

Windlast auf Hochhäuser in Innenstadtbereichen – Messungen am Neubau des Main Tower in Frankfurt/Main

T 2891

T 2891

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

1999, ISBN 3-8167-5701-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail irb@irb.fhg.de

URL <http://www.irb.fhg.de>

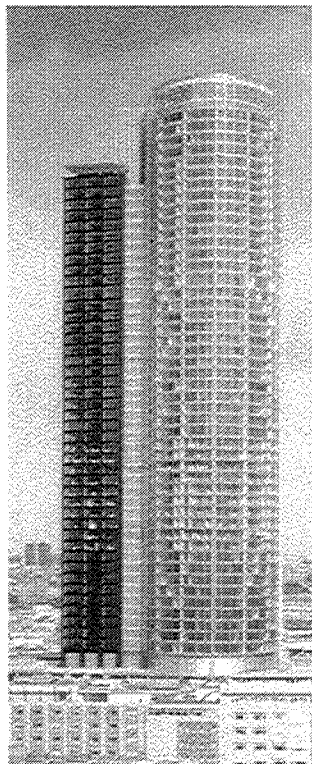


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner
Institut für Massivbau
Fachbereich 13 • Bauingenieurwesen

Alexanderstr. 5
64283 Darmstadt
Telefon (06151) 16 2144
Telefax (06151) 16 5344
c.a.graubner@massivbau.th-darmstadt.de

"Windlast auf Hochhäuser in Innenstadtbereichen - Messungen am Neubau des MAIN TOWER in Frankfurt/Main"



Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr.: IV 12-5-3.68-863/97

gefördert durch das Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin

Darmstadt, 01. Juni 1999

Inhaltsverzeichnis :

1. Einleitung	3
2. Theoretische Grundlagen	5
2.1. Stand der Forschung	5
2.1.1. Profil der mittleren Windgeschwindigkeit	5
2.1.2. Turbulenzeigenschaften des Windes	8
2.2. Stand der deutschen Normung	9
2.3. Stand der europäischen Normung	11
3. Beschreibung des Meßkonzeptes	13
3.1. Beschreibung der untersuchten Gebäude	13
3.2. Beschreibung der Meßpunkte	14
3.3. Beschreibung der Meßeinrichtungen	15
3.4. Beschreibung des Rechenprogrammes zur Auswertung der Meßdaten	17
3.4.1. Auswahl einer geeigneten Software	17
3.4.2. Beschreibung des entwickelten Auswerte-Programmes in MATLAB	18
4. Ergebnisse der Messungen und Auswertung	20
4.1. Windprofil	20
4.2. Turbulenzeigenschaften des Windes	29
5. Schlußfolgerungen	30
6. Zukünftiger Forschungsbedarf	32
6.1. Windgeschwindigkeit und Winddynamik	32
6.2. Verifikation mit Windkanalversuchen und FE-Berechnungen	33
6.3. Staudruck auf die Fassade	33
6.4. Dynamische Bauwerksreaktion	34
6.5. Entwicklung eines Rechenmodells	34
7. Zusammenfassung	35
8. Literatur	36

1. Einleitung

Für Berechnung und Bemessung von Hochhäusern ist die Beanspruchung aus Windlasten von großer technischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Bei der Ermittlung von Windeinwirkungen auf Bauwerke in exponierten Innenstadtlagen ist man jedoch vielfach auf Vereinfachungen angewiesen, da die Beanspruchung neben der Gebäudeaerodynamik und Gebäudedynamik von den noch nicht vollständig erforschten Einflußparametern Windprofil (Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeit über die Höhe) sowie von den Turbulenzeigenschaften der Windeinwirkungen abhängt.

Das Windprofil hängt wesentlich von der Rauigkeit des umgebenden Geländes ab. Hierüber ist im Innenstadtbereich mit seiner inhomogenen Umgebung wenig bekannt. Gleiches gilt für die Turbulenzeigenschaften und die Böigkeit des Windes. Für die rechnerische Ermittlung des anzusetzenden Windprofils stehen Lösungsansätze nach Davenport [1] (Exponentialansatz) oder nach Eurocode 1, Teil 2.4 [2] (logarithmischer Ansatz) zur Verfügung. Beide Verfahren berücksichtigen die Turbulenzeigenschaften des Windes mit unterschiedlichem Genauigkeitsgrad. Eurocode 1, Teil 2.4 ist jedoch nur für Gebäudehöhen bis zu 200 m gültig, für größere Gebäudehöhen fehlen entsprechende normative Regelungen.

Durch Vergleichsrechnungen [9] konnte gezeigt werden, daß der logarithmische Ansatz des Eurocode 1 in innerstädtischen Lagen die Realität nicht wirklichkeitsnah abbildet. Zudem ergaben umfangreiche Windmessungen des Instituts für Massivbau der TU Darmstadt in den Jahren 1996 und 1997 im Zuge der Herstellung des derzeit höchsten Bürogebäudes Europas - der COMMERZBANK - in Frankfurt, daß mit beiden Verfahren die Windeinwirkungen im innerstädtischen Bereich planmäßig deutlich überschätzt werden [10]. Dies kann zu einer Überdimensionierung der tragenden Bauteile um bis zu 30 % führen. In [9] wird daher ein verbesserter Rechenansatz für Windprofil und Turbulenzeigenschaften vorgeschlagen, der jedoch nur auf den durchgeführten Windmessungen an einem Bauwerk basiert.

Die Gebäudeaerodynamik beeinflusst den auf das Bauwerk einwirkenden Staudruck und wird derzeit bei Hochhäusern üblicherweise durch entsprechende Windkanalversuche erfaßt. Mit

diesen Versuchen werden auch die Interferenzeigenschaften (gegenseitige Beeinflussung der Windeinwirkungen auf benachbarte Gebäude) näherungsweise abgedeckt. Da Windeinwirkungen auch eine dynamische Beanspruchung darstellen, muß die Gebäudereaktion aus dieser Belastung unter Berücksichtigung der dynamischen Gebäudeeigenschaften (z.B. Eigenfrequenz) bestimmt werden. Hier kommen vereinfachte Ansätze zur Anwendung, eine Überprüfung am realen Bauwerk erfolgt jedoch nur in seltenen Fällen.

Es besteht daher dringender Bedarf, die Windeinwirkungen auf Hochhäuser in innerstädtischen Bereichen näher zu untersuchen. Um abgesicherte Aussagen über die Windbeanspruchung zu erhalten sollten Messungen und Untersuchungen an Originalgebäuden stattfinden. Nur dann können auch tatsächlich auftretende Windlasten unter Berücksichtigung von Interferenzen bestimmt und mit den der Berechnung zugrunde gelegten Ergebnissen der Windkanalversuche verglichen werden.

Durch den Neubau des Hochhauses MAIN TOWER der Landesbank Hessen-Thüringen in Frankfurt mit einer Höhe von 200 m bot sich die Möglichkeit, sowohl das Windprofil am Bauwerksstandort – ohne Beeinflussung durch das zu errichtende Gebäude – als auch die späteren Windeinwirkungen auf das Gebäude gezielt zu untersuchen. Die gewonnenen Ergebnisse können unter Berücksichtigung bereits durchgeführter Untersuchungen zur Windbeanspruchung am benachbarten COMMERZBANK-Hochhaus ausgewertet werden. Des Weiteren werden zur Zeit und während der gesamten Laufzeit des geplanten Forschungsvorhabens auch Windmessungen an der Mastspitze des COMMERZBANK-Hochhauses in einer Höhe von 275 m durchgeführt, die dem direkten Vergleich dienen.

Das Forschungsvorhaben ist von nationaler und internationaler Bedeutung, da die Ergebnisse generell auf Hochhäuser in unterschiedlichster Lage übertragen werden können. Gleichzeitig können die Untersuchungen Grundlage für eine deutliche Zuschärfung der vorliegenden Normen zur Windeinwirkung sein und damit zu einer wirtschaftlicheren Dimensionierung der Bauwerke beitragen. Ferner können wesentliche Erkenntnisse über die Beeinflussung der Windeinwirkungen auf bestehende Gebäude bei der Erstellung neuer Hochhäuser in unmittelbarer Nachbarschaft gewonnen werden.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Stand der Forschung

2.1.1. Profil der mittleren Windgeschwindigkeit

Die großräumige Luftbewegung wird in der Nähe der Erdoberfläche abgebremst. Es entsteht das für reibungsbehaftete Strömungen typische Grenzschichtprofil. Die Form des Profils hängt von der Rauigkeit des umgebenden Geländes ab. Die Form des Windprofils wurde erstmals von Hellmann [3] mit einem Exponentialansatz und den Geländeparametern z_g (Gradientenhöhe), α sowie der Gradientenwindgeschwindigkeit $v(z_g)$ beschrieben.

$$v(z) = v(z_g) \cdot \left(\frac{z}{z_g} \right)^\alpha \quad (Gl. 2-1)$$

Die Beschaffenheit der Umgebung ist von großer Bedeutung für das Windprofil. Sie läßt sich aber nur schwer in Zahlen ausdrücken, wenn keine Messungen vorliegen. Für die Parameter z_g und α existieren verbal umschriebene Kategorien, in die ein konkretes Bauwerk eingeordnet werden muß. Da die Geländeform im allgemeinen nicht in allen Richtungen gleich ist, hängen die Parameter auch von der Windrichtung ab. In Tabelle 2-1 sind die geländespezifischen Eingangsparemeter, wie sie von Davenport [1] vorgeschlagen wurden, zusammengestellt. Bild 2-1 zeigt eine Auswertung für verschiedene Geländeformen.

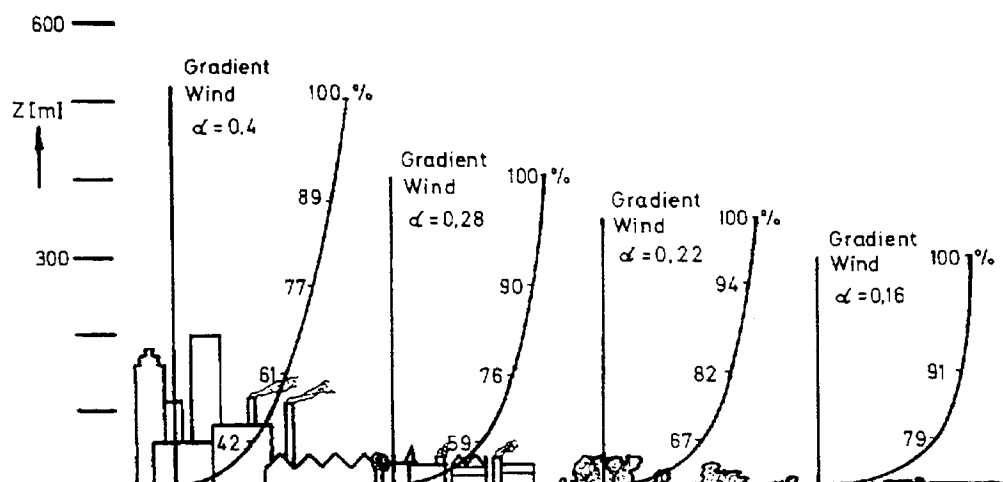


Bild 2-1: Windprofil für verschiedene Geländeformen

Beschreibung der Geländeoberfläche		α	z_g [m]
(a)	Offenes Gelände mit sehr kleinen Hindernissen: z.B. weite Grasflächen, Farmland mit wenigen Bäumen, Hecken etc.; Prärie, Tundra; flache Inseln in Binnenseen; Wüsten	0.16	274
(b)	Gelände, welches gleichförmig mit 10-15 m hohen Hindernissen belegt ist: z.B. Wohnvororte kleiner Städte; Wälder; kleine Felder mit Büschen; Bäumen und Hängen	0.28	400
(c)	Gelände mit großen und unregelmäßigen Objekten: z.B. Innenstädte mit dichter Hochhausbebauung; sehr durchbrochene Landschaften mit vielen einzelnen sehr hohen Bäumen etc.	0.40	520

Tabelle 2-1: Rauigkeitswerte nach Davenport [1]

Neben dem Exponentialansatz wird insbesondere für kleine Höhen ein logarithmischer Ansatz zur Beschreibung des Windprofils herangezogen. Im Gegensatz zum Exponentialgesetz läßt sich dieser Ansatz auf theoretische Grundlagen zurückführen. Eine einfache Herleitung findet sich z. B. in [4].

