Referenzgeschwindigkeitsmessung des „DPG17“ herangezogen wird.

Der Vergleich zwischen Natur- und Windkanalmessungen verdeutlicht, dass sich anhand der Natur-Puff-Freisetzungen der JU2003-Kampagne die mögliche Variabilität der Puff-Ausbreitungen aufgrund der zu geringen Anzahl von Wiederholungsmessungen nicht aufzeigen lässt. Bei der Interpretation der Naturmessungen besteht daher das Problem, dass nicht eingeschätzt werden kann, ob es sich bei den gemessenen 1 bis 4 Messwerten um

seltene Extremwerte handelt, oder ob sie dem Mittelwert von statistisch hinreichend vielen Wiederholungsmessungen entsprechen.

Desweiteren wird ein repräsentativer Vergleich zwischen Windkanalergebnissen oder auch Ergebnissen numerischer Modelle und Ergebnissen der Naturmessungen dadurch erschwert, dass sich die für einen Ausbreitungsprozess repräsentative Windgeschwindigkeit und Windrichtung aufgrund nicht konstanter meteorologischer Randbedingungen nur ungenau bestimmen lässt.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund stetig anwachsender Rechnerkapazitäten haben komplexe numerische Modelle, wie LES-Modelle, heute das Potential, Ausbreitungsprozesse von Gaswolken mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung selbst in urbanen Rauigkeiten vorherzusagen. Da die Modelle in der Praxis häufig Einfluss auf Entscheidungen mit profunden politischen und ökonomischen Konsequenzen nehmen, ist die Qualitätssicherung dieser Modelle von besonderer Bedeutung.

Existierende Validierungsstrategien und -daten orientieren sich jedoch an den Anforderungen etablierter Gauß- oder RANS-Modelle und basieren in der Regel auf Mittelwerten von Strömungs- und Ausbreitungsprozessen. Es besteht daher ein Bedarf an Referenzdaten, die auch zeitlich veränderliche Prozesse auflösen.

In der vorliegenden Arbeit wurde am Beispiel von Wolkenausbreitungen (Puffs) in einer komplexen urbanen Rauigkeit untersucht, wie sich zeitlich veränderliche Prozesse für Referenzdatensätze repräsentativ charakterisieren lassen. Hierfür wurde auf Basis von systematischen, hochaufgelösten Windkanalmessungen die Ausbreitung von Puffs in einem Modell des Innenstadtbereiches von Oklahoma City im Maßstab von 1:300 untersucht.

Um die Qualität eines numerischen Modells bewerten zu können, sind zudem genaue Kenntnisse über die Güte der Referenzdaten erforderlich. In der vorliegenden Arbeit wurde systematisch untersucht, mit welcher Unsicherheit sich zeitlich veränderliche Prozesse charakterisieren lassen. Die Messungen im Grenzschichtwindkanal „Wotan“ ermöglichten es, die Ausbreitung von Puffs unter gleichen mittleren Randbedingungen beliebig häufig zu wiederholen, um so die Unsicherheit der Messergebnisse zu bestimmen.

Die Ausbreitung der freigesetzten Gaswolken wurde auf Basis von Puff-Parametern („arrival time“, „peak time“, „leaving time“, „peak concentration“ und „dosage“) charakterisiert. Die durchgeführten Messungen haben eine hohe Variabilität der Puff-Ausbreitungsprozesse in einer urbanen Rauigkeitsstruktur aufgezeigt. Werden die mittleren Puff-Parameter beispielsweise auf Basis von 5 Wiederholungsmessungen ermittelt, sind die Mittelwerte mit Unsicherheiten von teilweise über 100 % behaftet. Eine reprä-

sentative Charakterisierung dieser Ausbreitungsprozesse auf Basis von Feldversuchen ist somit nicht möglich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Randbedingungen in der Natur stetig verändern. So konnten beispielsweise bei der Naturkampagne Joint Urban 2003 lediglich 4 Puffs unter meteorologisch ähnlichen Bedingungen nacheinander freigesetzt werden.

Steht eine höhere Anzahl von Wiederholungsmessungen zur Verfügung, reduziert sich mit zunehmender Ensemblegröße n die Unsicherheit, mit der sich die mittleren Puff-Parameter bestimmen lassen. Diese Verminderung der Unsicherheit mit zunehmender Ensemblegröße n ist proportional zu $\frac{1}{\sqrt{n}}$. Erst anhand von über 200 Wiederholungsmessungen ließen sich mittlere Reisezeiten mit Genauigkeiten von unter $\pm 3\%$ bestimmen.

Es ist hierbei zu berücksichtigen, dass die Repräsentativität der einzelnen Puff-Parameter bei gleicher Ensemblegröße signifikante Unterschiede aufweist. Im Vergleich zu den Reisezeiten sind für die „dosage“ und „peak concentration“ eine höhere Anzahl von Wiederholungsmessungen erforderlich, um die gleiche statistische Repräsentativität der Mittelwerte zu erreichen. Selbst auf Basis von 200 Wiederholungsmessungen sind Unsicherheiten von bis zu $\pm 10\%$ hinsichtlich der mittleren „dosage“ und $\pm 15\%$ bezüglich der mittleren „peak concentration“ möglich.

Desweiteren wurde aufgezeigt, dass die Genauigkeit, mit der sich die mittleren Puff-Parameter bestimmen lassen, vom Quellabstand des Messortes abhängt. Dies ist auf die mit der Zeit zunehmende Vermischung der Konzentration mit der Umgebungsluft und die damit verbundene Reduzierung der Konzentrationsgradienten innerhalb der Wolke zurückzuführen. Somit nimmt mit zunehmendem Quellabstand des Messortes die Variabilität der Messergebnisse ab, was wiederum zu einer geringeren Unsicherheit für die Bestimmung der mittleren Puff-Parameter bei gleicher Ensemblegröße führt.

