

Messung der Starkwindstruktur und
deren Auswirkung auf das
Windlastkonzept von Bauwerken

T 1101

T 1101

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

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.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

T 1101: Messung der Starkwindstruktur und deren Auswirkung
auf das Windlastkonzept von Bauwerken

Messung der Starkwindstruktur und deren

=====
Auswirkungen auf das Windlastkonzept

=====
von Bauwerken

=====

Forschungsvorhaben des Meteorologischen Instituts
der Universität München
gefördert durch das Institut für Bautechnik, Berlin

Projektleitung: Dr. H. Schroers

Berichterstatter: H. Lösslein

Inhaltsverzeichnis

=====

	Zusammenfassung	1
	Summary	2
	Résumé	3
1.	Aufgabenstellung	4
2.	Meßprogramm	4
3.	Auswertungen	7
3.1.	Profil der mittleren Windgeschwindigkeit	7
3.2.	Varianz der Böigkeit	9
3.3.	Böenfaktoren	10
3.4.	Energiespektrum der Böigkeit	14
3.5.	Autokorrelation der Böigkeit	16
3.6.	Zusammenhang zwischen dem Integrallängenmaß L_x und der Maximum-Wellenzahl k_{\max} des Spektrums	21
3.7.	Maßzahlen der vertikalen Korrelation	23
3.7.1.	Kohärenzspektrum	23
3.7.2.	Kreuzkorrelationsfunktion	26
3.8.	Maßzahlen der horizontalen Korrelation	28
4.	Auswirkungen auf das Windlastkonzept von Bauwerken	34
5.	Literaturverzeichnis	37

Zusammenfassung

=====

Es wird über meteorologische Messungen der Böenstruktur zur Festlegung von Eingangsdaten für ein Windlastkonzept berichtet. Hierzu wurden in einem ebenen und offenen Gelände an drei nahe beieinander stehenden Gittermasten in verschiedenen Höhen bis 80 m Sekundenwerte der Windgeschwindigkeit gemessen und registriert. Diese Meßwerte wurden hinsichtlich Energiespektrum, Autokorrelation, Kohärenzspektrum und Kreuzkorrelationsfunktionen ausgewertet. Zur Abschätzung der Auswirkung auf das Windlastkonzept von Bauwerken wurden auf der Grundlage der vorläufigen Ergebnisse der meteorologischen Messungen Bögkeitsfaktoren der Bauwerksreaktion ermittelt und mit den entsprechenden Werten aus der Literatur verglichen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, daß sich mit den neueren meteorologischen Eingangswerten diese Bögkeitsfaktoren vermindern.

Summary

=====

This paper describes meteorological measurements of the gust structure to define the input parameters of a wind loading concept. In a level and open country 1-sec-values of wind speed have been measured and recorded on three closely grouped lattice towers in several heights up to 80 m. These measured data have been analysed as for spectral densities, auto-correlation, coherence and cross-correlation. To assess the effects of these preliminary meteorological measurement results, gust response factors have been evaluated and compared to the values in the literature. The results seem to show that the gust response factors are reduced using the measured meteorological input parameters.

Résumé

=====

Dans ce rapport nous donnons des mesurages météorologiques sur la structure des rafales, destinés à fixer les dates d'entrée pour une conception de la charge du vent aux bâtiments. Dans ce but, nous avons mesurés et enregistrés à chaque seconde les valeurs de la vitesse du vent dans un terrain plat et ouvert; à cette fin, nous avons installés trois pylones en treillis, l'un près de l'autre, et avons fait les mesurages dans différentes hauteurs jusqu'à 80 mètres. Les valeurs ainsi reçues ont été exploitées à l'égard du spectre énergétique, de l'auto-correlation, du spectre de la cohérence et des fonctions de la corrélation croisée. Pour évaluer l'influence exercée par la charge du vent sur les bâtiments, nous avons recherchés- sur la base des résultats provisoires - les facteurs de la variabilité des rafales de la réaction des bâtiments, et nous avons comparés ces résultats avec les dates correspondantes publiées dans des oeuvres météorologiques. Les résultats indiquent une réduction des facteurs de la variabilité des rafales à la suite de l'emploi des valeurs plus récentes.

1. Aufgabenstellung

=====

Zur wirklichkeitsnahen und dennoch einfachen Beschreibung der Windbelastung großer, schwingungsanfälliger Bauwerke hat sich das Konzept der Böigkeitsfaktoren durchgesetzt. Die dynamischen Wirkungen des böigen Windes werden dabei durch eine statische Ersatzlast erfaßt, die die gleiche maximale Beanspruchung wie der wirkliche dynamische Vorgang hervorruft. Die statische Ersatzlast W_e ist durch den Böigkeitsfaktor der Bauwerksreaktion G mit der mittleren Windbelastung W_m verknüpft:

$$W_e = G \cdot W_m \quad (1)$$

Zur Bestimmung der Ersatzwindlast sind als meteorologische Eingangsgrößen die mittlere Windgeschwindigkeit und Angaben über die Böenstruktur - im einzelnen: Varianz und deren Profil, Energiespektrum und Korrelationsbetrachtungen - erforderlich. Hierfür liegen in Deutschland bisher ausreichende meteorologische Messungen nicht vor; daher wurden bei der Erarbeitung einer neuen deutschen Windlastnorm (DIN 1055) die erforderlichen Größen aus ausländische Veröffentlichungen (DAVENPORT und DALGLIESH 1970) übernommen. Es ist Ziel dieses Forschungsvorhabens, die meteorologischen Eingangsgrößen für ein Windlastkonzept durch Messungen in Deutschland zu überprüfen und anschauliche Deutungen für die Struktur des Starkwindes und der Windbelastung zu ermöglichen.

2. Meßprogramm

=====

Auf einem "ebenen und offenen" Gelände (landwirtschaftlich genutzt) in der Nähe von Meppen (Emsland) werden seit Juni 1979 an drei nahe beieinanderstehenden Gittermasten in den Höhen 8 m, 16 m, 32 m,

48 m, 64 m und 80 m Sekundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit gemessen und registriert. Die Lage und Abstand der Türme, sowie deren Höhe zeigt Abbildung 1. Während der Turm A₁ auf allen Höhen mit Anemometern bestückt ist, sind auf den Türmen A₂ und A₃ jeweils nur in 8 m und 48 m Meßgeräte angebracht.

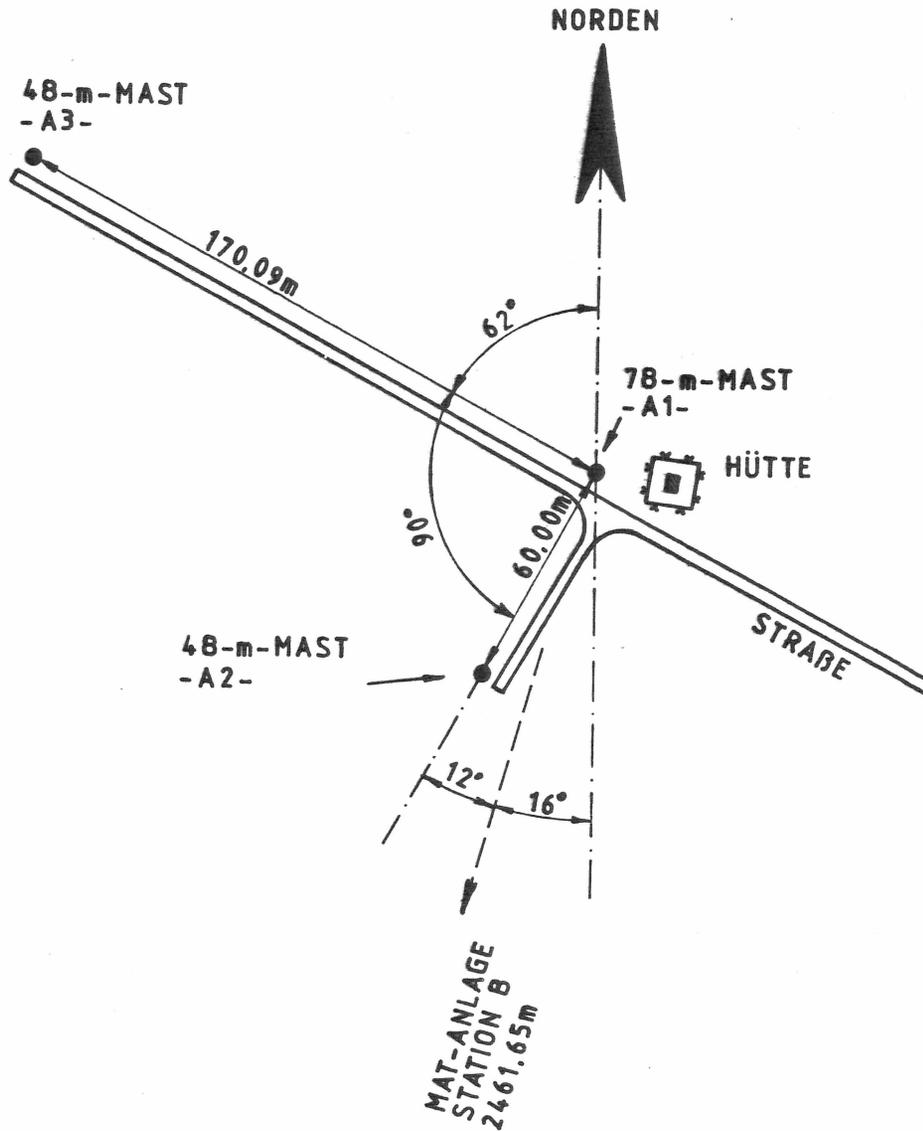


Abbildung 1: Meteorologische Anlage Türme (MAT) in Meppen
(Station A)

Lageplan im Maßstab 1:2000

Als Windmeßfühler sind trägheitsarme Schalenkreuzanemometer mit einer Trägheitslänge von ca. 5 m im Einsatz. Die Trägheitslänge eines Anemometers ist definiert als jener Windweg, den die Luft zurückgelegt haben muß, damit bei einer Sprungänderung die Abweichung der Anzeige vom stationären Wert auf $1/e$ abnimmt. Diese, zur Kennzeichnung der Anemometerträgheit benutzte charakteristische Länge ist bei Windgeschwindigkeiten größer als 5 ms^{-1} unabhängig von der Windgeschwindigkeit.

Die vom Anemometer abgegebenen Impulse (24 Impulse pro Umdrehung) werden in Zählern aufsummiert, von einer mikroprozessorgesteuerten Datenerfassungsanlage nach jeder Sekunde abgefragt, aufbereitet und zusammen mit der Zeitinformation auf computerkompatible Magnetbänder abgespeichert. Dabei werden die Sekundenwerte nur bei Starkwindsituationen aufgezeichnet.