Allgemein läßt sich damit das Profil in folgender Weise beschreiben:

$$v(z) = v_{\text{ref}} \cdot k \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (\text{Gl. 2-2})$$

Durch v_{ref} wird dabei eine Referenzgeschwindigkeit definiert, die mittels des Faktors k an die einzelnen Geländerauhigkeiten angepaßt wird. Die Form des Windprofils wird durch die Rauigkeitslänge z_0 bestimmt.

In Tabelle 2-2 sind Rauigkeitslängen für verschiedene Geländeoberflächen zusammengestellt, wie sie von Wieringa in [5] vorgeschlagen wurden. Zum Vergleich mit dem Exponentialansatz sind in Tabelle 2-2 auch entsprechende Werte für den Exponentialfaktor α angegeben.

Beschreibung der Geländeoberfläche	z_0 [m]	α
1 „Meer“ Offenes Meer oder See (ungeachtet des Wellenganges); schneebedeckte flache Ebenen; ebenmäßige Wüsten; Teer- oder Betonflächen mit einer Ausdehnung von mehreren Kilometern	0.0002	0.08
2 „Glatt“ Ebenmäßiges Land ohne erkennbare Hindernisse und kaum Ve- getation; z.B. Strände, Packeis ohne große Klippen; Moore. etc.	0.005	0.16
3 „Offen“ Landflächen mit flacher Vegetation (z.B. Gras) und vereinsel- ten Hindernissen mit einem Abstand von mind. 50-facher Hin- dernishöhe; z.B. Grasflächen ohne Windbrecher, Moore, Tun- dren, Startbahnen von Flughäfen etc.	0.03	0.17
4 „Beinahe offen“ Kultiviertes Land mit niedrigem Getreide; mäßig offenes Land mit gelegentlichen Hindernissen mit einem Abstand von etwa 20-facher Hindernishöhe	0.10	0.23
5 „Rauh“ Kürzlich kultivierte „junge“ Landschaft mit hohem Getreide oder Getreide unterschiedlicher Höhe; verstreute Hindernisse mit einem ungefähren Abstand von 15-facher Hindernishöhe	0.25	0.26
6 „Sehr rauh“ „Alte“ kultivierte Landschaft mit recht hohen Hindernisgruppen mit Freiräumen von 10-facher Hindernishöhe	0.50	0.30
7 „Geschlossen“ Vollständig und weitgehend regelmäßig mit großen Hindernis- sen etwa gleicher Höhe bedeckte Landschaft mit Freiräumen, die der Hindernishöhe entsprechen; z.B. alte, ebenmäßige Wäl- der, gleichförmige Städte oder Dörfer	1.00	0.35
8 „Chaotisch“ Zentren großer Städte mit abwechselnden niedrigen Gebäuden und Hochhäusern, große ungleichmäßige Wälder mit zahlrei- chen Lichtungen	2.00	0.40

Tabelle 2-2: Rauheitsklassen nach Wieringa [5]

2.1.2. Turbulenzeigenschaften des Windes

Durch das Abbremsen der Luftströmung in der Nähe der Erdoberfläche wird die Luftströmung turbulent. Die einfachste Methode zur quantitativen Beschreibung der Turbulenz des Windes ist die Bildung des Quotienten aus größter gemessener Geschwindigkeit zu einer über einen bestimmten Zeitraum gemittelten Windgeschwindigkeit, dem Böfaktor:

$$G_v = \frac{v_{\max}}{\bar{v}} \quad (\text{Gl. 2-3})$$

Mit dem Böfaktor wird allerdings nur eine Böe mit der größten Amplitude beschrieben. Über die Häufigkeit und Größe der Schwankungen wird keine Aussage getroffen.

Die Summe der Schwankungsanteile läßt sich durch die Standardabweichung kontinuierlich gemessener Windgeschwindigkeiten ausdrücken. Der Quotient von Standardabweichung und dem zugehörigen Mittelwert der Windgeschwindigkeit ist die Turbulenzintensität:

$$I_z = \frac{\sigma_z}{\bar{v}_z} \quad (\text{Gl. 2-4})$$

Zur zahlenmäßigen Beschreibung der Turbulenz schlägt Davenport [1] folgenden Ansatz vor:

$$I_z = 2.45 \cdot \sqrt{K} \cdot \left(\frac{z}{10\text{m}} \right)^{-\alpha} \quad (\text{Gl. 2-5})$$

mit

K = Rauigkeitsparameter: 0.005 für Geländekategorie (a) (siehe Tabelle 2-1)

0.015 für Geländekategorie (b)

0.050 für Geländekategorie (c)

z = Höhe über Geländeoberkante

α = Exponentialfaktor

2.2. Stand der deutschen Normung

Die deutschen Vorschriften DIN 1055, DIN 4228, DIN 4131, DIN 4133 sowie der Ergänzungserlaß zu DIN 1055 Teil 4: „Windlastannahmen bei hohen Hochhäusern in Frankfurt“ [6] spiegeln den derzeitigen Stand der Technik in Deutschland wider. Auf die äußerst unbefriedigende Beschreibung des Windprofils in der DIN 1055 Teil 4 wird hier nicht näher eingegangen.

Der für die Berechnung von Windlasten auf Hochhäuser im Raum Frankfurt/Main maßgebende Ergänzungserlaß basiert auf dem Exponentialansatz nach Davenport. Allerdings wird hier nicht zwischen verschiedenen Rauigkeiten des umgebenden Geländes unterschieden, sondern immer das ungünstigste Profil für offenes Gelände (Kategorie (a) nach Tabelle 2-1) angesetzt:

$$v(z) = v(10\text{m}) \cdot \left(\frac{z}{10\text{m}} \right)^{0,16} \quad (\text{Gl. 2-6})$$

mit:

z = Höhe über Geländeoberkante

$v(10\text{m})$ = Referenzwindgeschwindigkeit in 10 m Höhe (aus meteorologischen Daten)

Die statische Windlast auf ein Gebäude ergibt sich bekanntermaßen aus dem Staudruck – ermittelt aus der mittleren Windgeschwindigkeit – multipliziert mit einem aerodynamischen Beiwert und integriert über die Bauwerksobertfläche:

$$W = \sum c_{f,i} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v(z)^2 \cdot A_i \quad (\text{Gl. 2-7})$$

Zur Berücksichtigung von dynamischen Effekten wird mit Hilfe der Spektralmethode nach Davenport ein Böenreaktionsfaktor Φ_R berechnet, mit dem die statische Windkraft W zu vervielfachen ist:

$$W_{\text{crs}} = \Phi_R \cdot W \quad (\text{Gl. 2-8})$$

Der Böenreaktionsfaktor ergibt sich nach einem vereinfachten Näherungsansatz, wodurch die aufwendige Integration über die spektrale Dichte der Gebäudereaktion vereinfacht wird:

$$\Phi_R = 1 + r \cdot \sqrt{B + \frac{s \cdot F}{\delta}} \quad (\text{Gl. 2-9})$$

mit:

$$r = 2 \cdot g \cdot I_z = 1.21 \cdot \left(\frac{h}{10} \right)^{-0.16} \quad (\text{Geländefaktor}) \quad (\text{Gl. 2-10})$$

$$B = \frac{8}{9} \cdot \int \frac{1}{1+x \cdot \frac{h}{450}} \cdot \frac{1}{1+x \cdot \frac{b}{120}} \cdot \frac{x}{(1+x^2)^{\frac{4}{3}}} \cdot dx \quad (\text{Böengrundanteil}) \quad (\text{Gl. 2-11})$$

$$s = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{1}{1 + \frac{8}{3} \cdot \frac{n_0 \cdot h}{v_m(h)}} \cdot \frac{1}{1 + 10 \cdot \frac{n_0 \cdot b}{v_m(h)}} \quad (\text{Größenfaktor}) \quad (\text{Gl. 2-12})$$

$$F = \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{x_0^2}{(1+x_0^2)^{\frac{4}{3}}} \quad ; \quad x_0 = \frac{1200 \cdot n_0}{v_m(h)} \quad (\text{Energiefaktor}) \quad (\text{Gl. 2-13})$$

b.h = Breite und Höhe des Gebäudes

$v_m(h)$ = Mittlere Windgeschwindigkeit in der Gebäudehöhe

n_0 = Grundeigenfrequenz der Gebäudebiegeschwingung

δ = Logarithmisches Dämpfungsdekrement (= $2 \cdot \pi \cdot D$)

D = Dämpfungsbeiwert

Aus den angegebenen Beziehungen wird ersichtlich, daß auch bei der Berechnung des Böenreaktionsfaktors nicht zwischen verschiedenen Geländerauhigkeiten unterschieden wird, sondern stets von offenem Gelände auszugehen ist.

2.3. Stand der europäischen Normung

In der europäischen Normung sind Windeinwirkungen auf Gebäude im Eurocode 1, Teil 2.4 [2] behandelt. Wie in der entsprechenden deutschen Vorschrift wird auch hier zunächst eine mittlere Windbeanspruchung ermittelt, die schließlich mit mehreren Faktoren zu einer Ersatzwindlast führt, welche die dynamischen Wirkungen des Windes auf das Gebäude berücksichtigt.

Im Gegensatz zur Deutschen Normung liegt der Beschreibung der mittleren Windgeschwindigkeit ein logarithmisches Gesetz zugrunde:

$$v_m(z) = c_t(z) \cdot k_T \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot v_{ref} \quad (\text{Gl. 2-14})$$

Die Parameter k_T und z_0 hängen von der Rauigkeit des umgebenden Geländes ab, wobei nach Tabelle 2-3 vier Kategorien zu unterscheiden sind. Desweiteren ist in Eurocode 1, Teil 2.4 eine Mindesthöhe z_{min} definiert unterhalb derer die Windgeschwindigkeit konstant anzunehmen ist.

