

Ein wirklichkeitsnaher Ansatz der böenerregten Windlasten auf Hochhäuser in Frankfurt/Main

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andreas Bachmann

aus Berlin

D 17

Darmstadt 2003

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Technische Universität Darmstadt
Institut für Massivbau
Alexanderstraße 5
64283 Darmstadt
<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de>

Bachmann, Andreas:

Ein wirklichkeitsnaher Ansatz der böenerregten Windlasten auf Hochhäuser
in Frankfurt/Main

1. Auflage Darmstadt, Eigenverlag, Heft 6

ISBN 3-9808875-2-9

Dr.-Ing. Andreas Bachmann

Geboren 1970 in Berlin. Von 1990 bis 1991 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Leipzig. Von 1991 bis 1997 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Berlin. 1997 Dischinger-Preis des Deutschen Beton-Vereins. Von 1997 bis 1998 Technisches Einarbeitungsprogramm der Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft in Dresden, Leipzig und Mannheim. Von 1998 bis 2003 wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Von 1998 bis 2003 freier Mitarbeiter im Ingenieurbüro König, Heunisch und Partner in Frankfurt am Main. Seit 2003 Gruppenleiter Fassadentechnik und Bauphysik im Creativ Center Hochbau der Bilfinger Berger AG in Mannheim.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2001 bis 2003 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für das mir entgegengebrachte Vertrauen, seine vielfältigen Anregungen sowie seine Diskussionsbereitschaft. Unser offenes, kritisch-konstruktives Verhältnis habe ich sehr genossen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit sowie die Übernahme des Korreferates.

Meinen Kollegen bin ich für das freundschaftliche Verhältnis dankbar, das meine Tätigkeit am Institut für Massivbau zu einer unvergesslichen Zeit werden ließ. Für die erfahrene Unterstützung danke ich insbesondere dem langjährigen Leiter der Messtechnik, Herrn Dipl.-Ing.(FH) Gerhard Koster.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studenten, die durch ihre Mitwirkung im Rahmen von Diplom- und Vertieferarbeiten zum Gelingen der Arbeit beitrugen. Mein besonderer Dank gilt hier Herrn Jochen Volz, Herrn Norbert Roth und Herrn Markus Spengler.

Der Bilfinger Berger AG bin ich für die finanzielle Unterstützung meiner Untersuchungen sowie für die gute Zusammenarbeit während der Messungen auf der Hochhausbaustelle Gallileo zu großem Dank verpflichtet. Herrn Achim Kolano von der Commerzbank AG danke ich für die uneingeschränkte Unterstützung der Wind- und Beschleunigungsmessungen an diesem von ihm betreuten Hochhaus. Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Ruscheweyh und Herrn Dipl.-Met. Thomas Schumann danke ich sehr herzlich für ihren fachlichen Rat und Herrn PD Dr.-Ing. Michael Kasperski für seine zahlreichen Anregungen und Kritiken.

Für die sorgfältige Durchsicht des Manuskripts dieser Arbeit danke ich Frau Dipl.-Kommunikationswirtin(FH) Jana Gehrmann und Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Minnert.

Meinen Eltern Barbara und Jürgen Bachmann bin ich sehr dankbar für die Unterstützung, die sie mir in all den Jahren zuteil werden ließen.

Meiner lieben Antje sowie meinen Töchtern Annabelle und Luise danke ich ganz besonders herzlich für ihr Verständnis und ihre Geduld, wodurch sie meine Motivation zum Anfertigen der vorliegenden Arbeit erhalten halfen.

Andreas Bachmann

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jörg Lange
Tag der Einreichung:	16. Juli 2003
Tag der mündlichen Prüfung:	01. Dezember 2003