Die Streuung der ermittelten Ergebnisse deutet allerdings an, dass die Ensemblegröße und der Quellabstand des Messortes nicht die einzigen Parameter sind, die Einfluss auf die Genauigkeit nehmen, mit der sich die einzelnen mittleren Puff-Parameter bestimmen lassen. Weitere Studien könnten, beispielsweise durch systematische Variation des Abstandes eines Messortes zu einzelnen Gebäuden oder durch Variation der Höhe des

Messortes über dem Boden, den Einfluss dieser Faktoren auf die Bestimmungsgenauigkeit der mittleren Puff-Parameter untersuchen.

LES-Modelle haben das Potential, auch selten vorkommende Extremwerte vorherzusagen. Hierfür sind jedoch Referenzdaten erforderlich, die selten vorkommende Ereignisse abbilden. Die zuverlässige Identifizierung von Extremwerten ist insbesondere im Falle der Ausbreitung toxischer Gase von hoher Bedeutung. Die durchgeführten Messungen konnten aufzeigen, dass sich auf Basis von 200 Wiederholungsmessungen Extremwertbereiche (2.5 % der kleinsten und größten Werte) mit Unsicherheiten von unter 4 % für sämtliche Puff-Parameter bestimmen lassen.

Auf Basis von Wiederholungsmessungen, bei denen die Freisetzungsmenge und Windgeschwindigkeit systematisch variiert wurden, konnte die Skalierbarkeit der ermittelten Puff-Parameter und damit die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse sichergestellt werden. Die durchgeführten Versuche haben aufgezeigt, 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 „dosa-ge“ 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.

Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse in einer von Hochhäusern geprägten Rauigkeitsstruktur ermittelt wurden, die insbesondere typisch für nordamerikanische Großstädte ist. Es wird daher empfohlen, anhand von Windkanaluntersuchungen zu überprüfen, ob sich die gewonnenen Ergebnisse auch auf typisch europäische Stadtstrukturen übertragen lassen.

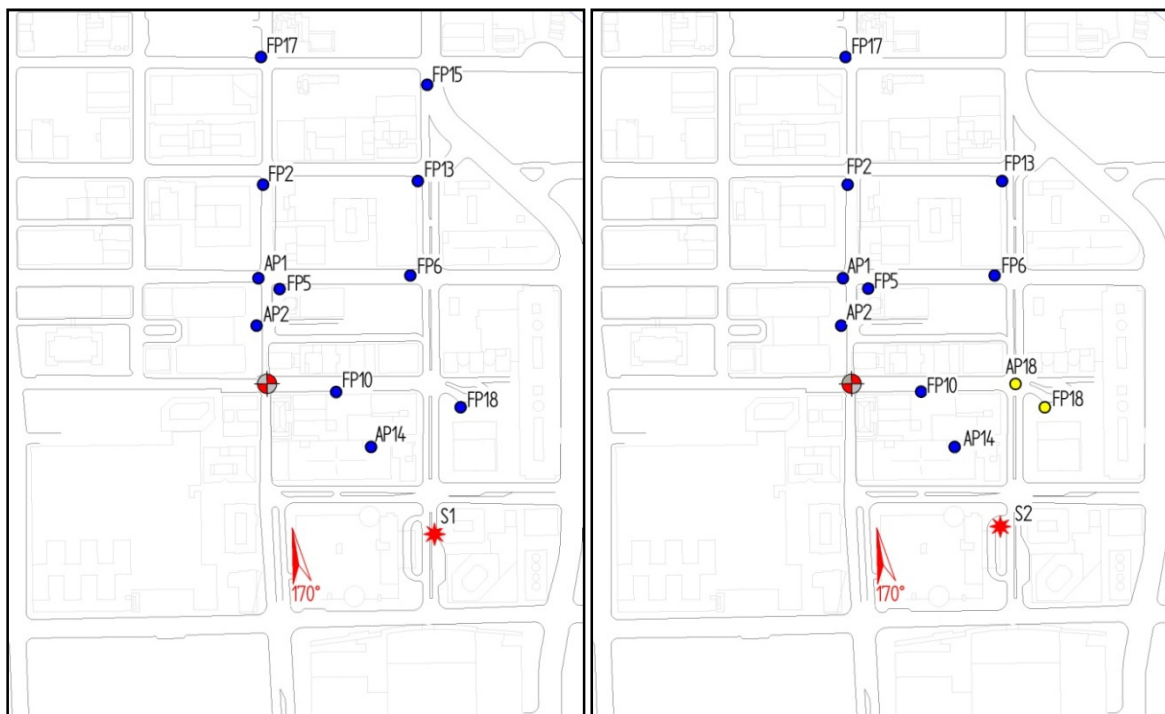
Die ermittelten Daten, die die Ausbreitung von Gaswolken in einer urbanen Rauigkeit mit bekannter Genauigkeit charakterisieren, bilden die Basis zur Validierung numerischer

Modelle. Der in dieser Arbeit erstellte Referenzdatensatz umfasst umfangreiche Konzentrations- und Strömungsmessungen und wird auf Anfrage für Validierungszwecke zur Verfügung gestellt (EWTL@zmaw.de).

