

Untersuchungen zur Aufstellung von Windlastannahmen für Fassaden

T 1236

T 1236

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

UNTERSUCHUNGEN ZUR AUFSTELLUNG
VON WINDLASTANNAHMEN
FÜR FASSADEN

Forschungsvorhaben, gefördert durch das
Institut für Bautechnik, Berlin

Dipl.-Ing. Walther Pieckert
Fichtelbergstr. 36
7000 Stuttgart

März 1984

Windlastannahmen
für
Fassaden

Inhaltsübersicht

1. Anlaß der Untersuchung
2. Aufgabenstellung und Grundlagen
 - 2.1 Unterschiede zwischen einer stationären, homogenen Anströmung und turbulenter Anströmung
 - 2.2 Unterschiede zwischen ungestörter Anströmung und wandnaher Umströmung hinter Ablösebereichen
 - 2.2.1 Strömungsverhältnisse in Ablösezonen bei stationärer Anströmung
 - 2.2.2 Strömungsverhältnisse in den Ablösungszonen bei instationärer Anströmung
 - 2.3 Auswirkungen veränderlicher Außendrucke am Bauwerk
 - 2.3.1 Bauwerke mit starren, einschaligen Wänden
 - 2.3.2 Bauwerke mit elastischen, einschaligen Wänden
 - 2.3.3 Bauwerke mit vorgesetzten, hinterlüfteten Fassaden

- 2.3.3.1 Druckausgleich bei niedrigen Frequenzen
- 2.3.3.2 Druckausgleich bei einer hinterlüfteten Fassade bei höheren Frequenzen
- 2.3.3.3 Verformungen und ihre Rückwirkungen auf die Umströmung, insbesondere im Ablösebereich
- 2.4 Beobachtungen und Messungen
 - 2.4.1 Schäden an Bauwerken
 - 2.4.2 Messungen an Bauwerken und an Modellen
- 3. Arbeitshypothesen für die Entwicklung einer Windlastannahme für Fassaden
 - 3.1 Frequenzdichtespektrum hinter Ablösekanten mit Überlagerung des Außenströmungsspektrums
 - 3.2 Abhängigkeit der Verformungen vom zeitlichen Druckverlauf und dem Eigenschwingverhalten der Bauteile bei bestimmten Fassadenfabrikaten
 - 3.3 Anzahl N der maximalen Verformungswechsel
 - 3.4 Abminderung der zulässigen Spannungen entsprechend der Zeitfestigkeit und Dauerfestigkeit
- 4. Zusammenfassung
- 5. Literaturangaben

Windlastannahmen für Fassaden.

1. Anlaß der Untersuchung.

Häufig werden bei Starkwinden Fassadenelemente oder auch ganze Fassaden zerstört, deren Bemessung nach den heutigen Regeln richtig durchgeführt war, d.h. mit statischen Ersatzlasten aus den geltenden technischen Baubestimmungen, insbesondere der DIN 1055 Blatt 4. Die zulässigen Spannungen für die verwendeten Werkstoffe und Bauelemente waren eingehalten worden. Dies weist darauf hin, daß in den angewandten Bestimmungen wesentliche Beanspruchungsarten nicht erfaßt waren. In der Umströmung eines Bauwerkes treten z. B. häufig wiederholte Druckschwankungen in den Ablösebereichen auf, die bisher in keiner Norm erfaßt sind. Weiterhin gelten die in Windkanälen gemessenen Druckverteilungen nicht unbedingt für die Großausführung. Die häufig wiederholten Druckschwankungen wirken gelegentlich verstärkt durch Resonanz sich als Verformungsüberhöhungen bei leichten Fassadenelementen aus mit Überschreitung der Verformungsgrenzen. Die zugehörigen Spannungen lagen dann erheblich über denen aus den statischen Ersatzlasten, die aus den Vorschriften für Lastannahmen an Bauten entwickelt waren. Verschärfend kann sein, daß bei Resonanz die Zahl der Verformungsspiele N zu Beanspruchungen der Konstruktionselemente im Zeitfestigkeits- bzw. Dauerfestigkeitsbereich führen kann. Die Bruchfestigkeit liegt in Bereichen mit hohen Lastspielzahlen wesentlich niedriger als bei einer einmaligen statischen Belastung..

Es sollte daher versucht werden, die besonderen Eigenschaften der Umströmung von Bauten, insbesondere in den Ablösungs- und Wiederanlegezonen zu erfassen. In diesen Bereichen wurden vorwiegend die Schäden beobachtet und festgestellt. Für die Druckschwankungen aus der freien Anströmung und insbesondere in den Ablösebereichen, waren die Druckausgleichsvorgänge bei hinterlüfteten Fassaden gesondert zu untersuchen. Hier wurde verschiedentlich angenommen, daß über den Druckausgleich die Beanspruchungen generell so weit abgebaut würden, daß sogar eine Herabsetzung der Lastannahmen gegenüber denen bei starren Fassaden möglich wären. Insbesondere bei sehr schnellen Druckwechseln aber sind in der Außenströmung an der Wand die Einflüsse der Resonanz der Bauteile gelegentlich überwiegend und verantwortliche für deren Zerstörung. Auch Flattererscheinungen, d.h. Rückwirkungen der Verformung auf die Umströmungsformen sind zu untersuchen.

Die bisherigen Ergebnisse sind unvollständig, da die zugesagten Mittel für umfangreichere Windkanalversuche sowie Versuche an Großausführungen im Ablösebereich hinter Bauwerkskanten nicht gegeben wurden. Teile dieses Berichtes müssen daher vorerst auf plausiblen theoretischen Annahmen aufbauen als Ersatz für die noch ausstehenden Versuchsergebnisse. Ein Antrag auf Forschungsmittel für Versuche zur Bestätigung dieser Annahmen wurde gestellt. Über wünschenswerte Versuche und Ergänzungen wird einiges im Abschnitt 3 und 4 ausgeführt.

2. Aufgabenstellung und Grundlagen.

Im folgenden Abschnitt wird u. a. auf die unterschiedlichen Gegebenheiten der Umströmungsverhältnisse der Großausführung und den geltenden Normen hingewiesen vor allem aber auf die grundsätzlichen Unterschiede der verschiedenen Strömungsformen in der Anströmung und in der Umströmung.

2.1 Unterschiede zwischen einer stationären homogenen Anströmung und einer turbulenten Anströmung.

Die meisten Windkanäle, in denen Versuche an Fassaden und Fassadenelementen ausgeführt wurden, waren Forschungseinrichtungen für die Kraftfahrzeug- und Luftfahrzeugindustrie mit einer quasistationären, homogenen Anströmung mit sehr geringer Turbulenz (Turbulenzfaktoren unter 1 %). Solche Messungen zeigten daher nur unbedeutende Schwankungen in den Drücken auf der Luvseite, während die Druckschwankungen an den windparallelen Seitenflächen der Modelle im allgemeinen gar nicht ausgemessen und analysiert wurden. Die Messungen zeigten jedoch, daß die Druckschwankungen auf den Seiten erheblich waren. Da meist nur mit trägen Flüssigkeitsmanometern gemessen wurde, die Mittelwerte angaben, glaubte man, die Ergebnisse solcher Messungen ohne Bedenken auf die Großausführung übertragen zu können. Dies war mit Sicherheit zulässig für die Gesamtkräfte an einem Bauwerk, jedoch nicht mehr für die einzelnen Teile. Hier genügte offensichtlich die statische Ersatzlastannahme nicht mehr. Mangels anderer Angaben wurden jedoch die Werte auch für die Bemessung

der Fassaden übernommen, wodurch sich gewisse Probleme ergaben je nach Art der Fassadenkonstruktion. Dies erscheint nur soweit zulässig, wie die Gebäudeaußenflächen dicht und so starr sind, daß ihre Eigenfrequenzen durch die Fluktuationen in der Anströmung bzw. Umströmung nicht angesprochen werden konnten. Solche Anregungen treten aber mit Sicherheit ein bei den moderen Vorhangfassaden mit und ohne Luftzwischenraum.

Der natürliche Wind ist eine Luftbewegung relativ zur Erde. Fest mit der Erde verbundene Bauwerke sind Widerstandskörper, die von der Luftmasse unter Energieverlust umströmt werden müssen. Die Summen der Druckdifferenzen und Reibungskräfte an allen Bauwerksoberflächen werden komponentenweise als Widerstand, Auftrieb und Querkraft (Quertrieb) bezeichnet. Die ungestörte Anströmung ist räumlich und zeitlich stark veränderlich. Diese zufallsverteilten Windgeschwindigkeiten werden nach den Methoden der Statistik in vereinfachter Form dargestellt. In mittleren und starken Winden läßt sich eine Grundgeschwindigkeit des Windes \bar{v} definieren, d. h. eine Geschwindigkeit die über eine vereinbarte Zeit zwischen 1 bis 10 Minuten nach Richtung und Größe etwa konstant ist. Sie ist als Mittelwert der Windgeschwindigkeit über die Mittelwertbildungsdauer definiert. Dieser Grundgeschwindigkeit (Transportgeschwindigkeit) \bar{v} sind additiv mehr oder weniger schnell veränderliche Zusatzgeschwindigkeiten überlagert, die vereinbarungsgemäß in ihren drei Komponenten erfaßt werden, von denen $v'_x(t)$ in Richtung der Grundgeschwindigkeit liegt, $v'_y(t)$ horizontal und rechtwinklig zur Grundgeschwindigkeit und $v'_z(t)$ vertikal rechtwinklig zu \bar{v} . Bei der heute üblichen Erklärung der

Fluktuation als einer Summe von Wirbelbewegungen verschiedenster Größe und Lage ergeben sich innerhalb eines Wirbelsystems gewisse Invarianten, z. B.

$$v'_x{}^2 + v'_y{}^2 + v'_z{}^2 = \text{const}$$

die einmal darauf hinweisen, daß die Größtwerte aller Komponenten nicht an einem Punkt gleichzeitig auftreten können, zum anderen darauf, daß die Energieverteilungen über die Frequenz in den verschiedenen Richtungen ähnlich sein müssen. Diese Festlegung gilt auch in einem größeren aus stochastisch verteilten Wirbeln aufgebauten Turbulenzsystem.

Im allgemeinen wird nur die Fluktuation der v'_x -Komponenten, d.h. in Richtung der Transportgeschwindigkeit \bar{v} weiter verfolgt.

Die Fluktuation der entsprechenden Drücke wird dargestellt mit

$$p(x,t) = \bar{p}(x) + p'(x,t) \text{ mit } p'(x,t)$$

als stochastisch Veränderlicher. Da die Druckschwankungen ebenfalls stochastisch verteilt sind, werden sie erfaßt über die Varianz der Zusatzdrücke

$$\sigma_p^2(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p'(x,t) dt$$

Aus praktischen Gründen wird für diese Zufallsgrößen eine Gauß'sche Normalverteilung angenommen. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $w(p)$ wäre dann

$$w = \frac{1}{\sigma_p \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(p-\bar{p})^2}{2\sigma_p^2}}$$

wobei \bar{p} der Mittelwert in der Glockenkurve ist.

Die Druckschwankungen $p'(x,t)$ sind an zwei benachbarten Punkten (z.B. x_1 und x_2 in Strömungsrichtung) statistisch voneinander abhängig. Dies wird durch die Kreuzkorrelation ausgedrückt

$$R(x_1, x_2, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T p'_1(x_1, t) \cdot p'_2(x_2, t + \tau) dt$$

bzw. deren normierte Form

$$g(x_1, x_2, \tau) = \frac{R(x_1, x_2, \tau)}{\sqrt{R(x_1, x_1, 0) \cdot R(x_2, x_2, 0)}}$$

Bei völliger Gleichartigkeit im Verlauf der Druckschwankungen wäre $g = 1$.

Für den Fall $x_1 = x_2$ bleibt der Ausdruck $R(x_1, \tau)$ als Maß für die Ähnlichkeit ("Beständigkeit") bei einer bestimmten zeitlichen Verschiebung am gleichen Ort. Für $\tau = 0$ wird für diese Autokorrelationsfunktion

$$R(x, 0) = \tilde{\sigma}_p^2(x)$$

Eine Transformation dieser Darstellung der zeitlich veränderlichen Druckschwankungen $p'(x,t)$ in ein Energiedichtespektrum oder Frequenzdichtespektrum ist möglich über die Beziehung

$$R(x, \tau) = \int_0^{\infty} S(x, f) \cos(2\pi f \tau) df$$

oder auch

$$S(x, f) = 4 \int_0^{\infty} R(x, \tau) \cos(2\pi f \tau) d\tau$$

Für $\tau = 0$ wird dann wieder

$$\sigma_p^2(x) = \int_0^{\infty} S(x, f) df$$

$S(x, f) \cdot df$ ist für jeden Frequenzbereich von f bis $(f + df)$ ein Maß für den Anteil dieses Frequenzbereiches an der Gesamtenergie bzw. der Varianz σ_p^2 .

Durch Davenport u.a. (siehe Literatur 5) wurden Energiedichtespektren gemessen und definiert. Da sie abhängig von der Höhe über Gelände und der Stärke der Grundströmung ausgedrückt durch \bar{v}^2 sind, wurden sie entsprechend normiert. Die "Bezugslänge" $x = 1200$ m, die in Beziehung steht zu den sogenannten turbulence scales gilt für etwa 60 m Höhe über Gelände und war von Davenport so festgelegt worden. Dieser Wert wächst etwa mit der Wurzel der Höhe z über Gelände, d.h. dort verschiebt sich das Maximum $S(f)$ zu den kleineren Frequenzen, d.h. zu längeren Schwingzeiten.

