Systematische Windkanaluntersuchungen zur Charakterisierung des Einflusses der urbanen Bebauungsstruktur hinsichtlich der Stadtdurchlüftung

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

Department Geowissenschaften

der Universität Hamburg

vorgelegt von

Frieso Kipsch

aus

Emden (Ostfr.)

Hamburg

2014

- Korrigierte Fassung -

Tag der Disputation: 09.07.2014

Folgende Gutachter empfehlen die Annahme der Dissertation:

Prof. Dr. Bernd Leitl

Prof. Dr. Felix Ament

KURZFASSUNG

Anhaltende Urbanisierung und der Trend zur Nachverdichtung in Stadtgebieten stellen Stadtplaner und Ingenieure vor wachsende Herausforderungen. Eine der Hauptanforderungen ist die Sicherstellung von akzeptablen Bedingungen für die Bewohner hinsichtlich der Luftqualität. Die Luftqualität wird maßgeblich durch das urbane Ventilationsverhalten bestimmt, deren Charakteristik durch Anpassungsmaßnahmen auf der Gebäudeebene stark beeinflusst wird. Im Rahmen des Stadtklimaverbundprojektes KLIMZUG-Nord wurden am Beispiel des Hamburger Stadtteils Wilhelmsburg Modelluntersuchungen zu den Auswirkungen von lokalen Anpassungsmaßnahmen auf die urbane Durchlüftung durchgeführt.

Zur Analyse des Ventilationsverhaltens und nachfolgender Bewertung der Auswirkungen von lokalen Anpassungsmaßnahmen bedarf es eines neuartigen Ansatzes. Für diese Vergleichsstudie ist eine experimentelle Methode entwickelt worden. Anhand von Tracerfreisetzungen kann mit dieser Messmethodik das instationäre Ventilationsverhalten zeitlich und räumlich hochaufgelöst bestimmt werden.

Die Windkanalstudien sind an einem detaillierten Stadtteilmodell (Hamburg-Wilhelmsburg) durchgeführt worden. Aufgrund zeitlich und räumlich hochaufgelösten Messungen können die lokalen Auswirkungen von urbanen Umstrukturierungen auf die Durchlüftung der Stadtstruktur untersucht werden. Ein quantitativer Ansatz zur Bestimmung des lokalen Ventilationsverhaltens aus der Häufigkeitsverteilung der Konzentrationssignale wird vorgestellt. Die Analyse der Durchlüftung in verschieden Stadträumen zeigt individuelle Charakteristiken des lokalen Ventilationspotentials auf. Die Auswirkungen verschiedener Betrachtungszeiträume auf die Bewertung des Ventilationspotentials wurde ebenfalls untersucht.

Schlüsselworte:

Windkanalstudie, Stadtdurchlüftung, räumliches Ventilationsverhalten, lokales Ventilationspotential.

IV

ABSTRACT

Increasing urbanization and the trend towards densification of urban areas raise numerous challenges to city planners and engineers. To ensure acceptable conditions in air quality, the ventilation in densely built areas will remain to be a key factor of urban planning. The air quality is largely determined by the urban ventilation behavior; therefore it is essential to analyze the effects of various local adaptation measures even at building level. In the frame of the urban climate project KLIMZUG-Nord, experimental wind tunnel studies were carried out using a real urban environment to determine the effects of local adaptation measures to the urban ventilation.

To analyze the local ventilation behavior and to evaluate of the impact of local adaptation measures a new measurement technique is required. For this study, an experimental approach has been developed. By means of tracer releases, the transient phenomena of ventilation can be resolved temporally and spatially with high resolution.

Wind tunnel studies have been conducted in the model of a realistic urban geometry (Hamburg-Wilhelmsburg). Due to the high temporal and spatial resolution of the measurements, effects of urban reconstruction can be examined. In contrast to similar approaches reported in literature, the method developed is using information masked in measured concentration fluctuations. Sensitivity studies show a high variability of the ventilation conditions within a limited area. By analyzing the frequency distributions of the concentration signals, characteristic ventilation behavior for various urban spaces can be determined. In addition, the effect of temporal resolution of the measured concentration time series on the ventilation potential was investigated.

Keywords:

Wind tunnel experiments, urban ventilation, spatial characteristics of ventilation, local ventilation potential.

VI

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Einle	itung	1
2.	Klim	atische Grundlagen	5
	2.1	Die atmosphärische Windgrenzschicht	5
	2.2	Einfluss durch Stadtstrukturen	10
	2.3	Charakterisierung von Stadtstrukturen	12
	2.4	Stadtklima und Anpassungsmöglichkeiten	14
	2.5	Bestimmung der Ventilation urbaner Gebiete	16
3.	Met	nodik des physikalischen Modells	23
	3.1	Der Grenzschichtwindkanal WOTAN des Meteorologischen Instituts	23
	3.2	Das Windkanalmodell Hambura-Wilhelmsbura	24
	3.2	Messtechnik im Grenzschichtwindkanal	25
	5.5		25
	3.4	Qualitat der modellierten Grenzschichtstromung	27
	3.4.1	Versperrungsgrad	27
	3.4.2	Druckgradient im windkanal	28
	3.4.3	Laterale Homogenität der Anströmung	30
	3.4.4	Reynoldszahl-Unabhängigkeit der Anströmung	31
	3.4.5	Genauigkeit des Windkanalmodells	33
	3.4.6	Genauigkeit der Sondenpositionierung	33
	3.4.7	Reproduzierbarkeit der Strömungsmessungen	34
	3.5	Eigenschaften der modellierten Grenzschicht	36
4.	Expe	rimentelle Untersuchungsmethoden der Ventilationseigenschaften eines Modellgebietes mit	tels
Tr	acern		45
	4.1	Diskussion möglicher Tracer	49
	4.2	Diskussion der Messverfahren	50
	4.2.1	Bestimmung der lokalen Ventilationseffizienz mit bodennahen Traceremissionen	50
	4.2.2	Beschreibung des lokalen Ventilationspotentials durch die systematische Erfassung der	
	Ober	Oberflächentemperatur	
	4.2.3 Bestimmung des lokalen Ventilationspotentials durch bodennahe Tracergasfreisetzunger		53
5.	Vers	uchsdurchführung der Ventilationsstudien	55
	5.1	Bestimmung der Ventilationseffizienz mit Hilfe bodennaher Tracergasfreisetzungen	55
	5.1.1	Charakterisierung der Ventilation mit bodennahen Quellen	55
	5.1.2	Lokale Freisetzungen durch mobile Quellen	60
	52	Reschreihung des Ventilationspotentials durch systematische Erfassung der Oberflächentempe	pratur
	5.2		66
	5.3	Bestimmung des Ventilationspotentials anhand von flächigen Emissionsquellen	71

6. A	Auswertung der Ventilationspotentialstudien	
6.1	Betrachtung des Zeitschriebs der Konzentrationswerte	80
6.2	Bestimmendes Zeitintervall der Betrachtung der Ventilation von Stadtgebieten	86
7. V	rergleich der Ventilationseigenschaften	93
7.1	Sensitivitätsuntersuchung des Verfahrens zur Bestimmung des Ventilationspotentials	98
7.2	Vergleich der Bebauungszustände im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg	103
7.3	Vergleich der Stadtraumtypen	107
8. Z	usammenfassung und Ausblick	115
9. A	bbildungsverzeichnis	117
10.	Tabellenverzeichnis	121
11.	Symbole und Abkürzungen	123
12.	Literaturverzeichnis	127
13.	Danksagung	139
14.	Anhang	141
15.	Eidesstattliche Versicherung	181

Dem Andenken meines Großvaters gewidmet.

1. Einleitung

Aufgrund der sich immer stärker verdichtenden Innenstädte sowie der Bevölkerungszu-nahme in den Ballungsgebieten sind Stadtplaner, Soziologen, Architekten sowie Ingenieure gefordert den Menschen auch in Zukunft nicht nur akzeptable, sondern weiterhin attraktive Lebensumstände bieten zu können. Neben sozioökonomischen Aspekten stellen klimatische Einflüsse maßgebende Faktoren für attraktive Lebensbedingungen dar. Im Rahmen des von dem Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten interdisziplinären Verbundprojektes KLIMZUG-Nord wurden Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel für die Metropolregion Hamburg auf der Basis lokaler Anforderungen untersucht und entwickelt. Die Region soll durch dieses Projekt in ihren Planungs- und Entwicklungsprozessen hinsichtlich der erwarteten Klimaänderungen unterstützt werden [1].

Im Fokus von KLIMZUG-Nord steht der Gegensatz zwischen der Metropole Hamburg und dem sie umgebenden ländlich geprägtem Raum, der Ökonomie und der Ökologie sowie dem Naturschutz. Für die Metropolregion soll in drei Themenfeldern und in enger Abstimmung mit betroffenen Stakeholdern (Akteuren) ein integrativer Anpassungsansatz an einen möglichen Klimawandel entwickelt [2] sowie ein Handlungskonzept für den planerischen Zeitraum bis 2050 aufgezeigt (Schlünzen und Linde, 2014) werden. Innerhalb des KLIMZUG-Nord Verbunds besteht eine inhaltliche Gliederung in drei Themenfelder ("Ästuarmanagement", "Integrierte Stadt- und Raumentwicklung" sowie "Zukunftsfähige Kulturlandschaften"). Weiterhin werden in Fokus- oder Modellgebieten anhand der individuellen Eigenschaften eines begrenzten Raumes mögliche lokale Entwicklungsszenarien entwickelt sowie Anpassungsmaßnahmen an die jeweiligen Anforderungen des Betrachtungsraumes erarbeitet (Kursbuch Klimaanpassung, 2014). Neben den Modellgebieten Altes Land, Elmshorn, Wandse u.a. stellt der Stadtteil Hamburg-Wilhelmsburg eines dieser räumlich fokussierten Modellgebiete dar.

In Fokusgebieten werden in interdisziplinären Arbeitsgruppen die Herausforderungen des Klima- und Strukturwandels hinsichtlich stadtklimatischer, hydrologischer und sozioökonomischer Fragestellungen untersucht. Der Fokus auf ein räumlich begrenztes Modellgebiet soll es ermöglichen Folgen und Stressoren eines möglichen Klimawandels auf den Stadtteil abzuschätzen und mögliche Planungshinweise für Städteplaner zu entwickeln.

Das Modellgebiet Wilhelmsburg fokussiert sich auf den Stadtteil Hamburg-Wilhelmsburg, den Stadtteil mit der größten Ausdehnung der Stadt Hamburg. Seine Insellage und somit die räumliche Trennung von anderen Stadtteilen stellt eine Herausforderung an die Sozial- und Wirtschaftsstruktur und somit an die Attraktivität des Stadtteils dar. Dieser Stadtteil ist, im Vergleich zum Durchschnitt der Stadt Hamburg, von hoher Arbeitslosigkeit und geringem Einkommen geprägt. Wirtschaftlich ist der Stadtteil durch den Hamburger Hafen geprägt, neben diesem und einigen Großbetrieben befinden sich überwiegend kleine Betriebe auf der Elbinsel (Kowalewski und Schempp, 2014). Die Elbinsel gehört zu den sich derzeit am stärksten verändernden Stadtquartieren Hamburgs. Im Zuge der internationalen Garten-schau

2013 (igs)¹ und der internationalen Bauausstellung (IBA)² erfolgte eine Umstruk-turierung großflächiger Bereiche des Stadtgebiets. Neben der Veränderung der Bebauungs-struktur im Stadtteil Wilhelmsburg (und daraus folgend der Verdichtung und Versiegelung des Stadtteils) sowie der Modernisierung des Baubestandes wird im Zuge der Bauaus-stellung eine Durchmischung der Bevölkerungsstruktur der Elbinsel angestrebt.

Für stadtklimatische Fragestellungen innerhalb des KLIMZUG-Nord Verbundes wurde im Grenzschichtwindkanal der Universität Hamburg anhand eines physikalischen Modells des Stadtteils ein Referenzdatensatz der bodennahen Windgeschwindigkeiten erstellt. Sowohl der Ist-Zustand als auch der Bebauungszustand nach Vollendung der Umstrukturierung im Rahmen der internationalen Bauausstellung (Plan-Zustand) wurden systematisch analysiert.

Mit einem numerischen Modell können auf dieser Basis die Effekte weiterer Anpassungsmaßnahmen (bspw. intensive Dachbegrünungen, Verringerung des Oberflächenversiegelungsgrades, etc.) evaluiert werden.



Abb. 1-1: Beeinflussende Faktoren des städtischen Windfelds, nach Groß und Funk (2012).

Für eine Betrachtung des bodennahen Windfelds muss neben den großräumigen windklimatischen Verhältnissen (vgl. Anhang A - Exkurs: Windklima am Standort Hamburg) die lokale Bebauungsstruktur betrachtet werden. Sowohl die Dichte der Bebauung als auch deren Orientierung, die mittlere Gebäudehöhe sowie deren Verteilung wirken sich auf die lokalen Windgeschwindigkeiten und -richtungen aus, sodass oberflächennah erhobene Messdaten differenziert betrachtet werden müssen (vgl. Oke, 2007). Neben einer Verringerung der Windstärke übt die Beschaffenheit der Bebauung ebenfalls Einfluss auf das lokale Windfeld aus. Weitere Effekte wie die Geländeneigung oder der Bewuchsbestand sind ggf. ebenfalls zu berücksichtigen. Zusammenfassend kann das innerstädtische Windfeld als Zusammenspiel

¹ Unter dem Leitmotto "In 80 Gärten um die Welt" wurden in dem Zeitraum 26. 04. -13.10.2013 auf der ca. 100 ha umspannenden Fläche der igs verschiedene Themenwelten und Kulturlandschaften präsentiert.

² In den Jahren 2007-2013 war die Stadt Hamburg der Gastgeber der internationalen Bauausstellung unter dem Motto "Entwürfe für die Zukunft der Metropole". Weiterführende Informationen: www.ibahamburg.de

der großräumigen Windverhältnisse, der vorherrschenden Bebauung und der Topographie³ angesehen werden (vgl. Abb. 1-1).

Das zukünftige Stadtklima Hamburg-Wilhelmsburgs wird entscheidend von den städtebaulichen Maßnahmen im Stadtteil beeinflusst. Im Kontext der IBA wurden zwei Entwicklungsszenarien für den Stadtteil Wilhelmsburg skizziert:

Ein **Referenzszenario** mit der Fortschreibung der bisherigen Stadtentwicklung am Standort Hamburg-Wilhelmsburg sowie

ein **Exzellenzszenario** mit einer grundlegenden Neuordnung der Flächenentwicklungspläne im Stadtteil und daraus resultierend neugeschaffenen Siedlungsflächen im Stadtraum.

Auf Grundlage der Entwicklungsszenarien der IBA (IBA, 2010) kann eine Verdichtung des urbanen Siedlungsraumes vorausgesetzt werden. Einer zusätzlichen Flächenversiegelung um 200 ha im Referenzszenario um 17 % (211 ha bzw. 18 % im Exzellenzszenario) steht ein Rückbau der Hafen- und Industrieflächen gegenüber (79 ha bzw. 91 ha). Einfamilienhäuser mit geringer Ausdehnung sowie der Geschosswohnungsbau mit größerer horizontaler und vertikaler Ausdehnung erfahren eine Zunahme von 94 ha bzw. 52 ha (55 ha bzw. 84 ha im Exzellenzszenario), die Flächen für Gewerbetreibende im Stadtquartier vergrößern sich auf 228 ha (292 ha im Exzellenzszenario). Eine Mischnutzung der Bebauungsstruktur soll mit dieser Umstrukturierung einhergehen.

Die Umstrukturierungen können sich auf das lokale Mikroklima sowie auf das individuelle hedonische Empfinden auswirken, da die Bebauungsstruktur einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung des urbanen Windfelds ausübt. Je nach Bebauungstyp und der Positionierung der Gebäude relativ zueinander können aufgrund von bspw. Kanalisierungs- oder Interferenzeffekten lokal Zonen des Diskomforts für Passanten geschaffen werden. So können durch Aufstockungen oder Veränderungen der äußeren Gestaltungsform von Gebäuden aufgrund von Wirbelablöseeffekten an den Bauwerkskanten Zonen mit einer erhöhten Böigkeitsstruktur geschaffen werden (vgl. Reuter (2012), Gandemer (1978)).

Eine weitere Wechselwirkung der Bebauungsstruktur auf das Windfeld ist deren Auswirkung auf das lokale Ventilationsverhalten. Neben der Komfortwirkung muss auch der Austausch von belasteter (mit Schadstoffen oder Wärme) Luft in Stadtteilplanungen berücksichtigt werden. Durch eine Verbesserung des Ventilationsverhaltens eines urbanen Raumes können akzeptable thermische Bedingungen für Anwohner geschaffen, sowie der Abtransport von Luftschadstoffen verbessert werden. Die Ventilation von urbanen Räumen wirkt sich invers zum Komfortempfinden aus (vgl. Isyumov, 1995). Eine Verringerung der Wind-geschwindigkeit durch bauliche Maßnahmen wie bspw. der Errichtung von schmalen Straßenzügen oder der Schaffung einer homogenen Ausprägung der Gebäudehöhen erhöhen den lokalen Windkomfort, verringern demgegenüber jedoch die Ventilationswirkung. Da ein Kernpunkt des Exzellenzszenarios die Nachverdichtung der urbanen Struktur, somit eine Aufstockung bzw. Erweiterung des Baubestandes, bildet, gilt diesem Punkt besondere Berücksichtigung.

³ Das Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg ist als aerodynamisch eben anzusehen, sodass mögliche Topographieeffekte im Untersuchungsraum vernachlässigt werden können.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Auswirkungen der baulichen Umstrukturierung des Stadtteils mit Fokus auf das urbane Ventilationsverhalten diskutiert. Für die Studien wurde ein hochauflösender, experimenteller Ansatz zur Bestimmung des urbanen Ventilationsverhaltens entwickelt.

In Kapitel 2 werden nach einer Einführung in atmosphärische Grenzschichtströmungen die Wechselwirkungen des urbanen Raumes mit dem Windfeld skizziert. Weiterhin erfolgt eine Übersicht über den Stand der Technik der verschiedenartigen Ansätze zur Bestimmung des Ventilationsverhaltens sowie zur Bestimmung der Ventilationswege im urbanen Raum. Kapitel 3 beinhaltet eine Beschreibung des verwendeten Windkanals, des physikalischen Modells sowie der eingesetzten Messtechnik. Des Weiteren wird die Qualität der modellierten Anströmung bewertet sowie die Grenzschichtanströmung auf das Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg charakterisiert. In Kapitel 4 erfolgt eine detaillierte Diskussion des Stands der Forschung zur Bestimmung des lokalen Ventilationsverhaltens. Ebenfalls werden mögliche Tracer und Versuchskonfigurationen für Windkanalversuche diskutiert.

Kapitel 5 zeigt die versuchstechnische Umsetzung der in Kapitel 4 diskutierten Versuchskonfigurationen. Da die lokalen Ventilationseigenschaften untersucht werden sollen, erfolgt eine Bewertung der Verfahren auf ihre der Anwendungstauglichkeit. Kapitel 6 zeigt die Fragestellungen der durchgeführten Versuche auf, vertieft die Anforderungen an die Messtechnik und diskutiert mögliche Anwendungen der entwickelten Messmethode. Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer detaillierten Beantwortung der in Kapitel 6 skizzierten Fragestellungen. Die Messmethodik zur Bestimmung des Ventilationsverhaltens wird hinsichtlich ihrer räumlichen Sensitivität untersucht. Im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg werden die Auswirkungen der Umstrukturierung aufgezeigt, weiterhin werden für verschiedene Stadtraumtypen verschiedenartige Charakteristiken bestimmt. Kapitel 8 werden die Ergebnisse der Studien des Ventilationspotentials kritisch diskutiert und ein Ausblick über den weiteren Forschungsbedarf hinsichtlich der entwickelten Messmethodik vorgestellt.

Eine kurze Ergebnisübersicht des Modellgebiets Hamburg-Wilhelmsburg zum Themengebiet der Ventilation erfolgt in Anhang E - Ergebnisse KLIMZUG.

2. Klimatische Grundlagen

Dieses Kapitel soll eine Einleitung in das Themengebiet der Ventilation geben. In Kap. 2.1 wird eine kurze Einführung in die atmosphärische Grenzschichtströmung gegeben, Kap. 2.2 beleuchtet den Einfluss der urbanen Bebauung auf das bodennahe Windfeld sowie die thermischen Eigenschaften des urbanen Raumes. In Kap. 2.3 werden in unterschiedlichen Betrachtungsskalen verschiedenartige Charakterisierungsmöglichkeiten der Stadtstrukturen skizziert. In Kap. 2.4 werden Bewertungsmöglichkeiten des thermischen Komforts in urbanen Gebieten vorgestellt. In Kap. 2.5 werden verschiedene Bestimmungsmöglichkeiten der urbanen Ventilationswege und des Ventilationsverhaltens aufgezeigt und diskutiert.

2.1 Die atmosphärische Windgrenzschicht

Als atmosphärische Grenzschicht wird der oberflächennahe Teil der Erdatmosphäre bezeichnet. Ein Charakteristikum für diese Grenzschicht stellt deren direkte Beeinflussung durch die Erdoberfläche dar. Bedingt durch unterschiedliche Oberflächenstrukturen und deren Nutzungsarten treten Reibungseffekte auf, d.h. es erfolgt ein Impulsaustausch der Windströmung in der bodennahen Atmosphäre mit der Erdoberfläche.

Die Höhe der Grenzschicht ist variabel, je nach vorherrschenden klimatischen Bedingungen und meteorologischen Schichtungsverhältnissen kann sie, dem Tagesgang folgend, eine Dicke von mehreren hundert Metern bis zu mehreren tausend Metern aufweisen. Die Mächtigkeit der Grenzschicht kann bei neutraler Schichtung eine Stärke zwischen 500 - 2000 m aufweisen (Snyder, 1981), nach Stull (1991) variiert diese Mächtigkeit zwischen 100 und 3000 m.

Oberhalb dieser atmosphärischen Grenzschicht beginnt der Bereich der freien Atmosphäre, innerhalb welcher sich keine Beeinflussungen durch die Erdoberfläche mehr nachweisen lassen. Die geostrophische Strömung ist durch das Gleichgewicht zwischen Druckgradientenkraft und Corioliskraft geprägt. Auch kann angenommen werden, dass der mittlere Windvektor ausschließlich eine Horizontalkomponente besitzt, da die mittlere Strömung parallel zu der Erdoberfläche verläuft (Sockel, 1984).

Die atmosphärische Grenzschicht stellt den Übergang zwischen zwei Randbedingungen dar: Die Strömungsgeschwindigkeit am Erdboden gleich Null als untere Randbedingung und der geostrophischen Strömungsgeschwindigkeit als obere Randbedingung. Der Verlauf dieses Übergangs lässt sich in drei Teilbereiche klassifizieren:

Innerhalb der **Ekman-Schicht** (obere 90% der atmosphärischen Grenzschicht) tritt zu den Druckgradient- und Corioliskräften der geostrophischen Strömung noch die Reibungskraft der Erdoberfläche als dritte Komponente hinzu. Die entstehenden Reibungskräfte wirken entgegen der Strömungsrichtung. Daraus folgt, dass mit abnehmender Höhe über dem Boden die mittlere Geschwindigkeit des Windes abnimmt und die Turbulenz des Windes zunimmt. Daraus resultiert, dass die wirksame Corioliskraft geringer wird und sie innerhalb der Bodengrenzschicht ihren Einfluss auf die Strömungsrichtung zunehmend verliert (vgl. Abb. 2-1). Der Windvektor dreht sich zu den Isobaren niedrigeren Luftdrucks. Innerhalb der **Prandtl-Schicht** übt die aus der Erdrotation resultierende Corioliskraft einen vernachlässigbar geringen Einfluss aus, sodass in diesem Bereich die Windrichtung als im Mittel konstant angenommen werden kann. Aufgrund des Anwachsens des Reibungseinflusses der Erdoberfläche mit abnehmender Höhe vermindert sich die Strömungsgeschwindigkeit des Windes, die Turbulenz des Windes nimmt zu. Ein Definitionsmerkmal der Prandtl-Schicht ist eine nahezu konstante Schub-spannung (engl.: constant-flux layer). Die Prandtl- Schicht besitzt eine vertikale Aus-dehnung von ca. 10 % der Gesamthöhe der atmosphärischen Grenzschicht.

Die **viskose Unterschicht**, auch laminare Grenzschicht genannt, liegt in unmittelbarer Bodennähe und ist nur wenige Millimeter dick. Hier klingen die turbulenten Schwankungsbewegungen ab und die Geschwindigkeit des Windes wird aufgrund der (Wand-) Reibung auf nahezu null abgebremst. Der Grenzschichttheorie zufolge sind Wärme- und Impulstransporte durch molekulare Vorgänge bedingt, welche jedoch keinen Einfluss auf die dynamischen Prozesse innerhalb der Grenzschicht ausüben.



Abb. 2-1: Schematischer Aufbau der Atmosphäre, nach Koss (2001).

Abb. 2-1 zeigt den schematischen Aufbau der Atmosphäre. Der Skizze des Aufbaus der atmosphärischen Grenzschicht in Abb. 2-1 (rechter Teil) kann entnommen werden, dass die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe über Grund an Intensität zunimmt. Die Beschreibung des Geschwindigkeitsprofils kann durch zwei Funktionen beschrieben werden, dem logarithmischen Windprofil (Gl. 2-1) sowie einem empirischen Potenzansatz (Hellmann, 1917, Gleichung 2-2).

$$\frac{\bar{u}_z}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right) \tag{GI. 2-1}$$

$$\frac{\overline{u}_z}{\overline{u}_{ref}} = \left(\frac{z - d_0}{z_{ref} - d_0}\right)^{\alpha}$$
(GI. 2-2)

mit:

\overline{u}_z :	mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe z	[m/s]
\overline{u}_{ref} :	mittlere Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe	[m/s]
<i>z</i> :	Höhe über Grund	[m]
z _{ref} :	Höhe der Referenzwindgeschwindigkeit	[m]
<i>z</i> ₀ :	dynamische Rauigkeitslänge	[m]
<i>d</i> ₀ :	Versatzhöhe des Profils	[m]
α:	Profilexponent	[-]
<i>u</i> _* :	Schubspannungsgeschwindigkeit	[m/s]
κ:	vKarman- Konstante	[-]

Aus dem Prandtl'schen Mischungswegansatz können zwei Grundlagen der Grenzschichtbetrachtung abgeleitet werden. Aufgrund des zunehmenden Wandabstands und des somit vernachlässigbar kleinen Einflusses des molekularen Impulsaustausches $\left(-\overline{u'v'} \gg v \frac{\partial U_1}{\partial x_2}\right)$ prägt sich die Schubspannung τ_* (Gl. 2-3) bei konstanter Dichte ρ höhenunabhängig konstant innerhalb der ausgebildeten atmosphärischen Grenzschicht aus. Die korrespondierende Schubspannungsgeschwindigkeit u_* (Gl. 2-4) ist entsprechend als höhenunabhängig konstant zu interpretieren, wenn der longitudinale Druckgradient der Strömung gegen Null geht.

$$\tau_* = -\rho \cdot \overline{u'v'} \tag{Gl. 2-3}$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_*}{\rho}} \tag{GI. 2-4}$$

mit:

u'v': Kovarianz der horizontalen und vertikalen Strömung

Unter der Annahme einer konstanten Schubspannung kann aus dem Prandtl'schen Grenzschichtansatz ($-\overline{u'v'} = u_*^2$) das logarithmische Wandgesetz zur Beschreibung des Windgeschwindigkeitsprofils (Gleichung 2-1) abgeleitet werden. Dem logarithmischen Ansatz des Windprofils zufolge wird die mittlere Windgeschwindigkeit als Funktion in Abhängigkeit der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* , der v.-Kármán-Konstante κ , der Rauigkeitslänge z_0 und der Geländeversatzhöhe d_0 beschrieben. Die Gültigkeit von Gleichung 2-1 ist aufgrund der Voraussetzung einer höhenkonstanten Schubspannungsgeschwindigkeit u_* auf das oberflächennahe Windprofil innerhalb der Prandtl-Schicht (bis ca. 100 m) beschränkt. Dieser Ansatz ist der für die Prandtl-Schicht empfohlene Ansatz (VDI, 2000).

[m²/s²]

Mittels exponentieller Ansätze, basierend auf der Höhenabhängigkeit der horizontalen Windgeschwindigkeit (vgl. Gl. 2-2), kann eine Kopplung mit einer (Referenz-) Windge-schwindigkeit oberhalb der Prandtl-Schicht erfolgen (vgl. Helbig et al., 1999). Aufgrund des explizit empirischen Hintergrundes des Potenzansatzes sollte der logarithmische Ansatz zur Beschreibung des oberflächennahen Profils vorgezogen werden.

Die Beschreibung des Profilverlaufs einer Grenzschichtströmung erfolgt anhand einiger bestimmender Kennzahlen. Neben der Kenntnis der Windgeschwindigkeit sind Profilneigungs- bzw. Geländeparameter zu berücksichtigen.

Der Parameter z_0 des Profils ist kennzeichnend für die sich ausbildende Rauigkeitslänge. Diese beschreibt die Höhe über Grund, in der eine mittlere Windgeschwindigkeit gleich Null erreicht wird. Mathematisch lässt sie sich herleiten aus dem Schnittpunkt der Profilgeraden mit der um d_0 verschobenen Höhenachse in der logarithmischen Darstellungsweise (vgl. Koss, 2001). Innerhalb von Bebauungsstrukturen oder dichten Vegetationsflächen erfolgt eine Nullhöhenverschiebung d_0 , ein mittleres Geschwindigkeitsprofil bildet sich oberhalb dieser Versatzhöhe aus. d_0 wird als Versatzhöhe während der Normierung des Windprofils auf die Rauigkeitslänge verwendet. Die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* bestimmt innerhalb der logarithmischen Skalierung die Neigung des Geschwindigkeitsprofils (Gl. 2-5).

$$d_0 = \frac{u_*}{\kappa} \tag{GI. 2-5}$$

Anhand des **Profilexponenten** α (Gleichung 2-2) kann eine Höhenanpassung der Windgeschwindigkeit ohne die Kenntnis der Wandschubspannung erfolgen. Dieser theoretische Ansatz wird in der Literatur häufig dem logarithmischen Ansatz zur Bestimmung einer Rauhigkeits- oder Geländekategorie vorgezogen. Formell können die beiden Ansätze nicht ineinander überführt werden, nach Counihan (1975) besteht jedoch ein funktioneller Zusammenhang zwischen der Versatzhöhe z₀ und dem Profilexponenten α (vgl. Kap. 3.5).

Obwohl die profilbeschreibenden Parameter bei unterschiedlichen Oberflächenbeschaffenheiten und verschiedenartigen Landnutzungsarten in ihrer Ausprägung variieren, kann die Nutzung der Oberfläche durch wenige Parameter hinreichend beschrieben werden. Für ingenieurtechnische Anwendungen wurden, basierend auf dieser Annahme, verschiedene Landnutzungstypen in Geländekategorien klassifiziert und einem charakteristischen Wertebereich der beschreibenden Parameter zugeordnet. Je nach Klassifizierungstyp variieren die Klassen untereinander, sowohl in der Anzahl als auch in den charakteristischen Zuordnungen. Nach VDI (2000)⁴ werden bspw. vier (davon zwei urbane) Oberflächenrauigkeits-klassen unterschieden, im Eurocode (NABau, 2005) werden fünf (davon zwei urbane) Oberflächenrauigkeitsklassen vorgeschlagen. Cook (1985) und Troen et al. (1989) weisen weitere verschiedene Kategorien mit unterschiedlichen Klassifizierungen aus. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird zur Beschreibung des Grenzschichtprofils die Klasseneinteilung des VDI (2000) verwendet.

⁴ In Kap. 3.4 erfolgt eine Strömungscharakterisierung auf Basis dieser Kennzahlen.

Die Betrachtung des Windprofils erfolgt in dieser Arbeit auf der Basis von mittleren Geschwindigkeitswerten. Windströmungen in der Atmosphäre sind räumlich und zeitlich instationäre Vorgänge, deren Ursprünge in Druckausgleichströmungen innerhalb der Erdatmosphäre liegen. Van der Hoven (1957) konnte anhand von Frequenzanalysen maßgebende Strömungscharakteristiken, ausgeprägte Energiemaxima sowohl im nieder- als auch im hochfrequenten Bereich, identifizieren⁵.



Abb. 2-2: Schwankungsanteile der Windgeschwindigkeit, nach v. d. Hoven (1957).

Abb. 2-2 zeigt die Schwankungsanteile der Strömung, drei Eigenschaften werden aus dieser Verteilung ersichtlich:

Ein globales Energiemaximum bei einer Frequenz von ca. 0.01 [1/h], ca. 4 Tage. Dieses Maximum kann makrometeorologischen Phänomenen zugeordnet werden.

Ein lokales Energiemaximum (ca. 50 [1/h]) in einem Frequenzbereich von 10-1000 [1/h], also einem Bereich von 10 Minuten bis wenigen Sekunden mit einem Energiemaximum bei ca. 1.5 Minuten. Dieser Teilbereich beinhaltet den turbulenten Schwankungsbereich des Windes. Das sog. Böenspektrum wird dem mikrometeorologischen Bereich zugeordnet.

⁵ Die Allgemeingültigkeit des Spektrums nach v.d. Hoven ist stark umstritten, jedoch eignet es sich zur qualitativen Charakterisierung atmosphärischer Bewegungsformen (Schatzmann, 2006).

Differenziert werden kann zwischen diesen beiden Maxima aufgrund eines ausgeprägten Energieminimums, der sog. "spektralen Lücke" (spectral gap), in dem Frequenzbereich von ca. 5 Minuten – 5 Stunden.

Basierend auf dem Turbulenzspektrum nach v. d. Hoven kann zwischen dem makrometeorologischen Bereich (Wetterlage) und dem mikrometeorologischem Bereich (Turbulenz) unterschieden werden. Eine physikalische Simulation des Turbulenzspektrums in Grenzschichtwindkanälen kann in Superposition mit dem makrometeorologischen Bereich ein realitätsnahes Abbild der Strömungsverhältnisse erzeugen.

2.2 Einfluss durch Stadtstrukturen

Urbane Gebiete prägen aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung den bodennahen Teil der Atmosphäre, die Prandtl-Schicht, sodass die in Kap. 2.1 aufgeführte atmosphärische Gliederung erweitert werden muss. Neben dem mechanischen Einfluss auf die Anströmung aufgrund der Hinderniswirkung ihrer Bauwerksgeometrie wirkt sich ein Stadtraum ebenfalls thermisch und chemisch aus.



Abb. 2-3: Städtische Grenzschicht, nach Oke (1992), modifiziert.

Der typische urbane Aufbau der Bebauungsstruktur kann durch den Übergang einer ländlich geprägten, wenig beeinflussenden Struktur in eine vorstädtische mit einem ausgeprägten Stadtzentrum im Inneren charakterisiert werden (vgl. Abb. 2-3). Dieser Aufbau spiegelt sich in der sich ausbildenden Grenzschicht wieder. In städtischen Gebieten verändert sich die aerodynamische Rauigkeit der Oberfläche, es kommt zu einem sog. Rauigkeitssprung. An diesem Übergang bildet sich in der Grenzschichtströmung eine interne Grenzschicht mit veränderten Charakteristiken aus, welche mit zunehmender Überstreichungslänge an vertikaler Mächtigkeit zunimmt. Die sich ausbildende Grenzschicht wird auch als städtische Grenzschicht bezeichnet (Urban Boundary Layer, UBL)⁶. Ein Charakteristikum des Windfelds innerhalb dieser internen Grenzschicht ist u.a. die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit aufgrund der erhöhten Rauigkeit der Oberfläche sowie eine Erhöhung der (mechanischen und thermischen) Turbulenz.

⁶ Aufgrund der großräumigen Bezüge kann die Ausbildung einer UBL als ein mesoskaliges Phänomen betrachtet werden (Löbel et al., 1988).

Der Bereich unterhalb der sich ausbildenden internen Grenzschicht wird als "Stadthindernisschicht" (Urban Canopy Layer, UCL, Kuttler (2004)) bezeichnet. Die Höhe der UCL entspricht der mittleren Gebäudehöhe und somit annäherungsweise der Verdrängungsdicke d₀ (Löbel et al. (1988), vgl. Abb. 2-4).



Abb. 2-4: Versatzhöhe d₀, oberflächennahes Windfeld, nach Cook (1985), modifiziert.

Auf der mikroskaligen (lokalen) Ebene prägt die Bebauungsstruktur bedingt durch ihre inhomogene Ausprägung dem Windfeld individuelle Charakteristika auf. So treten bspw. aufgrund von Wirbelablösungen an Bauwerkskanten im Nachlauf eines Gebäudes Zonen mit erhöhter Böigkeit des Windes auf. Weitere häufig auftretende Effekte im urbanen Raum sind Bereiche mit erhöhter Geschwindigkeit aufgrund von Kanalisierungen des Windes durch parallele oder spitzwinklige Riegelbebauung sowie in dichter, blockartiger Bebauungsstruktur Interferenzeffekte, ausgelöst durch Druckunterschiede zwischen zueinander versetzt stehenden Gebäuden. Hochhauskomplexe oder Einzelbauwerke üben einen besonders zu berücksichtigen Effekt aus, da an der luvseitigen Fassade Fallwinde entstehen können sowie das Windfeld bis in den fernen Nachlauf des Gebäudes beeinflusst wird. In Windkomfortstudien wird die mechanische Gefahr dieser Windeffekte auf den Fußgängerbereich untersucht. Aus hochaufgelösten Zeitreihen der lokalen Windgeschwindigkeit können Böenhäufigkeiten und -intensitäten eines Standortes abgeschätzt und in Superposition mit windklimatischen Bedingungen die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Gefährdung bestimmt werden. Für vertiefte Informationen zu verschiedenen Komfortkriterien und deren Bestimmungsgrenzwerten sei u.a. auf die Vergleichsstudie von Koss (2006) verwiesen.

Der Einfluss urbaner Gebiete besteht nicht nur in einer aerodynamisch veränderten Rauigkeit. Aufgrund der Versiegelung der Oberflächen kann in Stadtgebieten weniger Feuchtigkeit verdunsten, da auftretender Niederschlag direkt abgeführt wird. Weiterhin besitzen die versiegelten Oberflächen eine im Vergleich zu den unversiegelten Flächen erhöhte Albedo, welche einen höheren Bodenwärmestrom erzeugt. In Straßenschluchten entsteht aufgrund der Bauwerksgeometrie eine vergrößerte wirksame Oberfläche, welche je nach Art der verwendeten Materialien in variierender Intensität kurzwellige Strahlung absorbiert bzw. reflektiert. Die Bauwerksmaterialien besitzen unterschiedliche Wärmekapazitäten und -leitfähigkeiten, erhöhen jedoch durch die Absorption kurzwelliger Strahlung die Wärmespeicherung innerhalb der Bausubstanz. Durch die Horizonteinengung in Straßenzügen reduziert sich zudem die effektive langwellige Emission. Verbrennungsprozesse und das gestiegene Verkehrsaufkommen in Siedlungsgebieten erhöhen die anthropogene Wärmeproduktion, weiterhin führt die verstärkte Luftverunreinigung zu wachsender atmosphärischer Gegenstrahlung (Treibhauseffekt). Da das Winddargebot innerhalb der UCL verringert ist, reduziert sich auch der turbulente Wärme- bzw. Abwärmetransport (vgl. u.a. Oke (1982), Matzarakis (2001), Hupfer et al. (2006)).

Bedingt durch die urbanen Modifikationen kann sich in Abhängigkeit von der Wetterlage eine sog. städtische Wärmeinsel (engl.: urban heat island, UHI⁷), eine Erhöhung der Lufttemperatur in städtischen Gebieten gegenüber dem Umland, ausbilden. Die größte Intensität der UHI tritt bei Schwachwindlagen in klaren Sommernächten auf (Oke, 1982). Durch die Wärmespeicherung der städtischen Bauwerke verzögert sich die urbane Abkühlung. Bedingt durch den reduzierten Abwärmetransport bildet sich ein Temperaturgradient Innenstadt- Umland aus. Meteorologische Größen wie der Bedeckungsgrad (direkter Einfluss auf die Strahlungsbilanz) und die Windgeschwindigkeit (Durchlüftung des Stadtgebietes) üben entsprechend einen bedeutsamen Einfluss auf die Ausbildung einer UHI aus. Für eine detaillierte Literaturübersicht zu diesem Themengebiet sei auf die Arbeiten von Arnfield (2003) und Matzarakis (2001) verwiesen.

2.3 Charakterisierung von Stadtstrukturen

Städtische Strukturen lassen sich vielfältig charakterisieren, je nach Größe des Betrachtungsraumes können und müssen verschiedenartige beschreibende Parameter gewählt werden. Britter und Hanna (2003) klassifizierten vier typische horizontale Ausdehnungen für stadtklimatische Untersuchungsgebiete, basierend auf verschiedenen klimatischen Fokussen der Untersuchungen. Nachfolgend sollen einige Kennwerte der vier von Britter und Hanna definierten räumlichen Ausdehnungen vorgestellt werden, sodass für Kap. 2.5 ein Verständnis der Betrachtungsgröße der verschiedenen stadtklimatischen Untersuchungen sowie für eine Einordnung in räumliche und zeitliche Längenmaße geschaffen wird.

Straßenzug-Ebene (Street scale, Ausdehnung ~ (1-2) *10² m)

In stadtklimatischen Untersuchungen dieser Ebene wird zur Beschreibung der lokalen Struktur eines urbanen Raumes die Horizontüberhöhung (sky view factor, SVF) als Maßzahl verwendet (vgl. u.a. Matzarakis (2001), Kuttler (2009)). Definiert ist der SVF als das Verhältnis der sichtbaren Himmelsfläche gegen das Sichtfeld einer nicht eingeschränkten Hemisphäre. Der SVF ist also eine lokale Größe und variiert mit den Gebäudeabmaßen in einer Straßenschlucht und den Abständen zwischen den Häusern (Abb. 2-5).

Oke (1992) schlägt vor, ähnlich des SVF, das Verhältnis der Gebäudehöhe zur Straßenbreite (H/W) als Bestimmungsmaß zu verwenden, da aus dem Höhen-Breiten-Verhältnis der SVF (Gl. 2-6) generiert werden kann sowie dieser Verhältniswert mit der Strahlungsbilanz in Straßenzügen korreliert (Gleichung 2-7, vgl. Oke, 1982).

⁷ Vertiefenden Informationen zur UHI: siehe Anhang B - Exkurs: Urban Heat Island.



Abb. 2-5: Schematische Darstellung des SVF, nach Oke (1992).

$$SVF = \psi_s = \cos\left[tan - 1 \cdot \left(\frac{2 \cdot H}{W}\right)\right]$$
 (GI. 2-6)

$$Q_t = 2 \cdot Q_w \cdot \left(\frac{H}{W}\right) + Q_f \tag{GI. 2-7}$$

mit:

H:	mittlere Gebäudehöhe	[m]
W:	Straßenbreite	[m]
Qw:	Strahlungsbilanz Hauswand (wall)	[W]
Qf:	Strahlungsbilanz Boden (floor)	[W]
Qt:	Strahlungsbilanz Grenze UBL-UCL	[W]

Studien in dieser Größenausdehnung untersuchen meist lokale Strömungs- und Ausbreitungsmuster, wie bspw. den Austausch an der Grenze UBL-UCL oder das Strömungsmuster bei verschiedenen H/W-Verhältnissen eines Straßenzuges, das Strömungsverhalten im Nachlauf von Gebäuden oder dessen lokale Wirbelablösungen. In Modellgebieten dieser Größe können Windkomfort- und Ausbreitungsuntersuchungen durchgeführt und somit die mechanische und toxikologische Gefährdung der Personen im Fußgängerbereich untersucht bzw. bewertet werden.

Quartiers-Ebene (Neighborhood scale, Ausdehnung ~ (1-2) *10³ m)

Innerhalb der Quartiers-Ebene kann eine Beschreibung der urbanen Struktur anhand der dominanten geometrischen Eigenschaften des Betrachtungsraumes erfolgen. So können bspw. Bebauungsdichten in Oberflächennutzungs-Verhältnissen beschrieben werden, Wohndichte in urbanen Gebieten als Geschoss-Flächen-Verhältnisse (Cheng, 2009), das Verhältnis der Gebäudefläche zur Grundstücksgröße (λ_p), der Frontflächenindex (λ_f) oder die volumenbezogene Packungsdichte (λ_c) (vgl. u.a. Grimmond und Oke (1999), Schulz (2008)) zur Charakterisierung verwendet werden. Eine Stadtraumtypenbeschreibung kann weiterhin u.a. auf Basis des Alters, der Energetik oder der Materialeigenschaften der Bebauungsstruktur erfolgen.

Innerhalb der Modellgebiete dieser Größe können Untersuchungen zu dem bodennahen Windkomfort und dem Ausbreitungsverhalten von Schadstoffen sowie Studien des Ventilationsverhaltens eines Stadtquartiers durchgeführt werden.

Stadt-Ebene (City scale, Ausdehnung ~ (1-2) *10⁴ m)

In mesoskaligen Untersuchungen dieser wie der höheren räumlichen Ausdehnungklasse (**Regional-Ebene**) sind die lokalen Effekte einzelner Gebäude oder Gebäudegruppen vernachlässigbar gering. Die urbane Struktur wird von dem Strömungsfeld als Änderung der Oberflächenrauigkeit sowie der thermodynamischen Eigenschaften wahrgenommen. Für (meteorologische) Untersuchungen werden urbane Flächen aufgrund dessen in verschiedene Klimatope klassifiziert. Ein Klimatop kennzeichnet Flächen mit relativ homogenen (mikro-) klimatischen Ausprägungen. Einfluss auf diese Ausprägungen üben bspw. das Geländerelief, die Flächennutzungsart, die Oberflächenrauigkeit oder der thermischen Tagesgang aus. Eine Klassifizierung des VDI (1997) charakterisiert 10 verschiedene Klimatope (davon 5 städtische).

Grimmond und Oke (1999) identifizierten auf der Basis von meteorologischen Messungen (bzw. der z₀-Verschiebung der Windprofile) sowie Bebauungscharak-teristiken im nahen Umfeld der betrachteten Messpositionen 4 urbane Klimatope. Basierend auf den Überlegungen von Grimmond und Oke erfolgte eine Erweiterung der von Davenport vorgeschlagenen Oberflächenrauigkeitsklassen (Wieringa et al., 2001) auf insgesamt 8, davon 3 urbane Klassen. Oke (2004) klassifizierte zur Beschreibung von Standorten innerhalb der urbanen Bebauungsstruktur 7 Klima-zonen, für vertiefende klimatologische Analysen ergänzten Steward und Oke (2012) diese um Landbedeckungstypen und deren Eigenschaften.

In dieser Größenordnung erfolgen Untersuchungen zu den aufgrund der urbanen Struktur modifizierten thermischen und hygroskopischen Eigenschaften des Stadtklimas. Ebenfalls können das Windfeld sowie die Ventilations- und Ausbreitungsvorgänge in den urbanen Raum hinein analysiert werden.

Regional-Ebene (Regional scale, Ausdehnung ~ (1-2) *10⁵ m)

In der regionalen Ebene erfolgen meist Studien zu den Auswirkungen einer städtischen Wärmeinsel oder hinsichtlich der Anpassungsmaßnahmen diese sowie Untersuchungen der städtischen Wärme- und/oder der städtischen Abluftfahne. Ebenfalls erfolgen synoptische Untersuchungen unter Berücksichtigung veränderter Energiebilanzen von Oberflächen.

2.4 Stadtklima und Anpassungsmöglichkeiten

Der Fachausschuss Biometeorologie der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft definierte in einem Workshop (1988) das **ideale Stadtklima** als einen räumlich und zeitlich variablen Zustand der Atmosphäre in urbanen Bereichen, in dem sich möglichst keine anthropogen erzeugten Schadstoffe in der Luft befinden. Den Stadtbewohnern soll in Gehnähe (charakteristische Länge: 150 m) eine Vielfalt an Atmosphärenzuständen unter der Vermeidung von Extremen geboten werden (Mayer, 1989). In Matzarakis (2001) wird diese Definition um ein **maßgebliches Zeitintervall** (charakteristische Zeit: ca. 5 Minuten) ergänzt. Der Fachausschuss Biometeorologie sprach Empfehlungen an Stadtplaner aus, wie z.B. ein Nichtverschlechterungsgebot des aktuellen Stadtklimazustandes und ein Vorsorgeprinzip, um sich dem definierten Ideal mit einem mindestens "tolerablen Stadtklima" zu nähern (Mayer, 1989).

Das innerstädtische Klima erfährt meist eine Zweiteilung⁸ in eine "thermische" und eine "lufthygienische" Komponente. Diese Einteilung folgt der Definition der Arbeitsgruppe Human-Biometeorologie des VDI (2008).

Der "**thermische Wirkungskomplex**" beinhaltet die urbane Energetik, also kurz- und langwellige Strahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit.

Der "**lufthygienische Wirkungskomplex**" behandelt die urbane Luftqualität, entsprechend Emission, Transmission und Immission von Luftbeimengungen.

