

Forschungsbericht FZKA-BWPLUS

Bereitstellung systematischer Vergleichsdaten für die  
Entwicklung und Validierung  
numerischer Geruchsausbreitungsmodelle  
Windkanalversuche im Verbundprojekt  
"Geruchsfreisetzung und –ausbreitung"

B. Leitl, S. Aubrun, M. Schatzmann  
Meteorologisches Institut der Universität Hamburg

Förderkennzeichen: BWE 20001

Die Arbeiten des Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung werden mit Mitteln des  
Landes Baden-Württemberg gefördert

Juli 2002

## **Bereitstellung systematischer Vergleichsdaten für die Entwicklung und Validierung numerischer Geruchsausbreitungsmodelle - Windkanalversuche**

B. Leidl, S. Aubrun, M. Schatzmann  
Meteorologisches Institut der Universität Hamburg

### **Zusammenfassung**

Die in der Praxis verwendeten Modelle und Verfahren zur Prognose und Bewertung von Geruchsimmissionen können bislang nur unzureichend überprüft und validiert werden, da qualitativ abgesicherte Vergleichs- und Referenzdatensätze noch nicht in ausreichendem Umfang zur Verfügung stehen. Im BWPlus-Verbundprojekt "Geruchsfreisetzung und -ausbreitung" wurden erstmals unter Einbeziehung aller zur Verfügung stehenden Methoden und Analyseverfahren qualitativ abgesicherte und vollständig dokumentierte Referenzdatensätze aus Feldmessungen, olfaktometrischen Untersuchungen und systematischen Laboruntersuchungen im Grenzschichtwindkanal erstellt. Den im Windkanallabor des Meteorologischen Institutes der Universität Hamburg durchgeführten Laboruntersuchungen kommt eine besondere Bedeutung im Rahmen der Erzeugung von Referenzdatensätzen zu. Windkanalexperimente stellen noch immer das einzige qualitativ abgesicherte Modellverfahren dar, mit dessen Hilfe die in ihrer Aussagefähigkeit eingeschränkten, stichprobenartigen Feldmessungen um die für Validierungszwecke erforderlichen systematischen Untersuchungen ergänzt werden können. Die im Grenzschichtwindkanal gewonnenen Ergebnisse ermöglichen die Bewertung der Repräsentativität der im Projektverbund realisierten Feldversuche. Sie stellen auf diese Weise die für zuverlässige Modellvergleiche zwingend erforderliche Verbindung zwischen der von numerischen Modellen üblicherweise berechneten stationären Geruchsstoffkonzentration und den Ergebnissen von nur episodisch durchgeführten Feldmessungen (Begehungen, Tracereperimente) her.

Auf der Grundlage der im Grenzschichtwindkanal durchgeführten Modellversuche wurden vollständige Vergleichsdatensätze erstellt, mit denen die Zuverlässigkeit numerischer Geruchsausbreitungsmodelle untersucht und das physikalisch korrekte Modellverhalten grundlegend bewertet werden kann. Alle zur physikalisch eindeutigen Charakterisierung der Ausbreitungssituation erforderlichen Randbedingungen wurden im Windkanalversuch mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung gemessen. Sie stehen als Eingabedaten für Modellrechnungen direkt zur Verfügung, so dass auf den Modellvergleich möglicherweise verfälschende Annahmen verzichtet werden kann. Mit Abschluss des Projektes steht ein in Umfang, Vollständigkeit und Qualität bisher einmaliger Referenzdatensatz für die Geruchsausbreitungsmodellierung zur Verfügung.

# **Generation of Systematic Reference Data for Development and Validation of Numerical Odour Dispersion Models - Wind Tunnel Tests**

B. Leidl, S. Aubrun, M. Schatzmann  
Meteorological Institute at Hamburg University

## **Summary**

Within the scope of the cooperative research project BWE20001-4 "Odor Release and Odor Dispersion" an extensive and complete reference data set for model validation purposes has been compiled from both, field data and systematic wind tunnel experiments. The experiments have been carried out around a pig barn located in topographically structured terrain. The accuracy and reliability of offline odor analysis has been studied and odor source strength measurements were carried out during several field campaigns. In addition, extensive wind tunnel measurements on a 1:400 scaled model of the pig barn have been carried out in the small boundary layer wind tunnel of the Meteorological Institute at Hamburg University. After setup and evaluation of a properly modeled boundary layer flow in the test section of the wind tunnel, systematic dispersion experiments were carried out. Altogether, 4 extensive reference data sets were compiled from wind tunnel measurements. The laboratory data sets significantly enhance the field data by providing information on the representativeness of the field data. In addition, the wind tunnel results extend the limited amount of field dispersion experiments by a variety of systematic test cases.

The report describes the basic principles used for modeling an atmospheric boundary layer in the test section of a boundary layer wind tunnel. A short overview of the instrumentation used as well as the measurement strategies applied is given. The main results of the systematic wind tunnel testing are documented and discussed. The wind tunnel results are used to determine the representativeness of the field data. Furthermore, the link between the mean and fluctuating properties of the concentration field inside the odor plumes can be established, based on the high resolution time series of concentration fluctuations captured in the wind tunnel. The information derived from the wind tunnel experiments is substantial for the validation of numerical odor dispersion models. Boundary conditions used as input for standard odor dispersion models were varied in a systematic way. The result is an extensive set of reference data which is unique with respect to completeness and quality of the data provided.

# Inhalt

Zusammenfassung .....	I
Summary .....	II
1. Einleitung.....	1
2 Aufgabenstellung und Projektrahmen.....	2
3 Modell- und Versuchstechnik .....	3
3.1 Das Windkanalmodell .....	3
3.1 Der verwendete Grenzschichtwindkanal .....	5
3.2 Versuchsaufbau und Messtechnik .....	5
4. Mess- und Auswertekonzept .....	11
5 Ergebnisse .....	15
5.1 Dokumentation der Modellgrenzschicht.....	15
5.2 Visualisierung der Geruchsfahnenausbreitung .....	19
5.3 Vorversuche zur Ausbreitungsmodellierung und Vergleichsexperiment .....	22
5.4 Systematische Ausbreitungsmessungen .....	26
5.5 Datenaufbereitung und Publikation der Referenzdatensätze im Internet.....	36
6 Zusammenfassung.....	37
7 Literatur .....	37

# 1. Einleitung

Zur Modellierung von Schadstoffausbreitungsvorgängen in den bodennahen Luftschichten der Atmosphäre werden zunehmend numerische Strömungs- und Transportmodelle verwendet. Die Programmsysteme unterliegen einer ständigen Weiterentwicklung und werden mit steigender verfügbarer Rechenleistung zunehmend komplexer. Obwohl sich gerade in den letzten Jahren die zur Verfügung stehende Computerkapazität vervielfacht hat und neue, physikalisch anspruchsvolle Ausbreitungsmodelle entwickelt wurden, gelingt es jedoch noch immer nicht, für die Geruchsbelästigung wesentliche Phänomene wie zum Beispiel das Zeitverhalten der Geruchsstoffkonzentration in einer Geruchsfahne und deren Beeinflussung durch Bebauung und Bewuchs, mit ausreichender Genauigkeit und vertretbarem Aufwand in einem numerischen Modell abzubilden. Die in der Praxis verwendeten Modelle und Prognoseverfahren liefern zum Teil deutlich unterschiedliche Ergebnisse und erschweren so die Prognose und Bewertung von Geruchsimmissionen nach einheitlichen Kriterien.

Um die zur Verfügung stehenden Modelle und Algorithmen verbessern bzw. bezüglich ihrer Prognosegenauigkeit testen zu können, sind vollständige, qualitativ abgesicherte Vergleichs- bzw. Referenzdatensätze erforderlich, die bisher nicht zur Verfügung standen. Die üblicherweise zum Test von Geruchsausbreitungsmodellen verwendeten Ergebnisse von Fahnenbegehungen sind für die Modellvalidierung nicht geeignet. Ergebnisse von Geruchsbegehungen und Tracerexperimenten in der Natur haben grundsätzlich Strichprobencharakter und können die Komplexität bzw. die Bandbreite der möglichen Immissionssituationen für einen Ausbreitungsfall nur bedingt abbilden. Der z.B. durch den meteorologischen Tagesgang und Schwankungen im Geruchsemissionsstrom verursachte Wechsel in den Ausbreitungsrandbedingungen führt zu Streuungen in den Naturergebnissen. Ein weiteres Defizit von Begehungsdaten für Validierungszwecke ist im nur unzureichend verstandenen, empirischen Zusammenhang zwischen Geruchsstoffkonzentration und Geruchswahrnehmung oder Geruchserkennung zu sehen. Obwohl der subjektive Vorgang der Geruchswahrnehmung die Bewertung von Geruchsausbreitungsproblemen in der Praxis entscheidend beeinflusst, darf dieser nicht in die Validierung von Strömungs- und Ausbreitungsmodellen einbezogen werden, wenn die Qualität der Ausbreitungsmodellierung getestet werden soll.

Die für die Validierung des Strömungs- bzw. Ausbreitungsteils eines Geruchsausbreitungsmodells erforderlichen, statistisch repräsentativen Vergleichsdatensätze können in abgesicherter Qualität bisher nur durch systematische Untersuchungen in einem Grenzschichtwindkanal bereitgestellt werden. Im Modellversuch können die den Ausbreitungsvorgang bestimmenden Randbedingungen wie zum Beispiel Windprofil und Turbulenzeigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht oder die Freisetzungsbedingungen eines Tracers, der den Geruchsstoff im Modellversuch abbildet, gezielt eingestellt, systematisch variiert und über beliebig lange Versuchszeiträume konstant gehalten werden. Alle wesentlichen, die Dynamik des Transports von Geruchsstoffen bestimmenden Randbedingungen werden im Windkanalversuch mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfasst und mit bekannter Genauigkeit dokumentiert. Als Ergebnis der Modellversuche entstehen Vergleichsdatensätze, die alle für Testrechnungen mit numerischen Modellen erforderlichen Eingangsgrößen beinhalten. Da das Windkanalexperiment unter anderem die von numerischen Modellen üblicherweise berechneten statistischen Mittelwerte der Ausbreitungskenngrößen

liefert, können Windkanaldaten direkt und ohne den Vergleich verfälschende zusätzliche Annahmen den Ergebnissen einer Modellrechnung gegenübergestellt werden.

Am Beispiel einer existierenden Stallanlage wurden im Verbundprojekt "Geruchsfreisetzung und –ausbreitung" die Möglichkeiten und Grenzen der in der Praxis üblichen Mess- und Bewertungsverfahren dokumentiert und für die Modellvalidierung geeignete Referenzdatensätze erzeugt. Der Abschlußbericht gibt einen Überblick über die im Verbundprojekt BWE20001 im kleinen Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg durchgeführten Experimente und stellt die im Windkanal gewonnenen Validierungsdaten vor. Die für die Ausbreitungsexperimente verwendete Modell- und Versuchstechnik, das Messkonzept und die wesentlichen Ergebnisgrößen werden vorgestellt. Es folgt eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse.

## 2 Aufgabenstellung und Projektrahmen

Die durchzuführenden systematischen Untersuchungen im Grenzschichtwindkanal gliedern sich in drei wesentliche Arbeitsabschnitte:

- Modellbau, Anpassung der Modellgrenzschicht und Validierungsexperiment für den im Verbundprojekt untersuchten Praxisstall
- Untersuchung zur Geruchsstoffausbreitung am Modell des Praxisstalls für systematisch variierte Ausbreitungsrandbedingungen
- Aufbereitung der Versuchsergebnisse, Quantifizierung systematischer Zusammenhänge und Publikation der Testfälle als vollständig dokumentierter Referenzdatensatz

Entsprechend dem im Verbundprojekt definierten Zeitplan war in der ersten Projektphase zunächst ein Modell des Praxisstalls aufzubauen und eine auf die Verhältnisse am Stall abgestimmte Modellgrenzschicht zu erzeugen. Die Güte der Grenzschichtmodellierung wurde durch den Vergleich mit Vorgabewerten aus der Natur dokumentiert. In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurden Vorversuche zur Ausbreitungsmodellierung am Stallmodell durchgeführt. Durch einen direkten Vergleich der Windkanalergebnisse mit den Ergebnissen der im Projektverbund durch das Ingenieurbüro Lohmeyer durchgeführten Tracergasexperimente in der Natur konnte die Eignung des Windkanalmodells für die Erzeugung von qualitativ abgesicherten Validierungsdatensätzen nachgewiesen werden. Zusätzlich wurde im Sinne eines besseren Verständnisses der Geruchsstoffausbreitung im Nahfeld der untersuchten Stallanlage die Ausbreitung der Geruchsfahne mit Hilfe von Rauchversuchen und Laser-Lichtschnittvisualisierungen im Windkanal sichtbar gemacht und dokumentiert.

Im Rahmen der systematischen Modellversuche wurden verschiedene Ausbreitungssituationen für eine Reihe von Ausbreitungsrandbedingungen detailliert vermessen und in Form von Referenzdatensätzen publiziert. Dabei wurde für jeden Ausbreitungsfall entlang eines bodennahen Longitudinalprofils sowie entlang mehrerer bodennaher Lateral- und Vertikalprofile an mindestens 15 und bei hoher Messauflösung an bis zu 60 Messpunkten pro Testfall Zeitreihen der Geruchsstoffkonzentration aufgenommen und analysiert. Der Gesamtdatenfundus umfasst nach Abschluss aller Messungen mehr als 1200 repräsentative Zeitreihen

Alle Messergebnisse wurden in ein am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg konzipiertes Datenformat für Validierungsdatensätze überführt und in die bestehende Referenzdatenbank für mikroskalige Ausbreitungsmodelle CEDVAL (Leitl, 2000) aufgenommen.

### 3 Modell- und Versuchstechnik

#### 3.1 Das Windkanalmodell

Die im Projekt untersuchte Stallanlage (Schweinemaststall) befindet sich in topographisch leicht gegliedertem Gelände. Im Sinne einer hohen Detailtreue des Windkanalmodells wurde die Geländestruktur um den Versuchsstall im physikalischen Modell berücksichtigt. Ausgehend von einem vom Projektkoordinator (Universität Hohenheim) zur Verfügung gestellten Kartenauszug wurde zunächst ein dreidimensionales, digitales Höhenmodell des Geländes erzeugt. Für einen etwa 1.6 km x 1.6 km großen Geländeausschnitt um den Stall wurden aus dem digitalen Geländemodell feingestufte Höhenlinien extrahiert, auf den gewählten Modellmaßstab von 1:400 umgerechnet und auf Höhenschablonen für den Modellbau übertragen. In Abbildung 1 ist in den verwendeten Kartenausschnitt die Lage der Stallanlage sowie das Modellgebiet eingetragen. Abbildung 2 zeigt eine perspektivische Ansicht des digitalen Geländemodells mit eingezeichneten Höhenlinien.

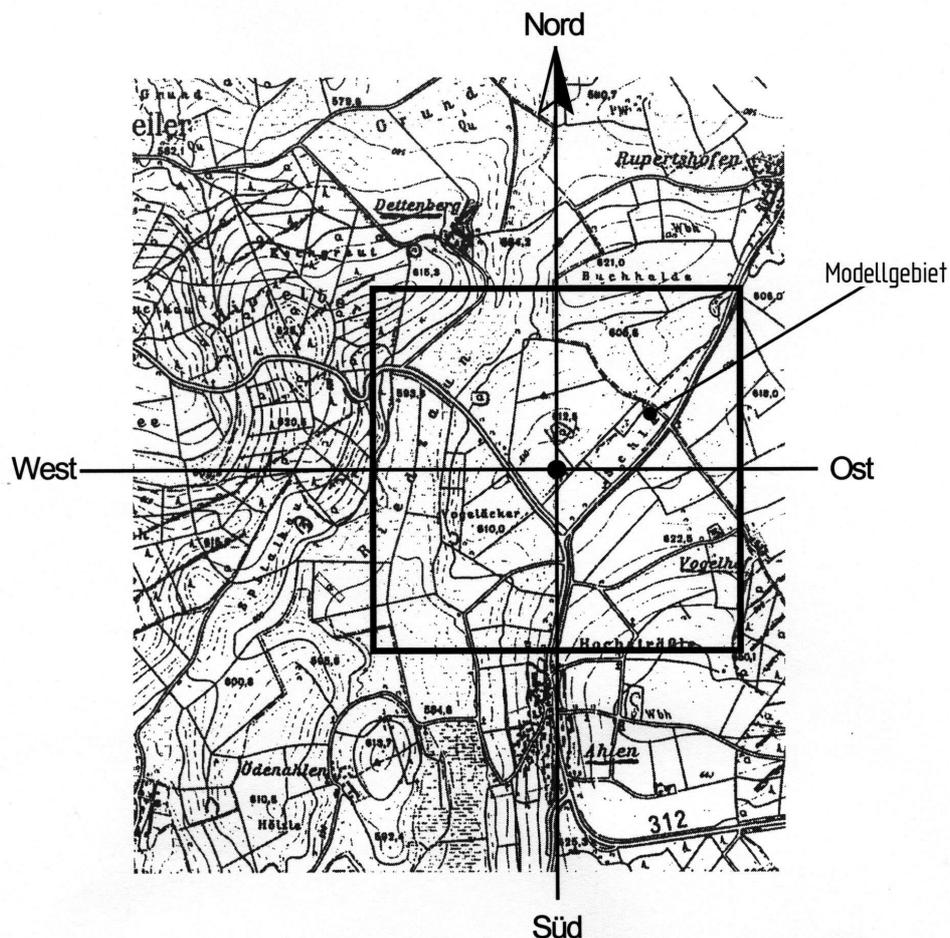
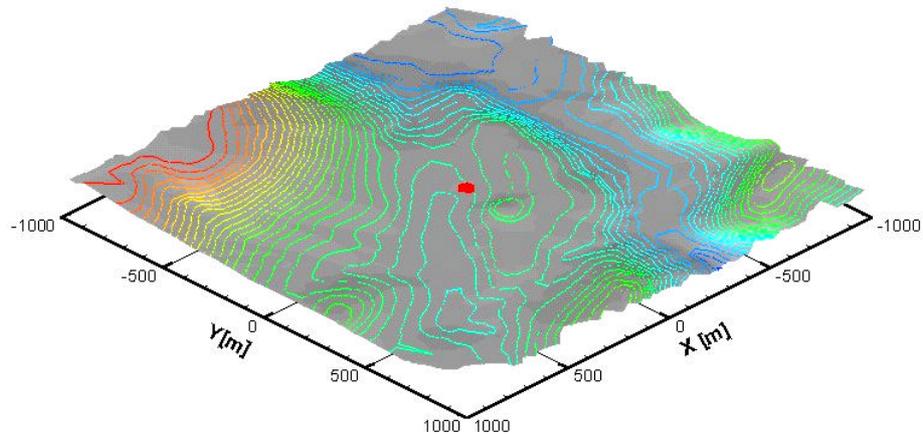


Abbildung 1: Modellgebiet und Lage der Stallanlage.



**Abbildung 2: Für den Modellbau verwendetes digitales Höhenmodell**

Der Aufbau des Geländemodells aus einzelnen Höhenschnitten hat zur Folge, dass im Modell treppenförmige Höhenstufungen erscheinen. Da die Stufen im Nahfeld der Emissionsquelle in Bereichen starker Konzentrationsgradienten die Modellergebnisse unter Umständen verfälschen, wurde im Kernbereich des Modells mit einem Radius von 300 m um das Stallgebäude herum die Stufenstruktur verfüllt und entsprechend den Verhältnissen in der Natur vollständig geglättet. Für Entfernungen größer 300 m wurden die Höhenstufungen lediglich lokal angeglichen. Eine signifikante Beeinflussung der Geruchsfahne im Modell durch die Stufung in größerer Entfernung von der Emissionsquelle ist nicht zu erwarten, da die Konzentrationsgradienten gering bzw. die Ausdehnung der Geruchsfahne im Vergleich zu den Stufungen groß ist. Abbildung 3 zeigt das in die Messstrecke des Windkanals eingebaute Modell der Stallanlage.