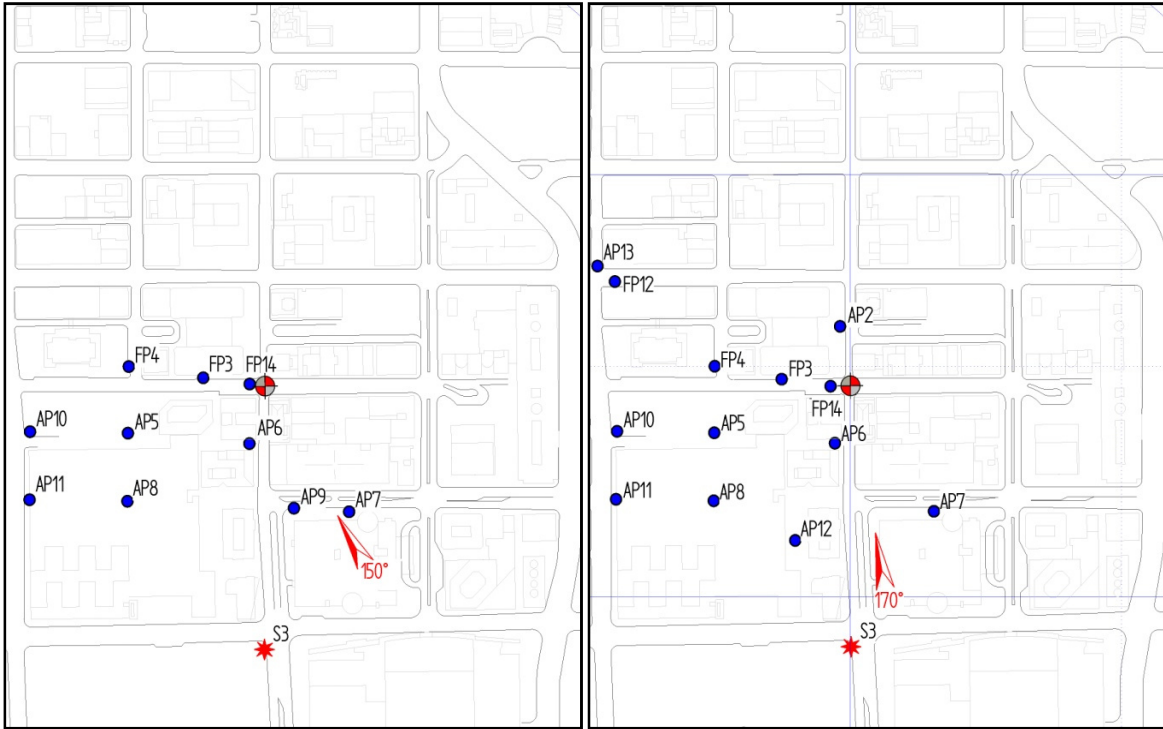
In einem nächsten Schritt wären geeignete Verfahren zur Validierung numerischer Modelle zu entwickeln, die zeitabhängige Prozesse auflösen. Eine Validierung, die allein auf einem Vergleich von Mittelwerten beruht, wie dies z.B. bei herkömmlichen Gauß- oder RANS-Modellen der Fall ist, wäre hierfür unzureichend. Damit das numerische Modell nicht nur den wahrscheinlichsten Ausbreitungsverlauf einer Wolke sondern auch seltene Extremwertereignisse richtig vorhersagen kann, wird eine Validierung empfohlen, die auf einem Vergleich von Häufigkeitsverteilungen beruht. Hierdurch könnte zudem überprüft werden, ob die Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmtes Ereignis eintritt, vom numerischen Modell vorhergesagt werden kann.

Anhang A: Abbildungen der Messkonfigurationen für sämtliche Konzentrationsmessungen

In diesem Abschnitt sind aus Übersichtsgründen die 15 Konfigurationen der durchgeführten Konzentrationsmessungen zu Kapitel 4.3 dargestellt. Bei den 15 Konfigurationen unterscheidet sich jeweils die Kombination von Quellort und Windrichtung voneinander. An jeweils 10 -15 Messpunkten pro Konfiguration wurde die freigesetzte Konzentration aufgezeichnet. Die Lage der Windkanalmesspunkte, die mit der Bezeichnung „FP“ (für field position) beginnen, korrespondiert mit Messpositionen der Feldmesskampagne Joint Urban 2003. Die übrigen Messpunkte tragen die Bezeichnung „AP“ (für additional position). Es wurden ausschließlich für eine mittlere Windrichtung von 170° und der Quelle Westin (West) Messungen in unterschiedlichen Höhen (6.7 m, 30 m, 60 m, 90 m, 120 m und 150 m im Naturmaßstab) durchgeführt (siehe gelb markierte Punkte in Abbildung 71 b).



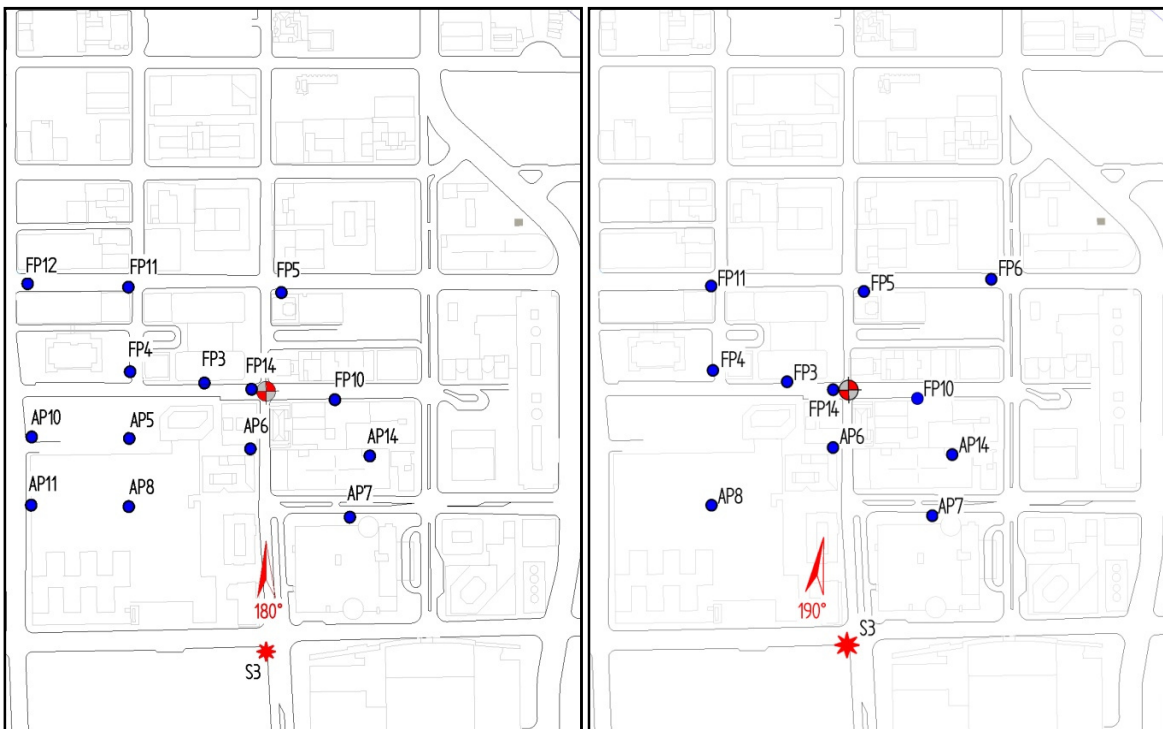
(a) (b)
Abbildung 71 a/b: Freisetzungsorte S1 (a) und S2 (b) und die jeweils zugehörigen Messorte in einer Höhe von 2 m über dem Boden (blau markiert) für eine mittlere Windrichtung von 170° (a, b). Gelb markiert (b) sind Messorte, an denen Messungen in verschiedenen Höhen durchgeführt wurden.