Bei diesen Spektren wurde $f \cdot S(\bar{x}, f)$ als reduzierte Spektralfunktion oder auch $f \cdot S(\bar{x}, f) / \bar{v}^2$ über der Wellenzahl f / \bar{v} aufgetragen. Es liegen inzwischen sehr viele Messungen solcher Spektraldichtefunktionen vor, die sich ohne großen Zwang zusammenfassen ließen zu einer repräsentativen Kurve. Dabei werden aus praktischen Gründen in beiden Achsen des Diagramms logarithmische Teilungen genommen. Bei dieser Auftragsart zeigt sich bei den höheren Frequenzen eine gute Übereinstimmung mit den theoretischen Arbeiten von Kolmogoroff, Monin und Obukhow (Abb.1).

Diese mathematische Darstellung der Fluktuation in x -Richtung läßt sich wie oben erwähnt, auch auf die anderen Richtungen y und z übertragen, wobei die z -Komponente mit der Höhe über Gelände relativ zu

den x- und y-Komponenten anwächst. Im übrigen nimmt die Turbulenz mit der Höhe ab. Zu beachten ist wegen der Form und Lage der angesetzten Wirbel, daß die Korrelationswerte in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich sind, d.h. in y-Richtung wesentlich stärker abnehmen als in x- oder in z-Richtung.

Aus einem solchen für alle Geschwindigkeiten \bar{v} geltenden Energiedichtespektrum läßt sich für eine bestimmte Grundgeschwindigkeit \bar{v} und einen gegebenen Zeitabschnitt, die für jede Grundgeschwindigkeit \bar{v} annähernd konstante Zahl der Windstöße für die einzelnen Intensitäten (Böenstärken) ermitteln. Nur bei den kleinen Anstößen im Dissipationsbereich des Spektrums zeigen je nach Art der unterstellten Turbulenzmodelle im Bereich der höheren Frequenzen sich gewisse Unterschiede. Diese Unterschiede zwischen den Turbulenzmodellen von Gurwitsch und Yaglom gegenüber den Wirbelstreckungsansätzen von Kraichnan und Townsend sind für die technischen Anwendungen unbedeutend, da dieser Anteil des Spektrums nur einen geringen Energieanteil und geringe Auswirkungen für normale Bauteile hat. Für Fassaden kann dies gegebenenfalls sich ändern.

Für die kleineren Frequenzen, d.h. längere Schwingungszeiten, die den größten Energieanteil haben und entscheidend die größeren Böenstöße bedingen, kann eine gewisse Vorordnung gewählt werden, die durch Auswertung vieler Meßschriebe von Starkwinden zu begründen ist.

In einfachster Form ergeben sich diese Zahlen durch Auszählung der Null-Durchgänge durch die Mittelgeschwindigkeit. Näherungsweise ergab sich die Zahl

der Durchgänge pro Stunde etwa entsprechend der Formel $n = 5400/v_{\max}$. Die Spitzenstöße sind jeweils aufgebaut aus Anteilen verschiedener Frequenzen, wobei die niedrigen die größten Anteile liefern. Für die praktische Bemessung sind die Summenwerte interessant, nachdem bei der stochastischen Natur der freien Anströmung von vornherein über längere Zeit wirkende harmonische Schwingungen auszuschließen sind. Die Häufigkeit dieser Spitzenwerte wird bestimmt durch die energiereichsten Frequenzen, die z. B. für eine Mittelgeschwindigkeit $\bar{v} = 20$ m/s bzw. Spitzengeschwindigkeit $v_{\max} \sim 36$ m/s etwa bei $0,03$ bis $0,04 \text{ sec}^{-1}$ liegen. Hieraus ergibt sich eine bestimmte Verteilung der Windstöße innerhalb eines Starkwindes, bei dem einmal in 1 Stunde die Geschwindigkeit v_{\max} erreicht oder überschritten wird. Die Aufteilung der Spitzenwerte auf die verschiedenen Geschwindigkeiten ergibt ein Böenkollektiv das für 1 Stunde aber auch für 1 Jahr ermittelt werden kann. Die Auftragungen der Spitzengeschwindigkeiten bzw. der Spitzendrücke über der Anzahl N zeigt einen relativ schnellen Abfall von den Größtwerten. Aufgrund solcher Lastkollektive der Wirkungen des natürlichen Windes läßt sich ausschließen, daß die Ermüdungsfestigkeit an unmittelbar durch die Anströmung belasteten Bauwerksflächen eine größere Rolle spielen kann als die Kurzzeitfestigkeit beim Auftreten der einmaligen Spitzenbelastung. Bei der stochastischen Natur des anströmenden Windes ohne bevorzugte Frequenzen, d.h. auch ohne Spitzen im Frequenzdichtespektrum, kann auch die Anregung bestimmter Eigenschwingungen des betroffenen Bauteiles noch nicht zu Ermüdungsproblemen führen. Etwaige Resonanzüberhöhungen treten immer nur kurzfristig auf mit maximalen Überhöhungsfaktoren zwischen 3 und 4.

Bei der Überprüfung können wieder die erwähnten Ansätze von Davenport u.a. (siehe Literatur) verwendet werden. Es könnten sich damit auch gewisse Überhöhungswerte auf den luvseitigen Flächen ergeben, wenn es sich um eine Vorhangfassade mit abgeschlossenem großen Luftzwischenraum handelt, doch dürfte dieser Fall selten sein.

Diese Überlegungen können unter gewissen Bedingungen auch für die Bauwerksrückseiten noch gelten, da sich dort die Wirbelablösungen an den luvseitigen Bauwerkskanten weniger auf diese Drücke auswirken als die niedrigfrequenten Druckschwankungen in der Außenströmung außerhalb der Ablösungskontur (Trennungsfläche).

2.2 Unterschiede zwischen den Strömungsverhältnissen in der Anströmung und in der abgerissenen Strömung in Wandnähe hinter den luvseitigen Bauwerkskanten (Abreißkanten).

Druckverteilungsmessungen an großen Bauwerken zeigten, daß die Drücke an den Luvseiten noch relativ gut rückbezogen werden konnten auf Windkanalversuche mit homogener quasistationärer Anströmung bzw. auch mit turbulenter Anströmung. Die Ergebnisse aus Grenzschichtkanälen ließen sich, wenn man bei diesen die Geschwindigkeitszunahme mit der Höhe über Kanalboden einrechnet, durchaus vereinbaren mit den "konventionellen" Meßergebnissen. Erhebliche Abweichungen zwischen den gemessenen Druckverteilungen zeigten sich jedoch bei Widerstandskörpern mit Rechteckgrundriß an den windparallelen Seitenflächen und etwas weniger an den Rückseiten. Diese Abweichungen waren

davon abhängig, wie weit kurzzeitige Druckschwankungen noch durch die Meßeinrichtung erfaßt werden konnten. Unmittelbar hinter den Kanten liegen die Spitzenwerte der Unterdrücke tatsächlich erheblich über denen aus Windkanalversuchen, während in weiter zurückliegenden Teilen der windparallelen Seiten diese Werte im Mittel niedriger sind, allerdings auch noch mit erheblichen Schwankungen. Diese ergeben sich aus Wiederanlagevorgängen usw.

Eine unmittelbare Erklärung dieser Abweichungen allein aus den Eigenschaften der freien Anströmung ist nicht möglich, da in den Ablösebereichen andere Frequenzdichteverteilungen anzusetzen sind als vor dem Widerstandskörper. Es wird versucht, dies stufenweise zu erklären und zu erfassen einmal für eine stationäre homogene Anströmung ($v_{\max} \sim \bar{v} \sim \text{const}$), zum anderen für turbulente Anströmungen mit einem Turbulenzfaktor $I \sim 0,16$ entsprechend dem häufigsten Wert aus den Auswertungen von Starkwinden über offenem ebenem Gelände.

2.2.1 Strömungsverhältnisse von Ablösezonen bei stationärer Anströmung.

Für einen rechtwinklig zur luvseitigen Fläche (Stirnfläche) angeströmten Widerstandskörper mit Rechteckgrundriß, ergeben sich für eine Potentialströmung zweifach symmetrische Stromlinien. Derartige Strömungsbilder treten auch noch bei sehr kurzzeitigen Anfahrvorgängen in der Strömung auf, d.h. plötzlichen Anstößen auch als Teil einer sehr schnellen Schwingung. Mangels ausreichender Akkumulationszeiten treten keine wesentlichen Reibungserscheinungen auf. Solche Strömungen sind in gewisser

Weise noch umkehrbar. Auf diesen Fall als Grenzfall wird noch im Abschnitt 2.2.2 eingegangen.

Leitet man mehr oder weniger stoßartig die stationäre Strömung ein, so bildet sich wegen der sehr hohen Geschwindigkeit (theoretisch = ∞) bei der Kantenströmung dort sofort eine Trennungsfläche aus unter Bildung eines Anfangs-Kantenwirbels. Damit wird die Übergeschwindigkeit stark herabgesetzt. Dieser Wirbel zieht Flüssigkeit aus den rückwärtigen Wandbereichen nach und erhält seine Energie aus der außerhalb der Trennfläche liegenden Umströmung. Diese hat inzwischen wegen der neuen Gesamtform (Körper + Ablösungsbereich) eine wesentlich andere Druckverteilung als die ursprüngliche Potentialströmung. Die ersten Wirbel wandern in Strömungsrichtung weiter und ergeben in Wandnähe Geschwindigkeiten, die teilweise gegen die Anströmrichtung liegen bzw. entgegen der Geschwindigkeit an den Trennungsflächen. Die Trennungsfläche erreicht ihre endgültige Form erst nach einer gewissen Zeit bzw. einer "Laufänge" der Anströmung, die etwa das 5- bis 15-fache der Körperlänge betragen dürfte. Für die Umströmung dieser neuen Kontur, bestehend aus der luvseitigen Fläche sowie den Trennungsflächen, sind Geschwindigkeits- und Druckverteilungen in der Trennfläche zu ermitteln, die nach den Überlegungen von Helmholtz u.a. zu ähnlichen mittleren Druckverhältnissen im Ablösegebiet führen. Innerhalb des Trennungsbereiches werden von der Kante und der Trennfläche ausgehend unter Energieentzug laufend Wirbel unterhalten und neu gebildet, die nach Erreichen einer gewissen Größe sich von der Körperwand ablösen, nicht zuletzt

wegen des dort positiven Druckgradienten an der Oberfläche gegen die Strömung. Die Trennungsfläche erhält bei dieser laufenden Wirbelablösung und -wanderung eine leicht gewellte Kontur und weist damit auf Druckschwankungen mit einer gewissen Regelmäßigkeit hin.

Ausmaß und Geschwindigkeit der Wirbelablösungen sind also abhängig von den Druckverhältnissen an der Trennungsfläche und der Geometrie des zwischen der Trennungsfläche und der festen Wand liegenden Bereiches. Auch bei stationärer Anströmung mit voller Ausbildung der Trennflächenkontur wird sich die Form der Trennfläche pulsierend verändern durch das Ablösen und die Neubildung von Wirbeln. Dies führt dann auch zu pulsierenden Drücken im Inneren der Ablösungszone und damit auch an der Körperwand. Bei vorgegebener mittlerer Geschwindigkeit $v_{\ddot{u}}$ an den Trennungsflächen wird die Abwanderingeschwindigkeit der Wirbelkerne v_k etwa bei $0,5 v_{\ddot{u}}$ liegen. Die Länge von der Kante bis zur Wirbelablösungsstelle hängt von der Größe des positiven Druckgradienten ab, d.h. bei höheren Anströmgeschwindigkeiten wächst dieser Gradient mit dem Quadrat von $v_{\ddot{u}}$. Die Ablösung wird damit näher an die Kante gelegt. Der Kernabstand der abschwimmenden Wirbel dürfte zwischen 2,0 und 2,8 liegen. Die Größenordnung der dabei auftretenden Ablösefrequenzen läßt sich etwa abschätzen.

Bei $\bar{v} = 20$ m/s treten an der Trennungsfläche Übergeschwindigkeiten auf zwischen >40 und 30 m/s. Die Wirbelkerngeschwindigkeit liegt damit bei etwa 15 bis >20 m/s. Bei einem Wirbel von etwa $0,4$ m \emptyset

der sich ablöst und Wirbelabstand etwa 1,0 m ergibt sich über die Kerngeschwindigkeit v_k etwa eine Frequenz $f_1 = 15$ Hz. Bei halber Anströmgeschwindigkeit werden die Wirbel wegen des geringeren positiven Druckgradienten etwas größer sein mit einer Vergrößerung des Wirbelabstandes und damit Verringerung der Frequenz unter die Hälfte der Frequenz bei doppelter Geschwindigkeit.

Dies sind allerdings nur die Frequenzen, die durch die Hauptwirbel vorgegeben sind. Hinzu kommen Druckschwankungen durch die kleineren Nebenwirbel, die im Zwischenraum zwischen den Hauptwirbeln angesiedelt sind.

