
Erfassung und Analyse transienter und mikroskaliger Strömungs- und Transportprozesse in komplexen urbanen Strukturen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Mathematik, Informatik und
Naturwissenschaften
Fachbereich Erdsystemwissenschaften
der Universität Hamburg

vorgelegt von

Kerstin Surm

aus Nürnberg, Deutschland

Hamburg

2020

Fachbereich Erdsystemwissenschaften

Datum der Disputation: 07.07.2021

Gutachter/innen der Dissertation: Prof. Dr. Bernd Leitl
Prof. Dr. Felix Ament

Zusammensetzung der Prüfungskommission: Vorsitz Prof. Dr. Bernd Leitl
Prof. Dr. Felix Ament
Prof. Dr. Jürgen Böhner
Prof. Dr. Matthias Hort
Dr. Frank Harms

Vorsitzender des Fach-Promotionsausschusses
Erdsystemwissenschaften: Prof. Dr. Hermann Held

Dekan der Fakultät MIN: Prof. Dr. Heinrich Graener

Zusammenfassung

Ein wichtiger Faktor für das Wohlbefinden des Menschen in Städten ist die Böigkeit des Windes und der damit verbundene Luftschadstofftransport weg von den Hauptverkehrsstraßen. In vielen Windkomfortkriterien wird die Böigkeit des Windes bereits als Indikator verwendet. Speziell bei der Stadtplanung sollte die Böigkeit des Windes verstärkt berücksichtigt werden, wofür einfache Kriterien oder auch validierte, hochaufgelöste numerische Modelle benötigt werden.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts „Stadtklima im Wandel“ werden hochaufgelöste Validierungsdaten erzeugt. Dafür wurden im WOTAN Grenzschichtwindkanal der Universität Hamburg insgesamt vier detaillierte Stadtmodelle gebaut. Das erste Modell bildete die HafenCity in Hamburg ab, welches den Vorteil bot zwei Bebauungszustände untersuchen zu können. Das zweite und dritte Modell stellten Ausschnitte aus Berlin dar, wobei Regionen gewählt wurden, an denen Naturmessungen durchgeführt wurden. Für das vierte Modell wurde ein Ausschnitt aus der Innenstadt von Stuttgart nachgebaut.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die turbulenzauflösenden Strömungsmessungen hinsichtlich der Böigkeit des Windes ausgewertet. Sowohl für den Böenfaktor als auch für das Verhältnis von maximalen turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen zur Standardabweichung turbulenter Schwankungsbewegungen konnte kein fester Wert bestimmt werden. Im Weiteren zeigte sich eine lineare Abhängigkeit des Böenfaktors zur Turbulenzintensität und ein signifikanter Einfluss vom Effekt von Bäumen und der Umgebungsbebauung und somit von der Anströmwindrichtung. Von der Anströmwindgeschwindigkeit war der Böenfaktor unabhängig, ebenso ergaben sich keine Unterschiede bei den Böenfaktorwerten zwischen den Städten. Beim Böenkriterium nach der Definition des Deutschen Wetterdienstes ergaben sich signifikante Änderungen sowohl durch die Umgebungsbebauung und den Effekt von Bäumen als auch durch die Anströmwindgeschwindigkeit. Dadurch zeigten sich ebenfalls Unterschiede in den Ergebnissen der verschiedenen Städte.

Bei der Auswertung des Luftschadstofftransports von Hauptverkehrsstraßen wurde nachgewiesen, dass Luftschadstoffe über Dachniveau in Hinterhöfe und bis 1 km Entfernung transportiert werden. Bei turbulenten Strömungen können Schadstoffe auch gegen die Anströmwindrichtung transportiert werden. Hinter großen Gebäuden können sich Rezirkulationsgebiete bilden, wodurch Schadstoffe selbst auf Dachniveau gemessen werden können.

Abstract

The gustiness of wind and the related transport of pollutants from main streets is an important factor for human comfort in cities. Many wind comfort criteria already use the gustiness of wind as an indicator. To increase the consideration of the gustiness of wind specifically in city planning, simple criteria or validated, high resolution numerical models are required.

Within the scope of the project "Urban climate under change", which is funded by the Bundesministerium für Bildung und Forschung, high-resolution validation data are created. A total of four detailed city models were built inside the WOTAN environmental wind tunnel at the University of Hamburg. The first model reproduced the HafenCity in Hamburg which offered the advantage to examine two different development states. The second and third model reproduced parts of Berlin where field measurements took place. For the fourth model, a part of the Stuttgart city center was copied.

In this dissertation, turbulence resolving flow measurements were evaluated with regard to the gustiness of wind. No fixed value could be identified for the gust factor, as well as for the peak factor. Furthermore, the gust factor was shown to have a linear dependency to the turbulence intensity, and was affected significantly by nearby trees and buildings, and therefore by the incoming wind direction. The gust factor was independent of the incoming wind velocity, and did not differ between cities. Using the definition of gust from the Deutscher Wetterdienst, significant changes were caused by differences in nearby buildings, trees and incoming wind velocity. Furthermore, the results of different cities varied.

While evaluating the transport of pollutants from main streets, it was shown that pollutants were transported over roof levels into backyards, and to distances up to 1 km. Also, pollutants were transported within turbulent flows in the opposite direction of the incoming wind flow. Recirculation zones can be formed behind of large buildings, causing pollutants to be detectable on roof level.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis	x
Tabellenverzeichnis	xx
Abkürzungsverzeichnis	xxii
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	2
1.2. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)-Projekt „Stadt- klima im Wandel“	3
1.3. Struktur der Arbeit und Darstellung der Forschungsfragen	4
2. Grundlagen der planetarischen Grenzschicht und die Theorie der Turbulenz	7
2.1. Planetarische Grenzschicht	7
2.1.1. Betrachtung der einzelnen Schichten in der Prandtl-Schicht	9
2.1.2. Einfluss eines Gebäudes auf den Wind	10
2.2. Turbulenz	12
2.2.1. Physikalische Darstellung	13
2.2.2. Energiekaskade	14
2.2.3. Zeitliche Repräsentativität von Messungen	16
3. Stand der Forschung	18
3.1. Windkanaluntersuchungen	18
3.2. Windkomfort in urbaner Struktur	19
3.2.1. Böigkeit des Windes	22

3.3.	Konzentrationsverteilung in urbanen Strukturen	23
3.3.1.	Transektmessungen	24
4.	Windkanal	26
4.1.	WOTAN Grenzschichtwindkanal	26
4.2.	Messgeräte und Quelltypen	27
4.2.1.	Prandtl-Rohr	27
4.2.2.	Laser Doppler Anemometer	29
4.2.3.	Flammenionisationsdetektor	29
4.2.4.	Sanderosionsexperimente	32
5.	Modellversuche im Grenzschichtwindkanal	33
5.1.	HafenCity Hamburg	33
5.2.	Ernst-Reuter-Platz Berlin	36
5.3.	Neckartor Stuttgart	38
5.4.	Fichtenberg Berlin	40
6.	Modellbau und Grenzschichtmodellierung	41
6.1.	Modellbau	41
6.2.	Grenzschicht	46
6.2.1.	Grenzschichtentwicklung	47
6.2.2.	Auswertung der Grenzschichten	50
7.	Qualitätssicherung und Bearbeitung der Messdaten	58
7.1.	Vorversuche	58
7.1.1.	Vorversuche Strömungsmessungen und Versperrungsgrad	59
7.1.2.	Vorversuch für die Linienquellen	60
7.1.3.	Vorversuch für die Punktquelle	61
7.1.4.	Vorversuche für alle Quelltypen	62
7.2.	Qualitätssicherung während des Messens	63
7.3.	Bearbeitung der Messdaten	64
7.3.1.	Dateiname und Qualitäts-Flags für die Strömungsmessungen	65
7.3.2.	Bearbeitung der Strömungsmessungen	67
7.3.3.	Bearbeitung der Konzentrationsmessungen	68

7.4.	Auswerteskripte	69
7.4.1.	Böenanalyse	70
7.4.2.	Analyse verkehrserzeugter Immissionen	71
7.5.	Statistische Auswerteverfahren	72
7.5.1.	Bestimmung der Messunsicherheiten	72
8.	Böenanalyse	75
8.1.	Auswahl der Daten und der Anströmwindgeschwindigkeit	75
8.2.	Auswertung des Böenfaktors	77
8.2.1.	Untersuchung des bodennahen Böenfaktors	79
8.2.2.	Bestimmung von Orten mit kritischer Böenwindgeschwindigkeit	80
8.2.3.	Betrachtung der Einschränkungen in der Böendefinition des DWDs	80
8.3.	Untersuchung unterschiedlicher Einflussparameter auf die Böenanalyse	82
8.3.1.	Einfluss einer 20°-Windrichtungsänderung	83
8.3.2.	Einfluss des Effekts von Bäumen	86
8.3.3.	Einfluss eines Gebäudedurchbruchs auf das lokale Strömungsfeld	91
8.4.	Weitere literaturbezogene Auswertungen	92
8.5.	Kritische Betrachtung der Messorte	95
9.	Analyse verkehrserzeugter Immissionen	96
9.1.	Messortrepräsentativität bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen	96
9.1.1.	Windrichtung 175°	97
9.1.2.	Windrichtung 265°	103
9.1.3.	Wirkung der lokalen Gebäudestruktur	106
9.2.	Windrichtungsabhängigkeit der Emissionsbelastung und der Transportentfernung	107
9.2.1.	Emissionsbelastung in einer Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße	108
9.2.2.	Emissionsbelastung in einer Nebenstraße mit einem 30°-Winkel zur Hauptverkehrsstraße	114
9.2.3.	Heterogenität der Konzentrationsverteilung in 200 m Entfernung	118
9.3.	Transektmessung senkrecht zur Straße des 17. Juni	120

9.4. Zeitlichen Repräsentativität der Emissionsbelastung	123
10. Zusammenfassung und Ausblick	130
10.1. Fazit zur Böenanalyse	131
10.1.1. Weitere Auswertemöglichkeiten	134
10.2. Fazit zu den verkehrserzeugten Immissionen	134
10.2.1. Weitere Auswertemöglichkeiten	138
10.3. Übersicht weiterer möglicher Untersuchungen	138
Literaturverzeichnis	L-1
Anhang	A-1
Anhang A. Detaillierte Darstellung aller Messpunkte	A-1
A.1. Hamburg HafenCity-Modell	A-2
A.1.1. Messungen im Bebauungszustand 2017 und 2023	A-2
A.1.2. Windkanalmessungen an den Naturmessorten während der IOP in der HafenCity	A-4
A.1.3. Rasterförmige Messungen an der HafenCity Universität Hamburg	A-5
A.1.4. Windkanalmessungen in der Nähe der HafenCity Naturmessstel- le des HUSCO-Messnetzes	A-6
A.1.5. Windkanalmessungen im Überseeboulevard	A-7
A.1.6. Messungen am Unilever-Haus	A-9
A.2. Berlin Ernst-Reuter-Platz-Modell	A-11
A.2.1. Strömungsmessungen	A-11
A.2.2. Rasterförmige Messungen in einem Schulhof	A-12
A.2.3. Mit und ohne extra Wandraufigkeit	A-13
A.2.4. Verkehrserzeugte Emissionen im Ernst-Reuter-Platz-Modell . . .	A-15
A.2.5. Transektmessung Kantstraße	A-17
A.2.6. Transektmessung Straße des 17. Juni	A-18
A.3. Stuttgart Neckartor-Modell	A-19
A.3.1. Tabelle ohne den Effekt von Bäumen	A-20
A.3.2. Tabelle mit dem Effekt von Bäumen	A-23
Anhang B. Zusätzliche Abbildungen für die Grenzschichtauswertung	A-26

Anhang C. Quellcode zur Böenanalyse	A-30
Anhang D. Zusätzliche Abbildungen für die Böenanalyse	A-35
Anhang E. Zusätzliche Abbildungen für die Analyse der verkehrserzeugten Immissionen	A-40
Danksagung	A-46
Eidesstattliche Versicherung Declaration of Oath	A-46

Abbildungsverzeichnis

2.1. Schichten der Atmosphäre nach dem Lexikon des Deutschen Wetterdienstes (<i>Planetarische Grenzschicht</i> 2019)	8
2.2. Schematische Darstellung der Prandtl-Schicht nach Grimmond und Oke (2002)	9
2.3. Schematische Darstellung der durch ein Hindernis beeinflussten Bereiche nach Oke (2000)	10
2.4. Lichtschnitt vom Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell mit Stromlinien in weiß nach Oke (2000)	11
2.5. Energiekaskade nach Garratt (1992)	15
4.1. Windkanal	28
4.2. Fast-FID und Punktquelle im Stuttgart-Modell	30
4.3. Modellgebiet vom Ernst-Reuter-Platz Berlin mit farbig markierten Linienquellen	31
5.1. Windkanalmodell der HafenCity Hamburg (Bebauungszustand von 2017)	34
5.2. Windkanalmodell der HafenCity Hamburg (geplanter Bebauungszustand von 2023)	34
5.3. Windkanalmodell des Ernst-Reuter-Platzes Berlin	36
5.4. Ausschnitt aus dem ersten Berlin-Modell mit zusätzlicher Wandrauigkeit	38
5.5. Windkanalmodell des Stuttgarter Neckartors	39
5.6. Ausschnitt aus dem Windkanalmodell des Stuttgarter Neckartors in a) ohne und b) mit dem Effekt von Bäumen	39
5.7. Zweites Berlin-Modell vom Fichtenberg mit Blick in Windrichtung . . .	40
6.1. Einbau der Linienquellen in das Ernst-Reuter-Platz-Modell	42

6.2. Fertig eingebaute Linienquellen im Ernst-Reuter-Platz-Modell	43
6.3. Einbau Modellgebäude Hamburg HafenCity	43
6.4. Passgenauigkeit der Gebäude	44
6.5. Markierungen für die Windrichtungen	45
6.6. Gebäude vor Ort in Berlin	45
6.7. Gebäude im Windkanal	45
6.8. Beim ersten Versuch für eine Grenzschichtmodellierung verwendete Turbulenzgeneratoren	48
6.9. Vergleich der stufenförmigen unteren Elemente der Spires (vorne - holz- farben) zu denen mit Steigung (hinten - rot)	48
6.10. Detailaufnahme der Rauigkeiten	49
6.11. Finale Konfiguration der Turbulenzgeneratoren	49
6.12. Schematische Darstellung der Rauigkeitselemente	50
6.13. Finale Konfiguration der verwendeten Spires mit Maßangaben	51
6.14. Zusammenhang zwischen Profilexponenten α und Rauigkeitslänge z_0 mit den Referenzwerten von Counihan (1975)	51
6.15. Turbulenzintensitäten für die Windrichtungskomponenten u, v, w für das Hamburg-Modell mit den Referenzlinien aus der VDI 3783/12 (2000)	53
6.16. Turbulenzintensitäten für die Windrichtungskomponenten u, v, w für das Berlin-Modell mit den Referenzlinien aus der VDI 3783/12 (2000) . .	54
6.17. Turbulenzintensitäten für die Windrichtungskomponenten u, v, w für das Stuttgart-Modell mit den Referenzlinien aus der VDI 3783/12 (2000)	54
6.18. Integrales Längenmaß L_{ux} für die Daten des Hamburg-Modells mit Re- ferenzwerten aus der Natur von Counihan (1975)	55
6.19. Integrales Längenmaß L_{ux} für die Daten des Berlin-Modells mit Refe- renzwerten aus der Natur von Counihan (1975)	56
6.20. Integrales Längenmaß L_{ux} für die Daten des Stuttgart-Modells mit Refe- renzwerten aus der Natur von Counihan (1975)	57
7.1. Wasserbadtest einer Linienquelle aus dem Ernst-Reuter-Platz-Modell . .	60
7.2. Durchflussrate zur Druckdifferenz für alle verwendeten Linienquellen. .	61
7.3. Ergebnisse des Quellstärkentests an einem Messort im Stuttgart-Modell	62

7.4.	Reynoldszahlenunabhängigkeitstest für einen Messort im Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell	63
7.5.	Beschreibung der Zusammensetzung des Dateinamens	65
8.1.	Zeitliche Auflösung der Zeitreihen in Sekunden (boxplot) und die gemittelte Anzahl der 10-min-Intervalle (rote Punkte) für verschiedene Windgeschwindigkeiten [WG] in m/s für alle Daten mit flg0??0	76
8.2.	Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen und eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor	78
8.3.	Über Windgeschwindigkeitsintervalle von 0,25 m/s gemittelte Werte für den Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für Hamburg (2017: blau; 2023: orange), Berlin (grün) und Stuttgart(rot) . . .	78
8.4.	Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Messhöhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von a) 8 m/s und b) 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor . . .	79
8.5.	Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von 12 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor; Grenzgeschwindigkeit für 15 m/s als gelbe Linie und für 20 m/s als dunkelrote Linie	81
8.6.	a) Böendefinition gemäß Deutscher Wetterdienst (DWD) und b) 5 m/s-Böe jeweils als Funktion vom 10-minütiger Mittelwind für alle Höhen ≤ 10 m. Blau: Hamburg HafenCity (2017); Gelb: Hamburg HafenCity (2023); Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor	81

8.7. Böenfaktor bei Anwendung des DWD-Kriteriums als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor	83
8.8. Böenfaktor für eine Anströmwindgeschwindigkeit von a) 110° und b) 130° für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe	84
8.9. Böenfaktor für a) 110° und b) 130° für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe	84
8.10. Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs für a) 110° und b) 130° für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s. In grau wurden Messorte ohne Böen nach der Definition des DWDs markiert.	85
8.11. Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs für a) 110° und b) 130° für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 17 m/s	85
8.12. Windrosen und mittlere dimensionslose Horizontalwindgeschwindigkeit für a) 110° und b) 130°	86
8.13. Böenfaktor a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen	87
8.14. Mittelwert der dimensionslosen Windgeschwindigkeiten a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen	88
8.15. Turbulenzintensität I_u a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen	89
8.16. Turbulenzintensität I_v a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen	89
8.17. Häufigkeit der Böen gemäß der Definition des DWDs a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s; Grau: Messorte ohne Böen	90
8.18. Böenfaktor a) für den Fall mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch für eine Windgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung	91

8.19. Häufigkeit der Böen gemäß der Definition des DWDs a) für den Fall mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch	92
8.20. Windrosen und mittlere Horizontalwindgeschwindigkeit a) mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch	93
8.21. Böenfaktor als Funktion der Turbulenzintensität I_u für alle Messpunkte für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor	94
8.22. Verhältnis von maximalen turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen zur Standardabweichung turbulenter Schwankungsbewegungen (k) als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Messpunkte für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor	94
9.1. Umrisse der Linienquellen mit den jeweiligen Straßennamen und die in diesem Abschnitt ausgewerteten Messorte mit Namen	97
9.2. 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen von verkehrsreichen Straßen gemessen an vier Messorte bei einer Windrichtung von 175°	98
9.3. Windrosen in 4 m Höhe über Grund bei einer Anströmwindrichtung von 175°	100
9.4. Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Hardenbergstraße am Messort TU-Dach	101
9.5. Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Kantstraße am Messort TU-Dach	102
9.6. Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Kantstraße am Messort TU-Vorplatz	102
9.7. Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Hardenbergstraße am Messort TU-Vorplatz	103

9.8. Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Hardenbergstraße am Messort TU-150m	103
9.9. Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Hardenbergstraße am Messort TU-250m	104
9.10. 50. Perzentil des Anteils der dimensionslosen Konzentrationen von ver- kehrsreichen Straßen gemessen an vier Messorten bei einer Windrichtung von 265°	105
9.11. 50. Perzentil des Anteils der dimensionslosen Konzentrationen der Haupt- verkehrsstraßen am Messort südlich des Durchgangs (schwarzer Balken in Abbildung b)) bei einer Hauptwindrichtung von 265° a) mit Durch- gang und b) ohne Durchgang	107
9.12. Windrosen für die Messpunkte nördlich und südlich des Durchgangs in 4 m Höhe über Grund a) mit Durchgang (grau markierter Bereich) und b) ohne Durchgang für eine Anströmwindrichtung von 265°	108
9.13. Modellgebiet vom Ernst-Reuter-Platz mit den Linienquellen in der Kant- straße in grün und den Messpunkten in rot und die gemessenen Wind- richtungen (185°, 200°, 215°, 230°) als Pfeile	109
9.14. 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen entlang der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße für die Windrichtungen a) 185°, b) 200°, c) 215° und d) 230°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäude- höhe.	110
9.15. 95. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen entlang der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße für die Windrichtungen a) 185°, b) 200°, c) 215° und d) 230°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäude- höhe.	111
9.16. 5. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen entlang der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße für die Windrichtungen a) 185°, b) 200°, c) 215° und d) 230°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäude- höhe.	112
9.17. Nahansicht der ersten Messpunkte mit Windrichtungspfeil (215°)	113
9.18. Windrosen im Bereich der Konzentrationsmessungen in 4 m Höhe über Grund für eine Anströmwindrichtung von 185° und 225°	114

9.19. 50. Perzentil der Konzentrationen entlang einer in 30° zur Hauptverkehrsstraße verlaufenden Nebenstraße für die Windrichtungen a) 185°, b) 200°, c) 215° und d) 230°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.	115
9.20. 5. und 95. Perzentil der Konzentrationen entlang einer in 30° zur Hauptverkehrsstraße geneigten Nebenstraße für die Windrichtungen a) und b) 185°, c) und d) 200°, e) und f) 215° und g) und h) 230°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.	117
9.21. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen für die Messpunkte in 2 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	119
9.22. 50. und 5. Perzentil für die Konzentrationsverteilung in 200 m Entfernung zur Kantstraße für die Windrichtungen a) und b) 185°, c) und d) 200° und e) und f) 215°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.	121
9.23. 5. Perzentil der Konzentrationen in der Nebenstraße senkrecht zur Straße des 17. Juni	122
9.24. 5. Perzentil der Konzentrationen mit Unsicherheiten für 1 m Höhe	122
9.25. 50. Perzentil der Konzentrationen entlang der Nebenstraße senkrecht zur Straße des 17. Juni	122
9.26. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 10 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 2 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	125
9.27. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 60 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 2 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	126
9.28. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen für die Messpunkte in 32 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	127

9.29. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 10 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 32 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	128
9.30. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 60 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 32 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	129
A.1. Strömungsmessungen im Hamburger HafenCity-Modell für beide Bebauungszustände	A-2
A.2. Windkanalmessungen an den Naturmessorten während der IOP in der HafenCity	A-4
A.3. Rasterförmige Messungen an der HafenCity Universität Hamburg	A-5
A.4. Windkanalmessungen in der Nähe der HafenCity Naturmessstelle des HUSCO-Messnetzes	A-6
A.5. Messungen im Überseeboulevard für eine Anströmwindrichtung von 110°	A-7
A.6. Messungen im Überseeboulevard für eine Anströmwindrichtung von 225°	A-8
A.7. Messungen am Unilever-Haus	A-9
A.8. Messungen im Ernst-Reuter-Platz-Modell	A-11
A.9. Rasterförmige Messungen in einem Schulhof	A-12
A.10. Strömungsmessungen mit und ohne extra Wandrauigkeit	A-13
A.11. Konzentrationsmessungen mit und ohne extra Wandrauigkeit	A-14
A.12. Verkehrserzeugte Emissionen im Ernst-Reuter-Platz-Modell	A-15
A.13. Messpunkte vom Transekt zur Kantstraße	A-17
A.14. Messpunkte vom Transekt zur Straße des 17. Juni	A-18
A.15. Alle Strömungsmessorte im Stuttgarter Neckartor-Modell	A-19
A.16. Messorte im Stuttgarter Neckartor-Modell; kleiner Ausschnitt mit eingezeichneten Effekten von Bäumen (graue Ringe)	A-20
B.1. Logarithmische Darstellung der horizontalen Windkomponenten in der Grenzschicht vor dem Hamburg-Modell	A-26

B.2.	Logarithmische Darstellung der horizontalen Windkomponenten in der Grenzschicht vor dem Berlin-Modell	A-27
B.3.	Logarithmische Darstellung der horizontalen Windkomponenten in der Grenzschicht vor dem Stuttgart-Modell	A-27
B.4.	Turbulente Flüsse im Constant Flux Layer vor dem Hamburg-Modell . .	A-28
B.5.	Turbulente Flüsse im Constant Flux Layer vor dem Berlin-Modell	A-28
B.6.	Turbulente Flüsse im Constant Flux Layer vor dem Stuttgart-Modell . .	A-29
D.1.	Böenfaktor als Funktion des mittleren 1-Std-Horizontalwindes. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor	A-35
D.2.	Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor; Grenzgeschwindigkeit für 15 m/s als gelbe Linie und für 20 m/s als dunkelrote Linie	A-36
D.3.	Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor; Grenzgeschwindigkeit für 15 m/s als gelbe Linie und für 20 m/s als dunkelrote Linie	A-37
D.4.	Böen gemäß der Definition des DWDs gegenüber dem mittleren 10-min-Wind. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor	A-37
D.5.	Böenfaktor a) ohne den Effekt von Bäumen und b) mit dem Effekt von Bäumen für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s	A-38
D.6.	Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs a) ohne den Effekt von Bäumen und b) mit dem Effekt von Bäumen für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s	A-38

D.7. Böenfaktor a) für den Fall mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung	A-39
D.8. Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs a) für den Fall mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung	A-39
E.1. Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Kantstraße am Messort TU-150m	A-40
E.2. Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Kantstraße am Messort TU-250m	A-41
E.3. 95. Perzentil der Konzentrationen in 200 m Entfernung zur Hauptverkehrsstraße für die Windrichtungen a) 185°, b) 200° und c) 215°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.	A-41
E.4. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 30 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 2 m Höhe für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	A-42
E.5. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 120 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 2 m Höhe für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	A-43
E.6. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 30 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 32 m Höhe für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	A-44
E.7. 5.,50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 120 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 32 m Höhe für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.	A-45

Tabellenverzeichnis

8.1. Anzahl und prozentualer Anteil der Messorte mit Böen nach den verschiedenen Kriterien	82
9.1. 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen für die Messorte TU-Dach, TU-Vorplatz, TU Hauptgebäude 150 m und TU Hauptgebäude 250 m	99
9.2. 5. und 95. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen für die vier Messorte	101
A.2. Messpunkte im Hamburger HafenCity-Modell für den Bebauungszustand von 2017 und den zukünftigen von 2023	A-3
A.3. Zusatzmessungen im Hamburger HafenCity-Modell	A-3
A.4. Windkanalmessungen an den Naturmessorten der IOP in Hamburg HafenCity für beide Bebauungszustände	A-4
A.5. Zusatzwindkanalmessungen an den Naturmessorten der IOP in Hamburg HafenCity	A-4
A.7. Rasterförmige Messungen an der HafenCity Universität Hamburg	A-6
A.9. Windkanalmessungen in der Nähe der HafenCity Naturmessstelle des HUSCO-Messnetzes Bebauungszustand 2017	A-7
A.10. Windkanalmessungen in der Nähe der HafenCity Naturmessstelle des HUSCO-Messnetzes Bebauungszustand 2023	A-7
A.11. Messungen im Überseeboulevard	A-8
A.13. Messungen im Überseeboulevard	A-9
A.14. Zusatzmessungen im Überseeboulevard nur mit Gebäudedruchbruch	A-9

A.15.Messungen am Unilever-Haus mit der sehr detaillierten Version und der sehr stark vereinfachten Version	A-10
A.16.Zusatzmessungen am Unilever-Haus mit einer leicht vereinfachten Version	A-10
A.18.Messungen im Ernst-Reuter-Platz-Modell. Die beiden K-Messungen sind ohne Durchgang.	A-12
A.19.Ergänzende Messungen zur Untersuchung des Einflusses einer geringfügigen Windrichtungsänderung	A-12
A.20.Rasterförmige Messungen in einem Schulhof	A-13
A.22.Strömungsmessungen mit und ohne extra Wandrauigkeit	A-14
A.24.Konzentrationsmessungen mit und ohne extra Wandrauigkeit	A-15
A.25.Abkürzungen für die Straßen, von denen Konzentrationen freigesetzt wurden	A-15
A.26.Verkehrserzeugte Emissionen im Ernst-Reuter-Platz-Modell; K bei verschlossenem Durchgang	A-16
A.28.Messpunkte vom Transekt zur Kantstraße	A-18
A.29.Messpunkte vom Transekt zur Straße des 17. Juni	A-18
A.31.Alle Strömungs- und Konzentrationsmessorte ohne den Effekt von Bäumen im Stuttgarter Neckartor-Modell	A-22
A.33.Alle Messorte ohne den Effekt von Bäumen im Stuttgarter Neckartor-Modell	A-25

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CFD	Computational Fluid Dynamics
DWD	Deutscher Wetterdienst
EET	early evening transition
EWTL	Grenzschichtwindkanallabor
FID	Flammenionisationsdetektor
FU Berlin	Freie Universität Berlin
H	Horizontalwind = $\overline{u \cdot v}$
HCU	HafenCity Universität
HUSCO	Hamburg Urban Soil Climate Observatory
IOP	Intensivmesskampagne
LDA	Laser Doppler Anemometer
LES	large-eddy simulation
LoD	Level of Detail
METRAS	Mesoskaliges Transport- und Strömungsmodell
Re	Reynoldszahl
TU Berlin	Technische Universität Berlin
UCL	Urban Canopy Layer
UHH	Universität Hamburg
WMO	World Meteorological Organization

Kapitel 1

Einleitung

Das menschliche Wohlbefinden in Städten hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab. Neben sozialen und architektonischen Gegebenheiten spielen auch die meteorologische Bedingungen eine wesentliche Rolle. Zu den meteorologischen Parametern, die das Wohlbefinden unmittelbar beeinflussen, zählen die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und der Wind. Der Wind kann zusätzlich Schadstoffe vom Straßenverkehr, von Industrieanlagen und Emissionen aus Wohngebäuden an den Menschen herantragen. Somit ist der Wind eine wichtige Größe bei der Betrachtung des menschlichen Wohlbefindens in Städten. Allerdings beschreibt Bitan (1976), dass Wind nicht als negativer Faktor wahrgenommen wurde. Der Autor gibt jedoch Beispiele, warum bei der Planung von Gebäuden hohe Windgeschwindigkeiten berücksichtigt werden müssen. Mittlerweile sind auch die negativen Aspekte von Wind in urbaner Umgebung bekannt. Blocken, Stathopoulos und Beeck (2016) weisen darauf hin, dass viele Stadtverwaltungen heutzutage Windkomfortanalysen fordern, bevor sie Hochhäuser genehmigen. Die Autoren beschreiben verschiedene Windkanalmesstechniken und Computational Fluid Dynamics (CFD)-Techniken, die zur Untersuchung des Windkomforts verwendet werden. Sie weisen auch darauf hin, dass aufgrund des häufig geringen Budgets überwiegend die kostengünstigeren Verfahren gewählt werden, welche ihrer Analyse nach auch ausreichend sind. Diese Schlussfolgerung ist allerdings nur plausibel, weil bei den von ihnen verwendeten Windkomfortkriterien nur der Mittelwert betrachtet wird. Darüber hinaus merken die Autoren an, dass die Bögigkeit für die Bewertung des Windkomforts sehr wichtig ist und empfehlen, in zukünftigen Studien die Bögigkeit näher zu untersuchen (Blocken, Stathopoulos und Beeck, 2016). Da das Thema Windkomfort mittlerweile präsenter ist, werden zunehmend wissenschaftliche Arbeiten zu dem Thema veröffentlicht. Vor allem im Bereich der Stadtplanung können mit Windkanalmodellen viele Gebäudekonfigurationen innerhalb kurzer Zeit getestet werden (siehe u. a. Kuo et al. (2015) und Janssen (2013)).

Für das Wohlbefinden des Menschen ist allerdings nicht nur der Windkomfort wichtig, sondern auch die Ventilation von Stadtgebieten. Kipsch (2014) untersuchte ein Stadtgebiet in Hamburg hinsichtlich seiner Ventilationseigenschaften. Er konnte drei Stadtraumtypen identifizieren, die signifikant unterschiedliche Ventilationseigenschaf-

ten aufwiesen. Das Ventilationspotenzial und auch der Windkomfort hängen zusätzlich von der geographischen Lage einer Stadt ab. Basierend auf den Arbeiten von Wu und Kriksic (2012) und Uematsu et al. (1992) schlussfolgern Mittal, Sharma und Gairola (2018), dass in Regionen mit sehr feuchtem und heißem Klima die Hauptstraßen parallel zur Hauptwindrichtung liegen sollten. Diese Maßnahme erhöht die Luftbewegung und den Abtransport schadstoffbeladener Luftmassen. Im Gegensatz dazu sollte in kalten Regionen für eine Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeit gesorgt werden, dafür können zum Beispiel Gebäude mit Podium gebaut werden (Mittal, Sharma und Gairola, 2018).

Auch Naturmessungen zeigen, dass durch Veränderungen im Stadtgebiet der Windkomfort verbessert werden kann (Fezer, 1990). Neben Naturmessungen und Windkanalmessungen werden auch numerische Modelle verwendet, um den Windkomfort in bestimmten Gebäudekonfigurationen und die Strömungen in Straßenschluchten zu testen (Soulhac, Perkins und Salizzoni (2008) und Yasa (2017)).

Windkanalmessungen werden sehr oft zum Vergleich bzw. zur Validierung von numerischen Modellen verwendet. Bei der Untersuchung mikroklimatischer Prozesse und Zustände in Stadtgeometrien finden unterschiedliche geometrische Detailstufen Verwendung. Zum einen werden einzelne Gebäude oder kleine Gebäudekomplexe isoliert betrachtet (siehe u. a. Ferreira, Sousa und Viegas (2002); Hooff, Blocken und Tominaga (2017)), zum anderen werden Straßenschluchten stark vereinfacht modelliert (siehe u. a. Castro et al. (2017); Kellnerová et al. (2018)). Andere Studien vergleichen sowohl vereinfachte als auch detaillierte Stadtstrukturen (siehe u. a. Abdi und Bitsuamlak (2016)). Darüber hinaus gibt es auch Studien, in denen nicht nur Windströmungen verglichen werden, sondern auch Konzentrationsverteilungen (siehe u. a. Gartmann et al. (2012)) oder Schneeverwehungen (siehe u. a. Zhou et al. (2016); Groot Zwaafink et al. (2014)).

1.1. Motivation

Zur Validierung von numerischen Modellen können auch Naturmessungen verwendet werden (Schäfer (2013): „Validierung des mesoskaligen Transport- und Strömungsmodells „METRAS“ für Berlin anhand der Messkampagne der Freien Universität Berlin im Sommerhalbjahr 2012“). Dazu wurden im Zuge des Projektes MILIEU - Centre for Urban Earth System Studien 2012 sechs Messkampagnen in Berlin durchgeführt. Dabei wurden die Temperatur und die relative Feuchte in 5 cm und 2 m Höhe über Grund auf 31 Routen gemessen. Zusätzlich wurden die Messdaten der festen Messstationen der Freien Universität Berlin (FU Berlin), der Technischen Universität Berlin (TU Berlin), der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der Meteomedia AG verwendet. Beim Vergleich der Messdaten untereinander konnte gezeigt werden, wie variabel und schwer interpretierbar Naturmessungen sind. Beim Vergleich der Messdaten mit den METRAS-Modelldaten wurde ersichtlich, dass ein Vergleich von Punktmessungen zu Modelldaten mit einer Gitterauflösung von 200 m schwierig ist, speziell da das Modell keine 2-m-Temperatur simuliert hat. Bei der Untersuchung der Bodenbeschaffenheit wurde festgestellt, dass die gemessenen Temperaturen nicht nur von der Bodenbeschaffenheit, sondern auch von Abschattungseffekten

und besonders vom lokalen Wind abhängig sind (Schäfer, 2013). Daher war für diese Arbeit die Erkenntnis motivierend, wie wichtig der Wind für die Temperaturverteilung in der Stadt ist.

Bezüglich der Auswertungen wurde in der Arbeit von Schäfer (2013) festgestellt, dass diese dadurch erschwert wurde, dass Naturmessungen von sehr vielen unterschiedlichen Parametern abhängig sind, die nicht simultan erfasst werden konnten. Wünschenswert wären kontrollierbare und vollständig dokumentierbare Randbedingungen, wie sie zum Beispiel bei Versuchen in sogenannten Grenzschichtwindkanälen bereitgestellt werden.

Ein weiterer motivierender Aspekt für die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Untersuchungen war die Erstellung eines Validierungsdatensatzes für ein gebäudeauflösendes Modell mit einer Gitterweite von 1 bis 10 m. In der Arbeit von Schäfer (2013) wurde ein Vergleich von 2-m-Messdaten zu 10-m-Modelldaten auf einem 200-m-Gitter durchgeführt. Im Modell wurden die Gebäude nicht aufgelöst, sondern als Rauigkeit parametrisiert. Beim Vergleich zeigte sich, dass sich aufgrund der fehlenden abschattenden Gebäude die Messdaten zum Teil deutlich von den Modelldaten unterschieden.

1.2. BMBF-Projekt „Stadtklima im Wandel“

Speziell in der Stadtplanung werden stadtklimatische Modelle benötigt, die gebäudeauflösend sind, komplette Städte berechnen können und Gitterweiten von 10 m und feiner haben. Um die Modellentwicklung in diesem Bereich zu unterstützen, förderte das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in einer ersten Förderphase von 2016 bis 2019 das Projekt „Stadtklima im Wandel“ (Scherer, Antretter et al. 2019).

Sämtliche bereits existierende Modelle sind auf unterschiedliche Parameter spezifiziert. So können gebäudeauflösende Modelle meist nur einzelne Straßenzüge oder räumlich begrenzte Stadtquartiere abbilden. Selbst in anspruchsvollen numerischen Modellen werden meist nur in Raum und Zeit gemittelte Werte prognostiziert. Dabei stellt sich die Frage, ob bei Prozessen und Phänomenen im mikroskaligen Bereich Mittelwerte zur Beschreibung ausreichen. Dies gilt besonders für Modelle, die aufgrund der verwendeten groben Gitterweiten zwar gesamte Städte modellieren, jedoch keine Gebäude auflösen können. Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Entwicklung und Validierung eines Stadtklimamodells, das sowohl komplette Städte abbildet als auch gebäudeauflösende Simulationsrechnungen ermöglicht. Aus praktischer Perspektive wird von dem Modell erwartet, dass es benutzerfreundlich und effizient ist (Scherer, Antretter et al. 2019). Gerechnet werden soll sowohl auf einem Großrechner als auch auf einem PC.

Unterteilt ist das Projekt in drei Module. Modul A ist für die Entwicklung des numerischen Modells und dessen grundlegende Validierung zuständig. Modul B ist für die Erzeugung eines geeigneten Validierungsdatensatzes auf der Basis von Naturmessungen und systematischen Modellversuchen im Grenzschichtwindkanal verantwortlich. Gemeinsam mit Modul A werden Simulationsrechnungen durchgeführt und die Güte der Modellergebnisse wird evaluiert. Modul C begleitet den Entwicklungs- und Evaluierungsprozess aus der Perspektive zukünftiger Modellanwender, trägt Anforderungen

an das Modell zusammen und testet gemeinsam mit potenziellen Modellanwendern die Praxistauglichkeit des Softwarewerkzeugs.

Modul A verwendete als Basis für das neue Modell das PALM-Modell (Raasch, 2001). PALM ist ein large-eddy simulation (LES) Modell, welches auf verschiedenen Rechnersystemen betrieben werden kann. In einer für urbane Anwendungen adaptierten Version können Gebäude als feste Körper im Modell berücksichtigt werden. Für Stadtklima-Simulationen muss PALM allerdings um eine Reihe von Funktionalitäten erweitert werden. Zu ergänzen ist unter anderem ein Energiebilanz-Modul für die Oberflächen des Modellgebietes. Weiterhin soll ein Innenraumklimamodell implementiert werden, um anthropogene Einflüsse wie das Heizen oder Kühlen von Räumen abzubilden. Es wird zusätzlich ein Luftschadstoff-Ausbreitungsmodell benötigt, mit dem der Transport, aber auch die chemischen Prozesse berücksichtigt werden können. Ein weiterer wichtiger Punkt betrifft die Implementierung eines Multi-Agenten Systems, mit dem einzelne Menschen in der Stadt und deren Verhalten aufgrund von umweltmeteorologischen Einflüssen simuliert werden können. Schlussendlich wird in Zusammenarbeit mit den anderen Modulen noch eine graphische Oberfläche erzeugt, um das Modell benutzerfreundlich zu gestalten (Maronga et al. 2019).

Modul B beschäftigte sich mit der Erfassung hochaufgelöster dreidimensionaler Validierungsdaten. Neben Langzeitmessungen wurden vier Intensivmesskampagnen in Berlin, Hamburg und Stuttgart realisiert. Zusätzlich wurden vier Windkanalmodelle von Messgebieten der Naturversuche aufgebaut und in einem Grenzschichtwindkanal untersucht. Von den Projektpartnern wurden Wetter- und Klimadaten aufgezeichnet. Diese beinhalten Wind- und Turbulenzdaten, Impuls- und Massenflüsse sowie Energie- und Wasserbilanzen. Weitere Daten wurden im Bereich der Luftschadstoffe erhoben. Die Messergebnisse der Langzeitbeobachtungen und der Intensivmesskampagnen wurden im Rahmen des Projektes aufbereitet, qualitätsgesichert und in einer Datenbank zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe des Datenfundus sollen Konzepte und Werkzeuge zur Erfassung und Analyse von Daten entwickelt und das neue Modell validiert werden (Scherer, Ament et al. 2019).

Modul C stellt im Projekt die Verbindung zu zukünftigen Anwendern her. Dabei wurde analysiert, welche Anforderungen diese an das neue Stadtklimamodell stellen. Außerdem wurde mit den Anwendern das Modell getestet und auf seine Praxistauglichkeit hin untersucht (Halbig et al. 2019). Ziel war es, sowohl die Naturmessungen als auch die Modellsimulationen in der Stadtplanung und beim Klimaschutz anzuwenden.

1.3. Struktur der Arbeit und Darstellung der Forschungsfragen

Innerhalb des BMBF-Projektes ist durch die Kombination von Natur- und Labormessungen ein umfangreicher Validierungsdatensatz entstanden. Insgesamt wurden vier Modelle für den WOTAN Grenzschichtwindkanal der Universität Hamburg gebaut. Ein Modell bildet die HafenCity in Hamburg ab, das Zweite den Ernst-Reuter-Platz in Berlin, das Dritte das Neckartor in Stuttgart und das Vierte den Fichtenberg in Berlin. In der vorliegenden Arbeit werden speziell Strömungsmessdaten hinsichtlich der Böigkeit

und die Ergebnisse der Ausbreitungsmodellierung im Modell Berlin Ernst-Reuter-Platz analysiert.

Dazu wird zunächst in Kapitel 2 auf die Grundlagen der planetarischen Grenzschicht und die Theorie der Turbulenz eingegangen. Kapitel 3 legt den aktuellen Stand der Forschung dar. Das daran anschließende Kapitel 4 beschäftigt sich mit dem Grenzschichtwindkanal WOTAN und der verwendeten Messtechnik, bevor dann die Modellversuche im Windkanal in Kapitel 5 beschrieben werden. Kapitel 6 behandelt den Modellbau und die im Rahmen der Arbeit entwickelte Modell-Windgrenzschicht. Auf die Qualitätssicherung und die Bearbeitung der Messdaten wird in Kapitel 7 eingegangen.

Kapitel 8 stellt die Ergebnisse der Analyse turbulenzauflösender Strömungsmessungen vor. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt dabei auf der Betrachtung der Böigkeit des Windes. Die Böigkeit ist ein wesentlicher stadtklimatischer Parameter, zu dessen vollständiger repräsentativer Erfassung sehr lange Naturmessreihen oder rechenintensive, wirbelauflösende numerische Simulationen erforderlich sind. Alternativ können die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Windkanalversuche qualifizierte Daten liefern. Besonders in der Stadtplanung wird angestrebt, mit weniger komplexen Modellen oder rein auf Basis von Mittelwerten den Windkomfort an einem Standort charakterisieren und bewerten zu können. Dafür werden praxistaugliche Parameter benötigt. Dies führt zur ersten Frage: „Gibt es einen festen Parameter, der städteübergreifend für verschiedene Anströmwindgeschwindigkeiten genutzt werden kann?“ (Kapitel 8.2)

Der Aufenthaltsbereich des Menschen im Freien liegt überwiegend im bodennahen Bereich bis 10 m Höhe. Dieser Bereich ist somit zur Auswertung bei der Stadtplanung wichtig und soll in einer zweiten Fragestellung betrachtet werden: „Wie verhält sich der untersuchte Parameter bodennah und an welchen Orten können kritische Böenwindgeschwindigkeiten erreicht werden?“ (Kapitel 8.2)

Auch der Deutsche Wetterdienst hat eine Definition für Böen, die sich auf den zu untersuchenden Parameter bezieht, wodurch sich folgende Fragestellung ergibt: „Welchen Einfluss haben die bei der Definition einer Böe verwendeten Annahmen und Einschränkungen vom DWD auf die berechneten Faktoren?“ (Kapitel 8.2)

Abschließend sollen der Parameter und die Häufigkeit des Auftretens einer Böe nach der Definition des DWDs für verschiedene Einflussparameter separat untersucht werden. Dabei wurden drei Fragestellungen zu den Einflussfaktoren ausgewählt: „Welchen Einfluss hat eine geringfügige Windrichtungsänderung? Wie stark ist der Effekt von Bäumen? Wie groß ist die Auswirkung der verwendeten Detailgenauigkeit der Gebäude für die Modellierung?“ (Kapitel 8.3)

In Kapitel 9 werden verkehrserzeugte Immissionen näher betrachtet. Diese werden stark von den lokalen Windverhältnissen beeinflusst. Dabei war es im Rahmen der Windkanalmessungen möglich, die meisten Einflussfaktoren auf einen festen Wert zu reduzieren und speziell den Einfluss des Windes zu analysieren. Dies ermöglichte die genaue Untersuchung aus welchen Hauptverkehrsstraßen die Immissionen stammen. Dabei ist die Lage der Messstelle bezüglich der Hauptverkehrsstraße relevant, sodass sich folgende Frage ergab: „Welche Repräsentativität hat ein Messort bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen?“ (Kapitel 9.1)

Im Weiteren wurde bei der Erstellung der Modelle festgestellt, dass viele verfügbare Datensätze unvollständig in Hinblick auf neue Bauten, Hofdurchfahrten und Häuserdurchbrüche sind. Dies führte zur nächsten Frage: „Welchen Einfluss haben geometrische Vereinfachungen auf die Erfassung verkehrserzeugter Immissionen?“ (Kapitel 9.1.3)

Den alleinigen Einfluss einer Hauptverkehrsstraße auf die umliegende Umgebung zu untersuchen, ist in der Natur nahezu unmöglich. Zur richtigen Interpretation von Messwerten ist die Kenntnis darüber wichtig, wie weit die Konzentrationen in Luft getragen werden und wie sie sich räumlich verteilen. Somit soll folgende Fragestellung geklärt werden: „Wie weit reicht der Transport von Schadstoffen aus einer Hauptverkehrsstraße und welchen Einfluss haben Windrichtung und Umgebungsbebauung auf die Immissionsbelastung in einer komplexen Stadtstruktur?“ (Kapitel 9.2)

Da sich die vorherigen Fragestellungen überwiegend mit der Analyse der räumlichen Repräsentativität von Messorten beschäftigen, soll abschließend auch die zeitliche Repräsentativität untersucht werden. Dazu stellt sich die Frage: „Wie hoch ist die Variabilität von Messergebnissen an einem Standort, die durch die Messdauer entsteht?“ (Kapitel 9.4)

Abschließend werden in Kapitel 10 die Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Untersuchungen wird gegeben.

Kapitel 2

Grundlagen der planetarischen Grenzschicht und die Theorie der Turbulenz

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Aufbau der Atmosphäre und der Theorie der Turbulenz. Dabei wird sich überwiegend auf die Literatur von Tennekes und Lumley (1972), Snyder (1981), Garratt (1992), Oke, 2000, Etling (2002), Malberg, 2007 und Wyngaard (2010) bezogen. Ziel des Kapitels ist nicht eine umfassende Darstellung, sondern eine Zusammenfassung der für das Verständnis der Arbeit wesentlichen Sachverhalte. Soweit erforderlich, wird auf weiterführende Literatur verwiesen.

2.1. Planetarische Grenzschicht

In Abbildung 2.1 ist der Aufbau der planetarischen Grenzschicht dargestellt. Die planetarische Grenzschicht setzt sich zusammen aus der viskosen Unterschicht, der Prandtl-Schicht und der Ekman-Schicht. Oberhalb beginnt die freie Atmosphäre. Dabei ist die Höhe der Grenzschicht nicht konstant, sondern kann durch den Tagesgang und großräumige Wetterverhältnisse variieren. Nachts, bei sehr ruhigen Windverhältnissen, kann sie bis auf 100 m abnehmen. Durch thermische Konvektion können an sonnigen Tagen mit mäßigem Wind Grenzschichthöhen von 1 bis zu 2 km Höhe auftreten (Oke, 2000). Nachfolgend werden die einzelnen Bereiche der planetarischen Grenzschicht näher beschrieben.

Viskose Unterschicht

Vom Boden bis in wenige Millimeter Höhe erstreckt sich die viskose Unterschicht. Die Höhe der viskosen Unterschicht hängt von der Oberflächenbeschaffenheit und der Windgeschwindigkeit ab. Dominiert wird die viskose Unterschicht, die auch molekulare Unterschicht genannt wird, durch molekulare Bewegungen. Diese transportieren Feuchte und Wärme vom Boden in die Atmosphäre. Oke (2000) bezeichnet diese Schicht als laminare Unterschicht. Laminar bedeutet, dass die Strömung parallel zum Untergrund verläuft und keine Fluktuationen aufweist. Tennekes und Lumley (1972) hingegen

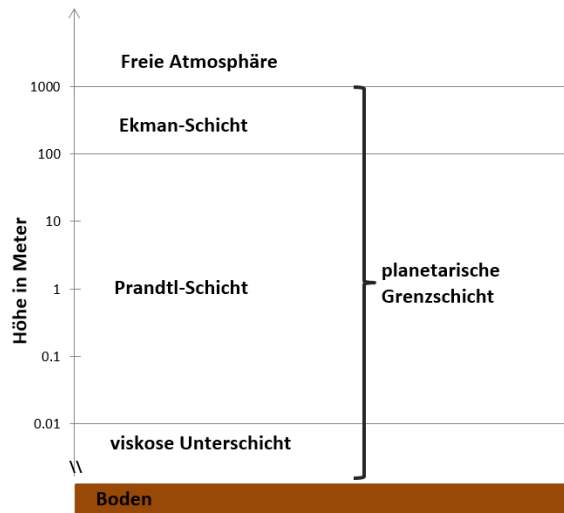


Abbildung 2.1.: Schichten der Atmosphäre nach dem Lexikon des Deutschen Wetterdienstes (*Planetarische Grenzschicht* 2019)

schreiben, dass die Strömung Fluktuationen aufweist. Deshalb finden sie die Bezeichnung „laminare Unterschicht“ als missverständlich.

Prandtl-Schicht

Im Gegensatz zur viskosen Unterschicht spielen molekulare Reibungsprozesse keine wichtige Rolle in der Prandtl-Schicht und können vernachlässigt werden. Die Höhe der Prandtl-Schicht variiert aufgrund der thermischen Schichtung zwischen 20 m und 100 m. In dieser Schicht ist der Einfluss von Rauigkeitselementen, wie zum Beispiel Gebäude und Pflanzen, sehr groß. Neben der mittleren Luftbewegung werden durch Hindernisse Luftwirbel erzeugt, welche als mechanisch induzierte Turbulenz bezeichnet werden (Malberg, 2007). Die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu und kann bis zu vier Fünftel der Windgeschwindigkeit am Oberrand der planetarischen Grenzschicht erreichen. Dabei entsteht keine horizontale Drehung des Windvektors mit der Höhe, da der Einfluss der Corioliskraft noch vernachlässigbar ist. Auch die turbulenten Flüsse bleiben nahezu konstant mit der Höhe (Etling, 2002). Deswegen wird die Prandtl-Schicht auch „constant flux layer“ genannt.

Ekman-Schicht und freie Atmosphäre

Die Ekman-Schicht, auch „outer layer“ genannt, ist die oberste Schicht innerhalb der planetarischen Grenzschicht. Sie erstreckt sich somit bis zu einer Höhe von 1 bis 2 km. In dieser Schicht verursacht die Corioliskraft eine Winddrehung/Windscherung mit der Höhe, weshalb sie im Windkanal nicht nachgebildet werden kann. Innerhalb der Ekman-Schicht nehmen die turbulenten Flüsse ab. An diese Schicht schließt sich die freie Atmosphäre an. Bis zum oberen Rand der Ekman-Schicht haben sich die turbulenten Flüsse aufgelöst, sodass die freie Atmosphäre wieder weitestgehend laminar und somit wirbelfrei ist (Etling, 2002). In der freien Atmosphäre können Reibungsprozesse vernachlässigt werden und zusätzlich braucht die Oberflächenbeschaffenheit nicht berücksichtigt zu werden. Hier sind die Druckgradientkraft und die Corioliskraft im Gleichgewicht (Snyder, 1981).

2.1.1. Betrachtung der einzelnen Schichten in der Prandtl-Schicht

In einem Grenzschichtwindkanal wird meist die Prandtl-Schicht bei neutral geschichteter Atmosphäre nachgebildet (Garratt, 1992). Die Modellierung nicht-neutraler Schichtungsverhältnisse ist im Rahmen enger Grenzen möglich. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich neutral geschichtete bodennahe Windgrenzschichten modelliert. Im Folgenden soll die Prandtl-Schicht ausführlicher beschrieben werden. Nach Grimmond und Oke (2002) lässt sich die Prandtl-Schicht vertikal weiter unterteilen. Die einzelnen Bereiche sind in Abbildung 2.2 eingetragen. Die oberste Schicht wird als Trägheitsschicht bezeichnet. Darunter schließt die Rauigkeitsunterschicht an. Der untere Teil der Rauigkeitsunterschicht, der zwischen den Häusern liegt, heißt Hindernisschicht und wird auch als Urban Canopy Layer (UCL) bezeichnet.

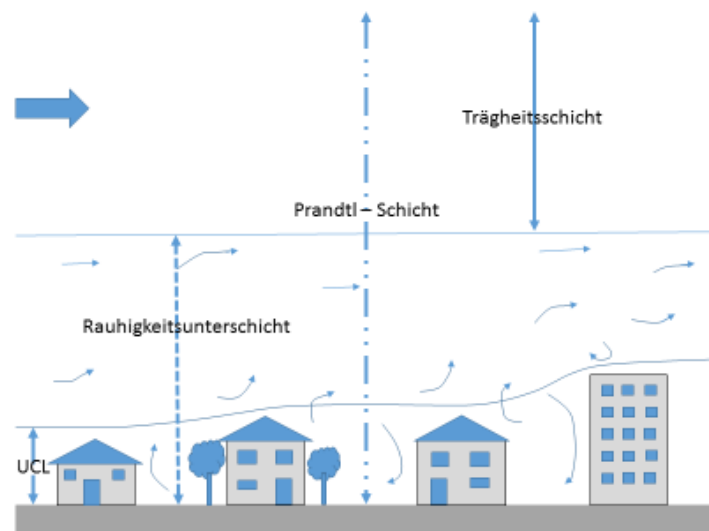


Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung der Prandtl-Schicht nach Grimmond und Oke (2002)

Trägheitsschicht

Weitere Namen für die Trägheitsschicht sind „inertial sublayer“ oder auch logarithmische Region. Letzteres liegt daran, dass das mittlere Windprofil innerhalb dieser Schicht einen logarithmischen Verlauf aufweist (Tennekes und Lumley, 1972). Die Schicht zeichnet sich dadurch aus, dass hier Beziehungen für sogenannte Gleichgewichtsgrenzschichten verwendet werden können. Die Rauigkeiten werden nicht mehr einzeln wahrgenommen, sondern sind ein Integral über die unterschiedlichen Elemente (R. E. Britter und Hanna, 2003).

Rauigkeitsunterschicht

Im Gegensatz zur Trägheitsschicht haben hier die Topografie und die Gebäude einen direkten Einfluss auf die Windströmung. Durch die Umströmung in der Hindernisschicht entstehen dreidimensionale Effekte und Wirbelbewegungen, die direkt in die Rauigkeitsschicht übergehen. Da die Zusammensetzung der Rauigkeitselemente in der Hindernisschicht horizontal nicht konstant ist, weist die Strömung in der Rauigkeitsunterschicht eine räumliche Inhomogenität auf (R. E. Britter und Hanna, 2003).

Die Höhe der Schicht ist abhängig von den Rauigkeitselementen und entspricht etwa der doppelten Gebäudehöhe (R. E. Britter und Hanna, 2003).

Hindernisschicht

Oberhalb der viskosen Unterschicht bis zum Dachniveau breitet sich die Hindernisschicht aus. Die Hindernisse, wie z. B. Gebäude, haben dabei einen direkten Einfluss auf die Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Auch der Anteil an solarer Einstrahlung, der den Boden erreicht, und die Luftverschmutzung werden durch die Hindernisse bestimmt. Dabei können einzelne Gebäude die Windgeschwindigkeit so stark verstärken, dass der Wind für den Menschen gefährlich wird. Gleichzeitig werden im Nahfeld von Gebäuden windschwache oder windstille Zonen beobachtet, in denen sich Schadstoffe akkumulieren (Blocken und Carmeliet, 2004).

Der nächste Abschnitt beschreibt den Einfluss eines Gebäudes auf die Windströmung detaillierter.

2.1.2. Einfluss eines Gebäudes auf den Wind

Im städtischen Umfeld wird die Windströmung durch die Gebäude beeinflusst. Zur Beschreibung des Einflusses eines Gebäudes sollen zunächst allgemein die einzelnen Bereiche für die Umströmung eines Hindernisses nach Oke (2000) dargelegt werden. Dazu wurden diese Bereiche schematisch in Abbildung 2.3 eingezeichnet. Entfernungangaben sind bezogen auf die Höhe h des umströmten Hindernisses. Durch den Druck, der sich vor dem Hindernis aufbaut, beginnt der Einfluss eines Hindernisses bereits in einer Entfernung, die etwa der dreifachen Hindernishöhe entspricht. Dieser Bereich nennt sich Verdrängungsbereich, da die Luft vor dem Hindernis nach oben und seitlich verdrängt wird. Über dem Hindernis wird die Strömung beschleunigt. Der Einfluss des Hindernisses reicht bis in etwa dreifache Hindernishöhe. Hinter dem Hindernis bildet sich ein Rezirkulationsgebiet mit einem semistationärem Leewirbel. Ein weiterer Bereich ist der Nachlauf. Hier nimmt die Strömung wieder zunehmend die Eigenschaften der Umgebungsströmung an. Seine Reichweite hängt stark von der Porosität des Hindernisses ab und kann bis zum 10- bis 15-fachen der Höhe h betragen. (Oke, 2000)

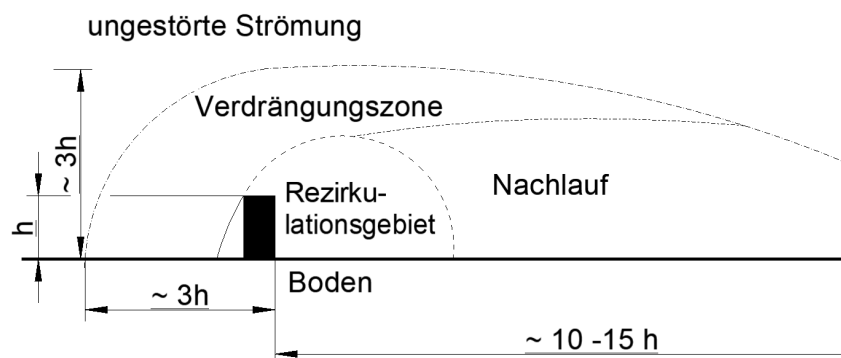


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung der durch ein Hindernis beeinflussten Bereiche nach Oke (2000)

2.1 Planetarische Grenzschicht

Die Umströmung kann auch im Windkanal visualisiert werden. Dazu wird mit Laserlicht im sichtbaren Wellenlängenbereich eine vertikale Ebene im Raum aufgespannt. Durch das zusätzliche Freisetzen von Nebelpartikeln wird die Umströmung eines Hindernisses sichtbar. Diese Visualisierung wird als Lichtschnitt bezeichnet. In Abbildung 2.4 ist ein Lichtschnittbild aus dem Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell dargestellt. Dabei sind aufgrund einer langen Belichtungszeit mittlere Strömungsmuster zu erkennen. Ergänzend wurden die Stromlinien für die Überströmung eines Hindernisses nach Oke (2000) eingezeichnet.

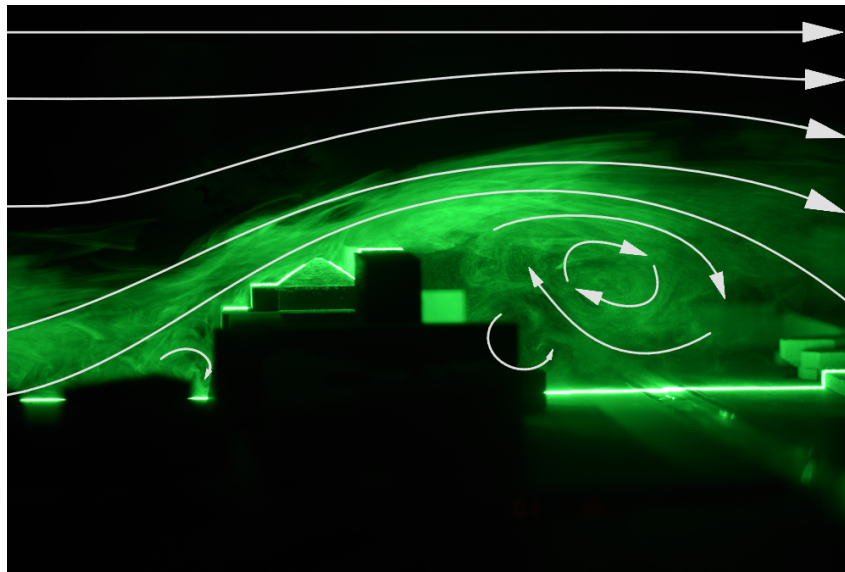


Abbildung 2.4.: Lichtschnitt vom Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell mit Stromlinien in weiß nach Oke (2000)

In Blocken und Carmeliet (2004) wird die Umströmung eines Gebäudes detaillierter beschrieben. Die einzelnen Bereiche lassen sich in Abbildung 2.4 wiedererkennen. Zunächst zeigt sich, dass bereits deutlich vor dem Gebäude ein Großteil der Strömung nach oben umgelenkt wird. Die übrige Strömung teilt sich vor dem Gebäude in einen Teil, der über das Gebäude geleitet wird, und einen Teil, der nach unten abgelenkt wird. Beim Umströmen eines einzelnen Gebäudes wird zusätzlich ein Teil der Strömung zu den Seiten abgelenkt. Diese ist allerdings nicht im dargestellten, vertikalen Lichtschnitt sichtbar. Die nach unten abgelenkte Strömung wird in einen stehenden Wirbel geleitet, der auch Hufeisenwirbel genannt wird. Der Name Hufeisen kommt von der Form des Wirbels, da er wie ein Hufeisen aussieht. An den Ecken des Gebäudes entstehen dadurch starke Strömungen. Hinter dem Gebäude bildet sich ein Rezirkulationsgebiet. Dieses lässt sich in Abbildung 2.4 gut erkennen. Bemerkenswert ist, wie deutlich die Bereiche sich selbst in einer komplexen Stadtstruktur ausbilden.

Die Hindernisse erzeugen auch Turbulenz. Die Theorie der Turbulenz wird im nächsten Abschnitt detaillierter beschrieben.

2.2. Turbulenz

Der vorherige Abschnitt befasste sich mit den einzelnen Schichten der Atmosphäre und zeigte, dass Turbulenz, in der im Grenzschichtwindkanal modellierten Prandtl-Schicht, eine wichtige Größe ist. Dabei lässt sich Turbulenz an vielen Orten beobachten. Vom Wasserlauf im Bach über die Form von Kumulusbewölkung bis hin zu den Sonnenwinden bilden sich turbulente Strukturen aus (Tennekes und Lumley, 1972). Nachfolgend werden die Eigenschaften einer turbulenten Strömung überblicksartig dargestellt.

Zunächst stellt die Turbulenz keine Materialeigenschaft oder eigenständige Bewegungsform dar, sondern ist die Eigenschaft einer Strömung. Sie kann sowohl in Gasen als auch Flüssigkeiten auftreten und ist von deren molekularen Eigenschaften unabhängig (Tennekes und Lumley, 1972).

Turbulenz besitzt folgende Eigenschaften:

Rotationsbehaftet

Die anschaulichste Eigenschaft der Turbulenz sind ihre Wirbel. Jedoch entstehen nicht zwangsläufig kreisförmige Wirbel. Die wirbelartigen Strukturen sind zum Teil auch nur gekrümmte Bewegungen (Malberg, 2007).

Dissipativ

Innerhalb der Strömung werden durch viskose und turbulente Scherspannungen die Wirbel verformt. Dabei wird Energie in der Regel von größeren zu kleineren Wirbeln übertragen. Dieser Prozess wird als Energiekaskade bezeichnet und in Abschnitt 2.2.2 näher beschrieben. Am Ende dieses Energietransportprozesses wird turbulente Energie über die kleinsten Wirbel einer turbulenten Strömung in innere Energie umgewandelt. (Tennekes und Lumley, 1972)

Diffusiv

Durch ungeordnete Bewegung werden Austauschvorgänge von Impuls, Wärme und Stoffen verstärkt. Deswegen sind turbulente Strömungen gut durchmischt (Tennekes und Lumley, 1972).

Große Reynoldszahl (Re)

Die dimensionslose Reynoldszahl beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Zähigkeitskräften in einer Strömung.

$$Re = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{Reibungskraft}} = \frac{\frac{dv}{dt}}{\nu \cdot \frac{U}{L^2}} = \frac{\frac{U^2}{L}}{\nu \cdot \frac{U}{L^2}} = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (2.1)$$

Dabei ist U die charakteristische Geschwindigkeit, L eine charakteristische Länge und ν die kinematische Viskosität. Erst ab einer ausreichend großen Reynoldszahl wird eine Strömung turbulent, bei kleinen Reynoldszahlen ist sie laminar (Wyngaard, 2010).

Dreidimensional und instationär

Die Bewegungsform ist dreidimensional und instationär. So können Bewegungen auch quer und gegen die mittlere Windströmung auftreten. Außerhalb der bodennahen Windgrenzschicht gibt es ebenfalls zweidimensionale Turbulenz bei großräumiger atmosphärischer Bewegung (Wyngaard, 2010).

Räumlich und zeitlich irregulär

Räumlich und zeitlich irregulär heißt, dass bei Betrachtung einer Einzelmessung des Windes oder der Temperatur, diese nicht wiederholbar ist. Jede Messung für sich ergibt ein anderes Ergebnis. Es lassen sich nur statistische Aussagen über die Strömung treffen (Malberg, 2007).

Statistische Größen

Bei Betrachtung der statistischen Größen lassen sich weitere Aussagen zur Turbulenz treffen. In einer statistisch stationären turbulenten Strömung sind statistische Größen zeitunabhängig. In diesem Fall ist von einem ergodischen Signalverhalten auszugehen. Das heißt, wenn man lange genug misst, bekommt man, egal wann man misst, immer den gleichen Mittelwert und die gleichen statistischen Eigenschaften (Garratt, 1992). Nachfolgend soll zunächst auf die physikalische Darstellung und den Entstehungsprozess von Turbulenz eingegangen werden. Danach wird die zeitliche Repräsentativität von Messungen detaillierter erläutert.

2.2.1. Physikalische Darstellung

Nachdem die Eigenschaften der Turbulenz beschrieben wurden, beschäftigt sich der folgende Abschnitt mit der physikalischen Darstellung der Turbulenz. In dieser Arbeit wird das kartesische Koordinatensystem verwendet. Der Geschwindigkeitsvektor wird in Form von $\mathbf{U}(\mathbf{x}, t)$ angegeben. Dabei ist $\vec{U} = (u, v, w)$ mit einer Position $\vec{x} = (x, y, z)$ zu einer Zeit t .

Reynolds'sche Postulate

Mathematisch lässt sich die Turbulenz durch das Konzept von Reynolds darstellen (Tennekes und Lumley, 1972). Dabei wird die Strömung in eine mittlere Grundströmung und turbulente Schwankungen aufgeteilt:

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.2)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.3)$$

$$w = \bar{w} + w' \quad (2.4)$$

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ stellen das zeitliche Mittel dar und u', v', w' stehen für die turbulente Abweichung der Strömung. Exemplarisch wird im Folgenden nur die u -Komponente dargestellt.

Zunächst ist für eine stationäre Strömung der Mittelwert der zeitlich gemittelten Komponente des Strömungsvektors konstant (Tennekes und Lumley, 1972):

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0 \quad (2.5)$$

Zusätzlich besagt eines der Reynolds'schen Postulate (Tennekes und Lumley, 1972):

$$\overline{u'} \equiv 0 \quad (2.6)$$

Wird über eine der Gleichungen von 2.2 - 2.4 gemittelt, dann ergibt sich mit der Bedingung 2.6 exemplarisch für u (Tennekes und Lumley, 1972):

$$\bar{u} = \overline{\bar{u} + u'} = \bar{\bar{u}} + \overline{u'} \quad (2.7)$$

Für das Mittel über den Mittelwert ergibt sich somit (Wyngaard, 2010):

$$\bar{\bar{u}} = \bar{u} \quad (2.8)$$

Bei der Berechnung des horizontalen Windes, im Folgenden auch als Horizontalwind (H) beschrieben, muss allerdings beachtet werden, dass diese Mittelung nicht gilt. Unter der Bedingung von 2.6 lässt sich dieser mit folgender Formel berechnen:

$$H = \bar{u} \cdot \bar{v} = \overline{(\bar{u} + u') \cdot (\bar{v} + v')} = \overline{\bar{u}\bar{v}} + \overline{\bar{u}v'} + \overline{\bar{v}u'} + \overline{v'u'} = \bar{u}\bar{v} + \overline{v'u'} \quad (2.9)$$

Es zeigt sich, dass hier die Mittelung des Produktes aus zwei Windkomponenten nicht gleich dem Produkt über die Mittelwerte der Windkomponenten ist. Aufgrund des Postulates 2.6 kann das Produkt der Fluktuationen gleich 0 gesetzt werden. Im Weiteren lässt sich aus der Formel ableiten, inwieweit zwei Windkomponenten miteinander korreliert sind. Bei $\overline{v'u'}$ ungleich Null besteht eine Korrelation, bei $\overline{v'u'}$ gleich Null nicht (Tennekes und Lumley, 1972).

Aus den vorherigen Formeln kann für zwei Windvektoren (a und b) abgeleitet werden, dass das Mittel der Summen von Windvektoren gleich der Summe der gemittelten Windvektoren ist (Wyngaard, 2010):

$$\overline{a + b} = \bar{a} + \bar{b} \quad (2.10)$$

2.2.2. Energiekaskade

Nachdem die Haupteigenschaften und die physikalische Darstellung von Turbulenz beschrieben wurde, soll im Folgenden auf den Entstehungsprozess und die weitere

Entwicklung von turbulenten Strukturen eingegangen werden. Dabei können die wirbelartigen Strukturen auf drei verschiedene Weisen entstehen. Zum einen bilden sie sich durch thermische Prozesse, wie sie zum Beispiel in einer Gewitterwolke stattfinden. Zum anderen können turbulente Strukturen mechanisch erzeugt werden, beispielsweise beim Überströmen eines Hindernisses. Ein weiterer Entstehungsprozess von Turbulenzen sind dynamische Instabilitäten bei großen Reynoldszahlen (Häckel, 2005).

Nachdem turbulente Strukturen entstanden sind, entwickeln sie sich weiter. Richardson (1922) zieht aufgrund von Naturbeobachtungen den Schluss, dass kleinere wirbelartige Strukturen sich bei größeren wirbelartigen Strukturen bilden und einen Teil der Energie der größeren Wirbel übernehmen. Dieser Prozess findet hin zu immer kleineren Wirbeln statt, bis die Energie der kleinsten Wirbel durch molekulare Reibung in Wärme umgewandelt wird. Dieser Prozess wird auch als Energiekaskade bezeichnet und ist exemplarisch in Abbildung 2.5 dargestellt.

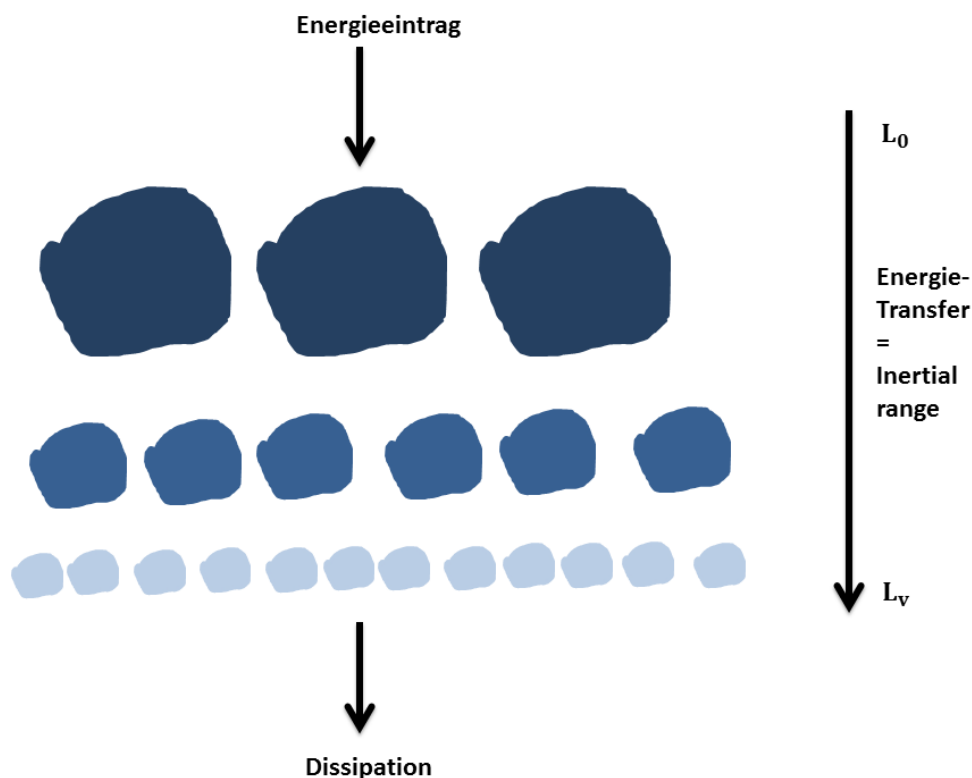


Abbildung 2.5.: Energiekaskade nach Garratt (1992)

Die charakteristische Länge (L) eines Wirbels liegt in der Atmosphäre im Bereich von Kilometern für die größten Wirbel (L_0) und im Bereich von Millimetern für die kleinsten Wirbel (L_v) (Sorbjan, 1989). Die Energiekaskade kann in drei Abschnitte unterteilt werden, die in Tennekes und Lumley (1972) folgendermaßen beschrieben werden:

Energieeintrag

Im Bereich des Energieeintrags werden die großen Wirbel gebildet. Diese Wirbel sind in der Regel anisotrop. Da hier der Energieeintrag in die Energiekaskade stattfindet, sind die Wirbel sehr energiereich. Es herrscht ein Gleichgewicht zwischen Energiezustrom aus der mittleren Grundströmung und Energietransfer an kleinere Wirbel. Dabei

wird die Energie aus der Hauptströmung zugeführt und durch den Zerfall der Wirbel entzogen.

Energietransfer = „inertial subrange“

Der anschließende Bereich existiert nur, wenn die Reynoldszahl hinreichend hoch ist. In der Atmosphäre kann man davon ausgehen, dass dies zutrifft. Er wird auch als Trägheitsbereich bezeichnet, da hier weder Turbulenzelemente produziert noch diese in Wärme umgewandelt werden. Jedoch werden die Wirbel gestreckt und deformiert. Dadurch zerfallen sie in immer kleinere Turbulenzelemente und die lokale Isotropie wächst.

Dissipation = „equilibrium range“

Hier halten sich bei hinreichend großer Reynoldszahl der Energiezustrom durch die Energiekaskade (ϵ) und die viskose Dissipation (ν_m) und damit die Energievernichtung die Balance. Dabei herrscht eine lokale Isotropie vor. Die Art der Entstehung der Wirbel spielt keine entscheidende Rolle.

2.2.3. Zeitliche Repräsentativität von Messungen

Zu Beginn des Abschnittes wurde definiert, dass turbulente Strömungen, wenn sie über einen ausreichend langen Zeitraum betrachtet werden, zeitunabhängig sind. Jedoch zeigt sich bei Messungen in der Natur, dass dies durch synoptische Prozesse und tageszeitliche Schwankungen für die Grenzschicht nicht zutrifft. In manchen Fällen bleiben die physikalischen Bedingungen über ein paar Stunden konstant. Dieser Zeitraum kann für manche Fragestellung bereits ausreichend sein und wird als quasi-stationärer Zustand beschrieben. Wyngaard (2010) stellt die Frage, ab wann der Zeitraum ausreichend ist. Dazu wird zunächst über die Zeit T integriert:

$$\bar{u}^T = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u(t') dt' \quad (2.11)$$

Wobei bei t_0 , der Startzeit, begonnen und bei einem Zeitschritt $t_0 + T$ aufgehört wird. Wie in Formel 2.2 dargestellt, kann u in einen Mittelwert und in einen Turbulenzterm aufgespalten werden. Die Zeit, die notwendig ist, dass die physikalischen Bedingungen konstanten bleiben kann nach einigen Formel-Umstellungen ermittelt werden:

$$T = \frac{2\tau}{e^2} \left[\frac{\overline{u^2}}{\overline{u}^2} \right] \quad (2.12)$$

Die genaue Herleitung der Formel 2.12 findet sich in Wyngaard (2010). Die Formel besagt, dass die Mittelungszeit T proportional zu τ (Euler'sches Integralzeitmaß) und zu $\overline{u^2}$ (Streuung der Zeitserie) ist. Außerdem ist die Zeit T umgekehrt proportional zum mittleren quadratischen Fehler e^2 . Daraus ergibt sich, dass für geringe mittlere quadratische Fehler sehr lange Mittelungszeiten notwendig sind. Naturmessungen

2.2 Turbulenz

konvergieren daher viel langsamer als Windkanalmessungen, da das Euler'sche Integralzeitmaß in der Natur sehr viel größer als im Modellversuch ist. (Wyngaard, 2010). Da die Konzentrationsverteilung vom Windfeld abhängig ist, kann dies auch für die Konzentrationsmessungen übernommen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die zeitliche Repräsentativität von Konzentrationsmessungen näher untersucht.

Kapitel 3

Stand der Forschung

In Kapitel 2 wurden die Grundlagen der planetarischen Grenzschicht und die Theorie der Turbulenz beschrieben. Tiefergehend wurde auf die Prandtl-Schicht und speziell die Hindernisschicht eingegangen, da diese im Rahmen von Grenzschichtwindkanaluntersuchungen modelliert wird. Im Folgenden soll der aktuelle Stand der Forschung dargelegt werden. Dazu wird zunächst ein kurzer Überblick über verschiedene Untersuchungsschwerpunkte im Bereich Windkanalmodellierung gegeben. Dabei wird vorrangig auf Grenzschichtwindkanalmessungen eingegangen. Anschließend werden spezielle Experimente, die den Windkomfort und die Böigkeit des Windes betreffen, beschrieben. Der letzte Abschnitt legt Analysen im Bereich von Luftschadstoffausbreitungen dar. Alle drei Teile stellen keine vollständige Dokumentation vorhandener Literatur dar.

3.1. Windkanaluntersuchungen

Zunächst soll ein kurzer Überblick über mögliche Windkanalstudien gegeben werden. Neben der Untersuchung von Städten existiert eine Vielzahl von Untersuchungen im komplexem Gelände (z. B. Chen et al. (2019)), in landwirtschaftlichen Betrieben (z. B. Rong et al. (2016)) oder auch in Wäldern (z. B. Conan et al. (2015)).

Innerhalb von Städten ist besonders das bodennahe Strömungs- und Turbulenzfeld wichtig. Li et al. (2013) dokumentieren, dass die Umgebungsbebauung einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Auch andere Arbeiten beschäftigen sich mit der Wirkung einzelner Häuser oder Gebäudegruppen auf das bodennahe Windfeld (siehe u. a. Kuo et al. 2015, Mara et al. 2014 und Blocken, Stathopoulos und Carmeliet, 2008). Leitl, Chauvet und Schatzmann (2001) untersuchten die Umgebungsbebauung sowie den Einfluss der geometrischen Vereinfachung von Gebäudestrukturen auf die in Modellen abgebildeten Strömungs- und Turbulenzverhältnisse. Sie stellten fest, dass es vom betrachteten Gebiet abhängt, wie groß der Einfluss geometrischer Modifikatio-

nen auf gemessene Strömungsdaten ist. In engen Straßenschluchten ist der Einfluss der Umgebungsbebauung deutlich geringer als in offenen Strukturen. Auch der Einfluss der Details ist in sogenannten detailreichen Gebieten höher als in Stadtstrukturen mit blocktypischer Bebauung. Aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeiten wurde mit einem möglichst hohen Detailgrad für die im Rahmen des BMBF-Projektes verwendeten Windkanalmodelle gearbeitet.

Im Grenzschichtwindkanälen können verschiedene Mess- und Untersuchungsmethoden zur Bestimmung des Windkomfort verwendet werden. Mit Hilfe von Erosionsexperimenten wird Schneedrift im urbanen Raum untersucht (siehe u. a. Zhou et al. 2016 und Watanabe et al. 2016). Mit dem gleichen Verfahren können auch die bodennahen Windverhältnisse und insbesondere die Böigkeit des Windes in der Umgebung von Gebäuden visualisiert und teilweise quantifiziert werden (siehe u. a. Blocken, Stathopoulos und Beeck (2016), Janssen, 2013 und He, 2014). Aktuell wird im Bereich Stadtklima auch die Dachbegrünung erforscht. Dabei können in Grenzschichtwindkanälen Windlasten untersucht werden (z. B. Cao, Tamura und Yoshida, 2013). Um die Auswirkungen auf Pflanzen, Wasserhaushalt und Temperatur genauer zu untersuchen, wird eine spezielle Klima-Kammer, wie im Paper von Ouldboukhitine und Belarbi (2015) verwendet, benötigt.