**Abbildung 3: Modell in der Messstrecke des Windkanals.**

### 3.1 Der verwendete Grenzschichtwindkanal

Die im Projekt geplanten Modellversuche wurden im Grenzschichtwindkanal "Blasius" des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg durchgeführt. Der in Abbildung 4 schematisch dargestellte Windkanal besteht im wesentlichen aus einer Einlaufdüse mit Strömungsgleichrichtern, einer 7.5 m langen Anlaufstrecke, der ca. 4 m langen Messstrecke und einem Radialgebläse mit Austrittsdiffusor als Windkanalantrieb. Da der Windkanal im Saugbetrieb arbeitet, wirken sich die durch den Antrieb verursachten Störungen nicht negativ auf die Strömung in der Messstrecke aus. Im Bereich der Messstrecke ist der Windkanal mit einer Drehscheibe ausgestattet, die die Änderung der Anströmrichtung bzw. Windrichtung am Modell gestattet. Der freie Strömungsquerschnitt beträgt im Bereich der Messstrecke 1.5 m x 1 m (Breite x Höhe). Zusätzlich ist der Windkanal mit einer verstellbaren Decke ausgerüstet, die den Abgleich longitudinaler Druckgradienten im Kanal ermöglicht. Der Grenzschichtwindkanal ist mit einer schrittmotorgesteuerten Sondenpositionierung ausgerüstet, mit der die verwendeten Messsonden an jedem Punkt der Messstrecke positioniert werden können. Der maximale Positionierfehler beträgt weniger als 0.1 mm für alle 3 Raumrichtungen. Es steht eine speziell für den Grenzschichtwindkanal entwickelte Mess- und Auswertesoftware zur Bearbeitung umfangreicher Messaufgaben zur Verfügung.

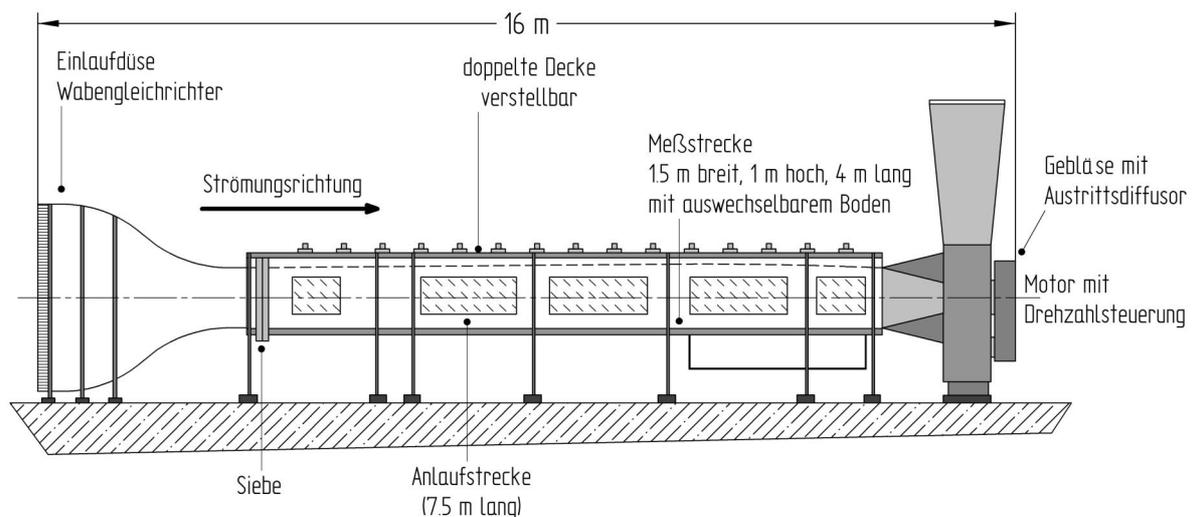


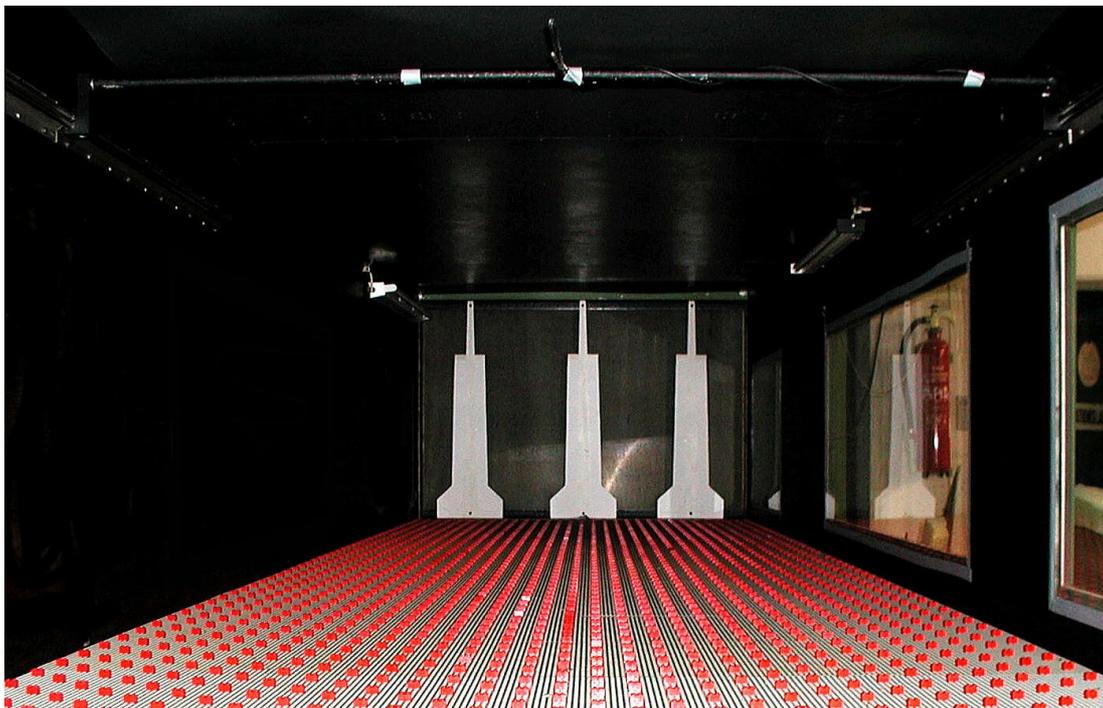
Abbildung 4: Der verwendete Grenzschichtwindkanal "Blasius".

### 3.2 Versuchsaufbau und Messtechnik

Im Rahmen des Projektes kommen ausschließlich Standardmessverfahren und kommerziell vertriebene Labormessgeräte zum Einsatz, auf deren detaillierte Beschreibung hier verzichtet werden kann. Zur Messung der Grundgeschwindigkeit bzw. Referenzgeschwindigkeit der Luftströmung im Windkanal wird ein aus einer pneumatischen Sonde (Prandtl-Rohr, Lambrecht KG) und einem Präzisionsdruckwandler (Baratron, MKS) bestehendes Messsystem verwendet. Um eine hohe Messgenauigkeit zu sichern, wird der Präzisionsdruckwandler regelmäßig mit Hilfe einer zertifizierten Feindruckprüfwaage (Junkalor) kalibriert. Für zeitlich und räumlich hochauflösende Strömungsmessungen kommt ein 2D – Laser-Doppler-Anemometer

(LDA, DANTEC) zum Einsatz. Obwohl ein LDA-System in der Regel nicht kalibriert werden muss, wurde das verwendete Messsystem vor dem Einsatz im Windkanal durch Vergleichsmessungen an einer Streuscheibe geprüft.

Um die Übertragung der im Grenzschichtwindkanal gewonnenen Modellergebnisse auf die Verhältnisse in der Natur zu ermöglichen, müssen die Windverhältnisse an der untersuchten Stallanlage in der Messstrecke des Windkanals modelliert werden. Neben dem mittleren Windprofil sind die Turbulenzstrukturen bzw. wesentliche Parameter der atmosphärischen Turbulenz maßstäblich in der Modellgrenzschicht abzubilden (vergl. VDI 3783 / Blatt 12). Zur Modellierung neutral geschichteter atmosphärischer Grenzschichten werden Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten verwendet. Die am Beginn der Anlaufstrecke angeordneten Turbulenzgeneratoren formen das zu erzeugende Windprofil grob vor und erzeugen die Grobstruktur der zu modellierenden Turbulenz. Die Bodenrauigkeiten simulieren die durch Strömungshindernisse wie zum Beispiel Bewuchs oder Bebauung erzeugten Effekte auf das bodennahe Windfeld. Eine typische Anordnung von Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten in der Messstrecke des kleinen Grenzschichtwindkanals zeigt Abbildung 5.

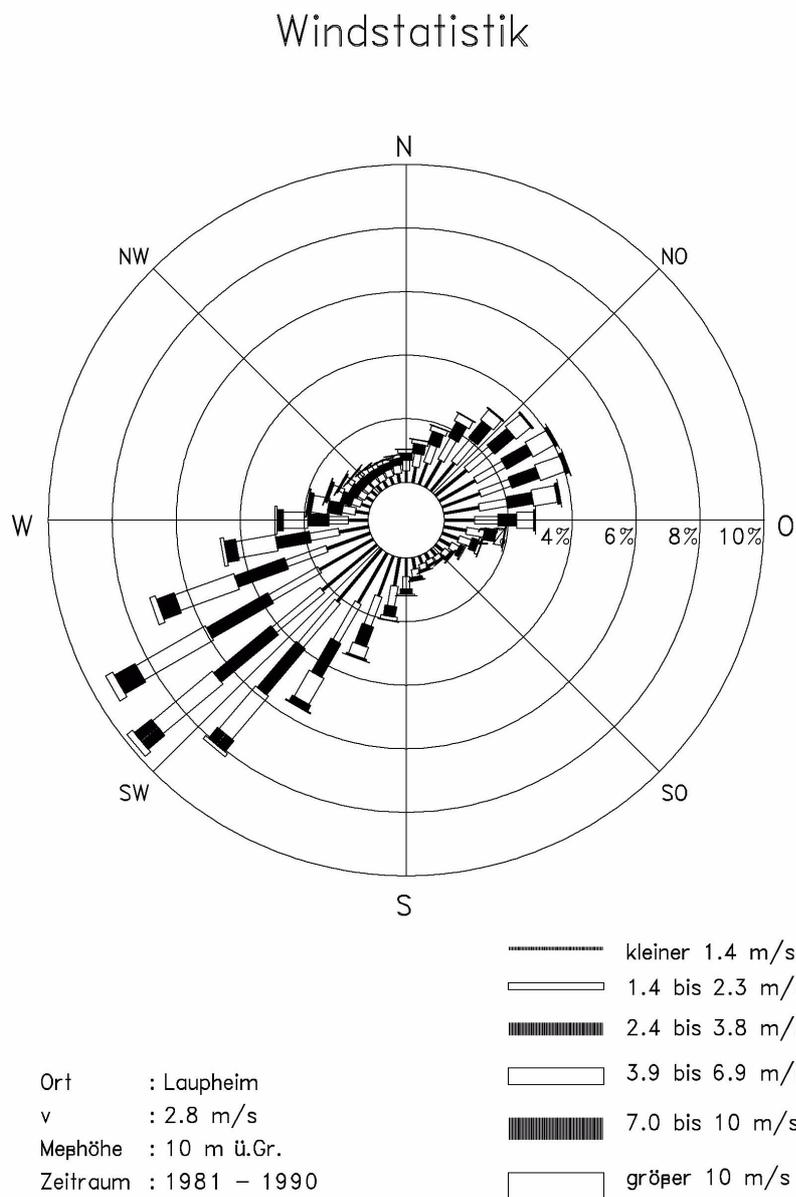


**Abbildung 5: Messstrecke des Windkanals mit Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten.**

Im Zuge der Anpassung einer Modellgrenzschicht auf ein bestimmtes Windprofil und einen bestimmten Modellmaßstab werden die Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten in Form und Anordnung systematisch variiert, bis die geforderte Übereinstimmung mit den Verhältnissen im Original erreicht ist. Die im folgenden verwendeten Parameter zur Beschreibung und Bewertung der Grenzschichtmodellierung im Windkanal entsprechen den in der VDI-Richtlinie 3783, Blatt 12, festgeschriebenen Mindestanforderungen an die physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der Atmosphäre. Die im Windkanallabor des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg angewendeten Verfahren zur Qualitätssicherung im Rahmen der Grenzschichtmodellierung basieren auf den VDI-Vorgaben, ge-

hen im Sinne qualitativ hochwertiger Modellergebnisse jedoch deutlich über diese hinaus. Insbesondere für die zuverlässige physikalische Modellierung niederfrequenter Windrichtungsfluktuationen wurde ein durch Naturmessungen abgesichertes Modellkonzept entwickelt (Pascheke 2000).

Abbildung 6 zeigt die für den Standort als repräsentativ angenommene Windstatistik Laupheim. Die dargestellte Windrose ist durch zwei Vorzugswindrichtungen charakterisiert. Am häufigsten sind Ausbreitungssituationen mit Windrichtungen um 240°. Weniger häufig sind Windrichtungen um etwa 60°. Für Vorversuche und die ersten systematischen Messungen wurde der Windrichtungssektor 240° gewählt, um Windverhältnisse im Windkanal zu modellieren, die auch im Rahmen der Feldversuche mit hoher Wahrscheinlichkeit angetroffen werden. Entsprechend wurde ein im Naturmaßstab 600 m breiter Korridor für die Windrichtung 240° aus der Modellfläche (Abbildung 1) geschnitten und in die Messtrecke des Windkanals eingebaut.



**Abbildung 6: Windstatistik Laupheim.**

Bei der Festlegung der zu modellierenden Windgrenzschicht wurde davon ausgegangen, dass das vertikale Windprofil am Ort der Stallanlage zumindest für die zunächst untersuchte Hauptwindrichtung durch Grasland und Ackerflächen geprägt ist. Entsprechend stellt sich ein Windprofil ein, das nach VDI 3783/12 durch einen Windprofilexponenten  $\alpha \approx 0.12 \dots 0.18$  beschrieben werden kann. Für die als Parameter im logarithmischen Windprofil definierte Rauigkeitslänge werden über Gras- und Ackerflächen Werte von  $z_0 \approx 5 \dots 100$  mm angenommen. Die Verdrängung des Windprofils infolge Bodenrauigkeit ist im vorliegenden Fall vernachlässigbar. Ziel der Grenzschichtanpassung im Windkanal ist es, die angegebenen Grenzschichtparameter möglichst genau zu reproduzieren. Dazu ist zunächst der durch den Modelleinbau in die Messstrecke erzeugte longitudinale Druckgradient zu minimieren. Eine signifikante Druckänderung in Hauptwindrichtung stört die Erzeugung eines im Bereich der Messstrecke konstanten Windprofils und verhindert die Ausbildung einer den Verhältnissen in der Natur ähnlichen Turbulenz. Als Kriterium für den Abgleich des Druckgradienten wird die in VDI 3783/12 angegebene Beziehung

$$\frac{\left( \frac{\partial p}{\partial x} \cdot d \right)}{\frac{\rho}{2} \cdot u^2} \leq 0.05$$

- $p$  statischer Druck in der Messstrecke
- $x$  Longitudinalkoordinate (in Hauptwindrichtung)
- $d$  Grenzschichtdicke
- $\rho$  Dichte der Luft
- $u$  Geschwindigkeit am Grenzschichttrand

genutzt. Abbildung 7 zeigt die nach erfolgtem Abgleich mittels verstellbarer Kanaldecke gemessenen lokalen Druckgradienten in der Messstrecke. Im Bereich der Geruchsfahne ( $x > 0$ ) sind die normierten Druckgradienten  $< 0.025$  und damit hinreichend klein.

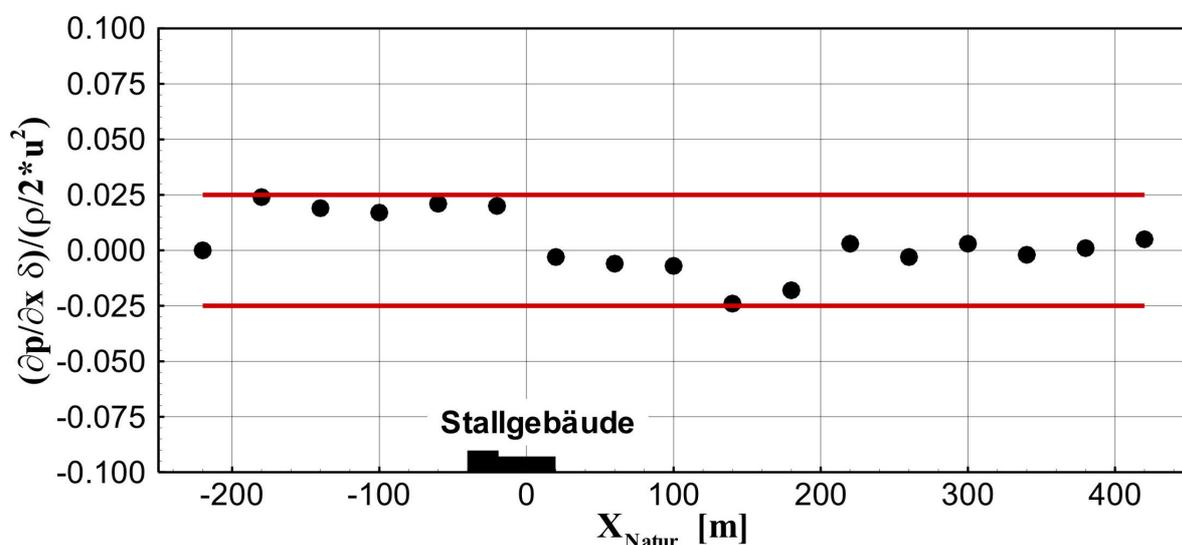


Abbildung 7: Longitudinales Druckprofil in der Messstrecke des Windkanals.

Die im Kapitel 5 dokumentierte Modellgrenzschicht wurde im Zuge der Grenzschichtanpassung an den gewählten Modellmaßstab 1:400 und den geforderten Geländetyp durch systematische Variation der zur Grenzschichterzeugung verwendeten Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten entwickelt. Es wurden insgesamt 12 Kombinationen verschieden geformter Turbulenzgeneratoren und Bodenrauigkeiten untersucht und schrittweise optimiert. Für jeden Optimierungsschritt wurden dabei folgende Teilaufgaben bearbeitet:

- Etwa 80 m vor der Stallanlage, am Ort des während der Feldexperimente aufgestellten meteorologischen Messmastes (~ in der ungestörten Anströmung vor der Stallanlage) wurden räumlich hochaufgelöste Vertikalprofile der Komponenten des Windvektors und der turbulenten Flüsse gemessen, analysiert und mit den Naturvorgaben verglichen.
- Die Konstanz des Windprofils in Windrichtung wurde über die gesamte Länge der Messstrecke geprüft (3 Vertikalprofile bis ca. 500 m hinter dem Stallgebäude).
- Die Homogenität der Anströmung wurde mittels komponentenaufgelöster Geschwindigkeitsmessungen in einer vertikalen Messebene quer zur Hauptwindrichtung überprüft.
- Auf der Grundlage hochaufgelöster Zeitreihen der Geschwindigkeitskomponenten wurden die spektralen Eigenschaften der Turbulenz mit Vorgabewerten aus der Natur verglichen.
- Die niederfrequenten Windrichtungsfluktuationen wurden analysiert und mit Naturwerten verglichen.

