

**Lehrstuhl für Statik  
der Technischen Universität München**

# **Simulation leichter Flächentragwerke in einer numerisch generierten atmosphärischen Grenzschicht**

**Alexander Michalski**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Gerhard H. Müller

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Manhart
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek,  
Universität Stuttgart

Die Dissertation wurde am 29.09.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 16.04.2010 angenommen.



Schriftenreihe des Lehrstuhls für Statik TU München

Band 14

**Alexander Michalski**

**Simulation leichter Flächentragwerke in einer  
numerisch generierten atmosphärischen Grenzschicht**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9317-8

ISSN 1860-1022

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Zusammenfassung

Windbeanspruchungen bilden für textile Konstruktionen aufgrund ihres geringen Eigengewichts die bemessungsmaßgebende Belastung, wobei insbesondere instationäre turbulente Windfluktuationen bei diesen Tragwerken zu Schwingungserscheinungen führen können. Die Erfassung der dynamischen Bauwerksreaktionen ist aufgrund des speziellen Tragverhaltens, der Werkstoffeigenschaften und der stark ausgeprägten Wechselwirkung von Struktur und Fluid äußerst komplex. Das Simulationswerkzeug der Fluid-Struktur-Wechselwirkungssimulation bietet im Vergleich zu den gängigen Methoden der Ingenieurspraxis, die Möglichkeit, Kraft- und Verformungszustände wirklichkeitsnah zu erfassen. Für dieses Berechnungskonzept ist es notwendig, das turbulente Windfeld stromaufwärts des zu untersuchenden Bauwerks innerhalb einer numerischen Strömungsumgebung zu modellieren. Diese Problematik wurde in bisherigen numerischen Simulationen nur andeutungsweise behandelt. Ziel der Arbeit ist es, diese Lücke zu schließen. Es wird eine Methode, wie eine atmosphärische Grenzschichtströmung innerhalb einer numerischen Strömungssimulation mit einer für die Gebäudeaerodynamik ausreichenden Genauigkeit realisiert werden kann, entwickelt und umgesetzt. Das Strömungsproblem wird hier durch die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen und die Turbulenz durch den Ansatz der Grobstruktursimulation modelliert.

Die Grundlagen atmosphärischer Windströmungen in Zusammenhang mit der Tragwerksanalyse werden aufbereitet und vor allem die statistische Beschreibung des mikrometeorologischen Teil des Windspektrums detailliert diskutiert. In dieser Arbeit wird die künstliche Erzeugung von Windgeschwindigkeitszeitreihen, ausgehend von statistischen Beschreibungen turbulenter Windströmungen, eingesetzt. Es werden zwei Verfahren, mit denen zeitlich und räumlich aufgelöste Windfelder erzeugt werden, umgesetzt: die Methode der autoregressiven Prozesse und die Methode der Wellenüberlagerung mithilfe der dreidimensionalen Fourier-Transformation im Wellenzahlbereich auf Basis eines Spektraltensors für atmosphärische Turbulenz. Es wird ein Kopplungsmodul entwickelt, das die Übergabe sowie die räumliche und zeitliche Interpolation der extern erzeugten Windsignale an das numerische Berechnungsgitter regelt. Windfelder werden mittels beider Verfahren generiert und am Einströmrand einer Grobstruktursimulation aufgeprägt. Die so erhaltene numerische Simulation atmosphärischer Grenzschichtströ-

---

mung wird in Beispielen eingehend getestet und bewertet.