Geländekategorie		k_T	z_0 [m]	z_{min} [m]
I	Offene See; Seen mit mindestens 5 km freier Fläche in Windrichtung; glattes, flaches Land ohne Hindernisse	0.17	0.01	2
II	Landwirtschaftlich genutztes Gelände mit Begrenzungshecken, einzelnen Gehöften, Häusern oder Bäumen	0.19	0.05	4
III	Vororte von Städten oder Industrie- und Gewerbeflächen; Wälder	0.22	0.3	8
IV	Stadtgebiete, bei denen mindestens 15 % der Fläche mit Gebäuden bebaut ist, deren mittlere Höhe 15 m überschreitet	0.24	1.0	16

Tabelle 2-3: Geländekategorien nach Eurocode 1 [2]

Die Referenzgeschwindigkeit wurde so gewählt, daß sich für die Geländekategorie II in 10 m Höhe die gleiche Windgeschwindigkeit ergibt wie in der DIN bzw. dem Ergänzungserlaß [6]. Allerdings gelten die Festlegungen nach Eurocode 1, Teil 2.4 [2] nur für Gebäudehöhen bis 200m.

Die Berücksichtigung der dynamischen Wirkung der Windbeanspruchung basiert – wie in der Deutschen Normung – auf der Spektralmethode nach Davenport. Auch hier wird aus der mittleren Windlast eine Ersatzlast errechnet. Im Unterschied zur deutschen Normung wird allerdings der Böenreaktionsfaktor anders aufgeteilt und die aerodynamischen Übertragungsfunktion geringfügig modifiziert. Prinzipiell stimmen beide Verfahrensweisen jedoch überein.

3. Beschreibung des Meßkonzeptes

3.1. Beschreibung der untersuchten Gebäude

Der Neubau der Landesbank Hessen-Thüringen (MAIN TOWER) erreicht eine Höhe von 198 m und hat 57 Ober- und 5 Untergeschosse. Der Grundriß hat die Geometrie eines Quadrates und eines Kreises die sich überschneiden. Das Gebäude ist durch mehrere Kerne ausgesteift.

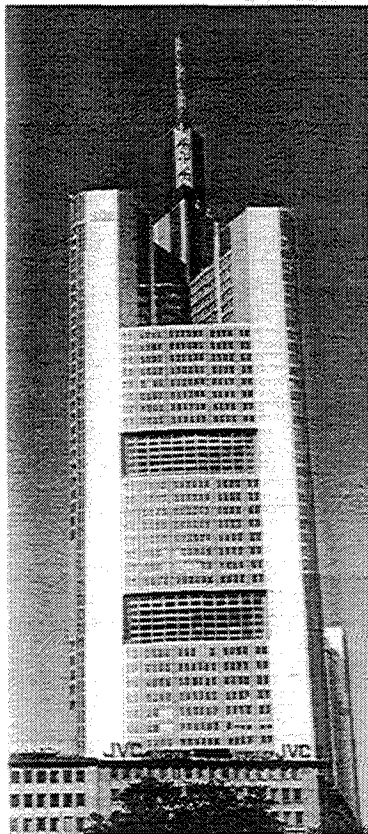


Bild 3-1: COMMERZBANK

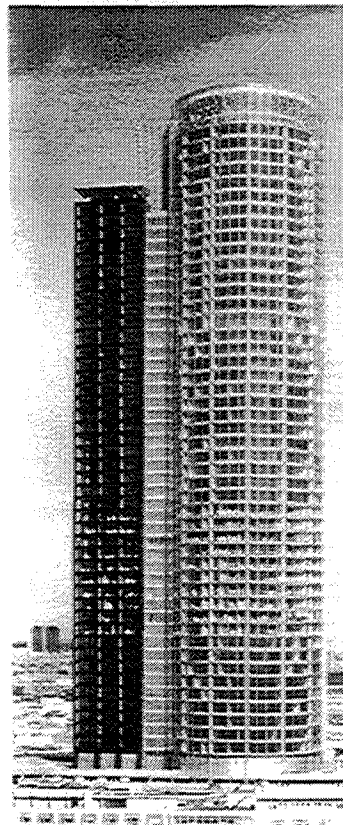


Bild 3-2: MAIN TOWER

Das COMMERZBANK-Hochhaus hat zwei Untergeschosse und 63 Obergeschosse und erreicht einschließlich des Technik-Geschosses eine Höhe von 258,75m. Mit dem sich daran anschließenden 40m hohen Antennenmast erreicht das Gebäude eine Gesamthöhe von 298,75m und ist damit das höchste Bürogebäude Europas. Der Grundriß besitzt die Form eines gleichseitigen Dreiecks mit abgerundeten Ecken.

3.2. Beschreibung der Meßpunkte

Ziel der Messungen war es, in einem Gebiet mit Innenstadtbebauung die Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen aufzunehmen. Dafür wurde auf der Baustelle des MAIN TOWERS an einem der beiden Kletterkräne eine Windmeßanlage installiert. Die Meßstelle auf der COMMERZBANK, die sich in einer größeren Höhe befindet, wurde als Referenzmeßstelle genutzt. An der Meßstelle des MAIN TOWERS wurden die Windgeschwindigkeiten im 2-Sekunden-Takt, an der COMMERZBANK im 5-Sekunden-Takt gemessen.

Die Windmeßstation wurde vom Institut für Massivbau auf dem größten Kletterkran der Hochhausbaustelle MAIN TOWER unterhalb des Drehkranzes montiert. Um eine Beeinflussung der Meßdaten durch die Bauwerksumströmung auszuschließen, mußten die Windräder immer einen ausreichenden Abstand zur Gebäudeoberkante besitzen.

Diese Windmeßeinrichtung wandert während der Bauphase mit dem Kran nach oben und liefert so vom Neubau unbeeinflusste Windgeschwindigkeitsdaten in verschiedenen Höhen. Die Messungen wurden in 51,3 m; 64,8 m; 96,3 m; 123,3 m; 135,46 m und 151,96 m Höhe durchgeführt.

Zur Ermittlung eines Profils der mittleren Windgeschwindigkeit werden die am Bauwerksstandort zu verschiedenen Zeiten gemessenen Geschwindigkeiten mit den simultan auf dem COMMERZBANK-Hochhaus gemessenen mittleren Windgeschwindigkeiten normiert. Die Referenz-Meßstelle auf dem COMMERZBANK-Hochhaus befindet sich an dem Antennenmast und ist etwa in der Mitte des Mastes installiert. Sie liegt somit auf einer Höhe von 275 m und ist ca. 20 m von der Gebäudeoberkante entfernt. Man kann aufgrund der 20m Entfernung der Windräder von der Gebäudeoberkante davon ausgehen, daß die gemessenen Windgeschwindigkeiten nicht durch die Bauwerksumströmung beeinflusst werden und von einem ungestörten Anstrom des Windes an die Windräder sprechen.

3.3. Beschreibung der Meßeinrichtungen

Beide Meßstationen bestehen aus zwei senkrecht zueinander in einer horizontalen Ebene liegenden Flügelradanemometern, die die Windgeschwindigkeit in diesen ausgezeichneten Richtungen messen. Durch die Umdrehung des Windrades werden über Lichtschranken Impulse ausgelöst, deren Frequenz proportional zur Drehgeschwindigkeit und damit zur Windgeschwindigkeit ist. Die Anemometer sind zusätzlich mit einem Außentemperaturfühler und einer Heizung ausgestattet, um bei sinkender Temperatur eine Beeinträchtigung der Windräder auszuschließen und weiterhin die Messung der exakten Windgeschwindigkeiten zu gewährleisten.

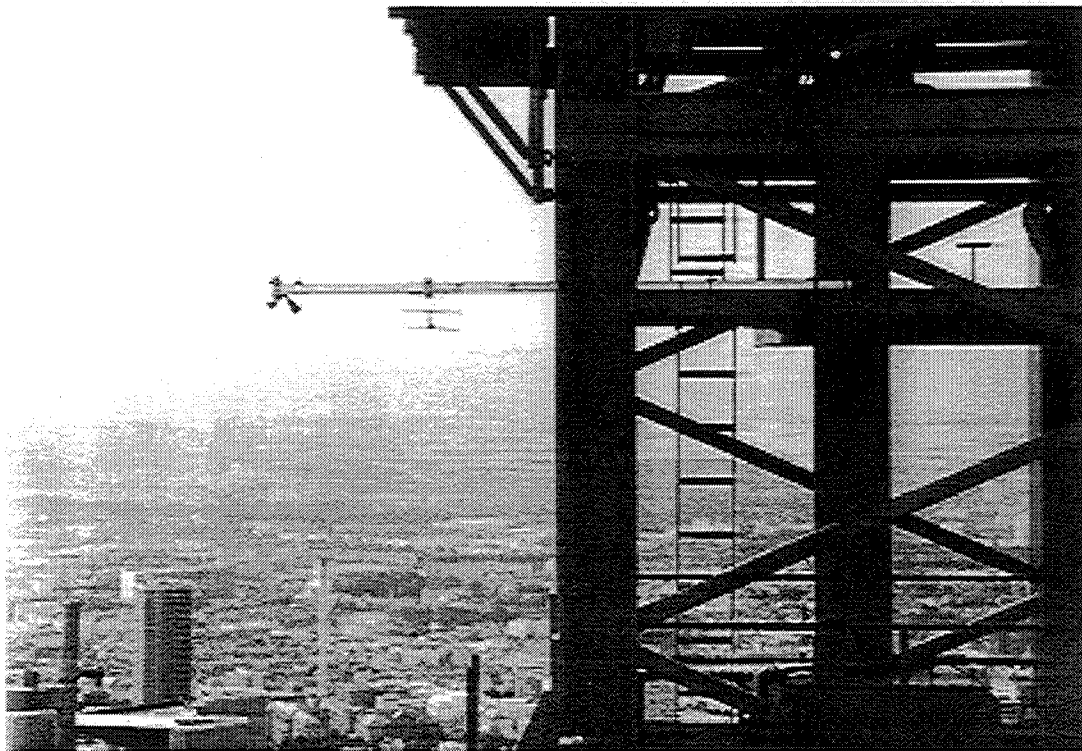


Bild 3-3: Windmeßeinrichtung am Kletterkran

Diese Meßgeber sind mit einem Schaltkasten verbunden, der sich in ihrer Nähe befindet. In diesem Kasten befindet sich die Elektronik zur Aufbereitung der Meßsignale sowie ein Modem zur Übertragung der Daten an einen PC. Die gemessenen Daten werden an den PC übertragen und dort mit einem am Institut für Massivbau entwickelten, speziellen Meßprogramm aufgenommen und weiterverarbeitet.