Für Windlastannahmen von Bauwerken interessieren Starkwinde und Stürme und die dabei auftretenden Böen. Bearbeitet und ausgewertet werden nur Meßruns deren mittlere Windgeschwindigkeit (Stundenmittel) in 8 m Höhe größer als 5 ms^{-1} ist. Starkwinde mit Windgeschwindigkeiten größer als 20 ms^{-1} traten bisher im Meßzeitraum nicht auf; insofern können die hier gezeigten Ergebnisse nur Hinweise auf Sturmverhältnisse sein.

Es wurden bisher ca. 985000 Sekundenmittelwerte der Windgeschwindigkeit registriert und hinsichtlich Korrelation und Spektren untersucht. Als Ergänzung zu den Messungen in Meppen werden die Ergebnisse der Windmessungen an der meteorologischen Station in Garching herangezogen. Es stehen in Garching bisher ca. 26100 Profile der 6-Minutenmittelwerte der Windgeschwindigkeit bei Starkwind mit $\bar{v}_{10} \geq 10 \text{ ms}^{-1}$ zur Verfügung. Zur Bestimmung der Böenfaktoren des Windes sind in Garching zusätzliche Messungen (ca. 80000 Profile der 10-Sekundenmittelwerte) durchgeführt worden.

3. Auswertungen

=====

3.1. Profil der mittleren Windgeschwindigkeit

=====

Zur Beschreibung der Höhenabhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit hat sich neben dem in der Meteorologie üblichen logarithmischen Windprofil

$$\bar{v}_z = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{z}{z_0} \quad (2)$$

auch das meist in der Technik benutzte Potenzprofil

$$\bar{v}_z = \bar{v}_{10} \cdot \left(\frac{z}{10\text{m}} \right)^\alpha \quad (3)$$

bewährt. Dabei sind \bar{v}_z und \bar{v}_{10} die Windgeschwindigkeiten in den Höhen z bzw. 10 m , z_0 der vom Gelände abhängige Rauigkeitsparameter, u_* die Schubspannungsgeschwindigkeit und k die v. Karman Konstante ($k = 0.4$). Im Falle adiabatischer Schichtung, die bei Sturm durch die gute Durchmischung der Atmosphäre in der Regel vorliegt, stehen beide Profile gleichwertig nebeneinander. Die Parameter α und z_0 der beiden Profile lassen sich mit baupraktisch hinreichender Genauigkeit verknüpfen. Aus dem Vergleich des Gradienten des logarithmischen Profils mit dem Gradienten des Potenzprofils in einer Höhe z erhält man die Beziehung

$$\alpha_z = 1/\ln(z/z_0). \quad (4)$$

Für den Höhenbereich von z_1 bis z_2 erhält man nach PANOFSKY(1977) ein mittleres α von

$$\alpha = 1/\ln(\hat{z}/z_0) \quad (5)$$

$$\text{mit } \hat{z} = \sqrt{z_1 \cdot z_2} \quad (\text{geometrisches Mittel}) \quad (6)$$

Die Auswertung einer 5-jährigen Meßreihe von 10-Minutenmittelwerten der Windgeschwindigkeit aus Meppen und einer 14-jährigen Meßreihe von 6-Minutenmittelwerten aus Garching mit $\overline{v_{10}} \geq 10 \text{ ms}^{-1}$ erbrachte die in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse.

Die größere Rauigkeit in Garching findet in den größeren Werten des Exponenten ihren Niederschlag. Die Häufigkeitsverteilung der Exponenten entspricht in guter Näherung der Normalverteilung. Sie läßt sich somit durch Mittelwert und Streuung aus Tabelle 1 bestimmen (LÖSSLEIN 1979).

	mittlerer Exponent	Streuung	mittleres z_0
Meppen	0.139	0.0261	3 cm
Garching	0.154	0.0347	5 cm

Tabelle 1: Mittlere Exponenten und Streuung des Potenzprofiles für Garching und Meppen (mittlere Windgeschwindigkeit $\overline{v_{10}} = 12 \text{ ms}^{-1}$)

Die in Tabelle 1 angegebenen Exponenten sind Mittelwerte, die sich bei dem Standort Garching auf den Höhenbereich von 5 m bis 50 m und bei dem Standort Meppen auf den Höhenbereich 8 m bis 80 m beziehen. Den Werten liegen viele Messungen des Windprofiles im Windgeschwindigkeitsbereich von $\overline{v_{10}} \geq 10 \text{ ms}^{-1}$ zugrunde und gelten für eine mittlere Windgeschwindigkeit von $\overline{v_{10}} = 12 \text{ ms}^{-1}$. Die mittleren Exponenten (Tab. 1) nehmen mit zunehmender Windgeschwindigkeit um ca. 1.5 % - 2 % pro 1 ms^{-1} Windgeschwindigkeitszunahme ab.

3.2. Varianz der Böigkeit

=====

Die Varianz der Böigkeit ist ein einfaches Maß des Turbulenzgrades. Zur Berechnung der Varianz wurden alle 10-Minutenruns verwendet, deren mittlere Windgeschwindigkeit größer als 10 ms^{-1} ist. Die Mittelwerte der Varianzen für alle Höhen sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Die mittlere Varianz der Böigkeit erreicht in ca. 50 m Höhe einen maximalen Wert; das heißt, daß die Windschwankungen in dieser Höhe größer sind als in Bodennähe und in größeren Höhen. Die Turbulenzintensität σ/v nimmt mit zunehmender Höhe ab (Spalte 3 in Tabelle 2). Diese Höhenabhängigkeit läßt sich durch ein Potenzprofil in guter Näherung beschreiben. Für den Standort Meppen ergibt sich bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 8 ms^{-1} in 8 m Höhe:

$$\sigma / v_z = 0.205 z^{-0.117} \quad (7)$$

Höhe in m	Varianz in m^2s^{-2}	Streuung der Varianz in m^2s^{-2}	Turbulenz- intensität
8	3.53	1.31	0.157
16	3.87	1.40	0.149
32	4.10	1.48	0.139
48	4.17	1.58	0.133
64	4.16	1.63	0.127
80	3.71	1.52	0.117

Tabelle 2: Mittlere Varianz, Streuung der Varianz der Windgeschwindigkeit und Turbulenzintensität für verschiedene Höhen

3.3. Böenfaktoren

=====

Der Böenfaktor ist definiert als

$$G(t, 10 \text{ min}, z) = v_{\max}(t, z) / \bar{v}(10 \text{ min}, z) \quad (8)$$

Dabei ist $v_{\max}(t, z)$ die maximale Windgeschwindigkeit in der Höhe z während der Mittelungszeit t mit $1 \text{ s} \leq t \leq 10 \text{ min}$, und $\bar{v}(10 \text{ min}, z)$ die mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe z während 10 Minuten. Mit Hilfe des Böenfaktors ist es somit möglich von 10-Minutenmittelwerten der Windgeschwindigkeit auf die Windgeschwindigkeiten kürzerer Mittelungszeiten zu schließen. In Tabelle 3 sind für die verschiedenen Meßhöhen z und verschiedene Mittelungszeiten t die Böenfaktoren eingetragen. Die Streuung beträgt bei $t = 1 \text{ s}$ im Mittel 6 % des Tabellenwertes, bei $t = 10 \text{ s}$ ist sie im Mittel 5.3 %. Aus dieser Tabelle ergibt sich folgende Näherungsgleichung für die Böenfaktoren mit t in Sekunden und z in Metern.

$$G(t, 10 \text{ min}, z) = t^{0.00035 \cdot z} e^{-0.00207 \cdot z} (1.583 - 0.09566 \cdot \ln t) \quad (9)$$

Dabei muß gelten $1 \text{ s} \leq t \leq 300 \text{ s}$ und $8 \text{ m} \leq z \leq 80 \text{ m}$. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme des Böenfaktors mit der Höhe, was auf den geringer werdenden Einfluß der Bodenrauigkeit zurückzuführen ist (siehe auch Abbildung 2).

In Abbildung 3 sind die Häufigkeitsverteilungen der Böenfaktoren für die Mittelungszeit $t = 1 \text{ s}$ und die Höhen $z = 8 \text{ m}$ und $z = 80 \text{ m}$ dargestellt. Man erkennt klar die Verschiebung der Verteilung zu niedrigeren Werten des Böenfaktors in großen Höhen. Die Verteilungen entsprechen in brauchbarer Näherung einer Normalverteilung. Eine Abhängigkeit des Böenfaktors von der mittleren Windgeschwindigkeit konnte in dem untersuchten Windgeschwindigkeitsbereich (Starkwind) nicht festgestellt werden.

t	z 8 m	16 m	32 m	48 m	64 m	80 m
1 s	1.546	1.512	1.477	1.418	1.380	1.328
2 s	1.503	1.463	1.425	1.388	1.353	1.303
5 s	1.427	1.404	1.377	1.336	1.309	1.265
10 s	1.357	1.343	1.322	1.292	1.265	1.231
20 s	1.284	1.277	1.268	1.238	1.217	1.190
60 s	1.170	1.170	1.167	1.145	1.135	1.120
300 s	1.034	1.034	1.035	1.032	1.030	1.028

Tabelle 3: Böenfaktoren $G(t, 10 \text{ min}, z)$ in Meppen

Zu ähnlichen Ergebnissen kam FROST et. al. (1978) aus Messungen in Cape Kennedy. Seine Böenfaktoren sind im Mittel um 6 % kleiner als in Meppen, was als Anzeichen für eine stärkere Homogenität des Geländes in Cape Kennedy gedeutet werden kann.