3.2. Windkomfort in urbaner Struktur

Nachdem im vorherigen Abschnitt allgemein Studien im Windkanal beschrieben wurden, wird im Folgenden näher auf den Windkomfort in Stadtstrukturen eingegangen, wobei nicht nur auf Windkanalstudien Bezug genommen wird.

Für diese Arbeit wurde der Windkomfort gewählt, da dieser, wie Blocken und Carmeliet (2004) betonen, bei der Planung von Gebäuden sehr wichtig ist. Zunächst geben Blocken und Carmeliet (2004) einen Überblick über aktuelle Arbeiten zum Thema Windkomfort, wobei sie sich besonders auf die Dissertationsschrift von Bottema (1993) beziehen. Im Rahmen ihrer Untersuchungen beschreiben die Autoren die Windverhältnisse um Gebäude und geben aktuelle Beispiele, bei denen der Windkomfort nicht im Vorfeld geprüft wurde. Dabei stellten sie fest, dass ein nachträgliches Überarbeiten der Gebäude schwierig, teuer und nicht immer effektiv ist (Blocken und Carmeliet, 2004). Dies zeigt zum einen die Notwendigkeit der Verwendung von numerischen Modellen oder Windkanalmodellen zur Prüfung von verschiedenen Gebäudekonfigurationen im Vorfeld und zum anderen den unvollständigen Kenntnisstand im Bereich von Windkomfort bei der Planung von Gebäuden.

Der folgende Abschnitt wird nach Bottema (1993) zitiert. Bottema (1993) legt dar, dass der Windkomfort in drei Bereiche separiert werden kann. Jeder Bereich untersucht dabei den Einfluss des Windes auf den Menschen. Innerhalb des ersten Bereichs wird nur der mittlere Wind berücksichtigt. Im Zweiten werden zusätzliche Effekte betrachtet, die zum Beispiel auftreten, wenn der Wind an einer Häuserkante abgelenkt und geteilt wird. Erst der dritte Bereich beschreibt den Einfluss von Windböen. Hierfür bezieht sich Bottema (1993) auf Hunt, Poulton und Mumford (1976). Die Autoren haben im Rahmen einer Windkanalstudie das Verhalten von Menschen unter dem Einfluss von Windböen

untersucht. Es wurde festgestellt, dass Böenwindgeschwindigkeiten ≥ 15 m/s Menschen aus dem Gleichgewicht bringen und für ältere Menschen gefährlich sein können. Auch für jüngere Menschen besteht Gefahr, wenn Windgeschwindigkeiten von mehr als 20 m/s erreicht werden (Hunt, Poulton und Mumford, 1976). Ähnliche Ergebnisse dokumentieren Murakami, Uehara und Deguchi (1980) und Jackson (1978). Deswegen soll mit Hilfe des umfangreichen Datensatzes, der für diese Arbeit zur Verfügung stand, untersucht werden, an welchen charakteristischen urbanen Strukturen die Grenzwerte von 15 und 20 m/s für Windböen überschritten werden.

Zur Charakterisierung des Windkomforts werden Windstärkefluktuationen häufig mit der mittleren Windgeschwindigkeit an einem Ort verknüpft. Bottema (1993) bezieht sich auf mehrere Windkomfortkriterien, die folgenden Zusammenhang verwenden:

$$U_e = \bar{u} + k \cdot \sigma_u > U_{GR} \quad (3.1)$$

Dabei ist U_e die äquivalente Windgeschwindigkeit, \bar{u} die mittlere Windgeschwindigkeit, σ_u die Standardabweichung der mittleren Windgeschwindigkeit und U_{GR} der Grenzwert zur Charakterisierung des Windkomforts. k ist definiert als turbulente Abweichung der Strömung durch die Standardabweichung (Bottema, 1993):

$$k = \frac{v'(t)}{\sigma_u} \quad (3.2)$$

Im Rahmen dieser Arbeit wird der maximale Wert für k betrachtet. Dabei wird zur Berechnung der turbulenten Abweichung die Differenz von der maximalen Windgeschwindigkeit und der mittleren Windgeschwindigkeit verwendet:

$$v' = v_{max} - \bar{u} \quad (3.3)$$

Da nicht bekannt ist, welche Werte k an typischen Orten in bebauter Umgebung annehmen kann, werden bei den verschiedenen Windkomfortkriterien unterschiedliche Werte für k verwendet. Dabei variieren die Werte für k zwischen 0 und 3,5. Werte von $k \approx 1$ werden angenommen, wenn Windböen betrachtet werden sollen, die häufiger auftreten, und Werte von $k \approx 3$ für die maximalen Windböen pro Stunde (Bottema, 1993).

Im Weiteren beschreibt Bottema (1993), dass für die Bewertung des Windkomforts neben dem Betrag der Böenwindgeschwindigkeit die Häufigkeit der Überschreitung kritischer Werte bedeutsam ist. Als unkomfortabel wird ein Aufenthaltsort definiert, an dem ein Grenzwert von 6 m/s in 16 % der Zeit überschritten wird (Bottema, 1993).

$$U + 1\sigma_u > 6m/s \quad (3.4)$$

Bei gefährlichen Böen > 20 m/s ist der Grenzwert bereits erreicht, wenn diese einmal innerhalb einer Stunde auftreten (Bottema, 1993).

$$U + 3\sigma_u > 20m/s \quad (3.5)$$

Da Bottema (1993) beschreibt, dass der Parameter k aufgrund fehlender Messungen von den einzelnen Windkomfortkriterien unterschiedlich definiert wird, soll das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung im Rahmen dieser Arbeit explizit berechnet werden.

Weiterführend hat Koss (2006) zum Teil die gleichen wissenschaftlichen Arbeiten wie Bottema (1993) verwendet und diese mit im Jahr 2006 verwendeten Windkomfortkriterien unterschiedlicher Länder verglichen. Koss (2006) dokumentiert, dass die verwendeten Windkomfortkriterien überwiegend die stündliche mittlere Windgeschwindigkeit betrachten. Aus seiner Untersuchung leitet Koss (2006) ab, dass zur Festlegung eines allgemein gültigen Windkomfortkriteriums die Betrachtung der stündlichen mittleren Windgeschwindigkeit ausreichend ist. Er geht davon aus, dass dies zu einer schnelleren Einigung bezüglich eines allgemeinen Kriteriums führt. Jedoch verweist Koss (2006) auf die Notwendigkeit zukünftig auch die Böigkeit eines Standortes bei der Bewertung des Windkomforts zu berücksichtigen. Im Weiteren schlussfolgert er aus seiner Studie, dass dabei kein fester Wert für das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung, wie in den meisten Windkomfortkriterien üblich, verwendet werden soll. Stattdessen soll eine Extremwertanalyse aus gemessenen Daten vorgenommen werden, um das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung zu bestimmen (Koss, 2006). Da dies speziell bei Neuplanungen in der Regel nicht umsetzbar ist, soll im Rahmen dieser Arbeit das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung untersucht werden, um den Wertebereich, der sich innerhalb der urbanen Struktur ergeben kann, zu erfassen.

Zehn Jahre nach Koss (2006) weisen Blocken, Stathopoulos und Beeck (2016) immer noch darauf hin, dass die aktuell verwendeten Windkomfortkriterien die mittlere Windgeschwindigkeit betrachten. Diese finden, wie in Blocken, Stathopoulos und Beeck (2016) beschrieben, vor allem im Bereich der Stadtplanung Anwendung. Im Rahmen von städtebaulichen Maßnahmen und insbesondere bei der Errichtung hoher Bauwerke, wird von Stadtverwaltungen in der Regel eine Analyse des Windkomforts im Umfeld des Bauwerkes gefordert. Da der Kostenrahmen für derartige Gutachten begrenzt ist, werden meist einfache Mess- und Untersuchungsmethoden verwendet. In ihrer Studie zeigen die Autoren, dass die Ergebnisse einer mit einfachen Verfahren durchgeführten Windkomfort-Untersuchung nicht unbedingt von Ergebnissen abweichen, die mit aufwändiger und teurer Messtechnik, wie zum Beispiel dem Laser Doppler Anemometer (LDA) (in Kapitel 4.2.2 beschrieben) gewonnen wurden. Zu beachten ist allerdings, dass in der Studie überwiegend nur die mittlere Windgeschwindigkeit zur Beurteilung des Windkomforts verwendet wurde und die Qualität der Ergebnisse stark vom Mess- bzw. Untersuchungsort abhängt. Blocken, Stathopoulos und Beeck (2016) weisen auch darauf hin, dass die Böigkeit für den Windkomfort sehr wichtig ist und empfehlen zukünftigen Studien die Böigkeit näher zu untersuchen.

Wie die beschriebenen Arbeiten gezeigt haben, sind Windkomfort-Untersuchungen im Vorfeld von städtebaulichen Maßnahmen wichtig. Dabei sollte zukünftig auch die Böigkeit eines Standortes berücksichtigt werden. Auf die Böigkeit des Windes soll im nächsten Abschnitt näher eingegangen werden.

3.2.1. Böigkeit des Windes

Nachdem in 3.2 Arbeiten zum Windkomfort in urbanen Strukturen dargestellt wurden, beschäftigt sich dieser Abschnitt allgemein mit der Böigkeit des Windes. Dabei wird zunächst auf die unterschiedlichen Parameter eingegangen, die betrachtet werden können, bevor aufgezeigt wird, wo sie unter anderem angewendet werden. Der letzte Abschnitt beschäftigt sich mit Einflussgrößen auf die Böigkeit.

Zur Charakterisierung der Böigkeit des Windes werden verschiedene Parameter bzw. Kennzahlen verwendet. Hu et al. (2018) beschreiben eine ganze Reihe verschiedener Parameter, mit denen Windböen definiert werden können. Neben dem bereits beschriebenen Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung (k) zählt auch der Böenfaktor dazu. Dieser wird laut der World Meteorological Organization (WMO) definiert als der Quotient aus maximaler Windgeschwindigkeit eines bestimmten Bezugszeitraums und dem Mittelwert dieses Bezugszeitraums (Harper, Kepert und Ginger, 2010):

$$G = \frac{v_{max}}{v_{mean}} \quad (3.6)$$

Wobei die maximale Windgeschwindigkeit ebenfalls über eine Periode, die deutlich kürzer als der Bezugszeitraum ist, gemittelt sein kann (Harper, Kepert und Ginger, 2010). Ein weiterer Parameter ist die Böenstärke. Die Böenstärke ist definiert als die Differenz von Maximalwert und Mittelwert der Windgeschwindigkeit über einen Bezugszeitraum von zehn Minuten (Hu et al. 2018):

$$v^a = v_{max} - v_{mean10min} \quad (3.7)$$

Weitere Parameter, die bei einer Windböe betrachtet werden können, sind die Anstiegszeit und Anstiegsstärke sowie die Dauer einer Böe und die mittlere Windböenstärke. Weitere Parameter sind Hu et al. (2018) zu entnehmen.

Brasseur (2001) beschreibt zum einen, dass es keinen einfachen Zusammenhang zwischen mittlerem Wind und Windböen gibt. Andererseits dokumentiert der Autor, dass beim britischen Meteorological Office (U.K. Met. Office) abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit ein fester Böenfaktor verwendet wird. Ebenso wie aus den bereits zitierten Studien lässt sich daraus ableiten, dass weitere Analysen hinsichtlich der Böigkeit des Windes notwendig sind. Zusätzlich zeigt dies, dass im Bereich der Anwendung einfache Parameter bzw. Kennzahlen gebraucht werden.

Der Böenfaktor wird beim U.K. Met. Office mit einem Bezugszeitraum von einer Stunde berechnet. Für Innenstädte wurden 1993 beim U.K. Met. Office die Werte von 1,9 bis 2,3 verwendet (U.K. Met. Office, 1993). Neben dem U.K. Met. Office wird der Böenfaktor auch bei der WMO und in weiteren Studien, wie zum Beispiel die von Gutiérrez und Fovell (2018), Suomi und Vihma (2018) und Bardal und Sætran (2016), verwendet. Da auch der DWD diesen Parameter nutzt, wurde der Böenfaktor zur näheren Untersuchung ausgewählt.

Bei der Definition einer Böe gemäß DWD wird der Böenfaktor eingesetzt. Der Bezugszeitraum liegt bei zehn Minuten. Dies wurde für die vorliegende Arbeit übernommen. Zusätzlich wird beim Böen-Kriterium des DWDs festgelegt, dass eine Böe mindestens drei Sekunden und maximal 20 Sekunden lang sein soll. Weiterhin ist vorgegeben, dass die maximale Böenwindgeschwindigkeit mindestens 5 m/s (10 kn) höher als die mittlere 10-minütige Windgeschwindigkeit, sein muss (Bö 2019).

Mit Hilfe der Böen-Definition des DWDs und mit den Daten vom Messnetz des DWDs wurde von Karran (2015) ein Böenfaktor von 1,5 für Starkwindereignisse ermittelt. Jedoch verweist Karran (2015) darauf, dass bei niedrigeren mittleren Windgeschwindigkeiten Böenfaktorwerte von bis zu 4 oder 5 berechnet wurden. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Starkwindereignisse untersucht werden, soll in erster Linie auf den Einfluss der mittleren Windgeschwindigkeit und der urbanen Struktur auf den Böenfaktor eingegangen werden.

Auch andere Arbeiten haben sich mit den Einflussgrößen auf den Böenfaktor beschäftigt. Dabei wurden überwiegend Naturmessungen verwendet, um die Windlast aus Windkraftanlagen oder die Ventilation bei Schwachwind zu untersuchen. Hu et al. (2018) und Letson et al. (2019) dokumentierten, dass der Böenfaktor von der Windrichtung und der Turbulenzintensität abhängig ist. Acevedo und Fitzjarrald (2001) untersuchten die Böigkeit des Windes während des Übergangs am frühen Abend (early evening transition (EET)). Dabei zeigt sich eine deutliche Abnahme des Windes und der Böigkeit während der EET.

3.3. Konzentrationsverteilung in urbanen Strukturen

Einen weiteren Schwerpunkt stadtklimatischer Untersuchungen bilden Luftbelastungen im urbanen Raum. Ein großer Teil der Studien untersucht die Schadstoffverteilung innerhalb eines Straßenzuges (siehe u.a. Pavageau und Schatzmann, 1999). Dabei liegt der Fokus der Studien zum einen auf den Vergleich mit numerischen Modellen (z. B. Chan et al. 2002 und Salem et al. 2015) und zum anderen auf den Einfluss von Bäumen (z. B. Gromke und Ruck, 2007). Allerdings dokumentieren Dai et al. (2018), dass auch die umgebende Bebauung einen starken Einfluss auf die Schadstoffausbreitung hat.

Belcher (2005) fasst in seiner Literaturübersicht zusammen, wie sich Schadstoffe innerhalb einer Straßenschlucht und über mehrere systematische Häuserblöcke hinaus ausbreiten. Dabei werden Luftschadstoffe in den Nachlauf von Gebäuden eingetragen. Die Freisetzung dieser Schadstoffe erfolgt anschließend über einen längeren Zeitraum, weshalb der Nachlauf eines Gebäudes somit als zusätzliche Quelle betrachtet werden kann (Belcher, 2005). Dieser Effekt muss auch bei Messungen im Grenzschichtwindkanal berücksichtigt werden, worauf in Abschnitt 7.2 eingegangen wird.

Im Weiteren stellt Belcher (2005) fest, dass die in der Natur gemessenen Schadstoffe an einem Messort sich aus Schadstoffen von verschiedenen Quellorten zusammensetzen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll folglich untersucht werden, wie hoch die Anteile unterschiedlicher Hauptverkehrsstraßen an einem Messort sind. Zusätzlich hat auch die Windrichtung einen starken Einfluss auf die horizontale und vertikale Ausbreitung der Luftschadstoffe (Belcher, 2005). Dies wird ebenfalls im Rahmen dieser

Arbeit für komplexe urbane Strukturen näher untersucht. Die Notwendigkeit der Modellierung realistischer Stadtstrukturen mit einem hohen Detailgrad für eine realistische Schadstoffausbreitung wurde von Kastner-Klein, Berkowicz und R. Britter (2004) festgehalten. Dafür studierten die Autoren den Einfluss unterschiedlicher Dachstrukturen bei systematischen Gebäudeblöcken und werteten Windkanalmessungen in einem realen Stadtmodell aus.

Ferner sind auch Untersuchungen von Hinterhöfen wichtig, da diese im Allgemeinen schlecht ventiliert sind. Hall, Walker und Spanton (1999) veröffentlichten zu diesem Thema eine umfangreiche Studie mit Messungen im Windkanal. Dabei setzten die Autoren Konzentrationen in einem Hinterhof frei und änderten systematisch die Tiefe, das Höhe-Breite-Verhältnis und die Dicke des Gebäudes. Zusätzlich untersuchten Hall, Walker und Spanton (1999) den Einfluss von einem Durchgang in den Hinterhof und verschiedener Windrichtungen. Die Autoren stellten fest, dass jede Veränderung einen signifikanten Einfluss auf die Ventilation hat. Dies zeigt wie wichtig die Untersuchung von Hinterhöfen in realen Stadtstrukturen bei der Schadstoffausbreitung ist. Eine Studie mit Naturmessungen zu diesem Thema wurde von S. Weber und K. Weber (2008) gemacht. Dafür untersuchten die Autoren die Anzahl der Partikel in einer stark befahrenen Straße, auf dem Dach eines der Straße angrenzenden Hauses und in einem benachbarten, abgeschlossenen Hinterhof. Dabei zeigte sich, dass sich bei einer Hauptwindrichtung quer zur Straße ein Wirbel in der Straßenschlucht bildet, der die Schadstoffe gegen die Hauptwindrichtung an den Partikelzähler herantransportierte. Im Allgemeinen war die Konzentration für PM_{10} um 30 % und für PM_1 um 22 % im Hinterhof geringer als in der Straßenschlucht. Die Konzentrationen auf dem Dach und im Hinterhof waren im Mittel gleich (S. Weber und K. Weber, 2008). Es muss beachtet werden, dass bei der Auswertung nur mittlere Konzentrationen betrachtet wurden.

3.3.1. Transektmessungen

Neben Messungen im lokalen Umfeld einer Quelle sind auch Messungen in weiterer Entfernung, wie auch bei Belcher (2005) beschrieben, notwendig. Dafür werden meistens entlang einer geraden Linie, ein sogenanntes Transekt, lateral oder longitudinal zur Quelle Messungen vorgenommen. In der Natur kann damit unter anderem untersucht werden, wie weit die Luftbelastungen von Autobahnen reichen. Baldauf et al. (2013) dokumentieren, dass bereits in einem Abstand von 50 bis 100 m zur Hauptverkehrsstraße Hintergrundkonzentrationen erreicht wurden. Anstatt den Anstieg der Konzentration in der Nähe der Autobahn als Anhaltspunkt der Reichweite zu verwenden, nutzten Cahill et al. (2016) spezielle Partikel. Diese wurden von fahrenden Autos freigesetzt und konnten von den Autoren noch in 325 m Entfernung mitten in Wohngebieten gemessen werden. Um besonders den schädlichen Einflussbereich von Autobahnen zu untersuchen, ist das Verfahren von Cahill et al. (2016) dem von Baldauf et al. (2013) vorzuziehen. Auch im Hinblick auf Messungen in urbanen Strukturen, bietet das zweite Verfahren den Vorteil speziell den Einfluss einer Straße zu untersuchen. Dies ist besonders bei der Validierung von numerischen Modellen relevant, da mit dieser Methode die exakte Freisetzung entlang der Straße bekannt ist. Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Validierungsdaten bieten Grenzschichtwindkanäle, da bei diesen ebenso die Freisetzungsmenge bekannt ist (z. B. Nosek et al. 2018).

Mit Hilfe von numerischen Modellen untersuchten zum Beispiel Amini et al. (2018) die Auswirkungen von tiefergelegten Autobahnen und Lärmschutzwänden auf die Konzentrationsverteilung. Aber auch der Einfluss von Auto-Emissionen in Straßenschluchten kann mit numerischen Modellen analysiert werden. Gross (2016) untersuchte die Straßenemissionen zum einen mit einer linienförmigen Quelle, aus der kontinuierlich Konzentrationen freigesetzt werden, und zum anderen mit punktförmigen sich bewegenden Quellen, die somit exakter Auto-Emissionen simulieren. Zusammenfassend konnte er zeigen, dass ab einer Entfernung von ungefähr 30 bis 50 m der Unterschied zwischen Linienquellen und einzelnen sich bewegenden Quellen vernachlässigbar gering ist. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit überwiegend in weiteren Entfernungen Messungen vorgenommen worden sind, ist davon auszugehen, dass die Verwendung von Linienquellen zur Untersuchung von Straßenemissionen ausreicht.

Kanda et al. (2011) verglichen in ihrer Arbeit Windkanalmessungen mit Naturmessungen. Dazu wurden vier unterschiedliche Stadtgebiete in Japan untersucht. Jeweils in 5, 35 und 70 m Entfernung auf der einen Seite der untersuchten Hauptverkehrsstraße und 150 m auf der anderen Seite der Straße wurden über vier Jahre die Luftschadstoffe gemessen. Wie bei Amini et al. (2018) wurden die Konzentrationen der Hauptverkehrsstraßen als Maß genommen und entweder der Messort in 70 oder in 150 m Entfernung als Hintergrundkonzentration angenommen. Kanda et al. (2011) konnten eine gute Übereinstimmung zwischen den Windkanaldaten und den Naturdaten feststellen. Allerdings zeigte sich, dass Abweichungen dadurch entstanden, dass in der Natur nicht nur von der Hauptverkehrsstraße Schadstoffe freigesetzt werden, sondern auch von Gebäuden und Nebenstraßen. Dies führte ebenfalls dazu, dass zum Teil auch deutlich mehr Hintergrundkonzentration gemessen wurde als Schadstoffe am Messort. Eine weitere Unsicherheit entstand durch die nicht optimale Darstellung von Vegetation im Windkanalmodell (Kanda et al. 2011). Zusammenfassend stellten die Autoren fest, dass die Verwendung von Windkanaldaten zur Modellvalidierung sinnvoll sind. Im Windkanal wurde rasterförmig parallel der Hauptverkehrsstraße bis zu einer Entfernung von 600 m gemessen. Daraus konnte abgeleitet werden, dass die Konzentrationen deutlich weiter als 600 m transportiert werden. Zusätzlich ergab sich eine starke Abhängigkeit von der lokalen Bebauung. Speziell hohe Häuser haben einen signifikanten Einfluss auf die Konzentrationsverteilung (Kanda et al. 2011). Da nur wenige Windkanalstudien von Schadstofffreisetzungen durch Linienquellen in realen urbanen Strukturen vorhanden sind, zeigt dies die Notwendigkeit weiterer Messungen zur Untersuchung der Reichweite von Schadstoffen und des lokalen Einflusses der urbanen Struktur. Zusätzlich waren in den Untersuchungsgebieten von Kanda et al. (2011) keine Hinterhöfe untersucht worden.

Kapitel 4

Windkanal

Das folgende Kapitel beschreibt den WOTAN Windkanal des meteorologischen Institutes der Universität Hamburg und die einzelnen Messgeräte und -methoden, die in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden.

4.1. WOTAN Grenzschichtwindkanal

Das Meteorologische Institut der Universität Hamburg betreibt mehrere Windkanäle. Der große Grenzschichtwindkanal WOTAN ermöglicht die Modellierung großflächiger Stadtmodelle in hinreichend großem Maßstab. Abbildung 4.1 zeigt eine schematische Darstellung von außen. Seine Innenmaße betragen 25 m x 4 m x 3 m, wobei die Deckenhöhe auf $\pm 0,25$ m anpassbar ist, um die blockierende Wirkung von in der Messstrecke aufgebauten Modellen zu kompensieren. Die 18 m lange Anlauf- und Messstrecke besteht aus einem Bereich für die Erzeugung der Windgrenzschicht und einem Teil für das Modellgebiet. Dabei kann das Modell auch die gesamten 18 m einnehmen. Zusätzlich sind in den Modellbereich zwei Drehscheiben eingebaut. Diese haben jeweils einen Radius von 1,75 m und werden verwendet, um durch Drehung des Modells verschiedene Windrichtungen untersuchen zu können. Am Einlauf des Windkanals sind Gleichrichter angebracht, um die Luftströmung zu homogenisieren und Querbewegungen zu reduzieren. Des Weiteren wird die Luftströmung vom Axialventilator durch den Windkanal gesaugt, damit die Luftströmung möglichst gleichmäßig über die Turbulenzgeneratoren und über die Rauigkeitselementen streicht. Dadurch wird eine naturähnliche Grenzschicht erzeugt. Die Windgeschwindigkeit im Windkanal ist stufenlos von 0 - 20 m/s einstellbar. Zusätzlich kann an 22 Druckmessstellen, die in 1,5 m Abstand jeweils auf beiden Seiten im Windkanal eingebaut sind, der longitudinale statische Druckgradient gemessen werden. Damit kann überprüft werden, ob es durch den Versuchs- und Modellaufbau zu einer unbeabsichtigten Beschleunigung der Luftströmung in der Messstrecke des Windkanal kommt. Diese kann die Ausbildung einer naturähnlichen Windgrenzschicht behindern oder gänzlich unmöglich machen.

Außerdem ist ein computergesteuertes Traversensystem eingebaut. Dieses ermöglicht eine auf 0,5 mm präzise Positionierung der Messgeräte.

4.2. Messgeräte und Quelltypen

Nachfolgend werden die verwendeten Messgeräte und Konzentrationsquellen beschrieben. Der erste Abschnitt 4.2.1 stellt das Prandtl-Rohr dar, mit dem die Anströmwindgeschwindigkeit gemessen wird. Anschließend wird auf das Messverfahren mit einem Laser Doppler Anemometer (LDA), mit dem der lokale Wind gemessen wird, eingegangen. Es folgt eine Erläuterung des Messverfahrens mit Slow- und Fast-Flammenionisationsdetektor (FID)s, das für die Konzentrationsmessungen notwendig ist. Als Quelltyp wurden im Berlin-Modell Linienquellen und im Stuttgart-Modell eine Punktquelle verwendet. Im Hamburg-Modell wurden keine Konzentrationsmessungen durchgeführt. Eine weitere Messmethodik sind die Sanderosionsversuche, mit denen der bodennahe Windkomfort untersucht werden kann.

4.2.1. Prandtl-Rohr

Im Einströmbereich des Windkanals etwa 2 m über dem Boden und somit oberhalb der künstlich erzeugten Grenzschicht wird mit einem Prandtl-Rohr eine Referenz- bzw. Bezugsgeschwindigkeit gemessen. Dadurch können Einzelmessungen, die bei unterschiedlichen Anströmgeschwindigkeiten durchgeführt wurden, zu einem Gesamtdatensatz zusammengeführt werden. Zunächst wird der dynamische Druck aus der Differenz zwischen dem Luftdruck der Anströmung und dem statischen Druck berechnet:

$$P_{(dyn)} = P_{(gesamt)} - P_{(stat.)} \quad (4.1)$$

Aus dem berechneten dynamischen Druck kann die Strömungsgeschwindigkeit am Messort mit der folgenden Beziehung berechnet werden:

$$u = \sqrt{2 \frac{P_{dyn}}{\rho}} \quad (4.2)$$

Dabei bezeichnet ρ die Dichte der Luft.

Das Drucksignal wird mit einem Differenzdruckwandler (Model 239, Setra Systems) in eine Messspannung umgewandelt und anschließend mit einem A/D-Wandler (Daqbook2000, Fa. IOtech) in ein digitales Signal übertragen. Abschließend wird das digitale Signal mit der Formel 4.2.1 in eine Geschwindigkeit umgerechnet. Um eine möglichst hohe Genauigkeit zu erreichen, wurde einmal wöchentlich der Differenzdruckwandler mit Hilfe einer Feindruckprüfwaage (Fa. Junkalor Dessau) kalibriert.

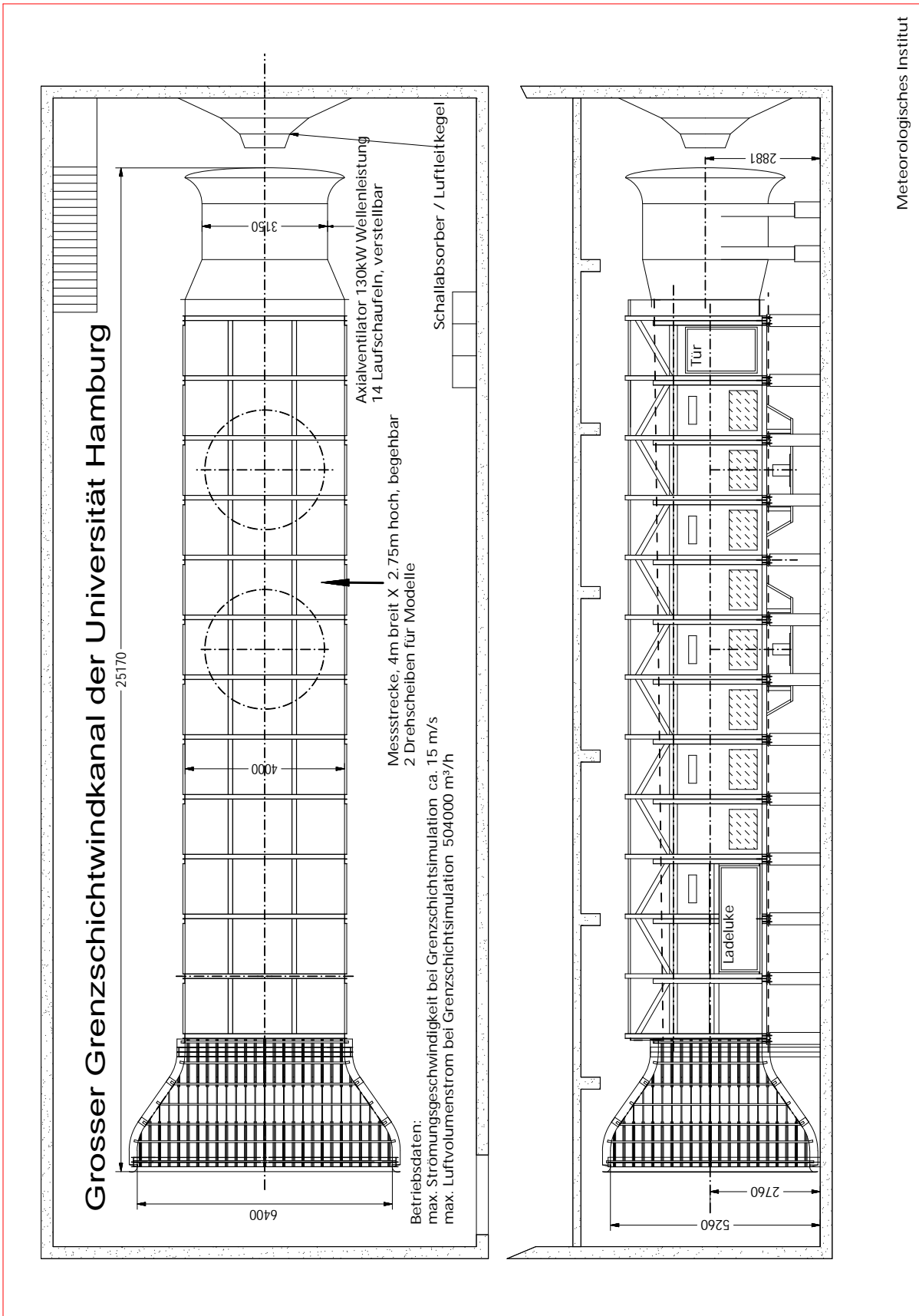


Abbildung 4.1.: Schematische Darstellung des WOTAN Grenzschichtwindkanals

4.2.2. Laser Doppler Anemometer

Das Laser Doppler Anemometer (LDA) der Firma Dantec wird für die Strömungsmessungen im Windkanal verwendet. Dabei wird mit zwei Laserstrahlen ein Ellipsoid erzeugt, welches dem Luftstrom homogen hinzugefügte Messpartikel durchqueren. Unter der Voraussetzung, dass die Messpartikel der Strömung schlupffrei folgen, kann so die Strömungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Die Verwendung eines Lasers erlaubt eine berührungslose und störungsfreie Messung. Zusätzlich bietet das 2D LDA die Möglichkeit, zwei Komponenten des Windvektors mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu erfassen. Abhängig von der Anzahl der Messpartikel variiert die zeitliche Auflösung zwischen wenigen Hz bis hin zum kHz-Bereich. Im WOTAN Windkanal der Universität Hamburg werden Aerosole als Messpartikel verwendet. Die Position der Nebelmaschine der Firma Smoke Factory Tour Hazer hat einen starken Einfluss auf die Anzahl der Partikel, die durch das Messvolumen fliegen und somit auf die Datenrate. Um eine möglichst gute Verteilung im Windkanal zu erreichen, wird die Nebelmaschine unter den Windkanal gestellt. Eine genauere Beschreibung des Messverfahrens findet sich in Harms (2010). Die Erfassung der Daten am Computer erfolgt mit der BSA Flow-Software (Version 4.50).

4.2.3. Flammenionisationsdetektor

Die Konzentrationsmessungen erfolgten mit einem Flammenionisationsdetektor (FID). Es wurden zwei Varianten verwendet. Mit einem Slow-FID wurde die Hintergrundkonzentration gemessen und mit einem Fast-FID die Konzentration am Messort. Dabei ist der Aufbau beider FID-Typen ähnlich. Beide bestehen aus einer Brennkammer, einer Luft- und Gaszufuhr und einer Pumpe. Mit Hilfe der Pumpe werden Gasproben vom Messort in die Brennkammer gesaugt, wo das verwendete kohlenwasserstoffhaltige Messgas in einer kohlenwasserstofffreien Flamme verbrannt wird. Dadurch entstehen Ionen, die am Ionenkollektor ein elektrisches Signal erzeugen. Je höher der Messgasgehalt in der angesaugten Gasprobe, umso mehr Ionen werden freigesetzt und desto stärker ist das Messsignal. Mit Hilfe einer Kalibrierung wird einer bekannten Konzentration eine Spannung zugeordnet. Beim Messen werden die gemessenen Spannungen auf den Computer übertragen und dort mit Hilfe der Zuordnung in Konzentrationen umgerechnet. Als kohlenwasserstoffhaltiges Messgas wurde Ethan (C_2H_6) verwendet. Dieses Gas bietet sich an, da es etwa die gleiche Dichte wie Luft aufweist und somit die Dichte der Strömung während des Messens nicht verändert.

Der Unterschied zwischen dem Slow-FID und dem Fast-FID liegt in der Reaktionszeit. Das Slow-FID reagiert innerhalb von 1 bis 2 Sekunden und ist für die Messung der Hintergrundkonzentration ausreichend. Die Hintergrundkonzentration wird im Rauigkeitsfeld vor dem Modellgebiet gemessen. Für diese Arbeit wurde ein Rosemount Analytical (Model 400A) verwendet. Für eine möglichst hohe zeitliche Auflösung der Messdaten im Modellgebiet reagiert das Slow-FID zu langsam. Das Fast-FID hat im Gegensatz zum Slow-FID eine Reaktionszeit von Millisekunden. In Abbildung 4.2 ist das Fast-FID am Messstandort Neckartor im Stuttgart-Modell fest eingebaut. Die Brennkammer befindet sich direkt im roten Kasten. Die Entfernung zum Messpunkt wird

mit einer 320 mm langen Kanüle überbrückt, um die Strömung möglichst wenig zu beeinflussen. Das Fast-FID war ein Cambustion Ltd (HFR 400). Zur Sicherstellung der erforderlichen Genauigkeit der Konzentrationsmessungen wurde beide FIDs in kurzen Abständen von jeweils drei Stunden mit drei bis vier Referenzgasen neu kalibriert.

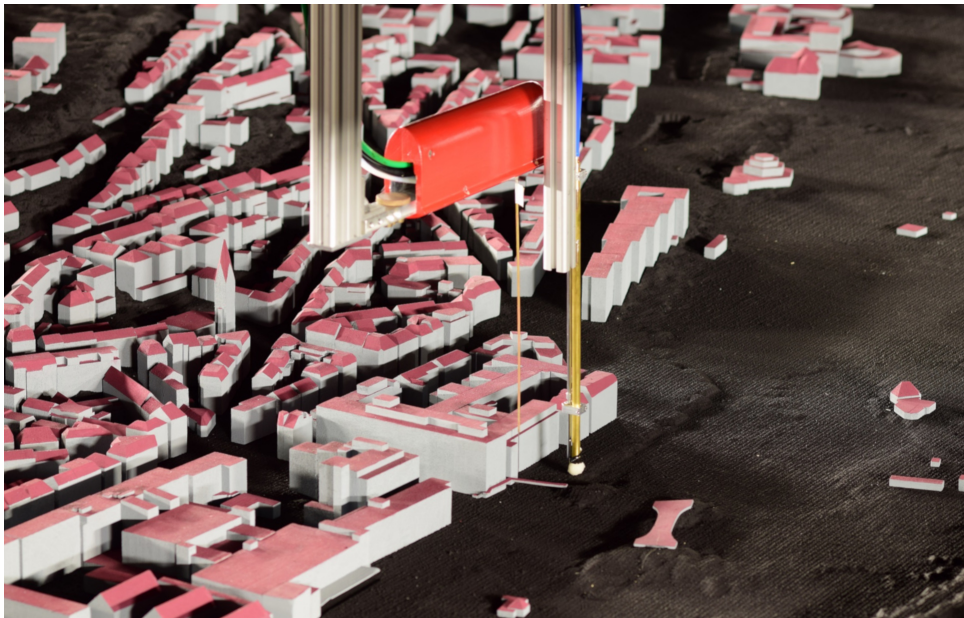


Abbildung 4.2.: Fast-FID und Punktquelle im Stuttgart-Modell

Punktquelle

Wie in Abbildung 4.2 zu sehen, wurde im Stuttgart-Modell eine Punktquelle (Ende des goldfarbigen Rohres) verwendet, um die Konzentrationen freizusetzen. Diese Punktquelle mit Bodenabstandsmesser (silberner Metallstab hinter dem Quellrohr) wurde explizit für diese Messkampagne hergestellt. Da vor allem Verkehrsemissionen untersucht werden sollten, war es wichtig, die Konzentrationen in Bodennähe freizusetzen. Aufgrund der Höhenunterschiede im Stuttgart-Modell konnte mit Hilfe dieser Konstruktion vor jeder Messung die Höhe über dem Modellboden festgestellt werden. Dies war wichtig, da immer in der gleichen Höhe über Grund die Konzentrationen freigesetzt werden sollten. Eine Punktquelle wurde verwendet, um punktwise untersuchen zu können, bis zu welcher Entfernung Konzentrationen den Messstandort Neckartor erreichen.

Linienquellen

Auch im Berlin-Modell lag der Fokus auf den Verkehrsemissionen, jedoch wurde hier der Einfluss gesamter Straßenzüge untersucht, weshalb hier Linienquellen verwendet wurden. Diese bieten den Vorteil, dass über die gesamte Länge die gleiche Menge an Konzentration freigesetzt wird. Zur Identifizierung der verkehrsreichsten Straßen im

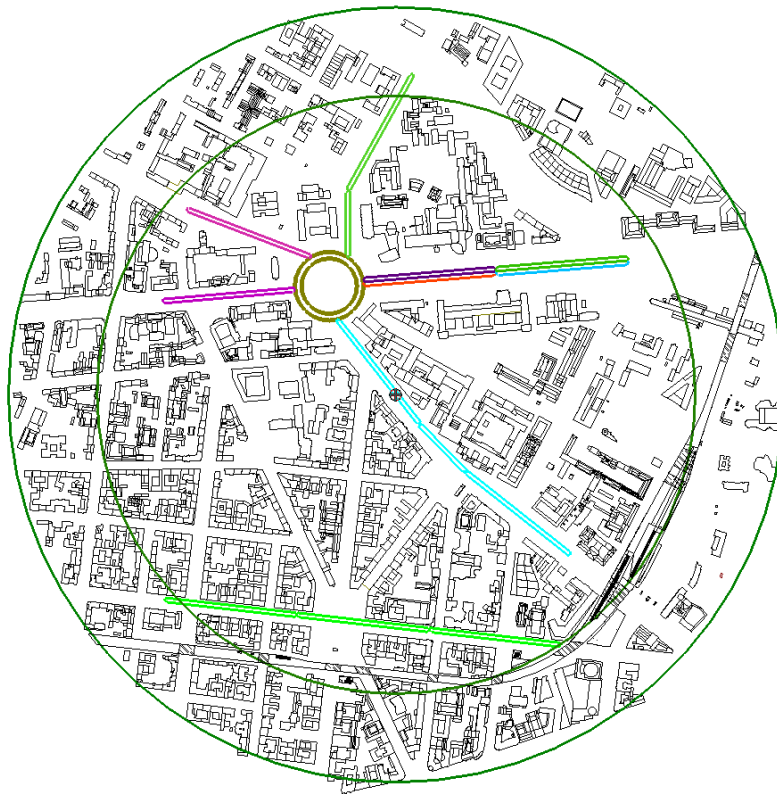


Abbildung 4.3.: Modellgebiet vom Ernst-Reuter-Platz Berlin mit farbig markierten Linienquellen

Bereich des Ernst-Reuter-Platzes, wurde die Verkehrsmengenkarte der Stadt Berlin¹ herangezogen. In Abbildung 4.3 sind die verwendeten Linienquellen gekennzeichnet. Dabei wurden für die Straße des 17. Juni vier Linienquellen verwendet, die einzeln ab- und zugeschaltet werden konnten. Für den Ernst-Reuter-Platz wurde eine ringförmige Linienquelle gebaut. Die vom Platz abgehenden Straßen sind, im Norden die Marschstraße, im Nordwesten die Otto-Suhr-Allee und im Westen die Bismarckstraße. Die hellblauen Linienquellen liegen entlang der Hardenbergstraße. Im südlichen Modellgebiet liegt die Kantstraße. Zusammengeschaltete Linienquellen wurden in Abbildung 4.3 in der gleichen Farbe dargestellt. Insgesamt wurden zwölf 60 cm lange und zwei 30 cm lange Linienquellen in das Modellgebiet eingebaut. Für den Kreisverkehr am Ernst-Reuter-Platz wurde die oben genannte ringförmige Quelle genutzt.

Über die Linienquellen wurde ein Ethan-Stickstoff-Gemisch freigesetzt, um zu gewährleisten, dass immer die gleiche Menge an Gasgemisch durch die Linienquelle strömt. Dies ist wichtig, damit gleichmäßig über die gesamte Linienquelle Gas abgegeben wird. Bei zu geringen Freisetzungsmengen, kann durch unterschiedliche Luftdruckverhältnisse, die durch die Umgebungsbebauung entstehen, entlang der Linienquelle die Freisetzung beeinflusst werden. Im Gegensatz dazu kann es bei zu hohen Freisetzungsmengen zu einem Überschießen aus der Linienquelle kommen. Dies würde die Luftströmung beeinflussen, sodass die Ergebnisse nicht mehr naturähnlich sind.

¹https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/lenkung/vlb/download/ergebnisbericht_2014.pdf, Stand 21.05.2019

Für das Gasgemisch wurde Stickstoff verwendet, da dieses genauso wie Ethan etwa die gleiche Dichte wie Luft aufweist, jedoch nicht brennbar ist. Durch das Gemisch konnte der Ethananteil der pro Linienquelle freigesetzt wird variiert werden. Dies ist wichtig, da das Fast-FID einen begrenzten Messbereich aufweist, sodass bei Freisetzung in der Nähe des Messpunktes weniger Ethan abgegeben werden musste, als weiter vom Messpunkt entfernt.

4.2.4. Sanderosionsexperimente

Zur Visualisierung windkritischer Zonen in Modellgebieten wurden Sanderosionsexperimente gemacht. Dafür wurde ein Sand verwendet, der überwiegend ähnlich große Sandkörner aufwies. Dieser Sand wurde mit Hilfe eines Siebes möglichst gleichmäßig auf dem Modellgebiet verteilt. Um negative Auswirkungen durch herabfallenden Sand zu vermeiden, wurde dieser anschließend von den Häuserdächern abgesaugt. Die Sanderosionsexperimente wurde für fünf Windgeschwindigkeiten durchgeführt. Eine Experiment wurde als beendet angesehen, wenn sich bei konstanter Windgeschwindigkeit ein stabiler Zustand (glatte Sandkanten) einstellt. Dieser Zustand wurde mit Fotos festgehalten. Im Anschluss wurde die Windgeschwindigkeit erhöht. Nachdem die fünf Windgeschwindigkeiten durchgeführt worden waren wurde der Ausgangszustand wiederhergestellt (Sand wegsaugen), bevor eine neue Windrichtung eingestellt und das Untersuchungsgebiet neu eingesandet wurde.

Kapitel 5

Modellversuche im Grenzschichtwindkanal

Mit den Fördermittel vom BMBF-Projekt wurden vier Windkanalmodelle für den im Kapitel 4 beschriebenen WOTAN Grenzschichtwindkanal der Universität Hamburg gebaut. Jedes Modell hat einen anderen Untersuchungsschwerpunkt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den Modellen zu vereinfachen, wurden alle Modelle im geometrischen Maßstab von 1:500 erstellt. Dieser Maßstab wurde gewählt, um möglichst große Modellgebiete abbilden zu können und trotzdem noch eine ausreichende Detailgenauigkeit zu erreichen. Dabei konnten Stadtteile mit einem Radius bis zu 2 km nachgebildet werden. Da für den gewählten Maßstab im WOTAN Grenzschichtwindkanal noch keine Stadtmodelle untersucht wurden, musste zunächst eine geeignete, naturähnliche Windgrenzschicht entwickelt werden. Diese wird im Kapitel 6 beschrieben. Im Folgenden werden die Modelle für die HafenCity in Hamburg, den Ernst-Reuter-Platz in Berlin, das Neckartor in Stuttgart und den Fichtenberg in Berlin vorgestellt und es werden grundlegende Informationen zum Versuchsplan gegeben.

5.1. HafenCity Hamburg

In Hamburg wurde das Gebiet der HafenCity gewählt, da hier eines der größten europäischen städtebaulichen Gebiete im Entstehen ist ¹. Eine detaillierte Beschreibung der Positionierung des modellierten Bereiches innerhalb der HafenCity gibt Schliffke (2018). Es wurde sowohl der Bebauungszustand von 2017 als auch der geplante Endzustand der Bebauung von 2023 nachgebildet. Die Elbe, die durch dieses Gebiet fließt, ist zwar den Gezeiten unterworfen, aber im Modell wurde ein konstanter Höhenunterschied zwischen Elbe und HafenCity von 5 m angenommen. Dies entspricht dem Elbspiegel bei Niedrigwasser. Die Geländehöhenunterschiede innerhalb des modellierten Gebietes sind gering, sodass ein ebenes Modell aufgebaut werden konnte. Um mehrere Windrichtungen untersuchen zu können, wurde das Modellgebiet auf eine drehbare Kreisscheibe

¹<https://www.HafenCity.com/de/startseite.html> Stand 21.05.2019

gebaut. Zusätzlich wurden die in Abbildung 5.1 abgebildeten Fleete westlich des auf der Kreisscheibe modellierten Gebietes nachgebaut.



Abbildung 5.1.: Windkanalmodell der HafenCity Hamburg (Bebauungszustand von 2017)

Insgesamt wurden für das Modell 135 Gebäude für den Bebauungszustand von 2017 (Abbildung 5.1) und 58 zusätzliche Gebäude für den geplanten Bebauungszustand von 2023 (Abbildung 5.2) geschaffen. Um die Gebäude besser unterscheiden zu können, wurden die Dächer der Bestandsgebäude in rot und der zukünftigen Gebäude in grün markiert. Die gelb markierten Gebäude sind Teil einer Untersuchung zum Einfluss der Detailmodellierung auf die bodennahe Windströmung.



Abbildung 5.2.: Windkanalmodell der HafenCity Hamburg (geplanter Bebauungszustand von 2023)

Bei den Messungen, die in diesem Modell durchgeführt wurden, wurde mehreren Fragestellungen nachgegangen. Zunächst wurde geprüft, welchen Einfluss die Baumaßnahmen auf den Stadtteil haben. Dazu wurden flächendeckend an 25 Orten

Profilmessungen sowohl im Bebauungszustand von 2017 als auch für 2023 durchgeführt (siehe Anhang Abschnitt A.1.1). Für die Windrichtungen wurde der Bereich um die 1. und 2. Hauptwindrichtung von Hamburg gewählt. Konow (2015) hat in ihrer Dissertation Hamburger Winddaten aus 12 Jahren untersucht. Die Autorin dokumentierte, dass für Hamburg die 1. Hauptwindrichtung 270° und die 2. Hauptwindrichtung 120° ist. In Anlehnung an diese Hauptwindrichtungen wurden die Windrichtungen 110° , 130° , 150° , 250° , 260° , 270° , 280° und 290° für die Untersuchungen im Windkanal ausgewählt.

Die gleichen Windrichtungen wurden verwendet, um die räumliche und zeitliche Variabilität von Messstationen im städtischen Umfeld zu untersuchen. Dies wurde anhand von zwei Orten innerhalb des Modellgebietes realisiert. Ein Ort war die Naturmessstelle HafenCity im „Hamburg Urban Soil Climate Observatory“-Messnetzes (HUSCO-Messnetz) der Universität Hamburg (Messpunkte: Anhang Abschnitt A.1.4). Hier wurde in einem Radius von 10 m um die Naturmessstelle und entlang der Straße in zwei Höhen die Windströmung erhoben. Diese Daten wurden von Benjamin Schliffke im Rahmen seiner Masterarbeit erfasst und ausgewertet (Schliffke, 2018). Ebenso wurden die Messungen am zweiten Untersuchungsort unmittelbar neben dem Gebäude der HafenCity Universität (HCU) von Benjamin Schliffke durchgeführt. In diesem Bereich wurde ein Messraster mit 10-m-Abstand angelegt (siehe Anhang Abschnitt A.1.3).

Im Rahmen des BMBF-Projektes fanden Naturmessungen in zwei Höhen an sieben Orten neben der HCU statt. Um die Modelldaten mit den Naturdaten vergleichen zu können, wurden an den gleichen Messpositionen im Windkanal für die 1. und 2. Hauptwindrichtung zuzüglich $\pm 10^\circ$ bzw. 20° von Benjamin Schliffke Messdaten erhoben (Messpunkte: Anhang Abschnitt A.1.2). An zwei dieser Naturmessorte wurde zusätzlich zwischen 10° und 350° in 20° -Schritten sowie bei 360° und 180° gemessen. An einem dritten Naturmessort wurde eine weitere Messung durchgeführt, wenn die vorherigen Messungen stark voneinander abwichen.

Weitere Fragestellungen beschäftigten sich mit dem bodennahen Windkomfort und dem Einfluss von geometrischen Veränderungen. Dies ist wichtig, da durch den fortwährenden Wandel von Städten, wie zum Beispiel den Neubau oder Abriss von Gebäuden und Gebäudegruppen und die Anlegung neuer Grünflächen, Gebäudedatensätze von Städten schnell veraltet sind. Außerdem fehlen in vielen Datensätzen Details wie Hofdurchfahrten oder Gebäudedurchbrüche. Hierzu wurde das Unilever-Haus und der Marco-Polo-Tower in drei verschiedenen Detaillierungsgraden nachgebaut. Der Überseeboulevard wurde mit und ohne Durchbrüche in der Gebäudestruktur und mit vereinfachter Dachstruktur nachgebildet. Das Überseequartier wurde in drei Varianten modelliert: als offener Straßenzug, mit einer Überdachung und mit geschlossenen Ein- und Ausgängen. Zunächst fanden Sanderosionsmessungen für zehn verschiedenen Windrichtungen bei fünf verschiedenen Windgeschwindigkeiten statt, um den bodennahen Einfluss der Veränderungen großflächig anschaulich darzustellen. Aufgrund der Sanderosionsversuche wurden zwei Windrichtungen für den Überseeboulevard und eine für das Unilever-Haus gewählt. Dabei wurde untersucht, in welchem Bereich sich die geometrischen Veränderungen auf das Messergebnis auswirken. Dazu wurde an den Orten mit den größten Unterschieden zwischen den Detaillierungsgraden Strömungsmessungen entlang der Achse der Anströmwindrichtung durchgeführt. Diese wurden bodennah in 3 m Höhe, in mittlerer Gebäudehöhe, kurz unter sowie über Dachniveau und deutlich über Dachniveau vorgenommen.

Eine Darstellung der Messpunkte sowie eine Tabelle mit den Messorten und den jeweiligen Höhen befindet sich im Anhang Abschnitt A.1.5 und Abschnitt A.1.6.

5.2. Ernst-Reuter-Platz Berlin

Das zweite Modell bildet den Ernst-Reuter-Platz in Berlin ab (Abbildung 5.3). Dieses Gebiet wurde gewählt, weil hier innerhalb des BMBF-Projektes die meisten Messungen in der Natur stattfanden. Im Zentrum des Gebietes liegt die Technische Universität Berlin (TU Berlin). Die realen Höhenunterschiede im Gelände sind gering, sodass genauso wie im Hamburg-Modell auf die Nachbildung der Orographie verzichtet werden konnte. Für die Variation in der Windrichtung, wurde das Modell mit insgesamt 847 Gebäuden auf der beweglichen Kreisscheibe verbaut.



Abbildung 5.3.: Windkanalmodell des Ernst-Reuter-Platzes Berlin

Die Untersuchungsstrategie für die Strömungsmessungen beinhaltete zunächst wieder flächendeckende Messungen. Diese fanden zum größten Teil an Messorten der Naturmesskampagne statt. Während der ersten und zweiten Intensivmesskampagne (IOP) wurde überwiegend Wind aus südlichen und westlichen Richtungen an den DWD-Standorten Tegel, Tempelhof und Schönefeld gemessen. Diese Windrichtungen wurden für die Windkanalmessungen um 5° angepasst, um senkrecht sowie parallel zu den Hauptverkehrsstraßen zu liegen (175° , 185° und 265°). Zusätzlich wurde eine Windrichtung von 225° gewählt. Ergänzend wurde an sieben Messorten die Anströmwindrichtung zwischen 260° und 280° variiert, um zu analysieren, wie sensibel die gemessenen Windverhältnisse in der Nähe einer sechsspurigen Hauptverkehrsstraße auf geringe Windrichtungsänderung von 5° in der Anströmung reagieren. Bilder und Tabellen zu den Messpunkten finden sich in Anhang Abschnitt A.2.1.

Weitere Untersuchungen bezüglich der räumlichen Repräsentativität von Strömungsmessungen wurden in einer offenen Innenhofstruktur eines Schulzentrums vorgenom-

men. Dazu wurde in einem Raster innerhalb und außerhalb des Schulhofes gemessen (siehe Anhang Abschnitt A.2.2).

Neben der Windströmung wurde die Ausbreitung von Fahrzeugabgasen simuliert und vermessen. Um Luftschadstofffreisetzung entlang von Straßenzügen zu simulieren, wurden Linienquellen in das Modell eingebaut. Die Immissionsmessungen erfolgten im Nahbereich der Hauptverkehrsstraßen. Vorteil, den ein Grenzschichtwindkanal dabei bietet, ist, dass sowohl die Windverhältnisse als auch die Quellstärke der Luftschadstofffreisetzung kontrolliert und exakt dokumentiert werden können.

Eine Hauptverkehrsstraße liegt am Rand des Modellgebietes und verläuft näherungsweise in Ost-West Richtung. Dieser Straßenzug eignet sich somit zur Untersuchung der Reichweite von Verkehrsemissionen. Um den Transport verkehrserzeugter Emissionen des Straßenzuges zu dokumentieren, wurden systematische Ausbreitungsmessungen im Lee der Emissionsquelle durchgeführt. Untersucht wurde neben der senkrechten Anströmung (relative Windrichtung 90°) des Straßenzuges auch Schräganströmungen der Hauptverkehrsstraße mit 105° , 120° und 135° . Um die Konzentrationsverteilung in Abhängigkeit der Höhe zu untersuchen, wurden bodennah, in Dachniveau und deutlich über Dachniveau Messungen vorgenommen. Dazu wurden drei Transekte bestimmt. Das Erste verläuft senkrecht zur Hauptverkehrsstraße, das Zweite in einem 30° -Winkel und das Dritte in 200 m Entfernung parallel zur Hauptverkehrsstraße. Zusätzlich wurde in 200 m Entfernung parallel zur Hauptverkehrsstraße innerhalb von Hinterhöfen gemessen: ein kleiner Hinterhof ohne direkten Zugang zur Straße, ein mittlerer Hinterhof mit Zugang zur Straße und ein sehr großer Hinterhof, der direkt an die Hauptverkehrsstraße anschließt. Eine Darstellung der Messpunkte und eine Tabelle mit den jeweiligen Höhen und Windrichtungen pro Messort befindet sich im Anhang Abschnitt A.2.5. Zur Untersuchung der Reichweite innerhalb eines Fuß-/ Radweges wurde ein weiteres Transekt wurde bezüglich einer weiteren Hauptverkehrsstraße vorgenommen (Anhang Abschnitt A.2.6).

An sechs weiteren Messpunkten wurde analysiert, woher die Schadstoffe bei einer festen Anströmrichtung kommen. Zusätzlich wurde hier ein Durchgang einmal offen und einmal geschlossen betrachtet (Messpunkte: Anhang Abschnitt A.2.4). Der Durchgang wurde außerdem mit Hilfe von Strömungsmessungen bei 175° und 265° untersucht.

Auch im Ernst-Reuter-Platz-Modell wurde der Einfluss der Detailheit der Modellgebäude auf die Modellergebnisse untersucht. Numerische Modelle sind häufig in Gittern strukturiert. Häuserkanten diagonal zu einer Gitterbox können somit stufenförmig abgebildet werden. Diese stufenförmige Änderung der Gebäude kann als eine zusätzliche Rauigkeit angesehen werden. Um den Einfluss solcher geometrischen Artefakte im numerischen Modell auf die Simulationsergebnisse zu untersuchen, wurde ein Modell ohne zusätzliche Rauigkeit mit einem Modell mit zusätzlicher Rauigkeit verglichen. Dazu wurde bei einer Windrichtung von 185° eine 2 mm x 2 mm dicke rasterförmige Rauigkeit aufgetragen. Diese ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Für den Vergleich wurden Strömungsmessungen in 5 m Höhe über Grund und Konzentrationsmessungen in 2 m Höhe über Grund vorgenommen (siehe Anhang Abschnitt A.2.3).



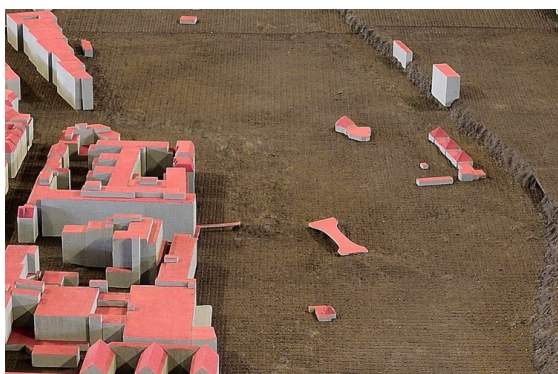
Abbildung 5.4.: Ausschnitt aus dem ersten Berlin-Modell mit zusätzlicher Wandrauigkeit

5.3. Neckartor Stuttgart

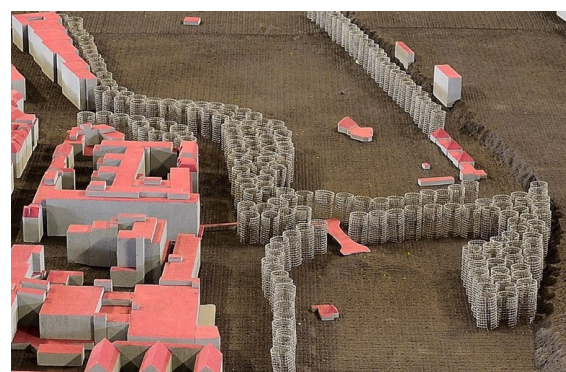
Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Modellen wurde für Stuttgart ein Korridormodell mit Topografie in Richtung der Hauptwindrichtung Südwest erstellt (siehe Abbildung 5.5), da die umliegenden Höhenzüge in Stuttgart einen wesentlichen Einfluss auf die lokalen Strömungs- und Ausbreitungsverhältnisse haben (Reuter, Baumüller und Flassak, 2008). Das Modellgebiet schließt die Immissionsmessstation Neckartor ein, da hier sehr hohe Schadstoffkonzentrationen gemessen werden (Baden-Württemberg Landesanstalt für Umweltschutz, 2019). An dieser Naturmessstelle wurden im Modellgebiet Konzentrationsmessungen durchgeführt. Dazu wurde eine mobile Punktquelle entlang von Straßenzügen, in Hinterhöfen und in einem Park platziert, um die Größe des Einzugsgebiets der Messstelle zu untersuchen. Da es im Gegensatz zu den anderen Modellen an der Naturmessstelle am Neckartor einen großen Park mit Baumbestand gibt, wurde speziell der Einfluss der Belaubung auf die Messergebnisse betrachtet. Dabei wurde der Effekt von Bäumen nach Aubrun und Leitl (2004) modelliert, wobei der Einfluss durch die Berücksichtigung (Variante 1) und Nicht-Berücksichtigung (Variante 2) untersucht wurde. Abbildung 5.6a zeigt Variante 1 ohne den simulierten Effekt von Bäumen und Abbildung 5.6b zeigt Variante 2 mit den simulierten Effekt von Bäumen. Nach Abschluss der Konzentrationsmessungen wurden für beide Varianten Strömungsmessungen an den Orten der Punktquelle durchgeführt. Die Orte der Punktquelle und der Strömungsmessungen sind in Anhang Abschnitt A.3 dargestellt und aufgelistet.



Abbildung 5.5.: Windkanalmodell des Stuttgarter Neckartors



(a) ohne den Effekt von Bäumen



(b) mit dem Effekt von Bäumen

Abbildung 5.6.: Ausschnitt aus dem Windkanalmodell des Stuttgarter Neckartors in a) ohne und b) mit dem Effekt von Bäumen

5.4. Fichtenberg Berlin

Das vierte Modellgebiet umfasst den Fichtenberg in Berlin Steglitz (Abbildung 5.7). Dieser Bereich wurde ausgewählt, da dort sowohl das meteorologische Institut der Freien Universität Berlin (FU Berlin) als auch das Klimatologische Institut der TU Berlin liegen und somit mehrere Naturmessungen in diesem Gebiet vorgenommen worden sind. Die Geländestructur wurde im Modell explizit abgebildet, um den Einfluss des Berges auf die Strömungs- und Ventilationsverhältnisse im sonst flachen Gelände zu simulieren. Wieder wurde das Modell auf einer Kreisscheibe gebaut, um mehrere Windrichtungen betrachten zu können. Da Steglitz ein Bezirk mit einem hohen Anteil von Stadtgrün und in weiten Bereichen ausgeprägtem Baumbestand ist, lag der Fokus der Untersuchungen auf der Beeinflussung urbaner Ventilation durch Stadtgrün. Für die Untersuchung der Ventilation wurde in diesem Modell eine in numerischen Modellen häufig verwendete Versuchsmethodik getestet. Dabei wurde das gesamte Modellgebiet bis zum Erreichen eines Gleichgewichtszustandes mit Messgas beaufschlagt und anschließend wurde untersucht, wie lange Immissionssignale nach dem Abschalten der Messgaszufuhr an verschiedenen Orten nachweisbar waren und ob umliegende Vegetation einen größeren Einfluss auf die lokale Verweildauer von Tracergas hat. Anhand eines Parks konnte dies speziell analysiert werden. Die Simulationsergebnisse aus dem Modell sind nicht integraler Bestandteil dieser Arbeit und werden in Wachsmann (2020) umfassend dargestellt.

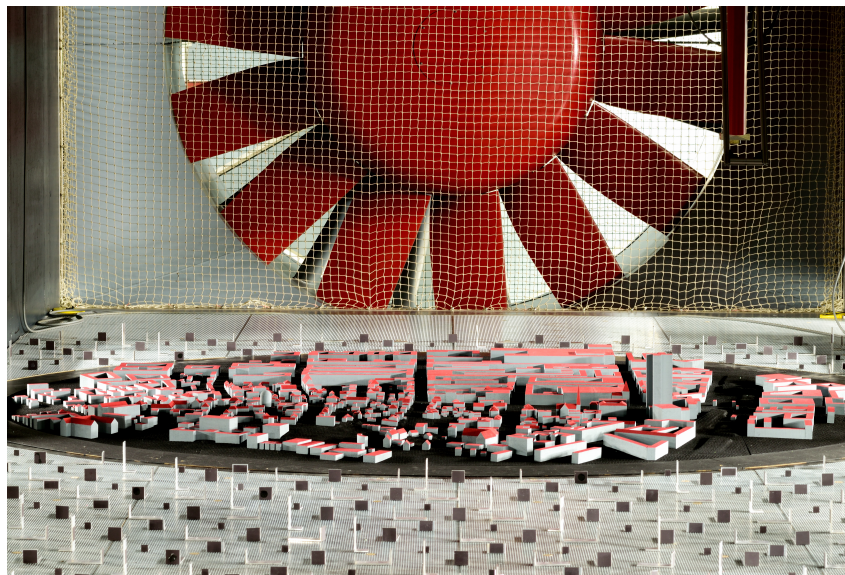


Abbildung 5.7.: Zweites Berlin-Modell vom Fichtenberg mit Blick in Windrichtung

Kapitel 6

Modellbau und Grenzschichtmodellierung

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit dem Bau der drei im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Modelle und der Grenzschichtmodellierung. Im Anschluss wird die Rauigkeitsklasse der Grenzschicht, welche für alle Modelle gleich ist, nach VDI 3783/12 (2000) bestimmt.

6.1. Modellbau

Der Modellbau des Hamburger HafenCity-Modells ist in Schliffke (2018) beschrieben. Für die beiden Berlin-Modelle wurden die frei zugänglichen Daten der Stadt Berlin genutzt.¹ Die Daten für das Stuttgart-Modell stellte das Amt für Umweltschutz der Landeshauptstadt Stuttgart zur Verfügung (R. Rinke, persönliche Kommunikation, 10.01.2018).

Die Daten für das Berlin-Modell lagen in einer Auflösung von LoD1 (Level of Detail) vor, d.h. dass die Gebäude als Blöcke mit flachem Dach dargestellt werden (*3D-Gebäudemodelle (LoD1 und LoD2)* 2019). Für Gebäude mit Satteldach werden zwei Blöcke mit verschiedenen Maßen verwendet. Zur Ergänzung von Details wurden vor Ort Bilder gemacht und anschließend der Datensatz angepasst. Die Dateien von Stuttgart lagen bereits sehr hoch aufgelöst vor und wurden ohne einen Abgleich mit der aktuellen Bebauungsstruktur verwendet.

Beim Bau des Berlin-Modells zeigte sich, dass der Bau von insgesamt fast 850 detaillierten Gebäuden viel Zeit in Anspruch nimmt. Aus diesem Grund wurde beim Modellbau des Stuttgart-Modells beschlossen, die Gebäude in Abhängigkeit vom Abstand zum Untersuchungsgebiet in drei Modellkategorien mit unterschiedlicher Detailliertheit zu unterteilen. Der Kernbereich des Modellgebietes umfasst ca. 150 Gebäude, bei denen Details mit einer Auflösung von bis zu 0,5m nachgebildet wurden. Etwa 300 Gebäude befanden sich in einem mittleren Entfernungsbereich zum Untersuchungsgebiet.

¹<https://www.businesslocationcenter.de/berlin3d-downloadportal/#/export> Stand 03.09.2019

Für diesen wurden die Grundrisse begradigt und Erker, Dachfenster und weitere kleine Anbauten bis 5 m vernachlässigt. Im Randbereich des Gesamtmodells befanden sich weitere etwa 300 Gebäude, die vereinfacht als Blöcke aufgebaut wurden. Für die Festlegung der Höhe der Blöcke wurde der jeweils höchste Punkt im entsprechenden Gebäudedatensatz verwendet. Dieses Vorgehen wurde im Anschluss ebenso für das zweite Berlin-Modell übernommen.

Die Höhenunterschiede in der Orografie betragen für das Ernst-Reuter-Platz-Modell nur wenige Meter und wurde daher nicht nachgebildet. Die exakte Lage der Linienquellen entlang der Hauptverkehrsstraßen und die Lage des Landwehrkanals wurden in einer Datei zusammengefasst und als Vorlage zur Fertigung der Bodenplatten verwendet. Abbildung 6.1 zeigt den aufwendigen Einbau des Ernst-Reuter-Platz-Modells in den Windkanal. Pro Hauptverkehrsstraße wurden zwei Schläuche zu den jeweiligen Linienquellen unter dem Modellgebiet hingeführt. Teilweise wurden Linienquellen zusammengeschaltet, sodass insgesamt 20 Schläuche zum Modellgebiet führten. Besonders beim Drehen der Modellscheibe war darauf zu achten, dass keiner der Schläuche geknickt wurde.



Abbildung 6.1.: Einbau der Linienquellen in das Ernst-Reuter-Platz-Modell

Um Lücken zwischen Linienquelle und Modellboden zu vermeiden, wurden, wie in der Abbildung 6.2 zu sehen, beide Seiten der Linienquelle mit Gewebeklebeband abgeklebt. Während den Strömungsmessungen wurden die Linienquellen mit einer Frischhaltefolie abgedeckt, um sie vor den für die LDA-Messungen erforderlichen Aerosolpartikeln zu schützen. Frischhaltefolie bietet den Vorteil, dass sie keine Rückstände beim Entfernen auf den Linienquellen hinterlässt und dünn genug ist, um keine zusätzliche Erhebung im Modellgebiet zu erzeugen.

Da im Stuttgart-Modell Höhenunterschiede von bis zu 130 m auftreten, konnten diese beim Modellbau nicht vernachlässigt werden. Die Daten standen als 98 PRT-Dateien zur Verfügung und mussten zunächst mit Hilfe von SagaGIS (V.2.3.1) und MegaCAD (2018 20.18.01.31 und einer Version von 2017) zusammengefügt und auf das gewünschte Gebiet zugeschnitten werden. Im Anschluss konnte mit Hilfe der erzeugten Topografie-datei das Gelände in Styrodur gefräst werden. Außerdem wurde der Effekt von Bäumen

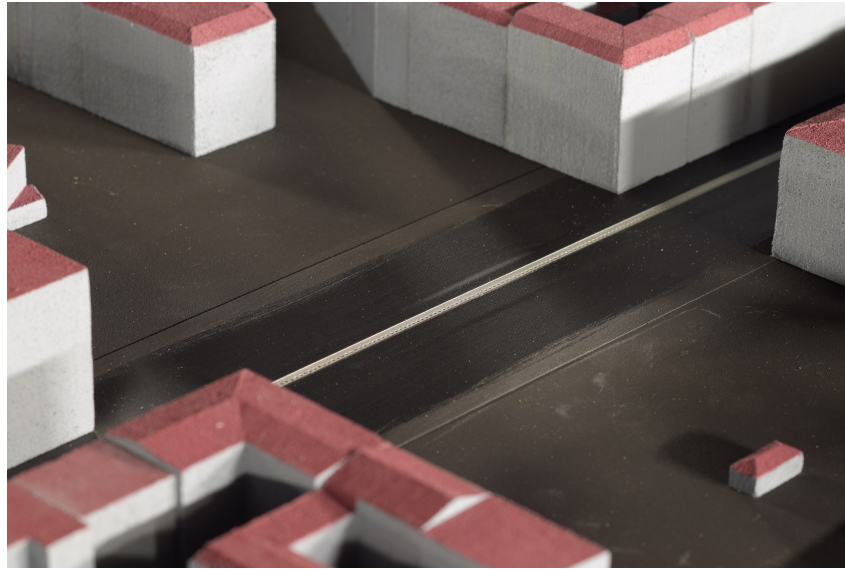


Abbildung 6.2.: Fertig eingebaute Linienquellen im Ernst-Reuter-Platz-Modell

im Stuttgart-Modell nach den Arbeiten von Aubrun und Leitl (2004) und Conan et al. (2015) simuliert.

Bei der Positionierung der Gebäude wurde für das Ernst-Reuter-Platz-Modell das gleiche Verfahren wie für das Hamburg-Modell angewendet (siehe Schliffke, 2018). Um die Gebäude zu positionieren und anschließenden zu fixieren wurde mit Hilfe der Traverse und einem Laserpointer drei Eckpunkte pro Gebäude angefahren und mit einem Bleistift markiert. Abbildung 6.3 zeigt die Positionsgenauigkeit eines eingeklebten Gebäudes aus dem Hamburger HafenCity-Modell durch den roten Laserpointerpunkt. Da die Gebäude mit einer Genauigkeit von ± 1 mm gefertigt wurden, die Traverse auf einen halben Millimeter genau fahren kann und die Punktgröße des Laserpointers am Boden ca. 2 mm groß ist, ergibt sich eine Genauigkeit des Einbaus der Gebäude von 1 bis 2 mm.

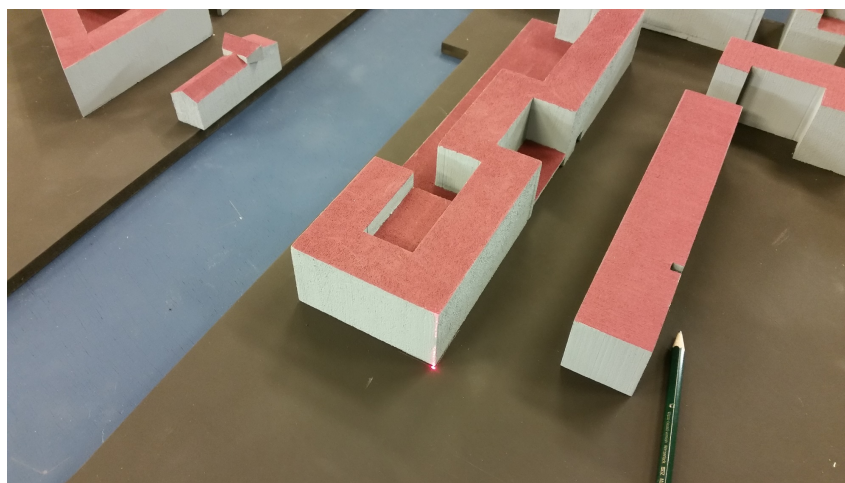


Abbildung 6.3.: Einbau Modellgebäude Hamburg HafenCity

Die Platzierung der Gebäude mit Hilfe des Laserpointers wurde auch für das erste Berlin-Modell übernommen. Aufgrund der Topografie konnte das oben beschriebene Verfahren zur Platzierung der Gebäude für das Stuttgart-Modell nicht angewendet

werden. Hier entstand die Idee, die Grundrisse bereits beim Geländefräsen mit einzufräsen. Dafür wurden nach der Erstellung der Gebäudepläne die vereinfachten Grundrisse in die Topografiedatei eingefügt. Anschließend wurde der niedrigste Punkt des jeweiligen Grundrisses bestimmt und als Fräshöhe verwendet. Dies erleichterte und beschleunigte den Einbau der Gebäude deutlich. Wegen der Produktionsgenauigkeit der Modellgebäude von ± 1 mm wurden die Gebäudegrundrisse 2 mm größer gefräst. Dadurch lag die Genauigkeit des Einbaus der Gebäude bei ± 1 mm. Abbildung 6.4a zeigt die Passgenauigkeit der Gebäude. Das rechte Bild (Abbildung 6.4b) lässt erkennen, wie tief teilweise in die Topografie hineingefräst werden musste. Diese Variante wurde ebenfalls beim zweiten Berlin-Modell verwendet.

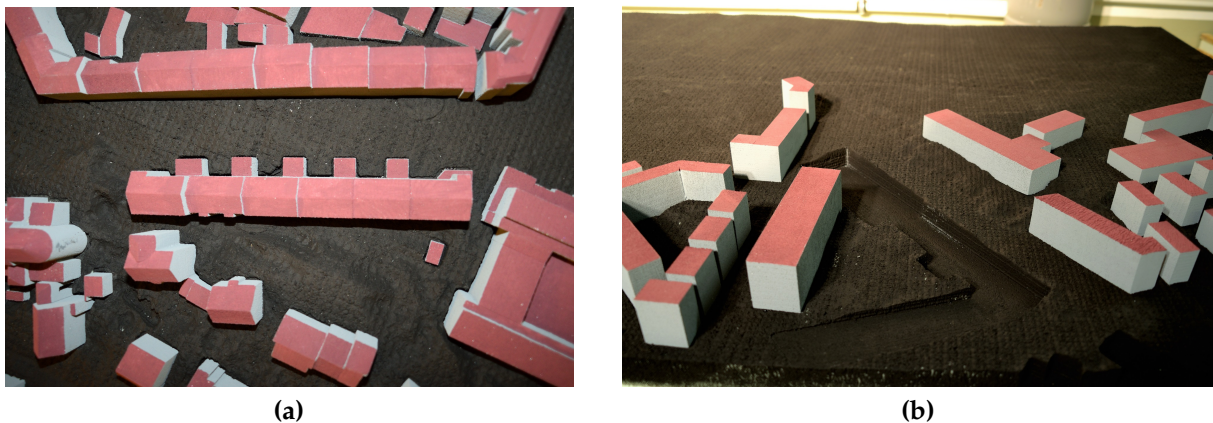
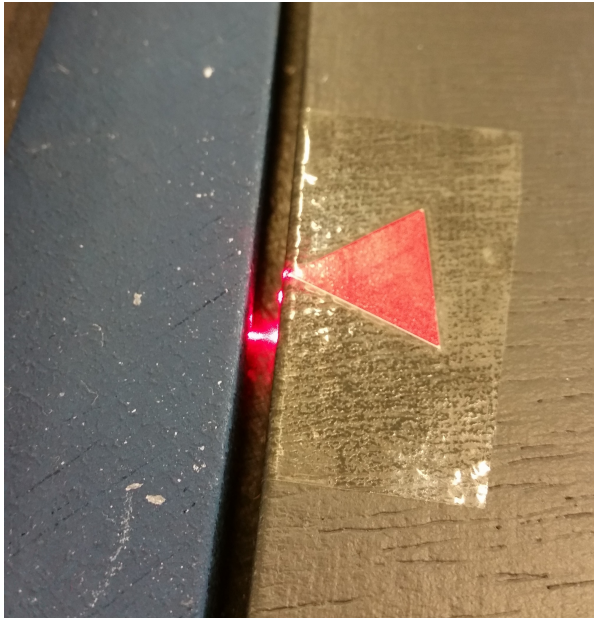


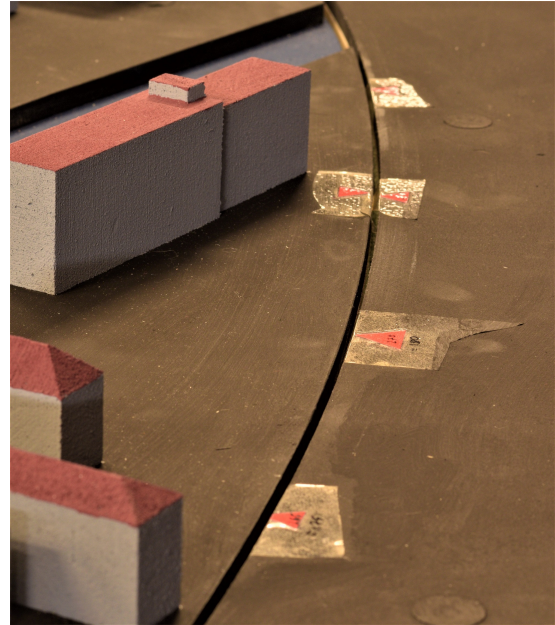
Abbildung 6.4.: Passgenauigkeit der Gebäude

Um das Modellgebiet auf die gewünschten Windrichtungen drehen zu können, mussten diese zu Beginn markiert werden. Wie in Abbildung 6.5 zu sehen, wurde dafür ebenfalls mit dem Laserpointer der Rand der Drehscheibe angefahren und mit Markierungen versehen. Mit Hilfe der Markierungen konnten die für die Messung relevanten Windrichtungen ausgewählt werden.

Nachdem die Modelle eingebaut waren, wurden Vergleichsfotos gemacht. In den Abbildungen 6.6 und 6.7 ist ein Ausschnitt aus dem Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell einmal in Natur und einmal im Windkanal wiedergegeben. Bemerkenswert ist die hohe Detailgenauigkeit der Modellgebäude. Die einzelnen Stufen des Mathematikgebäudevorbaus (vorne links) wurden exakt nachgebildet.



(a)



(b)

Abbildung 6.5.: Markierungen für die Windrichtungen



Abbildung 6.6.: Gebäude vor Ort
in Berlin

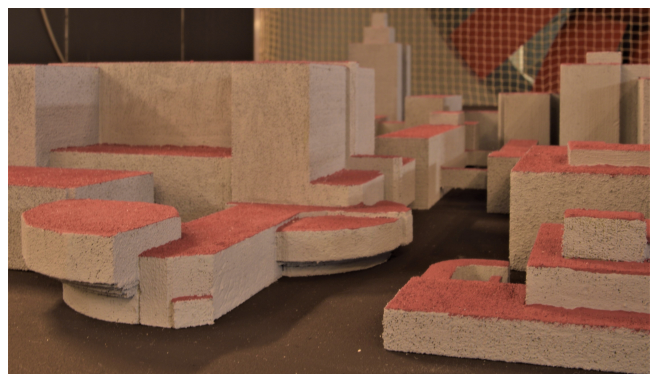


Abbildung 6.7.: Gebäude im Windkanal

6.2. Grenzschicht

Im Anschluss an den Modelleinbau erfolgte der Einbau der Grenzschicht. Da für den ausgewählten Maßstab von 1:500 im WOTAN Grenzschichtwindkanal noch keine Grenzschicht modelliert worden war, musste zunächst durch mehrere Versuche eine geeignete Grenzschicht gefunden werden. In der VDI 3783/12 (2000)-Richtlinie werden Standards für die Modellierung einer atmosphärischen Grenzschicht im Windkanal beschrieben. Unter anderem wird die Rauigkeit der Oberfläche in vier Kategorien aufgeteilt. Eis, Schnee und Wasserflächen liegen in der Kategorie „wenig rau“. Grasland und Ackerflächen liegen in „mäßig rau“. Die für Städte interessanten Kategorien sind für Park und Vorstadt „rau“ sowie für Innenstadtbereiche und Waldgebiete „sehr rau“. Mit Hilfe der Rauigkeitslänge z_0 und des Profilexponenten α wird die Grenzschicht einer Kategorie zugeordnet. Die Rauigkeitslänge wird mit Hilfe des logarithmischen Windprofils bestimmt:

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right) \quad (6.1)$$

Dabei ist $\bar{u}(z)$ die mittlere Windgeschwindigkeit in Höhe z , u_* die Schubspannungsgeschwindigkeit, κ die Von-Karman-Konstante $\approx 0,4$ und d_0 die Nullpunktverschiebung.