Am MAIN TOWER wurden die gemessenen Werte über ein Funkmodem an den Computer im nebenan gelegenen Helaba-Hochhaus übermittelt. An der Meßstelle auf der COMMERZ-BANK wurden die Meßwerte über hausinterne Leitungen an einen im zweiten Untergeschoß befindlichen Computer gesendet.

3.4. Beschreibung des Rechenprogrammes zur Auswertung der Meßdaten

3.4.1. Auswahl einer geeigneten Software

Die gemessenen Daten wurden an einen PC weitergegeben und dort mit dem am Institut für Massivbau entwickelten Meßprogramm MW aufgenommen. Dieses Programm ist ein reines Meßprogramm und nicht zur Analyse von weiterführenden Daten konzipiert.

Aus diesem Grund mußten die gemessenen Werte - wie Windgeschwindigkeit in x- und y-Richtung, Temperaturgang u.s.w. - zunächst in ein anderes Format übertragen werden, um in einem nachfolgendem Programm die notwendigen Berechnungen durchführen zu können. Mit dem Programm MW ist es leicht möglich, die bei einer Messung aufgenommenen Werte in andere Dateiformate wie z.B. EXCEL zu konvertieren. Das Programm EXCEL ist für die Bearbeitung großer Datenmengen jedoch nicht geeignet. Aus diesem Grund wurden die Daten in ein MATLAB - Format konvertiert.

Zielsetzung der Anwendung des Programmes MATLAB ist es, alle für die Analyse der gemessenen Windgeschwindigkeiten und zur Erstellung eines Windprofiles erforderlichen Daten zu ermitteln und aufzubereiten. MATLAB ist ein umfangreiches mathematisches Programmpaket und deckt fast den gesamten Bereich der Mathematik ab. Seine Arbeitsweise besteht vornehmlich auf der Basis der Vektoren und Matrizen. Man kann vorhandene Datenreihen ebenso graphisch zwei- oder dreidimensional darstellen. Es besitzt auch eine eigene Programmiersprache. Mit dieser Programmiersprache kann man beliebig viele Unterprogramme, sogenannte M - Files, erstellen und die eingelesenen Werte und Daten verarbeiten. Diese M-Files können zu einem bestimmten Zeitpunkt im Rechenablauf aufgerufen werden und dann die erforderlichen Berechnungen durchführen.

3.4.2. Beschreibung des entwickelten Auswerte-Programmes in MATLAB

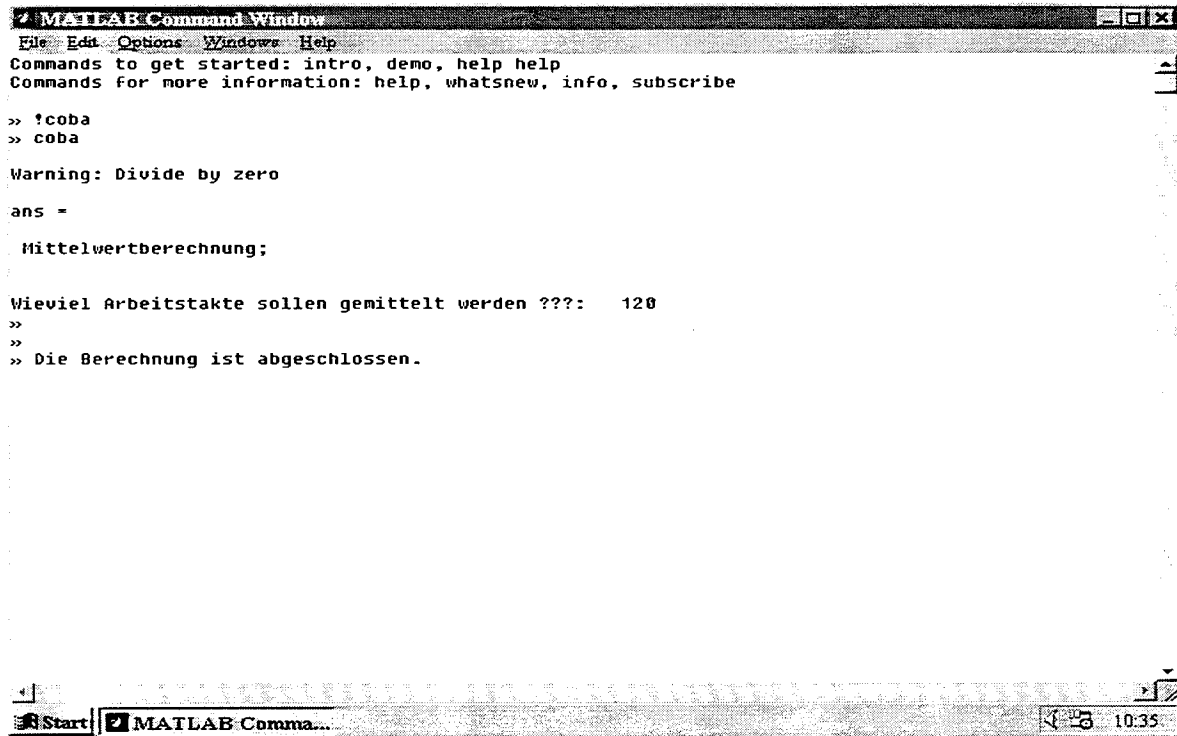
Mit den vorhandenen Windgeschwindigkeiten in x- und y-Richtung berechnet das Programm die globalen Windgeschwindigkeitskomponenten in den Richtungen Nord und Ost. Mit diesen globalen Werten können dann die absolute Windgeschwindigkeit und die tatsächliche Winkelrichtung gegenüber Nord berechnet werden.

In den nun vorhandenen, zum Teil schon berechneten Vektoren befinden sich die Werte, die im Falle MAIN TOWER alle zwei Sekunden, bzw. im Falle COMMERZBANK alle fünf Sekunden aufgenommen wurden. Diese Werte sind aber nicht repräsentativ. Um Einflüsse aus Böigkeit und Turbulenzen aufzufangen, ist es üblich, die Windprofile auf der Basis von Zehn-Minuten-Mittelwerten zu erstellen und auszuwerten. Deshalb ist das Programm so konzipiert, daß der Anwender selbst eingibt, wieviel Werte abhängig vom Meßtakt nötig sind, um aus den vorhandenen Daten Zehn-Minuten-Mittelwerte zu erstellen. Das Programm gestattet dem Anwender jedoch die Auswahl welche Komponenten er mitteln möchte und wie viele Werte gemittelt werden sollen. So kann zum Beispiel variabel auch ein Ein-Stunden-Mittelwert erstellt werden.

Das Programm bietet die Möglichkeit, die absolute Windgeschwindigkeit, die Windgeschwindigkeit in Nord- und Ost-Richtung und die Windrichtung zu erstellen, die maximale und minimale Geschwindigkeit anzugeben, den Böfaktor und die Standardabweichung zu errechnen, die Varianz und die Turbulenzintensität anzuzeigen. Dies alles erfolgt in dem vorab gewählten Zeitbereich. Am Ende speichert das Programm die Datei automatisch unter dem alten Namen mit dem Zusatzbuchstaben **f** ab und erzeugt eine Ausgabe- (Out-) Datei mit allen zur weiteren Berechnung relevanten Faktoren, die dann in EXCEL eingelesen werden können. Die Ausgabe- Datei sollte in EXCEL eingelesen werden, da in EXCEL bessere und mehrere Möglichkeiten bestehen, die Daten darzustellen und miteinander zu vergleichen.

Ohne gewisse Grundkenntnisse in MATLAB würde sich die Anwendung des Programmes relativ schwierig gestalten. Deshalb wurde mit der Programmiersprache Pascal noch eine Eingabemaske programmiert, die dieses Auswerteprogramm enthält, damit der Anwender nur noch das Programm MATLAB aufrufen muß und das Kennwort für den MAIN TOWER oder

die COMMERZBANK eingibt, abhängig davon, an welchem Bauwerk die Daten gemessen wurden. Wurde der Name eingegeben und bestätigt, arbeitet das Programm selbstständig und der Anwender muß nur lediglich die Fragen, was und in welchen Arbeitstakten gemittelt werden soll, beantworten.



```

MATLAB Command Window
File Edit Options Windows Help
Commands to get started: intro, demo, help help
Commands for more information: help, whatsnew, info, subscribe

>> !coba
>> coba

Warning: Divide by zero
ans =

Mittelwertberechnung;

Wieviel Arbeitstakte sollen gemittelt werden ???: 120
>>
>> Die Berechnung ist abgeschlossen.

```

Bild 3-4: Programm MATLAB

4. Ergebnisse der Messungen und Auswertung

4.1. Windprofil

Die folgenden Darstellungen, die den Vergleich der Feldmessungen mit den theoretischen Ansätzen zeigen, bilden die relativen Windgeschwindigkeiten in einem bestimmten Winkelbereich ab. In diesem Winkelbereich werden die Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen dargestellt. Die unterschiedlichen Höhen, für die Meßwerte vorliegen, wurden durch die jeweilige Höhe des Kletterkranes bestimmt, dadurch liegen die unterschiedlichen Höhen in einem Bild teilweise mehrere Monate auseinander.

Beim Vergleich der gemessenen Zehn-Minuten-Mittelwerte mit den theoretischen Ansätzen wurde die in einer Höhe von 275m an der COMMERZBANK gemessene Geschwindigkeit als Bezugsgeschwindigkeit verwendet. Die anderen gemessenen Geschwindigkeiten in den verschiedenen Höhen des MAIN TOWER werden als Relativgeschwindigkeit auf die Höhe in 275m bezogen.

Die Windprofile, mit denen die gemessenen Geschwindigkeiten verglichen wurden, sind nach Davenport mit den Rauigkeitsparametern $\alpha = 0,4$ (Innenstadt) und $\alpha = 0,28$ (Vororte) erstellt worden. Auf den folgenden Bildern sind neben den Windprofilansätzen und den gemessenen Geschwindigkeiten auch noch die Bereiche angegeben, in dem sich der Winkel der Windrichtung sowie der Bereich der Windgeschwindigkeiten bewegen.

Für eine Anströmrichtung des Windes aus Nord bis Nord-Nordost konnten am MAIN TOWER Windgeschwindigkeiten in den Höhen 51m, 65m, 96m und 135m aufgenommen werden. Die Meßwerte unterliegen zum Teil einer stärkeren Streuung. Es ist jedoch mit zunehmender Höhe eine Erhöhung der Windgeschwindigkeiten zu erkennen. Die Werte liegen zwar unter der Linie für das Innenstadtprofil, die Meßwerte bilden aber auch die Form eines üblichen Windprofiles (*Bild 4-1*). Um die Geschwindigkeiten aus dieser Richtung richtig einzuschätzen, genügt das Profil nach Davenport mit dem Rauigkeitsparameter $\alpha = 0,4$. Die gemessene Geschwindigkeit liegt sogar deutlich unter dem Profil nach Davenport.