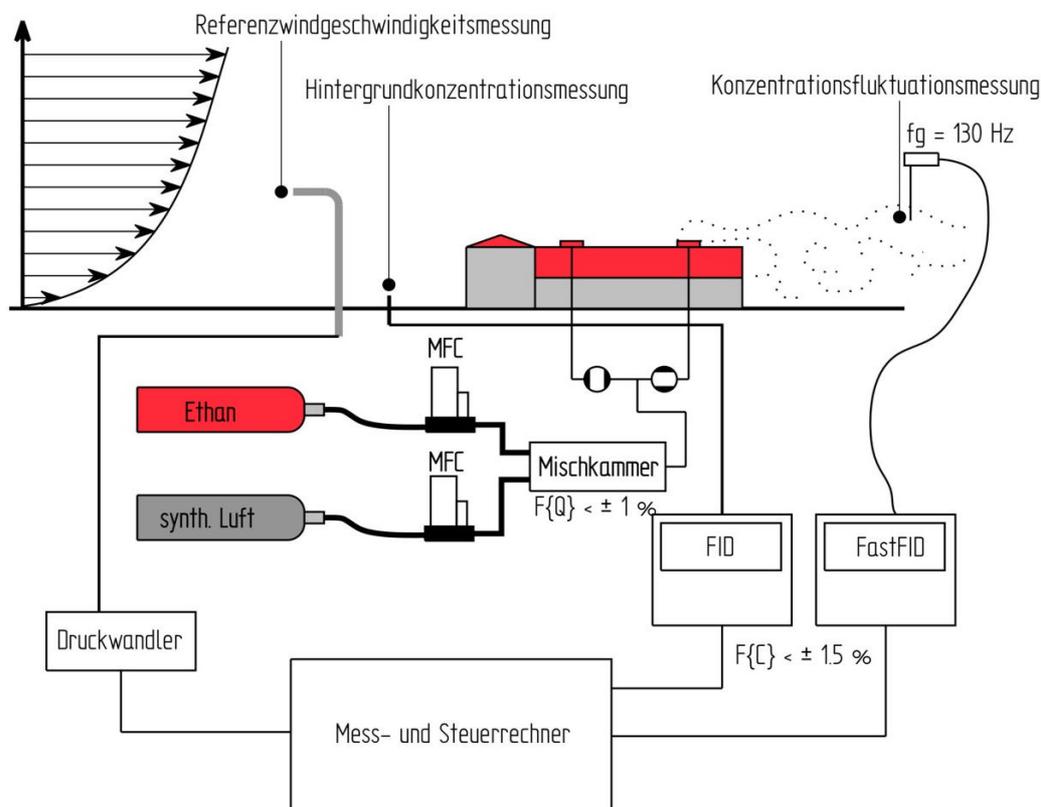


Abbildung 8: Versuchsaufbau für Ausbreitungsmodellierung und -messung (schematisch).

Den für die Ausbreitungsmodellierung verwendeten Versuchsaufbau zeigt schematisch Abbildung 8. Als Tracergas für die Simulation der geruchsstoffbeladenen Abluftfahne des Stalls wurde Ethan verwendet. Ethan weist nahezu die gleiche Dichte wie Luft auf. Die von Schwere- bzw. Auftriebseffekten unbeeinflusste Ausbreitung der Abluftfahne ist somit gewährleistet. Da das Verhältnis von Abluftaustrittsgeschwindigkeit zu mittlerer Windgeschwindigkeit in Austrittshöhe die Ausbildung der Abluftfahne in Quellnähe entscheidend beeinflusst, muss der im Modell realisierte Abluftvolumenstrom präzise einstellbar sein. Im vorliegenden Fall wurde dem Tracergasvolumenstrom in einer Mischkammer ein definierter Volumenstrom kohlenwasserstofffreier Luft zugemischt, um die Abluftgeschwindigkeit unabhängig vom verwendeten Tracergasvolumenstrom regeln zu können. Die Dosierung und Regelung der Quellvolumenströme erfolgte mit Hilfe von elektronischen Massendurchflussmessern (BROOKS 5851S-Serie), die vor den Experimenten mit Hilfe unabhängiger, volumetrischer Referenznormale (BROOKS Vol-U-meter) kalibriert wurden. Die Gesamtgenauigkeit der Dosierung bzw. Regelung des Quellvolumenstroms konnte so besser als  $\pm 1\%$  gehalten werden. Zur Messung der Tracerkonzentrationen wurden Flammenionisationsdetektoren (FIDs) verwendet, die den Kohlenwasserstoffgehalt des am Messort abgesaugten Tracer-Luft-Gemisches analysieren. Zur Erfassung der Grund- bzw. Hintergrundkonzentration in der Windkanalluft wurde an einer Messstelle in Windrichtung vor dem Modell Windkanalluft abgesaugt und einem Standard-FID zugeführt. Das Gerät vom Typ Rosemount Analytical 400A analysiert die Kohlenwasserstoffkonzentration mit einer zeitlichen Auflösung von etwa 1 Hz, da die Messleitung und die im Gerät befindliche Brennkammer ein relativ großes, von der Gasprobe zu spülendes Volumen bilden. Die gemessenen Hintergrundkonzentrationen wurden im Rahmen der Messdatenauswertung von den Messkonzentrationen in der simulierten Abgasfahne subtrahiert. Zur Messung der turbulenten Schwankungen der Tracergaskonzentration an Messpunkten innerhalb der modellierten Abluftfahne wurde ein FastFID (Cambustion HFR400) verwendet. Das Gerät verfügt über eine äußerst kompakte Brennkammer, die außerhalb des FID-Grundgerätes unmittelbar in der Messstrecke des Windkanals positioniert werden kann. Über eine kurze Absaugkanüle mit einem Innendurchmesser von 0.3 mm wurde das am Messort abgesaugte Gasgemisch unmittelbar der Brennflamme des FastFID zugeführt. Mit der verwendeten, 130 mm langen Messkanüle wurde eine Frequenzauflösung von 130 Hz im Modell realisiert. Bei gleicher Windgeschwindigkeit im Modell und in der Natur ist diese Zeitauflösung im Modell einem Wert von etwa 0.3 Hz in der Natur äquivalent. Die im Modell realisierte zeitliche Auflösung entspricht somit in etwa der menschlichen Atemfrequenz. Die verwendeten FIDs wurden vor, während und nach jeder Messreihe mit Hilfe zertifizierter Eichgase an mindestens 4 über den gesamten Messbereich verteilten Kalibrierpunkten kalibriert. Die Reproduziergenauigkeit der Kalibrierung betrug 97% bzw. der Messfehler der FID-Systeme konnte durch sorgfältige Kalibrierung typischerweise kleiner als 3% gehalten werden. Zur Messung der Referenzwindgeschwindigkeit wurde eine Prandtl-Sonde mit nachgeschaltetem Druckwandler (MKS BARATRON) verwendet. Das Prandtl-Rohr wurde im Modell in 25 mm Höhe (10 m Höhe im Naturmaßstab) am Ort der Referenzwindmessung während der Feldexperimente positioniert. Zur Positionierung der FastFID-Brennkammer im Windkanal wurde die in die Messstrecke des Windkanals integrierte Sondenverstellereinrichtung eingesetzt.

## 4. Mess- und Auswertekonzept

In Abbildung 9 sind die Orientierung der Stallanlage sowie die entsprechend der Lage des untersuchten Praxisstalls definierten Windrichtungen für die Ausbreitungssimulation dargestellt. Der Ursprung des verwendeten Modellkoordinatensystems befindet sich in der Mitte des Abluftkamins 1, die X-Achse wurde je nach Messfall in Windrichtung ausgerichtet, die Y-Achse bezeichnet die laterale Koordinate quer zur mittleren Windrichtung und Z bezeichnet die Vertikalkoordinate.

Im Windkanalversuch wird der Vorgang der Geruchsstoffausbreitung durch die analoge Freisetzung eines passiven Tracergases simuliert. Folglich werden im Windkanalversuch nicht unmittelbar Geruchshäufigkeiten gemessen sondern zunächst die zu den Geruchsstoffkonzentrationen direkt proportionalen Tracergaskonzentrationen bestimmt. Um die Umrechnung von gemessenen Tracergaskonzentrationen in entsprechende Geruchsstoffkonzentrationen zu erleichtern, werden die relativen, auf die Tracerkonzentration am Quellort bezogenen Messkonzentrationen (Volumenkonzentrationen) angegeben als

$$C_{rel} = \frac{(C_{mess} - C_0)}{C_{quelle}}$$

$C_{rel}$	relative Tracer-/Geruchsstoffkonzentration
$C_{mess}$	am Immissionsort gemessene Tracer-/Geruchsstoffkonzentration
$C_0$	Tracer-Hintergrundkonzentration/Geruchsstoff-Vorbelastung in Windrichtung vor der Quelle
$C_{quelle}$	Tracer-/Geruchsstoffkonzentration der Quelle

Die Ergebnisse werden bewusst nicht als mit der Windgeschwindigkeit, der Quellhöhe und der Quellstärke entdimensionierte Konzentrationswerte dargestellt, da im untersuchten Fall der impulsbehafteten Freisetzung von Geruchsstoffen aus einem niedrigen Abluftkamin mit Gebäudeeinfluss die Ergebnisse zwar problemlos auf unterschiedliche Quellkonzentrationen, nicht aber auf unterschiedliche Emissionsstärken (d.h. Abluftvolumenströme), Quellhöhen und Windstärken übertragen werden können. Zur Umrechnung der relativen Konzentrationswerte in Geruchsstoffkonzentrationen, müssen die im Windkanal gemessenen relativen Konzentrationswerte mit der z.B. über eine olfaktometrische Analyse bestimmten Geruchsstoffkonzentration der Quelle (i.a. angegeben in GE – Geruchseinheiten) multipliziert werden. Im Rahmen der im Verbundprojekt realisierten Feldmessungen wurde die Geruchs-Quellstärke am untersuchten Praxisstall durch die Projektpartner Universität Hohenheim (Brose et al., 2002) und Ingenieurbüro IMA (Richter et al., 2002) olfaktometrisch bestimmt. Für einen direkten Vergleich von Natur- und Laborexperimenten standen außerdem die Ergebnisse der vom Projektpartner Ingenieurbüro Lohmeyer (Bächlin et al., 2001) realisierten Tracergasexperimente in der Natur zur Verfügung.

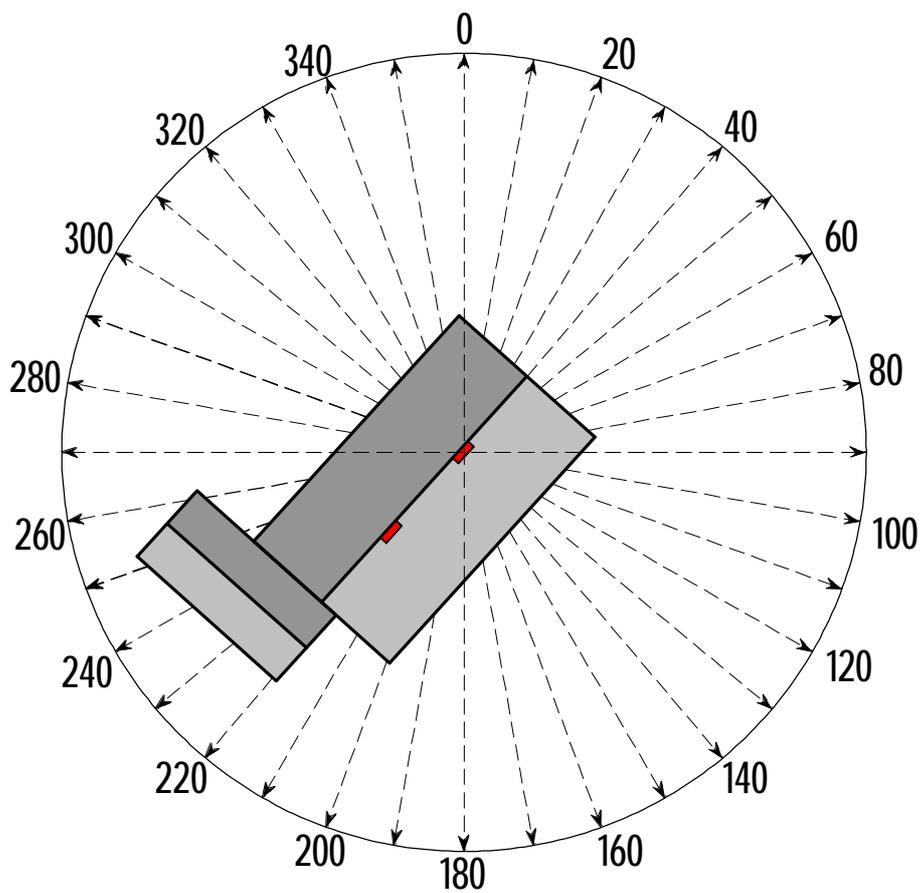
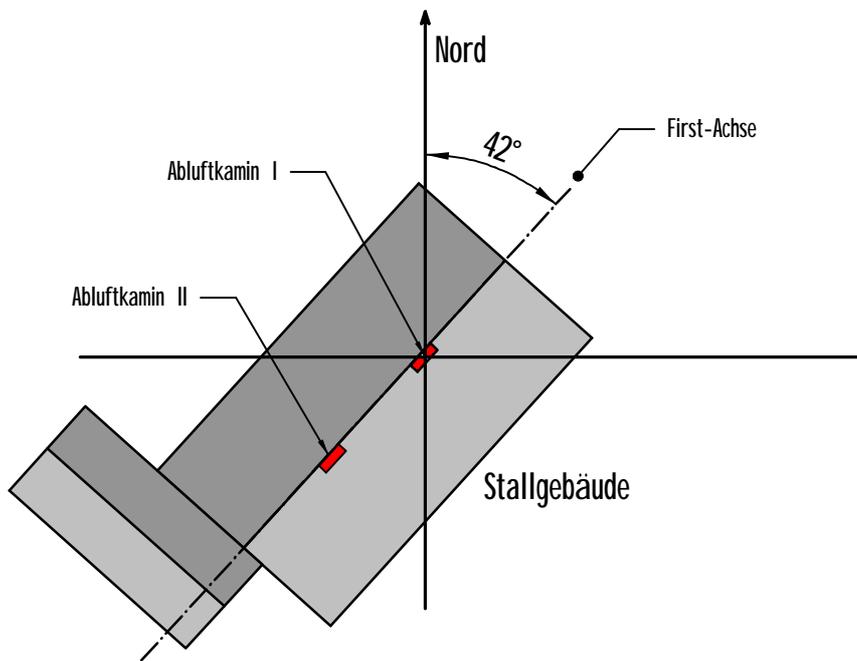


Abbildung 9: Orientierung des Stallgebäudes und untersuchte Windrichtungen.

Vorrangiges Ziel der Windkanalmessungen war die Erfassung, Beschreibung und Dokumentation des den Vorgang der Geruchswahrnehmung wesentlich bestimmenden zeitlichen Verlaufs von Geruchsstoffkonzentrationen innerhalb der modellierten Abluftfahne. Zusätzlich zu den üblicherweise gemessenen mittleren Tracerkonzentrationen und mittleren statistischen Schwankungsgrößen des Konzentrationssignals sollte die unmittelbare Auswertung der gemessenen Konzentrationszeitreihen auch nach der Durchführung der Experimente möglich bleiben. Deshalb war es erforderlich, für alle Testfälle und Messorte die aufgenommenen Zeitserien der Messkonzentration zu archivieren. In Vorversuchen wurde zunächst die für repräsentative Messungen erforderliche Dauer der Einzelmessungen an einem Messort bestimmt und dann, erhöht um einen "Sicherheitsfaktor" von 1.5, auf 5 Minuten festgelegt. Für gleiche Windgeschwindigkeiten im Windkanalversuch und in der Natur repräsentiert jede Zeitreihe der Konzentrationsfluktuationen etwa 33 Stunden Messzeit in der Natur unter konstanten Ausbreitungsrandbedingungen. Die erwartete Unabhängigkeit der mit der Windgeschwindigkeit normierten Modellergebnisse von der Reynoldszahl des Versuches (d.h. Windgeschwindigkeit im Modell) wurde ebenfalls im Rahmen von Vorversuchen für jeweils gleiche Impulsverhältnisse am Austritt des Abluftkamins überprüft und experimentell bestätigt. Zur automatisierten Analyse des umfangreichen Datenmaterials wurde ein spezielles Softwarepaket erstellt, das ohne zusätzliche Datenmanipulationen und für alle Messreihen in gleicher Weise die folgenden Kenngrößen der Tracer- bzw. Geruchsstoffkonzentration berechnet und dokumentiert:

- Mittelwert der Messkonzentration
- RMS der Messkonzentration
- Intermittenz (~ Zeitanteil) des Konzentrationssignals
- Persistenz (~ mittlere Präsenzzeit) des Konzentrationssignals
- "Peak-to-Mean ratio" des Konzentrationssignals
- Häufigkeitsverteilung der Messkonzentrationen
- 90-Perzentil-Wert der Konzentrationszeitreihe

Die zu realisierenden Versuchsreihen und Messfälle wurden mit Blick auf eine systematische Erfassung der wesentlichen Transport- und Ausbreitungsphänomene geplant. Eine Modellierung unabhängiger Einzelfälle ist für die Schaffung von Validierungsdatensätzen nicht sinnvoll, da ein Übereinstimmen von Referenzdaten und Ergebnissen einer numerischen Simulation im Einzelfall keine Information über die Güte der im Modell implementierten Algorithmen oder die Fähigkeit des Modells, für wechselnde Randbedingungen Trends richtig wiederzugeben, liefert. Im streng physikalischen Sinne kann schon auf Grund der in numerischen Modellen notwendigerweise vorgenommenen geometrischen Vereinfachungen nicht erwartet werden, dass eine einzelne Modellrechnung exakt mit einem Vergleichsfall übereinstimmt. Für den praktischen Einsatz taugliche Modelle sollen vielmehr Modellergebnisse liefern, die Zusammenhänge zwischen den Rand- und Anfangsbedingungen eines Ausbreitungsvorganges und den Modellergebnissen zuverlässig für verschiedene, im An-

wendungsfall mögliche Situationen mit ausreichender Genauigkeit wiedergeben. Um den systematischen Test praxistauglicher Modelle zu ermöglichen, wurden folgende Testfälle konzipiert und im Windkanal vermessen:

- 2 Einzelsituationen, die den Ausbreitungssituationen während der im Projektverbund realisierten Feldmessungen entsprechen (2 Windrichtungen mit jeweils unterschiedlichen Emissionsverhältnissen, Berücksichtigung der Topographie)
- Systematische Variation des Geschwindigkeitsverhältnisses am Austritt des Abluftkamins (ein Abluftkamin, eine Windrichtung, 3 Geschwindigkeitsverhältnisse am Kamin, Berücksichtigung der Topographie)
- Systematische Variation des Emissionsortes (für eine Windrichtung und ein Geschwindigkeitsverhältnis am Abluftkamin jeweils einen Datensatz für Emission aus Kamin I, Kamin II sowie Kamin I und II zusammen, Berücksichtigung der Topographie)
- Systematische Variation der Windrichtung (36 Windrichtungen mit jeweils gleichen Emissionsverhältnissen, ohne Berücksichtigung der topographischen Gliederung des Geländes)

Das verwendete, vom konkreten Ausbreitungsfall unabhängige Messraster in der Abluffahne des Stallmodells zeigt Abbildung 10. Lediglich bei der Nachbildung der Feldmessungen wurde die Lage einzelner Messpunkte geringfügig variiert und den Feldexperimenten angepasst. Die quellbezogene Darstellung der Einzelergebnisse bietet den Vorteil, dass die Ergebnisse aus verschiedenen Ausbreitungssituationen an Aufpunkten mit jeweils gleicher relativer Lage in der Fahne unmittelbar verglichen werden können.