Zur Bestimmung von α werden zusätzlich Referenzwerte (u_{ref}, z_{ref}) für folgende Formel benötigt:

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_{ref}} = \left(\frac{z - d_0}{z_{ref} - d_0}\right)^\alpha \quad (6.2)$$

Die Werte von z_0 liegen für eine raue Grenzschicht zwischen 0,1 und 0,5 m bzw. für eine sehr raue Grenzschicht zwischen 0,5 und 2 m. Der Profilexponent liegt zwischen 0,18 und 0,24 für eine raue Grenzschicht und zwischen 0,24 und 0,4 für eine sehr raue (VDI 3783/12 (2000)).

Zusätzlich kann mit Hilfe der Turbulenzintensität $I(z)$ eine Zuordnung zur jeweiligen Rauigkeitskategorie vorgenommen werden. Die Turbulenzintensität ist definiert als das Verhältnis der Standardabweichung σ der Windgeschwindigkeitsschwankungen zur mittleren Windgeschwindigkeit u am Messort:

$$I_i(z) = \frac{\sigma_i(z)}{\bar{u}(z)}; i \in u, v, w \quad (6.3)$$

Die Turbulenzintensität wird für jede Geschwindigkeitskomponente (u, v, w) separat berechnet (VDI 3783/12 (2000)).

Der nächste Abschnitt beschäftigt sich mit der Grenzschichtentwicklung. Im Verlauf der Grenzschichtfindung wurden zusätzlich neue Maßnahmen entwickelt, die beschrieben werden. Anschließend werden die Grenzschichtparameter der drei Stadtmodelle hinsichtlich der VDI 3783/12 (2000) ausgewertet.

6.2.1. Grenzschichtentwicklung

Das erste Modell bildet einen Ausschnitt aus der Hamburger Hafencity ab. Im Jahr 2016 setzte sich die Oberflächenbeschaffenheit des umliegenden Gebietes zusammen aus Innenstadtbauung im Norden, überwiegend Brachflächen im Osten, Hafengebiet im Süden und Wasser im Westen. In ihrer Dissertationsschrift wertete Konow (2015) die Naturmessdaten vom 7 km zur HafenCity entfernt stehenden Hamburger Wettermast aus. Dabei stellte sie fest, dass die Werte für die Rauigkeitslänge je nach Windrichtung zwischen 0,13 und 0,96 (Höhe: 10 - 110 m) variieren. Zusätzlich dokumentierte sie, dass die zur Berechnung der Rauigkeitslänge verwendeten Höhen einen starken Einfluss auf die Ergebnisse haben. Deshalb hat sie zusätzlich eine effektive Rauigkeitslänge berechnet (Konow, 2015). Für diese Arbeit ist es wichtig darauf hinzuweisen, dass die Rauigkeitslänge windrichtungsabhängig ist. Jedoch lag der Fokus im Rahmen des Projektes auf der Erzeugung von Validierungsdaten und dem Vergleich verschiedener Städte im Hinblick auf bodennahe Windverhältnisse, sodass es wichtig war, eine Grenzschicht zu finden, die für alle Windrichtungen und Modelle kompatibel ist. Allerdings sind bei der Verwendung gleicher Anströmungsgrenzschichten Messungen im Randbereich der Modellgebiete nicht unmittelbar auf die Realität übertragbar. Entsprechende Bereiche wurden im Rahmen der Modellversuche konsequent von Messungen ausgeschlossen. Durch das Überströmen des Modellgebietes nimmt die Strömung die lokalen Charakteristiken an, sodass bodennah der Einfluss der verwendeten Grenzschicht reduziert ist. Da das gesamte Gebiet im Zentrum der Stadt Hamburg liegt, wurde entschieden eine raue bis sehr raue Grenzschicht zu modellieren.

Da bisher noch keine Grenzschicht im Maßstab von 1:500 im WOTAN Windkanal modelliert worden war, wurde als erster Versuch die Turbulenzgeneratoren aus dem Oklahoma City Modell (Harms, 2010) mit einem Maßstab von 1:300 zur Grenzschichtmodellierung verwendet. Die Turbulenzgeneratoren setzen sich zusammen aus Rauigkeitselementen auf Windkanalboden und Spires im Einlauf des Windkanals. In Abbildung 6.8 sind die Turbulenzgeneratoren nach Harms (2010) mit leicht veränderter Ausführung dargestellt. Es wurden kleinere Rauigkeitselemente verwendet und zusätzlich wurden diese näher zusammengestellt.

Es ergab sich ein z_0 von 0,66 m und ein α von 0,21. Somit würde die Grenzschicht nach der Kategorisierung für die Rauigkeitslänge in einem sehr rauen und für den Profilexponenten in einem rauen Bereich liegen. Generell gilt, dass die Bereiche für die Kategorisierung nicht strikt festgelegt sind und Messwerte eine Unsicherheit aufweisen.

Andererseits zeigte sich bei den Turbulenzintensitäten I_w , dass die Grenzschicht für Höhen über 100 m nicht konsistent ist. Folglich wurden im Anschluss schmalere Spires getestet. Dies verbesserte die Turbulenzintensitäten I_w deutlich. Jedoch wurde vermutet, dass die Grenzschicht noch deutlich verbessert werden konnte. Also wurden in den folgenden zwei Monaten viele verschiedene Zusammenstellungen an Turbulenzgeneratoren getestet. Daraus resultierten teilweise Verbesserungen, teilweise Verschlechterungen und teilweise minimale Veränderungen. Nach mehr als 100 getesteten Konfigurationen wurde eine zufriedenstellende Kombination an Spires und Rauigkeitselementen gefunden. Abbildung 6.11 zeigt die finale Konfiguration der Turbulenzgeneratoren.

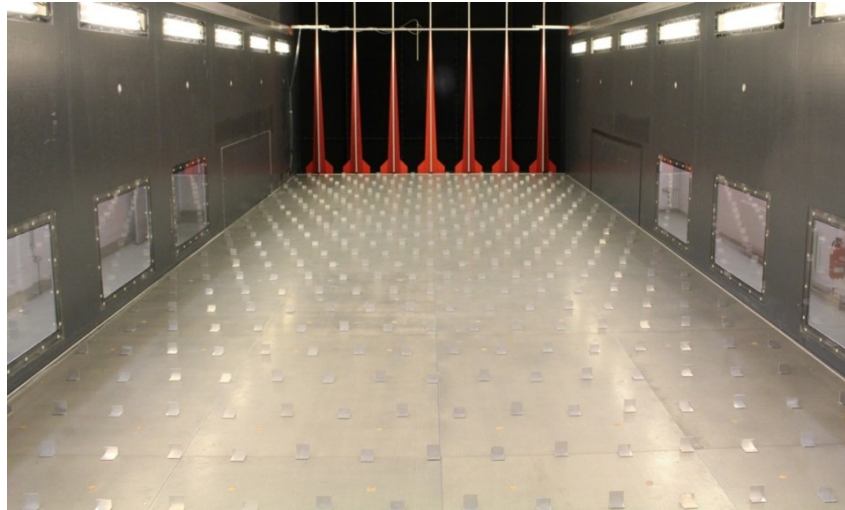
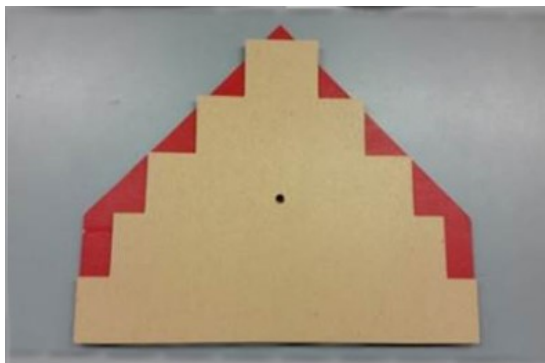
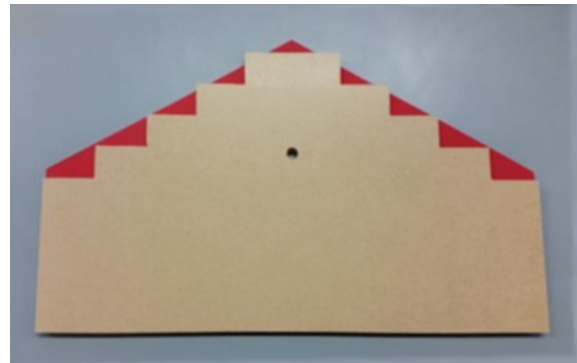


Abbildung 6.8.: Beim ersten Versuch für eine Grenzschichtmodellierung verwendete Turbulenzgeneratoren

Während des Testens entwickelten sich neue Maßnahmen zur Entwicklung einer geeigneten Grenzschicht. So wurden die unteren Elemente der Spires nicht mehr mit einer Steigung, sondern mit Stufen gebaut (Abbildung 6.9). Zwei unterschiedliche stufenförmige Spires wurden getestet, wobei für Variante 1 (Abbildung 6.9a) die Turbulenz in 200 m verringert wurde, jedoch sich für Variante 2 (Abbildung 6.9b) keine nennenswerte Veränderung ergaben. Also wären weitere Untersuchungen notwendig, um den Einfluss der Stufen näher zu bestimmen.



(a) Versuch 1



(b) Versuch 2

Abbildung 6.9.: Vergleich der stufenförmigen unteren Elemente der Spires (vorne - holzfarben) zu denen mit Steigung (hinten - rot)

Laut VDI 3783/12 (2000) soll das Verhältnis der Standardabweichungen σ_u zu σ_w bei 0,5 liegen. Jedoch zeigte sich in der Testphase, dass dies sehr schwer zu erreichen ist. Um das Verhältnis zu verbessern, wurde ein Teil der Rauigkeitselemente um 90° gedreht. Abbildung 6.10 stellt einen Ausschnitt aus der finalen Konfiguration der Rauigkeitselemente dar. Durch das Drehen wird die Blockierung in u -Richtung reduziert und die Blockierung in v -Richtung vergrößert, dadurch erhöht sich die Turbulenzintensität in u -Richtung und verringert sich in v -Richtung.

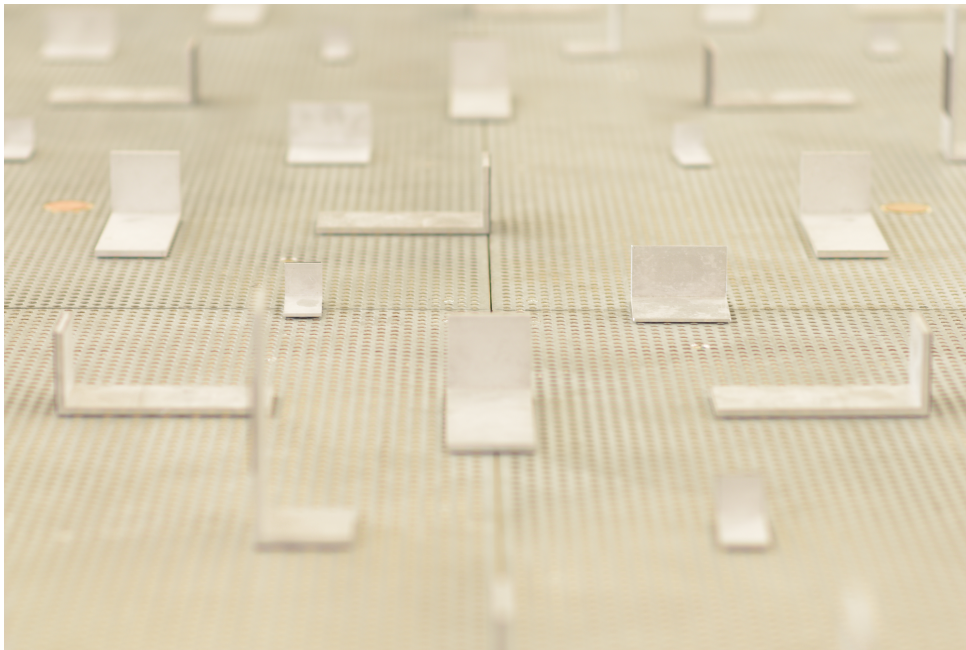


Abbildung 6.10.: Detailaufnahme der Rauigkeiten

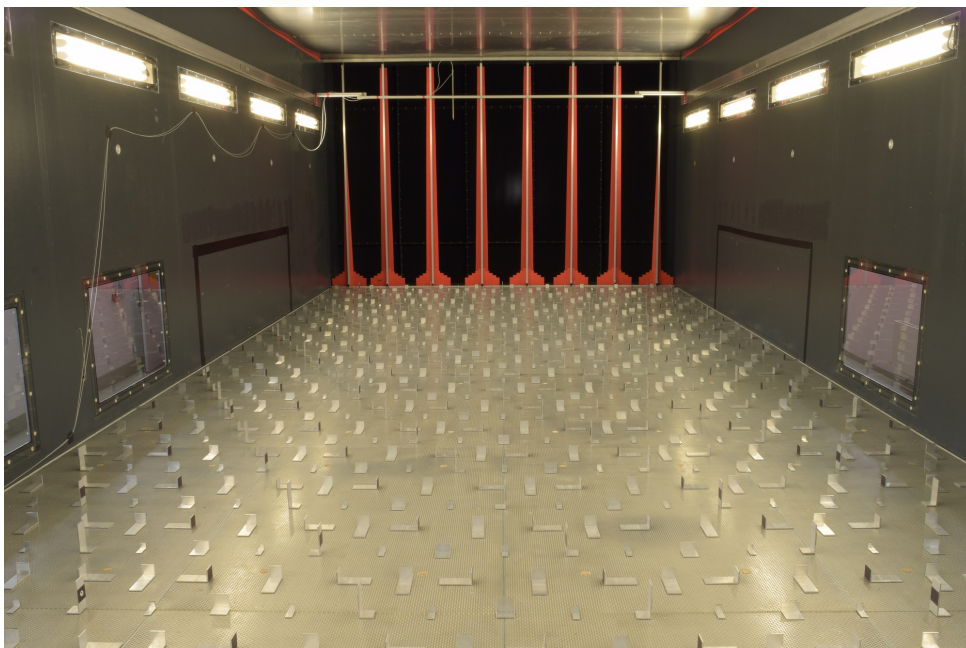


Abbildung 6.11.: Finale Konfiguration der Turbulenzgeneratoren

In Abbildung 6.12 ist die Verteilung der Rauigkeitselemente schematisch dargestellt. Für eine vollständige Dokumentation der verwendeten Grenzschicht sind in Abbildung 6.13 die Spires mit den jeweiligen Maßen zu sehen. Verwendet wurden insgesamt acht Spires, davon zwei kleinere mit einer Größe von 2 m und 6 mit einer Höhe von 2,5 m. Bei den unteren Elementen der Spires wurde die Variante mit Stufen aus Versuch 1 gewählt. Die exakten Maßangaben der unteren Elemente der Spires sind in Abbildung 6.13b aufgezeigt.

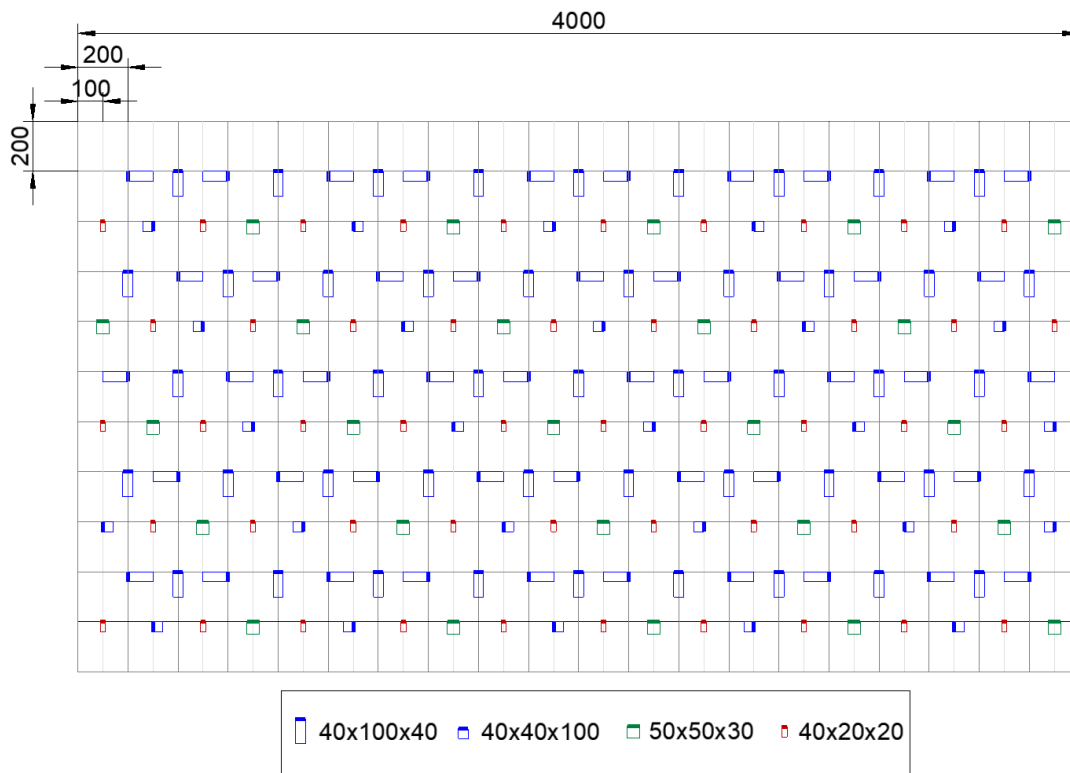


Abbildung 6.12.: Schematische Darstellung der Rauigkeitselemente

6.2.2. Auswertung der Grenzschichten

Auch wenn für alle Modellversuche der gleiche Versuchsaufbau zur Grenzschicht-erzeugung verwendet wurde, ist der Einfluss des Modellgebietes auf die simulierte Anströmung zu prüfen und zu dokumentieren. Die Auswertung der Grenzschicht für das Hamburg-Modell wurde bereits ausführlich in Schliffke (2018) beschrieben. Im Folgenden soll ein Vergleich zwischen den Grenzschichten der drei Modelle HafenCity-, Ernst-Reuter-Platz- und Stuttgart-Modell gezogen werden.

Proflexponent und Rauigkeitslänge

Für den Vergleich der modellierten Grenzschichten zwischen den einzelnen Modellen erfolgt zunächst die Zuordnung zur Rauigkeitsklasse. Wie beschrieben, hängt die Rauigkeitsklasse vom Proflexponenten α und der Rauigkeitslänge z_0 ab. Counihan

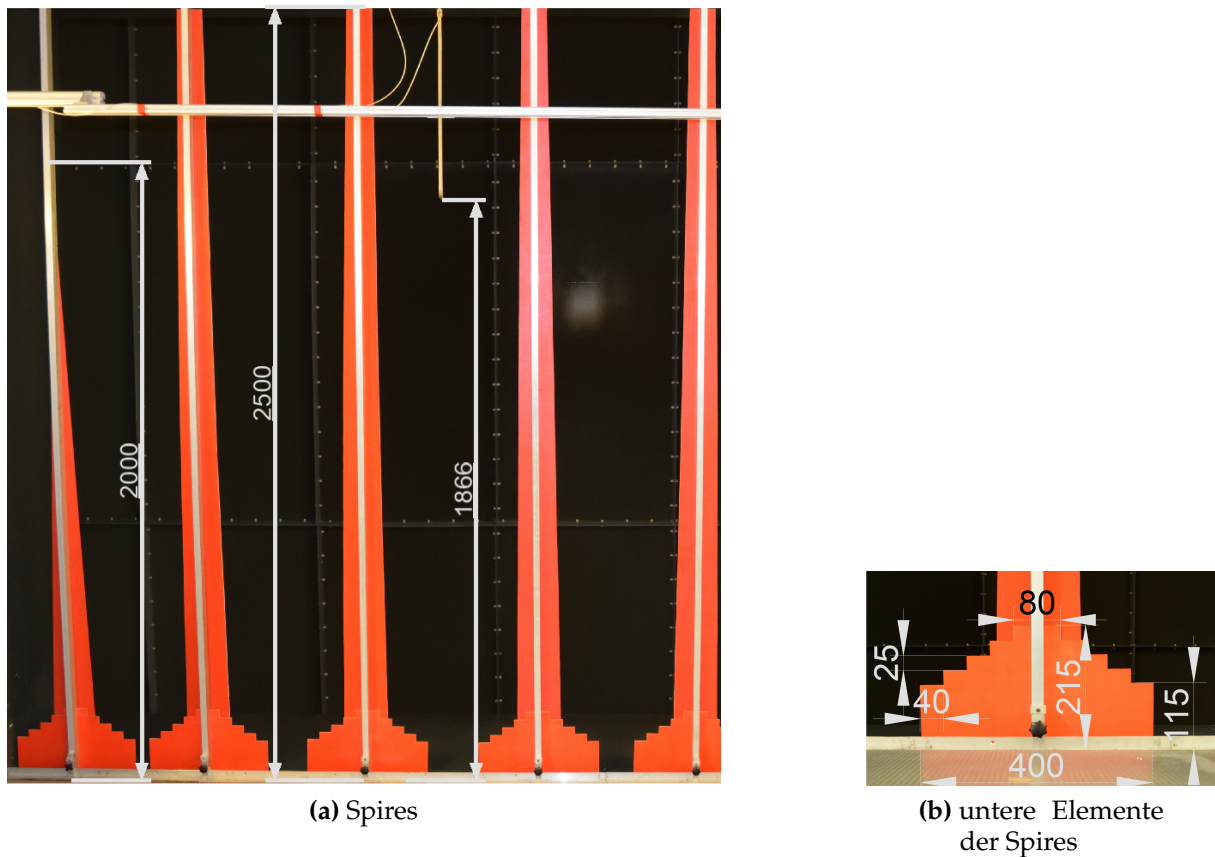


Abbildung 6.13.: Finale Konfiguration der verwendeten Spires mit Maßangaben

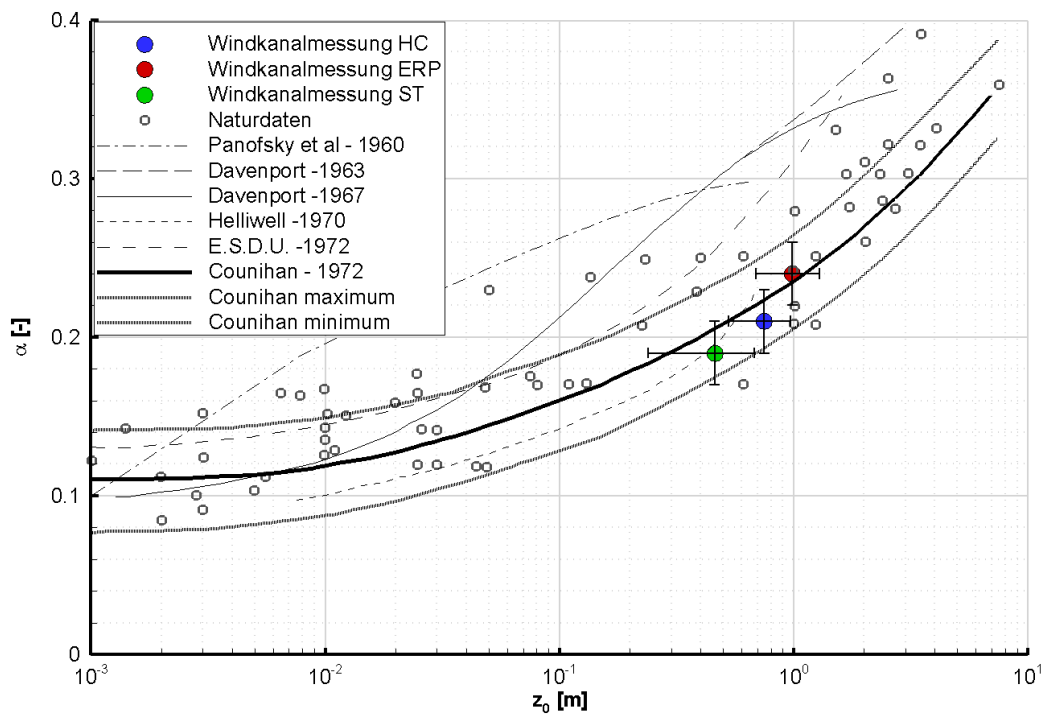


Abbildung 6.14.: Zusammenhang zwischen Profilexponenten α und Rauigkeitslänge z_0 mit den Referenzwerten von Counihan (1975)

(1975) hat in der Natur bestimmte α und z_0 in eine Graphik eingetragen und mit einer analytisch ableitbaren Exponentialfunktion verglichen. Dies ist in Abbildung 6.14 dargestellt. Zusätzlich wurden die α und z_0 -Werte, die für die drei Modelle berechnet worden sind, eingetragen. Es zeigt sich, dass alle drei Zusammenhänge im von Counihan (1975) definierten Bereich liegen.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen ergaben sich aus den Messpositionen und der Entfernung zum eingebauten Modellgebiet. Die Grenzschicht wurde für alle drei Modelle erst nach Einbau des Modells bestimmt. So ergeben sich folgende Abstände: Die Messungen im Hamburg-Modell und Berlin-Modell wurden jeweils 1000 mm vor dem Modellgebiet durchgeführt. Dieser Abstand wurde gewählt, um möglichst weit vom Modell entfernt zu sein, damit das Modellgebiet noch keinen Einfluss auf die Strömung hat. Gleichzeitig wird eine ausreichend lange Anlaufstrecke gewährleistet, damit sich die Grenzschicht voll entwickeln kann. Erwartungsgemäß wurde beim Hamburg-Modell festgestellt, dass die Orientierung des Modellgebietes Einfluss auf die Grenzschichtmessungen hat. Wenn die Elbe an das Rauigkeitsfeld angrenzt waren die gemessenen Windgeschwindigkeiten geringer als wenn die Innenstadt anschließt. Das zeigt sich auch beim Vergleich des Berlin-Modells mit dem Hamburg-Modell. So werden die höchsten α und z_0 -Werte für das Ernst-Reuter-Platz-Modell gemessen, da es die höchste Gebäudedichte aufweist. Beim Stuttgart-Modell konnte aufgrund der großen Ausstreckung des Modells nicht im räumlich kurzen Rauigkeitsfeld gemessen werden, sondern auf einem Plateau unmittelbar vor dem Modellgebiet. Ein Effekt der schon verringerten Oberflächenrauigkeit muss deshalb beachtet werden. Zusätzlich ist im gesamten Stuttgart-Modell die Gebäudedichte deutlich niedriger als im Ernst-Reuter-Platz-Modell.

Die gemessenen Werte für z_0 liegen für das HafenCity-Modell bei $0,75 \pm 0,22$, für das Ernst-Reuter-Platz-Modell bei $0,99 \pm 0,3$ und für das Stuttgart-Modell bei $0,46 \pm 0,22$ und somit innerhalb beziehungsweise am unteren Rand des sehr rauen Bereiches. Für α liegen die Werte im rauen Bereich mit $0,21 \pm 0,02$ für das HafenCity-Modell, mit $0,24 \pm 0,02$ für das Ernst-Reuter-Platz-Modell und mit $0,19 \pm 0,02$ für das Stuttgart-Modell.

Turbulenzintensität

Neben dem Profilexponenten α und der Rauigkeitslänge z_0 wird in der VDI 3783/12 (2000) auch die Turbulenzintensität für die Einordnung der Grenzschicht in die jeweilige Rauigkeitsklasse verwendet. Beim Vergleich der Turbulenzintensitäten I_u , I_v und I_w in den Abbildungen 6.15, 6.16 und 6.17 zeigt sich, dass die Werte für alle drei Windkomponenten innerhalb der Messunsicherheit liegen und somit der Rauigkeitsklasse rau zugeordnet werden können. Folglich entwickelte sich die Grenzschicht durch die verwendeten Turbulenzgeneratoren im Berlin-Modell genauso wie im Hamburg-Modell. Im Stuttgart-Modell sind die niedrigsten Turbulenzintensitäten I_u und I_v vorzufinden. Vor dem eigentlichen Modellgebiet musste eine Rampe angebaut werden, die einen kontinuierlichen Übergang vom Anlaufbereich mit Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten zum Geländemodell herstellt. Die Rampe konnte mit der Oberflächenrauigkeit des Geländemodells, nicht aber mit Rauigkeitselementen der Grenzschichtmodellierung versehen werden. Die verwendete Rampe erzeugte im Vergleich mit den

6.2 Grenzschicht

Modellkonfigurationen Hamburg und Berlin größere Werte für die Vertikalkomponente der Turbulenzintensität I_w .

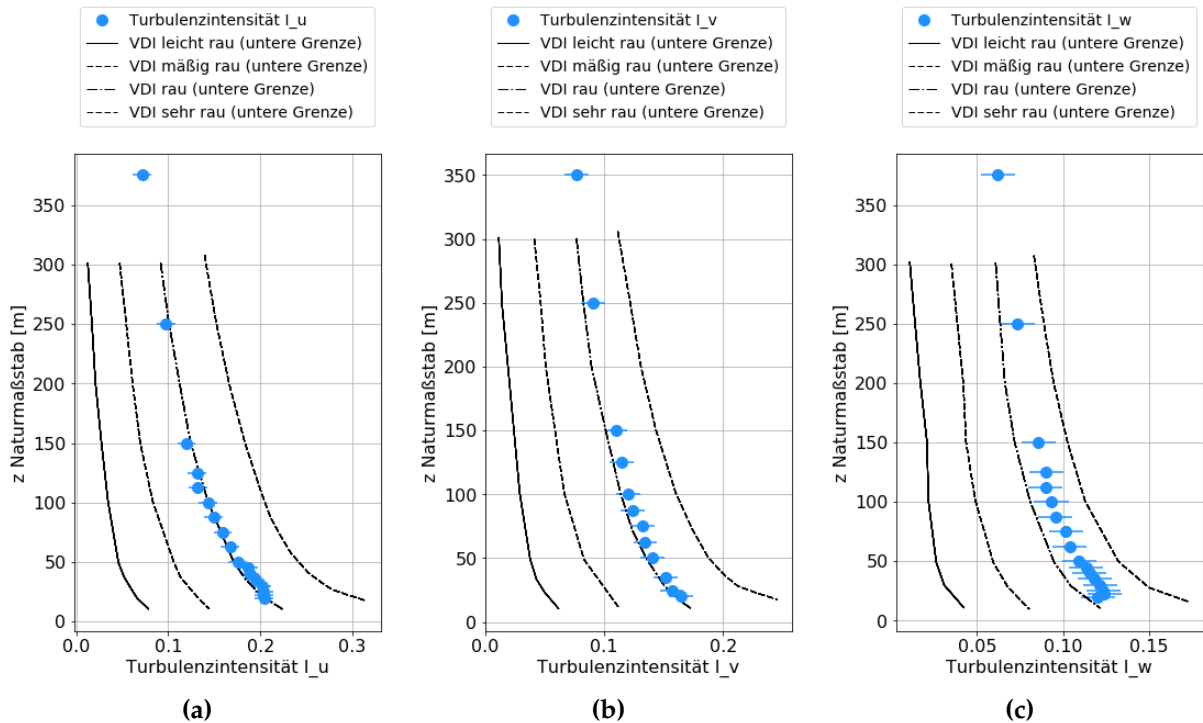


Abbildung 6.15.: Turbulenzintensitäten für die Windrichtungskomponenten u, v, w für das Hamburg-Modell mit den Referenzlinien aus der VDI 3783/12 (2000)

Integrales Längenmaß L_{ux}

Zusätzlich zur Betrachtung des Profilexponenten, der Rauigkeitslänge und der Turbulenzintensitäten kann die Rauigkeitsklasse auch über das integrale Längenmaß bestimmt werden. Um die Qualität der Grenzschicht zu überprüfen, ist es wichtig, nicht nur einen Parameter, sondern möglichst viele zu betrachten.

Zur Berechnung des integralen Längenmaßes wird zunächst das integrale Zeitmaß berechnet:

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

Anschließend wird T_u mit der mittleren Windgeschwindigkeit U multipliziert. Das integrale Längenmaß kann sowohl für die U-Komponente als auch für die V- und W-Komponente berechnet werden.

Die Abbildungen 6.18, 6.19 und 6.20 stellen das integrale Längenmaß für die U-Komponente des Windvektors im Vergleich zu den von Counihan (1975) analysierten Naturmessdaten dar. Es ist zu sehen, dass die Werte der für die drei Modellgrenzschichten be-

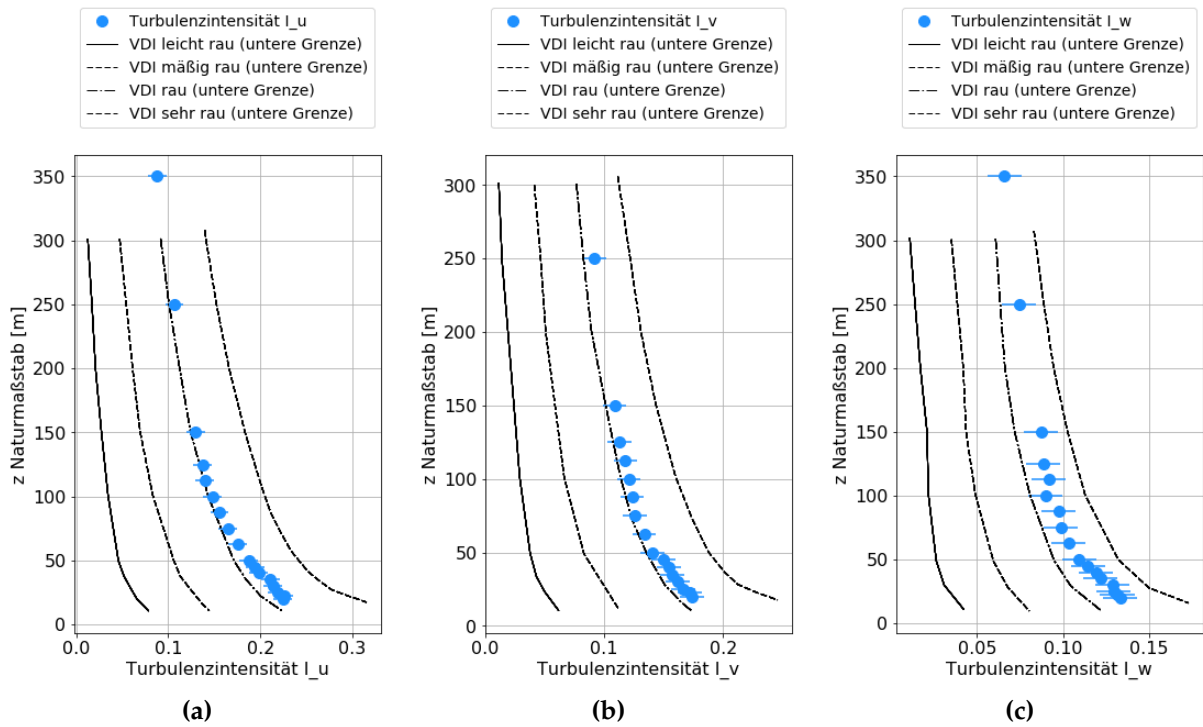


Abbildung 6.16.: Turbulenzintensitäten für die Windrichtungskomponenten u, v, w für das Berlin-Modell mit den Referenzlinien aus der VDI 3783/12 (2000)

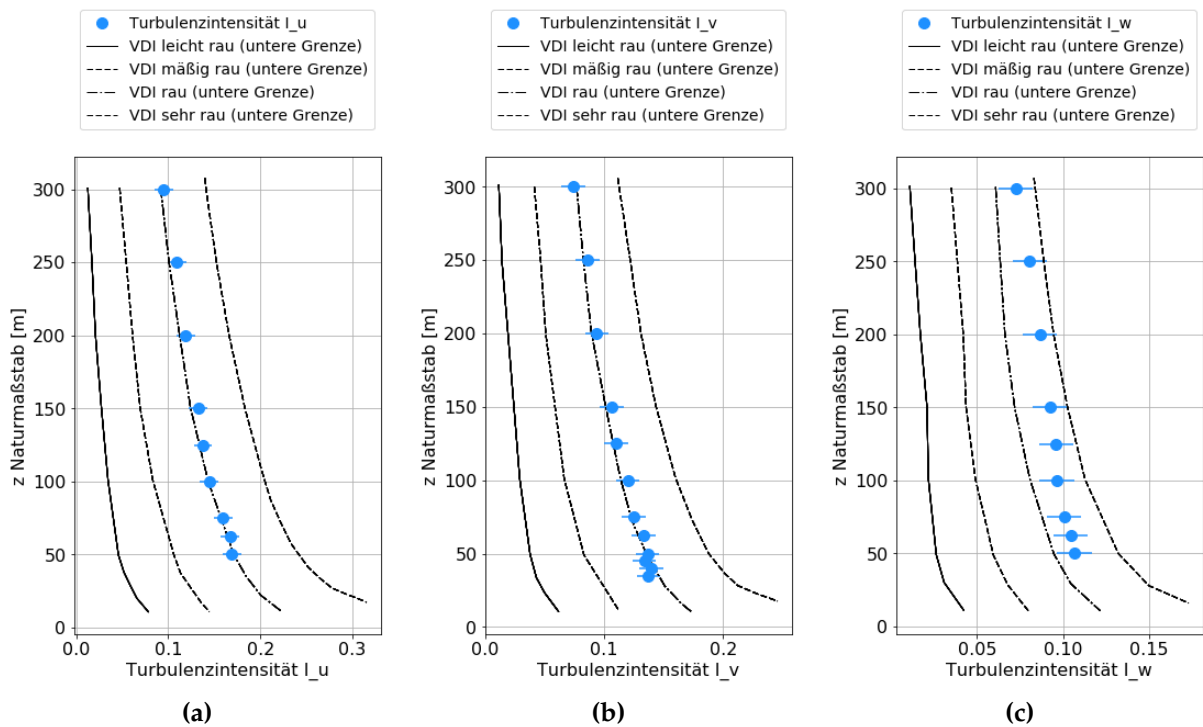


Abbildung 6.17.: Turbulenzintensitäten für die Windrichtungskomponenten u, v, w für das Stuttgart-Modell mit den Referenzlinien aus der VDI 3783/12 (2000)

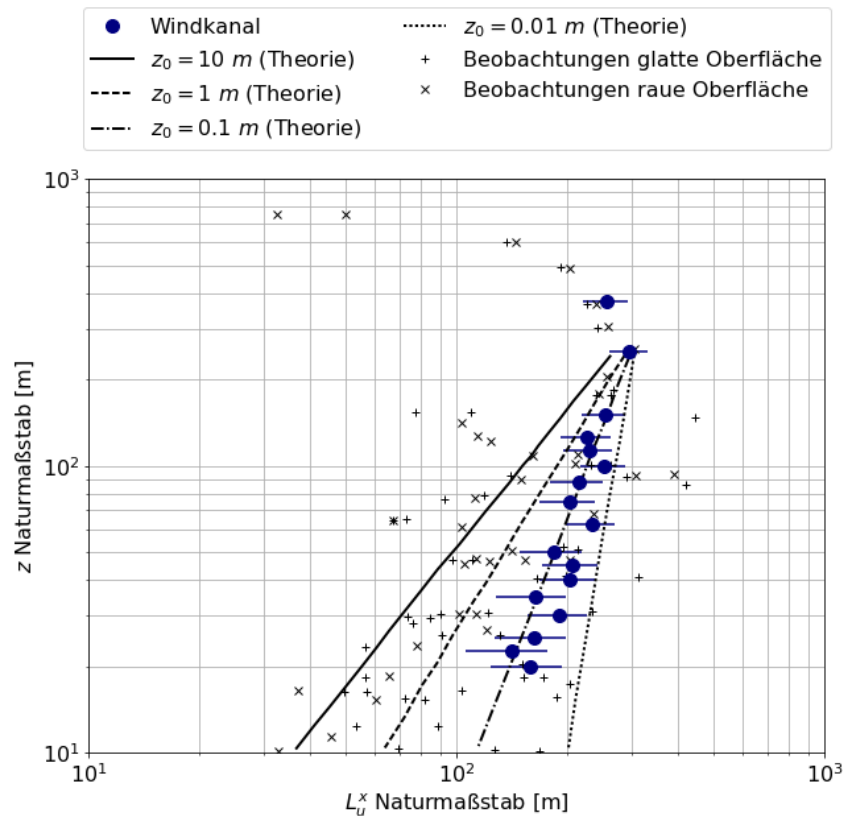


Abbildung 6.18.: Integrales Längenmaß L_{ux} für die Daten des Hamburg-Modells mit Referenzwerten aus der Natur von Counihan (1975)

stimmten Integrallängenmaße L_{ux} im Rahmen der Messunsicherheit mit den aus Naturmessungen abgeleiteten Referenzkurven für die Geländekategorie "rau" übereinstimmen.

Eine ebenso gute Übereinstimmung findet sich für die Grenzschichten des Hamburg-, des Ernst-Reuter-Platz- und des Stuttgart-Modells bei der logarithmischen Windzunahme mit der Höhe (siehe Anhang Abbildungen B.1, B.2, B.3) und den turbulenten Flüssen (siehe Anhang Abbildungen B.4, B.5, B.6).

Nachdem gezeigt wurde, dass eine raue bis sehr raue Grenzschicht für den Maßstab 1:500 im WOTAN Grenzschichtwindkanal der Universität Hamburg modelliert und für alle drei Stadtmodelle reproduziert werden konnte, soll im nächsten Kapitel auf die Vorversuche und weitere qualitätssichernde Maßnahmen eingegangen werden.

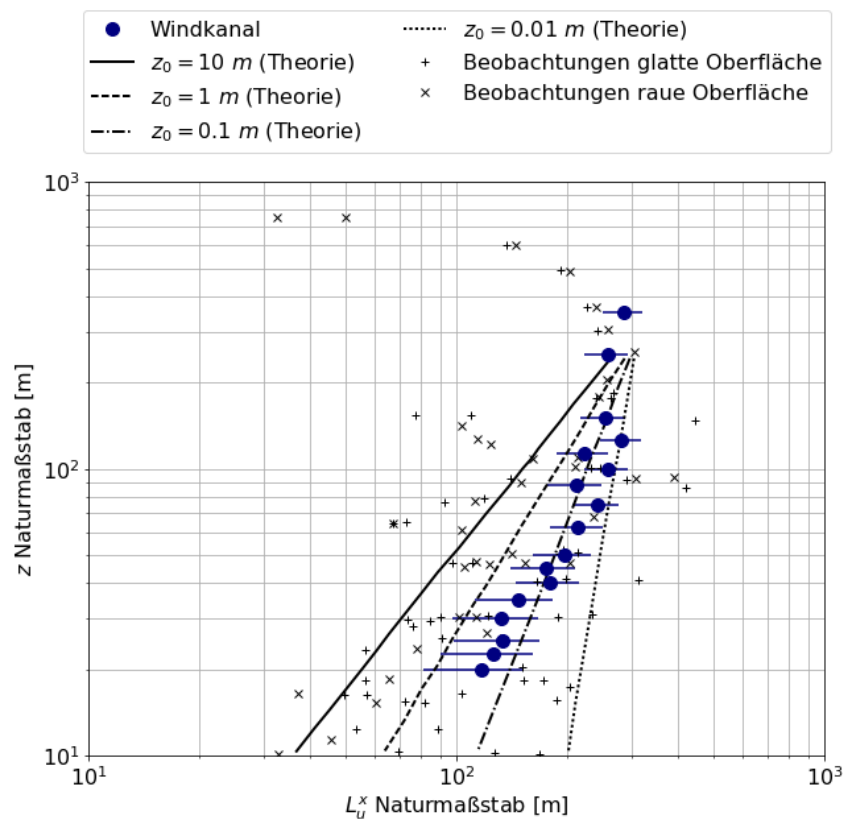


Abbildung 6.19.: Integrales Längenmaß L_{ux} für die Daten des Berlin-Modells mit Referenzwerten aus der Natur von Counihan (1975)

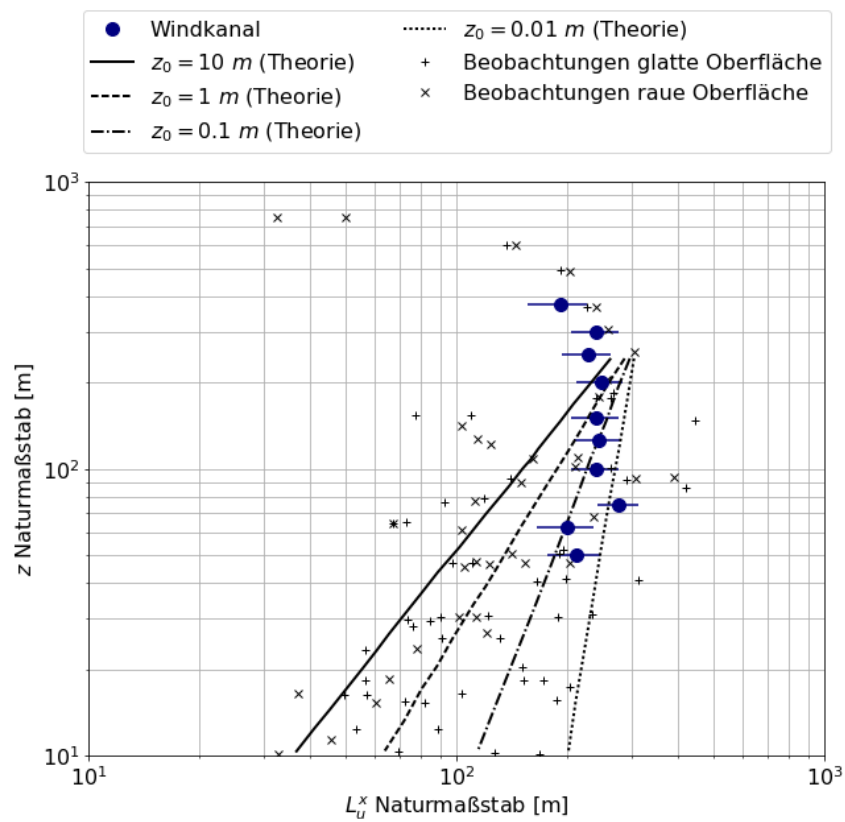


Abbildung 6.20.: Integrales Längenmaß L_{ux} für die Daten des Stuttgart-Modells mit Referenzwerten aus der Natur von Counihan (1975)

Kapitel 7

Qualitätssicherung und Bearbeitung der Messdaten

Da die Windkanaldaten im Rahmen des BMBF-Projektes „Stadtklima im Wandel“ zur Modellvalidierung gemessen wurden, kam der Qualitätssicherung eine sehr hohe Bedeutung zu. Wie in Kapitel 6 beschrieben, wurden über zwei Monate zur Grenzschichtoptimierung verwendet. Zusätzlich wurden diverse Vorversuche durchgeführt, welche in den nächsten beiden Abschnitten betrachtet werden. Des Weiteren werden die Maßnahmen aufgelistet, die während des Messens eingehalten wurden, um den erforderlichen hohen Qualitätsstandard zu gewährleisten.

Ebenso wichtig wie eine sorgfältige Qualitätssicherung während der Messungen ist die sorgfältige Aufbereitung und Analyse der gewonnenen Daten. Damit befasst sich der Abschnitt 7.3. Zunächst werden der Dateiname und die verwendeten Flags erklärt, bevor auf die Bearbeitung der Daten eingegangen wird. Anschließend werden die verwendeten Auswerteskripte und die statistischen Verfahren näher erläutert. Zum Schluss wird die Messunsicherheit der Daten ausgewertet.

7.1. Vorversuche

Ein Großteil der Vorversuche zu den Strömungsmessungen wurde bereits im Rahmen der Grenzschichtmodellierung in Kapitel 6.2.2 dargestellt. Nachfolgend werden weitere Vorversuche der Strömungsmessungen und der Versperrungsgrad der Modelle umrissen. Als nächstes wird auf die Vorversuche eingegangen, die für die Konzentrationsmessungen gebraucht werden. Dabei werden zuerst die Tests beschrieben, die separat für die Linienquellen oder die Punktquelle gemacht wurden und anschließend die Vorversuche erklärt, die sowohl für die Linienquellen als auch für die Punktquelle wichtig waren.

7.1.1. Vorversuche Strömungsmessungen und Versperrungsgrad

Reynoldszahlenunabhängigkeit

Einer der Vorversuche befasst sich mit der Reynoldszahlenunabhängigkeit der Modell- bzw. Messergebnisse. Diese basiert darauf, dass mit der Reynoldszahl beschrieben werden kann, ob eine Strömung laminar oder turbulent ist. Dies ist wichtig, da die Strömung in der modellierten Prandtl-Schicht voll turbulent sein muss, um auf die Natur übertragen werden zu können.

Die Reynoldszahl stellt gemäß Definition (Gl. 2.1) das Verhältnis von Trägheitskraft zur Reibungskraft dar. Eine Strömung ist laminar, wenn die Reibungskräfte groß im Verhältnis zu den Trägheitskräften sind. Im umgekehrten Fall wird eine Strömung turbulent (Snyder, 1981). Bei der Modellierung bodennaher atmosphärischer Strömungs- und Transportprozesse im Windkanal ergeben sich aufgrund der maßstäblichen Verkleinerung im Modell um drei bis vier Größenordnungen kleinere Reynoldszahlen. Dies bedeutet, dass viskose Effekte z.B. in unmittelbarer Nähe fester Wände stärker ausfallen als in der Realität. Jedoch beschrieb bereits Townsend (1956), dass die grobe Struktur der Turbulenz über einen großen Bereich von Reynoldszahlen gleich bleibt. Das heißt, turbulente Strömungen sind in diesem Bereich selbstähnlich. Dies besagt auch die Monin-Obukhov'sche Ähnlichkeitstheorie, die auf der Dimensionsanalyse und dem Buckingham π -Theorem basiert (Wyngaard, 2010). Die Reynoldszahl einer Strömung muss somit nur groß genug sein, damit die modellierte Strömung als voll turbulent angesehen werden kann. Um zu überprüfen, ob die notwendige Reynoldszahl erreicht ist, beschrieb Snyder (1981) unter anderem die Reynoldszahlenunabhängigkeit.

Für die Reynoldszahlenunabhängigkeit müssen laut Snyder (1981) mehrere Voraussetzungen zutreffen. Zum einen kann die Reynoldszahlenunabhängigkeit nicht bestimmt werden, wenn Schwere- beziehungsweise Dichteeffekte im Modell abgebildet werden. Zum anderen muss der modellierte Bereich außerhalb des Einflussbereichs der Corioliskraft liegen. Die dritte Voraussetzung ist, dass die Reynoldszahlenunabhängigkeit über die dimensionslosen Windgeschwindigkeiten bestimmt werden muss. Daraus ergeben sich bei einer ausreichend großen Reynoldszahl unabhängig von der Anströmwindgeschwindigkeit die gleichen mittleren Windgeschwindigkeiten an einem Messort.

Dies wurde bei allen Modellen an mehreren Orten im Modellgebiet überprüft. Erwartungsgemäß zeigte sich, dass die Reynoldszahlenunabhängigkeit an bestimmten Orten deutlich früher eintritt als an anderen. Generell gilt, dass ab einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s am Prandtl-Rohr die Strömung reynoldszahlenunabhängig ist. Somit wurde diese Anströmwindgeschwindigkeit für die Messungen in den Modellgebieten übernommen. Für die detaillierte Beschreibung der Reynoldszahlenunabhängigkeit im HafenCity-Modell wird auf Schliffke (2018) verwiesen.

Ergodizität und Konvergenz statistischer Ergebnisgrößen

Neben Reynoldszahlenunabhängigkeitstests wurden an mehreren Messorten in den Modellgebieten die Ergodizität und die Konvergenz der Messdaten geprüft. Dies dient

zur Bestimmung der Messdauer, die notwendig ist, um statistisch repräsentative und im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzierbare Ergebnisse zu erzeugen. Hierzu werden Messungen über einen längeren Zeitraum von etwa 20-30 Minuten im Modellzeitmaßstab durchgeführt. Anschließend wird diese Zeitreihe in mehrere Zeitintervalle von einigen Sekunden bis zu mehreren Minuten unterteilt. Ab einer bestimmten Intervallgröße schwanken die für die Teilintervalle berechneten statistischen Mittelwerte nur noch im Rahmen der entsprechenden Messunsicherheit. Aus der Konvergenzanalyse ergab sich, dass mindestens drei Minuten lang gemessen werden muss, um die Mittelwerte der in dieser Arbeit dokumentierten Strömungs- und Ausbreitungsgrößen bei Wiederholungsmessungen im Rahmen der Messgenauigkeit reproduzieren zu können. Um alle Extremwerte eines Messortes zu bekommen, müsste über einen deutlich längeren Zeitraum gemessen werden. Ebenso wie bei der Reynoldszahlenunabhängigkeit befindet sich eine detailliertere Beschreibung der Konvergenzmessung im HafenCity-Modell in Schliffke (2018).

Versperrungsgrad

Wenn ein Modell in einen räumlich begrenzten Tunnel gestellt wird, kann der Querschnitt des Modells zu einer Versperrung und somit zu einer Beschleunigung der Strömung führen. Laut VDI 3783/12 (2000) darf der Versperrungsgrad eines Modells im Windkanal bei einer geschlossenen Messstrecke nicht $\geq 5\%$ sein. Aufgrund der Höhenanpassung der Decke des WOTAN Grenzschichtwindkanals konnte dies bei allen drei Modellen gewährleistet werden.

7.1.2. Vorversuch für die Linienquellen

Vor dem Einsatz der Linienquellen wurden Vorversuche hinsichtlich ihrer Dichtigkeit durchgeführt. Dies wurde mit einem Wasserbadtest (Abbildung 7.1) umgesetzt.

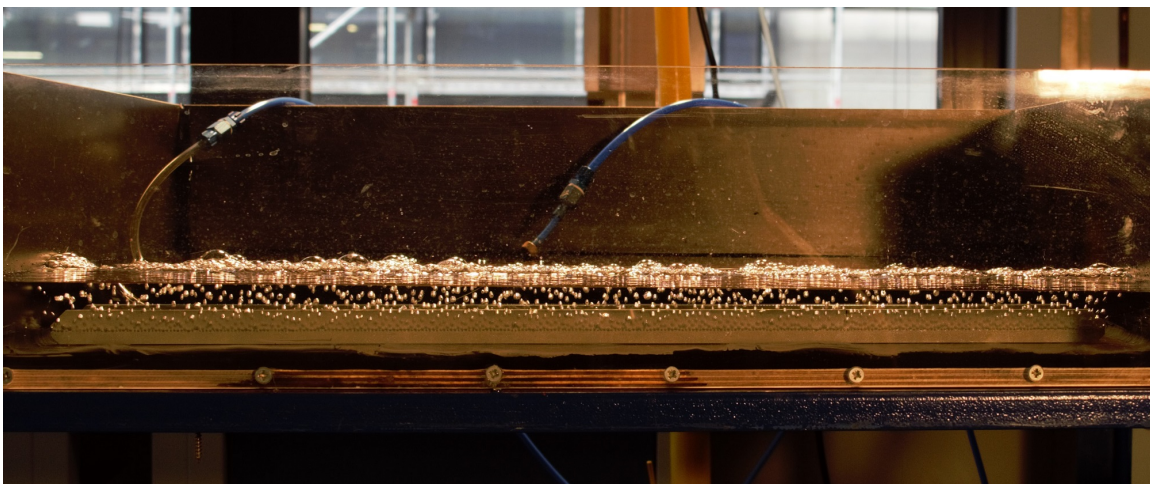


Abbildung 7.1.: Wasserbadtest einer Linienquelle aus dem Ernst-Reuter-Platz-Modell

7.1 Vorversuche

Dabei wird die Linienquelle vollständig unter Wasser gelegt und mit synthetischer Luft durchströmt. Dabei ist sicherzustellen, dass die Luft gleichmäßig aus allen Öffnungen, jedoch nicht an den Verbindungsleitungen und Anschlüssen austritt.

Um die Ergebnisse der Konzentrationsmessungen miteinander vergleichen zu können, muss bei gleicher Durchflussrate der gleiche Druck an allen Linienquellen herrschen. Dabei wird der Durchfluss in [l/h] als Durchflussrate pro Meter Quelllänge angegeben. Zusätzlich soll die Druckdifferenz mit zunehmender Durchflussrate linear ansteigen. In Abbildung 7.2 ist die Durchflussrate gegenüber der Druckdifferenz für alle verwendeten Linienquellen dargestellt. Bei den verwendeten Linienquellen stellt sich bei gleicher Durchflussrate der gleiche Überdruck ein und der erwartete lineare Zusammenhang zwischen Durchflussrate und Druckdifferenz stellt sich ein.

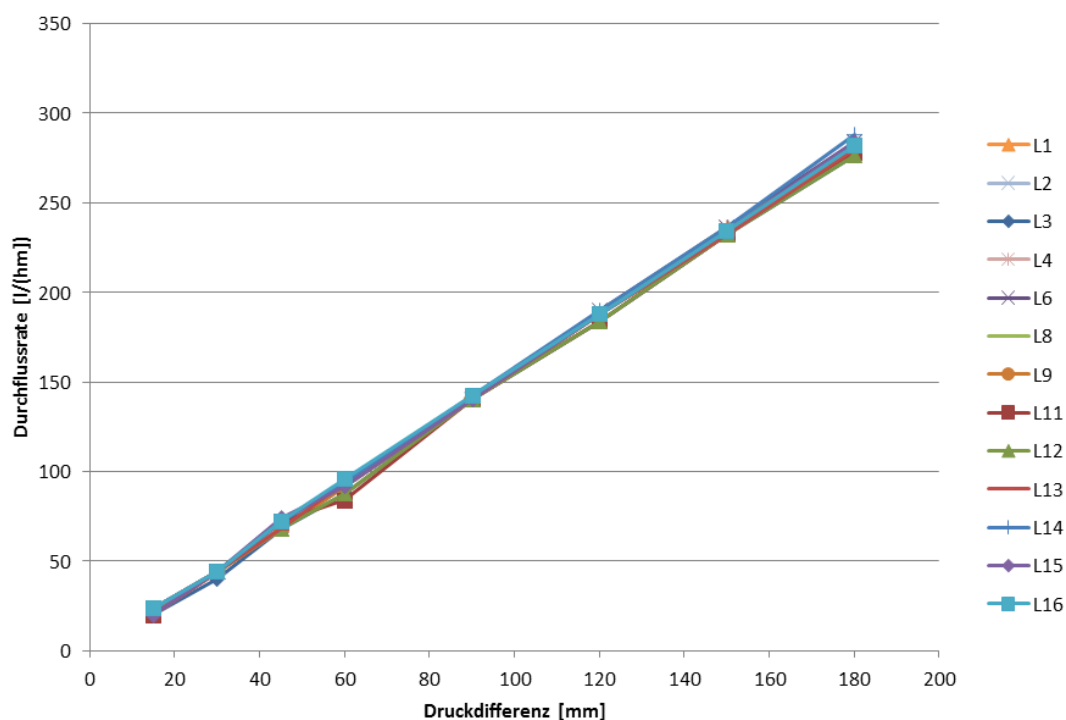


Abbildung 7.2.: Durchflussrate zur Druckdifferenz für alle verwendeten Linienquellen.

7.1.3. Vorversuch für die Punktquelle

Wie für die Linienquellen wurde auch ein spezieller Vorversuch für die Punktquelle durchgeführt. Dazu wurde getestet, ob die nach VDI 3783/12 (2000) entdimensionalisierten Konzentrationsmesswerte unabhängig von der Quellstärke beziehungsweise Freisetzungsmenge sind. In Abbildung 7.3 ist die Quellstärkenunabhängigkeit einer Punktquelle dargestellt. Die dimensionslosen Konzentrationen sind unter Berücksichtigung der bestimmten Messunsicherheit von 6 % nicht von der gewählten Quellstärke abhängig.

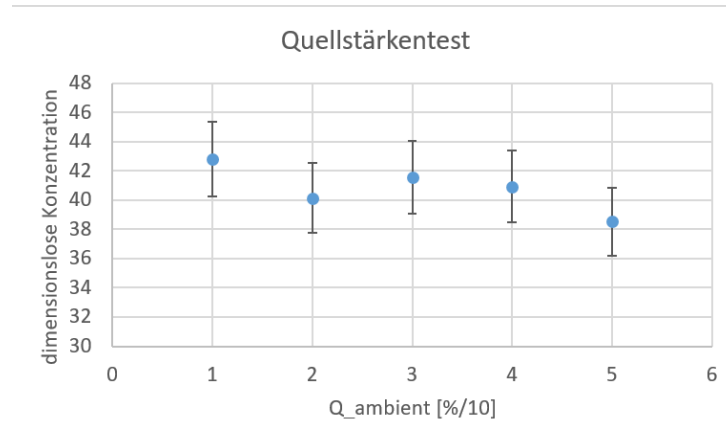


Abbildung 7.3.: Ergebnisse des Quellstärkentests an einem Messort im Stuttgart-Modell

7.1.4. Vorversuche für alle Quelltypen

Nachdem separat auf die jeweiligen Vorversuche für die Linienquellen und für die Punktquelle eingegangen wurde, werden nun die Vorversuche beschrieben, die für beide Quelltypen durchgeführt wurden. Neben einer Überprüfung der Reynoldszahl-unabhängigkeit von Konzentrationsmessungen wurde die Quellmodellierung auch bezüglich einer möglichen Abhängigkeit der Messungen von der verwendeten Tracer-gas -Quellkonzentration und -Quellstärke getestet.

Reynoldszahlenunabhängigkeit dimensionsloser Konzentrationen

Sowohl im Berlin- als auch im Stuttgart-Modell wurden wie bei den Strömungsmes-sungen an mehreren Orten Reynoldszahlenunabhängigkeitstests vorgenommen. Damit wurde untersucht, ob sich unabhängig von der Anströmwindgeschwindigkeit am Mess-ort jeweils die gleiche dimensionslose Messkonzentration einstellt. Die Ethanfreisetzung bleibt dabei konstant. Um die Druckverhältnisse an den im Berlin-Modell verwendeten Linienquellen für verschiedene Reynoldszahlen konstant zu halten und das Mess-signal an den Detektionsbereich der Konzentrationsmesstechnik anzupassen, wurde dem freigesetzten Quellvolumenstrom bei Bedarf ein Teil Stickstoff beigemischt. In Abbildung 7.4 ist der Reynoldszahlenunabhängigkeitstest für einen Messort im Berlin-Modell dargestellt. Die Unsicherheitsbalken entsprechen $\pm 6\%$. Somit zeigt sich, dass bereits bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten die dimensionslosen Immissions-konzentrationen unabhängig von der Reynoldszahl des Modellversuchs sind. Bei der Untersuchung der Punktquelle konnte die Reynoldszahlenunabhängigkeit auch bereits bei sehr kleinen Windgeschwindigkeiten gefunden werden.

Einfluss der Quellstärke auf die dimensionslose Konzentration

Bei diesem Test wurde geprüft, ob unterschiedliche Freisetzungsraten einen Einfluss auf die dimensionslose Konzentration haben. Dieser Test wurde sowohl für das Berlin-

7.2 Qualitätssicherung während des Messens

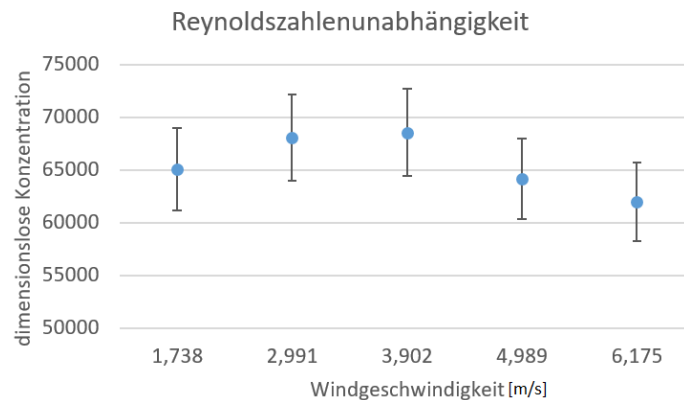


Abbildung 7.4.: Reynoldszahlenunabhängigkeitstest für einen Messort im Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell

Modell als auch für das Stuttgart-Modell an mehreren Orten durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die dimensionslosen Konzentrationen im Rahmen der Messunsicherheit unabhängig von der gewählten Quellstärke sind.

Einfluss der Quellkonzentration auf die dimensionslose Konzentration

Beim dritten Test wird Ethan variiert und die Windgeschwindigkeit konstant gehalten. Damit bei den Linienquellen der Druck ebenfalls konstant bleibt, wurde beim Berlin-Modell zusätzlich der Anteil des Stickstoffs abhängig von dem Ethan-Volumen angepasst. Bei der Auswertung wurde die gleiche dimensionslose Konzentration für verschiedene Ethan-Volumina erwartet. Für das Berlin-Modell ergab sich, dass die Ergebnisse mit $\pm 9\%$ außerhalb der Messunsicherheit lagen. Dies hängt mit der Auflösung des Fast-FIDs und mit den Massendurchflussreglern zusammen. Die vom Fast-FID Immissionskonzentrationen müssen innerhalb des vom Gerät vorgegebenen Messbereichs liegen. Ansonsten werden entweder Konzentrationsspitzen abgeschnitten oder die gemessene Konzentration liegt im Bereich der Hintergrundkonzentration. Auf dieses Problem wird in Kapitel 7.3.3 näher eingegangen. Als schwierig erwies sich bei diesem Test, dass die verwendeten Massendurchflussregler bis an die untere Grenze des Regelbereichs herangeführt werden mussten. Bei den Messungen wurde deswegen besonders darauf geachtet, dass die Massendurchflussregler im mittleren Regelbereich geöffnet waren.

Neben den beschriebenen Vorversuchen wurde auch während der Umsetzung systematischer Messreihen kontinuierlich die Qualität der Messergebnisse überwacht. Mit der Vorgehensweise befasst sich der nächst Abschnitt.

7.2. Qualitätssicherung während des Messens

Für die Gewinnung qualitativ hochwertiger Datensätze ist die Verwendung einer qualifizierten / naturähnlichen Anströmrenzschicht eine notwendige Voraussetzung.

Diese wurde in Kapitel 6 beschrieben. Zusätzlich müssen, wie in Kapitel 7.1 dargestellt, Vorversuche durchgeführt werden, um die Qualität der Daten zu gewährleisten. Ergänzend wurden während des Messens qualitätssichernde Maßnahmen vorgenommen, die im Folgenden beschrieben werden.

Für alle Messversuche im Windkanal wird eine Referenzwindgeschwindigkeit benötigt. Diese wird mit einem Prandtl-Rohr gemessen und mit Hilfe des Differenzdruckwandlers (Model 239, Setra Systems) in ein elektrisches Signal umgewandelt. Zur Qualitätssicherung wurde der Differenzdruckwandler mindestens einmal pro Woche mit Hilfe einer zertifizierten Feindruck-Prüfwaage kalibriert.

Strömungsmessungen mit einem LDA werden von einer Reihe von Messrandbedingungen beeinflusst. Die zeitliche Auflösung der Messreihen und damit auch das räumliche Auflösungsvermögen bei der Erfassung turbulenter Strukturen hängt unter anderem vom Signal-Rausch-Verhältnis der Burst-Signale, dem für die Signalanalyse verwendeten Verfahren sowie von der Anzahl von Seedingpartikeln in der Strömung ab. Durch eine kontinuierliche Anpassung und Optimierung der Messparameter während der Messreihen konnten auch innerhalb der komplexen Stadtmodelle hohe Messdatenraten erzielt werden, die einer räumliche Auflösung turbulenter Strukturen von mindestens 20 bis 30 m im Naturmaßstab entsprachen.

Für die Konzentrationsmessungen mussten das Slow- und Fast-FID regelmäßig kalibriert werden, da Temperatur- und Druckschwankungen Einfluss auf das Messergebnis haben können. Deswegen wurde mindestens zweimal, teilweise dreimal am Tag kalibriert. Neben der Erfassung von Immissionsverteilungen im quasi-stationären Zustand wurden auch Untersuchungen zum Ventilationsverhalten von Stadtstrukturen und zur Quellzuordnung durchgeführt, bei denen Emissionsquellen systematisch zu- und abgeschaltet wurden. Dabei war es wichtig sicherzustellen, dass nach dem Abschalten einer Quelle das Modell zunächst ausreichend lange ventiliert wurde und nicht im Modell verbliebene Reste von Tracergas die nachfolgende Messung beeinflussen. Jeweils unmittelbar nach einer Messung wurden die Messreihen entsprechend analysiert und mögliche Fehlmessungen wiederholt.

Bei den Sanderosionsmessungen wurde darauf geachtet, eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Sandes zu erhalten. Da es mit dem verwendeten Versuchsaufbau nicht möglich ist, eine exakt gleiche Verteilung zu erzeugen, können die Bilder nur qualitativ hinsichtlich der Erosionsmuster ausgewertet werden. Quantitative Rückschlüsse auf die lokale Windgeschwindigkeit sind bei den im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen der Erosionsexperimente nicht möglich und nicht erforderlich, da in der Regel entsprechende Strömungsmessungen mit dem LDA durchgeführt wurden.

7.3. Bearbeitung der Messdaten

In den vorherigen Abschnitten wurden die Vorversuche und die qualitätssichernden Maßnahmen während des Messens beschrieben. Ein weiterer Indikator für qualitätsgeprüfte Daten ist die Zuordnung von Flags. Mit diesen und dem verwendeten Dateinamen befasst sich der nächste Abschnitt. Anschließend wird auf die Bearbeitung der Strömungs- und Konzentrationsmessungen eingegangen.

7.3.1. Dateiname und Qualitäts-Flags für die Strömungsmessungen

Um das Einlesen der Daten zu vereinfachen, wurde bereits vor dem Messen eine Form für den Dateinamen festgelegt. Diese Form ist in Abbildung 7.5 exemplarisch für das Hafencity-Modell dargestellt.

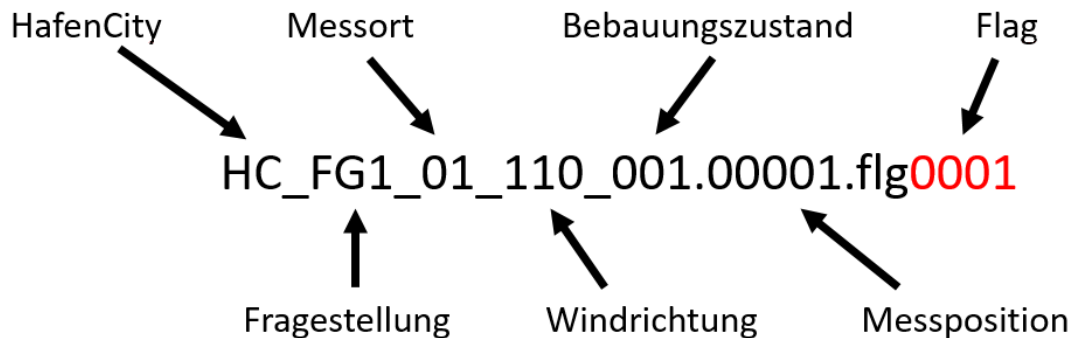


Abbildung 7.5.: Beschreibung der Zusammensetzung des Dateinamens

Die Zeichen vor dem ersten Unterstrich stehen für das gewählte Modellgebiet. Dabei steht HC für Hafencity, ERP für Ernst-Reuter-Platz, ST für Stuttgart und FI für Fichtenberg. Die nachfolgenden ein bis zwei Platzhalter kennzeichnen die gewählte Fragestellung und Messposition bzw. nur für die Messposition. Daran schließt sich, falls variierbar, die Windrichtung in Grad an. Es folgt ein Indikator für den Bebauungszustand. Im Beispiel des Hafencity-Modells kennzeichnet 001 den Zustand von 2017, 003 die für 2023 geplante Bebauung. Eine Ausnahme hiervon bilden die Daten für das Unilever-Haus sowie für den Überseeboulevard, wo 003 die vereinfachte Darstellung der Gebäude kennzeichnet. Für das Unilever-Haus wird noch eine mittlere Detailstufe abgebildet, die mit 005 bezeichnet wird. Zur Markierung von Wiederholungsmessungen wurden gerade Zahlen gewählt. So steht die 002 für eine Wiederholungsmessung im Bebauungszustand von 2017 und 004 für eine Wiederholungsmessung im Bebauungszustand von 2023 bzw. für eine Wiederholungsmessung der vereinfachten Gebäudedarstellung. Beim Ernst-Reuter-Platz-Modell und beim Stuttgart-Modell gibt es nur einen Bebauungszustand (001 bzw. 01) und eine mögliche Wiederholung (002 bzw. 02). Der letzte Abschnitt steht für die Qualitäts-Flags. Dafür unterläuft jede Messzeitreihe vier Qualitätskontrollen. Falls eine der Zeitreihen bei einer der Kontrollen auffällt, erhält diese Messung den jeweiligen Qualitäts-Flag.

Folgende Qualitäts-Flags wurden vergeben:

- Flag1000: Intermittenz der Zeitserie
- Flag0100: Ensemblegröße pro Zeitserie
- Flag0010: Bandbreite der Spektren der turbulenten kinetischen Energie
- Flag0001: Streuung der Geschwindigkeitskorrelationen

Flag1000: Intermittenz der Zeitserie

Bei der Untersuchung der Intermittenz der Zeitserie wird die Größe der zeitlichen Lücken zwischen zwei Messungen betrachtet. Diese kann auf Grund der Nebelverteilung variieren. Da die Lückengröße von der lokalen Windgeschwindigkeit abhängt, wurden die Abstände mit der lokalen mittleren Windgeschwindigkeit multipliziert. Ein Flag1000 erhielten im Anschluss die Zeitserien, deren 95. Perzentil bei einer angenommenen lokalen Windgeschwindigkeit von 5 m/s zeitliche Lücken von mehr als 5 Sekunden im Naturmaßstab aufweist. Der 5-Sekundenwert wurde verwendet, da dies dem 95. Perzentil aller Messungen entspricht.

Bei Verwendung der Zeitserien muss beachtet werden, dass die Zeitserien äquidistant vorliegen. Sie wurden mit einer Sample-and-Hold-Methode äquidistant gerechnet, damit keine künstlichen Minima und Maxima erzeugt wurden. Allerdings wurden durch diese Bearbeitung berechnete Werte hinzugefügt beziehungsweise Messwerte entfernt. Speziell bei sehr ungleichmäßig verteiltem Nebel kann es zu stark bearbeiteten Zeitreihen kommen. Deswegen wurden Daten mit diesem Flag nicht im Rahmen der Böenanalyse ausgewertet.

Flag0100: Ensemblegröße pro Zeitserie

Mit der Ensemblegröße wird die Anzahl der Messzeitpunkte pro Zeitreihe bezeichnet, welche von verschiedenen Parametern abhängt.

Für die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Strömungsmessungen kann in der verwendeten LDA-Software (BSA-Flow, Version 4.50, Dantec Dynamics) unter anderem eine maximale Anzahl von Einzelmessungen und eine maximale Messdauer pro Messpunkt vorgegeben werden. Die Messung wird gestoppt, sobald eines der beiden Abbruchkriterien für eine der beiden gemessenen Komponenten des Windvektors erreicht ist. Dies kann an ungünstigen Messorten zur Folge haben, dass zwar für eine der simultan gemessenen Windkomponenten ein statistisch repräsentatives Messergebnis erzielt wird, das korrespondierende Datenensemble der 2. Komponente jedoch deutlich kleiner ausfällt. Einfluss auf die Ensemblegröße pro Zeitserie hat auch die Anzahl der Messpartikel, die den Messort pro Zeiteinheit passieren. Zum Beispiel werden wegen niedrigeren Windgeschwindigkeiten weniger Nebelpartikel in Hinterhöfen transportiert. Ebenso werden über Dachniveau die Nebelpartikel stärker durchmischt. Mit dem Flag 0100 werden Datenreihen markiert, die die im Rahmen dieser Arbeit festgelegte Mindestanforderung von 5000 Einzelmessungen pro Messort nicht erfüllen.

Flag0010: Bandbreite der Spektren der turbulenten kinetischen Energie

Ein weiterer Parameter, der untersucht wurde, sind die Spektren der turbulenten kinetischen Energie. Dabei werden die Phasen der Energiekaskade (Abschnitt 2.2.2) sichtbar. Der Bereich des Energieeintrages wird durch das Maximum der Spektraldichtefunktion der kinetischen Energie der Turbulenz markiert. Der Energietransferbereich zeichnet

sich durch eine $-5/3$ Steigung aus, die auch Kolmogorov'sches $k^{-5/3}$ -Gesetz genannt wird (Stull, 2009).

Bei der Qualitätsprüfung wurde zum einen kontrolliert, ob die Spektren ein eindeutiges Maximum aufweisen, zum anderen, wie groß die kleinsten Wirbel sind, und zusätzlich, ob die Energiedichte nach dem Maximum kontinuierlich abnimmt. Speziell bodennah ist es aufgrund der Verteilung von Messpartikeln oft schwierig, kleinste Wirbel in der Strömung aufzulösen.

Die Größe der kleinstmöglichen Wirbel hängt unter anderem vom Maßstab des Modells ab. Je kleiner der gewählte Modellmaßstab ist, umso größer ist der Zeitmaßstab zwischen Modell- und Natumaßstab. Im Weiteren hängt die Wirbelgröße von der Windgeschwindigkeit ab. Je niedriger die Windgeschwindigkeit, desto leichter ist es mehrere Messpunkte innerhalb eines Wirbels zu messen. Dabei besagt das Nyquist-Abtasttheorem, dass mindestens vier Punkte (Stull, 2009) eines Wirbels gemessen werden müssen, um diesen vollständig zu erfassen.

Daten mit diesem Flag sind nur bedingt und unter Berücksichtigung der begrenzten zeitlichen Auflösung für Zeitreihenanalysen geeignet.

Flag0001: Streuung der Geschwindigkeitskorrelationen

Im Weiteren wurde die Streuung der Geschwindigkeitskorrelation überprüft. An festen Modelloberflächen reflektiertes Laserlicht kann das Signal-Rausch-Verhältnis des Messsignals verschlechtern und zu einer größeren Streuung der gemessenen Geschwindigkeitswerte führen. Trotz der sehr zuverlässigen Signalaufbereitung und Filterung der Ergebnisse im verwendeten BSA-System können in Ausnahmesituationen deutlich zu hohe oder zu niedrige Geschwindigkeitswerte gemessen werden. Dadurch wird die Statistik der Extremwerte verfälscht. Entsprechende Messreihen werden mit dem Flag0001 gekennzeichnet und zum Beispiel im Rahmen der Böenanalyse nicht berücksichtigt.

7.3.2. Bearbeitung der Strömungsmessungen

Für eine erste Auswertung der Strömungsmessdaten gibt es innerhalb der EWTL Arbeitsgruppe zwei Softwarepakete. Das eine wurde von Fischer (2011) und das andere von Erdmann (2017) entwickelt. Innerhalb dieser Arbeit wurde die Software von Erdmann (2017) verwendet, um einen ersten Eindruck der Messungen zu erhalten und bereits während des Messvorgangs feststellen zu können, ob eine Messung wiederholt werden muss.

Nach dem Messen wurden die Daten vereinheitlicht. Dazu wurden sie zunächst dimensionslos gerechnet. Dies musste sowohl für die Zeit als auch für die Windgeschwindigkeiten getan werden.

Die Formeln für die Windgeschwindigkeit und die Zeit sind:

$$u = \frac{u}{u_{ref} \cdot f_{sc}} \quad (7.1)$$

$$t = t \cdot 0.5 \cdot u_{ref} \cdot f_{sc} \quad (7.2)$$

Dabei ist u_{ref} die Referenzwindgeschwindigkeit am Prandtl-Rohr und f_{sc} der Skalierungsfaktor. Der Skalierungsfaktor wird aus den Einströmprofilen berechnet. Dazu wird zunächst eine Bezugshöhe in Naturmaßstab und eine Bezugslänge benötigt. Die Bezugshöhe wurde auf 50 m und die Bezugslänge auf 1 m gesetzt. Für das Hamburg-Modell ergab sich ein Skalierungsfaktor von $0,48 \pm 0,02$, für das Berlin-Modell ein Faktor von $0,44 \pm 0,02$ und für das Stuttgart-Modell ein Skalierungsfaktor von $0,51 \pm 0,01$. Die Unterschiede im Skalierungsfaktor ergeben sich durch die unterschiedlichen Einströmprofile der jeweiligen Modelle. Dabei wurden bei den Modellen von Hamburg und Berlin alle Profile in Anströmung für die Berechnung des Skalierungsfaktors verwendet, um die Unterschiede, die sich im Windkanal ergeben, herauszumitteln. Im Gegensatz dazu wurden im Stuttgart-Modell nur die Profile auf dem Plateau vor dem Modellgebiet genommen. Die Profile vor der Rampe waren durch die Rampe und die Profile über dem Modellgebiet durch das Modellgebiet beeinflusst.

Nach dem Entdimensionalisieren der Daten wurden mit dem 5-Sigma-Kriterium Ausreißer gelöscht. Fehlmessungen können u.a. durch Staubpartikel, zu hohe Signalverstärkung oder durch Rückstreuung von Laserlicht an festen Modelloberflächen erzeugt werden.

Nach Löschung der Ausreißer wurden mit der Sample-and-Hold-Methode die Messungen äquidistant gerechnet. Diese Methode wurde von Fischer (2011) geprüft und ebenfalls von Schliffke (2018), dessen Programmcode für die Berechnung der äquidistanten Zeitreihen verwendet wurde, genutzt.