Die Simulationsumgebung bestehend aus Windsimulation und der Fluid-Struktur-Kopplung wird für die Ermittlung der dynamischen Tragwerksantwort eines 29m-Schirms unter Windbelastung angewendet. Die in einer CFD-Simulation ermittelten Druckschwankungen werden mit Ergebnissen am starren, kleinskaligen Schirmmodell aus Windkanaluntersuchungen verglichen. Anschließend wird die Validität der numerischen FSI-Methode anhand eines Feldexperiments gezeigt. Innerhalb dieses Versuchs wird das dreidimensionale turbulente Windfeld sowie Kräfte und Verformungen am 29m-Schirmprototyp gemessen und mit FSI-Simulationsergebnissen verglichen. Die hierfür notwendige numerische Erzeugung eines natürlichen, gemessenen Windfeldes demonstriert die Anwendbarkeit und Leistungsfähigkeit der entwickelten Methode.

---

## Abstract

The sensitivity of membrane structures to wind loads due to their flexibility and the reduction of inertial masses raises the question of their behavior under natural wind conditions. Particularly transient wind load could lead to dynamic amplification of the structural response. The assessment of dynamic response of membrane structures is extremely complex due to their special load carrying behavior, their material properties and their distinct structural interaction with flow induced effects. Deterministic fluid-structure interaction simulation could overcome simplifications and limitations of existing approaches, especially small scale wind tunnel tests. It allows the assessment of all relevant structural and fluid phenomena. These simulations need as an input the space and time correlated wind velocity fields as they occur in nature, which are to be applied upstream of the designed object.

The present study aims the development of numerical methods that allow a realistic description of atmospheric boundary layer flow within a computational fluid dynamics simulation at a level of complexity that is necessary for building aerodynamic applications. The flow problem is modelled through the incompressible Navier-Stokes equations. Wind turbulence is modelled with Large Eddy Simulations.

The fundamentals of atmospheric boundary layer flow within the field of building aerodynamics is worked out. In particular the emphasis is put on the statistical description of the micrometeorological part of the wind spectrum. The present approach presents the numerical simulation of time and space correlated wind fields. This is done based on the processing of statistical meteorological data. More specifically, auto-regressive processes and wave superimposition techniques are evaluated within this study. Threedimensional inverse Fast-Fourier Transformation techniques where the atmospheric surfacelayer turbulence is based on spectral tensors are realized to improve drawbacks of autorecursive filtering methods.

A specific wind module is built integrated to a CFD software, which contains the generation of multi-correlated wind velocity time series and specific interpolation routines. Synthetic wind velocity fields are generated and applied at the inflow section of a LES approach. The numerical simulation of atmospheric boundary layer flow is worked out and tested within several examples.

The presented methodology of the fluid structure interaction simulation in-

---

cluding natural wind conditions is applied to assess the dynamic response of an umbrella structure subject to transient wind loads. Fluctuating pressure distributions on the membrane surface resulting from CFD-Simulations are compared to wind tunnel tests. Following, the validity of the numerical FSI methodology is demonstrated at a built 29 m umbrella prototype. Within these test the three-dimensional turbulent wind field is measured with sonic anemometers up-stream and simultaneously the forces and deflections of the structure are determined and compared to numerical FSI simulations.

The performance and the effectiveness of the elaborated wind simulation methodology is demonstrated through the numerical generation of a specific wind environment at test site and the comparison of the numerical and experimental results.

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2004-2009 während meiner Tätigkeit als freier Mitarbeiter im Architekturbüro Rasch + Bradatsch, Stuttgart.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Bletzinger möchte ich ganz herzlich für seine Bereitschaft danken, mich als externen Doktoranden in seinem Lehrstuhl aufzunehmen und mir so in interessierter Zusammenarbeit einen Rahmen für einen intensiven wissenschaftlichen Austausch zu schaffen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Manhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek danke ich herzlich für ihr Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme der Zweitgutachten. Ihre Bereitschaft, als Gutachter im Rahmen des Promotionsverfahrens tätig zu sein, hat mich sehr gefreut. Ebenso geht mein Dank an Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Gerhard H. Müller für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission.