Die ersten Frequenzen der Druckschwankungen sind also umgekehrt proportional der Dicke des Ablösebereiches und etwa proportional der Geschwindigkeit bzw. einer Potenz dieser Geschwindigkeit und richten sich etwa nach der Formel

$$f_1 = v^{1,2} \cdot (1/d_a) \cdot k$$

wobei k ein noch zu bestimmender Faktor ist, der weitgehend vom positiven Druckgradienten abhängt.

Die Dicke des Ablösebereiches hängt vom Winkel zwischen der Anströmrichtung und der in Windrichtung liegenden Seitenfläche ab, an deren luvseitiger Kante die Ablösewirbel sich bilden. Die höchsten Übergeschwindigkeiten treten an der Ecke auf bei Anström winkeln zwischen $\beta = -5^\circ$ und -10° . Die Staulinie auf der luvseitigen Fläche hat sich hier zur Kante hin verschoben mit einer Strömungsumlenkung gegen die Anströmrichtung. d.h. mit

entsprechend erhöhter Umströmungsgeschwindigkeit der Kante. Andererseits drückt die Hauptströmung die Stärke der Ablösezone etwas zusammen. Die Übergeschwindigkeiten werden an der Trennungsfläche also höher, der Bereich innerhalb der Trennungsschicht wird schmaler und damit die Größe der Wirbel und die Abstände der Wirbel ebenfalls wesentlich kleiner. Beides wirkt sich als Erhöhung der ersten Frequenzen aus bis auf das doppelte der Werte bei wandparalleler Strömung. Umgekehrt wirken positive β -Werte sich in einer Verringerung der Ablösefrequenzen aus. Da der Ablösebereich im zweiten Falle wesentlich dicker wird, entsteht ohnehin eine weniger geordnete Wirbelablösung, d.h. für $\beta > 5^\circ$ sind ausgezeichnete Frequenzen vermutlich kaum noch zu beobachten.

Diese Überlegungen sind leider ohne genauere Versuche vorerst nur qualitativ als richtig anzunehmen und gelten für eine nach Richtung und Größe über eine bestimmte Zeit konstante Anströmung. In der Praxis gilt dies auch noch für alle länger als etwa 30 sec andauernden Strömungsanteile. In Hinblick auf die bei vorgehängten Fassaden zu befürchtenden Resonanzen zwischen diesen Erregerfrequenzen (Druckschwankungen), die offensichtlich zwischen 5 und 50 Hz liegen können, abhängig von v_∞ und β sollte einmal die Zeit zur Ausbildung einer vollständigen Ablösungsströmung (Lauflänge $> 10 L$) ausreichen, zum anderen für eine hinreichende Anfachung der relativ geringen Anfangsamplituden der beaufschlagten Bauteile. Wo hier genau die Grenze zu ziehen ist, kann nur der Versuch klären.

Vorerst wird angenommen, daß alle Anteile der freien Anströmung, die man in einer Bezugszeit von etwa 30 bis 60 sec noch als quasi-konstant ansehen

kann (also mit stärksten Abweichungen von $\pm 20\%$ innerhalb der Mittelwertbildungszeit) einbezogen werden können. Dies wären dann nicht nur die Geschwindigkeiten aus dem 10-Minuten-Mittelwert also die sogenannte Grundgeschwindigkeit nach den neuen Norm-Entwürfen, sondern auch noch Geschwindigkeiten, die etwa 20 bis 25 % über diesen Werten liegen.

2.2.2 Strömungsverhältnisse in den Ablösungszonen bei instationärer Anströmung.

Die Grenze zwischen stationärer Anströmung und instationären Anströmungsteilen ist von Fall zu Fall und abhängig von der Gebäudegröße unterschiedlich. Grundsätzlich sollte man eigentlich nur Potentialströmungen addieren bzw. auch wieder unterteilen und nicht reibungsbedingte, d.h. nicht umkehrbare Strömungen. Hiergegen wird allerdings aus praktischen Gründen immer wieder verstoßen u.a. schon bei der Aufteilung der Geschwindigkeit in einen Grundgeschwindigkeitsanteil und einen fluktuierenden Anteil. Beide Anteile liefern bei der Umströmung eines Widerstandskörpers bereits nicht umkehrbare Strömungen, deren Wirkungen dann im Laufe des Rechenverfahrens bisher einfach addiert und multipliziert werden mit Beiwerten, die genau genommen nur für eine stationäre, homogene Anströmung gelten.

Bereits in Abschnitt 2.2.1 war darauf hingewiesen worden, daß die Druckverhältnisse um einen umströmten Körper stark zeitabhängig sind. Die instantan angestoßene Strömung ergibt eine Druckverteilung ähnlich der in einer Potentialströmung. Dies gilt auch für sehr schnelle Druckschwankungen geringer Amplitude. Die nach entsprechender Anlauf-

bzw. Akkumulationszeit voll ausgebildete Umströmung mit klar zu definierenden Trennungsflächen liefert eine völlig andere Druckverteilung. Im ersten Falle sind bei der Umströmung beispielsweise eines Zylinders Vorder- und Rückseitendrücke gleich hoch ($c_p = + 1,0$) und die seitlichen Unterdruckbeiwerte $c_p = - 3,0$. Im zweiten Falle hat der Rückseitendruck ein anderes Vorzeichen mit $c_p \sim - 0,5$ bis $- 0,86$. Die seitlichen Unterdrücke haben den Beiwert $c_p \sim - 1,10$. Die in turbulenter Anströmung (Grenzschichtkanäle) gemessenen Unterdruckbeiwerte liegen, bezogen auf den 5-sec-Spitzenstaudruck, zwischen diesen Werten. Man könnte also unter Verstoß gegen die vorher genannten Grundsätze die Druckverteilungen aus Anteilen verschiedener Wirkungsdauer zusammensetzen.

Für eine praktische Lösung der gestellten Aufgabe, nämlich Lastannahmen für Bauwerksfassaden zu finden, wäre vorerst, da keine Meßergebnisse auswertbar sind, folgende Hypothesen zu empfehlen:

- a) Für Bauwerke mit Grundrißabmessungen zwischen 20 und 50 m Kantenlänge tritt bei Geschwindigkeiten $\bar{v} < 20$ m/s die Ausbildung einer vollen Reibungsströmung und damit eines vollständigen Nachlaufgebietes erst ein nach einer Weglänge von etwa 400 m, d.h. mindestens 20 sec. Damit über diese Zeit hinweg die Anströmung nach Größe und Richtung etwa konstant ist, muß eine Schwingungszeit von etwa 60 sec angenommen werden innerhalb der in einem 20-sec-Zeitraum die Abweichungen von dem entsprechenden 20-sec-Mittelwert noch kleiner als etwa 25 % bleiben.

Bei Annahme von Wirbelfäden als Elemente der turbulenten Strömung ergeben sich gleichzeitig mit den Schwankungen in Hauptströmungsrichtung auch Schwankungen in den rechtwinklig dazu liegenden beiden anderen Richtungen, d.h. Richtungsänderungen von etwa $\pm 5^\circ$ in der Anströmung, wobei schon erhebliche Veränderungen im Ablösemechanismus eingeleitet werden können. Es kann jedoch damit gerechnet werden, daß ähnlich wie bei Flattererscheinungen auch bei einer Fassadenplattenschwingung durch eine eingeleitete Schwingung deren Frequenz etwa fixiert wird, wobei Änderungen von $\pm 30\%$ in der Anregungsfrequenz diese Schwingung noch nicht unterbrechen sondern sogar noch steigern. Aus diesen relativ langsam veränderlichen Anströmungsanteilen, deren Spitzenwerte noch immerhin 75 % der maximalen Böenwerte erreichen, ergibt sich auch im Außenbereich ein quasi-konstanter Zustand mit entsprechendem Druckverlauf an der Trennungsschicht. Zu dieser Druckverteilung an der Trennungsschicht gehört auch der langwellige Teil des Frequenzdichtespektrums der Außenumströmung bzw. der freien Anströmung.

- b) Die gegenüber (a) kurzzeitigeren Geschwindigkeitsänderungen in der Außenanströmung, deren Anteil etwa 25 bis 30 % der Maximalwerte darstellt, können praktisch nicht mehr auf die Form der Trennungsschicht der Umströmung und damit die dort herrschenden Druckverhältnisse in der vorher dargestellten Weise einwirken. Dies gilt auch für die Rückseitendrücke, die wesentlich den Widerstandsbeiwert bestimmen.

Für diese Geschwindigkeitsanteile mit höheren Frequenzen in der Anströmung bilden sich keine vollständigen Reibungsumströmungen mehr aus. Die Herausnahme von etwa 25 bis 30 % der Maximalwerte stellt eine willkürliche wenn auch plausible Annahme dar, die mindestens zur Erklärung einiger gemessener Erscheinungen brauchbar ist. Diese kurzzeitigen Schwankungen sind noch annähernd in voller Größe unmittelbar hinter den luvseitigen Ablösekanten vorhanden, wo sie sich auch an der Gebäudeoberfläche voll auswirken. An den lee-seitigen Bereichen bleiben sie ohne Auswirkung.

Dabei werden diese Wirkungen im Vorderkantenbereich überhöht, entsprechend ihrer Plötzlichkeit ("Instantaneität" nach Föttinger). Der Extremfall wären für sehr kurzzeitige Windstoßanteile Spitzenwerte vom Vielfachen der mit den Flüssigkeitsmanometern im Windkanal gemessenen Werte. Dies stimmt überein mit Beobachtungen von Eaton und Newberry sowie Lam bei Druckverteilungsmessungen an Gebäuden.

Schematisch ergeben sich also die in Abb. 3 gezeigten Bereiche. Der Anteil der sehr hohen Frequenzen, die potentialströmungsähnliche Druckverteilungen bedingen (etwa 5 % der gesamten Anströmungsenergie), ist zwar gering, liefert aber sehr hohe örtliche Unterdruckspitzen von weniger als etwa $1/10$ sec Dauer in einen Bereich von etwa 2 m Länge hinter den luvseitigen Kanten.

Der Anteil der niedrigen Frequenzen unter etwa 0,03 Hz, d.h. der Mittelgeschwindigkeitsanteil mit etwa 30 sec Mittelwertbildungszeit, der ca.

70 % des Spitzenstaudruckes ausmacht, liefert eine ausreichend lange quasistationäre Anströmung und Umströmung, bei der sich eine vollständige Reibungsströmung ausbildet. Damit ergeben sich die bekannten Druckverteilungen der mittleren Unterdrücke.

Für die fehlenden 25 % der Anströmungsenergie gelten Formen der Umströmung, die zwischen den vorgenannten beiden Extremen liegen. Sie wirken sich abnehmend bis etwa zur Mitte der windparallelen Seiten aus.

Den noch aus der Anströmung abzuleitenden Druckverteilungen sind die Druckschwankungen aus den Vorgängen innerhalb der Ablösungszone (aus dem Aufbau der Reibungserscheinungen) zu überlagern.

Bezogen auf die heute noch überwiegend angezogenen Ergebnisse von Modellmessungen im Windkanal mit homogener turbulenzarmer Anströmung und Messungen mit Flüssigkeitsmanometern von etwa 2-5 sec Anzeigeträgheit, ergeben sich für eine turbulente Anströmung folgende Abweichungen in den Druckverteilungen an einem rechtwinklig angeströmten Quader.

An der Luvseite gelten etwa die Drücke aus den Modellmessungen (bei richtigem Ansatz der Bezugsgeschwindigkeit). Zu den Kanten hin ergeben sich erhöhte Unterdrücke.

An den windparallelen Seiten ergeben sich unmittelbar hinter der luvseitigen Kante in sehr schmalen Bereichen wesentlich erhöhte Unterdrücke, während

etwa nach der halben Seitenlänge die mittleren Unterdrücke (5-sec-Mittelwertbildungszeit) unter die Windkanalwerte absinken.

An der Rückseite sind die Drücke um etwa 15-30 % niedriger als nach den einfachen Windkanalversuchen.

Können in der Messung mit etwas weniger trägen Instrumenten auch kürzere Mittelwertbildungszeiten erfaßt werden, so ergäben sich auf der Luvseite und unmittelbar hinter den luvseitigen Kanten entsprechend den Werten in der turbulenten Anströmung erhöhte Druckspitzen, während an den windparallelen Seitenflächen diese Spitzen in der Anströmungsturbulenz nur noch auf relativ kurze Länge sich auswirken. Nur wenige bisher vorliegende Druckverteilungsmessungen mit größerer Auflösung (kleinerer Trägheit) bestätigen dies. Eine entsprechende Festlegung der Windlastannahmen an Fassaden hängt im übrigen von deren konstruktivem Aufbau ab.

2.3 Auswirkungen veränderlicher Außendrucke am Bauwerk.

2.3.1 Bauwerke mit starren, einschaligen Wänden.

Bei dichten, starren Bauwerkswänden wirken sich die mehr oder weniger schnell veränderlichen Außendrucke unmittelbar und ohne Abminderungen oder Überhöhungen aus. Hierbei sollen die Wandelemente dicht und nicht schwingungsanfällig sein, z.B. schwere Massivwände aus Stein oder Beton. Die Druckverteilungen aus Modellversuchen (wie sie auch

DIN 1055 Blatt 4 wiedergibt) können für die Luvseiten, die Rückseiten und die windparallelen Seitenflächen übernommen werden, wobei empfohlen wird, die erhöhten Unterdruckwerte hinter den luvseitigen Kanten in jedem Falle auch zu übernehmen. Eine Abminderung um ca. 20 % an den windparallelen Seiten und den Rückseiten erscheint zwar möglich, ist aber meistens aus konstruktiven und wirtschaftlichen Gründen wenig sinnvoll.