(c)

(d)

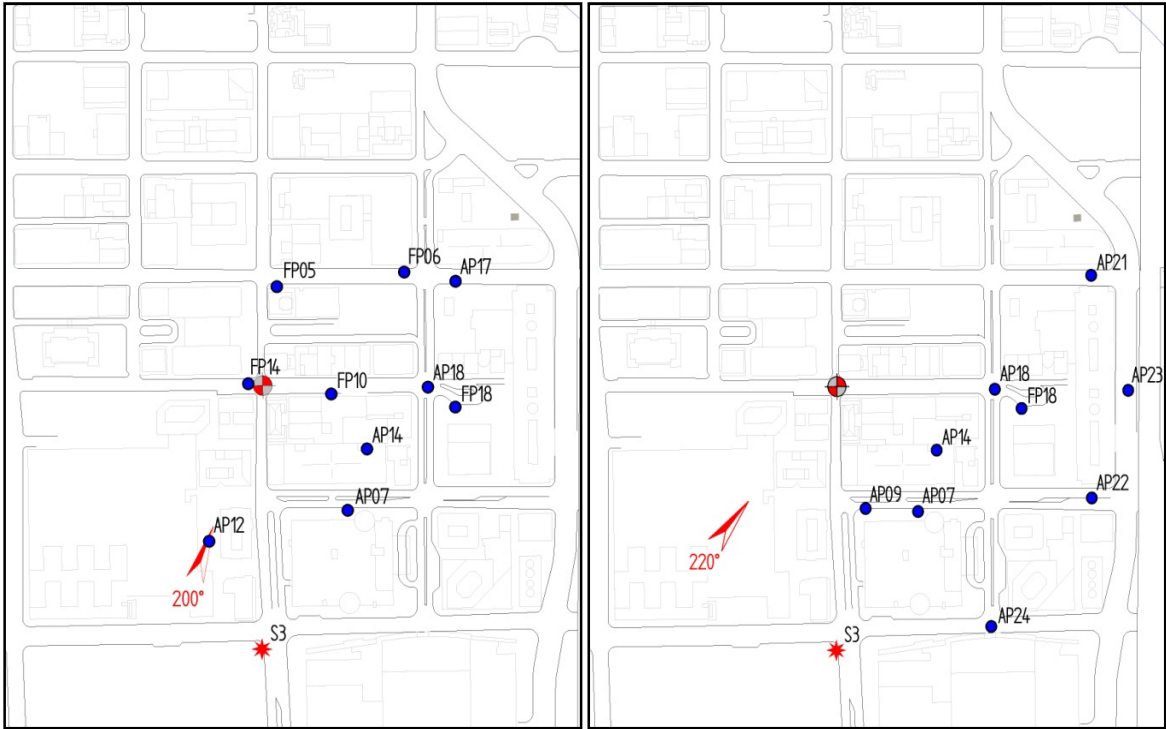
Abbildung 71 c/d: Freisetzungsort S3 (c, d) und die jeweils zugehörigen Messorte in einer Höhe von 2 m über dem Boden (blau markiert) für eine mittlere Windrichtung von 150° (c) und 170° (d).



(e)

(f)

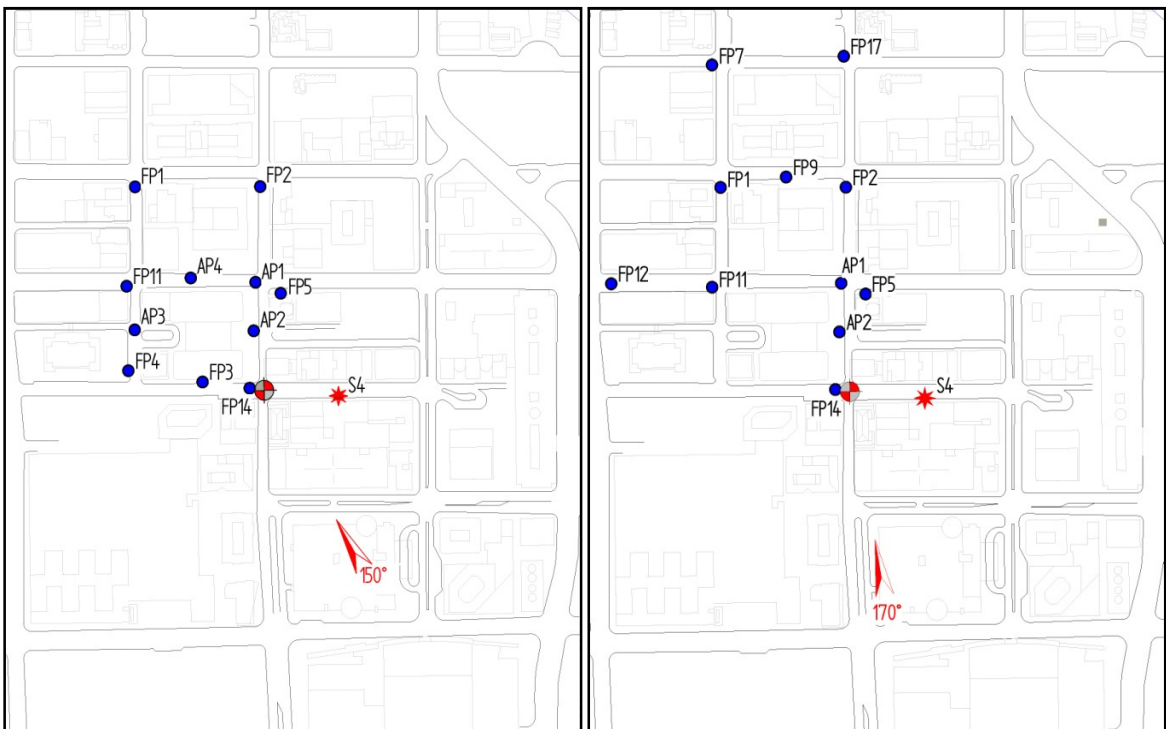
Abbildung 71 e/f: Freisetzungsort S3 (e, f) und die jeweils zugehörigen Messorte in einer Höhe von 2 m über dem Boden (blau markiert) für eine mittlere Windrichtung von 180° (e) und 190° (f).