Ganz herzlich möchte mich bei ich Herrn Jürgen Bradatsch für die vertrauensvolle Förderung und Unterstützung bedanken. Er hat mir mit seiner außergewöhnlichen Offenheit ein interdisziplinäres Umfeld zwischen Architekten und Ingenieuren geboten und eine fachübergreifende Herangehensweise bei der Lösung von Bauaufgaben nahe gebracht. Vor allem seine Vielseitigkeit hat mir die einmalige Gelegenheit gegeben, sowohl wissenschaftlich als auch projektbezogen zu arbeiten und damit meinen Horizont zu erweitern.

Sehr dankbar bin ich auch Eberhard Haug, der mich für das weite Feld der numerischen Simulationen begeisterte und bei der Idee meines Promotions-themas Pate stand. Seine kreative Art, Probleme zu lösen inspirierte mich immer wieder aufs Neue. Sein unermüdlicher Einsatz und seine konstruktive Kritik motivierten mich stets und haben mich kontinuierlich weitergebracht.

Einen ganz besonderen Dank möchte ich meinem Kollegen Bernhard Gawenat aussprechen. In freundschaftlicher Atmosphäre setzte er sich intensiv mit der Thematik auseinander und begleitete mit anregenden Diskussionen meine Arbeit. Dabei sorgten sein offener Geist und seine Neugier immer wieder für neue Impulse. Sein kontinuierliches Interesse an der Thematik hat entscheidend zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen.

Der Firma Liebherr möchte ich für die Bereitschaft danken, die Messungen am 29 m Schirm in diese Dissertation verwenden zu dürfen.

---

Der Firma ESI France, Paris, besonders Pierre de Kermel, gilt mein Dank für die Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei der Verwendung der PAM-Software, die von der Firma ESI Group kostenlos zur Verfügung gestellt wurde.

Herrn Prof. Talaslidis möchte ich ganz herzlich für seine Unterstützung danken, die er mir während meines Stipendiumaufenthaltes an der Aristoteles Universität Thessaloniki (School of Engineering Science, Institut of Structural Analysis) entgegenbrachte.

Nicht zuletzt möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Familie, insbesondere bei meinen lieben Eltern und ganz besonders bei meiner lieben Frau für die Unterstützung und den starken Rückhalt in jeder Lebensphase bedanken.

Stuttgart, im Juni 2010, Alexander Michalski

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Windumströmte Membrantragwerke</b>	<b>7</b>
2.1	Textile Flächentragwerke: eine allgemeine Einführung . . . . .	7
2.1.1	Definition: Einordnung der Konstruktion . . . . .	8
2.1.2	Prinzipien des Konstruierens mit Textilien . . . . .	9
2.1.3	Formfindung . . . . .	11
2.1.4	Textile Werkstoffe . . . . .	12
2.1.5	Zuschnitt . . . . .	16
2.1.6	Tragverhalten mechanisch vorgespannter Membrantragwerke . . . . .	17
2.1.7	Tragwerksanalyse . . . . .	20
2.2	Grundlagen windbelasteter Konstruktionen . . . . .	21
2.2.1	Charakterisierung von Strömungen . . . . .	21
2.2.2	Aerodynamische Grundlagen . . . . .	24
2.2.3	Aerodynamische Lasten . . . . .	29
2.3	Phänomenologie windumströmter Membrantragwerke . . . . .	31
2.3.1	Statisches Verhalten . . . . .	31
2.3.2	Dynamisches Verhalten . . . . .	33