7.3.3. Bearbeitung der Konzentrationsmessungen

Zur besseren Vergleichbarkeit der Daten wurden die Daten mit folgender Formel dimensionslos gerechnet:

$$c^* = \frac{c \cdot u_{ref} \cdot L_{ref}^n \cdot L}{Q} \quad (7.3)$$

c^* steht für die dimensionslose Konzentration und c für die gemessene Konzentration. u_{ref} ist die Referenzwindgeschwindigkeit und L_{ref}^n die Referenzlänge. Hierbei wurde bei Linienquellen im Berlin-Modell $n = 1$ und bei der Punktquelle im Stuttgart-Modell $n = 2$ gesetzt. Das L steht für die Länge der Linienquelle und wird nur für Linienquellen benötigt. Geteilt wird alles durch den Emissionsmassenstrom Q . (VDI 3783/12 (2000))

Durch die Verwendung dimensionsloser Daten wurde der Vergleich zwischen den Messorten ermöglicht. Zusätzlich erleichtert dies das Umrechnen der Messwerte mit in der Natur gemessene Emissionen von Hauptverkehrsstraßen. Da in dieser Arbeit keine Vergleiche zu Naturdaten vorgenommen werden, wird dies nicht benötigt. Ebenso wie bei den Strömungsmessungen lag der Fokus auf der Vergleichbarkeit der Messorte.

Bei der Berechnung der Konzentrationen wurde zunächst die Hintergrundkonzentration von den jeweiligen gemessenen Konzentrationen abgezogen. Obwohl regelmäßig kalibriert wurde, konnte keine exakte Übereinstimmung zwischen dem Slow- und Fast-FID erzielt werden. Der Unterschied lag bei ungefähr 0,5 ppm und konnte kurz vor einer Neukalibrierung bis auf 2 ppm ansteigen. An Orten mit hohen Konzentrationen war dieser Einfluss gering. Da aber bei Messorten mit geringen Konzentrationen der Einfluss sehr groß sein kann, wurden Wiederholungsmessungen an diesen Orten direkt nach einer Kalibrierung durchgeführt, um diesen Fehler möglichst gering zu halten. Bei der Berechnung der dimensionslosen Konzentrationen wurden alle Messwerte, die durch die Differenz der Hintergrundkonzentration negativ wurden, Null gesetzt. Diese Korrektur betraf in der Regel wenige Werte und die negativen Abweichungen der hintergrundbereinigten Konzentration lagen im Bereich der Messunsicherheit.

Schwierigkeiten beim Filtern der Daten

Bei der Qualitätsprüfung der Daten hat bereits Fischer (2011) festgestellt, dass es bei den Konzentrationsdaten im Vergleich zu den Strömungsdaten sehr kompliziert ist, die Ausreißer herauszufiltern. Ausreißer entstehen bei Konzentrationsmessungen dadurch, dass sich brennbare Teilchen im Windkanal befinden, die vom Fast-FID eingezogen werden und dort verbrennen. Bereits beim Messen wurde darauf geachtet, dass möglichst wenige Ausreißer entstehen. Außerdem wurde der Wertebereich beim Messen so eingestellt, dass er bereits durch die freigesetzten Konzentrationen gut ausgefüllt war. Dies hat den Vorteil, dass Ausreißer nur einen sehr geringen Einfluss auf die mittlere Konzentration haben. Bei der Qualitätsprüfung wurde anschließend darauf verzichtet, Ausreißer systematisch aus den Datensätzen zu entfernen. Stattdessen wurde bei der Auswertung der Konzentrationen das 5. und das 95. Perzentil anstelle der absoluten Maximal- und Minimal-Werte verwendet. Beim 5. Perzentil hat dies den weiteren Vorteil, dass nicht nur gezeigt werden kann, ob frische Luft an diesem Standort eingebracht wurde, sondern auch wie groß der Anteil im Vergleich zu anderen Messorten ist. Zusätzlich sind das 5. und das 95. Perzentil deutlich stabiler und somit weniger unsicherheitsbehaftet als der Maximal- und Minimal-Wert.

7.4. Auswerteskripte

Nach der beschriebenen Bearbeitung der Daten liegen die Messzeitserien jetzt qualitätsgeprüft und dimensionslos vor. Im folgenden Abschnitt werden die Skripte beschrieben, die für die Auswertung der Messdaten in der vorliegenden Arbeit verwendet wurden. Dabei wird zunächst auf die Böenanalyse und dann auf die Skripte für die Auswertung der Immissionsdaten eingegangen.

7.4.1. Böenanalyse

Für die Auswertung der Grenzschicht ist das Skript von Schliffke (2018) für die hier verwendeten Daten und Vorstellungen angepasst worden.

Im Weiteren wurde das Python-Skript von Kock (2018) verwendet und angepasst, um die Turbulenzintensitäten, Mittelwerte und Windrosen auf die Grundrisse der Modelle zu plotten.

Das 5., 50. und 95. Perzentil wurde jeweils mit dem Numpy-Paket und der Funktion „percentile“ (*numpy.percentile* 2019) berechnet. Diese Funktion wird auch in den Masterarbeiten von Schliffke (2018) und Kock (2018) verwendet.

Bei der Auswertung der Strömungsmessungen für die Böenanalyse ist zunächst die zeitliche Auflösung der Zeitreihen berechnet worden. Beim Einlesen der Zeitreihen wurde bereits berücksichtigt, dass nur Messdaten verwendet werden, die kein Flag in der Streuung der Geschwindigkeitskorrelation und keines in der Intermittenz (kurz flg0???) aufweisen. Anschließend wurden sie auf die unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten in der Anströmung umgerechnet und die dimensionslose Zeit durch die gewünschte Windgeschwindigkeit geteilt und mit 1 m charakteristische Länge multipliziert. Die dimensionslosen Windgeschwindigkeiten wurden mit der gewünschten Windgeschwindigkeit multipliziert. Danach wurde die Anzahl der 10-Minuten-Intervalle und der zeitliche Abstand zwischen zwei Messpunkten berechnet. Dafür kamen folgende Formeln zur Anwendung:

```
n_rows_aver = np.floor(t_data[-1]/time_average)
blocksize = int(np.floor(np.size(t_data)/n_rows_aver))
```

Hier steht `t_data` für die Zeitdaten der Zeitserie und `time_average` für die jeweilige gewünschte Mittelungszeit. Für die Auswertung wurde über die Anzahl der 10-Minuten-Intervalle aller Messpunkte gemittelt. Im Anschluss wurden die zeitlichen Abstände als Boxplots dargestellt. (*pandas.DataFrame.boxplot* 2019)

Bei der Darstellung aller Böenfaktorwerte wurden nur Daten mit flg0???) verwendet. Die Daten wurden auf die gewünschte Windgeschwindigkeit in der Anströmung umgerechnet. Zur Berechnung des Böenfaktors gibt es fünf Skriptvarianten. Variante 1 ermittelt den Böenfaktor. Variante 2 ermittelt zuerst die 3-Sekunden-Mittelwerte, bevor sie den Böenfaktor berechnet. Variante 3 untersucht, ob der Unterschied zwischen der Maximalböe und dem Mittelwind 5 m/s beträgt, und rechnet danach den Böenfaktor aus. Bei der vierten Variante werden die einschränkenden Kriterien für eine Böe nach der Definition des DWDs angewendet und die fünfte Variante ermittelt vor der Definition des DWDs zunächst den 3-Sekunden-Mittelwert. Eine weitere Variante berechnet das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung. Im Rahmen dieser Arbeit werden allerdings die Ergebnisse mit den 3-Sekunden-Mittelwerten nicht verwendet. Der Quellcode der einzelnen Varianten befindet sich im Anhang C.

Jede Skriptvariante erstellt am Ende eine Darstellung aller Daten und eine Darstellung der Messwerte mit einer Höhe ≤ 10 m.

Für die gemittelte Abbildung wurde zusätzlich die Böenfaktorwerte in 0,5er Schritte aufgeteilt und anschließend gemittelt:

```
df_now['10min Wind'] = df_now['10min Wind'] * 2
df_now = df_now.round({'10min Wind':0})
df_now['10min Wind'] = df_now['10min Wind'].div(2)
df_now = df_now.groupby(['Ort', '10min Wind'])['Ort',
                                             'boenfaktor', '10min Wind'].mean()
```

Verwendet wurde dafür Pandas Version 0.23.4. (*pandas: powerful Python data analysis toolkit* 2019) Hierbei wird kaufmännisch gerundet.

Zur Darstellung der Häufigkeit der Böen musste das Skript so angepasst werden, dass nicht nur ein Wert pro Variante, sondern auch die Anzahl der Böen ausgegeben wird. Hierfür wurde speziell die Variante 5 angepasst und anschließend die Anzahl aufsummiert (siehe Skript in Anhang C).

7.4.2. Analyse verkehrserzeugter Immissionen

Zur Auswertung der verkehrserzeugten Immissionen wurde das MATLAB-Skript von Berbekar (2016) verwendet. Dieses wurde dahingehend angepasst, dass es die dimensionslosen Konzentrationen und das 50. Perzentil der Konzentrationen in eine Excel-Tabelle und zusätzlich die dimensionslosen Konzentrationen als Zeitserien in eine Textdatei ausgibt. Außerdem musste die Formel zur Berechnung der dimensionslosen Konzentrationen für die Messwerte aus dem Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell angepasst werden, da Berbekar (2016) mit Punktquellen und nicht mit Linienquellen gearbeitet hat. Im Weiteren wurden negative Konzentrationen, wie in Abschnitt 7.3.3 beschrieben, gleich Null gesetzt.

Die Veranschaulichung der Ergebnisse erfolgte zum einen mit Python (v 3.6) und zum anderen mit MegaCAD (v.2018).

Zur tiefergehenden Analyse der Ergebnisse wurden mit Python (v 3.6) die Zeitreihen und die halb-logarithmischen Häufigkeitsverteilungen dargestellt. Die halb-logarithmische Darstellung wurde deswegen gewählt, da hier besonders Konzentrationen betont werden, die selten auftreten. Dabei wurden die Klassen nach einem Verfahren, welches von Fischer (2011) verwendet worden ist, berechnet. Ebenso wie bei den Strömungsmessungen wurde das 5., 50. und 95. Perzentil mit dem Numpy-Paket und der Funktion „percentile“ berechnet.

Für die Auswertung der zeitlichen Repräsentativität der verkehrserzeugten Immissionen wurden die mit MATLAB erstellten dimensionslosen Zeitreihen der Messdaten mit Python eingelesen. Danach wurde die Zeit durch 5 m/s geteilt und mit 1 m charakteristische Länge multipliziert, um die Daten auf Naturmaßstab mit 5 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung umzurechnen. Um Minutenwerte zu erhalten, wurden die Daten zusätzlich durch 60 geteilt. Die verwendeten Mittelungszeiten waren 0, 5, 10, 30, 60, 120 und 240 Minuten. Mit der gleichen Formel wie bei den Strömungsmessungen wurden die Anzahl der Reihen pro Intervall und die Anzahl der Intervalle berechnet. Anschließend wurde für jedes Intervall das 50. Perzentil ermittelt. Zum Schluss wurde von allen

Intervallen das 5., 50. und 95. Perzentil auf eine Karte geplottet. Für die Berechnung der Perzentile wurde wieder das Numpy-Paket verwendet.

7.5. Statistische Auswerteverfahren

Im vorherigen Abschnitt wurden die Skripte für die Auswertungen der Messungen beschrieben. Dieser Abschnitt soll auf die verwendeten statistischen Auswerteverfahren näher eingehen. Dabei werden bei der Auswertung sogenannte Boxplots verwendet, die mit dem Softwarewerkzeug *Python 3.6.0* (2016) erzeugt wurden. In dem verwendeten Python Paket markiert die Box den Bereich der Werte vom 25. bis 75. Perzentil und der Strich in der Mitte das 50. Perzentil. Die sogenannten Whisker enden bei $1,5 \cdot \text{IQP}$, wobei IQP die Differenz zwischen dem 25. und 75. Perzentil ist (*pandas.DataFrame.boxplot* 2019). Mit schwarzen Kreisen werden die Werte dargestellt, die außerhalb des durch Box und Whisker markierten Wertebereichs liegen.

Konzentrationsmessungen sind meistens nicht nach Gauß normalverteilt, weshalb der arithmetische Mittelwert nicht dem am häufigsten gemessenen Wert entspricht. Deswegen wird in dieser Arbeit statt des arithmetischen Mittelwertes das 50. Perzentil betrachtet. Bei den durchgeführten Strömungsmessungen sind die Messwerte in den Zeitreihen überwiegend normalverteilt. Deshalb wurde bei der Auswertung das arithmetische Mittel verwendet.

Sowohl bei den Böenanalysen als auch bei den Konzentrationsuntersuchungen wurde für die Auswertung das 5. und 95. Perzentil verwendet. Im Vergleich zum Minimum und Maximum ist das 5. und 95. Perzentil statistisch repräsentativer. Aufgrund endlicher Messdauer ist es möglich, dass sowohl bei den Konzentrationsmessungen als auch bei den Strömungsmessungen die absoluten Maximal- und Minimalwerte nicht gemessen wurden. Daraus resultiert eine höhere Unsicherheit bei diesen beiden Werten. Bei den Konzentrationsmessungen ergibt sich durch Verwendung des 5. Perzentils der Vorteil, dass damit die niedrigsten Konzentrationen betrachtet werden. Also wird nicht nur geprüft, ob an einem Ort Frischluft ankommt.

Das 5. und 95. Perzentil wird ebenfalls für die Berechnung der Unsicherheiten verwendet. Diese Berechnung wird im nächsten Abschnitt erläutert.

7.5.1. Bestimmung der Messunsicherheiten

Wie bereits beschrieben, wurden viele Maßnahmen unternommen, um möglichst qualitativ hochwertige Daten zu erhalten. In diesem Abschnitt wird auf die Berechnung der Messunsicherheit eingegangen.

Bei Windkanalmessungen treten zum Beispiel durch die sich täglich ändernden Umgebungsbedingungen im Labor Unsicherheiten auf. Bei sehr trockenen Bedingungen lösen sich die Nebelpartikel deutlich schneller als an Tagen mit hoher Luftfeuchtigkeit auf. Da, wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, der Referenzdruck mit Hilfe von Druckunterschieden gemessen wird, haben Luftdruckschwankungen und daraus resultierende Änderungen

der Luftdichte einen Einfluss auf die Messungen. Luftdruckschwankungen können u.a. bei einem Frontdurchgang zu signifikanten Dichteunterschieden führen, weshalb der Umgebungsdruck regelmäßig mit Hilfe eines Stationsbarometers gemessen und ggf. in der Messdatenerfassungssoftware aktualisiert wurde. Das Windkanallabor der Universität Hamburg befindet sich in einem temperierten Kellerraum und die Luft in den Strömungskanälen zirkuliert in den Laborräumen, so dass der Einfluss von Temperaturschwankungen auf die Luftdichte während einer Messung im Allgemeinen vernachlässigbar klein bleibt. Dennoch wird auch die Raumlufttemperatur mehrmals täglich kontrolliert und in der Messdatenerfassung aktualisiert.

Weiterhin trägt jedes Messgerät zur Gesamtunsicherheit einer Messung bei. So wird zum Beispiel die Messgenauigkeit von Strömungsmessungen mittels LDA von dessen räumlicher Auflösung, d.h. der Größe des Messvolumens oder auch von der Lage des Messortes und der Orientierung des Messvolumens im Strömungsraum beeinflusst. Beim Prandtl-Rohr, welches mindestens einmal pro Woche kalibriert wurde, ergeben sich weitere Unsicherheitsquellen. Zusätzlich kann die Homogenität des Seedings der Strömungsluft unter Umständen die Messgenauigkeit beeinflussen. Während Messungen wurde die Zufuhr von Messpartikeln durch verschieben der außerhalb des Windkanal positionierten Nebelmaschine entsprechend optimiert.

Da die Bestimmung der exakten Unsicherheiten oft schwer ist und durch die Traverse und das Drehen des Modellgebietes weitere hinzukommen, wurden an mehreren Stellen Wiederholungsmessungen vorgenommen und mit diesen die Messunsicherheit berechnet.

Hamburg

In der HafenCity wurden insgesamt 316 Wiederholungsmessungen durchgeführt. Allerdings wurde bei der Berechnung der Messunsicherheiten festgestellt, dass es zum Teil deutlich höhere Abweichungen zwischen zwei Datensätzen gab, wenn mindestens einer davon bei der Qualitätsprüfung bereits negativ aufgefallen war. Diese Daten wurden für die Berechnung der Unsicherheit nicht herangezogen, sodass 13 Wiederholungsmessungen nicht verwendet werden konnten.

Im HafenCity-Modell wurde zwischen einzelnen Bebauungszuständen gewechselt. Zwischendurch sind zusätzlich Sanderosionsuntersuchungen durchgeführt worden. Beim Vergleich von Messungen mit dem Bebauungszustand von 2017 am Beginn und am Ende der Messkampagne wurden große Unterschiede sichtbar. Diese Wiederholungsmessungen wurden verwendet.

Berlin und Stuttgart

Sowohl im Berlin-Modell als auch im Stuttgart-Modell wurden insgesamt deutlich weniger Messungen als im Hamburg-Modell vorgenommen, sodass insgesamt auch weniger Wiederholungsmessungen stattfanden. Generell zeigten sich keine signifikanten Unterschiede bei den Messunsicherheiten zwischen den drei Modellen.

Bei den Konzentrationsmessungen wurde die gleiche Herangehensweise wie für die Strömungsmessungen gewählt. Damit ergaben sich für beide Modelle jeweils mehrere Messungen an verschiedenen Orten. Da in dieser Arbeit jedoch nur die Daten

vom Berlin-Modell ausgewertet wurden, wird die Unsicherheit nur aus diesen Daten berechnet.

Messunsicherheiten der einzelnen Messgrößen

Bei den Strömungs- und Konzentrationsmessungen wurde sowohl die absolute als auch die relative Unsicherheit für jeden Parameter separat für jedes Modell berechnet. Für die Auswertung wurde überwiegend das 95. Perzentil betrachtet, da einzelne Ausreißer durch die besondere Lage des jeweiligen Messpunktes verursacht worden sind. Das 95. Perzentil ergibt somit einen robusten Fehlerwert. Abhängig von dem Bereich an möglichen Werten wurde ein absoluter Wert oder ein relativer Wert für die Unsicherheit verwendet. Der unterschiedliche Einfluss, der durch die Verwendung des relativen beziehungsweise absoluten Fehlers entsteht, ist in der Arbeit von Berbekar (2016) ausführlich erläutert. Da bei den Konzentrationsmessungen große Unterschiede für die dimensionslosen Konzentrationen auftreten können, wurde hier ab einem festen Grenzwert ein absoluter Fehler verwendet. Die relative Unsicherheit lag bei $\pm 6\%$. Bis zu einem Messwert der dimensionslosen Konzentrationen von $\leq 500 [-]$ wurde eine absolute Unsicherheit von $500 [-]$ verwendet.

Für den dimensionslosen horizontalen Wind wurde eine relative Unsicherheit von $\pm 2,5\%$ und eine absolute Unsicherheit von $\pm 0,01$ bestimmt. Ein absoluter Fehler von $\pm 0,01$ wurde auch für das 5., 50. und 95. Perzentil festgelegt. Die relativen Unsicherheiten liegen beim 5. Perzentil bei $\pm 4,5\%$, beim 50. Perzentil bei $\pm 2,5\%$ und beim 95. Perzentil bei $\pm 1,9\%$. Die Turbulenzintensitäten haben eine relative Unsicherheit von $\pm 2\%$ und das integrale Längenmaß von $\pm 30\%$.

Bei den turbulenten Flüssen zeigte sich, dass diese im Modellgebiet deutlich größer als im Rauigkeitsfeld sind, sodass für die Messungen im Rauigkeitsfeld die Unsicherheiten aus dem Modellgebiet nicht verwendet werden konnten. Für die turbulenten Flüsse im Rauigkeitsfeld wurde eine relative Unsicherheit von $\pm 5\%$ angenommen.

Die Unsicherheit beim Böenfaktor liegt bei $\pm 0,2$ für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe und $\pm 0,4$ für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe. Für die Häufigkeit der Böen beträgt die absolute Unsicherheit bei der Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s $2,5$ Böen pro Messzeitraum und bei 17 m/s 19 Böen pro Messzeitraum.

Kapitel 8

Böenanalyse

Nachdem im Kapitel 7 die Qualitätsprüfung und die Bearbeitung der Messdaten beschrieben wurde, werden im Folgenden die Strömungsdaten hinsichtlich der Böigkeit ausgewertet. Dazu wurden folgende Forschungsfragen formuliert:

„Gibt es einen festen Parameter, der städteübergreifend für verschiedene Anströmwindgeschwindigkeiten genutzt werden kann?“

„Wie verhält sich der untersuchte Parameter bodennah und an welchen Orten können kritische Böenwindgeschwindigkeiten erreicht werden?“

„Welchen Einfluss haben die bei der Definition einer Böe gemäß DWD verwendeten Annahmen und Einschränkungen auf die berechneten Faktoren?“

„Welchen Einfluss hat eine geringfügige Windrichtungsänderung? Wie stark ist der Effekt von Bäumen? Wie groß ist die Auswirkung der verwendeten Detailgenauigkeit der Gebäude für die Modellierung?“

Der folgende Abschnitt befasst sich mit der Auswahl der Daten und der Anströmwindgeschwindigkeit.

8.1. Auswahl der Daten und der Anströmwindgeschwindigkeit

Wie im Kapitel 7 beschrieben, wurden den im Windkanalversuch gemessenen Zeitreihen Flags hinzugefügt. Für die folgende Auswertung wurden Strömungsdaten der Modelle HafenCity, Ernst-Reuter-Platz und Stuttgart verwendet, wenn für diese kein Datenflags für die Intermittenz und die Streuung der Geschwindigkeitskorrelationen gesetzt waren. Im Dateinamen der Zeitreihe muss somit an der ersten und letzten Stelle des Qualitäts-Flags eine null stehen (flg0??0). Daraus resultiert, dass von 4411 gemessenen Zeitreihen nur 3949 in die Auswertung einfließen. Da besonders die bodennahen Ergebnisse

interessieren, wurden für einen Teil der Auswertung nur Messhöhen ≤ 10 m über Grund betrachtet. Hierfür reduziert sich das zur Verfügung stehende Datenensemble auf 1744.

Die Daten liegen dimensionslos und zeitäquidistant vor und können auf eine Vielzahl von Windgeschwindigkeiten in der Anströmung umgerechnet werden. Eine Ausnahme bilden dabei sehr schwache Winde, da bei diesen die Strömung laminar werden kann, und sehr starke Winde, da dann unter Umständen die Kompressibilität des Strömungsmediums nicht mehr vernachlässigt werden kann. Die zeitliche Auflösung der Messzeitserie ist dabei von der Anströmwindgeschwindigkeit abhängig. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten strömen die Wirbel deutlich langsamer als bei hohen Windgeschwindigkeiten am Messort vorbei. Für die im Windkanal gemessene Zeitreihe ergibt sich, dass bei niedrigeren Anströmwindgeschwindigkeiten die Zeitserie einen längeren Zeitraum abbildet. Allerdings entstehen große zeitliche Lücken zwischen den einzelnen Messungen. Im Gegensatz dazu werden die Wirbel bei hohen Windgeschwindigkeiten deutlich schneller am Messort vorbeigetragen, sodass die gemessene Zeitserie einen kürzeren Zeitraum abbildet. Dafür aber sind die zeitlichen Abstände zwischen den Messungen ebenfalls kürzer.

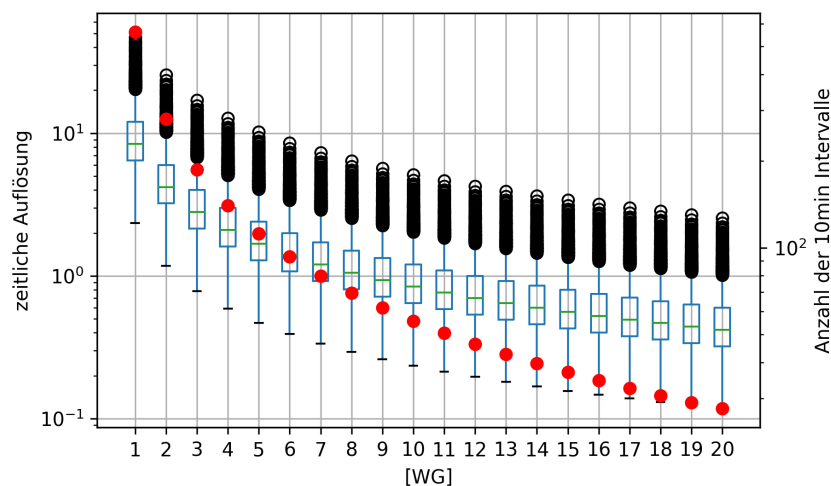


Abbildung 8.1.: Zeitliche Auflösung der Zeitreihen in Sekunden (boxplot) und die gemittelte Anzahl der 10-min-Intervalle (rote Punkte) für verschiedene Windgeschwindigkeiten [WG] in m/s für alle Daten mit $flg0??0$

Um zu entscheiden, welche Windgeschwindigkeit (WG) für die Auswertung verwendet werden soll, wurde in Abbildung 8.1 die zeitliche Auflösung der Zeitreihen abhängig von der Windgeschwindigkeit als Boxplots dargestellt. Zusätzlich wurde die mittlere Anzahl der 10-min-Intervalle eingetragen. Bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten ergibt sich zwar eine sehr hohe Anzahl von Intervallen, aber die zeitliche Auflösung der auf die Natur umgerechneten Daten mit im Mittel 8 Sekunden ist eher gering. Bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten ist die zeitliche Auflösung in fast allen Datenreihen kleiner als 1 Sekunde. Jedoch stehen dann bei den meisten Zeitreihen weniger als 30 Intervalle zur Auswertung zur Verfügung. Um möglichst viele Intervalle auswerten zu können, sollte eine möglichst niedrige Windgeschwindigkeit gewählt werden. Dabei darf die schlechteste zeitliche Auflösung nicht größer als 7 Sekunden sein, damit beim DWD-Kriterium zumindest drei Werte in die Betrachtung eingehen. Dies ist bei 8 m/s

erfüllt. Um den Einfluss der Anströmgeschwindigkeit auf die Simulationsergebnisse untersuchen zu können, wurde als zweite Referenzwindgeschwindigkeit 17 m/s gewählt. Bei dieser Anströmwindgeschwindigkeit wird der zeitliche Verlauf der Windgeschwindigkeit mit Samplingintervallen von maximal 3 Sekunden noch hinreichend aufgelöst.

Bei der Wahl der Bezugsgeschwindigkeiten wurde somit nicht die in den jeweiligen Städten vorherrschende, sondern eine einheitliche Windgeschwindigkeit verwendet, um die Wirkung unterschiedlicher Stadtstrukturen auf die Böigkeit des Windes besser herauszuarbeiten.

8.2. Auswertung des Böenfaktors

Nachdem beschrieben wurde, welche Daten und welche Anströmwindgeschwindigkeiten für die Auswertung verwendet worden sind, soll dieser Abschnitt die Frage klären, ob es einen festen Böenfaktor gibt, der städteübergreifend für verschiedene Anströmwindgeschwindigkeiten genutzt werden kann.

Dazu wurden zunächst für alle ausgewählten Daten der Böenfaktor und der dazugehörige 10-min-Wind berechnet. In Abbildung 8.2 ist der Böenfaktor gegenüber dem 10-min-Wind für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe aufgetragen. Die Daten des Hamburg HafenCity-Modells wurden unterteilt in die Daten vom Bebauungszustand von 2017 (blau) und in die vom Bebauungszustand von 2023 (orange). Zusätzlich sind die Daten vom Ernst-Reuter-Platz in grün und die Ergebnisse von Stuttgart in rot dargestellt. Die durchgezogene schwarze Linie entspricht einem Böenfaktor von 1,5. Dieser Wert wurde von Karran (2015) aus Daten des DWDs berechnet und entspricht dem deutschlandweiten Mittelwert für starke Winde. Jedoch bemerkt der Autor, dass lokal auch Böenfaktorwerte von 4 oder 5 auftreten können.

In Abbildung 8.2 zeigt sich zunächst, dass städteunabhängig mit zunehmender mittlerer Windgeschwindigkeit der Böenfaktor abnimmt. Außerdem lässt sich erkennen, dass besonders bei niedrigen Windgeschwindigkeiten der Böenfaktor einen großen Streubereich aufweist. Dies weist darauf hin, dass kein fester Böenfaktor bestimmt werden kann. Ebenso ist die Zuordnung eines Böenfaktors zu einer mittleren lokalen Windgeschwindigkeit nicht möglich. Im Vergleich zum deutschlandweiten Mittelwert (Karran, 2015) fällt auf, dass ein Böenfaktor von 1,5 selbst in doppelter Gebäudehöhe in den drei Städten nur sehr selten auftritt. Die lokalen Werte von 4 oder 5 werden allerdings in den Städten bei niedrigen mittleren Windgeschwindigkeiten häufiger erreicht. Im Weiteren werden keine signifikanten Unterschiede der Messdaten zwischen den einzelnen Städten festgestellt. Zur genaueren Untersuchung wurde in Abbildung 8.3 ein Mittelwert pro Modell und Windgeschwindigkeit gebildet. Die Windgeschwindigkeiten wurden in 0,25 m/s Bereiche unterteilt. Die Messergebnisse der Stadtmodelle weisen im Vergleich zueinander keine deutlich höheren oder niedrigeren Böenfaktorwerte pro Windgeschwindigkeit auf. Um den Einfluss der jeweiligen Bebauung auf den Böenfaktor zu analysieren, werden zunächst nur Messungen bis zur mittleren Gebäudehöhe von 10 m über Grund untersucht.

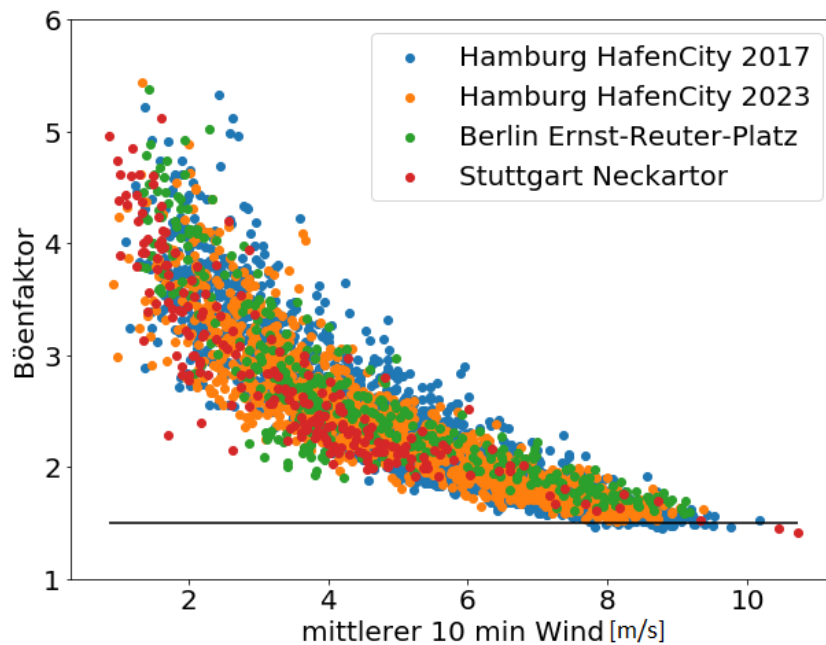


Abbildung 8.2.: Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen und eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor

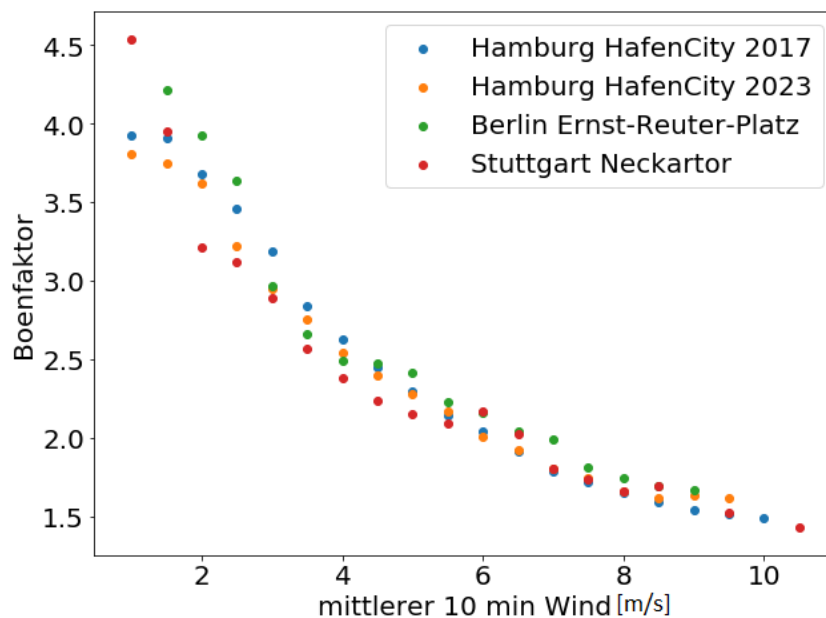


Abbildung 8.3.: Über Windgeschwindigkeitsintervalle von 0,25 m/s gemittelte Werte für den Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für Hamburg (2017: blau; 2023: orange), Berlin (grün) und Stuttgart (rot)

8.2.1. Untersuchung des bodennahen Böenfaktors

Nachfolgend wird untersucht, wie sich der Böenfaktor bodennah verhält. Dafür sind in Abbildung 8.4a und 8.4b die Messungen in ≤ 10 m Höhe für die Anströmwindgeschwindigkeiten von 8 m/s und 17 m/s dargestellt. Zunächst fällt auf, dass sich der funktionale Zusammenhang der Böenfaktoren zwischen den beiden Anströmwindgeschwindigkeiten nicht signifikant verändert. Die Böenfaktorwerte werden nur in Richtung größerer mittlerer 10-min-Windgeschwindigkeiten verschoben. Zu beachten ist, dass bei höheren Windgeschwindigkeiten die Wirbel deutlich schneller als bei niedrigen Windgeschwindigkeiten eine Messstelle passieren. Allerdings entstehen geringfügige Unterschiede in den berechneten Böenfaktorwerten in Abbildung 8.4a und 8.4b dadurch, dass bei der Umrechnung von Simulationsergebnissen aus dem Laborversuch bei höheren Windgeschwindigkeiten mehr turbulente Strukturen im 10-min-Intervall registriert werden. Der gleiche Grund kann angeführt werden, wenn man die Böenfaktorwerte von 10-min-Intervallen mit 1-std-Intervallen vergleicht (Abbildung D.1).

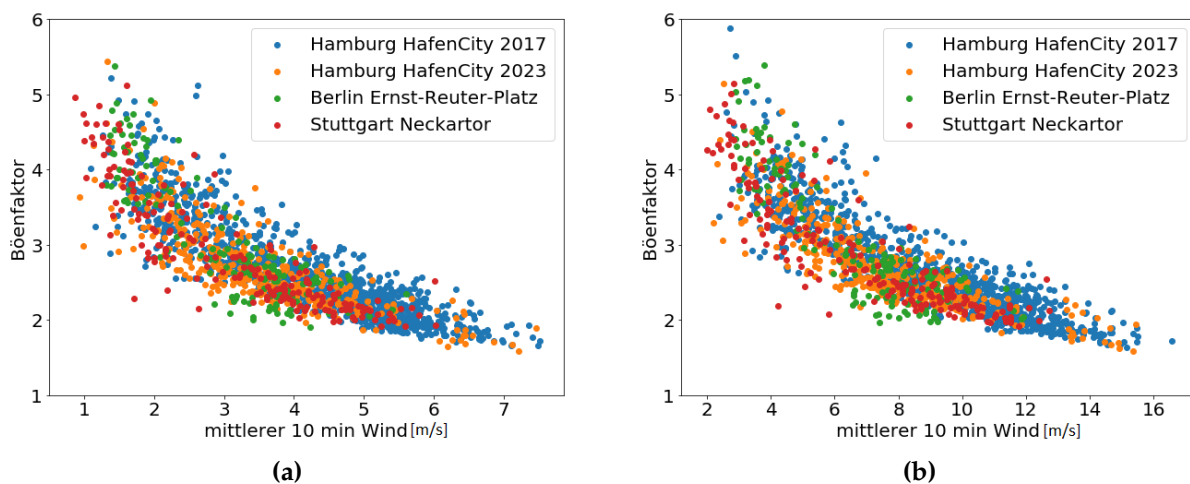


Abbildung 8.4.: Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Messhöhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von a) 8 m/s und b) 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor

Beim Vergleich der Messergebnisse zwischen den einzelnen Städten wurden in der Hamburger HafenCity die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten gemessen. Weiterhin ist festzustellen, dass durch die zusätzliche Bebauung bis 2023 die mittleren Windgeschwindigkeiten in der HafenCity abnehmen werden. Bei näherer Betrachtung der Daten vom 2023-Modell zeigt sich, dass die höheren Windgeschwindigkeiten überwiegend über der Elbe und in direkter Nähe zur Elbe gemessen wurden. Durch die geringere turbulente Reibung über dem Wasser nimmt die mittlere Windgeschwindigkeit zu und der Böenfaktor entsprechend ab. Ebenso wurden im Stuttgart-Modell durch geringere Reibung höhere 10-min-Windgeschwindigkeiten in der Am Neckartor-Straße gemessen, wenn keine Effekte von Bäumen im Modellgebiet simuliert wurden.

Die Modellvariante Hamburg 2017 weist im Vergleich die höchsten Böenfaktorwerte pro 10-min-Wind auf. Das zeigt, dass in der HafenCity im Vergleich zu den anderen untersuchten Stadtgebieten stärkere Windböen auftreten.

8.2.2. Bestimmung von Orten mit kritischer Böenwindgeschwindigkeit

Zusätzlich zur allgemeinen Auswertung des Böenfaktors stellte sich die Frage, an welchen Orten kritische Böenwindgeschwindigkeiten erreicht werden können. Unter anderem in Bottema (1993) werden Grenzwertgeschwindigkeiten für Böen angegeben. Ab 15 m/s ist mit einer Gefährdung für Kinder und ältere Menschen zu rechnen. Böen von 20 m/s können grundsätzlich Erwachsene zu Fall bringen.

Die Anzahl kritischer Orte hängt erwartungsgemäß von der mittleren Windgeschwindigkeit ab. Für die Abbildung 8.5 wird in 50 m Höhe eine mittlere Windgeschwindigkeit von 12 m/s gewählt. Dies ermöglicht eine detailliertere Auswertung, da bei 8 m/s (Abbildung D.2) kaum Messorte und bei 17 m/s (Abbildung D.3) die Mehrheit der Messorte im kritischen Bereich liegen. In Abbildung 8.5 wurde eine rote Linie für 20 m/s und eine gelbe Linie für 15 m/s eingetragen, um die Grenzwerte zu kennzeichnen. Dabei zeigt sich, dass kritische Messorte mit Böenwindgeschwindigkeiten von mehr als 20 m/s überwiegend in der HafenCity im Bebauungszustand von 2017 auftreten. Gefährliche Windböen wurden an Orten in der Nähe des Flusses, auf freien Flächen und hinter hohen Gebäuden gemessen. Die zusätzliche Bebauung bis 2023 reduziert gefährliche Windböen in der HafenCity deutlich. In Stuttgart und Berlin treten hingegen keine gefährlichen Böen mit Windgeschwindigkeiten über 20 m/s auf. Im Weiteren zeigt sich, dass alle drei Städte Windböen mit ≥ 15 m/s bei einer Anströmwindgeschwindigkeit von 12 m/s in 50 m Höhe aufweisen.

8.2.3. Betrachtung der Einschränkungen in der Böendefinition des DWDs

Nachdem der Böenfaktor im Verhältnis zu den einzelnen Städten und zu verschiedenen Anströmwindgeschwindigkeiten untersucht worden ist, sollen im Folgenden die Einschränkungen analysiert werden, die sich aus der Böendefinition gemäß DWD ergeben. Die Definition begrenzt sowohl den Geschwindigkeitswert als auch wie lang eine Böe ist (Böendauer 3 - 20 Sekunden). Per Definition muss eine Böe mindestens 5 m/s stärker als der gemessene Mittelwert sein. Dadurch werden besonders an Messorten mit moderaten Windgeschwindigkeiten keine Böen auftreten. Da erwartet wird, dass diese Einschränkung die Messorte mit Böen schon stark reduziert, wird dieses Kriterium separat betrachtet und mit 5 m/s-Böe bezeichnet.

In Abbildung 8.6a wurde die Böendefinition gemäß DWD und in Abbildung 8.6b die Böe eingezeichnet, bei der die Böengeschwindigkeit mindestens 5 m/s stärker ist als die mittlere Windgeschwindigkeit. Es ist zu sehen, dass bereits durch das 5 m/s Kriterium sehr viele Böenfaktorwerte vor allem im Bereich von niedrigen Windgeschwindigkeiten abgeschnitten werden. Dies liegt daran, dass bei 2 oder 3 m/s eine Windböe mit 5 m/s über dem Mittelwert deutlich seltener auftritt als bei höheren Windgeschwindigkeiten. Dabei ist der Böenfaktor der Quotient aus maximaler Windgeschwindigkeit im

8.2 Auswertung des Böenfaktors

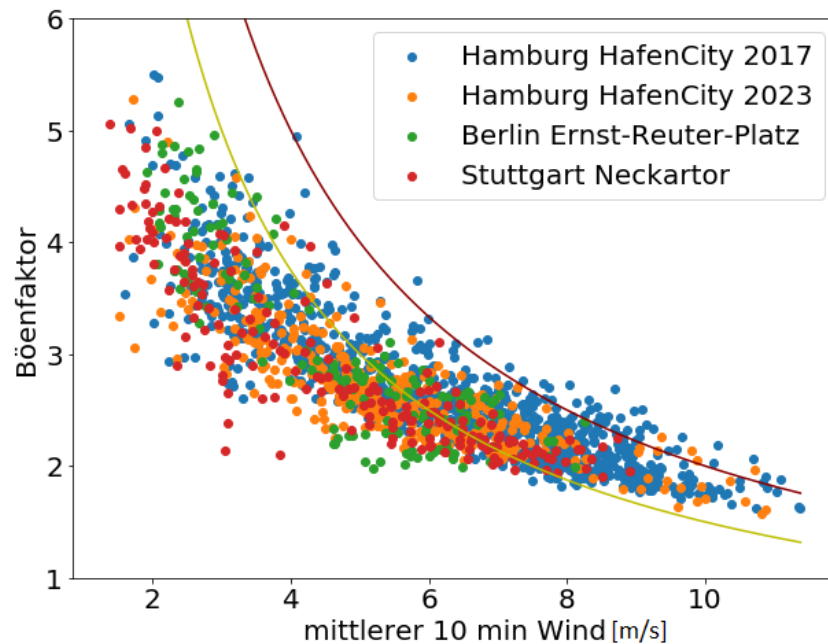


Abbildung 8.5.: Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von 12 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor; Grenzgeschwindigkeit für 15 m/s als gelbe Linie und für 20 m/s als dunkelrote Linie

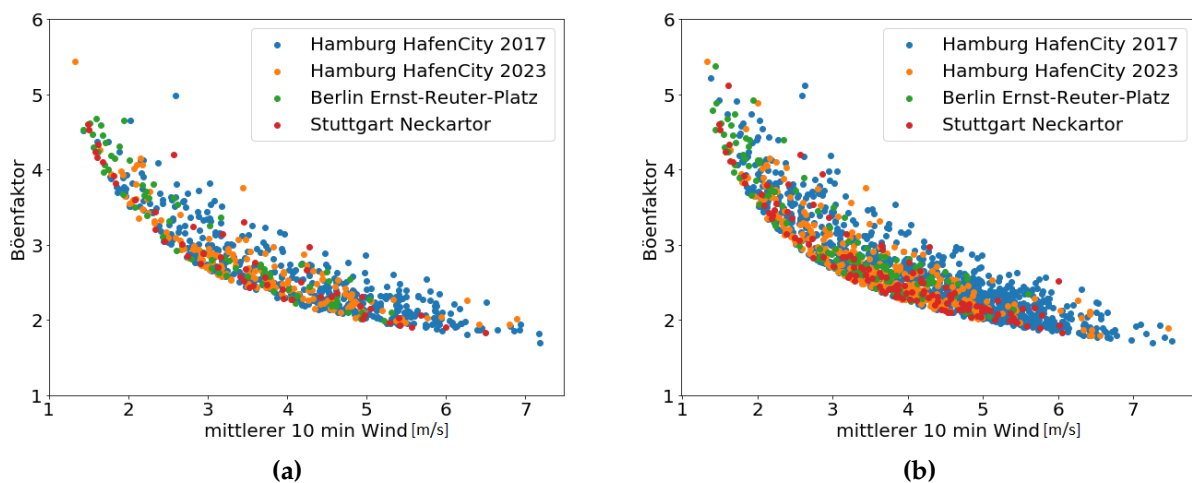


Abbildung 8.6.: a) Böendefinition gemäß DWD und b) 5 m/s-Böe jeweils als Funktion vom 10-minütiger Mittelwind für alle Höhen ≤ 10 m. Blau: Hamburg HafenCity (2017); Gelb: Hamburg HafenCity (2023); Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor

	HafenCity 2017	HafenCity 2023	Ernst-Reuter-Platz	Stuttgart
Böenfaktor	1007 = 100 %	379 = 100 %	162 = 100 %	196 = 100 %
5 m/s-Bö	912 = 91 %	302 = 80 %	121 = 75 %	127 = 64 %
Bö (DWD)	448 = 45 %	154 = 41 %	70 = 43 %	51 = 26 %

Tabelle 8.1.: Anzahl und prozentualer Anteil der Messorte mit Böen nach den verschiedenen Kriterien

10-min-Intervall und dem Mittelwert des 10-min-Intervalls, sodass sich an Orten mit niedriger mittlerer Windgeschwindigkeit durch die große Differenz deutlich höhere Böenfaktorwerte ergeben. Ebenso ist zu erkennen, dass die zeitliche Einschränkung Einfluss auf die an den Messorten unter Verwendung des DWD-Kriteriums beobachtete Böenanzahl hat.

Zur genaueren Untersuchung wurde die jeweilige Anzahl der Messorte mit Böen in Tabelle 8.1 festgehalten. Durch die Begrenzung der Differenz zwischen der maximalen und der mittleren Windgeschwindigkeit und der Einwirkungsdauer sinkt die Anzahl der Standorte mit Böen nach dem Böenkriterium des DWDs auf weniger als 50% aller Standorte. Dabei hat Stuttgart die wenigsten Böenstandorte. Bereits das 5 m/s-Kriterium reduziert die Daten auf 64% und die zeitliche Einschränkung reduziert sie weiter auf 26%. Somit werden nur an einem Viertel aller Messorte in Stuttgart Böen nach der Definition des DWDs verzeichnet. Dies zeigt, dass es in den in dieser Arbeit untersuchten Stadtgebieten und Messorten in Stuttgart weniger böig als in den anderen beiden Städten ist. Das 5 m/s-Kriterium hat den geringsten Einfluss auf die Modellkonfiguration der HafenCity 2017. Daraus folgt, dass in dieser Konfiguration im Vergleich zu den anderen Modellvarianten und untersuchten Stadtgebieten höhere mittlere Windgeschwindigkeiten auftreten. Ergänzend zu den Ergebnissen aus Kapitel 8.2.2 weist dies darauf hin, dass durch die zusätzliche Bebauung im Jahr 2023 nicht nur die Häufigkeit von kritischen Windböen, sondern allgemein von Windböen, abnimmt.

Um den Einfluss der Windgeschwindigkeit in der Anströmung auf die Böendefinition des DWDs zu untersuchen, sind in Abbildung 8.7 die Böenwerte nach der Definition des DWDs als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für eine Windgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss des 5 m/s-Kriteriums deutlich reduziert ist. Insgesamt wurden von den 1744 Daten nur 14 Daten herausgefiltert. Daraus resultiert, dass die Böenhäufigkeit bei Anwendung des DWD-Kriteriums deutlich von der Anströmwindgeschwindigkeit abhängt.

Die Darstellung der Böe nach der Definition des DWDs als Funktion des mittleren 10-minütigen Windes für alle Messhöhen befindet sich im Anhang (D.4).

8.3. Untersuchung unterschiedlicher Einflussparameter auf die Böenanalyse

In den vorherigen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass es keinen festen Böenfaktor gibt und der Böenfaktor mit zunehmender lokaler Windgeschwindigkeit abnimmt. Wichtig ist, dass der Böenfaktor von verschiedenen Parametern beeinflusst werden kann. Zum einen gibt es meteorologische Einflussgrößen, wie die Windrichtung, den

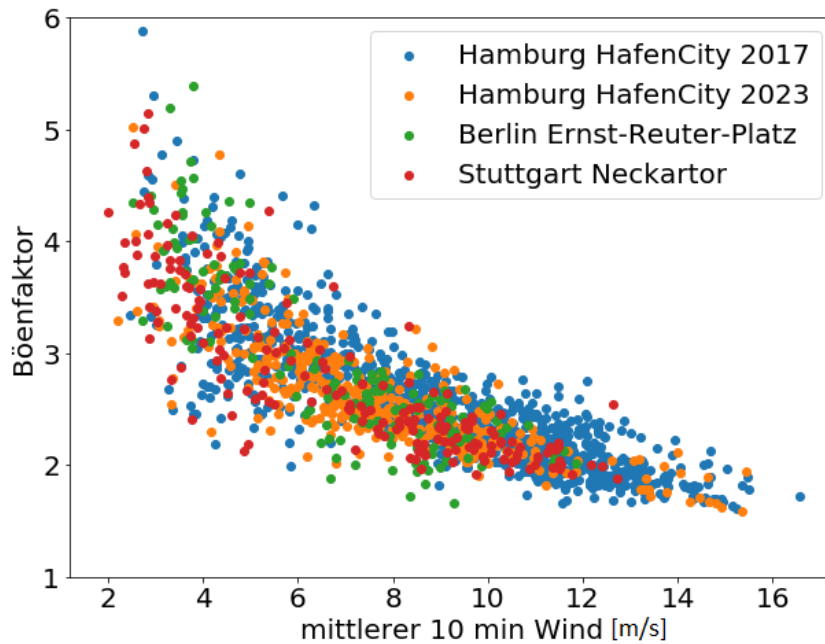


Abbildung 8.7.: Böenfaktor bei Anwendung des DWD-Kriteriums als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor

Tagesgang oder den Effekt von Bäumen. Zum anderen gibt es Größen, die besonders bei der Modellvalidierung berücksichtigt werden müssen, wie die Detailgenauigkeit der Gebäude, die Topografie und die Anströmbedingungen. Im Folgenden sollen die Windrichtung, der Effekt von Bäumen und die Detailgenauigkeit näher untersucht werden. Die anderen Parameter könnten in weiterführenden Arbeiten analysiert werden.

In Bottema (1993) wird darauf eingegangen, dass die Häufigkeit des Auftretens von Böen wichtig für den Windkomfort ist. Deswegen werden die drei Einflussparameter auch hinsichtlich der Häufigkeit von Windböen untersucht.

8.3.1. Einfluss einer 20°-Windrichtungsänderung

Für die Untersuchung der Windrichtungsabhängigkeit wurde ein Ausschnitt aus dem Hamburg-Modell in der Nähe einer Naturmessstelle gewählt. In Abbildung 8.8 ist der Böenfaktor für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung für die Windrichtungen 110° und 130° dargestellt. Durch die Windrichtungsänderung von 20° verschiebt sich der Bereich mit höheren Böenfaktorwerten in Richtung Norden. Dies liegt daran, dass bei einer Windrichtung von 110° deutlich mehr Messpunkte im Lee des Gebäudes als bei 130° liegen. Die Unterschiede der beiden südlichsten Punkte liegen bei einer Unsicherheit des Böenfaktors von 0,2 innerhalb der Messgenauigkeit, da sie bei beiden Windrichtungen frei angeströmt werden.

Um den Einfluss der Windgeschwindigkeit in der Anströmung näher aufzuzeigen, wurde in Abbildung 8.9 der Böenfaktor für eine Anströmwindgeschwindigkeit von

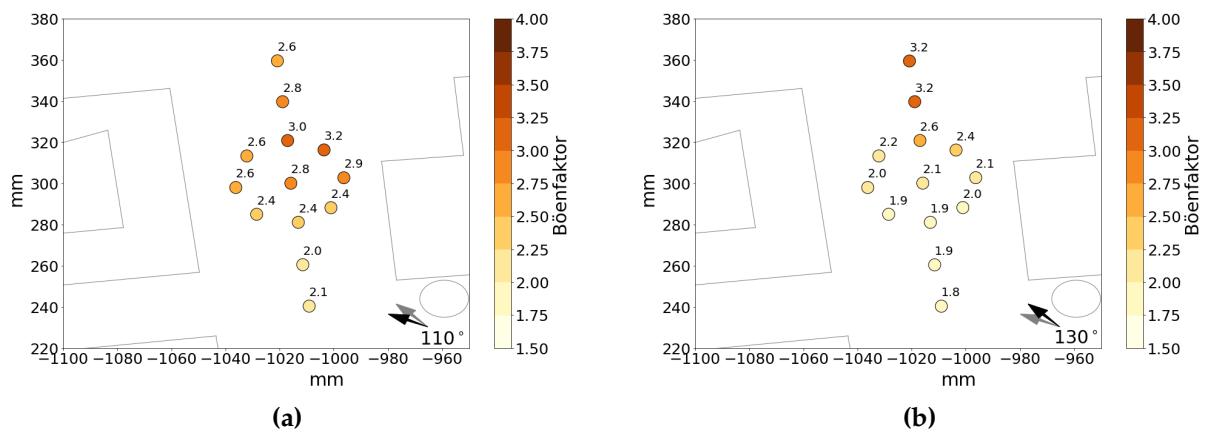


Abbildung 8.8.: Böenfaktor für eine Anströmwindgeschwindigkeit von a) 110° und b) 130° für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe

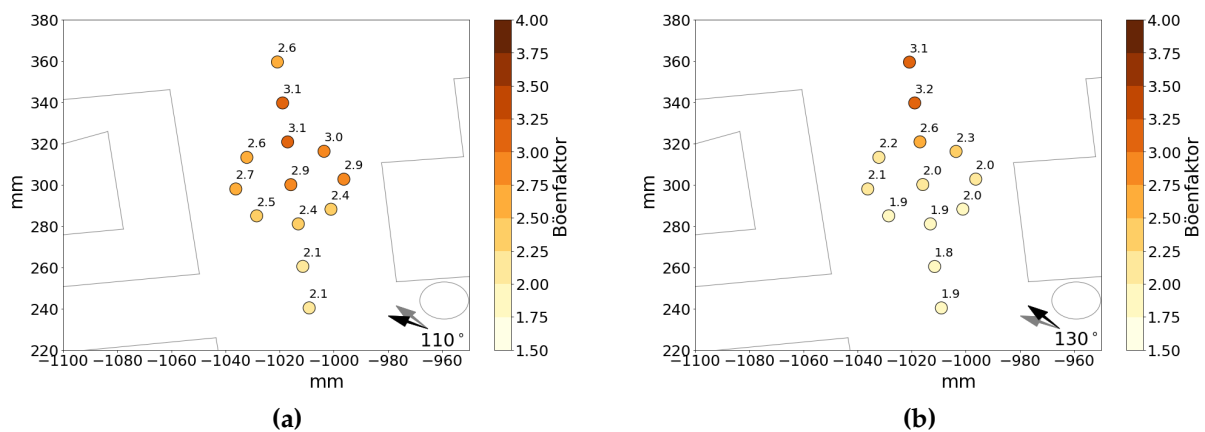


Abbildung 8.9.: Böenfaktor für a) 110° und b) 130° für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe

17 m/s eingetragen. Es ergibt sich, dass die Böenfaktorwerte für beide Anströmwindgeschwindigkeiten innerhalb der Messgenauigkeit liegen. Somit ist der Böenfaktor unabhängig von der Windgeschwindigkeit in der Anströmung.

Im Gegensatz zum Böenfaktor ist die Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs abhängig von der Windgeschwindigkeit in der Anströmung. In Abschnitt 8.2.3 wurde gezeigt, dass bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung durch die Einschränkungen des DWD-Kriteriums bis 74 % der Messorte keine Böen verzeichnen. Zusätzlich wurde in Abschnitt 8.1 beschrieben, dass die Länge der auf die Natur umgerechneten Zeitserie von der Windgeschwindigkeit in der Anströmung abhängig ist. Bei geringen Windgeschwindigkeiten ergibt sich eine längere Zeitserie und bei höheren Windgeschwindigkeiten eine kürzere. In Abbildung 8.10 ist die Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s dargestellt. Bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung ist die Zeitreihe im Naturmaßstab 12 Stunden lang. Innerhalb dieser 12 Stunden werden allerdings bodennah sehr wenige Böen gemessen. Bei 110° wurde lediglich an zwei Messorten jeweils eine gemessen. Wobei zu beachten ist, dass die Unsicherheit bei 2,5 Böen liegt. Nur bei 130° überschreitet an einem Messort

8.3 Untersuchung unterschiedlicher Einflussparameter auf die Böenanalyse

die Häufigkeit der Böen 2,5, sodass hier davon ausgegangen werden kann, dass es innerhalb jeder 12-Stunden-Periode an diesem Standort zu Böen nach der Definition des DWDs kommt. Dieser Messort entspricht exakt dem gleichen Messort, an dem auch für den Böenfaktor mit $3,2 \pm 0,4$ der höchste Wert gemessen wurde. Bei 17 m/s in der Anströmung wurde nur an diesem Ort und bei dieser Windrichtung ein Böenfaktorwert von $3,2 \pm 0,4$ ermittelt.

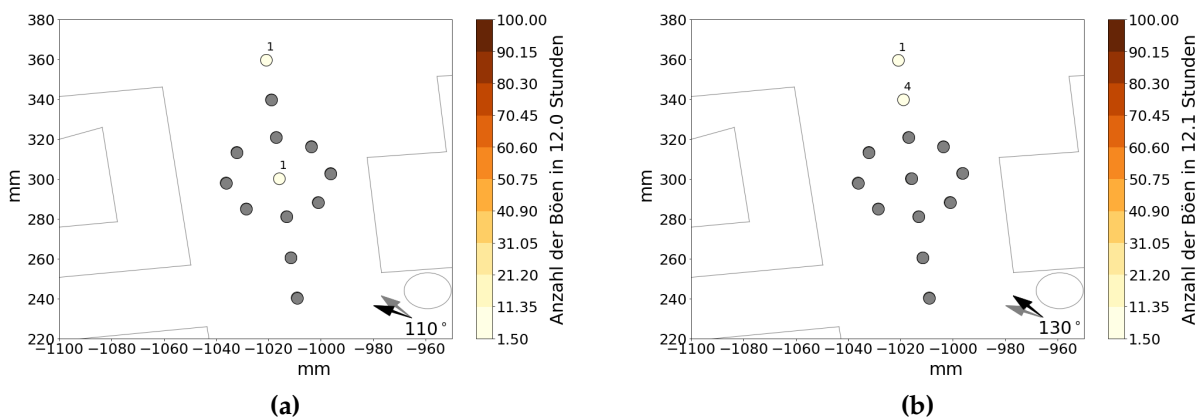


Abbildung 8.10.: Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs für a) 110° und b) 130° für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s. In grau wurden Messorte ohne Böen nach der Definition des DWDs markiert.

Aufgrund der Abhängigkeit der Böendefinition des DWDs von der Windgeschwindigkeit ist in Abbildung 8.11 die Häufigkeit der Böen bei einer Anströmwindgeschwindigkeit von 17 m/s dargestellt. Es ist zu sehen, dass bei dieser Windgeschwindigkeit an allen Messorten Böen laut DWD-Kriterium gemessen wurden. Durch die höhere Windgeschwindigkeit in der Anströmung reduziert sich die Zeitserie auf 5,7 Stunden. Aufgrund der höheren Häufigkeit der Böen erhöht sich die Unsicherheit auf 19 Böen, sodass weiterhin die beiden südlichen Messpunkte innerhalb der Messunsicherheit liegen. Ebenso wie bei 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung wurden die meisten Böen bei einer Windrichtung von 130° am zweitnördlichsten Messpunkt gemessen. Da der Abstand zwischen den Messpunkten nur 10 m beträgt, verdeutlicht dies, wie

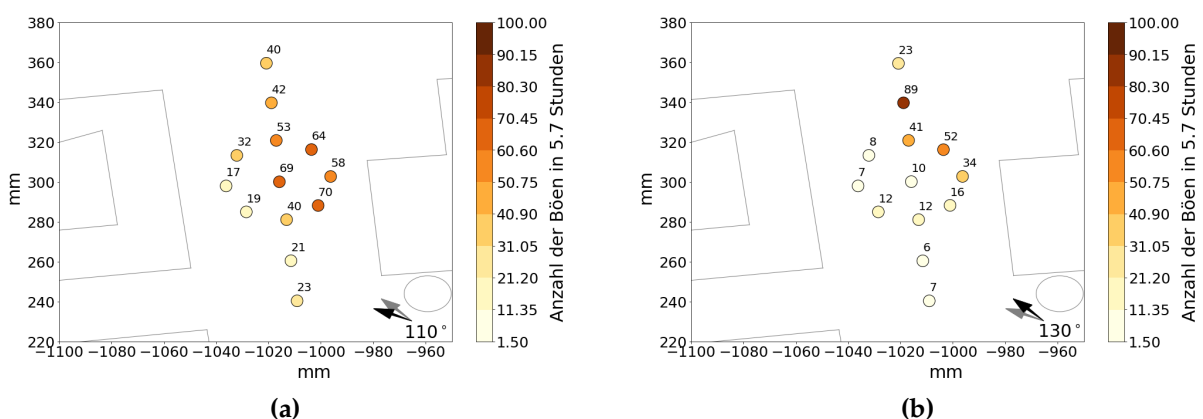


Abbildung 8.11.: Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs für a) 110° und b) 130° für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 17 m/s

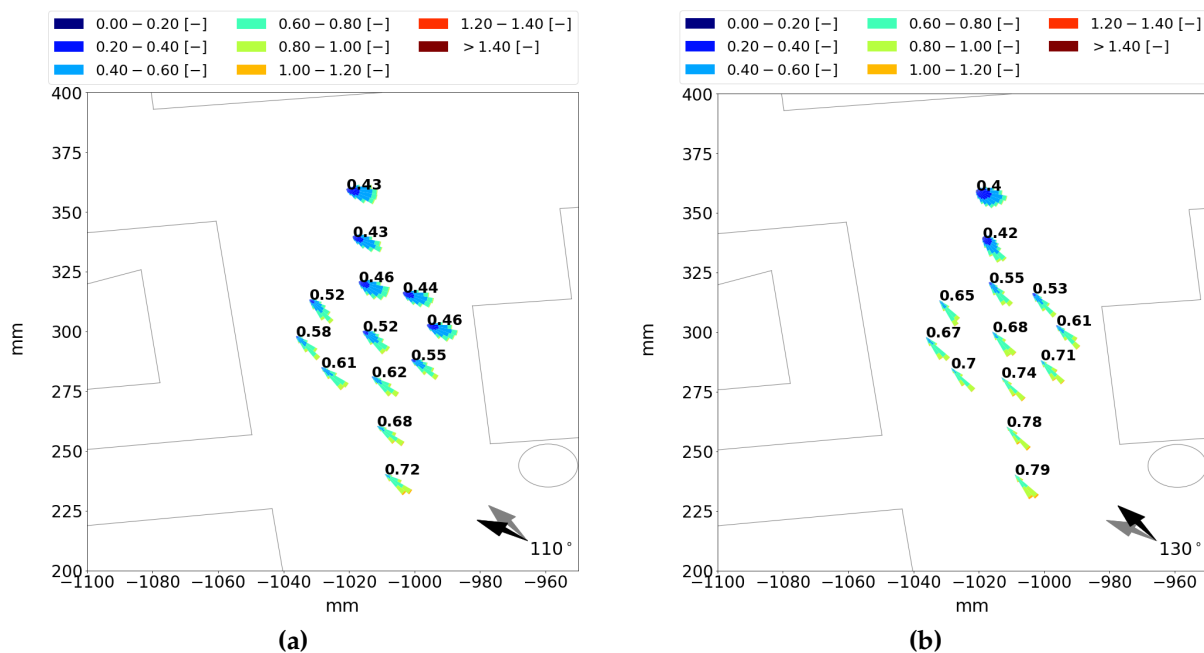


Abbildung 8.12.: Windrosen und mittlere dimensionslose Horizontalwindgeschwindigkeit für a) 110° und b) 130°

kleinräumig das lokale Windfeld innerhalb einer Straße ist und wie stark die Bebauung in der direkten Einströmung Einfluss auf die Böigkeit eines Standortes hat.

In Abbildung 8.12 wurden die Windrosen und die dimensionslosen mittleren Windgeschwindigkeiten eingetragen. Durch das östliche Gebäude wird die Windgeschwindigkeit reduziert. Bei 110° sind deutlich mehr Messpunkte als bei 130° betroffen. Auffällig ist, dass die mittlere Windgeschwindigkeit für den zweitnördlichsten Messpunkt innerhalb der Messunsicherheit für die Windrichtungen von 110° und 130° liegt. Also hängt die Böigkeit eines Standortes nicht direkt mit der mittleren Windgeschwindigkeit zusammen. Ebenso liegen beide südlichen Messpunkte für beide Windgeschwindigkeiten nicht innerhalb der Messunsicherheit. Dies könnte daran liegen, dass bei 130° ein längeres Gebiet als bei 110° ohne Gebäude überströmt wird. Jedoch können die Messergebnisse dies nicht eindeutig aufzeigen. Somit ist der Böenfaktor deutlich stärker lokal geprägt als der mittlere Wind. Der Einfluss des östlichen Gebäudes auf die Windgeschwindigkeit und die Windrichtungsvariabilität an den Messorten zeigt sich in den Windrosen sehr deutlich. So weisen die Messorte mit höheren Böenfaktorwerten auch höhere Windrichtungsvariabilitäten in den Windrosen auf.

8.3.2. Einfluss des Effekts von Bäumen

Im vorherigen Abschnitt wurde festgestellt, wie stark der Böenfaktor von der umliegenden Bebauung und somit von der Hauptwindrichtung abhängig ist. In diesem Abschnitt wird untersucht, welcher Einfluss durch Bäume entstehen kann. In Abbildung 8.13a ist der Böenfaktor um die Naturmessstelle Neckartor mit Effekt von Bäumen und in Abbildung 8.13b ohne diesen dargestellt. Die Windgeschwindigkeit in 50 m

8.3 Untersuchung unterschiedlicher Einflussparameter auf die Böenanalyse

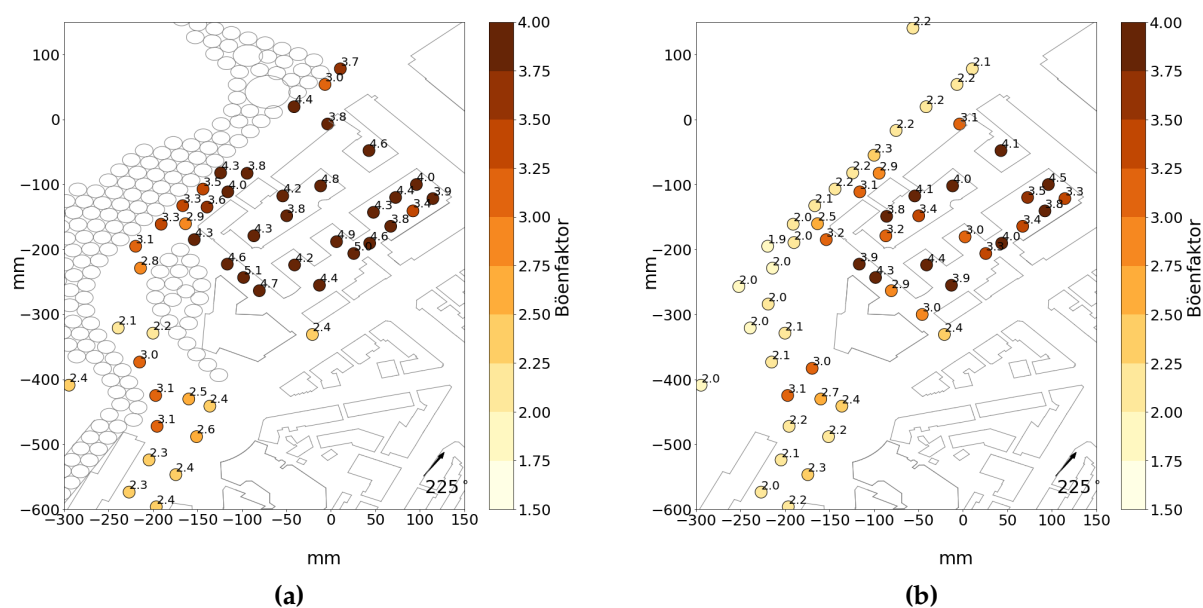


Abbildung 8.13.: Böenfaktor a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen

Höhe in der Anströmung beträgt 17 m/s. Die Abbildung mit 8 m/s befindet sich im Anhang (Abbildung D.5). Wie bereits für die Windrichtungsänderungen zu sehen, liegen die Unterschiede zwischen beiden Anströmwindgeschwindigkeiten innerhalb der Messunsicherheit.

Die Analyse der Ergebnisse für 17 m/s Anströmwindgeschwindigkeit zeigt, dass wenn kein Effekt von Bäumen im Luv von Messstandorten simuliert wird, die Unterschiede innerhalb der Unsicherheit liegen (südliche Messpositionen). Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede signifikant, wenn der Effekt von Bäumen im Luv von Messpositionen simuliert wurde. Durch die Effekte von Bäumen werden die Böenfaktorwerte signifikant erhöht. Unabhängig des Effekts von Bäumen sind die höchsten Böenfaktoren innerhalb von Hinterhöfen vorzufinden. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass in Abbildung 8.13a mit dem Effekt von Bäumen die Böenfaktorwerte in den Hinterhöfen höher als ohne Baumeffekte sind. In Abbildung 8.13b ist zusätzlich zu sehen, dass die Böenfaktorwerte in der Nähe bzw. im Nachlauf der Gebäude höher sind.

Zur genaueren Untersuchung des Effekts von Bäumen wurden in Abbildung 8.14 die mittleren dimensionslosen Windgeschwindigkeiten an diesen Messpunkten eingetragen. Es lässt sich erkennen, dass durch den Effekt der Bäume die Windgeschwindigkeiten hinter den aerodynamisch ähnlich simulierten Bäumen signifikant abgeschwächt werden. Die über alle dargestellten Messpunkte gemittelte dimensionslose Windgeschwindigkeit ohne den Effekt von Bäumen beträgt 0,45. Diese wird durch den Effekt der Bäume auf 0,25 reduziert und somit fast halbiert. Die starke Erhöhung des Böenfaktorwertes im nordwestlichen Bereich lässt sich somit auf eine niedrigere lokale Windgeschwindigkeit beziehen. Wie in Abbildung 8.2 dargestellt, erhöht sich der Böenfaktor mit abnehmender lokaler Windgeschwindigkeit. Zusätzlich zeigt sich, dass durch die reduzierte Windgeschwindigkeit in der Straße hinter den Bäumen die Windgeschwindigkeit in den Hinterhöfen reduziert werden. Da diese jedoch bereits ohne den

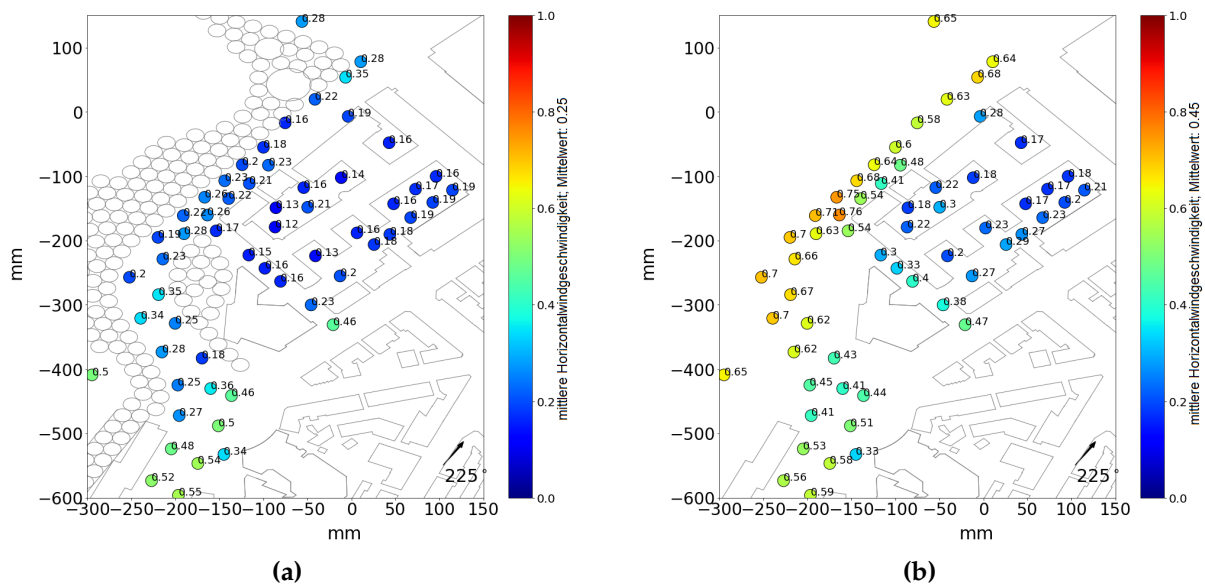


Abbildung 8.14.: Mittelwert der dimensionslosen Windgeschwindigkeiten a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen

Effekt von Bäumen deutlich niedriger als in der Straße sind, ist der Unterschied weniger signifikant. Allerdings kann ein Einfluss auf den Böenfaktor festgestellt werden.

Aus der Untersuchung der Windrichtungsabhängigkeit von Windböen resultierte, dass nicht an allen Messorten die Unterschiede beim Böenfaktor und beim mittleren Wind korrelieren. Zur weiteren Vertiefung sind in den Abbildungen 8.15 und 8.16 die Turbulenzintensitäten in u - und v -Richtung nach Formel 6.3 dargestellt. Wie beim Böenfaktor bleiben die Turbulenzintensitäten an den fünf südlichen Messpunkten innerhalb der Messunsicherheit gleich. Durch den Effekt der Bäume erhöht sich an den nordwestlichen Messpunkten die Turbulenzintensität sowohl in u - als auch in v -Richtung. Wie beim Böenfaktor nimmt die Turbulenzintensität in der Nähe der Gebäude ohne den Effekt von Bäumen zu. Im Gegensatz dazu lässt sich bei der Turbulenzintensität mit dem Effekt von Bäumen keine Zu- oder Abnahme entlang oder quer zur Straße feststellen. Besonders auffällig ist ein Messpunkt in der Nähe des Durchgangs zum Hinterhof. Hier wurden sogar höhere Turbulenzintensitäten in der u -Richtung ohne den Effekt von Bäumen ($0,62 \pm 0,01$) als mit dem Effekt von Bäumen ($0,54 \pm 0,01$) gemessen. Dies lässt sich bei den Böenfaktorwerten nicht erkennen, die von $3,1 \pm 0,4$ auf $4,3 \pm 0,4$ durch den Effekt von Bäumen zunehmen. In den Hinterhöfen nehmen die Turbulenzintensitäten durch den Effekt von Bäumen wie auch der Böenfaktor zu. Dies zeigt, dass der Böenfaktor wie die Turbulenzintensität durch den Effekt der Bäume beeinflusst und erhöht wird.

Ebenso wie in Abschnitt 8.3.1 ergeben sich bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung keine kritischen Böenwindgeschwindigkeiten im Messgebiet (siehe Abbildung D.6). Deswegen wurde in Abbildung 8.17 die Häufigkeit der Böen nach Definition des DWDs bei einer Anströmwindgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe eingetragen. Durch die hohe Windgeschwindigkeit in der Anströmung können 5,5 Stunden an dem jeweiligen Messort ausgewertet werden. Die Messorte in Abbildung 8.17a/b sind identisch gewählt. Allerdings wurden ein paar der Mess-

8.3 Untersuchung unterschiedlicher Einflussparameter auf die Böenanalyse

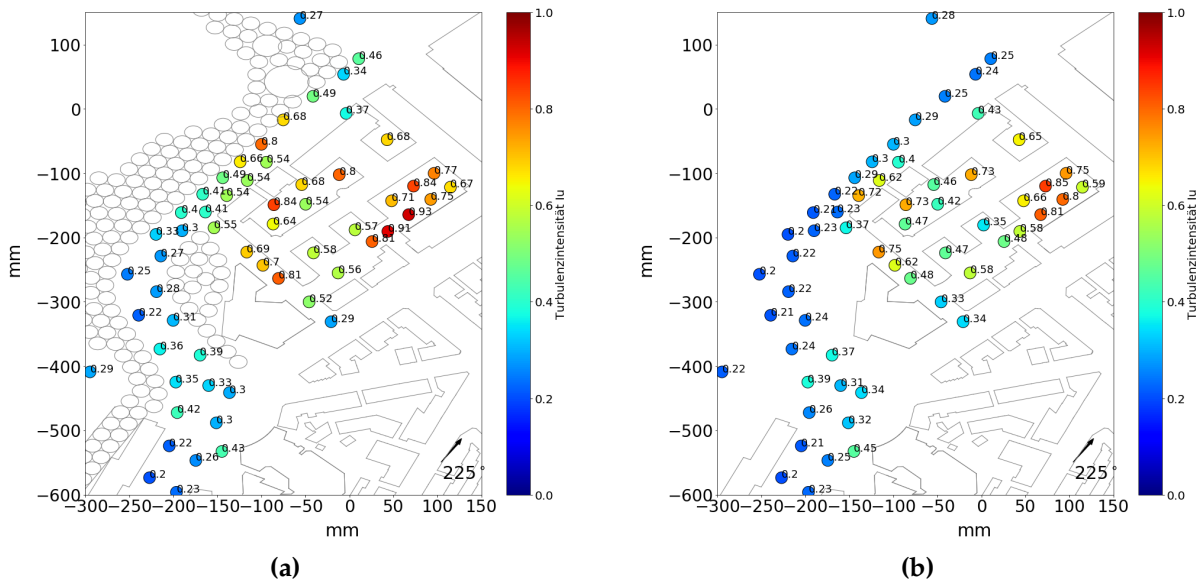


Abbildung 8.15.: Turbulenzintensität I_u a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen

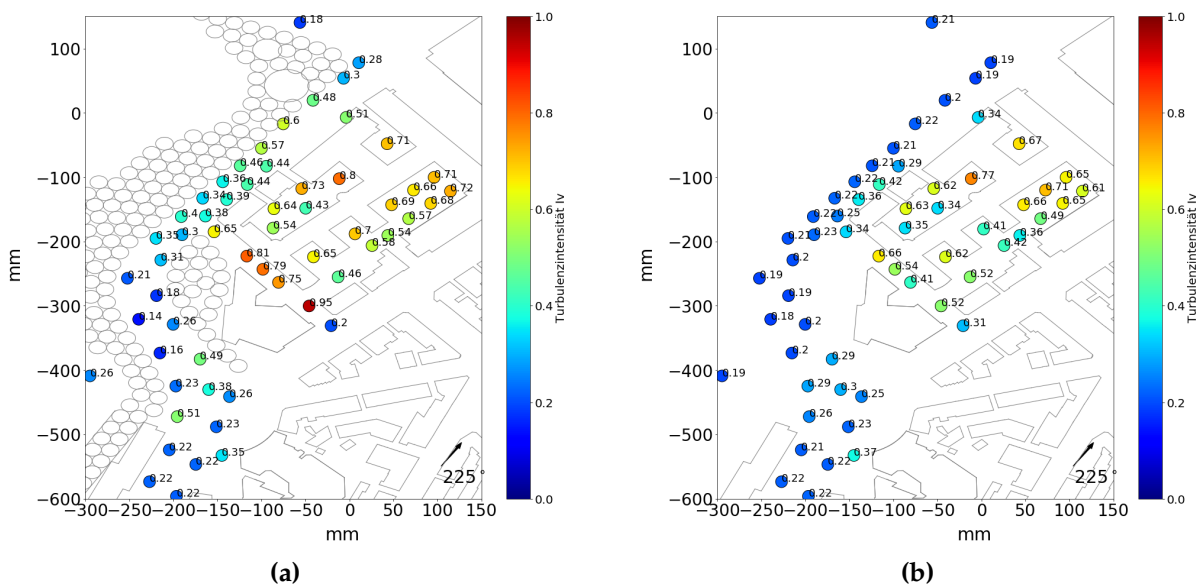


Abbildung 8.16.: Turbulenzintensität I_v a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen

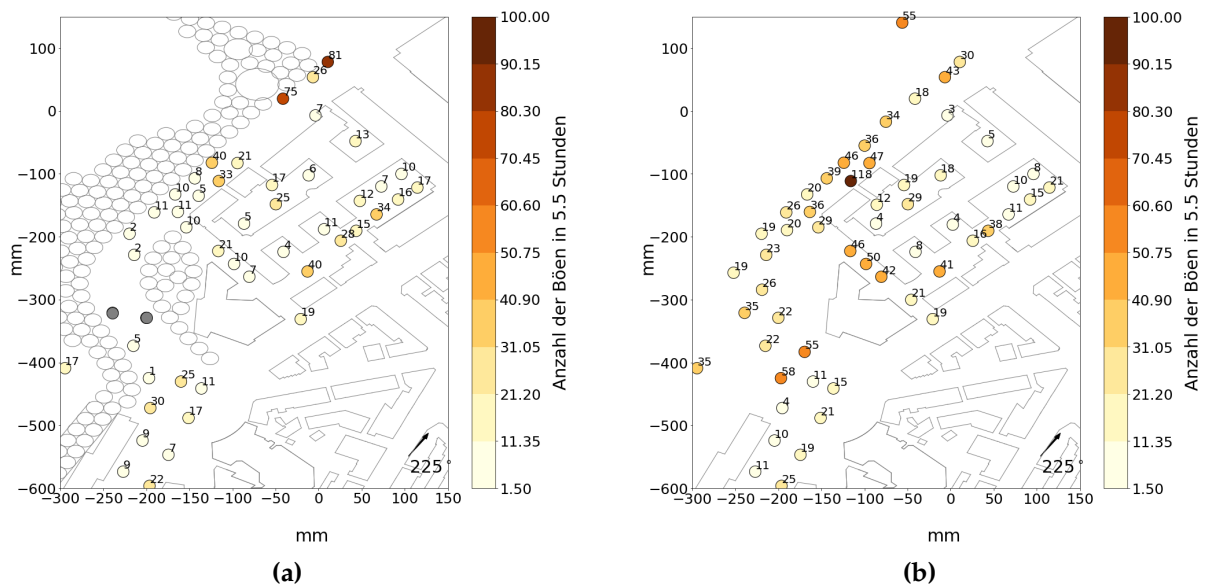


Abbildung 8.17.: Häufigkeit der Böen gemäß der Definition des DWDs a) mit dem Effekt von Bäumen und b) ohne den Effekt von Bäumen für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s; Grau: Messorte ohne Böen

orte aufgrund der Datenqualitätsprüfung von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Besonders bodennah haben viele Daten nicht die gewünschte Auflösung.