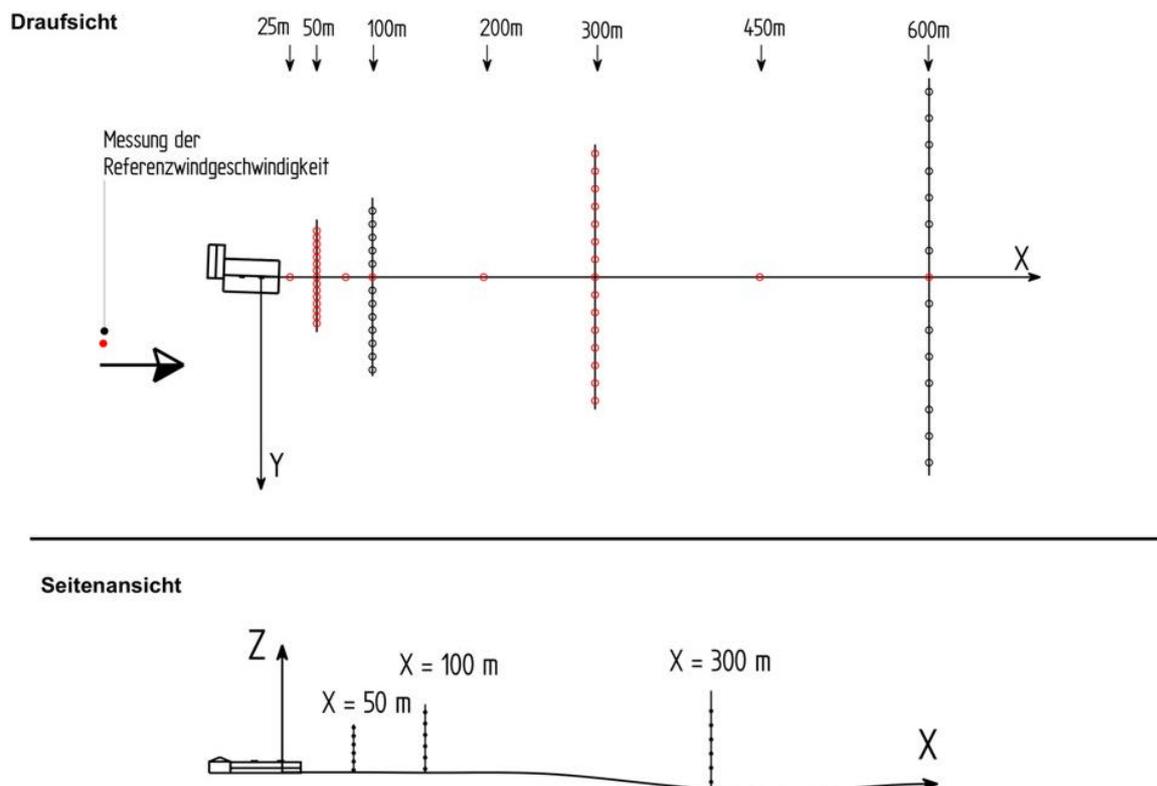


Abbildung 10: Verwendetes Modellkoordinatensystem.

## 5 Ergebnisse

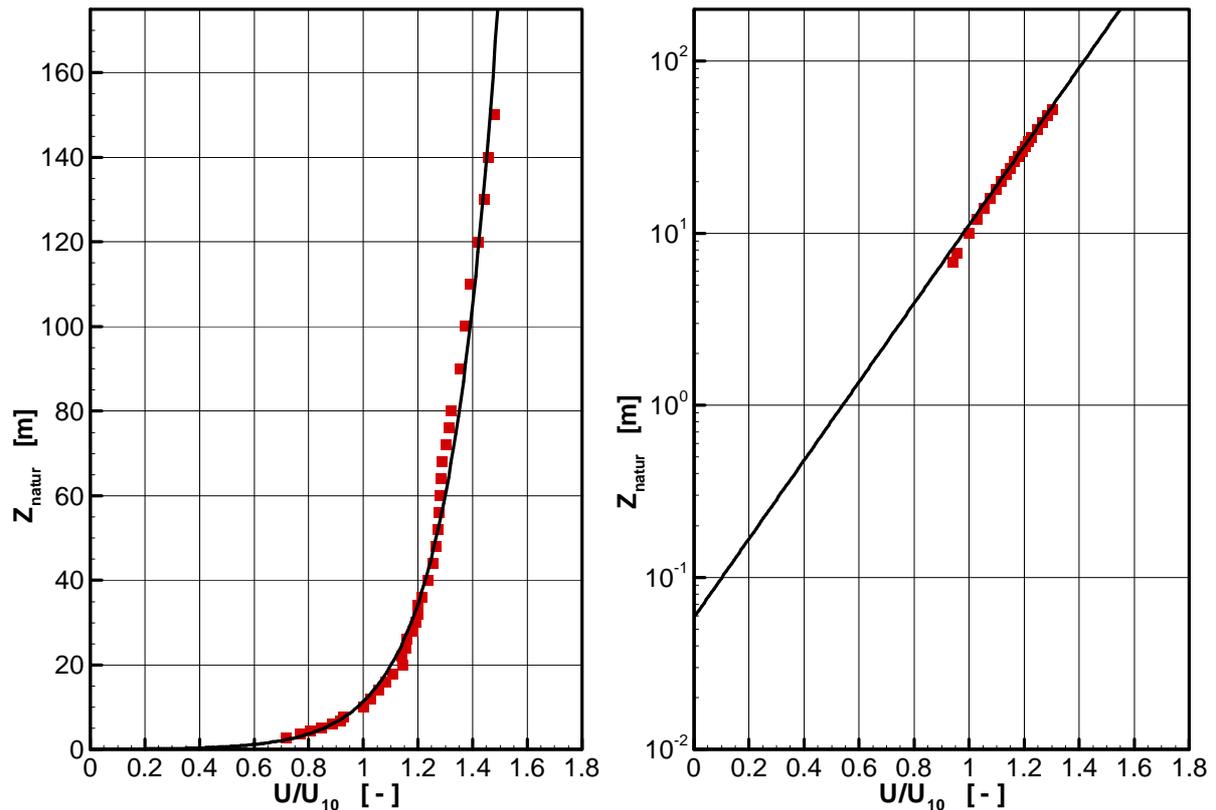
### 5.1 Dokumentation der Modellgrenzschicht

Die folgenden Ergebnisse zur Dokumentation der Modellgrenzschicht sind im Naturmaßstab, d.h. umgerechnet auf die Verhältnisse am im Verbundprojekt untersuchten Praxisstall, dargestellt. Abbildung 11 zeigt das am Aufstellungsort des Meteorologie-Mastes gemessene zeitgemittelte Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeitsmesswerte sind in dimensionsloser Form, bezogen auf den Messwert in  $Z = 10$  m (Anemometerhöhe bei Naturmessungen) aufgetragen. Eine Anpassung der Messwerte an den zur Beschreibung von Windprofilen üblichen Potenzansatz

$$U(z) = U_{ref} \cdot \left[ \frac{z - d_0}{z_{ref} - d_0} \right]^a$$

- $z$  Höhe über Grund
- $ref$  Bezugs- bzw. Referenzindex
- $a$  Windprofil-Exponent
- $d_0$  Versatzhöhe des Windprofils

liefert  $d_0 \approx 0$  m und einen zum modellierten Geländetyp passenden Profilexponenten von  $a \approx 0.16$ . Aus der halblogarithmischen Darstellung des Windprofils in Abbildung 10 kann die charakteristische Rauigkeitslänge des modellierten Windprofils abgeleitet werden. Für die vorliegende Modellgrenzschicht ergibt sich mit  $z_0 \approx 0.06$  m im Naturmaßstab ein den Vorgaben entsprechender Wert. Die Anpassung der Messwerte an das erwartete logarithmische Profil gelingt gut für den Bereich der Prandtl-Schicht bis etwa 80 m Höhe über dem Boden.



**Abbildung 11: Mittleres Windprofil der Modellgrenzschicht.**

Die in Abbildung 12 dargestellte vertikale Verteilung der Turbulenzintensität stimmt ebenfalls gut mit entsprechenden Vorgabewerten aus der Natur für mäßig raues Gelände (z.B. ESDU, 1985) überein. Abbildung 13 zeigt die zeitgemittelte vertikale Verteilung der turbulenten Schubspannungen  $\overline{u'w'}$  für den Bereich der Prandtl-Schicht. Es stellt sich die auch in der Natur beobachtete "constant flux layer" ein, der vertikale turbulente Impulsfluss ist im betreffenden Höhenbereich näherungsweise konstant.

Zur Bewertung der Güte der Modellierung turbulenter Strukturen wird mindestens für die Hauptwindkomponente  $U$  aus einer Zeitreihe der Geschwindigkeit die spektrale Verteilung der kinetischen Energie der Turbulenz (auch Turbulenzspektrum) berechnet. Abbildung 14 zeigt die für Messhöhen von 10, 20, 40 und 80 m über Grund berechneten Spektren im Vergleich mit Referenzspektren nach Kaimal et al. (1972) und Simiu/Scanlan (1986). Im Bereich der Prandtl-Schicht ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Labormesswerte mit den Naturvorgaben, die Messhöhen 40 m und 80 m zeigen eine auch in der Natur beobachtete Verschiebung des Turbulenzspektrums mit zunehmender Höhe.

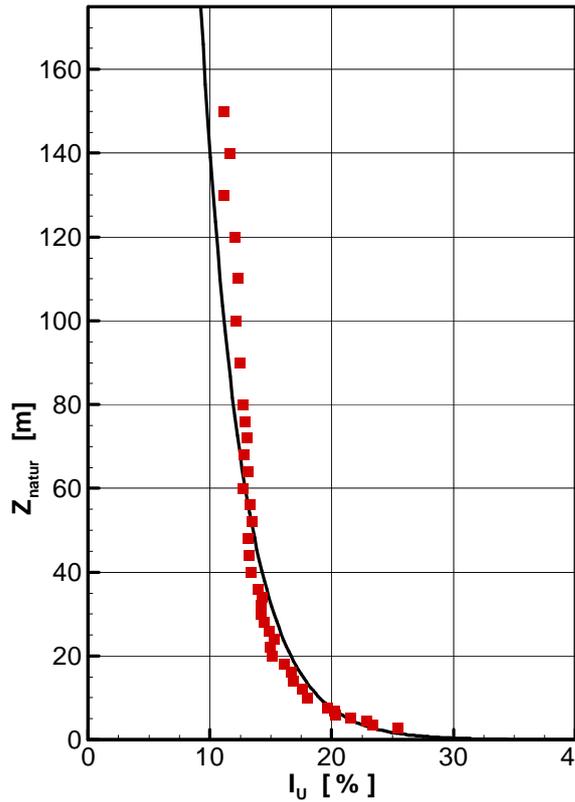


Abbildung 12: Vertikalprofil der Turbulenzintensität.

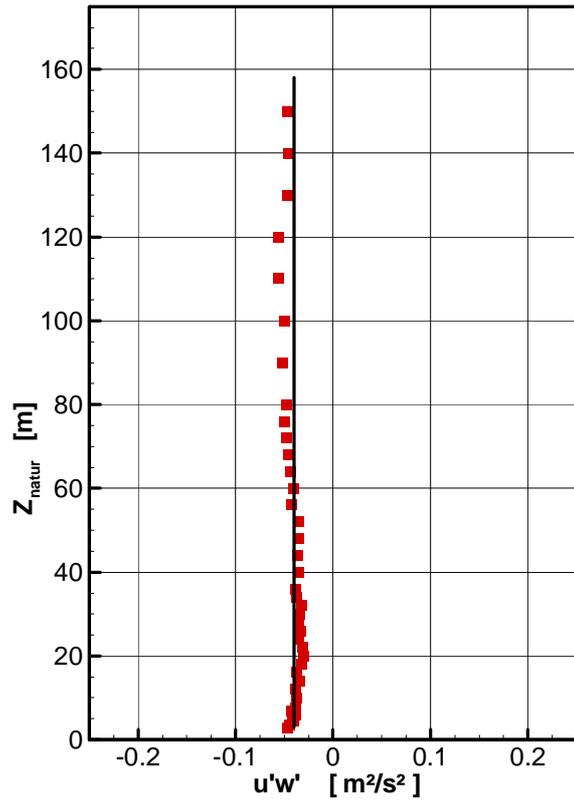


Abbildung 13: Vertikalprofil des Turbulenten Impulsflusses.

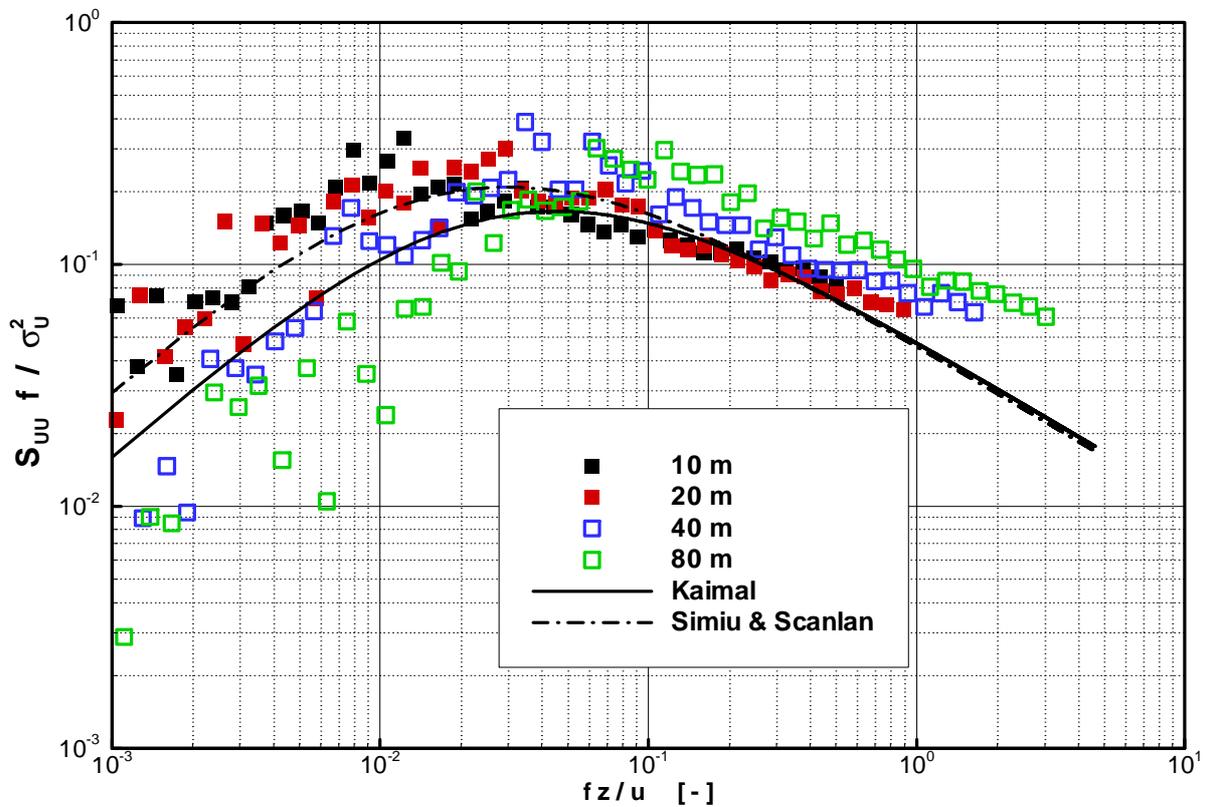


Abbildung 14: Spektrale Verteilung der kinetischen Energie der Turbulenz in der Modellgrenzschicht.

Ein abschließender Vergleich bewertet die Modellierung lateraler Windrichtungsfluktuationen im Windkanal. Der das Mäandrieren einer Geruchsfahne erzeugende Wechsel der Windrichtung in horizontaler Richtung bestimmt wesentlich die Charakteristik der für den Vorgang der Geruchswahrnehmung typischen Fluktuationen der Konzentration eines Geruchsstoffes. Bisher wurde angenommen, dass im Windkanal die in der Natur beobachteten lateralen Windrichtungsfluktuationen infolge der endlichen Breite der Windkanalmessstrecke nicht ausreichend abgebildet werden. Neuere, in Pascheke (2000) zusammengefasste Untersuchungen belegen jedoch durch Vergleiche mit Naturdaten, dass sowohl der Winkelbereich, als auch die Frequenz, mit der die Windrichtungswechsel in der Natur auftreten in guter Näherung im Windkanal modelliert werden können. Exemplarisch ist in Abbildung 15 die Häufigkeit des Auftretens einer lateralen Windrichtungsabweichung als Funktion des Winkels aufgetragen. In der im Projekt entwickelten Modellgrenzschicht werden in 10 m Höhe über dem Boden (Anemometerhöhe) Windrichtungsschwankungen im Bereich von  $\pm 50^\circ$  abgebildet. Infolge messtechnischer Probleme während der Feldmesskampagnen konnten im Verbundprojekt leider keine hochaufgelösten Zeitreihen des Windgeschwindigkeitsvektors für einen direkten Vergleich mit den Windkanaldaten bereitgestellt werden. Die gemessenen Windrichtungsfluktuationen konnten so lediglich mit den in Pascheke (2000) zusammengestellten Naturdaten für eine raue Grenzschichtströmung verglichen werden und zeigen dabei den erwarteten, geringeren Fluktuationswinkelbereich.

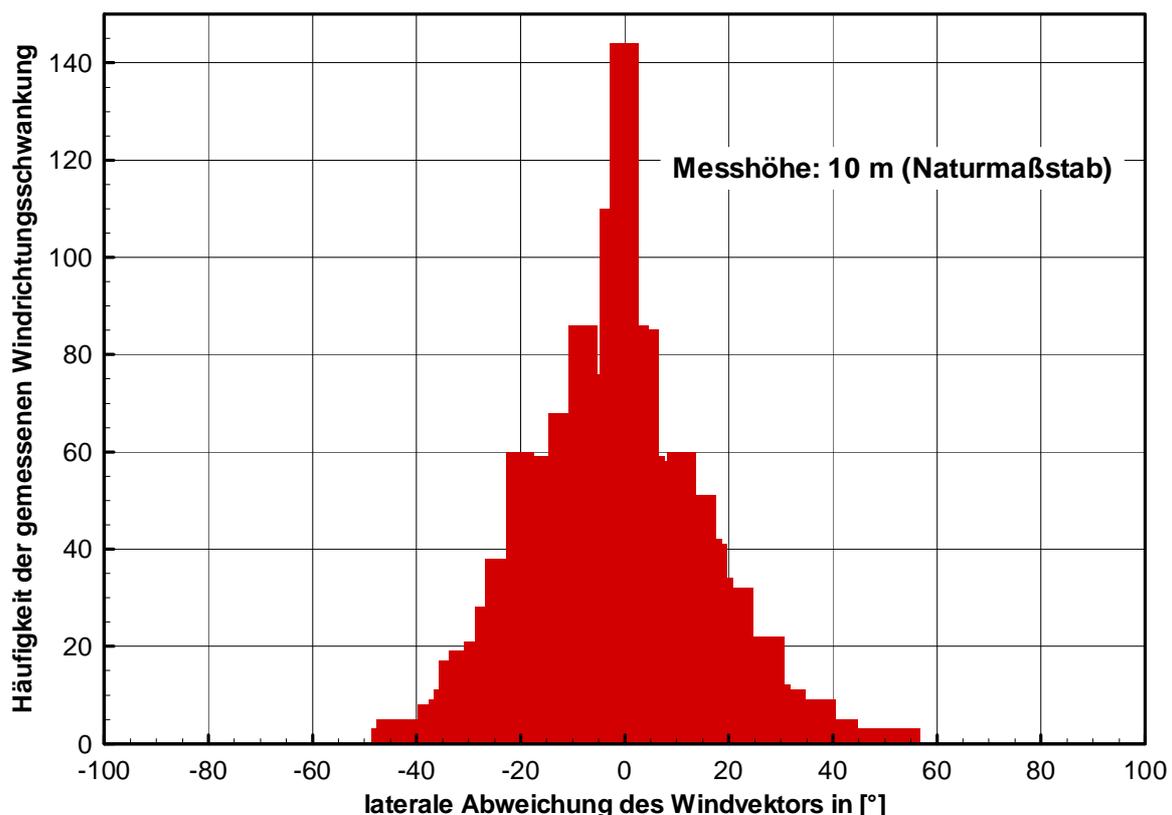


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der lateralen Windrichtungsfluktuationen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine gut auf die zu erwartenden Windverhältnisse an der Stallanlage abgestimmte Modellgrenzschicht erzeugt wer-

den konnte. Die sorgfältige Modellierung der Grenzschicht bildet die Voraussetzung für qualitativ abgesicherte Laboruntersuchungen, die im Ergebnis Referenzdaten für numerische Ausbreitungsmodelle bereitstellen sollen.