(g)

(h)

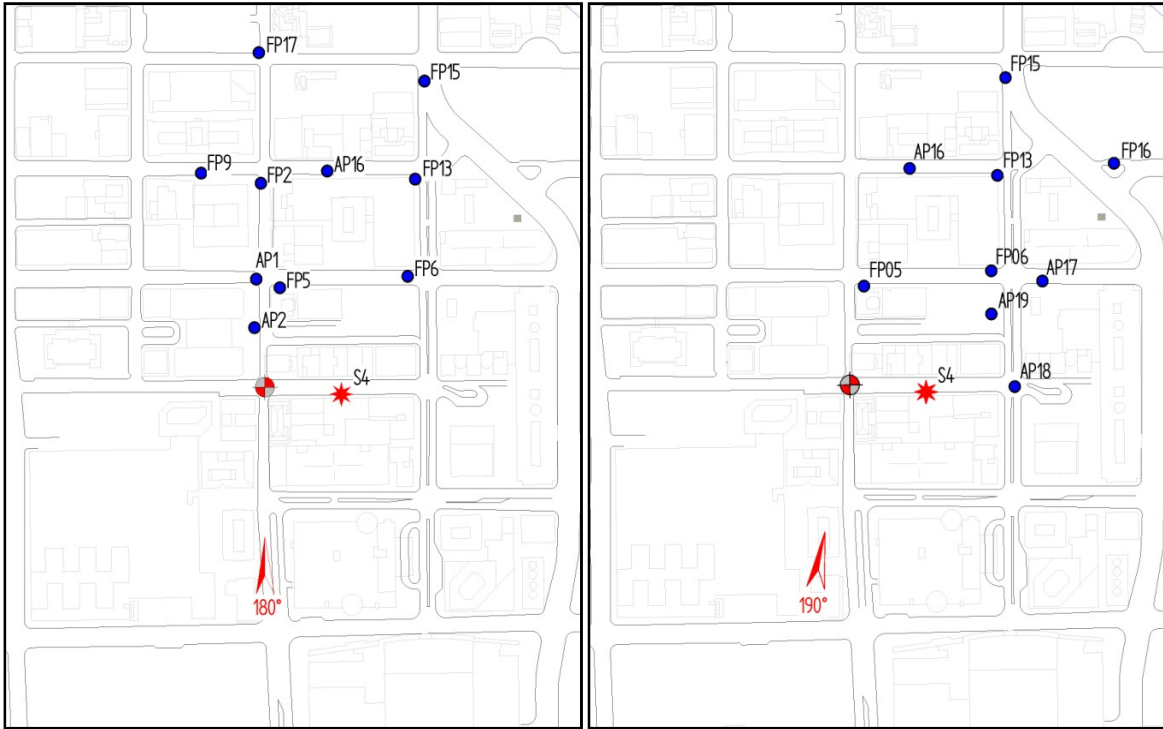
Abbildung 71 g/h: Freisetzungsort S3 (g, h) und die jeweils zugehörigen Messorte in einer Höhe von 2 m über dem Boden (blau markiert) für eine mittlere Windrichtung von 200° (g) und 220° (h).



(i)

(j)

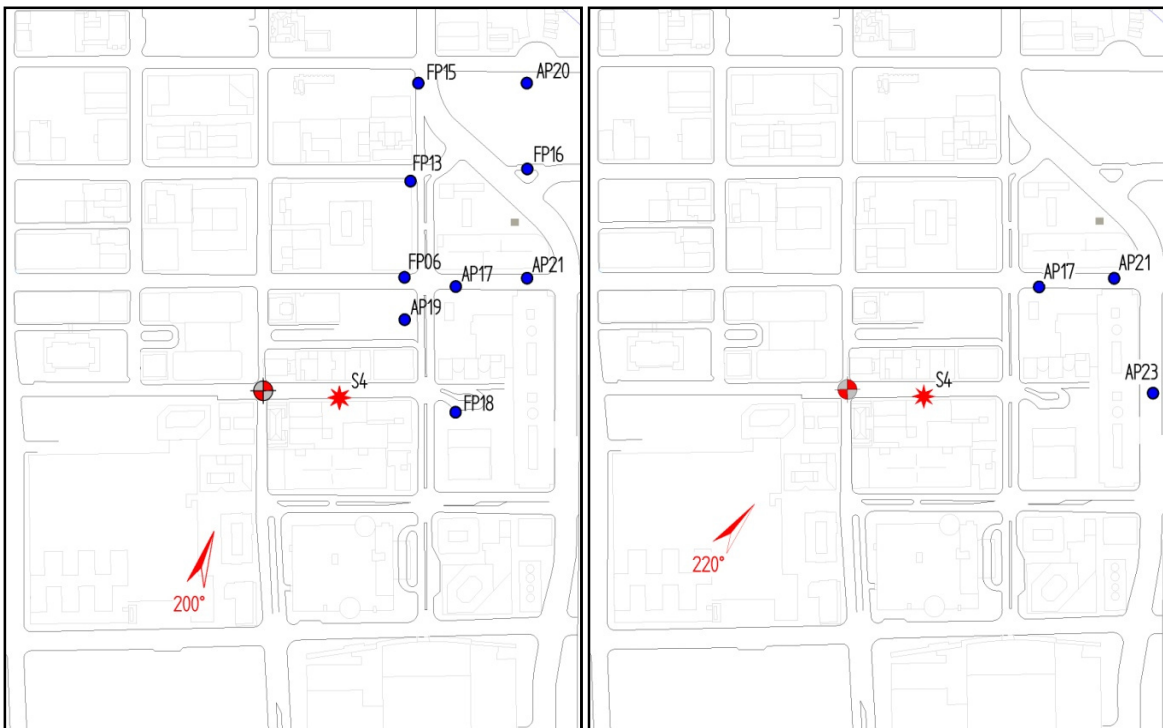
Abbildung 71 i/j: Freisetzungsort S4 (i, j) und die jeweils zugehörigen Messorte in einer Höhe von 2 m über dem Boden (blau markiert) für eine mittlere Windrichtung von 150° (i) und 170° (j).