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielstellung und Vorgehensweise	3
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Entstehung und Struktur der Windströmung.....	5
2.1.1 Sturmarten und ihre meteorologischen Hintergründe	5
2.1.2 Zerlegung des Windvektors in seine Komponenten	6
2.2 Statistische Grundlagen der Windklimatologie.....	9
2.2.1 Statistische Modellierung der Grundgesamtheit der Windgeschwindig- keitsdaten.....	9
2.2.2 Überschreitenswahrscheinlichkeit und Referenzwindgeschwindigkeit.....	10
2.2.3 Extremwertanalyse mittels Anpassung der Extremwerte an eine Verteilungsfunktion.....	13
2.2.4 Extremwertanalyse mittels der Methode der Schwellenwertüberschreitung	19
2.2.5 Berücksichtigung der Windrichtung	20
2.3 Vertikales Windprofil der mittleren Windgeschwindigkeit	22
2.3.1 Beschreibung homogener Windprofile unter dem Einfluss der Geländerauhigkeit	22
2.3.2 Modifizierung des Windprofils an Rauigkeitsübergängen.....	29
2.3.3 Einfluss der thermischen Schichtung der Atmosphäre	32
2.3.4 Einfluss des Sturmtyps	35
2.3.5 Böenwindprofile - Einfluss der Mittelungszeit	35
2.3.6 Reibungsbedingte Modifikation der Windrichtung.....	37
2.4 Grundlagen der turbulenten Windströmung.....	38
2.4.1 Generierung und Wesen der Turbulenz	38
2.4.2 Statistische Beschreibung des Schwankungsanteils der Wind- geschwindigkeit.....	39
2.4.3 Korrelationsfunktionen.....	40
2.4.4 Spektrale Dichtefunktion der Windgeschwindigkeitsschwankungen	44
2.5 Strukturdynamische Grundlagen.....	49
2.5.1 Grundbegriffe	49
2.5.2 Die Bewegungsgleichung der gedämpften Schwingung.....	49
2.5.3 Dämpfung eines schwingenden Systems	52
2.6 Konzepte zur Modellierung der böenerregten Windbeanspruchung- von Hochhäusern.....	55
2.6.1 Allgemeines.....	55
2.6.2 Statische Windlast infolge der mittleren Windgeschwindigkeit	55
2.6.3 Konzept der einhüllenden Windböe.....	56
2.6.4 Deterministische Verfahren.....	57

2.6.5	Spektralverfahren nach DAVENPORT	58
2.6.6	Closed Form Solution.....	64
3	Aufnahme der Messdaten	65
3.1	Windmessungen am Hochhaus Commerzbank	65
3.1.1	Feldmessungen	65
3.1.2	Windkanalversuche zur Kalibrierung der Winddaten	66
3.2	Windmessungen des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Frankfurt/Main.....	72
3.3	Windmessungen an den Kletterkränen der Hochhausbaustellen Main Tower und Gallileo	73
3.3.1	Feldmessungen	73
3.3.2	Windkanalversuche zur Korrektur der Winddaten.....	74
3.4	Windmessungen der Gebäudeleittechnik der Hochhäuser Commerzbank und Main Tower	79
3.5	Beschleunigungsmessungen an ausgewählten Hochhäusern in Frankfurt/Main.....	80
4	Untersuchung des Windklimas in Frankfurt/Main	83
4.1	Einleitung	83
4.2	Aufbereitung der Winddaten	83
4.2.1	Mittelwertbildung	83
4.2.2	Kritische Bewertung der gewonnenen Datenbasis	86
4.2.3	Lokale Beeinflussung der Windströmung durch die naturräumliche Gliederung	88
4.3	Statistische Modellierung der Grundgesamtheit der Messdaten	89
4.4	Statistik der Extremwerte und Ableitung einer Referenzwindgeschwindigkeit für den Standort Frankfurt/Main	91
4.4.1	Extremwertstatistik der Messstelle Commerzbank in der Höhe 275m	91
4.4.2	Extremwertstatistik der Messstelle Flughafen Frankfurt in der Höhe 10m	94
4.4.3	Festlegung der Referenzwindgeschwindigkeit für das Gebiet Frankfurt/Main und Vergleich zu aktuellen Normwerten	97
4.5	Einfluss der Windrichtung.....	99
4.5.1	Windrosen der Richtungshäufigkeiten	99
4.5.2	Windrosen der mittleren Windgeschwindigkeiten	100
4.5.3	Empirische Windrosen und WEIBULL-Stärkewindrosen	101
4.5.4	Stärkewindrosen aus der Extremwertverteilung.....	103
4.6	Saisonaler Einfluss	105
4.7	Aussagen zum Klimawandel	106
5	Untersuchung des Profils der mittleren Windgeschwindigkeit	109
5.1	Einleitung	109
5.2	Bisherige Annahmen für Windprofile in Frankfurt/Main	109
5.2.1	Windprofile nach Norm.....	109
5.2.2	Windprofile in aktuellen Windkanalversuchen	112