## 5.2 Visualisierung der Geruchsfahnausbreitung

Im Sinne eines besseren Verständnisses des untersuchten Ausbreitungsvorganges wurde die Abluffahne im Windkanalversuch mit Hilfe von Laser-Lichtschnitten sichtbar gemacht. Das Prinzip der Laser-Lichtschnitt-Visualisierung ist in Abbildung 16 skizziert. Im Modell werden der Abluffahne geringe Mengen Theaternebel zugeführt. Infolge der intensiven Vermischung der Abluffahne mit der Umgebungsluft und der höheren Geschwindigkeit, mit der der Ausbreitungsvorgang im Windkanalmodell abgebildet wird ist die Fahne unter Umgebungslicht nur im unmittelbaren Nahfeld der Quelle als dünner Nebelschleier wahrnehmbar. Um die Abluffahne innerhalb geometrisch definierter Visualisierungsebenen sichtbar zu machen, wird Laserlicht mit Hilfe einer Linsenkombination in eine etwa 1 mm dicke Lichtebene umgeformt. Die Lichtebene wird über ein Spiegelsystem in gewünschter Lage in den Nachlauf des Stallmodells projiziert. Wenn Aerosolpartikel des an der Quelle freigesetzten Theaternebels die Visualisierungsebene passieren, senden diese intensives Streulicht aus, das visuell deutlich intensiver wahrnehmbar ist als reiner Theaternebel. Die sich in den Lichtebenen einstellenden Strömungs- bzw. Ausbreitungsmuster können mit Foto- und Videotechnik aufgezeichnet und archiviert werden. Ein wesentlicher Vorteil der Laser-Lichtschnitt-Technik besteht in der geometrisch definierten Sichtbarmachung komplexer Schadstoffausbreitungsphänomene. Nur die in der Lichtschnittebene bewegten Rauchpartikel sind deutlich sichtbar, die außerhalb des Lichtschnittes bewegten Aerosoltröpfchen bleiben für den Betrachter unsichtbar.

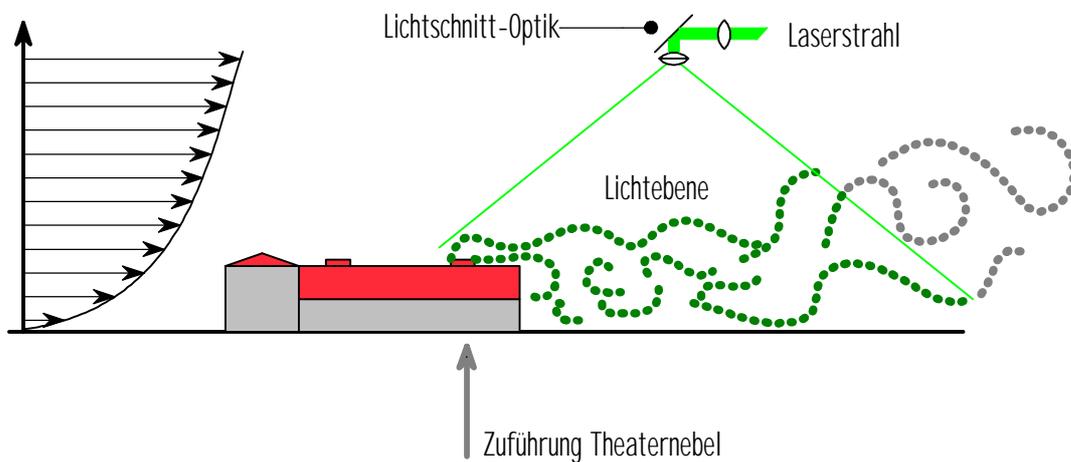
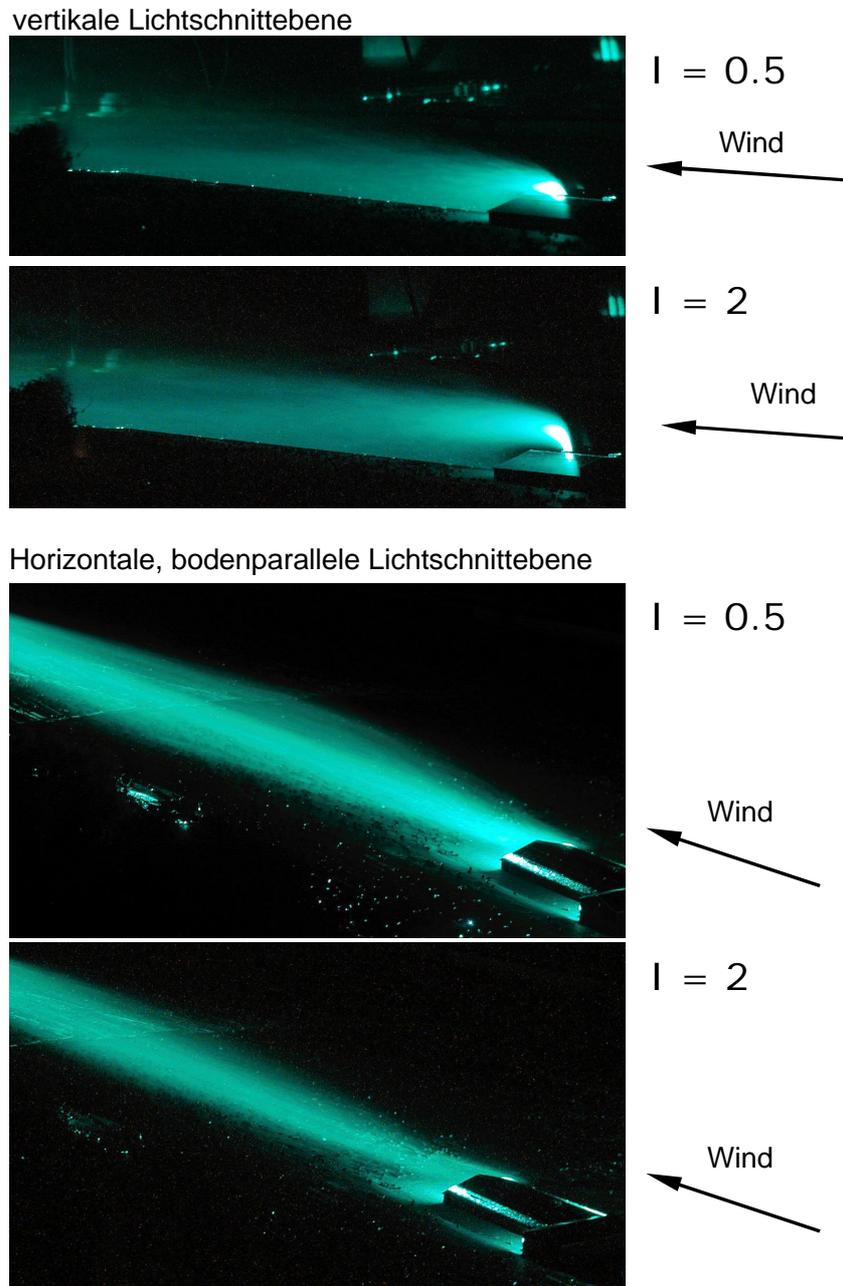


Abbildung 16: Versuchsaufbau für Laser-Lichtschnitt-Visualisierung (schematisch).

Für jeweils 4 verschiedene Impuls- bzw. Geschwindigkeitsverhältnisse am Austritt des Abluftkamins wurden die sich einstellenden Ausbreitungsmuster im Nachlauf der Stallanlage erfasst in horizontalen und vertikalen Visualisierungsebenen erfasst. Das Abluft-Geschwindigkeitsverhältnis wird definiert als  $I = \frac{U_{Abluft}}{U_{Wind}}$  in Austrittshöhe des Abluftkamins.

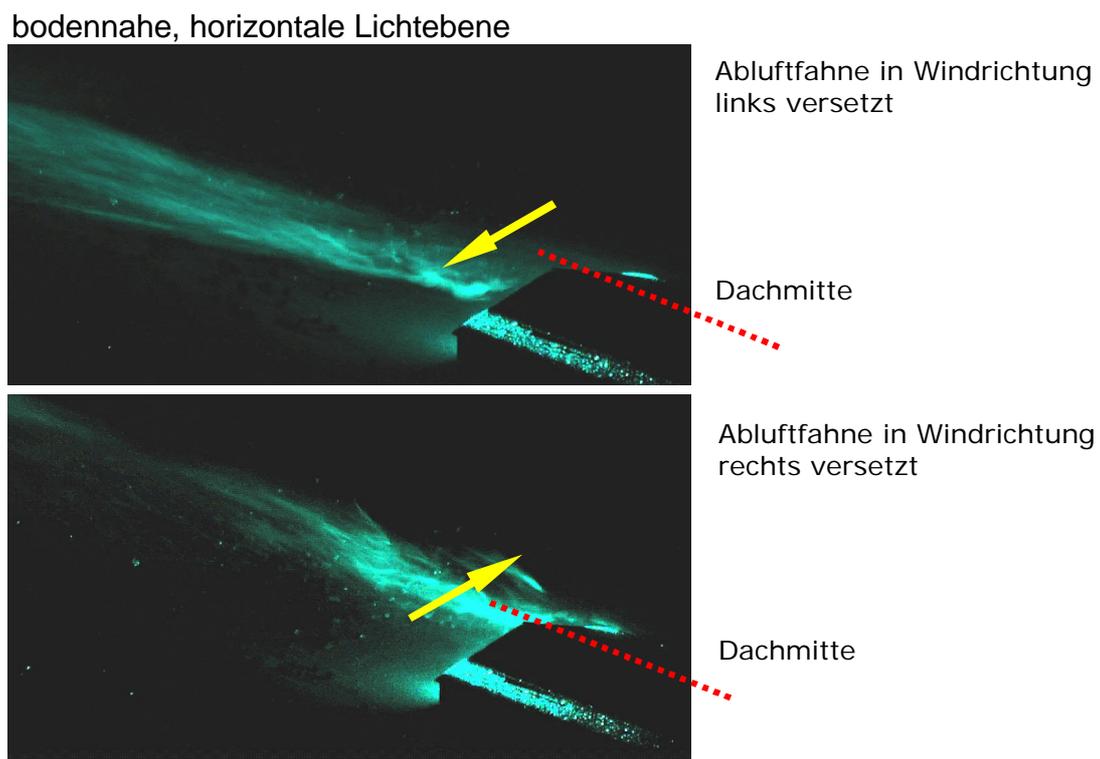


**Abbildung 17: Lichtschnittvisualisierung für verschiedene Geschwindigkeitsverhältnisse am Austritt des Abluftkamin  $I$ .**

Abbildung 17 zeigt Lichtschnittaufnahmen mit langer Belichtungszeit, die die mittlere Lage der Abluffahne im Nachlauf des Stalls für eine Windrichtung von  $220^\circ$  erkennen lassen. Für kleine Geschwindigkeitsverhältnisse  $I$ , d.h. im Vergleich zur Windgeschwindigkeit geringe Austrittsgeschwindigkeiten der Stallabluft wird die Abluffah-

ne unmittelbar in den Gebäudenachlauf gemischt und die Aufweitung der Abluffahne unmittelbar am Stall ist größer als bei großen Abluft-Geschwindigkeitsverhältnissen. Entsprechend verschiebt sich die Lage der maximalen, in Bodennähe zu erwartenden Geruchsstoffkonzentrationen signifikant. Für große Abluftgeschwindigkeitsverhältnisse kann sich die geruchsstoffbeladene Abluffahne nahezu unbeeinflusst vom unmittelbaren Gebäudenachlauf ausbreiten, die laterale Ausdehnung der Fahne in Gebäudenähe ist geringer.

Aufgrund der hohen Intensität des Streulichtes ist es möglich, Momentaufnahmen der Abluffahne anzufertigen und so die Instationarität der Ausbreitung zu dokumentieren. Abbildung 18 zeigt zwei entsprechende Momentaufnahmen, die bei gleicher Windgeschwindigkeit  $U_{10} = 2.5 \text{ m/s}$  in der Natur etwa 30 Sekunden Mittelungszeit entsprechen. Für identische Ausbreiterandbedingungen sind zwei signifikant unterschiedliche Ausgangspositionen der Abluffahne am Gebäude zu erkennen. Bei den nachfolgenden Konzentrationsmessungen wurden in der Nähe des Bauwerkes bistabile, im Zeitraum von mehreren Minuten in der Natur wechselnde Ausbreitungsmuster festgestellt, die durch die Visualisierungsexperimente eindeutig dokumentiert werden konnten. Die Kurzzeit-Aufnahmen lassen außerdem grobe Turbulenzstrukturen erkennen, die das Zeitverhalten der Geruchsstoffkonzentration und somit die Geruchswahrnehmung in der Natur maßgeblich bestimmen.



**Abbildung 18: Visualisierung bistabiler Ausbreitungsmuster im Nahbereich des Stalls.**

### 5.3 Vorversuche zur Ausbreitungsmodellierung und Vergleichsexperiment

In Vorversuchen für die systematischen Ausbreitungsuntersuchungen wurde zunächst geprüft, ob die mit der Windgeschwindigkeit skalierten Ergebnisse von Konzentrationsmessungen die erwartete Unabhängigkeit von der mit der Anströmgeschwindigkeit gebildeten Reynoldszahl zeigen. In Abbildung 19 ist für einen bodennahen Messpunkt innerhalb der Abluffahne in etwa 50 m Entfernung vom Stallgebäude bzw. der Emissionsquelle die normierte Messkonzentration

$$C_{NORM} = \frac{(C_{mess} - C_0)}{C_{quelle}} \cdot (U_{10} / U_{Abluft})$$

für jeweils gleiche Geschwindigkeitsverhältnisse am Austritt des Abluftkamins aufgetragen. Ab einer Windgeschwindigkeit von  $U_{10} \cong 2$  m/s bzw. einer mit der Quelhöhe gebildeten Reynoldszahl von  $Re \approx 3900$  zeigen die Ergebnisse die erwartete Reynoldszahl-Unabhängigkeit. Im Rahmen der systematischen Ausbreitungsmessungen wurde die Anströmwindgeschwindigkeit stets auf einen Wert von  $U_{10} \geq 3$  m/s eingestellt.

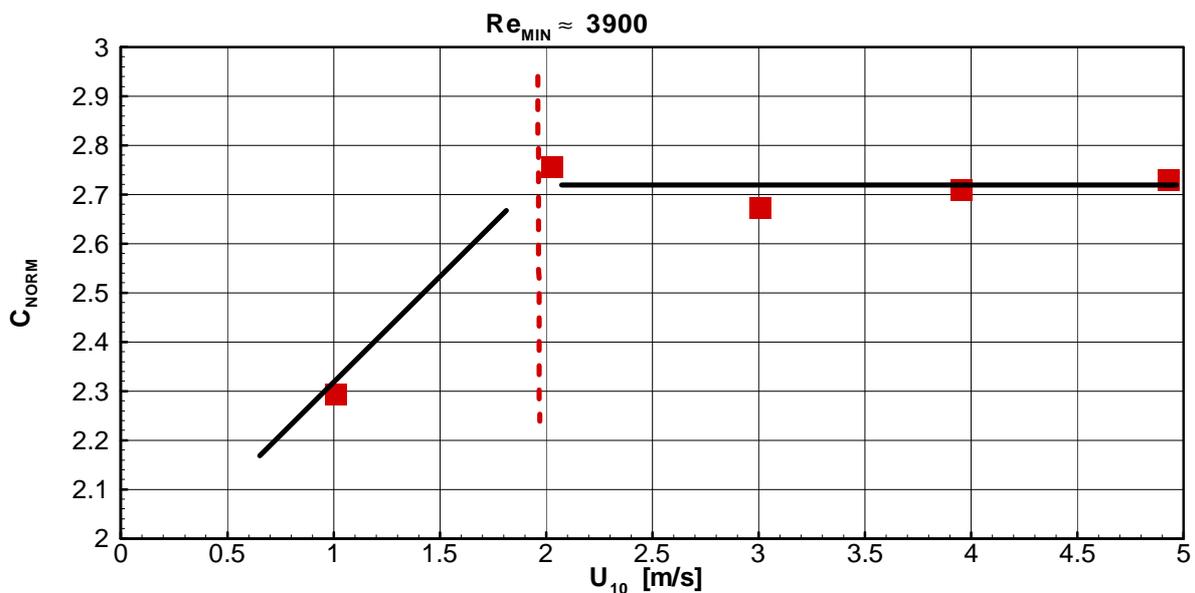


Abbildung 19: Ergebnisse des Reynoldszahl-Tests für Konzentrationsmessungen.

In einem weiteren Vorversuch wurde experimentell die zur Messung repräsentativer Konzentrationswerte mindestens erforderliche Messzeit pro Messpunkt bestimmt. Dazu wurden für 3 unterschiedliche Messpositionen innerhalb der modellierten Abluffahne lange Zeitreihen der Konzentrationsfluktuationen aufgezeichnet und anschließend für unterschiedliche Mess- bzw. Mittelungszeiten analysiert. Die berechneten statistischen Kenngrößen der Konzentrationszeitreihen konvergieren bei Vergrößerung der Mess- bzw. Mittelungszeiten gegen einen statistisch repräsentativen Langzeitwert. In Abbildung 20 sind die aus den Zeitreihen berechneten Konzentrationsmittelwerte als Funktion der Mittelungszeit im Natur- und Modellmaßstab dargestellt. Erwartungsgemäß zeigen die in unterschiedlichen Bereichen der Abluffahne gemessenen Zeitreihen auch ein unterschiedliches Verhalten bezüglich der zum Erreichen repräsentativer Mittelwerte erforderlichen Integrations- bzw. Messzeit. Während im Kernbereich der Abluffahne ein stationärer Mittelwert bereits nach etwa 30 Sekunden Messzeit im Windkanal erreicht wird, muss am Rand der Abluffahne mit

bis zu 200 Sekunden deutlich länger gemittelt werden, bis ein repräsentativer Mittelwert der Geruchsstoffkonzentration aus den Konzentrationszeitreihen berechnet werden kann. Im Ergebnis der Vorversuche wurde die Messzeit für die weiteren Konzentrationsmessungen auf einheitlich 300 Sekunden (33.3 Stunden im Naturmaßstab) pro Messpunkt festgelegt.

Weiterhin wurde auf der Grundlage der in den Vorversuchen gemessenen Zeitreihen die mindestens zu erwartende Variabilität bzw. Streuung der Ergebnisse 10-minütiger Naturmessungen abgeschätzt. Als Folge der atmosphärischen Turbulenz weisen die aus Naturmessungen berechneten 10-Minuten-Mittelwerte statistischer Kenngrößen der Luftschadstoffausbreitung eine erhebliche Streuung auf, die auf der Grundlage von Windkanal-Zeitreihen quantifiziert werden kann. Dazu wird im Windkanalversuch unter konstanten Randbedingungen eine repräsentative Zeitreihe der Tracer- bzw. Geruchsstoffkonzentration gemessen und diese anschließend in zum Beispiel einem Mittelungszeitintervall von 10 min in der Natur entsprechende Zeitabschnitte unterteilt. Für jeden der Zeitabschnitte werden wesentliche Kenngrößen der Konzentrationsfluktuationen berechnet und die Streuung der Einzelwerte um den entsprechenden repräsentativen Langzeit-Mittelwert der Kenngröße bestimmt. Die auf diese Weise bestimmte prozentuale Abweichungen der Kurzzeitmittelwerte kennzeichnen die bei Naturversuchen mindestens zu erwartende Streubreite der Ergebniswerte infolge atmosphärischer Turbulenz. In der Realität muss von einer noch größeren Streuung der Naturergebnisse ausgegangen werden, da neben der atmosphärischen Turbulenz auch der Tagesgang der Meteorologie sowie wechselnde Emissions- und Immissionsrandbedingungen die Ausbreitung und Wahrnehmung von Geruchsstoffen beeinflussen. In Abbildung 21 ist die mindestens zu erwartende Streuung der Kurzzeit-Mittelwerte der in der Natur gemessenen Tracer- bzw. Geruchsstoffkonzentrationen als Funktion der Mittelungszeit dargestellt. Abbildung 22 zeigt die gleiche Darstellung für das aus den Zeitreihen berechnete "peak-to-mean" – Verhältnis, das u.a. ein Maß für die mögliche Intensität der Geruchswahrnehmung darstellt. In beiden Darstellungen wird deutlich, dass in der Natur Gesamtmesszeiten von mehreren Tagen mit jeweils exakt gleichen Ausbreitungsrandbedingungen erforderlich wären, um die Unsicherheit der stichprobenartigen Naturmessungen auf ein für die Modellvalidierung akzeptables Niveau zu senken und die Quantifizierung der Unsicherheit der Naturergebnisse allein auf der Grundlage der Naturdaten zu ermöglichen. Besonders gravierend zeigt sich der Effekt für die höheren statistischen Momente der Zeitreihen, die wiederum die Grundlage der Geruchsbewertung in numerischen Modellen bilden.