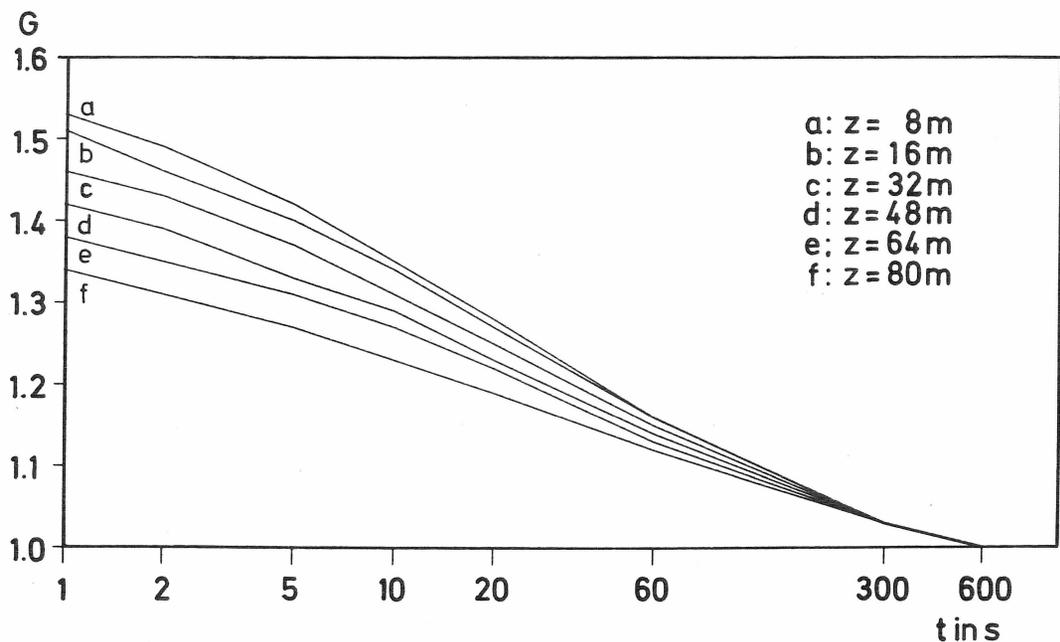


Abbildung 2: Böenfaktoren $G(t, 10 \text{ min}, z)$ aus Meppen

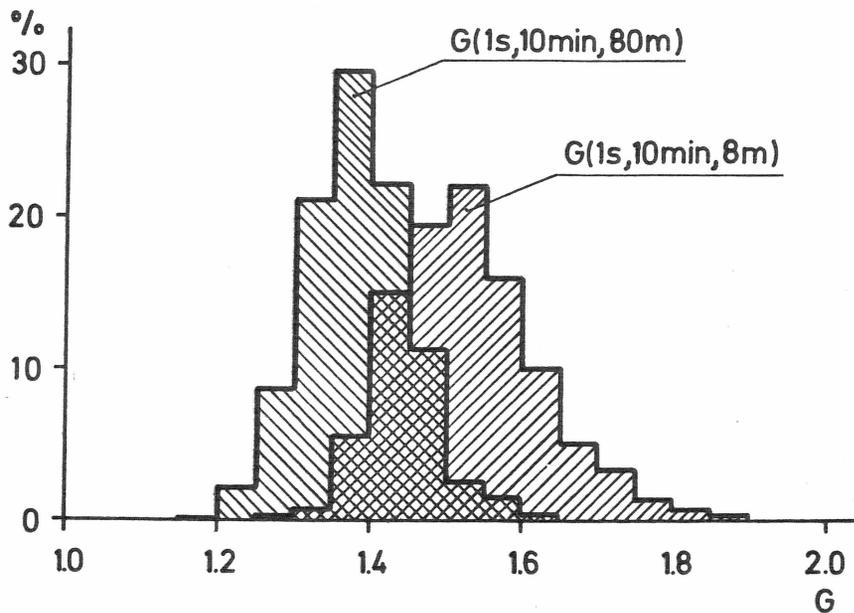


Abbildung 3: Relative Verteilung der Böenfaktoren aus Meppen in 8 m bzw. 80 m Höhe

WIERINGA (1973) leitet aus seinen Böigkeitsmessungen in Vlaardingen bei Rotterdam folgende Näherungsgleichung für die Böenfaktoren ab.

$$G(t, 10 \text{ min}, z, z_0, \bar{v}) = 1 + \frac{1.42 + 0.3013 \cdot \ln(990 / (\bar{v} \cdot t) - 4)}{\ln(z/z_0)} \quad (10)$$

In diese Gleichung geht die Höhe z , der Rauigkeitsparameter z_0 , der 10-Minutenmittelwert der Windgeschwindigkeit \bar{v} und die Mittelungszeit t der Böen ein. Die Gültigkeit der Gleichung ist auf ebenes und offenes Gelände, die Prandtl-schicht und Starkwind beschränkt. Einen Vergleich dieser Böenfaktoren zeigt Tabelle 4, wobei zu bemerken ist, daß die Werte aus DIN 1055 nur für eine Höhe von $z = 10 \text{ m}$ gelten.

Höhe z	8 m		48 m		80 m	
	1 s	10 s	1 s	10 s	1 s	10 s
Meppen	1.55	1.36	1.42	1.29	1.33	1.23
Garching	--	1.34	--	1.18	--	--
FROST	1.41	1.31	1.27	1.20	1.24	1.18
WIERINGA	1.53	1.37	1.39	1.28	1.37	1.26
DIN 1055 (10m)	(1.58)	(1.44)	--	--	--	--

Tabelle 4: Vergleich verschiedener Böenfaktoren

Für die Werte von WIERINGA (1973) sind in Gleichung 10 die Werte für z_0 und \bar{v} aus Meppen eingesetzt. Bei Anwendung der für 10 m geltenden Werte aus DIN 1055 werden die Böengeschwindigkeiten in der Regel etwas zu hoch bestimmt; man liegt somit auf jeden Fall auf der "sicheren Seite".

3.4. Energiespektrum der Bögigkeit

=====

Das Energiespektrum beschreibt die Verteilung der Energie - und damit der Varianz - der Bögigkeit über die Frequenzen. Der Betrag des Energiespektrums im Bereich der Eigenfrequenzen der Bauwerke geht direkt in die dynamische Berechnung des Bauwerkes ein.

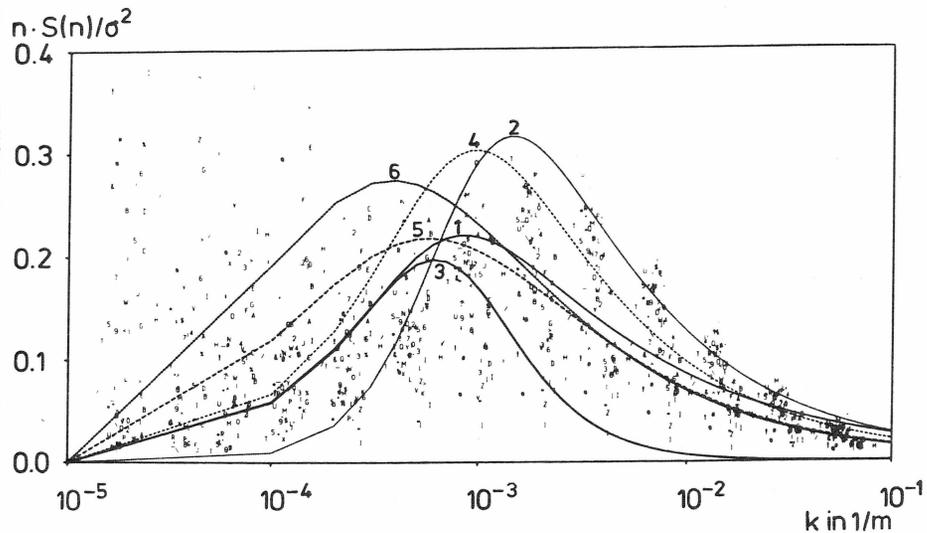


Abbildung 4: Vergleich gemessener Energiespektren mit empirischen Anpassungen anderer Autoren

- 1 : Anpassung an die gemessenen Werte
- 2 : DAVENPORT 1961
- 3 : ESDU 1974
- 4 : HARRIS 1971
- 5 : KAIMAL et al. 1972
- 6 : SIMIU 1974

Für jeden Meßrun und für jede Meßhöhe wurde aus den Sekundenwerten der Windgeschwindigkeit ein Energiespektrum berechnet und als charakteristische Größen Lage und Amplitude des Maximums festgestellt. Für die Bauwerksbelastung interessiert im wesentlichen der

hochfrequente Bereich der Spektren; dort sind alle in der Literatur angegebenen Spektren ähnlich und folgen dem Kolmogorovgesetz. Als Beispiel sind in Abbildung 4 gemessene Spektren aus 80 m Höhe zusammen mit der empirischen Anpassung des mittleren Spektrums (durchgezogene Linie) und einigen Anpassungen anderer Autoren dargestellt. Einige dieser Anpassungen beschreiben die gemessenen Spektren sehr gut, andere wiederum folgen dem Verlauf der gemessenen Spektren weniger gut, was bei der großen Streuung der Einzelspektren nicht verwunderlich ist. Die Spektren haben alle ein ausgeprägtes, breites Maximum, dessen Lage sowohl in der Amplitude als auch in der Wellenzahl von Meßrun zu Meßrun große Unterschiede zeigt. Nach Mittelung aller Meßruns über Wellenzahlbereiche erhält man für jede Meßhöhe ein mittleres Spektrum. Die charakteristische Lage der Maxima in Bezug auf die Wellenzahl ist in Tabelle 5 zusammen mit den höheren Momenten der Verteilung übersichtlich dargestellt.

Höhe in m	Mittelwert k_{\max} in 0.01 m^{-1}	Streuung σ_k in 0.01 m^{-1}	Schiefe	Exzeß
8	0.161	0.105	0.743	0.055
16	0.124	0.112	1.600	2.590
32	0.111	0.115	1.561	2.531
48	0.096	0.088	0.724	-0.212
64	0.091	0.073	0.834	0.678
80	0.085	0.053	0.605	-0.548

Tabelle 5: Die mittlere Lage des Maximums k_{\max} des Spektrums und höhere statistische Momente für verschiedene Höhen

Eine Abhängigkeit der Wellenzahl des Maximums von der mittleren Windgeschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden. Die Abhängigkeit der Wellenzahl k_{\max} des Maximums des Spektrums von der Höhe ergibt sich in guter Übereinstimmung mit den Messungen von SHIOTANI (1975) zu:

$$k_{\max} = 0.0027 \cdot z - 0.27 \quad (11)$$

Dabei ist z die Höhe in m bei $8 \text{ m} \leq z \leq 80 \text{ m}$ und $k_{\max} = n/v_z$ die Wellenzahl in m^{-1} . Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß die Unterschiede zwischen den einzelnen Höhenstufen geringer sind als die Unterschiede zwischen den Meßruns einer Höhe.

Höhe in m	Mittelwert	Streuung	Schiefe	Exzeß
8	0.211	0.039	-0.389	-0.529
16	0.214	0.043	-0.311	-0.530
32	0.207	0.048	-0.459	-0.658
48	0.218	0.049	-0.329	-0.432
64	0.214	0.055	-0.503	-0.110
80	0.211	0.061	-0.518	-0.467

Tabelle 6: Die mittlere Amplitude des Maximums des Spektrums und höhere statistische Momente für verschiedene Höhen

Die gemittelten Amplituden der Maxima der Spektren in jeder Meßhöhe sowie die höheren Momente der Verteilung sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Hier sieht man, daß eine systematische Höhenabhängigkeit nicht vorhanden ist. Eine Abhängigkeit der Amplitude von der Windgeschwindigkeit konnte ebenfalls nicht festgestellt werden, so daß in diesem Höhenbereich und in "ebenem und offenem Gelände" von einer im Mittel höhenkonstanten Amplitude des Maximums des Spektrums ausgegangen werden kann ($n S(n)/\sigma^2 = 0.21$).

3.5. Autokorrelation der Böigkeit

=====

Sowohl das Energiespektrum als auch die Autokorrelationsfunktion kennzeichnen den Frequenzinhalt der Böen und geben über die

Taylor-Hypothese Hinweise auf die mittlere longitudinale Ausdehnung der Böen (COUNIHAN 1975, SHIOTANI und IWATANI 1976). Während die zum Maximum des Spektrums gehörende Wellenlänge k_{\max} als charakteristische horizontale Ausdehnung der Böen angesehen wird, berechnet man bei der Autokorrelationsfunktion die mittlere Größe der Böen über die sogenannte Integralskala.