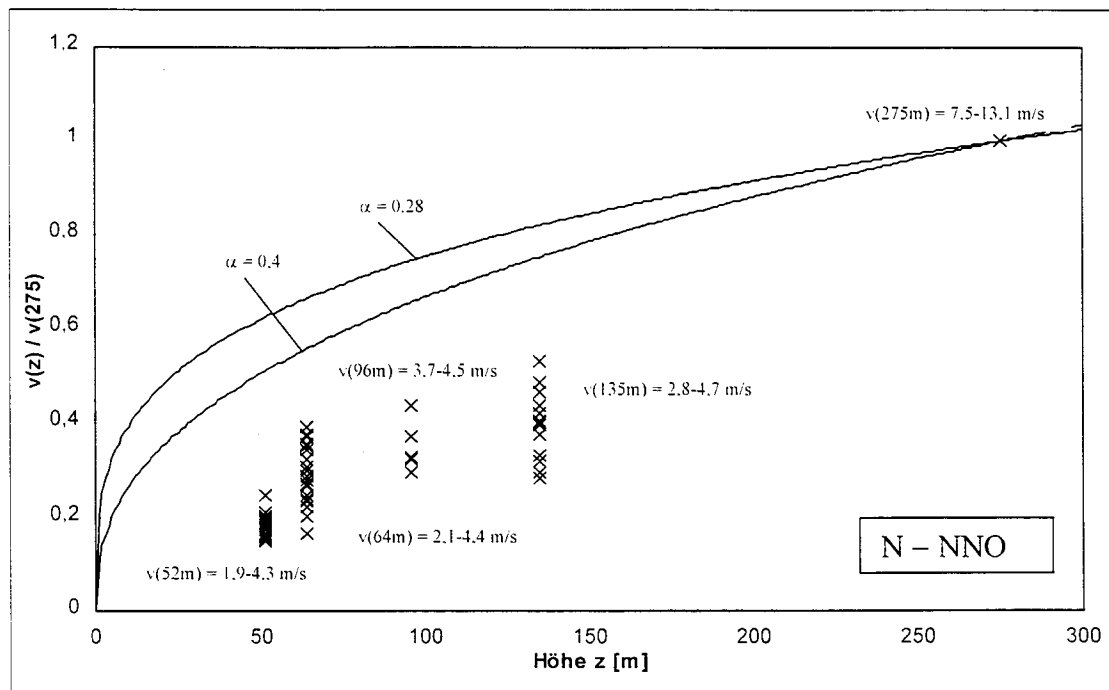


Bild 4-1: Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Nord bis Nord-Nordost und Windgeschwindigkeiten bis 13,5 m/s

Für die Windrichtung Ost bis Südost auf der COMMERZBANK konnte nur in einer Höhe von 51m eine für die Auswertung ausreichende Windgeschwindigkeit am MAIN TOWER gemessen werden (Bild 4-2). Hier entspricht die Anströmrichtung am MAIN TOWER jedoch nicht der auf der COMMERZBANK. Sie liegt in etwa bei Ost-Nordost. In der Richtung Ost bis Südost vom MAIN TOWER befindet sich ein mit Hochhäusern eng bebauter Bereich. Hier stehen u.a. die COMMERZBANK sowie die HELABA in genau dieser Richtung, so daß sich diese Anströmung am MAIN TOWER durch die Umströmung der umliegenden Gebäude ergibt. Die gemessenen Werte liegen alle unterhalb des Profils für eine Innenstadtbauung. Um jedoch abschließend zu bestätigen, daß für diese Windrichtung das Windprofil für eine Innenstadtbauung ausreicht, sind noch zu wenige Meßwerte vorhanden. Dazu benötigt man noch Meßwerte in größeren Höhen, um dort die mögliche Umströmung durch umliegende Gebäude zu beurteilen. Eine Umströmung kann sowohl eine Verringerung der Geschwindigkeit als auch eine Beschleunigung infolge des Düseneffekts hervorrufen.

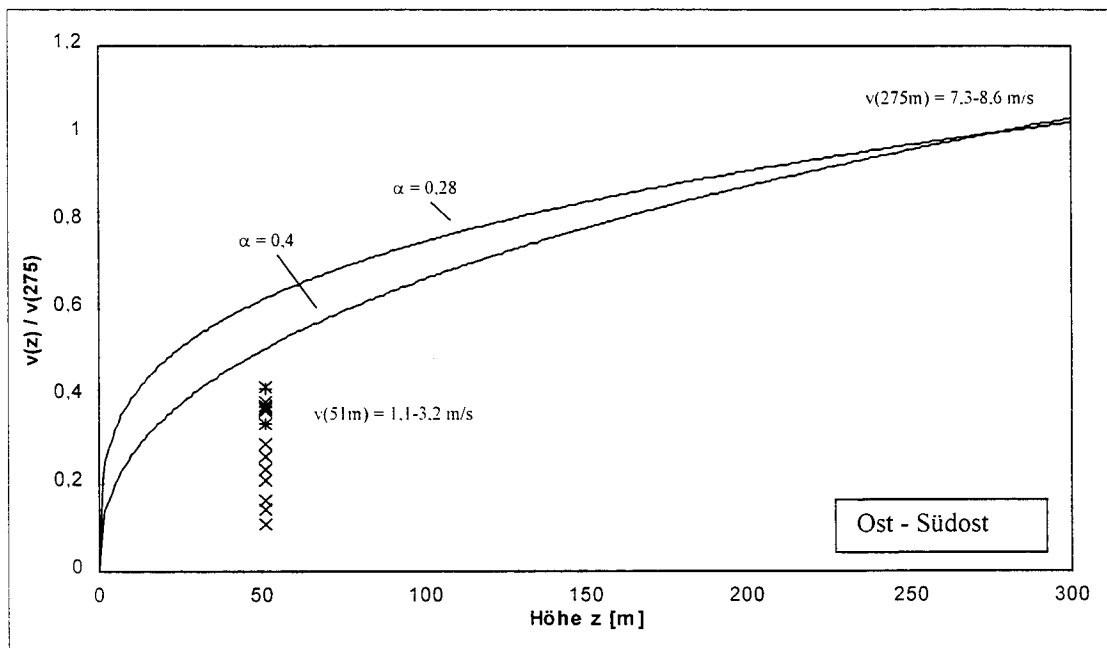


Bild 4-2: Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Ost bis Südost und Windgeschwindigkeiten bis 8,6 m/s

Für eine an der COMMERZBANK gemessene Windrichtung von Nordost bis Ost-Nordost findet sich eine gute bis sehr gute Übereinstimmung der Winkel an COMMERZBANK und MAIN TOWER. Daraus kann man schließen, daß es sich hier um eine ungestörte Anströmrichtung am MAIN TOWER handelt. Da für diese Windrichtung das Profil mit dem Parameter $\alpha = 0,28$ ebenfalls durch die gemessenen Geschwindigkeiten überschritten worden ist, wurde eine Unterteilung der gemessenen Werte vorgenommen. Die Windgeschwindigkeit auf der COMMERZBANK wurde in den Bandbreiten 8-10 m/s und 10-12 m/s gestaffelt und die gleichzeitig am MAIN TOWER gemessenen Geschwindigkeiten diesen Werten zugeordnet. Für den Geschwindigkeitsbereich von 8-10 m/s auf der COMMERZBANK überschreiten die Werte in einer Höhe von 51m das Profil mit dem Rauigkeitsbeiwert $\alpha = 0,28$ (Bild 4-3). In dem Geschwindigkeitsbereich von 10-12 m/s liegen die Werte in der Höhe von 51m und 65m größtenteils unterhalb der Linie für das Innenstadtprofil oder zwischen den beiden Profilen (Bild 4-4).

Daraus kann man schließen, daß das Windprofil bei geringeren Windgeschwindigkeiten nicht dieselbe Form besitzt wie bei Starkwindereignissen. Somit kann in geringeren Höhen eine

über dem Windprofil liegende Geschwindigkeit auftreten. Diese These wird durch *Bild 4-4* gestützt, denn dort liegen die Meßwerte bei einer höheren Grundgeschwindigkeit alle unter dem Profil mit dem Parameter $\alpha = 0,28$.

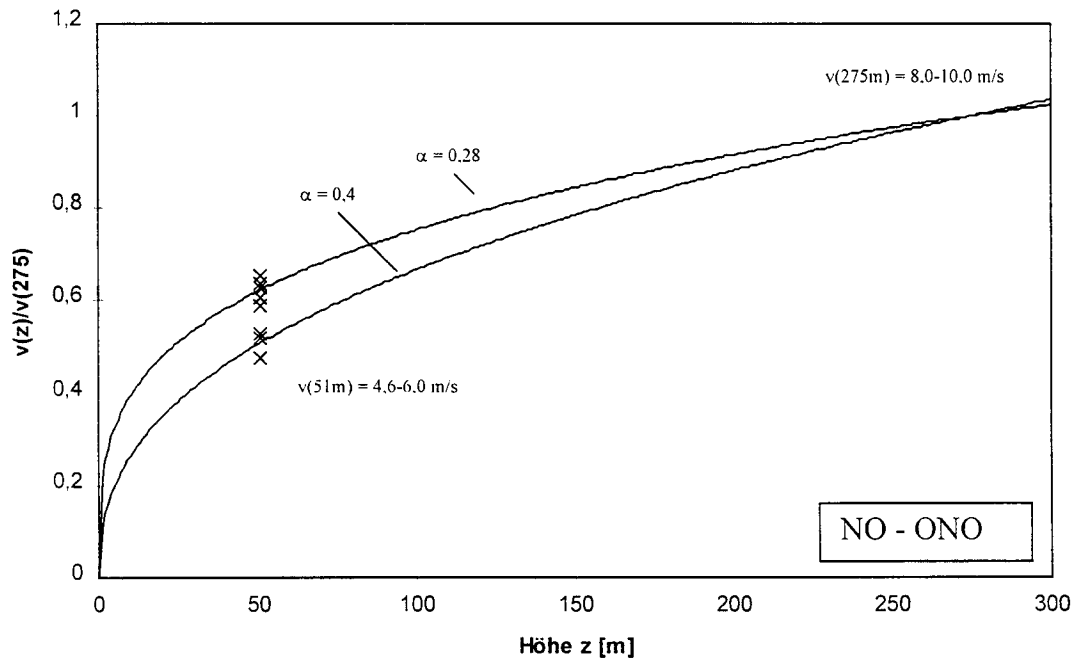


Bild 4-3: Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Nordost bis Ost-Nordost und das Windgeschwindigkeitsband 8-10 m/s