(k)

(l)

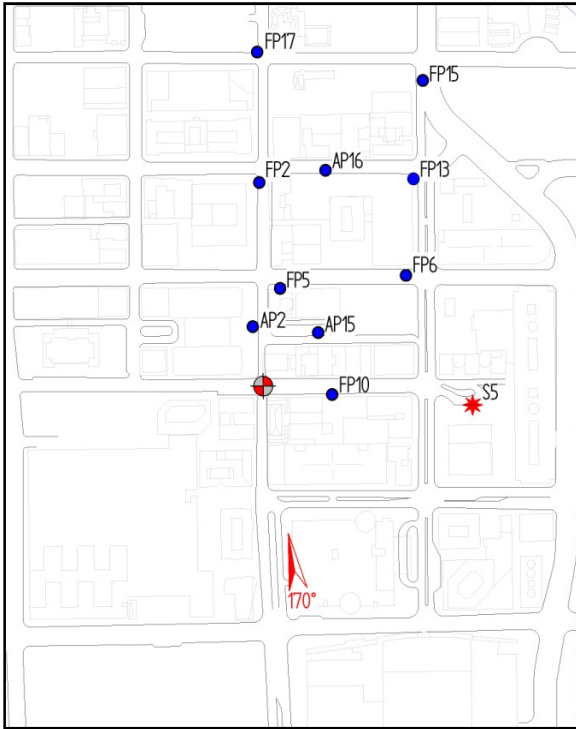
Abbildung 71 k/l: Freisetzungsort S4 (k, l) und die jeweils zugehörigen Messorte in einer Höhe von 2 m über dem Boden (blau markiert) für eine mittlere Windrichtung von 180° (k) und 190° (l).



(m)

(n)

Abbildung 71 m/n: Freisetzungsort S4 (m, n) und die jeweils zugehörigen Messorte in einer Höhe von 2 m über dem Boden (blau markiert) für eine mittlere Windrichtung von 200° (m) und 220° (n).



(o)

Abbildung 71 o: Freisetzungsort S5 und die jeweils zugehörigen Messorte in einer Höhe von 2 m über dem Boden (blau markiert) für eine mittlere Windrichtung von 170°.

Literaturverzeichnis

Allwine, KJ, Leach, MJ, Stockham, LW, Shinn, JS, Hosker, RP, Bowers, JF & Pace, JC 2004, 'OVERVIEW OF JOINT URBAN 2003 – AN ATMOSPHERIC DISPERSION STUDY IN OKLAHOMA CITY', Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone, January 11-15, WA. Amer. Meteor. Soc. , J7.1, Seattle.

Allwine, KJ, Shinn, JH, Streit, GE, Clawson, KL & Brown, M 2002, 'Overview of Urban 2000', *Bulletin of the American Meteorological Society* 83, 2002, p. 521–536.

Aubrun, S & Leiti, B 2004, 'Development of an improved physical modelling of a forest area in a wind tunnel', 2792-2801, *Atmospheric Environment* 38 (2004), University of Hamburg, Meteorological Institute.

Bezpalcova, K 2007, 'Physical Modelling of Flow and Diffusion in Urban Canopy', Doctoral Thesis, Faculty of Mathematics and Physics, Charles University in Prague.

Bonner, WD 1968, 'CLIMATOLOGY OF THE LOW LEVEL JET', *MONTHLY WEATHER REVIEW*, vol 96, no. 12, pp. 833-850.

Bottema, M 1997, 'Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion', *Atmospheric Environment*, 31 (18), 1997, p. 3059–3075.

Britter, R, Di Sabatino, S, Caton, F, Cooke, K, Simmonds, P & Nickless, G 2002, 'Results from Three Field Tracer Experiments on the Neighbourhood Scale in the City of Birmingham UK', *Water, Air, & Soil Pollution*, 2002, pp. 79-90.

Britter, RE & Hanna, SR 2003, 'Flow and dispersion in urban areas', *Annu. Rev. Fluid Mech.*, vol 35, pp. 469-496.

Cheng, H & Castro, I 2002, 'Near-wall flow development after a step change in surface roughness', *Boundary Layer Meteorology*, 105, 2002, p. 411–432.

Clawson, KL, Carter, RG, Lacroix, DJ, Biltoft, CA, Hukari, NF, Johnson, RC, Rich, JD, Beard, SA & Strong, T 2005, 'JOINT URBAN 2003 (JU03) SF6 ATMOSPHERIC TRACER FIELD TESTS', NOAA Technical Memorandum OAR ARL-254.

Counihan, J 1975, 'Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972', *Atmospheric Environment*, 1975, pp. 871-905.

De Wekker, SFJ, Berg, LK, Allwine, KJ, Doran, JC & Shaw, WJ 2004, 'Boundary-layer Structure Upwind and Downwind of Oklahoma City during the Joint Urban 2003 Field Study', *Fifth Conference on Urban Environment*, American Meteorological Society, 23-27 August, Vancouver, B.C., Canada.

Dinar, N, Kaplan, H & Kleiman, M 1988, 'Characterization of concentration fluctuations of a surface plume in a neutral boundary layer', *Boundary-Layer Meteorology* 45, 1988, pp. 157-175.

Doran, J, Allwine, K, Flaherty, J, Clawson, K & Carter, R 2007, 'Characteristics of puff dispersion in an urban environment', *Atmospheric Environment* 41, 2007, pp. 3440-3452.

ESDU 1985, 'Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere)', Item No. 85020, Engineering Sciences Data Unit, London.