<b>3 Die Struktur des Windes</b>	<b>41</b>
3.1 Meteorologische Klassifizierung . . . . .	41
3.1.1 Einordnung im Frequenzbereich . . . . .	42
3.2 Windklima . . . . .	43
3.2.1 Meteorologische Aspekte . . . . .	44
3.2.2 Großräumige Windsysteme . . . . .	44
3.2.3 Kleinräumige Windsysteme . . . . .	45
3.2.4 Statistische Grundlagen zur Festlegung der Referenzgeschwindigkeit . . . . .	46
3.3 Die atmosphärische Grenzschicht . . . . .	49
3.3.1 Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht . . . . .	50
3.3.2 Mathematische Beschreibung . . . . .	51
3.3.3 Profile der mittleren Windgeschwindigkeit . . . . .	52
3.3.4 Einfluss der thermischen Schichtung auf die Windverhältnisse . . . . .	58
3.3.5 Wesen der atmosphärischen Turbulenz . . . . .	59
3.3.6 Statistische Beschreibung atmosphärischer Turbulenzen	62
<b>4 Analyse windbelasteter Membrantragwerke</b>	<b>81</b>
4.1 Übersicht über die Modelle . . . . .	82
4.2 Statisches Berechnungsmodell . . . . .	84
4.2.1 Windkanalversuche . . . . .	85
4.2.2 Membrantragwerke mit statischem Tragverhalten . . . . .	92
4.2.3 Membrantragwerke mit dynamischen Tragverhalten . . . . .	94
4.3 Dynamisches Berechnungsmodell . . . . .	97
4.3.1 Vorgehensweise . . . . .	98
4.3.2 Anwendungsbeispiele . . . . .	99
4.4 Fluid-Struktur-Wechselwirkungssimulation . . . . .	101

4.4.1	Simulationskonzept . . . . .	102
4.4.2	Softwareumgebung . . . . .	106
4.4.3	Numerische Strömungsmechanik . . . . .	108
4.4.4	Numerische Strukturmechanik . . . . .	125
4.4.5	Kopplungsstrategie . . . . .	133
<b>5</b>	<b>Modellierung atmosphärischer Turbulenzen</b>	<b>139</b>
5.1	Problemstellung . . . . .	140
5.2	Anforderungen und Klassifikation der Lösungsverfahren . . . . .	142
5.3	Implementierung der Windrandbedingung in die numerische Strömungssimulation . . . . .	148
5.4	Numerische Generierung synthetischer Windturbulenz . . . . .	150
5.4.1	Generierung von Windzeitreihen mithilfe autoregressiver Prozesse . . . . .	153
5.4.2	Generierung von Windzeitreihen mithilfe der Fourier-Transformation . . . . .	170
<b>6</b>	<b>Numerische und experimentelle Analyse eines 29m-Schirms</b>	<b>193</b>
6.1	Problemdefinition . . . . .	193
6.2	CFD-Simulation im Vergleich mit dem Windkanalexperiment . . . . .	197
6.2.1	Windkanaluntersuchungen . . . . .	198
6.2.2	CFD-Simulation . . . . .	200
6.2.3	Ergebnisse . . . . .	201
6.3	Messungen am 29m-Schirm auf dem Testgelände Münsingen . . . . .	209
6.3.1	Beschreibung des Messaufbaus . . . . .	210
6.3.2	Analyse und Auswertung der Windmessdaten . . . . .	219
6.4	Numerische Generierung des Windfeldes für den Standort Münsingen . . . . .	229
6.4.1	Generierung der Windeinströmdaten . . . . .	231