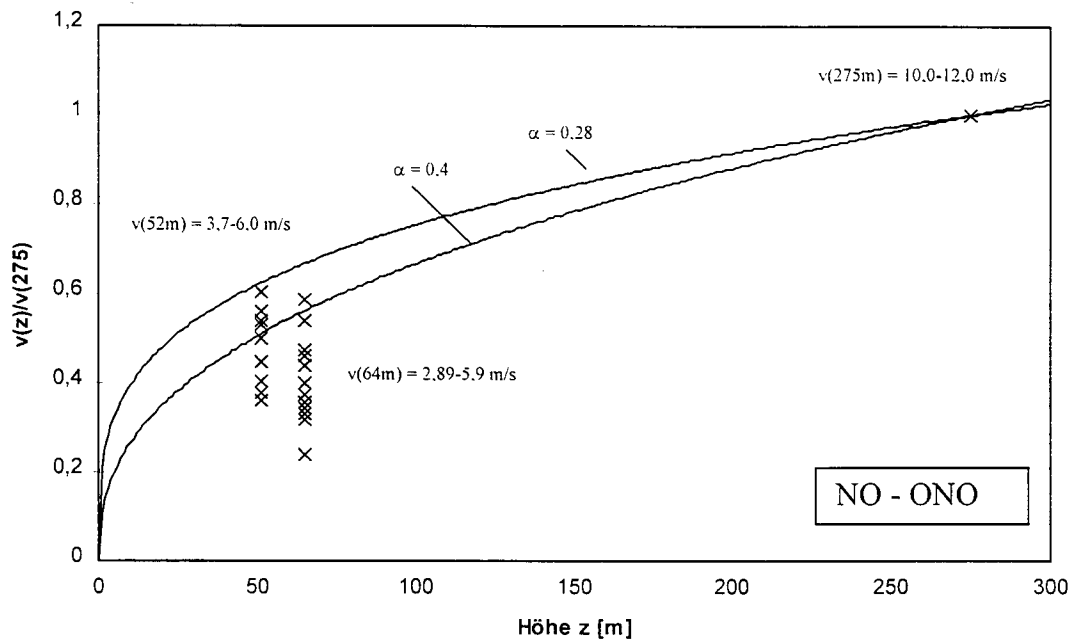


Bild 4-4: Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Nordost bis Ost-Nordost und das Windgeschwindigkeitsband 10-12 m/s

In Bild 4-5 und Bild 4-6 sind die gestaffelten Geschwindigkeiten für eine Anströmung aus Süd-Südwest dargestellt. Für die an der COMMERZBANK gemessene Geschwindigkeit von 8-10 m/s liegen in 65m Höhe einige Werte über dem Profil für die Vorstadtbebauung. Ein möglicher Grund dafür mag darin liegen, daß die auf der COMMERZBANK gemessenen Geschwindigkeiten von 8-10 m/s zu gering waren. In einem solchen Fall bildet sich das Windprofil anders aus als von Davenport vorgeschlagen, dessen Ansatz - aus Versuchen ermittelt - nur für Starkwindereignisse gilt. Das bedeutet, daß in einem solchen Fall in geringeren Höhen durchaus größere Geschwindigkeiten auftreten können.

Ein anderer Grund für die erhöhte Geschwindigkeit könnte in der in dieser Richtung befindlichen Taunusanlage liegen. Diese relativ ebene und freie Fläche paßt nicht in die Zuordnung Innenstadt. Dadurch könnte der Wind in diesem Bereich nochmals beschleunigen und so die überhöhte Geschwindigkeit verursachen.

In der Höhe von 135m stehen nur zwei verschiedene Meßwerte mit geringer Geschwindigkeit zur Verfügung. Der große Geschwindigkeitsverlust zu den anderen Höhen darf in diesem Fall

nicht zu hoch beurteilt werden. Wie schon erwähnt, handelt es sich nicht um eine zeitgleiche Messung der verschiedenen Höhen sondern in diesem Fall liegen die Messungen 5-6 Monate auseinander. Das bedeutet, dass sich für die verschiedenen Zeiträume ein jeweils völlig anderes Profil gebildet haben kann.

Die oben angeführten Gründe gelten ebenso für die Darstellung im Geschwindigkeitsbereich von 10-12 m/s. In dieser Richtung befindet sich außerdem eine relativ gleichmäßige Bebauung über eine Höhe von 10-12m, die noch nicht dem klassischen Innenstadtprofil nach Davenport entspricht.

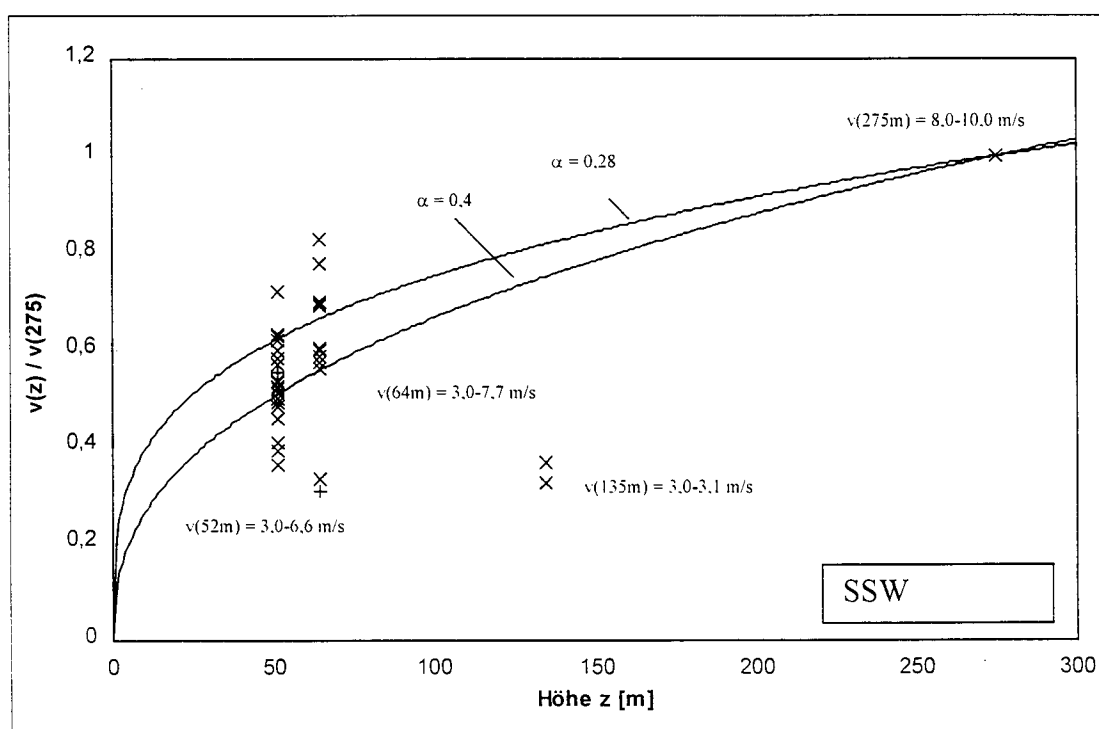


Bild 4-5 Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Süd-Südwest und das Windgeschwindigkeitsband 8-10 m/s

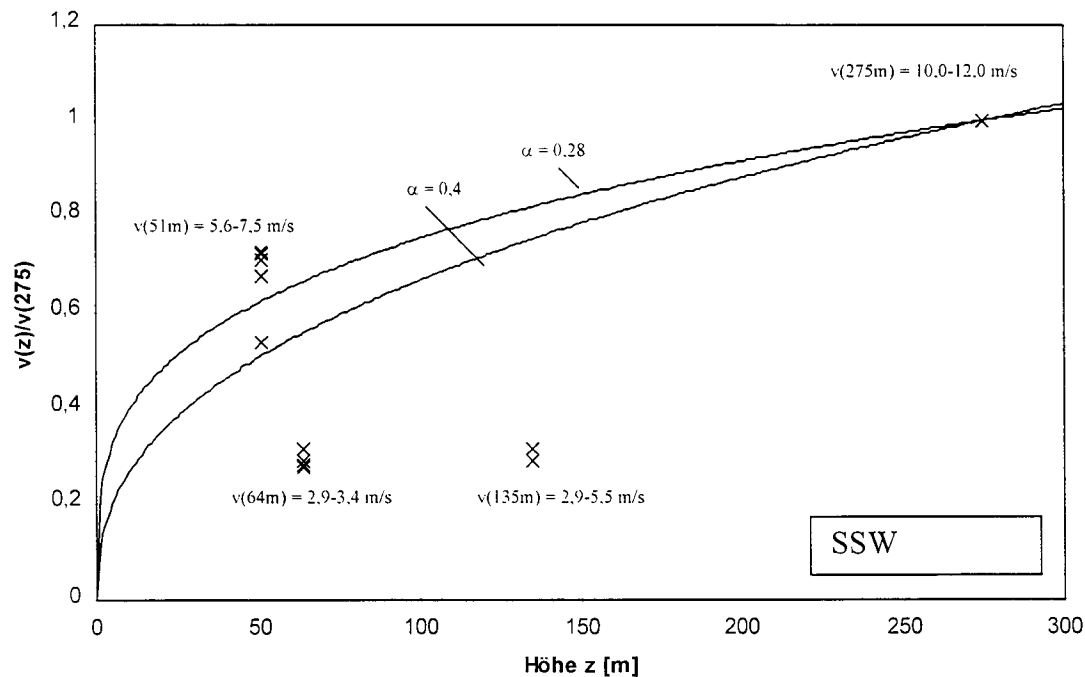


Bild 4-6 Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Süd-Südwest und das Windgeschwindigkeitsband 10-12 m/s

Für die Anströmrichtung Südwest bis West wurden die auf der COMMERZBANK gemessenen Geschwindigkeiten in die drei Bandbereiche 10-12 m/s, 12-14 m/s sowie 14-16 m/s unterteilt. Im Bereich von 10-12 m/s sind für alle Kranhöhen Meßwerte verfügbar (Bild 4-7). In den Höhen 96m und 123m sind die Geschwindigkeiten auf dem MAIN TOWER sehr gering. Der Grund dafür liegt darin, daß der Kran in 96m im Windschatten des MAIN TOWERS stand, während in der Höhe 123m die gemessenen Werte schon durch die Gebäudeumströmung des MAIN TOWERS beeinflußt wurden.

In den drei anderen Höhen unterliegen die Meßwerte einer größeren Streuung und reichen über beide berechneten Profile hinaus. Man kann hier wieder die Begründung der zu geringen Windgeschwindigkeiten anführen. Diese These wird auch durch die Bilder aus derselben Windrichtung mit höheren Geschwindigkeiten (Bild 4-8, Bild 4-9) bestätigt. Eine Überschreitung des Profiles durch die Meßwerte ist dort fast nicht mehr gegeben. Eine andere mögliche

Erklärung liegt wieder in der in dieser Richtung befindlichen Taunusanlage. Über diesem freien Feld können die Geschwindigkeiten nochmals erhöht werden.