Fedderson, B 2005, 'Wind tunnel modelling of turbulence and dispersion above tall and highly dense urban roughness', Dissertation, SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH, Zürich.

Feigenwinter, C, Vogt, R & Parlow, E 1999, 'Vertical structure of selected turbulence characteristics above an urban canopy', *Theor. Appl. Climatol.*, 62, 1999, pp. 51-63.

Fischer, R 2007, 'Ein Programm zur statistischen Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens instantan freigesetzter Schadstoffwolken in komplexer urbaner Bebauung', Diplomarbeit, Meteorologie, Universität Hamburg, Hamburg.

Garrat, JR 1994, *The atmospheric boundary layer*, Cambridge University Press.

Grimmond, C & Oke, T 2002, 'Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterisation scheme', *Journal of Applied Meteorology*, vol. 41, Issue 7, 2002, pp. 792-810.

Guilloteaum, E & Mestayer, P 2000, 'Numerical simulations of the urban roughness sublayer: A first attempt.', *Environmental Monitoring and Assessment*, 65, 2000, p. 211–219.

Hanna, S 1984, 'The exponential probability density function and concentration fluctuations in smoke plumes', *Boundary-Layer Meteorology* 29, 1984, pp. 361-375.

Hanna, SR, Briggs, GA & Hosker Jr., RP 1982, *Handbook on atmospheric diffusion*, National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, VA 22161.

Hanna, SR, Britter, R & Franzese, P 2003, 'A baseline urban dispersion model evaluated with Salt Lake City and Los Angeles tracer data', George Mason University, Volume 37, Issue 36, *Atmospheric Environment*, Fairfax, VA 22030-4444, USA.

Hanna, S & Franzese, P 1999, 'Alongwind Dispersion—A Simple Similarity Formula Compared with Observations at 11 Field Sites and in One Wind Tunnel', *Journal of Applied Meteorology* 39, 1999, pp. 1700-1714.

Heidorn, KC 1978, 'A Chronology of Important Events in the History of Air Pollution Meteorology to 1970', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 59, December 1978, pp. 1589-1589.

Herbst, I 2006, 'Experimentelle Bestimmung des Einflusses variierender Windgrenzschichten auf die Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse in städtischer Bebauung', Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg.

Hertwig, D 2007, 'Dispersion in an Urban Environment with a Focus on Puff Releases', University of Hamburg.

Holton, JR 1992, *An Introduction to Dynamic Meteorology*, Academic Press.

Kaimal, JC, Wyngaard, JC, Izumi, Y & Cote, OR 1972, 'Spectral characteristics of surface layer turbulence', 98, 563-589, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Kraus, H 1970, 'Die Energieumsätze in der bodennahen Atmosphäre', *Berichte des Deutschen Wetterdienstes*, Band 16 Nr. 171.

Leach, MJ 2005, 'Final Report for the Joint Urban 2003 Atmospheric Dispersion Study in Oklahoma City: Lawrence Livermore National Laboratory participation', Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94552.

Leitl, B 2008, 'Quality assurance of urban flow and dispersion models - new challenges and data requirements', *Journal of Wind and Engineering*, vol 5, no. 2, pp. 60-73.

Leitl, B, Pascheke, F & Schatzmann, M 2003, 'Generation of Wind Tunnel Data Sets in Support of the Joint Urban 2003 Atmospheric Dispersion Study - Final Report, Phase I', Meteorological Institute, University of Hamburg, Germany.

Leitl, B & Schatzmann, M 2005, 'Generation of Wind Tunnel Data Sets in Support of the Joint Urban 2003 Atmospheric Dispersion Study - Final Report, Phase II', Meteorological Institute, University of Hamburg, Germany.

Leitl, B, Schatzmann, M & Harms, F 2009, 'Benchmark for Computational Modeling of Urban Flows', Final Report, Meteorologie, Universität Hamburg, Hamburg.

Letzel, MO, Kanda, K & Raasch, S 2006, 'A NEW DIMENSION OF URBAN CLIMATE MODELLING WITH PARALLEL LARGE-EDDY SIMULATION', Proceedings, 6th International Conference on Urban Climate (ICUC-6) 12-16 June, Göteborg, Sweden.

Louka, P, Belcher, SE & Harrison, RG 2000, 'Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft', *Atmospheric Environment, Volume 34, Number 16*, 2000, pp. 2613-2621.

Meroney, R & Lohmeyer, A 1984, 'Statistical characteristics of instantaneous dense gas clouds released in an atmospheric boundary-layer wind tunnel', *Boundary-Layer Meteorology* 28, 1984, pp. 1-22.

Min, IA, Abernathy, RN & Lundblad, HL 2002, 'Measurement and Analysis of Puff Dispersion above the Atmospheric Boundary Layer Using Quantitative Imagery', *Journal of Applied Meteorology*, 2002, pp. 1027-1041.

Oikawa, S & Meng, Y 1995, 'Turbulence characteristics and organized motion in a suburban roughness sublayer', *Boundary Layer Meteorology* 74, 1995, pp. 289-312.

Oke, T 2006, *Instruments and Observing Methods: Report No. 81: Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*, Genf, viewed 26 Mai 2009, <<http://www.wmo.ch/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>>.

Pascheke, F 2000, 'Analyse zeitlich hochaufgelöster Windmessungen in einer städtischen Grenzschicht und Reproduktion wesentlicher Turbulenzeigenschaften im Grenzschichtwindkanal', Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg, Hamburg.

Pasquill, F & Smith, F 1974, 'Atmospheric Diffusion', Ellis Horwood, Sussex, England.

Patnaik, G, Boris, JP & Grinstein, F 2003, 'LARGE SCALE URBAN SIMULATIONS WITH THE MILES APPROACH', AIAA 2003-4104, CFD Conference, Orlando Fl.

Patnaik, G, Grinstein, F, Boris, J & Young, T 2005, *Large Scale Urban Simulations, Chapter 17 in, Implicit Large Eddy Simulation: Computing the Turbulent Fluid Dynamics*, Grinstein, F; Margolin, L; Rider, W, Cambridge UP.

POPULATION REFERENCE BUREAU REPORT 2008, 'World Population Data Sheet', www.prb.org/pdf08/08WPDS_Eng.pdf, Washington, DC.

