**Schätzung von Turbulenzparametern
aus Naturmessungen zur Beschreibung
bauwerksrelevanter räumlicher Windfelder**

von
Thomas Daniel Höbbel
geboren am 27.10.1981
aus Berlin

Von der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig zur Erlangung
des Grades eines Doktoringenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation

Eingereicht am
Disputation am
Berichterstatter

11. Juli 2016
11. Oktober 2016
Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Klaus Thiele
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h. c. Claudio Borri

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau

Heft 4

Thomas Höbbel

**Schätzung von Turbulenzparametern
aus Naturmessungen zur Beschreibung
bauwerksrelevanter räumlicher Windfelder**

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4893-3

ISSN 2198-8722

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

„... die einfachsten Ideen fast immer diejenigen sind, welche sich dem menschlichen Geiste zuletzt darbieten.“

Darstellung des Weltsystems durch Pierre-Simon Laplace,
aus dem Französischen übersetzt von Johann Karl Friedrich Hauff, 1797

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Die finanzielle Förderung des Forschungsvorhabens erfolgte größtenteils durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft.

Mein Doktorvater Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Klaus Thiele war stets ein interessierter und geduldiger Gesprächspartner, der meiner Arbeit die richtige Richtung gab. Ihm gilt mein besonderer Dank. Des Weiteren danke ich Univ.-Prof. a. D. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Udo Peil für die Initiierung des Forschungsvorhabens. Seine Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission hat mich sehr gefreut. Mein Dank gilt ebenso den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission. Mit Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. h. c. Claudio Borri hat ein international anerkannter Wissenschaftler auf dem Gebiet des Windingenieurwesens das Koreferat übernommen.

Dr.-Ing. Hodei Aizpurua Aldasoro, Dr.-Ing. Mathias Clobes, Dr.-Ing. Arno Kirch und Dr.-Ing. Oliver Steiln danke ich für die tiefgehenden, fachlichen Diskussionen und den Wissenstransfer während der gemeinsamen Zeit am Institut. Diese wird mir in sehr guter Erinnerung bleiben. Die Idee der Turbulenzmessungen an den Abspannseilen des Mastes stammt von Dr.-Ing. Mathias Clobes. Dr.-Ing. Arno Kirch gab den nützlichen Hinweis zu den Wirbelstromdämpfern.

Ding Cai, Florian Minuth-Hadi, Jonas Pons, Julian Unglaub und allen weiteren Mitarbeitern möchte ich für das sehr angenehme Arbeitsumfeld in den letzten Jahren danken. Dieses setzte sich im Privaten bei ausgedehnten Rennradtouren um und über den Elm fort. Des Weiteren danke ich den Werkstattmitarbeitern des Instituts für die bauliche Umsetzung der Sensorbox.

Großer Dank gilt meiner Familie und insbesondere meinen Eltern. Meiner Mutter möchte ich herzlich für die Unterstützung während des Studiums und darüber hinaus danken. Ebenso großer Dank gilt Dr.-Ing. Detlef Roschig. Sein Korrekturlesen und zahlreiche seiner Hinweise haben zum Gelingen der schriftlichen Ausarbeitung beigetragen. Meine Freundin Laura Roschig musste in den letzten Monaten viel Geduld aufbringen. Für ihre Nachsicht und ihren liebevollen Rückhalt bin ich überaus dankbar. Die Nachricht über unseren gemeinsamen Nachwuchs hat mir während der Promotion die größte Freude bereitet.

Berlin, im November 2016

Thomas Höbbel

Kurzfassung

Die dynamische Berechnung diskreter Tragwerksmodelle infolge böiger Windlasten erfordert die Kenntnis über die Spektraldichtematrix der Windturbulenz in der atmosphärischen Grenzschicht. Diese enthält die Auto- und Kreuzleistungsdichtespektren der u , v und w Turbulenzkomponenten. Die Spektraldichtematrix ist die Fourier Transformierte der im Zeitbereich definierten Korrelationsmatrix. Ein Ansatz zur Beschreibung der Autoleistungsdichtespektren bzw. Autokorrelationsfunktionen basiert auf einem isotropen Turbulenzmodell. Die Kreuzleistungsdichtespektren werden für gewöhnlich indirekt über eine empirisch ermittelte Wurzel-Kohärenzfunktion – oftmals eine abklingende Exponentialfunktion – und den entsprechenden Autoleistungsdichtespektren ermittelt. Die erforderlichen Parameter für die Autoleistungsdichtespektren und die Wurzel-Kohärenzfunktionen müssen aus Naturmessungen bestimmt werden. Die Wurzel-Kohärenzfunktion lässt sich jedoch nur mit großen Streuungen schätzen, so dass die Ermittlung der Parameter mit großen Unsicherheiten verbunden ist.