2.3.2 Bauwerke mit elastischen, einschaligen Wänden.

Elastische, einschalige Fassaden sind geschlossene Leichtfassaden aus Asbestzement, Metall oder Glas. Auf der Innenseite liegt hinter ihnen ein größerer Luftraum, der auf veränderliche bzw. wandernde Unterdruckspitzen an den Außenseiten nicht reagiert, sondern dessen Mitteldrücke (+ oder -) sich ungünstigstenfalls zu den Außendrücken addieren.

Auf die Flächen wirken von außen die unter 2.2.2 genannten Druckanteile.

An der Luvseite wirkt maximal über den größten Teil der Fläche der Nennböendruck (vereinbarungsgemäß der 5-sec-Mittelwert). Die mit diesem Mittelwert noch nicht erfaßten kürzeren Spitzenwerte sollten je nach Bauteilgröße noch erfaßt werden in Zuschlägen. Bei Teilen unter 10 m^2 Fläche wäre entsprechend den Messungen von Deacon, Katajisto u.a. zum Nennböenstaudruck noch $\Delta q = 0,15 \text{ kN/m}^2$ Zuschlag zu nehmen, für die Teile unter 2 m^2 Fläche ein Zuschlag von $\Delta q = 0,30 \text{ kN/m}^2$. Dies dürfte mit den in den heutigen Bemessungstabellen der Glasindustrie enthaltenen

Sicherheiten noch ohne Schwierigkeiten durchzuführen sein. Bei der Bemessung durchlaufender Fassadenplatten wird empfohlen, bei Unterstützungsabständen unter 2 m zu der normalen Staudruckbelastung noch feldweise wechselnd $\Delta q = \pm 0,15 \text{ kN/m}^2$ zu überlagern. Dies ergibt sich aus dem Zusammenhang mit der Größe der Böenkomplexe bei höheren Frequenzen.

Das Eigenschwingverhalten spielt bei den luvseitigen Fassadenteilen nur eine untergeordnete Rolle. Die Eigenfrequenzen der Fassadenelemente liegen meist zwischen 5 und 20 Hz und in der Verglasung etwa zwischen 10 und 70 Hz. Der Energieinhalt der Fluktuationsanteile dieser Frequenzen ist zwar relativ gering, so daß auf irgend welche Stoßzuschläge oder Schwingbeiwerte an der Luvseite verzichtet werden kann. In jedem Fall könnten aber entsprechend den Ansätzen von Davenport u.a. auch noch stochastische Anregungen eingerechnet werden. Dies führt zu einer geringfügigen Erhöhung der Bemessungswerte, jedoch noch nicht zu irgendwelchen Dauerfestigkeitsproblemen wie an anderer Stelle ausgeführt wurde (Windlastkollektive in der Anströmung).

Hinter den luvseitigen Kanten, d.h. in den Ablösebereichen, sind andere Verhältnisse zu berücksichtigen. Zu den aus der Windlastnorm zu entnehmenden mittleren Unterdruckbeiwerten; insbesondere den Zuschlägen in Kantennähe, sind noch die regelmäßigen Druckschwankungen aus den Wirbelablösungen innerhalb der Ablösebereiche zu addieren. Wenn in Starkwinden über etwa 20 bis 30 sec relativ konstante Geschwindigkeitsanteile (und Staudrücke) zu ermitteln sind, so reicht diese Zeitdauer bereits zur Ausbildung einer voll entwickelten Reibungsströmung. Die Spitzen der Potentialströmung

(Anfahrströmung) sind abgebaut und die Außenkontur des Ablösungsbereiches (Trennfläche) bestimmt das Bild der Gesamtumströmung und damit die mittlere Druckverteilung an der Trennfläche und damit an der Bauwerks oberfläche. Die Schwankungen in der Anströmung schlagen ebenfalls bis zur Körperfläche durch. Abhängig von dem 20-sec-Mittelwert in der Anströmung \bar{v} , der zwischen 10 und 30 m/s (Maximalwert) liegen kann, und dem Winkel β zwischen der in Windrichtung liegenden Wand und der Anströmgeschwindigkeit ergeben sich dann unterschiedliche Wirbelablösefrequenzen zwischen 5 Hz (für $\beta = 0^\circ$) und etwa 70 Hz ($\beta = -5^\circ$) und $v = 30$ m/s; für Anströmwinkel $\beta = -5^\circ$ bis -15° gilt dabei etwa der Zusammenhang

$$f \approx 2,0 \cdot v.$$

Für kleinere Anströmwinkel, z.B. $\beta = 0^\circ$ gelten andere Abhängigkeiten, z.B. $f = 0,30 v$. Die Amplituden der Druckschwankungen bei den Wirbelablösungen (Energieinhalt) sind ebenfalls sehr stark abhängig von Anströmwinkel und Anströmgeschwindigkeit. Sie wachsen etwa mit dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit. Aus dem Mechanismus der Wirbelablösung ergeben sich für die Ablösefrequenzen zwischen 40 und 80 Hz (beispielsweise für $\beta = -5^\circ$ bis -15°) Druckschwankungsamplituden von etwa $\Delta p/q \pm 0,04 \text{ kN/m}^2$ und für die niedrigeren Frequenzen von 5 bis 10 Hz (überwiegend für $\beta = 0^\circ$) Werte bis zu $\Delta p/q \pm 0,10 \text{ kN/m}^2$. Diese Werte müssen noch im einzelnen durch Versuche unterbaut werden. Sie konnten leider bisher durch mangelnde Mitarbeit der Industrie nicht durchgeführt werden. Gegenüber den für diese Frequenzen in der freien Anströmung geltenden Druckschwankungen liegen solche Werte etwa 5-bis 10-fach höher. Im Bereich

der Ablösungen sollte also mit bis zu 50 % höheren Unterdruckwerten in schmalen Bereichen (etwa 2-3 m) gerechnet werden. Die Länge ergibt sich einmal aus der Wellenlänge dieser wandernden Druckschwankungen, d.h. aus v/f , zum anderen aus der Turbulenz der Anströmung. Nachdem f proportional v und abhängig vom Anströmwinkel β ist, ergibt sich für $\beta = -5^\circ$ bis -15° etwa der Zusammenhang $f = k \cdot 2,0 \cdot v$ und daraus $v/f \sim 0,5$ m, die Wellenlänge. Mit anderen Anströmwinkeln, d.h. Frequenzen der Größenordnung 10 Hz ist der Zusammenhang $f = k \cdot 0,30 v$. Damit sind in diesen Fällen die Wellenlängen zwischen 2 und 3 m. Für Zwischenwerte gelten entsprechend Werte zwischen 0,5 m und 2 m.

Wenn die Frequenzen zusammenfallen mit den Eigenfrequenzen der Konstruktion, so können dort je nach Dämpfung erhebliche Verformungsüberhöhungen auftreten, die die Grenzverformungen nach kurzer Zeit erreichen. Die Bemessung der Fassaden muß in diesen Bereichen damit rechnen, daß jede Frequenz im Ablösungsbereich über relativ lange Zeit auftreten kann. Damit ergeben sich für die Bemessung Dauerfestigkeitsprobleme. Ein großer Teil der Fassadenschäden dürfte hierauf zurückzuführen sein.

2.3.3 Bauwerke mit vorgesetzten, hinterlüfteten Fassaden.

Viele heute übliche Fassadensysteme zeigen Fassadenplatten von etwa 1 bis 2 m Breite, 0,03 m bis 0,10 m Luftzwischenraum und Fugenbreiten zwischen 5 und 20 mm. Diese Hinterlüftung bewirkt einen Druckausgleich zwischen der Außenluft und dem Luftzwischenraum, der zu einer Entlastung der Fassadenkonstruktion

führen kann soweit es sich nicht um schnell veränderliche Drücke in der Außenströmung handelt, vor allem solchen mit größerer Druckamplitude, die dann wiederum zu erheblichen Verformungen der Fassadenelemente führen können.

2.3.3.1 Druckausgleich bei niedrigen Frequenzen.

Der Luftzwischenraum mit dem Volumen V hinter einem Fassadenelement steht mit dem Außenraum über die Schlitz- und Undichtheiten mit dem effektiven Querschnitt F in Verbindung. Soll Strahlein-schnürungen und ähnliche Behinderungen des freien Querschnittes der Schlitz- berücksichtigen. F ist der Querschnitt einer waagerechten und einer senkrechten Fuge neben einem Element.

Der Druckausgleich bei einer plötzlich aufge-brachten Druckdifferenz erfolgt entsprechend den Gleichungen:

$$(1) \quad p = m/\varrho = R \cdot T \quad \text{Zustandsgleichung}$$

$$(2) \quad p/\varrho^\gamma = p_0/\varrho_0^\gamma \quad \text{Poisson-Gleichung}$$

wobei für die hier geltende Adiabate (Entropie-änderung $dS = 0$) gilt $\gamma = c_p/c_v = 1,405$.

$$(3) \quad 0,5 (w^2 - w_0^2) + \int_{p_0}^p \frac{dp}{\rho c} = 0 \quad \text{(Bernoulli - Gleichung)}$$

$$(4) \quad V (\varrho - \varrho_0) = \int_0^t F \cdot \varrho \cdot w \cdot dt \quad \text{(Kontinuitäts-Gleichung).}$$

Die veränderte Luftmenge im Luftzwischenraum V entspricht der Summe der durch die Flächen F strömenden Luftmengen.

Die Einströmgeschwindigkeit w ergibt aus den Gleichungen (2) und (3) und mit der Annahme $w_0 = 0$ und den zugehörigen Werten $p_0 =$ Ruhedruck und $\rho_0 =$ Ruhedichte:

$$w^2 = -2 \int_p^{p_0} dp / \rho(p), \text{ wobei } \rho = \rho_0 (p/p_0)^{1/\kappa} \text{ ist.}$$

$$(5) w^2 = -2 \kappa / (\kappa - 1) \cdot p_0 / \rho_0 \left(1 - (p/p_0)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)$$

Gleichung von de St. Venant + Wantzel.

Aus der Gleichung (4) ergibt sich durch Differenzieren:

$$\frac{d\varrho}{dt} = \frac{\zeta \cdot F}{V} \cdot \rho \cdot w.$$

Gesucht ist dp/dt und eine Gleichung für den zeitlichen Verlauf von $p(t)$.

Mit $\frac{d\varrho}{dt} = \frac{dp}{dt} \cdot \frac{d\rho}{dp}$ und aus der Gleichung (2)

$$\frac{dp}{d\rho} = \kappa \cdot \rho^{\kappa-1} \cdot p_0 / \rho_0 \cdot \kappa = \frac{\kappa p}{\rho} \text{ wird dann}$$

$$\frac{dp}{dt} = k \cdot \frac{p}{\rho} \cdot \frac{\zeta \cdot F}{V} \cdot \rho \cdot w.$$

Aus der Wurzel aus Gleichung (5) wird dann

$$(6) \frac{dp}{dt} = k \cdot p \cdot \frac{\zeta \cdot F}{V} \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0} \left(1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)}$$

Aus der Gleichung für die Schallgeschwindigkeit

$$(7) c_0^2 = \frac{k \cdot p_0}{\rho_0}, \text{ die eingesetzt wird in die Gleichung (6)}$$

wird dann

$$(8) \frac{d\bar{p}}{\bar{p}} \cdot \sqrt[1-\mu]{1-\bar{p}^{\frac{\mu-1}{\mu}}} = \frac{\bar{F} \cdot c_0}{V} \cdot \sqrt{\frac{2\mu}{\mu-1}} \cdot dt.$$

Die Integration bietet gewisse Schwierigkeiten, doch kann für die hier relativ geringen Druckdifferenzen, d.h. für Werte $\bar{p} \sim 1$ eingesetzt werden, d.h. die Größe $\varepsilon = 1 - \bar{p}$ wird relativ klein und $-d\bar{p} = d\varepsilon$.

Mit einer Reihenentwicklung unter der Wurzel nach Potenzen von ε und mit Vernachlässigung der Glieder mit ε^2 usw. (geht solange $\varepsilon < 0,02$ ist) bleibt dann unter der Wurzel nur der Ausdruck $\frac{\mu-1}{\mu}$.

Damit wird das Integral

$$(9) \int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon} \frac{-d\varepsilon}{(1-\varepsilon)^{\frac{\mu-1}{\mu}}} = \frac{\bar{F} \cdot c_0}{V} \cdot \sqrt{\frac{2\mu}{\mu-1}} \cdot (t-t_a).$$

Dabei ist $t_a = 0$, wenn es sich um den Ausgleich einer plötzlich aufgebrauchten Druckdifferenz $p_0 - p_a$ handelt.

Die Gleichung könnte nach t aufgelöst werden, wenn bestimmte Relationen $\varepsilon/\varepsilon_a$ vorgegeben werden. Aus $\Delta p/p_0 = \varepsilon$ ergeben sich dann die absoluten Drücke. Der Druckausgleich erfolgt nach einer e-Funktion (keine Parabel).