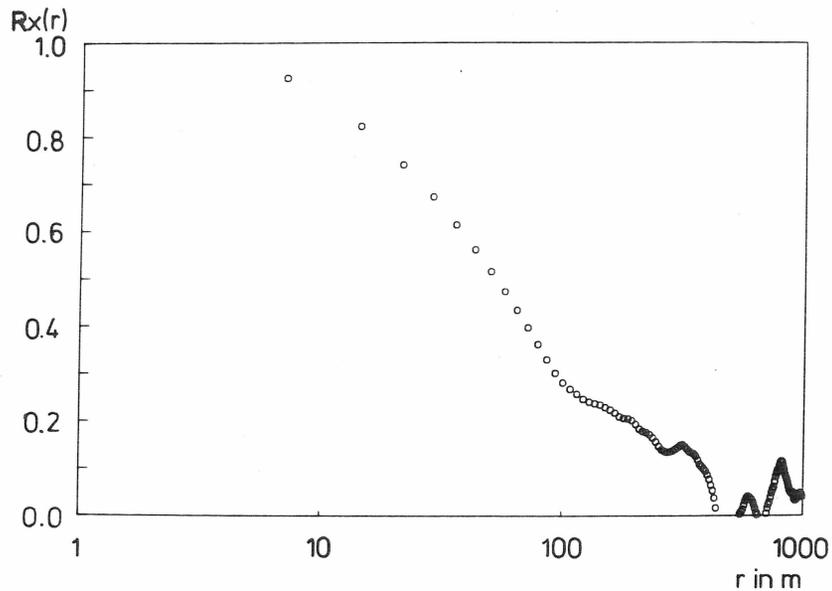


Abbildung 5: Beispiel einer Autokorrelationsfunktion
in 8 m Höhe

In Bild 5 ist als Beispiel die gemessene Autokorrelationsfunktion eines einzelnen Meßruns aus 8 m Höhe dargestellt. Dabei sind auf der Abszisse nicht die Zeitverschiebungen, sondern die mit der mittleren Windgeschwindigkeit berechneten Ortsverschiebungen aufgetragen (Taylor-Hypothese). Es ist üblich (DAVENPORT 1961), der Autokorrelationsfunktion eine Exponentialfunktion der Form

$$R_x(r) = \exp(-a \cdot r) \quad (12)$$

anzupassen. Dabei gibt es Meßreihen, deren Autokorrelationsfunktionen durch diese Exponentialfunktion gut beschrieben werden (siehe Abbildung 6), aber auch einige, bei denen offensichtlich wegen langfristiger Trends und großräumigen Störungen systematische Abweichungen auftreten (siehe Abbildung 7).

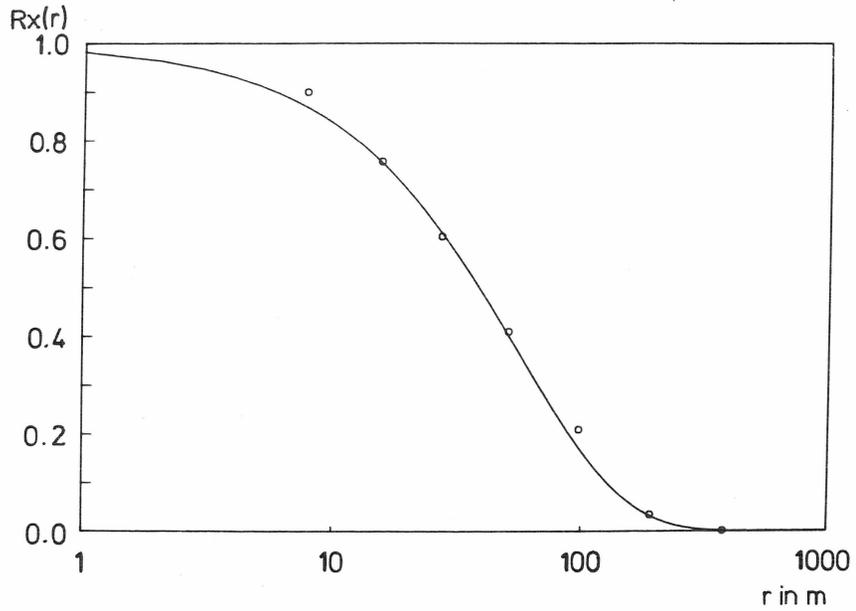


Abbildung 6: Beispiel für die Anpassung einer Exponentialfunktion an die Autokorrelationsfunktion R_x (häufig)

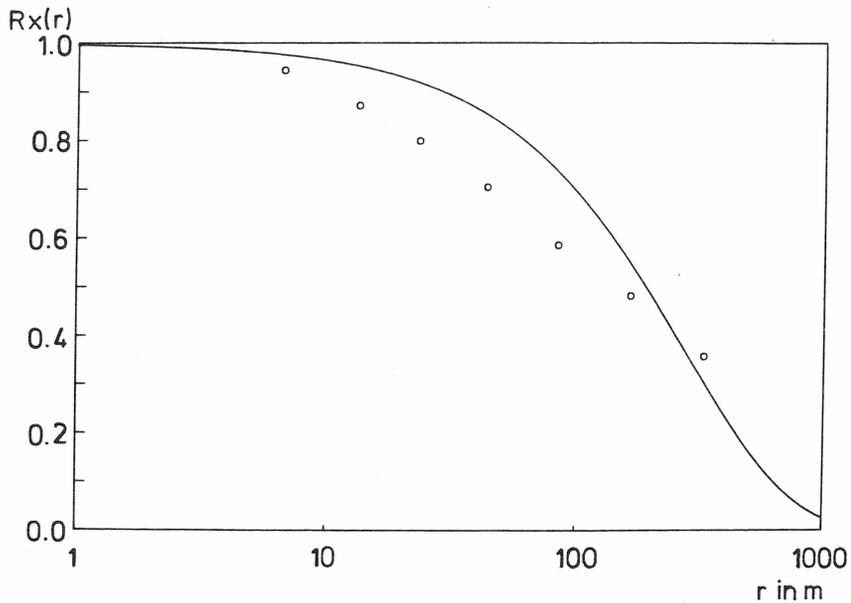


Abbildung 7: Beispiel für die Anpassung einer Exponentialfunktion an die Autokorrelationsfunktion R_x (weniger häufig)

Als charakteristische longitudinale Abmessung der Böen wird die

Integralskala

$$L_x = \int_0^{\infty} R_x(r) dr = 1/a \quad (13)$$

bezeichnet. Sie gibt an, über welches Gebiet die Windgeschwindigkeit im Mittel korreliert ist. Für die einzelnen Meßhöhen sind in Tabelle 7, Spalte 2 - 4 die Mittelwerte der Integralskalen mit den dazugehörigen Streuungen und die entsprechenden, aus den Maxima der Spektren errechneten charakteristischen Längen der Böen gegenübergestellt.

Die Zunahme der Integralskala mit der Höhe zeigt deutlich, daß die Wirbel mit zunehmender Entfernung vom Boden größer werden. Durch ein Potenzgesetz der Form

$$L_x(z) = 112.3 z^{0.27} \quad (14)$$

kann diese Zunahme näherungsweise beschrieben werden. Dabei ist z die Höhe in m bei $8 \text{ m} \leq z \leq 80 \text{ m}$. Eine Abhängigkeit der Integralskala von der mittleren Windgeschwindigkeit kann in dem zur Zeit gemessenen Windgeschwindigkeitsbereich von 5 ms^{-1} bis 20 ms^{-1} (Stundenmittelwerte) nicht festgestellt werden.

3.6. Zusammenhang zwischen dem Integrallängenmaß L_x

=====

und der Maximum-Wellenzahl k_{max} des Spektrums

=====

Zunächst muß festgestellt werden, daß nach TAUBENHEIM (1969) zu einem Spektrum eines Rauschens mit hervorgehobenem Frequenzbereich - das Böenspektrum ist von dieser Art - eine Autokorrelationsfunktion vom Exponential-Cosinustyp gehört. In diesem Fall gibt es über die Nullstellen der Autokorrelationsfunktion einen analytischen Zusammenhang zwischen der Integralskala L_x und der Maxi-

mum-Wellenzahl k_{\max} des Spektrums. Zu einer Korrelationsfunktion vom Exponentialtyp, wie sie in Gleichung 12 festgehalten ist, gehört ein rotes Rauschen, also ein Spektrum dessen Energieanteile mit kleiner werdenden Wellenzahlen kontinuierlich abnehmen. Das über viele Messungen gemittelte Böenspektrum zeigt in dem hier betrachteten Frequenzbereich nahe dem langwelligen Ende ein Maximum. Im kurzwelligen Bereich ist das Böenspektrum über mehrere Zehnerpotenzen der Wellenzahlen dem eines roten Rauschens sehr ähnlich. In der üblichen Darstellung des Spektrums mit logarithmischer Wellenzahlenskala wird der langwellige Bereich optisch sehr stark überbewertet. Unter diesen Voraussetzungen ist es statthaft die Autokorrelationsfunktion der gemessenen Winddaten durch eine Exponentialfunktion grob anzunähern. Dabei kann jedoch zwischen L_x und k_{\max} kein analytischer Zusammenhang angegeben werden. Dieser Zusammenhang kann daher nur durch eine empirisch gefundene Zahlenwertgleichung angenähert werden.