6.4.2	CFD-Simulation 1 eines langen, leeren Strömungskannels mit glatter Grundfläche . . . . .	233
6.4.3	CFD-Simulation 2 eines langen, leeren Strömungskannels mit rauher Grundfläche . . . . .	238
6.4.4	CFD-Simulation 3 unter Berücksichtigung des Geländeprofiles: Vergleich mit Naturmessungen . . . . .	241
6.5	Fluid-Struktur-Interaktionssimulation des 29m-Schirms . . . . .	251
6.5.1	FSI-Simulation unter Verwendung einer langen Anlaufstrecke . . . . .	253
6.5.2	FSI-Simulation unter Verwendung einer kurzen Anlaufstrecke . . . . .	260
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>271</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>277</b>
<b>A</b>	<b>Membranmaterialien im textilen Bauen</b>	<b>291</b>
<b>B</b>	<b>Auswertung der Leistungsspektren mit Flexpro</b>	<b>295</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Private residence, Saudi Arabien, 1991,SL-Rasch GmbH . . . . .	8
2.2	Formfindung: numerisch, experimentell (SL-Rasch GmbH) . . .	11
2.3	Last-Verformungsverhalten: Last in Schuss-, Diagonal-, Kett- richtung, aus [51] . . . . .	15
2.4	Nichtelastisches Verhalten bei wiederholter Belastung, aus [13] .	15
2.5	Turbulente Grenzschicht, aus [32] . . . . .	26
2.6	Grenzschichtablösung, aus [159] . . . . .	27
2.7	Umströmung eines Körpers, Stromlinien- und Druckvertei- lung, aus [159] . . . . .	27
2.8	Druckverteilung an Schirmen: unverformte Geometrie – ver- formte Geometrie, aus [122] . . . . .	32
2.9	Trennung der Dämpfungsarten, aus [69] . . . . .	36
2.10	Flattern eines freien Membranrandes (links) aus [146]; Luf- tumströmte Traglufthalle: Entwicklung des Geschwindigkeits- feldes – Druckverteilung auf der Membranoberfläche (rechts), aus [4] . . . . .	37
2.11	Windeinwirkung im Montagezustand bei mechanisch vorge- spannten Membranen (oben) (aus <a href="http://okok.org">http://okok.org</a> ), Einwir- kung einer Windböe beim Raffvorgang (unten) . . . . .	38
3.1	Spektrum der longitudinalen Windgeschwindigkeitskompo- nente für Brookhaven, nach Van der Hoven, aus [27] . . . . .	42
3.2	Globale atmosphärische Zirkulation, aus [37] . . . . .	45
3.3	Aufbau der atmosphärischen Grenzschicht . . . . .	50

3.4	Windprofil der atmosphärischen Grenzschicht (schematisch) . . .	52
3.5	Windprofile für die mittlere Windgeschwindigkeit, aus [30] . . .	56
3.6	Schematische Darstellung des Böenspektrums $fS_u$ , aus [27] . . .	61
3.7	Normierte Böenspektren der Turbulenzkomponente $u$ (links) und $v, w$ (rechts) . . . . .	78
4.1	Konzept zur Erfassung von Windbeanspruchungen für Bau- werke . . . . .	83
4.2	Statisches Berechnungskonzept . . . . .	84
4.3	Aufbau eines Windkanals , aus [56] . . . . .	88
4.4	Windkanalmodell 29m-Schirme, KAIA Jeddah, Saudi Arabia. Architekturbüro Rasch + Bradatsch 2008, Laboratorium für Ge- bäudeaerodynamik Universität Karlsruhe . . . . .	89
4.5	Dynamisches Berechnungskonzept . . . . .	98
4.6	Konzept der Fluid- Struktur-Wechselwirkungssimulation . . . .	101
4.7	26m-Schirme, Medina Saudi Arabien, Architekturbüro Rasch + Bradatsch 2008 . . . . .	102
4.8	Simulationsumgebung inklusive Software . . . . .	103
4.9	Large Eddy Simulation, aus [19] . . . . .	119
4.10	Konfiguration eines Membran- und Seilelements, aus [154] . . .	129
4.11	Einfach gestaffeltes Verfahren mit 'Subcycling'-Ansatz . . . . .	135
5.1	Windkanalexperiment am Laboratorium für Gebäudeaerody- namik, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe . . .	140
5.2	Generierung von Einströmdaten mithilfe einer Hilfssimulati- on, aus [112] . . . . .	144
5.3	Implementierung der Windrandbedingungen in das numeri- sche Simulationskonzept . . . . .	149
5.4	Berechnungsgebiet und CFD-Netz (oben) mit Auswertungs- punkten (unten) . . . . .	159