Ausreichend für die weitere Verwendung ist die Umformung

$$\frac{-d\varepsilon}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{\bar{F} \cdot c_0}{V} \cdot \sqrt{\frac{2\mu}{\mu-1}} \cdot dt.$$

Wenn die äußeren Drücke sich nach Art einer harmonischen Schwingung verändern, wie bei regelmäßigen

Kantenwirbelablösungen angenommen werden darf, so kann der vorstehende Ausdruck in eine entsprechende Differentialgleichung der veränderlichen äußeren Drücke übernommen werden. Wenn die Schwingzeiten die gleiche Größenordnung erreichen wie die Ausgleichszeiten, so ist der Ausgleichsgrad stark herabgesetzt, bzw. kann sogar zu Werten über 1 führen.

Es zeigt sich, daß bei einer üblichen Abmessung einer Fassade mit $V = 0,05 \text{ m}^3$, $F = 0,02 \text{ m}^2$ die Zeit für einen etwa 99%igen Druckausgleich zwischen Luftzwischenraum und Außenraum bei einem Außendruck von etwa $1,0 \text{ kN/m}^2$ sich ergibt zu

$$t = \sqrt{\frac{2}{\gamma}} \cdot \frac{V}{S \cdot F \cdot c_0} \cdot \sqrt{\Delta p / p_0} \text{ und mit den}$$

obigen Beispielswerten

$$\begin{aligned} t &= \sqrt{2/1,405} \cdot 0,05 \cdot \sqrt{0,01/0,8} \cdot 0,02 \cdot 340 \\ &= 1,19 \cdot 0,0092 \cdot 0,1 \approx 0,001 \text{ sec.} \end{aligned}$$

Bei niedrigen Druckwechselgeschwindigkeiten bzw. -frequenzen tritt der Druckausgleich also in Bruchteilen einer Sekunde ein. Wesentliche Verkleinerungen des Druckausgleiches treten erst bei sehr hohen Frequenzen ein und/oder bei Verformungsamplituden der Fassadenteile, die das Volumen und damit die Druckverhältnisse im Luftzwischenraum erheblich beeinflussen können.

2.3.3.2 Druckausgleich bei einer hinterlüfteten Fassade bei höheren Frequenzen.

Bei schneller wechselnden Druckschwankungen, insbesondere bei einer beispielsweise durch Kantenwirbelablösungen vorgegebenen Regelmäßigkeit des Abwanderns

der Wirbel, ergeben sich über die Länge der Bauwerksseite laufende Druckwellen. In Abschnitt 2.3.2 waren die zu erwartenden Größenordnungen der Schwankungen und ihrer Frequenzen bereits abgeschätzt worden. Bei Anströmgeschwindigkeit $v = 20 \text{ m/s}$ und einer Übergeschwindigkeit (entsprechend dem Unterdruck) an der Gebäudekante von etwa $v_{\ddot{u}} = 32 \text{ m/s}$ wäre beispielsweise bei $\beta = -5^\circ$ bis -15° die Frequenz etwa $f = 40 \text{ Hz}$ und damit die Wellenlänge $\lambda \sim 0,64 \text{ m}$. Wenn der Fugenabstand der Fassade wesentlich größer als die Halbwellenlänge ist, tritt auch für diese Druckschwankungen relativ schnell ein Druckausgleich zwischen Außenströmung und Luftzwischenraum ein.

Es können aber für andere Anströmgeschwindigkeiten und Anströmwinkel auch wesentlich andere Verhältnisse eintreten, z. B. bei $\beta = 0^\circ$ und $v_{\ddot{u}} = 32 \text{ m/s}$ die Frequenz $f = 8 \text{ Hz}$ und damit die Wellenlänge $\lambda = 32/8 = 4 \text{ m}$. Es können also alle Werte auftreten zwischen $0,5 \text{ m}$ und $4,0 \text{ m}$.

Bei einer Elementbreite $L = 1 \text{ m}$, d.h. einem Durchschnittswert für sehr viele Fassaden, wäre dann in einem Falle $L/\lambda = 0,25$ bis $0,333$, d.h. der Differenzdruck an diesem Element bleibt dann trotz sofortigen Druckausgleiches über die Luftschlitze teilweise unwirksam. Die Abb. 5 zeigt für verschiedene Verhältnisse L/λ wie groß zwischen den beiden Seitenkanten des Elementes das Restmoment aus einer Druckschwankungsamplitude Δp bleiben kann. Ermittelt wurden hierfür Größen $(1/\mu = M_{\max} / p \cdot L^2)$. Der Wert $\mu = 0,125$ würde gelten für die volle Druckdifferenz bei gleichmäßiger Verteilung über die

Teilfläche. Im Extremfall kann bei $L/\lambda = 1,00$ sogar der Wert $\mu = 0,1763$ erreicht werden. Bereits wenn $\Delta p/q = \pm 0,10$ ist, ergeben sich also trotz des Druckausgleiches über die Schlitze für den konstanten Unterdruckanteil regelmäßig wechselnde Belastungen von $\pm 0,1763 \cdot q$. Wenn mit $f = 8$ Hz eine Eigenfrequenz angesprochen würde, so wären die Grenzverformungen innerhalb von 1 bis 2 sec bereits erreicht. Die Wahrscheinlichkeit, daß Geschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz durch Druckschwankungen einerseits sowie die Fassadenteilung und Eigenfrequenz der Fassade derart zusammentreffen ist relativ gering. Es darf aber nicht übersehen werden, daß bei gleicher Frequenz verschiedene Kombinationen von β und v in der Anströmung wirksam werden können, die in die Bereiche $0,50 < L/\lambda < 1,50$ fallen. In diesem Bereich aber wirken sich die Druckschwankungen so aus, als ob praktisch kein Druckausgleich über die Luftschlitze mehr stattfindet.

Aus diesem Grunde muß bis zum Vorliegen weiterer Messungen empfohlen werden, auch bei hinterlüfteten Fassaden in Kantennähe mit den vollen Unterdruckwerten nach DIN 1055 Blatt 4 zu bemessen.

Die Amplituden der regelmäßigen Druckwellen aus Ablösungswirbeln nehmen mit der Entfernung von der luvseitigen Kante allmählich ab. Trotzdem sollte in den weiter zurückliegenden Bereichen keine Abminderung der Belastungen infolge von Druckausgleich angenommen werden. Auch die Wiederanlegevorgänge in den weiter zurückliegenden Teilen werden etwas gesteuert durch die regelmäßigen Kantenwirbelablösungen. Damit aber treten in den Wiederanlegebereichen ähnliche Frequenzen und

Wellenlängen auf wie unmittelbar hinter den Ablösekannten. Möglicherweise sind hierauf gewisse Fassadenschäden, die nicht nur in den Kantenbereichen, sondern auch in den mittleren Bereichen der windparallelen Wandflächen beobachtet wurden, zurückzuführen.

2.3.3.3 Verformungen und ihre Rückwirkungen auf die Umströmung, insbesondere im Ablösebereich.

Bei elastischen Fassadenelementen mit und ohne Hinterlüftung treten insbesondere bei Resonanzanregungen erhebliche Amplituden auf, die durchaus die Ablösevorgänge beeinflussen können. Dies gilt vor allem für die Steuerung des Wiederanlegevorganges. Durch diese Rückkoppelung werden einerseits die Wirbelstärken und damit die Schwankungsamplituden vergrößert, zum anderen aber diese Frequenzen den Ablösevorgängen in einem gewissen Bereich aufgezwungen. Die durch die Resonanz vorgegebene kritische Anströmgeschwindigkeit braucht damit nur in einen Spielraum von $\pm 30\%$ eingehalten zu sein. Damit aber können diese ungünstigen Wirkungen wesentlich häufiger und länger auftreten als ohne starke Resonanzverformungen. Amerikanische Untersuchungen zeigten, daß bereits relativ kleine Schwingungsamplituden einen erheblichen Steuer-effekt, insbesondere den "lock-in-effect" haben können. Befestigungen solcher stark deformierter Fassadenelemente sind daher auf Dauerfestigkeit zu untersuchen.

Dies gilt nicht nur für Fassadenelemente aus Blech, sondern vor allem auch für größere Glas-scheiben in Kantennähe, deren Verformungen in Feldmitte vor dem Bruch mehrere cm betragen können.

Ihr Steuereffekt und Einschließungseffekt ist besonders deutlich, wie die Messungen am Kasumigaseki-Hochhaus zeigten.

2.4 Beobachtungen und Messungen zum Problem der schnellen Druckschwankungen in Ablösebereichen.

2.4.1 Beobachtete Schäden an Bauwerken.

Aus der Literatur über Sturmschäden an Fassaden ergeben sich zwei Schadensgruppen.

Auf der Luvseite wurden in unregelmäßiger Verteilung die Fassadenteile, insbesondere Fenster, eingedrückt wobei die Schäden in den unteren Geschossen gelegentlich umfangreicher waren als oben. Es war in keinem Falle festzustellen, ob dies an einer mit der Höhe ansteigenden Windlastannahme gelegen hatte oder an der größeren Fluktuation am unteren Teil des Bauwerkes wegen der Grenzsicht im dicht bebauten Stadtkern.

An den etwa windparallelen Seitenflächen traten die größten Schäden hinter den luvseitigen Kanten ein. Eine Ersatzwindlast kann jedoch nicht aus der Bruchlast ermittelt werden. Es handelt sich eindeutig, wie der Unfall am Lonza-Hochhaus in Basel zeigt, um die Aufschaukelung von Verformungen mit Überschreitung der Grenzverformung. Selbstverständlich kann man zur Vereinfachung des Rechenganges sogenannte "Ersatzkräfte" aus diesen größten Verformungen ableiten. Über Windkanalversuche jeglicher Art lassen sich diese Ersatzlasten jedoch nicht ermitteln.

2.4.2 Messungen an Bauwerken und an Modellen.

Im bekannten Bericht der ASAHI-Glass-Corporation über Spektraldichtefunktionen an einzelnen Punkten des Kasumigaseki-Hochhauses ist leider keine Trennung in Ursache und Wirkungen vorgenommen worden. Gemessen wurden tatsächlich an der Glasscheibe hinter der luvseitigen Kante etwa 100-fach überhöhte Verformungswerte infolge von Resonanz. Dies stimmt relativ gut mit der bekannten logarithmischen Dämpfung von Glas mit $\xi = 0,03$ überein.

Messungen der Druckschwankungen (Lam) mit einer Auflösung von etwa 0,1 sec an quaderförmigen Hochhäusern zeigten die höchsten Spitzenwerte eindeutig hinter den luvseitigen Kanten der windparallelen Seiten. Für die verwendeten Druckgeber können Resonanzüberhöhungen ausgeschlossen werden. Die Werte sind allerdings extrem hoch und könnten einen Hinweis darstellen auf die Hypothese einer teilweisen "Potentialströmung".

Für das Juridicum Frankfurt wurden am kastenförmigen Modell bei $q = 100 \text{ kN/m}^2$ Frequenzhäufungen bei 25 Hz, 40 Hz und 60 Hz ausgemessen mit Schwankungsamplituden zwischen $\pm 1,0$ und $\pm 4,0$ mm WS.

Die in den vorangegangenen Abschnitten angegebenen Zahlenwerte stammten aus Messungen in Zusammenhang mit anderen Meßaufträgen. Sie geben nur eine erste Bestätigung der Hypothesen. Weitere Messungen in den Ablösebereichen hinter Gebäudekanten bei homogener und auch bei turbulenter Anströmung sind dringend erforderlich (siehe Absatz 3).

3. Arbeitshypothesen und Arbeitsplan für die Entwicklung einer Windlastnorm für Fassaden.

Um eine komplette Begründung der Windlastannahmen für Fassadenteile geben zu können, sind weitere Grundlagen noch zu schaffen.

3.1 Frequenzdichtespektren im Nachlaufgebiet hinter Ablösekanten.

Wie sich aus dem Mechanismus der Wirbelablösung und der aus ihr folgenden Druckschwingung ergibt, sind einmal Modellversuche an einer "Ecke" von etwa 2 m bis 3 m Höhe und 1,5 m und 5 m Seitenlängen durchzuführen. Variiert werden dabei Anströmwinkel β und Staudruck q . Im durch Druckmeßgeber von 1 Hz bis 500 Hz aufzunehmenden Frequenzdichtespektrum ergeben sich bestimmte Spitzen, die in Relation zu den hinter der Ecke immer wieder neu gebildeten Kantenwirbeln stehen. Zu messen sind dabei an einem nicht schwingenden Modell die Abhängigkeit der Spitzenfrequenz f_v von der Geschwindigkeit v und dem Anströmwinkel β sowie die Abhängigkeit der Druckamplituden Δp vom Anströmstaudruck q (und β). Die Messungen sind auch auszudehnen auf den Wiederanlegebereich, d.h. auf die ganze Seitenlänge.

Ein ähnlicher Versuch sollte durchgeführt werden in turbulenter Anströmung an einer Bauwerksecke. Zu bevorzugen sind hierbei Bauwerke in relativ ungestörter Anströmung (freies Feld) und in einem Gebiet mit sicheren relativ stetigen Anströmungen (z.B. "Morgenwind", "Abendwind", "Föhn" usw.). Es wird erwartet, daß sich die gleichen Abhängigkeiten für die f_v -Spitzen ergeben wie im Modellversuch.