Aus der Fülle der in der Literatur vorgeschlagenen empirischen Funktionen zur Anpassung an das Bögigkeitsspektrum wird hier nur die auf v. Karman zurückgehende Form

$$\frac{n \cdot S(n)}{\sigma^2} = \frac{c_1 \cdot x}{(1 + c_2 \cdot x^2)^{c_3}} \quad (15)$$

mit

$$x = \frac{n \cdot L_x(z)}{u(z)} = k \cdot L_x(z) \quad (16)$$

ausgewählt. Es hat sich gezeigt, daß die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen des Bögigkeitsspektrums durch eine Näherungsgleichung dieser Form am besten zu beschreiben sind. NIEMANN und RUHWEDEL (1981) geben für die Anpassungsparameter die Zahlenwerte $c_1 = 4$, $c_2 = 70.78$ und $c_3 = 5/6$ an. Diese Werte sind für ein relativ rauhes Gelände mit einem z_0 von $0.5 \text{ m} \leq z_0 \leq 1.0 \text{ m}$ oder einem α von $0.27 \leq \alpha \leq 0.34$ recht gut brauchbar. Für das im

Rahmen dieser Arbeit betrachtete ebene und offene Gelände von Meppen ($z_0 = 0.03$ m bzw. $\alpha = 0.13$) wurden aus ca. 500 Meßruns bei hohen Windgeschwindigkeiten Anpassungsparameter von $c_1 = 1.61$, $c_2 = 20.44$ und $c_3 = 0.754$ gefunden. Dabei wurden die Anpassungen nur im höherfrequenten Bereich für $k \geq 0.0003 \text{ m}^{-1}$ durchgeführt. Außerdem ist für das Integrallängenmaß $L_x(z)$ die ebenfalls aus diesen Messungen empirisch gefundene Höhenabhängigkeit (Gleichung 14) eingesetzt worden. Damit erhält man für das Bögigkeitsspektrum in ebenem und offenem Gelände bei Starkwinden die folgende empirische Näherungsgleichung

$$\frac{n \cdot S(n)}{\sigma^2} = \frac{1.61 \cdot x}{(1 + 20.44 \cdot x^2)^{0.754}} \quad (17)$$

Mit

$$L_x = 112.3 \cdot z^{0.27} \quad (18)$$

erhält man schließlich eine Gleichung, die nur noch von der Höhe z abhängt.

$$\frac{n \cdot S(n)}{\sigma^2} = \frac{181 \cdot k \cdot z^{0.27}}{(1 + 257775 \cdot k^2 \cdot z^{0.54})^{0.754}} \quad (19)$$

Durch Differentiation und Nullsetzen der Gleichung 15 erhält man die Lage x_{\max} des Maximums des Spektrums.

$$x_{\max} = \sqrt{\frac{1}{c_2 (2 \cdot c_3 - 1)}} \quad (20)$$

Damit kann man eine Beziehung zwischen der Wellenzahl des Maximums k_{\max} und dem Integrallängenmaß $L_x(z)$ herstellen.

$$x_{\max} = k_{\max}(z) \cdot L_x(z) = 0.3103 \quad (21)$$

bzw.

$$L_x(z) = \frac{0.3103}{k_{\max}(z)} \quad (22)$$

Wieder unter Verwendung von Gleichung 14 kann die Wellenzahl $k_{\max}(z)$ als Funktion der Höhe z näherungsweise berechnet werden.

$$k_{\max}(z) = \frac{0.3103}{L_x(z)} = \frac{0.00276}{z^{0.27}} \quad (23)$$

In der folgenden Tabelle 7 sind die in verschiedenen Höhen gemessenen Integrallängenmaße $L_x(z)$ und die entsprechenden Wellenlängen $1/k_{\max}(z)$ den aus den Gleichungen 22 und 23 näherungsweise berechneten Werten gegenübergestellt. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß diese Näherungsgleichungen nur die mittleren Verhältnisse der Bögigkeit, gemittelt über sehr viele Einzelmessungen, beschreiben. Die gemessenen Spektren und auch die gemessenen Integrallängenmaße streuen, wie aus Abbildung 4 und Tabelle 7 hervorgeht, sehr stark.

Höhe z in m	aus Meßwerten			aus Gl.22	aus Gl.23
	$L_x(z)$ in m	σ_L	$1/k_{\max}$ in m	$L_x(z)$ in m	$1/k_{\max}$ in m
8	202	102	625	194	635
16	237	128	725	224	765
32	295	173	893	277	923
48	328	192	943	292	1029
64	332	189	1020	317	1112
80	394	228	1163	361	1182

Tabelle 7: Vergleich der gemessenen und berechneten Integrallängen und Maximumwellenlängen

3.7. Maßzahlen der vertikalen Korrelation

=====

3.7.1. Kohärenzspektrum

=====

Das Kohärenzspektrum zweier verschiedener Höhen z_1 und z_2 ist ein Maß für die gleichzeitige Wirkung der Bö unter Einschluß einer Frequenzinformation. Es wird aus gemessenen Winddaten berechnet nach der Gleichung:

$$R_z(z_1, z_2, n) = \frac{C_o(z_1, z_2, n)^2 + Q(z_1, z_2, n)^2}{S(z_1, n) \cdot S(z_2, n)} \quad (24)$$

Aus dem Wert kann auf das charakteristische Verhältnis der longitudinalen (in Windrichtung) zur vertikalen Erstreckung der Böenwirbel geschlossen werden. Dabei ist C_o das Cospektrum, Q das Quadratspektrum, S das Energiespektrum in der jeweiligen Höhe z_1 bzw. z_2 und n die Frequenz. Als Beispiel ist in Abbildung 8 das Kohärenzspektrum eines Runs aus der Schicht 16 m bis 32 m gezeigt.

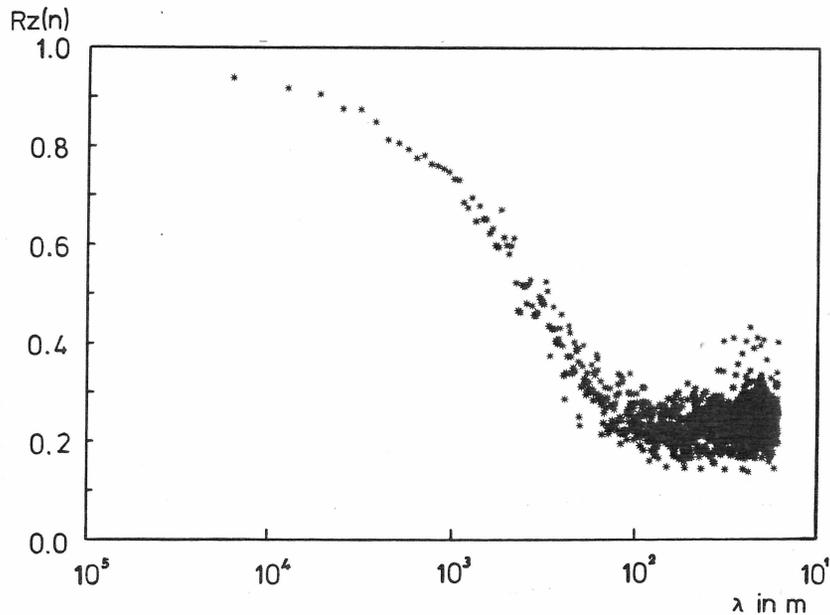


Abbildung 8 : Beispiel eines Kohärenzspektrums aus der Schicht 16 m bis 32 m Höhe

Für die folgende Betrachtung wird als Grenzwellenlänge λ_G diejenige Wellenlänge bezeichnet, bei der der Kohärenzwert R_z auf 0.5 abgefallen ist. Böenwirbel mit Wellenlängen größer als die Grenzwellenlänge werden in beiden Meßhöhen - bis auf Phasenverschiebungen - simultan ausgeführt, die Meßwerte sind also miteinander gekoppelt, während Wirbel, deren Wellenlängen kleiner sind als die Grenzwellenlänge, in den beiden Meßhöhen entkoppelt sind. Das heißt, daß Wirbel, deren Wellenlängen der Grenzwellenlänge entsprechen, gerade noch die vertikale Ausdehnung des Meßfühlerabstandes erreichen. Für das Beispiel in Abbildung 8 ergibt sich als charakteristisches Verhältnis der longitudinalen zur vertikalen Erstreckung der Böen ein Wert von

$$\lambda_G / \Delta z = 189 \text{ m} / 16 \text{ m} = 11.8 \quad (25)$$

Der Abfall des Kohärenzspektrums wird entsprechend des Vorschlags von DAVENPORT (1961) durch eine Exponentialfunktion der folgenden Form angenähert:

$$R_z \left(\frac{n \cdot \Delta z}{\bar{v}_z} \right) = \exp -C_z \cdot \left(\frac{n \cdot \Delta z}{\bar{v}_z} \right) \quad (26)$$

Dabei ist R_z die Kohärenz, n die Frequenz, Δz die Höhendifferenz, \bar{v}_z die mittlere Windgeschwindigkeit der jeweiligen Schicht und C_z ein zunächst als konstant angenommener Faktor. Bei der Auswertung hat sich jedoch gezeigt, daß die Abklingfaktoren C_z von der mittleren Windgeschwindigkeit der Schicht abhängen. Zwei Beispiele der Windgeschwindigkeitsabhängigkeit aus den Schichten von 16 m bis 32 m bzw. von 64 m bis 80 m sind in den Abbildungen 9 und 10 dargestellt. Bei der weiteren Untersuchung der Kohärenzspektren für verschiedene Höhenintervalle zeigte sich, daß der Abklingfaktor C_z von der Windgeschwindigkeit und auch von der Schichtdicke Δz des Höhenintervalles abhängt. Eine geringe Höhenabhängigkeit des Abklingfaktors C_z von der mittleren Höhe der Schicht läßt sich ebenfalls feststellen. In Tabelle 8 sind für verschiedene Schichtdicken Δz und mittlere Höhen z die zugehörigen Abklingfaktoren,

gemittelt über alle Meßwerte, eingetragen.

\bar{z}	Δz 8 m	16 m	24 m	32 m	40 m	48 m	56 m	64 m	72 m
12 m	13.5	.	.	.	.	.	.	.	.
20 m	.	.	7.9	.	.	.	.	.	.
24 m	.	10.1	.	.	.	.	.	.	.
28 m	5.3	.	.	.	.
32 m	.	.	.	6.3	.	.	.	.	.
36 m	4.0	.	.
40 m	.	9.9	.	.	.	4.5	.	.	.
44 m	3.4
48 m	.	.	.	6.8	.	.	.	3.9	.
56 m	.	9.7	.	.	.	5.0	.	.	.
64 m	.	.	.	7.2	.	.	.	.	.
72 m	.	10.5	.	.	.	.	.	.	.
C_z	13.5	10.1	7.9	6.8	5.3	4.8	4.0	3.9	3.4

Tabelle 8: Abklingfaktoren C_z des Kohärenzspektrums für verschiedene mittlere Höhen \bar{z} und entsprechenden Schichtdicken Δz

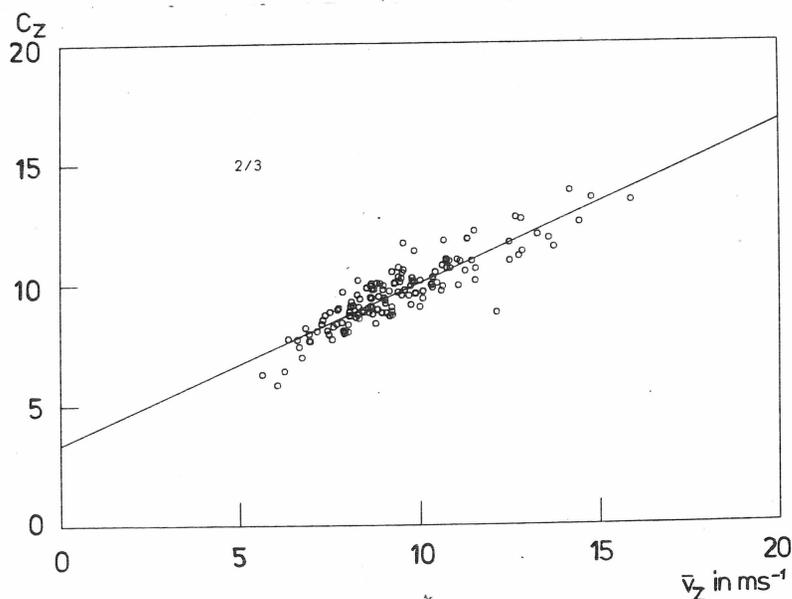


Abbildung 9: Abklingfaktoren C_z des Kohärenzspektrums gegen die mittlere Windgeschwindigkeit der Schicht 16 m bis 32 m Höhe