---

5.5	Verhältnis zwischen der mittleren Geschwindigkeit $\bar{v}$ mit $t < 1h$ und der mittleren Stundengeschwindigkeit $\bar{v}_h$ , 1...landwirtsch. Gelände, 2...bewaldet, 3...städtisches Gelände, aus [159]	160
5.6	Windgeschwindigkeitsprofile zum Zeitpunkt $t_1$ und $t_2$ , erzeugt mithilfe des AR-Prozesses (links) und der Monte-Carlo-Methode (rechts) nach [116]	162
5.7	Zeitreihen der generierten Geschwindigkeitskomponenten (links), Vergleich der generierten Autoleistungsspektren mit Zielspektren (rechts) als Ergebnis des numerisch generierten Windfeldes	163
5.8	Turbulenzintensität (links) und integrale Längenmaße $L_u^x$ (rechts) als Ergebnis der CFD-Simulation	165
5.9	Korrelationskoeffizient $\rho_{uw}$ (links), Druck- und Geschwindigkeitsverlauf am Punkt P18 über der Zeit $t$ (rechts) als Ergebnis der CFD-Simulation	166
5.10	Räumliches Feld zur Berechnung der Windgeschwindigkeiten an den Gitterpunkten	172
5.11	Skizze zur Veranschaulichung der Modellvorstellung des „Sheared spectral tensor“, Effekt der Windscherung auf Turbulenz (rechts), ausgehend vom isotropen Fall (links), aus [94]	175
5.12	Berechnungsgebiet mit statistischen Auswertungspunkten (links oben, unten) und Vernetzung (rechts)	179
5.13	Visualisierung der Schwankungskomponente $u$ in Windrichtung eines beispielhaften Windfeldes mit $16 \times 16 \times 64$ Punkten	181
5.14	Vergleich generierter Windspektren mit den Zielspektren nach Kaimal (links), Normierte Autokovarianzfunktionen (rechts) für alle Geschwindigkeitskomponenten	182
5.15	Geschwindigkeitskonturen auf Oberfläche des Strömungsgebietes, aus CFD-Simulation	184
5.16	Zeitlich gemitteltes Profil (links), Standardabweichung der longitudinalen Turbulenzkomponente (rechts)	185
5.17	Integrale Längenmaße $L_u^x$ (links), Zeitfunktion des Druckes am Punkt P90 (rechts)	185

5.18	Korrelationskoeffizient $\rho_{uw}$ (links), Turbulenzintensität $I_u$ (rechts) (Windfeld B) . . . . .	186
5.19	Autoleistungsspektrum $S_u$ des Einströmwindfeldes (links), Autoleistungsspektrum $S_u$ ausgewertet im CFD-Berechnungsgebiet (rechts) (Windfeld B) . . . . .	187
6.1	29m-Membranschirm, Testgelände der Firma Liebherr in Münsingen 2008 . . . . .	194
6.2	Zeitlicher Verlauf der Druckschwankungen $\Delta p$ aus der Differenz der Drücke oberhalb und unterhalb der Membran . . . . .	198
6.3	Windkanalexperiment eines 29m-Schirms am Laboratorium für Gebäude- und Umweltaerodynamik, Universität Karlsruhe . . . . .	199
6.4	Strömungsgebiet und Oberflächengitter des Membranschirms . . . . .	201
6.5	Geschwindigkeits- und Druckverteilung in einem Längsschnitt durch das Strömungsgebiet . . . . .	202
6.6	Statistische Auswertung der Windströmung: mittleres Geschwindigkeitsprofil (oben links), Turbulenzintensität (oben rechts), Leistungsspektren $S_u$ aus CFD (unten rechts) und Windkanal (unten links) . . . . .	203
6.7	Druckverteilung der Membranfläche aus Numerik und Experiment (Wind von oben): zeitlicher Mittelwert $\bar{c}_p$ (oben), Standardabweichung $\sigma_{c_p}$ (mitte). Schirmgeometrie im Experiment unten links, im Vergleich mit CFD unten rechts . . . . .	204
6.8	Statisches System des 29m-Schirms links, 3-fach überhöhte Verformungsfigur unter Windlast bei einer Bemessungswindgeschwindigkeit von 12 m/s (rechts) . . . . .	206
6.9	Lage des Messorts: Testgelände der Firma Liebherr auf dem ehemaligen Truppenübungsplatz Münsingen (oben, aus <i>GoogleEarth<sup>TM</sup> – Kartenservice</i> ), Übersicht Messaufbau (Schirm + Windmesseinrichtung) (unten) . . . . .	211
6.10	Aufbau der Messeinrichtung am 29m-Schirm auf dem Liebherr-Testgelände . . . . .	212
6.11	Windmessmasten, ausgestattet mit 15 Sonic Ultraschallanemometern . . . . .	213