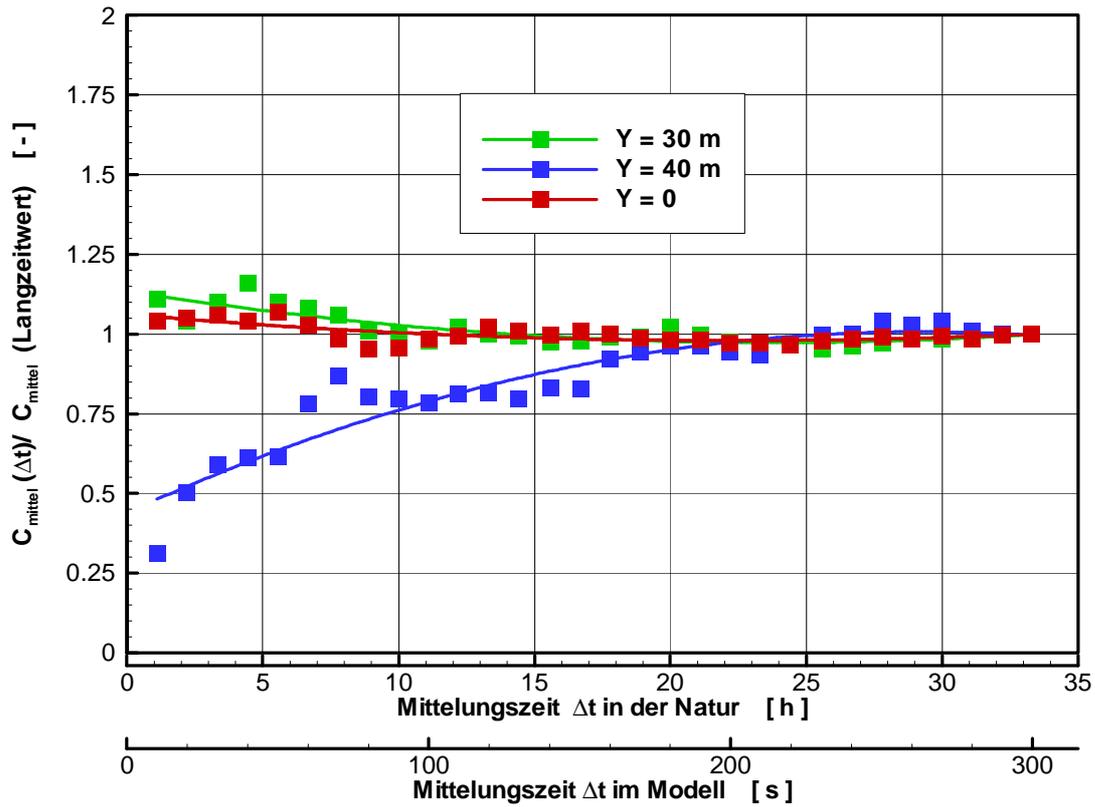


Abbildung 20: Bestimmung der Mittelungszeit bis zum Erreichen repräsentativer Konzentrationsmesswerte.

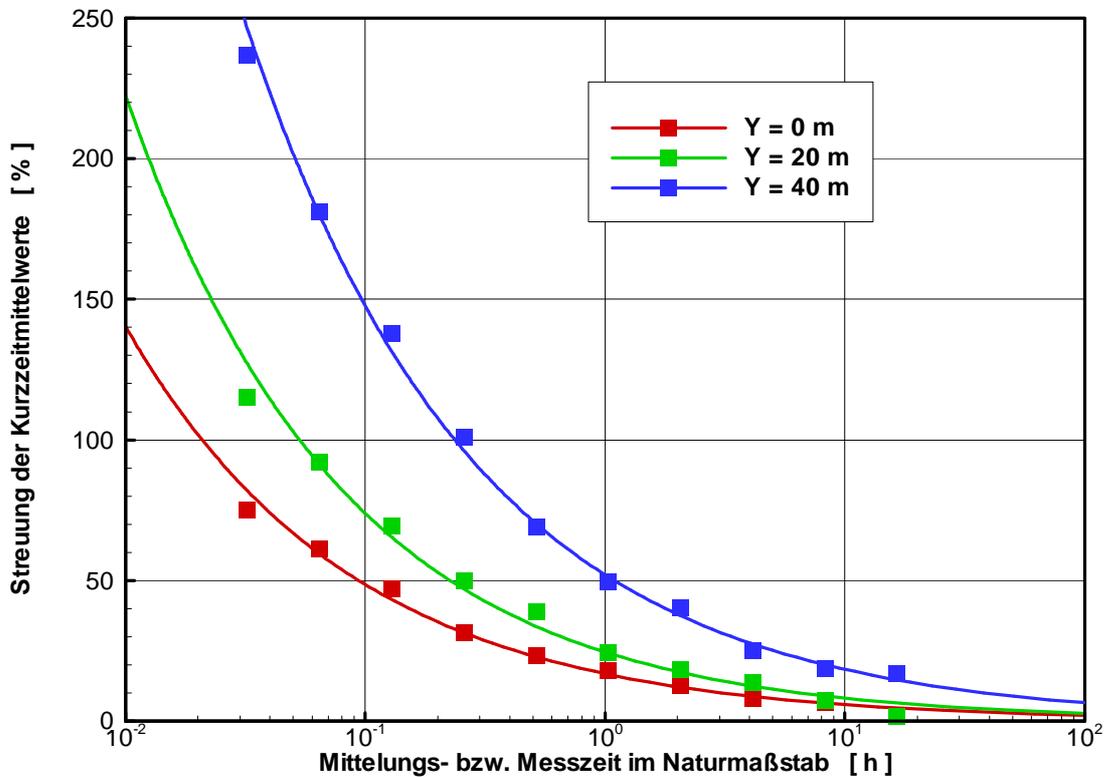
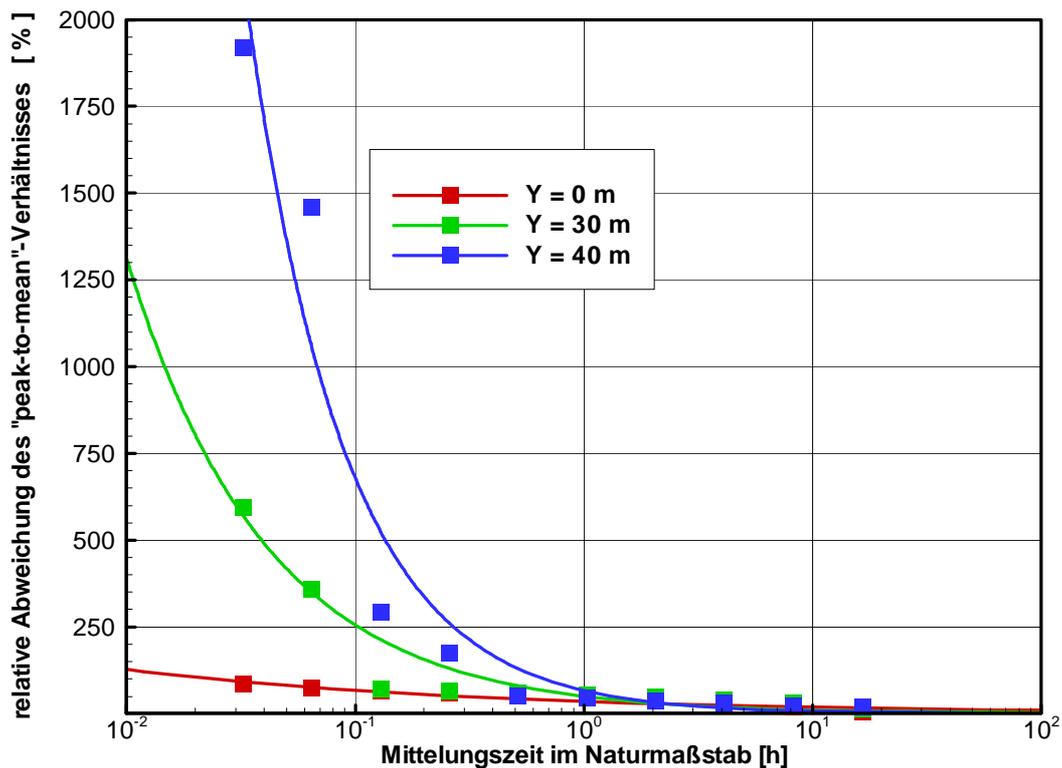


Abbildung 21: Streuung der in der Natur gemessenen Mittelwerte infolge atmosphärischer Turbulenz für eine Messentfernung von  $X = 300$  m.



**Abbildung 22:** Streuung der in der Natur gemessenen 'peak-to-mean'-Verhältnisse für unterschiedliche Messzeiten (Quellentfernung  $X = 300$  m).

Im Zuge der Vorversuche wurde abschließend ein Vergleichsexperiment durchgeführt, bei dem eine während der ersten Naturmessungen realisierte Ausbreitungssituation im Windkanalversuch simuliert wurde. Für eine Windrichtung von  $220^\circ$  und identische Geschwindigkeitsverhältnisse am Austritt des Abluftkamins I wurden Tracergasmessungen in der Abluffahne genau an den Messorten durchgeführt, an denen Tracergasmessungen auch im Feldversuch stattfanden (vergl. Bächlin et al., 2002). Die im Windkanal gemessenen relativen Konzentrationswerte wurde anschließend entsprechend der im Abschnitt 4 angegebenen Beziehung auf die Verhältnisse im Naturversuch umgerechnet. In Abbildung 23 sind für nahezu gleiche Windrichtungen in Natur und Windkanalversuch und identische Freisetzungsverhältnisse am Abluftkamin I die in 2 Lateralprofilen in der Abluffahne gemessenen mittleren Tracergaskonzentrationen von Windkanalmodell und Feldversuch gegenübergestellt. An die Windkanalmesswerte wurde zusätzlich die in den Vorversuchen ermittelte Variabilität der 10-Minuten-Mittelwerte aus der Natur angetragen. Unter Berücksichtigung der Unsicherheit der Naturergebnisse kann die Übereinstimmung von Natur- und Laborergebnissen als sehr gut bezeichnet werden. Die Ergebnisse eines zweiten Vergleichsexperiments für eine Windrichtung von  $240^\circ$  zeigen eine ähnliche gute Übereinstimmung. Es kann von einer sehr guten Übertragbarkeit der Windkanalergebnisse auf die Verhältnisse in der Natur für den untersuchten Fall neutraler atmosphärischer Schichtung ausgegangen werden.

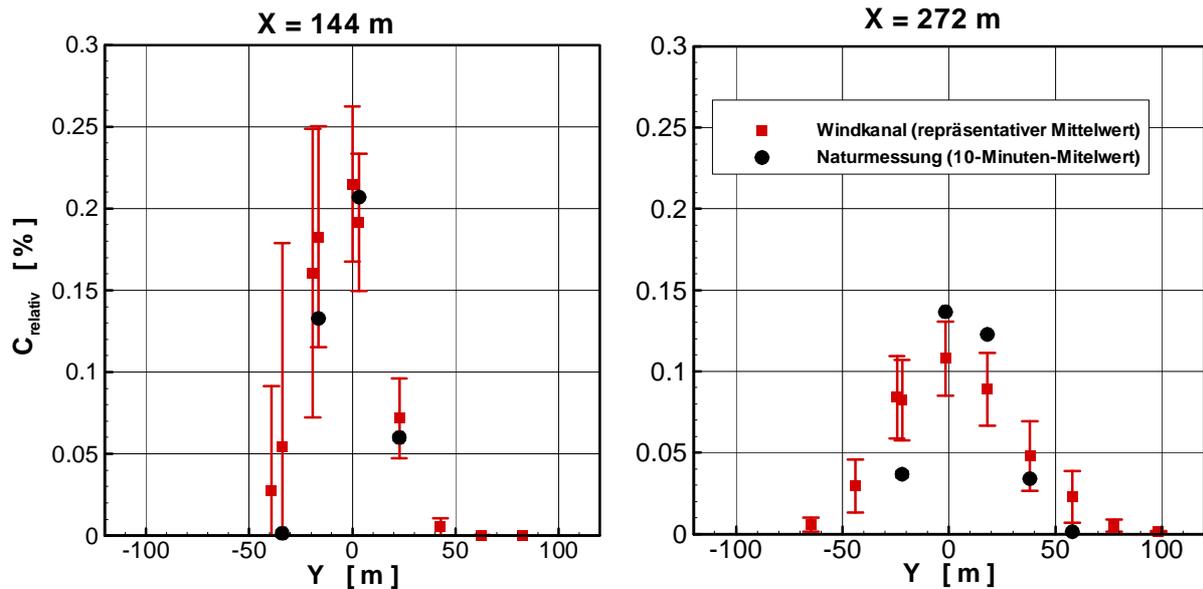


Abbildung 23: Vergleich der Ergebnisse von Tracerexperimenten in der Natur und im Windkanal.

## 5.4 Systematische Ausbreitungsmessungen

### Variation der Geschwindigkeitsverhältnisse am Abluftkamin

In einer Serie von Ausbreitungsexperimenten wurde die Abhängigkeit der Geruchsausbreitung vom Geschwindigkeitsverhältnis  $I$  am Abluftkamin I untersucht. Sowohl die Mittelwerte der Konzentration, als auch die aus den Zeitreihen berechneten Parameter der Fluktuationen von Tracer- bzw. Geruchsstoffkonzentrationen zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverhältnis am Kaminaustritt. Die Messungen dokumentieren den bereits im Rahmen der Visualisierungsexperimente festgestellten Effekt, dass die Abluffahne für  $I = 0.5$  unmittelbar in den Gebäudenachlauf der Stallanlage gelangt, während sich bei einem Geschwindigkeitsverhältnis von  $I = 2$  die mittlere Abluffahne im wesentlichen außerhalb des durch die Gebäude beeinflussten Windfeldes ausbreitet. Im Rahmen der Feldversuche wurden Geschwindigkeitsverhältnisse von  $I = 0.5 \dots 1$  gemessen, so dass von einer deutlich unterschiedlichen Beeinflussung der Abluffahne durch die Gebäude während der einzelnen Feldmessreihen ausgegangen werden muss. In Abbildung 24 sind die für eine Windrichtung von  $220^\circ$  und die untersuchten Geschwindigkeitsverhältnisse sich einstellenden longitudinalen und lateralen Profile der Konzentrationsmittelwerte dargestellt. An eine der Kurven wurde wiederum die aus den Einzelzeitreihen berechnete, mindestens zu erwartende Variabilität der 10-Minuten-Messwerte aus der Natur angetragen. Abbildung 25 zeigt exemplarisch die aus den gleichen Messreihen berechnete Intermittenz des Konzentrationssignals. Der vollständige Referenzdatensatz enthält alle weiteren aus den gemessenen Zeitreihen berechneten Parameter.

### Variation des Emissionsortes

In einer weiteren Parameterstudie wurde der Emissionsort der Geruchsausbreitung systematisch variiert. In den Einzelversuchen wurde aus Abluftkamin I und II separat sowie aus beiden Kaminen gleichzeitig Tracergas emittiert und die Abluffahne entlang der in Abbildung 10 angegebenen Messprofile vermessen. Exemplarisch dokumentieren die in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellten, in unterschiedlicher Quellentfernung gemessenen Vertikalprofile der mittleren Geruchsstoffkonzentration und

der Intermittenz des Geruchssignals den Einfluss der Lage des Emissionsortes auf die Fahnenausbreitung. Im Nahfeld des Stallgebäudes ist deutlich die Ausbildung einer vom Boden abgehobenen Geruchsfahne zu erkennen, wenn unter sonst gleichen Ausbreitungsrandbedingungen Geruchsstoffe aus dem Abluftkamin II freigesetzt werden. Die gemessenen Tracergas- bzw. Geruchsstoffkonzentrationen verdoppeln sich nahezu, wenn aus beiden Kaminen gleichzeitig mit jeweils gleichen Abluftvolumenströmen (d.h. gleichem Geschwindigkeitsverhältnis im Kaminaustritt) emittiert wird. Die aus den auf die Verhältnisse in der Natur umgerechneten Geruchsstoffkonzentrationszeitreihen bestimmte Intermittenz des Konzentrationssignals lässt mit zunehmendem Abstand vom Emissionsort einen deutlichen Unterschied zwischen der Freisetzung aus je einem der beiden Abluftkamine und dem gleichzeitigen Betrieb beider Kamine erkennen. Im Gruppenbetrieb ist die beobachtete Intermittenz des Geruchssignals in 300 m Entfernung von der untersuchten Stallanlage nahezu 10 mal größer als beim Betrieb eines Einzelkamins.

#### Variation der Windrichtung

Zur Untersuchung des Einflusses der Windrichtung auf die Geruchsfahne wurde das Stallmodell auf einer weiteren Modellplatte ohne Topographie aufgebaut. Der Vergleich der am Modell mit Geländestruktur gemessenen Geruchsstoffkonzentrationen mit entsprechenden Ergebnissen des Modells ohne Topographie rechtfertigt die Vernachlässigung der Geländestruktur im Rahmen der systematischen Variation der Windrichtung. Die in Abbildung 28 dargestellten Profile der mittleren relativen Geruchsstoffkonzentration zeigen keine signifikanten Unterschiede. In Abbildung 29, Abbildung 30 und Abbildung 31 ist die Abhängigkeit der mittleren relativen Geruchsstoffkonzentration sowie der Intermittenz und der Persistenz des Geruchssignals von der Windrichtung dargestellt. In jeder Abbildung ist die Windrichtungsabhängigkeit exemplarisch für 3 bodennahe Aufpunkte innerhalb der Abluffahne aufgetragen. Es zeigt sich eine ausgeprägte Windrichtungsabhängigkeit der Geruchsstoffausbreitung für alle dargestellten Parameter der Abluffahne. Die zum Teil sehr großen Schwankungen der Fahnenparameter innerhalb kleiner Winkelbereiche lassen die Kalibrierung von Geruchsausbreitungsmodellen auf der Grundlage einzelner Begehungsergebnisse fragwürdig erscheinen, solange das entsprechende Modell nicht explizit die Änderung der Strömungsverhältnisse am Gebäude bei Änderung der Windrichtung abbildet. Es kann als Maß für die Güte der im Verbundprojekt durchgeführten Modellversuche und Tracergasexperimente in der Natur gelten, dass gerade für einen Bereich mit ausgeprägter Windrichtungsabhängigkeit der Untersuchungsergebnisse (etwa 220°) eine sehr gute Übereinstimmung von Naturmessung und Modellversuch erzielt wurde.