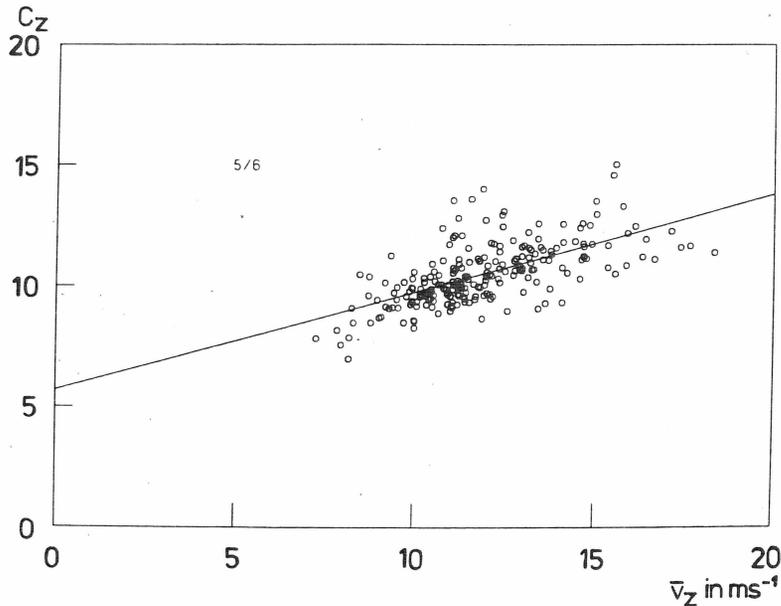


Abbildung 10: Abklingfaktoren C_z des Kohärenzspektrums gegen die mittlere Windgeschwindigkeit der Schicht 64 m bis 80 m Höhe

3.7.2. Kreuzkorrelationsfunktion

=====

Die Kreuzkorrelationsfunktion gibt Möglichkeiten zur anschaulichen Deutung der Böenstruktur. Das Maximum der vertikalen Kreuzkorrelation gibt an, bei welcher Zeitverschiebung die gemessenen Windgeschwindigkeiten in den zwei Meßhöhen z_1 und z_2 in ihrer Struktur am besten übereinstimmen. Geht man bei einer Böe von der Modellvorstellung eines mehr oder weniger einheitlich strukturierten Turbulenzelementes aus, dann können mit den gemessenen Zeitverschiebungen der Maxima Aussagen über z.B. die Form der vorderen Begrenzung der Böen gemacht werden. Die Zeitverschiebungen können mit Hilfe der mittleren Windgeschwindigkeit der oberen Meßhöhe in eine Ortsverschiebung der in beiden Höhen übereinstimmenden Strukturen übergeführt werden. Mit dieser Ortsverschiebung und dem

vertikalen Abstand Δz kann ein Neigungswinkel β der vorderen Begrenzung der Bö gegen die Horizontale bestimmt werden. Diese Neigungswinkel sind in der Abbildung 11 in Abhängigkeit von der Höhe für verschiedene Schichtdicken dargestellt. Man erkennt eine Zunahme des Winkels mit zunehmender Höhe bei konstanter Schichtdicke. Für Windlastannahmen an Bauwerken kann somit davon ausgegangen werden, daß eine Bö das Bauwerk normalerweise nicht gleichzeitig in allen Höhen trifft. Die vordere Begrenzung der Bö trifft zuerst die höchsten Gebäudeteile. Dieser Berührungspunkt bewegt sich mit abnehmender Geschwindigkeit an der Fassade des Bauwerkes nach unten.

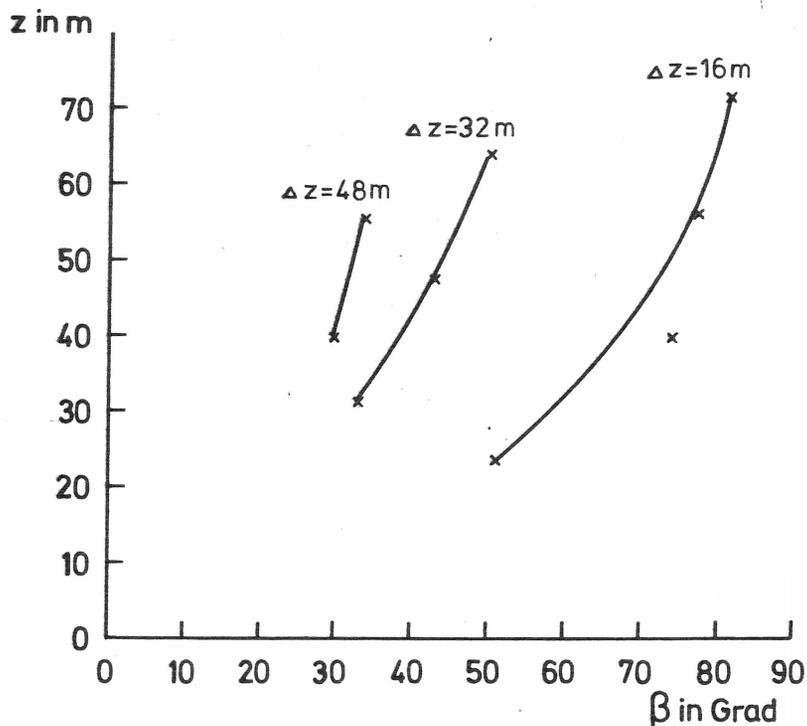


Abbildung 11: Neigungswinkel der vorderen Begrenzung der Böen für verschiedene Höhen und Schichtdicken

3.8. Maßzahlen der horizontalen Korrelation

=====

Die meßtechnische Erfassung der lateralen (senkrecht zur Windrichtung) Erstreckung der Bö ist mit großen Problemen behaftet und nur mit sehr großem Aufwand durchzuführen. Zur Bestimmung der mittleren Breite einer Bö ist es notwendig, eine immer senkrecht zur Windrichtung stehende Meßfühlerlinie in kurzen Abständen mit Anemometern auszustatten. Mit Hilfe der in Abbildung 1 gezeigten Anordnung der drei Meßtürme und unter Ausnutzung der unterschiedlichen Anströmungen der Meßfühlerlinien A_1-A_2 , A_1-A_3 bzw. A_2-A_3 soll versucht werden die laterale Ausdehnung der Böen abzuschätzen. Deshalb sind die Türme A_2 und A_3 in 8 m und 48 m mit Windmeßfühlern bestückt, so daß wenigstens in zwei Höhen eine Aussage über die Breite der Böen möglich ist. Die Abbildungen 12 bis 15 zeigen Beispiele der berechneten horizontalen Kreuzkorrelationen in 8 m Höhe für verschiedene Anströmwinkel der Meßfühlerlinien und für die Meßfühlerabstände A_1-A_2 (60 m) und A_1-A_3 (170 m).

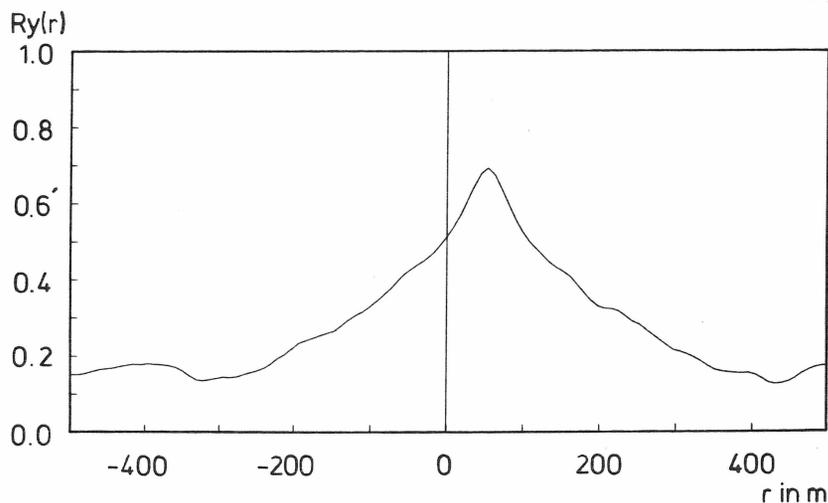


Abbildung 12: Beispiel der horizontalen Kreuzkorrelation
(Anströmwinkel 4 Grad, Meßfühlerabstand 60 m)

Je kleiner der Meßfühlerabstand und je kleiner der Anströmwinkel ist, desto größer und ausgeprägter ist das Maximum der Kreuzkorrelation. Bei einem Meßfühlerabstand von 170 m und einem großen Anströmwinkel von 33 Grad (Abbildung 15) ist das Maximum nicht mehr eindeutig zu erkennen. Das bedeutet, daß in diesem Fall die beiden Meßfühler nicht mehr das gleiche Turbulenzelement erfassen. Die Ortsverschiebung des Maximums (berechnet aus den Zeitverschiebungen mit Hilfe der mittleren Windgeschwindigkeit) kennzeichnet im Idealfall denjenigen Weg, um den der Meßpunkt A_2 (siehe Abbildung 16) in Windrichtung verschoben werden müßte, so daß die dann fiktive Meßfühlerlinie A_1-A_2' senkrecht zur Windrichtung steht. Für unterschiedliche Windrichtungen ergeben sich bei feststehenden Meßfühlern variable fiktive Meßfühlerabstände, die aus der Windrichtung berechnet werden. Durch Zuordnung der Korrelationswerte des Maximums zu den dazugehörigen fiktiven Meßfühlerabständen kann die Kreuzkorrelationsfunktion für variable horizontale Abstände konstruiert werden.