5.3	Bewertung der Oberflächenrauigkeit am Standort Frankfurt/Main	114
5.4	Ableitung eines Windprofils aus den Feldmessungen	117
5.4.1	Einfluss der thermischen Schichtung der Atmosphäre	117
5.4.2	Zeitbezogene Auswertung der Messdaten.....	118
5.4.3	Höhenstufenbezogene Auswertung der Messdaten.....	121
5.4.4	Neuvorschlag eines zusammengesetzten Windprofils für die Innenstadt von Frankfurt/Main	126
5.5	Weitere experimentelle Untersuchungen des Windprofils.....	129
5.5.1	Feldmessungen an den Kletterkränen des Hochhauses Commerzbank	129
5.5.2	Feldmessungen am Sendemast Gartow 2 in Niedersachsen	129
5.5.3	Feldmessungen der Windgeschwindigkeit in Peking.....	130
5.5.4	Feldmessungen des Windprofils mittels Sodar in Tokyo.....	130
5.6	Änderung der Windrichtung innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht	131
6	Untersuchung der turbulenten Windeigenschaften.....	133
6.1	Einleitung	133
6.2	Aufbereitung der Datenbasis der Schwankungskomponenten des Windes	133
6.3	Statistik der Schwankungskomponenten des Windes	135
6.3.1	Prüfung auf Normalverteilung	135
6.3.2	Standardabweichung	136
6.3.3	Turbulenzintensität.....	139
6.3.4	Böfaktoren.....	142
6.4	Korrelationsfunktionen und Integrallängenmaße.....	143
6.4.1	Abmessungen der Turbulenzelemente	143
6.4.2	Autokorrelationsfunktionen	144
6.4.3	Integrale Maßzahlen.....	146
6.5	Spektrale Dichtefunktion.....	151
6.5.1	Erstellung longitudinaler Leistungsdichtespektren aus den Messdaten und Anpassung an eine spektrale Dichtefunktion	151
6.5.2	Einflussparameter auf die Form der spektralen Dichtefunktion	154
6.5.3	Ableitung einer spektralen Dichtefunktion für die Innenstadt von Frankfurt/Main	159
7	Strukturdynamische Untersuchung bestehender Hochhäuser in Frankfurt	163
7.1	Einleitung	163
7.2	Aufbereitung der Beschleunigungsdaten und Untersuchung der Schwingrichtungen.....	163
7.2.1	Transformation der Beschleunigungsdaten	163
7.2.2	Hauptachsen des Bauwerkes	164
7.2.3	Hauptschwingrichtungen der Messung	167
7.3	Eigenfrequenzen.....	169
7.3.1	Vergleich der aufgefundenen Bauwerkseigenfrequenzen der Hochhäuser mit vorausberechneten Werten.....	169

7.3.2	Bewertung der Ansätze zur rechnerischen Ermittlung der niedrigsten Eigenfrequenzen von Hochhäusern	176
7.3.3	Korrelation zwischen der Eigenfrequenz und den herrschenden Randbedingungen	181
7.4	Dämpfungen	183
7.4.1	Erfahrungswerte für die Bauwerksdämpfung	184
7.4.2	Methoden der experimentellen Dämpfungsermittlung	186
7.4.3	Dämpfungsbestimmung aus den vorliegenden Beschleunigungsdaten Frankfurter Hochhäuser	189
8	Formulierung eines wirklichkeitsnahen Windlastansatzes für Hochhäuser in Frankfurt/Main und Vergleich mit aktuellen Normwerten.....	193
8.1	Windlastkonzepte in deutschen Normen	193
8.2	Modifizierung der mittleren Windwirkung	194
8.2.1	Referenzwert der Windgeschwindigkeit	194
8.2.2	Mittleres Windprofil	195
8.3	Modifizierung der dynamischen Windwirkung	197
8.3.1	Spektrale Dichtefunktion der Windgeschwindigkeit	197
8.3.2	Referenzwert der Windgeschwindigkeit	201
8.3.3	Bauwerkseigenfrequenzen	201
8.3.4	Weitere Einflussparameter	202
8.4	Anwendungsbeispiel	203
9	Zusammenfassung und Ausblick	205
	Literaturverzeichnis.....	209
	Verzeichnis der Symbole und Formelzeichen	217
	Anhang	223