Obwohl das urbane Windfeld als Bestandteil der ersten beiden Wirkungskomplexe (Windgeschwindigkeit im ersten Komplex, turbulenter Luftaustausch und Windverhältnisse im zweiten Komplex) genannt wird, finden sich in der Literatur kaum windtechnologische Anpassungsstrategien an thermisches Unbehagen. Zur Bewertung der Auswirkungen von Starkwindwetterlagen und daraus resultierende mechanischen Gefährdung bzw. Beeinträchtigung des Menschen existieren verschiedenartige Windkomfortkriterien (vgl. Koss, 2006).

Eine Bewertung des thermischen Empfindens kann bspw. anhand der modifizierten Komfortgleichung nach Fanger (1982) erfolgen. Aus der Behaglichkeitsgleichung, basierend auf der Energiebilanz des menschlichen Körpers, kann ein Wert des thermischen Empfindens berechnet (PMV, Predicted Mean Vote) werden. Durch Kopplung von kurz- und langwelligen Strahlungsströmen in dem "Klima-Michel-Modell" (Jendritzky, 1990) kann unter der Berücksichtigung der individuellen Aktivität sowie der atmosphärischen Randbedingungen das thermische Empfinden eines idealisierten Durchschnittsmenschen im urbanen Raum bestimmt werden. Diese Methodik sei nur beispielhaft als eine Bewertungsmöglichkeit genannt. Für vertiefende Informationen zu thermischen Bewertungsmethoden sei auf u.a. Helbig et al. (1999) und VDI (2008) verwiesen.

Der modifizierten Bilanzgleichung nach Fanger (1982) kann entnommen werden, dass sowohl mikro- und makrometeorologische Parameter Einfluss auf das individuelle thermische Empfinden haben. Neben einer Modifikation der Albedo der Umgebungsoberflächen sowie veränderten Vegetationsbedingungen kann aus einer Anpassung der bodennahen Windverhältnisse eine Verbesserung der thermischen Behaglichkeit erfolgen.

Die VDI-Richtlinie diskutiert im Rahmen einer Wärmebilanzbetrachtung des menschlichen Körpers⁹ eine mögliche Anpassungsstrategie an thermisches Unbehagen:

⁸ Ein dritter Wirkungskomplex ("aktinisch") umfasst den sichtbaren und ultravioletten Anteil der Strahlung, welche über die thermische Wirkung hinausgehen und sich biologisch positiv oder negativ auf den Organismus auswirken.

⁹ Siehe auch: Anhang B - Wärmebilanz des menschlichen Körpers.

"Die Stärke des Energieaustauschs hängt grundsätzlich von einer Größe ab, d.h. von der Differenz zwischen den Werten der Oberfläche des Menschen und in der Atmosphäre. Die turbulenten Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme werden darüber hinaus von der Windgeschwindigkeit gesteuert. Bei geringen Windgeschwindigkeiten haben kleine Änderungen relativ große Wirkungen im Wärmehaushalt, mit zunehmender Windgeschwindigkeit dagegen wesentlich kleinere. Zum Beispiel können schon geringe Verbesserungen der Durchlüftungsverhältnisse dicht besiedelter Gebiete zu einer deutlichen Verringerung der Wärmebelastung [Anmerkung: ...auf den menschlichen Körper...] führen." (VDI, 2008).

Ali-Touderts (2005) Studien bestätigen diese Schlussfolgerung. Sowohl numerisch als auch in Feldexperimenten untersuchte Ali-Toudert die thermische Komfortsituation in Straßenzügen anhand des biometeorologischen Kennwertes PET¹⁰. Diese Studien bestätigen die starke Abhängigkeit der Komfortsituation von der vorhandenen Windgeschwindigkeit. In numerischen Untersuchungen konnte durch eine Maximierung der bodennahen Windgeschwindigkeit eine Förderung des Austauschs belasteter Luftmassen und eine Erhöhung des thermischen Wohlbefindens festgestellt werden.

2.5 Bestimmung der Ventilation urbaner Gebiete

In stadtplanerischen Untersuchungen können Ventilationswege im Stadtraum aufgezeigt sowie Maßnahmen zur Verbesserung des Abtransports von belasteter Luft oder zur Minimierung der Luftbelastung (thermisch oder durch Abgase) durch Vergleichsuntersuchungen analysiert werden. Nachfolgend sollen einige Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der Ventilationswege sowie Ansätze für Vergleichsstudien vorgestellt werden.

Die Problematik der Durchlüftung von Stadtgebieten wurde in der deutschsprachigen Literatur erstmals im Kontext der Stadt Stuttgart diskutiert. In dem daraus resultierenden Regelwerk für Stadtplaner (Baumüller (1998), Neuauflage: Reuter (2012)) wird die Bedeutung von **Kaltluftabflüssen** und **Luftleitbahnen** für die Ventilation von Stadtgebieten diskutiert.

Kaltluftabflüsse entstehen bei autochthonen¹¹ oder Schwachwindlagen¹² aufgrund stärkerer Abkühlung bodennaher Luftschichten über naturbelassenen Flächen (Wäldern und Wiesen) gegenüber der geringeren Abkühlung über bebauten Flächen. Eine Voraussetzung zur Ausbildung von Kaltluftabflüssen ist das Vorhandensein eines orographisch gegliederten Geländes. Angetrieben von Dichteunterschieden entsteht schon bei geringen Geländeneigungen (> 1 Grad) ein Kaltluftabfluss (Reuter, 2012).

¹⁰ Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) nach Höppe (1984).

¹¹ Autochthone Wetterlagen (austauscharme Strahlungswetterlage): Wetterlage mit geringer Bedeckung sowie eingeschränkten Austauschverhältnissen sowohl in der Horizontalen (geringe Windgeschwindigkeiten) als auch in der Vertikalen (bedingt durch eine Bodeninversion). Durch lokale Temperaturunterschiede entstehen Ausgleichsströmungen, bei negativer Strahlungsbilanz bilden sich Strahlungsinversionen (Definition aus VDI, 2004).

¹² Maximale geostrophische Windgeschwindigkeit f
ür die Ausbildung von Kaltluftströmen: < 3 m/s (VDI, 2009).</p>

Luftleitbahnen sind zusammenhängende Schneisen in den urbanen Raum mit niedriger aerodynamischer Rauigkeit. Die Effizienz der Luftbahnen wird stark von deren Abmaßen und evtl. vorhandenen Einschnürungen geprägt. Beispiele für Luftleitbahnen sind zusammenhängende Grünzüge im Stadtgebiet, Freiflächen oder Verkehrswege (Mayer et al., 1994).

Vergleichbare Überlegungen wurden für das "Air Ventilation Assessment System" (AVAS) der Metropole Hongkong (Ng, 2009) getätigt. Neben der Wirkung der Stadtrandbebauung auf den Luftaustausch wird in dieser Planungsempfehlung die Berücksichtigung des Einflusses der lokalen Gebäudestrukturen (vgl. Gandemer, 1978) sowie die Wirkung der Orientierung von Stadtraumtypen (vgl. Helbig et al., 1999) auf das urbane Durchlüftungsverhalten berücksichtigt. Vertikale Ventilationsbahnen und somit eine Präferenz der Heterogenität der Gebäudehöhen ergänzen diesen stadtplanerischen Ansatz.

Die Bedeutung der Ventilationsbahnen für die Stadtdurchlüftung ist umstritten, da zum einen die effektivste Ventilationswirkung in Stadtrandlagen auftritt, zum anderen ein Eintrag von Schadstoffen in das Stadtgebiet nicht ausgeschlossen werden kann (Mayer und Matzarakis, 2003). Eine Differenzierung zwischen belasteten und unbelasteten Luftbahnen muss bei dieser Betrachtungsweise erfolgen.

In der Praxis haben sich einige nachfolgend zu skizzierende Verfahren zur Bestimmung der Ventilation bzw. der Luftleitbahnen eines Untersuchungsgebiets etabliert:

In Feldexperimenten zur Bestimmung der Ventilationsbahnen werden im lokalen Maßstab Tracerexperimente mit Spurengasen durchgeführt um Kaltluftströme und deren Bahnen zu erfassen. Bei Einsatz von chemischen Tracern werden auftretende Konzentrationen an verschiedenen Messpositionen im Untersuchungsgebiet kontinuierlich oder diskontinuierlich aufgezeichnet, das bodennahe Windfeld wird während dieser Untersuchungen an temporären oder festinstallierten Messstellen gemessen. Da im urbanen Raum ein sehr heterogenes Strömungsbild existiert, übt die Wahl des Messortes (Innenhof, Straßenzug, Freifläche) sowie die Positionierung der Messgeräte innerhalb dieses Untersuchungsraums direkten Einfluss auf die Messergebnisse aus (vgl. Oke (2007), Peeck (2011), Kuttler und Dütemeyer (2003)). Beeinflussend auf die Repräsentativität der Untersuchungsergebnisse wirkt sich ebenfalls die Dauer der Messungen aus. Rix (2007) analysierte Strömungs- und Konzentrationszeitserien aus Windkanalversuchen im urbanen Umfeld zur Bestimmung charakteristischer Mittelungsintervalle. Ihrer Studie zufolge unterliegen Messzeiträume < 30 min. starken Einschränkungen hinsichtlich ihrer statistischen Repräsentativität. Bei Feldmessungen werden meist an wenigen ausgewählten Messpositionen Daten über einen kurzen Zeitraum erhoben, zur Verbesserung der geringen zeitlichen Repräsentativität der Messungen können mehrere Wiederholungsversuche durchgeführt werden.

Bei Untersuchungen des Temperaturverlaufs kann für Dauerversuche ein Messstellennetz von Thermometern zur Bestimmung der Kaltlufthäufigkeit und -intensität verwendet werden, bei kürzeren Untersuchungszeiträumen wird ein horizontales Temperaturprofil durch Messfahrten mit mobilem Equipment erfasst (vgl. VDI (2009), Kuttler und Dütemeyer (2003)). Feldmessungen zur Bestimmung der Ventilationseigenschaften werden meist bei autochthonen Wetterlagen durchgeführt. Diese austauscharmen Wetterlagen sind durch geringe oberflächennahe Windgeschwindigkeiten geprägt. Geringe Windgeschwindigkeiten können unterschiedlich interpretiert werden, eine Orientierung gibt [3] nach der Beaufort-Skala: Windstille: < 0.2 m/s, schwacher Wind: 0.3 – 1.5 m/s.



Abb. 2-6: (a) Ausschnitt der Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit in 10m Höhe am Standort Billwerder (links), (b) Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Windrichtung in 10 m Höhe (rechts). Die Windgeschwindigkeitsklassifizierung erfolgt gemäß der verwendete Farbskala in Abb. 2-6 a. Ein möglicher Störeinfluss des Messmastes ist in der Windrosendarstellung grau hinterlegt.

Als Vergleichsmöglichkeit ist Abb. 2-6 a für den Standort Billwerder (in 10 m Höhe) ein Ausschnitt der absoluten Auftretenshäufigkeit der Windgeschwindigkeiten mit Fokus auf geringe Windgeschwindigkeiten dargestellt, die Klassenbreite der Verteilung beträgt 0.5 m/s; Abb. 2-6 b zeigt die Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der auftretenden Windrichtung.

Ersichtlich wird aus Abb. 2-6, dass geringe Windgeschwindigkeiten (< 1.5 m/s) nur selten auftreten und somit lediglich eine geringe Aussagekraft über die tatsächlichen Wind- und Ventilationsverhältnisse im Stadtraum Hamburgs besitzen. Weiterhin muss, neben der Dauer bis zur Ausbildung von Kaltluftschichten, der ggf. dominante Einfluss der Land-Seewind-Zirkulation (überwiegend von der Ostsee) auf die Wind-verhältnisse innerhalb des Stadtgebiets Hamburgs bei Schwachwindwetterlagen (Rosenhagen et al., 2011) berücksichtigt werden.

Eine Untersuchungsmethode zur Bestimmung der Ventilation mittels **numerischer Studien** ist die Simulation des Kaltluftabflussstromes. Bei Kenntnis der Topographie können mit Strömungsmodellen oder GIS-Kartierungen Kaltluftentstehungsgebiete ermittelt und deren Bahnen in den urbanen Raum prognostiziert werden.

Durch Simulation der Strömungszustände bei austauscharmen Strahlungswetterlagen mit nicht-hydrostatischen Modellen können im Modellgebiet die Luftbewegun-gen sowie beschreibende Kennwerte innerhalb dieser Volumenströme bestimmt werden. Durch Simulation können bspw. Kaltluftproduktionsraten über Freiflächen mit niedriger Vegetationsdecke und daraus resultierende Luftaustauschraten im Modellgebiet, human-biologische Kenngrößen (PET, PMV) oder ein möglicher Einfluss von Bauvorhaben auf den Luftaustausch berechnet werden. (vgl. Groß und Etling (2003), VDI (2008), VDI (2009)).

Schlünzen et al. (2012) untersuchten die Kaltluftabflüsse am Beispiel des Stadtgebiets Hamburgs mit 250 m horizontaler Auflösung¹³. In dieser Studie konnte unter günstigsten Bedingungen¹⁴ aufgrund der geringen orographischen Ausprägungen im Stadtgebiet kaum Kaltlufttransport beobachtet werden.

Die Bestimmung der Luftleitbahnen in Stadtgebieten kann ebenfalls anhand der urbanen Geometrie erfolgen. Über die Bildung des Frontflächenverhältnisses der Bebauung (vgl. Wong et al., 2010) oder über die Erstellung von hochaufgelösten räumlichen Kartierungen der Oberflächenrauigkeit (bestimmt aus deren Nutzungstypen oder der Bebauung) können sowohl Footprint-Analysen einzelner Standorte als auch Ventilationsbahnen bestimmt werden (vgl. Gál und Unger, 2009). Unter Verwendung von Topographie, Landnutzungsklassen bzw. Klimatopenkartierungen¹⁵ sowie meteorologischer Randbedingungen lassen sich Klimafunktionskarten erstellen, auf deren Basis Ventilationswege sowie klimatologisch relevante Funktionsräume im Stadtraum qualitativ bestimmt werden können (Katzschner (2009), Ren et al. (2011)).

Ein Kritikpunkt der Untersuchungsmethodik stellt die Stationarität der Strömungsphänomene der numerischen Modelle dar. Als Indikator der Ventilation werden Mittelwerte der Strömungs- und Konzentrationsmessungen bzw. ein daraus berechneter Luftaustauschquotient verwendet. Bei Messungen innerhalb einer urbanen Struktur stellt ein Mittelwert keine repräsentative Größe dar, denn bedingt durch die Gebäudestruktur und die Flächennutzungen wird dem Windfeld eine erhöhte Böigkeit aufgeprägt (vgl. u.a. Gandemer (1978), VDI (2008)). Bei der Betrachtung des urbanen Raumes hinsichtlich der Kriterien des idealen Stadtklimas (Zeitmaßstab: 5 min., vgl. Kap. 2.4)

¹³ Für stadtklimatische Untersuchungen mit Modellgebieten in Stadtgebietsgröße werden mesoskalige Modelle mit einer minimalen Gitterweitenauflösung in Dekametergröße verwendet. In einer aktuellen Stadtklimastudie der Stadt Hamburg (Groß und Funk, 2012) wird bspw. mit einer Gitterweite von 50 m gerechnet.

¹⁴ Tropennacht, großräumig schwachwindig. Mittlere Auftretenshäufigkeit pro Jahr: < 1 %.

¹⁵ Für stadtplanerische und mesoskalige numerische Untersuchungen werden urbane Flächen in verschiedene Klimatope klassifiziert. Ein Klimatop kennzeichnet Flächen mit relativ homogenen (mikro-) klimatischen Ausprägungen. Einfluss auf diese Ausprägungen üben bspw. das Geländerelief, die Flächennutzungsart, die Oberflächenrauigkeit oder der thermischen Tagesgang aus.

stellen kurzzeitige Einwirkungen wie die Böigkeit des Windes oder auftre-tende Intermittenzstrukturen bedeutende Einflussfaktoren auf die Ventilation dar.

In **Windkanalstudien** können Untersuchungen auf der mikroskaligen Ebene durchgeführt werden. In Grenzschichtwindkanälen werden meist neutrale Schichtungsverhältnisse modelliert, thermisch bedingte Luftbewegungen werden in diesen Studien nicht abgebildet. Durchgeführte Ventilationsstudien basieren auf der Analyse des bodennahen Windfelds oder auf dem Ausbreitungsverhalten von Tracern.

Kubota et al. (2008) nutzen das bodennahe Windfeld zur Bestimmung einer Abhängigkeit zwischen verschiedenartigen Bebauungsdichten und variablen Gebäudehöhen und der Komfortsituation bzw. der Durchlüftung. In idealisierten Stadtstrukturen wurde das räumlich hochaufgelöste Geschwindigkeitsfeld mit einer ungestörten bodennahen Messposition referenziert und dessen räumliches Mittel als Bewertungs-kriterium der Ventilation verwendet.

Ein ähnlicher experimenteller Ansatz wird von Ng (2009) am Beispiel der Stadt Hongkong beschrieben. Zur Verbesserung der Ventilation im Stadtraum soll mit dem AVAS¹⁶ in Detailstudien der Einfluss von Neubauvorhaben auf das lokale Windklima untersucht werden. Zur Bestimmung der bodennahen Ventilationseigenschaften wird das Verhältnis der Windgeschwindigkeit in 2 mfs über Grund gegenüber einer Referenz in der freien Anströmung über dem Stadtgebiet gewählt. Auswirkungen unterschiedlicher Ausprägungen der Gebäudegeometrie auf den räumlichen Mittelwert des bodennahen Windfelds sollen in Vergleichsstudien systematisch erfasst werden. Bauliche Konfigurationen, die zu einer Erhöhung der Geschwindigkeit des mittleren Windfelds beitragen, sollen in der nachfolgenden Planung bevorzugt werden¹⁷. Neben den experimentellen Untersuchungen zur Auswirkung auf das lokale Windfeld sind im AVAS allgemeingültige Planungshinweise zur Aufrechterhaltung bzw. Verbesserung der Durchlüftung festgehalten, welche die Überlegungen von Gandemer (1978) sowie der Städtebaulichen Klimafibel (Baumüller, 1998) in den Kontext einer Metropole übertragen. Das Regelwerk sieht keine Untersuchungen hinsichtlich der baulichen Auswirkungen auf den Komfort auf Fußgängerniveau vor (Ng, 2009).

Letzel et al. (2012) merken bei der Anwendung des von Ng für Windkanaluntersuchungen entwickelten Bewertungsverfahrens mit einem LES-Modell (Large Eddy Simulation; numerische, wirbelauflösende Simulation) an, dass innerhalb des Regelwerks keine Standards für repräsentative Messorte definiert wurden und somit keine eindeutige Übertragbarkeit auf andere Modellgebiete bestehe.

Plehn (2014) merkt an, dass eine Bestimmung der Ventilationseigenschaften auf Basis mittlerer Windgeschwindigkeiten bzw. deren räumlicher Mittelwert nur eine eingeschränkte Aussagekraft besitze. Für Ventilationsanalysen schlägt Plehn das

¹⁶ AVAS: Air Ventilation Assessment System.

¹⁷ In Kap. 2.4 wurde der direkte Zusammenhang zwischen dem thermischen Wohlbefinden und der bodennahen Windgeschwindigkeit skizziert. Als Folgerung aus diesem Zusammenhang kann u.a. in der Erhöhung des bodennahen Windfelds eine Verbesserung der Ventilation angesehen werden.

10. Perzentil einer Häufigkeitsverteilung der horizontalen Windgeschwindigkeiten als Indikator der Ventilation vor.

Plehn et al. (2013) entwickelten einen vertieften Ansatz zur Bestimmung der Ventilationseigenschaften eines Stadtgebietes anhand der horizontalen Windgeschwindigkeit in Bodennähe. Entgegen den vorgestellten, auf Mittelwerten basierenden Methoden, wird das Integral einer Zeitserie des horizontalen Windfeldes betrachtet und somit ebenfalls die Schwankungsanteile sowie mögliche Intermittenzeffekte berücksichtigt. Analog zu dosisbasierten Kriterien der Schadstoffausbreitungen (vgl. Harms et al., 2011) wird der Windeintrag an der betrachteten Messposition bestimmt ("Winddosis").

He et al. (2013) untersuchten in einem quantitativen Vergleich verschiedener experimenteller Methoden zur Bestimmung der urbanen Durchlüftung die Eignung von Partikelerosion zur Bestimmung der Ventilationsverhältnisse und zur Findung charakteristischer Messpositionen für nachfolgende Untersuchungen mit verschiedenen quantitativen Messmethoden (vgl. Letzel et al., 2012). Je nach Materialeigenschaft der Erosionspartikel können anhand der sich ausbildenden Erosionsmuster Zonen hohen Diskomforts durch mechanische Windeinwirkungen (vgl. Dezsö, 2006) oder, bei geringen Materialwichten, urbane Bereiche mit geringer Ventilationseigenschaften qualitativ ausgewiesen werden (He, 2014).

Aus o.g. Studien wird ersichtlich, dass die Mehrzahl der quantitativen Ventilationsuntersuchungen auf Mittelwerten der Strömungsgeschwindigkeit oder einer Indikatorkonzentration basieren. Fluktuationen oder Intermittenzeffekte, welche den Belüftungskomfort im Stadtraum beeinflussen, können bei der Betrachtung von mittleren Werten nicht berücksichtigt werden.

Die Intention der vorliegenden Arbeit besteht darin diese Lücken zu schließen. Im Rahmen dieser Studie sollen experimentelle Konzepte vorgestellt werden, anhand derer die Bandbreite der Ventilation im innerstädtischen Raum erfasst werden kann. In Windkanalversuchen soll ein Ansatz zur Bestimmung der urbanen Durchlüftungseigenschaften basierend auf der Instationarität des Windfeldes unter expliziter Berücksichtigung der inhomogenen urbanen Struktur und der transienten Struktur der Strömungs- und Austauschvorgänge entwickelt werden. Weiterhin sollen Kennzahlen der Ventilationseigenschaften diskutiert werden.

Unterschieden werden soll bei der Betrachtung zwischen der Ventilationseffizienz und dem Ventilationspotential innerhalb des urbanen Raums:

Ventilationseffizienz berücksichtigt sowohl den Eintrag als auch den Austrag eines Tracers in ein Betrachtungsvolumen. Als Ventilationseffizienz kann die tatsächliche Ventilationswirkung eines Raumes betrachtet werden. Zur Bestimmung der Ventilationseffizienz wird stromauf einer Messposition ein Tracer emittiert. Dessen Konzentration wird an einem Betrachtungsort innerhalb der urbanen Struktur detektiert. Durch diskontinuierliche Freisetzungen des Tracers kann das Ventilationsverhalten durch eine zeitlich hochaufgelöste Messung der Abklingkurve bestimmt werden.

Ventilationspotential beschreibt den Luftwechsel eines Ortes anhand des Austrags eines lokal freigesetzten Tracers aus dem Betrachtungsraum. Zur Messung des Ventilationspotentials wird im Betrachtungsvolumen oberflächennah ein Tracer kontinuierlich bzw. diskontinuierlich freigesetzt und dessen Konzentration bzw. nach dem Beenden der Emission dessen Abklingverhalten aufgezeichnet. Während bei der Ventilationseffizienz sowohl der Eintrag ins Betrachtungsvolumen als auch der Luftwechsel Schlüsselfaktoren der Ventilation darstellen, wird der Fokus während der Bestimmung des Ventilationspotentials auf den Luftwechsel im Betrachtungsvolumen gelegt.

In Kap. 4 werden mögliche experimentelle Untersuchungsmethoden basierend auf den vorgestellten Konzepten der Ventilationseffizienz und des Ventilationspotentials sowie deren Anwendungsmöglichkeiten im Grenzschichtwindkanal diskutiert.

3. Methodik des physikalischen Modells

Die Konzepte zur Bestimmung der urbanen Ventilationseigenschaften werden am physikalischen Modell unter naturähnlichen Anströmungsbedingungen getestet. Um die Übertragbarkeit der im Windkanal generierten Daten in den Naturmaßstab gewährleisten zu können, müssen neben der geometrischen Ähnlichkeit des Modells auch die strömungsphysikalischen Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschichtströmung in der Anströmung des Modellgebiets maßstabsgerecht modelliert werden. Zwei Strömungen gelten nur dann als physikalisch ähnlich, wenn bei gleichen Rand- und Startbedingungen die Kennzahlen der Strömung ein festes Verhältnis zueinander aufweisen. Diese beschreibenden Kennzahlen lassen sich aus der Dimensionsanalyse gewinnen. Unter Zuhilfenahme des Buckingham-П-Theorem können dimensionsbehaftete Größen als Potenzprodukt dimensionsloser Grundgrößen beschrieben werden. Diese Ähnlichkeitskenngrößen sind nicht mehr von dem gewählten Maßsystem abhängig (Truckenbrodt, 2008). Ein Beispiel einer solchen Ähnlichkeitskennzahl stellt bspw. die Reynolds-Zahl (vgl. Kap. 3.4.4) dar.

Dieses Kapitel soll einen Überblick über den im Rahmen dieser Untersuchungen verwendeten Grenzschichtkanal (Kap. 3.1) sowie das aerodynamische skalierte Stadtteilmodell (Kap. 3.2) geben. Neben der Vorstellung der verwendeten Messtechnik (Kap 3.3) und den Methoden der Qualitätssicherung der experimentellen Daten (Kap. 3.4) erfolgt eine Charak-terisierung der verwendeten Grenzschichtanströmung auf das Modellgebiet (Kap. 3.5).

3.1 Der Grenzschichtwindkanal WOTAN des Meteorologischen Instituts

Die Untersuchungen am Modell Hamburg-Wilhelmsburg wurden im Grenzschichtwindkanal "WOTAN" des Environmental Wind Tunnel Laboratory (EWTL) des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg durchgeführt (Abb. 3-1, Technische Zeichnung des Wind-kanals: Abb. 14-13). Der Grenzschichtwindkanal besitzt eine Gesamtlänge von 26 m, die für Modellaufbauten nutzbare Länge des Kanals beträgt 18 m. Weiterhin beträgt die Breite der Messstrecke des Windkanals 4 m, deren Höhe ca. 3 m. Um einen durch Versperrungseffekte auftretenden longitudinalen Druckgradienten entlang der Kanalmittelachse minimieren zu können, kann die Deckenhöhe des Grenzschichtwindkanals ± 0.25 m justiert werden. Zur Bestimmung des longitudinalen Druckgradienten sind je 11 Druckmessstellen paarweise mittig in einander gegenüberliegende Kanalseitenwände eingebracht. Durch einen Axiallüfter (Durchmesser: 3.15 m, 1) wird die Umgebungsluft in den Kanal gesaugt. Die Platzierung des Lüfters hinter dem Modellgebiet verhindert eine Beeinflussung des Lüfters auf die Strömung im Windkanal. Vor der Einlaufdüse des Windkanals befindet sich ein Gleichrichter (2), der die vorhandene vertikale und laterale Turbulenz der Strömung dämpft. Für die Modellierung einer Grenzschichtanströmung werden, um der Anströmung die benötigten Turbulenz-strukturen aufzuprägen, Rauigkeitselemente (3) und Wirbelgeneratoren (Spires, 4) verwen-det. Die Spires und die Bodenrauigkeiten können in Größe, Anzahl und Anordnung variiert werden, um die Eigenschaften der modellierten turbulenten Strömung präzise an die atmosphärische Zielgrenzschicht bzw. deren Parameter anzupassen.

Im Grenzschichtwindkanal WOTAN werden zur Modellierung der großräumigen Turbulenzstrukturen Wirbelgeneratoren nach Standen (1972) verwendet, in der Anlaufstrecke vor dem Stadtteilmodell dienen als Rauigkeitselemente L-förmige Winkel mit Magnetflächen zur individuellen Positionierung. Die Windgeschwindigkeit im Inneren des Windkanals lässt sich stufenlos bis ca. 20 m/s regeln, für die durchgeführten Untersuchungen wurden jedoch deutlich geringere Geschwindigkeiten gewählt (je nach Messmethodik zwischen 2 und 10 m/s). Der Grenzschichtwindkanal verfügt über zwei Drehscheiben, mittels welcher sich der Anströmwinkel des darauf befindlichen Modells variieren lässt. Diese wurden in diese Studie aufgrund der Größe des Stadtteilmodells nicht verwendet. Die Positionierung der Messgeräte innerhalb der Teststrecke erfolgt über ein computergesteuertes Traversiersystem (5). Die Messsonden können über diese millimetergenau (Toleranz: < 1 mm) in allen drei Raumachsen verfahren werden.

Als Koordinatenursprung der Referenzkoordinaten der Modellversuche wurde der Mittelpunkt der lüfterseitigen Drehscheibe gewählt. Die z-Achse ist von dem Kanalboden aufwärts positiv ausgerichtet, die x-Achse ist longitudinal positiv mit der Anströmrichtung ausgerichtet. Zusammen mit der y-Achse ergibt sich ein kartesisches Koordinatensystem.



Abb. 3-1: Skizze des großen Grenzschichtwindkanals (WOTAN) am EWTL.

In dem Grenzschichtwindkanal WOTAN werden Strömungsgrenzschichten mit neutralen Schichtungsverhältnissen generiert, thermische (Schichtungs-) Effekte können nicht berücksichtigt werden. Da in den Windkanaluntersuchungen ein mikroskaliges Modellgebiet betrachtet wird, kann der Einfluss der thermischen Turbulenz gegenüber der mechanischen vernachlässigt werden. Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung des Modellgebiets können mesoskalige Parameter wie bspw. der Corioliseinfluss ebenfalls vernachlässigt werden.

3.2 Das Windkanalmodell Hamburg-Wilhelmsburg

Für die Ventilationsstudien wurde ein Untersuchungsgebiet innerhalb des KLIMZUG-Nord Modellgebiets Hamburg-Wilhelmsburg ausgewählt. Das detaillierte Stadtteilmodell ist im Maßstab 1:350 realisiert und basiert auf 3D-CAD-Daten des Landesbetriebs Geoinformation und Vermessung der Stadt Hamburg. Das Modell Hamburg-Wilhelmsburg besitzt eine Grundfläche von 4 m_{ms} Breite (Naturmaßstab: 1400 m) und eine mittlere Länge von 8 m_{ms} (Naturmaßstab: 2800 m). Aufgrund der Größe des Windkanalmodells Hamburg-Wilhelms-burg

ist eine Anströmung auf das Modellgebiet in der Hauptströmungsrichtung der Stadt Hamburg gewählt, ein Teilmodell in Drehtellergröße zur Realisierung verschiedener Anströmrichtungen wurde nicht vorgesehen.

Das Stadtteilmodell berücksichtigt Geometrieelemente > 0.5 m_{fs} Höhe. Kleinere, aber für das städtische Windfeld bedeutsame Geometrieelemente der Gebäude wie Schornsteine, Erker, Giebel und Treppen wurden ebenfalls maßstabsgetreu eingebaut. Die städtische Bebauungsstruktur ist aus Styrodur gefertigt und verfügt somit über eine leicht angeraute Oberfläche. Neben der naturnahen Ausführung der Stadtgeometrie wurden im Untersuchungsgebiet Topographieelemente wie Anrampungen vor Brücken, die Hochtrasse der Wilhelmsburger Reichsstraße und der Elbdeich modelliert. Diese topographischen Elemente wurden aus Sperrholz-Elementen (Stärke: 1 mm_{ms}) in der Form der skalierten Höhenisolinien gefertigt. Basierend auf den Geodaten der Stadt Hamburg ist die Oberflächenstruktur der Elbinsel als aerodynamisch eben anzusehen (vgl. auch Groß und Funk, 2012), sodass als Modelluntergrund ebene Holzfaserplatten (MDF) verwendet werden können. In die Bodenplatten des Modells wurden an 6 Positionen Emissionsquellen mit einem Quelldurchmesser von 7 mm_{ms} (2.45 m_{fs}) plan eingelassen. Zur Unterbindung einer vertikalen Ausbreitung bei großen Freisetzungsraten eines Tracergases sind diese Quellen in einer Höhe von 3.5 mm_{ms} (1.225 m_{fs}) gedeckelt.

Um den Effekt der geplanten baulichen Veränderung im Stadtgebiet evaluieren zu können, wurde der sog. Winterfall betrachtet. Sowohl innerhalb des Stadtgebietes als auch in dem Parkgebiet in Anströmrichtung wurde auf die Modellierung von Stadtgrün verzichtet.

Die Güte des aerodynamischen Stadtteilmodells wird in Kapitel 3.4.5 diskutiert.

3.3 Messtechnik im Grenzschichtwindkanal

In den durchgeführten Windkanalstudien wurden sowohl Strömungs- als auch Konzentrationsmessungen durchgeführt. Die Funktionsprinzipien der verwendeten Messinstrumente soll nachfolgend kurz skizziert werden.

Die Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal erfolgte mit zwei Instrumenten.

Zur Bestimmung der mittleren Windgeschwindigkeit an einem Referenzpunkt wird ein **Prandtl-Rohr** verwendet. Dieses ist außerhalb der modellierten Grenzschichtströmung (ca. 2 m über Grund) auf gleicher Höhe der Spires positioniert. Mit einem Prandtl-Rohr wird sowohl der statische als auch der Staudruck der Strömung an dieser Position gemessen. Das Differenzdrucksignal des Prandtl-Rohres wird mit einem Differenzdruckwandler (MKS-Baratron - Typ 170M-26B) aufgezeichnet. Dieser Druckwandler wurde im Rahmen der Messkampagnen ein bis zweimal wöchentlich mit einer Feindruckprüfwaage der Fa. Junkalor Dessau kalibriert, wodurch eine Messungenauigkeit < 0.1 Pa sichergestellt werden kann. Das erfasste Signal des Differenzdruckwandlers wird durch einen A/D-Wandler (Daqbook2000, Fa. IOtech) digital zur weiteren rechnergestützten Verarbeitung umgewandelt.

Die Untersuchung der Strömungsgeschwindigkeit innerhalb der Prandtl-Schicht erfolgte mit einem 2D Laser Doppler Anemometer (LDA) der Fa. Dantec. Durch ein 2D-LDA werden berührungsfrei sowie mit hoher zeitlicher Auflösung (bis zu mehreren

kHz) die Geschwindigkeiten zweier Strömungskomponenten erfasst. Das LDA-System wird mit einem Argon-Ionen-Laser der Fa. Spectra- Physics (Modell 177-G0232) betrieben, eine faseroptische Sonde emittiert dessen kohärente Strahlen. In dem verwendeten System werden zwei Laser mit unterschiedlichen Wellenlängen verwendet (Wellenlängen: 488 nm und 514.5 nm).

Das Prinzip des LDAs basiert auf dem Doppler-Effekt: Die kohärenten Strahlen eines Lasers kreuzen sich in einem Messvolumen und erzeugen dort ein Interferenzmuster. Gemessen wird die Rückstreuung des Laserlichts anhand der Strömung zugesetzter Partikel. Um eine Richtungsabhängigkeit des Interferenzfeldes und somit die Strömungsrichtung der kreuzenden Partikel zu bestimmen, wird je einer der beiden Strahlen des Lasers mittels einer Bragg-Zelle phasenverschoben. Das durch die sich kreuzenden Laserlichtstrahlen aufgespannte Interferenzfeld ist aufgrund dieser Frequenzverschiebung nicht mehr stationär, die Richtung der Partikel kann anhand der Frequenzverschiebung eindeutig bestimmt werden. Das Messvolumen hat die Form eines Rotationsellipsoides, dessen Größe wird durch die verwendeten Sonden und deren Brennweite bestimmt (max. Ausdehnung des Messvolumens bei der gewählten Konfiguration: ca. 1 mm). Das von den Partikeln rückgestreute Licht wird von der Sonde aufgenommen und mittels des Photomultipliers zur weiteren Verarbeitung verstärkt. Die Signalauswertung des Lasersystems erfolgt durch eine Auswerteelektronik (BSA F70), zur Steuerung der Traverse und des Messvorgangs wird die BSA Flow-Software verwendet. Zur Einbringung der Streulichtpartikel in der Strömung wird mittels einer Nebelmaschine der Fa. Smoke Factory (Typ: Tour Hazer) ein Aerosolnebel mit geringer Partikelgröße erzeugt. Diese Nebelmaschine wird vor dem Gleichrichter außerhalb des Windkanals positioniert.

Zur Detektion einer Tracergaskonzentration im Modellgebiet werden zwei verschiedenartige Flammenionisationsdetektoren (FID) verwendet. Die lokale Konzentration im Untersuchungsgebiet wird mit einem Fast-FID bestimmt, die Detektion der Hintergrundkonzentration innerhalb des Windkanals erfolgt in der Anströmung auf das Modellgebiet mittels eines Standard-FIDs.

Unter Zuhilfenahme einer Vakuumpumpe wird konstant ein definiertes Volumen der Luft im Modellgebiet in die Brennkammer des FIDs gesaugt, in welcher ortsfest eine Diffusionsflamme zwischen zwei spannungsgeladenen Elektroden brennt (der Verbrennungsvorgang wird mit extern zugeführtem reinen Wasserstoff und Sauerstoff betrieben). Bei dem Verbrennungsvorgang von Ethan entsteht ein Ladungstransport des ionisierenden Wasserstoffanteils zur Kathode hin und damit einhergehend ein elektrisches Signal. Dessen Intensität ist direkt proportional zu der in der Probe enthaltenen Konzentration. Die Kalibrierung der FIDs erfolgt mittels geeichter Referenzgase. Die Messergebnisse der FIDs unterliegen äußeren Einflüssen wie Luftdruck- oder Temperaturschwankungen, es wird daher mehrfach täglich eine Kalibrierung der Geräte durchgeführt, um die Genauigkeit der Messergebnisse zu gewährleisten.

Die Brennkammer des **Fast-FID** der Fa. Cambustion Ltd. (HFR 400) ist an der Traverse montiert, somit kann innerhalb des Modellgebietes an verschiedenen Positionen die Konzentration gemessen werden. Das Fast-FID ist mit einer langen Kanüle (295 mm, Außendurchmesser: 0.78 mm, Innendurchmesser: 0.32 mm) ausgestattet, sodass die
Konzentrationsmessung annähernd störungsfrei im Modell-gebiet erfolgen kann. Aufgrund des Durchmessers und der Länge der Kanüle besteht ein zeitlicher Versatz der Konzentration von ca. 0.11 Sekunden. Die zeitliche Auf-lösung des Fast-FID in der verwendeten Konfiguration beträgt ca. 60 Hz.

Die Identifikation der Hintergrundkonzentration¹⁸ erfolgt mit einem **FID** der Fa. Rosemount Analytical (Typ: 400A). Eine Probe der Umgebungsluft wird im Anströmbereich des Modells, oberhalb der Quellposition im Modellgebiet, mittels eines 2500 mm langen Schlauches gezogen. Die zeitliche Auflösung des Standard-FID ist auf ca. 1 Hz begrenzt, ein Anstieg der Hintergrundkonzentration während einer Messkampagne kann jedoch hinreichend genau erfasst werden.

Zur Freisetzung von Tracergas im Untersuchungsgebiet werden Quellen mit Magnetventilen verwendet. Durch die Magnetventile kann Tracergas in definierten Intervallen mit präzise definierten Volumina freigesetzt werden. Bei geschlossenen Ventilen wird das Gas aus der Windkanalhalle geführt, erst bei geöffneter Kupplung des Ventils wird das Ethan über die Quelle freigesetzt. Dieser Bypass-Modus verhindert einen Druckaufbau bei geschlossener Zuführung und ermöglicht ein kontrolliertes, impulsarmes Emittieren des Tracergases.

3.4 Qualität der modellierten Grenzschichtströmung

Um eine korrekte Bewertung der erhobenen Datensätze der Strömung zu gewährleisten, werden im Folgenden die Randbedingungen der Windkanalversuche dokumentiert. Dieses erlaubt eine Bewertung der modellierten Grenzschichtströmung und der Qualität der Modellergebnisse.

3.4.1 Versperrungsgrad

Bei Versuchen in Grenzschichtwindkanälen muss die endliche Ausdehnung des Windkanals berücksichtigt werden. Ein großes Modell kann zu einer Verfälschung der Umströmungs-bzw. Überströmungseigenschaften führen. Durch einen im Vergleich zum Windkanalquerschnitt zu groß gewählten Modellmaßstab können Beschleunigungseffekte über dem Modell entstehen, welche die Ausbildung von konstanten Impulsflüssen, dem Definitionsmerkmal der Prandtl-Schicht, verhindert. Nach VDI (2000) soll bei geschlossener Messstrecke die maximale Versperrungsfläche des Modells 5 % des Messquerschnittes nach Möglichkeit nicht überschreiten (Gl. 3-1).

$$\Phi = \frac{A_{Modell}}{A_{Windkanal}} < 0.05 \tag{GI. 3-1}$$

¹⁸ Die Hintergrundkonzentration wurde während der Untersuchungen der Ventilationseffizienz (Kap. 5.1) zur Korrektur der lokal detektierten Konzentration gemessen.

Abb. 3-2 visualisiert das Versperrungsverhältnis des Stadtteilmodells im Windkanal. Das aerodynamische Modell ist maßstabsgetreu abgebildet, die Wände des Windkanals werden durch die Umrandung dargestellt. Das Traversiersystem ist, in grauer Färbung, maßstabsgetreu eingefügt. In dieser Abbildung ist die Umstrukturierung des Stadtteils im Zuge der internationalen Bauausstellung berücksichtigt. Deutlich zu erkennen ist die geringe vertikale Ausdehnung der Frontfläche des Modells bezüglich des Windkanalquerschnittes.

Nach Gleichung (Gl. 3-1)3-1 beträgt der Versperrungsgrad des Modells im Plan-Zustand Φ = 0.0328, das Modell im Ist-Zustand (vor der Umstrukturierung) besitzt einen leicht geringeren Versperrungsgrad mit Φ = 0.0316.

Das Kriterium nach VDI (2000) gilt aufgrund der geringen vertikalen Ausdehnung der angeströmten Stirnfläche des Modells als erfüllt.



Abb. 3-2: Versperrungsverhältnis des Windkanalmodells Hamburg-Wilhelmsburg (Blick in Strömungsrichtung). Die Umstrukturierung des Stadtteils im Rahmen der IBA ist berücksichtigt.

3.4.2 Druckgradient im Windkanal

Zur Vermeidung einer beschleunigten bzw. verzögerten Strömung im Windkanal aufgrund von Einengungen des Kanalquerschnittes kann die Deckenhöhe des Windkanals angepasst werden. Durch Justierung der Decke und damit einer Veränderung des durchströmten Volumens kann eine Druckäquivalenz entlang der longitudinalen Achse des Windkanals erzeugt werden. Als Nachweis dieser Äquivalenz wird die Ausbildung eines nahezu konstanten statischen Drucks angesehen, bzw. der dimensionslose Druckgradient zwischen den Messpositionen entlang der Windkanalachse. Dieser Gradient ist, nach VDI (2000), definiert als:

$$p^* = \frac{\frac{\partial p}{\partial x} \cdot \delta}{\frac{\rho}{2} \cdot u_{\delta}^2} \le 0.05$$
(Gl. 3-2)

mit:

δ	Höhe der modellierten Grenzschicht	[<i>m</i>]
u_{δ}	Referenzgeschwindigkeit am Grenzschichtrand	[m/s]
ρ	Dichte des Fluids	$[kg/m^2]$

Entlang der Windkanalachse existieren 22 Wanddruckmessstellen, an denen der statische Druck mittels eines Differenzdruckwandlers (Setra PT239) erfasst werden kann. Diese sind jeweils paarweise entlang beider Seitenwände in einem Abstand von 1.5 m zueinander angeordnet. In Abb. 3-3 sind die dimensionslosen Druckgradienten p* (nach Gleichung 3-2) entlang der Seitenwände des Windkanals über den Modellkoordinaten aufgetragen, der Koordinatennullpunkt ist der Mittelpunkt der lüfterseitigen Drehscheibe. Der grauhinterlegte Bereich kennzeichnet die Ausmaße des Modellgebiets Hamburg-Wilhelmsburg. Die Streubalken um die Messwerte kennzeichnen den durch Wiederholungsversuche bestimmten Unsicherheitsbereich der Differenzdruckmessungen. Die Höhe der modellierten Grenzschicht konnte auf $\delta_{min} = 0.5 \text{ m}_{ms}$ bestimmt werden. Der durch VDI (2000) vorgegebenen Richtwert von p* < 0.05 wird zu jedem Zeitpunkt eingehalten. Die größte Druckdifferenz tritt an der Position x: -9750 mm auf. In diesem Bereich kann die Deckenhöhe nicht an die Strömungsverhältnisse angeglichen werden.

Aufgrund der Längenausdehnung des Modellgebiets wird eine Anpassung der Deckenhöhe für verschiedene Traversenpositionen (vorderer und hinterer Modellbereich) vorgenommen. Bei einem ortsfesten Traversiersystem könnte eine Anpassung einen homogeneren longitudinalen Gradienten ohne die beiden Ausreißer in den jeweiligen Traversenpositionen erzeugen. Die Vorgaben des VDI können als erfüllt angesehen werden.



Abb. 3-3: Dimensionsloser Druckgradient längs der longitudinalen Windkanalachse.

3.4.3 Laterale Homogenität der Anströmung

Neben der korrekten Ausbildung des Druckgradienten muss auch die laterale Homogenität der Anströmung untersucht werden, da nicht nur ein Korridor in der Kanalmitte sondern ein breiter Bereich quer zur Hauptströmung untersucht werden soll. In Abb. 3-4 sind vier laterale Profilmessungen über dem Kerngebiet Hamburg-Wilhelmsburg dargestellt. In den Höhen 52.5, 70, 105 und 175 m_{fs} wurde die Windgeschwindigkeit in dem Bereich y: ± 350 m_{fs} um die Mittelachse des Windkanals erfasst. Für eine visuelle Vergleichbarkeit wurde in der Abbildung eine horizontale Linie durch den Schnittpunkt des mittigen Geschwindigkeitswerts gezogen. Die Streubalken an den Messwerten spiegeln die Reproduzierbarkeit der dimen-sionslosen Strömungsgeschwindigkeit mit einer Abweichung von < 0.03 [-] wieder (vgl. Kap. 3.4.7). Die tatsächliche Abweichung der Messwerte der Homogenitätstests unter-einander ist deutlich geringer als die Messunsicherheit der gesamten Messungen (vgl. Abb. 3-4). Lediglich in der untersten Höhenstufe (52.5 m_{fs} bzw. 150 mm_{ms}, Mittelwert dargestellt als gestrichelte Linie) besteht keine laterale Homogenität der Strömung mehr, da im boden-nahen Bereich die Strömung eine Beeinflussung durch die vorhandenen Stadtstrukturen sowie die Topographieelemente erfährt.



Abb. 3-4: Lateralprofile der Windgeschwindigkeit über dem Stadtgebiet Hamburg-Wilhelmsburg.

3.4.4 Reynoldszahl-Unabhängigkeit der Anströmung

Für eine Übertragbarkeit der gemessenen Daten in den Naturmaßstab muss sichergestellt sein, dass die Charakteristika der Strömung unabhängig von der Windgeschwindigkeit während der Untersuchungen sind, d.h. ein vollturbulenter Strömungszustand im Modell erreicht wird. Eine direkte Übertragung der Reynoldszahlen in den Modellversuch ist nicht möglich, da die im Windkanal modellierten Grenzschichten aufgrund der maßstäblichen Verkleinerung der Referenzlänge geringere Reynoldszahlen aufweisen als vergleichbare atmosphärische Strömungen. Nach einer Hypothese von Townsend (1965) können naturähnliche Strömungszustände im Grenzschichtwindkanal erzeugt werden (Konzept der Reynoldszahl- Unabhängigkeit). Nach dieser Hypothese sind Strömungen über gleichartigen (Oberflächen-) Rauigkeiten einander ähnlich, wenn eine bestimme Grenz-Reynoldszahl überschritten ist. Die Eigenschaften der Strömung sind in diesem Fall Geschwindigkeitsunabhängig. Da die kleinen Wirbelgrößen des turbulenten Spektrums hauptsächlich durch die Zähigkeit des Mediums beeinflusst werden, die größeren, niederfrequenten Strukturen jedoch kaum, erfolgt durch die Übertragung eine Kürzung des Frequenzbandes (Snyder (1981), nach Townsend).

Nach VDI (2000) wird für Bauwerksumströmungen mit scharfen Ablösekanten eine Reynoldszahl im Modell von $Re_M > 10.000$ als hinreichend groß angenommen. Dieses ist nur als ein Richtwert zu betrachten, auch bei geringeren (oder erst bei größeren) Reynoldszahlen kann sich eine unabhängige Strömung ausprägen.

Definiert ist die Reynoldszahl als das Verhältnis der Trägheitskraft eines Fluides zu dessen Zähigkeit (Gl. 3-3).

$$Re = \frac{\overline{u} \cdot L_{ref}}{v}$$
(Gl. 3-3)

mit:		
$ar{u}$	mittlere Geschwindigkeit in Bauwerkshöhe	[m/s]
L _{ref}	charakteristische Länge / Referenzlänge ¹⁹	[m]
υ	kinematische Viskosität des Fluids	$[m^{2}/s]$



Abb. 3-5: Test auf Reynoldszahlen-Unabhängigkeit der Strömung.