Ohne die Berücksichtigung des Effekts der Bäume in Abbildung 8.17b werden an jeder Messstelle Böen registriert, obwohl sich viele der Messorte in Hinterhöfen befinden. Der experimentell im Rahmen von Wiederholungsmessungen ermittelte Vertrauensbereich der Ergebnisse liegt im Stuttgart-Modell bei ± 10 Böen. Somit weisen die in Hinterhöfen gelegenen Messstellen, die sich in der Nähe von Durchfahrten befinden, mehr Böen auf. Messstellen in von Gebäuden abgeschatteten Bereichen registrierten deutlich weniger Böen. Die meisten Böen mit 118 pro 5,5 Stunden wurden am Durchgang zum Hinterhof gemessen. Hier ist zu beachten, dass sich bereits 14 m entfernt von diesem Messpunkt die Häufigkeit der Böen um zwei Drittel verringert, das heißt der Grund für diese hohe Böigkeit ist die Nähe zum Hinterhof-Durchgang. Weitere mögliche Einflussgrößen auf die räumliche Variabilität von Böen sind die Lage des Messpunktes innerhalb der Straße, die Ausrichtung der Straße bezüglich der Hauptwindrichtung und die Straßenbreite.

An dem Messpunkt mit den meisten Böen ist auch die höchste Turbulenzintensität in u-Richtung mit 0,42 im Vergleich zu den umliegenden Messpunkten vorzufinden. Also hat die Turbulenzintensität auf die Häufigkeit der Windböen einen stärkeren Einfluss als auf den Böenfaktor. Zur Überprüfung dieser Aussage müssten allerdings weitere Untersuchungen gemacht werden.

In Abbildung 8.17a ist die Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs mit dem Effekt von Bäumen dargestellt. Durch Bäume kommt es zu einer starken Reduzierung der Häufigkeit der Böen. Zum Teil wurden an manchen Messorten keine Böen mehr gemessen. Am Messpunkt am Durchgang zum Hinterhof, der ohne den Effekt von Bäumen 118 Böen aufweist, wird deren Häufigkeit durch den Effekt von Bäumen abgeschwächt, sodass nur noch 33 Böen pro 5,5 Stunden gemessen werden. Im Vergleich zu den umliegenden Messorten stellt dies immer noch einen erhöhten Wert dar.

8.3 Untersuchung unterschiedlicher Einflussparameter auf die Böenanalyse

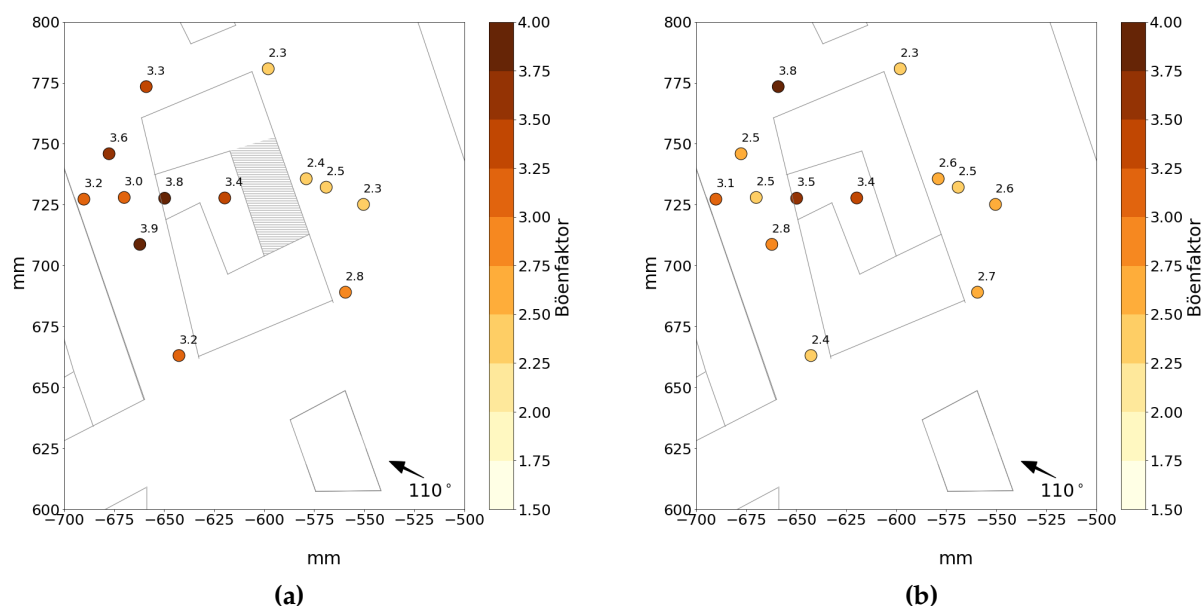


Abbildung 8.18.: Böenfaktor a) für den Fall mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch für eine Windgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung

Die Hinterhöfe selbst scheinen von den Baueffekten nicht beeinflusst zu sein. Hier verändern sich die Häufigkeiten der Böen nur im Bereich der Messunsicherheit.

8.3.3. Einfluss eines Gebäudedurchbruchs auf das lokale Strömungsfeld

Neben den meteorologischen Einflussgrößen gibt es Parameter, die besonders für die Modellierung entscheidend sind. Hierzu zählt die Detailgenauigkeit von Gebäuden. Diese kann aufgrund des vorliegenden Datensatzes variieren. Speziell Erker, Gebäudevorsprünge und Gebäudedurchbrüche fehlen in vielen Datensätzen. Deswegen soll im Folgenden untersucht werden, welchen Einfluss ein Gebäudedurchbruch in Höhe des ersten Stockwerkes auf die Messungen in 10 m Höhe hat. Dafür wurde der Überseeboulevard aus dem HafenCity-Modell verwendet. Wie bei den beiden vorherigen Beispielen bleibt der Böenfaktor für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten in der Anströmung konstant. Die Darstellung für 8 m/s in der Anströmung befindet sich im Anhang Abbildung D.7. Abbildung 8.18 stellt den Böenfaktor für 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung dar. Die Unsicherheit für den Böenfaktor liegt für 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung bei $\pm 0,4$. Dadurch zeigt sich, dass die Böenfaktorwerte östlich des Gebäudedurchbruchs im Rahmen der Messunsicherheit liegen, ebenso wie der Messpunkt im Hinterhof. In der Straße westlich des Gebäudedurchbruchs erhöhen sich die Böenfaktorwerte durch den Durchbruch signifikant.

Neben dem Böenfaktor ist für den Windkomfort auch die Häufigkeit der Böen wichtig. In Abbildung 8.19 ist die Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs dargestellt. Man sieht, dass besonders an den Gebäudeecken viele Böen gemessen wurden. Dabei reduziert sich die Häufigkeit der Böen signifikant durch Schließen des Durchgangs an

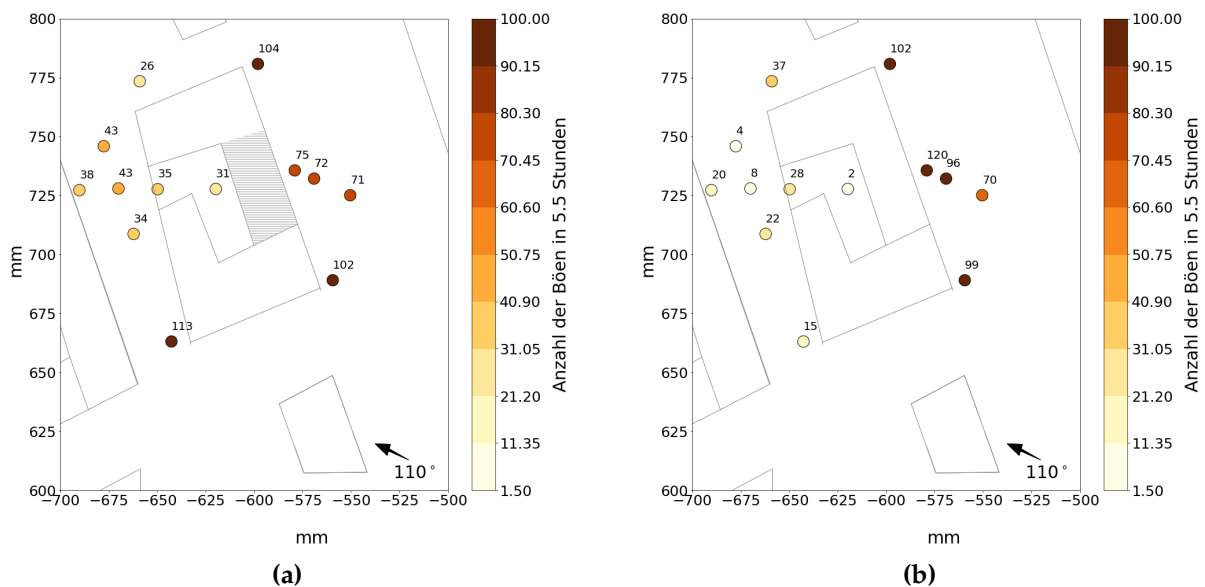


Abbildung 8.19.: Häufigkeit der Böen gemäß der Definition des DWDs a) für den Fall mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch

der südlichen Ecke des Gebäudes. Jedoch erhöhen sich die Böen signifikant östlich des Gebäudedurchbruchs bei geschlossenem Gebäudedurchbruch. Dies steht im Gegensatz zum Böenfaktor, bei dem sich östlich des Gebäudedurchbruchs keine signifikanten Änderungen gezeigt haben. Das Gleiche gilt für den Hinterhof. Auch die Häufigkeit der Böen nimmt nach Verschließen des Gebäudedurchbruchs in der Straße westlich des Gebäudes signifikant ab. Bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung ergibt sich ein ähnliches Bild, das jedoch aufgrund der niedrigeren Häufigkeit von Böen weniger deutlich ausgeprägt ist (Abbildung D.8).

Zur genaueren Auswertung wurden in Abbildung 8.20 die Windrosen und die mittleren Windgeschwindigkeiten eingetragen. Der Einfluss des Gebäudedurchbruchs lässt sich westlich des Gebäudedurchbruchs erkennen. Durch den Gebäudedurchbruch reduziert sich die Windgeschwindigkeit in der Straße westlich des Gebäudekomplexes. Die Windrose im Hinterhof (Abbildung 8.20a) veranschaulicht die lokale Luftströmung durch den Gebäudedurchbruch. Ebenso zeigt sich eine bimodale Verteilung der Windrichtungen in der Straße westlich des Gebäudedurchbruchs. Östlich des Gebäudedurchbruchs ist kein signifikanter Unterschied bei den Windrosen zu sehen.

8.4. Weitere literaturbezogene Auswertungen

Bei der Untersuchung des Böenfaktors in den vorherigen Abschnitten ist aufgefallen, dass ein Zusammenhang zwischen Böenfaktor und Turbulenzintensität bestehen kann. Eine Korrelation zwischen Böenfaktor und Turbulenzintensität ist schon in der Literatur dokumentiert (siehe u. a. Hu et al. 2018). In Abbildung 8.21 ist der Böenfaktor für die ausgewählten Daten von allen drei Modellen in allen Höhen gegenüber der Turbulenzintensität I_u eingetragen. Zur besseren Beschreibung wurde eine Ausgleichsgerade

8.4 Weitere literaturbezogene Auswertungen

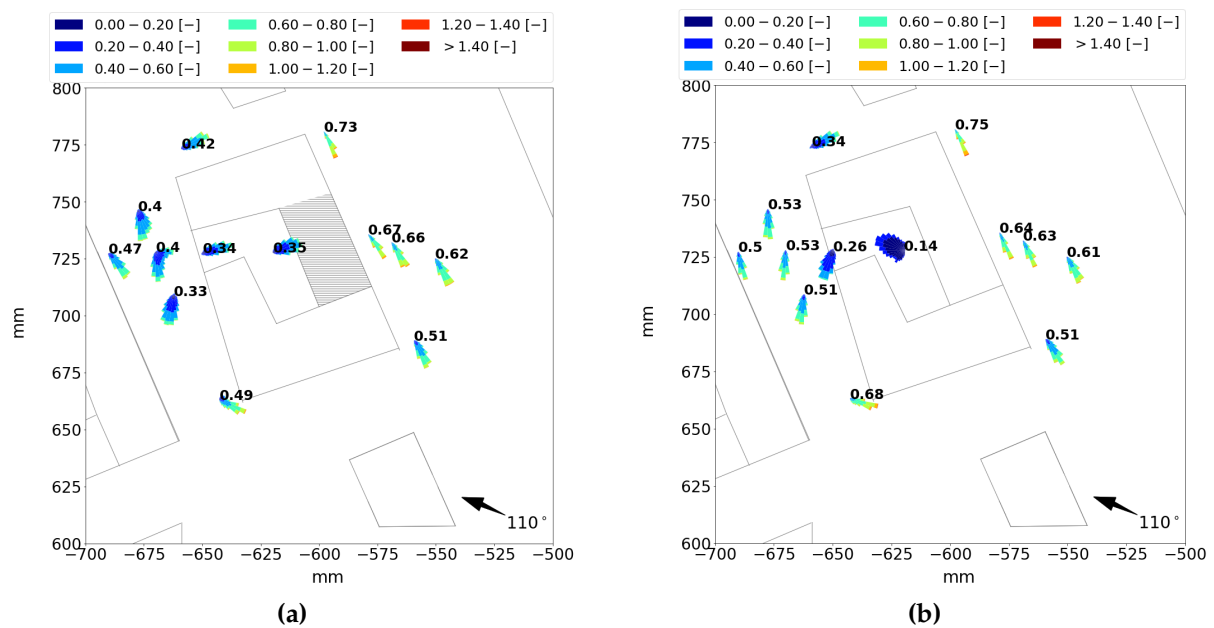


Abbildung 8.20.: Windrosen und mittlere Horizontalwindgeschwindigkeit a) mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch

hinzugefügt. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,8 zeigt sich eine gute Korrelation zwischen der Turbulenzintensität I_u und dem Böenfaktor.

Neben dem Böenfaktor wird der Parameter k , das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung (engl. peak factor), in vielen Windkomfortkriterien betrachtet (Bottema, 1993, Koss, 2006). Es konnte kein windgeschwindigkeitsunabhängiger Böenfaktor gefunden werden. Deshalb wird der Zusammenhang zwischen mittlerer Windgeschwindigkeit und dem Verhältnis von maximalen turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen zur Standardabweichung turbulenter Schwankungsbewegungen untersucht, um einen allgemeingültiges Verhältnis zu erhalten. In Abbildung 8.22 ist das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung als Funktion vom mittleren 10 min-Wind dargestellt. Für die drei untersuchten Städte zeigt sich bei der Betrachtung des maximalen Wertes für k , dass dieser zwischen 3 und 7 liegt. Wenige Ausnahmen liegen zwischen 7 und 9. Somit lässt sich wie beim Böenfaktor für das Verhältnis von maximalen turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen zur Standardabweichung turbulenter Schwankungsbewegungen kein fester Wert bestimmen. Auch nimmt das Verhältnis von maximalen turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen zur Standardabweichung turbulenter Schwankungsbewegungen mit zunehmender Windgeschwindigkeit ab. Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Städten.

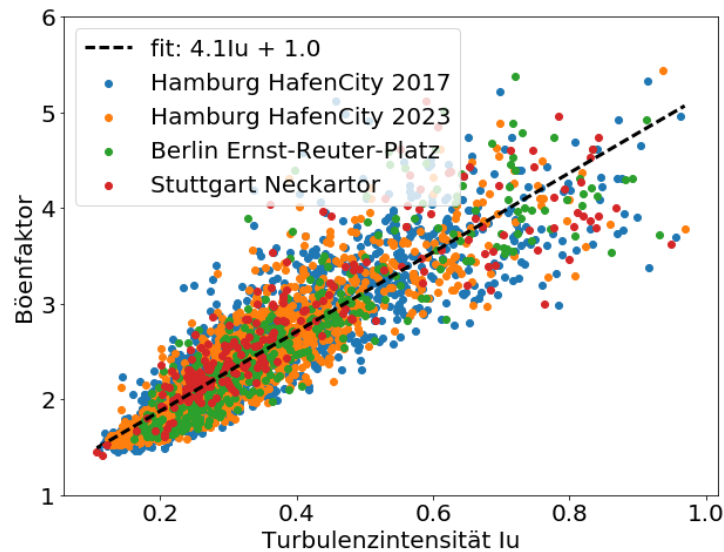


Abbildung 8.21.: Böenfaktor als Funktion der Turbulenzintensität I_u für alle Messpunkte für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor

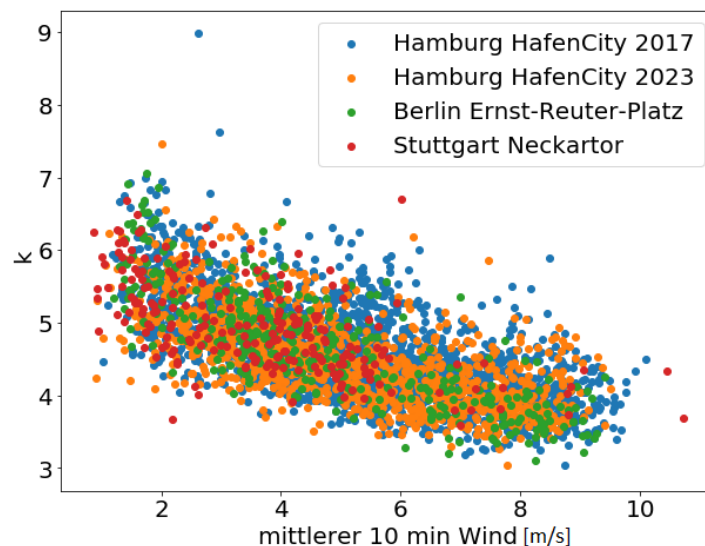


Abbildung 8.22.: Verhältnis von maximalen turbulenten Geschwindigkeitsschwankungen zur Standardabweichung turbulenter Schwankungsbewegungen (k) als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Messpunkte für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor

8.5. Kritische Betrachtung der Messorte

Beim Vergleich der Messergebnisse der Städte ist zu berücksichtigen, dass, obwohl der gesamte Datensatz für alle Messungen in ≤ 10 m über Grund 1744 Messorte aufweist, diese nicht gleich zwischen den Städten verteilt sind. Im Hamburger HafenCity-Modell wurde an deutlich mehr Messorten als im Stuttgarter Neckartor-Modell oder Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell gemessen. Im Weiteren wurden nur Punktmessungen gemacht, weshalb die Wahl der Messorte einen starken Einfluss auf den Vergleich hat. So haben zum Beispiel Hinterhöfe eine andere Strömungscharakteristik als offene Plätze oder breite Straßen. Der Einfluss der Messorte wurde verstärkt, da in jedem Modell anderen Fragestellungen nachgegangen und somit an für das jeweilige Modell typischen Messorten gemessen wurde. Dies hat zur Folge, dass, obwohl eine möglichst gleichmäßige Abdeckung aller typischer Orte in jedem Modell gewährleistet werden sollte, nicht zwingend an gleich vielen Orten der gleichen Art gemessen wurde. Außerdem stellt jedes Modellgebiet nur einen Ausschnitt aus der jeweiligen Stadt dar. Es kann somit nicht gezeigt werden, ob der gewählte Stadtteil die für die Stadt typischen Bedingungen widerspiegelt.

Kapitel 9

Analyse verkehrserzeugter Immissionen

Die räumliche Variabilität von Windböen im städtischen Umfeld und verschiedene Einflussgrößen auf die Windböenverteilung wurden in Kapitel 8 näher untersucht. Straßenemissionen werden sowohl durch den mittleren Wind als auch durch Windböen transportiert. Dabei werden die Schadstoffe von stark frequentierten Straßenzügen auch in Nebenstraßen und Hinterhöfe befördert. Somit können sowohl die nächstgelegenen Hauptverkehrsstraßen Anteile an der gemessenen Konzentration eines Messortes als auch weiter entfernte Straßen haben. Um die Forschungsfrage nach der Repräsentativität eines Messortes bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen zu untersuchen, wurden bei zwei verschiedenen Windrichtungen an vier verschiedenen Messorten die jeweiligen Konzentrationen verschiedener Hauptverkehrsstraßen gemessen. Zusätzlich wurde untersucht, welchen Einfluss geometrische Vereinfachungen auf die Verteilung von Konzentrationen haben.

Anschließend wird anhand einer Hauptverkehrsstraße die Transportentfernung von Konzentrationen sowie der Einfluss der Windrichtung und der Umgebungsbebauung auf die Transportverteilung untersucht.

Da bei Naturmessungen die Anströmwindrichtung und Anströmwindgeschwindigkeit selten über einen längeren Zeitraum konstant bleiben, soll anhand der Daten zusätzlich untersucht werden, wie hoch die Variabilität von Messergebnissen an einem Standort ist, die aus der begrenzten Messdauer resultiert. Ziel ist die Unsicherheit von Naturmessungen abzuschätzen, die nur durch die Messdauer erzeugt wird.

9.1. Messortrepräsentativität bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen

Im Folgenden wird die Repräsentativität eines Messortes näher betrachtet, da bei verkehrserzeugten Immissionen die Standortwahl des Messgerätes von großer Bedeutung ist. In Abbildung 9.1 wurden die vier untersuchten Messorte in der Nähe der Straße des 17. Juni eingetragen. Zusätzlich sind die mit den Umrissen der Linienquellen ver-

9.1 Messortrepräsentativität bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen

sehenen Hauptverkehrsstraßen mit deren Straßennamen gekennzeichnet. Es werden jeweils die Immissionen jeder Hauptverkehrsstraße, die diese auf die vier Messorte hat, betrachtet. Die Windrichtung im Abschnitt 9.1.1 beträgt 175° und im Abschnitt 9.1.2 265° . Der dritte Abschnitt 9.1.3 beschäftigt sich mit dem Einfluss von geometrischen Vereinfachungen in der Nähe des Ernst-Reuter-Platzes.

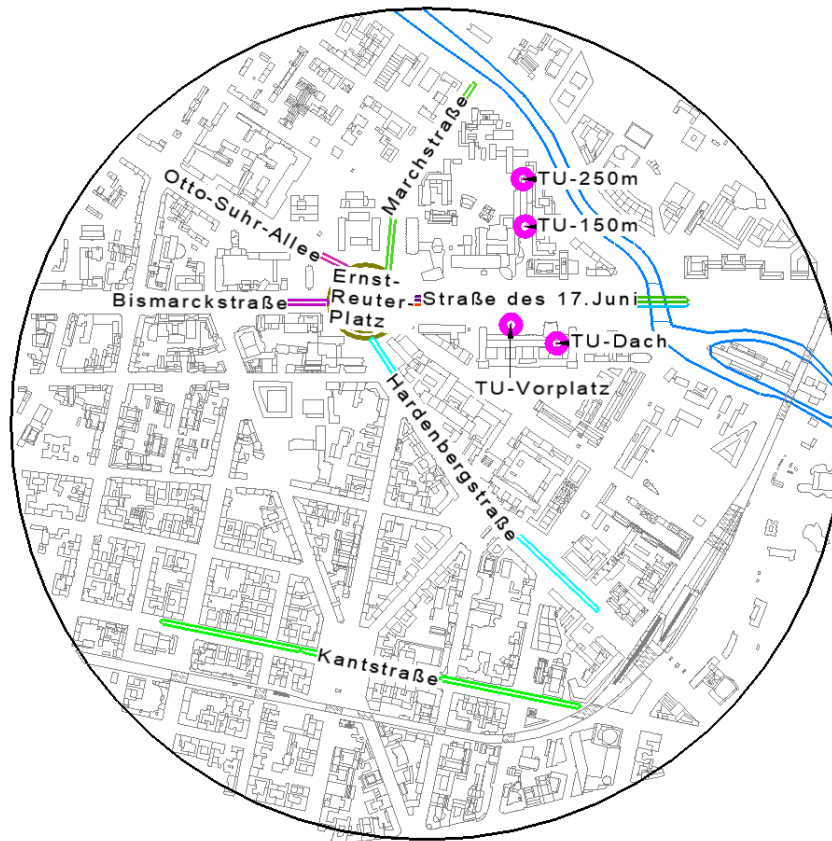


Abbildung 9.1.: Umriss der Linienquellen mit den jeweiligen Straßennamen und die in diesem Abschnitt ausgewerteten Messorte mit Namen

9.1.1. Windrichtung 175°

In Abbildung 9.2 ist für jeden Messort das Modellgebiet mit allen Linienquellen dargestellt. Der Messort in Abbildung 9.2a liegt auf dem Dach des TU Berlin Hauptgebäudes in 56 m Höhe über Grund und wird im Folgenden als TU-Dach bezeichnet. Eine weitere Messung wurde auf dem Vorplatz des TU Berlin Hauptgebäudes vorgenommen und in Abbildung 9.2b eingetragen. Dieser Messort wird als TU-Vorplatz bezeichnet und befindet sich in 2 m Höhe über Grund. Der dritte Messort befindet sich in 1 m Höhe über Grund in einer Nebenstraße in nördlicher Richtung 150 m vom Hauptgebäude entfernt und wird als TU-150m bezeichnet (Abbildung 9.2c). Die Nebenstraße ist ein Fuß-/ Radweg. Auch der vierte Messort befindet sich in 1 m Höhe über Grund in dieser Nebenstraße und zwar in 250 m Entfernung zum Hauptgebäude. Dieser wird als TU-250m bezeichnet und wurde in Abbildung 9.2d eingetragen.

An diesen Messorten wird untersucht, welcher Anteil an Konzentrationen von verkehrsreichen Straßen an den jeweiligen Messorten ankommt. Die Linienquellen entlang

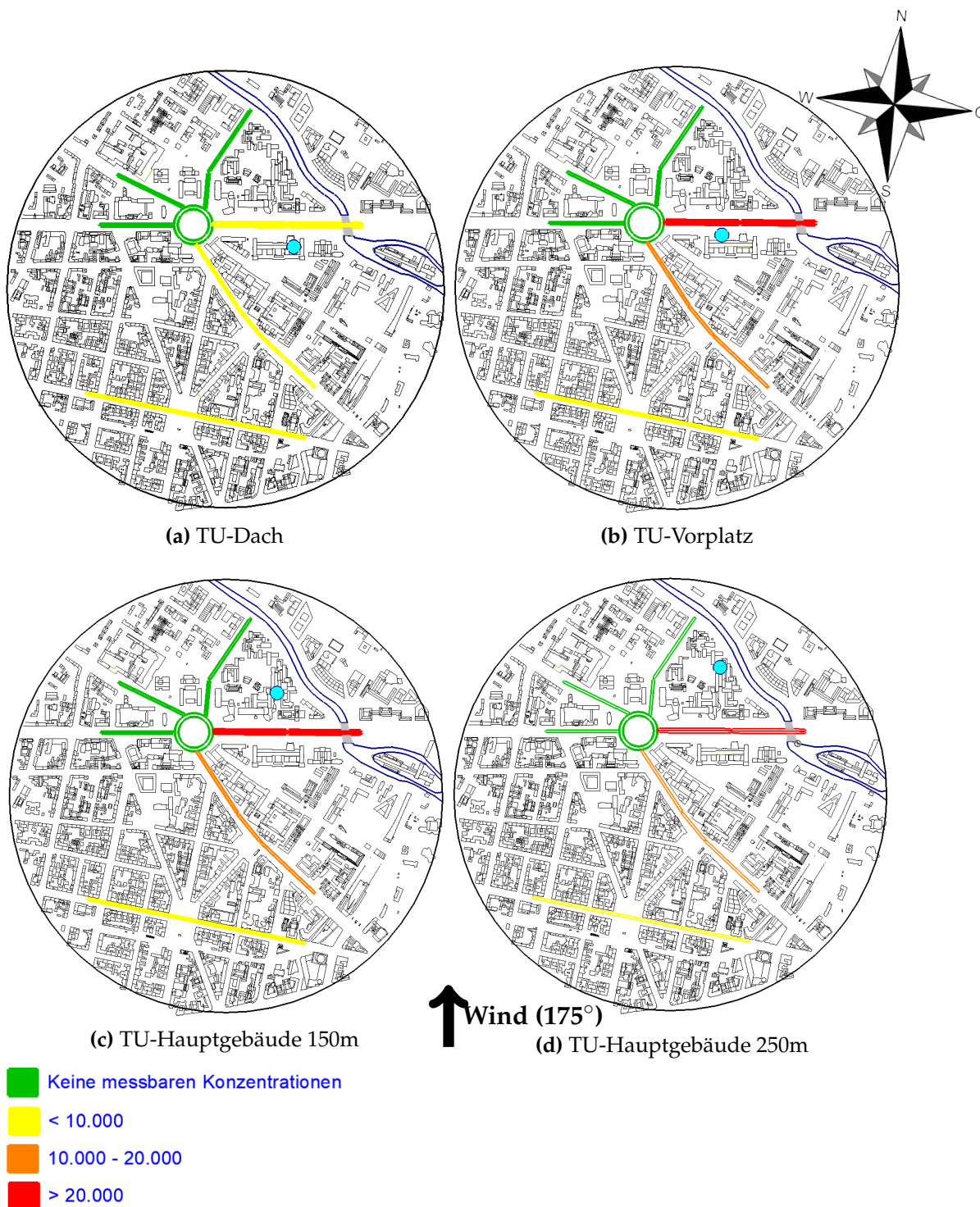


Abbildung 9.2.: 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen von verkehrsreichen Straßen gemessen an vier Messorte bei einer Windrichtung von 175 °

9.1 Messortrepräsentativität bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen

der Straßen wurden für das 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentration, die am eingetragenen Messort ankommt, im Ampelsystem eingefärbt. Die Windrichtung beträgt 175° und steht somit senkrecht auf der Straße des 17. Juni. Durch das verwendete Farbschema zeigt sich ein gleiches Bild für die Messorte TU-Vorplatz, TU-150m und TU-250m. Nur beim TU-Dach sind die Konzentrationen geringer. Dabei sind die Liniquellen, an denen keine messbare Konzentration gemessen wurden, grün. Messorte mit einer dimensionslosen Konzentration gemäß Gleichung 7.3 von kleiner als $10 \cdot 10^3$ wurden in gelb, mit $10 \cdot 10^3$ bis $20 \cdot 10^3$ in orange und größer als $20 \cdot 10^3$ in rot eingefärbt.

Um trotzdem mögliche Unterschiede zu ermitteln wurden die 50. Perzentile der dimensionslosen Konzentrationen in der Tabelle 9.1 zusammengefasst. Straßenzüge, die an keinem der Messstandorte messbare Konzentrationen erzeugt haben, werden in der Tabelle nicht mit aufgeführt. Für die Straße des 17. Juni zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den jeweiligen Stationen. Das war aufgrund der Nähe zur Quelle zu erwarten. Auffällig ist, dass, obwohl der TU-Vorplatz nicht in der Strömungsrichtung zur Straße des 17. Juni liegt, hier die höchsten Konzentrationen gemessen worden sind. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben liegt dies an einem Rezirkulationsgebiet, welches sich hinter dem TU-Hauptgebäude ausbildet. Dieses Rezirkulationsgebiet ist in den Ergebnissen der Strömungsmessungen zu erkennen. In Abbildung 9.3 sind die Windrosen in 4 m Höhe über Grund innerhalb der Straße des 17. Juni dargestellt. Es zeigt sich, dass bei einer Anströmwindrichtung von 175° die Windgeschwindigkeit direkt hinter dem südlich gelegenen TU-Hauptgebäude deutlich reduziert ist und überwiegend aus nördlichen Richtungen kommt. Durch dieses Rezirkulationsgebiet werden auch geringe Konzentrationen zur Messstelle auf dem TU-Dach transportiert. In Strömungsrichtung erwartet man, dass die der Quelle näheren Messorte höhere Konzentrationen als weiter entfernte aufweisen. Dies zeigt sich auch für die Messstationen TU-150m und TU-250m.

	TU-Dach	TU-Vorplatz	TU-150m	TU-250m
Straße des 17. Juni	$(0 \pm 0.5) \cdot 10^3$	$(994 \pm 60) \cdot 10^3$	$(73 \pm 4) \cdot 10^3$	$(48 \pm 3) \cdot 10^3$
Hardenbergstraße	$(8.7 \pm 0.5) \cdot 10^3$	$(14 \pm 0.9) \cdot 10^3$	$(16 \pm 1) \cdot 10^3$	$(14 \pm 0.9) \cdot 10^3$
Kantstraße	$(9.9 \pm 0.6) \cdot 10^3$	$(10 \pm 0.6) \cdot 10^3$	$(9.7 \pm 0.6) \cdot 10^3$	$(8.1 \pm 0.5) \cdot 10^3$

Tabelle 9.1.: 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen für die Messorte TU-Dach, TU-Vorplatz, TU Hauptgebäude 150 m und TU Hauptgebäude 250 m

Bezüglich der Hardenbergstraße liegen die Unterschiede in den gemessenen mittleren Konzentrationen für die Messorte TU-Vorplatz, TU-150m und TU-250m und bezüglich der Kantstraße für die Messorte TU-Dach, TU-Vorplatz und TU-150m innerhalb der Messunsicherheit. Im Folgenden soll untersucht werden, ob dies auch beim 5. und 95. Perzentil auftritt.

Die oben beschriebenen Zusammenhänge der Hauptverkehrsstraßen zu den Messpositionen werden mit der Betrachtung der 5 und 95. Perzentile näher erläutert. In Tabelle 9.2 wurden das 5. und das 95. Perzentil der Immissionswerte für Freisetzen in der Hardenbergstraße und der Kantstraße eingetragen. Auffällige Ergebnisse werden am Messort TU-Dach beobachtet, bei dem sowohl für Freisetzen in der Hardenbergstraße als auch in der Kantstraße das 95. Perzentil der Immissionswerte signifikant höher

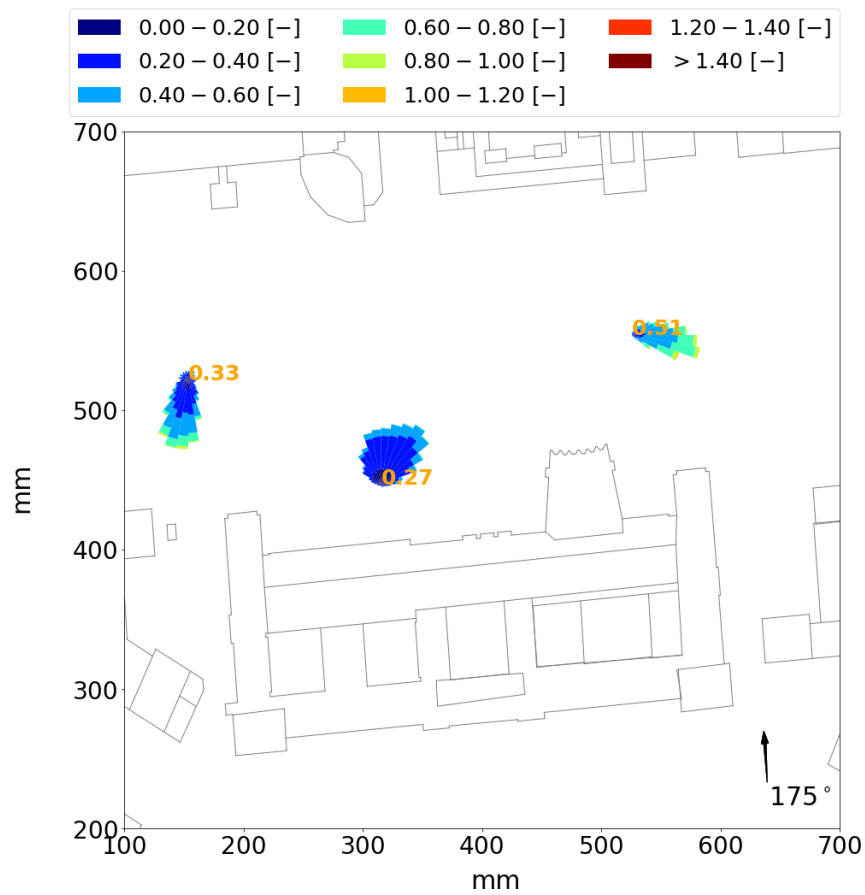


Abbildung 9.3.: Windrosen in 4 m Höhe über Grund bei einer Anströmwindrichtung von 175°

9.1 Messortrepräsentativität bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen

und das 5. Perzentil der Immissionswerte signifikant niedriger als bei den anderen drei Stationen ist. Dies liegt daran, dass das TU-Dach aufgrund seiner Höhe frei angeströmt wird. Dadurch werden hier einerseits Wirbel mit sehr hohen Konzentrationen und andererseits aber auch Wirbel mit frischer Luft herantransportiert. Zusätzlich liegt es in Strömungsrichtung am nächsten zu den emittierenden Hauptverkehrsstraßen. Daraus resultiert, dass die Lage und somit die Art der Anströmung sehr großen Einfluss auf mögliche Extremwerte hat und dies nicht zwingend aus den Mittelwerten erkennbar ist. Für den Messort TU-Dach erwartete man, dass durch die gute Durchmischung überwiegend niedrige Werte gemessen werden, die durch einzelne Wirbel mit höheren Konzentrationen unterbrochen sind. Dies ist auch aus der Zeitreihe für die Hardenbergstraße am Messort TU-Dach (Abbildung 9.4) ersichtlich. In der Häufigkeitsverteilung ergibt sich in der halb-logarithmischen Darstellung eine lineare Abnahme.

	TU-Dach	TU-Vorplatz	TU-150m	TU-250m
95. Perzentil Hardenbergstraße	$(36 \pm 2) \cdot 10^3$	$(25 \pm 1.5) \cdot 10^3$	$(24 \pm 1.4) \cdot 10^3$	$(22 \pm 1.3) \cdot 10^3$
Kantstraße	$(17 \pm 1) \cdot 10^3$	$(13 \pm 0.8) \cdot 10^3$	$(13 \pm 0.8) \cdot 10^3$	$(11 \pm 0.7) \cdot 10^3$
5. Perzentil Hardenbergstraße	$(0.06 \pm 0.5) \cdot 10^3$	$(6.3 \pm 0.5) \cdot 10^3$	$(7.9 \pm 0.5) \cdot 10^3$	$(7.8 \pm 0.5) \cdot 10^3$
Kantstraße	$(1.7 \pm 0.6) \cdot 10^3$	$(7.3 \pm 0.5) \cdot 10^3$	$(6.7 \pm 0.5) \cdot 10^3$	$(5.6 \pm 0.5) \cdot 10^3$

Tabelle 9.2.: 5. und 95. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen für die vier Messorte

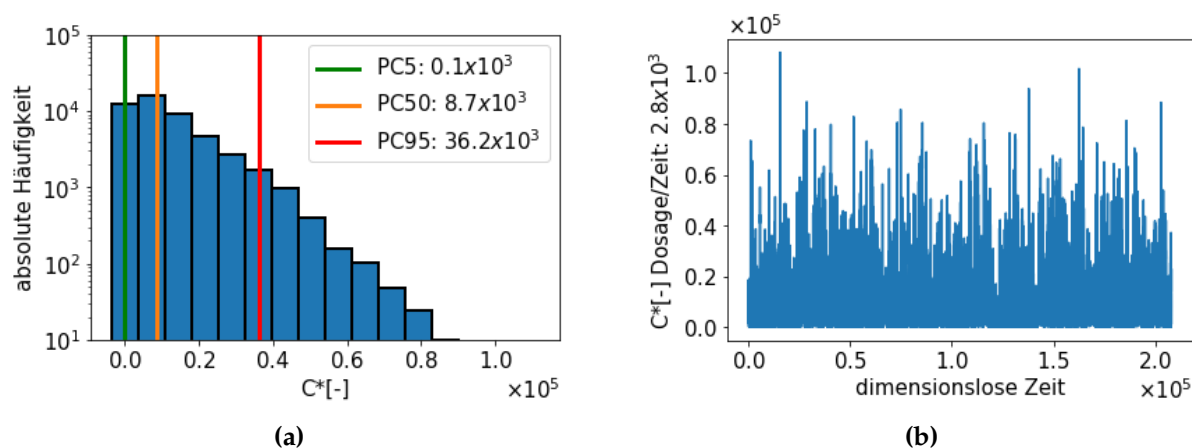


Abbildung 9.4.: Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Hardenbergstraße am Messort TU-Dach

Aufgrund der Werte für das 5. Perzentil, das 95. Perzentil und den 50. Perzentil wäre eine ähnliche Verteilung für die Kantstraße zu erwarten gewesen. Jedoch wie in Abbildung 9.5 zu sehen, verschiebt sich das Maximum der Häufigkeitsverteilung auf höhere Werte und es wurden zusätzlich weniger hohe Konzentrationsspitzen gemessen. Dies ist auf die größere Entfernung der Kantstraße zum Messort zurückzuführen. Es findet bereits eine größere Durchmischung statt.

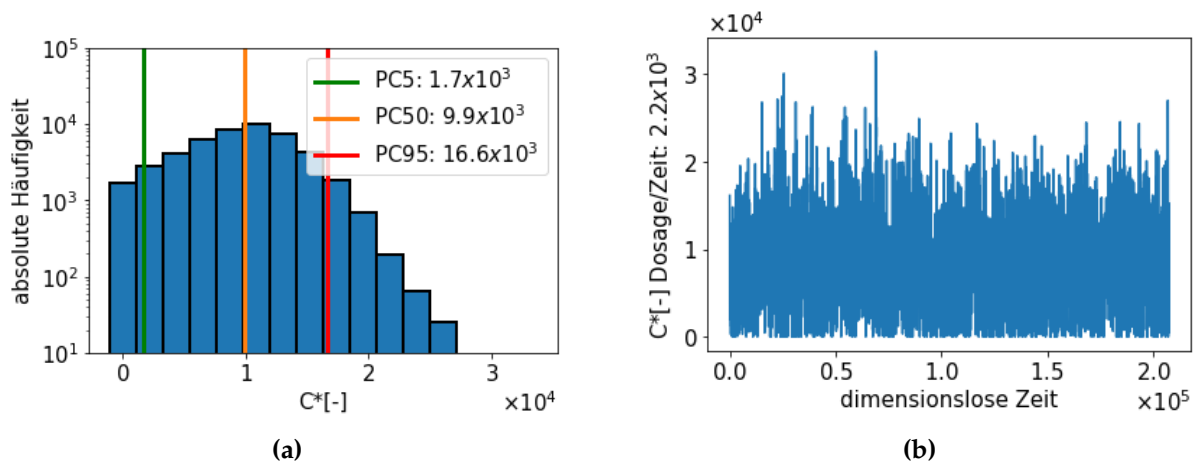


Abbildung 9.5.: Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Kantstraße am Messort TU-Dach

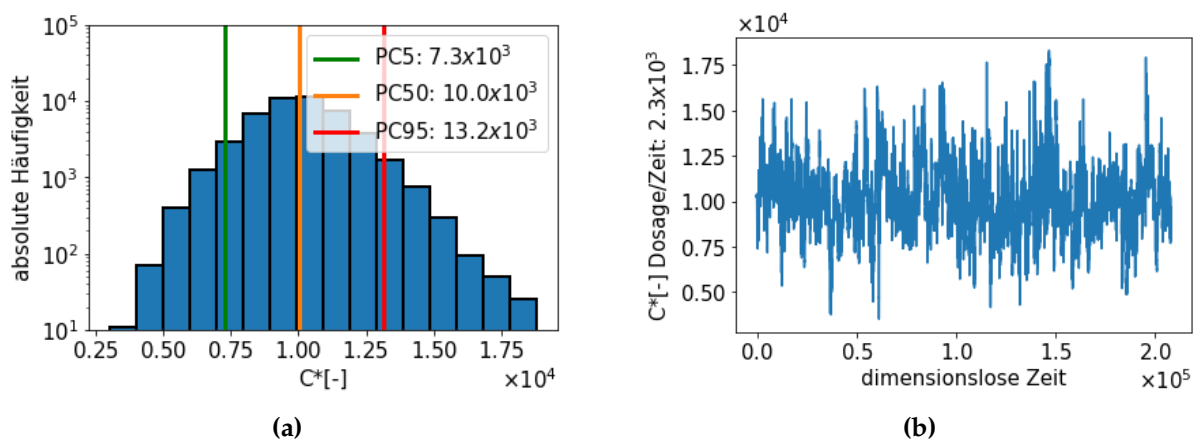


Abbildung 9.6.: Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Kantstraße am Messort TU-Vorplatz

Bei Betrachtung des 5. Perzentils fällt der TU-Vorplatz auf. Bei diesem liegen die Unterschiede der Ergebniswerte für die Hardenbergstraße und für die deutlich entfernter liegende Kantstraße innerhalb der Messunsicherheit. In Abbildung 9.6 sind zur näheren Untersuchung die Häufigkeitsverteilung und die Messreihe von der Hardenbergstraße und in Abbildung 9.7 von der Kantstraße am Messort TU-Vorplatz dargestellt. Die ähnlichen 5. Perzentile sind darauf zurückzuführen, dass es durch die weitere Entfernung der Kantstraße zu einer stärkeren Durchmischung der Luft kommt. Beim zeitlichen Verlauf der Konzentrationen zeigt sich, dass sie deutlich ausgeglichener sind. Der Wertebereich liegt für die Kantstraße (Abbildung 9.6b) zwischen $0,4$ und $1,8 \cdot 10^4$. Für die Hardenbergstraße wurden dagegen Konzentrationsspitzen mit fast $6 \cdot 10^4$ gemessen.

Beim Vergleich der Messorte TU-150m und TU-250m ist zu sehen, dass trotz der Entfernung von 100 m zwischen den Messorten sowohl das 5. als auch das 50. und das 95. Perzentil der Immissionswerte für Freisetzungen in der Hardenbergstraße innerhalb der Messunsicherheit liegen. Bei genauerer Betrachtung der Häufigkeitsverteilung und der Zeitreihe (Abbildung 9.8 und Abbildung 9.9) zeigt sich, dass die Messwerte für den

9.1 Messortrepräsentativität bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen

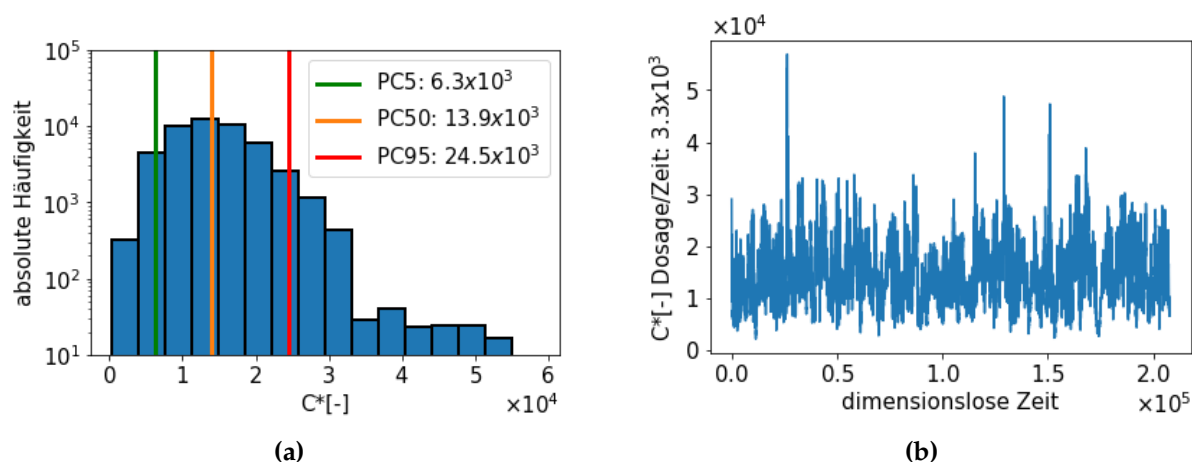


Abbildung 9.7.: Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Hardenbergstraße am Messort TU-Vorplatz

Messort TU-250m deutlich stärker als für den Messort TU-150 durchmischt sind. Im Gegensatz dazu nehmen alle drei Perzentile der Immissionswerte für Freisetzungen für die Kantstraße innerhalb dieser Entfernung ab (Abbildung E.1 und Abbildung E.2).

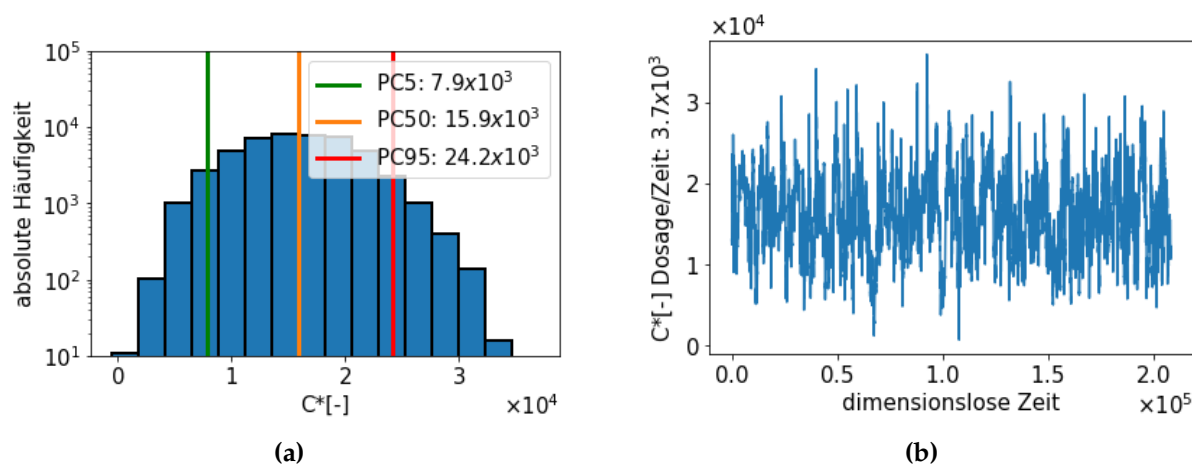


Abbildung 9.8.: Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Hardenbergstraße am Messort TU-150m

9.1.2. Windrichtung 265°

Neben der Windrichtung senkrecht zur Straße des 17. Juni (175°) wurde die Windrichtung parallel zur Straße des 17. Juni (265°) untersucht. Dabei wurden für die Abbildung 9.10 exakt die gleichen Linienquellen und Messorte wie für die Abbildung 9.2 verwendet. Zur Veranschaulichung wurde ein Ampelschema definiert. Dafür wurden die Linienquellen entlang der Hauptverkehrsstraßen jeweils in der Farbe markiert, die das 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen anzeigen, die am Messort (blauer Punkt) gemessen worden sind. Dabei sind Linienquellen, von denen keine messbaren

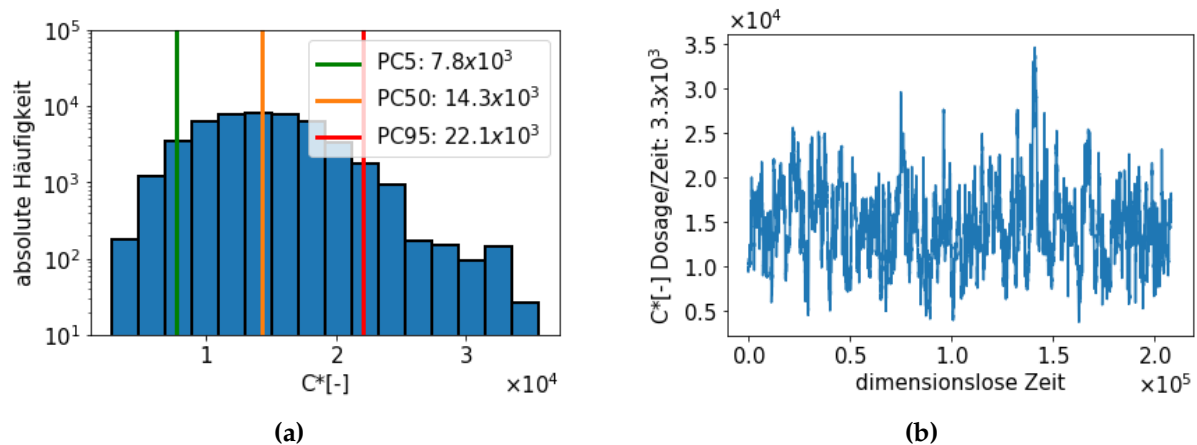


Abbildung 9.9.: Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Hardenbergstraße am Messort TU-250m

Konzentrationen an den Messorten angekommen sind, in grün dargestellt. Hauptverkehrsstraßen sind in gelb eingezeichnet, deren Anteil vom 50. Perzentil am Messort geringer als 2000 ist. In Orange wurden Straßen mit Anteilen von 2000 bis 20.000 und in rot für mehr als 20.000 eingetragen.

Es zeigt sich, dass im Vergleich von 175° zu 265° die Konzentrationsverteilungen für alle Messorte unterschiedlich sind. Für das Dach des Hauptgebäudes der TU Berlin erwartete man, dass die höchsten Konzentrationen vom Kreisverkehr des Ernst-Reuter-Platzes kommen. Dies ist in Abbildung 9.10a zu sehen. Mittlere Anteile kamen von den beiden in Strömungsrichtung auf den Ernst-Reuter-Platz zulaufenden Straßen und der Hardenbergstraße. Geringere Konzentrationen kamen von der Straße des 17. Juni und der Marchstraße. Bei der Straße des 17. Juni liegt dies daran, dass die meisten Konzentrationen unterhalb des Messortes vorbeitransportiert wurden und erst danach die Schadstofffahne auf die Höhe der Messposition aufsteigt. Auffällig ist vor allem die Hardenbergstraße, von der deutliche Konzentrationen am Messort gemessen wurden, obwohl nur ein kleiner Bereich der Straße in Strömungsrichtung liegt. Da für diese Arbeit keine vertikalen Strömungsmessungen vorliegen, können die Messergebnisse nicht eindeutig aufzeigen, dass die Schadstofffahne durch die Häuser in Strömungsrichtung bereits zum Aufsteigen gebracht und so zur Messstelle transportiert worden sind. Ein weiterer Anteil kam von der Marchstraße. Wie die Schadstoffe zur Messstelle transportiert wurden, kann ebenso aufgrund fehlender Messungen nicht näher untersucht werden.

Dass sich die Konzentrationen quer zur Strömungsrichtung ausbreiten, zeigt sich am nächsten Messort auf dem Vorplatz des Hauptgebäudes (Abbildung 9.10b). Hier ist zu erkennen, dass ein signifikanter Anteil von der Marchstraße gemessen wurde, obwohl wegen der Ausrichtung der Straße zu erwarten gewesen wäre, dass die Konzentrationen ins nördliche Modellgebiet transportiert werden. Auch von der Hardenbergstraße, die ebenso keine direkte Verbindung zum Messort aufweist, wurden Konzentrationen am Vorplatz gemessen. Durch die Verteilung der Gebäude ist davon auszugehen, dass die Konzentrationen über die Gebäude zum Vorplatz transportiert wurden. Jedoch lässt sich dies mit den vorhandenen Messdaten nicht nachweisen. Die hohen Konzentrationen der anderen Hauptverkehrsstraßen waren zu erwarten.

9.1 Messortrepräsentativität bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen

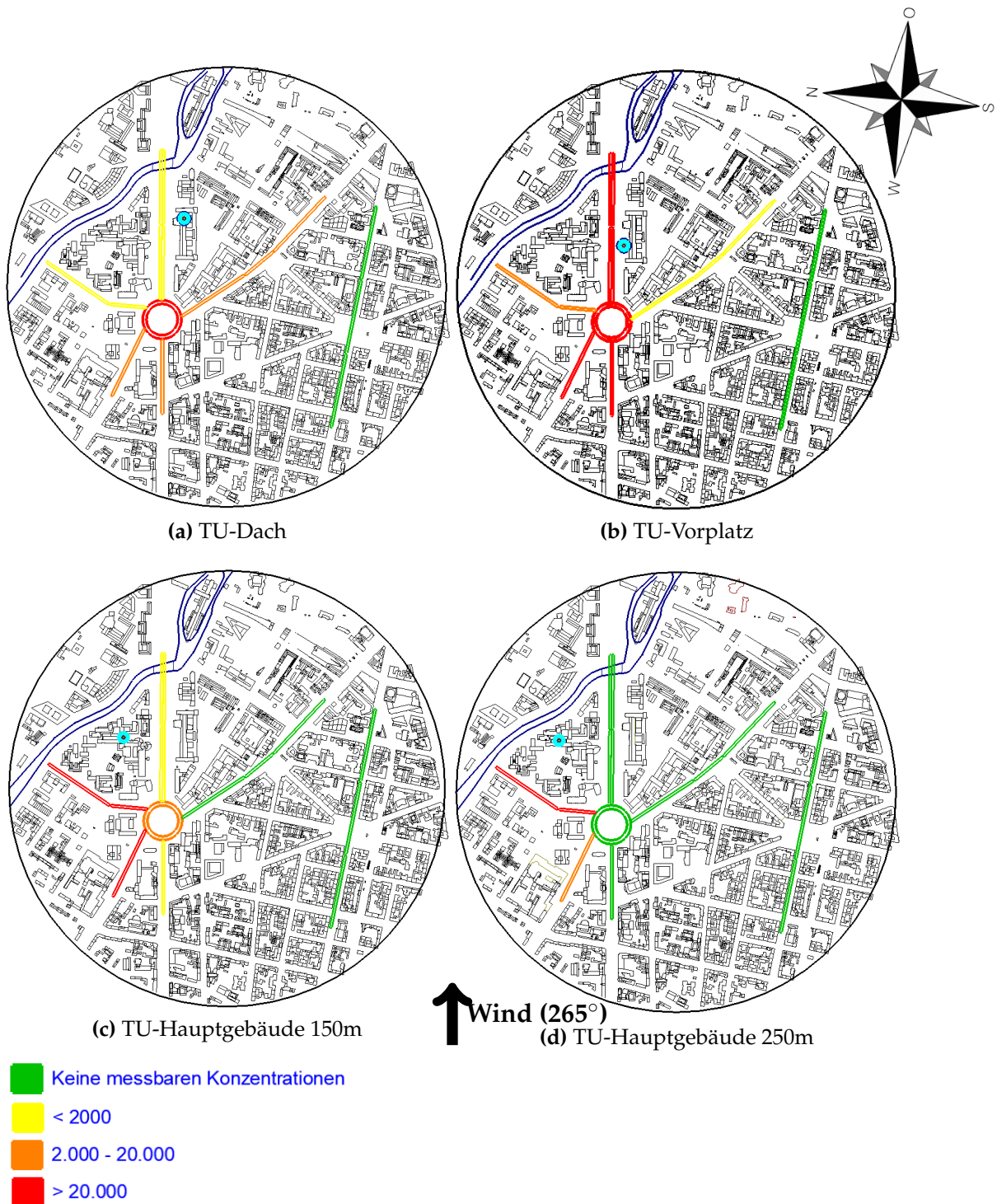


Abbildung 9.10.: 50. Perzentil des Anteils der dimensionslosen Konzentrationen von verkehrsreichen Straßen gemessen an vier Messorten bei einer Windrichtung von 265°

In Abbildung 9.10c liegt der Messort in einer Nebenstraße zur Straße des 17. Juni. Dort war zu erwarten, dass die höchsten Konzentrationen von der Marchstraße kommen, da der Messort in Strömungsrichtung von der Marchstraße liegt. Dies ist in Abbildung 9.10c zu sehen. Das gilt ebenso für die Otto-Suhr-Allee. Jedoch wurden hier auch Konzentrationen von der Straße des 17. Juni und von den Straßen, die in direkter Strömungslinie zur Straße des 17. Juni liegen, gemessen. Von der Hardenbergstraße erreichen keine Konzentrationen die Messstelle.

In Abbildung 9.10d ist zu sehen, dass 100 m weiter nördlich von der vorherigen Messstelle nur noch Konzentrationen von der Marchstraße und der Otto-Suhr-Allee gemessen wurden. Von der Straße des 17. Juni kamen keine Konzentrationen an diesem Standort an.

Im Vergleich zur Windrichtung von 175° verdeutlicht dies, wie wichtig die Hauptwindrichtung für die richtige Interpretation der Messwerte ist. Ergänzend ist festzustellen, dass die Konzentrationen nicht nur aus der nächstgelegenen Hauptverkehrsstraße stammen, sondern auch weiter entfernt liegende Straßen einen wichtigen Beitrag liefern. Ebenso können Konzentrationen von Hauptverkehrsstraßen kommen, die nicht in Strömungsrichtung liegen.

9.1.3. Wirkung der lokalen Gebäudestruktur

Nachdem die räumliche Repräsentativität bezüglich unterschiedlicher Windrichtungen untersucht wurde, wird nun der Einfluss eines Gebäudedurchbruchs in Straßenhöhe auf die räumliche Repräsentativität hin untersucht. Dafür wurde in Abbildung 9.11 ein Ausschnitt aus dem Ernst-Reuter-Platz-Modell mit den Umrissen der untersuchten Linienquellen und dem Messort als rotes Kreuz eingetragen. Dabei stellt die Abbildung 9.11a die Variante mit Durchgang und die Abbildung 9.11b ohne Durchgang dar. Zusätzlich ist in Abbildung 9.11b der nicht vorhandene Durchgang mit einem schwarzen Balken markiert.

Es wurde erwartet, dass die höchsten Konzentrationen von der Hardenbergstraße kommen. Dies zeigt sich bei der Variante mit offenem Durchgang in Abbildung 9.11a mit $31.8 \pm 1.9 \cdot 10^3$. Allerdings liegt auch der Anteil vom Ernst-Reuter-Platz mit $30.0 \pm 1.8 \cdot 10^3$ im gleichen Bereich. Die Länge der jeweiligen Linienquellen wurde bei der Berechnung der dimensionlosen Werte berücksichtigt, so dass ein direkter Vergleich hier möglich ist. Leicht niedriger sind die Konzentrationen von der Bismarckstraße mit $19.1 \pm 1.1 \cdot 10^3$. Ein geringer Anteil kam selbst von der Otto-Suhr-Allee. Von der Marchstraße und der Straße des 17. Juni wurden keine messbaren Konzentrationen gemessen.

Nach Verschließen des Durchgangs erhöhten sich die Konzentrationen von der Hardenbergstraße auf $36.0 \pm 2.2 \cdot 10^3$ und die Konzentrationen vom Ernst-Reuter-Platz und der Bismarckstraße verringerten sich auf $12.7 \pm 0.8 \cdot 10^3$ bzw. auf $8.6 \pm 0.5 \cdot 10^3$. Also gilt wie bei den Windböen, dass der Unterschied, ob ein Gebäudedurchbruch im Datensatz vorhanden ist, starke Auswirkungen auf das Strömungsmuster und somit auf die Konzentrationsverteilung hat.

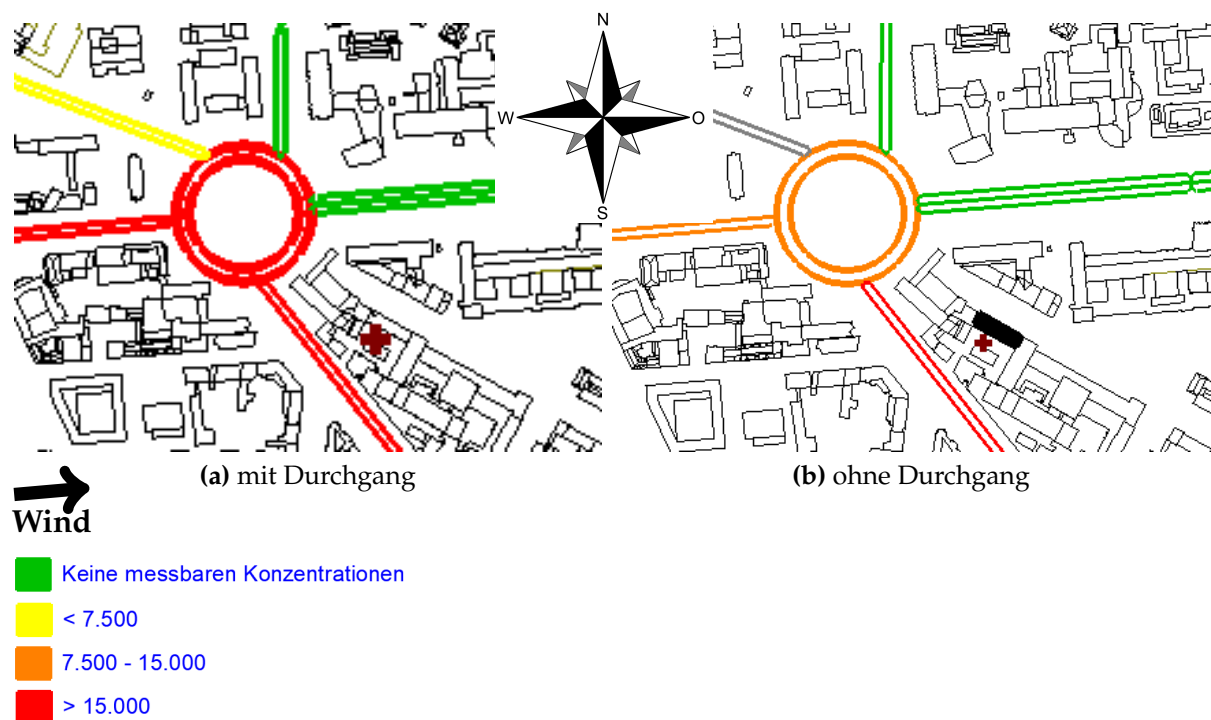


Abbildung 9.11.: 50. Perzentil des Anteils der dimensionslosen Konzentrationen der Hauptverkehrsstraßen am Messort südlich des Durchgangs (schwarzer Balken in Abbildung b)) bei einer Hauptwindrichtung von 265° a) mit Durchgang und b) ohne Durchgang

Zur genaueren Untersuchung sind in Abbildung 9.12 die Windrosen für die bisher untersuchte Messposition und einer weiteren Messposition nördlich des Durchgangs in Abbildung 9.12a für den Fall mit Durchgang und in Abbildung 9.12b ohne Durchgang dargestellt. Es zeigt sich, dass die Messwerte nördlich des Durchgangs nicht durch den Durchgang beeinflusst sind. Jedoch ist ein deutlicher Einfluss an der Messposition südlich des Durchgangs zu sehen. Ein deutlicher Anteil des Windes kommt bei der Variante mit Durchgang durch den Durchgang. Ohne Durchgang kommt der Wind überwiegend aus östlichen Richtungen. Durch Verschließen des Durchgangs reduziert sich die mittlere Windgeschwindigkeit. Daraus resultiert, dass die Stärke des Einflusses eines Durchgangs stark von der Lage des Messpunktes und der vorherrschenden Anströmwindrichtung abhängig ist.

9.2. Windrichtungsabhängigkeit der Emissionsbelastung und der Transportentfernung

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Messortrepräsentativität untersucht wurde, wird nachfolgend auf die Transportentfernung von Emissionen einer Hauptverkehrsstraße und darauf, welchen Einfluss eine Windrichtungsänderung auf die Ergebnisse hat, eingegangen. Zur Untersuchung fanden Messungen senkrecht zur Hauptverkehrsstraße, in

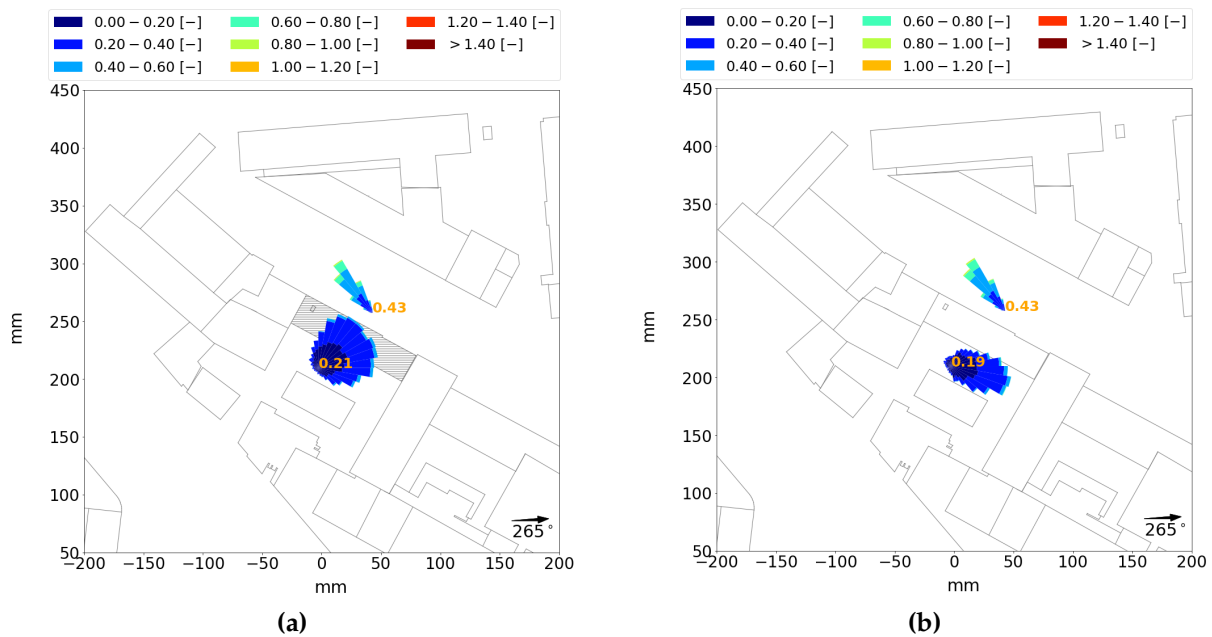


Abbildung 9.12.: Windrosen für die Messpunkte nördlich und südlich des Durchgangs in 4 m Höhe über Grund a) mit Durchgang (grau markierter Bereich) und b) ohne Durchgang für eine Anströmwindrichtung von 265°

200 m Entfernung und in einer Seitenstraße statt. Die Messpunkte und die verwendeten Windrichtungen (185°, 200°, 215°, 230°) wurden in Abbildung 9.13 eingetragen.

9.2.1. Emissionsbelastung in einer Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße

Zunächst ist in Abbildung 9.14 das 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen als x-z-Querschnitt einer Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße (die die Quelle darstellt) für eine jeweilige Windrichtung (a-d) dargestellt. Eine schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe dieser Straße.

In Abbildung 9.14a beträgt die Windrichtung in der Anströmung 185° und ist somit senkrecht zur Hauptverkehrsstraße. Man erwartet, dass die höchsten Konzentrationen am Anfang der Straße in Bodennähe gemessen werden. Dies ist in Abbildung 9.14a zu sehen. Quellnah über Dachniveau sind die Konzentrationen schon stark verdünnt und in 65 m Höhe über Grund nicht mehr messbar. Zusätzlich nehmen die Konzentrationen entlang der Straße ab und verteilen sich vertikal auch oberhalb des mittleren Dachniveaus. In 1 km Entfernung sind sie bereits so stark verdünnt, dass vom Boden bis über Dachniveau an allen Messorten die gleiche Konzentration innerhalb der Messunsicherheit gemessen wurde. Auch in 65 m Höhe über Grund waren noch deutlich Konzentrationen messbar.

Bei einer Windrichtungsdrehung von 15° zeigt Abbildung 9.14b, dass das 50. Perzentil 25 m hinter der Quelle noch sehr hohe Konzentrationen ($750 \pm 45 \cdot 10^3$) jedoch deutlich niedriger als für 185° ($1076 \pm 65 \cdot 10^3$) aufweist. Dies lässt darauf schließen, dass hier weniger Konzentrationen in die Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße eingetragen werden. Entlang der Straße nehmen die Konzentrationen weiter ab. Über Dachniveau

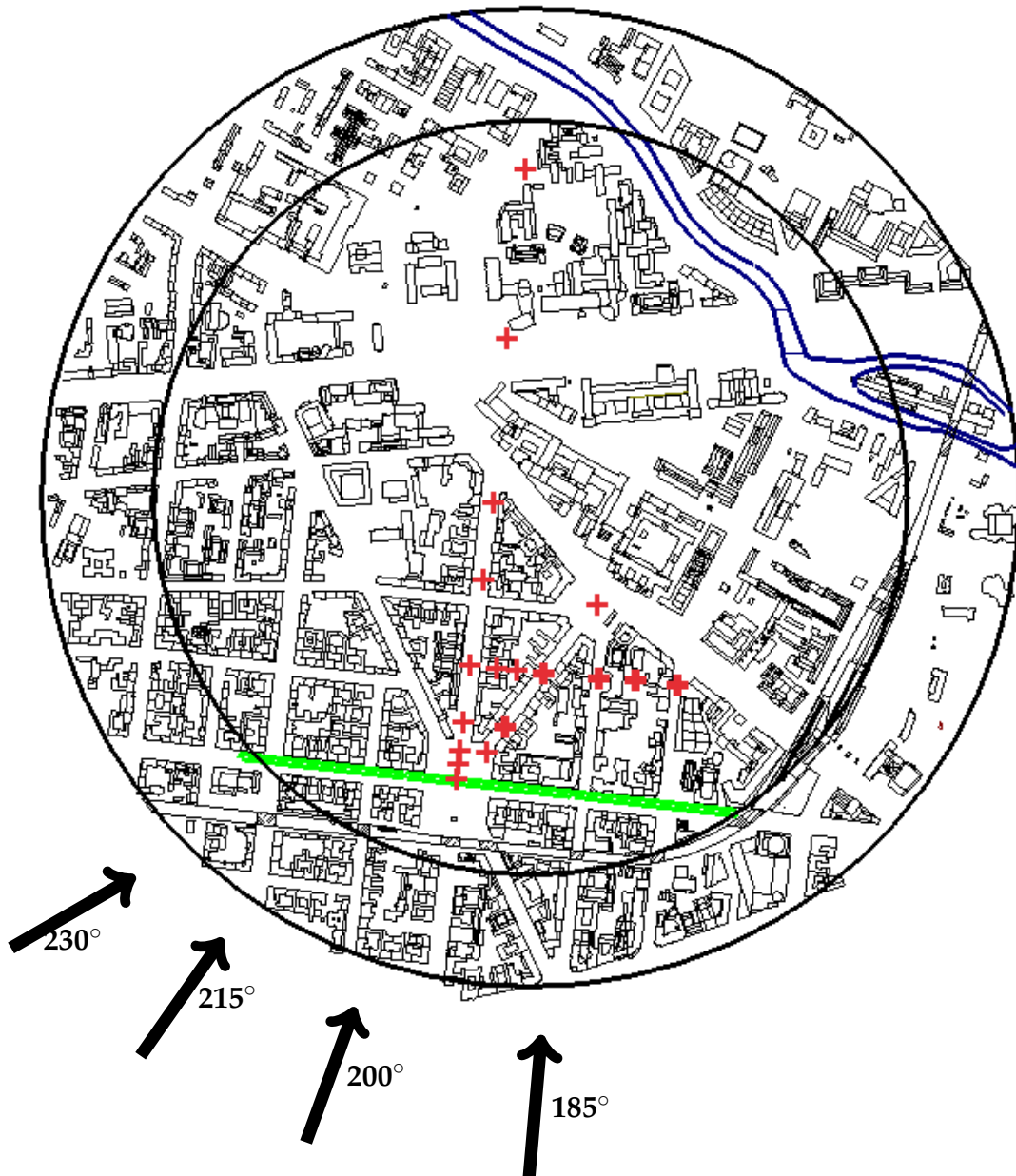


Abbildung 9.13.: Modellgebiet vom Ernst-Reuter-Platz mit den Linienquellen in der Kantstraße in grün und den Messpunkten in rot und die gemessenen Windrichtungen (185°, 200°, 215°, 230°) als Pfeile

liegt das 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen für beide Windrichtung bei $0 \pm 0.5 \cdot 10^3$. In 500 m Entfernung sind die Konzentrationen in der Straßenschlucht für 200° niedriger als für eine Windrichtung von 185° . Jedoch sind sie über Dachniveau höher. Dies weist daraufhin, dass ein Großteil der Konzentrationen direkt über Dachniveau transportiert wird und in der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße nicht gemessen wurden. Selbst in 1000 m Entfernung sind die Unterschiede der gemessenen Konzentrationen in 4 m Höhe über Grund der Windrichtung von 200° ($12.7 \pm 0.8 \cdot 10^3$) und der Windrichtung von 185° ($14.6 \pm 0.9 \cdot 10^3$) außerhalb der Messunsicherheit. Über Dachniveau liegen sie innerhalb der Messunsicherheit.

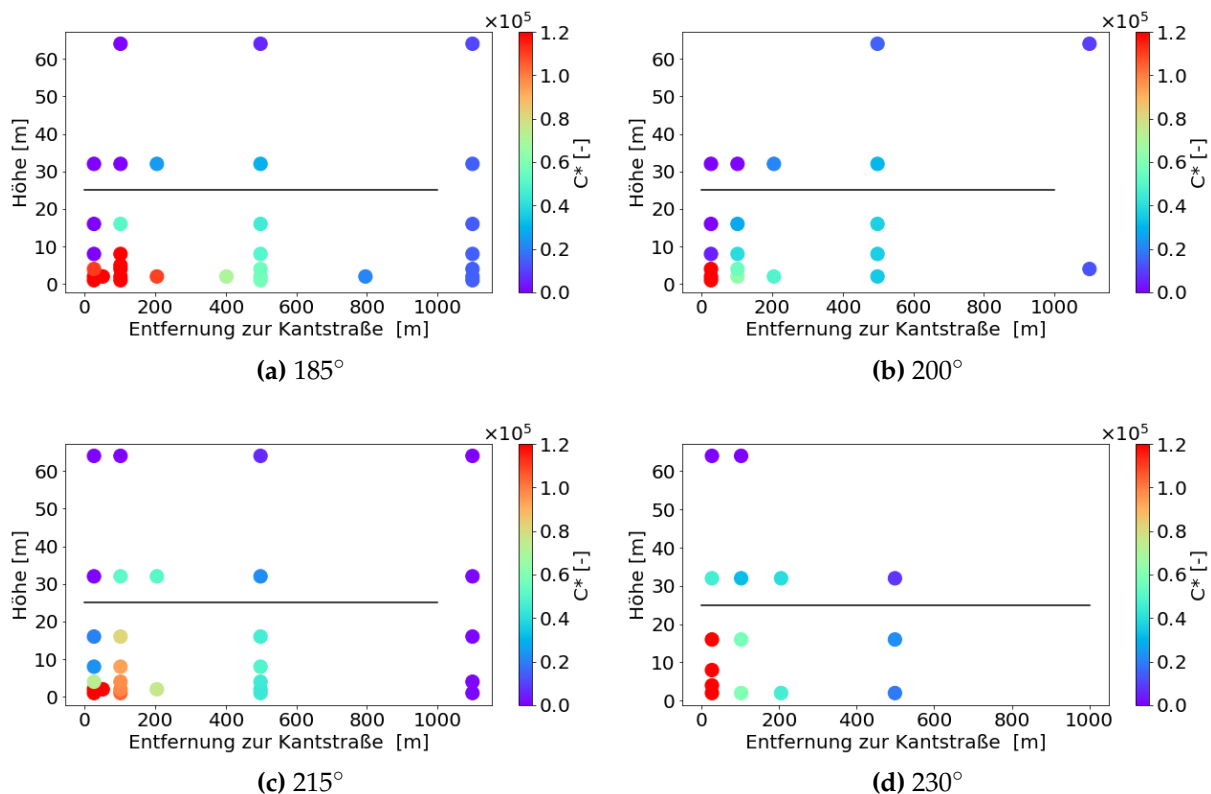


Abbildung 9.14.: 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen entlang der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße für die Windrichtungen a) 185° , b) 200° , c) 215° und d) 230° . Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.

In Abbildung 9.14c ist ein noch stärkerer Transport über Dachniveau zu erkennen. Bereits in 25 m Entfernung zur Hauptverkehrsstraße reicht die Konzentration bis in 65 m Höhe. Auch in 100 und 200 m Entfernung ist die Konzentration über Dachniveau deutlich höher als bei 185° und 200° . Dies zeigt, wie bereits eine geringe Windrichtungsänderung von 30° den Transportweg der Konzentrationen deutlich verändern kann. Auffällig ist, dass die Konzentrationen ab 100 m Entfernung innerhalb der Straße höher als bei 200° sind. Mit Hilfe des 5. Perzentils wird dies näher untersucht. Im Weiteren wurde in 1000 m Entfernung noch ein geringer Anteil gemessen. Dies ändert sich bei einer Windrichtungsdrehung auf 230° . In Abbildung 9.14d sieht man, dass in 1000 m Entfernung keine Konzentrationen von der emittierenden Straße mehr gemessen wurden. Auffällig ist, dass quellnah über Dachniveau die Konzentrationenwerte deutlich ansteigen. Auch innerhalb der Straße sind sie größer als bei den anderen Windrichtun-

9.2 Windrichtungsabhängigkeit der Emissionsbelastung und der Transportentfernung

gen. Dies weist daraufhin, dass die Schadstofffahne deutlich schneller aufsteigt und so die Konzentrationen über Dachniveau transportiert werden. Da über Dachniveau die Einmischung von frischer Luft deutlich stärker als innerhalb der Straße ist, reduziert sich die Reichweite der Konzentrationen bei dieser Windrichtung deutlich. Bereits in 500 m Entfernung konnten nur noch geringe Anteile an Konzentrationen innerhalb der Straße bis geringfügig über Dachniveau gemessen werden.