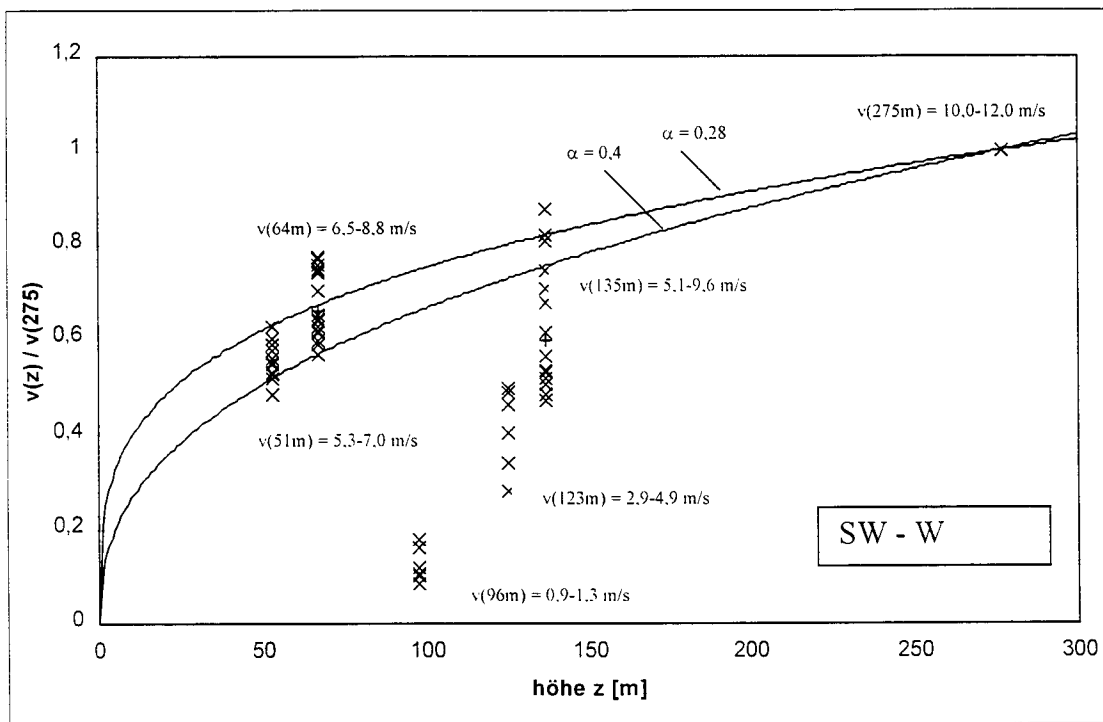


Bild 4-7 Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Südwest bis West und das Windgeschwindigkeitsband 10-12 m/s

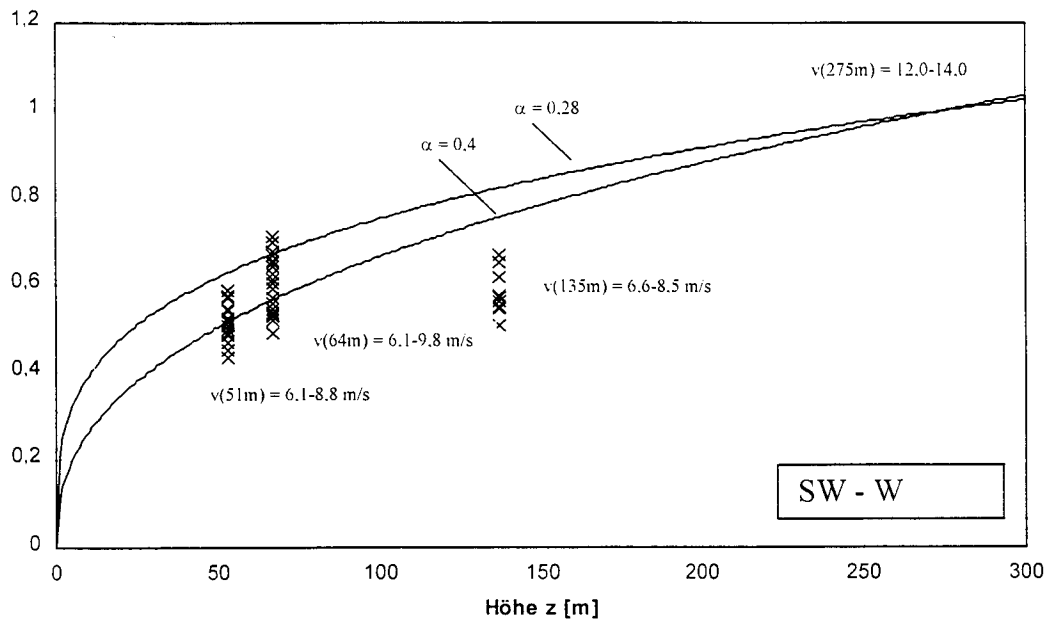


Bild 4-8 Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Südwest bis West und das Windgeschwindigkeitsband 12-14 m/s

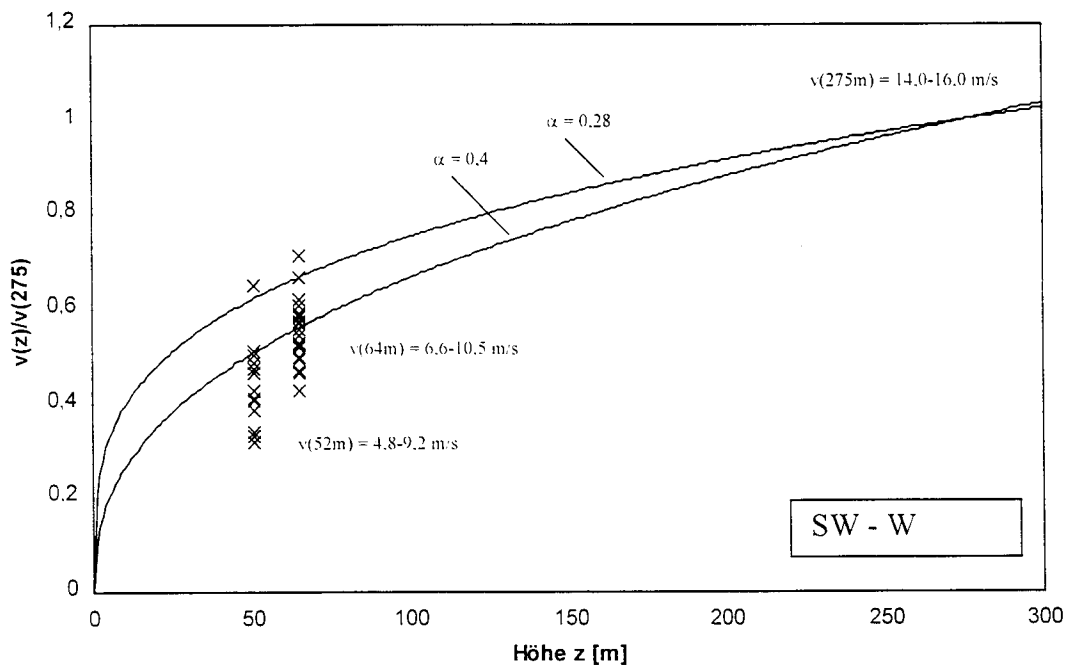


Bild 4-9 Vergleich der Feldmessungen mit den Windprofilen nach Davenport für die Windrichtung Südwest bis West und das Windgeschwindigkeitsband 14-16 m/s

4.2. Turbulenz des Windes

Die Turbulenzintensität beschreibt die dynamischen Eigenschaften der Windeinwirkung wird als das Verhältnis der Standardabweichung zur mittleren Windgeschwindigkeit angegeben.

$$f_T = \frac{\sigma_u}{v_{\text{mean}}}$$

In der großen Höhe von 275m auf der COMMERZBANK sinkt die Turbulenzintensität mit steigender mittlerer Windgeschwindigkeit ab. Die Streuung der Werte ist dabei relativ gering. Demgegenüber wird an der Meßstelle MAIN TOWER die Turbulenzintensität bei größerer Streuung stark von der Meßstellenhöhe sowie den umliegenden Hochhäusern beeinflusst (Bild 4-10).

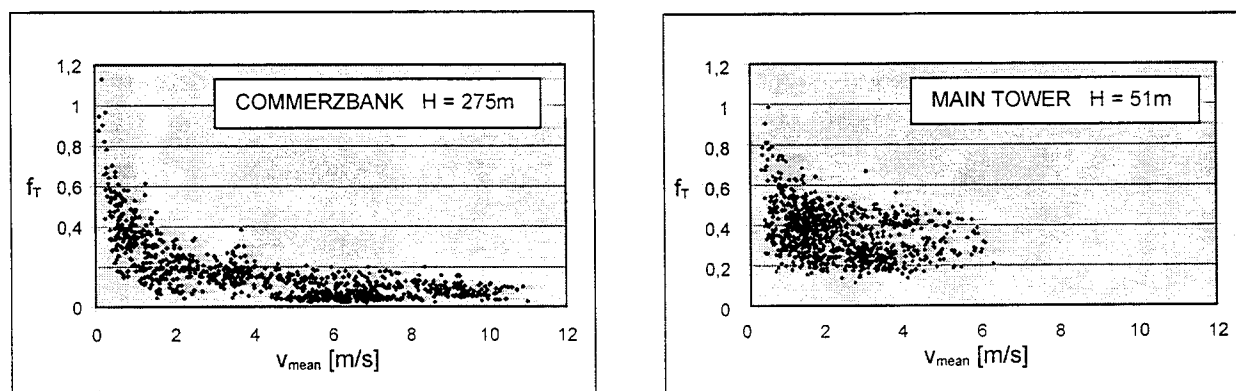


Bild 4-10: Turbulenzintensität an COMMERZBANK und MAIN TOWER

5. Schlußfolgerungen

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden die Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen an den Hochhäusern MAIN TOWER und COMMERZBANK gemessen und analysiert, um einen Vergleich mit den von Davenport vorgeschlagenen Windprofilen zu ziehen. Dazu wurden die Profile für die Geländeklassen "Innenstadt" und "Vororte" herangezogen. Für die verschiedenen Windrichtungen ergaben sich im Vergleich der gemessenen Werte mit den Profilen nach Davenport für die verschiedenen Geschwindigkeitsbereiche unterschiedliche Ergebnisse.

Für die beiden Windrichtungsbereiche Ost bis Südost sowie Nord bis Nord-Nordost liegen die am MAIN TOWER gemessenen Windgeschwindigkeiten alle unter dem Windprofil für eine Innenstadtbebauung. Strömt der Wind aus einer Richtung von Nordost bis Ost-Nordost auf das Bauwerk, reicht das Profil für die Innenstadtbebauung nicht mehr aus. Das Profil für Vororte wird sogar minimal überschritten. Die selben Merkmale lassen sich für die Windrichtungen Süd bis West-Südwest feststellen. Bei einer Unterteilung der an der COMMERZBANK gemessenen Windgeschwindigkeiten in verschiedene Geschwindigkeitsstufen stellt man fest, daß sich die Meßwerte am MAIN TOWER, mit einer an der COMMERZBANK anwachsenden Grundgeschwindigkeit, immer mehr dem Innenstadtprofil annähern und sich bei höheren Windgeschwindigkeiten zwischen dem Innenstadtprofil und dem Vorortprofil anordnen. Das bedeutet, es besteht eine Abhängigkeit zwischen der absoluten Windgeschwindigkeit und der Form des Windprofiles. Die Berücksichtigung des Windprofils für die Rauigkeitskategorie "offenes Gelände", die nach dem Ergänzungserlaß [6] stets anzusetzen ist, liefert dagegen deutlich zu hohe Windgeschwindigkeiten.