Das Frequenzdichtespektrum der freien Anströmung sollte dabei synchron ausgemessen werden, um seinen Einfluß auf das körpernahe Spektrum erfassen bzw. kompensieren zu können.

3.2 Vergleichende Messungen an Bauteilen, d.h. bestimmten Fassadenelementen (Fabrikaten).

Bestimmte Fassadentypen sind an einer Gebäudeecke anzubringen und auszumessen. Die resultierenden Drücke im Luftzwischenraum und im Außenbereich sind zu messen dazu aber die Verformungen mit ihren Rückkoppelungseffekten auf die körpernahe Strömung. Für sie ist ein Frequenzdichtespektrum aufzunehmen. Auch diese Messungen wurden bereits vorbereitet, konnten aber aus Geldmangel nicht mehr ausgeführt werden.

3.3 Lastkollektiv in Ablösungsbereichen.

Das Lastkollektiv der freien Anströmung gilt nicht mehr in den Ablösebereichen. Dort sind Energiehäufungen bei bestimmten Frequenzen zu erwarten, die bei Resonanzanregungen zum Dauerbruch der Fassadenelemente führen können. Dabei ist das Lastkollektiv der Ablöseströmung scharf zu trennen vom Beanspruchungskollektiv infolge von Resonanzen. Dies war beispielsweise bei der ASAHI-Messung nicht berücksichtigt worden.

3.4 Festlegung von Abminderungen der zulässigen Spannungen.

Die ersten Eigenfrequenzen der Fassadenelemente liegen im allgemeinen zwischen 5 Hz und 80 Hz und finden in jedem Fall Anregungen aus den Druckwechsel-

frequenzen in der Ablösezone. Aus dessen Frequenzdichtespektren und den daraus abgeleiteten Kollektiven und unter Einrechnung der benachbarten Frequenzen für den "lock-in-effect" lassen sich in Verbindung mit den Statistiken der Windgeschwindigkeiten die Lastspielzahlen für die Fassadenelemente ermitteln. Aus den Lastspielzahlen und der gewählten Konstruktion sowie den verwendeten Werkstoffen ergibt sich, ob eine Bemessung für Dauerfestigkeit oder Zeitfestigkeit vorzusehen ist. Rechtzeitige Konstruktionsverbesserungen werden dadurch möglicherweise angeregt.

Diese Überlegungen gelten nicht nur für die Fassadenelemente, sondern gleichermaßen für die Befestigungselemente und für die Unterkonstruktionen vor der Hauptstruktur des Bauwerkes.

4. Zusammenfassung.

Der vorstehende Bericht kann keine fertige Lösung für die Windlastannahmen von Bauwerksfassaden geben, sondern nur einige Anmerkungen zu den besonderen Phänomenen der Aufgabe sowie Hinweise auf erforderliche Versuche zur Unterbauung der gebrachten Hypothesen.

Herausgearbeitet wurde, daß lediglich an der luvseitigen Stirnfläche etwa die auf den Bemessungsstaudruck bezogenen Druckbeiwerte beibehalten werden können und nur für kleine Konstruktionsgruppen mit weniger als 10 m^2 Fläche noch Zuschläge gemacht werden sollten.

Für die etwa windparallelen Seitenflächen sollte eine Aufteilung der Beiwerte entsprechend den verschiedenen Strömungsregimen überlegt werden, um eine Klärung und Extrapolation der Druckmeßergebnisse an den Großausführungen zu finden. Es werden drei Anteile vorgeschlagen, zu denen die Zusatzdrücke aus den Vorgängen innerhalb der Ablösungszone noch addiert werden müssen. Es wird festgestellt, daß es sich hier um periodische Druckwechsel mit etwa 5 bis 7 % der Spitzenstau drücke handelt, die relativ stabil sind. Bei dem jederzeit möglichen Zusammentreffen mit den Eigenfrequenzen der wenig gedämpften Fassadenkonstruktionen, können sich sehr große Verformungen ergeben, gelegentlich jenseits der Verformungsgrenze.

Bei der Bemessung sollte untersucht werden, wie oft und wie lange solche Resonanzen der körpernahen Strömung mit den Eigenfrequenzen der Konstruktion auftreten können. Bei den sehr hohen Frequenzen und damit auch hohen Lastwechselzahlen ist meistens Dauerfestigkeit und Zeitfestigkeit zu berücksichtigen.

Ersatzlasten entsprechend dem Aufbau der DIN 1055 Blatt 4 lassen sich nicht allgemein gültig aus den Größtverformungen ableiten. Hierzu wären zuerst umfangreiche Versuche an Modellen und Großausführungen von Gebäudeecken auszuführen. Bis zum Vorliegen solcher Ergebnisse sollte man auch bei hinterlüfteten Fassaden die Fassadenelemente und die dahinter liegenden Wände zur Aufnahme der vollen für geschlossene Bauwerksfassaden geltenden Drücke fordern.

In den Bereichen hinter den luvseitigen Bauwerkskanten (auf etwa 2 bis 3 m Länge) wird darüber hinaus eine Bemessung aller Teile und ihrer Befestigungen mit den für Dauerbelastungen geltenden Werten empfohlen. Entsprechend sind auch die Konstruktionen zu gestalten.

Zur Minderung der Überhöhungsfaktoren werden elastische Befestigungen mit erhöhter Dämpfung an allen Anschlüssen empfohlen, da erhöhte Dämpfungen bei den großflächigen Fassadenteilen kaum technisch durchführbar erscheinen.

Die noch fehlenden notwendigen Versuche wurden im 3. Abschnitt bereits skizziert. Ihre systematische Auswertung könnte später Bestandteil einer Windlastnorm für Fassaden werden.

Stuttgart, den 1. März 1984

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Rust', located to the right of the date.

5. Literaturverzeichnis

- Allen D.E.,
Dalglish W.A. Dynamic Wind Loads and Cladding
Design.
IVBH Symposium Lissabon 1973
S. 279-285
- ANSI American Standards Building Code
Requirements for Minimum Design Loads
in Buildings and other Structures.
A 58-1 (1972)
American National Standards Institution
- Bergh+Tijdeman Theoretical and experimental results
for the dynamic response of pressure
measuring systems.
Rep. NLR-TRF. 238, S. 1-19
- Betz Konforme Abbildung.
Springer-Verlag, Berlin 1964
- Birkeland Curtain walls, Handbook 11 B.
Norwegian Building Research Institute,
Oslo 1962
- Bradshaw Zum Verständnis und zur Bestimmung
turbulenter Strömungen.
Jahrbuch 1972 der DGLR, S. 51 ff
- B.S.I. Code of Basic Data for the Design of
Buildings.
CP 3: Chapter V: Part 2 (1972)
- Caspar Ein klimatologischer Beitrag über
Sturmschäden an Bauwerken und ihre
Verhütung.
Die Bautechnik, 1953, S. 36+37
- Chien u.a. Wind tunnel studies of pressure distri-
butions of elementary building forms.
IOWA Institute of Hydr.Research,
State University of IOWA, 1951
- Crowe, Bassiga Are our Codes for wind pressures safe
enough?
ASCE Journ. Struct.Div. ST8, Aug.1974
- Dalglish, W.A. Statistical Treatment of Peak Gusts
on Cladding.
Journ. of the Structural Division,
ASCE, Vol.97, No.ST9, Proc.Paper 8356,
Sept. 1971, pp 2173-2187

- Dagliesh, W.A., Cladding pressures on Commerce Court Tower, Toronto. Symposium Univ. Western Ontario, Juni 1974
- Davenport A.G., The estimation of load repetitions on structures with application to wind induced fatigue and overload. RILEM Mexico City, Sept. 1966
- Davenport A.G., The application of statistical concepts to the wind loading of structures. Proc. Instr. Civ. Engrs., 1961, S. 449-472
- Davenport A.G., The Spectrum of horizontal gustiness near the ground in high speed winds. Quart. Journ. Royal Met. Soc. 1961, S. 194
- Deacon Wind gust speed. Austr. Met. Mag. 1965, S. 11-14
- DIN 18516 Außenwandbekleidungen. Bekleidung, Unterkonstruktion und Befestigung. Beuth-Verlag, Berlin 30, 1982
- DISA-Elektronik Wissenschaftliche Forschungs-Instrumentierung. Gesamtkatalog, Skovlunde, DK
- Duchêne-Marullaz Studie der größten jährlichen Windgeschwindigkeiten und Festlegung der Windgeschwindigkeiten zur Berechnung der Windlasten. Cahiers du Centre Scient. et Techn. du Bâtiment 131 (1972), S.1-20
- Borges, Castanheta Wind in Western Europe. Laboratorio Nacional de Engenharia Civ., Lissabon, 1973
- Eaton, K.J. Proceedings of the 4. Intern. Conf. on wind effects on buildings and structures. 1975 Heathrow, BRE
- Eaton, K.J. Wind loads on Claddings. ASCE-Meeting in New Orleans, April 1975, Rep. 2436

- Eck, B. Technische Strömungslehre.
Springer-Verlag, Berlin 1966
- Einsfeld Erläuterungen zu den Richtlinien
für Fassadenbekleidungen mit und
ohne Unterkonstruktion.
Mitt. IfBt 1975/3
- Hansen Symposium on fully separated flows.
ASME Conf. Philadelphia, 1964
- Harris, R.O. An improved method for the prediction
of extreme values of wind effects
on simple buildings and structures.
Journ. Wind Engg. Ind. Aerodyn, 1982,
S. 343-379
- d'Havé L'action du vent sur les bâtiments.
Annales des Travaux publics de
Belgique, 1965/66
- Helmholtz Zwei hydrodynamische Abhandlungen.
Ostwalds Klassiker Nr.79, Leipzig
- Van der Hoven Power spectrum of horizontal wind
speed.
Journ. Met. 1957, S. 160-164
- Hunt Turbulent Velocities near and
fluctuating surface pressures on
structures in turbulent winds.
Symp. Heathrow 1975, Sept.
- IVBH Proc. of the 3rd Int. Conf. on wind
effects on buildings and structures.
Tokio 1971
- Johns, Scruton,
Ballantyne, NPL Proceedings of a Symposium of Wind
Effects on Buildings and Structures.
Loughborough 1968
- Jshizaki, Miyoshi,
Miura On the design of glass panes against
wind loading.
4. Int. Conf. on Wind effects on
buildings, Heathrow, 1975, Sept.
- Justus, Hargraves,
Mikhail, Graber Methods for estimating wind speed
frequency distributions.
J. Appl. Meteor. 1978, S. 350-353

- Kaimal Horizontal Velocity Spectra in an Unstable Surface Layer.
J.Atmos. Sci. 1978, S. 18-30
- Kaufmann Angewandte Hydromechanik, Bd.I u.II
Springer-Verlag, Berlin 1934
- Kolscher Unstetige Strömungen mit endlichem Totwasser.
Luftfahrtforschung 1940, S. 154
- van Koten The Fluctuating Wind Pressures on the Cladding and Inside a Building. Proceedings, Symposium of Full Scale Measurements of Wind Effects an Tall Buildings.
The Univ. of Western Ontario, London, Canada, 1974, June, S. 23-29
- Kraemer, K. Die Druckverteilung am Keil bei inkompressibler Strömung.
Ein Beitrag zum Totwasserproblem.
Mitt. aus dem MPI und der AVA
Göttingen, Nr. 30 (1964)
- Kraichnan Eddy viscosity in two and three dimensions.
J. Atmosph.Sci. 1976, S. 1521-1536
- Kramer + Gerhardt Windlasten an hinterlüfteten Fassaden.
Strömungslabor der FH Aachen, 1983
- Lam R.P./Lam L.C. Wind Loads for Cladding Design.
4. Int.Conf. on Wind Loads,
Heathrow, 1975, Sept.
- Liersch Außenwandbekleidungen mit Asbestzement.
Zentralblatt für Industriebau 1978,
S. 24 ff
- Mayne + Menzies Measurements of the response of glazing on a tall building to wind pressures.
Proc.NPL Research meeting 1974, July,
S. 57-62
- Mayne + Walker The response of glazing to wind pressure.
BRE Building Research Station CP 44/76

- Melbourne, H.W. Turbulence effects on maximum surface pressures. Wind Engg. Proc. 5th Conf. Fort Collins, Col. USA, 1979
- Monin-Obukhov Dimensionless characteristics of turbulence in the atmospheric layer near the ground. Dokl. AN SSSR 1953
- Newberry + Eaton Windloading handbook, 1974 BRE Report, London
- Ostrowski, Marshall, Cermak Vortex formation and pressure fluctuations on buildings. Symp. on Wind Effects on buildings and structures. Univ. of Toronto 1968
- Page Damage on buildings by severe storms Proc. NPL Symposium Wind effects on buildings, Apr. 1968
- Panofsky Windstruktur von Starkwinden unterhalb 150 m. Wind Engg. 1977, S. 91
- Panofsky Atmospheric boundary layer below 500 ft. Annual Rev. of Fluid, Mech. 1974, S. 147-177
- Peterka Fluctuating pressure tests for cladding design. ASCE Structural Engineering Conv., New Orleans 1975, Rep. 2457
- Ropelefsky, Tennekes, Panofsky Horizontale Kohärenzen von Windfluktuationen. Boundary Layer Meteorology 1973, S- 353-363
- Ruscheweyh Windlasten am Fernsehturm Hamburg. Journ. of Ind. Aerodyn. 1976, S. 315-333
- Saffir Glass and Curtain walls. Effects of high winds. Required design data. 4. Int. Conf. on Wind effects on buildings, Heathrow, 1975, Sept.