Im Rahmen dieser Arbeit werden das bodennahe Windfeld und die Spülzeit von Gasen bzw. die Ventilationswirkung eines urbanen Raumes in Abhängigkeit von der vorherrschenden Bauwerksgeometrie untersucht. Für hochaufgelöste Spülzeitanalysen werden, messtechnisch bedingt, geringe Windgeschwindigkeiten benötigt. Entsprechend sorgfältig müssen die Tests auf eine Reynoldszahlen-Unabhängigkeit der Strömung durchgeführt werden. Kritische Messpositionen wie in Rezirkulationsgebieten hinter Gebäuden, Straßenschluchten und umschlossenen Räume wie bspw. Innenhöfe werden ebenso wie die freie Anströmung betrachtet. Abb. 3-5 zeigt den Betrag des dimensionslosen Windvektors über der Referenzgeschwindigkeit, gemessen in 5 m Höhe (Naturmaßstab). Die Zeitserien der Positionen 2-5

¹⁹ Hier: mittlere Gebäudehöhe im Kernuntersuchungsgebiet, 15.71 m_{fs}.

wurden an kritischen Positionen innerhalb des Stadtgebiets erhoben, die Position 1 befindet sich in einer Freifläche in der Anströmung auf das Stadtteilmodell.

Als charakteristische Länge zur Berechnung der maßgebenden Reynoldszahlen wurde die mittlere Gebäudehöhe im Kernuntersuchungsgebiet gewählt. Innerhalb des suburbanen Stadtteilmodells beträgt die durchschnittliche Gebäudehöhe 15.71 m_{fs} (44.89 mm_{ms}). Aus dieser geringen vertikalen Ausdehnung resultieren geringe Reynoldszahlen, deren statistisches Verhalten sich geschwindigkeitsunabhängig ausprägt. Die ermittelte Unsicherheit der Geschwindigkeitsmessungen von < 0.03 [-] ist in Abb. 3-5 als Fehlerbalken an den Messwert angetragen. Als Ergebnis dieser Untersuchungen wurde für die Windkanalversuche eine Mindestreferenzgeschwindigkeit von 1.8 m/s gewählt.

3.4.5 Genauigkeit des Windkanalmodells

Das Stadtteilmodell Hamburg-Wilhelmsburg wurde auf Basis eines 3D-CAD Datensatzes des Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung der Stadt Hamburg gefertigt. Die zur Verfügung gestellten Gebäudegeometrien wurden im Rahmen von Überfliegungsmessungen des Stadtgebieten mit einer Grundgenauigkeit von < 1 m erhoben. Ein Schwachpunkt des Datensatzes stellt die Top-Shot-Perspektive dar. Aufgrund der perspektivischen "Draufsicht" werden Balkone, Unterführungen oder Brücken als Volumenkörper mit Ausdehnung bis zur Erdoberfläche wahrgenommen. Dieser Fehler kann als vernachlässigbar klein angenommen werden, da er sich im Modellgebiet nur auf wenige Gebäudemodelle auswirkt und somit einen geringen Anteil am Gesamtmodell besitzt. Die Gebäude des Windkanalmodells wurden mit einer Genauigkeit von < 1 mm_{ms} (0.35 m_{fs}) von der hauseigenen Werkstatt gefertigt.

Zur Positionierung der Modelle wurden mittels einer CNC-Fräse die Außenkanten der Gebäudegeometrien auf den Grundplatten des Windkanalmodells millimetergenau markiert. Zur Vermeidung von Positionierungsfehlern wurden an definierten Positionierung der Fräse Wiederholungsbohrungen durchgeführt. Eine Ungenauigkeit der Positionierung der Modelle kann somit ausgeschlossen werden. Ebenfalls konnte anhand der Gebäudemarkierungen die Abmaße der gefertigten Modellgebäude kontrolliert werden. Ein evtl. auftretender Fehler in dem Modell und der Gebäudeorientierung kann als vernachlässigbar klein (± 0.5 mm_{ms}) angesehen werden.

3.4.6 Genauigkeit der Sondenpositionierung

Die Ermittlung der bodennahen Windgeschwindigkeiten im urbanen Raum setzt eine unbedingte Kenntnis des Messortes voraus, da sich innerhalb eines Straßenzuges oder im Nachlauf eines Gebäudes das lokale Windfeld signifikant ändern kann. Im Rahmen der durchgeführten Messungen wurde ein Traversiersystem mit einer Grundgenauigkeit der Achsen von 0.1 mm_{ms} verwendet. Zur Justierung dieses Traversensystems wurden die auf der Grundplatte mittels einer CNC-Fräse millimetergenau bestimmten Bohrpunkte verwendet. Zu Beginn jedes Messtages erfolgte ebenfalls ein Abgleich mit mindestens drei bekannten Positionen Modellgebiet. Um evtl. auftretende Positionierungsfehler im durch Koordinateninterpolation der Traverse zu minimieren, wurde mehrmals täglich die exakte Position des Messvolumens des LDAs im Modell bestimmt. Durch diese Kontrollen konnte neben der Gewährleistung der exakten Positionierung der Traverse auch eine tägliche Kontrolle der Ausrichtung des LDA-Messvolumens erfolgen. Messfehler bedingt durch eine ungenaue Positionierung der Sonde können als vernachlässigbar klein angesehen werden.

3.4.7 Reproduzierbarkeit der Strömungsmessungen

Da die Strömungsdaten der Windkanalversuche als Referenzdatensatz für ein numerisches Modell verwendet werden, muss die Repräsentativität der erhobenen Daten überprüft werden. Schultz (2008) berechnet den Unsicherheitsbereich der Messdaten über das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz. Die reine messtechnische Unsicherheit kann so auf einen Wert 0.45 % bestimmt werden. Da im Rahmen dieser Arbeit dieselbe Messtechnik verwendet wurde, kann die von Schulz bestimmte Unsicherheit übernommen werden. Nach Felderhoff und Ulrich (2007) "[...] ist die Messunsicherheit der Messung meistens größer als die Messunsicherheit der Messgeräte". Es müssen also neben den systematischen Fehlern auch die zufälligen Fehler betrachtet werden (Felderhoff und Ulrich, 2007).

Als Maß für die Qualität der erhobenen Windkanaldaten kann deren Reproduzierbarkeit angesehen werden. Innerhalb einer Kampagne werden gezielt Messungen wiederholt, um den Unsicherheitsbereich der Messdaten feststellen zu können. Wiederholungsmessungen einzelner Punkte zu unterschiedlichen Zeiten im Tagesgang und im Messfortschritt spiegeln ein repräsentatives Bild der Messkampagne wieder. In diesen Wiederholungsmessungen summieren die Unsicherheiten der Messinstrumente, die Unsicherheiten aufgrund der Kalibrierung, die Unsicherheiten hinsichtlich der Sondenpositionierung, etc. Die vorhandenen variablen äußeren Einflüsse auf den Versuch wie z.B. Schwankungen der Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und des Luftdrucks werden durch die Wiederholung der Messungen ebenfalls abgedeckt.

Im Rahmen der Strömungsuntersuchungen des Modellgebiets Hamburg-Wilhelmsburg wurden Strömungsprofile mit einem 2D-LDA-System (gemessene Komponenten des Windvektors: uv und uw) erhoben. Neben Wiederholungen von (Teil-) Profilen kann die longitudinale Komponente des Strömungsvektors der zwei Zeitserien eines Profils zur Bestimmung eines Vertrauensbereichs der Messungen verwendet werden.

Zu beachten ist hierbei die unterschiedliche Ausrichtung des Messellipsoides während der Messungen. Bezogen auf die uv-Messung (vertikal orientierte Ellipse) wird die LDA-Sonde zur Bestimmung der uw-Komponenten (horizontale orientierte Ellipse) um annähernd 90° gedreht. Aus der Ausrichtung resultierende Messungenauigkeiten werden so ebenfalls in den Wiederholungen der Strömungsmessungen ersichtlich²⁰. Zur Bestimmung der Messunsicherheit wurde die absolute Differenz der normierten Geschwindigkeiten ($|u_1/u_{ref} - u_2/u_{ref}|$) der longitudinalen Strömungskomponenten beider Zeitserien (u_1v und u_2w) einer Profilposition gebildet, Wiederholungsmessungen eines Profils wurden äquivalent behandelt. Für die

²⁰ Bedingt durch die Drehung der LDA-Sonde unterscheidet sich die relative Lage der Messellipsoide der beiden Messungen. Bei uv-Messungen wird über ein senkrechtes Rotationsellipsoid die Windgeschwindigkeit gemessen, bei uw-Messungen befindet sich die Integralfläche annähernd in der Horizontalen. Die vertikalen Ausdehnungen der beiden Messvolumina sind verschieden, somit ist es möglich, dass während der Messungen signifikant unterschiedliche Strömungsmuster erfasst werden.

Unsicherheitsabschätzung ergab sich eine Grundgesamtheit von 277 Messergebnissen (Tabelle 3-1). Diese Stichprobe wurde während des gesamten Messzeitraumes über dem Modellgebiet erhoben, es werden beide Bebauungskonfigurationen des Modells abgebildet. In Abb. 3-6 sind die Differenzen der Messergebnisse als Häufigkeitsverteilung dargestellt. Als Vertrauensbereich der Messungen wird das 95. Perzentil der Stichprobe definiert. Der Stichprobenumfang unterhalb dieses definierten Grenzwerts umfasst eine Gesamtheit von 263 Stichproben. Neben der wahrscheinlichsten absoluten Abweichung der Messergebnisse (0.003 - 0.006 [-]) kann der aufgrund der Rechtsschiefe der Häufigkeitsverteilung der absoluten Differenzen der longitudinalen Strömungskomponenten eine hohe Genauigkeit der Wiederholungsmessungen festgestellt werden. So kann bspw. bestimmt werden, dass 60 % der Differenzen ≤ 0.010 [-] sowie 85 % ≤ 0.0155 [-] betragen. Der Vertrauensbereich der Strömungsmessungen kann auf Basis des 95. Perzentils auf eine absolute Unsicherheit von ± 0.0139 [-] bzw. auf eine relative Unsicherheit von ± 3.465 % bestimmt werden (siehe auch Abb. 14-8 - Abb. 14-10).



Abb. 3-6: Unsicherheitsbestimmung der Messergebnisse aus den Strömungsprofilen.

Tabelle 3-1: Messunsicherheit der Strömungsmessungen bestimmt aus Wiederholungsmessungen.

Anzahl Wiederholungsmessungen	betrachtete Stichprobe < 95. Perzentil	Konfidenzintervall u / u _{ref}
277	263	± 0.0139 [-]

3.5 Eigenschaften der modellierten Grenzschicht

In Anhang A - Exkurs: Windklima am Standort Hamburg wird eine großräumige Einschätzung der klimatischen Verhältnisse der Stadt Hamburg gegeben. Für die Modellversuche im Grenzschichtwindkanal wird die Windanströmung über der Stadt eingehender betrachtet. Die Grundlage dafür bilden die Zeitserien des Hamburger Wettermastes des Zeitraums 2007 - 2009. Der Wettermast Hamburg ist eine vom Meteorologischen Institut der Universität Hamburg betriebene Klimastation am Standort Hamburg-Billwerder (vgl. Brümmer et al., 2012) in einer Entfernung von ca. 6.5 km zu dem Modellgebiet HH-Wilhelmsburg. Das Kernstück dieser Klimastation bildet der Sendemast des Norddeutschen Rundfunks (NDR), welcher in verschiedenen Höhenstufen (bis 280 m) mit meteorologischen Sensoren versehen ist²¹.

Für die Modellversuche wurden die Daten hinsichtlich der Anströmrichtungen (Hauptwindrichtung) und den meteorologischen Randbedingungen (neutrale Schichtungsverhältnisse) sortiert, eine Grenzschichtanströmung für die Modellversuche entwickelt und detailliert dokumentiert (Peeck, 2011). Die Laborgrenzschicht wurde als Anströmung für das Stadtgebiet Hamburgs von Hertwig (2013) verifiziert. In diesem Kapitel werden nachfolgend die Eigenschaften der Modellgrenzschicht gegenüber den Anforderungen des Modellgebietes aufgezeigt. Für einen Vergleich mit den meteorologischen Randbedingungen sei auf die oben genannten Studien verwiesen.



Abb. 3-7: Windprofil der Grenzschichtanströmung auf das Stadtteilmodell Hamburg-Wilhelmsburg, links in linearer Darstellung (a), rechts in halb-logarithmischer Darstellung (b).

²¹ Nähere Informationen zu der meteorologischen Messstation und aktuelle Wetterdaten unter: wettermast-hamburg.zmaw.de/.

Abb. 3-7 zeigt ein Profil der Strömungsgeschwindigkeit, gemessen vor dem Bereich der städtebaulichen Umstrukturierungen im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmburg, links in der linearen, rechts in der halblogarithmischen Darstellung. Der Mittelwert der Windgeschwindigkeit wurde mit einer Referenzwindgeschwindigkeit in 175 m Höhe (vgl. zu Naturmessungen: Messinstrumentenhöhe am NDR-Sendemast) entdimensionalisiert. Die Streubalken an den Profilen zeigen den in Kap. 3.4.7 definierten Vertrauensbereich der Strömungsmessungen an. Der untere Bereich des Profils weicht stark von einer exponentiellen Profilform ab, da in diesen Höhenstufen im Nachlauf der städtischen Geometrie gemessen wurde (vgl. Kap. 2.2). Die Charakteristiken der Grenzschichtströmung lassen sich aus dessen unge-störtem Bereich des Profils ableiten. Hau (2008) und Sockel (1984) grenzen den durch Hindernisse beeinflussten Bereich auf eine vertikale Ausdehnung bis zur zweifachen Höhe sowie der zwanzigfachen Länge der Hindernishöhe ein, nach Oke (1992) gilt die dreifache Überhöhung des Hindernisses als beeinflusst. Für die Charakterisierung der Grenzschichtanströmung wird aufgrund der geringen Ausprägung der bodennahen Bebauung das Windprofil ab der 1.5fachen Höhe der Rauigkeitselemente (42 m_{fs}) betrachtet.

Im Grenzschichtwindkanal werden die untersten 10 - 15 % der atmosphärischen Strömungen (Prandtl-Schicht, vgl. Kap. 2.1) modelliert. Ein Kriterium der Prandtl-Schicht ist die Ausbildung höhenkonstanter turbulenter Flüsse. Nach Stull (1991, vgl. auch Snyder, 1981) kann eine Schwankungsbandbreite der vertikalen turbulenten Flüsse von max. \pm 10 % um den bodennahen Wert als konstant betrachtet werden.



Abb. 3-8: Vertikale turbulente Flüsse der modellierten Anströmung auf das Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg.

In Abb. 3-8 sind die vertikalen turbulenten Flüsse der Anströmung über der Höhe aufge-tragen. Die durch die Rauigkeitselemente beeinflussten untersten Höhenstufen werden in diese Betrachtung nicht mit einbezogen, die Streubreite von ± 10 % (grau hinterlegt) ist um den Wert des ersten Messpunkts in der ungestörten Anströmung angetragen. Analog zum Windprofil wurde hier die Messhöhe von 42 m_{fs} gewählt. Bis zu einer Höhe von 175 m_{fs} liegt die Streubreite der Messwerte bezogen auf den Referenzwert unter 5 %. Da nur wenige Messwerte betrachtet werden können, entfällt die Abschätzung eines Trends und somit eine Abweichung von der konstanten Flussgröße. Trotz der leicht negativen Tendenz ab einer Höhe von ca. 100 m_{fs} wird die Ausdehnung der modellierten Prandtl-Schicht auf ca. 150 m_{fs} abgeschätzt.

Abb. 3-8 bestätigt die in Abb. 3-7 getroffene Abschätzung der Prandtl-Schicht. Die vertikalen Flüsse folgen in dem bestimmten Bereich der getroffenen Abschätzung. Aus dem Profil der Windgeschwindigkeit (Abb. 3-7 a) kann mit dem empirischen Potenzansatz nach Hellmann (vgl. Kap. 2.1, Gl. 2-2) der Profilexponent α bestimmt werden. Die Versatzhöhe für den gewählten Ansatz ist d₀ = 0.

Die Rauigkeitslänge z_0 kann aus dem Schnittpunkt der Profilgeraden mit der Höhenachse in der halblogarithmischen Darstellung gewonnen werden. Sowohl die Rauigkeitsklassifizierungen der VDI-Richtlinie (0.18 - 0.24, VDI (2000)) als auch der WTG (0.20 - 0.24, WTG (1994)) ordnen dem Profilexponenten α ein raues, suburbanes Gelände zu. Die Rauigkeitslänge z_0 wird nach WTG eher suburbanen Gebieten (1 -1.5 m) zugeordnet, die VDI-Richtlinie hingegen stuft die Länge als charakteristisch für Innenstadtgebiete (sehr rau, 0.5 - 2 m) ein.



Abb. 3-9: Zusammenhang des Profilexponent α und der Rauigkeitslänge z₀ der Anströmung auf das Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg im Vergleich mit Daten von Naturmessungen und der Theorie nach Counihan (1975).

Nach einer Studie von Counihan (1975), basierend u.a. auf den Naturmessungen der Untersuchungen von Panofsky (1960), Davenport (1963, 1967), Helliwell (1970) sowie der ESDU (1972), besteht zwischen der Rauigkeitslänge z_0 und dem Profilexponenten α einer Grenzschichtströmung ein funktionaler Zusammenhang (Gl. 3-4).

$$\alpha = 0.096 \cdot \log_{10} z_0 + 0.016 \cdot (\log_{10} z_0)^2 + 0.24$$
 (GI. 3-4)

mit:

α	Profilexponent	[-]
<i>Z</i> ₀	dynamische Rauigkeitslänge	[m]

In Abb. 3-9 ist das Verhältnis Profilexponent über Rauigkeitslänge der Windkanalmessung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Verhältnis der Kennzahlen α und z_0 im Rahmen der Messunsicherheit dem von Counihan vorgeschlagenen Zusammenhang entspricht.

Neben der Betrachtung der Grenzschichtdicke und der Profilformparameter aus zeitlich gemittelten Strömungsdaten müssen deren turbulente Charakteristiken überprüft werden. Die Turbulenzintensität (Gl. 3-5) ist ein Maß für den Energiegehalt einer Strömung; definiert ist die Turbulenzintensität li(z) als das Verhältnis des Schwankungsanteils der i-ten Strömungskomponente $\sigma_i(z)$ zur mittleren (longitudinalen) Windgeschwindigkeit in der Betrachtungshöhe $\overline{u}(z)$.

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i(z)}{\overline{u}(z)}, i = u, v, w$$
(GI. 3-5)

mit:

$$\sigma_i(z)$$
Standardabweichung der i-ten Strömungskomponente in der Höhe z[m/s] $\overline{u}(z)$ mittlere Windgeschwindigkeit der i-ten Strömungskomponente in der Höhe z[m/s]

In Abb. 3-10 sind die vertikalen Profile der Turbulenzintensität über der Höhe dargestellt, für eine bessere Abschätzung sind die Rauigkeitsklassifizierungen des VDI eingefügt. Der Abbildung zu entnehmen ist, dass die Turbulenzintensität longitudinal (I_U) und lateral (I_V) sowohl in der Profilausprägung als auch in der Größenordnung der eines vorstädtischen Gebiets entspricht. I_W hingegen weist nur knapp die turbulenten Merkmale einer rauen, vorstädtischen Anströmung der angestrebten Rauigkeitsklasse auf.



Abb. 3-10: Profile der Turbulenzintensität der Strömungskomponenten in der Anströmung auf das Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg.

Eine dritte wichtige Größe zur Charakterisierung einer Strömung sind deren integrale Längenmaße, also die mittlere räumliche Ausdehnung der energiereichsten Wirbelkörper der Strömung. Über Integration der Autokorrelation des Schwankungsanteils der Strömung ergibt sich das integrale Zeitmaß T_{UX}^{22} zu

$$T_{UX} = \int_{0}^{\infty} \frac{u'(t) \cdot u'(t + \tau)}{\sigma_{u}^{2}} d\tau$$
 (GI. 3-6)

Das integrale Zeitmaß T_{iX} kennzeichnet den Zeitraum, den ein Turbulenzballen benötigt, um an einem ortsfesten Punkt vorbeizuziehen. Basierend auf dem Ansatz der Taylor-Hypothese, dass der turbulente Schwankungsanteil (u', v', w') einer Strömung unverändert mit der Geschwindigkeit der Grundströmung einen festen Raumpunkt passiert ("Frozen-Turbulence"-Ansatz), folgt Gleichung 3-7 (Schrader, 1993).

$$L_{iX} = T_{iX} \cdot \overline{u} \tag{GI. 3-7}$$

Ähnlich wie die Turbulenzintensität weisen die integralen Längenmaße L_{ix} eine vertikale Verteilung auf. Je rauer der Untergrund, desto turbulenter bildet sich die Strömung und entsprechend geringer die Wirbelgröße aus. Mit größer werdender Entfernung zur Oberfläche nehmen die Wirbelgrößen in der Grenzschichtströmung zu. Counihan formulierte auf Basis von Naturmessungen den Zusammenhang zwischen den integralen Längenmaßen, der Oberflächenrauigkeit und der Messhöhe (Counihan, 1975). In Abb. 3-11 sind die integralen Längenmaße der Anströmung über die Höhe sowie der funktionale Zusammenhang nach Counihan und dessen betrachteten Naturmesswerte aufgetragen, die Unsicherheiten sind für jede Höhenstufe aus den Wiederholungsmessungen der Position bestimmt.

Auffällig ist, dass die integralen Längenmaße an der Messposition im Modellgebiet gegenüber einer Abschätzung durch den Counihan'schen Zusammenhang leicht erhöht ausfallen. Trotz der geringen Streuung der Untersuchungsergebnisse befinden sich die bestimmten Wirbelgrößen in einem Bereich, der nach Counihan einer Rauigkeitslänge z_0 von 0.1 - 0.01 m zugeordnet wird. Bedingt durch die Beeinflussung der urbanen Struktur an dieser Messposition ist eine Betrachtung der L_{ux} ab einer Messhöhe > 42 m_{fs} möglich (Der durch die Bebauung gestörte Bereich des Profils sowie der Bereich oberhalb der Grenzschichtströmung sind in dieser Abbildung grau hinterlegt.). Die Überschätzung prägt sich im Höhenverlauf der Grenzschicht, bedingt durch die Zunahme der Längenmaße über der Höhe, lediglich gering aus. Die aus der Anströmung bestimmten Rauigkeitslänge $z_0 = 0.65$ m wird mit der Abschätzung der Wirbelgrößen nicht erreicht.

²² Die Bestimmung der Wirbelmaße der weiteren Strömungskomponenten (v, w) erfolgt analog zu (Gl. 3-6).



Abb. 3-11: Vertikales Profil der integralen Längenmaße L_{ux} der Anströmung im Vergleich mit dem funktionalen Zusammenhang nach Counihan.

Neben der vertikalen Verteilung der Turbulenzintensität ist auch die Naturähnlichkeit der spektralen Verteilung der Turbulenzenergie zu überprüfen. Nach VDI (2000) kann die Verteilung für den mikrometeorologischen Frequenzbereich durch (GI. 3-8) angenähert werden. Die Normierung der Turbulenzenergie auf das Integral des Quadrates des Schwankungsanteils der Strömung σ_u^2 bezeichnet die turbulente Energiedichte.

$$\frac{f \cdot S_{UU}(f,z)}{\sigma_u^2(z)} = \frac{A \cdot f_{red}}{(E+B \cdot f_{red}^c)^D}$$
(GI. 3-8)

mit:

<i>f</i> :	Frequenz der Geschwindigkeitsfluktuationen	[1/s]
$S_{UU}(f,z)$:	Spektrale Energiedichte der u- Komponente	[m²/s²]
f _{red} :	reduzierte Frequenz	[-]
$\sigma_u^2(z)$:	Varianz des Schwankungsanteils der u-Komponente	[-]
A-E:	Approximationskonstanten	[-]



Abb. 3-12: Normierte spektrale Verteilung der turbulenten kinetischen Energiedichte in Hauptströmungsrichtung der Anströmung auf das Modellgebiet in 42 m Höhe (Naturmaßstab).

In Abb. 3-12 ist die spektrale Verteilung der turbulenten kinetischen Energien (normiert mit der Standardabweichung des Schwankungsanteils der Hauptströmungsrichtung) über der Frequenz (normiert mit der Windgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung und der Höhe des Messortes) an der tiefsten Messposition der ungestörten Anströmung dargestellt, als Vergleichsmöglichkeit dienen die Referenzspektren von Kaimal et al. (1972) und Simiu und Scanlan (1996). Die gemessene spektrale Verteilung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung sowohl in der Form als auch in den Maxima der Energiedichte mit dem Referenzspektrum von Simiu und Scanlan.

Die für die Windkanalversuche im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg modellierte Grenzschichtströmung erfüllt die Anforderungen einer vorstädtischen Grenzschichtanströmung und kann somit als geeignet für die Untersuchungen im Modellgebiet betrachtet werden.

4. Experimentelle Untersuchungsmethoden der Ventilationseigenschaften eines Modellgebietes mittels Tracern

In Kap. 2.5 wurde das meist verwendete Verfahren zur Bestimmung der Ventilation eines urbanen Raums (numerisches Modell auf der Basis autochthoner Windfelder - Kaltluftabflüsse) diskutiert. Ebenfalls wurden die Definitionen **Ventilationspotential** und **Ventilationseffizienz** eingeführt. In dem folgendem Kapitel sollen experimentelle Ansätze mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung diskutiert werden, da "(...) eine Betrachtung der mittleren Konzentration eines Tracers zur Bewertung der Luftqualität innerhalb eines Stadtgebiets nicht ausreicht" (Buccolieri et al., 2011). Da sich viele experimentelle Bewertungsverfahren auf Standarduntersuchungen der Lüftungstechnik berufen, soll als Einstieg in die Thematik die Belüftung von Innenräumen betrachtet werden. Analog zur Ventilation in urbanen Gebieten kann die bauphysikalische Größe der Luftwechselzahl n [1/h] betrachtet werden. Definiert ist diese als der Quotient des Zuluftvolumenstroms V_L bezogen auf das Raumvolumen V_R (VDI, 2001).

$$n = \frac{\dot{v}_L}{v_R} \tag{GI. 4-1}$$

Gleichung 4-1 beschreibt einen kontinuierlichen Verdünnungsprozess im Untersuchungsraum, keinen absoluten Raumluftaustausch. Somit beschreibt diese Definition die kürzest mögliche Verweilzeit der Luft im Betrachtungsraum und, daraus folgend, den optimalen Luftaustausch eines geschlossenen Raumes. Anwendung findet die Luftwechselzahl in der Lüftungstechnik zur Bewertung von Raumluftbelastungen (Lüftungsverhältnis in Innen-räumen, Expositionen von Schadstoffen). Neben der absoluten Luftwechselzahl n wird auch häufig die Dauer des Abklingens einer Indikatorkonzentration auf einen bestimmten Schwellenwert (n₅₀, 50 %-Wert der Ausgangskonzentration, vgl. VDI, 2001) als Maß des Luft-austausches verwendet.

Nachfolgend werden die Bestimmungsmethoden der Luftwechselzahl n nach VDI (2001) skizziert und ihre Anwendbarkeit auf urbane Räume diskutiert. Da sich in dieser Richtlinie der Stand der (Innenraumlüftungs-) Technik widerspiegelt, erfolgt zunächst eine Beschrän-kung auf diese Methoden. Zu beachten ist bei den Methoden zur Innenraumbelüftung, dass ein definiertes, abgeschlossenes Volumen (Innenraum) mit vollständiger Durchmischung des Luft-Tracergas-Gemisches betrachtet wird.

Unterschieden wird in der VDI-Richtlinie nach drei Vorgehensweisen:

Konstant-Injektions-Methode: Bei der Konstant-Injektions-Methode wird dem Untersuchungsraum ab Beginn der Konzentrationsmessungen kontinuierlich ein konstanter Tracergasstrom zugeführt. Bei ungestörtem Luftwechsel wird sich im Betrachtungsvolumen ein quasistationärer Zustand der Konzentration einstellen. Aus dem Verhältnis des Tracergasvolumenzustroms und der gemessenen Tracergaskonzent-ration kann der Zuluftvolumenstrom bestimmt werden. Über das effektive Raum-volumen lässt sich die Luftwechselzahl n berechnet.

Konzentrationsabfall-Methode: Das gebräuchlichste Verfahren zur Bestimmung der Luftwechselrate ist die Konzentrationsabfall-Methode. In den Untersuchungsraum wird

ein Tracergas injiziert und mit der Raumluft vermischt, sodass zu Beginn der Untersuchungen eine homogene Verteilung der Tracergaskonzentration im Betrachtungsvolumen vorliegt. Aus dem im zeitlichen Verlauf durch Luftaustauschvorgänge erzeugten Abklingen der Konzentration über der Zeit kann die Luftwechselzahl n bestimmt werden.

Konstant-Konzentrations-Methode: Bei der Konstant-Konzentrations-Methode wird, analog der Konzentrationsabfall-Methode, vor Beginn der Untersuchungen ein stationärer Wert der Tracergaskonzentration im Betrachtungsvolumen erzeugt. Während der Messungen wird dieser Sollwert über automatisierte Steuerungseinrichtungen auf einem konstanten Niveau gehalten. Der Luftwechsel des Betrachtungsraumes verhält sich proportional zum Tracergasvolumenstrom, zur Bestimmung der Luftwechselzahl benötigt man die Kenntnis des effektiven Raumvolumens.

Für Untersuchungen im Grenzschichtwindkanal können sowohl die Vorgehensweisen der **Konstant-Injektions**-Methode als auch der **Konzentrationsabfall**-Methode für Windkanalversuche adaptiert werden. Bedingt durch die Instationarität der vollturbulenten Strömung kann die **Konstant-Konzentrations**-Methode für die geplanten Fallstudien im Windkanal nicht angewendet werden.

Aktuelle Untersuchungen zur urbanen Ventilation lassen sich anhand ihres Ansatzes grob in zwei Lager unterteilen, beide sollen nachfolgend anhand ausgewählter Studien vorgestellt werden. Eine Gruppe untersucht die Ventilation anhand von hochaufgelösten Strömungs- und Konzentrationsmessungen innerhalb der UCL (urban canopy layer) sowie der Interaktion des UCL mit der UBL. Bentham und Britter (2003) entwickelten auf Basis von Strömungsmessungen innerhalb und oberhalb der UCL ein Modell zur Bestimmung der turbulenten Flüsse des Übergangsbereichs UCL - UBL. Über den experimentell bestätigten Zusammenhang des Frontflächenindex der überströmten Geometrie sowie deren (Luft-) Widerstandsbeiwert kann eine als annähernd konstant betrachtete Windgeschwindigkeit im Straßenzug bestimmt werden. Mit der weiteren Vereinfachung einer oberhalb des Straßenzugs konstanten Windgeschwindigkeit kann der Austausch zwischen beiden Schichten auf zwei Faktoren zurückgeführt werden: den Impulsaustausch UCL - UBL durch turbulente Misch-prozesse sowie einen Impulsverlust aufgrund des Strömungswiderstandes der Geometrie. Dieser Massenfluss kann als Indikator der Ventilationswirkung verstanden werden, die Austauschgeschwindigkeit und somit der Transport aus dem Straßenzug heraus kann aus den Randbedingungen bestimmt werden.

Hamlyn und Britter (2005) verifizierten dieses mathematische Modell anhand von numerischen Untersuchungen. Caton et al. (2003) und Salizzoni et al. (2009) untersuchten experimentell den Massenstrom an der Grenzschicht UCL - UBL bei verschiedenen Anströmbedingen. Beide Studien untersuchen den Impulsfluss sowohl mit Strömungsmessungen als auch mit kontinuierlichen und semikontinuierlichen bzw. diskontinuierlichen Tracerfreisetzungen. Während der kontinuierlichen Freisetzungen wird die Verteilung der Tracerkonzentration im Straßenraum betrachtet, bei den semikontinuierlichen wird bis zum Erreichen einer stationären Konzentration innerhalb des Straßenzuges Tracer freigesetzt, um das Abklingverhalten der Konzentration (ebenfalls an verschiedenen Positionen im Straßenraum) zu untersuchen. Anhand dieser experimentellen Untersuchungen kann der Massenaustausch an dem Übergang UCL - UBL analysiert werden. Die Durchführung dieser Experimente ähnelt der Konzentrationsabfall-Methode der Raumlufttechnik, da in diesen ebenfalls ein abgeschlossenes, streng geometrisch definiertes Volumen betrachtet wird.

Eine zweite Gruppe untersucht (meist numerisch) die Durchlüftungseigenschaften von Stadtgebieten anhand gängiger Verfahren der Lüftungstechnik. Sandberg und Sjöberg (1983) führten in ihrer Studie zur Innenraumventilation die Methodik des (lokalen) Luftalters ((local) age of air, Gl. 4-2) und der (lokalen) Spülrate (Purging Flow Rate, PFR, Gl. 4-3) ein. Bei einer homogenen Tracerfreisetzung (Q) kann über die mittlere Konzentration (\bar{c}) das mittlere lokale Alter der Luft ($\bar{\tau}_p$) bestimmt werden (vgl. Konstant-Injektions-Methode). Das lokale Alter entspricht dem Zeitraum, den ein Tracer benötigt, um ein definiertes Volumen zu durchqueren. Ein geringer Quotient bedeutet demnach eine gute Belüftung. Die PFR ist definiert als der Quotient aus dem Massenstrom (\dot{m}) einer homogenen Tracerfreisetzung im Betrachtungsraum und der mittleren Konzentration.

$$\overline{\tau}_p = \frac{\overline{c}}{Q} \tag{GI. 4-2}$$

$$PFR = \frac{m}{\bar{c}}$$
(Gl. 4-3)

Bady et al. (2008) untersuchen in einem idealisierten Stadtgebiet numerisch die Übertragbarkeit der Konzentrationsabfallmethode auf einen urbanen Raum. Als Indikator der Ventilation definieren Bady et al. das Abklingen einer Tracergaskonzentration innerhalb eines definierten Volumens (PFR, vgl. Konzentrationsabfall-Methode) sowie die Eintretenshäufigikeit eines Partikels in das Betrachtungsvolumen (Visitation Frequency, VF, vgl. Kato et al., 2003). Kato und Hiyama (2012) regen an, die Auftretenswahrscheinlichkeiten bzw. die Überschreitungswahrscheinlichkeiten der PFR und der turbulenten kinetische Energie (TKE) gegen einen Grenzwert zu untersuchen und als Maß der Durchlüftung des Stadtraums zu betrachten. Bady et al. sehen auf Basis ihrer Untersuchungen CFD-Simulationen als geeignetes Mittel zur Bestimmung der urbanen Durchlüftungseigenschaften, da in von Ihnen durchgeführten Windkanaluntersuchungen die Instationarität der Tracerkonzentration, bedingt durch die turbulenten Strömungscharakteristiken innerhalb urbaner Strukturen, nicht kompensiert werden kann (Bady et al., 2008).

Buccolieri et al. (2010) prägen das Schlagwort der urbanen Atmung (city breathability). Als Einatmen eines städtischen Betrachtungsraumes, also ein möglicher Schadstoffeintrag, kann nach Buccolieri et al. (2010) das Luftalter-Konzept angesehen werden, als Analogie des Ausatmens wird die Verdünnung einer freigesetzten Konzentration (PFR) betrachtet (vgl. auch Hang et al. (2012), Panagiotou et al. (2013)).

Hu und Yoshie (2013) untersuchen Korrelationen zwischen einem räumlich gemittelten Konzentrationsmesswert \bar{c}^* (vgl. Buccolieri et al. (2011), Hang et al. (2012b)) und den von Bady et al. vorgeschlagenen Ventilationsindizes in verschiedenen urbanen Konfigurationen. Ihren numerischen Studien zufolge kann der räumliche Konzentrationsmittelwert als Integralwert der urbanen Ventilationsindizes betrachtet werden (Hu und Yoshie, 2013).

Liu et al. (2005) definieren die Luft- und Schadstoffwechselrate (ACH, air exchange rate, (Gl. 4-4); bzw. PCH, pollutant exchange rate) als Betrachtungsgröße der Ventilation. Als Bezugsgröße der numerischen Studien gilt der stündliche Massenstrom in ein Betrachtungs-volumen. Studien von Hang und Li (2010), Mirzaei und Haghighat (2011), u.a. greifen die Betrachtungsgröße ACH als Referenz der Durchlüftung auf.

$$ACH = \frac{3.6 \cdot \dot{m}}{V} \tag{GI. 4-4}$$

In den betrachteten Studien sind verschiedene Quelltypen verwendet worden, je nach Untersuchungsgebiet und Zweck der Untersuchungen (vgl. Hang et al. (2012b), Hu und Yoshie (2013), Yuan et al. (2014)). In numerischen Studien wird meist die unbebaute Modellgrundfläche, respektive das betrachtete Stadtgebiet als Flächenquelle mit konstanter Emissionsrate ausgebildet. In (numerischen und experimentellen) Studien über das Ventilationsverhalten in Straßenzügen wird aus einer Linien- oder Flächenquelle ein Tracer emittiert (vgl. Pavageau und Schatzmann (1999), Soulhac et al. (2008), Salizzoni et al. (2011)). In Vergleichsstudien zu den Auswirkungen variierender Bebauungsdichten wird ebenfalls eine Linienquelle für vollständiges Seeding des Betrachtungsgebiets genutzt (vgl. Buccolieri et al., 2011).

Diese Übersicht repräsentiert nur einen Ausschnitt der Arbeiten der letzten Jahre. Studien über die Auswirkungen verschiedenartig ausgeprägter Stadtstrukturen (u.a. Hang et al. (2009), Buccolieri et al. (2011), Hang und Li (2011), Yuan et al. (2014)) wurden nicht gelistet, da in diesen die o.g. Vorschläge Anwendung finden, jedoch keine von den genannten Methoden verschieden- oder neuartigen Ansätze präsentiert werden. Zusammenfassend lassen sich die Untersuchungen wie folgt gliedern:

Untersuchungen mit **Fokus auf einen Straßenzug** und die Interaktion zwischen dem Strömungs- und Ausbreitungsverhalten zwischen Straßenzug und freier Überströmung. Zur Bestimmung des Austausches finden sowohl numerische Simulationen als auch räumlich hochaufgelöste Messfelder in experimentellen Studien Anwendung.

Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Innenraumkonzepten der Belüftung auf den urbanen Raum werden meist anhand von numerischen Modellen durchgeführt. Ein Vorteil diese Untersuchungen ist die Gitterstruktur numerischer Modelle, da geschlossene Volumina und somit Eintretenswahrscheinlichkeiten (VF) und Massenströme durch diese betrachtet werden können.

Da im letzteren Anwendungsfall meist RANS²³-Modelle Anwendung finden, erfolgt in diesen Studien eine Bewertung der Ventilationswirkung mit (räumlichen) Mittelwerten. Fluktuationen der Geschwindigkeit sowie Intermittenzeffekte, welche den Belüftungskomfort in Straßenzügen beeinflussen, können nicht betrachtet werden.

²³ Numerische Strömungssimulation auf Basis der zeitlich gemittelten Lösung der Navier-Stokes-Gleichung.

4.1 Diskussion möglicher Tracer

In den Windkanalversuchen soll ein experimenteller Ansatz zur Bestimmung der urbanen Ventilationseigenschaften unter expliziter Berücksichtigung der transienten Struktur der Strömungs- und Austauschvorgänge innerhalb urbaner Strukturen entwickelt werden. Zur Durchführung der Ventilationsanalysen soll ein Indikator möglichst beeinflussungsfrei ins Betrachtungsgebiet eingebracht werden. Im Rahmen dieses Kapitels werden drei mögliche Tracerarten diskutiert: Gase, Wärme und Feuchtigkeit.

Die **Ventilationseffizienz** eines Stadtraums kann über die Immission eines Tracers bestimmt werden. Anhand der Konzentration und der Verweilzeit können Aussagen über die Durchlüftung des Betrachtungsraums getroffen werden. Die zeitlich hochaufgelöste Bestimmung einer Gaskonzentration bzw. deren Abklingverhalten kann mit einem Fast-FID (vgl. Kap. 3.3) realisiert werden. Die Tracergase können, je nach Untersuchungsmethodik, in definierten Freisetzungsintervallen sowie als kontinuierlicher Volumenstrom emittiert werden. Diese Beschickung des Betrachtungsraumes kann entweder durch ortsfeste oder durch mobile Quellen erfolgen. Denkbar wären ebenfalls eine Emission von (gefärbtem) Rauch sowie die Detektion dessen Verdünnungs- und Abklingverhaltens über photooptische Verfahren. Reisezeitunterschiede des Tracers in verschiedenen urbanen Räumen und somit direkte Aussagen über den Eintrag des Tracers in ein Betrachtungsvolumen können ebenfalls mittels Langzeitbelichtungen von kurzzeitigen Freisetzungen visualisiert werden.

Weitere der Strömung zugeführten Tracer könnten Wärme oder Feuchtigkeit sein. Ein Feuchtigkeitssensor erfasst hochaufgelöste Zeitschriebe der Luftfeuchtigkeit, thermische Anemometrie (Hitzdraht-, Heissfilm- oder Pulsdrahtsonden) detektiert Wärmetracer, je nach gewähltem Messinstrument richtungsscharf und/oder zeitlich hochauflösend.

Neben der Tracerzugabe in der Anströmung des Untersuchungsgebietes kann das Ventilationspotential des urbanen Raumes über die Betrachtung des Modellbodens bzw. eines bodennahen Volumens erfasst werden. Die Abkühlung eines erwärmten Modellbodens wird sich entsprechend der Ventilation der Bebauungsstruktur ausprägen, die Wärmestrahlung bzw. -emission des Untergrundes wird sich gemäß dem Luftaustausch des betrachteten Gebietes verhalten. Eine Wärmebildkamera kann quantitative Aussagen generieren, mit einem Infrarot- Strahlungspyrometer können zeitlich hochaufgelöste Detailuntersuchungen erfolgen. Die Erwärmung eines eingebrachten Körpers mit hoher thermischer Masse und das Abklingen der Körpertemperatur wird sich entsprechend des Strömungsfeldes ausbilden und kann analog zu der obengenannten Methode als ein Maß der Ventilation angesehen werden. Stofftransport durch oberflächennahe Verdunstung von Lösungsmitteln aus chemischem Löschpapier kann sowohl quantitative Ergebnisse anhand von Färbung des Löschpapieres (äquivalent zur Sanderosion bei Windfelduntersuchungen) als auch qualitative Ergebnisse über das Ventilationspotential durch zeitlich hochaufgelöste Konzentrationswerte erzeugen. In den nachfolgenden Kapiteln wird eine Übertragung dieser Überlegungen auf Versuche im Windkanal beschrieben. Einige skizzierte Methoden ohne Störung des Windfeldes durch eingebrachte Körper werden diskutiert, hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bewertet und auf die zu erwartenden Ergebnisqualität geprüft.

4.2 Diskussion der Messverfahren

In dem nachfolgenden Kapitel werden verschiedene Messverfahren zur Bestimmung der Ventilationseffizienz und des Ventilationspotentials diskutiert sowie ein Kontext zu in der Fachliteratur vorgestellten, experimentellen Studien erstellt. In dieser Diskussion erfolgt eine Beschränkung auf drei Verfahren, deren Methodik sowie Anwendungsmöglichkeit auf urbane Strukturen in Windkanalversuchen in Voruntersuchungen erprobt wurden.

4.2.1 Bestimmung der lokalen Ventilationseffizienz mit bodennahen Traceremissionen

Zur Bestimmung der **Ventilationseffizienz** wurde ein experimentelles Konzept mit Tracergasen zur Anwendung im Grenzschichtkanal entwickelt. Analog zu der Konzentrationsabfall-Methode des VDI (vgl. Kap. 4; VDI (2001)) wird bis zum Erreichen eines quasistationären Konzentrationsniveaus im Modellgebiet bodennah Tracergas emittiert (Abb. 4-1).



Abb. 4-1: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus: Messungen der Ventilationseffizienz mit bodennaher Tracergasfreisetzung aus ortsfester Quelle.²⁴

Nach Erreichen dieses quasistationären Zustandes wird die Tracerzuleitung ins Modellgebiet unterbrochen, sodass die Tracerkonzentration innerhalb eines Betrachtungsraumes sich sukzessive verringert, bis diese vollständig ausgewaschen wurde. Anhand des Abklingens des Konzentrationssignals kann die lokale Ventilationseffizient bestimmt werden, das Abklingen der Konzentration kann als Austausch von (mit Schadstoffen oder Wärme) belasteter Luft durch Frischluftpakete interpretiert werden.

²⁴ Diese und nachfolgende Abbildungen dienen lediglich der Veranschaulichung als Prinzipskizzen. Weder wird ein Bilanzraum betrachtet, noch kann eine gleichförmige Windgeschwindigkeit und -richtung im urbanen Raum angenommen werden.

Ein vergleichbarer Ansatz wurde u.a. von Caton et al. (2003) und Salizzoni et al. (2009) zur Untersuchung der Transportvorgänge in Straßenzügen gewählt. Die genannten Studien emittieren Tracergas aus einer Linienquelle im Betrachtungsgebiet (Straßenzug), in der durchzuführenden Windkanalstudie erfolgt die Freisetzung von Tracergasen aufgrund der Inhomogenität des Modellgebiets aus einer Punktquelle stromauf des Betrachtungsgebiets. Da für ein statisches repräsentatives Ergebnis Einzelversuche vielfach wiederholt werden müssen (vgl. Salizzoni et al. (2009), Harms (2010)), kann aufgrund der resultierenden Stichprobengröße, neben der Mittelwert- und Bandbreitenbetrachtung eine Abschätzung der Extremereignisse (bspw. Abklingdauern der n₅₀-Konzentration, Verweilzeiten, etc.) erfolgen.

4.2.2 Beschreibung des lokalen Ventilationspotentials durch die systematische Erfassung der Oberflächentemperatur

In einer Windkanalstudie sollen anhand von Oberflächenwärmeemissionen die urbanen Ventilationsvorgänge untersucht werden. Durch Advektion wird, abhängig vom lokalen Wärmeübergangskoeffizienten, Wärmeenergie auf das Fluid übertragen. Da eine Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten von der lokalen Windgeschwindigkeit vorliegt, können mittels Thermographieuntersuchungen qualitativ Bereiche lokalveränderter Windgeschwindigkeiten sichtbar gemacht werden (vgl. Buckisch und Költzsch, 1999). Yamada et al. (1996) untersuchten die bodennahen Umströmungsverhältnisse um einen Würfelkörper mittels Infrarot-Thermografie. Für diese Studien platzierten Yamada et al. einen Würfel auf einer thermisch isolierten, beheizten Bodenplatte innerhalb eines Strömungsfeldes. Die Temperaturverteilung auf der Bodenoberfläche um diesen Körper wurde flächig mit einem Strahlungspyrometer erfasst. Ergänzend durchgeführte Sanderosionsversuche zeigten zu den Ergebnissen der Thermoanalyse vergleichbare Muster im Nahfeld des Würfels. Ein qualitativer Vergleich der Isothermen mit durchgeführten Geschwindigkeitsmessungen weist ein lineares Verhältnis zur effektiven Windgeschwindigkeit²⁵ [$u_e = (\bar{u} + 3\sigma)$] (nach Hunt et al., 1976) auf.

Buckisch und Költzsch (1999) wenden dieses Verfahren zur Bestimmung bodennahen Windkomforts an. Die Erwärmung der Oberfläche eines Stadtteilmodells erfolgt in ihrer Studie durch mehrere Scheinwerfer oberhalb des Modellgebiets. Aufgrund größerer Stationarität sowie größerer Reproduzierbarkeit der Verteilungsmuster der Oberflächentemperatur gegenüber der Muster der Sanderosionstechnik schlagen Buckisch und Költzsch vor, zur Bestimmung des Windkomforts (vgl. Kap. 2.5) die Thermographieuntersuchung den Ero-sionsstudien vorzuziehen.

Cook et al. (2002) adaptieren das Verfahren von Yamada für Untersuchungen der Oberflächentemperaturverteilung eines beheizten Würfelkörpers (Innentemperatur: 50°C) mit verschiedenartigen Oberflächenmaterialien. Die Temperaturverteilungen auf der Oberfläche zeigten eine konstante Mittelwertverteilung, variieren je nach Materialstärke stark in ihrer zeitlichen Auflösung. An dünnwandigen Oberflächen können zeitlich hochaufgelöste Messergebnisse von mehreren Deka-Hz erzielt werden.

²⁵ Die effektive Windgeschwindigkeit stellt ein Bewertungskriterium der Windkomfortstudien von Hunt et al. (1976) dar.

Rudolph et al. (2009) fanden eine gute Übereinstimmung zwischen dem Strömungsmustern der Umströmung eines Zylinders bei Streichlinienbildern und den Temperaturmustern einer überhitzten Oberfläche. Zeitlich hochaufgelöste Messungen mit einem Pyrometersystem zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit durch Heissfilmsensoren gemessene Wand-schubspannungsgeschwindigkeiten und -richtungen an der Modelloberfläche.