Precht, M, Kraft, R & Bachmaier, M 2005, *Angewandte Statistik*, 7th edn, Oldenbourg.

Rix, M 2007, 'Bestimmung repräsentativer Mittelungsintervalle für Naturmessungen in komplexer urbaner Bebauung', Diplomarbeit, Meteorologisches Institut, Universität Hamburg.

Roberts, PJW & Webster, DR 2002, *Environmental Fluid Mechanics: Theories and applications*, Hayley H. Shen, Alexander H. D. Cheng, Keh-Han Wang, Michelle H. Teng, and Clark C. K. Liu.

Rotach, MW 1999, 'On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion', *Atmospheric Environment*, 33, 1999, pp. 4001-4008.

Roth, M 2000, 'Review of atmospheric turbulence over cities', *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 126, 2000, pp. 941-990.

Roth, M & Oke, TR 1993, 'Turbulent transfer relationships over an urban surface I: Spectral characteristics', *Q.J. R. Meteorol. Soc.* 119, 1993, pp. 1071-1104.

Sagaut, P 2004, *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*, 2nd Edition, Springer, An Introduction.

Sawford, B, Frost, C & Allan, T 1985, 'Atmospheric boundary-layer measurements of concentration statistics from isolated and multiple sources', *Boundary-Layer Meteorology* 31, 1985, pp. 249-268.

Schatzmann, M 2001, 'Turbulenz und Grenzschicht', Vorlesungsskript, Meteorologisches Institut, Hamburg.

Schatzmann, M & Britter, R 2005, 'Proceedings - International Workshop on Quality Assurance of Microscale Meteorological Models', *COST Action 732*, University of Hamburg - Meteorological Institute - Centre for Marine and Atmospheric Sciences, Hamburg.

Schatzmann, M & Leitl, B 2002, 'Validation and application of obstacle resolving urban dispersion models', *Atmospheric Environment*, 2002.

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.

Schultz, AM 2008, 'Systematische Windkanaluntersuchungen zur Evaluierung von Parameteransätzen für die städtische Rauigkeit', Dissertation, Meteorologie, Universität Hamburg, Hamburg.

Serafin, R, Barron, E, Bluestein, H, Clifford, S, Duncan, L, Lemone, M, Neff, D, Odom, W, Pfeffer, G, Turekian, K, Warner, T & Wyngaard, J 2003, *Tracking and Predicting the Atmospheric Dispersion of Hazardous Material Releases: Implications for Homeland Security*, National Academies Press, Washington, DC.

Simiu, E & Scanlan, RH 1986, 'Wind effects on structures', John Wiley & Sons.

Snyder, WH 1981, 'Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion, report no. 600/8-81-009', Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711.

Stull, R 1989, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, second reprint edn, Publishers, Kluwer Academic, 3300 AA Dordrecht, Niederlande.

Sweatman, WL & Chatwin, P 1996, 'Dosages from instantaneous releases of dense gases in wind tunnels and into a neutrally stable atmosphere', *Boundary-Layer Meteorology* 77, 1996, pp. 211-231.

Tennekes, H & Lumley, J 1972, *A First Course in Turbulence*, MIT Press, Cambridge, Mass.

Townsend, A 1976, *The structure of turbulent shear flow*, Cambridge University Press.

VDI Richtlinie, 3 2000, 'Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht - Windkanalanwendungend', Beuth Verlag, Berlin.

WMO 1958, 'Turbulent Diffusion in the Atmosphere', World Meteorological Organization, WMO - No.77 , Geneva.

Yee, E & Biltoft, CA 2004, 'Concentration fluctuation measurements in a plume dispersing through a regular array of obstacles', *Bound.-Lay. Meteorol.*111, 2004, p. 363–415.

Yee, E, Chan, R, Kosteniuk, P, Chandler, G, Biltoft, C & Bowers, J 1995, 'The vertical structure of concentration fluctuation statistics in plumes dispersing in the atmospheric surface layer', *Boundary-Layer Meteorology* 76, 1995, pp. 41-67.

Yee, E, Kosteniuk, P & Bowers, J 1998, 'A Study of Concentration Fluctuations in Instantaneous Clouds Dispersing in the Atmospheric Surface Layer for Relative Turbulent Diffusion: Basic Descriptive Statistics', *Boundary-Layer Meteorology* 87, 1998, pp. 409-457.

Zhou, Y & Hanna, S 2007, 'Along-wind dispersion of puffs released in a built-up urban area', *Boundary-Layer Meteorology* 125, 2007, pp. 469-486.

Zimmerman, W & Chatwin, P 1995, 'Fluctuations in dense gas concentrations measured in a wind-tunnel', *Boundary-Layer Meteorology* 75, 1995, pp. 321-352.

Danksagung

Herrn Prof. Schatzmann möchte ich dafür danken, dass ich meine Arbeit am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg anfertigen konnte, sowie für die Unterstützung und Geduld, die zum Beenden der Arbeit beigetragen haben.

Ich möchte mich bei Prof. Bernd Leitl für die vielen fachlichen Anregungen, die umfassende Betreuung und selbst für das regelmäßige (meistens montägliche) Anspornen bedanken. Ich möchte mich zudem bei Prof. Leitl dafür bedanken, dass er mein Interesse an Windkanalversuchen weckte und ich weiterhin beruflich die Möglichkeit habe, diesem Interesse nachzukommen.

Desweiteren danke ich der gesamten Windkanalarbeitsgruppe für die vielen angenehmen Kaffeepausen und für ein Betriebsklima, in dem ich mich immer sehr wohl gefühlt habe. Ich danke Ilona Bastigkeit für die Unterstützung bei den Windkanalmessungen und Rasmus Fischer für die Entwicklung einer sehr hilfreichen Datenverarbeitungssoftware.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern. In all den Jahren meiner Ausbildung habt Ihr mich immer in Allem voll unterstützt.

Danke Denise, für die vielen hilfreichen fachlichen Diskussionen, fürs Korrekturlesen, fürs Zuhören, für Deine Geduld, fürs Aufmuntern, für die Kraft, die Du mir gibst und für vieles mehr.