95. Perzentil

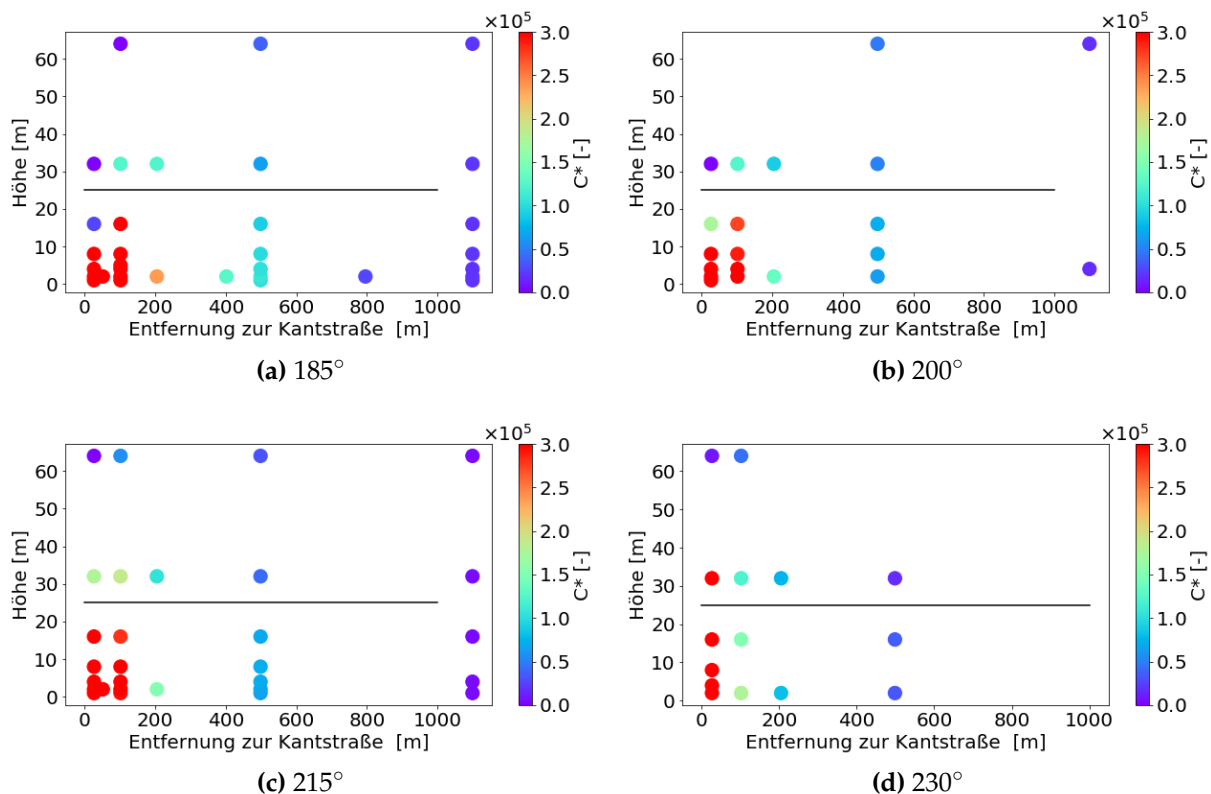


Abbildung 9.15.: 95. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen entlang der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße für die Windrichtungen a) 185°, b) 200°, c) 215° und d) 230°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.

In Abbildung 9.15 ist das 95. Perzentil des Anteils an dimensionslosen Konzentrationen von der Hauptverkehrsstraße dargestellt. Wie beim 50. Perzentil zeigt sich, dass bei 185° die Konzentrationen quellnah und bodennah am höchsten sind und mit der Höhe und Entfernung abnehmen. Bereits bei einer Windrichtungsdrehung um 15° (Abbildung 9.15b) steigt die Schadstofffahne stärker auf, wodurch die Konzentrationen kurz unter Dachniveau 25 m von der Quelle entfernt signifikant höher sind als bei einer Windrichtung von 185°. Durch den Abtransport der Schadstoffe über Dachniveau sind die Konzentrationswerte innerhalb der Straße bereits bei 100 m Entfernung deutlich reduziert. Bei einer weiteren Windrichtungsdrehung von 15° nehmen die Anteile der dimensionslosen Konzentrationswerte bodennah weiter ab. Lediglich in 500 m Entfernung liegen die Unterschiede der Konzentrationswerte für die Windrichtungen

200° und 215° innerhalb der Messunsicherheit. Ebenso zeigt sich auch bei 200°, dass die Schadstofffahne stärker aufsteigt, so dass die Konzentrationswerte kurz unter und kurz über Dachniveau weiter zugenommen haben. Bei einer Windrichtung von 230° wurde im Vergleich zu den anderen Windrichtungen das größte 95. Perzentil über Dachniveau gemessen. Dabei sind die Werte für das 95. Perzentil genauso wie beim 50. Perzentil innerhalb der Straßenschlucht signifikant niedriger als bei den anderen Windrichtungen.

5. Perzentil

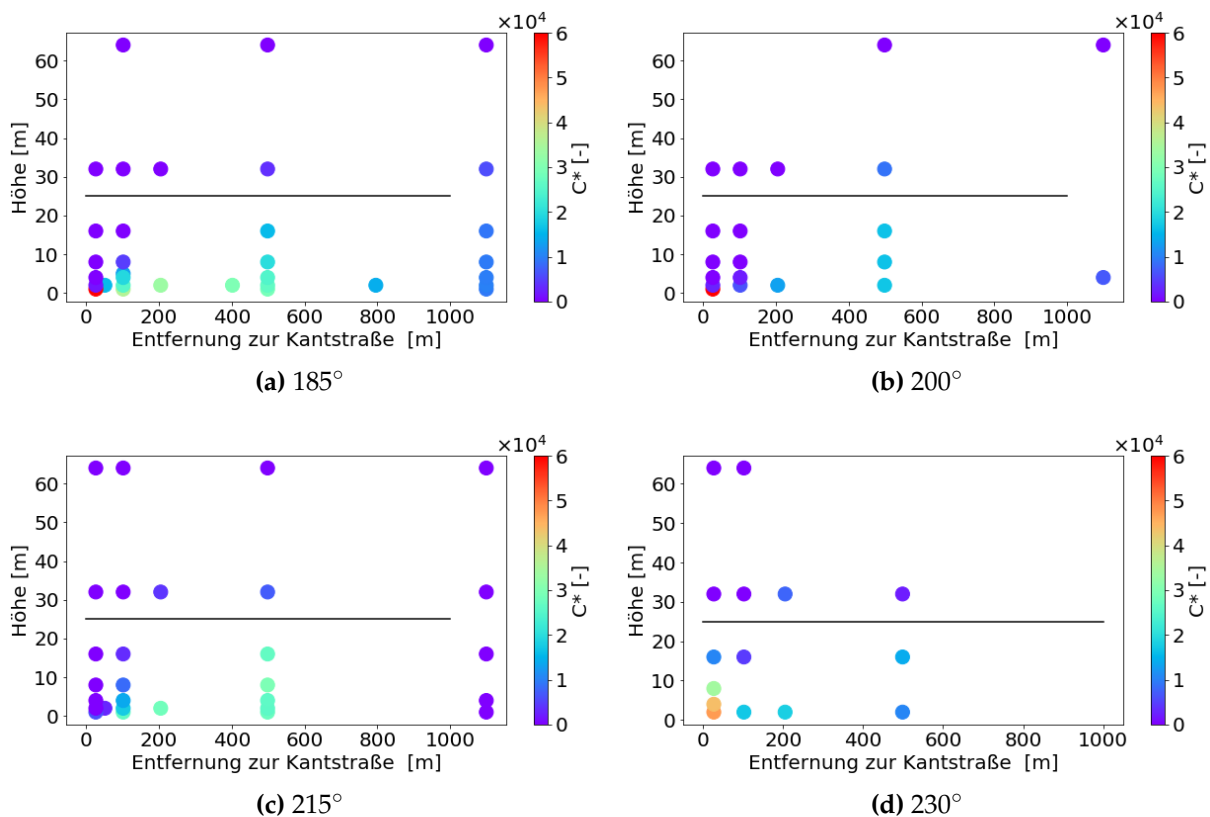


Abbildung 9.16.: 5. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen entlang der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße für die Windrichtungen a) 185°, b) 200°, c) 215° und d) 230°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.

Beim 5. Perzentil (Abbildung 9.16) ist zu sehen, dass bei einer Windrichtung von 185° in 1 m Höhe über Grund in 25 m Entfernung zur Quelle hohe Werte für das 5. Perzentil gemessen wurden. Bereits in 4 m Höhe über Grund wird so viel frische Luft eingemischt, dass für das 5. Perzentil kaum mehr Konzentrationen gemessen wurden. Außerdem zeigt sich, dass bei einer Windrichtung von 185° mit Entfernung zur Quelle die Konzentrationen vertikal durchmischen.

Die Ergebnisse vom 5. Perzentil (Abbildung 9.16b) spiegeln die Ergebnisse vom 50. Perzentil wieder und lassen bei einer Windrichtung von 200° deutlich erkennen, dass bodennah und quellnah genauso wie bei 185° sehr hohe Konzentrationen gemessen

9.2 Windrichtungsabhängigkeit der Emissionsbelastung und der Transportentfernung

wurden. Jedoch bereits in 100 m Entfernung ergeben sich deutlich geringere Konzentrationen innerhalb des 5. Perzentils. Erst bei einer Entfernung von 500 m zeigen sich über Dachniveau höhere Werte für das 5. Perzentil als bei 185°.

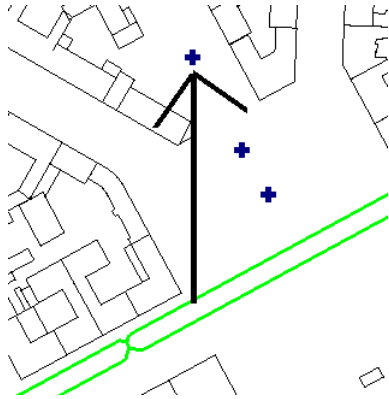


Abbildung 9.17.: Nahansicht der ersten Messpunkte mit Windrichtungspfeil (215°)

In Abbildung 9.16c (Windrichtung 215°) lässt sich erkennen, dass in der Nähe zum Boden und zur Quelle deutlich geringere Konzentrationen als bei den Windrichtungen 185° und 200° gemessen wurden. In 100 m Entfernung zur Hauptverkehrsstraße wurden bodennah höhere Werte für das 5. Perzentil als in 25 m Entfernung gemessen. Eine mögliche Begründung ist in Abbildung 9.17 dargestellt. Dabei wurden der Umriss der Linienquelle in grün und die Messpunkte in blau eingezeichnet. Der Pfeil zeigt die Windrichtung 215° an. Durch die Anströmrichtung werden die Konzentrationen möglicherweise nach Osten abgelenkt und anschließend direkt zum Messpunkt 100 m entfernt zur Quelle transportiert.

Die Begründung vom 50. Perzentil, dass Schadstoffe über das Dachniveau transportiert werden, kann hier nicht verwendet werden, da das 5. Perzentil mit der Höhe abnimmt.

Zur näheren Untersuchung wurden die Windrosen der Strömungsdaten in Abbildung 9.18 eingetragen. Es stehen lediglich die Windrichtungen 185° und 225° zur Verfügung. Es zeigt sich, dass die Windverhältnisse am südlichsten Messpunkt durch die Anströmwindrichtung und die umgebende Bebauung beeinflusst ist. Bei 185° weht der Wind aus südlichen Richtungen und bei 225°, beeinflusst durch die Bebauung, aus Westen. Dies weist daraufhin, dass die Konzentrationen entlang der Hauptverkehrsstraße Richtung Osten abgelenkt werden. Aufgrund der fehlenden Messung bei 215° kann dies nicht eindeutig für diese Anströmwindrichtung bewiesen werden. Zusätzlich befindet sich der Messpunkt nicht direkt an der Gebäudeecke um eine mögliche nördlich Ablenkung festzuhalten. Für eine detaillierte Auswertung müssten weitere Strömungsmessungen in der Nähe der Gebäudeecke für eine Windrichtung von 215° durchgeführt werden.

Weiterhin zeigt sich in Abbildung 9.16c, dass durch die höheren Konzentrationen in 100 m Entfernung auch die Konzentrationen in 200 und 500 m Entfernung höher als bei einer Anströmwindrichtung von 200° sind.

Durch eine weitere Windrichtungsänderung um 15° (Abbildung 9.16d) nehmen die Konzentrationen in 25 m Entfernung wieder zu. Bereits bei einer Windrichtung von 225° ist in Abbildung 9.18 am südlichsten Messpunkt zu sehen, dass der Wind durch Gebäude abgelenkt wird und von Westen weht. Daraus lässt sich schließen, dass auch bei 230° der Wind aus Westen weht und somit die Konzentrationen aus der westlichen Straße an den Messpunkt herantransportiert. Deswegen sind die Werte für das 5. Perzentil bodennah bei 230° höher als bei 200° und erst in 500 m Entfernung geringer. Wie bereits beim 50. Perzentil steigt die Schadstoffkonzentration deutlich stärker bereits in 25 m Entfernung auf. Ab 2 m Höhe über Grund bis zum Dachniveau wurden bei einer Windrichtung von 230° höhere Werte für das 5. Perzentil als für die anderen Windrichtungen

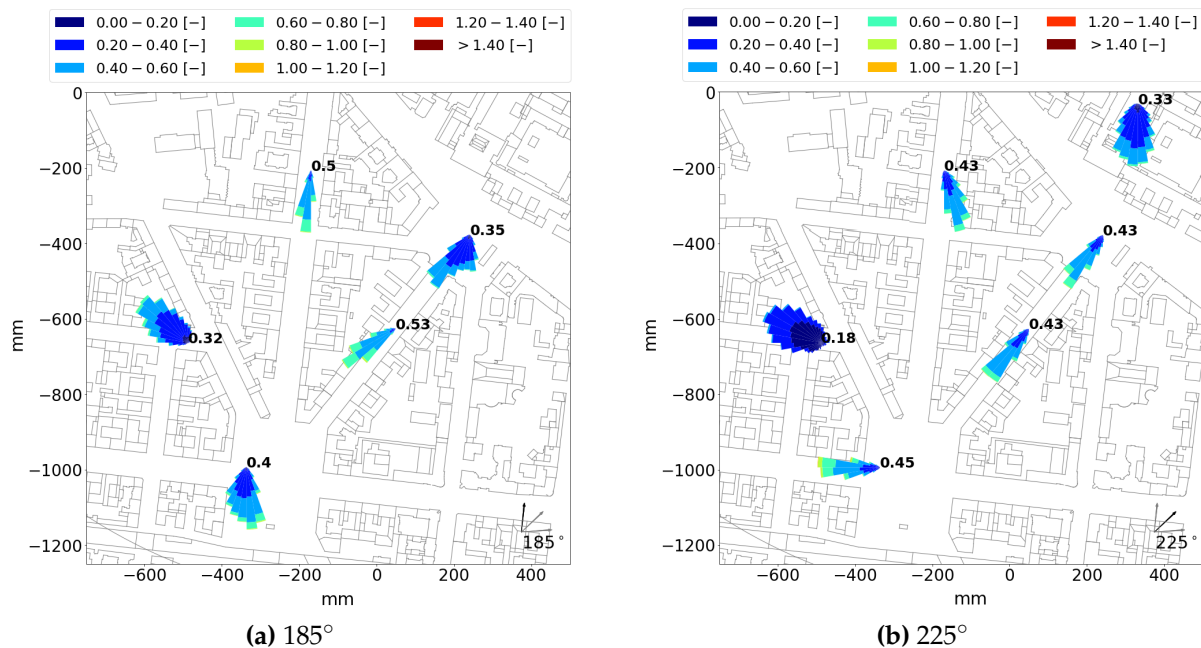


Abbildung 9.18.: Windrosen im Bereich der Konzentrationsmessungen in 4 m Höhe über Grund für eine Anströmwindrichtung von 185° und 225°

gemessen. Die höchsten Werte über Dachniveau werden bei dieser Windrichtung in 200 m Entfernung ermittelt.

9.2.2. Emissionsbelastung in einer Nebenstraße mit einem 30°-Winkel zur Hauptverkehrsstraße

Zusätzlich zur Straße, die senkrecht zur Hauptverkehrsstraße verläuft, wurde in einer Nebenstraße, die in einem Winkel von 30° zur Hauptverkehrsstraße abgeht, gemessen. Es muss beachtet werden, dass beide Straßen zusätzlich durch einen Park von der Hauptverkehrsstraße getrennt sind (Abbildung 9.13).

In Abbildung 9.19 wurde das 50. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen für die Nebenstraße in den Windrichtungen 185°, 200°, 215° und 230° eingetragen. Es zeigt sich, dass bei einer Windrichtung senkrecht zur Hauptverkehrsstraße die meisten Konzentrationen in die Nebenstraße transportiert und bis zu einer Entfernung von 400 m höhere Konzentrationen in der Straße im Vergleich zu den anderen Windrichtungen gemessen wurden. Aufgrund des Parks beginnt die Nebenstraße erst in 100 m Entfernung zur Hauptverkehrsstraße. Dass die Schadstofffahne bereits zu Beginn der Straße verstärkt aufsteigt, ist daran zu erkennen, dass das 50. Perzentil mit der Höhe bis zum Dachniveau zunimmt. Über Dachniveau wurden bei 185° deutlich höhere Konzentrationen im Vergleich zu 200° und 215° gemessen.

Obwohl bei einer Windrichtung von 215° die Nebenstraße parallel angeströmt wird, sind hier die Konzentrationen niedriger als bei 185°. Im Gegensatz zur Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße (Abbildung 9.14) liegen die Werte für das 50. Perzentil für die Windrichtungen 200°, 215° und 230° innerhalb der Straßenschlucht zum Teil innerhalb der Messunsicherheit. Dies lässt darauf schließen, dass die Anströmung-

9.2 Windrichtungsabhängigkeit der Emissionsbelastung und der Transportentfernung

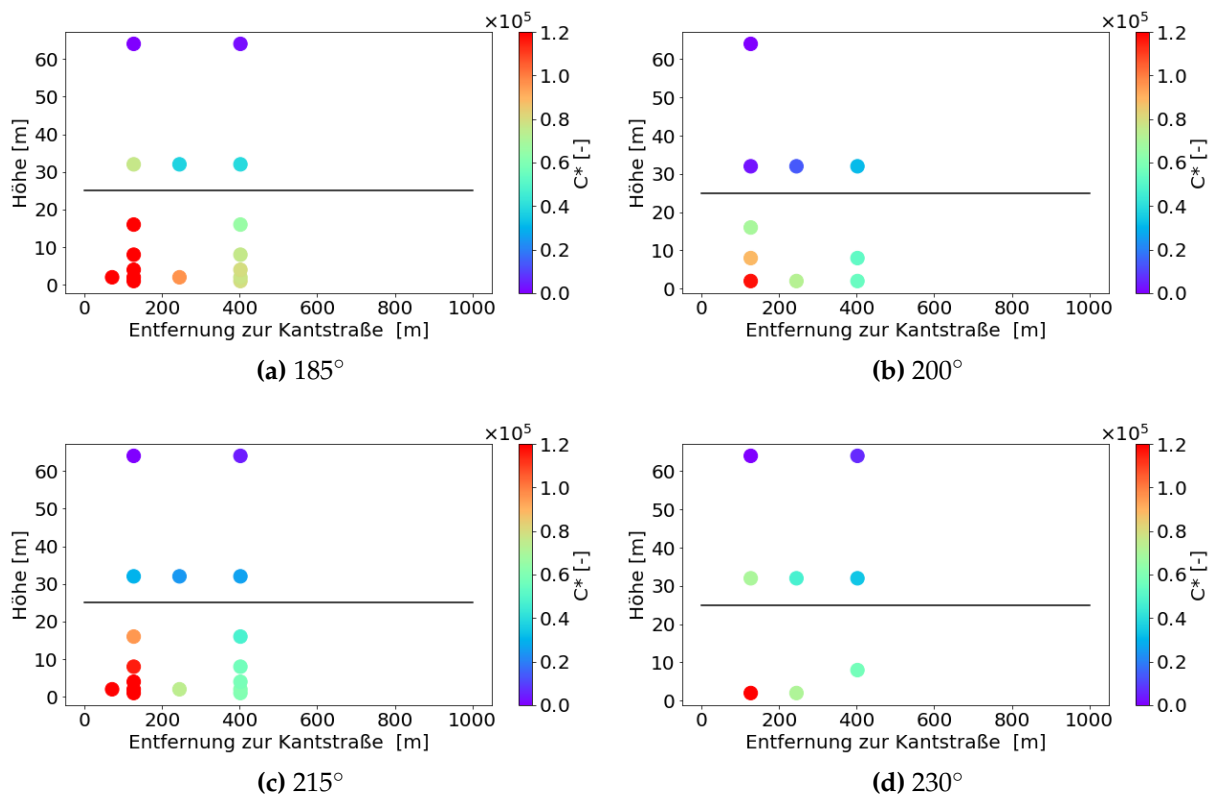


Abbildung 9.19.: 50. Perzentil der Konzentrationen entlang einer in 30° zur Hauptverkehrsstraße verlaufenden Nebenstraße für die Windrichtungen a) 185° , b) 200° , c) 215° und d) 230° . Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.

windrichtung der emittierenden Straße für die Konzentrationsverteilung wichtiger als die Anströmungswindrichtung der Nebenstraße ist. Dies wird unterstützt durch die Windrosen in Abbildung 9.18. Sowohl bei einer Windrichtung von 185° als auch bei einer Windrichtung von 225° in der Anströmung wird die lokale Windrichtung von der Umgebungsbebauung so stark beeinflusst, dass der Wind innerhalb der Nebenstraße bei beiden Windrichtungen parallel zur Straße weht.

Beim Vergleich der Straßen senkrecht zur Hauptverkehrsstraße und geneigt zur Hauptverkehrsstraße zeigt sich für die Windrichtungen von 200° , 215° und 230° , dass die Konzentrationen in der zu Hauptverkehrsstraße geneigten Straße höher sind. Dabei erwartete man, dass bei einer Windrichtung parallel zur Nebenstraße höhere Konzentrationen in die Nebenstraße hinein transportiert werden. Beim Vergleich der Abbildungen 9.14 und 9.19 für die Windrichtung 230° bestätigt sich dies. Ob die Windrichtungsausrichtung zur Hauptverkehrsstraße relevanter als die der Nebenstraße ist, kann nicht näher untersucht werden, da nur dieses eine Beispiel gemessen wurde und hier zusätzlich der Park die Aussagekraft der Ergebnisse einschränkt.

Im Weiteren ist auffällig, dass die Unterschiede gemessener Immissionskonzentrationen innerhalb der Straßenschlucht so klein sind, dass man von im Rahmen der Messgenauigkeit gleichen 50. Perzentilen ausgehen kann, jedoch über Dachniveau signifikante Unterschiede in den Werten für das 50. Perzentile gemessen werden. Bei 200° wurden über Dachniveau erst ab 400 m Entfernung deutliche Werte gemessen. Bei 215° waren bereits ab 100 m geringe Konzentrationen messbar und bei 230° wurden ungefähr die gleichen Werte für das 50. Perzentil wie bei 185° gemessen. Zur genaueren Untersuchung wird das 5. und 95. Perzentil betrachtet.

95. und 5. Perzentil

In Abbildung 9.20 wurde das 5. und 95. Perzentil der Konzentrationen der Hauptverkehrsstraße, die in der Nebenstraße gemessen wurden, eingetragen. Für das 95. Perzentil lässt sich erkennen, dass in 200 m Entfernung von der Quelle die Unterschiede der Werte für alle vier Windrichtungen innerhalb der Straßenschlucht im Rahmen der Messunsicherheit liegen. Daraus resultiert, dass der Einfluss der Windrichtung in der Nebenstraße deutlich geringer als in der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße ist. Bei näherer Betrachtung der Windrosen in Abbildung 9.18 zeigt sich für beide Windrichtungen, dass der Wind in beiden Straßen parallel zur Straße weht und die Beträge der gemessenen Windgeschwindigkeiten für die beiden Straßen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit als gleich anzusehen sind. Also hat die lokale Windgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die unterschiedliche Konzentrationsverteilung. Jedoch stehen in beiden Straßen nur jeweils eine Windmessung und keine vertikalen Messungen zur Verfügung. Deshalb sind weitere Messungen nötig, um die Unterschiede in der Konzentrationsverteilung näher zu untersuchen.

Im Gegensatz zum 95. Perzentil zeigen sich beim 5. Perzentil (Abbildung 9.20) signifikante Unterschiede. Bei einer senkrechten Anströmung der Hauptverkehrsstraße werden die meisten Konzentrationen in die Nebenstraße transportiert. Besonders beim 5. Perzentil ist zu sehen, dass bodennah sehr wenig frische Luft eingetragen wird. Den größten Eintrag von frischer Luft gibt es, wie in der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße, bei einer Windrichtung von 200° . Beim Vergleich mit den Windrosen in Abbildung 9.18 fällt auf, dass die Windgeschwindigkeit bei einer Anströmung von

9.2 Windrichtungsabhängigkeit der Emissionsbelastung und der Transportentfernung

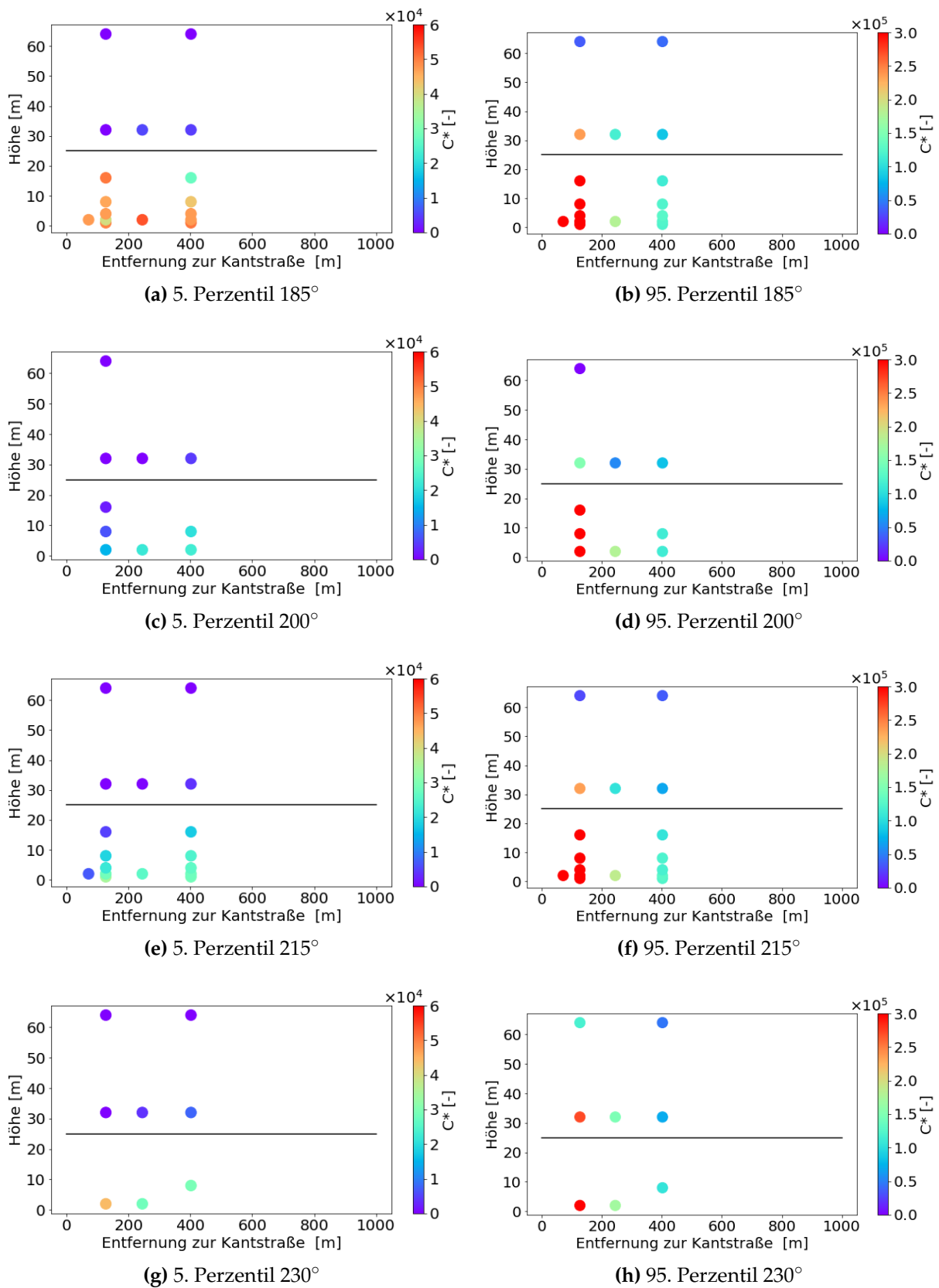


Abbildung 9.20.: 5. und 95. Perzentil der Konzentrationen entlang einer in 30° zur Hauptverkehrsstraße geneigten Nebenstraße für die Windrichtungen a) und b) 185° , c) und d) 200° , e) und f) 215° und g) und h) 230° . Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.

185° signifikant höher als bei 225° ist. Durch die höheren Windgeschwindigkeiten werden die Konzentrationen entlang der Straße weniger stark verdünnt. Dadurch weist speziell das 5. Perzentil für 185° signifikant höhere Konzentrationen auf. Da keine Strömungsmessungen für die Windrichtungen 200° und 215° vorhanden sind, kann nicht untersucht werden, ob die niedrigeren Konzentrationen für diese Windrichtungen durch geringere Windgeschwindigkeiten verursacht wurden.

9.2.3. Heterogenität der Konzentrationsverteilung in 200 m Entfernung

Um die Konzentrationsverteilung in unterschiedlichen Straßenzügen näher zu untersuchen, wurde in Abbildung 9.21 das 5., das 50. und das 95. Perzentil für alle Messpunkte in 2 m Höhe über Grund für eine Anströmwindrichtung von 185° eingetragen. Zusätzlich wurde die prozentuale Abweichung des 5. beziehungsweise 95. Perzentils zum 50. Perzentil berechnet. Der jeweils größere Wert ist in Abbildung 9.21 dargestellt. Die blaue Linie zeigt die Lage der Linienquelle. Es ist zu sehen, dass quellenah die höchsten Werte für das 50. und 95. Perzentil und die niedrigsten Werte für das 5. Perzentil gemessen wurden. Deswegen ist die prozentuale Abweichung des 5. beziehungsweise 95. Perzentils vom 50. Perzentil mit 275 % am höchsten. Je weiter der Messpunkt von der emittierenden Hauptverkehrsstraße entfernt ist, desto mehr nimmt die prozentuale Abweichung ab. Es fällt allerdings auf, dass die größten Konzentrationsschwankungen in 200 m Entfernung zur Quelle in der westlichen, senkrechten Straße zur Hauptverkehrsstraße gemessen wurden. Die höchsten Werte für das 95. Perzentil ergaben sich jedoch in der mittleren senkrechten Straße. Je weiter der Messpunkt von der Quelle entfernt liegt, desto niedriger sind die prozentualen Abweichungen.

Zur genaueren Untersuchung ist in Abbildung 9.22 das 50. und 5. Perzentil für Messungen in 200 m Entfernung zur Hauptverkehrsstraße dargestellt. Die Ergebnisse für das 95. Perzentil befinden sich im Anhang E.3. Beim 50. Perzentil (Abbildung 9.22a) ist erkennbar, dass die Konzentrationen über Dachniveau zum Teil genauso groß wie in der Straße sind. Besonders deutlich ist dies über den Hinterhöfen. Wie in Abbildung 9.21 gezeigt, liegen der westlichste Punkt in der untersuchten Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße, die beiden anschließenden Punkte in Hinterhöfen und der vierte Punkt in der 30° zur Hauptverkehrsstraße geneigten Straße. Weitere Messpunkte befinden sich in einer senkrechten Straße und in einem sehr großen Hinterhof. Speziell bei den kleineren Hinterhöfen ohne direkten Zugang zur Hauptverkehrsstraße stellt sich heraus, dass ein signifikanter Anteil an Konzentrationen in den Hinterhöfen gemessen wurde. Da die mittleren Konzentrationen über Dachniveau ebenso deutliche Konzentrationen aufweisen, lässt sich daraus schließen, dass die Konzentrationen über Dachniveau in die Hinterhöfe hineingespült wurden. Für die Straßen senkrecht zur Hauptverkehrsstraße wird festgestellt, dass das 50. Perzentil der Konzentrationen über Dachniveau niedriger als in der Straßenschlucht ist. Dabei wurden die höchsten Werte für das 50. Perzentil in der mittleren senkrechten Straße gemessen. Eine nähere Untersuchung der Straßenschlucht lässt erkennen, dass diese Straße die stärkste Kanalisierung aufweist, sodass die Konzentrationen länger in der Straße verweilen und weniger mit Frischluft vermischt werden. Dies ergibt sich auch für das 95. Perzentil (Abbildung E.3) und das 5. Perzentil. Beim 5. Perzentil weist die mittlere senkrechte Straße ebenso die höchsten Werte auf.

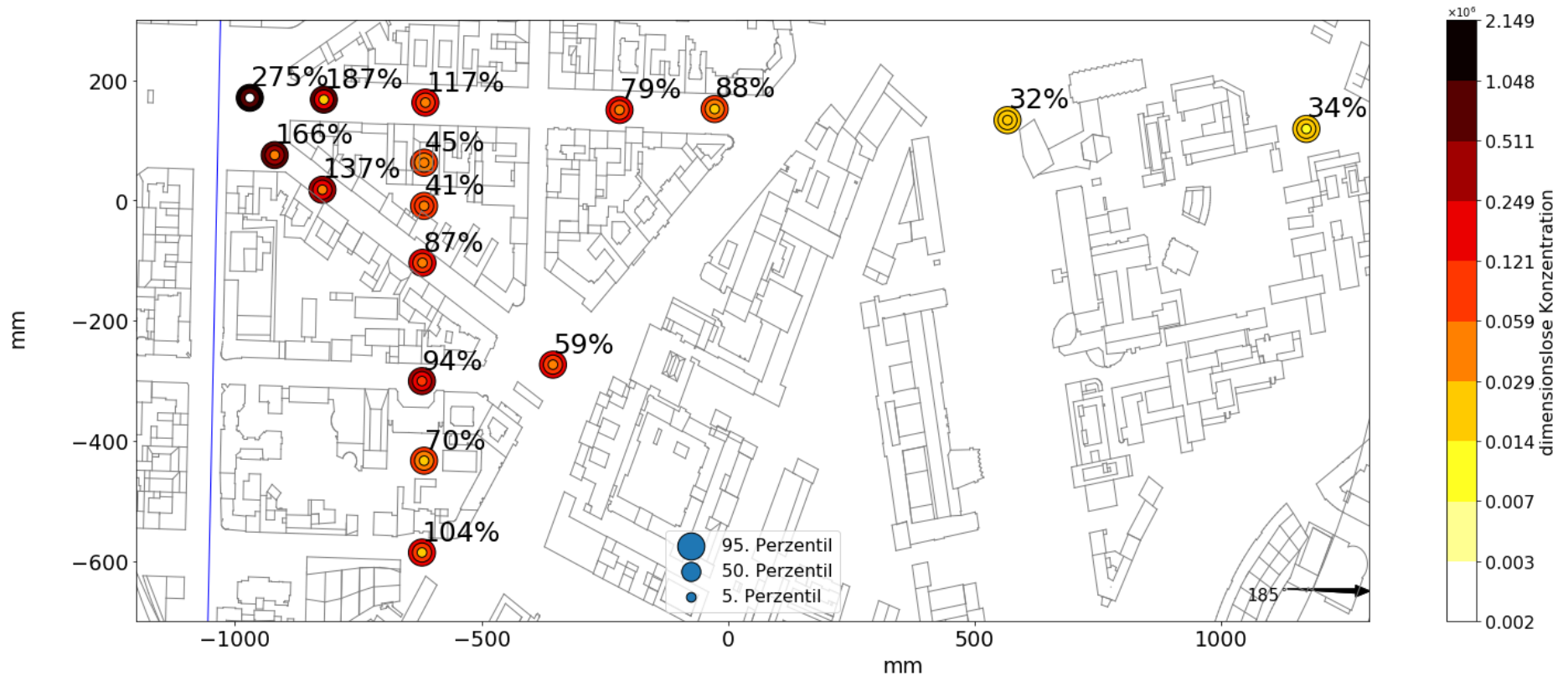


Abbildung 9.21.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen für die Messpunkte in 2 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

Bei einer Windrichtungsänderung von 15° nimmt das 50. Perzentil der Konzentrationen an den westlichen Messpunkten ab. In der mittleren senkrechten Straße wurden weiterhin die höchsten Werte gemessen. Im großen Hinterhof sind die Werte mit $37,0 \pm 2,2 \cdot 10^3$ und $33,7 \pm 2,0 \cdot 10^3$ im Rahmen der Messunsicherheit identisch. Nur in der östlichen senkrechten Straße nehmen die Konzentrationen zu. Dies zeigt sich auch beim 5. Perzentil (Abbildung 9.22d). Auffallend stark ist die Zunahme der Konzentrationen am östlichen Messort, an dem mit $78,0 \pm 4,7 \cdot 10^3$ signifikant höhere Konzentrationen als in der mittleren senkrechten Straße mit $67,1 \pm 4,0 \cdot 10^3$ gemessen worden sind. Für eine detaillierte Strömungsuntersuchung stehen zu wenige Strömungsmessungen in diesem Gebiet zur Verfügung. Auffällig ist, dass bei einer weiteren Windrichtungsänderung von 15° die Werte für das 5. und 50. Perzentil für beide senkrechte Straßen signifikant abnehmen. Im Gegensatz dazu verdoppelt sich der Wert im großen Hinterhof für das 50. Perzentil fast (200° : $33,7 \pm 2,0 \cdot 10^3$; 215° : $57,0 \pm 3,4 \cdot 10^3$). Über Dachniveau ist das 50. Perzentil mit $65,4 \pm 3,9 \cdot 10^3$ für 215° mehr als doppelt so groß wie für 200° mit $27,8 \pm 1,7 \cdot 10^3$. Daraus resultiert, dass ein substanzieller Anteil der Konzentrationen über Dachniveau in den Hinterhof hineingespült wird. Für die 30° zur Hauptstraße geneigten Straße bleiben die Werte innerhalb der Messunsicherheit gleich.

9.3. Transektmessung senkrecht zur Straße des 17. Juni

Neben dem Transekt zur Kantstraße wurde entlang eines Transektes zur Straße des 17. Juni gemessen. In Abbildung 9.23 ist das 5. Perzentil der dimensionslosen Konzentrationen dargestellt. Die Windrichtung beträgt dabei 175° und ist somit senkrecht zur Straße des 17. Juni. Auf Grund von Zumischung frischer Luft reduzieren sich die Werte für das 5. Perzentil entlang der Strecke. Zusätzlich lässt sich erkennen, dass am Messort direkt neben der Quelle durch Turbulenzen mehr konzentrationsarme Luft als 10 m entfernt zur Quelle beigemischt ist. In 25 m Entfernung zur Straße des 17. Juni hat sich der Frischluftanteil wieder erhöht. Auffällig ist, dass der darauffolgende Punkt in 50 m Entfernung, der zwischen den Gebäuden liegt, weniger Frischluft erhält. Dies könnte daran liegen, dass die Luft durch die Gebäude kanalisiert wird, somit weniger Turbulenzen aufweist und weniger frische Luft zum Messstandort transportieren kann. Zur genaueren Untersuchung wurde in Abbildung 9.24 die Konzentrationen mit Unsicherheiten für die bodennahen Messpunkte eingetragen. Es ist ersichtlich, dass beide Werte innerhalb der Messunsicherheit liegen. Weiterhin ist in Abbildung 9.23 eine Zunahme des Frischlufteintrages mit der Höhe an dem Messort 150 m von der Straße des 17. Juni entfernt zu sehen.

In Abbildung 9.25 wurde das 50. Perzentil der Konzentrationen eingetragen. Die Abbildung zeigt eine Abnahme mit zunehmender Entfernung zur Straße des 17. Juni. Innerhalb der mittleren Gebäudehöhe sind die Konzentrationen vertikal homogen.

Im Vergleich zur Entfernung der Kantstraße (Abbildung 9.14a) verdeutlicht Abbildung 9.25), dass wesentlich mehr Konzentrationen in die Knesebeckstraße als in den Fuß-/Radweg zur Straße des 17. Juni eingetragen wird. Dies ist auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen. Zunächst ist die Kantstraße deutlich schmaler als die Straße

9.3 Transektmessung senkrecht zur Straße des 17. Juni

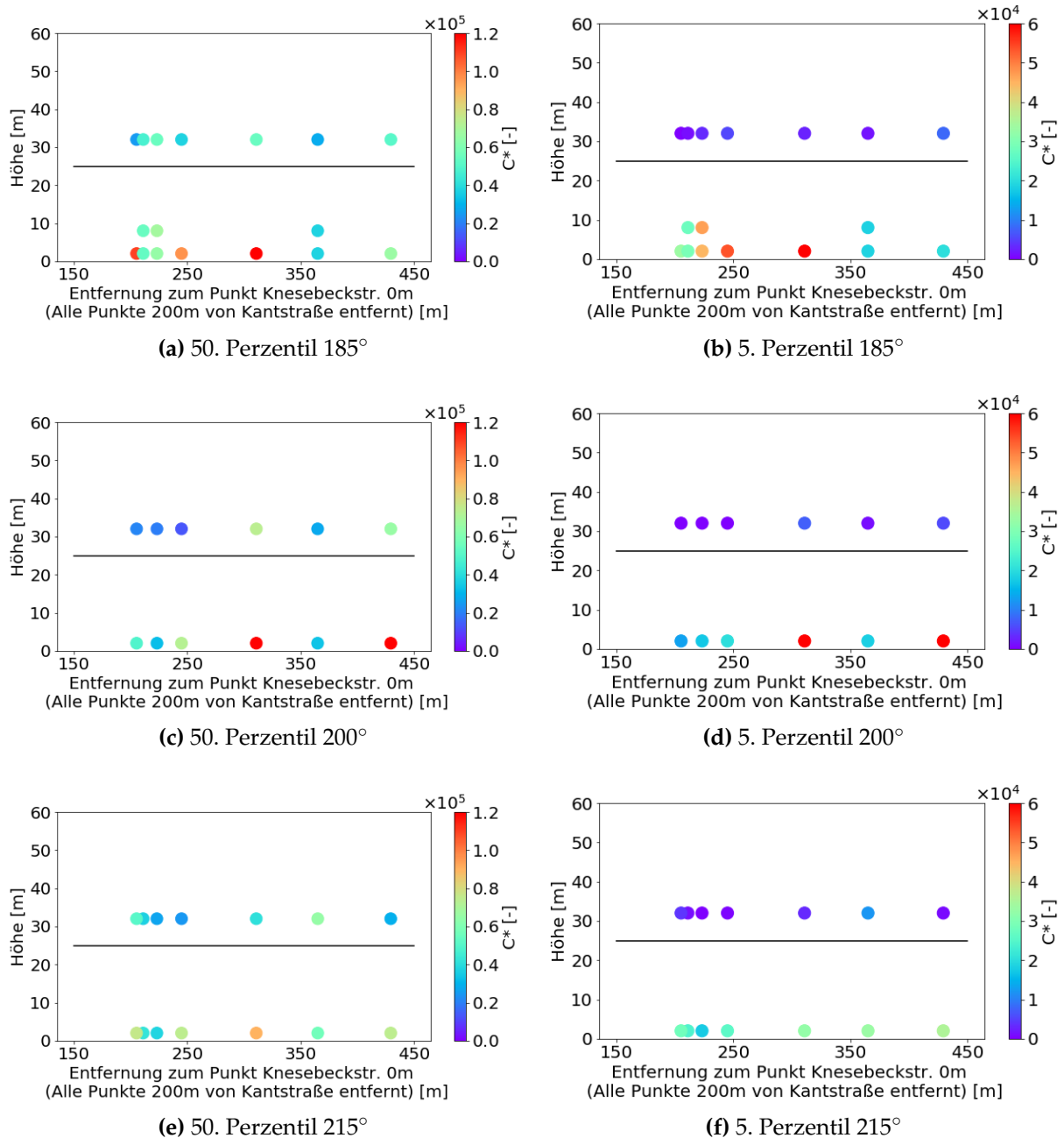


Abbildung 9.22.: 50. und 5. Perzentil für die Konzentrationsverteilung in 200 m Entfernung zur Kantstraße für die Windrichtungen a) und b) 185°, c) und d) 200° und e) und f) 215°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.

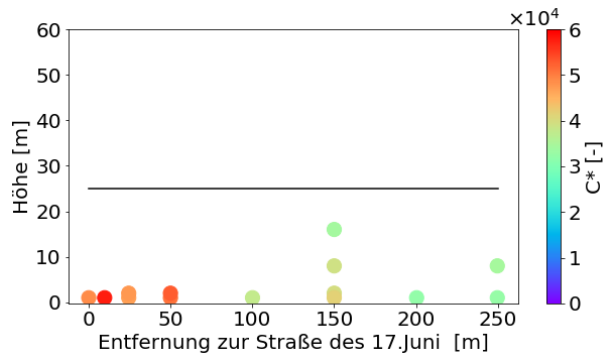


Abbildung 9.23.: 5. Perzentil der Konzentrationen in der Nebenstraße senkrecht zur Straße des 17. Juni

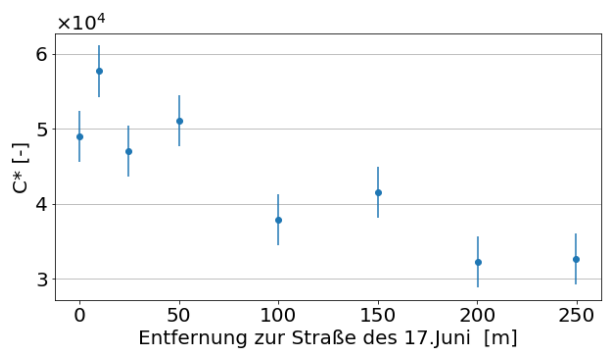


Abbildung 9.24.: 5. Perzentil der Konzentrationen mit Unsicherheiten für 1 m Höhe

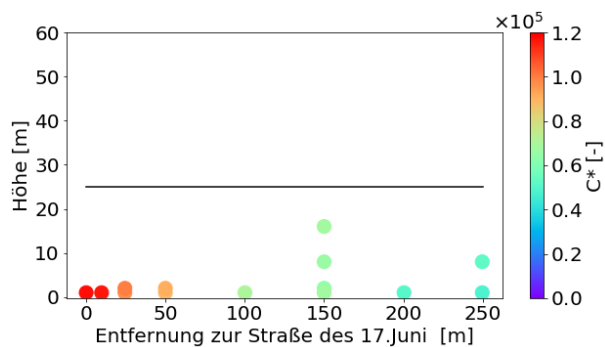


Abbildung 9.25.: 50. Perzentil der Konzentrationen entlang der Nebenstraße senkrecht zur Straße des 17. Juni

des 17. Juni, sodass bereits am Anfang der Nebenstraßen die Konzentrationen deutlich höher sind. Im Weiteren verteilen sich die Konzentrationen in der Straße des 17. Juni auf zwei Fahrbahnen. Dadurch liegt die eine Fahrbahn deutlich weiter vom Messort entfernt als die andere. Weitere Unterschiede liegen in der Größe der Nebenstraße. Die Knesebeckstraße ist eine Nebenstraße, in der sich zwei Fahrspuren und zwei Fußgängerwege befinden. Das Transekt zur Straße des 17. Juni ist ein Fuß-/ Radweg. Durch die schmalere Öffnung werden weniger Schadstoffe in die Nebenstraße hineintransportiert. Durch deutlich niedrigere Konzentrationen am Anfang der Straße reduzieren sich diese weiter, sodass auch in 250 m Entfernung niedrigere Konzentrationen auf dem Fuß-/ Radweg gemessen werden. Auffällig ist, dass die Konzentrationen in der Knesebeckstraße besonders quellnah mit der Höhe abnehmen. Auf dem Fuß-/ Radweg ist dies nicht zu sehen.

9.4. Zeitlichen Repräsentativität der Emissionsbelastung

In den vorherigen Abschnitten wurde die Messortrepräsentativität bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen und der Einfluss der Windrichtung auf die Emissionsbelastung und die Transportentfernung näher untersucht. Im Folgenden soll die Unsicherheit abgeschätzt werden, welche dadurch entsteht, dass in der Natur die Randbedingungen meist nur über eine kurze Zeit konstant sind. Um über eine definierte Zeit in der Natur mitteln zu können, wurden die Daten auf eine Windgeschwindigkeit von 5 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung umgerechnet. Als zeitliche Intervalle wurden 10 min, 30 min, 60 min und 120 min gewählt. In Abschnitt 9.2.3 wurden bereits die Messungen ohne Mittelungszeitraum in Abbildung 9.21 dargestellt und beschrieben. In Abbildung 9.26 ist die Mittelung über 10 Minuten zu sehen. Es zeigt sich, dass bereits quellnah die Unterschiede zwischen 5., 50. und 95. Perzentil signifikant kleiner sind. Ebenso lässt sich erkennen, dass die Abweichungen zwischen den einzelnen Messpositionen unabhängig von der Entfernung zur Quelle zwischen 14 und 44 % liegen.

Mit zunehmender Mittelungszeit nehmen die prozentualen Abweichungen zwischen dem 50. und dem 5. beziehungsweise 95. Perzentil weiter ab. In Abbildung E.4 ist die Mittelungszeit von 30 Minuten und in Abbildung 9.27 von 60 Minuten dargestellt. Dabei zeigt sich, dass bei 60 Minuten für den Messort mit den geringsten Fluktuationen im mittelgroßen Hinterhof das 5. und 95. Perzentil innerhalb des 50. Perzentils $\pm 7\%$ fällt. Die für die Konzentrationsmessungen bestimmte Unsicherheit liegt bei $\pm 6\%$. Somit liegt für den mittelgroßen Hinterhof das 5. und 95. Perzentil knapp außerhalb der Unsicherheit des 50. Perzentils. Also reichen an diesem Ort eine Stunde konstante Randbedingungen, um das 50. Perzentil im Rahmen der Messunsicherheit bestimmen zu können. Im größten Hinterhof sind allerdings die Fluktuationen noch so groß, dass die prozentualen Abweichungen bei 32 % liegen. An diesem Ort müsste deutlich länger gemessen werden. In Abbildung E.5 wurde über 120 Minuten gemittelt. In diesem Fall liegen für alle Orte das 5. und 95. Perzentil im Rahmen des 50. Perzentils $\pm 10\%$. Um das gemessene 50. Perzentil im Rahmen der Messunsicherheit bestimmen zu können, wäre es sinnvoll, mindestens 120 Minuten bei konstanten Randbedingungen zu messen. Es sei darauf hingewiesen, dass in diesem Fall das 5. und 95. Perzentil und nicht die absoluten Maximal- und Minimalwerte betrachtet wurden. Bei der Betrachtung

tung des Maximal- und des Minimalwertes wären die prozentualen Abweichungen deutlich höher. Ebenso wurde in Wyngaard (2010) hergeleitet, dass Messungen in der Natur generell langsamer konvergieren. Dies bedeutet, dass in der Natur noch längere Mittelungszeiten notwendig sind, um den beschriebenen Vertrauensbereich der Messergebnisse zu erreichen.

Zusätzlich zu den Messungen in den Straßenschluchten werden die Messungen über Dachniveau in 32 m Höhe über Grund untersucht. Dafür wurden in Abbildung 9.28 die nicht gemittelten Werte für das 5., 50. und 95. Perzentil eingetragen. Dabei fallen die beiden quellnächsten Werte mit 0 % auf. Dies liegt daran, dass bei einem Mittelwert von 0 keine prozentuale Abweichung berechnet werden kann. Im Weiteren ist zu sehen, dass durch die Eintragung von Frischluft die prozentualen Abweichungen zwischen 5. beziehungsweise 95. und 50. Perzentil signifikant größer als in der Straßenschlucht sind. 200 m entfernt von der Hauptverkehrsstraße liegen die Abweichungen über dem Dachniveau der westlichen senkrechten Straße bei fast 400 %. Genauso wie in der Straßenschlucht zeigt sich über Dachniveau, dass die Abweichungen mit zunehmender Entfernung zur Hauptverkehrsstraße abnehmen, da die Konzentrationen in der Luft besser durchmischt sind. Dadurch wurden weniger starke Konzentrationsspitzen und -minima gemessen.

Ebenso wie in der Straßenschlucht werden bereits bei einer Mittelung von 10 Minuten die Abweichungen deutlich reduziert. So liegt die prozentuale Abweichung zwischen 5. bzw. 95. und 50. Perzentil bei einer Mittelung von 10 Minuten nur noch bei 85 %. Eine Mittelung von 30 Minuten reduziert dies weiter (Abbildung E.6).

Abbildung 9.30 stellt einen Mittelungszeitraum von 60 Minuten dar. Ebenso wie bei den Messungen in der Straßenschlucht liegen die prozentualen Abweichungen für ein paar Messorte schon innerhalb der Messunsicherheit. Jedoch gibt es auch über Dachniveau Orte mit prozentualen Abweichungen von fast 30 %, sodass eine Mittelung über einen längeren Zeitraum wünschenswert wäre. Abbildung E.7 zeigt die Mittelung über 120 Minuten. Ebenso wie in den Straßenschluchten liegen hier das 5. und das 95. Perzentil im Rahmen der Messunsicherheit des 50. Perzentils. Hierbei wird von einer Unsicherheit von $\pm 10\%$ ausgegangen.

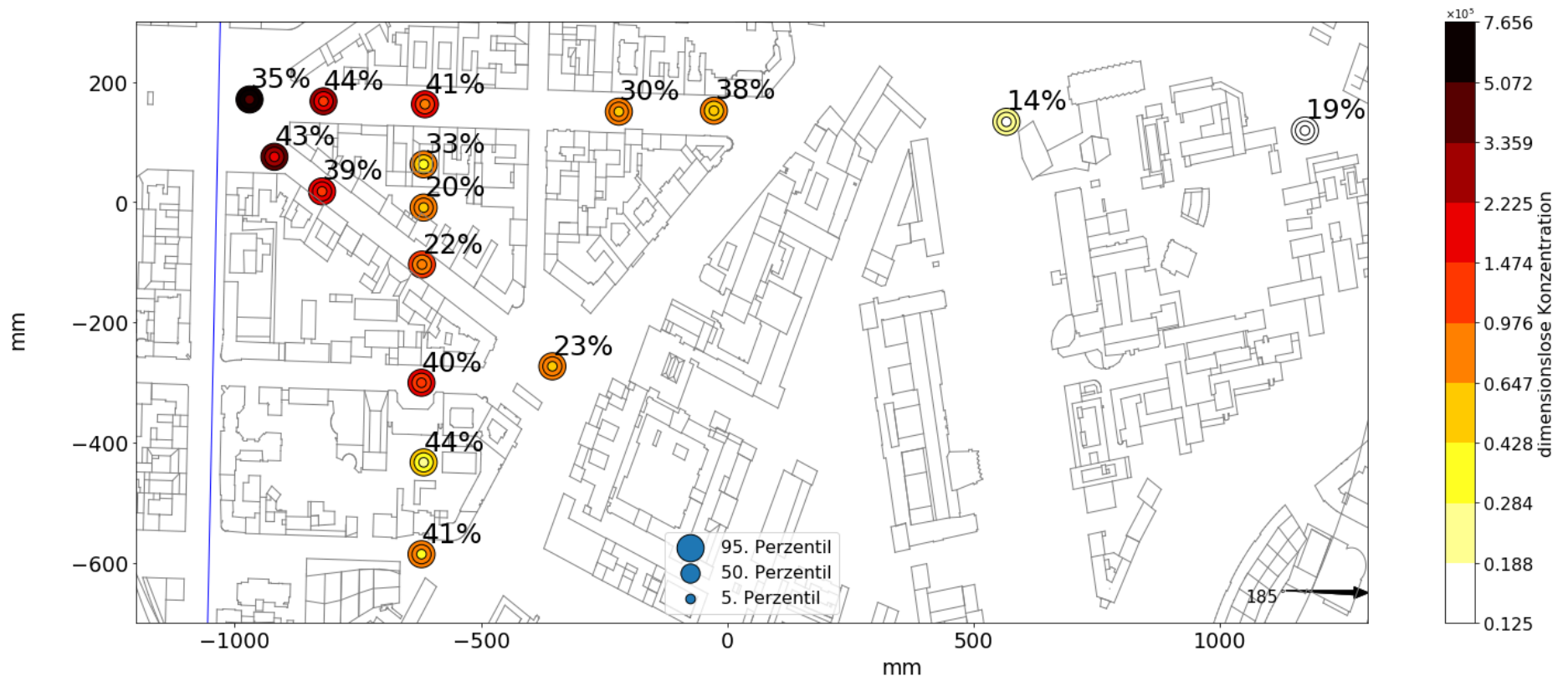


Abbildung 9.26.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 10 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 2 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

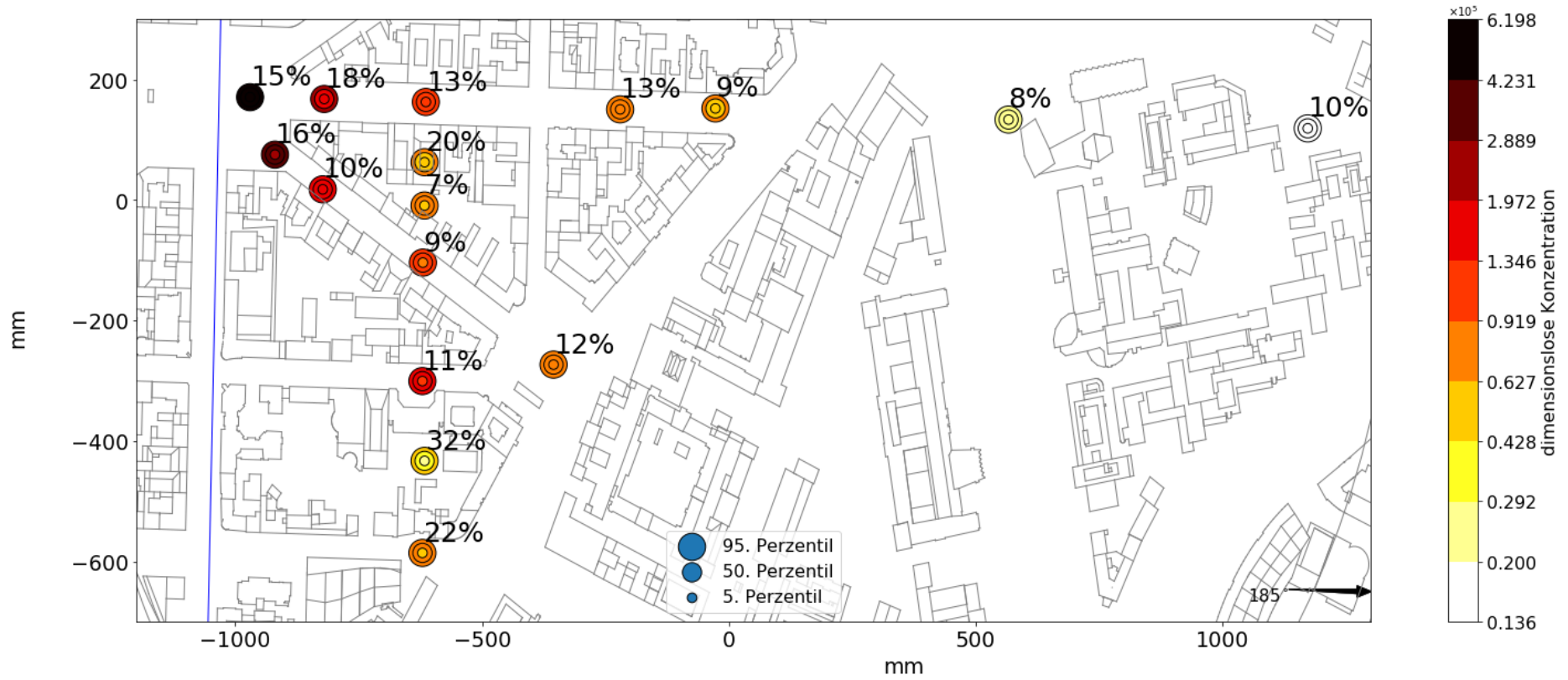


Abbildung 9.27.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 60 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 2 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

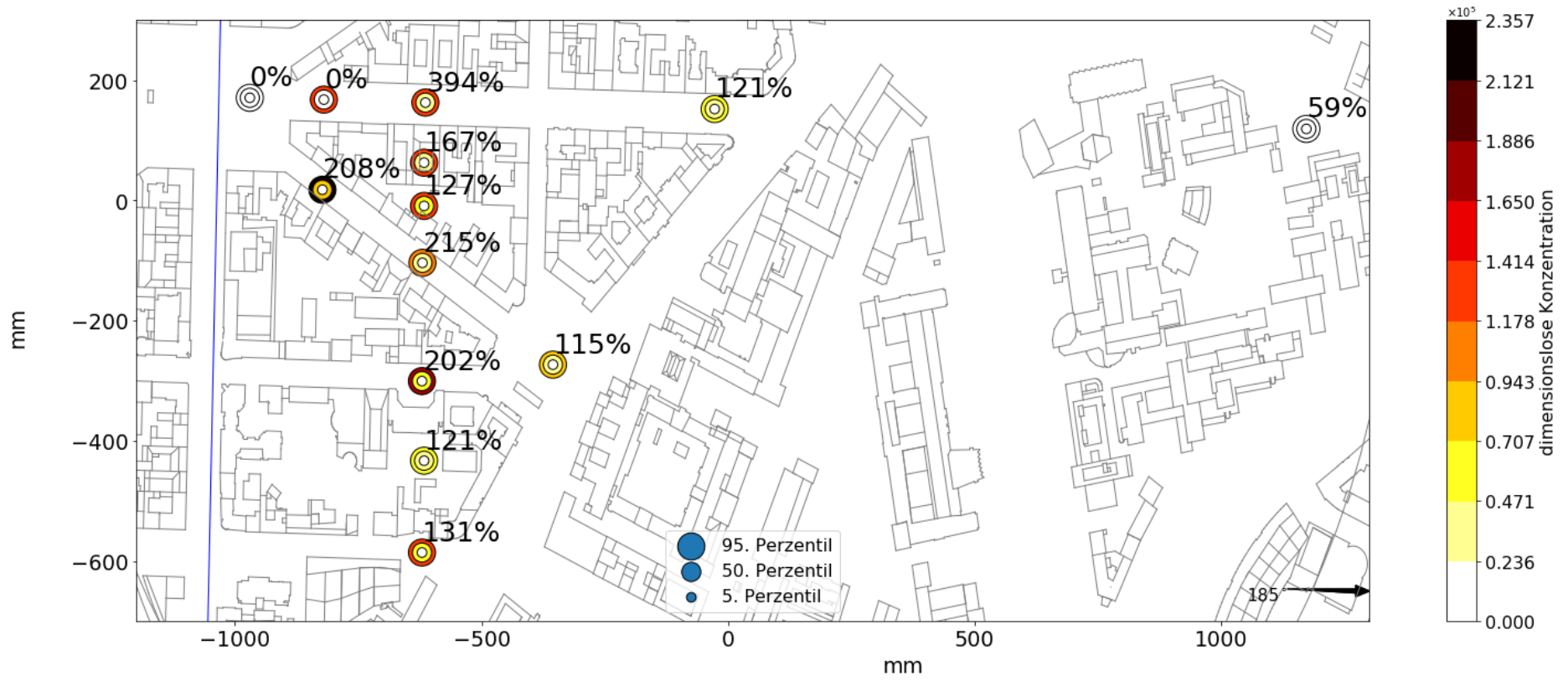


Abbildung 9.28.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen für die Messpunkte in 32 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

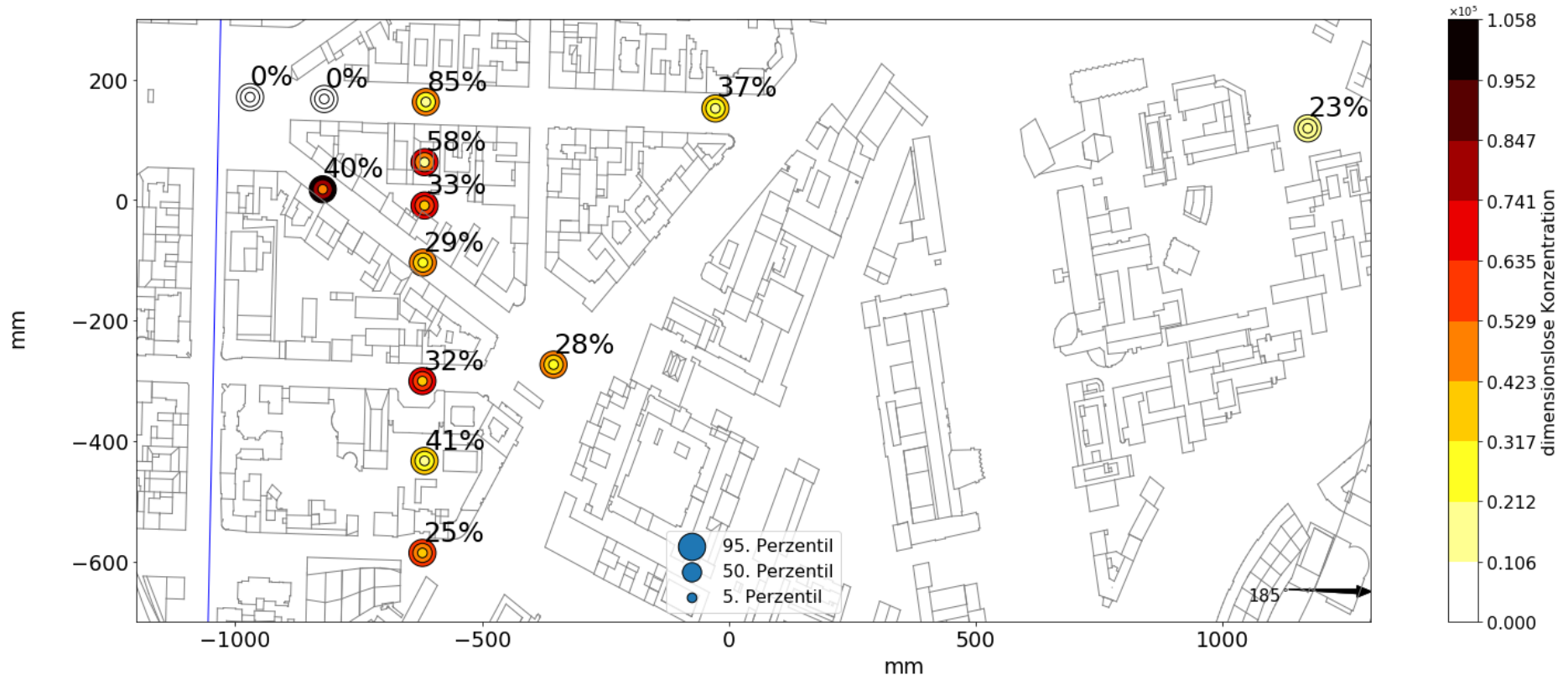


Abbildung 9.29: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 10 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 32 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

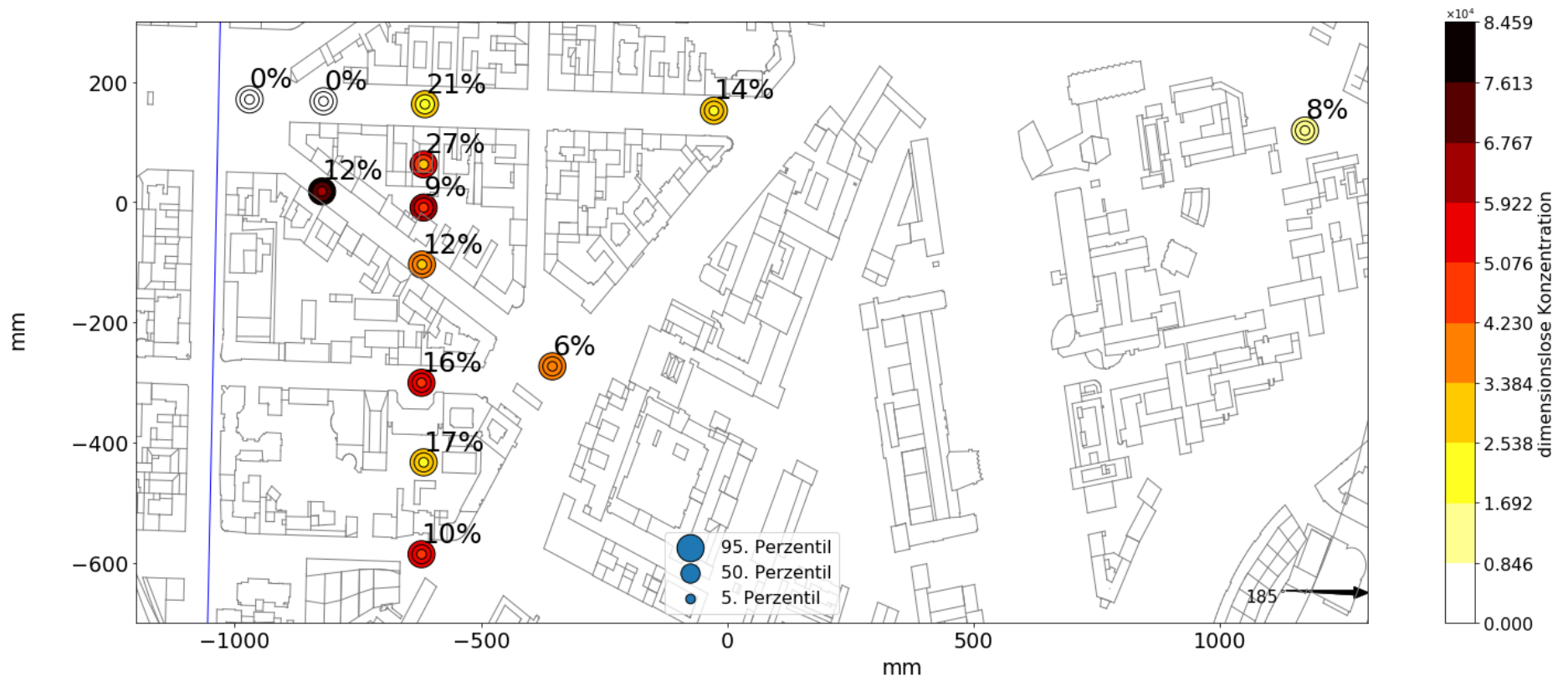


Abbildung 9.30.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 60 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 32 m Höhe über Grund für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

Kapitel 10

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des BMBF-Projektes „Stadtklima im Wandel“ wurden insgesamt vier Stadtmodelle für eine Windkanalversuchsreihe gebaut. Das Erste bildet einen Teil der Hafen-City in Hamburg im Bebauungszustand von 2017 und von 2023 ab. Weiterhin wurden aus der Stadt Berlin zum einen der Ernst-Reuter-Platz, da hier die meisten Naturmessungen im Rahmen des Projektes stattfanden, und zum anderen der Fichtenberg, da sich hier sowohl eine Abteilung der TU Berlin als auch eine der FU Berlin befinden, gewählt. Das letzte Modell stellt einen Bereich in Stuttgart, nahe des Neckartors, dar. Es wurde das Gebiet der Naturmessstelle Neckartor gewählt, da an dieser Naturmessstelle hohe Luftschadstoffkonzentrationen gemessen werden.

In jedem Modellgebiet wurde der Untersuchungsschwerpunkt anders gewählt. Im Hamburg-Modell wurde im Rahmen von Strömungsmessungen zum einen der Unterschied in den Bebauungszuständen untersucht, zum anderen fanden Messungen zur räumlichen Repräsentativität von Messungen in Stadtgebieten statt. Der Einfluss der Detailgenauigkeit in der Modellierung von Gebäuden wurde an zwei Beispielen überprüft. Ebenso wurden an den Messorten, an denen auch in der Natur Messungen im Rahmen des Projektes durchgeführt worden waren, Strömungsmessungen aus diversen Anströmwindrichtungen realisiert.

Beim Ernst-Reuter-Platz-Modell lag der Schwerpunkt auf den Emissionen der Hauptverkehrsstraßen. Zusätzlich wurden Strömungsmessungen für einen Vergleich mit Naturmessungen vorgenommen. Einen weiteren Versuch gab es hinsichtlich der Gebäuderasterung, welche in numerischen Modellen vorkommen. Hierfür wurde eine Straße im Modellgebiet mit einer 1-mm-Rasterung nachgebildet und die Unterschiede gemessen. Die Messergebnisse sind im Gesamtdatensatz enthalten, werden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht dargestellt. Beim zweiten Berlin-Modell (Fichtenberg) lag der Schwerpunkt auf der Ventilation. Weitere Messungen befassten sich mit dem Einfluss von Stadtgrün. Stadtgrün war zugleich der Schwerpunkt beim Stuttgart-Modell. Hier wurden sowohl Konzentrations- als auch Strömungsmessungen gemacht.

Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Modellen zu erhalten, wurde für alle Modelle der gleiche Maßstab von 1:500 gewählt und die gleiche Grenzschicht verwendet.

Zu Projektbeginn wurde intensiv an der Modellierung der Grenzschicht gearbeitet, um die angestrebten Parameter für eine städtische Grenzschicht möglichst gut zu treffen. Insgesamt wurden über 100 Variationen aus verschiedenen Turbulenzgeneratoren und Rauigkeitselementen geprüft. Dazu wurden die Turbulenzgeneratoren optimiert. Durch eine Treppenstufenform wurde erwartet, dass mehr Turbulenz in w-Richtung erzeugt wird. Mit den vorhandenen Versuchen konnte dies jedoch nicht absolut belegt werden. Im Weiteren wurde die Orientierung der Rauigkeitselemente verändert. Dadurch wurde eine Erhöhung der Turbulenz in v-Richtung erzeugt. Für beide Optimierungsverfahren müssen weitere Versuche durchgeführt werden, um den Effekt abschließend beurteilen zu können.

Da die Daten im Rahmen des Projektes zur Modellvalidierung eingesetzt werden sollen, wurde ein hoher Anspruch an den Qualitätsstandard der Messdaten gelegt. Dazu zählte auch, dass nach dem Messen jeder Zeitreihe ein Qualitäts-Flag zugeordnet wurde. Durch Wiederholungsmessungen wurden die Unsicherheiten bestimmt. Dabei wurde für jeden verwendeten Parameter separat sowohl die relative als auch die absolute Unsicherheit berechnet.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten nicht alle untersuchten Fragestellungen näher behandelt werden. Es wurden die Strömungsmessdaten der Modelle HafenCity, Ernst-Reuter-Platz und Neckartor bezüglich ihrer Böigkeit untersucht. Außerdem wurden die verkehrserzeugten Immissionen des Ernst-Reuter-Platz-Modells ausgewertet.

10.1. Fazit zur Böenanalyse

Bei der Böenanalyse wurden die Strömungsdaten ausgewählt, die kein Qualitäts-Flag bei der Intermittenz und der Geschwindigkeitskorrelation aufweisen. Mit Hilfe der zeitlichen Auflösung der Daten und der Anzahl der 10-minütigen Intervalle wurden die Windgeschwindigkeit 8 m/s und 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung für die Auswertung bestimmt.

Die erste Forschungsfrage lautete: **„Gibt es einen festen Parameter, der städteübergreifend für verschiedene Anströmwindgeschwindigkeiten genutzt werden kann?“** Bei der Auswertung wurde als Parameter der Böenfaktor gewählt. Jedoch zeigte sich, dass mit zunehmender mittlerer lokaler Windgeschwindigkeit der Böenfaktor abnimmt und vor allem bei niedrigen Windgeschwindigkeiten einen großen variablen Wertebereich aufweist. Somit konnte kein fester Böenfaktorwert wie in Brasseur (2001) beschrieben bestimmt werden. Dies stimmt mit den Beobachtungen von Azad und Alam (2010) überein. Zusätzlich wird darauf hingewiesen, dass die berechneten Böenfaktorwerte deutlich höher sind als die vom U.K. Met. Office (1993) verwendeten Werte. Beim Vergleich der Messdaten zwischen den Städten wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Beim Vergleich unterschiedlicher Anströmwindgeschwindigkeiten konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Dies konnte auch bei der Auswertung verschiedener anderer Einflussparameter auf den Böenfaktor gezeigt werden.

Anschließend stellte sich die Frage: **„Wie verhält sich der untersuchte Parameter bodennah und an welchen Orten können kritische Böenwindgeschwindigkeiten erreicht werden?“** Um den bodennahen Einfluss näher zu untersuchen, wurden nur Messungen bis 10 m Höhe über Grund betrachtet. Beim Vergleich der Messergebnisse der Städte stellte sich heraus, dass in der HafenCity die höchsten mittleren 10-min-Windgeschwindigkeiten gemessen wurden. Es konnte festgestellt werden, dass der mittlere Wind durch die zusätzliche Bebauung im Jahr 2023 signifikant reduziert werden wird. Weiterhin wurde dargelegt, dass kritische Böenwindgeschwindigkeiten vor allem nah am Wasser, über freien Flächen und hinter großen Gebäuden entstehen.

Die nächste Forschungsfrage heißt: **„Welchen Einfluss haben die bei der Definition einer Böe verwendeten Annahmen und Einschränkungen des DWDs auf die berechneten Faktoren?“** Die Definition einer Böe des DWDs beruht auf der Definition des Böenfaktors. Jedoch werden Einschränkungen gemacht. So legt der DWD als Kriterium fest, dass der Unterschied zwischen 10-minütigem Maximalwert und 10-minütigem Mittelwert mindestens 5 m/s sein muss und dass eine Böe mindestens 3 Sekunden aber nicht länger als 20 Sekunden dauern darf. Bei einer Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s wurde gezeigt, dass im Falle von Stuttgart nur an einem Viertel aller Standorte Böen auftreten. Im Gegensatz dazu wurden in der HafenCity mit dem Bebauungszustand von 2017 an fast 50 % aller Messorte Böen gemessen. Dies lässt erkennen, dass es an den untersuchten Messorten in der HafenCity böiger als an den untersuchten Messorten in Stuttgart ist. Des Weiteren reduzieren sich die Messorte, an denen Böen gemessen werden, in der HafenCity im zukünftigen Bebauungszustand (2023) auf 40 %. Daraus folgt, dass durch eine zusätzliche Bebauung nicht nur die mittlere Windgeschwindigkeit, sondern auch die Häufigkeit der Böen abnehmen wird.

Aus der Auswertung einer Anströmwindgeschwindigkeit von 17 m/s resultierte, dass das Kriterium des DWDs stark von der Windgeschwindigkeit in der Anströmung abhängt. Dabei werden bei höheren Anströmwindgeschwindigkeiten an deutlich mehr Messorten Böen verzeichnet. Dies konnte genauso bei den Einflussparametern auf den Böenfaktor und die Häufigkeit von Böen nach der Böendefinition des DWDs festgestellt werden.

Im Anschluss daran wurde der Einfluss meteorologischer Parameter und für die Modellierung wichtiger Parameter untersucht. Dazu wurden folgende Forschungsfragen formuliert: **„Welchen Einfluss hat eine geringfügige Windrichtungsänderung? Wie stark ist der Effekt von Bäumen? Wie groß ist die Auswirkung der verwendeten Detailgenauigkeit der Gebäude für die Modellierung?“**

Bei der Untersuchung des Einflusses der Windrichtung konnte festgestellt werden, dass die lokale Bebauung in der Einströmung eine starke Auswirkung sowohl auf die Häufigkeit der Böen als auch auf den Böenfaktor selbst hat. Dies wird ebenso in den Ergebnissen für die Daten von Windkraftanlagen von Hu et al. (2018) dokumentiert. Im Weiteren konnte gezeigt werden, dass die räumliche Repräsentativität des Böenfaktors begrenzt ist. Bereits in 10 m Entfernung konnten signifikant unterschiedliche Böenfaktorwerte gemessen werden. Beim Vergleich mit dem mittleren Wind und den Windrosen wurde festgestellt, dass der mittlere Wind und die Böenfaktorwerte nicht korrelieren. Der mittlere Wind blieb an Orten, an denen der Böenfaktor sich signifikant änderte, im Bereich der Messunsicherheit konstant. Aber an Messorten mit Böenfaktorwerten im Bereich der Messunsicherheit änderte sich der mittlere Wind signifikant.

Beim Vergleich mit den Windrosen stellte sich heraus, dass an Messorten mit höherer Windrichtungsvariabilitäten ebenfalls höhere Böenfaktorwerte gemessen wurden.

In Stuttgart wurde der Effekt von Bäumen untersucht. Dabei ergab sich, dass in Bereichen ohne direkten Einfluss des Effekts von Bäumen der Böenfaktor und die Häufigkeit der Böen im Rahmen der Messunsicherheit gleichbleiben. Weiterhin wurde festgestellt, dass hinter den modellierten Effekten von Bäumen die mittlere Windgeschwindigkeit abgeschwächt wird und somit der Böenfaktor und die Turbulenzintensität zunehmen, aber die Häufigkeit der Böen abnimmt. In den Hinterhöfen ließ sich eine leichte Reduzierung des mittleren Windes erkennen, sodass hier der Böenfaktor überwiegend zunimmt. Jedoch wurden in den Hinterhöfen so wenige Böen gemessen, dass sich ihre Häufigkeit nicht durch den Effekt der Bäume signifikant änderte. Die Turbulenzintensität wurde wie der Böenfaktor durch den Effekt der Bäume beeinflusst und nahm ebenfalls zu. Besonders hohe Werte für die Häufigkeit der Böen wurde an Gebäudekanten neben Hofeinfahrten gemessen.