In Analogie zur Verwendung von Heissfilmsensoren untersuchen Mayer et al. (1998) den Temperaturgradienten einer Oberfläche um qualitative Aussagen über die Wandschubspannung treffen zu können. Durch Laserbestrahlung wird ein definierter Bereich eines Wandelements bis zum Erreichen eines stationären Temperaturzustands erhitzt. Nach Erreichen des stationären Zustands wird die Laseremission abgeschaltet und das Abklingen der Temperatur bzw. die Veränderung der Oberflächentemperaturverteilung mit einem Strahlungspyrometer detektiert. Durch die Veränderung der Oberflächentemperatur kann hochaufgelöst der Wärmeübergang, die Wandschubspannung und somit die Wandschubspannungsgeschwindigkeit bestimmt werden.

In der Windkanalstudie soll das **Ventilationspotential** eines urbanen Raumes untersucht werden. Analog zu dem Versuchsaufbau von Mayer et al. (1998) wird lokal der Modellboden erhitzt. Anders als bei den vorgestellten Verfahren wird das bestehende Stadtteilmodell (Styrodurkörper auf MDF-Bodenplatten) verwendet, eine thermische Entkopplung einzelner Messpositionen kann aufgrund des Modellaufbaus nicht realisiert werden. Die Erhitzung des Modellbodens erfolgt mittels einer Leuchtquelle, sowohl der Erwärmungsprozess als auch das Abklingen der Temperatur wird mittels eines Strahlungspyrometers zeitlich hochauf-gelöst detektiert (Abb. 4-2).



Abb. 4-2: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus: Messungen des Ventilationspotentials über die Oberflächenwärmeemission.

4.2.3 Bestimmung des lokalen Ventilationspotentials durch bodennahe Tracergasfreisetzungen

Das **Ventilationspotential** eines Stadtraums kann ebenfalls mit Traceranalysen bestimmt werden. Im Betrachtungsraum erfolgt eine Traceremission aus einer mobilen Flächenquelle sowie eine zeitlich hochaufgelöste Konzentrationsmessung mittels eines Fast-FID-Systems. Aus diesen Konzentrationsmessungen kann ein Rückschluss auf das Ventilationspotential erfolgen, indem die lokale Tracerkonzentration betrachtet wird. Es erfolgt kein Tracereintrag durch die Strömung von außerhalb in das Betrachtungsvolumen hinein.

Der Modellaufbau (Flächenquelle im Betrachtungsraum, vgl. Abb. 4-3) folgt den Ansätzen zur Bestimmung der Ventilation innerhalb eines Straßenraums (vgl. Kap. 4). Innerhalb des Stadtteilmodells Hamburg-Wilhelmsburg sind viele Messungen an verschiedenartigen Messpositionen vorgesehen, um sowohl individuelle Charakteristika einzelner Standorte zu untersuchen als auch räumliche Charakteristiken zu identifizieren.

Der Einbau von Quellen in den Modellboden ist nicht realisierbar, da an jeder möglichen Messposition eine Flächenquelle benötigt wird; eine "mobile" Flächenquelle muss für diese Untersuchungen entwickelt und getestet werden. Zu beachten ist, dass die zu entwickelnde Flächenquelle eine geringe vertikale Ausdehnung besitzen muss, um eine Beeinträchtigung des bodennahen Strömungsfelds zu verhindern. Diese Methodik liefert gegenüber der in Kap. 4.2.2 vorgestellten Methodik eine vollständigere Betrachtungsweise, da ein Transport des Tracers von der Modelloberfläche nicht mit einem Verlassen des Betrachtungsraumes gleichzusetzen ist, wie bspw. in Rezirkulationsgebieten im Gebäudenachlauf oder in Innenhöfen.

Für ein besseres Verständnis der Ventilation wird kein absoluter Konzentrationswert (vgl. Hu und Yoshie, 2013) sondern ein Referenzwert der Konzentration verwendet. Eine mögliche Referenz bietet bspw. ein schlechtbelüfteter Innenhof als Negativbeispiel der Belüftung.



Abb. 4-3: Prinzipskizze des Versuchsaufbaus: Messungen des Ventilationspotentials mit einer Flächenquelle.

Die Ventilationsuntersuchungen werden im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg durchgeführt, einem detaillierten Stadtteilmodell im Maßstab 1:350. Da ein real existierendes Stadtteilmodell mit einer sehr heterogenen Baustruktur untersucht wird, muss das Betrachtungsvolumen für die Studien eindeutig definiert werden. Bei experimentellen Untersuchungen innerhalb eines idealisierten Straßenzugs kann dieses anhand der gleichförmigen Bebauungsstruktur bzw. bei numerischen Studien anhand der Gitterzellen des Modells erfolgen. Da die geplanten Untersuchungen in der "Straßenzugebene" durchgeführt werden, kann als Charakterisierungsmöglichkeit der lokalen urbanen Struktur u.a. der SVF (vgl. Kap. 2.3) herangezogen werden. Eine weitere mögliche Volumendefinition liefern Hang et al. (2012b). In der numerischen Studie von Hang et al. wird mittels einer Volumenquelle Tracergas im Straßenraum emittiert. Als Quellvolumen wählten Hang et al. den betrachteten Straßenzug sowie eine vertikale Ausdehnung (2 m_{fs}) als den von Menschen beeinflussten Bereich.

Für die Untersuchungen zum Ventilationspotential urbaner Räume im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg (Kap. 5.3) wird Betrachtungsvolumen analog zu Hang et al. definiert. Die überströmte Fläche der Emissionsquelle sowie der Abstand der Fast-FID-Kanüle über Quelle wird in dieser Studie als Betrachtungsvolumen der Ventilation angenommen.

5. Versuchsdurchführung der Ventilationsstudien

Im Kap. 4.2 wurden experimentelle Ansätze zur Bestimmung des urbanen Ventilations-verhaltens hinsichtlich einer Anwendung im Grenzschichtwindkanal diskutiert. Dieses Kapitel soll den experimentellen Aufbau sowie die Versuchsdurchführungen dokumentieren, des Weiteren soll eine erste Bewertung der Ergebnisse erfolgen. In Kap. 5.1 werden zwei Ansätze zur Bestimmung der Ventilationseffizienz diskutiert, Kap. 5.2 und Kap. 5.3 beschreiben je einen Ansatz zur Bestimmung des Ventilationspotentials.

5.1 Bestimmung der Ventilationseffizienz mit Hilfe bodennaher Tracergasfreisetzungen

Ziel der Studien ist es, die Ventilationseffizienz eines urbanen Raumes durch das Abklingverhalten einer Tracerkonzentration zu bestimmen. Es wird im Betrachtungsraum ein quasistationärer Zustand der Konzentration erzeugt und mittels eines zeitlich hochauflösendem Messverfahren das Abklingen der Konzentration und somit das Ausspülen des Tracers durch unbelastete Luft detektiert. Ein stationärer Konzentrationszustand ist innerhalb des urbanen Windfelds nicht möglich, es muss durch vielfache Wiederholungsversuche ein quasistationärer Zustand des Mittelwertes erzeugt werden (vgl. u.a. Salizzoni et al. (2007), Bady et al. (2008), Salizzoni et al. (2009)).

5.1.1 Charakterisierung der Ventilation mit bodennahen Quellen

Für die Windkanalstudie wurden in den Modellboden des Untersuchungsgebiest Emissionsquellen plan verbaut (vgl. Abb. 4-1). Zur Freisetzung von Tracergas werden magnetventilgesteuerte Quellen im Bypass-Modus verwendet. Durch diese gesteuerten Emissionsquellen kann ein präzise definierter Volumenstrom in definierten Intervallen freigesetzt werden. Bei geöffneter Kupplung des Ventils wird im Modell Ethan emittiert, bei geschlossenem Ventil wird das Indikatorgas durch einen Bypass aus dem Windkanallabor geführt. Dieser Bypass verhindert einen Druckaufbau bei geschlossener Zuführung und ermöglicht ein kontrolliertes, impulsarmes Emittieren des Tracergases. Die Detektion der emittierten Tracergase erfolgt mittels eines Fast-FIDs (vgl. Kap. 3.3) mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 60 Hz. Das Tracergas wird über eine Kanüle (Länge: 300 mmms, Øaußen: 0.8 mmms, Øinnen: 0.32 mmms) der Brennkammer des FIDs zugeführt, eine Beeinflussung des Windfeldes am Entnahmeort der Probe kann aufgrund des Abstandes der Probeentnahme zur FID-Brennkammer vernachlässigt werden. Das Fast-FID ist an die Traverse montiert und kann somit in allen drei Raumachsen mit einer Genauigkeit von 0.1 mm_{ms} positioniert werden. Während der Untersuchungen wurde Ethan (C_2H_6) als Tracergas verwendet. Das Dichteverhältnis von Ethan zu Luft beträgt 1.0481, somit sind keine schwereinduzierten Störungen des Strömungsfeldes aufgrund von Dichteunterschieden zu erwarten.

In Abb. 5-1 ist ein Ausschnitt der Konzentrationszeitserie dargestellt. Das Triggersignal zeigt die Öffnung der Magnetventile an, innerhalb dieser Intervalle wird durch die Tracergasquelle bodennah Ethan emittiert. Nach dem Schließen der Zuleitung des Tracers ins Modellgebiet (Triggersignal: 0 V) wird die Tracerkonzentration aus dem Betrachtungsvolumen gespült. Nach vollständiger Spülung der Konzentration erfolgt eine erneute Quellöffnung. Je nach Messposition und somit Abstand des Fast-FIDs vom Emissionsort variiert sowohl die Quell-

öffnungs- als auch die Schließzeitdauer, sodass für jede Messposition eine quasistationäre Beimpfung des Betrachtungsgebiets sowie ein vollständiges Auswaschen des Indikatorgases gesichert ist. Die Mindestschließzeit der Quelle beträgt in den durchgeführten Versuchen das 1.15-fachen der Emissionszeit.

Deutlich zu erkennen ist in Abb. 5-1 die Varianz der Einzelereignisse des Konzentrationssignals. Für ein statistisch repräsentatives Ergebnis wird eine Vielzahl von Wiederholungsmessungen benötigt. Ähnlich der Geschwindigkeitsmessungen wird bei einer einzelnen Untersuchung nur ein kurzer Ausschnitt der vorherrschenden Austauschvorgänge betrachtet. Bei einer ausreichend großen Stichprobe kann jedoch ein repräsentativer quasistationärer Mittelwert der Konzentration erreicht werden (vgl. Abb. 5-2).



Abb. 5-1: Ausschnitt einer Zeitserie der Konzentrations-Abklingversuche.

Nachdem ein quasistationärer Zustand der Tracerkonzentration im Betrachtungsraum sichergestellt werden kann, wird nun der Fokus der weiteren Betrachtung auf das Abklingen des Konzentrationssignals gelegt. In Abb. 5-3 wird das mittlere Abklingverhalten des Tracers den Einzelergebnissen der 160 Wiederholungsversuche gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen ist die Bandbreite der Einzelwerte um einen statistischen Mittelwert. Für eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse werden bei nachfolgenden Untersuchungen die gemessenen Konzentrationssignale auf die Intensität der quasistationären Konzentration normiert und lediglich das Abklingverhalten der Konzentration betrachtet.



Abb. 5-2: Darstellung einer Spülzeitanalyse. Rot: mittlere Konzentration in einem Straßenzug, grau: Ergebnisse der Einzelmessungen.



Abb. 5-3: Detaillierte Betrachtung des Konzentration-Abklingvorgangs der mittleren und der einzelnen Tracergasfreisetzungen.

Vor der Analyse der Bandbreite der Konzentrations-Abklingversuche wurde in einer Vorstudie anhand die Anwendbarkeit dieses Verfahrens im urbanen Raum untersucht. Als ein erster Indikator dieses Verfahrens soll der statistische Mittelwert des Abklingverhaltens betrachtet werden. Das gewählte Untersuchungsgebiet dieser Vorstudie besteht aus einem Modell mit innerstädtischem Bebauungstyp: einer dichten Bebauungsstruktur mit hoher vertikaler Ausdehnung sowie ausgeprägten Straßenzügen.

In einen ersten Testfall wird das Abklingverhalten der Tracerkonzentration an einer Freifläche im Stadtgebiet untersucht (Abb. 5-4 oben). Die Freifläche befindet sich innerhalb desselben Straßenzugs der Emissionsquelle und stromab der Quellposition. Die beiden Messorte sind in Strömungsrichtung am Auslass (Pos. A) sowie am Einlass (Pos. B) der Freifläche gelegen, in einer Quellentfernung von 280 m bzw. 250 m. Das Abklingverhalten beiden Signale korreliert miteinander, die Kurvenverläufe der Anpassungsfunktionen sind nahezu Deckungsgleich. Dieses Ergebnis ist erwartet worden, da ein freies Gelände betrachtet wurde und keine Störkörper zwischen den Messpositionen existieren.

Im nächsten Schritt wird die Sensitivität des Abklingverhaltens bei verschiedenartigen geometrischen Randbedingungen untersucht (Abb. 5-4 unten). Pos. C und Pos. D befinden sich stromab der Quelle in verschiedenen Straßenzügen in vergleichbarer Quellentfernung (ca. 150 m). Die Bebauungshöhen der Straßenzüge sind vergleichbar, die Straßenbreite und die Bauwerksgeometrie in Anströmungsrichtung ebenfalls. Die Anzahl der Wiederholungsversuche beider Messpositionen ist identisch. Unterschiedlich ist der jeweilige Straßenverlauf im Nachlauf der Messpositionen: Stromab Pos. C erweitert sich der Straßenverlauf, stromab Pos. D verjüngt sich dieser.

Aus Abb. 5-4 unten wird ersichtlich, dass sich kleinräumige Variationen in der Bebauungsstruktur sensitiv auf das mittlere Abklingverhalten einer Tracergaskonzentration auswirken. An der Pos. C wirken sich diese Variationen verzögernd auf den Luftaustausch im Straßen-zug aus. Der halblogarithmischen Darstellung kann entnommen werden, dass sich der Gradient des Abklingverhaltens geringer ausprägt. Ein 50-prozentiger Luftaustausch im Betrachtungsraum weist, im Vergleich der beiden betrachteten Straßenzügen, eine zeitliche Differenz von ca. 60 Sekunden auf. Aufgrund des exponentiellen Charakters des Abklingens einer Tracergaskonzentration überlagert sich das Auswaschverhalten geringer Konzentrationen (< 10 %).

Anhand der durchgeführten Voruntersuchungen konnte gezeigt werden, dass mittels der Erfassung des Abklingverhaltens einer Tracergaskonzentration die lokale Ventilationseffizienz bei Messpositionen mit vergleichbarem Quellabstand sensitiv erfasst werden kann. Exemplarisch sind in Abb. 5-5 zwei Messpositionen in unterschiedlicher Entfernung zur Emissionsquelle gegenübergestellt, beide Positionen befinden sich innerhalb eines geometrisch vergleichbaren urbanen Umfelds.

Die Abb. 5-5 verdeutlicht den Einfluss der Quellentfernung auf das Abklingverhalten der Konzentration. Ersichtlich ist eine Schwächung des Abklinggradienten in größerer Entfernung zur Emissionsquelle und somit eine Verzögerung des Abklingens der Konzentration. Anhand des Kurvenverlaufs wird weiterhin die Beeinflussung des Abklingverhaltens der Konzentration durch eine "Speicherwirkung" der urbanen Geometrie zwischen der Quelle und der Messposition E ersichtlich. Nach Beendigung der Tracergasemission verringert sich die

Konzentration im Straßenzug aufgrund des lokalen Luftaustauschs. Das mittlere Messergebnis dieser Position nähern sich zeitlich verzögert (ca. 2.5 Minuten_{fs}) einer exponentiellen Anpassung an das Abklingverhalten an, da sich das Abklingen der Konzentration mit einem gleichzeitigen Tracergaseintrag aus Auswaschvorgängen stromauf gelegener Strukturen überlagert.



Abb. 5-4: Vergleich des Abklingens der Konzentration in verschiedenen urbanen Strukturen: Freifläche im Stadtgebiet (Pos. A-B, oben), Messposition innerhalb eines Straßenzugs (Pos. C-D, unten).



Abb. 5-5: Vergleich unterschiedlicher Quellentfernungen auf das Abklingverhalten des Tracergases.

Ziel dieser Studie ist es die Ventilationseigenschaften eines Ortes im urbanen Raum in Abhängigkeit von der **lokalen** Bebauungsstruktur zu untersuchen. Durch Anwendung dieses Versuchsaufbaus übt der Einfluss der Quellentfernung und somit der Einfluss der urbanen Struktur im Luv des Messortes einen messtechnisch nachweisbaren Einfluss auf das Abklingverhalten einer Tracerkonzentration im Betrachtungsvolumen aus. In nachfolgenden Untersuchungen muss für vergleichbare Ergebnisse aller Versuche der Abstand der Quelle zur Messposition konstant sein.

Vergleichsstudien in verschiedenen Bebauungszuständen, in denen die Differenz des Eintrags in das Betrachtungsvolumen ohne Berücksichtigung der lokalen Ventilationseffizienz untersucht wird (vgl. Buccolieri et al, 2011), können in dieser Versuchskonfiguration durchgeführt werden.

5.1.2 Lokale Freisetzungen durch mobile Quellen

Kap. 5.1.1 behandelte das Abklingverhalten einer Tracergaskonzentration aus einer in den Modellboden eingebrachten Quelle zur Bestimmung der lokalen Ventilationseffizienz. Diese Untersuchungsmethodik wurde verworfen, da das Abklingverhalten einer Tracerkonzen-tration von dem Quellabstand der Messpositionen beeinflusst wird (vgl. Abb. 5-5). In diesem Kapitel wird ein Ansatz mit mobilen Quellen in definiertem Abstand zu der Messposition vorgestellt, so dass eine Einflussnahme der Quellentfernung auf das Ventilationssignal ausgeschlossen werden kann.

Der Versuchsaufbau unterscheidet sich von der in Kap. 5.1.1 vorgestellten Methode durch die Tracergaszuführung ins Modellgebiet. Anstelle von fest in den Modellboden einge-brachten Quellen wird eine einzelne, an der Traverse montierte Quelle mit Magnetventil ver-wendet. Das Magnetventil befindet sich auf der Höhe des Fast-FIDs, eine Beeinflussung der Strömung im Straßenzug durch die Zuleitung des Tracergases kann als vernachlässigbar klein

angesehen werden. Die Gaszuführung erfolgt über eine Kanüle (Länge: 300 mm_{ms}, $Ø_{außen}$: 12 mm_{ms}, $Ø_{innen}$: 5.7 mm_{ms}) impulsarm in einer Höhe von 2 m_{fs} in das Modellgebiet. Diese Zuleitungskanüle ist während der Versuchsdurchführung mit Tracergas gefüllt, ein Verschlussstopfen aus Filtermaterial verhindert ein unkontrolliertes Impfen der Strömung bei geschlossener Gaszuführung. In Voruntersuchungen wurde der Abstand der Zuleitungskanüle zur Fast-FID-Kanüle auf 250 mm_{ms} bestimmt. In dieser Entfernung erfolgt eine ausreichend große Verdünnung des Indikatorgases um eine konstante Beschickung des Messvolumens zu gewährleisten.



Abb. 5-6: Messprinzip: Tracergasfreisetzung mit mobiler Tracerzuführung.

Abb. 5-6 skizziert dieses Messprinzip. Das Ausschlusskriterium des in Kap. 5.1.1 auf ihre Anwendbarkeit in den urbanen Raum getesteten Messverfahrens ist das unterschiedliche Abklingverhalten der Tracerkonzentration bei Quellabstandsvariation der Messpositionen. Durch Gewährleistung eines äquidistanten Abstands können die in Kap. 5.1.1 getroffenen Aussagen erweitert werden, die Betrachtung des Abklingsignals der Konzentration wird in diesem Kapitel über die Mittelwertbetrachtung hinausgehen.

Aus der mobilen Quelle wird, bis zum Erreichen eines quasistationären Konzentrationszustands im Messvolumen, Tracergas freigesetzt. Nach Erreichen dieses Zustandes wird die Tracerzuführung in das Modellgebiet unterbrochen und das Abklingverhalten des Tracers detektiert. Da für ein statistisch repräsentatives Ergebnis die Versuche vielfach wiederholt werden müssen²⁶, wurde je Messposition eine Mindestanzahl von 150 Versuchswiederholungen festgelegt.

²⁶ Harms (2010) untersuchte die Bandbreite der Ergebnisse verschiedener Parameter bei Tracerversuchen in Abhängigkeit von der Stichprobengröße. Seinen Untersuchungen zufolge müssen für ein statistisch repräsentatives Ergebnis die Versuche unter stationären Randbedingungen vielfach wiederholt werden. Bei geringer Stichprobenanzahl kann die Bandbreite der Ergebnisse einzelner Parameter > 100 % betragen.

Aufgrund der Vielzahl der Wiederholungsversuche sowie einer hohen zeitlichen Auflösung des Fast-FID-Systems kann neben der einer Untersuchung des mittleren Abklingverhaltens der Konzentration die Bandbreite der Ergebnisse betrachtet werden. Als Beispiel für eine Bandbreitenbetrachtung des Konzentrationsabklingverhaltens soll Abb. 5-7 dienen. In der Abbildung ist die dimensionslose Konzentration c*, normiert auf die quasistationäre Tracer-konzentration, über den zeitlichen Verlauf des Abklingvorgangs aufgetragen. Aus den Wiederholungsversuchen wurde die Auftretenshäufigkeit der normierten Konzentration in 1 %-Schritten je Zeitschritt bestimmt, sodass im Vergleich zu Kap. 5.1.1 in dieser Betrach-tung die hochaufgelöste Bandbreite der Konzentration dargestellt werden kann (vgl. Abb. 5-3, mittleres Abklingverhalten). Die Auftretenshäufigkeit der normierten Konzentration c* zu jedem Zeitschritt ist über die Farbkodierung verdeutlicht.



Abb. 5-7: Bandbreite der normierten Konzentration c* im Betrachtungsvolumen während des Abklingvorgangs.

Aus Abb. 5-7 wird neben der exponentiellen Abnahme der Konzentration auch die Band-breite der Messergebnisse ersichtlich. Der Abbildung kann bspw. entnommen werden, dass die n_{50} -Konzentration bei den gewählten Randbedingungen von ihrem Mittelwert bis zu den Extremereignissen eine Zeitspanne von 4 min_{fs} aufweist. Weiterhin kann der Abbildung die Bandbreite der Konzentration sowie deren Variabilität über jeden Betrachtungszeitschritt des Spülzeitraums entnommen werden. Nach bspw. zweiminütiger Abklingzeit kann hier eine Bandbreite der auftretenden Konzentrationen von 85 % abgeschätzt werden, nach fünfminütiger Spülzeit ist diese auf 40 % gesunken, nach einer Spülzeit von 10 Minuten beträgt die vorhandene Bandbreite < 10 % der quasistationären Konzentration.


Abb. 5-8: Betrachtung des Abklingverhaltens der Konzentration einer Position in verschiedenen Höchenstufen, dargestellt sind ausgewählte Perzentile der Konzentration.

Für die Untersuchungen der Ventilationseffizienz muss eine ideale Messhöhe innerhalb des Modellgebiets gefunden werden, da für die Messpositionen repräsentative Abklingverläufe bestimmt werden sollen. An einer Messposition wurde der Tracerversuch in verschiedenen Höhenstufen durchgeführt, innerhalb der urbanen Bebauungsstruktur konnte ein vergleichbares Spülverhalten festgestellt werden. Abb. 5-8 zeigt ausgewählte Perzentile der Konzentrationsverteilung dreier Messhöhen auf. Deren Übereinstimmungen im Abklingverlauf decken sich mit den Untersuchungen von Salizzoni et al. (2009), eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Wahl der Messhöhe im Straßenraum kann als vernachlässigbar klein angesehen werden. Da neben Stadtstrukturen auch die Freiflächen im Modellgebiet untersucht werden, wurde für die Windkanalstudien eine Höhe von 2.5 m_{fs} gewählt.

In Abb. 5-9 erfolgte ein Vergleich des Abklingverhaltens der Konzentration an einer Position für verschiedene Bebauungszustände. Dargestellt ist die Differenz der Verteilung der Konzentration zu des Plan-Zustands subtrahiert von der Verteilung der Konzentration des Ist-Zustands (Ist-Zustand - Plan-Zustand) zu jedem Betrachtungszeitschritt. Die Differenz der Verteilungen ist farbcodiert dargestellt, bei blauer Schattierung dominiert der Ist-Zustand, in rötlicher Färbung überwiegt der Plan-Zustand. Eine annähernde Gleichverteilung des Auftretens wird durch eine gelbe Färbung aufgezeigt. Aus Abb. 5-9 wird die Auswirkung der Umstrukturierung auf die Ventilationseffizienz ersichtlich.



Abb. 5-9: Differenz der Verteilungen des Abklingverhaltens im Zuge der Umstrukturierungen im Stadtgebiet Hamburg-Wilhelmsburg, Nullzustand - Planzustand.

Das Abklingverhalten in den ersten Zeitschritten der Abb. 5-9 ist annähernd gleichverteilt, ab Minute 1.5 können anhand der dominanten Farbverläufe, zwei verschiedenartige Abklingverläufe identifiziert werden. Bei näherungsweise identischen versuchstechnischen Randbedingungen (Freisetzungsmenge des Tracergases, Öffnungs- und Schließzeiten des Magnetventils) prägen sich verschiedene Spülkurven aus. An dieser Messposition kann eine zeitliche Verzögerung des Abklingverhaltens der Konzentration und somit eine Beeinträchtigung der Ventilation aufgrund der Umstrukturierungen im Stadtgebiet nachgewiesen werden.

Die Bestimmung der Messunsicherheit der Spülversuche kann analog zu den Vergleichen verschiedener Bauzustände erfolgen. Die durchgeführten Wiederholungsversuche während der Messungen der Ventilationseffizienz wiesen eine qualitativ gute Wiederholbarkeit auf, die mittleren Verläufe der abklingenden Konzentration zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Bei der Betrachtung aller durchgeführten Wiederholungsmessungen einer Messposition kann kein abweichendes Ventilationsverhalten festgestellt werden, das Abklingverhalten ist als gut reproduzierbar anzusehen. Auf eine detaillierte Betrachtung des Mittelwerts und die Bestimmung einer mittleren Unsicherheit der Bandbreite wurde aufgrund der guten Wiederholbar-keit zunächst verzichtet.

Die durchgeführten Untersuchungen zur Ventilationseffizienz im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg mit diesem Messverfahren beschränken sich auf Positionen innerhalb der urbanen Struktur, auf Straßenschluchten und Innenhöfe, da der Eintrag von Tracern in das Betrachtungsvolumen sowie deren Speicherwirkung nur innerhalb dieser Strukturen detektiert werden kann. Außerhalb dieser geometrisch klar definierten Begrenzungen konnte keine quasistationäre Konzentration über einen messtechnisch auflösbaren Zeitraum gewährleistet werden. Abb. 5-10 zeigt eine Abklingkurve der Konzentration an einer vergleichsweise gut durchlüfteten Position. Trotz Erreichen einer quasistationären Tracer-konzentration während der Tracerzuleitung können keine Aussagen über den Abklingverlauf getroffen werden, da ein direkter Austrag des Indikatorgases aus dem Betrachtungsraum erfolgt. Eine Differenzierung zwischen verschiedenen Bauzuständen oder Messpositionen ist ebenfalls nicht möglich.

Abb. 5-11 zeigt einen Ausschnitt aus einem Zeitschrieb der Konzentration bei kontinuierlicher Tracerzuleitung ins Modellgebiet, gemessen an einer Position in gelockerter Baustruktur. Bedingt durch das vollständige Spülen des Betrachtungsvolumens kann an dieser Position kein stationäres Konzentrationsniveau erreicht werden.

Den Abbildungen Abb. 5-10 und Abb. 5-11 kann entnommen werden, dass mit der Messmethodik der Ventilationseffizienz in dem Modellgebiet keine räumlich hochaufgelösten Untersuchungen durchgeführt werden können. Für die Quantifizierung der lokalen Auswirkungen des Umstrukturierungsgebiets auf das Durchlüftungsverhalten des Stadtteils werden im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg ergänzende Untersuchungen des Ventilationspotentials durchgeführt.



Abb. 5-10: Spülgraduntersuchung einer Freifläche im Stadtgebiet.



Abb. 5-11: Zeitschrieb der Konzentration einer kontinuierlichen Freisetzung in einer gut ventilierten Messposition (gelockerte Baustruktur).

5.2 Beschreibung des Ventilationspotentials durch systematische Erfassung der Oberflächentemperatur

In systematischen Windkanalstudien soll ein experimenteller Bestimmungsansatz der Beeinflussungen von Bauwerken auf das lokale Ventilationspotential gefunden werden. Nach Yamada et al. (1996) prägt sich die Oberflächentemperatur eines Modells analog zu der bodennahen Windgeschwindigkeit aus. Für die Untersuchungen soll ein zu Mayer et al. (1998) vergleichbarer Versuchsaufbau realisiert werden. Statt einer Überhöhung der Oberflächentemperatur im gesamten Modellgebiet (vgl. auch Buckisch und Költzsch, 1999) wird eine lokale Temperaturerhöhung erfolgen. Der Austausch belasteter Luft im Stadtraum kann als analog zu dem Transport der Wärmeenergie angesehen werden.

Für die Untersuchungen im Windkanal wurde an dem Traversiersystem eine Beleuchtungseinheit montiert, sodass an verschiedenen Positionen im Modellgebiet eine lokale Überhitzung durch einen scharf abgegrenzter Lichtkegel auf der Kanalbodenoberfläche erzeugt werden kann. Als Leuchtmittel dient eine Halogenlampe mit gleichförmiger Lichtkegelintensität ohne Abschattungsflächen innerhalb des Lichtkegels (250 Watt, Fa. Omnilux, 10 V, 50 mm Durchmesser, ohne Wärmespiegel). Die Bestrahlungsintensität der Lampe auf die Bodenoberfläche kann über das Integral der Lichtkegelfläche als konstant angenommen werden. Die konzentrierte Bestrahlung führt zu einer Erwärmung der Modellbodens im Bereich des Lichtkegels, welche durch ein Strahlungspyrometer detektiert werden kann. In den Modellversuchen wird die Bodenfläche durch die Beleuchtungseinheit bis zum Erreichen eines stationären Zustandes erwärmt. Nach Erreichen dessen wird die Leuchtquelle ausgeschaltet und das Abklingverhalten der Temperatur durch ein Pyrometer detektiert. Dies ermöglicht es, Zeitserien der Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) hochaufgelöst und beein-flussungsfrei zu erfassen (vgl. Mayer et al., 1998). Da über den lokalen Wärmeübergang die Wandschubspannungsgeschwindigkeit (Mayer, 2000) und somit die lokale Windgeschwindigkeit bestimmt werden kann, soll anhand des Wärmetransfers ein Ansatz zur Beschreibung des Ventilationspotentials gefunden werden.



Abb. 5-12: Messprinzip: Oberflächenwärmeemission.

Der verwendete Versuchsaufbau ist in Abb. 5-12 skizziert. An der Traverse wurde ein Infrarot-Strahlungspyrometer der Fa. Heidtronic (KT 19.85 II) befestigt, somit kann das Pyrometer im gesamten Untersuchungsgebiet millimetergenau platziert werden. Das KT 19.85 ist senkrecht in einer Höhe von 600 mm über Grund montiert und verfügt in dieser Höhe über ein kreisförmiges Messvolumen mit einem Durchmesser von 50 mm. Da das Strahlungspyrometer die Oberflächentemperatur über das Messvolumen integriert kann mittels eines Glühfadens die exakte Orientierung des Messvolumens bestimmt und somit die senkrechte Ausrichtung sichergestellt werden. Bedingt durch die Pyrometerausrichtung befindet sich das Beleuchtungssystem außermittig an der Traverse, ebenfalls in einer Höhe von 600 mm sowie thermisch entkoppelt. Das durch den Lichtkegel auf dem Modellboden aufgespannte Ellipsoid besitzt die Halbachsen 50 mm und 55 mm. Konvektionsströmungen innerhalb des Modells sind aufgrund der geringen Temperaturunterschiede ($\Delta T \le 10$ K) zu vernachlässigen.

In den Voruntersuchungen im Windkanal wurde bei konstanten Randbedingungen die Bodenplatte²⁷ eines idealisierten Stadtteilmodells über einen definierten Zeitraum erwärmt. Der Oberflächentemperaturverlauf wurde sowohl während der Anstiegs- als auch der Abklingphase detektiert. Analog zu den durchgeführten Tracerversuchen wurde bei dieser Methodik die Oberfläche bis zum Erreichen einer annähernd stationärer Oberflächentemperatur erwärmt. Da sich die Oberflächentemperatur und somit der Dauer der Erwärmung je nach

²⁷ Bestehend aus einer 10 mm dicken Holzfaserplatte.

Messposition verschieden ausprägt, werden in der nachfolgenden Betrachtung definierte Überhitzungs- und Abklingphasen betrachtet.

In Abb. 5-13 sind Wiederholungsversuche des Überwärmungs- und Abklingverhaltens der Oberflächentemperatur in zwei stark überhöhten, stark idealisierten urbanen Konfigurationen dargestellt. Je nach Bebauungsstruktur bilden sich verschiedenartige Temperaturverläufe der Modelloberflächen aus (vgl. Yamada, 1996).

Abb. 5-14 zeigt die Temperaturdifferenz Theta zwischen zwei Messzeitschritten²⁸ über der Messdauer auf. In der ersten Stufe der Untersuchungen, der Validierung des Messprinzips, wird vorerst das mittlere Abklingverhalten der Temperatur betrachtet (vgl. Kap. 5.1.1). Ersichtlich wird eine starke Streuung der mittleren Temperaturdifferenz. Die Bildung eines gleitenden Mittelwerts ($t_i \pm 3 s_{ms}$) zeigt einen Trend des Abklingverhaltens der Temperatur-differenz auf, eine Anpassung an diesen Trend weist ein Bestimmtheitsmaß R² = 0.7519 auf.

In Abb. 5-15 ist ein Abklingverlauf der Oberflächentemperatur über der Zeit in halblogarithmischer Darstellung aufgezeigt. Neben den gemessen Rohdaten sind eine exponentielle sowie eine polynominalen Anpassung an die gemessene Oberflächentemperatur dargestellt. Der Korrelationskoeffizient der Anpassung beider Funktionen mit einem Bestimmtheitsmaß R² von je > 0.98 ist als sehr gut zu betrachten. Auffallend ist der Bereich der Abklingkurve unmittelbar nach dem Abschalten der Wärmequelle. Nach dem Newton'schen Abkühlungsgesetz wird ein exponentielles Abklingen der Oberflächentemperatur erwartet, eine polynominale Anpassung weist aufgrund der Streuung in den ersten Zeitschritten des Abklingverhaltens eine bessere Anpassung auf. Beeinflussende Effekte einer mögliche Überhitzung der Oberfläche können in diesem Falle ausgeschlossen werden, da in verschieden Zeitabschnitten individuelle Anpassungen vorgenommen wurden. Abb. 5-16 zeigt einen Versuch mit, im Vergleich zu Abb. 5-15, deutlich verlängertem Messintervall. Ersichtlich wird die Abweichung des Abklingverhaltens der Oberflächentemperatur von einem prognostizierten, exponentiellen Verlauf.

Im Zuge dieser Arbeit wurden, neben der Betrachtung der Einflüsse variabler Bebauungsstrukturen und variabler Windgeschwindigkeiten, Sensitivitätsstudien zu den Auswirkungen verschiedenartiger Untergrundmaterialien und unterschiedlicher Farbgebung (gefärbter Modellboden und Stadtteilmodelle) hinsichtlich der Signalgüte durchgeführt. Diese Variationen zeigten keine eine Annäherung des Abklingsignals des Temperaturverlaufs an ein exponentielles Verhalten (vgl. Abb. 5-16).

²⁸ Als Messzeitschritt dargestellt sind die mittleren Temperaturwerte über je 1s_{ms}.



Abb. 5-13: Vorversuche zur Erfassung der Oberflächentemperatur in verschieden urbanen Bebauungskonfigurationen.



Abb. 5-14: Anpassung einer mittleren Temperaturdifferenz Theta über gleitend gemittelte Temperaturdifferenzen pro Messzeitschritt.



Abb. 5-15: Anpassungen eines mittleren Abklingverhaltens der Oberflächentemperatur an das Signal durch verschiedene Funktionen, semilogarithmische Darstellung.



Abb. 5-16: Anpassungen eines mittleren Abklingverhaltens der Oberflächentemperatur an das Signal durch verschiedene Funktionen, semilogarithmische Darstellung, langfristige Betrachtung der Zeitserie.

Ebenfalls konnten mit dieser Messmethodik bei Wiederholungsversuchen zu geringen Variationen der Bebauungsstruktur²⁹, wie sie innerhalb des Stadtraums Hamburg-Wilhelmsburg auftreten, nicht aufgelöst werden. Die Streuung der Einzelversuche um einen Mittelwert war in jedem der betrachteten Fälle stärker als die Unterschiede des Abklingverhaltens bei verschiedenen Betrachtungsräumen.

Aufgrund der starken Streuung der Messergebnisse wurde diese Untersuchungsmethodik verworfen.

5.3 Bestimmung des Ventilationspotentials anhand von flächigen Emissionsquellen

Zur Bestimmung des Ventilationspotentials innerhalb des urbanen Raumes wird in den durchgeführten Windkanalstudien über eine Flächenquelle ein Tracer freigesetzt und im Betrachtungsraum, oberhalb der Quellposition, detektiert. Das Messkonzept im Stadtteilmodell Hamburg-Wilhelmsburg sieht vor, Vergleichsstudien in unterschiedlichen Stadtraumtypen (Kleingartenanlagen, verdichtetes Wohngebiet in Bahnhofsnähe, Neubauten der IBA) sowie Aussagen über die Änderungen des Ventilationspotentials aufgrund der Umstrukturierung des Stadtquartiers durchzuführen. Eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse im gesamten Untersuchungsgebiet wird angestrebt.

Daraus lassen sich zwei Voraussetzungen ableiten:

Die Emissionsquellen müssen im Modellgebiet **frei positionierbar** sein, da an einer Vielzahl von Positionen im Stadtmodell gemessen werden soll.

Aus der Forderung nach der Vergleichbarkeit folgt, dass für alle Messpositionen die **gleichen Randbedingungen** gelten müssen. Daraus folgt, dass die Konzentrationsmessungen an allen Messpositionen relativ zur Quelle erfolgen müssen. Dieses ist zu gewährleisten, wenn die Konzentration zentrisch über der Emissionsquelle detektiert wird. Zur Gewährleitung einer für alle Anströmungsrichtungen vergleichbaren Überstreichungslänge ist ein kreisförmiges Layout der Flächenquelle zu wählen. Limitierend für die Quelldimensionen ist die Straßenbreite innerhalb des Modellgebiets. Gewählt wurde eine Quelldurchmesser $B_Q < B_{S\,98}$ von 48 mm, sodass in 98 % aller Straßenzüge des Modellgebiets Konzentrationsmessungen durchgeführt werden können (Abb. 5-17).

Für die Versuche im Grenzschichtwindkanal muss eine neuartige Emissionsquelle entworfen werden. Neben der Mobilität der Flächenquelle muss sichergestellt werden, dass durch die Emissionsquelle das bodennahe Windfeld nicht gestört wird. Die skizzierten Eigenschaften können durch eine auf der Modelloberfläche aufliegenden Emissionsquelle erfüllt werden, bisher verwendete Quelltypen eignen sich aufgrund ihrer äußeren Dimensionen nicht.

²⁹ Abb. 5-13 zeigt Wiederholungsversuche der Messungen in einem idealisierten, stark überhöhten Bebauungszustand.



Abb. 5-17: Vergleich der gewählten Quellgröße zur gewählten Mindeststraßenbreite, schematische Darstellung. Links: Frontalansicht, rechts: Draufsicht.

Zur Gewährleistung einer definierten, gleichförmigen Tracergasfreisetzung während der Versuche wurden Freisetzungsdauertests mit verschiedenen Tracer- und Trägermaterialien durchgeführt. Die Flüchtigkeit von Lösungsmitteln ausnutzend können kontinuierlich beschickende Flächenquellen³⁰ realisiert werden.

In Vortests konnte die Eignung verschiedener Lösungsmittel hinsichtlich der Emissionsdauer validiert werden. Isopropanol (auch: 2-Propanol, Isopropylalkohol; Summenformel: C_3H_8O bzw. C_3H_7OH , Stoffeigenschaften in: Rappoport und Frankel, 1967) wies von den getesteten Lösungsmitteln die günstigsten Eigenschaften auf, da bedingt durch die Molekularstruktur ein langanhaltender Volatilitätsprozess gewährleistet wird (Eickmann, 2008) und somit eine quasikonstante Beimpfung mit Indikatorgas erfolgt.

Zu Beginn der Voruntersuchungen im Windkanal wurden verschiedenartige Trägermaterialien mit Isopropylalkohol gesättigt. Unter realistischen Testbedingungen in einem idealisierten Stadtteilmodell konnte eine konstante Freisetzungsrate des Tracers über einen hinreichend langen Zeitraum (> 10 Minuten) durch zwei Materialien (Aquarellpapier der Stärke 650 g/m² sowie Filz) erfüllt werden. Mit der Wahl Aquarellpapier als Träger zu nutzen konnten sehr dünne Emissionsquellen (< 1 mm) realisiert werden. Eine Beeinflussung der Flächenquelle auf das bodennahe Windfeld kann somit als vernachlässigbar klein angesehen werden. Die Eigenschaften der Emissionsquelle sind in Tabelle 5-1 gelistet.

Material	Durchmesser	Durchmesser	Dicke	Dicke
	[mm _{ms}]	[m _{fs}]	[mm _{ms}]	[m _{fs}]
Aquarellpapier (650 g/m²)	48	16.8	< 1	< 0.35

Tahelle	5-1.	Figenschaften	der	kreisförmigen	Flächenquelle
lanelle	5-1.	Eigenschalten	uer	Kielslollingen	Flachenquelle.

Zur Detektion der Konzentration an der Messposition wird ein Fast-FID-System verwendet, die Tracerkonzentration wird zentrisch über der Quelle gemessen. Die Flächenquellen sind

³⁰ Ohne evtl. auftretende Versperrungseffekte durch Zuleitungen o.ä..

kreisförmig ausgebildet und besitzen somit für alle Anströmrichtungen eine gleichbleibende Überstreichungslänge. Um die Quellcharakteristiken der Ventilationsversuche grundsätzlich zu veranschaulichen wird in diesem Kapitel zunächst, analog zu Kap. 5.1.1, der Mittelwert der relativen Konzentration betrachtet.

Vor jedem Messbeginn wurde, nach einer hinreichend langen Aufwärmphase des FID-Systems, eine Kalibrierung gegen ein Worst-Case-Szenario (unbelüfteter Hinterhof bei Wind-stille) durchgeführt. Stichprobentests auf den Mittelwert belegen, dass diese Kalibrierung im Rahmen der Messunsicherheit über den Tagesverlauf konstant bleibt. Zur Minimierung einer diesbezüglichen Unsicherheit wurde das FID-System zwei- bis dreimal täglich kalibriert.

Für eine von äußeren Einflüssen unabhängige Betrachtung der detektierten Konzentrationen kann eine Übertragung der Konzentration in den dimensionslosen Kennwert c* anhand Gleichung 5-1 erfolgen (vgl. VDI, 2000).

$$c^* = \frac{c \cdot u_{ref} \cdot L_{ref}^0}{Q} \tag{GI. 5-1}$$

mit:

с	Volumenanteil	$[m^3/m^3]$
<i>u_{ref}</i>	Referenzwindgeschwindigkeit	[m/s]
L_{ref}^0	Referenzlänge, Exponent: 0 da Flächenquelle	[<i>m</i>]
Q	Emissionsvolumenstrom	$[m^3/s / m^2]$

Aus Gleichung 5-1 kann gefolgert werden, dass die oberhalb der Flächenquelle detektierte Konzentration sowohl von der gewählten Referenzwindgeschwindigkeit als auch von dem Emissionsvolumenstrom der Quelle abhängig ist.

In Abb. 5-18 ist das lokale detektierte Konzentrationssignal über verschiedenen Durchmessern der Flächenquelle in zwei gewählten Referenzwindgeschwindigkeiten aufgetragen. Ein steigender Durchmesser bedingt einen höheren Emissionsvolumenstrom, dieser korreliert linear mit der gemessenen relativen Konzentration. Neben dem linearen Trend wird eine stärkere Streuung der Ergebnisse der Konzentrationsmessung bei der geringeren Windgeschwindigkeit ersichtlich. Des Weiteren kann eine größere Streuung der Messergebnisse mit ansteigendem Emissionsquellendurchmesser festgestellt werden.

Abb. 5-19 zeigt das mittlere Konzentrationssignals über verschiedenen Referenzwindgeschwindigkeiten an zwei urbanen Konfigurationen auf. Der Abbildung kann entnommen werden, dass die gewählte Referenzgeschwindigkeit die Intensität des Konzentrationssignals im Betrachtungsraum beeinflusst. Die Windkanalversuche zur Bestimmung des Ventilationspotentials werden bei einer möglichst geringen Referenzwindgeschwindigkeit durchgeführt, um das transiente Verhalten der Durchlüftung detailliert auflösen zu können. Für die Versuchsdurchführung wurde, bei einer Abtastrate des Fast-FIDs von 50 Hz, eine Referenzgeschwindigkeit von 1.8 m/s gewählt. Aufgrund fehlender Wiederholungsmessungen in den betrachteten Fällen können in Abb. 5-18 und Abb. 5-19 keine Unsicherheitsbereiche an die Messergebnisse angetragen werden.



Abb. 5-18: Abhängigkeit des mittleren Konzentrationssignals von dem Quelldurchmesser.



Abb. 5-19: Abhängigkeit des mittleren Konzentrationssignals von der Referenzwindgeschwindigkeit.



Abb. 5-20: Abhängigkeit des mittleren Konzentrationssignals von dem Quellabstand des Fast-FIDs.



Abb. 5-20 zeigt das mittlere Konzentrationssignal zweier Messpositionen über dem Abstand der Fast-FID-Kanüle zur Flächenquelle. Der doppeltlogarithmischen Darstellung kann entnommen werden, dass bei großen Abständen zur Flächenquelle ein geringes Signal, bei geringer werdendem Abstand eine ansteigende mittlere Konzentration detektiert werden kann. Auffällig ist weiterhin, dass der Einfluss der Umgebungsbebauung in direkter Quell-nähe nur geringe Auswirkungen auf das Signal aufweist. In niedrigen Messhöhen befindet sich die Kanüle unmittelbar innerhalb des Sättigungsbereichs der Emissionsquelle, dieser überwiegt gegenüber äußeren Einflüssen. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird ein Abstand der FID-Kanüle von 5 mm_{ms} zu der Flächenquelle (entspricht einschließlich der vertikalen Ausdehnung der Quelle einer Höhe von ca. 2 m_{fs}) gewählt, da in dieser Messhöhe ein hinreichend starkes Signal detektiert sowie die Beeinflussung der urbanen Geometrie auf das mittlere Konzentrationssignal sensitiv erfasst werden kann.

Analog zu den Strömungsmessungen wurden während der Durchführung der Windkanalexperimente zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Tages- und Messablauf an definierten Positionen Wiederholungsmessungen zur Bestimmung der Unsicherheit der Messergebnisse durchgeführt. In diesen Wiederholungsversuchen kumulieren die variablen äußeren Einflüsse (Schwankungen von Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Luftdrucks) mit den Unsicherheiten der verwendeten Messtechnik und der Versuchsdurchführung (vgl. Kapitel 3.4.7).

In Abb. 5-21 ist zur Abschätzung des Unsicherheitsbereichs der Konzentrationsmessungen die Bandbreite der Mittelwerte der Wiederholungsversuche einer Messposition dargestellt. Die Grundgesamtheit der Stichprobe umfasst 11 Wiederholungsmessungen mit jeweils 3 Referenzwindgeschwindigkeiten. Aus dieser Abbildung wird die relative Unsicherheit der Messmethodik ersichtlich. Bei geringerer Referenzwindgeschwindigkeit erhöht sich die Bandbreite der Messergebnisse, da bei geringer Windgeschwindigkeit höhere Konzentrationen detektiert werden können.

Aus Abb. 5-21 kann anhand der Streubreite der Wiederholungsmessungen ein Unsicherheitsbereich der mittleren Konzentrationswerte für die gewählte Referenzwindgeschwindigkeit der Ventilationspotentialversuche von < 0.04 [-] abgeleitet werden. Wiederholungsmessungen an weiteren Messpositionen im Modellgebiet, durchgeführt in der gewählten Referenzwindgeschwindigkeit, bestätigt die getroffene Abschätzung.

Bei konstanten Randbedingungen bildet sich an der Oberfläche der Flächenquellen ein konstanter Emissionsmassenstrom aus. Der Verdunstungsprozess des Lösungsmittels³¹ ist als eine kontinuierliche Freisetzung aus einer Flächenquelle anzusehen. Die Quellstärke kann im Gegensatz zu den Spülgraduntersuchungen mit Ethan (Kap.5.1) nicht variiert werden, eine Freisetzung in definierten Intervallen ist ebenfalls nicht möglich. Für die Bestimmung des Ventilationspotentials eines Stadtgebietes muss ein beschreibender Ansatz mit kontinuierlicher Tracerbeschickung gefunden werden.