Der sehr geringe Anteil von das Vorortprofil überschreitenden Meßwerten kann vernachlässigt werden, wenn man berücksichtigt, daß die gemessenen Windgeschwindigkeiten noch keinem Starkwindereignis zuzuordnen sind und das von Davenport vorgeschlagene Profil nur für Starkwinde gilt. Außerdem ist in den *Bildern 4-7 bis 4-9* deutlich der Trend zu erkennen, daß sich die Windgeschwindigkeiten in unteren und mittleren Höhen bei zunehmender Geschwindigkeit in großer Höhe, immer mehr den Profilen nach Davenport anpassen.

Man kann aufgrund der vorhandenen Meßergebnisse davon ausgehen, daß bei Starkwindereignissen das Innenstadtprofil nach Davenport für die Bemessung eines Hochhauses im Frankfurter Bankenviertel zu geringe Windgeschwindigkeiten liefern würde. Dafür ist noch keine ausreichend hohe Bebauung mit entsprechender Oberflächenrauigkeit vorhanden.

Abschließend ist aufgrund der Auswertung der Meßergebnisse festzustellen, daß der Ansatz eines Innenstadtprofils in Frankfurt nicht für alle Windrichtungen genügt. Für die Berechnung der Windeinwirkungen auf Hochhäuser in der Innenstadt Frankfurts scheint jedoch das Vorortprofil nach Davenport ausreichend. Für eine Verallgemeinerung dieser Schlußfolgerung sind aber noch weitere Geschwindigkeitsmessungen erforderlich.

6. Zukünftiger Forschungsbedarf

6.1. Allgemeines

Im Sinne einer hinreichend aussagefähigen Datenbasis ist eine weiterführende Untersuchung der Windeigenschaften und der daraus resultierenden Gebäudereaktion an realen Gebäuden vorzusehen. Ergänzend zu den bisherigen Untersuchungen über das mittlere Windgeschwindigkeitsprofil sind wichtige Kenngrößen über die resultierenden Fassadendrucke sowie die statische und dynamische Beanspruchung von Hochhäusern notwendig. Das Interferenzverhalten von Hochhäusern gegenüber ihrer Nachbarbebauung, der Vergleich der Ergebnisse mit Windkanalversuchen sowie theoretischen Strömungsberechnungen auf der Grundlage von FE-Modellen sollten dabei im Mittelpunkt stehen. Daraus kann dann ein Rechenmodell zur wirklichkeitsnahen Beschreibung der Windeinwirkungen auf beliebig hohe Gebäude in Innenstadtlagen entwickelt werden.

6.2. Windgeschwindigkeit und Winddynamik

Die am Bauwerksstandort zu gleichen Zeitpunkten in verschiedenen Höhen gemessenen Windgeschwindigkeiten sollten systematisch hinsichtlich ihrer dynamischen Eigenschaften analysiert werden. Dabei werden Turbulenzintensitäten, Standardabweichungen, Mittelwerte und spektrale Dichten der Windgeschwindigkeiten aus den Messungen in der jeweiligen Höhe errechnet. Damit werden Aussagen über die Höhenabhängigkeit dieser Eigenschaften möglich.

Zur Ermittlung eines zuverlässigen Profils der mittleren Windgeschwindigkeit sind weitere Messungen im Frankfurter Hochhausgebiet erforderlich. Nur die Verfügbarkeit von Meßwerten an möglichst vielen Standorten und über einen langen Zeitraum gestattet eine abschließende Beurteilung der Problematik. Dazu können die vorliegenden Daten sowie die gegenwärtigen Meßstellen als Referenzmessungen herangezogen werden.

6.3. Verifikation mit Windkanalversuchen und FE-Berechnungen

Der Bauherr des Hochhauses MAIN TOWER hat umfangreiche Windkanalversuche mit anschließenden Strömungsberechnungen mit der FE-Methode durchführen lassen, die dem Institut für Massivbau zur Verfügung gestellt wurden. Anhand dieser Untersuchungen sollten die Feldmessungen verifiziert werden. Die punktuellen Messungen vor Ort können direkt mit den Windkanalversuchen verglichen werden. Da Windkanalversuche und Strömungsberechnungen in großem Umfang durchgeführt wurden, ist bei entsprechender Übereinstimmung mit den Meßergebnissen eine Verallgemeinerung der aus den Versuchen gewonnenen Schlußfolgerungen möglich.

6.4. Staudruck auf die Fassade

Der tatsächlich auf die Fassade in unterschiedlichen Höhen einwirkende Staudruck wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht bestimmt. Seine Kenntnis ist jedoch von großer technischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Zum einen könnte dann das Verhalten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wirklichkeitsnah modelliert werden. Zum anderen würden derartige Ergebnisse zugespitzte Sicherheitsbetrachtungen ermöglichen.

Durch Applizierung von Wegaufnehmern an die Fassadenscheiben eines im Bau befindlichen Hochhauses können die Fassadenverformungen unter Windbeanspruchung gemessen werden. Aus den Verformungsmessungen an den Fassaden können mit Hilfe geeigneter Kalibrierkurven zunächst die Druckverteilungen über die Fassade in Abhängigkeit von der Windrichtung zurückgerechnet werden. Der Vergleich mit den Windkanalversuchen ermöglicht generelle Aussagen über die Gebäudeaerodynamik. In diesem Zusammenhang ist auch die Lage von Ablösepunkten der Strömung, sowie von Druck- und Sogspitzen näher zu untersuchen, um hieraus allgemeine Erkenntnisse über das Interferenzverhalten benachbarter Gebäude zu gewinnen.

Weiterhin kann aus den Fassadendrücker in den verschiedenen Höhen der zugehörige Staudruck ermittelt werden. Dieser müßte mit einer berechneten Druckverteilung verglichen werden, die aus dem während der Bauzeit gemessenen bezogenen Windprofil und der simultan

mit den Fassadendrücken gemessene Windgeschwindigkeit bestimmt wird. Der Vergleich ist Grundlage für ein allgemein formuliertes Rechenmodell zur Windbeanspruchung hoher Bauwerke.

6.5. Dynamische Bauwerksreaktion

Die dynamische Bauwerksreaktion ist eine für die Bemessung des Tragwerks maßgebende Einwirkungsgröße. Sie ist aber auch für die Beurteilung der Gebäudeeigenschaften im Gebrauchszustand wichtig, um die sogenannten "Behaglichkeitskriterien" überprüfen zu können.

Zur Messung von Verformungen und Schwingungen des Gebäudes in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen müßten an der Gebäudeoberkante zwei Schwingungsmesser installiert werden. Derartige Verformungs- und Schwingungsmessungen könnten in Korrelation zu den auftretenden und gemessenen Windbeanspruchungen ausgewertet werden und gestatten eine Aussage über die dynamische Gebäudereaktion unter Windeinwirkung. Damit können die nach Davenport getroffenen Annahmen zur aerodynamischen Übertragungsfunktion verifiziert und gegebenenfalls verbessert werden. Des Weiteren würden die Schwingungsmessungen die Überprüfung der bei der Berechnung der mechanischen Übertragungsfunktion abgeschätzten Eingangsparameter erlauben.

6.6. Entwicklung eines Rechenmodells

Die ausgewerteten Meßergebnisse sind Grundlage für ein zu entwickelndes Rechenmodell zur wirklichkeitsnahen Beschreibung der Windbeanspruchung von Hochhäusern in Innenstadtbereichen sein. Dadurch wird es möglich, bestehende Ansätze zu verbessern und die Eingangsparameter in das Rechenmodell mit den im Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnissen zuzuschärfen. Dieser Ansatz kann dann auf Grundlage eines hinreichenden Wissensstandes zur Verbesserung der derzeit unbefriedigenden Normungssituation dienen.

7. Zusammenfassung

Wesentliches Ziel des beantragten Forschungsvorhabens war eine weiterführende Absicherung der am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt bereits erarbeiteten Erkenntnisse bezüglich der Windbeanspruchung von Hochhäusern. Dabei wurden schwerpunktmäßig das vorhandene Windprofil sowie die Turbulenzeigenschaften der Windeinwirkung untersucht.

Es wurde festgestellt, daß die ermittelten Windprofile deutlich unter den Ansätzen der Normen liegen. Für Starkwindereignisse hat sich der Ansatz der Geländerauhigkeit "Vororte" nach Davenport im innerstädtischen Bereich der Stadt Frankfurt für alle Anströmrichtungen als ausreichend erwiesen. Der Einfluß der Windturbulenz nimmt mit zunehmender Bauwerkshöhe ab.

Weiterführende Untersuchungen der Windeigenschaften und der Gebäudereaktionen an realen Bauwerken zur Bestimmung von Windgeschwindigkeitsprofil, Fassadendrücker sowie zum Interferenzverhalten zwischen benachbarten Bauwerken stehen noch aus und wären aus technischer und ökonomischer Sicht äußerst bedeutsam. Dies gilt insbesondere für eine zuverlässige Beurteilung der Fassadenbeanspruchung in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit sowie die Bewertung der Behaglichkeitskriterien von Hochhäusern unter dynamischer Windeinwirkung.

8. Literatur

- [1] Davenport, Alan G.. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 19. Seiten 449-472, 1961.
- [2] CEN Europäisches Komitee für Normung. Eurocode 1: Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 2.4: Windlasten, 1994.
- [3] Hellmann, G.. Über die Bewegung der Luft in den untersten Schichten der Atmosphäre. 1. Bis 3. Mitteilung, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften Berlin, 1914, 1917, 1919.
- [4] Plate, Erich J.. Engineering Meteorology. Elsevier Scientific Publishing Company, 1982.
- [5] Wieringa, J.. Updating the Davenport roughness classification. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44. Seiten 357-368, Elsevier, Amsterdam, 1992.
- [6] Hessisches Ministerium des Innern. Ergänzungserlaß zu DIN 1055, Teil 4, Ausgabe August 1986. Betr. Windlasten bei hohen Hochhäusern im Raum Frankfurt am Main, 1987.
- [7] Winz, Christine. Windprofilbetrachtungen und Auswertung von Meßdaten zum neuen COMMERZBANK-Hochhaus. Diplomarbeit am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 1997.
- [8] Winz, Christine und Sonntag, Ralf. Windkanalversuche zum neuen COMMERZBANK-Hochhaus in Frankfurt/Main. Studienarbeit am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 1996.
- [9] Berneiser, Andreas. Windlasten im innerstädtischen Bereich – Messungen am neuen COMMERZBANK-Hochhaus in Frankfurt/Main –. Eingereichte Dissertation. Institut für Massivbau, TU Darmstadt, 1997.
- [10] Sonntag, Ralf. Auswertung von Meßdaten aus Windkanal- und Feldmessungen am neuen COMMERZBANK-Hochhaus in Frankfurt am Main. Diplomarbeit am Institut für Massivbau der TU Darmstadt, 1997.