6.12	Dehnungsmessungen am Stahlgestänge . . . . .	214
6.13	Dynamische Verformungsmessung der Membran mittels photogrammetrischem Verfahren. Messaufbau (links), Übersicht Messmarken (rechts oben), Kameras (rechts unten) . . . . .	216
6.14	Windgeschwindigkeiten im Sturmtief 10.02.09 (links), Übersicht der Windmessensensoren Ansicht West (rechts) . . . . .	220
6.15	Schwankungen der Windrichtung $\phi_z$ am Windmesser W8 . . . . .	221
6.16	Trendbereinigung der longitudinalen Windgeschwindigkeit am Windmesser W8 . . . . .	222
6.17	Windprofile ermittelt aus den Windmessern W1 bis W15 (links), Kurvenanpassung zur Bestimmung des Profilexponents $\alpha$ und der Referenzgeschwindigkeit $u_{ref}$ (rechts) . . . . .	223
6.18	Verteilungsdichte und Verteilungsfunktion der Turbulenzkomponenten . . . . .	225
6.19	Standardabweichung der Turbulenzkomponenten (links), Turbulenzintensität (rechts) . . . . .	226
6.20	Normierte Autokovarianzfunktion der longitudinalen Turbulenzkomponente am Windmesser W8 (links), Integrallängenmaße $L_u^x$ aller Messstellen (rechts) und ihr Mittelwert über der Höhe $z$ . . . . .	227
6.21	Böenspektren der Windturbulenz am Standort Münsingen . . . . .	228
6.22	Verlauf der Schubspannungsgeschwindigkeit (links) und der Korrelationskoeffizienten der Turbulenzkomponenten am Punkt (rechts) . . . . .	229
6.23	Feld des resultierenden Turbulenzanteils . . . . .	232
6.24	Berechnungsgebiet, -gitter eines leeren Strömungskanals . . . . .	234
6.25	Verlauf des mittleren Geschwindigkeitsprofils $\bar{u}(x/H, z)$ (links), Verlauf der Standardabweichung $\sigma_i(x/H)$ (rechts) . . . . .	235
6.26	Verlauf des Korrelationskoeffizienten $\rho_{uw}$ (oben links), der Schubspannungsgeschwindigkeit $u_*$ (oben rechts) und des integralen Längenmaßes $L_u^x$ (unten links), Normierte Autokovarianzfunktion $\rho_{uu}$ (unten rechts) . . . . .	237