Eine andere Möglichkeit ist die direkte Beschreibung der Kreuzleistungsdichtespektren bzw. der Kreuzkorrelationsfunktionen. Dieser Ansatz wird im Rahmen dieser Arbeit gewählt. Es erfolgt zunächst die Herleitung der Kreuzkorrelationsfunktionen aus dem Korrelationstensor für isotrope Turbulenz. Die Parameter eines isotropen Turbulenzfeldes sind richtungsunabhängig. Diese Annahme ist für die Turbulenz in der atmosphärischen Grenzschicht unzutreffend. Daher ist jede der hergeleiteten Kreuzkorrelationsfunktionen von eigenen Parametern abhängig. Die Kreuzkorrelationsfunktionen sind somit als empirische Funktionen zu interpretieren, die sich gut an geschätzte Kreuzkorrelationsfunktionen anpassen lassen.

Die Berechnung räumlich ausgedehnter Tragwerke erfordert den Aufbau einer räumlichen Spektraldichtematrix mit allen erforderlichen Turbulenzkomponenten. Zur Bestimmung der hierfür notwendigen Parameter wurde die seit dem Jahr 1989 vom Institut für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig betriebene Windmessanlage am 344 m hohen, abgespannten Fachwerkgerüstmast Gartow 2 im Wendland (Niedersachsen, Deutschland) um ein kegelförmiges Messraster mit zunächst sechs dreidimensional messenden Ultraschallanemometern erweitert. Die Messergebnisse aus den Jahren 1989 bis 2015 und die Messergebnisse mit der erweiterten Windmessanlage aus den Monaten Juni bis November des Jahres 2015 werden hinsichtlich des hier gewählten Modells (direkte Beschreibung der Kreuzkorrelationsfunktionen) ausgewertet. Die gewählten Auto- und Kreuzkorrelationsfunktionen lassen sich durch Minimierung der

Fehlerquadratsumme gut an die geschätzten Funktionen anpassen. Auch im Frequenzbereich zeigen sich gute Übereinstimmungen von geschätzten Funktionen und Modellfunktionen.

Zwei Anwendungsbeispiele, die Berechnung eines 100 m hohen, angelenkten Stahlschornsteines im Frequenzbereich und die Simulation eines räumlichen Windfeldes, können wesentliche Verbesserungen des hier entwickelten Modells gegenüber dem üblicherweise verwendeten Modell der abklingenden Exponentialfunktion als Wurzel-Kohärenzfunktion aufzeigen.

Abstract

Dynamic calculation of discrete structural design models due to gusty wind loads requires knowledge of the wind turbulence spectral density matrix in the atmospheric boundary layer. This includes the power and cross-power density spectra of u , v and w turbulence components. The spectral density matrix is the Fourier transform of the correlation matrix defined in the time domain.

An approach to describing the power density spectra and autocorrelation functions is based on an isotropic turbulence model. The cross-power density spectra are usually determined indirectly via a root coherence function – often a decaying exponential function – which is determined empirically, and via the respective power density spectra. The required parameters for the power density spectra and the root coherence functions must be determined from field measurements. However, the root coherence function can only be estimated with large distributions, so determining the parameters is associated with a lot of uncertainty.

Another option is to directly describe cross-power density spectra and the cross-correlation functions. This approach is chosen as part of this work. Initially, the cross-correlation functions are derived from the correlation tensor for isotropic turbulence. The parameter of an isotropic turbulence field is not dependent on direction. This assumption is incorrect for turbulence in the atmospheric boundary layer. This is why each of the derived cross-correlation functions depends on its own parameters. Therefore, the cross-correlation functions must be interpreted as empirical functions that can be fitted to estimated cross-correlation functions.