- Scruton + Newberry Über die Bestimmung von Windlasten für den Entwurf von Baukonstruktionen Proc.Inst.Civ.Engrs. 1963, S.97-136
- SIA Norm für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Überwachung von Bauten.
SIA 160 (1970)
Schweizer Ingenieur-und Architekten-Verein, Zürich
- Siedenburg Beitrag zur Beurteilung von Windlasten und ihrer Häufigkeit.
Der Stahlbau 1975
- Simiu, E. Wind Climate and Failure Risks.
ASCE 1976, ST 9
- Schultz-Grunow Turbulente Ablösung bei Druckanstieg.
Luftfahrtforschung 1939, S. 425
- Tanner, M. Zur Bestimmung des Totwasserwiderstandes mit Anwendung auf Totwasser hinter Keilen.
DFVLR-Bericht 64/39
- Taylor, Johnes Effects of turbulent air-flow on vibrations of light claddings.
Proc.NPL Symposium Wind Effects on Buildings, April 1968
- Thom, H.C.S. Asymptotic Extreme Value Distribution Applied to Wind and Waves.
Lectures at NATO Seminar, Farö 1967
- Thom, H.C.S. New Distributions of extreme winds in the United States.
Journ.Struct.Div. ASCE ST7, 1968, S. 1787-1802
- Thom, H.C.S. Frequency of maximum wind speeds.
ASCE Struct.Div. 1955, 539-1-11
- Timme Über die Geschwindigkeitsverteilung in Wirbeln.
Ing.Archiv, 1957, S. 205
- Tolefon Summary of derived gust velocities obtained from measurements within thunderstorm.
NACA Rep. 1285

- Townsend The structure of turbulent shear
flow.
Cambr.Univ.Press, 1976
- Ullrich, R.B. Das Temperatur-und Windprofil an der
meteorologischen Station beim
Forschungsreaktor München.
Univ.München, Meteor.Inst.,
Wiss.Mitt. Nr. 13, 1967
- Univ.of Western Symposium on full-scale measurements
Ontario of wind effects on buildings.
Journ.Ind.Aerodyn., 1974
- Yaglom Data on turbulence characteristics
in the atmospheric surface layer.
Izv. Atm.and Oceanic Phys. 1974,
S. 566-586
- Yang, H.T., Modell einer Potentialströmung für
Bar-Lev einen plötzlich verschobenen Zylinder.
Journ.of Appl.Mech. 1976, S.213 ff