³¹ Die Verdunstungsrate Isopropanols und somit der Emissionsmassenstrom *Q* kann durch den Stofftransport an einer ebenen Platte (Aquarellpapier) durch freie und erzwungene Konvektion beschrieben werden (vgl. Baehr und Stephan (2006), Kabelac (2006)).

Bei der Ausnutzung der Volatilität von Lösungsmitteln ist zu berücksichtigen, dass verschieden Faktoren (wie bspw. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit)³² den Massenfluss des Tracers bedingen. Trotz der konstanten Randbedingungen im Labor variieren die Randbedingen im Modell, da die lokale Windgeschwindigkeit aufgrund der urbanen Geometrie stark variiert.

Da die relative Konzentration der individuellen Messpositionen von den Randbedingungen abhängig ist, wurden während der Studie die Referenzwindgeschwindigkeit sowie der Quelldurchmesser nicht variiert. Ein Verhältniswert zweier Konzentrationen kann jedoch bei einem direkten Vergleich als unabhängig von den Randbedingungen betrachtet werden.

³² Die Freisetzungsrate der Flächenquelle kann, aufgrund der ausführlichen Dokumentation der meteorologischen Randbedingungen während der Laborversuche, durch den Massenverlust über der Messdauer bestimmt werden (vgl. Abb. 14-15).

6. Auswertung der Ventilationspotentialstudien

In diesem Kapitel soll anhand des in Kap. 5.3 diskutierten Verfahrens zur Bestimmung des Ventilationspotentials eine qualitative Beschreibung des Ventilationspotentials im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg erfolgen. Im Rahmen der Windkanalstudien wurden an verschiedenen, für den suburbanen Bebauungstyp charakteristischen Messpositionen mit der skizzierten Messmethodik Versuche durchgeführt. Die Positionierung der Messpunkte im Modellgebiet orientierte sich anhand zweier Fragenstellungen:

1. Existiert ein charakteristisches Ventilationspotential für verschiedenartige Stadtraumtypen³³?

Im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg konnten drei Gebiete innerhalb anhand ihrer homogenen Bebauungsstruktur für die Untersuchungen ausgewählt werden:

Die **bahnhofsnahe Bebauungsstruktur** mit uniformer vertikaler Ausdehnung in Riegel- bzw. Ringstruktur (durchschnittliche Gebäudehöhe: 15.71 m),

die Siedlungsstruktur der nahegelegenen **Kleingärten** (Blockhüttenbebauung in strenggeometrischer Anordnung mit einer maximalen vertikalen Ausdehnung von 3 m),

die **Neubauten der internationalen Bauausstellung** stellvertretend für Gebäudegruppen mit hoher vertikaler Ausdehnung und relativer Dichte der Bebauung zueinander.

In diesen drei gewählten Stadtraumtypen wurden räumlich hochaufgelöste Vergleichsmessungen durchgeführt. Weitere Stadtraumtypen wie bspw. Hafenrandbebauung mit großflächigen Lagerhallen oder Einfamilienhäuser in gelockerter Siedlungsstruktur konnten aufgrund ihrer relativen Lage im untersuchten Modellgebiet nicht betrachtet werden.

2. Wie weitreichend wirkt sich die Umstrukturierung der Bebauungsstruktur im Zuge der internationalen Bauausstellung auf das Ventilationspotentials der Bestandsbebauung in dessen Nachlauf aus?

Im Nachlauf des umstrukturierten Gebietes wurden longitudinal und lateral innerhalb der urbanen Struktur sowie diagonal (entlang der S-Bahntrasse) Vergleichsmessungen in verschiedenen Bebauungszuständen durchgeführt. Anhand dieses Messrasters soll ein Vergleich des Ventilationspotentials der Bebauungszustände gezogen werden.

³³ Die Begrifflichkeit "Stadtraumtyp" wird in dieser Arbeit zur Beschreibung der geometrischen Ausgestaltung der lokalen Baustruktur verwendet, eine Betrachtung darüber hinaus (bspw. energetisch, nach Baujahr, etc.) erfolgt nicht.

6.1 Betrachtung des Zeitschriebs der Konzentrationswerte

Kapitel 4 listet eine Auswahl an durchgeführten Studien zum Themengebiet der Ventilation. Eine Vielzahl der Untersuchungen nutzt die mittlere Konzentration eines Tracers relativ zum Massenstrom (\bar{c}^*) als Indikator der Belüftung eines Stadtteils bzw. zur räumlichen Beschreibung dessen räumlichen Mittelwert. Eine Vergleichsstudie verschiedener Parametrisierungsansätze der urbanen Ventilation von Hu und Yoshie (2013) zeigt auf, dass \bar{c}^* als die integrale Kenngröße der urbanen Belüftung zu betrachten ist, da eine Vielzahl weiterer Ventilationsparameter anhand der lokalen mittleren Konzentration \bar{c}^* beschrieben werden können. Buccollieri et al. (2010) prägten für diese Bewertungsmethode die Begrifflichkeit "Atmungsaktivität", da eine Betrachtung des Traceraustrags relativ zur lokalen Struktur erfolgt und aus einer Bodenquelle aus dem Untersuchungsgebiet hinaus erfolgt (zum Vergleich: Einatmen \approx Tracereintrag in das Untersuchungsgebiet).

Im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg wurden räumlich hochaufgelöste Messungen des Ventilationspotentials in verschiedenen Bebauungszuständen getätigt. Da aufgrund der Messmethodik absolute Konzentrationswerte relativ zu einem Worst-Case-Szenario zu betrachten sind, kann ein Vergleich der Bebauungszustände anhand einer relativen Konzentration c* nicht vollzogen werden.

Anhand eines qualitativen Vergleichs der mittleren relativen Konzentration ist es möglich, die Veränderung des Ventilationspotentials in den betrachteten Bebauungszuständen abzubilden. In Abb. 6-1 sind die mittleren Konzentrationswerte von 25 Messpositionen im Nachlauf des Umstrukturierungsgebiets im Nullzustand über den Mittelwerten der Konzentration im Planzustand dargestellt. Neben der mittleren Konzentrationen der jeweiligen Messposition ist über die Farbcodierung die prozentuale Zunahme nach der Umstrukturierung aufgezeigt. Der Unsicherheitsbereich der mittleren Konzentration, bestimmt aus Wiederholungsmessungen, ist an die Ergebnisse angefügt, weiterhin ist die 1:1 Relationslinie kenntlich gemacht.

Auffallend in der räumlichen Darstellung (Abb. 6-2³⁴) ist, dass sich anhand der Differenzen der mittleren Konzentrationswerte keine Aussagen über deren geometrische Lage im Modellgebiet treffen lassen. Im direkten Nachlauf des Neubaus der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt der Stadt Hamburg (BSU) wurde eine starke Veränderung erwartet, da im Zuge der Umstrukturierung auf einem unbebauten Gelände (vorherige Nutzung: Freibad mit Liegefläche) eine Riegelbebauung (Längenausdehnung: ca. 250 m, maximale Höhenausdehnung: 56 m) errichtet wurde. Studien zu den Auswirkungen des Neubauvorhabens auf das Wind-feld (Kipsch et al. (2011), Salim et al. (2012)) zeigten eine Beeinflussung (geringere mittlere Windgeschwindigkeit, erhöhte Turbulenz des Windes) bis in den fernen Nachlauf (ca. fünfzehnfache Gebäudehöhe). Die mittleren Konzentrationswerte weisen im direkten Nachlauf eine geringe Abweichung im Rahmen der Messunsicherheit voneinander auf, die Positionen im fernen Nachlauf entlang der Bahntrasse zeigen eine deutliche Differenz (> 10 %) voneinander.

³⁴ In dieser und nachfolgenden Übersichtdarstellungen werden farbcodiert die Mittelpunkte der Flächenquellen angezeigt, nicht deren Durchmesser. Des Weiteren ist die Stadtgeometrie um 145° gedreht, sodass die Anströmung (in Hauptwindrichtung: 235°) von links erfolgt.



Abb. 6-1: Veränderung der mittleren Konzentrationswerte im Stadtraum Wilhelmsburg bei der Realisierung des Plan-Zustands der internationalen Bauausstellung.



Abb. 6-2: Veränderung des mittleren Konzentrationswertes (in %) der Ventilationsuntersuchungen im Stadtraum Hamburg-Wilhelmsburg.

Ergänzend muss angemerkt werden, dass die Positionen im Nahfeld des Neubaus des BSU-Gebäudes sehr geringe Konzentrationen in beiden betrachteten Bebauungszuständen aufweisen. Der mittlere Konzentrationswert der Messpositionen innerhalb des Stadtgebietes variiert in seiner Ausprägung je nach relativer Lage, sodass keine verallgemeinernden räumlichen Aussagen getroffen werden können.

In den Laborversuchen zur Bestimmung des lokalen Ventilationspotentials wurde die relative Konzentration eines Messortes zeitlich hochaufgelöst detektiert, sodass eine Betrachtung der relativen Konzentration unter besonderer Berücksichtigung instationärer Effekte der Strömung ermöglicht wird. Eine Analyse der Zeitserie der lokalen Konzentration kann bspw. aufzeigen, Mittelwertes zweier dass trotz eines vergleichbaren Messpositionen sich das Ventilationsverhalten, veranschaulicht durch eine Häufigkeitsverteilung der Messwerte, in der Form der Verteilung je nach den Charakteristiken des betrachteten Untersuchungsvolumens unterscheidet. Abb. 6-3 a zeigt einen Ausschnitt einer gemessenen Zeitserie der Windkanalversuche, die relative Konzentration über die Zeit dargestellt. Abb. 6-3 b zeigt die Verteilung der gemessenen relativen Konzentration über deren Auftretenshäufigkeit. Die Orientierung der Achsen wurde in Analogie zu Abb. 6-3 a gewählt. Deutlich ersichtlich wird aus Abb. 6-3 b neben der wahrscheinlichsten Konzentration im Maximum der Verteilung (Modus) die Auftretenshäufigkeit geringer und hoher Konzentrationswerte.



Abb. 6-3: (a) Ausschnitt einer Zeitserie der relativen Konzentration, (b) Häufigkeitsverteilung der relativen Konzentration der Messposition.

Für die Verteilung der Auftretenshäufigkeit der relativen Konzentrationen erfolgte eine Klasseneinteilung h_{kl} der relativen Konzentration auf der Basis von Freedman und Diaconis (1981, (Gl. 6-1)). Für Zeitschriebe mit einer hohen Standardabweichung kann so eine optimale Verteilung bestimmt werden. Bei schmaleren Konzentrationsverteilungen (bspw. an einer sehr gut belüfteten Messposition oder aufgrund von Mittelungsintervallen über einen längeren Zeitraum, vgl. Kap. 6.2) wurde eine Mindestklassenbreite $h_{kl,min}$ der Histogramme von 0.01 definiert.

$$h_{kl} = \frac{2 \cdot IQR}{\sqrt[3]{n}} \tag{GI. 6-1}$$





Abb. 6-4: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen verschiedener Messpositionen im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg.

In Abb. 6-4 ist die Auftretenshäufigkeit der relativen Konzentrationen an ausgewählten Messpositionen im Modellgebiet dargestellt. Die verschiedenartigen urbanen Räume wirken sich auf das lokale Ventilationspotential (und somit auf die detektierbare relative Konzentration) aus, ersichtlich wird dieses aus der Form der Häufigkeitsverteilungen.

Innerhalb eines geschlossenen Innenhofs (x_{fs}: 650, y_{fs}:140, rechte Häufigkeitsverteilung) konnte mit der Messmethodik eine sehr breite Verteilung mit einem hohem mittleren Konzentrationswert detektiert werden. Aus der Verteilung wird ersichtlich, dass an dieser Position ein verringerter Frischlufteintrag besteht. In der betrachteten Zeitserie kann nur ein kleiner Anteil an geringen Konzentrationen detektiert werden, es dominieren höhere relative Konzentrationen an diesem Messort. Die detektierten, erhöhten Konzentrationen weisen diese Messposition als einen Ort mit verringertem Frischlufteintrag und schlechten Ventilationseigenschaften aus. Auf der Bahntrasse, neben einem Parkgebiet (in dem Umstrukturierungsgebiet vor Baubeginn, x_{fs}: 150, y_{fs}: -222, mittlere Verteilung), wird aufgrund der freien Anströmung eine größere Häufigkeit an geringen Konzentrationen detektiert: ein Anzeichen für einen vermehrten Frischlufteintrag in das Betrachtungsvolumen und eine gute Durchlüftung des Ortes. Nachfolgend wird die Häufigkeitsverteilung der relativen Konzentration dieser Position als Referenz für einen sehr gut ventilierten Messort verwendet. Im direkten Nachlauf eines Gebäudes auf dem Gebiet der internationalen Bauausstellung (IBA: rote Gebäude, Messposition x_{fs} : 0, y_{fs} : 35, linke Verteilung) wird eine bimodale Häufigkeitsverteilung der Konzentration detektiert. Es können sowohl sehr geringe als auch erhöhte Konzentrationen an dieser Position gemessen werden.

Aus dieser Gegenüberstellung wird ersichtlich, dass sich unterschiedliche urbane Strukturen verschiedenartig auf das lokale Ventilationspotential eines Betrachtungsvolumens auswirken. Es besteht eine relative Vergleichsmöglichkeit der Ventilation einzelner Positionen durch die Betrachtung der jeweiligen Häufigkeitsverteilung der relativen Konzentration.



Abb. 6-5: Gegenüberstellung der Häufigkeitsverteilungen der relativen Konzentrationen einer Messposition in zwei betrachteten Bebauungszuständen.

Im Rahmen der Untersuchungen im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg wurden Vergleichsstudien in verschiedenen Bebauungszuständen getätigt. So ist es möglich, die Auswirkungen der Umstrukturierung auf das Durchlüftungsverhalten eines Ortes qualitativ durch Gegenüberstellung der Verteilungskurven zu vergleichen. Abb. 6-5 zeigt die Häufig-keitsverteilungen eines Messortes in zwei Bebauungskonfigurationen, zur besseren Vergleichbarkeit sind die Verläufe kumulativ dargestellt. Als Referenz ist die Verteilungsfunktion einer Messposition in der freien Anströmung³⁵ mit sehr guten Ventilationseigenschaften aufgezeigt. Die betrachtete Position befindet sich im direkten Nachlauf des BSU-Neubaus in der Mitte der S-Bahntrasse. Trotz deutlich voneinander verschiedenen Häufigkeitsverteilungen der relativen Konzentration in den zwei Bebauungszuständen sind deren Mittelwerte, im Rahmen der Messunsicherheit, als gleich anzusehen (vgl. Abb. 6-2).

Ersichtlich wird bei diesem qualitativen Vergleich die Beeinträchtigung des Luftaustauschs an der Messposition durch die Verschiebung der Verteilungsfunktion. Während in dem Ist-Zustand ca. 55 % des betrachteten Zeitraums keine Konzentration detektiert werden konnte, wird nach den Änderungen innerhalb der Bebauungsstruktur lediglich an ca. 15 % des gleichen Zeitraums dieser Wert erreicht. Weiterhin hat sich der Median der Verteilungen deutlich verschoben. Im Ist-Zustand konnte bei 50 % der Zeitschritte keine Tracerkonzentration detektiert werden, im Plan-Zustand hingegen liegt der Median bei ca. 0.05, also 5 % bezogen auf die Kalibrierungsreferenz. Das 90. Perzentil der Verteilung erreicht einen Wert von ca. 7 %, im Plan-Zustand wird ein relativer Konzentrationswert von ca. 32 % erreicht.

Bei vielen Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von Tracergasen wird zur Verbesserung der Datengüte die detektierte Konzentration gegen einen unteren Grenzwert betrachtet, bei Unterschreitung dessen wird das Ergebnis der Messposition als Null betrachtet (conditional sampling, vgl. Yee et al. (1993), Klein und Young (2011)). Dieses conditional sampling unterstützt bei Ausbreitungsszenarien von Tracergasen die Datenauf-arbeitung, da zum einen geringe Konzentrationen messtechnisch nur sehr schwer aufgelöst werden können. Zum anderen wird bei Ausbreitungsuntersuchungen ein an die Frage-stellung angepasster Tracervolumenstrom freigesetzt, geringe Konzentrationen stellen meist nicht Zielgröße der Untersuchungen dar. Ein solcher Messwert kann als vernachlässigbar klein angesehen werden.

Abb. 6-6 verdeutlicht den Einfluss des conditional samplings auf eine Zeitserie der Untersuchungen des Ventilationspotentials, die normierte Häufigkeitsverteilung ist über der kumulierten relativen Konzentration aufgetragen. Der Abbildung ist zu entnehmen, dass eine sehr gut belüftete Messposition betrachtet wird, da 93 % eine relative Konzentration von Null aufweisen. Die Beeinflussung des conditional sampling (cs) mit unterschiedlichen Grenzwerten cs = 0.005... 0.025 (entspricht maximal 2.5 % der Kalibrierungsreferenz) auf die Häufigkeitsverteilung wird ersichtlich. Sowohl in der Form der Verteilung als auch in deren höheren Momenten treten in dem gewählten Beispiel deutliche Unterschiede aufgrund des verringerten Stichprobenvolumens auf.

³⁵ Die Referenzposition ist auf der S-Bahntrasse gelegen, neben einem Parkgebiet (vor Umstrukturierungsbeginn); Modell ohne Waldgebiete (vgl. Abb. 6-4, x_{fs}: 150, y_{fs}: -222).

In den durchgeführten Laborversuchen zur Bestimmung des Ventilationspotentials ist eine Anwendung des conditional sampling nicht vorgesehen. Bei der Betrachtung einer Zeitserie werden, je nach Messposition in variierender Häufigkeit, Zeitschritte mit geringer Tracerkonzentration detektiert. Diese Zeitabschnitte stellen eine sehr gute Belüftungssituation dar, da in dem betrachteten Intervall keine Konzentration im Betrachtungsvolumen detektiert werden konnte. Für die nachfolgenden Betrachtungen wird daher auf ein conditional sampling der Zeitserien verzichtet.



Abb. 6-6: Einfluss des conditional samplings auf die Häufigkeitsverteilung an einer Messposition mit guten Ventilationseigenschaften.

6.2 Bestimmendes Zeitintervall der Betrachtung der Ventilation von Stadtgebieten

Für die Bewertung der Ventilation existieren unterschiedliche Betrachtungsintervalle. Liu et al. (2005) wenden den in der Bauphysik gebräuchlichen Betrachtungszeitraum von einer Stunde als maßgebendes Intervall der Ventilation für die Untersuchung eines Straßenzuges an (vgl. VDI, 2001). Basierend auf Lius Definition des ACH wird in numerischen Studien (vgl. u.a. Hang et al., 2009b) der stündliche Luftwechsel für die Gitterzellen innerhalb eines Betrachtungsgebiets bestimmt, aus welchem zur Erlangung einer Gebietsinformation ein räumliches Mittel gebildet werden kann. Mayer (1989) definierte auf der Basis des "Stadtklima Bayern" Projektes einen Zeitraum von 5 Minuten als "ideales Betrachtungsintervall des Stadtklimas für eine charakteristische Länge (räumliche Ausdehnung: 150 m) im urbanen Raum". Plehn et al. (2013) untersuchte die Ventilation eines Stadtgebiets anhand von Strömungsmessungen (Messvolumen << 1 m) in einem maßgebenden Zeitintervall von 3 Minuten.

Analog zu der Wahl der Betrachtungsintervalle der Ventilation ist sowohl die Größe des Untersuchungsraumes als auch der Untersuchungshintergrund zu betrachten. Auf regionaler Ebene (oder Planungsraum: Landschaftsplan³⁶) kann auf Basis eines mittleren (Jahres-) Wertes eine Beurteilung der Ventilationswirkung hinreichend genau erfolgen. Bei Untersuchungsflächen in der Ausdehnung einer Stadt (Flächennutzungsplan) kann ein stündlicher Wert als Bewertungsgrundlage (vgl. ACH, Liu et al. (2005)) herangezogen werden. Stadtquartiere (Bauleitplanung) sind nach Mayer (1989) auf der Basis weniger Minuten zu bewerten. Untersuchungen zum Ventilationsverhalten innerhalb eines Straßenzuges (Bebauungsplan) sollten ein geringeres Betrachtungsintervall aufweisen, sodass hochfrequente und intermittierende Effekte abgebildet werden können.

Weiterhin wird der zu wählenden Bewertungszeitraum durch das Ziel der Untersuchung bedingt. Studien zu mittleren jährlichen oder täglichen Belastungswerten entlang eines Straßenzuges unterscheiden sich im Betrachtungsintervall zu Analysen intermittierender Effekte wie bspw. in Komfortuntersuchungen. Ebenfalls muss eine individuelle Betrachtung der Belastung erfolgen. So wird anregender Geruch z.B. anders wahrgenommen werden als mit Hitze belastete Luft.

In dieser Studie wird über eine Flächenquelle (Durchmesser ca. 17 m_{fs}) ein Volumen im Stadtraum aufgespannt (vgl. Kap. 4). Ziel dieser Arbeit ist es nicht ein allgemeingültiges Bewertungsintervall der Ventilation zu finden, vielmehr werden Vorschläge für ein solches Intervall in Abhängigkeit von der vorwiegenden Nutzung des Gebietes vergleichend gegenüber gestellt (siehe Tabelle 6-1). Analog zu Windkomfortuntersuchungen werden für verschiedene Nutzungsklassen unterschiedliche Zeiträume definiert. Koss (2006) vergleicht in einer Studie verschiedene Ansätze der Komfortuntersuchungen und findet trotz verschie-denartiger Bewertungskriterien eine allen Studien gemeine Klassifizierung der Nutzungsarten des städtischen Raumes. In Tabelle 6-1 werden die vier von Koss vorgestellten Tätigkeits-klassen aufgeführt und verschiedenen Bewertungsintervallen (bezogen auf das Betrach-tungsvolumen dieser Studie) zugeordnet.

Klasse	Beschreibung der Haupttätigkeit	Bewertungsintervall		
1	schnelles, geschäftiges Laufen	10 s		
2	normale Gehgeschwindigkeit	30 s		
3	Schlendern (in Einkaufspassagen)	180 s		
4	langfristiges Verweilen (sitzen in Straßencafés)	3600 s		

Tabelle	6-1:	Zeitliche	Klassifizierung	unterschiedlicher	Nutzungsarten	in	einem	räumlich	begrenzten
	В	etrachtun	gsgebiet (ca. 17	m _{fs} ; Tabelle analog	zu Koss (2006)	, me	odifizier	·t).	

³⁶ Klassifizierung in verschiede Planungsebenen auf Basis der VDI-Richtlinie 3787 - 2 (VDI, 2008).

In der nachfolgenden Betrachtung werden die vier in Tabelle 6-1 vorgeschlagenen Zeitintervalle als Bewertungsmaßstäbe der Durchlüftungseigenschaften eines Stadtraumes angesetzt. Je nach Anwendungszweck und Zielgröße nachfolgender Untersuchungen sollte das maßgebende oder die maßgebenden Betrachtungsintervalle auf Basis von Untersuchungen der physiologischen Auswirkungen verschiedenartige Zeitintervalle der Ventilation bestimmt werden. Des Weiteren muss bei der Abschätzung von maßgebenden Zeiträumen die Größe des Betrachtungsraumes berücksichtigt werden. Die verwendete kreisförmige Flächenquelle und somit der Betrachtungsraum der Studien besitzt einen Durchmesser in Straßenzugbreite (ca. 17 m_{fs}). Eine Skalierung des von Mayer (1989) vorgeschlagenen bestimmenden Zeitintervalls eines idealen Stadtklimas auf die Grundfläche der verwendeten Emissionsquelle zeigt einen Zeitbereich von ca. 30 s_{fs} (Klasse 2) als maßgebend auf.

Die Zeitmaßstäbe in dieser Studie sind so gewählt, dass der Turbulenzbereich des Windspektrums nach v. d. Hoven abgedeckt wird (vgl. Abb. 6-7). Sowohl kurzfristige Ereignisse wie Böigkeits- und Intermittenzeffekte (Klasse 1, Zeitraum: 10 Sekunden) als auch lang-fristige Mittelwerte (Klasse 4) werden in der Klasseneinteilung berücksichtigt. Das längste betrachtete Mittelungsintervall (Klasse 4, Zeitraum: 1 Stunde) befindet sich in der sog. "spektralen Lücke" (spectral gap) des v. d. Hoven-Spektrums, dem Übergangsbereich zwischen Turbulenz- und meteorologischen Effekten (vgl. Kap. 2.1). Niederfrequente Effekte, ausgelöst durch variierende meteorologische Randbedingungen, werden in Grenzschichtwindkanaluntersuchungen nicht betrachtet.

Diese Zeitintervalle wurden auf Basis der Energiedichte-Verteilung des Windes nach v. d. Hoven bestimmt. Denkbar wären auch Klassifikationen hinsichtlich des intermittenten Verhaltens des Konzentrationssignals gegen einen Grenzwert oder dessen Korrelation in verschiedenartigen Stadträumen.

Währende der Windkanalversuche wurden die Konzentrationswerte mit einer zeitlichen Auflösung von 1000 Hz erhoben. Für die Bearbeitung der Konzentrationszeitschriebe erfolgte ein Downsampling durch Blockmittelung der Zeitschriebe auf 200 Hz um hochfrequente Schwankungen des Signals, verursacht durch elektronisches Rauschen, zu minimieren (vgl. Harms, 2010). Über die reduzierte Zeitserie werden entsprechend der bereits definierten Nutzungsklassen gleitende Intervallcluster gebildet. In Abb. 6-8 sind ein Ausschnitt eines Zeitschriebs der relativen Konzentration sowie die daraus resultierenden Cluster der gleitenden Mittelwerte über je 10 Sekunden (Klasse 1) dargestellt.



Abb. 6-7: Bewertungszeiträume der Ventilation im Vergleich mit der spektralen Verteilung des Windes nach v. d. Hoven (1957), ergänzt um die vorgeschlagenen Intervallklassen.



Abb. 6-8: Gleitender Mittelwert über verschiedene Betrachtungsintervalle, hier: 10 s.



Abb. 6-9: Einfluss der Mittelungszeiträume der Intervallklassen auf das resultierende Histogramm der relativen Konzentration am Beispiel einer Messposition im Nachlauf des BSU-Gebäudes.

Durch die Mittelung über verschiedene Intervallklassen kann eine differenzierte Betrachtung der Ventilationsverhältnisse erfolgen, je nach Anforderung und Nutzungsart des Betrachtungsraumes. Zu beachten sind hierbei die Auswirkungen einer Clusterung des Konzentrationssignals auf die Häufigkeitsverteilung der relativen Konzentrationen³⁷. Abb. 6-9 verdeutlicht den Einfluss der Mittelungsintervalle auf die Häufigkeitsverteilung. Dargestellt ist die Häufigkeitsverteilung einer Position im direkten Nachlauf des BSU-Gebäudes in den zwei betrachteten Bebauungskonfigurationen (vgl. Abb. 6-5). Aus dem Vergleich der Verteilungen des ersten Mittelungsintervalls wird ersichtlich, dass sich die Form der Verteilungen leicht unterschiedlich ausprägt. Im Ist-Zustand können verstärkt die geringen Konzentrationen sowie der Null-Konzentration-Fall detektiert werden. Die Bandbreite der relativen Konzentrationen im Plan-Zustand ist im Vergleich zu der Spannweite des Ist-Zustands erhöht. Es werden im Plan-Zustand vermehrt hohe und im Vergleich zum Null-Zustand erhöhte Konzentrationen gemessen. Diese individuelle Ausprägung wird in allen Klassenintervallen ersichtlich. Dem vierten Klassenintervall, einem Mittelungszeitraum von einer Stunde, kann entnommen werden, dass sich die mittlere Konzentration im Betrachtungsvolumen aufgrund der Umstrukturierung im Stadtgebiet stark erhöht.

³⁷ Analog zu verschiedenen Intervallklassen der Konzentrationsmessungen untersuchten Plehn et al. (2013) die Auswirkungen verschiedener Intervallgrößen auf das horizontale Windfeld, sowohl in der mittleren Geschwindigkeit als auch der mittleren Windrichtung (vgl. auch Abb. 14-16, Windrosen einer Messposition in den vier gewählten Intervallklassen).

Für verschiedene Intervallklassen muss auch eine individuelle Abschätzung der Messunsicherheit erfolgen. Die aus der Messunsicherheit des Fast-FIDs resultierende Unsicherheit der Auftretenshäufigkeit kann anhand einer kumulativen Verteilung (Abb. 6-10) der Wiederholungsmessungen in den jeweiligen Klassenintervallen bestimmt werden.

Für eine Betrachtung der Häufigkeitsverteilungen kann anhand der kumulativen Verteilung die Bandbreite der relativen Konzentration, aus den Perzentilen des Konzentrationszeitschriebs die Unsicherheit der Auftretenshäufigkeit bestimmt werden. Da die maximalen Bandbreiten nicht repräsentativ für die globale Unsicherheit der Verteilung sind, wird das 95. Perzentil der Bandbreite des Unsicherheitsbereichs als maßgeblich definiert (Tabelle 6-2, vgl. Kap. 3.4.7).

In Abb. 6-10 ist der aus den Wiederholungsmessungen bestimmte Unsicherheitsbereich an die Verteilungen der jeweiligen Klassen angezeichnet. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit der Abbildung werden die Verteilungen kumulativ aufgetragen. Des Weiteren werden nur zwei Klassenintervalle dargestellt, die dargestellten Verteilungen entsprechen denen in Abb. 6-9. Weiterhin ist entgegen der bisherigen Formatierung die Klasseneinteilung durch verschiedene Farben kenntlich gemacht, die Bebauungszustände durch das Linienformat (Ist-Zustand: durchgezogene Linie, Plan-Zustand: gestrichelte Linie). Deutlich ersichtlich wird eine im Vergleich zur Variation in den Bebauungszuständen geringe Unsicherheit der Bestimmungsmethodik.

Klasse	Bewertungsintervall	Unsicherheitsbereich der Konzentrationsmessung (aus 95. Perzentil)	Unsicherheitsbereich der Auftretenshäufigkeit (aus 95. Perzentil)
1	10 s	0.016	0.038
2	30 s	0.014	0.038
3	180 s	0.011	0.037
4	3600 s	0.002	0.006

Tabelle6-2:UnsicherheitenderVerteilungenderVentilationspotentialversuchebestimmtausWiederholungsmessungen, in unterschiedlichenBetrachtungsintervallen.



Abb. 6-10: Unsicherheitsbestimmung der Verteilungen in den Klassenintervallen.

7. Vergleich der Ventilationseigenschaften

In diesem Kapitel erfolgt mit der Anwendung der entwickelten Messmethodik eine Bestimmung des lokalen Ventilationsverhaltens im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg. Da an den Messpositionen Zeitserien der relativen Konzentration detektiert wurden, kann die Verteilung der Konzentration untersucht werden. Die Betrachtung der Häufigkeitsverteilung der relativen Konzentrationen erlaubt eine Bewertung des Ventilationspotentials durch formbeschreibende Parameter. Es können aus der Zeitserie ebenfalls charakteristische Kenngrößen gewonnen werden, stellvertretend sollen nachfolgend einige wesentliche Beispielparameter vorgestellt werden.

Eine Beschreibung der relativen Konzentration anhand der Zeitserie kann durch die zentralen statistischen Momente Varianz, Schiefe sowie Wölbung erfolgen. Es werden weiterhin der Mittelwert, der Median und die Standardabweichung der relativen Konzentration betrachtet.

Aus der Häufigkeitsverteilung können der Modus der Verteilung und dessen Intensität bestimmt werden, somit kann der häufigste (Konzentrations-) Zustand im urbanen Raum eindeutig identifiziert werden. Als Vergleichsmöglichkeit zweier Verteilungen bieten sich neben dem Konzentrationsverlauf die Lage und die Intensität des Schwerpunktes der Integralfläche der Konzentration an. Zur Vervollständigung der Kenngrößen der Verteilungen seien der Interquartilsabstand und verschiedene Perzentile der Histogramme genannt.

Neben der Analyse der Form der Verteilung kann auch eine vertiefte Analyse der Zeitserie der Konzentration anhand statistischer Kennwerte erfolgen. Zu diesen Parametern gehören bspw. die Schwankungsintensität des Signals (Gl. 7-1), Spitzen-zu-Mittelwert-Verhältnisse (Peak-to-mean-Ratio, mit verschiedenen Perzentilen (95, 97, 98, 99) als Spitzenwert), die Häufigkeit des Frischlufteintrags in das Betrachtungsvolumen (Gl. 7-4) sowie der Venti-lationsindex (Gl. 7-5). Ebenfalls kann die lokale Intermittenz des Konzentrationssignals als ein Vergleichskriterium dienen.

Die **Schwankungsintensität** *I* des Signals ist definiert als das Verhältnis der Standardabweichung des Signals über der mittleren Konzentration (vgl. u.a. Mole und Clarke (1995), Klein und Young (2011)). Analog zur Schwankungsintensität *I* kann auch eine Betrachtung des **Variationskoeffizienten** ε erfolgen (vgl. u.a. Yee et al. (1993), Zimmerman und Chatwin (1995), VDI (2000b)).

$$I = \frac{\sigma}{c_r} \tag{GI. 7-1}$$

$$\varepsilon = \frac{Varianz}{Mittelwert^2} = \frac{\sigma^2}{\overline{c_r}^2}$$
 (GI. 7-2)

Sowohl die Schwankungsintensität I als auch der Variationskoeffizient ε beschreiben die Streubreite des Signals, durch die Normierung auf den lokalen Mittelwert erfolgt eine Entdimensionalisierung der Standardabweichung. Erhöhte Streubreiten, deren Umfang sich größer als der Mittelwert der Zeitserie ausprägt, können so leicht identifiziert werden. Da sehr geringe mittlere Konzentrationen im Modellgebiet detektiert werden, erfolgt durch die Quadrierung bei

der Betrachtungsweise des Variationskoeffizienten eine Überhöhung und somit eine stärkere Hervorhebung der Streuung der Konzentrationswerte.

Die Häufigkeit des Frischlufteintrags FI (GI. 7-4) und somit der Luftwechsel³⁸ (LW) im Betrachtungsvolumen wird über den Intermittenzfaktor γ des Signals bestimmt. Zur Unterscheidung zwischen verschiedenen Durchlüftungszuständen des Standortes wird die relative Konzentration gegen den Grenzwert I_G^{39} untersucht. Bei Unterschreitung des Grenzwertes liegt eine gut belüftete Situation vor, das Tracergas wird in dem Betrachtungsintervall annähernd vollständig aus dem Betrachtungsvolumen gespült. Bei Überschreitung des Grenzwertes kann eine im Mittel hinreichend hohe Tracerkonzentration über das Intervall detektiert werden, sodass dieser Zeitraum aufgrund des eingeschränkten Luftwechsels als ein schlecht belüfteter Zeitabschnitt zu betrachten ist. Der für diese Studien gewählte Grenzwert I_G setzt sich aus der Bandbreite des mittleren Unsicherheitsbereichs zusätzlich eines Sicherheitsfaktors zusammen und kann für die durchgeführten Messungen auf I_G = 0.05 c_{relativ} bestimmt werden. Der Intermittenzfaktor zeigt folglich den Anteil der Zeitserie innerhalb welcher Konzentration detektiert wurde. Die Häufigkeit des Frischlufteintrags *FI* ist definiert als der prozentuale Anteil der Zeitserie mit guten Ventilationszuständen.

$$\gamma = \frac{1}{n} \sum_{1}^{n} c_r(n) \ge I_G$$
 (Gl. 7-3)

$$Fl = (1 - \gamma) \cdot 100$$
 (Gl. 7-4)

In Abb. 7-1 ist der Luftwechsel nach Gleichung 7-4 im jeweiligen Betrachtungsvolumen der Messposition farbcodiert dargestellt. Betrachtet wird der Plan-Zustand der urbanen Konfiguration mit den Gebäuden der IBA und der BSU im Modellgebiet Hamburg- Wilhelmsburg (rote Gebäudeumrisse). Zur Vergleichbarkeit der Wechselwirkungen zwischen der lokalen Baustruktur und dem lokalen Ventilationspotential sind die Messpositionen der drei Achsen im Stadtgebiet dargestellt.

Entlang der S-Bahntrasse besteht an den untersuchten Messorten ein sehr gutes Ventilationspotential, da meist eine Freifläche im Modell ohne direkte Umgebungsbebauung untersucht wurde. Deutlich ersichtlich werden der Einfluss der IBA-Bebauung sowie ein starker Einfluss des BSU-Gebäudes auf den Luftwechsel.

³⁸ Da keine Aussagen über die Qualität der eingetragenen Luft getroffen werden können und somit die Möglichkeit einer Vorbelastung der Luft (mit Schadstoffen oder (Ab-) Wärme) besteht, wird nachfolgend statt des Frischlufteintrags der Terminus Luftwechsel verwendet.

³⁹ Numerische Studien untersuchen die Intermittenz eines Standortes meist mit einem Faktor *I_G* gleich Null, in experimentellen Studien wird aufgrund der Messunsicherheit ein von Null verschiedener Wert angesetzt (vgl. Chatwin und Sullivan (1989), Yee et al. (1993), Klein und Young (2011)).



Abb. 7-1: Luftwechsel innerhalb des Betrachtungsvolumens im Stadtraum Hamburg-Wilhelmsburg, Modell im Plan-Zustand.

Im Kerngebiet des Modells variiert der Luftwechsel je nach Messposition innerhalb der urbanen Struktur, es besteht eine deutliche Veränderung des LWs im Vergleich zu dem über freien Flächen. Auch an Freiflächen im Stadtgebiet wie bspw. dem Marktplatz (x_{fs}: 540, y_{fs}: -300) kann ein verringerter LW detektiert werden. Die umgebende Baustruktur beeinträchtigt die Ventilation bei einer lediglich gering ausgeprägten vertikalen Versperrung in Strömungsrichtung.

Auffällig ist eine Messposition im Nachlauf eines Gebäudes in der Nähe der S-Bahn-Station (x_{fs}: 470, y_{fs}: -120). Obwohl der angrenzende Park als eine Freifläche im Modell anzusehen ist, wurde hier der geringste Luftwechsel detektiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Messposition innerhalb der Rezirkulationszone des Gebäudes befindet und somit, bedingt durch die Messmethodik, ein reduzierter Eintrag von unbelasteter Luft in das Betrachtungsvolumen stattfindet (vgl. Kap. 7.1). Der lokale Einfluss des Gebäudenachlaufs dominiert das Ventilationsverhalten an dieser Position, die Wahl der Messstellenpositionierung beeinflusst das Messergebnis nachhaltig (vgl. Oke, 2007).

Der Ventilationsindex VI (Gl. 7-5) stellt ein Dosis-basiertes Bewertungskriterium des lokalen Ventilationspotentials dar. Definiert ist der *W* als der Quotient aus der Summe des Integrals der Konzentration über dem jeweiligen Betrachtungsintervall, normiert auf die Summe der Betrachtungsintervalle. Nach Gleichung 7-5 kann der VI ebenfalls als eine Maßzahl für den möglichen Frischlufteintrag in das Betrachtungsvolumen betrachtet werden. Über das Integral der Konzentration wird die mögliche Belastung eines Ortes innerhalb iedes Betrachtungsintervalls detektiert, Spitzenlasten oder intermittente Phänomene werden ebenso erfasst wie stochastische Konzentrationsschwankungen. Zur Bewertung des Luftaustauschs an dem Messort wird die Belastungsdosis von der Kalibrierungsreferenz⁴⁰ subtrahiert.

$$VI = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \int_{\Delta t_i} c(t) \cdot dt}{\sum_{i=1}^{n} \Delta t_i}\right) \cdot 100$$
(Gl. 7-5)

In Kap. 6.2 wurde zur Bestimmung eines beschreibenden Zeitintervalls ein Zeitschrieb der relativen Konzentrationen in verschiedenartige, definierte Klassen unterteilt. Eine Beschreibung der lokalen Ventilationsverhältnisse kann anhand der Verteilung der mittleren Konzentrationen über diese Intervallklassen (10 s - 3600 s) sowie den daraus abgeleiteten beschreibenden Parametern erfolgen. Nachfolgend soll die **Intermittenz des Signals** über einen definierten Zeitraum bzw. deren Variation vertieft betrachtet werden. Da bei längerer Verweildauer an einem Ort im urbanen Raum nicht der relative Mittelwert, sondern das Spek-trum der Belastungen für das hedonische Empfinden verantwortlich ist, erfolgt eine hochaufgelöste Analyse des transienten Phänomens der Ventilation.



Abb. 7-2: Skizze: Intermittenzbetrachtung einer Zeitserie.

⁴⁰ Die Kalibrierungsreferenz der Konzentrationsmessungen stellt das Worst-Case-Szenario der Ventilation (geschlossener Innenhof der Nullwind-Situation) dar.

Zur Bestimmung des intermittierenden Verhaltens des Konzentrationssignals erfolgt eine Betrachtung der Zeitserie auf stündlicher Basis (4. Intervallklasse) in den maßgebenden Intervallen der Klassen 1 - 3 (vgl. Tabelle 6-1). Innerhalb des stündlichen Betrachtungszeitraums wird die relative Konzentration blockweise über die maßgebenden Klassenintervalle gemittelt (Abb. 7-2). Analog zu den Untersuchungen des *Fl* wird die Intermittenz der blockgemittelten Konzentration gegen den Grenzwert I_G (0.05) untersucht. Als Bewertungskriterium wird der Intermittenzfaktor γ (GI. 7-3) herangezogen. Dieser Parameter zeigt den Anteil des stündlichen Betrachtungszeitraums innerhalb welcher der Grenzwert überschritten und somit eine schlechter belüftete Situation vorlag. Da jeweils nur ein 60-minütiges Intervall analysiert wird, kann aus der Zeitserie der Konzentrationsmessungen die gesamte Bandbreite der stündlichen Belüftungszustände betrachtet und bewertet werden.



Abb. 7-3: Verteilung der Überschreitungshäufigkeiten des maßgebenden Intervalls (hier: Klasse 1) über einen stündlichen Bewertungszeitraum.

Anhand dieser vertieften Intermittenzuntersuchungen kann für den stündlichen Betrachtungszeitraum die Überschreitenshäufigkeit des Grenzwertes über die komplette detektierte Zeitserie bestimmt werden, sodass eine Häufigkeitsverteilung der Überschreitungshäufigkeit des Grenzwertes *I*_G pro Betrachtungszeitraum für jede Messposition bestimmt werden kann.

In Abb. 7-3 sind hierfür beispielhaft die Überschreitungshäufigkeiten eines Bewertungsintervalls (hier: Klasse 1, 10 s)⁴¹ gegen den Grenzwert I_G über den Betrachtungszeitraum (1 Stunde) des Messortes (x_{fs}: 310, y_{fs}: -55) dargestellt. Als Vergleichsmöglichkeit ist die Vertei-lung des

⁴¹ Zum Vergleich sind die Verteilungen über das Mittelungsintervall der Klasse 3 (180 s) der gleichen Position in zwei den Bebauungszuständen in Abb. 14-18 dargestellt.

intermittierenden Verhaltens der Messposition nach der Bebauungsvariation eingefügt. Der Abbildung kann entnommen werden, dass sich die Überschreitenshäufigkeit des Grenzwertes und damit der Anteil an Frischluftsituationen an der betrachteten Position stark unterscheidet. Nach der Umstrukturierung des Stadtteils hat sich die Intensität der Grenzwertüberschreitungshäufigkeiten pro Bewertungszeitraum stark erhöht. Der Modus der Verteilung änderte sich bspw. von 25 % im Ist-Zustand auf 55 % im Plan-Zustand.

7.1 Sensitivitätsuntersuchung des Verfahrens zur Bestimmung des Ventilationspotentials

Zur Überprüfung des Messverfahrens hinsichtlich dessen Sensitivität wurden zwei Betrachtungsgebiete räumlich hochaufgelöst untersucht: ein teilgeöffneter Innenhof im Stadtgebiet sowie ein offener Straßenzug im direkten Nachlauf eines Einkaufszentrums. Beide Betrachtungsgebiete wurden im Ist-Zustand des Stadtteils untersucht, Abb. 7-4 zeigt eine Übersicht über das Kerngebiet des Stadtteilmodells mit den hochaufgelösten Fokusgebieten sowie einer gewählten Referenzposition in freier Anströmung⁴².

Als erstes Fokusgebiet wird der offene Straßenzug untersucht, da hier der Einfluss eines Gebäudes in Anströmrichtung auf das Ventilationspotential im Straßenraum vertieft betrachtet werden kann. Die Messpositionen sind längs der Straßenmittelachse orientiert und weisen einen Abstand von 9 m_{fs} zueinander auf. Abb. 7-5 zeigt die kumulative Verteilung der Auftretenshäufigkeit der relativen Konzentration, der in Kap. 6.2 bestimmte Unsicher-heitsbereich der Verteilungen ist angezeichnet. Dargestellt ist das 10-sekündige Mittelungs-intervall (vgl. Tabelle 6-1), da aufgrund des geringen Mittelungszeitraums eine große Band-breite der relativen Konzentrationen vorherrscht und so die lokalen Unterschiede der Mess-positionen verstärkt hervortreten. Der Übersicht halber werden stellvertretend vier Positionen ausgewählt, die Nummerierung erfolgt von der S-Bahntrasse in den Straßenzug hinein. Deutlich ersichtlich wird eine Verschiebung zu höheren Konzentrationen entlang des Straßenzuges. An Position 1, neben der S-Bahntrasse gelegen, werden gute Ventilations-bedingungen detektiert. Der Verlauf der Kurve folgt annähernd der Referenzkurve einer sehr gut ventilierten Position, mit einem leichten Versatz zu höheren Konzentrationen. Der Median bspw. besitzt einen Wert von < 1 crel, das 95. lediglich 0.11 (Referenzposition: 0 und 0.06). Der Null-Konzentrationsfall der Zeitserie beträgt 44 %. Im Vergleich dazu wird an der Pos. 7 (27 m_{fs} entfernt) während der Messungen kaum der Null-Konzentrationsfall detektiert, d.h. es kann innerhalb jedes Betrachtungsintervalls Konzentration im Betrachtungsvolumen detektiert werden. Im Vergleich zu Pos. 1 werden an Pos. 7 deutlich höhere Konzentrationen gemessen, der Median erreicht 0.087 c_{rel} und das 95. Perzentil einen Wert von 0.32 c_{rel}.

⁴² Die Referenzposition ist auf der S-Bahntrasse gelegen, neben einem Parkgebiet (vor dem Umstrukturierungsbeginn im Rahmen der iba); Modell ohne Waldgebiete, vgl. Abb. 6-5.


Abb. 7-4: Hochaufgelöste Betrachtungsräume im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg.



Abb. 7-5: Vergleich der kumulativen Verteilung der Auftretenshäufigkeit relativen Konzentration im Fokusgebiet Straßenzug.

Abb. 7-5 zeigt deutlich Unterschiede in den Häufigkeitsverteilungen der Messpositionen entlang des Straßenzugs, kleinräumige Veränderungen des Ventilationspotentials können mit der entwickelten Messmethodik aufgelöst werden. Nachfolgend soll die räumliche Auflösung anhand einiger aus der Zeitserie gewonnener Parameter untersucht werden.



Abb. 7-6: Variabilität des Parameters Frischlufteintrag/Luftwechsel im Fokusgebiet Straßenzug in vier Betrachtungsintervallen, von oben links nach unten rechts: 10 s, 30 s, 180 s, 3600 s.

Der Einfluss des gewählten maßgebenden Bewertungsintervalls auf den Parameter Luftwechsel kann anhand Abb. 7-6 nachvollzogen werden. In dieser Abbildung wird sowohl das lokale Verhalten des Parameters als auch dessen Variabilität in den maßgebenden Mittelungszeiträumen aufgezeigt. Zur Bestimmung des Luftwechsels wird der prozentuale Anteil der Grenzwertüberschreitungen der Bewertungsintervalle des Zeitschriebs verwendet (vgl. Gleichung 7-4). Bei der Betrachtung über ein 10 s_{fs} Intervall (Klasse 1, oben links) wird ersichtlich, dass sich der detektierte Luftwechsel und somit der Frischlufteintrag im Verlauf des Straßenzugsverringert. In Anströmrichtung befindet sich ein Gebäude, sodass, bedingt durch Wechselwirkungen des Bauwerks mit der Strömung, der Luftwechsel im Betrachtungsvolumen beeinflusst wird. In der annähernd freien Anströmung (Pos. 1) kann ein LW von 98.3 % detektiert werden, an der ungünstigsten Position im Straßenzug reduziert sich der LW auf 4.7 %. Unmittelbar hinter diesem Messort erhöht sich der lokale LW wieder. Mit der angewendeten Messmethodik können also kleinräumige Änderungen des lokalen Windfelds⁴³ und somit der Ventilationseigenschaften eines Ortes abgebildet werden. Bei der Betrachtung in verschiedenen Intervallklassen wird der Einfluss von längeren Mittelungszeiträumen auf das Signal ersichtlich. Je nach Mittelungszeitraum und daraus resultierend individuellem Intermittenzverhalten des Signals⁴⁴ bildet sich der Kennwert in variierender Intensität aus, das sich ausbildende räumliche Muster des Luftwechsels bleibt in allen betrach-teten Klassen bestehen.