6.27	Berechnungsgebiet, Gitter eines leeren Strömungskanals . . . . .	239
6.28	Mittleres Geschwindigkeitsprofil $\bar{u}(z)$ (oben links), Standardabweichung $\sigma_i$ (oben rechts), Korrelationskoeffizient $\rho_{uw}$ (unten links), Schubspannungsgeschwindigkeit $u_*$ (unten rechts), in Abhängigkeit von Anlaufstrecke $x$ . . . . .	240
6.29	Berechnungsgebiet, Gitter eines leeren Strömungskanals . . . . .	242
6.30	Zeitlicher Verlauf des Druckes . . . . .	244
6.31	Geschwindigkeits- und Druckverteilung im Strömungsgebiet . . . . .	245
6.32	Mittleres Geschwindigkeitsprofil $\bar{u}(z)$ (oben links, unten links), Standardabweichung $\sigma_i$ (oben rechts), Momentane Geschwindigkeitsmaximas und -minimas (unten links), Turbulenzintensität $I_u$ (unten rechts) . . . . .	246
6.33	Korrelationskoeffizient $\rho_{uw}$ (oben links), Schubspannungsgeschwindigkeit $u_*$ (oben rechts), integrale Längenmaße $L_u^x$ (Mitte), Turbulenzspektren $x/H = 3.6$ (unten) . . . . .	248
6.34	Turbulenzspektrum $x/H = 3.6$ (oben links), Kreuzkorrelationskoeffizienten der Turbulenzkomponenten für Abstand in Spannweitenrichtung (oben rechts, unten) . . . . .	250
6.35	Schwerlastmattenversuch . . . . .	252
6.36	Berechnungsgebiet (oben links), Strukturmodell (oben rechts), Berechnungsgitter (unten) der FSI-Simulation . . . . .	254
6.37	Geschwindigkeitsverteilung in einem Längsschnitt (oben), Zeitreihe der Windgeschwindigkeit aus der Simulation am virtuellen Windmesser W8 (unten links), resultierendes Mastfußmoment (unten rechts) . . . . .	255
6.38	Verformung des 29m-Schirms zu den Zeitpunkten 10 , 30, 52, 59 s (5-fach bzw. 25-fach überhöht dargestellt) . . . . .	256
6.39	Verformung des 29m-Schirms zu den Zeitpunkten 62, 67, 69, 85 s (5-fach bzw. 25-fach überhöht dargestellt) . . . . .	257
6.40	Messeinrichtung am 29m Schirm: Armnummerierung (links), Übersicht über die Auswertung der Messung (rechts) . . . . .	259

---

6.41	Zeitlicher Verlauf des Mastfußmomentes (oben links) und Antwortspektrum des Mastfußmomentes (oben rechts) aus Experiment und Simulation, Vergleich der RMS-Werte der Schirmantwort aus Experiment und Simulation (unten) . . . . .	260
6.42	Vergleich der statistischen Eigenschaften des numerischen und experimentellen Windfeldes (a: Berechnungsgebiet, b: Mittel-/Böenwindgeschwindigkeiten, c: Turbulenzintensität, d: Integrale Längenmaße, e: Spektrum der u-Komponente, f: Reynoldsspannungen) . . . . .	264
6.43	Momentaufnahmen der Konturlinien der Windgeschwindigkeit und der Schirmverformung für unterschiedliche Zeitpunkte der FSI-Simulation . . . . .	265
6.44	Ergebnisse der FSI-Simulation im Vergleich mit der Feldmessung (a: Mastfußmoment, b: Kragarmmoment Diagonalarm VII, c: Vertikal Armspitzenverformung dz am Punkt P4, d: Vertikale Armspitzenverformung dz am Punkt P7, e: Normalkraft Strebe Mittelarm VIII, f: Normalkraft Strebe Mittelarm IV . . . . .	266
6.45	Ergebnisse der FSI-Simulation im Vergleich mit der Feldmessung (a: Antwortspektrum Mastfußmoment, b: Wahrscheinlichkeitsdichte Mastfußmoment, c: Antwortspektrum Armspitzenverformung, d: Wahrscheinlichkeitsdichte Armspitzenverformung, e: Vergleich der normierten, zeitlich gemittelten Schirmantwort, f: Vergleich der normierten RMS-Werte der Schirmantwort . . . . .	267
A.1	Eigenschaften von Membranmaterialien, aus [105] . . . . .	293
B.1	Ausgewertete Leistungsspektren der longitudinalen Turbulenzkomponente . . . . .	296