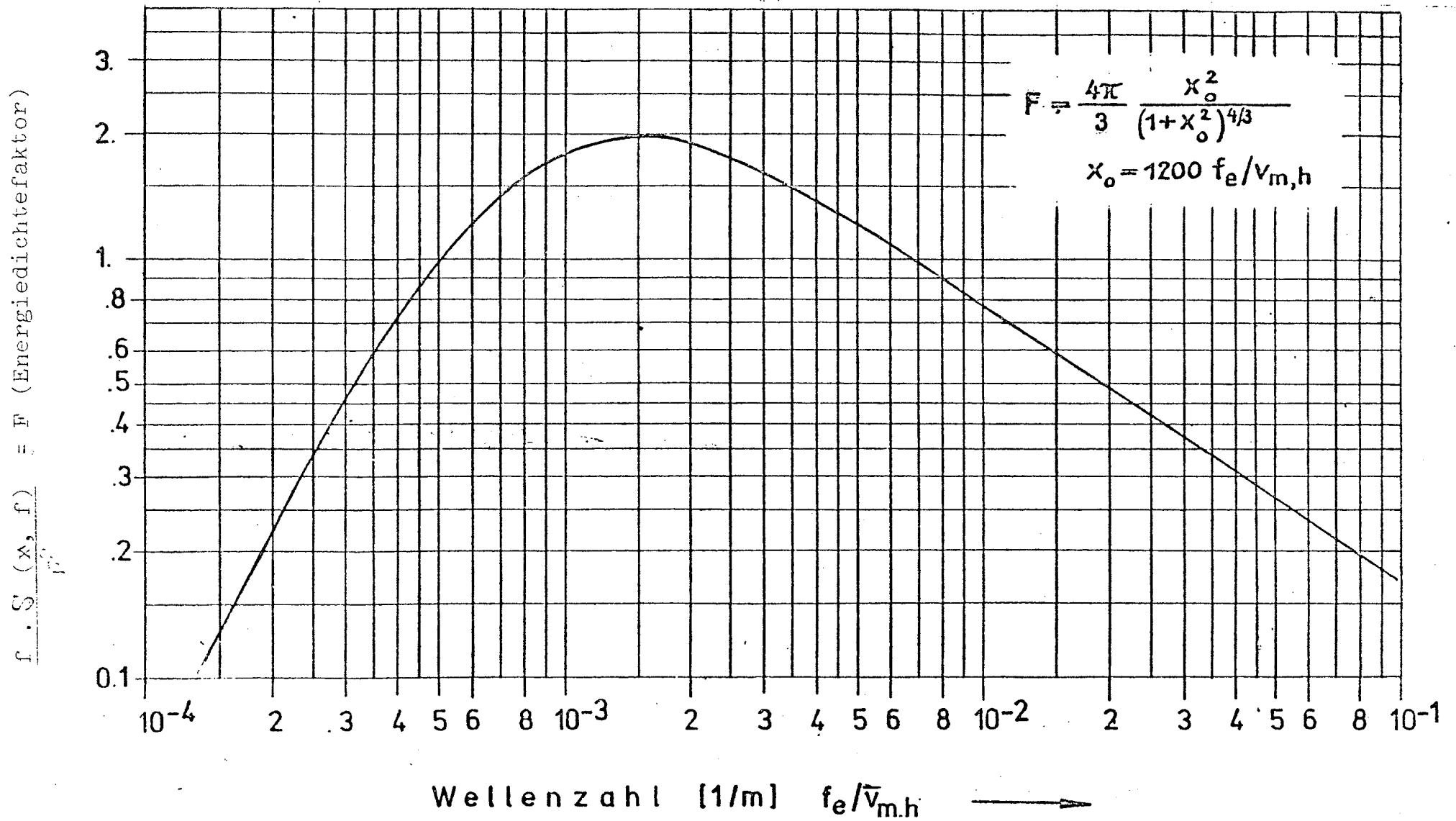


Abb. 1: Energiedichte-Spektrum

3,00
2,00
1,50
1,00
0,90
0,80
0,70
0,60
0,50
0,40
0,30
0,20
0,10

$\frac{q_b}{q_b^{max}}$
 $\frac{\sigma_N}{\sigma_A}$

Ersatzwerte nach
Palmgren-Miner

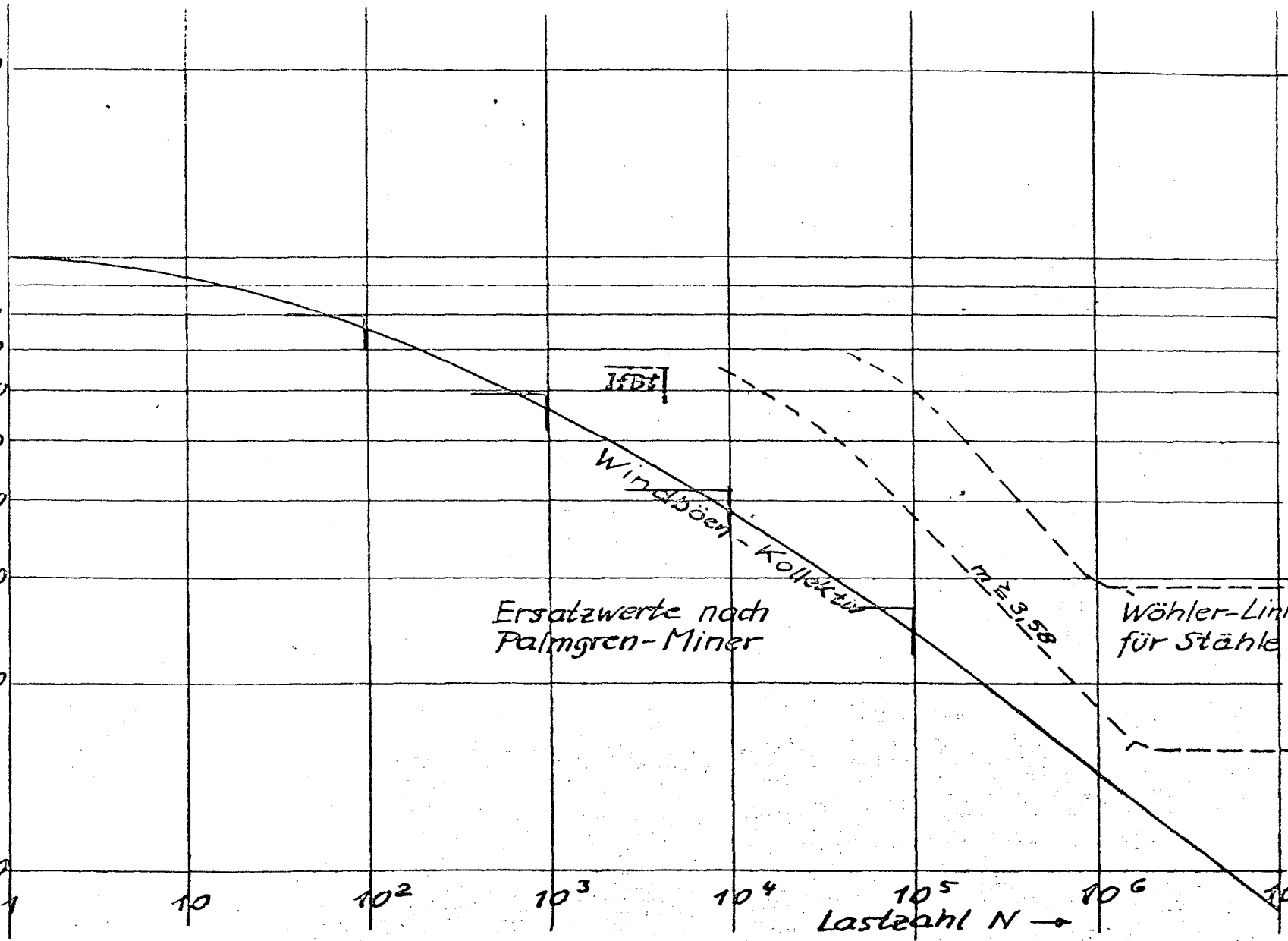
Windböen-Kollektiv

$m = 3,58$

Wöhler-Linien
für Stähle

10¹ 10² 10³ 10⁴ 10⁵ 10⁶ 10⁷
Lastzahl N

Abb. 2
Windlastkollektiv der
freien Anströmung



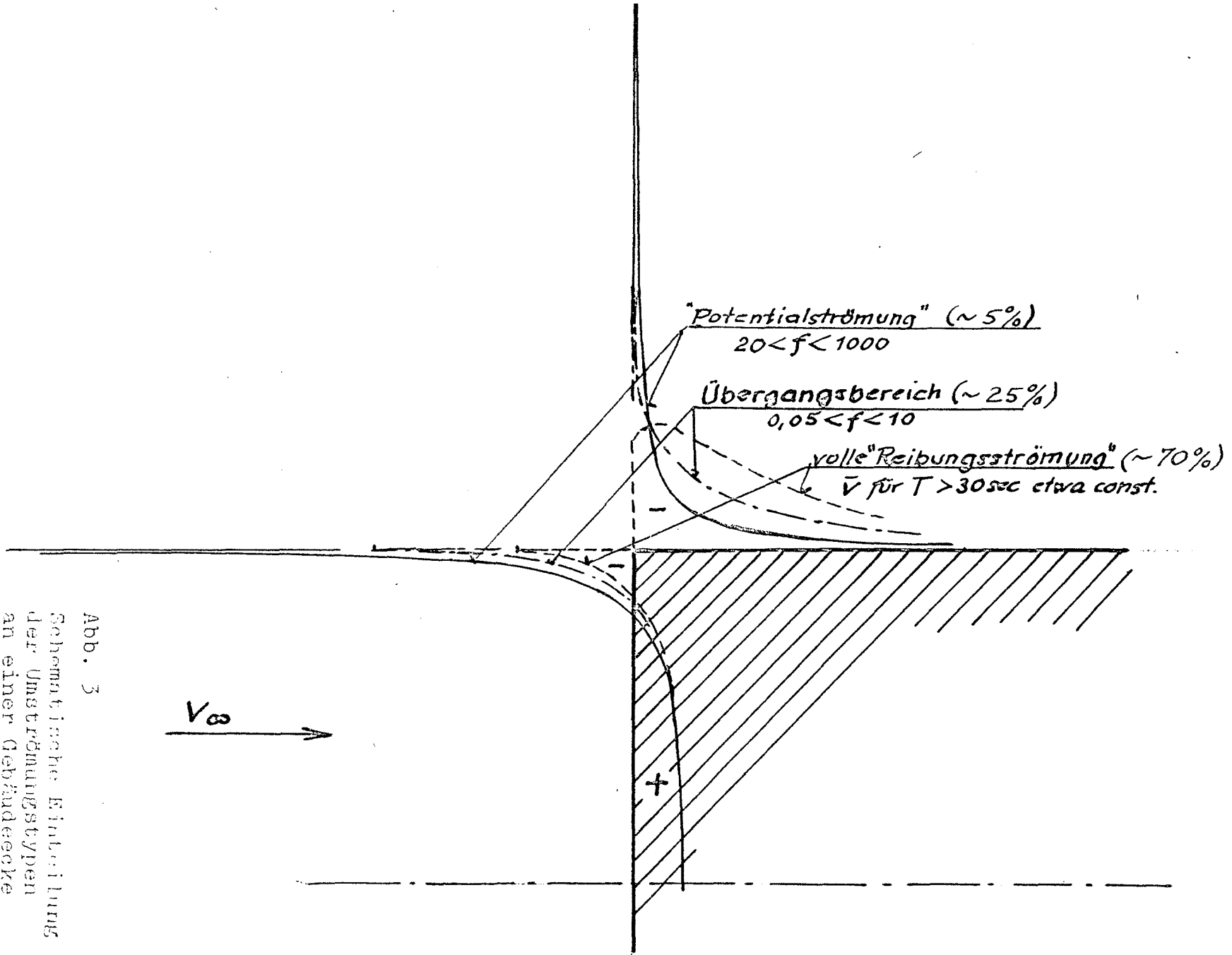
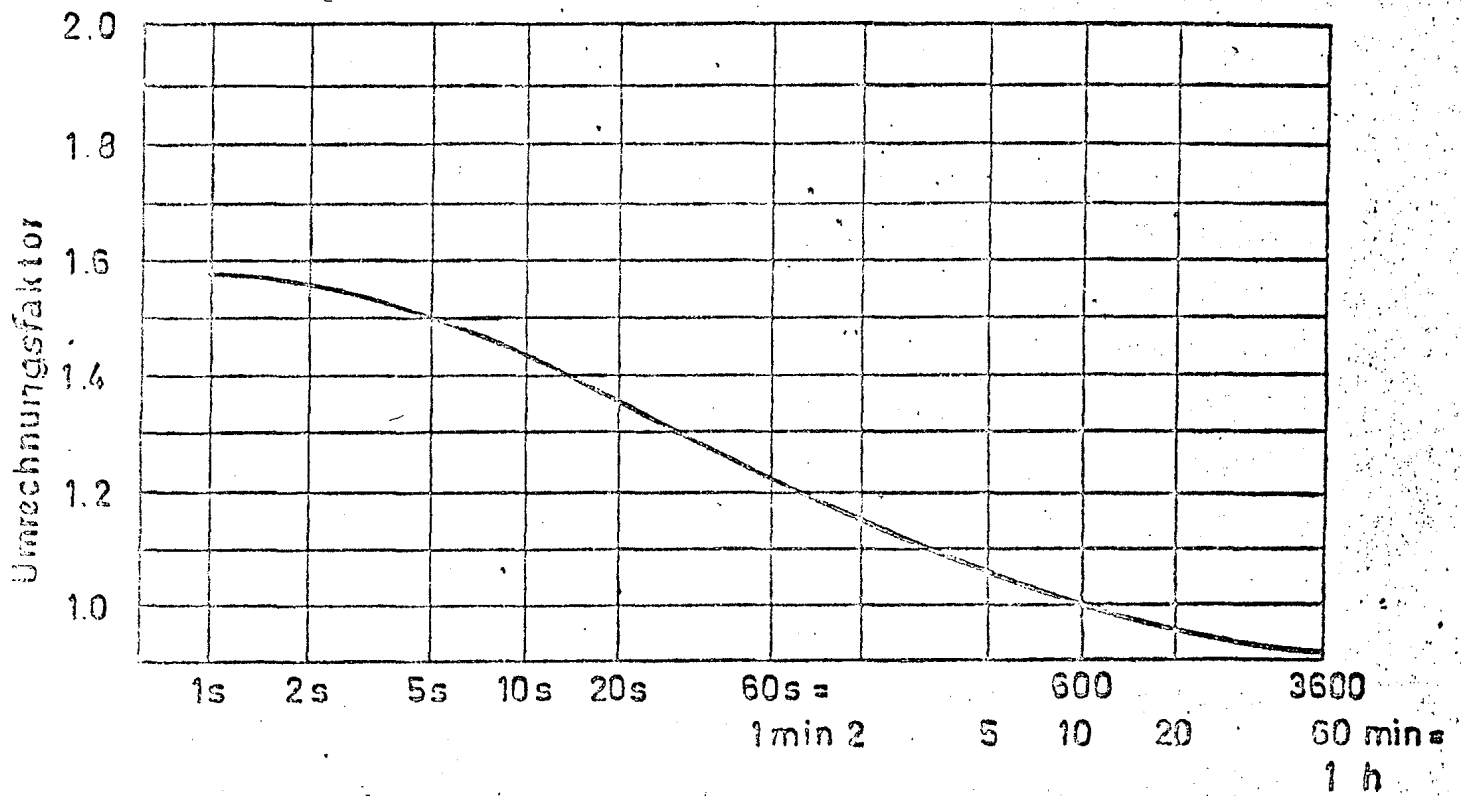
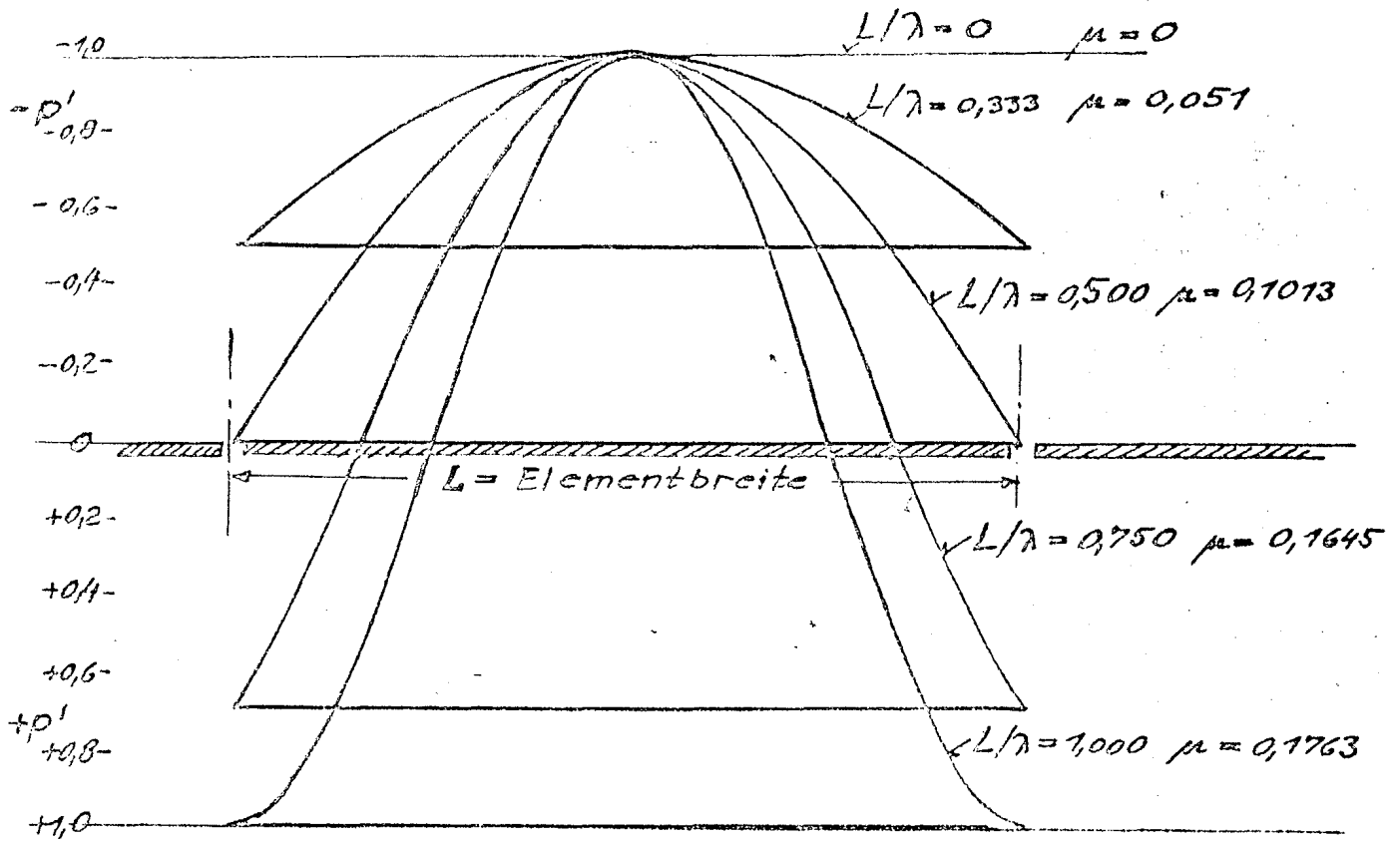


Abb. 3
 Schematische Einteilung
 der Umströmungstypen
 an einer Gebäudeecke



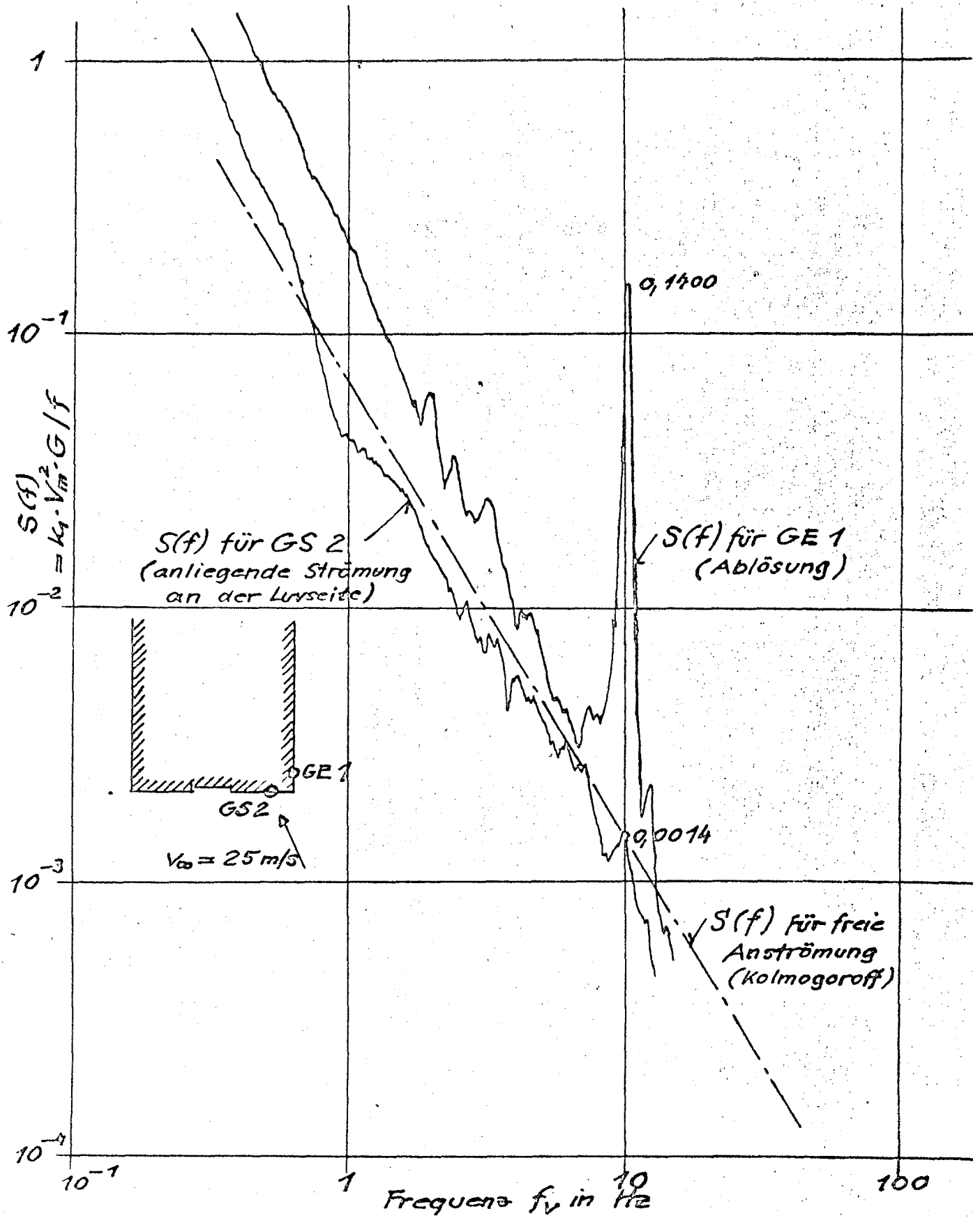
Abhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit vom Mittelungsintervall T^* , bezogen auf 10 Minuten (offenes Gelände)



$$\mu(L/\lambda) = \frac{M_{MAX}}{p' \cdot L^2}$$

$$\lambda = v/f_v$$

Abhängigkeit der Elementbelastung von $v \cdot f_v$ und L .



Spektraldichte im 36. Geschoss des Kasumigaseki-Hochhauses (T6810)