Abb. 7-7: (a) Luftwechsel und (b) Ventilationsindex im Fokusgebiet Innenhof, Betrachtungsintervall: 10 s.

Ein Vergleich der Ventilationsparameter Luftwechsel und Ventilationsindex erfolgt innerhalb des hochaufgelösten Fokusgebiets Innenhof in Abb. 7-7. Der Parameter Luftwechsel ist ein zeitlich hochaufgelöster Kennwert der Ventilation. Durch die prozentuale Angabe der Frischluft- bzw. der belasteten Zeitschritte kann ein "Belastungszeitraum" (analog zu VDI, 2000b) bestimmt werden, direkte Aussagen über die Intensität der Belastung werden hingegen nicht getroffen. Aus Abb. 7-7 a wird ersichtlich, dass der Luftwechsel innerhalb des hochaufgelösten Messfeldes in seiner Intensität stark variiert. Je nach relativer Lage im Innenhof verändert sich der Luftwechsel, in den Eckpositionen des Innenhofs kann ein deutlich verringerter

⁴³ Da keine hochaufgelösten Strömungsmessungen innerhalb dieses Straßenzugs durchgeführt wurden, können keine Aussagen über das bodennahe Windfeld getroffen werden. Anhand der Bauwerksgeometrie kann aus Literaturwerken auf eine Zone mit erhöhter Turbulenz an der Gebäudekante sowie daran anschließend ein Rezirkulationsgebiet mit reduzierter mittlerer Windgeschwindigkeit geschlossen werden.

⁴⁴ In Abb. 14-21 sind die Auswirkungen verschiedener Mittelungszeiträume auf die Zeitserie der relativen Konzentration dargestellt. Aus dieser Abbildung kann ebenfalls der Einfluss der Intervallgröße auf das intermittente Verhalten des Konzentrationssignals entnommen werden.

Luftwechsel detektiert werden. Die absolute Bandbreite Parameters Luftwechsel variiert an den Messpositionen im Innenhof zwischen 12 - 64 %.

In Abb. 7-7 b ist der Ventilationsindex aufgezeigt. Der Ventilationsindex bildet sich für äquidistante Zeitschritte analog des Mittelwerts aus, der Parameter zeigt die mittlere Belastung in den gewählten Betrachtungsintervallen (hier: 10 s). Vergleichbar mit Abb. 7-7 a kann in den Eckpositionen der geringste Ventilationsindex detektiert werden. Innerhalb des teiloffenen Hofes bildet sich eine annähernd homogene mittlere Konzentration aus, der Ventilations-index besitzt in diesem Fokusgebiet eine Spannweite von 75 – 94 %.

Aus den o.g. Betrachtungsweisen können keine Rückschlüsse über die Variabilität der detektierten Konzentration gezogen werden. Anhand des Parameters Variationskoeffizient (entdimensionalisierte Streubreite der Konzentration, vgl. Gleichung 7-2) soll die Variabilität der Konzentrationsmessungen untersucht werden. In der Übersicht in Abb. 7-8 wird die lokale Verteilung des Variationskoeffizienten veranschaulicht.



Abb. 7-8: Variationskoeffizient im Fokusgebiet Innenhof, Betrachtungsintervall: 10 s.

Innerhalb des Innenhofs kann eine gleichverteilte Streubreite detektiert werden, deren Standardabweichung der Konzentrationen in annähernd gleicher Größenordnung der mittleren Konzentration (\approx 1) liegt. An zwei Eckpositionen des Innenhofs (x_{fs}: 740, y_{fs}: 35; x_{fs}: 700, y_{fs}: 65) wird eine verringerte Variabilität des Signals bestimmt. Abb. 7-7 kann entnommen werden, dass an diesen Positionen die höchsten mittleren Konzentrationen und der geringste LW detektiert wurden.

Auffällig sind drei Messpositionen: der Einlass des Innenhofes sowie die beiden bisher nicht betrachteten Eckpositionen (x_{fs} : 740, y_{fs} : 50; x_{fs} : 715, y_{fs} : 70). An allen drei Positionen kann ein

erhöhter Variationskoeffizient bestimmt werden. In den Eckpositionen konnte ein (im räumlichen Vergleich) überdurchschnittlicher Luftwechsel (65.2 und 63.9) bei durchschnittlichem Ventilationsindex (93.9 und 93.6) bestimmt werden (vgl. Abb. 7-7). Im Einlassbereich des Innenhofes wurde ein leicht erhöhter Variationskoeffizient (1.4) detektiert. Diese Position zeigt in Abb. 7-7 weder einen erhöhten LW (49.7) noch einen stark beeinträchtigen Ventilationsindex (90) auf.

In diesem Abschnitt konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Messmethodik klein-räumige Änderungen des bodennahen Ventilationspotentials sensitiv erfassen kann, sowohl in der Ausprägung der Häufigkeitsverteilung als auch in den aus der Zeitserie bestimmten Kennwerten. Eine Betrachtung des Ventilationspotentials innerhalb des Modellgebiets Hamburg-Wilhelmsburg sowie der verschiedenen urbanen Konfigurationen kann mit dieser Methodik zeitlich und räumlich hochaufgelöst erfolgen. Die Unsicherheiten der aufgeführten Kennwerte der Ventilation sind für die betrachteten Parameter in der jeweiligen Farb-codierung "grün" dargestellt und können in den maßgebenden Bewertungsintervallen Tabelle 14-1 und Tabelle 14-2 entnommen werden.

7.2 Vergleich der Bebauungszustände im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg

Im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg erfolgt im Rahmen der internationalen Bauausstellung eine großflächige Umstrukturierung des Stadtgebiets. Auf der Fläche eines ehemaligen Park- und Kleingartenanlagengebiets werden in der "Bauausstellung in der Bauausstellung"⁴⁵ im Projektpark Wilhelmsburg Mitte nachhaltige, flexible und innovative Konzepte des urbanen Arbeitens, Wohnens und Lebens vorgestellt. Insgesamt 25 Wohn-, Arbeits- und Sportgebäude mit individuellen geometrischen Ausprägungen wurden auf der Fläche des Projektparks errichtet. Die Auswirkungen des Gebäudeensembles Projektpark Wilhelmsburg Mitte auf das Ventilationspotential werden nachfolgend in dessen Nachlauf anhand der entwickelten Messmethodik analysiert. Für die Vergleiche der Parameter des Ventilationspotentials der Bebauungszustände werden für die jeweiligen betrachteten Kennwerte deren Differenz mit der Basis Ist-Zustand⁴⁶ gebildet.

In Abb. 7-9 wird der Ventilationsindex des Stadtgebietes Hamburg-Wilhelmsburg in den beiden Bebauungszuständen dargestellt. Bei einer Deckungsgleichheit der Ergebnisse (100 % Übereinstimmung, schwarze Linie) kann keine Veränderung festgestellt werden. Der Unsicherheitsbereich der VI-Messungen ist durch die gestrichelten Linien entlang der 100 % Markierung dargestellt.

⁴⁵ In der "Bauausstellung in der Bauausstellung" werden in vier Fallstudien neuartige Baumaterialien ("Smart Material Houses"), effizientes und kostengünstiges Bauen ("Smart Price Houses"), flexibles Gestalten des Wohnraums ("Hybrid Houses") sowie wassernahes und -nutzendes Wohnen ("Water Houses") an verschiedenen Objekten im Baubestand vorgestellt. Vertiefende Informationen: [4] und König (2014).

⁴⁶ Differenzenbildung: Ist-Zustand - Plan-Zustand. Ein positiver Wert steht für eine Beeinträchtigung im Plan-Zustand, ein negativer für eine Verbesserung.



Abb. 7-9: Veränderung des Ventilationsindexes (in %) im Zuge der Umstrukturierung des Stadtquartiers. Die Diagonale entspricht der 100%-Marke, der Bestimmungsunsicherheitsbereich des Ventilationsindexes ist durch die gestrichelte Linie dargestellt. Betrachtungsintervall: 10 s.



Abb. 7-10: Veränderung des Ventilationsindexes (in %) im Stadtraum Hamburg-Wilhelmsburg.

Der Unsicherheitsbereich des Ventilationsindexes (± 1.65) wurde aus Wiederholungsmessungen an verschiedenen Positionen im Stadtgebiet bestimmt (vgl. Tabelle 14-1). Ersichtlich wird in Abb. 7-9, dass sich das Luftwechselpotential an einigen Untersuchungspunkten geringfügig verändert (positiv wie negativ), jedoch auch starke Beeinträchtigungen durch die Umstrukturierung (> 20 %) detektiert werden. Aussagen über die räumliche Verteilung können aus dieser Abbildung nicht getroffen werden. In den nachfolgenden Abbildungen wird eine räumliche Darstellung der Ventilationsparameter ohne angezeichneten Unsicherheitsbereich erfolgen (nur Farbcodierung: "grün", der Unsicherheitsbereich der einzelnen Ventilationsparameter kann Tabelle 14-1 und Tabelle 14-2 entnommen werden). Die räumliche Verteilung des Ventilationsindexes kann Abb. 7-10 entnommen werden.

In Abb. 7-11 wird analog zu Abb. 7-10 der Luftwechsel im Betrachtungsvolumen aufgezeigt. Der Parameter Luftwechsel zeigt das Intermittenzverhalten der detektierten relativen Konzentration und reagiert somit sensibler auf Veränderungen der turbulenten Struktur des Windfelds als der Parameter VI. Im direkten Nachlauf des BSU-Gebäudes kann eine Beeinträchtigung des Luftwechsels zwischen den Bebauungszuständen von max. 25 % detektiert werden. Ersichtlich wird, dass entlang der S-Bahntrasse sowie den benachbarten Freiflächen der gewählte Grenzwert I_G im Plan-Zustand signifikant häufiger überschritten wird. Innerhalb der bahnhofsnahen Bebauungsstruktur bedingt die Interaktion der Strömung mit den lokalen Baukörpern ein individuelles Ventilationsverhalten, verallgemeinernde Aussagen über die Veränderung des Ventilationspotentials können anhand des Parameters Luftwechsel nicht getroffen werden. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse der betrachteten Bebauungszustände erfolgt in Abb. 14-21.

Mit der Messmethodik kann eine Beeinflussung des Ventilationsverhaltens bis in den fernen Nachlauf des IBA-Geländes (ca. 1000 m_{fs}) und des BSU-Gebäudes nachgewiesen werden. Auf dem Übersichtplot wird ersichtlich, dass sich das Ventilationsverhalten bis in ca. 750 m_{fs} Entfernung des höchsten Gebäudes (15-fache Gebäudehöhe des BSU-Gebäudes) verändert. Messungen des Ventilationspotentials in größerer Entfernung wurden nicht erhoben. Auffällig ist des Weiteren die Konzentration der Beeinträchtigungen auf den direkten Nachlauf des Umstrukturierungsgebiets. Die Verbesserungen des Ventilationspotentials treten (je nach betrachtetem Parameter) signifikant gehäuft an den äußeren Messpositionen des untersuchten Gebiets auf.

Abb. 7-12 zeigt die Differenz der Schwankungsintensität des detektierten Konzentrationssignals⁴⁷ im Stadtraum. Vergleichbar zu Abb. 7-10 kann innerhalb des Stadtraums nur eine geringfügige Differenz des Parameters zwischen den Bebauungszuständen festgestellt werden, die relative Bandbreite des Signals bleibt vergleichbar. Entlang der S-Bahntrasse und den anrainenden Freiflächen kann eine deutliche Erhöhung der Schwankungsbreite (max. 1.6) im Ist-Zustand detektiert werden. Da an diesen Positionen ein geringer Mittelwert vorherrscht, verringert sich die Schwankungsbreite bei dessen Erhöhung im Plan-Zustand. Auch mit diesem Bewertungsparameter kann eine Veränderung in einer Entfernung von 15*h festgestellt werden.

⁴⁷ Es erfolgt eine Bandbreitenbetrachtung des Konzentrationssignals nach Gleichung 7-1. Bei der Abschätzung der lokalen Variabilität des Signals würde Gleichung 7-2 angewendet werden (vgl. Abb. 7-8 in Kap. 7.1).



Abb. 7-11: Differenz des Luftwechsels (in %) im Stadtgebiet Hamburg-Wilhelmsburg, Betrachtungsintervall: 10 s.



Abb. 7-12: Differenz der Schwankungsintensität im Stadtgebiet Hamburg-Wilhelmsburg, Betrachtungsintervall: 10 s.

In Abb. 14-22 erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse in den betracheteten Bebauungszuständen. Weitere mögliche Kennwerte der Ventilationseigenschaften wie bspw. die Schwerpunkte der Verteilungen, Spitzen-zu-Mittelwert-Verhältnissen, u.a. weisen ein vergleichbares räumliches Verhalten auf und sollen daher hier nicht vertieft betrachtet werden.

In Kap. 7 wurde die Intermittenz der Zeitserie als ein Bewertungskriterium des Ventilationsverhaltens eingeführt. Aus der Analyse von stündlichen Betrachtungsräumen konnten mittlere Überschreitungsdauern über den gewählten Grenzwert *I*_G für die jeweiligen Positionen bestimmt werden, bei der Betrachtung einer gesamten Zeitserie kann hieraus eine Häufigkeitsverteilung erstellt werden. Diese Untersuchung der mittleren Verteilung der Überschreitungszeiträume eignet sich lediglich für Einzelfalluntersuchungen an sehr stark beeinflussten Messpositionen. Im Nachlauf der Neubauten oder innerhalb der bestehenden urbanen Struktur weisen die Verteilungen eine relative Differenz voneinander weit unterhalb des Unsicherheitsbereichs⁴⁸ auf. Weiterhin zeigte die Betrachtung des mittleren intermittenten Verhaltens des Konzentrationssignals keine signifikanten räumlichen Verteilungsmuster und wird deswegen nicht vertiefend betrachtet.

7.3 Vergleich der Stadtraumtypen

In Kap. 6 konnten drei unterschiedliche Stadtraumtypen (SRT) innerhalb des Modellgebiets identifiziert werden. Da sich diese SRT in ihren charakteristischen Eigenschaften deutlich voneinander unterscheiden, wird ein je SRT verschiedenartiges Ventilationsverhalten erwartet. In einer ersten Betrachtung soll anhand einer räumlichen Mittelwertbildung ein Vergleich der SRT erfolgen. Die Bildung eines räumlichen Mittelwertes wird sowohl in experimentellen als auch in numerischen Studien (u.a. Kubota et al. (2008), Hang et al. (2010), Ng (2009), vgl. Kap. 4) zur Bestimmung des Ventilationsverhaltens angewendet. In den Windkanalversuchen sind an charakteristischen Positionen innerhalb der Stadtraumtypen räum-lich hochaufgelöst Messungen des Ventilationspotentials durchgeführt worden. Die Mess-ungen innerhalb des Stadtraumtyps Kleingartenanlage sowie im Stadtgebiet sind im Ist-Zustand, die Messungen auf dem Gebiet der internationalen Bauausstellung sind im Plan-Zustand des Modells erhoben worden.

Als ersten Vergleichsparameter der Ventilation wird der Luftwechsel nach (GI. 7-4) betrachtet. Tabelle 7-1 und Tabelle 7-2 listen den räumlich gemittelten Luftwechsel (LW) sowie ausgewählte Perzentile der Verteilung, sodass die Bandbreite der Ergebnisse abgeschätzt und evtl. auf die Verteilung dominant wirkende Messergebnisse aus dieser Gegenüberstellung ersichtlich werden. Die Analyse des Luftwechsels ist in allen vier Betrachtungsintervallen durchgeführt worden, detailliert betrachtet werden hier die Klassen 1 und 4 (10 s und 3600 s).

Der Tabelle 7-1 kann entnommen werden, dass der am stärksten ausgeprägte Luftwechsel innerhalb des SRT Kleingarten (mit geringen vertikalen Ausdehnungen und sehr strukturierter Gebäudeorientierung) detektiert wurde. Auch die Bandbreite der Ergebnisse ist im direkten Vergleich der SRT die schmalste.

⁴⁸ Die Wiederholbarkeit der mittleren Überschreitungsdauern wird in Abb. 14-19 diskutiert

Der SRT Stadt mit einer eher homogenen Struktur in Riegelbebauung weist den geringsten Luftaustausch auf. Auffällig ist, dass auch sehr gut ventilierte Orte im Stadtraum existieren, da in den oberen Perzentilen der Verteilung vergleichsweise hohe LW-Werte gemessen wurden. Die Baustruktur des SRT IBA weist großzügige Freiflächen zwischen den Gebäuden auf, die Gebäudehöhen und deren Geometrien sind sehr heterogen ausgebildet. Im Vergleich zur SRT Stadt mit homogener Struktur wird eine erhöhte Luftwechselrate detektiert. Auffällig ist in diesem SRT die Varianz des Luftwechsels an den Messpositionen: Bedingt durch die Heterogenität der Baustruktur wird der räumliche Mittelwert über eine große Bandbreite an LW-Zustände gebildet. Tabelle 7-2 verdeutlicht den Einfluss des Mittelungsintervalls Klasse 4 (hier: 1 Stunde) auf die statistischen Parameter. Die räumlichen Mittelwerte der SRT IBA und Stadt sind deutlich geringer als in Tabelle 7-1, SRT Kleingarten ist vernachlässigbar erhöht. Bemerkenswert ist die Bandbreite der Ergebnisse (0 - 100 % LW). Gleichung 7-4 definiert den Luftwechsel als den prozentualen Anteil der Zeitserie, der einen gewählten Grenzwert der Konzentration I_G unterschreitet. Je nach individueller Positionierung des Messortes wird, bei Betrachtung der Langzeitmittelwerte, dieser Grenzwert sehr häufig (im Nachlauf von Gebäuden) oder sehr selten (in freier Strömung) überschritten, sodass in dieser Intervallgröße das gesamte Spektrum der Ventilationszustände bestimmt werden kann. Auffällig ist weiterhin, dass die effektive Bandbreite der Ergebnisse bei kurzzeitigen Mittelwerten größer ist, jedoch die Spannweite der Ergebnisse aufgrund der zwei Extreme sich bei Langzeitmittelwerten vergrößert.

Tabelle 7-1: Vergleich	des mittleren	Luftwechsels in	den	Stadtraumtypen	in [%],	Betrachtungsintervall:
10 s.						

SRT	Mittelwert	05.	25.	Median	75.	95.	
		Perzentil	Perzentil		Perzentil	Perzentil	
Stadt	48.96	24.14	30.89	37.42	69.72	86.66	
IBA	59.91	26.99	37.22	62.99	84.05	97.02	
Kleingarten	72.07	54.61	65.16	75.88	83.92	92.84	

Tabelle 7-2: Vergleich des mittleren Luftwechsels in den Stadtraumtypen in [%], Betrachtungsintervall:3600 s.

SRT	Mittelwert	05.	25.	Median	75.	95.	
		Perzentil	Perzentil		Perzentil	Perzentil	
Stadt	27.25	0	0	6.03	64.36	100	
IBA	40.16	0	0	9.27	98.98	100	
Kleingarten	73.98	4.41	51.41	96.89	100	100	

Der räumlich gemittelte Luftwechsel in den Stadtraumtypen ist in Abb. 7-13 in den o.g. Klassen dargestellt. Die Farbcodierung erfolgte in dieser Abbildung zweigeteilt: Die linke Hälfte der eingefärbten Flächen spiegelt das Ergebnis der räumlichen Mittelwerte der ersten Klasse wieder, der rechte Teil steht für das Mittelungsintervall der Klasse 4.



Abb. 7-13: Vergleich des mittleren Luftwechsels in den Stadtraumtypen mit einer Zweiteilung der eingefärbten Flächen: linke Hälfte: 10 s, rechte Hälfte: 3600 s Betrachtungsintervall.

Auf der Basis eines räumlichen mittleren Wertes können keine Aussagen über die lokale Ausprägung des Ventilationsverhaltens aufgrund von Unterschieden der Bebauungsstruktur getroffen werden. Da die entwickelte Messmethodik es ermöglicht, die lokalen Charakteristiken des Ventilationspotentials zu erfassen, wird in der nachfolgenden Betrachtung zu den jeweiligen Fragestellungen eine Übersichtsdarstellung der lokalen Ventilationsparameter mit Fokus auf die individuellen Unterschiede erfolgen. Weitere vergleichende Aussagen auf der Basis von räumlich gemittelten Ventilationsparametern werden nicht getroffen.

In Abb. 7-14 ist der lokale Luftwechsel nach Gleichung 7-4 in den drei betrachteten SRT dargestellt. Die Betrachtung der lokalen Ausprägungen zeigt ein differenziertes Bild des Luftwechsels. Der Abbildung kann entnommen werden, dass innerhalb der Kleingartenanlage ein guter bis sehr guter Luftwechsel detektiert wird. Lediglich an drei Positionen konnten starke Abweichungen von diesem sehr guten Ventilationsverhalten nachgewiesen werden. Vergleichbar mit den anderen SRT wurde ebenfalls innerhalb der Baustruktur gemessen. An diesen Messpositionen spannen sich Freiräume zwischen den Gartenlauben auf, sodass dort im direkten Nachlauf eines Gartenhauses (2.5 - 3 m_{fs} Höhenausdehnung) das Ventilationspotential detektiert werden konnte. Der Einfluss der geringen vertikalen Ausdehnung der Gebäude bzw. die Interaktion der Gebäude mit dem Strömungsfeld kann mit dieser Messmethodik nachgewiesen werden. Diese drei Messpositionen üben aufgrund der geringen

Stichprobenanzahl innerhalb dieses SRT einen starken Einfluss auf den Mittelwert aus, sodass aufgrund dessen ein verringerter Gebietsmittelwert bestimmt wird.

Innerhalb der IBA-Struktur variiert die Ausprägung des Luftwechsels entsprechend der Baustruktur. Auffällig sind besonders drei Messpositionen im direkten Nachlauf der Gebäude, in denen bei einer Mittelung über das Klassenintervall 1 Luftwechselraten des unteren Drittels (< 30 %) detektiert wurden. Innerhalb der Freiflächen wird ein guter, durch die Baustruktur nur leicht beeinflusster LW gemessen. Durch die Betrachtung eines höheren Klassenintervalls verstärkt sich die Gewichtung der Interaktion mit den Gebäuden, sodass sich in den Betrachtungsintervallen der Mittelwert der Konzentration erhöht und sich somit ein geringerer LW ausprägt⁴⁹.

Der SRT Stadt prägt mit seinem charakteristischem Windfeld den Luftwechsel nachhaltig. Der verringerte Luftaustausch innerhalb der Straßenzüge wird ebenso erfasst wie das lokal variierende Ventilationsverhalten in Innenhöfen. Der Abb. 7-14 kann entnommen werden, dass innerhalb der Straßenzüge, aufgrund der kanalisierten Strömung, ein im räumlichen Vergleich erhöhter Luftwechsel detektiert werden kann. Als Vergleichsmöglichkeit für den reduzierten Luftwechsel des Stadtraums sind in der Abbildung Messpositionen entlang der S-Bahntrasse eingefügt.



Abb. 7-14: Vergleich der Stadtraumtypen: Luftwechsel im Betrachtungsvolumen, Betrachtungsintervall: 10s.

⁴⁹ In Abb. 14-24 ist der Luftwechsel im Betrachtungsvolumen in dem Betrachtungsintervall der Klasse 4 dargestellt, korrespondierend zu Tabelle 7-2.

Neben der Betrachtung eines räumlich gemittelten Wertes eines Ventilationsparameters stellt die Analyse des konvergenten Verhaltens der Verteilungen bzw. einer räumlich gemittelten Verteilung eine weitere Vergleichsmöglichkeit dar. Über die Mittelwertbildung der Verteilungen in verschiedenen Stichprobengrößen soll das Konvergenzverhalten in den drei Stadträumen untersucht werden. Da im SRT Kleingarten bis auf drei Ausnahmen ein allgemein sehr gutes Ventilationspotential detektiert werden konnte, wird eine Konvergenz der Verteilungen bei einer geringeren Stichprobengröße erwartet als bspw. innerhalb des SRT IBA mit sehr heterogenen Verteilungen.

Für die Analyse des Konvergenzverhaltens werden die kumulativen Verteilungen über die jeweilige Stichprobengröße in jedem Konzentrationsschritt blockgemittelt, sodass für wachsende Stichprobengrößen eine geringer werdende Anzahl an mittleren Verteilungen bestimmt wird. Anhand dieser mittleren Verteilungen kann das Konvergenzverhalten der relativen Konzentrationen im Stadtraumtyp nachvollzogen werden.



Abb. 7-15: Mittleres Ventilationsverhalten in den betrachteten SRT, Intervallgröße der Konvergenz-analyse: zwei Verteilungen.

In Abb. 7-15 sind die mittleren Verläufe der Häufigkeitsverteilungen, bei einer Intervallgröße von 2 Verteilungen, in den drei Stadtraumtypen aufgezeigt. Durch die Farbcodierung wird es ersichtlich, dass im SRT Kleingarten auf Grund der Gleichförmigkeit der individuellen Histogramme eine geringe Bandbreite der Verteilungen vorherrscht, in den anderen betrachteten SRT eine stärkere Streuung der Verteilungen existiert. Auffällig ist die Zweiteilung der Kurvenverläufe der Häufigkeiten im SRT IBA. Die Messpositionen innerhalb der Freiflächen sowie der gebäudenahen Positionen können eindeutig voneinander unterschieden werden. Innerhalb des SRT Stadt existiert eine große Streubreite der Verteilungen, einzelne Positionen mit herausstechenden Eigenschaften (bspw. die Innenhofpositionen) können jedoch eindeutig identifiziert werden.

In Abb. 7-16 ist beispielhaft das Konvergenzverhalten des SRT IBA aufgezeigt. Die o.g. Zweiteilung der Verteilungsfunktionen wird hier noch einmal veranschaulicht. Mit zunehmender Stichprobengröße der Mittelung bildet sich analog der Konvergenzanalysen der Strömungsgeschwindigkeit eine mittlere Verteilung aus. Bei einer Stichprobengröße von 15 Verteilungen wird eine Streubreite in ähnlicher Größenordnung der mittleren Unsicherheit aufgespannt.



Abb. 7-16: Konvergenzverhalten der Häufigkeitsverteilungen der relativen Konzentrationen im Stadtraumtyp IBA.

Da innerhalb des SRT IBA eine starke Streuung der lokalen Häufigkeitsverteilungen vorliegt, wird zur Ausbildung einer für den Stadtraumtyp repräsentativen Verteilung eine Mindeststichprobengröße von 25 Messpositionen (zum Vergleich: SRT Kleingarten: 10, SRT Stadt: 19 bei den gewählten Messpunkten) benötigt.

Zu beachten ist, dass die Form der mittleren Verteilung immer von der Anzahl und der Positionierung der einzelnen Messstellen abhängig ist. Bei einer verstärkten Betrachtung der teiloffenen Innenhöfe bzw. der gebäudenahen Positionen oder der Wahl von zusätzlichen Positionen in der freien Anströmung hätte sich eine verschiedenartige mittlere Form der Verteilung ausprägen können. Die hier betrachteten Messpositionen befinden sich an charakteristischen Orten innerhalb der jeweiligen Stadtraumtypen, eine Präferenz für geometrische Randbedingungen lag bei der Auswahl nicht vor.



Abb. 7-17: Aus der Konvergenzanalyse bestimmter mittlerer Verlauf der kumulativen Verteilungen in den drei Stadtraumtypen (Klasse 1).

In Abb. 7-17⁵⁰ sind die aus den Konvergenzanalysen bestimmten mittleren Verteilungen der relativen Konzentration innerhalb der Stadtraumtypen aufgezeigt, der in Kap. 6.2 bestimmte Unsicherheitsbereich ist an die Verteilungen angezeichnet. Die mittleren Verteilungen der Stadtraumtypen können in ihrer Form eindeutig voneinander differenziert werden. In bspw. dem Median wird ein Wert von 0.071 c_{rel} im Stadtgebiet erreicht, innerhalb des SRT IBA 0.019 c_{rel} und innerhalb des SRT Kleingarten lediglich 0.011 c_{rel}. Im Vergleich der Stadtraumtypen zeigt das 95. Perzentil die Bandbreite der Ventilationszustände auf, im SRT Kleingarten werden 0.159 c_{rel} erreicht, im SRT IBA 0.308 c_{rel} sowie 0.433 c_{rel} im SRT Stadt. Die betrachteten Häufigkeitsverteilungen unterscheiden sich weit über den Unsicherheitsbereich der Messungen hinaus.

Durch die räumliche Mittelung in verschiedenen Stichprobengrößen sowie die daraus resultierende Konvergenz der Häufigkeitsverteilungen konnte für die betrachteten Stadtraumtypen eine auf Basis der gewählten Messpositionen charakteristische mittlere Häufigkeitsverteilung der relativen Konzentrationen bestimmt werden. Das mittlere Ventilationsverhalten der betrachteten Stadtraumtypen kann aus diesen charakteristischen Verteilungen anhand einiger in Kap. 7 gelisteten statistischen Parametern (Mittelwert, Median, Spitzen-zu-Mittelwert-Verhältnis, Schiefe der Verteilung, etc.) erfolgen, aus der Form der Häufigkeits-verteilung können weitere beschreibende Parameter gewonnen werden. Der deutlich unter-schiedliche Kurvenverlauf der mittleren Häufigkeitsverteilungen in Abb. 7-17 spiegelt sich in den beschreibenden Parametern wieder. In Tabelle 7-3 sind beispielhaft einige Kennwerte der

⁵⁰ Klassenintervall 1 (10 s). Klassenintervall 4 (3600 s) ist zum Vergleich in Abb. 14-24 dargestellt.

Verteilungen aufgeführt. So wird ersichtlich, dass bspw. der Schwerpunkt des Flächenintegrals der relativen Konzentration sich relativ zu der Verteilung ausprägt. Ein erhöhter Schwerpunkt y_s spiegelt eine geringe Bandbreite wieder, ein erhöhter Schwerpunkt x_s weist auf ein ungünstigeres Ventilationsverhalten hin. Auffällig ist, dass sich bei allen betrachteten Stadtraumtypen der Modus (Maximum der Verteilung) der jeweiligen Verteilung bei 0.00 c_{relativ} ausbildet. Der Einfluss von sehr schlecht ventilierten Orten wie bspw. den Innen-hofpositionen wird durch die Vielzahl an Messorten kompensiert.

SRT	Schwerpunkt der Fläche unterhalb der Verteilungskurve			Peak	Median	75. Perzentil	95. Perzentil
	Xs	Уs	х	У			
Stadt	0.1369	0.0220	0	0.1218	0.0706	0.1969	0.4328
IBA	0.0807	0.0633	0	0.3211	0.0186	0.1103	0.3044
Kleingarten	0.0447	0.0807	0	0.3396	0.0109	0.0498	0.1585

Tabelle	7-3:	Beschreibende	Parameter	der	mittleren	charakteristischen	Häufigkeitsverteilung	der
	be	trachteten Stadtr	aumtypen, h	nier: 1	l0 s.			

Anhand der Untersuchung wird deutlich, dass mit einer hinreichend großen Stichprobe eine mittlere, für das Ventilationspotential eines Stadtraumtyps charakteristische Verteilung bestimmt werden kann. Durch eine Konvergenzanalyse können der Effekt verschiedener Stichprobengrößen sowie der Einfluss unterschiedlicher lokaler Strukturen (Straßenzug, Freifläche, Innenhof) auf die räumlich gemittelte Verteilung bestimmt werden.

Der Vorteil einer räumlich gemittelten Häufigkeitsverteilung gegenüber einem räumlichen Mittelwert besteht in der hochaufgelösten Betrachtungsweise, da sich aus der Verteilung weitere statistische Parameter und anhand dieser bspw. die Auftretenswahrscheinlichkeit von Lastspitzen innerhalb der Stadtraumtypen generiert werden können.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Bedingt durch die steigende Urbanisierung und die damit einhergehende Verdichtung des innerstädtischen Raums besteht ein Bedarf an neuartigen Methoden zur Bewertung der Auswirkungen von Planungsvorhaben sowie Techniken zur Abschätzung derer Risiken. Zur Verbesserung des individuellen Wohlbefindens und zur Sicherung akzeptabler und komfortabler Lebensumstände in urbanen Gebieten ist es wichtig, dass bei Umstrukturierungen im Stadtraum das Nichtverschlechterungsgebot (vgl. u.a. Mayer, 1989) eingehalten wird. Dieses gilt u.a. hinsichtlich der Durchlüftungseigenschaften eines Stadtquartiers, da die Dichte der lokalen Bebauung sowie deren geometrische Ausprägung den Luftaustausch im Straßenraum stark beeinflussen (vgl. Oke (1992), He (2014)).

In der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Messansätze zur Bestimmung des Durchlüftungsverhaltens eines urbanen Raumes diskutiert. Es wird aus dieser Übersicht der gängigen Methoden zur Bestimmung der urbanen Ventilation ersichtlich, dass eine Beschreibung der Durchlüftung meist auf der Basis von mittleren Werten (der Strömungsgeschwindigkeit oder einer Tracerkonzentration) erfolgt, transiente Phänomene können mit diesen Methoden nicht erfasst werden. Im Rahmen des KLIMZUG-Nord Verbundprojektes wurde für stadtklimatische Untersuchungen ein experimentelles Messverfahren zur Bestimmung der urbanen Ventilationseigenschaften entwickelt. Innerhalb des Modellgebiets wird über eine mobile und an die urbanen Randbedingungen angepasste Flächenquelle lokal Tracer emittiert. Mit diesem entwickelten Verfahren ist es möglich, die transienten Eigenschaften des lokalen Durchlüftungsverhaltens eines Stadtraumes zeitlich und räumlich hochaufgelöst zu detektieren und zu bewerten.

Bei der Untersuchung eines Stadtraums muss zwischen zwei Vorgehensweisen differenziert werden: dem Eintrag in ein Betrachtungsgebiet hinein ("Einatmen", vgl. Buccolieri et al., 2010) und dem Austrag der Luft aus einem Betrachtungsgebiet heraus ("Ausatmen"). Der Eintrag einströmender Luft in ein Betrachtungsvolumen und das Speichervermögen des urbanen Raumes können anhand des in Kap. 5.1.2 skizzierten Verfahrens der Ventilations-effizienz beschrieben werden. Durch Erzeugung eines (quasi-) stationären Konzentrations-zustands im Betrachtungsraum und der hochaufgelösten Detektion des Abklingverhaltens des Tracers kann, bei einer vielfacher Wiederholung der Versuchsdurchführung, die Band-breite der Durchlüftungsvorgänge detektiert werden.

Während der Versuchsdurchführung im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg konnte lediglich an ausgewählten Positionen im Stadtgebiet eine messtechnisch auflösbare Speicherwirkung der Geometrie festgestellt werden. Die Anwendung dieser Messtechnik auf das Stadtteilmodell zeigte, dass innerhalb des suburbanen Gebiets mit geringer vertikaler Ausdehnung und gelockerter Baustruktur kaum Tracer in die urbane Struktur eingetragen werden kann. Das Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg besitzt daher eine sehr gute Ventilationseffizienz.

Die Studien im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg setzten die Kenntnis des lokalen Strömungsfeldes für den Eintrag in das Betrachtungsvolumen voraus, da über eine punktförmige Quelle Tracer emittiert wurde. Bei einer Beschickung des Modellgebiets mit einem verschiedenartigen Quelltyp muss diese Kenntnis nicht maßgebend sein. Hier besteht Optimierungsbedarf für nachfolgende Studien. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und diskutierte Verfahren zur Bestimmung des Ventilationspotentials (Kap.5.3) beschreibt die Effektivität der Entlüftung eines Betrachtungsvolumens. Über eine flächige Emissionsquelle wird ein konstanter Tracervolumenstrom im Betrachtungsraum freigesetzt. Durch zeitlich hochauflösende Detektion der lokalen Tracerkonzentration kann das transiente Verhalten der Durchlüftung bestimmt werden.

Bei den Untersuchungen des Ventilationspotentials muss beachtet werden, dass keine Aussagen über die Güte der eingetragenen Luft getroffen werden kann. Bei belasteter Luft in Anströmungsrichtung kann sich ein hohes Ventilationspotential ungünstiger auf das Betrachtungsvolumen auswirken als ein geringes Ventilationspotential.

Sensitivitätsstudien im Modellgebiet zeigten, dass mit der entwickelten Messmethodik des Ventilationsverhaltens in hoher räumlicher Auflösung bestimmt werden kann. Änderungen des Ventilationspotentials können kleinräumig erfasst werden, sowohl in der sich ausbildenden Häufigkeitsverteilung der Konzentration als auch in den aus der Zeitserie abgeleiteten statistischen Ventilationsparametern. Es konnte gezeigt werden, dass anhand der Häufigkeitsverteilungen der relativen Konzentration ein Vergleich der lokalen Ventilationspeigenschaften erfolgen kann.

Es wurden Vergleichsstudien im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg in zwei Bebauungszuständen (vor und nach der Umstrukturierung im Rahmen der internationalen Bauausstellung) durchgeführt. Mit der entwickelten Messmethodik konnten starke lokale Veränderungen im Nahfeld der Neubauten registriert werden. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass sich die Umstrukturierung des Stadtgebiets bis in dessen fernen Nachlauf beeinflussend auf das lokale Ventilationspotential auswirkt. Innerhalb der urbanen Struktur dominieren die Abmaße der Bebauung das lokale Ventilationspotential, sodass nur geringfügige Differenzen der Bebauungszustände aufgezeigt werden konnten.

Im Windkanalmodell Hamburg-Wilhelmsburg sind anhand ihrer geometrischen Ausprägungen drei verschiedenartige Stadtraumtypen identifiziert worden. Anhand von räumlichen Mittelwertbildungen konnte aus den Häufigkeitsverteilungen der relativen Konzentrationen innerhalb der Stadtraumtypen ein mittleres Ventilationsverhalten bestimmt werden. Es zeigten sich für die drei Stadtraumtypen signifikant verschiedene mittlere Verteilungen. Die betrachteten Stadträume besitzen jeweils ein charakteristisches Ventilationspotential, somit kann ein signifikant unterschiedliches Durchlüftungsverhalten angenommen werden.

9. Abbildungsverzeichnis

ABB. 1-1: BEEINFLUSSENDE FAKTOREN DES STÄDTISCHEN WINDFELDS, NACH GROß UND FUNK (2012).	2
ABB. 2-1: Schematischer Aufbau der Atmosphäre, nach Koss (2001).	6
ABB. 2-2: Schwankungsanteile der Windgeschwindigkeit, nach v. d. Hoven (1957).	9
ABB. 2-3: STÄDTISCHE GRENZSCHICHT, NACH OKE (1992), MODIFIZIERT.	10
ABB. 2-4: VERSATZHÖHE D0, OBERFLÄCHENNAHES WINDFELD, NACH COOK (1985), MODIFIZIERT.	11
ABB. 2-5: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES SVF, NACH OKE (1992).	13
ABB. 2-6: (A) AUSSCHNITT DER HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER WINDGESCHWINDIGKEIT IN 10M HÖHE AM STANDORT BILLWERT	DER
(links), (b) Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Windrichtung in 10 m Höhe (rechts). Die	
WINDGESCHWINDIGKEITSKLASSIFIZIERUNG ERFOLGT GEMÄß DER VERWENDETE FARBSKALA IN ABB. 2-6 A. EIN MÖGLICHE	R
Störeinfluss des Messmastes ist in der Windrosendarstellung grau hinterlegt.	18
ABB. 3-1: SKIZZE DES GROßEN GRENZSCHICHTWINDKANALS (WOTAN) AM EWTL.	24
ABB. 3-2: VERSPERRUNGSVERHÄLTNIS DES WINDKANALMODELLS HAMBURG-WILHELMSBURG (BLICK IN STRÖMUNGSRICHTUNG	i). DIE
Umstrukturierung des Stadtteils im Rahmen der IBA ist berücksichtigt.	28
Abb. 3-3: Dimensionsloser Druckgradient längs der longitudinalen Windkanalachse.	30
Abb. 3-4: Lateralprofile der Windgeschwindigkeit über dem Stadtgebiet Hamburg-Wilhelmsburg.	31
Abb. 3-5: Test auf Reynoldszahlen-Unabhängigkeit der Strömung.	32
ABB. 3-6: UNSICHERHEITSBESTIMMUNG DER MESSERGEBNISSE AUS DEN STRÖMUNGSPROFILEN.	35
ABB. 3-7: WINDPROFIL DER GRENZSCHICHTANSTRÖMUNG AUF DAS STADTTEILMODELL HAMBURG-WILHELMSBURG, LINKS IN	
LINEARER DARSTELLUNG (A), RECHTS IN HALB-LOGARITHMISCHER DARSTELLUNG (B).	36
ABB. 3-8: VERTIKALE TURBULENTE FLÜSSE DER MODELLIERTEN ANSTRÖMUNG AUF DAS MODELLGEBIET HAMBURG-WILHELMSE	URG.
	37
ABB. 3-9: ZUSAMMENHANG DES PROFILEXPONENT A UND DER RAUIGKEITSLÄNGE Z0 DER ANSTRÖMUNG AUF DAS MODELLGEBII	T
Hamburg-Wilhelmsburg im Vergleich mit Daten von Naturmessungen und der Theorie nach Counihan (19	175).
	38
ABB. 3-10: PROFILE DER TURBULENZINTENSITÄT DER STRÖMUNGSKOMPONENTEN IN DER ANSTRÖMUNG AUF DAS MODELLGEB	ET
HAMBURG-WILHELMSBURG.	40
ABB. 3-11: VERTIKALES PROFIL DER INTEGRALEN LÄNGENMAßE LUX DER ANSTRÖMUNG IM VERGLEICH MIT DEM FUNKTIONALEN	
ZUSAMMENHANG NACH COUNIHAN.	42
ABB. 3-12: NORMIERTE SPEKTRALE VERTEILUNG DER TURBULENTEN KINETISCHEN ENERGIEDICHTE IN HAUPTSTRÖMUNGS-RICHT	UNG
der Anströmung auf das Modellgebiet in 42 m Höhe (Naturmaßstab).	43
ABB. 4-1: PRINZIPSKIZZE DES VERSUCHSAUFBAUS: MESSUNGEN DER VENTILATIONSEFFIZIENZ MIT BODENNAHER	
TRACERGASFREISETZUNG AUS ORTSFESTER QUELLE.	50
ABB. 4-2: PRINZIPSKIZZE DES VERSUCHSAUFBAUS: MESSUNGEN DES VENTILATIONSPOTENTIALS ÜBER DIE	
OBERFLÄCHENWÄRMEEMISSION.	52
ABB. 4-3: PRINZIPSKIZZE DES VERSUCHSAUFBAUS: MESSUNGEN DES VENTILATIONSPOTENTIALS MIT EINER FLÄCHENQUELLE.	53
ABB. 5-1: AUSSCHNITT EINER ZEITSERIE DER KONZENTRATIONS-ABKLINGVERSUCHE.	56
ABB. 5-2: DARSTELLUNG EINER SPÜLZEITANALYSE. ROT: MITTLERE KONZENTRATION IN EINEM STRAßENZUG, GRAU: ERGEBNISSE	DER
EINZELMESSUNGEN.	57
ABB. 5-3: DETAILLIERTE BETRACHTUNG DES KONZENTRATION-ABKLINGVORGANGS DER MITTLEREN UND DER EINZELNEN	
TRACERGASFREISETZUNGEN.	57
ABB. 5-4: VERGLEICH DES ABKLINGENS DER KONZENTRATION IN VERSCHIEDENEN URBANEN STRUKTUREN: FREIFLÄCHE IM	
Stadtgebiet (Pos. A-B, oben), Messposition innerhalb eines Straßenzugs (Pos. C-D, unten).	59
Abb. 5-5: Vergleich unterschiedlicher Quellentfernungen auf das Abklingverhalten des Tracergases.	60
ABB. 5-6: MESSPRINZIP: TRACERGASFREISETZUNG MIT MOBILER TRACERZUFÜHRUNG.	61
ABB. 5-7: BANDBREITE DER NORMIERTEN KONZENTRATION C* IM BETRACHTUNGSVOLUMEN WÄHREND DES ABKLINGVORGANG	s. 62
ABB. 5-8: BETRACHTUNG DES ABKLINGVERHALTENS DER KONZENTRATION EINER POSITION IN VERSCHIEDENEN HÖCHENSTUFEN,	
dargestellt sind ausgewählte Perzentile der Konzentration.	63

Abb. 5-9: Differenz der Verteilungen des Abklingverhaltens im Zuge der Umstrukturierungen im Stadtgebiet	
HAMBURG-WILHELMSBURG, NULLZUSTAND – PLANZUSTAND.	64
Abb. 5-10: Spülgraduntersuchung einer Freifläche im Stadtgebiet.	65
ABB. 5-11: ZEITSCHRIEB DER KONZENTRATION EINER KONTINUIERLICHEN FREISETZUNG IN EINER GUT VENTILIERTEN MESSPOSI	TION
(gelockerte Baustruktur).	66
ABB. 5-12: Messprinzip: Oberflächenwärmeemission.	67
Abb. 5-13: Vorversuche zur Erfassung der Oberflächentemperatur in verschieden urbanen Bebauungs-	
KONFIGURATIONEN.	69
Abb. 5-14: Anpassung einer mittleren Temperaturdifferenz Theta über gleitend gemittelte Temperaturdifferen	JZEN
PRO MESSZEITSCHRITT.	69
Abb. 5-15: Anpassungen eines mittleren Abklingverhaltens der Oberflächentemperatur an das Signal durch	
VERSCHIEDENE FUNKTIONEN, SEMILOGARITHMISCHE DARSTELLUNG.	70
Abb. 5-16: Anpassungen eines mittleren Abklingverhaltens der Oberflächentemperatur an das Signal durch	
verschiedene Funktionen, semilogarithmische Darstellung, langfristige Betrachtung der Zeitserie.	70
ABB. 5-17: VERGLEICH DER GEWÄHLTEN QUELLGRÖßE ZUR GEWÄHLTEN MINDESTSTRAßENBREITE, SCHEMATISCHE DARSTELLU	NG.
LINKS: FRONTALANSICHT, RECHTS: DRAUFSICHT.	72
ABB. 5-18: ABHÄNGIGKEIT DES MITTLEREN KONZENTRATIONSSIGNALS VON DEM QUELLDURCHMESSER.	74
Abb. 5-19: Abhängigkeit des mittleren Konzentrationssignals von der Referenzwindgeschwindigkeit.	74
Abb. 5-20: Abhängigkeit des mittleren Konzentrationssignals von dem Quellabstand des Fast-FIDs.	75
Abb. 5-21: Bandbreite der Mittelwerte der Wiederholungsmessungen.	75
Abb. 6-1: Veränderung der mittleren Konzentrationswerte im Stadtraum Wilhelmsburg bei der Realisierung d)ES
Plan-Zustands der internationalen Bauausstellung.	81
Abb. 6-2: Veränderung des mittleren Konzentrationswertes (in %) der Ventilationsuntersuchungen im Stadtr	AUM
HAMBURG-WILHELMSBURG.	81
Abb. 6-3: (a) Ausschnitt einer Zeitserie der relativen Konzentration, (b) Häufigkeitsverteilung der relativen	
KONZENTRATION DER MESSPOSITION.	82
Abb. 6-4: Vergleich der Häufigkeitsverteilungen verschiedener Messpositionen im Modellgebiet Hamburg-	
WILHELMSBURG.	83
Abb. 6-5: Gegenüberstellung der Häufigkeitsverteilungen der relativen Konzentrationen einer Messposition if	N ZWEI
BETRACHTETEN BEBAUUNGSZUSTÄNDEN.	84
Abb. 6-6: Einfluss des conditional samplings auf die Häufigkeitsverteilung an einer Messposition mit guten	
VENTILATIONSEIGENSCHAFTEN.	86
Abb. 6-7: Bewertungszeiträume der Ventilation im Vergleich mit der spektralen Verteilung des Windes nach v.	D.
Hoven (1957), ergänzt um die vorgeschlagenen Intervallklassen.	89
Abb. 6-8: Gleitender Mittelwert über verschiedene Betrachtungsintervalle, hier: 10 s.	89
ABB. 6-9: Einfluss der Mittelungszeiträume der Intervallklassen auf das resultierende Histogramm der relativ	VEN
KONZENTRATION AM BEISPIEL EINER MESSPOSITION IM NACHLAUF DES BSU-GEBÄUDES.	90
ABB. 6-10: UNSICHERHEITSBESTIMMUNG DER VERTEILUNGEN IN DEN KLASSENINTERVALLEN.	92
ABB. 7-1: LUFTWECHSEL INNERHALB DES BETRACHTUNGSVOLUMENS IM STADTRAUM HAMBURG-WILHELMSBURG, MODELL I	M PLAN-
Zustand.	95
ABB. 7-2: SKIZZE: INTERMITTENZBETRACHTUNG EINER ZEITSERIE.	96
Abb. 7-3: Verteilung der Überschreitungshäufigkeiten des maßgebenden Intervalls (hier: Klasse 1) über einen	
stündlichen Bewertungszeitraum.	97
ABB. 7-4: HOCHAUFGELÖSTE BETRACHTUNGSRÄUME IM MODELLGEBIET HAMBURG-WILHELMSBURG.	99
ABB. 7-5: Vergleich der kumulativen Verteilung der Auftretenshäufigkeit relativen Konzentration im Fokusge	BIET
STRAßenzug.	99
ABB. 7-6: VARIABILITÄT DES PARAMETERS FRISCHLUFTEINTRAG/LUFTWECHSEL IM FOKUSGEBIET STRAßENZUG IN VIER	
BETRACHTUNGSINTERVALLEN, VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS: 10 S, 30 S, 180 S, 3600 S.	100
ABB. 7-7: (A) LUFTWECHSEL UND (B) VENTILATIONSINDEX IM FOKUSGEBIET INNENHOF, BETRACHTUNGSINTERVALL: 10 S.	101