Als Drittes wurde der Einfluss eines Gebäudedurchbruchs in der Höhe des ersten Stockwerks auf den Böenfaktor und die Häufigkeit der Böen nach DWD-Definition bei einer Windrichtung von 110° untersucht. Dabei zeigte sich keine signifikante Änderung des Böenfaktors östlich des Gebäudedurchbruchs und im Hinterhof. Nur in der Straße westlich des Gebäudedurchbruchs wurden signifikant höhere Böenfaktorwerte gemessen. Bei der Häufigkeit der Böen wurde festgestellt, dass bei der Variante mit Gebäudedurchbruch die meisten Böen an den Häuserecken gemessen wurden und dass sich bei der Variante ohne Gebäudedurchbruch die Werte östlich des Durchbruchs signifikant erhöhten und im Hinterhof reduzierten. Genauso wie beim Böenfaktor werden bei der Häufigkeit der Böen in der Variante ohne Gebäudedurchbruch signifikant weniger Böen in der Straße westlich des Gebäudedurchbruchs gemessen. Auch beim Mittelwert und den Windrosen war westlich des Gebäudedurchbruchs eine signifikante Änderung zu sehen. Mit Gebäudedurchbruch entsteht eine Strömung durch den Durchbruch und anschließend in der Straße westlich des Gebäudes eine bimodale Verteilung. Östlich des Gebäudedurchbruchs ließ sich keine signifikante Änderung erkennen.

Da sich bei der Auswertung der Einflussfaktoren auf den Böenfaktor ein Zusammenhang zwischen Böenfaktor und Turbulenzintensität abzeichnete, wurde dies näher untersucht. Beim Vergleich des Böenfaktors mit der Turbulenzintensität zeigte sich ein linearer Zusammenhang. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Hu et al. (2018). Dabei analysierten die Autoren die Daten in typischen Höhen von Windkraftanlagen und stellten dabei ebenfalls einen linearen Zusammenhang der beiden Größen fest.

Im Weiteren wurde bei der Literaturrecherche festgestellt, dass sich die verwendeten Windkomfortkriterien in Bottema (1993), Koss (2006) und Blocken und Carmeliet (2004) auf das Verhältnis der turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung beziehen. Bei der Auswertung des Verhältnisses der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung zeigte sich, dass im Gegensatz zu den festen Werten in den Böenkriterien bei der Auswertung der Messwerte aus dem Windkanal kein fester Wert gefunden werden konnte. Zugleich wurde kein fester Wert für das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung pro Windgeschwindigkeit festgestellt. Im Weiteren fiel auf, dass die Werte für das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung größer als 3 waren. Es muss allerdings beachtet werden, dass in

dieser Auswertung die maximalen Werte für das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung betrachtet wurden. Prinzipiell ist ein Wert für das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung von 3 zu gering für die Auswertung von Extremwerten. Dies wurde auch in der Windkanalstudie von Pearce und Baker (1999) dokumentiert, die einen Wert von 5,4 empfehlen.

Abschließend wurde darauf hingewiesen, dass durch die Verwendung von Punktmessungen nicht alle Messorte abgedeckt werden. Zusätzlich ist nicht gewährleistet, dass an ähnlichen Standorten gleiche Messwerte gemessen werden. Die Auswirkungen, die die Auswahl der Messorte haben, konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

10.1.1. Weitere Auswertemöglichkeiten

Für weitere Auswertung wäre es interessant, ob mit anderen Böenparametern, wie sie in Hu et al. (2018) und Letson et al. (2019) zitiert werden, windrichtungs- oder anströmungsunabhängige Ergebnisse erzielt werden. Ahmad et al. (2017) kommt in seiner Arbeit auf das Ergebnis, dass die Daten unabhängig von der Windgeschwindigkeit in der Anströmung untersucht werden sollten. Dazu verwendet der Autor dimensionslose Zahlen. Da die Daten in dieser Arbeit bereits dimensionslos vorliegen, wäre dies ebenso eine mögliche weitere Analyse.

Bardal und Sætran (2016) konnte bei der Auswertung von Windkraftanlagen feststellen, dass der Böenfaktor mit der mittleren Windgeschwindigkeit abnimmt. Allerdings bleibt das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung konstant. Dies lässt vermuten, dass das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung von der Höhe abhängig ist. Somit könnte für eine weitere Auswertung das Verhältnis der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung für Höhen oberhalb der Gebäudehöhe betrachtet werden. Weitere Auswertemöglichkeiten wären die Betrachtung der 95. Perzentile des Böenfaktors und des Verhältnisses der maximalen turbulenten Abweichung der Strömung zur Standardabweichung. Dies wäre auch interessant, da einzelne starke Böen nicht vom Menschen wahrgenommen werden (siehe Bottema, 1993).

Weitere Fragestellungen, die speziell mit Windkanaldaten geklärt werden können, wären, ob in jedem 10-minütigen Intervall eine Böe auftritt und wie hoch die Wahrscheinlichkeit für eine oder mehrere Böen pro 10-minütigen Intervall ist.

10.2. Fazit zu den verkehrserzeugten Immissionen

Bei den verkehrserzeugten Immissionen wurde ebenfalls im Rahmen des Projektes ein vollständiger Datensatz zur Modellvalidierung erzeugt. Dabei liegt der Vorteil der Modellierung im Windkanal an den bekannten einstellbaren Randbedingungen. So

kann die Konzentration, die von einer Straße freigesetzt wird, vorgegeben und die Hauptwindrichtung konstant gehalten werden.

Zunächst wurde folgender Frage nachgegangen: **„Welche Repräsentativität hat ein Messort bezüglich der Erfassung verkehrserzeugter Immissionen?“** Es wurden vier Natur-Messstandorte im Ernst-Reuter-Modell betrachtet. Dabei wurde festgestellt, dass, obwohl das 50. Perzentil für drei der vier Messorte im gleichen Wertebereich lagen, sich signifikante Unterschiede bei der detaillierten Untersuchung zeigten. Wie erwartet, ergaben sich an den einzelnen Messorten aufgrund der unterschiedlichen Lage bezüglich der Straße des 17. Juni signifikante Unterschiede bei den Messwerten. Mit Hilfe der Strömungsdaten konnte bewiesen werden, dass sich ein Rezirkulationsgebiet hinter dem TU-Hauptgebäude ausbildet, sodass die höchsten Konzentrationen am TU-Vorplatz und somit entgegen der Anströmwindrichtung gemessen wurden. Außerdem wurden durch das Rezirkulationsgebiet Konzentrationen auf das Dach der TU Berlin transportiert. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchung von S. Weber und K. Weber (2008). Bei der Auswertung des 5. und 95. Perzentils fiel vor allem das TU-Dach auf. Aufgrund seiner exponierten Lage weist es die höchsten Werte für das 95. Perzentil und die niedrigsten Werte für das 5. Perzentil sowohl für die Hardenberg- als auch für die Kantstraße auf. Jedoch stellte sich bei der Untersuchung der Häufigkeitsverteilung und der Messzeitreihe heraus, dass die Entfernung des Messorts zur emittierenden Hauptverkehrsstraße einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Es gilt, je weiter ein Messort entfernt liegt, desto stärker sind die Konzentrationen vermischt. Dabei ließ sich für den Messort TU-Vorplatz erkennen, dass selbst der Ergebniswert für das 5. Perzentil noch im Rahmen der Messunsicherheit liegen kann, obwohl sich bei der Häufigkeitsverteilung signifikante Unterschiede zeigten. Dies wurde ebenfalls bei der Hardenbergstraße für die Messorte TU-150m und TU-250m festgestellt.

Die gleiche Untersuchung wurde für eine Windrichtung von $+90^\circ$ durchgeführt. Dabei ergaben sich bereits beim 50. Perzentil signifikante Unterschiede zwischen den Messorten. Auffällig ist jedoch, dass davon ausgegangen werden muss, dass die Konzentrationen über Dachniveau und quer zur Strömungsrichtung zu den Messorten transportiert werden. Dies verdeutlicht, wie wichtig die Anströmwindrichtung für die richtige Interpretation der Messdaten ist. Zusätzlich muss beachtet werden, dass Konzentrationen aus weiter entfernten Hauptverkehrsstraßen an den Messort transportiert werden. Ebenso können Konzentrationen von Hauptverkehrsstraßen kommen, die nicht in Strömungsrichtung liegen.

Die Auswertung der vier Messorte und der beiden Windrichtungen konnte zeigen, dass die räumliche Repräsentativität in den komplexen urbanen Strukturen sehr begrenzt ist.

Bei der Untersuchung der Frage **„Welchen Einfluss haben geometrische Vereinfachungen auf die Erfassung verkehrserzeugter Immissionen?“** wird ein Gebäudedurchbruch betrachtet, der häufig in Modellen vernachlässigt wird. Dabei zeigte sich, dass genauso wie bei den Windböen ein Gebäudedurchbruch signifikante Auswirkungen auf das Strömungsmuster und somit auf die Konzentrationsverteilung hat.

Die nächste Forschungsfrage lautete: **„Wie weit reicht der Transport von Schadstoffen aus einer Hauptverkehrsstraße und welchen Einfluss haben Windrichtung und Umgebungsbebauung auf die Immissionsbelastung in einer komplexen Stadtstruktur?“** Die Fragestellung wurde innerhalb des Berlin-Modells beantwortet. Zunächst

wurden die Konzentrationen in einer Straße, die senkrecht zur Hauptverkehrsstraße liegt, gemessen. Dabei wurden die Windrichtungen 185° , 200° , 215° und 230° gewählt.

Wie erwartet, ergaben sich bei senkrechter Anströmung (185° Windrichtung) der Hauptverkehrsstraße die höchsten Konzentrationen am Anfang der Nebenstraße. Bei der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße zeigte sich deutlich, dass die Schadstofffahne langsam über Dachniveau aufsteigt und dort sowie am Boden mit frischer Luft vermischt wird. In 1000 m Entfernung ist der Konzentrationsanteil in der Straße und über Dachniveau gleich innerhalb der Messunsicherheit. Dies lässt den Vorteil von Messungen im Windkanal erkennen, bei denen nur von einer Straße Konzentrationen freigesetzt werden und somit bis in 1000 m Entfernung Unterschiede erkennbar sind. Im Vergleich zum Windkanal lagen bei Messungen in der Natur bereits nach 50 bis 100 m die gemessenen Konzentrationen im Bereich der Hintergrundkonzentration (Baldauf et al. 2013).

Anschließend wurde festgestellt, dass bei einer Windrichtungsdrehung um 15° die Konzentrationen in der Straßenschlucht deutlich abnehmen. Selbst in 1 km Entfernung sind die Konzentrationen bei 200° signifikant niedriger als bei 185° . Es zeigt sich aber, dass die Konzentrationen bei 200° deutlich schneller über Dachniveau getragen werden, sodass in 500 m Entfernung höhere Konzentrationen über Dachniveau in 200° als bei 185° gemessen wurden. Dies verstärkt sich bei einer weiteren Winddrehung auf 215° und anschließend auf 230° . Auch beim 95. Perzentil war zu erkennen, dass die Konzentrationswerte mit jeder Windrichtungsdrehung stärker aufsteigen und dort stärker vermischt werden, sodass die Reichweite abnimmt. Bei der Auswertung des 5. Perzentils ergab sich für eine Windrichtung von 215° , dass die Umgebungsbebauung einen starken Einfluss auf die gemessenen Konzentrationen hat. Um die Fragestellung mit vorkommenden Strömungsmustern zu untermauern, standen nicht genug Strömungsmessungen zur Verfügung.

Zusammenfassend zeigte sich, dass bereits eine geringe Änderung der Hauptwindrichtung von 15° eine starke Auswirkung auf die gemessenen Konzentrationen hat. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von Nosek et al. (2018), die eine starke Windrichtungsabhängigkeit festgestellt haben. Ergänzend wurde bemerkt, wie bei Messorten in unmittelbarer Nähe zur Hauptverkehrsstraße bereits geringfügige Entfernungsveränderungen zu deutlich unterschiedlichen Konzentrationen führten.

Weiterhin wurde in einer Nebenstraße, die in einem Winkel von 30° zur Hauptverkehrsstraße steht, gemessen. Beim 50. Perzentil wurde deutlich, dass die Windrichtung, in der die Hauptverkehrsstraße angeströmt wird, für die Konzentrationsverteilung wichtiger als die Orientierung der Nebenstraße ist. Dies liegt daran, dass die Strömung in der Nebenstraße für alle untersuchten Windrichtungen kanalisiert wurde und somit keine starken Unterschiede aufweist. Auch beim 95. Perzentil ergaben sich gleiche Verteilungen. Durch die Kanalisierung wurden bei allen untersuchten Windrichtungen in 200 m Entfernung innerhalb der Straßenschlucht identische Messwerte im Rahmen der Messunsicherheit gemessen. Bei den Windrichtungen 200° , 215° und 230° wurden höhere Konzentrationen in dieser Nebenstraße als in der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße gemessen. Da aber in der Straße senkrecht zur Hauptverkehrsstraße der Wind ebenso kanalisiert wurde, reicht die Kanalisierung als Begründung nicht aus. Aufgrund fehlender Strömungsdaten konnten diese Unterschiede allerdings nicht näher untersucht werden.

Um die räumliche Heterogenität im städtischen Umfeld näher zu analysieren, wurde an sieben Orten in 200 m Entfernung zur Hauptverkehrsstraße gemessen. Dabei zeigte sich, dass die größten Unterschiede zwischen dem 5. bzw. 95. Perzentil und dem 50. Perzentil in der westlichen senkrechten Straße gemessen wurden. Die höchsten Werte für das 95. Perzentil wurden aber in der mittleren senkrechten Straße, die zugleich die stärkste Kanalisierung aufweist, gemessen. Auch beim 5. Perzentil hat es in dieser Straße den höchsten Wert gegeben. Für Hinterhöfe konnte bewiesen werden, dass die Konzentrationen über Dachniveau in die Hinterhöfe gespült werden. Bei den Windrichtungsänderungen zeigte sich kein eindeutiger Trend an den einzelnen Messorten.

Im Weiteren konnte auf dem Fußgängerweg senkrecht zur Straße des 17. Juni nachgewiesen werden, dass direkt an der Hauptverkehrsstraße durch Turbulenz frische Luft eingemischt wird. Auch ließ sich erkennen, dass an Messungen in der Nähe des mittleren Dachniveaus frische Luft über die Dächer eingemischt wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zum einen Schadstoffe über 1 km weit transportiert und zum anderen bereits geringe Windrichtungsänderungen von 15° signifikante Auswirkungen auf die Konzentrationsverteilung haben. Außerdem hängt die Immissionsbelastung aufgrund der komplexen Stadtstruktur stark von der Umgebungsbebauung ab.

Die letzte Forschungsfrage war Folgende: **„Wie hoch ist die Variabilität von Messergebnissen an einem Standort, die durch die Messdauer entsteht?“** Dazu wurde der Einfluss unterschiedlicher Mittelungsintervalle untersucht. Dabei wurde über 10, 30, 60 und 120 Minuten gemittelt. Zunächst zeigte sich für Messungen in 2 m Höhe, dass bereits bei einer Mittelung von 10 Minuten die Streuungen der Werte deutlich reduziert sind. Bei 60 Minuten Mittelungszeit zeigten bereits erste Messorte nur noch Schwankungen innerhalb der Messunsicherheit. Jedoch musste an manchen Orten noch mit einer Unsicherheit von 32 % gerechnet werden. Bei einer Mittelung von 120 Minuten lagen alle Schwankungen im Bereich der Messunsicherheit, sodass für die untersuchten Messorte konstante Randbedingungen von 120 Minuten ausreichen, um eine mittlere Messung innerhalb der Messgenauigkeit des Standortes zu erhalten. Für Messungen über Dachniveau in 32 m Höhe über Grund zeigte sich, dass durch die Einmischung frischer Luft die Schwankungen bereits ohne Mittelungen signifikant höher als in der Straßenschlucht sind. Jedoch reduzierten sich diese beim Mitteln deutlich, sodass bereits bei einer Mittelung von 60 Minuten die gleichen Schwankungen wie in der Straßenschlucht gemessen wurden. Für noch geringere Schwankungen wären 120 Minuten als Messdauer zu empfehlen. Es muss dabei beachtet werden, dass bei dieser Auswertung das 5. und 95. Perzentil und nicht das Maximum und Minimum betrachtet wurden. Diese würden die Unsicherheit deutlich erhöhen. Ebenso wurde in Wyngaard (2010) hergeleitet, dass Messungen in der Natur generell langsamer konvergieren. Dies bedeutet, dass in der Natur noch längere Mittelungszeiten notwendig sind, um die beschriebenen Unsicherheiten zu erreichen.

10.2.1. Weitere Auswertemöglichkeiten

Für weitere Auswertungen könnten die Daten mit den Verkehrsdaten aus Grafenhorst (2014) auf reale Konzentrationen umgerechnet und mit Naturmessungen verglichen werden.

Eine andere Möglichkeit wäre das Höhen-Breiten-Verhältnisse der Straßen im Hinblick auf die Konzentrationsverteilung näher zu untersuchen, wie dies in Dai et al. (2018) durchgeführt wurde.

Um eine tiefere Auswertung der Daten zu erreichen, wären weitere Messungen im Windkanal nötig. Es fehlen vor allem Messungen der vertikalen Windgeschwindigkeit, um die Transportwege der Konzentrationen genauer auszuwerten und bestimmen zu können. Zusätzlich wären weitere horizontale Messungen vor allem in der Nähe der Messorte und an Straßenkreuzungen nötig.

Im Bezug auf die Arbeit von Hall, Walker und Spanton (1999) wäre es interessant, im Rahmen von weiteren Windkanalmessungen zu untersuchen, wie lange sich die Konzentrationen der Hauptverkehrsstraße in den Hinterhöfen und Nebenstraßen halten.

10.3. Übersicht weiterer möglicher Untersuchungen

Nicht alle Messungen des Projektes wurden im Rahmen dieser Arbeit ausgewertet. Deswegen sollen im Folgenden weitere mögliche Auswertungen beschrieben werden.

Beim Hamburger HafenCity-Modell wurde ein aufwendiger 3D-CAD-Datensatz erstellt, um eine Validierung numerischer Modelle zu vereinfachen. Dies wurde für beide Bebauungszustände (2017 und 2023) gemacht, sodass bei der Validierung die Unterschiede hinsichtlich der Veränderung untersucht werden können.

Zur Analyse des Windkomforts in der HafenCity wurden an vier Standorten bei unterschiedlichen Windrichtungen Sanderosionsuntersuchungen durchgeführt, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht ausgewertet werden konnten. Zusätzlich wurden an drei der vier Standorte unterschiedlich große Veränderungen der Gebäude vorgenommen und ebenfalls mit Sanderosionsuntersuchungen geprüft. Ergänzt wurde der Datensatz an zwei Standorten mit Strömungsmessungen, von denen ein kleiner Teil im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich der Böigkeit ausgewertet wurde. Als weitere Auswertung wäre die Analyse des Windkomforts an den jeweiligen Messstandorten und die Untersuchung des Einflusses der Windrichtung und der Veränderungen möglich. Besonders der Einfluss der Reichweite der Veränderungen konnte nicht näher untersucht werden, da zum Teil die Standorte zu nah am Rande des Modells lagen.

Auch beim Berliner Ernst-Reuter-Platz-Modell konnten nicht alle Versuche ausgewertet werden. Untersucht wurde eine Straße mit Konzentrations- als auch mit Strömungsmessungen, bei der auf die Gebäudewände eine für numerische Modelle typische rasterförmige Rauigkeit mit 1 m Genauigkeit aufgetragen wurde. Zum einen könnten die Messdaten hinsichtlich des Einflusses der 1-m-rasterförmigen Rauigkeit ausgewertet werden, zum anderen wäre es interessant, welchen Einfluss eine gröbere Rasterung von

10.3 Übersicht weiterer möglicher Untersuchungen

zum Beispiel 5 m hätte. Ebenso könnte eine weitere Studie untersuchen, ob bei einem größeren Gebiet die Auswirkung der Rasterung stärker wird.

Für einen Vergleich von Windkanalmessungen mit Naturmessungen wurden Strömungsmessungen in einem Raster im Innenhof eines Gebäudekomplexes gemessen. Dabei können zum einen die Strömungsmessungen bezüglich der räumlichen Variabilität und zum anderen hinsichtlich der Messunsicherheit von Naturmessungen untersucht werden.

Im Neckartor-Modell wurden im Rahmen dieser Arbeit nur die Strömungsmessungen ausgewertet. Darüber hinaus stehen noch Konzentrationsmessungen zur Verfügung, die hinsichtlich des Einzugsgebietes am Neckartor ausgewertet werden können. Da bei den Konzentrationsmessungen auch der Effekt von Bäumen berücksichtigt wurde, kann dieser Effekt zusätzlich untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- 12, VDI 3783 Blatt (2000). *Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht Windkanalanwendungen*. Berlin: Beuth Verlag.
- 3D-Gebäudemodelle (LoD1 und LoD2) (2019). URL: https://www.lgln.niedersachsen.de/startseite/geodaten_karten/3d_geobasisdaten/3d_gebaudemodelle/3d-gebaudemodelle-142891.html (besucht am 23. 10. 2019).
- Abdi, D. S. und Bitsuamlak (2016). „Wind flow simulations in idealized and real built environments with models of various level of complexity“. In: *Wind and Structures* 22.4, S. 503–524. DOI: 10.12989/WAS.2016.22.4.503.
- Acevedo, O. V. C. und D. R. Fitzjarrald (2001). „The Early Evening Surface-Layer Transition: Temporal and Spatial Variability“. In: *JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES* 58, S. 18.
- Ahmad, N. H. et al. (2017). „Large-Eddy Simulation of the Gust Index in an Urban Area Using the Lattice Boltzmann Method“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 163.3, S. 447–467. DOI: 10.1007/s10546-017-0233-6.
- Amini, S. et al. (2018). „Modeling dispersion of emissions from depressed roadways“. In: *Atmospheric Environment* 186, S. 189–197. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2018.04.058.
- Aubrun, S. und B. Leitl (2004). „Development of an improved physical modelling of a forest area in a wind tunnel“. In: *Atmospheric Environment* 38.18, S. 2797–2801. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2004.02.035.
- Azad, A. K. und M. M. Alam (2010). „Determination of Wind Gust Factor at Windy areas of Bangladesh“. In: *Proceedings of the 13th Asian Congress of Fluid Mechanics*, S. 521–524. DOI: 10.13140/2.1.2090.6884.

- Baden-Württemberg Landesanstalt für Umweltschutz (2019). *Jahreswerte*. URL: <https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/luft/jahreswerte> (besucht am 25. 10. 2019).
- Baldauf, R. W. et al. (2013). „Air quality variability near a highway in a complex urban environment“. In: *Atmospheric Environment* 64, S. 169–178. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.09.054.
- Bardal, L. M. und L. R. Sætran (2016). „Wind Gust Factors in a Coastal Wind Climate“. In: *Energy Procedia* 94, S. 417–424. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.09.207.
- Belcher, S. E. (2005). „Mixing and transport in urban areas“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 363.1837, S. 2947–2968. DOI: 10.1098/rsta.2005.1673.
- Berbekar, E. (2016). „Transient phenomena of scalar transport during accidental releases in urban environments“. Dissertation. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Bitan, A. (1976). „Wind as a negative factor in human comfort and its implications for planning“. In: *International Journal of Biometeorology* 20.3, S. 174–183. DOI: 10.1007/BF01553658.
- Blocken, B. und J. Carmeliet (2004). „Pedestrian Wind Environment around Buildings: Literature Review and Practical Examples“. In: *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 28.2, S. 107–159. DOI: 10.1177/1097196304044396.
- Blocken, B., T. Stathopoulos und J.P.A.J. van Beeck (2016). „Pedestrian-level wind conditions around buildings: Review of wind-tunnel and CFD techniques and their accuracy for wind comfort assessment“. In: *Building and Environment* 100, S. 50–81. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.02.004.
- Blocken, B., T. Stathopoulos und J. Carmeliet (2008). „Wind Environmental Conditions in Passages between Two Long Narrow Perpendicular Buildings“. In: *Journal of Aerospace Engineering* 21.4, S. 280–287. DOI: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2008)21:4(280).
- Bö (2019). URL: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100310&lv3=100488> (besucht am 18. 07. 2019).
- Bottema, M. (1993). „Wind climate and urban geometry“. Dissertation. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- Brasseur, O (2001). „Development and Application of a Physical Approach to Estimating Wind Gusts“. In: *MONTHLY WEATHER REVIEW* 129, S. 5–25.

- Britter, R. E. und S. R. Hanna (2003). „Flow and dispersion in urban areas“. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 35.1, S. 469–496. DOI: 10.1146/annurev.fluid.35.101101.161147.
- Cahill, T. A. et al. (2016). „Artificial ultra-fine aerosol tracers for highway transect studies“. In: *Atmospheric Environment* 136, S. 31–42. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.03.058.
- Cao, J., Y. Tamura und A. Yoshida (2013). „Wind tunnel investigation of wind loads on rooftop model modules for green roofing systems“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 118, S. 20–34. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.04.006.
- Castro, I. P. et al. (2017). „Measurements and Computations of Flow in an Urban Street System“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 162.2, S. 207–230. DOI: 10.1007/s10546-016-0200-7.
- Cermak, J. E. (ed.) (1980). „Wind Engineering“. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Wind Engineering*, 1400 pp.
- Chan, T. L. et al. (2002). „Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon“. In: *Atmospheric Environment* 36.5, S. 861–872. DOI: 10.1016/S1352-2310(01)00490-3.
- Chen, F. et al. (2019). „Low-level wind effects on the glide paths of the North Runway of HKIA: A wind tunnel study“. In: *Building and Environment* 164, S. 106337. DOI: 10.1016/j.buildenv.2019.106337.
- Conan, B. et al. (2015). „Contribution of coherent structures to momentum and concentration fluxes over a flat vegetation canopy modelled in a wind tunnel“. In: *Atmospheric Environment* 107, S. 329–341. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.02.061.
- Counihan, J. (1975). „Adiabatic atmospheric boundary layers: review and analysis of data from the period 1880-1972“. In: S. 871–905.
- Dai, Y. et al. (2018). „Evaluation of computational and physical parameters influencing CFD simulations of pollutant dispersion in building arrays“. In: *Building and Environment* 137, S. 90–107. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.04.005.
- Erdmann, F. (2017). „Wind tunnel study of terrain induced flow modification and spatial resolution effects“. Masterarbeit. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Etling, D. (2002). *Theoretische Meteorologie: eine Einführung*. 2. Auflage. Berlin: Springer.

- Ferreira, A D, A C M Sousa und D X Viegas (2002). „Prediction of building interference effects on pedestrian level comfort“. In: *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* S. 305–319.
- Fezer, F. (1990). „Climatic change after regeneration in the oldest quarter of Heidelberg“. In: *Landscape and Urban Planning* 19, S. 47–54.
- Fischer, R. (2011). „Entwicklung eines problemorientierten Software-Pakets zur automatisierten Aufbereitung, Analyse und Dokumentation von im Windkanal produzierten Daten zur LES-Validierung“. Dissertation. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Garratt, J. R. (1992). *The atmospheric boundary layer*. Cambridge atmospheric and space science series. Cambridge [u.a]: Univ. Press.
- Gartmann, A. et al. (2012). „Evaluation of numerical simulations of CO₂ transport in a city block with field measurements“. In: *Environmental Fluid Mechanics* 12.2, S. 185–200. DOI: 10.1007/s10652-011-9226-z.
- Grafenhorst, W. (2014). *Straßenverkehrszählung Berlin 2014*. Ergebnisbericht. Berlin: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, S. 1–39. URL: https://www.berlin.de/senuvk/verkehr/lenkung/vlb/download/ergebnisbericht_2014.pdf.
- Grimmond, C.S.B. und T. R. Oke (2002). „Turbulent Heat Fluxes in Urban Areas: Observations and a Local-Scale Urban Meteorological Parameterization Scheme (LUMPS)“. In: *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY* 41, S. 19.
- Gromke, C. und B. Ruck (2007). „Influence of trees on the dispersion of pollutants in an urban street canyon—Experimental investigation of the flow and concentration field“. In: *Atmospheric Environment* 41.16, S. 3287–3302. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2006.12.043.
- Groot Zwaafink, C. D. et al. (2014). „Modelling Small-Scale Drifting Snow with a Lagrangian Stochastic Model Based on Large-Eddy Simulations“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 153.1, S. 117–139. DOI: 10.1007/s10546-014-9934-2.
- Gross, G. (2016). „Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 25.4, S. 479–487. DOI: 10.1127/metz/2016/0797.
- Gutiérrez, A. und R. G. Fovell (2018). „A new gust parameterization for weather prediction models“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 177, S. 45–59. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.04.005.

- Häckel, H. (2005). *Meteorologie*. 5., überarbeitete Auflage. UTB Geowissenschaften, Agrarwissenschaften 1338. Stuttgart: Ulmer.
- Halbig, G. et al. (2019). „User requirements and case studies to evaluate the practicability and usability of the urban climate model PALM-4U“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 28.2, S. 139–146. DOI: 10.1127/metz/2019/0914.
- Hall, D. J., S. Walker und A. M. Spanton (1999). „Dispersion from courtyards and other enclosed spaces“. In: *Atmospheric Environment* 33, S. 1187–1203.
- Harms, F. (2010). „Systematische Windkanaluntersuchungen zur Charakterisierung instationärer Ausbreitungsprozesse einzelner Gaswolken in urbanen Rauigkeitsstrukturen“. Dissertation. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Harper, B. A., J. D. Kepert und J. D. Ginger (2010). „Guidelines for converting between various wind averaging periods in tropical cyclone conditions“. In: *World Meteorological Organisation* TD-No. 1555.
- He, X. (2014). „Experimental assessment of ventilation in idealized urban structures“. Masterarbeit. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Hooff, T. van, B. Blocken und Y. Tominaga (2017). „On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: Comparison of RANS, LES and experiments“. In: *Building and Environment* 114, S. 148–165. DOI: 10.1016/j.buildenv.2016.12.019.
- Hu, W. et al. (2018). „Wind Gust Characterization at Wind Turbine Relevant Heights in Moderately Complex Terrain“. In: *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 57.7, S. 1459–1476. DOI: 10.1175/JAMC-D-18-0040.1.
- Hunt, J. C. R., E. C. Poulton und J. C. Mumford (1976). „The effects of wind on people; New criteria based on wind tunnel experiments“. In: *Building and Environment* 11, S. 15–28. DOI: 10.1016/0360-1323(76)90015-9.
- Jackson, P. S. (1978). „The evaluation of windy environments“. In: *Building and Environment* 13, S. 251–260.
- Janssen, T. (2013). „Windkomfort und bodennahe Luftbewegung im Bereich des geplanten Campus Bundesstr. Am Standort Geomatikum“. Masterarbeit. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.

- Kanda, I. et al. (2011). „A wind-tunnel study on diffusion from urban major roads“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99.12, S. 1227–1242. DOI: 10.1016/j.jweia.2011.10.009.
- Karran, D. (2015). *Methode 2: Böenfaktor*. URL: <https://www.synoptische-meteorologie.de/zyklonen/b%C3%B6envorhersage/> (besucht am 14.06.2019).
- Kastner-Klein, P., R. Berkowicz und R. Britter (2004). „The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons“. In: *Meteorology and Atmospheric Physics* 87, S. 121–131. DOI: 10.1007/s00703-003-0065-4.
- Kellnerová, R. et al. (2018). „On Street-Canyon Flow Dynamics: Advanced Validation of LES by Time-Resolved PIV“. In: *Atmosphere* 9.5, S. 161. DOI: 10.3390/atmos9050161.
- Kipsch, F. (2014). „Systematische Windkanaluntersuchungen zur Charakterisierung des Einflusses der urbanen Bebauungsstruktur hinsichtlich der Stadtbelüftung“. Dissertation. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Kock, P. L. (2018). „Investigation of Gas Dispersion Processes at the Facility of CERN“. Masterarbeit. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Konow, H. (2015). „Tall wind profiles in heterogeneous terrain.“ Dissertation. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- 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. DOI: 10.1016/j.jweia.2006.06.005.
- Kuo, C.-Y. et al. (2015). „Wind Tunnel Studies of a Pedestrian-Level Wind Environment in a Street Canyon between a High-Rise Building with a Podium and Low-Level Attached Houses“. In: *Energies* 8.10, S. 10942–10957. DOI: 10.3390/en81010942.
- Leitl, B., C. Chauvet und M. Schatzmann (2001). „Effects of Geometrical Simplification and Idealization on the Accuracy of Microscale Dispersion Modelling“. In: *Proc. 3rd Int. Conf. on Urban Air Quality*.
- Letson, F. et al. (2019). „Characterizing wind gusts in complex terrain“. In: *Atmospheric Chemistry and Physics* 19.6, S. 3797–3819. DOI: 10.5194/acp-19-3797-2019.
- Li, Q.S. et al. (2013). „Implementing wind turbines in a tall building for power generation: A study of wind loads and wind speed amplifications“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 116, S. 70–82. DOI: 10.1016/j.jweia.2013.03.004.

- Malberg, H. (2007). *Meteorologie und Klimatologie: eine Einführung*. 5., erw. und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer.
- Mara, T.G. et al. (2014). „Aerodynamic and peak response interference factors for an upstream square building of identical height“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 133, S. 200–210. ISSN: 01676105. DOI: 10.1016/j.jweia.2014.06.010.
- Maronga, B. et al. (2019). „Development of a new urban climate model based on the model PALM – Project overview, planned work, and first achievements“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 28.2, S. 105–119. DOI: 10.1127/metz/2019/0909.
- Mittal, H., A. Sharma und A. Gairola (2018). „A review on the study of urban wind at the pedestrian level around buildings“. In: *Journal of Building Engineering* 18, S. 154–163. DOI: 10.1016/j.jobee.2018.03.006.
- Murakami, S., S. Uehara und K. Deguchi (1980). „Wind effects on pedestrians: New criteria based on outdoor observation of over 2000 persons“. In: *Cermak (1980)*, S. 277–288.
- Nosek, S. et al. (2018). „Street-canyon pollution with respect to urban-array complexity: The role of lateral and mean pollution fluxes“. In: *Building and Environment* 138, S. 221–234. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.04.036.
- numpy.percentile* (2019). URL: <https://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/generated/numpy.percentile.html> (besucht am 15.10.2019).
- Oke, T. R. (2000). *Boundary layer climates*. 2. Auflage. London: Routledge.
- Ouldboukhitine, S.-E. und R. Belarbi (2015). „Experimental Characterization of Green Roof Components“. In: *Energy Procedia* 78, S. 1183–1188. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.099.
- pandas: powerful Python data analysis toolkit* (2019). URL: <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/index.html> (besucht am 15.10.2019).
- pandas.DataFrame.boxplot* (2019). URL: <https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/reference/api/pandas.DataFrame.boxplot.html> (besucht am 14.06.2019).
- Pavageau, M. und M. Schatzmann (1999). „Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon“. In: *Atmospheric Environment*, S. 11.

- Pearce, W. und C.J. Baker (1999). „Wind tunnel tests on the dispersion of vehicular pollutants in an urban area“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 80.3, S. 327–349. DOI: 10.1016/S0167-6105(98)00114-7.
- Planetarische Grenzschicht* (2019). URL: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101996&lv3=102070> (besucht am 22. 10. 2019).
- Python 3.6.0* (2016). URL: <https://www.python.org/downloads/release/python-360/> (besucht am 22. 10. 2019).
- Raasch, S. und M. Schröter (2001). „PALM - A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 10.5, S. 363–372. DOI: 10.1127/0941-2948/2001/0010-0363.
- Reuter, U., J. Baumüller und T. Flassak (2008). *Stadtklima 21*. Version 5. Stuttgart.
- Richardson, L. F. (1922). *Weather prediction by numerical process*. Cambridge: Univ. Press.
- Rong, L. et al. (2016). „Mechanisms of natural ventilation in livestock buildings: Perspectives on past achievements and future challenges“. In: *Biosystems Engineering* 151, S. 200–217. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.09.004.
- Salem, N. B. et al. (2015). „Modelling Pollutant Dispersion in a Street Network“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 155.1, S. 157–187. DOI: 10.1007/s10546-014-9990-7.
- Schäfer, K. (2013). „Validierung des mesoskaligen Transport- und Strömungsmodells “METRAS“ für Berlin anhand der Messkampagne der Freien Universität Berlin vom Sommerhalbjahr 2012“. Masterarbeit. Berlin: Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.
- Scherer, D., F. Ament et al. (2019). „Three-Dimensional Observation of Atmospheric Processes in Cities“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 28.2, S. 121–138. DOI: 10.1127/metz/2019/0911.
- Scherer, D., F. Antretter et al. (2019). „Urban Climate Under Change [UC]2 – A National Research Programme for Developing a Building-Resolving Atmospheric Model for Entire City Regions“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 28.2, S. 95–104. DOI: 10.1127/metz/2019/0913.
- Schliffke, B. (2018). „Investigating the Spatial and Temporal Representativeness of Low-Level Urban Wind Measurements in the HafenCity Hamburg“. Masterarbeit. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.

- Snyder, W. H. (1981). *Guideline for fluid modeling of atmospheric diffusion*. report no. 600/8-81-009. Research Triangle Park, NC 27711: Environmental Sciences Research Laboratory, Office of Research und Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- Sorbjan, Z. (1989). *Structure of the atmospheric boundary layer*. Prentice Hall advanced reference series. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall.
- Soulhac, L., R. J. Perkins und P. Salizzoni (2008). „Flow in a Street Canyon for any External Wind Direction“. In: *Boundary-Layer Meteorology* 126.3, S. 365–388. DOI: 10.1007/s10546-007-9238-x.
- Stull, R. B. (2009). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. 8. Auflage. o.O.: Springer Science + Business Media B.V.
- Suomi, I. und T. Vihma (2018). „Wind Gust Measurement Techniques—From Traditional Anemometry to New Possibilities“. In: *Sensors* 18.4, S. 1300. DOI: 10.3390/s18041300.
- Tennekes, H. und J. L. Lumley (1972). *A First Course in Turbulence*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Townsend, A. A. (1956). *The Structure of Turbulent Shear Flow*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Uematsu, Y. et al. (1992). „Effects of the corner shape of high-rise buildings on the pedestrian-level wind environment with consideration for mean and fluctuating wind speeds“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 44.1, S. 2289–2300. DOI: 10.1016/0167-6105(92)90019-7.
- U.K. Met. Office (1993). *Forecasters' Reference Book*. 2. Auflage. Bracknell: Meteorological Office.
- Wachsmann, R. (2020). „Untersuchung des Einflusses städtischer Baumgruppen auf die Ventilation eines Stadtquartiers am Beispiel von Berlin-Steglitz“. Masterarbeit. Hamburg: Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg.
- Watanabe, N. et al. (2016). „New City Block Design Approaches Incorporating Environmental Assessment for Downtown Districts in Cities with Severe Winter Climates“. In: *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 15.3, S. 455–462. DOI: 10.3130/jaabe.15.455.
- Weber, S. und K. Weber (2008). „Coupling of urban street canyon and backyard particle concentrations“. In: *Meteorologische Zeitschrift* 17.3, S. 251–261. DOI: 10.1127/0941-2948/2008/0286.

- Wu, H. und F. Kriksic (2012). „Designing for pedestrian comfort in response to local climate“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104-106, S. 397–407. DOI: 10.1016/j.jweia.2012.02.027.
- Wyngaard, J. C. (2010). *Turbulence in the Atmosphere*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Yasa, E. (2017). „The Evaluation of the Effects of Different Building Forms and Settlement Areas on the Thermal Comfort of Buildings“. In: *Procedia Engineering* 205, S. 3267–3276. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.329.
- Zhou, X. et al. (2016). „Numerical simulation and wind tunnel test for redistribution of snow on a flat roof“. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 153, S. 92–105. DOI: 10.1016/j.jweia.2016.03.008.

Anhang A

Detaillierte Darstellung aller Messpunkte

A.1. Hamburg HafenCity-Modell

Koordinatensystem: Koordinaten in ETRS89 (UTM) North Zone 32

A.1.1. Messungen im Bebauungszustand 2017 und 2023

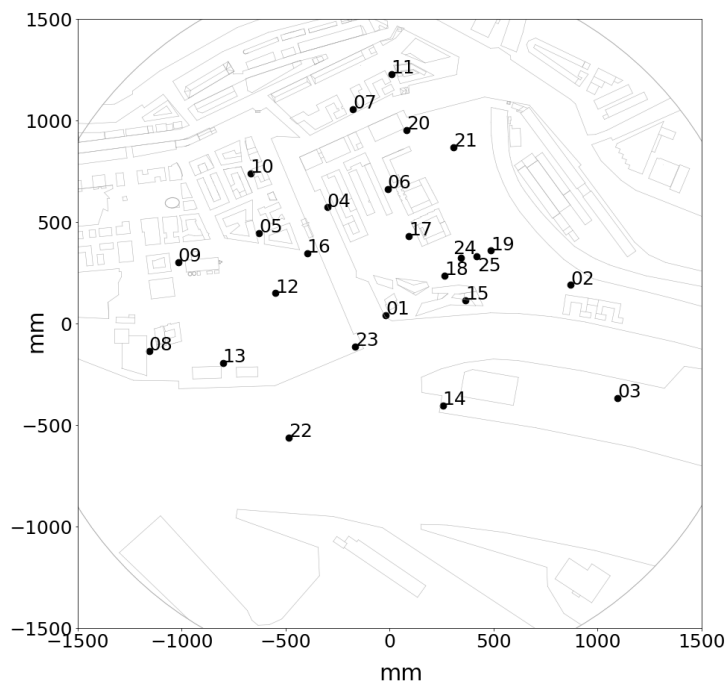


Abbildung A.1.: Strömungsmessungen im Hamburger HafenCity-Modell für beide Bebauungszustände

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
1	566439	5932798	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
2	566883.4	5932872	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
3	566995.7	5932593	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
4	566297.7	5933063	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
5	566133.9	5932999	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
6	566442.8	5933108	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
7	566359.6	5933305	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
8	565869.2	5932709	110;130;150;250;260;270 280;290	3,10,20,25,40,50,75
9	565939.6	5932927	110;130;150;250;260;270 280;290	3,10,20,25,40,50,75
10	566113.2	5933147	110;130;150;250;260;270 280;290	3,10,20,25,40,50,75
11	566451.9	5933391	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
12	566173.3	5932852	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
13	566047	5932680	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75

14	566575.4	5932574	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
15	566630	5932834	110;130;150;250;260;270 280;290	21,25,40,50,75
16	566249.2	5932951	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
17	566494.4	5932992	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
18	566580	5932895	110;130;150;250;260;270 280;290	3,10,20,25,40,50,75
19	566691.3	5932957	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
20	566487.9	5933253	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
21	566601	5933212	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
22	566204.6	5932495	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
23	566365.4	5932721	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
24	566625.8	5932938	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75
25	566656.6	5932942	110;130;150;250;270;290	3,10,20,25,40,50,75

Tabelle A.2.: Messpunkte im Hamburger HafenCity-Modell für den Bebauungszustand von 2017 und den zukünftigen von 2023

Neben den Messungen in A.2 wurden noch folgende Zusatzmessungen durchgeführt:

Name	Windrichtung	Höhe	Bebauung
1	280	3,10,20,25,40,50,75	2017
9	290	5	2017
16	290	100	2017 und 2023
18	110;250	7	2017 und 2023
18	290	7	2017
24	260	3,10,20,25,40,50,75	2023
25	260	3,10,20,25,40,50,75	2023
25	280	3,10,20,25,40,50,75	2027

Tabelle A.3.: Zusatzmessungen im Hamburger HafenCity-Modell

A.1.2. Windkanalmessungen an den Naturmessorten während der IOP in der HafenCity

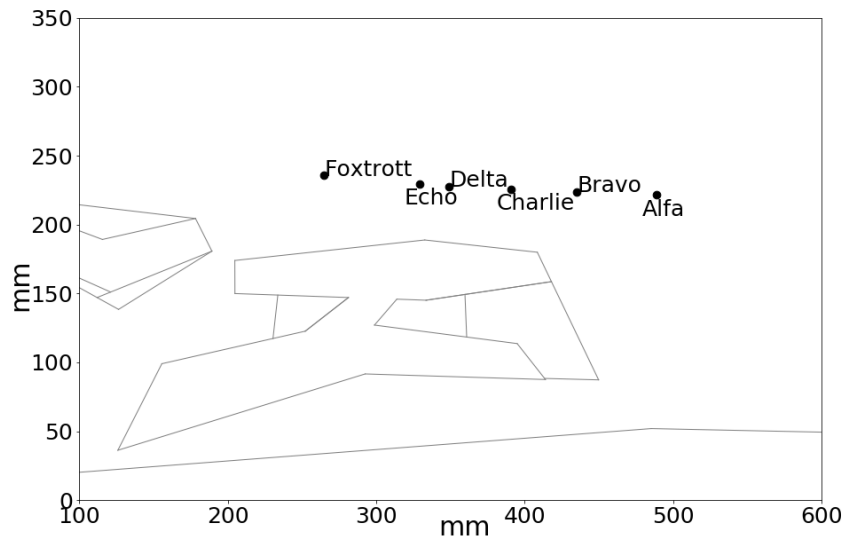


Abbildung A.2.: Windkanalmessungen an den Naturmessorten während der IOP in der HafenCity

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
Alfa	566692	5932888	110;130;150;260;270;280;290	3,7
Bravo	566665	5932889	110;130;150;250;260;270;280;290	3,7
Charlie	566643	5932890	110;130;150;250;260;270;280;290	3,7
Delta	566622	5932891	110;130;150;250;260;270;280;290	3,7
Echo	566612	5932892	110;130;150;250;260;270;280;290	3,7
Foxtrott	566580	5932895	110;130;150;250;260;270;280;290	3,7

Tabelle A.4.: Windkanalmessungen an den Naturmessorten der IOP in Hamburg HafenCity für beide Bebauungszustände

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe	Jahr
Alfa	566692	5932888	250	3,7	2023
Alfa	566692	5932888	0;10;30;50;70;90;170;180 190;210;230;310;330;350	7	2017
Charlie	566643	5932890	10;30;50;70;90;170;180 190;330;350	7	2017
Echo	566612	5932892	10	7	2017
Foxtrott	566580	5932895	0;10;30;50;70;90;170;180 190;210;230;310;330;350	7	2017

Tabelle A.5.: Zusatzwindkanalmessungen an den Naturmessorten der IOP in Hamburg HafenCity

A.1.3. Rasterförmige Messungen an der HafenCity Universität Hamburg

Die rasterförmigen Messungen wurden für beide Bebauungszustände durchgeführt.

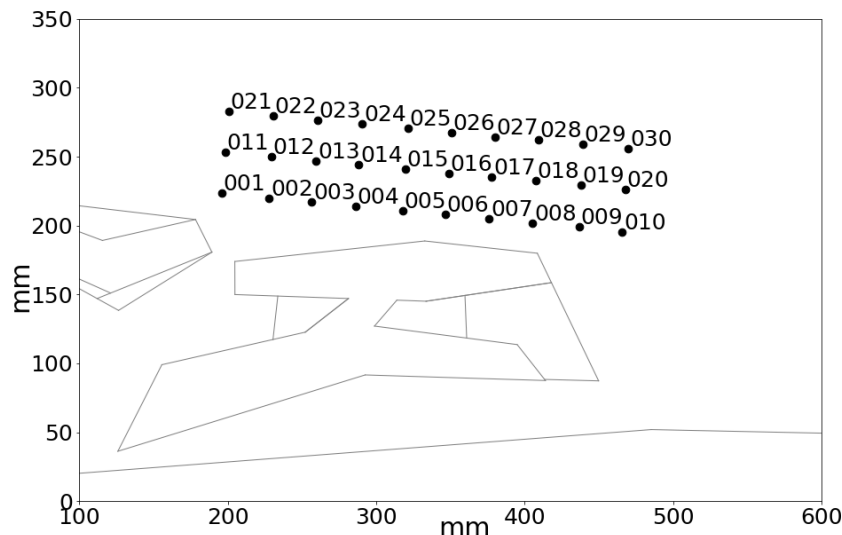


Abbildung A.3.: Rasterförmige Messungen an der HafenCity Universität Hamburg

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
001	566545.54	5932889.09	110;130;150;250;260;270;280;290	5
002	566561.45	5932887.18	110;130;150;250;260;270;280;290	5
003	566575.79	5932885.79	110;130;150;250;260;270;280;290	5
004	566590.52	5932884.31	110;130;150;250;260;270;280;290	5
005	566606.31	5932882.67	110;130;150;250;260;270;280;290	5
006	566620.84	5932881.21	110;130;150;250;260;270;280;290	5
007	566635.51	5932879.70	110;130;150;250;260;270;280;290	5
008	566650.14	5932878.10	110;130;150;250;260;270;280;290	5
009	566665.79	5932876.66	110;130;150;250;260;270;280;290	5
010	566680.32	5932875.04	110;130;150;250;260;270;280;290	5
011	566546.74	5932903.76	110;130;150;250;260;270;280;290	5
012	566562.21	5932902.28	110;130;150;250;260;270;280;290	5
013	566577.29	5932900.73	110;130;150;250;260;270;280;290	5
014	566591.66	5932899.44	110;130;150;250;260;270;280;290	5
015	566607.26	5932897.70	110;130;150;250;260;270;280;290	5
016	566621.85	5932896.11	110;130;150;250;260;270;280;290	5
017	566636.38	5932894.97	110;130;150;250;260;270;280;290	5
018	566651.12	5932893.49	110;130;150;250;260;270;280;290	5
019	566666.45	5932892.06	110;130;150;250;260;270;280;290	5
020	566681.29	5932890.28	110;130;150;250;260;270;280;290	5
021	566547.91	5932918.55	110;130;150;250;260;270;280;290	5
022	566562.90	5932917.04	110;130;150;250;260;270;280;290	5
023	566577.66	5932915.49	110;130;150;250;260;270;280;290	5
024	566592.81	5932914.13	110;130;150;250;260;270;280;290	5
025	566608.26	5932912.71	110;130;150;250;260;270;280;290	5
026	566622.83	5932911.08	110;130;150;250;260;270;280;290	5

027	566637.56	5932909.44	110;130;150;250;260;270;280;290	5
028	566652.17	5932908.22	110;130;150;250;260;270;280;290	5
029	566667.05	5932906.85	110;130;150;250;260;270;280;290	5
030	566682.44	5932905.13	110;130;150;250;260;270;280;290	5

Tabelle A.7.: Rasterförmige Messungen an der HafenCity Universität Hamburg

A.1.4. Windkanalmessungen in der Nähe der HafenCity Naturmessstelle des HUSCO-Messnetzes

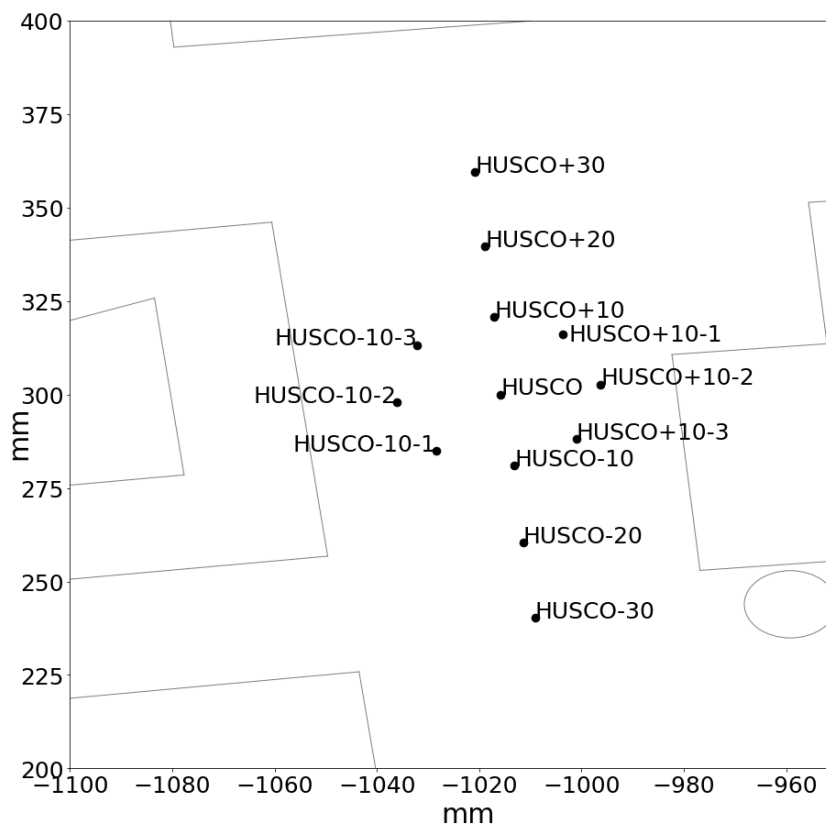


Abbildung A.4.: Windkanalmessungen in der Nähe der HafenCity Naturmessstelle des HUSCO-Messnetzes

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
HUSCO+10-1	565945.70	5932935.39	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO+10-2	565949.36	5932928.63	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO+10-3	565946.98	5932921.35	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO+10	565938.98	5932937.67	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO+20	565938.05	5932947.11	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO+30	565937.09	5932957.04	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO-10-1	565933.26	5932919.75	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO-10-2	565929.40	5932926.26	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO-10-3	565931.44	5932933.92	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10

HUSCO-10	565940.95	5932917.80	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO-20	565941.78	5932907.50	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO-30	565942.96	5932897.44	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10
HUSCO	565939.57	5932927.30	110;130;150;250;260;270;280;290	3,10

Tabelle A.9.: Windkanalmessungen in der Nähe der HafenCity Naturmessstelle des HUSCO-Messnetzes Bebauungszustand 2017

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
HUSCO+30	565937.09	5932957.04	270	3,10
HUSCO	565939.57	5932927.30	110;250;260;270;280;290	3,10

Tabelle A.10.: Windkanalmessungen in der Nähe der HafenCity Naturmessstelle des HUSCO-Messnetzes Bebauungszustand 2023

A.1.5. Windkanalmessungen im Überseeboulevard

Messungen wurden nur im Bebauungszustand von 2017 vorgenommen. Alle Messungen wurden sowohl mit als auch ohne Gebäudedurchbruch mit Ausnahme der Messungen in Tabelle A.14 durchgeführt. Letztere wurden mit Gebäudedurchbruch gemacht.

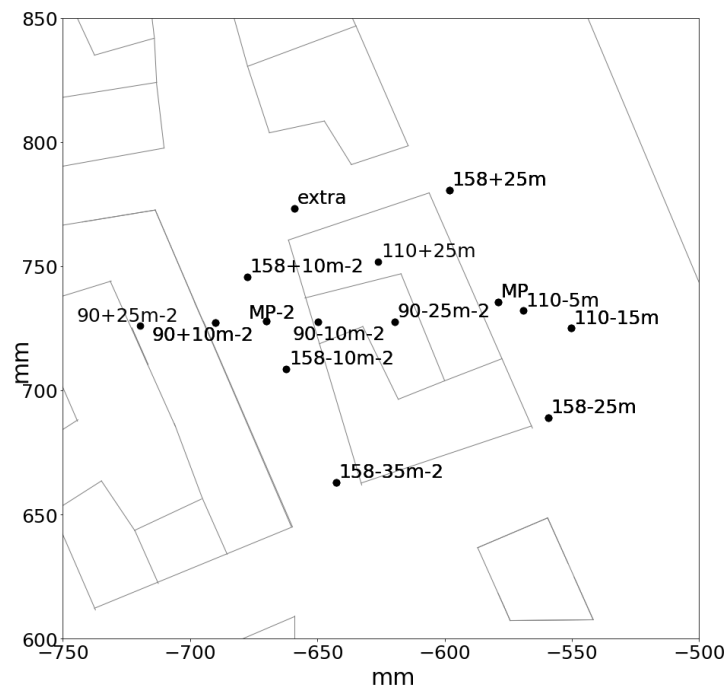


Abbildung A.5.: Messungen im Überseeboulevard für eine Anströmwindrichtung von 110°

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
110+25m	566134.47	5933153.23	110	28,40,50,75
110-15m	566172.31	5933139.83	110	3,10,20,25,40,50,75
110-5m	566162.99	5933143.36	110	3,10,20,25
158+10m-2	566108.71	5933150.23	110	3,10,20,25
158+25m	566148.49	5933167.67	110	3,10,20,25,40,50,75
158-10m-2	566116.41	5933131.63	110	3,10,20,25
158-25m	566167.81	5933121.81	110	3,10,20,25,40,50,75
158-35m-2	566126.18	5933108.82	110	3,10,20,25,40,50,75
90+10m-2	566102.42	5933140.91	110	3,10,20,25,40,50,75
90+25m-2	566087.73	5933140.29	110	40,50,75,100
90-10m-2	566122.61	5933141.10	110	10,20,25,40,50,75
90-25m-2	566137.63	5933141.16	110	10,20,25,40,50,75
extra	566118.00	5933164.00	110	3,10,20,25
MP-2	566112.50	5933141.26	110	3,10,20,25,40,50,75
MP	566158.00	5933145.10	110	3,10,20,25,40,50,75

Tabelle A.11.: Messungen im Überseeboulevard

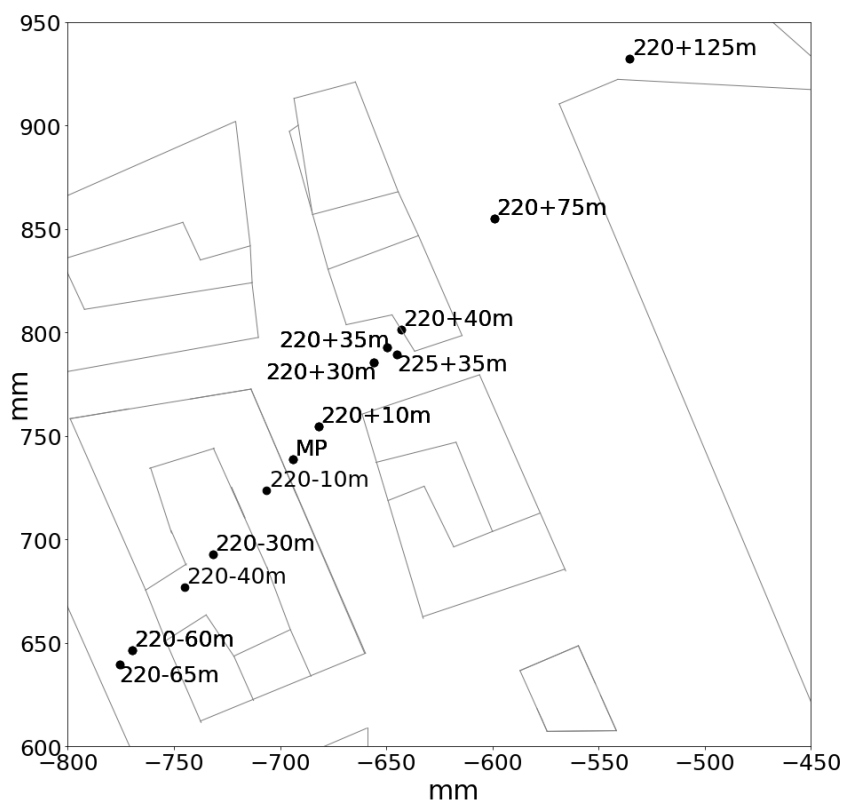


Abbildung A.6.: Messungen im Überseeboulevard für eine Anströmwindrichtung von 225°

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
220+10m	566106.56	5933154.62	225	3,10,20,25,40,50,75
220+125m	566179.83	5933243.58	225	3,10,20,25,40
220+30m	566119.62	5933170.17	225	3,10,20,25,40,50,75
220+35m	566122.63	5933173.81	225	3,10,20,25

220+40m	566125.94	5933178.02	225	3,10,20,25,40
220+75m	566148.01	5933204.95	225	3,10,20,25,40
220-10m	566094.34	5933139.11	225	40,50,75
220-30m	566081.68	5933123.79	225	10,20,25,40,50,75
220-40m	566074.96	5933115.82	225	10,20,25,40
220-60m	566062.70	5933100.62	225	3,10,20,25,40
220-65m	566059.65	5933097.06	225	3,10,20,25
225+35m	566125.00	5933172.04	225	3,10,20,25,40
MP	566100.53	5933146.77	225	3,10,20,25,40,50,75

Tabelle A.13.: Messungen im Überseeboulevard

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
220+35m	566122.63	5933173.81	225	40,50,75
220+75m	566148.01	5933204.95	225	50,75
220-60m	566062.70	5933100.62	225	50,75

Tabelle A.14.: Zusatzmessungen im Überseeboulevard nur mit Gebäudedruchbruch

A.1.6. Messungen am Unilever-Haus

Messungen wurden nur im Bebauungszustand von 2017 vorgenommen.

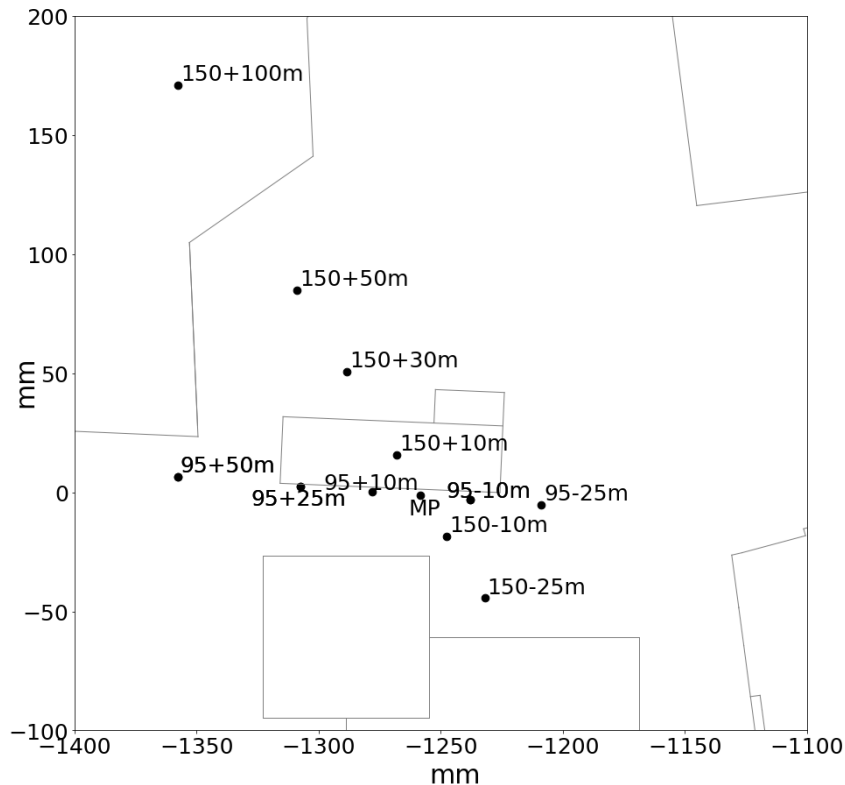


Abbildung A.7.: Messungen am Unilever-Haus

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
150+100m	565768.71	5932862.78	150	3,10,20,25,40,50,75
150+10m	565813.48	5932785.14	150	10,20,25,40,50,75
150+30m	565803.30	5932802.64	150	3,10,20,25,40,50,75
150+50m	565793.12	5932819.75	150	3,10,20,25,40,50,75
150-10m	565823.73	5932767.98	150	3,10,20,25,40,50,75
150-25m	565831.50	5932755.08	150	3,10,20,25,40,50,75
95+10m	565808.40	5932777.31	150	3,10,20,25,40,50,75
95+25m	565793.69	5932778.54	150	3,10,20,25,40,50,75
95+50m	565768.62	5932780.58	150	3,10,20,25,40,50,75,100
95-10m	565828.50	5932775.77	150	3,10,20,25,40,50,75,100
95-25m	565843.07	5932774.67	150	3,10,20,25,40,50,75
MP	565818.35	5932776.63	150	3,10,20,25,40,50,75

Tabelle A.15.: Messungen am Unilever-Haus mit der sehr detaillierten Version und der sehr stark vereinfachten Version

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
150+100m	565768.71	5932862.78	150	3,10,20,25,40,50,75
150+30m	565803.30	5932802.64	150	3,10,20,25,40,50,75
150+50m	565793.12	5932819.75	150	3,10,20,25,40,50,75
150-25m	565831.50	5932755.08	150	3,10,20,25,40,50,75
95+25m	565793.69	5932778.54	150	3,10,20,25,40,50,75
95-10m	565828.50	5932775.77	150	3,10,20,25,40,50,75
MP	565818.35	5932776.63	150	3,10,20,25,40,50,75

Tabelle A.16.: Zusatzmessungen am Unilever-Haus mit einer leicht vereinfachten Version

A.2. Berlin Ernst-Reuter-Platz-Modell

Koordinatensystem: Koordinaten in ETRS89 (UTM) North Zone 33

A.2.1. Strömungsmessungen

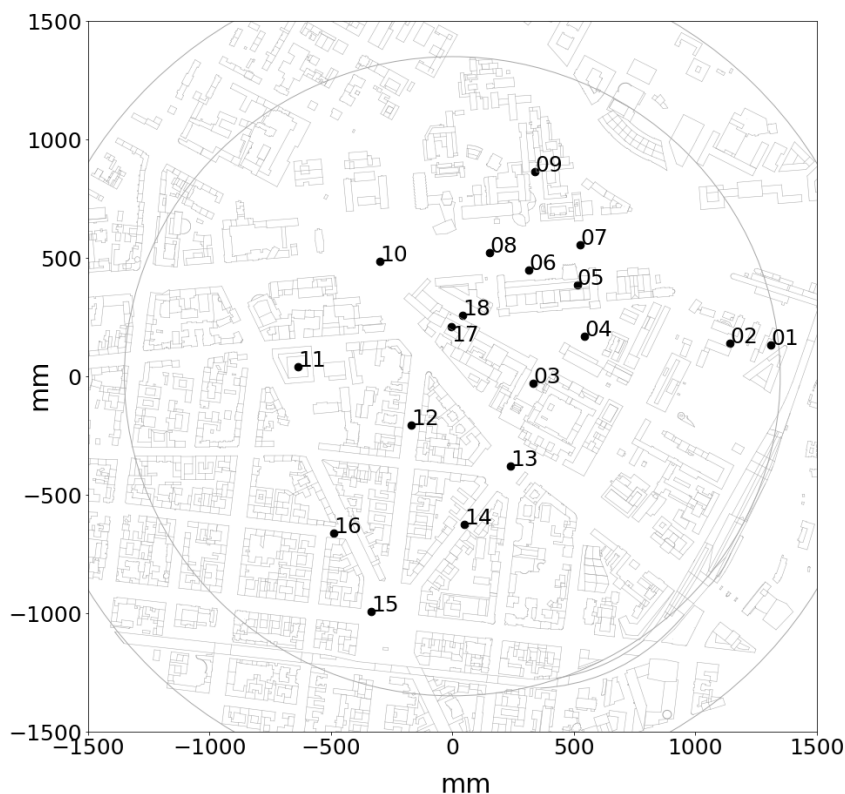


Abbildung A.8.: Messungen im Ernst-Reuter-Platz-Modell

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
1	386924.9	5819201	175,225,265	4,10,20,25,50,75
2	386840.6	5819206	175,225,265	4,10,20,25,50,75
3	386435.6	5819120	175,225,265	4,5,10,20,25,50,75
4	386541.6	5819220	175,225,265	4,5,10,20,25,50,75
5	386526.7	5819328	175,225,265	56,75
6	386427.3	5819359	175,225,265	4,10,20,25,50,75
7	386532.5	5819412	175,225,265	5,10,20,25,50,75
7	386532.5	5819412	175,225	4
8	386346.5	5819396	175,225,265	5,10,20,25,50,75
8	386346.5	5819396	175	4
9	386438.9	5819567	175,225,265	4,10,20,25,50,75
10	386120	5819378	175,225,265	4,7,10,20,25,50,75
11	385953	5819155	175,225,265	4,10,20,25,50,75
12	386185.1	5819032	185,225,265	4,10,20,25,50,75
13	386390.3	5818946	185,225,265	4,10,20,25,50,75

14	386294.4	5818822	185,225,265	4,10,20,25,50,75
14	386294.4	5818822	185	5
15	386101.9	5818638	185,225,265	4,10,20,25,50,75
16	386025.8	5818803	185,225,265	4,10,20,25,50,75
17	386268.4	5819240	175,225,265	4,10,20,25,50,75
K17	386268.4	5819240	265	4,10,20,25,50,75
18	386291.2	5819264	175,225,265	4,10,20,25,50,75
K18	386291.2	5819264	265	4,10,20,25,50,75

Tabelle A.18.: Messungen im Ernst-Reuter-Platz-Modell. Die beiden K-Messungen sind ohne Durchgang.

Einfluss einer geringfügigen Windrichtungsänderung

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
5	386526.7	5819328	260,270,280	56,75
7	386532.5	5819412	260,270,280	10,25,75
9	386438.9	5819567	260,270,280	10,25

Tabelle A.19.: Ergänzende Messungen zur Untersuchung des Einflusses einer geringfügigen Windrichtungsänderung

A.2.2. Rasterförmige Messungen in einem Schulhof

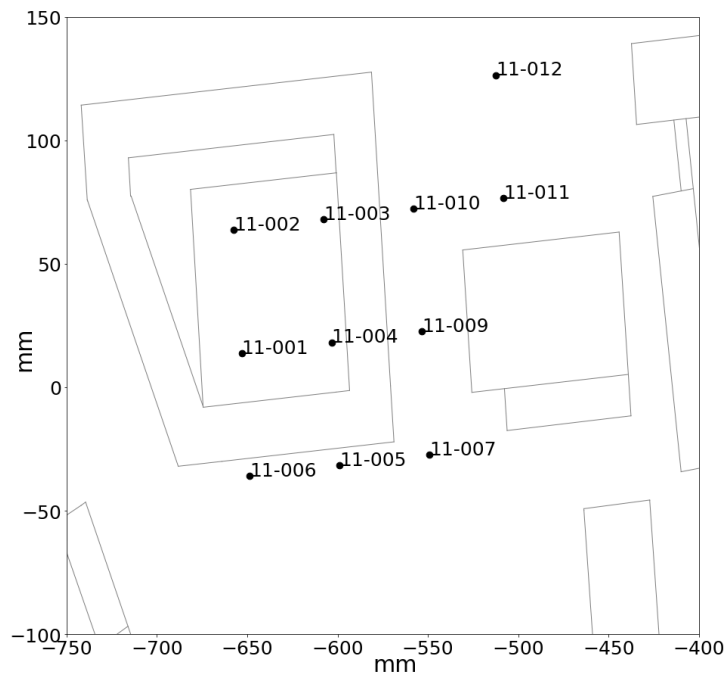


Abbildung A.9.: Rasterförmige Messungen in einem Schulhof

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
11-001	385943.2	5819142	175,225,265	4
11-002	385941	5819167	175,225,265	4
11-003	385965.9	5819169	175,225,265	4
11-004	385968.1	5819144	175,225,265	4
11-005	385970.3	5819119	175,225,265	4
11-006	385945.4	5819117	175,225,265	4
11-007	385995.2	5819122	175,225,265	4
11-009	385993	5819147	175,225,265	4
11-010	385990.8	5819171	175,225,265	4
11-011	386015.7	5819174	175,225,265	4
11-012	386013.5	5819198	175,225,265	4

Tabelle A.20.: Rasterförmige Messungen in einem Schulhof

A.2.3. Mit und ohne extra Wandrauigkeit

Strömungsmessungen

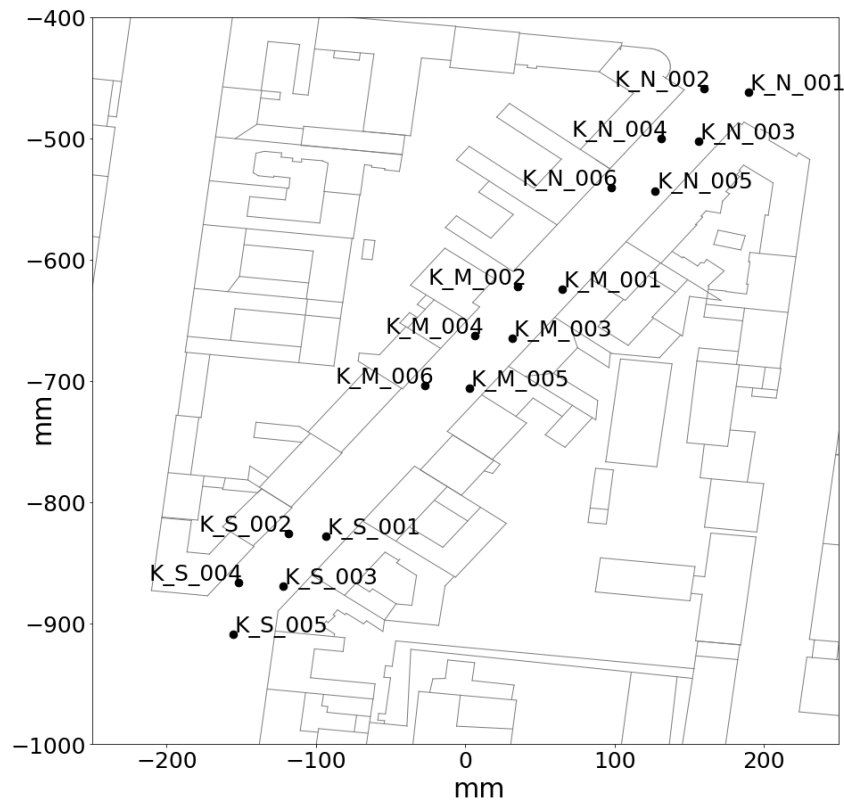


Abbildung A.10.: Strömungsmessungen mit und ohne extra Wandrauigkeit

Name	Rechtswert	Hochwert	Windrichtung	Höhe
K_N_1	386364.6	5818904	185	5
K_N_2	386349.8	5818906	185	5
K_N_3	386347.9	5818884	185	5
K_N_4	386335.3	5818885	185	5
K_N_5	386333.5	5818864	185	5

K_N_6	386318.6	5818865	185	5
K_M_1	386302.3	5818823	185	5
K_M_2	386287.4	5818824	185	5
K_M_3	386285.5	5818803	185	5
K_M_4	386273	5818804	185	5
K_M_5	386271.1	5818782	185	5
K_M_6	386256.2	5818783	185	5
K_S_1	386223.2	5818721	185	5
K_S_2	386210.6	5818722	185	5
K_S_3	386208.7	5818701	185	5
K_S_4	386193.9	5818702	185	5
K_S_5	386192	5818680	185	5

Tabelle A.22.: Strömungsmessungen mit und ohne extra Wandrauigkeit

Konzentrationsmessungen

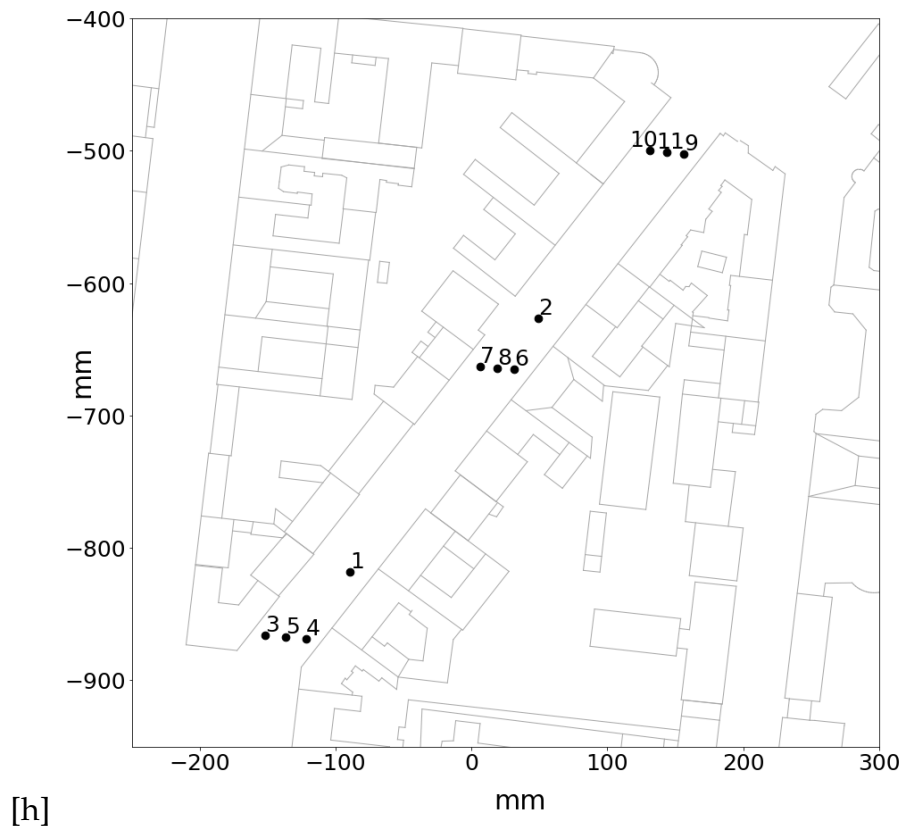


Abbildung A.11.: Konzentrationsmessungen mit und ohne extra Wandrauigkeit

Nr.	Rechtswert	Hochwert	WR	Höhe	Komplexität
1	386224.95	5818726.13	185	2	nur glatt
2	386294.40	5818821.85	185	2	nur glatt
3	386193.92	5818702.13	185	2	beides
4	386208.76	5818700.83	185	2	beides
5	386201.34	5818701.48	185	2	beides
6	386285.52	5818802.58	185	2	beides

7	386272.97	5818803.68	185	2	beides
8	386279.22	5818803.13	185	2	beides
9	386347.87	5818884.11	185	2	beides
10	386335.31	5818885.20	185	2	beides
11	386341.59	5818884.66	185	2	beides

Tabelle A.24.: Konzentrationsmessungen mit und ohne extra Wandrauigkeit

A.2.4. Verkehrserzeugte Emissionen im Ernst-Reuter-Platz-Modell

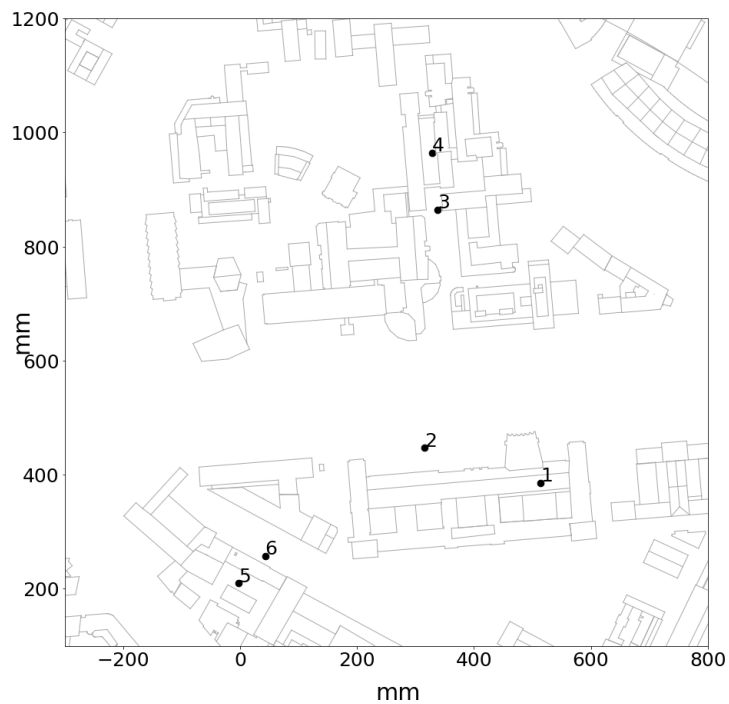


Abbildung A.12.: Verkehrserzeugte Emissionen im Ernst-Reuter-Platz-Modell

Name	Abkürzung
Straße des 17. Juni	17J
Marchstraße	March
Otto-Suhr-Allee	OSA
Bismarkstraße	Bism
Ernst-Reuter-Platz	ERP
Hardenbergstraße	Hard
Kantstraße	Kant

Tabelle A.25.: Abkürzungen für die Straßen, von denen Konzentrationen freigesetzt wurden

Nr.	Name	Rechtswert	Hochwert	WR	Höhe	Straße
1	TU-Dach	386526.7	5819328	265	56	17J,Bism,March Hard,OSA,ERP
2	TU-Vorplatz	386427.3	5819359	175	56	17J,Hard,Kant
				265	2	17J,Bism,March Hard,OSA,ERP
				175	2	17J,ERP,Hard, Kant
K2	TU-Vorplatz	386427.3	5819359	265	2	Hard
3	TU-150m	386438.9	5819567	175	1,8	17J,Hard,Kant
				265	8	17J,ERP,March
					1	17J,Bism,ERP OSA,March
K3	TU-150m	386438.9	5819567	175	1	Hard
4	TU-200m	386434	5819617	175	1,8	17J,Hard,Kant
				265	1,8	OSA,March
5	Durchgang Süd	386268.4	5819240	175	4	Hard,Kant
				265	4	Hard,ERP,Bism, OSA
K5	Durchgang Süd	386268.4	5819240	175	4	Hard,Kant
6	Durchgang Nord	386291.2	5819264	265	4	Bism,Hard,ERP
				175	4	Hard,Kant
				265	4	Hard,ERP,Bism, OSA,March
K6	Durchgang Nord	386291.2	5819264	175	4	Hard,Kant
				265	4	Hard,Bism,ERP, OSA

Tabelle A.26.: Verkehrserzeugte Emissionen im Ernst-Reuter-Platz-Modell; K bei verschlossenem Durchgang

A.2.5. Transektmessung Kantstraße

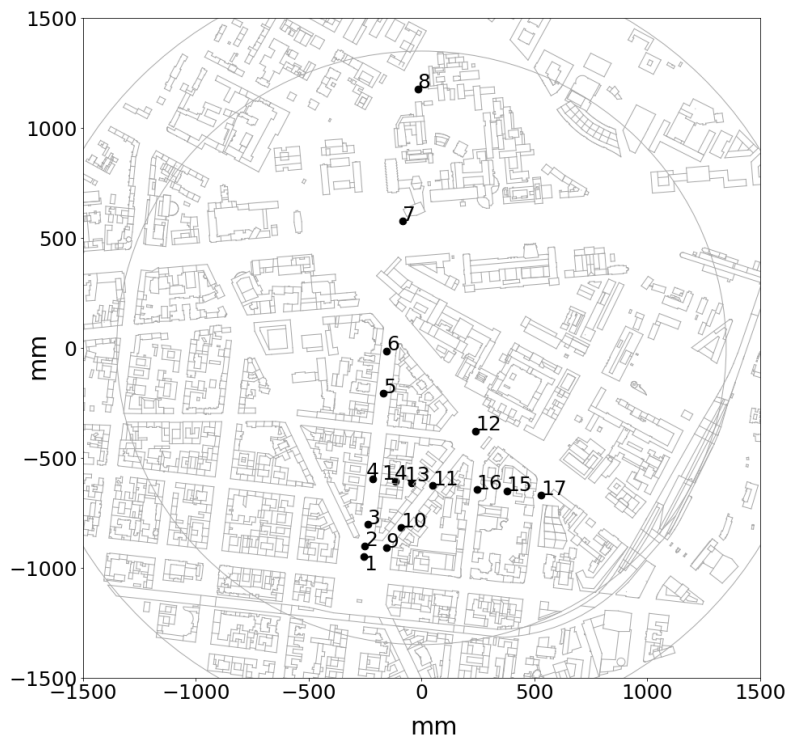


Abbildung A.13.: Messpunkte vom Transekt zur Kantstraße

Nr.	Rechtswert	Hochwert	WR	Höhe
1	386142.3	5818659	185,200,215	1,2,4,8,16,32,64
			230	2,4,8,16,32,64
2	386144.4	5818684	185,215	2
3	386150.3	5818734	185	1,2,4,5,8,16,32,64
			215	1,2,4,8,16,32,64
			200	2,4,8,16,32
			230	2,16,32,64
4	386161.8	5818836	185,200,215,230	2,32
5	386185.1	5819032	185	2
6	386192.7	5819128	185,215	1,2,4,8,16,32,64
			200	2,8,16,32,64
			230	2,16,32
7	386227.8	5819423	185	2
8	386261.5	5819724	185	1,2,4,8,16,32,64
			200,230	4,64
			215	1,4,16,32,64
9	386192	5818680	185,215	2
10	386225	5818726	185,215	1,2,4,8,16,32,64
			200	2,8,16,32,64
			230	2,32,64
11	386294.4	5818822	185,200,215,230	2,32
12	386390.3	5818946	185,215	1,2,4,8,16,32,64

13	386247.3	5818828	200	2,8,32
			230	8,32,64
			185	2,8,32
14	386211.5	5818831	200,215	2,32
			185	2,8,32
			215	2,32
15	386458.6	5818809	185	2,8,32
			200,215	2,32
			185,200,215	2,32
16	386392.4	5818813	185,200,215	2,32
			185,200,215	2,32
			185,200,215	2,32

Tabelle A.28.: Messpunkte vom Transekt zur Kantstraße

A.2.6. Transektmessung Straße des 17. Juni

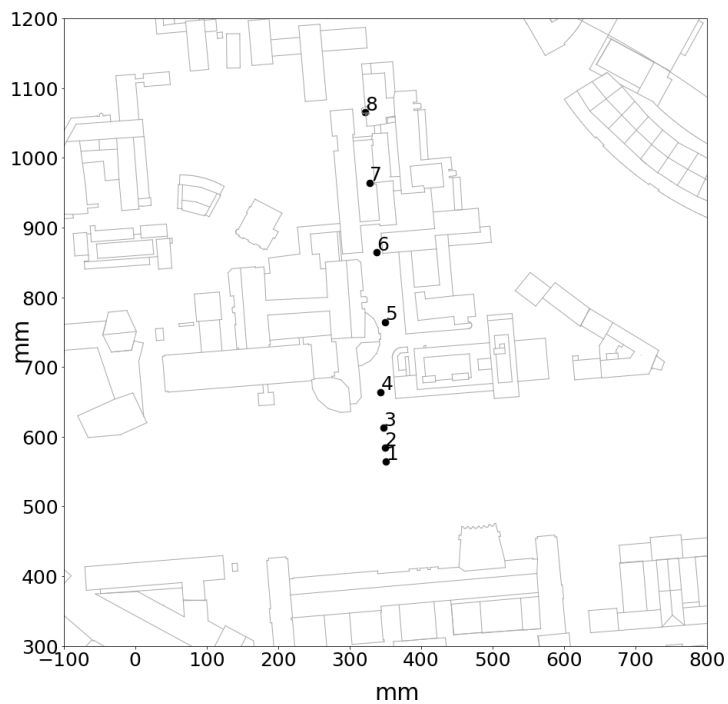


Abbildung A.14.: Messpunkte vom Transekt zur Straße des 17. Juni

Nr.	Name	Rechtswert	Hochwert	WR	Höhe
1	TU-0m	386445.11	5819417.37	175	1
2	TU-10m	386444.42	5819427.08	175	1
3	TU-25m	386443.54	5819441.83	175	1,2
4	TU-50m	386441.62	5819467.25	175	1,2
5	TU-100m	386444.55	5819517.48	175	1
6	TU-150m	386438.92	5819567.24	175	1,2,8,16
7	TU-200m	386433.97	5819617.43	175	1
8	TU-250m	386430.76	5819667.87	175	1,8

Tabelle A.29.: Messpunkte vom Transekt zur Straße des 17. Juni

A.3. Stuttgart Neckartor-Modell

Koordinatensystem: Koordinaten in ETRS89 (UTM) North Zone 32

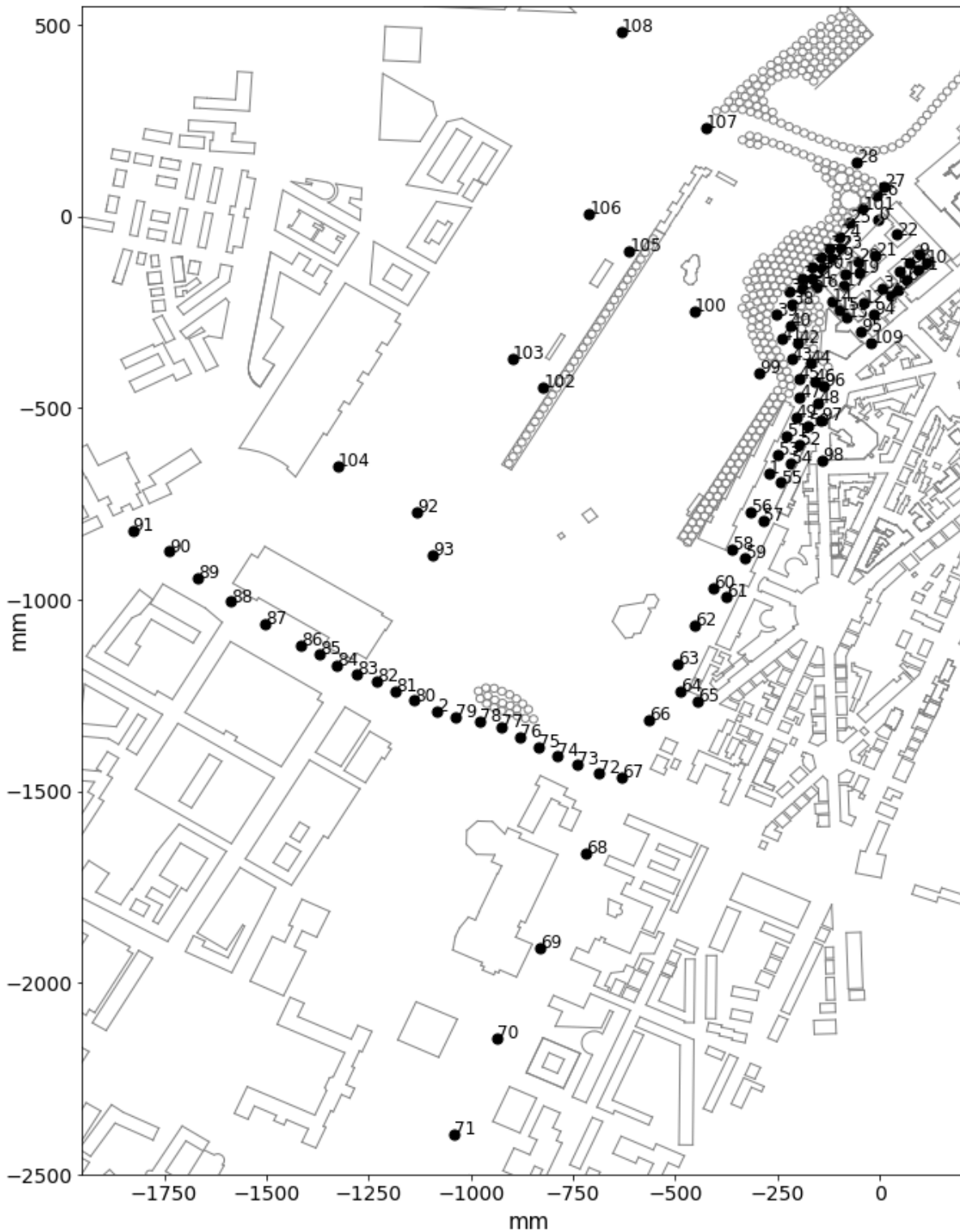


Abbildung A.15.: Alle Strömungsmessorte im Stuttgarter Neckartor-Modell

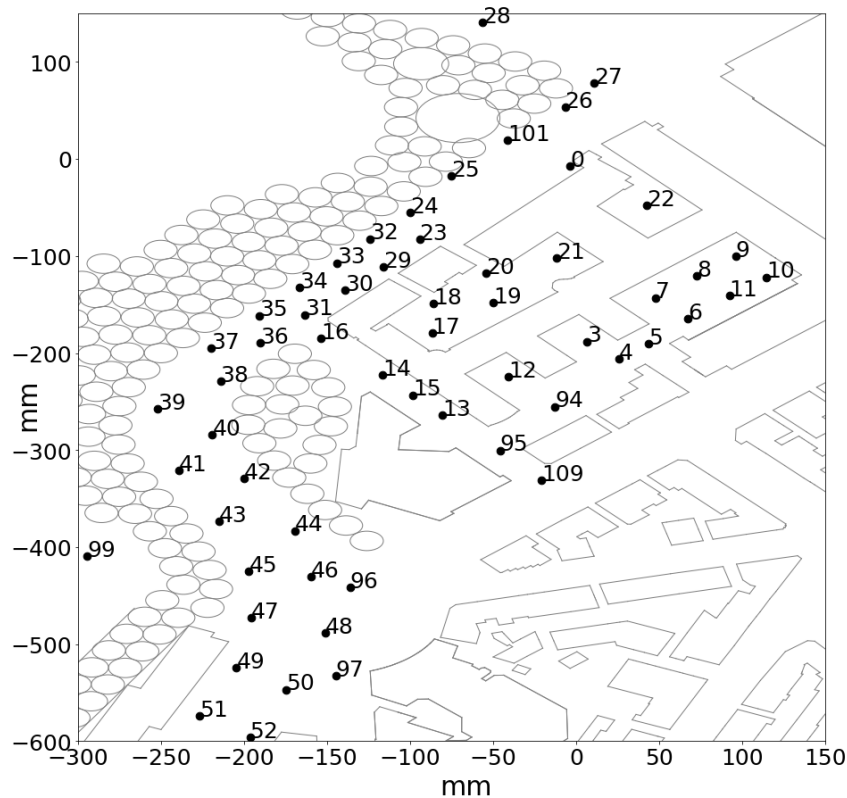


Abbildung A.16.: Messorte im Stuttgarter Neckartor-Modell; kleiner Ausschnitt mit eingezeichneten Effekten von Bäumen (graue Ringe)

In Stuttgart wurden sowohl Strömungs- als auch Konzentrationsmessungen vorgenommen. In den nachfolgenden Tabellen wurde für die Höhe kein Wert eingetragen, wenn an diesem Messort mit der jeweiligen Messtechnik nicht gemessen wurde.