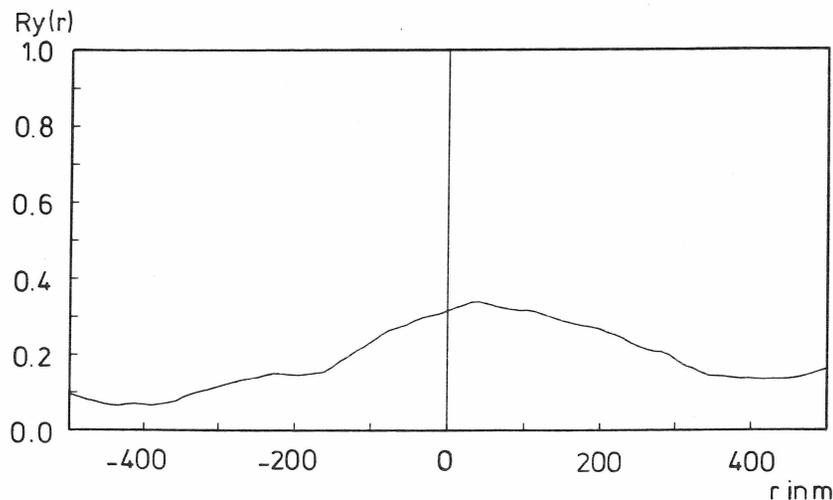


Abbildung 13: Beispiel der horizontalen Kreuzkorrelation
(Anströmwinkel 44 Grad, Meßfühlerabstand 60 m)

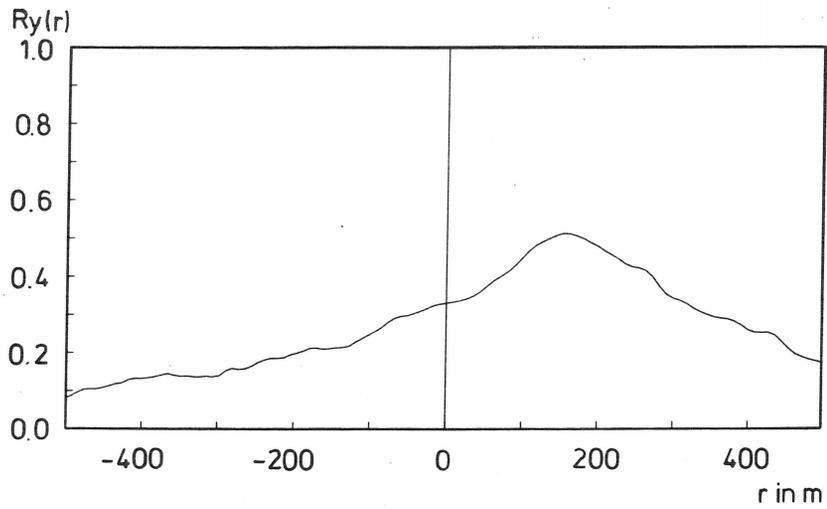


Abbildung 14: Beispiel der horizontalen Kreuzkorrelation
(Anströmwinkel 6 Grad, Meßfühlerabstand 170 m)

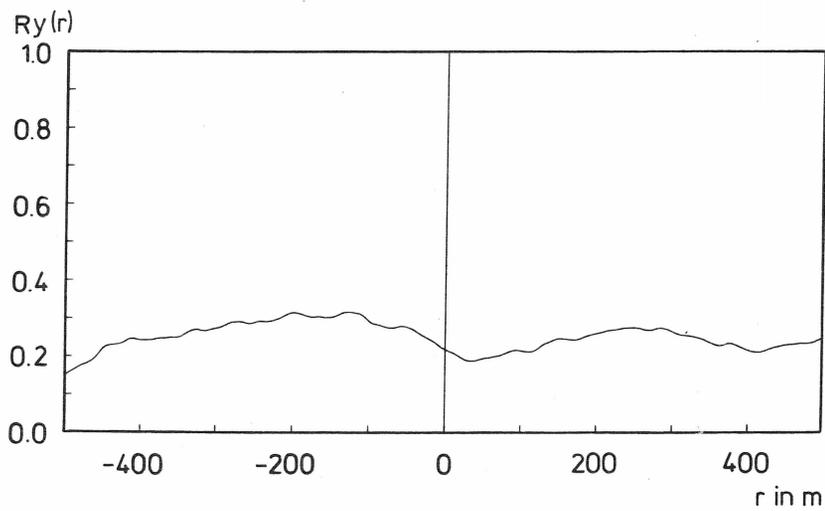


Abbildung 15: Beispiel der horizontalen Kreuzkorrelation
(Anströmwinkel 33 Grad, Meßfühlerabstand 170 m)

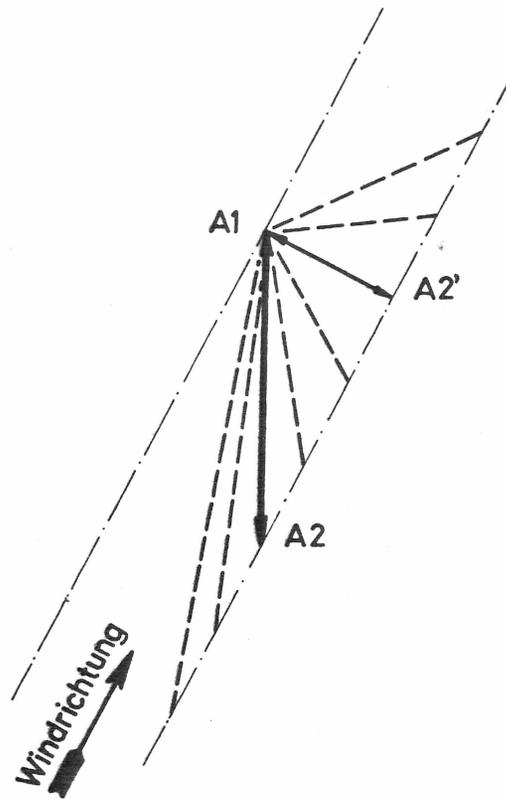


Abbildung 16: Zur Bestimmung der lateralen Korrelation

Da sich die Struktur des Turbulenzelementes auf dem Weg von A_2 nach A_2' natürlich verändert, wird der Korrelationswert des Maximums mit dem Wert der Autokorrelation der Meßreihe A_2 , der dieser Verschiebung entspricht, normiert. Trotz dieser in mancher Hinsicht groben Näherungsmethoden ist, wie die Abbildung 17 zeigt, die laterale Korrelation R_y der Böen relativ gut zu bestimmen.

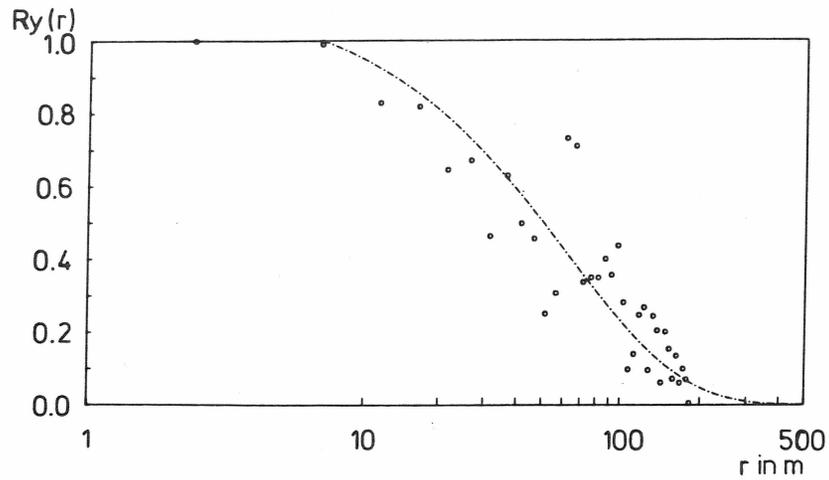


Abbildung 17: Laterale Korrelation R_y gegen Abstand r in 8 m Höhe

Analog der Autokorrelation zur Bestimmung der longitudinalen Erstreckung der Böen wird die Kreuzkorrelation durch eine Exponentialfunktion der Form

$$R_y(y) = \exp(-b \cdot y) \quad (27)$$

angenähert (strichpunktierte Linie in Abbildung 17) und über die Integralskala

$$L_y = \int_0^{\infty} R_y(y) dy = 1/b \quad (28)$$

die charakteristische laterale Erstreckung der Böen bestimmt. Für 8 m Höhe erhält man eine charakteristische Breite der Turbulenzelemente von $L_y = 63$ m. Das Verhältnis der charakteristischen Länge zur Breite ergibt sich dann zu:

$$L_x / L_y = 202 \text{ m} / 63 \text{ m} = 3.2 \quad (29)$$

Das heißt, daß die Wirbel im Mittel 3.2 mal länger als breit sind.

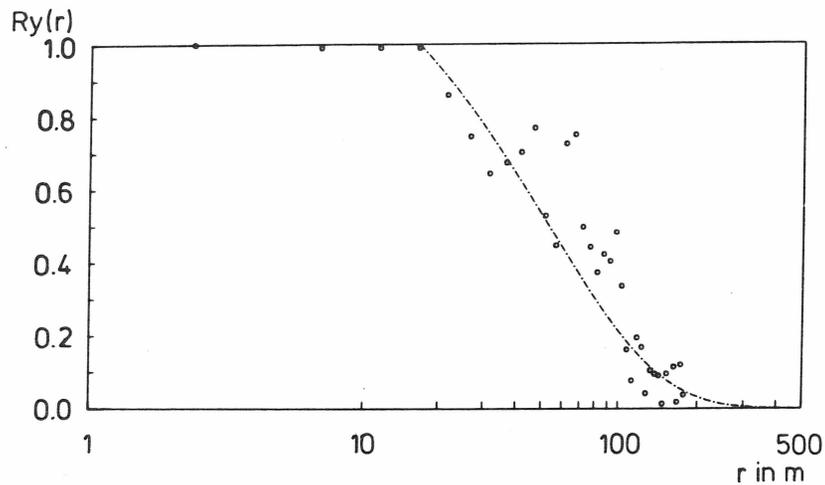


Abbildung 18: Laterale Korrelation R_y gegen Abstand r in 48 m Höhe

Für 48 m Höhe zeigt die Abbildung 18 die horizontale Kreuzkorrelation. Die Integralskala L_y ergibt sich zu 72 m und somit das Verhältnis der charakteristischen Länge zur charakteristischen Breite zu:

$$L_x / L_y = 328 \text{ m} / 72 \text{ m} = 4.6 \quad (30)$$

Dieses Verhältnis ist größer als in 8 m Höhe und deutet darauf hin, daß die longitudinale Erstreckung der Bö (in Hauptwindrichtung) mit der Höhe stärker zunimmt als die laterale Erstreckung der Bö (senkrecht zur Hauptwindrichtung). Dies läßt die Deutung zu, daß in größeren Höhen der Energietransfer aus der longitudinalen Komponente in die laterale Komponente geringer wird. TEUNISSEN (1980) erhält in 10 m Höhe ein Verhältnis von $130 \text{ m} / 24 \text{ m} = 5.4$.

Aus dem Integrallängenmaß L_y läßt sich auch auf den Abklingfaktor C_y einer horizontalen Kohärenzfunktion schließen. Der Abklingfaktor b in der Kreuzkorrelationsfunktion entspricht der Konstanten C_y der Kohärenzfunktion multipliziert mit der Frequenz n und dividiert durch die mittlere Windgeschwindigkeit v_z (Wellenlänge des Maximums des Spektrums $1/k_{\max}$).

$$C_y = b \cdot \frac{v_z}{n} = \frac{b}{k_{\max}} \quad (31)$$

Eine erste Abschätzung des Abklingfaktors C_y erhält man durch Einsetzen der Zahlenwerte $b = 1/63 \text{ m}$ und $v_z/n = 621 \text{ m}$ ($z = 8 \text{ m}$ Höhe) nach Tabelle 7.

$$C_y = \frac{1}{63 \text{ m}} \cdot 621 \text{ m} = 9.9 \quad (32)$$

Für die Höhe 48 m ist

$$C_y = \frac{1}{72 \text{ m}} \cdot 943 \text{ m} = 13.1. \quad (33)$$

In der Praxis wird z.Z. der Wert $C_y = 8.0$ benutzt, während in der Literatur (DAVENPORT 1967) Werte bis zu $C_y = 20$ angegeben werden.