Abb.	7-8: VARIATIONSKOEFFIZIENT IM FOKUSGEBIET INNENHOF, BETRACHTUNGSINTERVALL: 10 S.	102
Abb.	7-9: Veränderung des Ventilationsindexes (in %) im Zuge der Umstrukturierung des Stadtquartiers. Die	
	DIAGONALE ENTSPRICHT DER 100%-MARKE, DER BESTIMMUNGSUNSICHERHEITSBEREICH DES VENTILATIONSINDEXES IST DI	JRCH
	die gestrichelte Linie dargestellt. Betrachtungsintervall: 10 s.	104
Abb.	7-10: VERÄNDERUNG DES VENTILATIONSINDEXES (IN %) IM STADTRAUM HAMBURG-WILHELMSBURG.	104
Abb.	7-11: DIFFERENZ DES LUFTWECHSELS (IN %) IM STADTGEBIET HAMBURG-WILHELMSBURG, BETRACHTUNGS-INTERVALL: 10) s.
		106
Abb.	7-12: DIFFERENZ DER SCHWANKUNGSINTENSITÄT IM STADTGEBIET HAMBURG-WILHELMSBURG, BETRACHTUNGS-INTERVAL	.L:
	10 s.	106
Abb.	7-13: Vergleich des mittleren Luftwechsels in den Stadtraumtypen mit einer Zweiteilung der eingefärbten	
	Flächen: linke Hälfte: 10 s, rechte Hälfte: 3600 s Betrachtungsintervall.	109
Abb.	7-14: Vergleich der Stadtraumtypen: Luftwechsel im Betrachtungsvolumen, Betrachtungsintervall: 10s.	110
Abb.	7-15: MITTLERES VENTILATIONSVERHALTEN IN DEN BETRACHTETEN SRT, INTERVALLGRÖßE DER KONVERGENZ-ANALYSE: ZW	/EI
	Verteilungen.	111
Abb.	7-16: KONVERGENZVERHALTEN DER HÄUFIGKEITSVERTEILUNGEN DER RELATIVEN KONZENTRATIONEN IM STADTRAUMTYP IE	SA.
		112
Авв.	7-17: Aus der Konvergenzanalyse bestimmter mittlerer Verlauf der kumulativen Verteilungen in den drei	
	Stadtraumtypen (Klasse 1).	113
Abb.	14-1: (a) Schematische Darstellung der Lage der betrachteten Klimastationen in Hamburg, (b)	
	Häufigkeitsverteilung der mittleren Windverhältnisse (Windrose) am Standort Billwerder in 175 m Höhe,	
	Datengrundlage: 2007 - 2009.	143
Abb.	14-2: (A) WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN 175 M HÖHE BEI STARKWINDVERHÄLTNISSEN UND (B) SCHWACHWIND-	
	verhältnisse, Datengrundlage: 2007 – 2009.	144
Авв.	14-3: (A) WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN 10 M HÖHE UND (B) PROFIL DER MITTLEREN WINDGESCHWINDIGKEIT AM STAN	DORT
	BILLWERDER, DATENGRUNDLAGE: 2007 – 2009.	144
Авв.	14-4: Gegenüberstellung eines Tagesgangs der Lufttemperatur, nach Kuttler (2010).	148
Авв.	14-5: Idealisierter Vergleich nächtlicher Temperaturprofile: Urban vs. Rural, Nach Oke (1982).	149
Авв.	14-6: Schematische Darstellung des SVF. Nach Oke (1992).	150
Авв.	14-7: Konvergenz der statistischen Parameter einer Zeitserie. Betrachteter Paramter: Horizontale	
	WINDGESCHWINDIGKEIT.	153
Авв.	14-8: Relative Messunsicherheit. Bestimmt aus Wiederholungsmessungen.	155
Авв.	14-9: Absolute Unsicherheit der Messpositionen über der Lokalen Windgeschwindigkeit.	156
ABB.	14-10: Relative Unsicherheit der Messpositionen über der Lokalen Windgeschwindigkeit.	156
ABB.	14-11: Setup der Spires im Anströmbereich des Grenzschichtwindkanals WOTAN. Alle Angaben in MM.	159
ABB.	14-12: Setup der Rauigkeitseiemente im Grenzschichtwindkanal WOTAN, alle Angaben in mm.	160
ABB.	14-13: Ski77F Windkanai WOTAN.	161
ARR	14-14: Ereigesetzter Tracervollimenstrom bei verschiedenen Referenzwindgeschwindigkeiten, bestimmt aus	DFM
1.001		162
Δrr	14-15: ALISWIRKLINGEN DER GRÖßE EINES MITTELLINGSINTERVALLS ALIE DIE WINDROSE EINER MESSPOSITION	102
ADD.	MITTELLINGSZEITRALIM DER STRÖMUNGSMESSUNGEN: 10s. 30s 180s und 3600s (von Links oben nach rechts linten	()
		163
Лрр	14-16. Einelliss des conditional samplings alle die Hälleickeitsvedteilling an eined Messdosition mit eiled	105
ADD.		16/
Лрр	SCHLECHTEN VENTILATIONSEIGENSCHAFTEN. 14-17: Verteillung der Überschreitungshälleigkeiten des Maßgedenden Intervalls (Klasse 2) in einer stündlich	
ABD.	14-17. VERTEILUNG DER OBERSCHREITUNGSHAUFIGKEITEN DES MAßGEBENDEN INTERVALLS (KLASSE 5) IN EINER STUNDLICF	1EIN 165
٨٥٥		105
ABB.	14-10. DANUDRETTE DER THAUFIGKETTSVERTEILUNGEN DER WITTLEREN ÜBERSCHRETTUNGSZETTRAUME, BESTIMMT AUS	166
A		100
ABR.	14-17. VARIADILITAT DES MARAMETERS VARIATIONSKUEFFIZIENT IM FUKUSGEBIET STRAßENZUG IN VIER	167
	DETRACTIONOSINTERVALLEN, VON OBEN LINKS NACH UNTEN RECHTS: 10 S, 30 S, 180 S, 3000 S.	101

ABB. 14-20: EINFLUSS VERSCHIEDENER MITTELUNGSINTERVALLE AUF DAS KONZENTRATIONSSIGNAL, DARGESTELLT GEGEN EIN	NEN
GRENZWERT DER KONZENTRATION (IG = 0.05[-]), AUSSCHNITT, SIGNAL GLEITEND GEMITTELT.	168
ABB. 14-21: GEGENÜBERSTELLUNG DES LUFTWECHSELS IM BETRACHTUNGSVOLUMEN IN DEN ZWEI BEBAUUNGS-ZUSTÄNDEN	N. DIE
FARBCODIERUNG ZEIGT DEREN PROZENTUALE DIFFERENZ.	168
ABB. 14-22: GEGENÜBERSTELLUNG DER SCHWANKUNGSINTENSITÄT DES KONZENTRATIONSSIGNALS IN DEN ZWEI BEBAU-	
UNGSZUSTÄNDEN. DIE FARBCODIERUNG ZEIGT DEREN PROZENTUALE DIFFERENZ.	169
ABB. 14-23: AUS DER KONVERGENZANALYSE BESTIMMTER MITTLERER VERLAUF DER KUMULATIVEN VERTEILUNGEN IN DEN D	REI
Stadtraumtypen (Klasse 4).	170
ABB. 14-24: VERGLEICH DER STADTRAUMTYPEN: LUFTWECHSEL IM BETRACHTUNGSVOLUMEN, BETRACHTUNGSINTERVALL: 3	3600 s,
KORRESPONDIEREND ZU TABELLE 7-2.	171
ABB. 14-25: ANWENDUNG DES MESSVERFAHRENS IM MODELLGEBIET HAMBURG WILHELMSBURG.	171
ABB. 14-26: Einfluss des Gebäudeabstandes auf die urbane Ventilationswirkung, nach Oke (1992).	173
ABB. 14-27: Vergleich der Auswirkungen der Umstrukturierungen auf zwei Fokusgebiete innerhalb des	
Modellgebiets Hamburg-Wilhelmsburg, NACH Plehn (2014).	175
ABB. 14-28: VERÄNDERUNG DER TURBULENZSTRUKTUR DES WINDFELDS IM UMSTRUKTURIERUNGSBEREICH DER IBA, NACH	Plehn
(2014).	175
ABB. 14-29: VERGLEICH DES MITTLEREN LUFTWECHSELS FI (IN %) IN DEN BETRACHTETEN STADTRÄUMEN MIT EINER ZWEITEI	LUNG
der eingefärbten Flächen: linke Hälfte: 10 s Zeitmittel, rechte Hälfte: 1 Stunde Zeitmittel, Anströmrich	ITUNG
235°.	177
ABB. 14-30: DIFFERENZ DES LUFTWECHSELS IM NACHLAUF DES UMSTRUKTURIERUNGSGEBIETS, BASIS: AUSGANGS-ZUSTAN),
Anströmrichtung 235°.	178

10. Tabellenverzeichnis

TABELLE 3-1: MESSUNSICHERHEIT DER STRÖMUNGSMESSUNGEN BESTIMMT AUS WIEDERHOLUNGSMESSUNGEN.	35
Tabelle 5-1: Eigenschaften der kreisförmigen Flächenquelle.	72
TABELLE 6-1: ZEITLICHE KLASSIFIZIERUNG UNTERSCHIEDLICHER NUTZUNGSARTEN IN EINEM RÄUMLICH BEGRENZTEN	
Betrachtungsgebiet (ca. 17 mfs; Tabelle analog zu Koss (2006), modifiziert).	87
TABELLE 6-2: UNSICHERHEITEN DER VERTEILUNGEN DER VENTILATIONSPOTENTIALVERSUCHE BESTIMMT AUS	
WIEDERHOLUNGSMESSUNGEN, IN UNTERSCHIEDLICHEN BETRACHTUNGSINTERVALLEN.	91
TABELLE 7-1: VERGLEICH DES MITTLEREN LUFTWECHSELS IN DEN STADTRAUMTYPEN IN [%], BETRACHTUNGSINTERVALL: 10 S.	108
TABELLE 7-2: VERGLEICH DES MITTLEREN LUFTWECHSELS IN DEN STADTRAUMTYPEN IN [%], BETRACHTUNGSINTERVALL: 3600 S.	108
TABELLE 7-3: BESCHREIBENDE PARAMETER DER MITTLEREN CHARAKTERISTISCHEN HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER BETRACHTETEN	
Stadtraumtypen, hier: 10 s.	114
TABELLE 14-1: UNSICHERHEIT DER VENTILATIONSPARAMETER, BESTIMMT AUS WIEDERHOLUNGSMESSUNGEN.	157
TABELLE 14-2: UNSICHERHEIT DER VENTILATIONSPARAMETER, BESTIMMT AUS WIEDERHOLUNGSMESSUNGEN (FORTSETZUNG).	158
TABELLE 14-3: VERTEILUNG DES MITTLEREN LUFTWECHSELS IN DEN STADTRÄUMEN IN [%], HIER: 10 S INTERVALLE.	177

11. Symbole und Abkürzungen

Abkürzungen

Abkürzung Erläuterung

ACH	Air Exchange Rate, stündliche Luft- und Schadstoffwechselrate
AVAS	Air Ventilation Assesment System
CAD	Computer-Aided Design, Konstruktionssoftware
CFD	Computational Fluid Dynamics, numerische Strömungssimulation
CNC	Computerized Numerical Control, Steuerung und Regelung von Werkzeug- maschinen
CS	Conditional Sampling
EWTL	Environmental Wind Tunnel Laboratory
Fa.	Firma
FI	Häufigkeit des Frischlufteintrags
FID	Flammenionisationsdetektor
fs	Fullscale, Naturmaßstab
GIS	Geoinformationssystem
ha	Hektar
h _{kl}	Klassenbreite der Häufigkeitsverteilungen
I	Schwankungsintensität des Konzentrationssignals
l _G	Grenzwert unbelasteter-belasteter Luft (0.05)
IBA	internationale Bauausstellung
igs	internationale Gartenschau
LDA	Laser Doppler Anemometer
LES	Large Eddy Simulation, Wirbelauflösende numerische Strömungssimulation
L _{ix}	Integrales Längenmaß
LW	Luftwechsel
MDF	Mitteldichte Holzfaserplatte

Abkürzung Erläuterung

ms	Modelscale, Modellmaßstab
PET	Physiologisch Äquivalente Temperatur
PFR	Purging Flow Rate, Spülrate
PMV	Predicted Mean Vote
ppmv	parts per million by volume
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes (Equation), zeitlich gemittelte Lösung der Navier-Stokes-Gleichung
Re	Reynoldszahl
ref	Referenz
SRT	Stadtraumtyp
SVF	Sky View Faktor
T _{ix}	Integrales Zeitmaß
TKE	Turbulente Kinetische Energie
UBL	Urban Boundary Layer, städtische Grenzschicht
UCL	Urban Canopy Layer, Stadthindernisschicht
UHI	Urban Heat Island, städtische Wärmeinsel
VF	Visitation Frequency, Eintretenshäufigkeit in ein Betrachtungsvolumen
VI	Ventilationsindex
VR	Raumvolumen

Symbole

Symbol	Einheit	Definition
А	m²	Fläche
Crelativ, Crel	-	relative Konzentration
C*	-	dimensionslose Konzentration
d ₀	m	Versatzhöhe, Verdrängungsdicke
f _{red}	-	reduzierte Frequenz
h	m	Höhe
Н	m	mittlere Gebäudehöhe
l _{i(z)}	-	Turbulenzintensität
IQR	-	Interquartilsabstand
L	m	Länge
L _{ref}	m	charakteristische Länge
ṁ	kg / s	Massenstrom
n	1 / h	Luftwechselzahl
Q	m³ / s / m²	Emissionsvolumenstrom
Qi	W	Strahlungsbilanz
S _{UU} (f,z)	m² / s²	Spektrale Energiedichte der u- Komponente
Т	°C	Temperatur
u	m / s	Geschwindigkeit
u(z)	m / s	Geschwindigkeit in der Höhe z
u _*	m / s	Schubspannungsgeschwindigkeit
\overline{u}_z	m / s	mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe z
\overline{u}_{ref}	m / s	mittlere Windgeschwindigkeit in der Referenzhöhe
$\overline{u'v'}$	m² / s²	Kovarianz der horizontalen und vertikalen Strömung
VL	m³ / s	Zuluftvolumenstrom
Z	m	Höhe über Grund
Z ₀	m	dynamische Rauigkeitslänge

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Definition
α	-	Profilexponent
γ	-	Intermittenzfaktor
δ	m	Grenzschichthöhe
Δ	-	Differenz
3	-	Variationskoeffizient
λc	-	Volumenbezogene Packungsdichte urbaner Bebauung
λ_{f}	-	Frontflächenindex
λp	-	Verhältnis der Gebäudefläche zur Grundstücksgröße
κ	-	von-Kármán-Konstante (0.4)
μ	kg / ms	dynamische Viskosität
ν	m² / s	kinematische Viskosität
ρ	kg / m³	Dichte
σ_i^2	-	Varianz der i-ten Komponente
τ	N / m²	Schubspannung
$\overline{ au}_p$	S	Mittleres Alter der Luft
Φ	-	Versperrungsgrad

12. Literaturverzeichnis

LITERATURQUELLEN PRINTMEDIEN

- Ali-Toudert, F. (2005): Berichte des Meteorologischen Institutes der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Nr. 15. Dependence of Outdoor Thermal Comfort on Street Design in Hot and Dry Climate. Freiburg.
- Arnfield, A. J. (2003): Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. In: *Int. J. Climatol* 23 (1), S. 1–26.
- Bady, M.; Kato, S.; Huang, H. (2008): Towards the application of indoor ventilation efficiency indices to evaluate the air quality of urban areas. In: *Building and Environment* 43 (12), S. 1991–2004
- Baehr, H. D.; Stephan, K. (2006): Wärme- und Stoffübertragung. 5. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer.
- Britter, R. E.; Hanna, S. R. (2003): Flow and Dispersion in Urban Areas. In: *Annu. Rev. Fluid Mech.* 35 (1), S. 469–496.
- Bentham, T.; Britter, R. (2003): Spatially averaged flow within obstacle arrays. In: *Atmospheric Environment* 37 (15), S. 2037–2043.
- Benesch, W.; Jurksch, G. (1978): Die Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland im Hinblick auf die Nutzung der Windkraft. Berichte des Deutschen Wetterdiensts, 147. Offenbach am Main: Deutscher Wetterdienst.
- Brümmer, B.; Lange, I.; Konow, H. (2012): Atmospheric boundary layer measurements at the 280 m high Hamburg weather mast 1995–2011: mean annual and diurnal cycles. In: *Meteorol. Z.* 21 (4), S. 319–335.
- Baumüller, J. (Hg.) (1998): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung. Völlig überarb. Neuaufl. und Zusammenführung der Städtebaulichen Klimafibeln Folge 1 und 2. Stuttgart: Wirtschaftsministerium.
- Buccolieri, R.; Sandberg, M.; Di Sabatino, S. (2010): City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. In: Atmospheric Environment 44 (15), S. 1894–1903.
- Buccolieri, R.; Sandberg, M.; Di Sabatino, S. (2011): An application of ventilation efficiency concepts to the analysis of building density effects on urban flow and pollutant concentration. In: *Int. J. Environment and Pollution* 47 (1-4), S. 248–256.
- Buckisch, R.; Költzsch, K. (1999): Windkomfortuntersuchungen mittels Thermosgrafieaufnahmen. In: Ulrich Müller (Hg.): Workshop Stadtklima. 17./18. Februar 1999 in

Leipzig. Leipzig, Leipzig: Inst. für Meteorologie der Univ; Inst. für Tropensphärenforschung (Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig, 13), S. 25–30.

- Cappel, A.; Kalb, M. (1976): Das Klima von Hamburg. Analyse für Zwecke der angewandten Klimatologie mit Datenkatalog. Offenbach (Main): Im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes.
- Caton, F.; Britter, R. E.; Dalziel, S. (2003): Dispersion mechanisms in a street canyon. In: *Atmospheric Environment* 37 (5), S. 693–702.
- Chatwin, P. C.; Sullivan, P. J. (1989): The intermittency factor of scalars in turbulence. In: *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics (1989-1993)* 1 (4), S. 761–763.
- Cheng, V. (2009): Understanding Density and High Density. In: Edward Ng (Hg.): Designing High-Density Cities. For Social & Environmental Sustainability. London; Sterling, VA: Earthscan, S. 3–17.
- Cook, N. J. (1985): The designer's guide to wind loading of building structures. Pt I: Background, damage survey, wind data and structural classification. Garston, Watford: BRE Building Research Establishment, Department of the Environment (The designer's guide to wind loading of building structures, 1).
- Cook, N. J.; Chan, P.; Wu, D.; Holder, M. A. (2002): Towards quantitative visualization of transient surface flow on building models using infrared thermography. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 90 (6), S. 663–673.
- Counihan, J. (1975): Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880–1972. In: *Atmospheric Environment (1967)* 9 (10), S. 871–905.
- Davenport, A. G., (1963): The relationship of wind structure to wind loading. In: *Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures*. H.M.S.O. London.
- Davenport, A. G. (1967): The dependence of wind loads on meteorological parameters, Paper 2. In: *Conf. on wind Loads on Buildings*. Univ. Toronto Press. Toronto.
- Dezsö, G. (2006): On assessment of wind comfort by sand erosion. Proefschrift: Technische Universiteit Eindhoven.
- Eickmann, U. (2008): Methoden der Ermittlung und Bewertung chemischer Expositionen an Arbeitsplätzen. Landsberg: Ecomed Medizin (Fortschritte in der Präventiv- und Arbeitsmedizin; Progress in social and occupational medicine).
- ESDU, (1972): 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, (S.E.1982).
- Fanger, P. O. (1982, c1970): Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Malabar, Fla: R.E. Krieger Pub. Co.

- Felderhoff, R.; Freyer, U. (2007): Elektrische und elektronische Messtechnik. Grundlagen, Verfahren, Geräte und Systeme: mit zahlreichen Beispielen, Übungen und Testaufgaben. 8. Aufl. München [u.a.]: Hanser.
- Freedman, D.; Diaconis, P. (1981): On the histogram as a density estimator: L 2 theory. In: *Z. Wahrscheinlichkeitstheorie verw. Gebiete* 57 (4), S. 453–476.
- Gandemer, J. (1978): Discomfort due to wind near buildings: aerodynamic concepts. Washington: Dept. of Commerce, National Bureau of Standards.
- Gál, T.; Unger, J. (2009): Detection of ventilation paths using high-resolution roughness parameter mapping in a large urban area. In: *Building and Environment* 44 (1), S. 198–206.
- Grimmond, C. S. B.; Oke, T. R. (1999): Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. Journal of Applied Meteorology. In: *J. Appl. Meteor* 38 (9), S. 1262–1292.
- Groß, G.; Etling, C. (2003): Numerische Simulationsmodelle. In: Promet 30 (1/2), S. 2–38.
- Groß, G.; Funk, D. (2012): Stadtklimatische Bestandsaufnahme und Bewertung für das Landschaftsprogramm Hamburg. Kliamaanalyse und Klimawandelszenario 2050. Hg.
 v. Freie und Hansesstadt Hamburg. Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt. Hamburg.
- Hamlyn, D.; Britter, R. (2005): A numerical study of the flow field and exchange processes within a canopy of urban-type roughness. In: *Atmospheric Environment* 39 (18), S. 3243–3254.
- Handbuch Stadtklima (2010): Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel. Düsseldorf: Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Hang, J.; Sandberg, M.; Li, Y.; Claesson, L. (2009): Pollutant dispersion in idealized city models with different urban morphologies. In: *Atmospheric Environment* 43 (38), S. 6011–6025.
- Hang, J.; Sandberg, M.; Li, Y. (2009b): Age of air and air exchange efficiency in idealized city models. In: *Building and Environment* 44 (8), S. 1714–1723.
- Hang, J.; Li, Y. (2010): Ventilation strategy and air change rates in idealized high-rise compact urban areas. In: *Building and Environment* 45 (12), S. 2754–2767.
- Hang, J.; Li, Y. (2011): Age of air and air exchange efficiency in high-rise urban areas and its link to pollutant dilution. In: *Atmospheric Environment* 45 (31), S. 5572–5585.
- Hang, J.; Li, Y.; Buccolieri, R.; Sandberg, M.; Di Sabatino, S. (2012): On the contribution of mean flow and turbulence to city breathability: The case of long streets with tall buildings. In: Science of The Total Environment 416, S. 362–373.

- Hang, J.; Li, Y.; Sandberg, M.; Buccolieri, R.; Di Sabatino, S. (2012): The influence of building height variability on pollutant dispersion and pedestrian ventilation in idealized high-rise urban areas. In: *Building and Environment* 56, S. 346–360.
- Harms, F. (2010): Systematische Windkanaluntersuchungen zur Charakterisierung instationärer Ausbreitungsprozesse einzelner Gaswolken in urbanen Rauigkeitsstrukturen. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.
- Harms, F.; Leitl, B.; Schatzmann, M.; Patnaik, G. (2011): Validating LES-based flow and dispersion models. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99 (4), S. 289–295.
- Hau, E. (2008): Windkraftanlagen. Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit. 4. Aufl. Berlin: Springer.
- He, X.; Leitl, B.; Harms, F.; Kipsch, F. (2013): A systematic study on ventilation in idealized urban structures. In: PHSMOD 2013 International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena.
- He, X. (2014): Systematische Windkanalversuche zur Ableitung von Stadtplanungsempfehlungen f
 ür Stadtstrukturen mit optimal bel
 üfteten Fußg
 ängerbereichen. Masterarbeit. Universit
 ät Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.

Helliwell, N. C., (1970): Wind over London, Unpublished Note - Met. Off.

- Hellmann, G. (1917): Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre. Berlin: Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften. Physikalisch-mathematische Klasse, 1917:10).
- Hertwig, D. (2013): On Aspects of Large-Eddy Simulation Validation for Near-Surface Atmospheric Flows. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.
- Helbig, A.; Baumüller, J.; Kerschgens, M.J. (Hg) (1999): Stadtklima und Luftreinhaltung. 2. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer.
- Höppe, P. (1984): Die Energiebilanz des Menschen. Universität München, München. Meteorologisches Institut.
- Hu, T.; Yoshie, R. (2013): Indices to evaluate ventilation efficiency in newly-built urban area at pedestrian level. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 112, S. 39–51.
- Hunt, J. C. R.; Poulton, E. C.; Mumford, J. C. (1976): The effects of wind on people; New criteria based on wind tunnel experiments. In: *Building and Environment* 11 (1), S. 15–28.

- Hupfer, P.; Kuttler, W.; Heyer, E.; Chmielewski, F.-M. (2006): Witterung und Klima. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie. 12. Aufl. Wiesbaden: Teubner.
- Internationale Bauausstellung IBA Hamburg (2010): Energieatlas. Zukunftskonzept erneuerbares Wilhelmsburg. Berlin: Jovis.
- Isyumov, N.; Helliwell, S.; Rosen, S.; Lai, D. (1995): Winds in Cities: Effects on Pedestrians and the Dispersion of Ground Level Pollutants. In: Cermak, Davenport, Plate und Viegas (Hg.): Wind Climate in Cities, Bd. 277: Springer Netherlands (NATO ASI Series), S. 319–335.
- Jendritzky, G. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen. Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell. In: Beiträge der Akademie für Raumforschung, Bd. 114.
- Kabelac, S. (2006): VDI-Wärmeatlas. [Berechnungsunterlagen für Druckverlust, Wärme- und Stoffübergang]. Zehnte, bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI Buch).
- Kaimal, J. C.; Wyngaard, J. C.; Izumi, Y.; Cote, O. R. (1972): Spectral characteristics of surface layer turbulence. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. (98), S. 563-589.
- Kato, S.; Ito, K.; Murakami, S. (2003): Analysis of visitation frequency through particle tracking method based on LES and model experiment. In: *Indoor Air* 13 (2), S. 182–193.
- Kato, S.; Hiyama, K. (2012): Ventilating Cities. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Katzschner, L. (2009): Urban Climate in Dense Cities. In: Edward Ng (Hg.): Designing High-Density Cities. For Social & Environmental Sustainability. London: Sterling, VA: Earthscan, S. 71–83.
- Kratzer, A. (1956): Das Stadtklima. 2. Aufl. Braunschweig: F. Vieweg (Die Wissenschaft, 90).
- Kipsch, F.; Leitl, B.; Harms, F.; Werk, S. (2011): Optimization of urban structures for city ventilation and pedestrian level winds. In: PHSMOD 2011 - International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena.
- Kipsch, F.; Leitl, B. (2014): Wind. In: Schlünzen, K. H. und Linde, M. (Hg.): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und Szenarien zukünftiger Veränderungen. Hamburg: TuTech Verlag.
- Kipsch, F.; Leitl, B. (2014b): Einflüsse auf die Durchlüftungssituation. In: Schlünzen, K. H. und Linde, M. (Hg.): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und Szenarien zukünftiger Veränderungen. Hamburg: TuTech Verlag.
- Kipsch, F.; Schlünzen, K. H. (2014): Empfehlungen zur Bebauung. In Schlünzen, K. H. und Linde, M. (Hg.): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und Szenarien zukünftiger Veränderungen. Hamburg: TuTech Verlag.

- Klein, P. M.; Young, D. T. (2011): Concentration fluctuations in a downtown urban area. Part I: analysis of Joint Urban 2003 full-scale fast-response measurements. In: *Environmental Fluid Mechanics* 11 (1), S. 23–42.
- Koss, H. H. (2001): Einfluss der Simulation des natürlichen Windes auf die Prognose des Überlastrisikos von Hallentragwerken. Dissertation. Ruhr-Universität, Bochum. Aerodynamik im Bauwesen, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Koss, H. H. (2006): On differences and similarities of applied wind comfort criteria. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 94 (11), S. 781–797.
- König, C. (2014): IBA Hamburg Städtebauliche und energetische Betrachtung der Großen Elbinsel. In: Schlünzen, K. H. und Linde, M. (Hg.): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und Szenarien zukünftiger Veränderungen. Hamburg: TuTech Verlag.
- Kowalewski, J.; Schempp, S. (2014): Sozioökonomische Faktoren. In: Schlünzen, K. H. und Linde, M. (Hg.): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und Szenarien zukünftiger Veränderungen. Hamburg: TuTech Verlag.
- Kubota, T.; Miura, M.; Tominaga, Y.; Mochida, A. (2008): Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods. In: *Building and Environment* 43 (10), S. 1699–1708.
- Kursbuch Klimaanpassung (2014): Kursbuch Klimaanpassung. Handlungsoptionen für die Metropolregion Hamburg. Hamburg: TuTech Verlag.
- Kuttler, W.; Dütemeyer , D. (2003): Umweltmeteorologische Untersuchungsmethoden. In: Promet 30 (1/2), S. 15–27.
- Kuttler, W. (2004): Stadtklima. Teil 2: Phänomene und Wirkungen. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung* 16, S. 263–274.
- Kuttler, W. (2009): Klimatologie. Paderborn, München, Wien, Zürich: Schöningh (Grundriss Allgemeine Geographie, 3099).
- Kuttler, W. (2010): Urbanes Klima. Teil 1. In: *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft, Umweltmeteorologie* 7/8 (70).
- Lange, I. (2001): Eine Grenzschichtklimatologie für Hamburg. aus Daten der meteorologischen Messanlagen am NDR-Sendemast in Billwerder. Diplomarbeit. Universität Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.
- Letzel, M. O.; Helmke, C.; Ng, E.; An, X.; Lai, A.; Raasch, S. (2012): LES case study on pedestrian level ventilation in two neighbourhoods in Hong Kong. In: *Meteorol. Z.* 21 (6), S. 575–589.
- Liu, C.-H.; Leung, D.Y.C.; Barth, M.C. (2005): On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. In: *Atmospheric Environment* 39 (9), S. 1567–1574.

- Löbel, J.; Schirmer, H. (1988): Stadtklima und Luftreinhaltung. Ein wissenschaftliches Handbuch für die Praxis in der Umweltplanung. Berlin; Heidelberg [u.a.]: Springer.
- Manley, G. (1958): On the frequency of snowfall in metropolitan England. In: Q.J Royal Met. Soc 84 (359), S. 70–72.
- Matzarakis, A. (2001): Berichte des Meteorologischen Institutes der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Nr. 6. Die thermische Komponente des Stadtklimas. Freiburg.
- Mayer, H. (1989): Workshop: "Ideales Stadtklima" am 26. Oktober 1988 in München. In: *DMG Mitteilungen* (3), S. 52–54.
- Mayer, R.; Henkes, R.A.W.M; van Ingen, J.L (1998): Quantitative infrared-thermography for wall-shear stress measurement in laminar flow. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41 (15), S. 2347–2356.
- Mayer, R. (2000): Wall-shear stress measurements with quantitative infrared-thermography. Delft: Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering.
- Mayer, H.; Beckröge, W.; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. In: *UVP- Report* (5), S. 265–268.
- Mayer, H.; Matzarakis, A.: Zukunftsperspektiven der Umweltmeteorologie. In: *Promet* 2003 (30), S. 61–70.
- Mirzaei, Parham A.; Haghighat, Fariborz (2011): Pollution removal effectiveness of the pedestrian ventilation system. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99 (1), S. 46–58.
- NABau (2005): EN 191-1-4:2005: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke Teil 1-4. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. Berlin: Beuth.
- Ng, E. (2009): Designing for Urban Ventilation. In: Edward Ng (Hg.): Designing High-Density Cities. For Social & Environmental Sustainability. London, Sterling, VA: Earthscan, S. 119–136.
- Ng, E. (Hg.) (2009b): Designing High-Density Cities. For Social & Environmental Sustainability. London, Sterling, VA: Earthscan.
- Oke, T. R. (1982): The energetic basis of the urban heat island. In: Q.J Royal Met. Soc 108 (455), S. 1–24.
- Oke, T. R. (1988): Street design and urban canopy layer climate. In: *Energy and Buildings* 11 (1-3), S. 103–113.
- Oke, T. R. (1992, c1987): Boundary layer climates. 2. Aufl. London, New York: Routledge.
- Oke, T. R. (1995): The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In: *Cermak J. E. et al. (1995): Wind climate in cities*. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers.

- Oke, T. R. (2004): Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. [S.I.]: World Meteorological Organization (Instruments and Observing Methods Report, 81).
- Oke, T. R. (2007): Siting and Exposure of Meteorological Instruments at Urban Sites. In: Borrego und Norman (Hg.): Air Pollution Modeling and Its Application XVII: Springer US, S. 615–631.
- Panagiotou, I.; Neophytou, M.K.-A; Hamlyn, D.; Britter, R. (2013): City breathability as quantified by the exchange velocity and its spatial variation in real inhomogeneous urban geometries: An example from central London urban area. In: *Science of The Total Environment* 442, S. 466–477.
- Panofsky, H. A.; Blackadar, A. K.; Mc Vehil, G. E. (1960): The diabatic wind profile, In: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 86. 390.
- Pavageau, M.; Schatzmann, M. (1999): Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon. In: *Atmospheric Environment* 33 (24–25), S. 3961–3971.
- Peeck, C. (2011): Einfluss urbaner Rauigkeitsstrukturen auf das bodennahe Windfeld der Stadt Hamburg. Diplomarbeit. Universität Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.
- Plehn, L. (2014): Analyse der Veränderung des Ventilationspotentials von Stadtstrukturen bei städtebaulicher Umgestaltung am Beispiel Hamburg Wilhelmsburg. Masterarbeit. Universität Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.
- Plehn, L.; Kipsch, F.; Harms, F.; Leitl, B. (2013): Effect of a reconstructed cityquarter on urban ventilation. In: PHSMOD 2013 International Workshop on Physical Modeling of Flow and Dispersion Phenomena.
- Rappoport, Z.; Frankel, M. (1967): Handbook of tables for organic compound identification. 3. Aufl. Cleveland: Chemical Rubber Co.
- Reuter, U. (Hg.) (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung. Überarb. Neuaufl. Stuttgart: Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg.
- Ren, C.; Ng, E.; Katzschner, L (2011): Urban climatic map studies: a review. In: Int. J. Climatol. 31 (15), S. 2213–2233.
- Riecke, W.; Rosenhagen, G. (2010): Das Klima in Hamburg. Entwicklung in Hamburg und der Metropolregion. Offenbach/M: Deutscher Wetterdienst.
- Rix, M. (2007): Bestimmung repräsentativer Mittelungszeitintervalle für Naturmessungen in komplexer urbaner Bebauung. Diplomarbeit. Universität Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.
- Rosenhagen, G.; Schatzmann, M.; Schön, A (2011): Das Klima der Metropolregion auf Grundlage meteorologischer Messungen und Beobachtungen. In: v. Storch, H.; Claussen, M. (Hg.): Klimabericht für die Metropolregion Hamburg. Berlin; Heidelberg [u.a.]: Springer, S. 19–59.
- Rudolph, I.; Reyer, M.; Nitsche, W. (2009): Infrared-Based Visualization of Wall Shear Stress Distributions. In: Wolfgang Nitsche und Christoph Dobriloff (Hg.): Imaging Measurement Methods for Flow Analysis, Bd. 106: Springer Berlin; Heidelberg (Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design), S. 237–246.
- Salim, M.H; Linde, M.; Gierisch, A.; Grawe, D.; Reinhardt, V.; Schlünzen, K. H.: The Microscale Model MITRAS: Towards Quantifying the Impact of Adaptation Measures on Urban Climate. The 8th International Conference on Urban Climate – ICUC 8 and 10th Symposium on the Urban Environment. 2012.
- Salizzoni, P; Grosjean, N.; Méjean, P.; Perkins, R.J; Soulhac, L.; Vanliefferinge, R. (2007):
 Wind Tunnel Study of the Exchange Between a Street Canyon and the External Flow.
 In: Carlos Borrego und Ann-Lise Norman (Hg.): Air Pollution Modeling and Its Application XVII: Springer US, S. 430–437.
- Salizzoni, P.; Soulhac, L.; Mejean, P. (2009): Street canyon ventilation and atmospheric turbulence. In: *Atmospheric Environment* 43 (32), S. 5056–5067.
- Salizzoni, P.; Marro, M.; Soulhac, L.; Grosjean, N.; Perkins, R.J. (2011): Turbulent Transfer Between Street Canyons and the Overlying Atmospheric Boundary Layer. In: *Boundary-Layer Meteorology* 141 (3), S. 393–414.
- Sandberg, M.; Sjöberg, M. (1983): The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms. In: *Building and Environment* 18 (4), S. 181–197.
- Schatzmann, M. (2006): "Turbulenz und Grenzschicht Vorlesung für Studierende der Meteorologie", Vorlesungsskript. Universität Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.
- Schlünzen, K. H.; Linde, M. (Hg.) (2014): Wilhelmsburg im Klimawandel. Ist-Situation und Szenarien zukünftiger Veränderungen. Unter Mitarbeit von Kipsch, F.; Kowalewski, J.; König, C.; Leitl, B.; Linde, M.; Meier, A.-G; Schempp, S. KLIMZUG-Nord. Hamburg: TuTech Verlag.
- Simiu, E.; Scanlan, R. H. (1996): Wind effects on structures. Fundamentals and applications to design. 3rd ed. New York: John Wiley.
- Schultz, A. M. (2008): Systematische Windkanaluntersuchungen zur Evaluierung von Parametrisierungsansätzen für die städtische Rauigkeitsschicht. Dissertation. Universität Hamburg, Hamburg. Meteorologisches Institut, Department Geowissenschaften.
- Schrader, P. (1993): Die statistische Stabilität gemessener integraler Längenmaße und anderer Windparameter. Dissertation. Ruhr-Universität, Bochum. Aerodynamik im Bauwesen, Fakultät für Bauingenieurwesen.

- Schlünzen, K. H.; Grawe, D.; Ries, H.; Kirschner, P. (2012): Machbarkeitsstudie Modellierung von Stadtklima. Abschlussbericht für Teil 1: Bewertung etablierter Methoden zur Einschätzung des Stadtklimas und Nutzung der vielfältigen Informationen zu vorhandenen Flächennutzungen für numerische Modelle. Meteoro-logisches Institut, KlimaCampus, Universität Hamburg. Hamburg.
- Snyder, W. H. (1981): Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion. Research Triangle Park, N.C: Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- Sockel, H. (1984): Aerodynamik der Bauwerke. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg.
- Soulhac, L.; Perkins, R.J.; Salizzoni, P. (2008): Flow in a Street Canyon for any External Wind Direction. In: *Boundary-Layer Meteorology* 126 (3), S. 365–388.
- Standen, N. M. (1972): A spire array for generating thick turbulent shear layers for natural wind simulation in wind tunnels. Ottawa, Canada: National Aeronautical Establishment, Low Speed Aerodynamics Section (Laboratory technical report (National Research Council of Canada), 94).
- Stewart, I. D.; Oke, T. R. (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 93 (12), S. 1879–1900.
- Stull, R. B. (1991): An introduction to boundary layer meteorology. Repr. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Troen, I.; Petersen, E.L. (1989): European wind atlas. Roskilde, Denmark: Published for the Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research, and Development, Brussels, Belgium by Risø National Laboratory.
- Truckenbrodt, E. (2008): Fluidmechanik. Band 1: Grundlagen und elementare Strömungsvorgänge dichtebeständiger Fluide. Klassiker der Technik. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Van der Hoven, I. (1957): Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour. Journal of Meteorology. In: *J. Meteor* 14 (2), S. 160–164.
- VDI (1997): VDI-Richtlinie 3787/1: Umweltmeteorologie Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. Berlin: Beuth.
- VDI (2000): VDI-Richtlinie 3783/12: Umweltmeteorologie Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht - Windkanalanwendungen. Berlin: Beuth.
- VDI (2000b): VDI-Richtlinie 3788/1, 06.2000: Umweltmeteorologie Ausbreitung von Geruchsstoffen in der Atmosphäre Grundlagen. Berlin: Beuth.
- VDI (2001): VDI-Richtlinie 4300/7, 2001: Messen von Innenraumluftverunreinigungen Blatt 7: Bestimmung der Luftwechselzahl in Innenräumen. Berlin: Beuth.

- VDI (2004): VDI-Richtlinie 3787/9: Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen. Berlin: Beuth.
- VDI (2008): VDI-Richtlinie 3787/2: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung Teil I: Klima. Berlin: Beuth.
- VDI (2009): VDI-Richtlinie 3787/5: Umweltmeteorologie Lokale Kaltluft. Berlin: Beuth.
- Wieringa, J.; Davenport, A. G.; Grimmond, C. S. B.; Oke, T. R. (2001): New revision of Davenport roughness classification. In: J.A. Kleinman C.S. Geurts C.P.W &. Wit M.H de Wisse (Hg.): Third European & African conference on wind engineering: proceedings. Third European & African Conference on Wind Engineering. Eindhoven, July 2-6. Technische Universiteit Eindhoven. Eindhoven.
- Wong, M. S.; Nichol, J.E.; To, P. H.; Wang, J. (2010): A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. In: *Building and Environment* 45 (8), S. 1880–1889.
- WTG (1994): Merkblatt über Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik. Windtechnologische Gesellschaft WTG e. V., Aachen.
- Yamada, M.; Uematsu, Y.; Sasaki, R. (1996): A visual technique for the evaluation of the pedestrian-level wind environment around buildings by using infrared thermography.
 In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 65 (1–3), S. 261–271.
- Yee, E.; Kosteniuk, P.R; Chandler, G.M; Biltoft, C.A; Bowers, J.F (1993): Statistical characteristics of concentration fluctuations in dispersing plumes in the atmospheric surface layer. In: *Boundary-Layer Meteorology* 65 (1-2), S. 69–109.
- Yuan, C.; Ng, E.; Norford, L.K. (2014): Improving air quality in high-density cities by understanding the relationship between air pollutant dispersion and urban morphologies. In: *Building and Environment* 71 (0), S. 245–258.
- Zimmerman, W.B.; Chatwin, P.C. (1995): Fluctuations in dense gas concentrations measured in a wind-tunnel. In: *Boundary-Layer Meteorol* 75 (4), S. 321-352.

LITERATURVERZEICHNIS ONLINEQUELLEN

- [1] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Über KLIMZUG. Hg. ν. Bundesministerium für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter http://www.klimzug.de/160.php, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- [2] KLIMZUG-Nord: Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion. KLIMZUG-Nord: Unsere Ziele. Hg. v. TuTech Innovation GmbH. Online verfügbar unter http://www.klimzug-nord.de, zuletzt geprüft am 21.10.2013.
- [3] DWD: Beaufort-Skala. Wetterlexikon. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter http://www.deutscher-wetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=B&DAT=Beaufort-Skala, zuletzt geprüft am 16.10.2013.
- [4] Internationale Bauausstellung IBA Hamburg GmbH: Bauausstellung in der Bauausstellung. Die IBA zeigt die Zukunft des Bauens. Online verfügbar unter http://www.iba-hamburg.de/projekte/bauausstellung-in-derbauausstellung/projekt/bauausstellung-in-der-bauausstellung.html, zuletzt geprüft am 22.04.2014.

13. Danksagung

Ich danke Prof. Bernd Leitl dafür, dass er mir die Möglichkeit gab meine Experimentierleidenschaft am EWTL auszuleben.

Danke an Prof. Heinke Schlünzen für die Leitung und Ihre Unterstützung in dem spannenden Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg.

Der Arbeitsgruppe des EWTL danke ich für Anregung, Austausch, Unterstützung und Zerstreuung.

Ich danke meiner Familie für Ihre unendliche moralische Unterstützung während der letzten Jahre und jederzeit mindestens ein offenes Ohr. Von Herzen Dankeschön dafür.

Ich danke meinen Korrekturlesern (Stefanie Gillmeier, Dörthe Kipsch, Rüdiger Kipsch, Gisela Krause, Olaf Ziebell) für Kommata, finden von doppelten und vergessenen Worten, etc. Ohne Euch hätte es niemand geschafft bis hierhin zu lesen.

Ich danke den Komiteemitgliedern für ihre Zeit und Mühe bei der Beurteilung dieser Arbeit.

Und Eva: Du machst mich wahnsinnig glücklich. Danke. Für. Alles.

Diese Arbeit wurde im Rahmen des BMBF- Forschungsprojektes KLIMZUG-Nord (Fördernummer 01LR0805D) gefördert.

Der hochaufgelöste 3D- Datensatz der Stadtgeometrie wurde von dem Landesbetrieb für Geoinformation und Vermessung der Stadt Hamburg bereitgestellt.

Die GIS-Daten der Entwicklungsszenarien des Stadtteils Hamburg-Wilhelmsburg wurden von der internationalen Bauausstellung zur Nutzung im Rahmen dieses Projektes zur Verfügung gestellt.

Die Geometriedaten der Neubauvorhaben im Zuge der Umstrukturierung der IBA (Projektpark Wilhelmsburg-Mitte) wurden von den planenden Architekten bereitgestellt.

14. Anhang

INHALTSVERZEICHNIS ANHANG

Α.	Exkurs: Windklima am Standort Hamburg	143
B.	Exkurs: Urban Heat Island	147
	Einflussfaktoren auf die städtische Wärmeinsel	147
	Variabilität der UHI	148
	Ausdehnung der UHI	149
	Parametrisierungsansätze der UHI	149
	Wärmebilanz des menschlichen Körpers	150
C.	Unsicherheiten der Messungen	153
	Konvergenzanalysen der Zeitserien	153
	Unsicherheit der Messungen der Strömungsgeschwindigkeit	155
	Unsicherheiten der Konzentrationsmessung	157
D.	Ergänzende Abbildungen	159
	Kap. 3 - Der Grenzschichtwindkanal WOTAN des Meteorologischen Instituts	159
	Kap. 5 - Versuchsdurchführung der Ventilationsversuche	162
	Kap. 6 - Auswertung der Ventilationspotentialstudien	163
	Kap. 7 - Vergleich der Ventilationseigenschaften	165
E.	Ergebnisse KLIMZUG	173
	Einflüsse auf die Durchlüftungssituation	173
	Empfehlungen zur Bebauung	178

A. Exkurs: Windklima am Standort Hamburg

(Kipsch und Leitl, 2014)

Zur Betrachtung der windklimatischen Verhältnisse in Hamburg werden die meteorolo-gischen Daten der Klimastation des Deutschen Wetterdienstes in Fuhlsbüttel sowie die vom Meteorologischen Institut der Universität Hamburg erhobenen Wetterdaten am NDR-Sendemast am Standort Billwerder herangezogen (Abb. 14-1 a). Zu beiden Stationen existieren detaillierte Auswertungen (Fuhlsbüttel: Cappel und Kalb (1976), Riecke und Rosenhagen (2010), Billwerder: Lange (2001), Brümmer et al. (2012)). Da die Oberflächenstruktur (Bebauung, Topographie) die Windverhältnisse in Stadtgebieten stark beeinflusst⁵¹, werden zu einer allgemeinen Einschätzung zunächst die Daten einer Höhenstufe weit oberhalb der Stadt (175 m) an der Station Billwerder betrachtet.

Mittels der Windrose in Abb. 14-1 a wird die relative Häufigkeit der gemessenen Windstärken und -richtungen dargestellt, die Datengrundlage bilden die Zeitschriebe der Jahre 2007 - 2009. Aus Abb. 14-1 b wird eine Dominanz der westlichen Windrichtungen (Hauptwindrichtung) mit stärkeren Windgeschwindigekeiten als bei östlichen Windrichtungen ersichtlich. Ein zweites Maximum existiert in der Häufigkeitsverteilung für östliche/südöstliche Windrich-tungen, in denen geringere Windgeschwindigkeiten vorherrschen.



Abb. 14-1: (a) Schematische Darstellung der Lage der betrachteten Klimastationen in Hamburg, (b) Häufigkeitsverteilung der mittleren Windverhältnisse (Windrose) am Standort Billwerder in 175 m Höhe, Datengrundlage: 2007 - 2009.

Eine Klassifizierung der mittleren Windgeschwindigkeiten verdeutlichte eine ausgeprägte Dominanz der westlichen Windrichtung bei Starkwindsituationen (> 10 m/s) und eine annähernde Gleichverteilung bei Schwachwinden (< 3 m/s, Abb. 14-2). Zusätzlich wurde in den

⁵¹ Benesch und Jurksch (1978) untersuchten in einer Studie den Einfluss der veränderten Rauigkeit der Oberfläche auf das sich ausbildende mittlere Windprofil der Stadt Hamburg anhand einer Mess-position der freien Anströmung (Fuhlsbüttel) und einer Innerstädtischen (Seewetteramt, Hafengebiet). Die beschreibenden Parameter Rauigkeitslänge und Profilexponent änderten sich von 0.04 m auf 0.95 m bzw. 0.18 auf 0.28 im Stadtgebiet.