Calculating structural designs which have been spatially expanded requires a spatial spectral density matrix to be built with all required turbulence components. To determine the parameters required for this, the wind measurement system that has been operated by Braunschweig University of Technology's Structural Engineering Institute since 1989, which is on the cable-secured lattice mast Gartow 2 in Wendland (Niedersachsen, Germany), has been expanded with a conical measuring grid with initially six ultrasound anemometers that can measure in three dimensions. The measuring results from 1989 to 2015 and the measuring results with the expanded wind measurement system from June to November 2015 are evaluated in relation to the model chosen here (direct description of cross-correlation functions). The auto and cross-power correlation functions can be easily fitted to estimated functions by minimising the sum of least

squares. Good agreement of estimated functions and model functions are also shown in the frequency domain.

Two examples of application, calculating a 100m high hinged, steel chimney in the frequency range and simulating a spatial wind field, can demonstrate essential improvements through the model developed here, compared to the conventionally used model of the decaying exponential function as a root coherence function.

Inhalt

Symbole	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Einordnung der Arbeit	2
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2 Modell zur Beschreibung räumlicher Windfelder	7
2.1 Das turbulente Strömungsfeld als stochastischer Prozess	7
2.2 Windprofile	11
2.2.1 Profil der mittleren Windgeschwindigkeit	11
2.2.2 Höhenabhängigkeit der Standardabweichung	13
2.3 Korrelationsfunktionen	15
2.3.1 Bekannte Ansätze für Autokorrelationsfunktionen und Autoleistungs- dichtespektren	15
2.3.2 Aspekte zur Kohärenzfunktion	22
2.3.3 Direkte Beschreibung der Kreuzkorrelationsfunktionen und Kreuzleis- tungsdichtespektren	28
2.4 Zusammenstellung der Turbulenzparameter	31
3 Beschreibung der Windmessaanlage und der Messstrategie	35
3.1 Windmessaanlage Gartow	35
3.2 Erweiterung der Windmessaanlage	37
3.2.1 Entwicklung der Sensorbox	37
3.2.2 Korrektur und Transformation der Messdaten	40
3.3 Vorbehandlung und Auswahl der Messdaten	47
3.3.1 Filterung der Messdaten	47
3.3.2 Testen der Messdaten auf Stationarität	49
3.3.3 Auswahl der Messdaten von 1989 bis 2005	50
3.3.4 Anmerkungen zu den Messdaten von 2006 bis 2015	53
3.3.5 Auswahl der Messdaten von Juni bis November 2015	54

4	Auswertung der Messdaten	59
4.1	Vorbemerkungen	59
4.1.1	Definition der mittleren Windrichtung und verwendete Koordinatensysteme	59
4.1.2	Verwendete Schätzfunktionen	61
4.1.3	Messpunkte am Mast Gartow	64
4.2	Auswertung der Messdaten von 1989 bis 2005	65
4.2.1	Geschätzte Standardabweichungen	65
4.2.2	Geschätzte Autokorrelationsfunktionen und Autoleistungsdichtespektren	71
4.2.3	Geschätzte Kreuzkorrelationsfunktionen und Kreuzleistungsdichtespektren	80
4.3	Auswertung der Messdaten von Juni bis November 2015	89
4.3.1	Geschätzte Standardabweichungen	89
4.3.2	Geschätzte Autokorrelationsfunktionen und Autoleistungsdichtespektren	92
4.3.3	Geschätzte Kreuzkorrelationsfunktionen und Kreuzleistungsdichtespektren	94
4.4	Zusammenstellung der ermittelten und verwendeten Turbulenzparameter	101
5	Anwendungen	105
5.1	Berechnung eines angelenkten Stahlschornsteines im Frequenzbereich	105
5.2	Simulation räumlicher Windfelder	111
5.2.1	Simulationsmethoden und Anforderungen an die Spektraldichtematrix der Windturbulenz	111
5.2.2	Windfelder mit indefiniter Spektraldichtematrix	112
5.2.3	Beispiel eines räumlichen Windfeldes	115
6	Zusammenfassung und Ausblick	121
	Anhang	127
A.1	Verwendete Autokorrelationsfunktionen und Autoleistungsdichtespektren . . .	127
A.2	Verwendete Kreuzkorrelationsfunktionen und Kreuzleistungsdichtespektren . .	128
A.3	Koordinaten der Messpunkte	130
A.4	Knotenkoordinaten des räumlichen Windfeldes	130
	Literatur	131