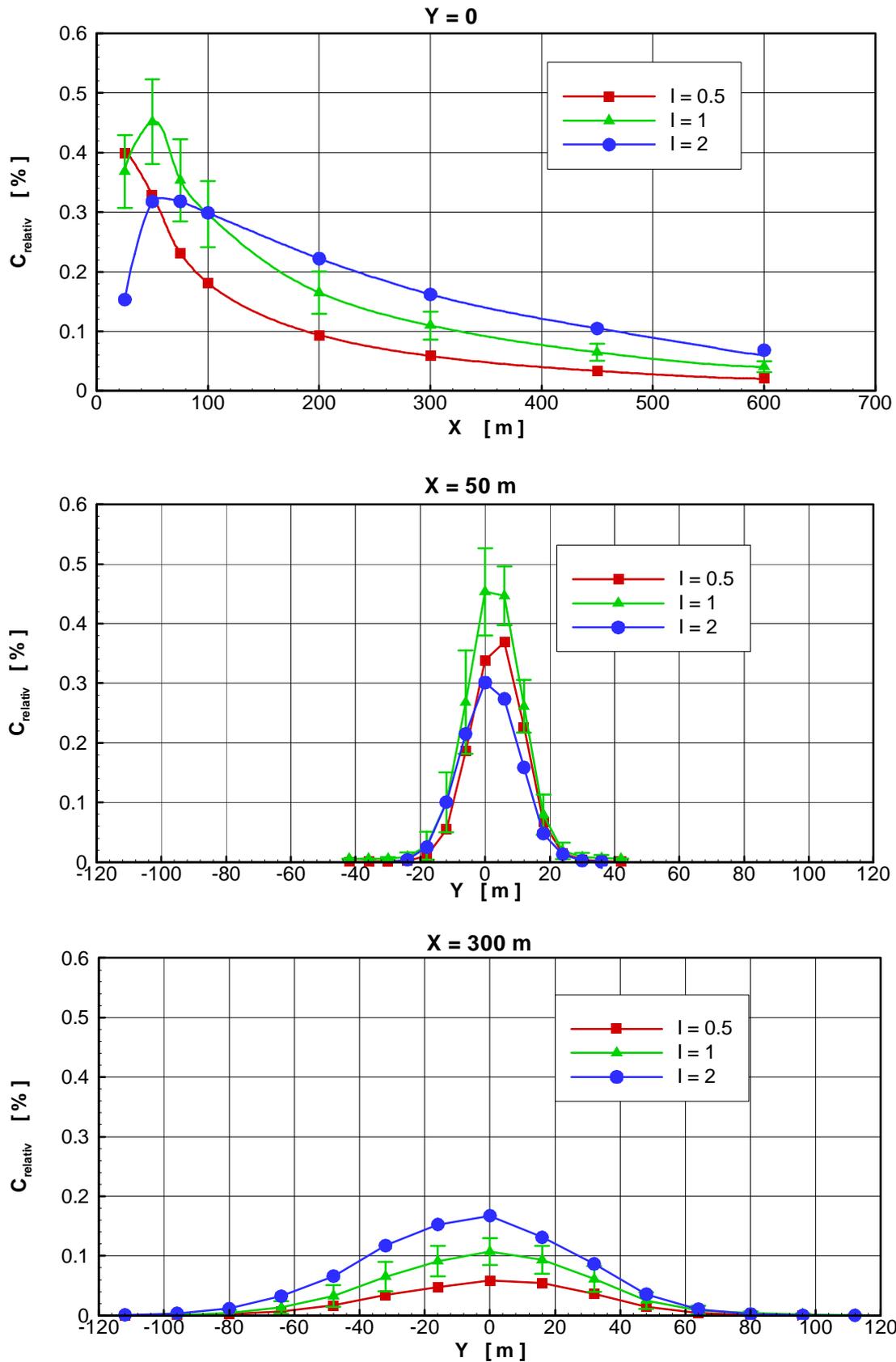


Abbildung 24: Einfluss des Geschwindigkeitsverhältnisses am Austritt des Abluftkamins auf die mittlere Konzentrationsverteilung in der Abluffahne.

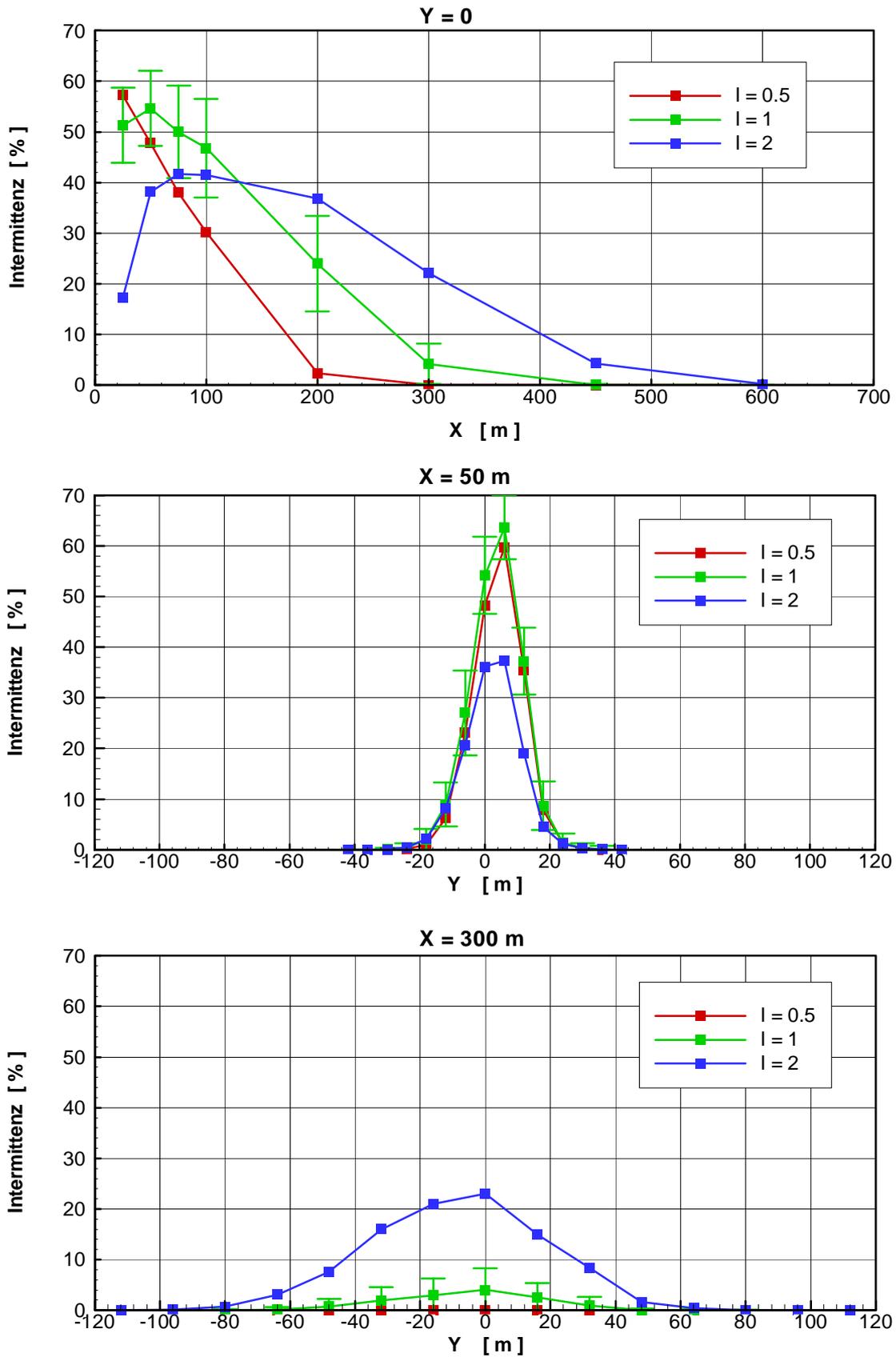


Abbildung 25: Einfluss des Geschwindigkeitsverhältnisses am Austritt des Abluftkamins auf die Intermittenz des Geruchssignals in der Abluffahne.

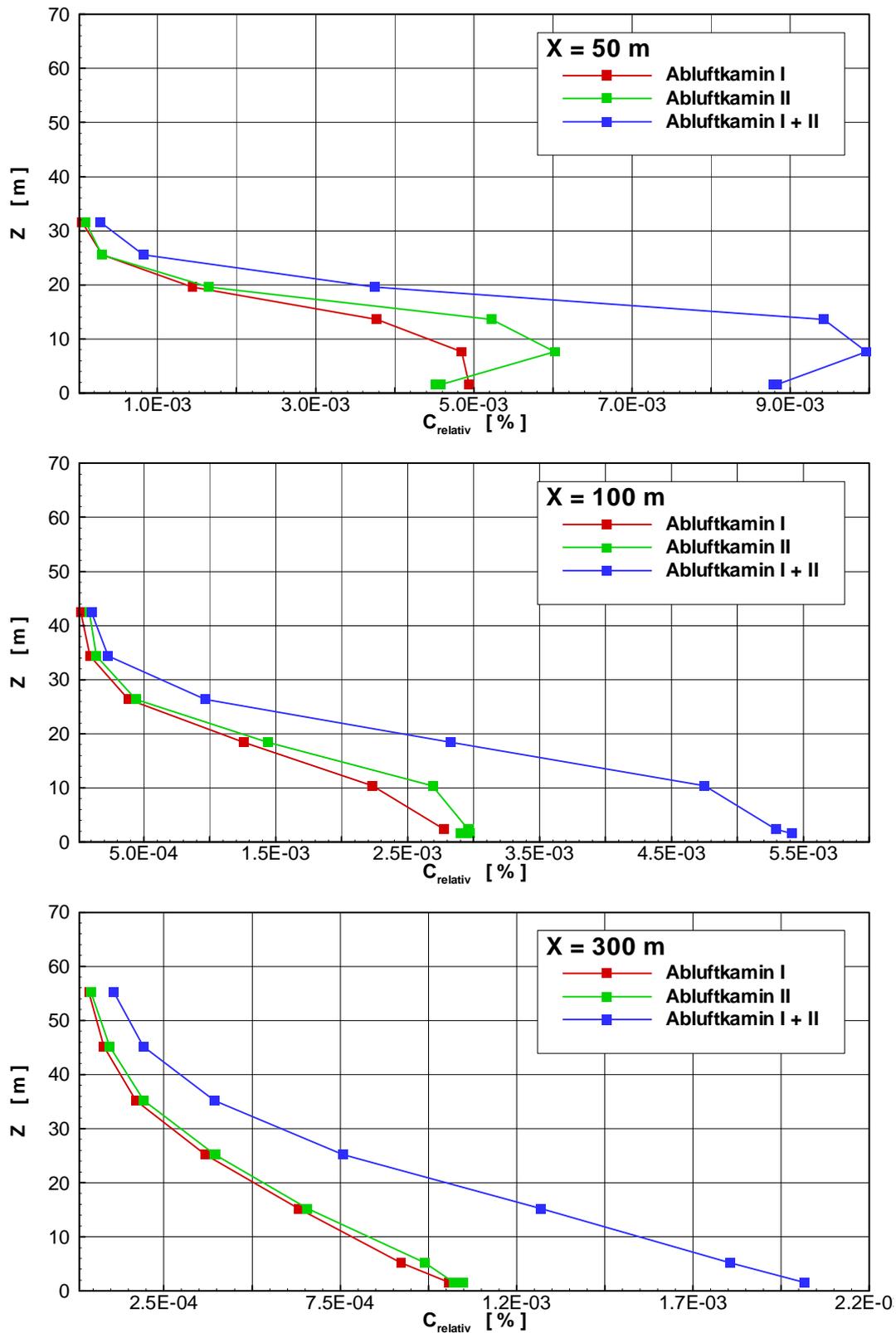


Abbildung 26: Einfluss des Emissionsortes auf die Vertikalprofile der mittleren Geruchsstoffkonzentration in der Abluffahne.

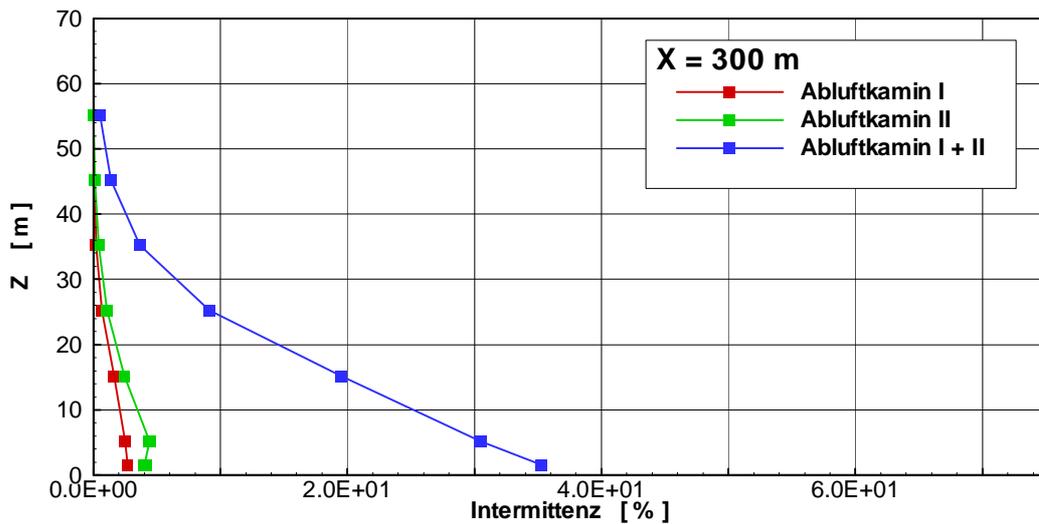
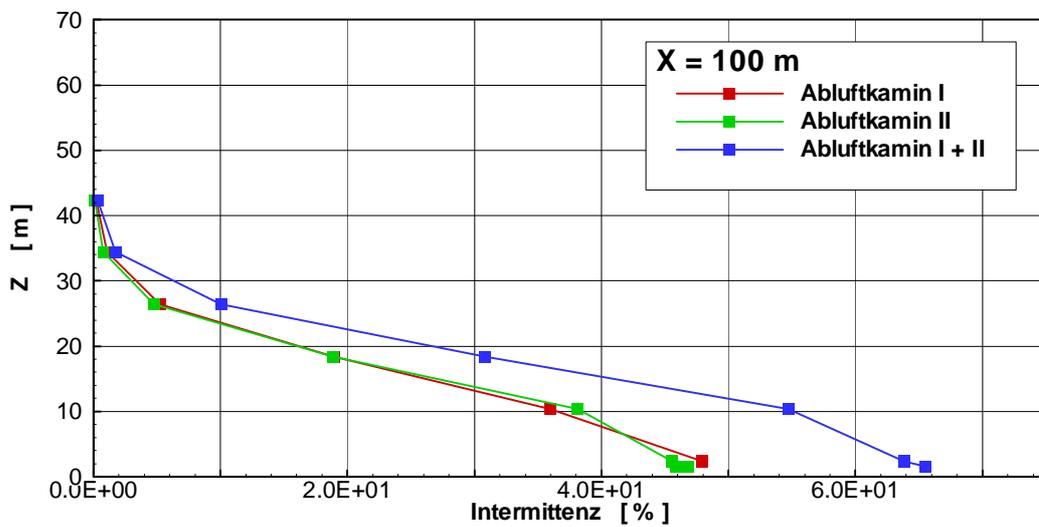
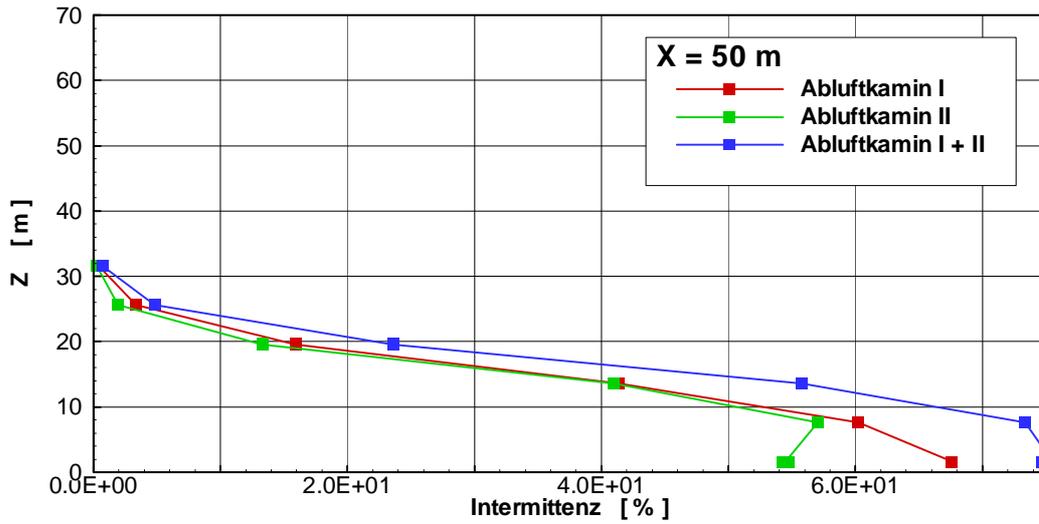


Abbildung 27: Einfluss des Emissionsortes auf die Vertikalprofile der Intermittenz des Konzentrationssignals in der Abluffahne.

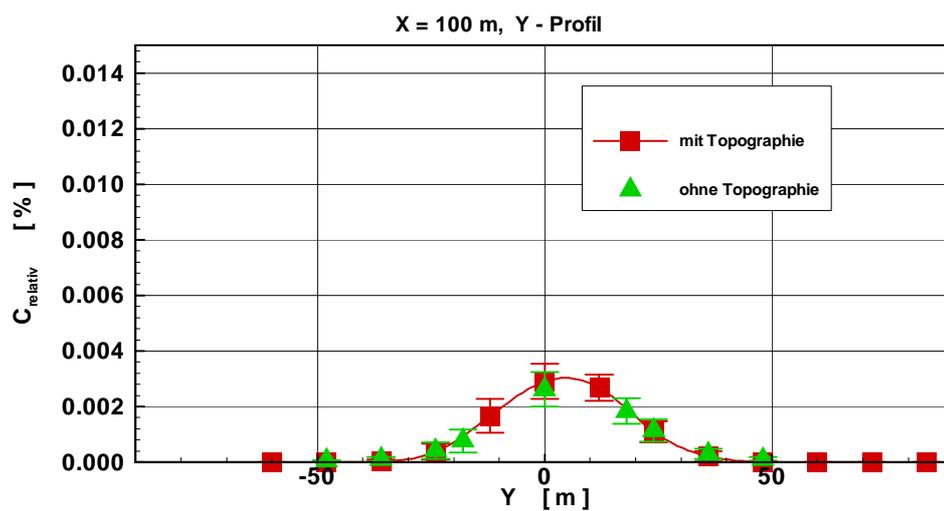
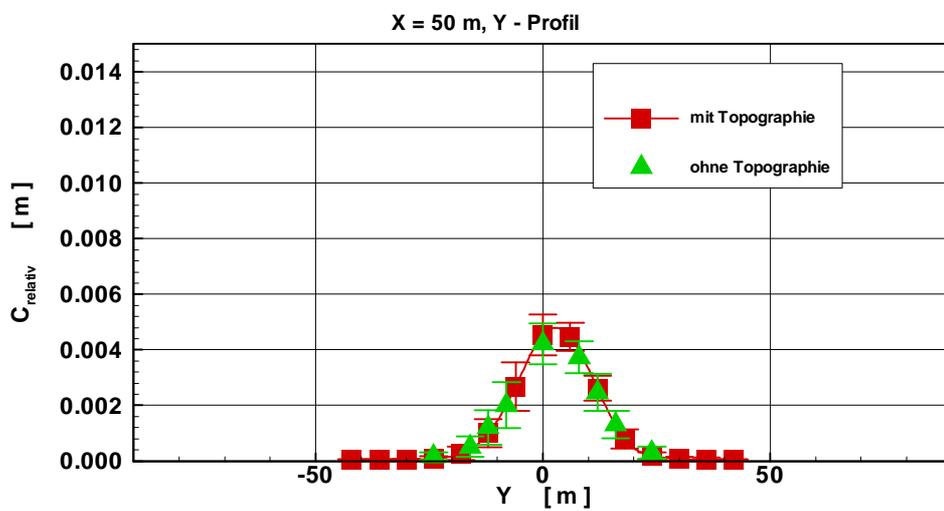
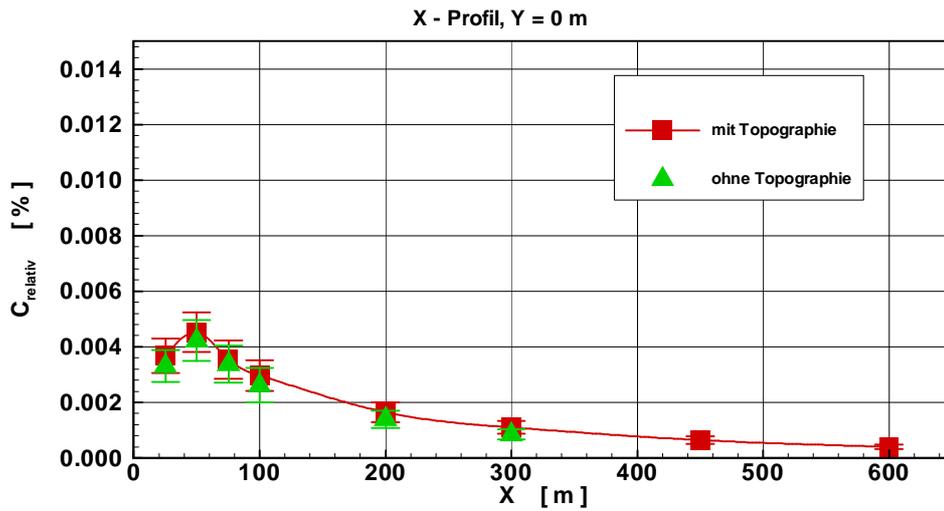


Abbildung 28: Einfluss der Geländestructur auf die in der Abluffahne gemessenen mittleren Geruchsstoffkonzentrationen.