Graphiken der Windrichtungsbereich grau unterlegt, für den eine Beeinflussung der Messergebnisse durch den NDR-Sendemast nicht ausgeschlossen werden kann. In den Messdaten wird eine ausgeprägte jahreszeitliche Abhängigkeit der Windstatistik festgestellt. Während in den Wintermonaten eine ungefähre Gleichverteilung der Hauptwindrichtungen Südwest und Südost beobachtet wird, verschieben sich in den Sommermonaten die Hauptwindrichtungen in eine dominante West-Nordwestrichtung sowie eine seltenere östliche Windrichtung (vgl. Lange, 2001).



Abb. 14-2: (a) Windrichtungsverteilung in 175 m Höhe bei Starkwindverhältnissen und (b) Schwachwindverhältnisse, Datengrundlage: 2007 – 2009.

Lange (2001) untersucht die Hauptwindrichtungen verschiedener Windstärken in 10 m Höhe (analog zu Abb. 14-2). Aus Abb. 14-3 a wird ein deutliches Maximum der Häufigkeitsverteilung in südöstlicher Richtung ersichtlich. Da der Messort südöstlich der Innenstadt gelegen ist, wertete Lange dieses als ein Indiz für eine städtische Wärmeinsel. Während die Starkwindsituationen in 10 m Höhe ein vergleichbares Muster aufweisen, unterscheiden sich seine Ergebnisse für die Schwachwindsituationen deutlich von denen in Abb. 14-2 b.



Abb. 14-3: (a) Windrichtungsverteilung in 10 m Höhe und (b) Profil der mittleren Windgeschwindigkeit am Standort Billwerder, Datengrundlage: 2007 – 2009.

Die in 175 m Höhe gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten repräsentieren jedoch nur bedingt die Windverhältnisse im Stadtgebiet Hamburgs. Die mittleren Windgeschwindig-keiten in 10 m Höhe sind deutlich geringer als in 175 m Höhe. Die verringerte Windgeschwin-digkeit in Bodennähe resultiert aus dem Rauigkeitseinfluss der städtischen Bebauung. Abb. 14-3 b zeigt ein typisches Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit. Je geringer der Abstand zur Erdoberfläche, desto geringere mittlere Windgeschwindigkeiten werden gemessen. Die mittlere Windgeschwindigkeit von 7 m/s in 175 m Höhe wird durch den Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf eine mittlere Windgeschwindigkeit von 3 m/s in 10 m Höhe reduziert.

Abb. 14-3 a zeigt die Windrichtungsverteilung und –häufigkeit in 10 m Höhe am Standort Hamburg-Billwerder. Die Hauptwindrichtungen West/Südwest sowie Ost/Südost weisen wie in der bodennahen Messung des Windfelds die stärksten Ausprägungen auf. Es wird eine stärkere Variation der Windrichtung beobachtet, welche durch den Rauigkeitseinfluss bzw. die Hindernisstruktur der Stadtgeometrie erzeugt wird. Ähnliche Verhältnisse werden auch am Standort Hamburg Fuhlsbüttel beobachtet.

B. Exkurs: Urban Heat Island

Einflussfaktoren auf die städtische Wärmeinsel

(Gekürzt in Kap. 2)

Urbane Gebiete prägen aufgrund ihrer räumlichen Ausdehnung und ihrer Bauwerksgeometrien dem Lokalklima eindeutige Charakteristika auf. Neben der Wechselwirkung der Oberflächenrauigkeit mit dem Windfeld kann sich aufgrund vorherrschender klimatischer Bedingungen eine "städtische Wärmeinsel" (engl.: urban heat island, UHI) ausbilden. Dieses bezeichnet eine Erhöhung der Lufttemperatur in städtischen Gebieten gegenüber vergleichbaren Messstationen im Umland. Erstmalig im deutschsprachigen Raum wurde dieses Phänomen von Kratzer (1956) diskutiert, Begriffsprägend (heat island effect – "Wärmeinsel-Effekt") war die Arbeit von Manley (1958).

Vielfältige Faktoren bedingen eine Überwärmung des urbanen Raums. Aufgrund der Versiegelung der Oberflächen in Stadtgebieten kann weniger Feuchtigkeit verdunsten, da Niederschlag direkt abgeführt wird. Ebenfalls besitzen versiegelte Oberflächen meist eine erhöhte Albedoeigenschaft, dieses resultiert in einen höheren Bodenwärmestrom. Innerhalb der Straßenzüge besteht aufgrund der Baustruktur eine vergrößerte wirksame Oberfläche, je nach verwendeten Bauwerksmaterialien wird in verschiedenen Intensitäten kurzwellige Strahlung absorbiert bzw. reflektiert. Des Weiteren besitzen diese Materialien verschiedene Wärmekapazitäten und –leitfähigkeiten, erhöhen jedoch die Wärmespeicherung in der Baustanz im Vergleich zum unbebauten Umland.

Durch die Horizonteinengung (bestimmbar durch den sky view faktor, vgl. Parametrisierungsansätze der UHI) reduziert sich die effektive langwellige Emission im Straßenzug. Durch Verbrennungsprozesse und gestiegene Verkehrsaufkommen in Siedlungsgebieten erhöht sich die anthropogene Wärmeproduktion, welches zu wachsender atmosphärischer Gegenstrahlung (Treibhauseffekt) führt. Einen weiteren Effekt übt das städtische Windfeld innerhalb der UCL aus, denn aufgrund reduzierter Windgeschwindigkeiten verringert sich auch der turbulente (Ab-) Wärmetransport. Als wichtigste Faktoren zur Ausbildung einer UHI gelten die Verringerung der Emissionen langwelliger Strahlung sowie die Absorption kurz-welliger Strahlung und damit verbundene Wärmespeicherung (vgl. Oke (1982), Matzarakis (2001), Hupfer et al. (2006), Kuttler (2009), Reuter (2012), u.a.).

Neben den direkten Einflüssen des urbanen Raumes auf die Ausbildung einer UHI ist die Wetterlage ein wichtiger Einflussfaktor. Die größte Intensität der UHI tritt bei Schwachwindlagen in klaren Sommernächten auf (Oke, 1982). Durch die Wärmespeicherung der städtischen Bauwerke verzögert sich die Abkühlung des urbanen Raums. Einhergehend mit geringer Windgeschwindigkeit tritt verringerter bis kein Abwärmetransport auf, sodass sich ein Temperaturgradient Innenstadt-Umland ausbildet. Meteorologische Größen wie der Bedeckungsgrad (direkter Einfluss auf die Strahlungsbilanz) und die Windgeschwindigkeit (Durchlüftung des Stadtgebietes) üben entsprechend einen bedeutsamen Einfluss auf die Ausbildung einer UHI aus.

Variabilität der UHI

Es besteht eine zeitliche Variabilität der UHI, sowohl im Tagesgang als auch Jahresverlauf. Die Intensität der UHI variiert weiterhin mit der Größe und der Struktur des urbanen Raumes, da sowohl Bebauungsdichten als auch die Nutzungen des freien Raumes sich mit zunehmender Einwohnergröße verändern. Der mittlere Temperaturgradient für europäische Städte wird auf 1-2 K beziffert (Handbuch Stadtklima, 2010), jedoch variiert dessen Ausprägung über den Tagesgang erheblich. Aufgrund der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien (Stahl, Beton, Bitumen, Asphalt) existiert im urbanen Raum am Morgen ein geringer fühlbarer Wärmestrom, da sich die Materialien durch die solare Einstrahlung unterschiedlich stark erwärmen. Abends (bzw. bei Abnahme der solaren Einstrahlung) wird diese Wärmeenergie wieder freigesetzt und verstärkt somit den fühlbaren Wärmestrom (Helbig et al, 1999). Die maximale Intensität kann in Sommernächten 3-5 Stunden nach Sonnenuntergang gemessen werden wenn eine Schwachwindsituation vorliegt und somit kaum Abwärmetransport stattfinden kann (vgl. Abb. 14-4). Des Weiteren ist ein kaum bedeckter bis wolkenloser Himmel für die langwellige Strahlungsemission des Umlands und somit für die Maximierung des Gradienten förderlich, da die in den urbanen Bauten gespeicherte Einstrahlungswärme die Temperatur innerhalb der UCL annähernd konstant hält (Oke, 1982).

Die höchste Intensität der UHI entsteht bei einer stärkeren Abkühlung des Umlandes im Vergleich zum städtischen Gebiet. Die maximalen Intensitäten können Temperaturgradi-enten von > 10 K erzeugen. Die geographische Lage einer Siedlung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Die klimatischen Randbedingungen und vorherrschende orografische Bege-benheiten beeinflussen ebenfalls die Ausprägung der UHI. Kratzer (1956) diskutiert in diesem Zusammenhang den Anstieg des Temperaturgradienten vom Äquator zu den Polen hin, da in nördlichen Breiten die anthropogen erzeugte Wärme einen nicht zu vernach-lässigen Einfluss auf die Energiebilanz darstellt.



Abb. 14-4: Gegenüberstellung eines Tagesgangs der Lufttemperatur, nach Kuttler (2010).

Eine Vergleichbarkeit der UHI Studien besteht nicht, da die Untersuchungen den lokalen Gegebenheiten (Einwohneranzahl und Dichte, Klimazone, Orographie, etc.) angepasst sind. Ebenfalls ist die Lage der Referenzstation entscheidend für die UHI-Intensität. Bedingt durch die stärkere Urbanisierung (höhere Einwohnerzahlen, größerer Flächenbedarf, stärkerer Versiegelungsgrad) sowie ein verstärktes Anwachsens des Primärenergieverbrauchs kann bei zeitlichem Versatz zweier Studien im gleichen Betrachtungsraum die Entwicklung der UHI nachvollzogen werden.

Ausdehnung der UHI

Die vertikale Ausdehnung der UHI kann anhand des Crossover-Effektes bestimmt werden. In dieser Höhenstufe ist die Temperatur oberhalb des Stadtgebiets signifikant unter die Temperatur des Umlandes gesunken (Abb. 14-5). Bedingt wird diese Abkühlung durch ther-mische Konvektion und damit einhergehende lokale Zirkulationssysteme über dem Stadt-gebiet. Die Intensität der sich ausbildenden Zirkulationssysteme ist wie die Ausbildung der UHI von den meteorologischen Randbedingungen sowie der geographischen Lage abhängig. Für nächtliche Wärmeinseln wurde eine Mächtigkeit von wenigen Dekametern (bis 300 m, Oke (1982)) ermittelt, tagsüber konnten die Auswirkungen des erhitzten städtischen Raumes bis in eine Höhe von 1 km nachgewiesen werden (vgl. Cermak et al. (1995), Oke (1982), Matzarakis (2001)).



Abb. 14-5: Idealisierter Vergleich nächtlicher Temperaturprofile: Urban vs. Rural, nach Oke (1982).

Aufgrund der sich ausbildenden Wärmekuppel über einem Stadtgebiet prägt der Temperaturgradient nicht nur die vertikale, sondern auch horizontal im Nachlauf der Stadt aus (sog. "urban plume"). Ähnlich der Veränderungen der Bodenrauigkeit (Rauigkeitssprung) wirkt sich ein Temperaturanstieg sich auf das Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit aus. Es bilden sich interne Temperaturgrenzschichten aus, zu deren vollständiger Durchmischung es weite Überstreichungslängen bedarf. In Feldversuchen konnte anhand der Temperaturverteilung eine städtische Wärmeinsel bis zu 40 km im fernen Nachlauf einer Stadt nachgewiesen werden (Cermak et al., 1995).

Parametrisierungsansätze der UHI

In vielen Arbeiten untersuchen die Korrelation der Einwohnerzahl bzw. der Stadtgröße mit der UHI-Intensität. Je nach Betrachtungsraum muss diese Korrelation an die klimatischen Gegebenheiten und die Art der städtischen Strukturen angepasst werden. Studien über die Korrelationen anhand der charakteristischen Kennzahlen ausgewählter Städte erfolgen sowohl global (u.a. Oke ,1982) als auch im regionalen Maßstab (u.a. Handbuch Stadtklima, 2010), ein hoher Regressionsgrad ($R^2 > 0.95$) kann erzielt werden.

Ein lokaler Bestimmungsansatz der UHI basiert auf dem sky view faktor (SVF). In Straßenzügen ist aufgrund der Bebauungsstruktur der Anteil der sichtbaren Fläche des Himmels eingeschränkt. Definiert ist der SVF als das Verhältnis dieser Fläche gegen das einer freien, nicht eingeschränkten Hemisphäre. Der SVF ist eine lokale Größe und variiert mit den Gebäudeabmaßen in einer Straßenschlucht und den Abständen zwischen den Häusern (Abb. 14-6).

149 | SEITE



Abb. 14-6: Schematische Darstellung des SVF, nach Oke (1992).

Bestimmt werden kann der SVF durch ein Horizontoskop sowie anhand von Fischaugen-Fotographien, da diese eine 180° Ansicht eines Ortes abbilden können. Bei Kenntnis der Geometrie und der Stadtgrüns kann dieses auch rechnergestützt erfolgen. Oke (1992) schlägt vor ähnlich des SVF auch das Verhältnis der Gebäudehöhe zur Straßenbreite als UHI-Indikator zu verwenden, da dieses mit der Strahlungsbilanz in Straßenzügen korreliert (Gl. 14-1). Des Weiteren kann aus dem Höhen-Breiten-Verhältnis der Straßenschlucht der SVF generiert werden ((Gl. 14-2), vgl. Oke, 1982).

$$Q_t = 2 \cdot Q_w \cdot \left(\frac{H}{W}\right) + Q_f \tag{GI. 14-1}$$

$$SVF = \psi_s = \cos\left[tan - 1 \cdot \left(\frac{2 \cdot H}{W}\right)\right]$$
 (Gl. 14-2)

mit:

H:	mittlere Gebäudehöhe	[m]
W:	Straßenbreite	[m]
Qw:	Strahlungsbilanz Hauswand (wall)	[W]
Qf:	Strahlungsbilanz Boden (floor)	[W]
Qt:	Strahlungsbilanz Grenze UBL-UCL	[W]

In beiden Fällen wird das Luftvolumen innerhalb eines Straßenzuges als bestimmender Faktor bei der Ausbildung einer UHI angesehen.

Wärmebilanz des menschlichen Körpers

Die VDI-Richtlinie 3787/2 (VDI, 2008) nennt im Rahmen einer Wärmebilanz des menschlichen Körpers (vgl. Jendritzky (1990), KLIMA-Michel-Modell) eine mögliche Anpas-sungsstrategie an thermisches Unbehagen:

Die Stärke des Energieaustauschs hängt grundsätzlich von einer Größe ab, d.h. von der Differenz zwischen den Werten on der Oberfläche des Menschen und in der Atmosphäre. Die turbulenten Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme werden darüber hinaus von der Windgeschwindigkeit gesteuert. Bei geringen Windgeschwindigkeiten haben kleine Änderungen relativ große Wirkungen im Wärmehaushalt, mit zunehmender Windgeschwindigkeit dagegen wesentlich kleinere. Zum Beispiel

können schon geringe Verbesserungen der Durchlüftungsverhältnisse dicht besiedelter Gebiete zu einer deutlichen Verringerung der Wärmebelastung [Anmerkung: ...auf den menschlichen Körper...] führen (VDI, 2008).

Die Wärmebilanz (Gl. 14-3) dient der Beschreibung des Wärmeaustauschs eines Körpers mit der Umgebung und dient der Bewertung der thermischen Randbedingungen.

$$M + W + Q^* + Q_H + Q_L + Q_{SW} + Q_{Re} = 0$$
 (Gl. 14-3)

mit:

<i>M</i> :	metabolische Rate	[W]
W:	mechanische Leistung	[W]
<i>Q</i> *:	Strahlungsbilanz	[W]
Q_H :	turbulenter Fluss fühlbarer Wärme	[W]
<i>Q</i> _{<i>L</i>} :	sensibler Fluss latenter Wärme	[W]
<i>Q_{sw}</i> :	turbulenter Fluss latenter Wärme durch Verdunstung von Schweiß	[W]
Q_{Re} :	Wärmetransport über die Atmung	[W]

Der Bilanzgleichung kann entnommen werden, dass (mikro- und makro-) meteorologische Parameter (Strahlung und Windgeschwindigkeit) Einfluss auf das thermische Empfinden eines Körpers nehmen. Durch eine Modifikation der Albedoeigenschaften der Umgebungsoberflächen, veränderte Vegetationsbedingungen und eine positive Beeinflussung der Windverhältnisse kann eine Verbesserung der lokalen thermischen Behaglichkeit erfolgen.

C. Unsicherheiten der Messungen

Konvergenzanalysen der Zeitserien

Zur Minimierung der Unsicherheiten der Strömungs- und Ventilationsmessungen wurden an kritischen Messorten im Modellgebiet bodennah Tests hinsichtlich des konvergenten Verhaltens der statistischen Kenngrößen einer Zeitserie durchgeführt. Für zunehmende Ensemblegrößen eines statistischen Parameters konvergiert die Verteilung der gleitenden Mittelungsintervalle gegen einen Mittelwert. Auf Basis dieser Konvergenzanalyse kann eine Abschätzung der benötigten Zeitserienlänge der Messungen erfolgen, so dass aus den durchgeführten Messungen repräsentative Mittelwerte bestimmt werden können.

In Abb. 14-7 ist beispielhaft das Konvergenzverhalten der horizontalen Strömungsgeschwindigkeit über der Ensemblegröße⁵² (ES) an einer Position innerhalb der Stadtstruktur dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass sich die Verteilung mit zunehmender Größe des Intervalls einem repräsentativen Mittelwert annähert.



Abb. 14-7: Konvergenz der statistischen Parameter einer Zeitserie, betrachteter Paramter: horizontale Windgeschwindigkeit.

Abb. 14-7 zeigt das Konvergenzverhalten des mittleren horizontalen Strömungsvektors bei zunehmender Stichprobengröße. Die Streubreite verringert sich von einer starken Streuung

⁵² Die Ensemblegröße ist ein dimensionsloser Faktor, abhängig von der Referenzwindgeschwindigkeit und der Messdauer.

des Ergebnisses bei geringen Intervallgrößen zu einer Streuung in der Größe der erwarteten Reproduzierbarkeit (< 0.03 [-]). Bei Messungen mit einem geringeren Stichprobenumfang würde der Vertrauensbereich der Strömungsmessungen durch eine erhöhte Messunsicherheit geschmälert. Da im Rahmen des KLIMZUG-Nord Projektes ein Referenzdatensatz der Strömungsgeschwindigkeit erstellt wurde, ist für einen statistisch repräsentativen Mittelwert aller betrachteten Parameter die Messdauer der Windkanalversuche auf eine Mindestzeitserienlänge von 180 Sekunden bestimmt worden. Die Messdauer für die Untersuchungen der urbanen Ventilationsvorgänge wurde auf der Basis dieser Konvergenzanalyse auf 300 Sekunden bestimmt.

Unsicherheit der Messungen der Strömungsgeschwindigkeit

Analog zu der absoluten Unsicherheit der Messungen der Strömungsgeschwindigkeit (vgl. Abb. 3-6) werden in Abb. 14-8 die relativen Unsicherheiten der Messung aufgezeigt. Die prozentuale Abweichung der beiden Messungen ist über der Auftretenshäufigkeit angetragen. Aus der rechtschiefen Verteilung wird deutlich ersichtlich, dass nur wenige relative Abweichungen einen Prozentsatz von 5 % überschreiten. Das Maximum der Verteilung liegt bei einer Abweichung von 1 - 1.5 %. Das 95. Perzentil der Verteilung beschreibt eine Abweichung der Messergebnisse von < 6.5 %.

Abb. 14-9 und Abb. 14-10 zeigen die absoluten und die relativen Abweichungen der Messergebnisse voneinander über der Referenzwindgeschwindigkeit. Aus Abb. 14-9 kann eine Verteilung der relativen Überschreitungen mit einem Maximum in den geringen Abweichungen abgeschätzt werden (vgl. Abb. 14-8).

Abb. 14-10 zeigt die Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit von der relativen Differenz auf. Eine geringe Differenz bei niedrigen Windgeschwindigkeiten erzeugt eine große prozentuale Abweichung der Messungen voneinander.



Abb. 14-8: Relative Messunsicherheit, bestimmt aus Wiederholungsmessungen.



Abb. 14-9: Absolute Unsicherheit der Messpositionen über der lokalen Windgeschwindigkeit.



Abb. 14-10: Relative Unsicherheit der Messpositionen über der lokalen Windgeschwindigkeit.

Unsicherheiten der Konzentrationsmessung

Während der Versuchsdurchführung im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg sind vielfache Wiederholungsmessungen an ausgewählten Positionen im Untersuchungsgebiet durchgeführt worden. Aus der maximalen Differenz der Ergebnisse kann die absolute Bandbreite der Ergebnisse der verschiedenen Ventilationsparameter bestimmt werden.

In Tabelle 14-1 und Tabelle 14-2 sind die aus der absoluten Bandbreite bestimmten Unsicherheiten der Ventilationsparameter (±) aufgeführt.

Variable	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
Mittelwert	0.0165	0.0165	0.0165	0.0164
Median	0.0146	0.0161	0.0163	0.0167
Standardabweichung	0.0091	0.0067	0.0036	0.0013
Varianz	0.0012	0.0006	0.0002	0.0000
Schiefe	0.3403	0.2716	0.3349	0.3518
Kurtosis	1.9942	1.7605	1.1931	0.6523
Peak x	0.0050	0.0150	0.0200	0.0150
Peak y	0.0404	0.0246	0.0360	0.1058
Schwerpunkt x _s	0.0165	0.0165	0.0164	0.0163
Schwerpunkt ys	0.0102	0.0076	0.0112	0.0306
Ventilationsindex	1.6476	1.6473	1.6451	1.6387
Schwankungsintensität	0.1063	0.0950	0.0485	0.0170
Intermittenz	0.1068	0.1513	0.2375	0.2765
Perzentil 05	0.0033	0.0063	0.0106	0.0155
Perzentil 10	0.0045	0.0079	0.0121	0.0154
Perzentil 15	0.0057	0.0095	0.0132	0.0158
Perzentil 25	0.0080	0.0115	0.0145	0.0159
Perzentil 50	0.0146	0.0161	0.0163	0.0167
Perzentil 75	0.0245	0.0210	0.0192	0.0168
Perzentil 85	0.0301	0.0243	0.0206	0.0166

Tabelle 14-1: Unsicherheit der Ventilationsparameter, bestimmt aus Wiederholungsmessungen.

Variable	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
Perzentil 90	0.0324	0.0269	0.0212	0.0166
Perzentil 95	0.0353	0.0293	0.0216	0.0178
Perzentil 97	0.0357	0.0293	0.0234	0.0178
Perzentil 98	0.0364	0.0305	0.0234	0.0192
Perzentil 99	0.0394	0.0345	0.0235	0.0205
IQR	0.0166	0.0096	0.0060	0.0020
Variationskoeffizient	0.2812	0.1423	0.0370	0.0035
Faktor der Überhöhung P99 / Mittelwert	0.7734	0.4431	0.2270	0.0560
Faktor der Überhöhung P98 / Mittelwert	0.5429	0.3442	0.1399	0.0546
Frischlufteintrag	10.681	15.133	23.749	27.645

Tabelle14-2:UnsicherheitderVentilationsparameter,bestimmtausWiederholungsmessungen(Fortsetzung).

D. Ergänzende Abbildungen





Abb. 14-11: Setup der Spires im Anströmbereich des Grenzschichtwindkanals WOTAN, alle Angaben in mm.









Abb. 14-13: Skizze Windkanal WOTAN.





Abb. 14-14: Freigesetzter Tracervolumenstrom bei verschiedenen Referenzwindgeschwindigkeiten, bestimmt aus dem Massenverlust der Emissionsquellen.

Während der Windkanalstudien wurde das Freisetzungsverhalten der Quelle bei verschiedenen Referenzwindgeschwindigkeiten analysiert. Neben der Detektion der Konzentration wurde in weiteren Untersuchungen der Massenverlust der Flächenquelle bestimmt. Anhand einer Präzisionswaage (PCE-BT 2000, Fa. PCE Deutschland GmbH, Messgenauigkeit: 0.01 g) konnte die Massendifferenz des Gewichts der Quelle vor und nach den durchgeführten Versuchen bestimmt ermittelt werden. Da der Wägezeitraum im Vergleich zur Messdauer vernachlässigbar klein ist, kann unter der Kenntnis der Randbedingungen (Luftdruck, Temperatur, Luftfeuchtigkeit) der Emissionsvolumenstrom bestimmt werden.

Die Versuche zur Bestimmung des Massenverlusts (und deren Wiederholungsmessungen) wurden in verschiedenen Referenzwindgeschwindigkeiten durchgeführt. Während der Windkanalexperimente wurde die Flächenquelle auf einer ungestörten Freifläche im Modellgebiet positioniert, sodass keine Beeinflussung durch das Stadtteilmodell an der Messposition vorlag.

In Abb. 14-14 ist der Emissionsvolumenstrom der Quelle für verschiedene Referenzwindgeschwindigkeiten dargestellt, die gewählte Referenzwindgeschwindigkeit der Versuche ist durch die gestrichelte Linie markiert. Ersichtlich werden ein geringer Trend der Freisetzungsmenge der Emissionsquelle sowie ein geringer Schwankungsbereich des bestimmten Volumenstroms um diesen Trend.



Entsprechend den in Kap. 6.2 vorgeschlagenen Bewertungsintervallen der Ventilation (Klasse 1-4) wurde eine Zeitserie der Strömungsmessungen der horizontalen Windgeschwindigkeit im Stadtgebiet gemittelt. Abb. 14-15 zeigt die Auswirkungen der gewählten Mittelungsintervalle auf das Windfeld. Ersichtlich wird daraus eine Verringerung der Bandbreite der betrachteten Strömungsvariabilität.



Abb. 14-15: Auswirkungen der Größe eines Mittelungsintervalls auf die Windrose einer Messposition. Mittelungszeitraum der Strömungsmessungen: 10s, 30s 180s und 3600s (von links oben nach rechts unten).



Abb. 14-16: Einfluss des conditional samplings auf die Häufigkeitsverteilung an einer Messposition mit eher schlechten Ventilationseigenschaften.

Kap. 7 - Vergleich der Ventilationseigenschaften



Abb. 14-17: Verteilung der Überschreitungshäufigkeiten des maßgebenden Intervalls (Klasse 3) in einer stündlichen Betrachtung.



Abb. 14-18: Bandbreite der Häufigkeitsverteilungen der mittleren Überschreitungszeiträume, bestimmt aus Wiederholungsmessungen.

In Abb. 14-18 sind die mittleren Überschreitungszeiträume der relativen Konzentration gegen einen Grenzwert dargestellt. Die Wiederholungsmessungen ist an einer gut ventilierten Position durchgeführt worden, betrachtet wird ein Intervall der Klasse 1. Aus Abb. 14-18 wird eine gute Übereinstimmung der relativen mittleren Häufigkeiten ersichtlich, an dem Maximum der Verteilung wird ein absoluter Unsicherheitsbereich von 6 % aufgespannt.

Für die Bestimmung der Unsicherheit des intermittenten Verhaltens der relativen Konzentration in definierten Betrachtungszeiträumen (bspw. eine Stunde) wird eine größere Stichprobenmenge der Wiederholungsmessungen benötigt. Da bedingt durch das transiente Phänomen der Durchlüftung eine Vielzahl an mittleren Belastungsdauern bestimmt werden konnte, muss für eine statistisch repräsentative Analyse eine größere Grundgesamtheit der Daten vorliegen.

Bei sehr ähnlichen Ausprägungen verschiedener Häufigkeitsverteilungen kann mit der angewendeten Bestimmungsmethodik keine Differenz der Verteilungen abgeschätzt werden, da mit dem 95. Perzentil der absoluten Bandbreite als Unsicherheitsbereich die Unterschiede zwischen den Verteilungen nicht mehr aufgelöst werden können. Es besteht noch vertiefter Forschungsbedarf hinsichtlich der Unsicherheitsbestimmung des intermittenten Verhaltens der Zeitserie.



Abb. 14-19: Variabilität des Parameters Variationskoeffizient im Fokusgebiet Straßenzug in vier Betrachtungsintervallen, von oben links nach unten rechts: 10 s, 30 s, 180 s, 3600 s.

Abb. 14-19 zeigt den Parameter Variationskoeffizient im Fokusgebiet Straßenzug in den betrachteten Intervallklassen. Es wird ersichtlich, dass mit zunehmendem Mittelungsintervall die Varianz der Ergebnisse reduziert wird. Für eine hochaufgelöste Bestimmung des individuellen Ventilationspotentials wird ein geringes Zeitintervall empfohlen, bei größeren Mittelungsintervallen bildet sich ein Mittelwert der Konzentration aus. Ersichtlich wird dieses anhand des Variationskoeffizienten in dem Mittelungsintervall 3600 s (Klasse 4), bedingt durch das Mittelungsintervall können transiente Phänomene nicht mehr aufgelöst werden (vgl. auch Abb. 14-20).



Abb. 14-20: Einfluss verschiedener Mittelungsintervalle auf das Konzentrationssignal, dargestellt gegen einen Grenzwert der Konzentration (Ig = 0.05[-]), Ausschnitt, Signal gleitend gemittelt.



Abb. 14-21: Gegenüberstellung des Luftwechsels im Betrachtungsvolumen in den zwei Bebauungszuständen. Die Farbcodierung zeigt deren prozentuale Differenz.



Abb. 14-22: Gegenüberstellung der Schwankungsintensität des Konzentrationssignals in den zwei Bebauungszuständen. Die Farbcodierung zeigt deren prozentuale Differenz.



Abb. 14-23: Aus der Konvergenzanalyse bestimmter mittlerer Verlauf der kumulativen Verteilungen in den drei Stadtraumtypen (Klasse 4).

Abb. 14-23 zeigt analog zu Abb. 7-17 die aus der Konvergenzanalyse bestimmten mittleren Verläufe der kumulativen Verteilungen in den betrachteten Stadtraumtypen. Der in Kap. 6.2 bestimmte Unsicherheitsbereich ist an die Verteilung angefügt, jedoch aufgrund dessen geringen Ausprägung bei einem Intervall der Klasse 4 nicht sichtbar. Visuell prägt sich der Kurvenverlauf der kumulierten Auftretenshäufigkeit sprunghaft (oder nicht beständig) aus. Da aufgrund des zeitlich großen Mittelungsintervalls sich eine sehr geringe Bandbreite der individuellen Verteilungen ausbildet, ist die nach Freedman und Diaconis (1981) vorgeschlagene Klassenbreite deutlich unterhalb der gewählten Grenzklassenbreite. Aufgrund der physikalischen Auflösung des Fast-FID Systems wurde eine Mindestklassenbreite von 0.01 c_{rel} gewählt.


Abb. 14-24: Vergleich der Stadtraumtypen: Luftwechsel im Betrachtungsvolumen, Betrachtungsintervall: 3600 s, korrespondierend zu Tabelle 7-2.



Abb. 14-25: Anwendung des Messverfahrens im Modellgebiet Hamburg Wilhelmsburg.

Abb. 14-25 zeigt die Anwendung der entwickelten Messmethodik zur Bestimmung des Ventilationspotentials im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg.

E. Ergebnisse KLIMZUG

Einflüsse auf die Durchlüftungssituation

(Kipsch und Leitl, 2014b)

Ein weiterer, nicht zu unterschätzender Effekt der Bebauungsstruktur ist dessen Auswirkung auf das lokale Ventilationsverhalten. Neben der bisher betrachteten Größe "Komfortwirkung" muss auch der Austausch von (mit Schadstoffen oder Wärme) belasteter Luft berücksichtigt werden. Die Ventilation von urbanen Räumen wirkt sich jedoch invers zum Komfortempfinden aus. Eine Verringerung der Windgeschwindigkeit durch bauliche Maßnahmen wie bspw. Errichtung von schmalen Straßenzügen oder Schaffung einer homogenen Ausprägung der Gebäudehöhen erhöhen den sich ausprägenden Windkomfort, verringern auf der Gegenseite jedoch die Ventilationswirkung. Da ein Kernpunkt des Exzellenzszenarios die Nachverdichtung der urbanen Struktur sowie eine Aufstockung bzw. Erweiterung des Baubestandes bildet gilt diesem Punkt besondere Berücksichtigung.

He (2014) führte Windkanal-Modellstudien zur Bestimmung des Ventilationspotentials an idealisierten Strukturen mit Fokus auf verschiedenen Nachverdichtungsmöglichkeiten durch. He zeigt, dass Gebäude mit homogenen vertikalen Ausprägungen sowie großem Gebäudehöhen-Straßenbreite-Verhältnisses aufgrund des geringen Luftaustauschs innerhalb der UCL eine geringe Luftaustauschrate aufweisen (vgl. Abb. 14-26). Weiterhin wurde der Einfluss verschiedener Aufstockungstypen auf den Baubestand unter Einhaltung einer äquivalenten Wohnfläche im Modellgebiet (Floor-Area-Ratio) in den jeweiligen Modellen untersucht. Auffällig ist, dass bei geringen Überhöhungen das Ventilationsverhalten sich Luvseitig erhöht, die Leeseite des Gebäudes sich verschlechtert. Ein erhöhter Luftaustauch, wie er im Lee von Hochhäusern entsteht, entfällt bei geringen Überhöhungen. Detailstudien zu verschiedenartigen Nachverdichtungstypen (vgl. Isyumov, 1995) bestätigten dieses.





In einer weiteren Modelluntersuchung (Plehn, 2014) ist die Windbelastung an zwei Fokusgebieten innerhalb des Untersuchungsraumes Hamburg-Wilhelmsburg betrachte worden. Die Windbelastung ist definiert als die richtungsunabhängige Windstärke eines Ortes. Durch die Betrachtung der Belastung können selbst stark bimodale Strömungen, wie sie bspw. an Straßenkreuzungen oder im Nachlauf von Gebäuden entstehen können, in ihrer Wirkung bewertet werden. Der Fokus dieser Vergleichsstudie stellt ebenfalls das Ventilationsverhalten im urbanen Raum dar, ein für ein Stadtgebiet typisches Mittelungsintervall (3 Minuten) ist als maßgebend bestimmt. Nach Ng (2009) kann die bodennahe Windgeschwindigkeit als Indikator der Ventilationswirkung eines Stadtgebietes angesehen werden. Durch eine zeitlich hochauflösende Untersuchungsmethode konnte das gesamte Spektrum der Windbelastung eines Ortes erfasst werden. In Windkomfortuntersuchungen werden meist die oberen Perzentile der Windgeschwindigkeit als Indikator des Komforts (vgl. Koss, 2006) bzw. der Gefährdung verwendet. Bei Ventilationsuntersuchungen auf Basis der Windbelastung wird dem gegenüber das 10. Perzentil der Häufigkeitsverteilung, also die für die Ventilation ungünstigen, schwachwindigen Situationen, als maßgebend betrachtet. In der Betrachtung der zwei Fokusgebiete im Modellgebiet Hamburg-Wilhelmsburg wurde das 10. Perzentil der Häufigkeitsverteilung aus dreiminütigen Intervallen an mehreren hundert Messpositionen untersucht.

In Abb. 14-27 sind die 10. Perzentile der Windbelastungen der Fokusgebiete in den Bebauungszuständen 2007 (vor Beginn der Umstrukturierung) und 2013 (nach Beendigung der Umstrukturierung) aufgezeigt. Die Fokusgebiete sind zum einen der Bereich der internationalen Bauausstellung (Umstrukturierungsgebiet), zum anderen als Referenz das Stadtguartier in Bahnhofsnähe (Stadtguartier). Die grauen Linien stellen den Unsicherheitsbereich der Bestimmungsmethodik dar. Ersichtlich ist eine Verschiebung der sehr guten Ventilationswirkung im Zustand vor der Umstrukturierung, ersichtlich an den hohen Perzentilen der Windgeschwindigkeit in 2007, hin zu einer breiteren Verteilung der Windbelastungen im Bebauungszustand 2013. Durch die Bebauung des Gebietes wurden vor allem Zonen mit verminderter Windbelastung und somit verringerter Ventilationswirkung geschaffen. Die Ventilationswirkung des Stadtquartiers ist durch die Umstrukturierung ebenfalls leicht beeinträchtigt. die Mehrzahl der Messstellen weist jedoch kaum eine Veränderung auf. Die Ventilation des Umstrukturierungsgebietes hat sich im Zuge der Bebauung in ihrer Charakteristik denen eines Stadtgebietes angenähert. Analysen der Böenwindgeschwindigkeit und der Turbulenzstruktur des Windfeldes stützen diese Aussage (vgl. Abb. 14-28). Die Ventilationswirkung des bestehenden Stadtquartiers ist durch die Umstrukturierung ebenfalls in geringem Maße beeinträchtigt, die Mehrzahl der Messstellen weist jedoch kaum eine Veränderung auf.



Abb. 14-27: Vergleich der Auswirkungen der Umstrukturierungen auf zwei Fokusgebiete innerhalb des Modellgebiets Hamburg-Wilhelmsburg, nach Plehn (2014).



Abb. 14-28: Veränderung der Turbulenzstruktur des Windfelds im Umstrukturierungsbereich der IBA, nach Plehn (2014).

Die verringerte Ventilation im bestehenden Stadtquartiert und im Umstrukturierungsgebiet kann erhöhte Luftbelastungen zur Folge haben. Dieses ist in einer Windkanalstudie für das Modellgebiet Wilhelmsburg Mitte untersucht worden. Über eine flächige Bodenquelle erfolgte eine kontinuierliche Tracerfreisetzung im Straßenraum. Die Verdünnung des Tracers durch Frischlufteintrag (FI) wurde detektiert. Da eine Vorbelastung der Luft möglich wäre, wird nachfolgend statt des Frischlufteintrags der Terminus Luftwechsel verwendet. Für die Studie des Luftwechsels im Straßenraum konnten innerhalb des betrachteten Modellgebiets drei typische Stadträume identifiziert und detailliert analysiert werden. Die betrachteten Stadträume sind:

Die Siedlungsstruktur der nahegelegenen Kleingärten (Blockhüttenbebauung) in strenggeometrischer Anordnung mit einer geringen vertikalen Ausdehnung.

Die bahnhofsnahe Bebauungsstruktur mit uniformer vertikaler Ausdehnung in Riegelbzw. Ringstruktur.

Die Bauten der IBA stellvertretend für Einzelgebäude mit hoher vertikaler Ausdehnung und relativ hoher Dichte der Bebauung. Der Bereich der IBA vor der Umstrukturierung ist von der Ventilationswirkung her analog zur Kleingartenstruktur zu betrachten.

Zur Bestimmung des Luftwechsels wurden an charakteristischen Positionen räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Messungen des Ventilationspotentials durchgeführt. Die zeitlich hoch aufgelösten Messungen erlauben eine Betrachtung in verschieden Zeiträumen, von Böen auflösend mit 10-sekündlichen Zeit-Intervallen bis zu stündlichen Mittelwerten. Der räumlich gemittelte Luftwechsel in den Stadträumen ist in Abb. 14-29 für diese beiden Zeiträume dargestellt. Die Farbcodierung erfolgte in dieser Abbildung zweigeteilt: Die linke Hälfte der eingefärbten Flächen spiegelt das Ergebnis der räumlichen Mittelwerte eine Böen auflösenden Betrachtung wieder, der rechte Teil steht für das stündliche Mittelungsintervall.

Die Betrachtung der mittleren Luftwechsel (Abb. 14-29) zeigt für die drei Stadträume jeweils charakteristische Luftwechsel. Innerhalb der Kleingartenstruktur (mit flachen Gebäuden und sehr strukturierter Gebäudeorientierung) wird ein sehr günstigster Luftwechsel detektiert (75%), sowohl in der auf Böen basierten als auch in der auf Stunden basierten Betrachtungsweise. Das Stadtgebiet mit einer eher homogenen Struktur in Riegelbebauung in Bahnhofsnähe weist den geringsten Luftaustausch auf. Auffällig ist, dass sehr gut ventilierte Orte ebenso wie Positionen mit geringem Luftwechselpotential (bspw. Innenhöfe) innerhalb des Stadtraums existieren (vgl. Tabelle 7-1). Die Baustruktur der IBA weist großzügige Freiflächen zwischen den Gebäuden auf, die Gebäudehöhen und deren Geometrien sind sehr heterogen ausgebildet. Im Vergleich zum Stadtgebiet mit homogener Struktur, wird dort eine erhöhte Luftwechselrate detektiert. Auffällig ist ebenfalls die Varianz des Luftwechsels an den Messpositionen: Bedingt durch die Heterogenität der Baustruktur wird der räumliche Mittelwert über eine große Bandbreite an Luftwechsel-Zuständen gebildet.



Abb. 14-29: Vergleich des mittleren Luftwechsels FI (in %) in den betrachteten Stadträumen mit einer Zweiteilung der eingefärbten Flächen: linke Hälfte: 10 s Zeitmittel, rechte Hälfte: 1 Stunde Zeitmittel, Anströmrichtung 235°.

Stadtraum I	Mittelwert	05.	25.	Median	75.	95.	
		Perzentil	Perzentil		Perzentil	Perzentil	
Stadt	48.96	24.14	30.89	37.42	69.72	86.66	
IBA	59.91	26.99	37.22	62.99	84.05	97.02	
Kleingarten	72.07	54.61	65.16	75.88	83.92	92.84	

Tabelle 14-3: Verteilung des mittleren Luftwechsels in den Stadträumen in [%], hier: 10 s Intervalle.

Auf der Basis von räumlich mittleren Werten können allerdings keine Aussagen über die lokale Ausprägung aufgrund von Unterschieden in der Bebauungsstruktur getroffen werden. Da es ie entwickelte Messmethodik ermöglicht die lokalen Charakteristiken des Ventilationspotentials zu erfassen, kann der Luftwechsel in den zwei Bebauungszuständen im Nachlauf des Umstrukturierungsgebiets verglichen werden. In Abb. 14-30 ist der Luftwechsel als Differenzen der Ventilation, wie sie nach der Umstrukturierung auftritt, von der vor der Ventilation vor der Umstrukturierung aufgezeigt. Der direkte Nachlauf der Gebäude ist der Bereich der stärksten Änderungen des Parameters Luftwechsel. Der Abbildung kann entnommen werden, dass eine Differenz des Luftwechsels von >20% entlang der S-Bahntrasse und daneben befindlicher, nicht bebauter Flächen auftritt. Dabei sind Verringerungen des Luftwechsels in Nähe der neuen Gebäude (rot in Abb. 14-30) ebenso zu finden wie erhöhte Luftwechsel in größerem Abstand.



Abb. 14-30: Differenz des Luftwechsels im Nachlauf des Umstrukturierungsgebiets, Basis: Ausgangs-Zustand, Anströmrichtung 235°.

Innerhalb der bahnhofsnahen Bebauungsstruktur bedingt die Interaktion der Strömung mit den lokalen Baukörpern ein individuelles Ventilationsverhalten, das sich ebenfalls aufgrund der neuen Gebäude ändert. Erhöhte Luftwechsel von >20% treten ebenso auf wie Verminderungen um >10%. Verallgemeinernden Aussagen können nicht getroffen werden, es empfiehlt sich Einzelfalluntersuchungen durchzuführen. Bei neuer Bebauung ist zu beachten, dass das Umstrukturierungsgebiet bis in den fernen Nachlauf der Gebäude (hier etwa 1000 m) Einfluss auf das lokale Ventilationspotential ausübt.

Empfehlungen zur Bebauung

(Kipsch und Schlünzen, 2014)

Einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung des urbanen Windfeldes hat neben der vorherrschenden Windsituation die lokale Bebauungsstruktur. Je nach relativer Positionierung der Bebauung zueinander kann Einfluss auf das Ventilationsverhalten oder auf das Komfortempfinden ausgeübt werden. Zur Sicherstellung der Ventilation und somit zum Abtransport von (mit Abgasen oder Wärme) belasteter Luft sind zusammenhängende Grünzüge und Freiflächen im Stadtgebiet als Luftleitbahnen zu erhalten. Straßenzüge in Hauptströmungsrichtung sowie Bahntrassen sind ebenfalls als Ventilationsbahnen zu betrachten. Einschnürungen durch Bebauungen in diese Luftleitbahnen sind zu vermeiden.

Bei Nachverdichtungen im Stadtraum sind unbebaute und unversiegelte Flächen zwischen den Gebäuden sowie eine eher gelockerte Struktur anzustreben, da durch Riegelbebauung die Ventilationswirkung verringert wird. Eine verdichtete Bebauung wird auch im Stadtteil Wilhelmsburg zu lokaler Überwärmung führen, die sich ggf. gesundheitlich bedenklich ausprägen kann. Daher sollte bei allen stadtplanerischen Maßnahmen an genügend Grün- und Wasserflächen sowie möglichst geringen Versiegelungsgrad gedacht werden. Aufstockungen im Bestand sind als förderlich für die Ventilation zu sehen, wenn homogene vertikale Ausdehnungen des Gebäudebestandes durch diese gestört werden. Zur Förderung des Luftaustauschs sind terrassenförmige ausgebildete Gebäudestrukturen denen einer homogenen Struktur vorzuziehen. Bei Aufstockungen im Bestand sind die Wechselwirkungen mit den Abluftfahnen der Schornsteine der Umgebungsbebauung zu berücksich-tigen.

Auch im Hafenbereich ist bei Veränderungen der Bebauungsstruktur und Umnutzung vorhandener Hafenflächen (mehr Bürogebäude) darauf zu achten, dass die bereits vorhandene Überwärmung nicht noch weiter zunimmt. Dieses könnte sonst sowohl tagsüber als auch am Abend zu gesundheitlich belastender Überwärmung führen, die zur Vermeidung gesundheitlicher Belastungen am Arbeitsplatz durch vermehrte Nutzung von Klimaanlagen kompensiert werden müsste. Da gerade im Hafenbereich auch nachts gearbeitet wird, ist es bedeutsam hier auch die nächtliche Überwärmung möglichst gering zu halten. Begrünungen jeglicher Art, insbesondere auch im Sommer Schatten spendende, Laub abwerfende Bäume, sind hier zu empfehlen.

Die Bebauungsstruktur kann lokal die Komfortsituation beeinträchtigen. Im Nachlauf eines Gebäudes bilden sich aufgrund von Ablöseeffekten an den Bauwerkskanten Zonen mit erhöhter Böigkeit des Windes aus. Eingangszonen sollten sich möglichst nicht in Ecklage befinden, eine gestaffelte Struktur des Gebäudes kann entschärfend wirken. In Zonen freistehender Riegelbebauung entstehen zwischen den Gebäuden Bereiche mit erhöhter Geschwindigkeit sowie bedingt durch die Überströmung der Gebäude erhöhter Turbulenzstruktur des Windes. Eine Nachverdichtung zur Verhinderung dieser Diskomfortbereiche ist als sinnvoll zu betrachten. Eine Kanalisierung des Windes aufgrund von paralleler oder spitzwinkliger Bebauungsstruktur ist unbedingt zu vermeiden. Weiterhin kann es in dichter, blockartiger Bebauungsstruktur zur Überlagerung der Einflüsse zweier zueinander versetzt stehender Gebäude kommen. In solchen Überlagerungszonen sind Stadtgrünpflanzungen zur Erhöhung des Windkomforts vorzusehen. Bei starker Überhöhung einzelner Gebäude gegenüber dem restlichen Bestand wird lokal der bodennahe Wind sowie das Windfeld bis in den fernen Nachlauf (Auswirkungen bis etwa 20-fache Gebäudehöhe) des Gebäudes beeinflusst. An der luvseitigen Gebäudefront können Fallwinde entstehen, Überdachungen oder die Ausbildung eines Podiums führen zu einer Verbesserung des Fußgängerkomforts.

Neben den o.g. Auswirkungen der Bebauungsstruktur muss auch deren relative Lage berücksichtigt werden. Die im Westen des Stadtteils in Hauptwindrichtung gelegenen Gewerbe- und Industrieflächen führen zu Lärm- und Luftbelastungen der Bewohner, die bei allen planerischen Maßnahmen bedacht werden müssen. Die lokalen Veränderungen der Luftbelastung bedingt durch die Verlagerung der Wilhelmsburger Reichsstraße entlang ihrer neuen Trasse sind ebenfalls zu berücksichtigen. Für Informationen zur Ventilation, die über die Gegebenheiten des Stadtquartiers Hamburg-Wilhelmsburg hinausgehen, sei auf die Regelwerke von Ng (2009b) und Reuter (2012) verwiesen, für vertiefte Informationen zu der Wirkung des Windes auf den Fußgängerbereich sei Gandemer (1978) empfohlen.

Aufgrund der komplexen Interaktion des Windfeldes mit der lokalen Bebauungsstruktur empfiehlt es sich, Einzelfalluntersuchungen anhand eines physikalischen Modells in einem Windkanal oder mittels eines wirbelauflösenden, numerischen Modells (LES) durchzuführen.

15. Eidesstattliche Versicherung

Eidesstattliche Versicherung

Declaration on oath

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

I hereby declare, on oath, that I have written the present dissertation by my own and have not used other than the acknowledged resources and aids.

Hamburg, den 13. Mai. 2014

Unterschrift

Signature