A.3.1. Tabelle ohne den Effekt von Bäumen

Name	Rechtswert	Hochwert	WR	Höhe Ström.	Höhe Konz.
0	514028.34	5403914.96	225	5;7,5;20;25;37,5;50;75	
1	513895.02	5403583.31	225	7,5	10
2	513486.79	5403277.22	225	7,5	10
3	514031.41	5403828.13	225	7,5	10
4	514043.04	5403815.31	225	7,5	10
5	514052.00	5403823.20	225	7,5	10
6	514063.81	5403836.25	225	7,5	10
7	514054.12	5403846.99	225	7,5	10
8	514066.57	5403858.43	225	7,5	10
9	514078.26	5403868.38	225	7,5	10
10	514087.53	5403857.58	225	7,5	10
11	514076.34	5403848.09	225	7,5	10
12	514009.76	5403806.48	225	7,5	10
13	513989.92	5403786.68	225	7,5	10
14	513971.91	5403807.12	225	7,5	10

15	513981.06	5403796.85	225	7,5	10
16	513953.34	5403825.98	225	7,5	10
17	513986.86	5403828.91	225	7,5	10
18	513987.29	5403843.92	225	7,5	10
19	514005.34	5403844.35	225	7,5	10
20	514003.10	5403859.58	225	7,5	10
21	514024.39	5403867.31	225	7,5	10
22	514051.58	5403894.49	225	7,5	10
23	513983.05	5403877.05	225	7,5	10
24	513980.23	5403890.92	225	7,5	10
25	513992.60	5403909.94	225	7,5	10
26	514026.86	5403945.37	225	7,5	10
27	514035.49	5403957.46	225	7,5	10
28	514002.09	5403988.74	225	7,5	10
29	513972.21	5403862.76	225	7,5	10
30	513960.51	5403851.05	225	7,5	10
31	513948.42	5403838.23	225	7,5	10
32	513968.17	5403877.33	225	7,5	10
33	513958.25	5403864.91	225	7,5	10
34	513946.87	5403852.11	225	7,5	10
35	513934.71	5403837.83	225	7,5	10
36	513935.18	5403823.72	225	7,5	10
37	513920.37	5403820.88	225	7,5	10
38	513923.10	5403804.06	225	7,5	10
39	513904.15	5403789.87	225	7,5	10
40	513920.66	5403776.36	225	7,5	10
41	513910.54	5403757.98	225	7,5	10
42	513930.12	5403754.03	225	7,5	10
43	513922.61	5403731.76	225	7,5	10
44	513945.40	5403726.96	225	7,5	10
45	513931.63	5403706.05	225	7,5	10
46	513950.26	5403703.34	225	7,5	10
47	513932.42	5403682.31	225	7,5	10
48	513954.62	5403674.37	225	7,5	10
49	513927.91	5403656.44	225	7,5	10
50	513942.96	5403645.13	225	7,5	10
51	513916.71	5403631.71	225	7,5	10
52	513931.98	5403620.39	225	7,5	10
53	513905.51	5403606.98	225	7,5	10
54	513920.78	5403595.65	225	7,5	10
55	513909.59	5403570.93	225	7,5	10
56	513871.92	5403532.78	225	7,5	10
57	513887.20	5403521.46	225	7,5	10
58	513849.53	5403483.32	225	7,5	10
59	513864.80	5403472.00	225	7,5	10
60	513827.13	5403433.86	225	7,5	10
61	513842.41	5403422.54	225	7,5	10
62	513804.74	5403384.40	225	7,5	10

63	513782.35	5403334.93	225	7,5	10
64	513786.42	5403298.88	225	7,5	10
65	513807.31	5403286.00	225	7,5	10
66	513748.76	5403260.74	225	7,5	10
67	513715.17	5403186.55	225		10
68	513670.38	5403087.62	225		10
69	513614.39	5402963.97	225		10
70	513563.13	5402845.53	225		10
71	513510.10	5402721.78	225		10
72	513685.85	5403193.06	225	7,5	10
73	513661.10	5403203.67	225	7,5	10
74	513636.35	5403214.27	225	7,5	10
75	513613.37	5403226.65	225	7,5	10
76	513590.39	5403239.02	225	7,5	10
77	513567.41	5403251.40	225	7,5	10
78	513540.89	5403260.23	225	7,5	10
79	513510.84	5403265.54	225	7,5	10
80	513461.35	5403286.75	225	7,5	10
81	513438.36	5403299.12	225	7,5	10
82	513415.38	5403311.50	225	7,5	10
83	513390.63	5403322.11	225	7,5	10
84	513365.89	5403332.71	225	7,5	10
85	513344.67	5403346.85	225	7,5	10
86	513321.69	5403359.23	225	7,5	10
87	513279.27	5403387.51	225	7,5	10
88	513236.84	5403415.80	225	7,5	10
89	513196.18	5403445.85	225		10
90	513160.82	5403481.20	225		10
91	513116.63	5403507.72	225		10
92	513463.77	5403532.07	225	7,5	10
93	513483.50	5403476.99	225	7,5	10
94	514023.74	5403790.87	225	7,5	10
95	514007.28	5403768.36	225	7,5	10
96	513962.10	5403697.86	225	7,5	10
97	513957.78	5403652.12	225	7,5	10
98	513960.25	5403600.64	225	7,5	10
99	513882.91	5403713.98	225	7,5	10
100	513803.22	5403793.66	225	7,5	10
101	514009.49	5403928.24	225	7,5	10
102	513618.74	5403695.30	225	7,5	10
103	513581.33	5403732.71	225	7,5	10
104	513367.88	5403592.61	225	7,5	10
105	513724.12	5403872.76	225	7,5	10
106	513674.67	5403922.22	225	7,5	10
107	513818.18	5404034.18	225	7,5	
108	513714.22	5404159.37	225	7,5	
109	514019.78	5403752.98	225	7,5	10

Tabelle A.31.: Alle Strömungs- und Konzentrationsmessorte ohne den Effekt von Bäumen im Stuttgarter Neckartor-Modell

A.3.2. Tabelle mit dem Effekt von Bäumen

Name	Rechtswert	Hochwert	WR	Höhe Ström.	Höhe Konz.
0	514028.34	5403914.96	225	5;7,5;20;25;37,5;50;75;100;250	
1	513895.02	5403583.31	225	7,5	10
2	513488.73	5403273.51	225	5;7,5;20;25;37,5;50;75;100;250	10
3	514033.35	5403824.42	225	5;7,5;20;25;37,5;50;75;100;250	10
4	514043.04	5403815.31	225	7,5	
5	514052.00	5403823.20	225	7,5	
6	514063.81	5403836.25	225	7,5	
7	514054.12	5403846.99	225	7,5	10
8	514066.57	5403858.43	225	7,5	
9	514078.26	5403868.38	225	7,5	
10	514087.53	5403857.58	225	7,5	
11	514076.34	5403848.09	225	7,5	
12	514009.76	5403806.48	225	7,5	10
13	513989.92	5403786.68	225	7,5	10
14	513971.91	5403807.12	225	7,5	
15	513981.06	5403796.85	225	7,5	10
16	513953.34	5403825.98	225	7,5	10
17	513986.86	5403828.91	225	7,5	
18	513987.29	5403843.92	225	7,5	10
19	514005.34	5403844.35	225	7,5	
20	514003.10	5403859.58	225	7,5	10
21	514024.39	5403867.31	225	7,5	10
22	514051.58	5403894.49	225	7,5	10
23	513983.05	5403877.05	225	7,5	10
24	513980.23	5403890.92	225	7,5	10
25	513992.60	5403909.94	225	7,5	10
26	514026.86	5403945.37	225	7,5	10
27	514035.49	5403957.46	225	7,5	
28	514002.09	5403988.74	225	7,5	
29	513972.21	5403862.76	225	7,5	10
30	513960.51	5403851.05	225	7,5	10
31	513948.42	5403838.23	225	7,5	10
32	513968.17	5403877.33	225	7,5	10
33	513958.25	5403864.91	225	7,5	
34	513946.87	5403852.11	225	7,5	10
35	513934.71	5403837.83	225	7,5	
36	513935.18	5403823.72	225	7,5	10
37	513920.37	5403820.88	225	7,5	10
38	513923.10	5403804.06	225	7,5	
39	513904.15	5403789.87	225	7,5	
40	513920.66	5403776.36	225	7,5	10
41	513910.54	5403757.98	225	7,5	10

42	513930.12	5403754.03	225	7,5	
43	513922.61	5403731.76	225	7,5	
44	513945.40	5403726.96	225	7,5	10
45	513931.63	5403706.05	225	7,5	10
46	513950.26	5403703.34	225	7,5	
47	513932.42	5403682.31	225	7,5	10
48	513954.62	5403674.37	225	7,5	
49	513927.91	5403656.44	225	7,5	10
50	513942.96	5403645.13	225	7,5	10
51	513916.71	5403631.71	225	7,5	
52	513931.98	5403620.39	225	7,5	
53	513905.51	5403606.98	225	7,5	
54	513920.78	5403595.65	225	7,5	
55	513909.59	5403570.93	225	7,5	
56	513871.92	5403532.78	225	7,5	
57	513887.20	5403521.46	225	7,5	
58	513849.53	5403483.32	225	7,5	
59	513864.80	5403472.00	225	7,5	
60	513827.13	5403433.86	225	7,5	10
61	513842.41	5403422.54	225	7,5	
62	513804.74	5403384.40	225	7,5	
63	513782.35	5403334.93	225	7,5	
64	513786.42	5403298.88	225	7,5	
65	513807.31	5403286.00	225	7,5	
66	513748.76	5403260.74	225	7,5	
67	513715.17	5403186.55	225	7,5	10
68	513670.38	5403087.62	225	7,5	10
69	513614.39	5402963.97	225	7,5	10
70	513563.13	5402845.53	225	7,5	
71	513510.10	5402721.78	225	7,5	
72	513685.85	5403193.06	225	7,5	10
73	513661.10	5403203.67	225	7,5	10
74	513636.35	5403214.27	225	7,5	10
75	513613.37	5403226.65	225	7,5	10
76	513590.39	5403239.02	225	7,5	10
77	513567.41	5403251.40	225	7,5	10
78	513540.89	5403260.23	225	7,5	10
79	513510.84	5403265.54	225	7,5	10
80	513461.35	5403286.75	225	7,5	10
81	513438.36	5403299.12	225	7,5	10
82	513415.38	5403311.50	225	7,5	10
83	513390.63	5403322.11	225	7,5	10
84	513365.89	5403332.71	225	7,5	10
85	513344.67	5403346.85	225	7,5	10
86	513321.69	5403359.23	225	7,5	10
87	513279.27	5403387.51	225	7,5	10
88	513236.84	5403415.80	225	7,5	10
89	513196.18	5403445.85	225	7,5	10

90	513160.82	5403481.20	225	7,5	
91	513116.63	5403507.72	225	7,5	
92	513463.77	5403532.07	225	7,5	10
93	513483.50	5403476.99	225	7,5	10
94	514023.74	5403790.87	225	7,5	
95	514007.28	5403768.36	225	7,5	10
96	513962.10	5403697.86	225	7,5	10
97	513957.78	5403652.12	225	7,5	
98	513960.25	5403600.64	225	7,5	10
99	513882.91	5403713.98	225	7,5	10
100	513803.22	5403793.66	225	7,5	10
101	514009.49	5403928.24	225	7,5	10
102	513618.74	5403695.30	225	7,5	10
103	513581.33	5403732.71	225	7,5	10
104	513367.88	5403592.61	225	7,5	10
105	513724.12	5403872.76	225	7,5	10
106	513674.67	5403922.22	225	7,5	
107	513818.18	5404034.18	225	7,5	
108	513714.22	5404159.37	225	7,5	
109	514019.78	5403752.98	225	7,5	10

Tabelle A.33.: Alle Messorte ohne den Effekt von Bäumen im Stuttgarter Neckartor-Modell

Anhang B

Zusätzliche Abbildungen für die Grenzschichtauswertung

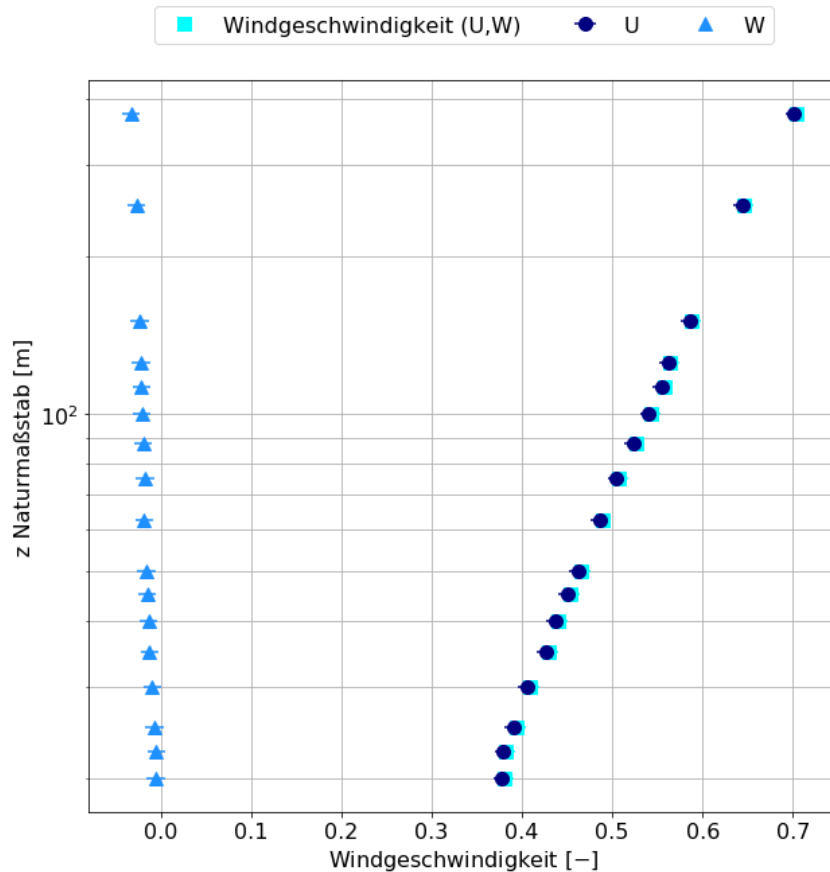


Abbildung B.1.: Logarithmische Darstellung der horizontalen Windkomponenten in der Grenzschicht vor dem Hamburg-Modell

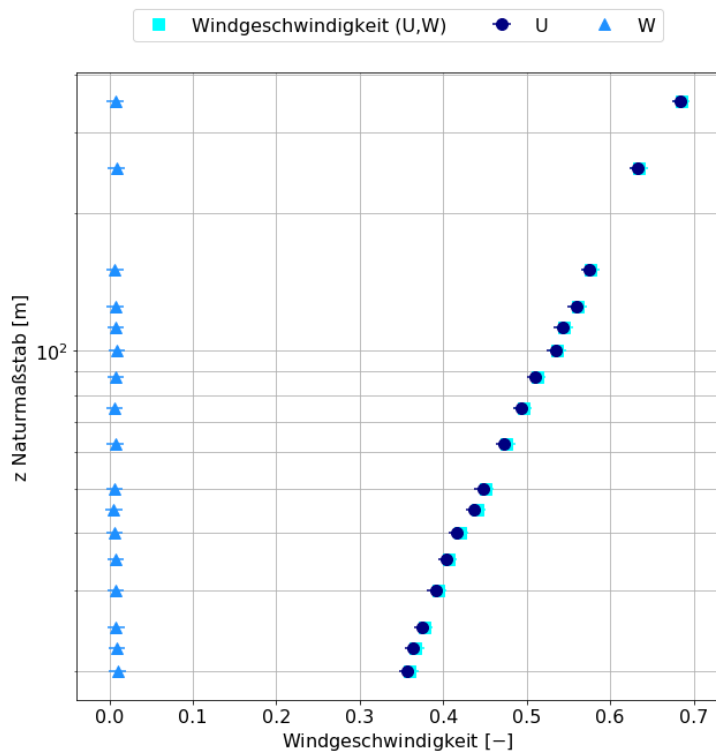


Abbildung B.2.: Logarithmische Darstellung der horizontalen Windkomponenten in der Grenzschicht vor dem Berlin-Modell

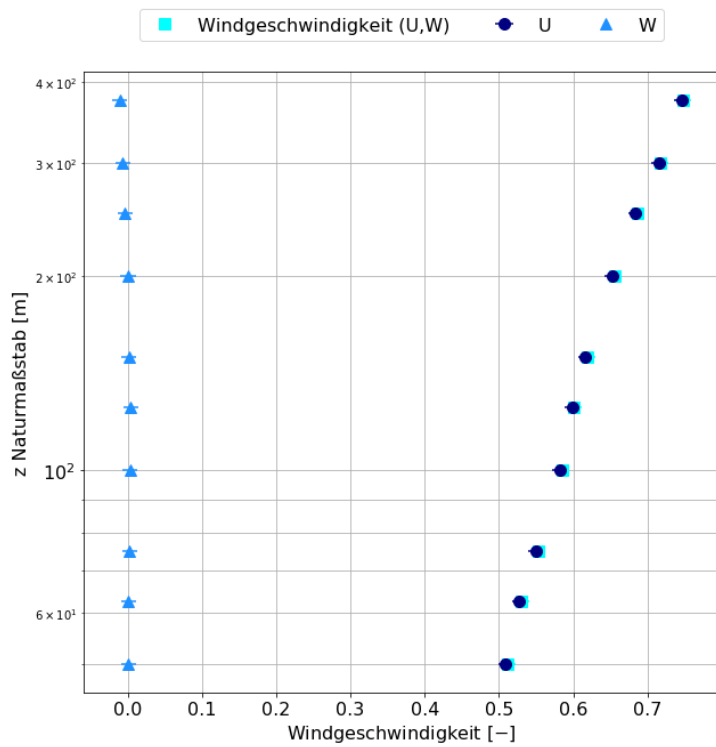


Abbildung B.3.: Logarithmische Darstellung der horizontalen Windkomponenten in der Grenzschicht vor dem Stuttgart-Modell

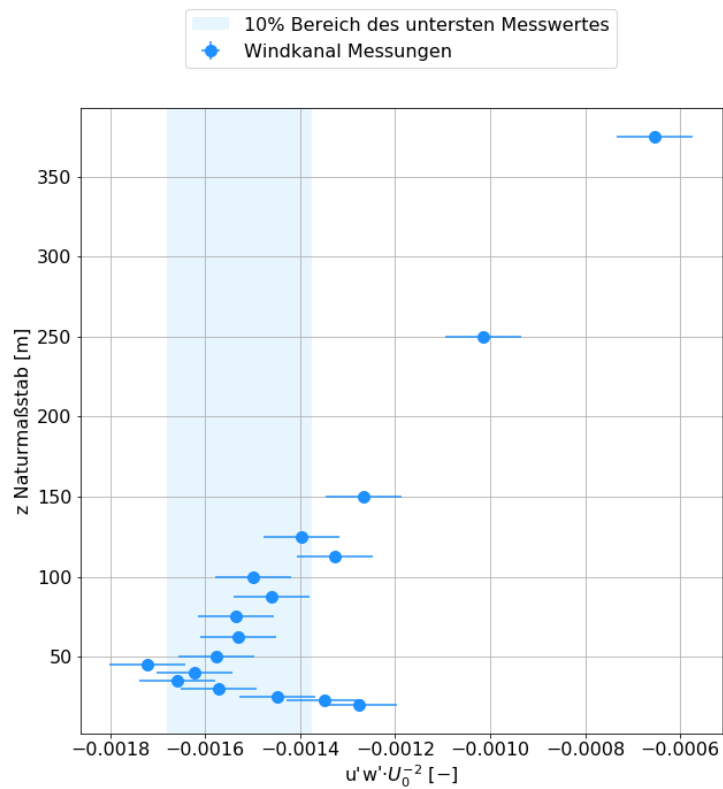


Abbildung B.4.: Turbulente Flüsse im Constant Flux Layer vor dem Hamburg-Modell

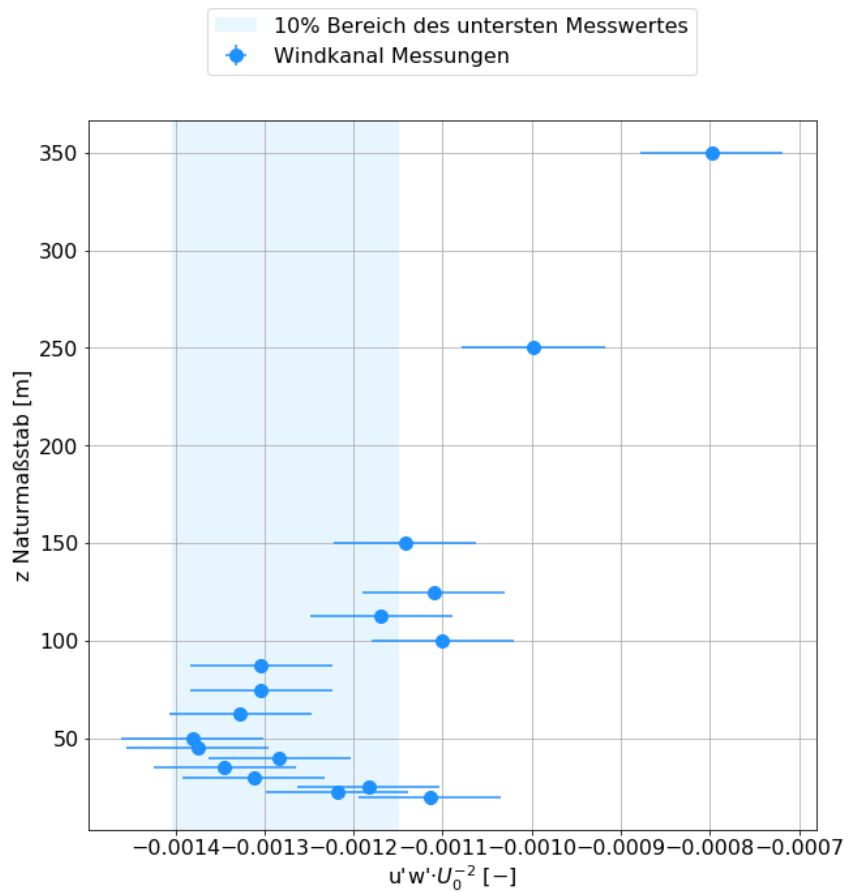


Abbildung B.5.: Turbulente Flüsse im Constant Flux Layer vor dem Berlin-Modell

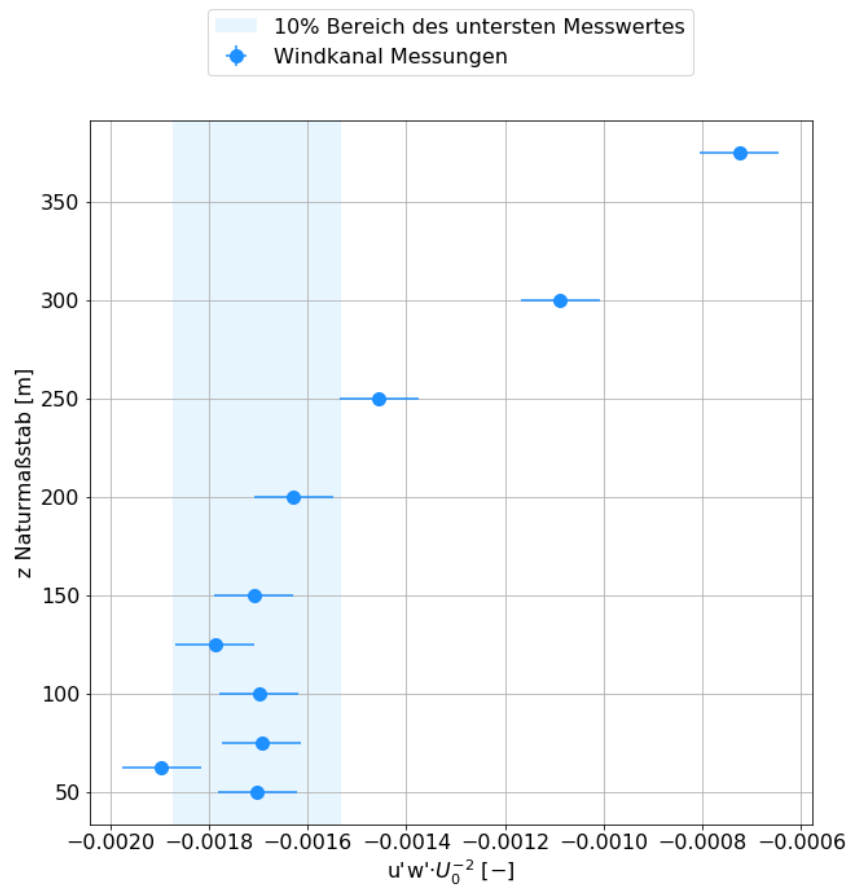


Abbildung B.6.: Turbulente Flüsse im Constant Flux Layer vor dem Stuttgart-Modell

Anhang C

Quellcode zur Böenanalyse

Folgendes Skript stellt den Quellcode für die Berechnung der Variationen für die Böenanalyse dar:

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Mon Apr 29 14:34:46 2019

@author: Kerstin Surm

Die Variationen:
"""
import numpy as np

def variationenboen(vari , mag_aver , t_aver , anzsec , singleall ):
    if vari == 1:
        outdata1=np.max(mag_aver)/np.mean(mag_aver)
        outdata2 = -1
        outdata3 = -1

    if vari == 2:
        n_rows_aver_2 = np.floor(t_aver[-1]/anzsec) #3 Sekunden!
        blocksize_2 = int(np.floor(np.size(t_aver)/n_rows_aver_2))
        if blocksize_2 == 0:
            outdata1=float('NaN')
        else:
            mag_vari2=np.zeros(int(np.size(t_aver)-blocksize_2))#

            #averaging gleitendes Mittel
            for ll in range(0,int(np.size(t_aver)-blocksize_2)):
```

```

        mag_vari2[ ll ]=np.mean(mag_aver[ ll : ll+blocksize_2 ])

        outdata1=np.max(mag_vari2)/np.mean(mag_aver)
        outdata2 = -1
        outdata3 = -1

    if vari == 3:
        testwert = np.max(mag_aver)-np.mean(mag_aver)
        if testwert >= 5:
            outdata1=np.max(mag_aver)/np.mean(mag_aver)
            outdata2=1
        else:
            outdata1=float('NaN')
            outdata2=0
        outdata3 = -1

    if vari == 4 or vari ==5:
        if vari == 5:
            n_rows_aver_2 = np.floor(t_aver[-1]/anzsec) #3 Sekunden!
            blocksize_2 = int(np.floor(np.size(t_aver)/n_rows_aver_2))
            if blocksize_2 != 0:
                mag_vari2=np.zeros(int(np.size(t_aver)-blocksize_2))#
                t_aver_2=np.zeros(int(np.size(t_aver)-blocksize_2))#
                #averaging gleitendes Mittel
                for ll in range(0,int(np.size(t_aver)-blocksize_2)):
                    mag_vari2[ ll ]=np.mean(mag_aver[ ll : ll+blocksize_2 ])
                    t_aver_2[ ll ]=np.mean(t_aver[ ll : ll+blocksize_2 ])
            if vari == 4:
                mag_vari2=mag_aver
                t_aver_2=t_aver
                blocksize_2 = 10
            if blocksize_2 ==0:
                outdata1=float('NaN')
                outdata2=-1
                outdata3=-1
            else:
                testwert = np.max(mag_vari2)-np.mean(mag_vari2)
                meanaver = np.mean(mag_vari2)
                if testwert >= 5:
                    holdvari1 = 0
                    singleoutdata=np.zeros(len(t_aver_2))#
                    singlecountoutdata=np.zeros(len(t_aver_2))#
                    for ll in range(0,len(t_aver_2)):

```

```

if mag_vari2[ll]-meanaver>=5 and holdvari1 == 0:
    if ll+1 == len(t_aver_2):
        timeval = t_aver_2[ll] - t_aver_2[ll-1]
        if timeval>3 and timeval < 20:
            singleoutdata[ll]=mag_vari2[ll]/ \
                np.mean(mag_vari2)
            singlecountoutdata[ll]=1
        else:
            if mag_vari2[ll+1] - meanaver < 5:
                timeval = t_aver_2[ll+1] - t_aver_2[ll]
                if timeval>3 and timeval < 20:
                    singleoutdata[ll]=mag_vari2[ll]/ \
                        np.mean(mag_vari2)
                    singlecountoutdata[ll]=1
                else:
                    holdvari1 = 1
                    timefirst = t_aver_2[ll]
                    firstll = ll
            elif mag_vari2[ll]-meanaver>=5 and holdvari1==1:
                if ll+1 == len(t_aver_2):
                    timeval=t_aver_2[ll]-t_aver_2[firstll-1]
                    holdvari1 = 0
                    if timeval>3 and timeval < 20:
                        singleoutdata[ll]=\
                            np.max(mag_vari2[firstll:ll])/ \
                            np.mean(mag_vari2)

                        singlecountoutdata[ll]=1
                    else:
                        if mag_vari2[ll+1] - meanaver < 5:
                            timeval = t_aver_2[ll+1]-timefirst
                            holdvari1 = 0
                            if timeval>3 and timeval < 20:
                                singleoutdata[ll]=\
                                    np.max(mag_vari2[firstll:ll])/ \
                                    np.mean(mag_vari2)

                                singlecountoutdata[ll]=1

#fuer die boxplots
if np.max(singleoutdata) == 0:
    outdata1=float('NaN')

```

```

        else:
            outdata1=np.max(singleoutdata)
            singleall.extend(singleoutdata[singleoutdata>0])
            outdata2=1
            outdata3=np.sum(singlecountoutdata)
    else:
        outdata1=float('NaN')
        outdata2=0
        outdata3=0
    if vari == 6:
        outdata1=(np.max(mag_aver)-np.mean(mag_aver))/np.std(mag_aver)
        outdata2 = -1
        outdata3 = -1
    return outdata1, outdata2, outdata3, singleall

```

Weitere Anpassungen mussten speziell für die Variante 5 vorgenommen werden:

```

testwert = np.max(mag_vari2)-np.mean(mag_vari2)
meanaver = np.mean(mag_vari2)
if testwert >= 5:
    holdvari1 = 0
    singleoutdata=np.zeros(len(t_aver_2))#
    singlecountoutdata=np.zeros(len(t_aver_2))#
    for ll in range(0,len(t_aver_2)):
        if mag_vari2[ll] - meanaver >= 5 and holdvari1 == 0 :
            if ll+1 == len(t_aver_2):
                timeval = t_aver_2[ll] - t_aver_2[ll-1]
                if timeval>3 and timeval < 20:
                    singleoutdata[ll]=mag_vari2[ll]/ \
                        np.mean(mag_vari2)
                    singlecountoutdata[ll]=1
            else:
                if mag_vari2[ll+1] - meanaver < 5:
                    timeval = t_aver_2[ll+1] - t_aver_2[ll]
                    if timeval>3 and timeval < 20:
                        singleoutdata[ll]=mag_vari2[ll]/ \
                            np.mean(mag_vari2)
                        singlecountoutdata[ll]=1
                else:
                    holdvari1 = 1
                    timefirst = t_aver_2[ll]
                    firstll = ll
    elif mag_vari2[ll] - meanaver >= 5 and holdvari1 == 1:
        if ll+1 == len(t_aver_2):
            timeval = t_aver_2[ll] - t_aver_2[firstll-1]
            holdvari1 = 0
            if timeval>3 and timeval < 20:
                singleoutdata[ll]= \

```

```

        np.max(mag_vari2[first11:11])/ \
        np.mean(mag_vari2)

        singlecountoutdata[11]=1
    else:
        if mag_vari2[11+1] - meanaver < 5:
            timeval = t_aver_2[11+1] - timefirst
            holdvari1 = 0
            if timeval>3 and timeval < 20:
                singleoutdata[11]= \
                np.max(mag_vari2[first11:11])/ \
                np.mean(mag_vari2)

                singlecountoutdata[11]=1
        if np.max(singleoutdata) == 0:
            outdata1[kk]=0
        else:
            outdata1[kk]=np.max(singleoutdata)
        singleall.extend(singleoutdata[singleoutdata>0])
        outdata2[kk]=1
        outdata3[kk]=np.sum(singlecountoutdata)
    else:
        outdata1[kk]=0
        outdata2[kk]=0
        outdata3[kk]=0

```

Anhang D

Zusätzliche Abbildungen für die Böenanalyse

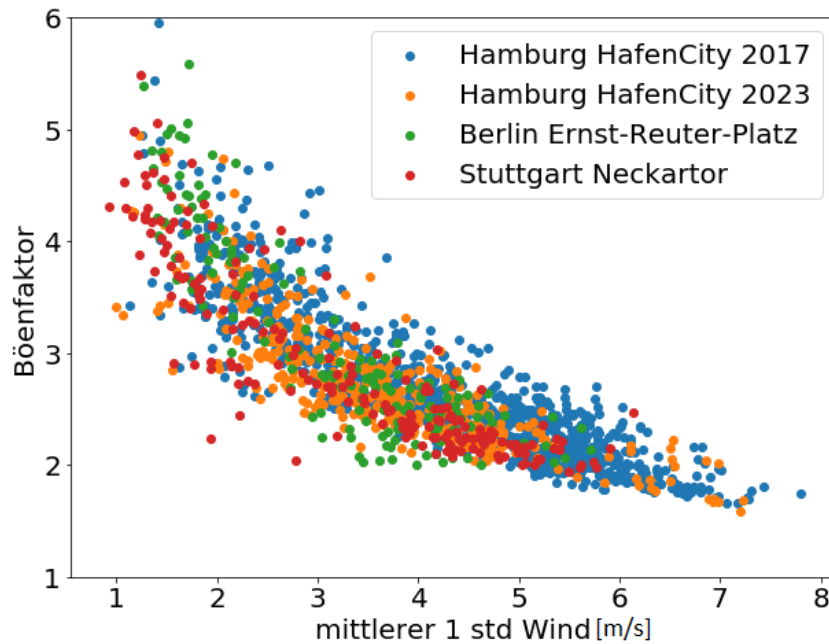


Abbildung D.1.: Böenfaktor als Funktion des mittleren 1-Std-Horizontalwindes. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg Hafen-City Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor

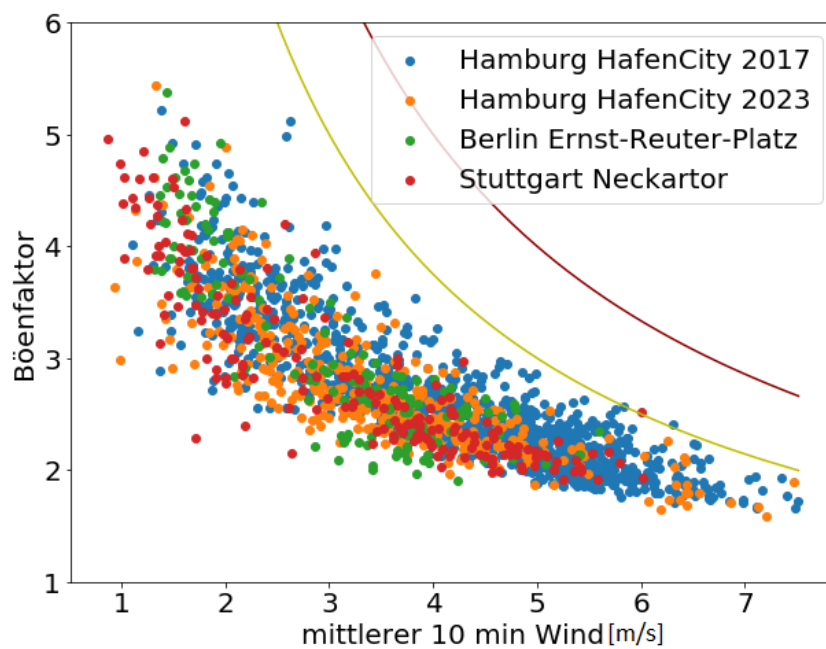


Abbildung D.2.: Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor; Grenzgeschwindigkeit für 15 m/s als gelbe Linie und für 20 m/s als dunkelrote Linie

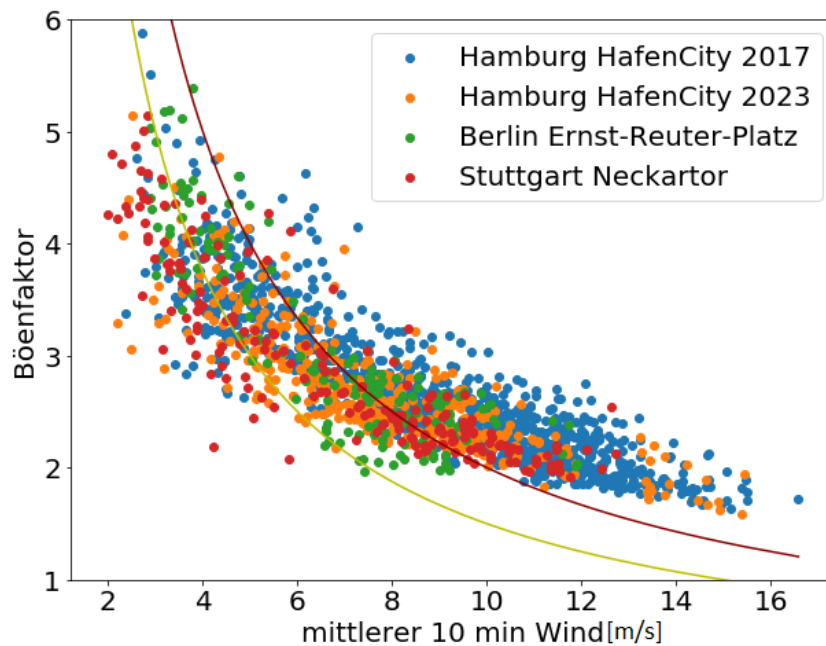


Abbildung D.3.: Böenfaktor als Funktion des mittleren 10-min-Horizontalwindes für alle Höhen ≤ 10 m und eine Windgeschwindigkeit von 17 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor; Grenzgeschwindigkeit für 15 m/s als gelbe Linie und für 20 m/s als dunkelrote Linie

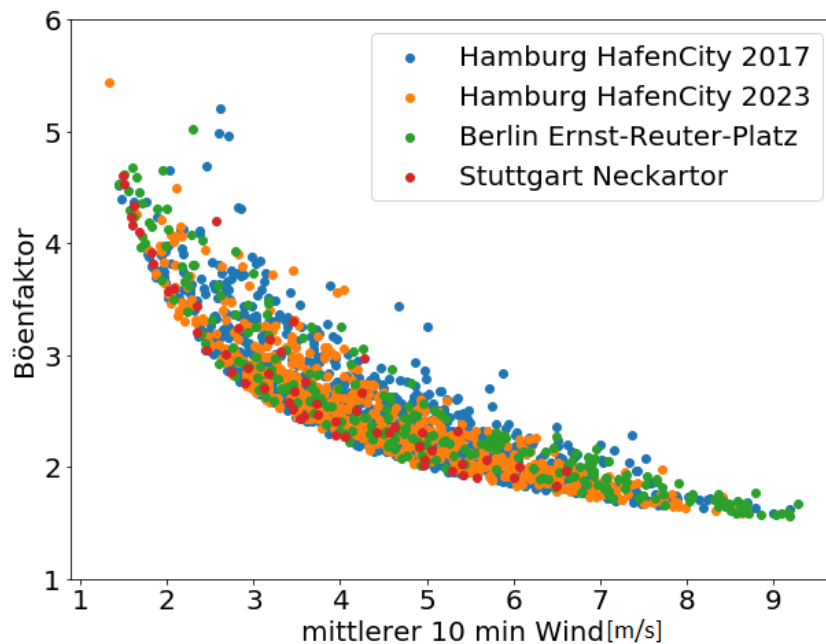


Abbildung D.4.: Böen gemäß der Definition des DWDs gegenüber dem mittleren 10-min-Wind. Blau: Hamburg HafenCity Bebauungszustand 2017; Gelb: Hamburg HafenCity Bebauungszustand von 2023; Grün: Berlin Ernst-Reuter-Platz; Rot: Stuttgart Neckartor

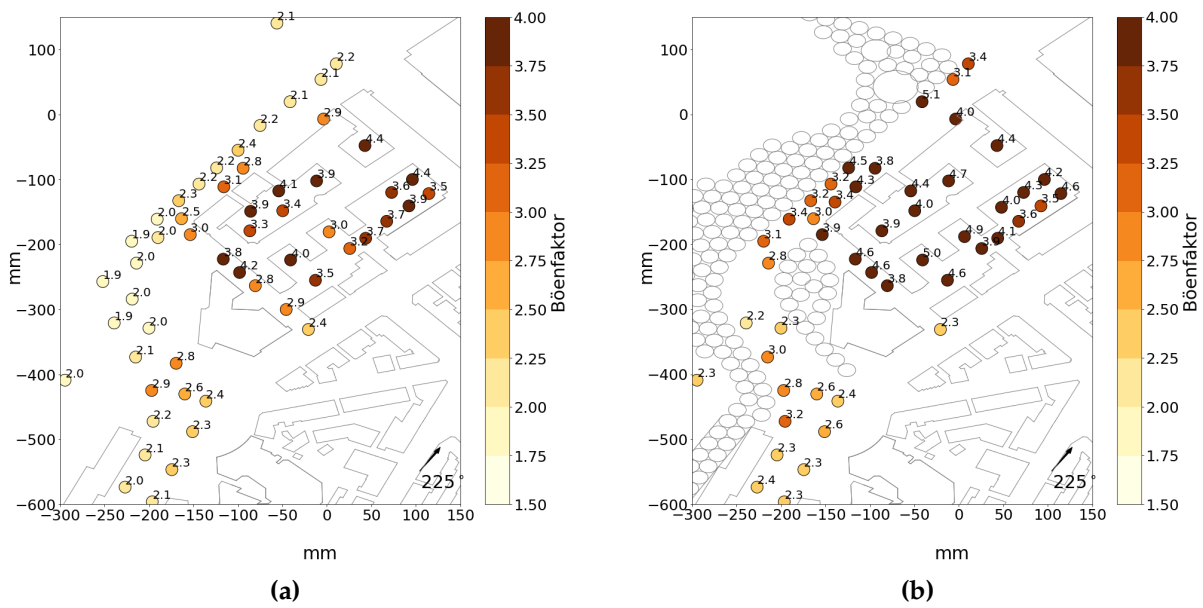


Abbildung D.5.: Böenfaktor a) ohne den Effekt von Bäumen und b) mit dem Effekt von Bäumen für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s

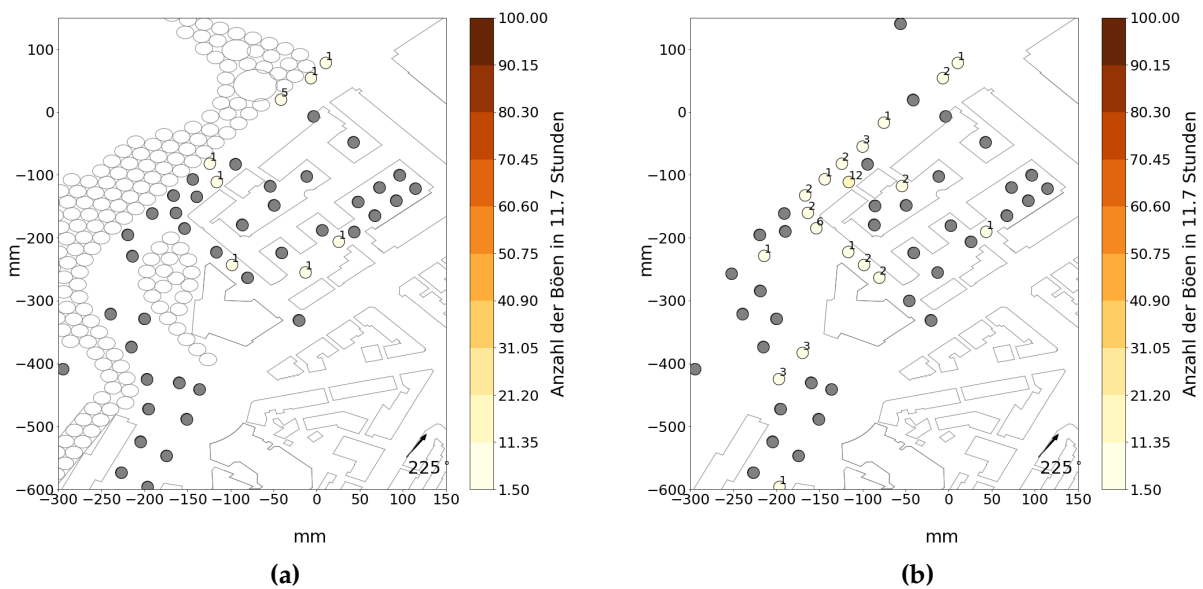


Abbildung D.6.: Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs a) ohne den Effekt von Bäumen und b) mit dem Effekt von Bäumen für eine Anströmwindgeschwindigkeit von 8 m/s

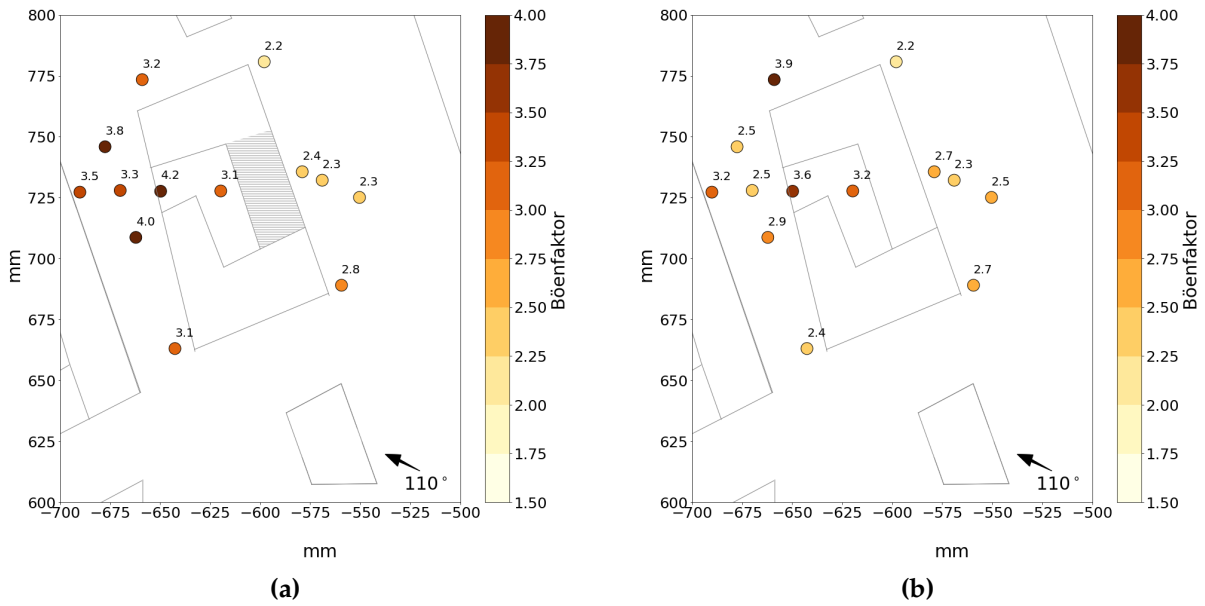


Abbildung D.7.: Böenfaktor a) für den Fall mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung

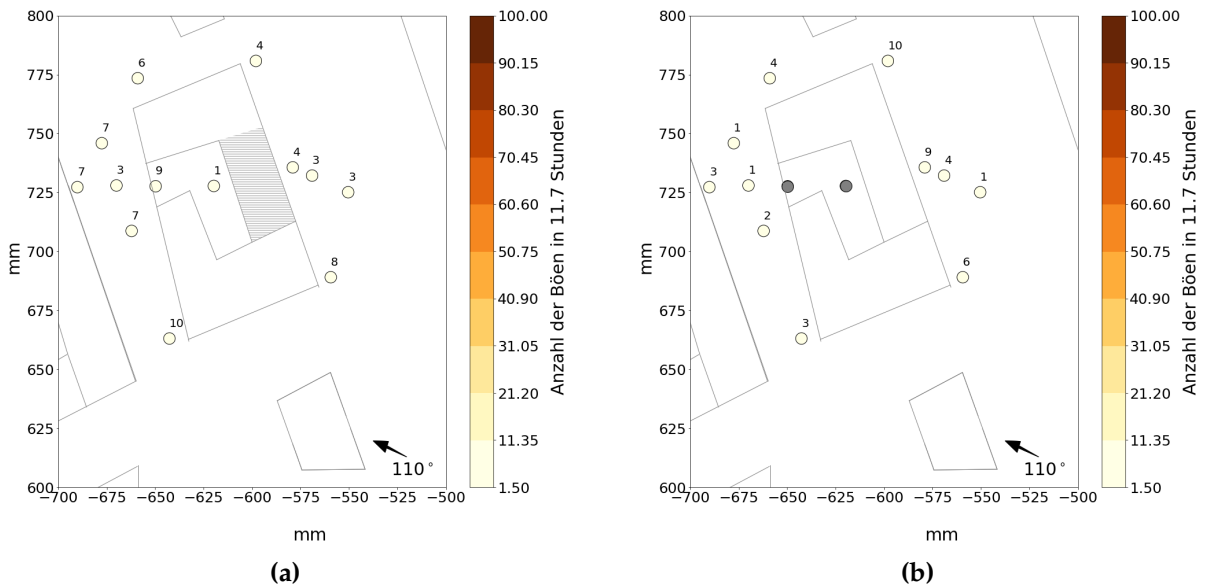


Abbildung D.8.: Häufigkeit der Böen nach der Definition des DWDs a) für den Fall mit Gebäudedurchbruch (grau markierter Bereich) und b) ohne Gebäudedurchbruch für eine Windgeschwindigkeit von 8 m/s in 50 m Höhe in der Anströmung

Anhang E

Zusätzliche Abbildungen für die Analyse der verkehrserzeugten Immissionen

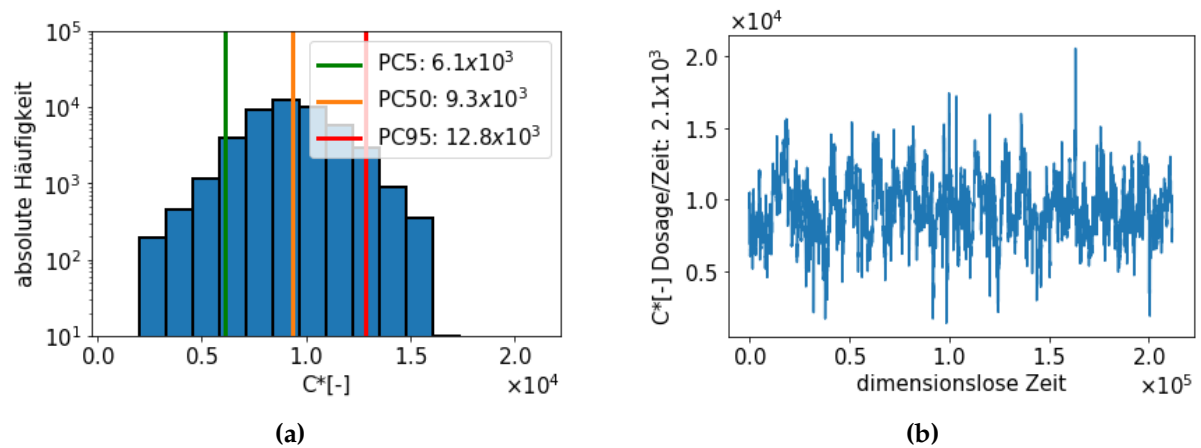
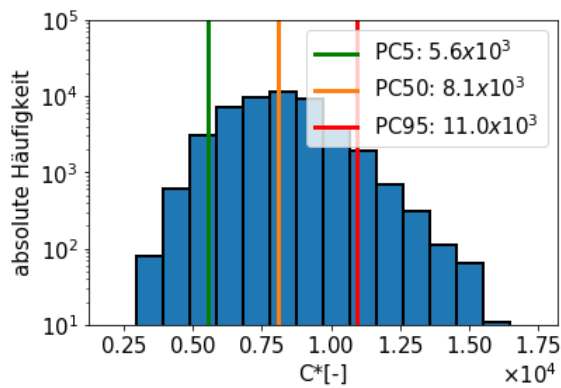
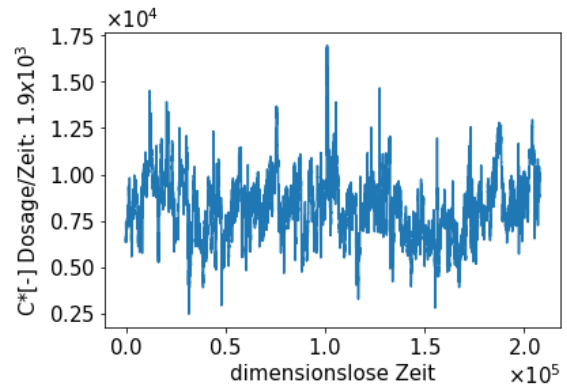


Abbildung E.1.: Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Kantstraße am Messort TU-150m

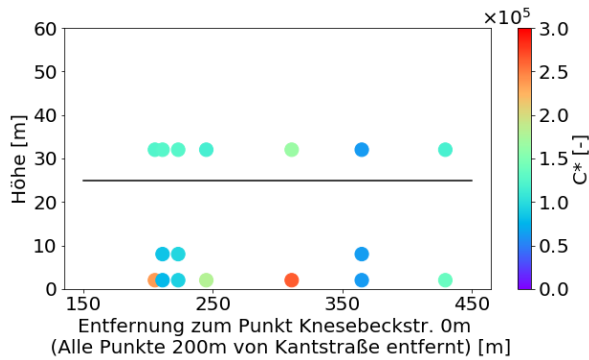


(a)

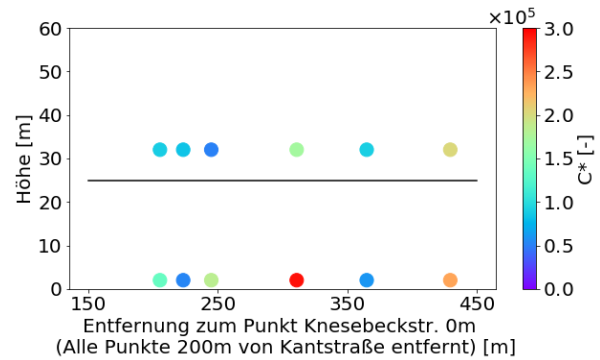


(b)

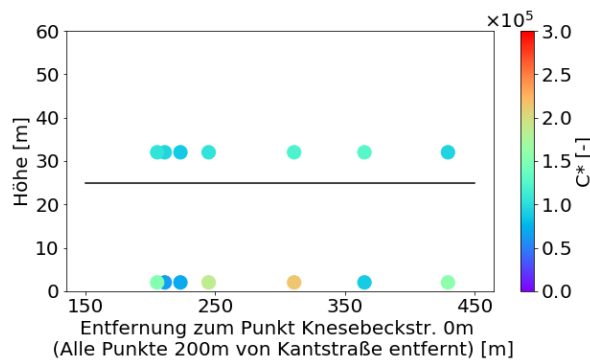
Abbildung E.2.: Häufigkeitsverteilung und zeitlicher Verlauf der Konzentrationen für die Linienquelle Kantstraße am Messort TU-250m



(a) 185°



(b) 200°



(c) 215°

Abbildung E.3.: 95. Perzentil der Konzentrationen in 200 m Entfernung zur Hauptverkehrsstraße für die Windrichtungen a) 185°, b) 200° und c) 215°. Die schwarze Linie zeigt die mittlere Gebäudehöhe.

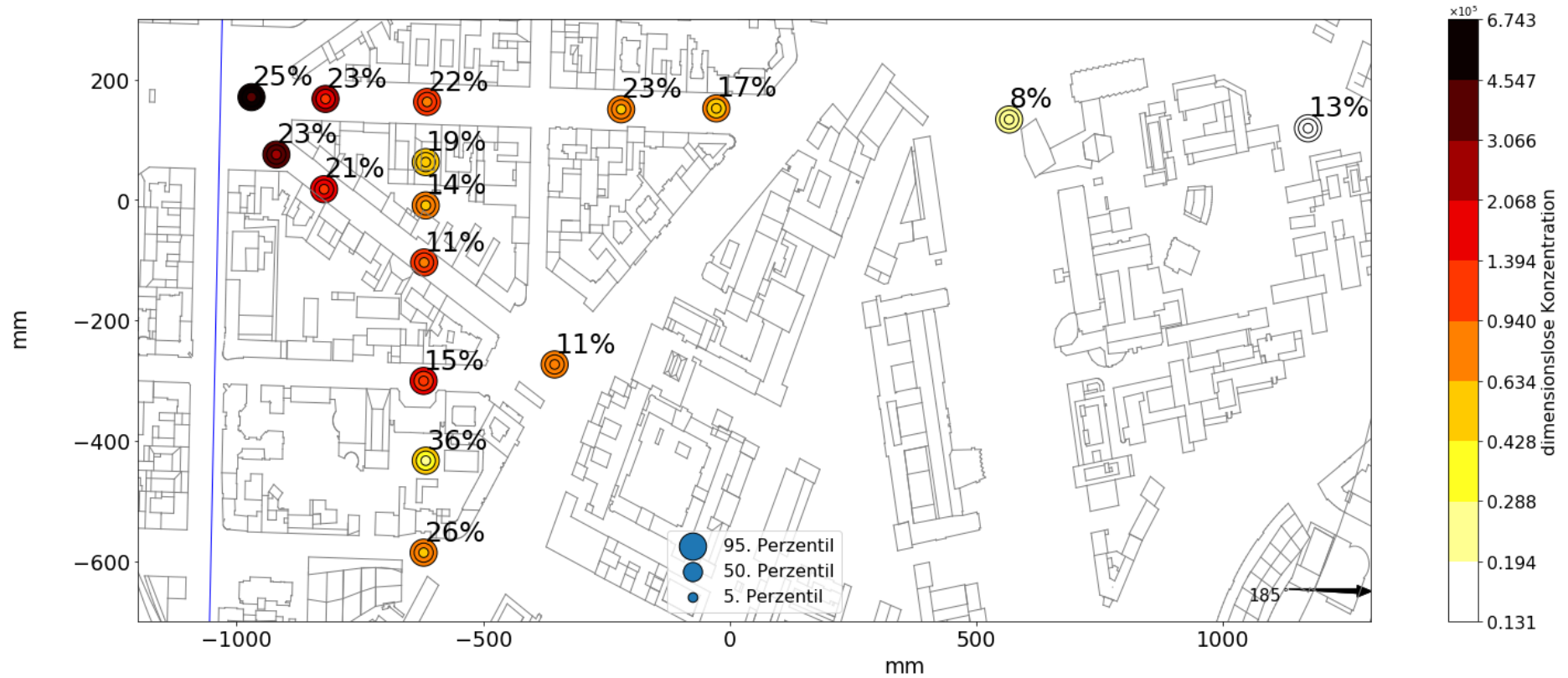


Abbildung E.4.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 30 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 2 m Höhe für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

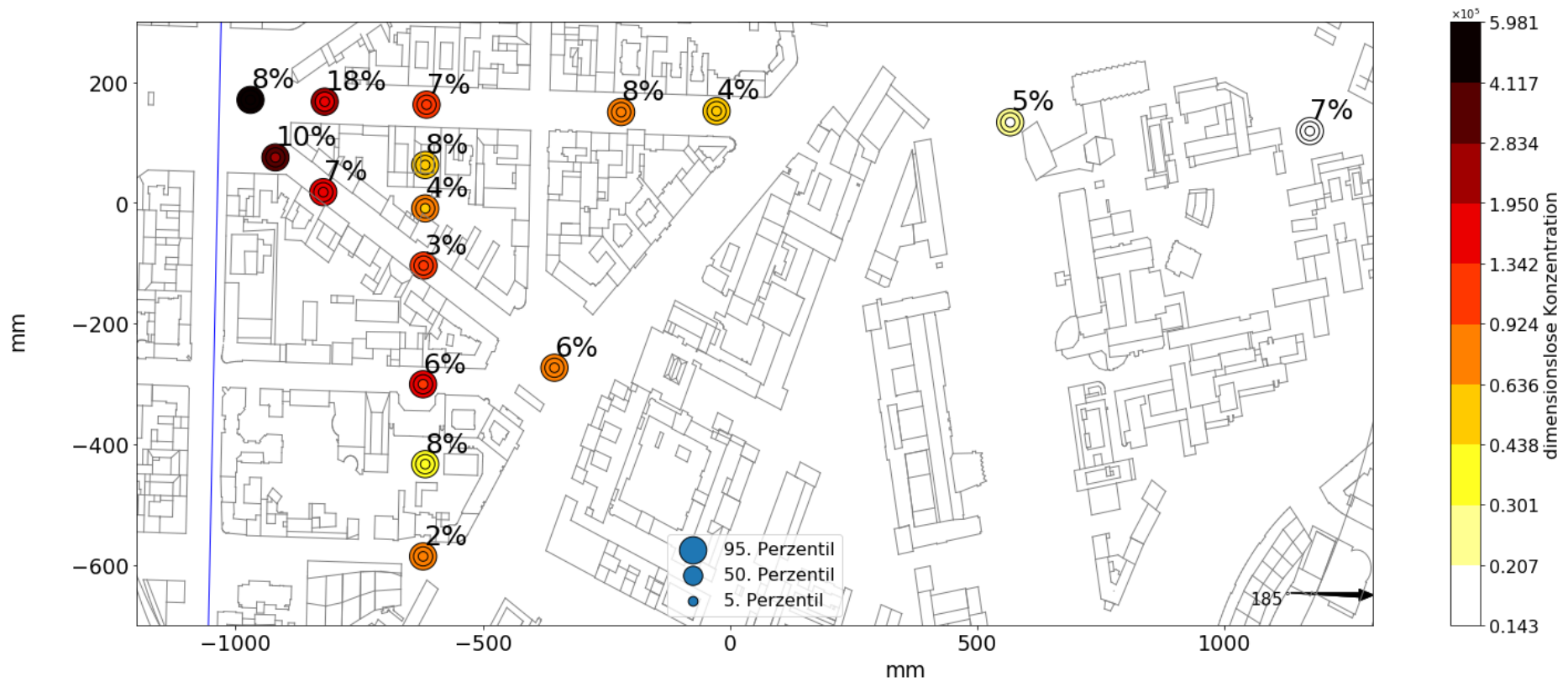


Abbildung E.5.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 120 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 2 m Höhe für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

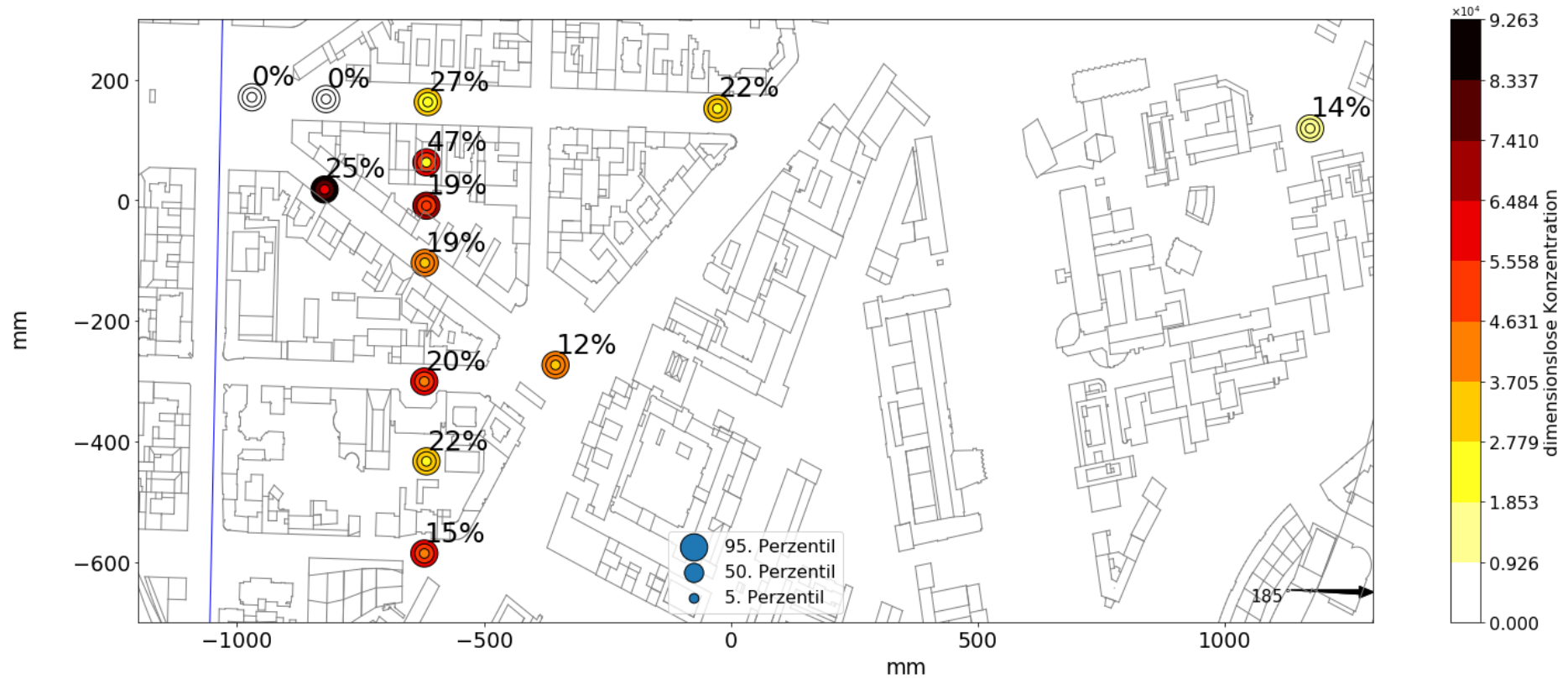


Abbildung E.6.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 30 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 32 m Höhe für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

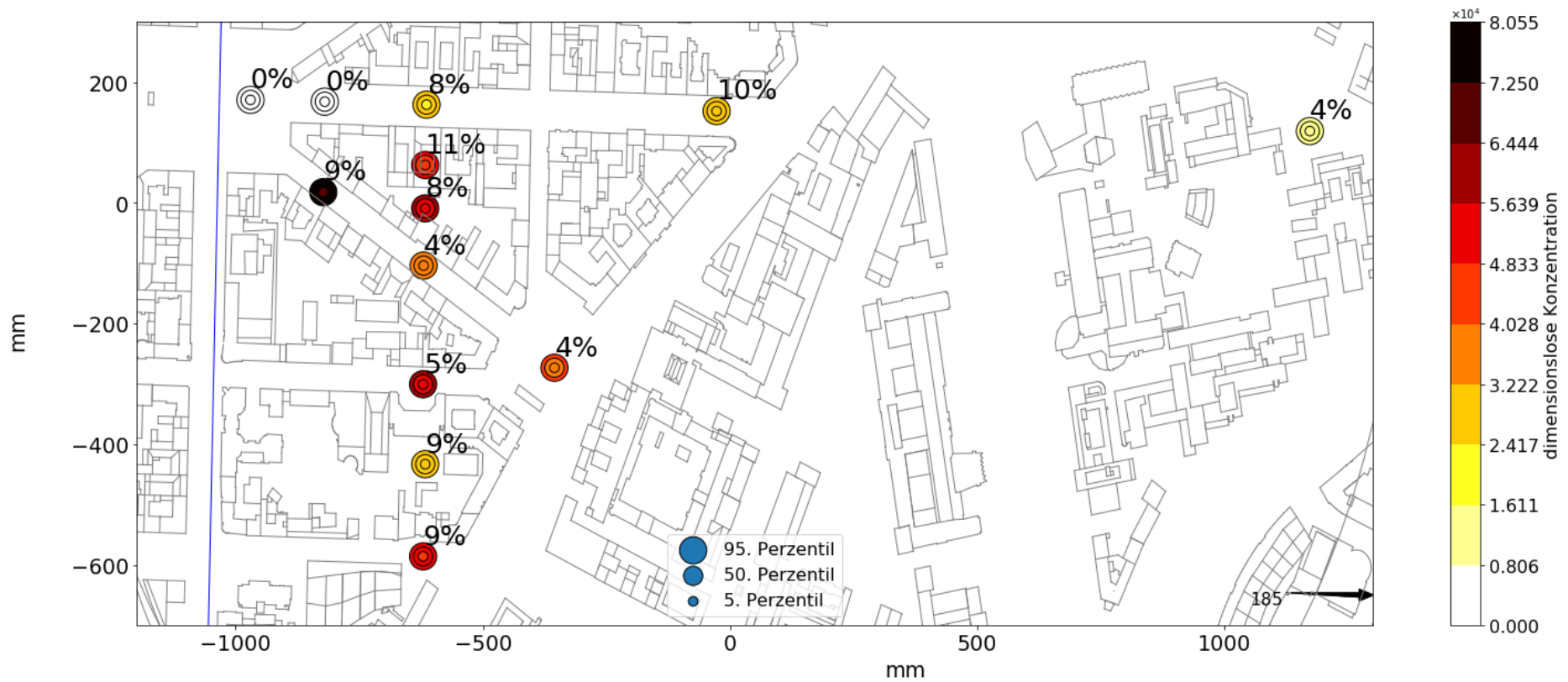


Abbildung E.7.: 5., 50. und 95. Perzentil der Konzentrationen über 120 Minuten gemittelt für die Messpunkte in 32 m Höhe für eine Windrichtung von 185°. Zusätzlich ist die maximale prozentuale Abweichung des 5. bzw. 95. Perzentils vom 50. Perzentil dargestellt.

Danksagung

Besonders möchte ich mich bei Prof. Dr. Bernd Leitl für seine umfassende Betreuung und sein mir entgegengebrachtes Vertrauen bedanken. Ebenso gilt mein Dank Dr. Frank Harms für seine vielen geduldigen Erklärungen, Hilfestellungen und Aufmunterungen.

Der gesamten EWTL-Arbeitsgruppe und vor allem den studentischen Hilfskräften möchte ich für die Unterstützungen, Anregungen und Ablenkungen danken. Dabei gilt mein Dank besonders Rike Wachsmann und Helen Stricker für die vielen gemeinsamen Gespräche vor allem in der Endphase dieser Arbeit. Genauso möchte ich mich bei Paula Kock für die vielen Ideen beim Auswerten und fürs Korrekturlesen bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Kristin Drose, Julia Sieland, Christina Littkemann, Leonie von Lochow, Sabine Ehrenreich und meinem Vater fürs Korrekturlesen. Zusätzlich möchte ich mich bei Christina Littkemann und meinem Mann Henrik Surm für ihre Aufmunterungen und Unterstützung innerhalb der letzten 4 Jahre bedanken.

Den Komiteemitgliedern danke ich für ihre Zeit und Mühe bei der Beurteilung dieser Arbeit.

Die Arbeit wurde im Rahmen des Projektes „Stadtklima im Wandel“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziell gefördert.

Eidesstattliche Versicherung |

Declaration of 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 upon oath that I have written the present dissertation independently and have not used further resources and aids than those stated.

Ort,den | City,date

Unterschrift | Signature