4. Auswirkungen auf das Windlastkonzept von Bauwerken

=====

Die ermittelten meteorologischen Parameter für das Windlastkonzept sind leider noch als vorläufig anzusehen, da im Meßzeitraum keine Stürme mit Windgeschwindigkeiten größer als 20 ms^{-1} beobachtet wurden. Dennoch soll versucht werden, die Auswirkungen auf die Windbelastung zu untersuchen. Hierzu wurde zunächst das Konzept von DAVENPORT (1970) so umgearbeitet, daß eine variable Bezugslänge des Spektrums angegeben werden kann. Die Höhenabhängigkeit der Bezugslänge wurde durch ein Potenzgesetz eingeführt. Auf die Herleitung der Formeln zur Ermittlung der maximalen dynamischen Windlast soll hier nicht im Einzelnen eingegangen werden; sie ist an anderer Stelle ausführlich dargestellt (ZILCH 1983).

Interessant für die Windbelastung von Bauwerken ist die Feststellung, daß der Exponent α des Windprofiles eine Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit zeigt. Dieser Exponent geht nicht nur in die Ermittlung des Bögigkeitsfaktors sondern auch

direkt in die mittlere Windlast ein. Die festgestellte Abhängigkeit wurde für einige Beispiele ausgewertet und in Abbildung 19 dargestellt.

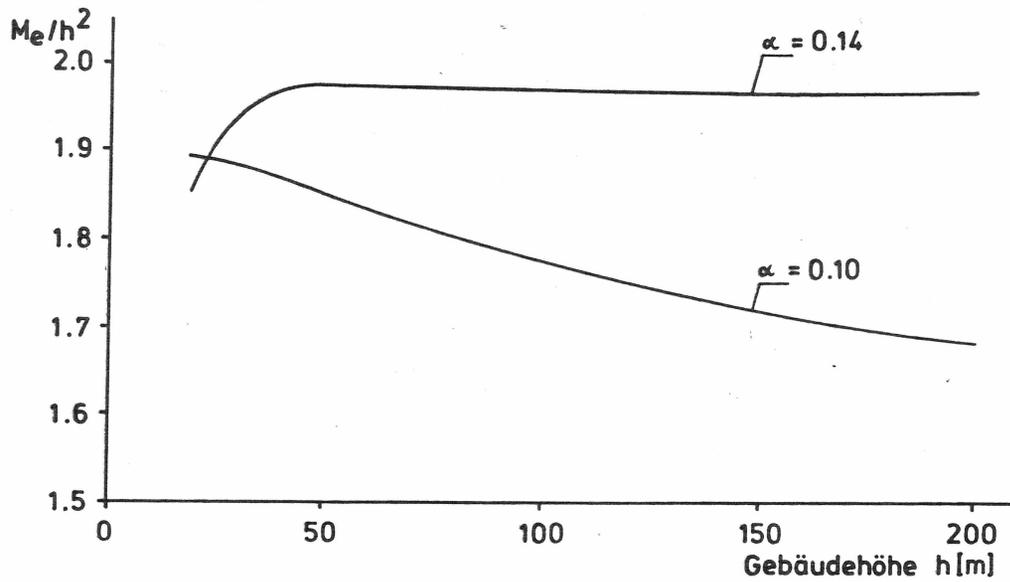


Abbildung 19: Abhängigkeit des Ersatzeinspannmoments M_e vom Profilexponenten α und der Gebäudehöhe h .

Eine Verminderung des Profilexponenten α wirkt sich bei hohen Gebäuden deutlich auf das (maximale) Ersatzeinspannmoment M_e aus. Hier scheint eine weitergehende Untersuchung der meteorologischen Eingangswerte, insbesondere für sehr hohe Windgeschwindigkeiten, dringend erforderlich.

Für die Ermittlung des Böigkeitsfaktors (des Bauwerkes) sind vor allem die Höhenabhängigkeit der spektralen Dichte und die Abklingfaktoren der Korrelation von Bedeutung. Es hat sich in den Messungen eine Höhen- und Windgeschwindigkeitsabhängigkeit gezeigt. Auch hier ist es wichtig, allein die für sehr hohe Windgeschwindigkeiten geltenden Werte zu verwenden. Bei der Ermittlung der Belastung von Bauten in extremen Wind müssen für eine vernünftige Beurteilung der Sicherheit zusammenhängende Grunddaten benutzt werden. Zur Verdeutlichung der Auswirkung soll ein Beispiel vorgeführt werden. In Abbildung 20 werden Böigkeitsfaktoren der

Bauwerksreaktion verglichen, die einerseits mit den meteorologischen Grunddaten nach DAVENPORT (1967) und andererseits mit den in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Werten berechnet wurden.

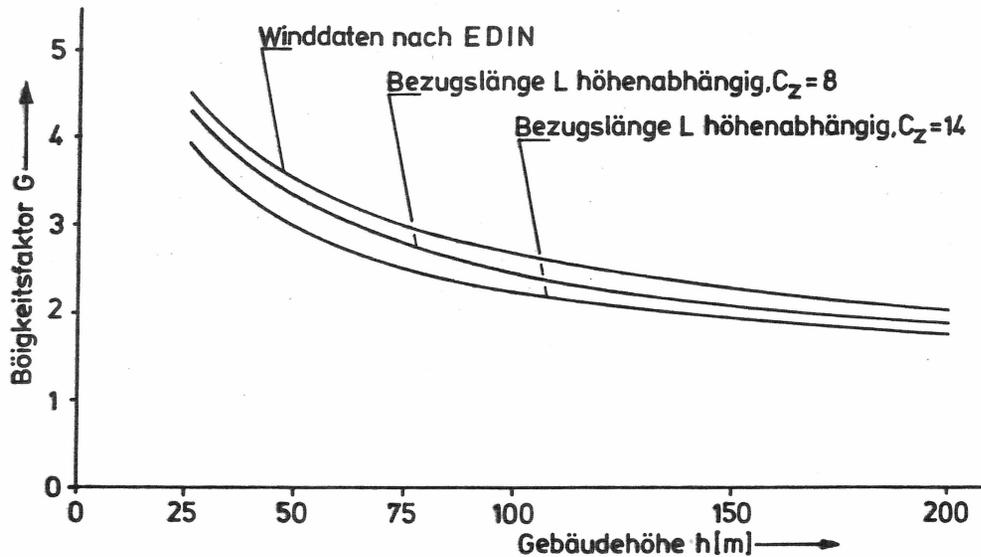


Abbildung 20: Beispiel eines Vergleichs der Böigkeitsfaktoren der Bauwerksreaktion mit verschiedenen meteorologischen Eingangsparametern.

Gebäudebreite/Gebäudehöhe $b/h = 0.2$

Eigenfrequenz $f_0 = 0.25$ Hz

Dämpfungsmaß $D = 0.006$

Mittelungsintervall $T = 10$ min

offenes Gelände

Es zeigt sich, daß für die berechneten Beispiele sowohl die Veränderung der Bezugslänge L im Spektrum als auch die Vergrößerung der Abklingkonstante C_z der vertikalen Korrelation den Böigkeitsfaktor vermindern. Sollten weitere Untersuchungen die aufgezeigten Tendenzen bestätigen, so ist mit einer Verminderung der Böigkeitsfaktoren der Bauwerksreaktion zu rechnen.

5 LITERATURVERZEICHNIS

=====

COUNIHAN, J

Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis
of data from the period 1880-1972

Atmospheric Environment, Vol.9, 871-905, 1975

DAVENPORT, A.G.

The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high
winds

Quart. J. R. Met. Soc., 87, 194-221, 1961

DAVENPORT, A.G.

Gust loading factors

Am. Soc. of Civ. Eng., Str. Div., 93, 1967

DAVENPORT, A.G. and DALGLIESH, W.A.

Wind loads. In: Canadian Structural Design Manual, Supplement
No.4 to the National Building Code of Canada, Ottawa:

National Research Council of Canada 1970

DIN 1055

Bericht über den Stand der Arbeiten an Regeln zur Erfassung
der Windwirkung auf Bauwerke (Stand August 1980)

Arbeitspapier des NABau-Arbeitsausschusses DIN 1055, Teil 4;
auch veröffentlicht im Rahmen eines Seminars des VDI-Bildungs-
werkes 1980

ESDU 74030/31

Characteristics of atmospheric turbulence near the ground

Part I: Definitions and general information

Part II: Single point data for strong winds

Engineering Sciences Data Unit, London, 1974

FROST, W., LONG, B.H. and TURNER, R.E.

Engineering handbook on the atmospheric environmental guide-
lines for use in wind turbine generator development

NASA Technical paper 1359, 1978

HARRIS, R. I.

The nature of the wind. In: The modern design of wind-sensitive structures. Proceedings of a seminar held on 18 June 1970 at London

Construction Industry Research and Information Association, London 1971

KAIMAL, J. C., WYNGAARD J. C., IZUMI, Y. and COTE, O. R.

Spectral characteristics of surface-layer turbulence

Quart. J. R. Met. Soc., Vol. 98, 563-589, 1972

LÖSSLEIN, H.

Das bodennahe Windfeld bei Starkwind und Sturm im Hinblick auf Bauwerksbelastungen

Diplomarbeit für Meteorologie, München, 1979

NIEMANN, H.-J. und RUHWEDEL, J.

Statische und dynamische Beanspruchung von Naturzugkühltürmen bei Einzel- und Gruppenanordnung

Konstruktiver Ingenieurbau Berichte 35/36, 1981

PANOFSKY, H. A.

Wind Structure. In: Wind effects on Buildings and Structures, Proceedings Cambridge

Cambridge University Press, 1977

SHIOTANI, M.

Turbulence measurements at the sea coast during high winds

Jour. of the Met. Soc. Japan, Vol. 53, 340-354, 1975

SHIOTANI, M. and IWATANI, Y.

Horizontal space correlations of velocity fluctuations during strong winds

Jour. of the Met. Soc. Japan, Vol. 54, 59-66, 1976

SIMIU, E.

Wind spectra and dynamic alongwind response

Am. Soc. of Civ. Eng., Str. Div., 9, 1897-1910, 1974

TAUBENHEIM, J.

Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten

Akad. Verlagsges. Geest und Portig, Leipzig, 1969

TEUNISSEN, H.W.

Structure of mean winds and turbulence in the planetary
boundary layer over rural terrain

Boundary Layer Meteorology, 19, 187-221, 1980

WIERINGA, J.

Gust factors over open water and built-up country

Boundary Layer Meteorology, 3, 424-441, 1973

ZILCH, K.

Ein anschauliches Lastkonzept für Hochhäuser in böigem Wind

Erscheint demnächst 1983