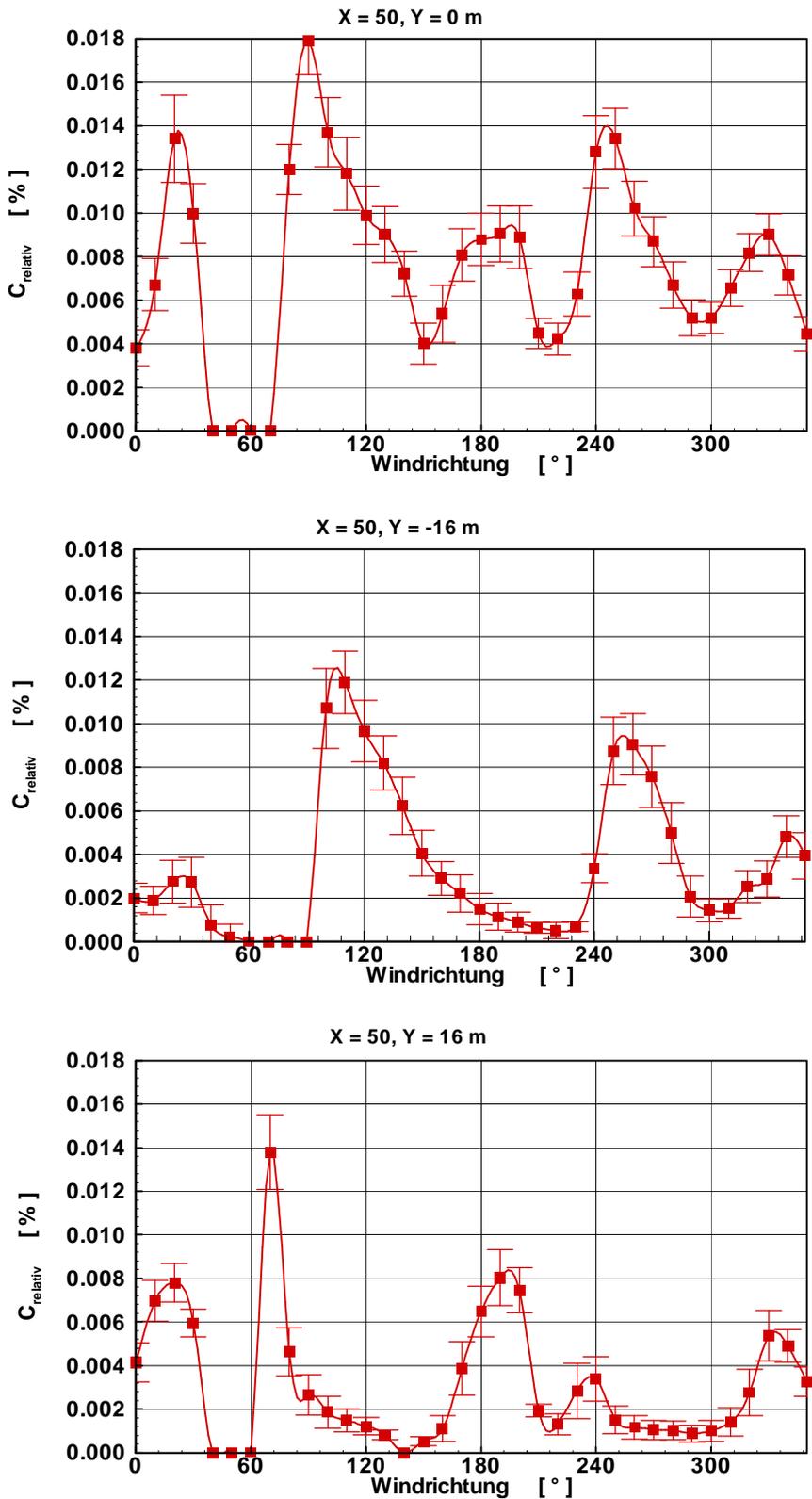


Abbildung 29: Windrichtungsabhängigkeit der mittleren Geruchsstoffkonzentrationen für 3 Messpositionen innerhalb der Abluffahne.

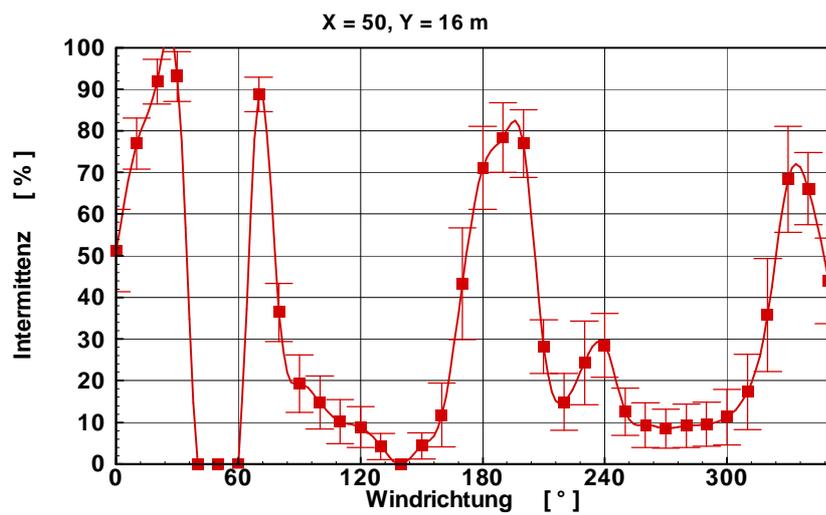
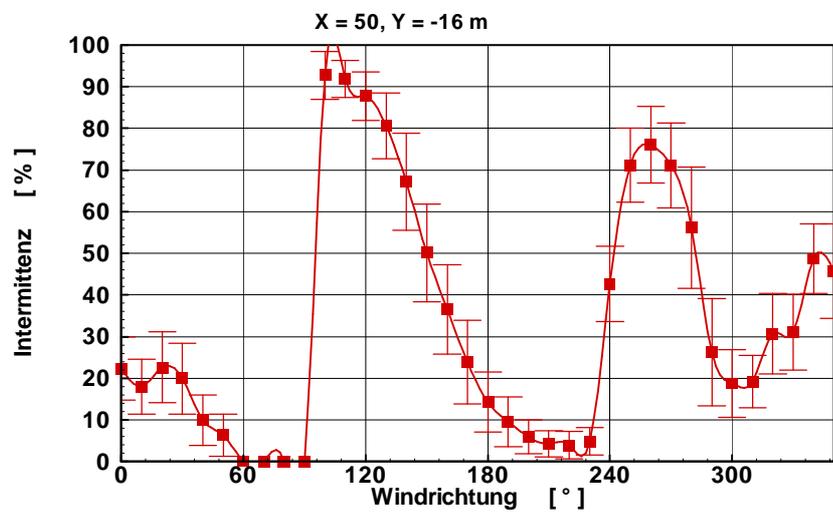
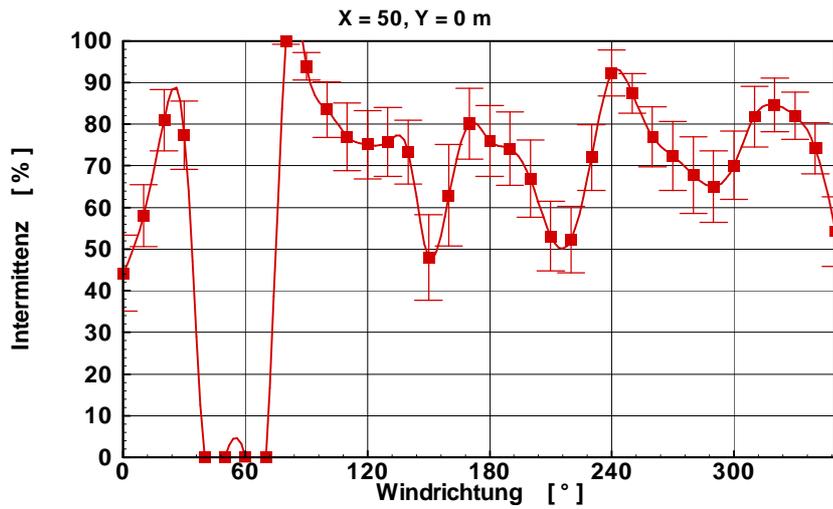


Abbildung 30: Windrichtungsabhängigkeit der Intermitenz des Konzentrationssignals für 3 Messpositionen innerhalb der Abluffahne.

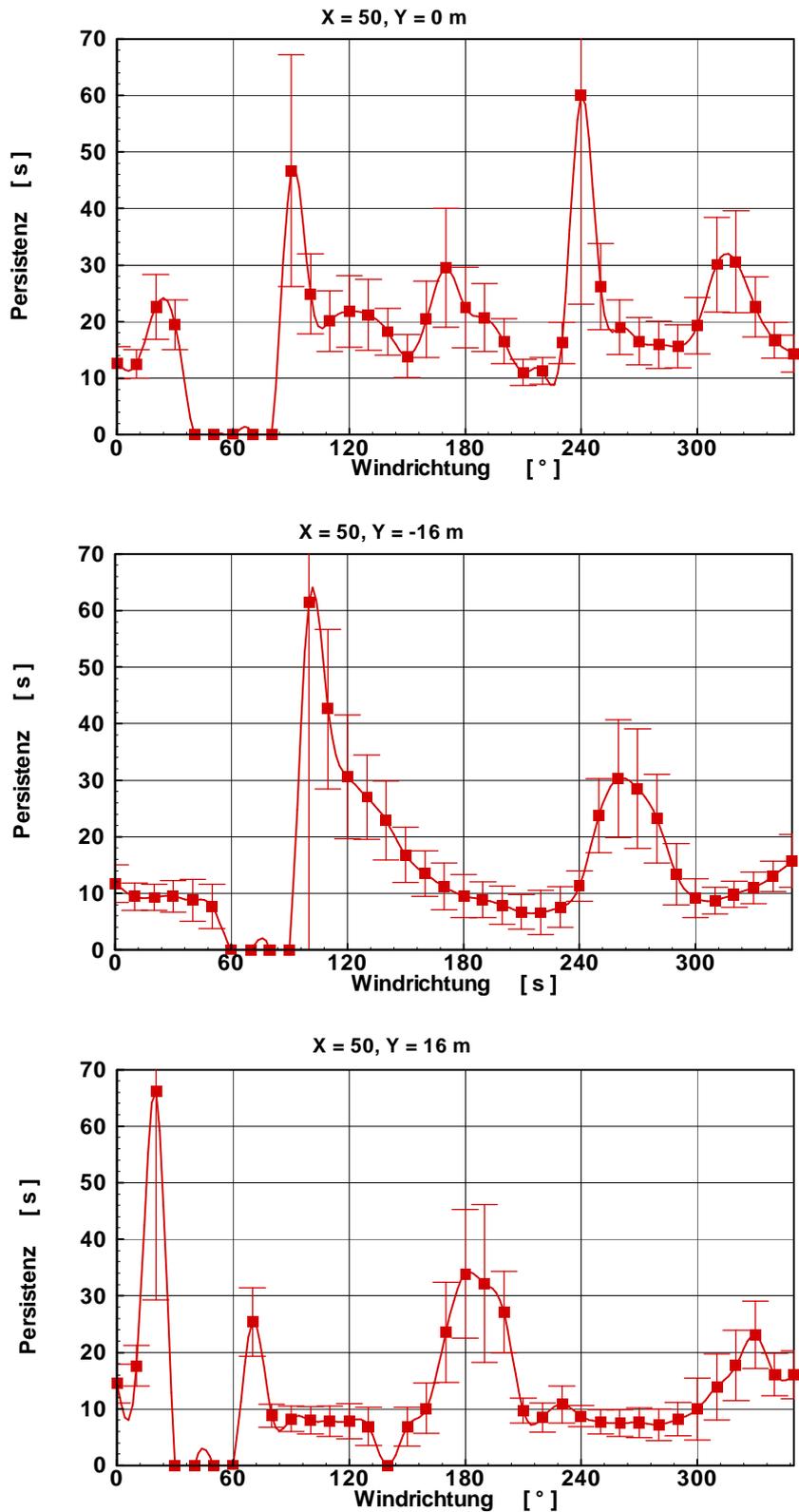


Abbildung 31: Windrichtungsabhängigkeit der Persistenz des Geruchssignals für 3 Messpositionen innerhalb der geruchsstoffbeladenen Abluftfahne.

## 5.5 Datenaufbereitung und Publikation der Referenzdatensätze im Internet

Alle Versuchsergebnisse wurden in 4 vollständig dokumentierten Referenzdatensätzen zusammengefasst und werden in die bereits bestehende Validierungsdatenbank CEDVAL ([www.mi.uni-hamburg.de/cedval](http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval)) übernommen. CEDVAL (Compilation of Experimental Data for VALidation purposes) wurde im Rahmen eines vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsprojektes (Schatzmann/Leitl, 2001) am Meteorologischen Institut der Universität Hamburg eingerichtet und stellt qualitativ abgesicherte Referenzdatensätze für die Validierung mikroskaliger Strömungs- und Transportmodelle bereit (Leitl, 2000). CEDVAL wird weltweit von einer Reihe von Modellentwicklern genutzt und soll auch zukünftig durch weitere Datensätze ergänzt und erweitert werden.

Die im Projekt erstellten Datensätze bilden eine eigene Kategorie von Vergleichsdatensätzen, da das Datenmaterial zum Teil vom Standard der Datenbank abweicht. So konnten innerhalb des finanziellen Projektrahmens keine flächendeckenden Strömungsmessungen im Nahfeld der Stallanlage realisiert werden, die die zuverlässige Interpretation der Ergebnisse von Ausbreitungsmessungen und entsprechenden Modellvergleichen erleichtern würden. Um die Übersichtlichkeit der umfangreichen Datenmenge zu gewährleisten wurden 4 Einzeldatensätze erstellt:

- D1-1 systematische Untersuchung der Windrichtungsabhängigkeit (ohne Topographie)
- D1-2 räumlich hochaufgelöste Messungen in der Abluffahne für die Windrichtungen 220° und 240° sowie 3 Geschwindigkeitsverhältnisse am Austritt des Abluftkamins (mit Topographie)
- D1-3 systematische Variation des Geschwindigkeitsverhältnisses am Austritt des Abluftkamins für Windrichtung 220° (mit Topographie)
- D1-4 systematische Variation des Emissionsortes bei Windrichtung 220° (mit Topographie)

Die 4 Datensätze bestehen aus jeweils mehreren Einzeldateien, die entsprechend der CEDVAL-Namenskonvention wie folgt bezeichnet sind:

- D1-X-**AF**.XX: gemessenes Windprofil der modellierten Grenzschichtströmung
- D1-X-**CO**.XX: Kontaktinformation für Rückfragen zum Datensatz
- D1-X-**DT**.XX: Kurzdokumentation zum Versuch, zum Versuchsaufbau sowie Hinweise zu den in den Datensätzen verwendeten Bezeichnungen, Variablen und Abkürzungen
- D1-X-**EE**.XX: Abschätzung der Messunsicherheit der verwendeten Messgeräte
- D1-X-**PT**.XX: zur physikalischen Charakterisierung der Modellgrenzschicht und des Ausbreitungsvorganges erforderliche Parameter der Versuche
- D1-X-**RE**.XX: experimenteller Nachweis der Reynoldszahl-Unabhängigkeit der Modellergebnisse
- D1-X-**SS**-X.XX: Zeichnungen/Skizzen/Bilder vom Versuchsaufbau
- D1-X-**TR**.XX: Messergebnisse / Referenzdaten

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Verbundprojektes BWE 2000 "Geruchsfreisetzung und –ausbreitung" wurde ein umfassender, auf den Ergebnissen von Natur- und Laboruntersuchungen basierender Referenzdatensatz für die Modellierung der Geruchsstoffausbreitung aus einer Schweinemastanlage erstellt. Neben Untersuchungen zum Lagerverhalten von Geruchsproben, Messungen der Geruchsstofffreisetzung in der Stallanlage sowie Fahnenbegehungen und Tracer-Ausbreitungsexperimenten in der Natur wurden systematische Ausbreitungsuntersuchungen im "Blasius"-Grenzschichtwindkanal des Meteorologischen Instituts der Universität Hamburg durchgeführt. Die aus den Windkanaldaten erstellten Referenzdatensätze vervollständigen bzw. erweitern die in ihrer Aussagefähigkeit beschränkten und für die Modellvalidierung nur bedingt geeigneten Ergebnisse der Feldexperimente. Auf der Grundlage der im Windkanalversuch gewonnenen Ergebnisse ist die Bewertung der Repräsentativität der stichprobenartig durchgeführten Feldmessungen möglich. Windkanalversuche stellen die für Modellvergleiche essentielle Verbindung zwischen den von numerischen Modellen üblicherweise berechneten Größen (mittlere Geruchsstoffkonzentration und mittlere Schwankung der Geruchsstoffkonzentration) und den Ergebnissen zeitlich begrenzter Feldmessungen (Begehungen, Tracerexperimente) her. Zusätzlich liefern die durchgeführten systematischen Modellexperimente vollständige Vergleichsdatensätze, mit denen die Reaktion eines numerischen Modells auf systematisch variierte Ausbreitungsrandbedingungen festgestellt und das Modellverhalten grundlegend bewertet werden kann. Alle zur physikalisch eindeutigen Charakterisierung der Ausbreitungssituationen erforderlichen Randbedingungen wurden im Windkanalversuch mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung gemessen. Sie stehen als Eingabedaten für Modellrechnungen direkt zur Verfügung. Mit Abschluss des Projektes steht ein in Umfang, Vollständigkeit und Qualität bisher einmaliger Referenzdatensatz für die Geruchsausbreitungsmodellierung zu Verfügung.

## 7 Literatur

Leitl, B. (2000): Validation Data for Microscale Dispersion Modelling. EUROTRAC newsletter, no. 22, autumn 2000, pp. 28-32

VDI 3783/12 (2000): Physikalische Modellierung von Strömungs- und Ausbreitungsvorgängen in der atmosphärischen Grenzschicht, VDI-Richtlinie 3783, Blatt 12, Umweltmeteorologie im VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b

Pascheke, F. (2000): Analyse zeitlich hochaufgelöster Windmessungen in einer städtischen Grenzschicht und Reproduktion wesentlicher Turbulenzeigenschaften im Grenzschichtwindkanal. Diplomarbeit im Fach Meteorologie, Fachbereich Geowissenschaften der Universität Hamburg, November 2000

Brose, G.; Hartung, E.; Jungbluth, T. (1002): Ermittlung eines Datensatzes zur dynamischen Geruchsfreisetzung aus Schweineställen und deren Auswirkung auf das Ausbreitungsverhalten von Geruchsstoffen. BWPlus-Projekt BWE20004, Statusbericht für das Projektjahr 2001, <http://bwplus.fzk.de/>

Richter, C.-J.; Enderle, K.-H.; Papamichail, N. (2002): Untersuchung der Lagerfähigkeit von Geruchsproben. BWPlus-Projekt BWE20002, Statusbericht für das Projektjahr 2001, <http://bwplus.fzk.de/>

Bächlin, W.; Rühling, A.; Lohmeyer, A. (2002): Bereitstellung von Validierungsdaten für Geruchsausbreitungsmodelle – Naturmessungen. BWPlus-Projekt BWE20003, Statusbericht für das Projektjahr 2001, <http://bwplus.fzk.de/>

ESDU, (1985): Characteristics of Atmospheric Turbulence near the Ground. Engineering Sciences Data Unit, Item No. 85020, London.

Kaimal, J.C.; Wyngaard, J.C.; Izumi, Y.; Cote, O.R. (1972): Spectral characteristics of surface layer turbulence. Quart. J. Roy. Met. Soc. 98 (1972) No. 417, pp. 563-589.

Simiu, E.; Scanlan, R.H. (1986): Wind Effects on Structures – Part A: The Atmosphere. Jon Wiley & Sons, Inc.

Schatzmann, M.; Leitl, B. (2001): Qualitätssicherung von Modellen für die Ausbreitung von Luftschadstoffen in der Atmosphäre – Sichtung, Bewertung und Erzeugung von Datensätzen für die Modellvalidierung. Forschungsbericht 296 43 831, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.