

Sonderdruck aus:

BERICHTE AUS DER BAUFORSCHUNG

Heft 86, 1973

Einwirkung von Regen und Wind  
auf Gebäudefassaden

Stand der gegenwärtigen Kenntnisse  
aufgrund der Literatur

zusammengestellt im Auftrag des  
Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau

von

Dr.-Ing. habil. W. FRANK

Institut für Bauphysik Stuttgart der Fraunhofer-Gesellschaft

Verlag Wilhelm Ernst & Sohn

## Inhalt

	Seite
1. Einleitung	17
2. Zur Charakteristik des Schlagregens	17
3. Die verschiedenen Arten der Schlagregeneinwirkung (Rain Penetration) auf Fassaden und ihre Ursachen	18
3.1 Kapillarkraft	18
3.2 Schwerkraftwirkung	18
3.3 Luftströmung mit Wassermitsführung	18
3.4 Kinetische Energie der Regentropfen	18
3.5 Windkräfte	19
4. Zur Frage der Windeinwirkung auf Fassaden	20
4.1 Allgemeines	20
4.2 Windspektrum	20
4.3 Böigkeit des Windes	21
4.4 Windgeschwindigkeitsprofile	22
4.5 Maximale Windgeschwindigkeiten	23
4.6 Neuere Messungen der Beanspruchung von Fassaden im natürlichen Wind	25
5. Schlagregenmessungen an Fassaden	28
6. Prüfmethoden zur Feststellung der Schlagregendichtheit	31
7. Zur Problematik von Schlagregengebieten	32
8. Praxis des Schlagregenschutzes	33
8.1 Regenschutz von Wänden	33
8.2 Schlagregenschutz bei Fugenausbildungen	35
8.3 Schlagregenschutz bei Fenstern	36
9. Zusammenfassung und Folgerungen	36
Literatur	37

## 1. Einleitung

Fragen der Beanspruchung von Gebäudefassaden durch Regen und Wind haben in den letzten Jahren zunehmend Bedeutung gewonnen. Im besonderen Maße gilt dies für vielgeschossige Bauten, für Fertigbauten mit Fugen in den Fassaden, für vorgehängte, hinterlüftete Fassadenbekleidungen und für moderne, verglaste Fassadenkonstruktionen. Entsprechend der Bedeutung der Schlagregenprobleme für das moderne Bauwesen ist das internationale Schrifttum über das gesamte Gebiet des Schlagregens und seiner Einwirkung auf Gebäude stark angewachsen. Eine kritische Sichtung der Gesamtliteratur und eine Zusammenfassung der wesentlichsten Untersuchungs- und Forschungsergebnisse schien daher geboten, um dem Interessierten einen Überblick über den derzeitigen Stand der Kenntnisse auf dem Gebiet der Schlagregenbeanspruchung von Gebäuden zu vermitteln.

Wegen der besonderen Bedeutung, die dem Einfluß des Windes im Zusammenhang mit Schlagregenfragen zukommt, sind die neueren Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Gebäudeaerodynamik unter Berücksichtigung der Wirkungen des natürlichen Windes ausführlicher gewürdigt worden.

In einem Schlußabschnitt der vorliegenden Arbeit wird auf die in verschiedenen Teilgebieten des behandelten Gesamtkomplexes noch bestehenden offenen Fragen eingegangen, aus denen sich Hinweise ergeben, welche weiteren Forschungen als notwendig und sinnvoll zu bezeichnen sind.

## 2. Zur Charakteristik des Schlagregens

Die mit der Bearbeitung von Schlagregenproblemen befaßte CIB-Arbeitsgruppe<sup>1)</sup> definiert den Schlagregen als die unter Windeinwirkung auf die Oberfläche von vertikalen Wänden auftreffende Niederschlagsmenge [1]. Schlagregen stellt somit einen, aus der vertikalen Richtung merkbar abgelenkten Regen dar, der infolge seines Einfallsinkels an Vertikalfächern (Fassaden und Fenster) „schlägt“, die er bei senkrechtem Fall nicht berühren würde [2]. Dringt dabei Regenfeuchtigkeit durch die Wandoberfläche selbst oder durch Öffnungen (z. B. an Fenstern, durch Risse, Fugen usw.) in die Wand ein, so spricht man von „Schlagregeneinwirkung“, für die sich im internationalen Schrifttum die Bezeichnung „Rain Penetration“ eingebürgert hat [3]. Diese liegt auch dann vor, wenn die eingedrungene Feuchtigkeit an der Innenseite der Wand nicht zum Vorschein kommt [1].

Auf einen fallenden Regentropfen (Bild 1) wirken die Schwerkraft G, die den Luftwiderstand  $L_w$  zu überwinden hat, und eine horizontal gedachte Windkraft W. Die Fallgeschwindigkeit  $v_F$  hängt von der sehr unterschiedlichen Größe und Masse der Regentropfen ab. Unter dem Einfluß der genannten Kräfte erreicht der

Tropfen seine resultierende Geschwindigkeit  $v_R$  und seinen Einfallsinkel  $\epsilon$  gegen die Wand. Jeden von der vertikalen Fallrichtung durch den Wind abgelenkten Regen kann man sich zusammengesetzt denken aus einer vertikalen Komponente  $R_N$  (normal zur Horizontalfläche) und aus einer horizontalen Komponente  $R_S$ , für welche sich die Bezeichnung „Schlagregen“ eingebürgert hat [3]. Die Schlagregenmenge  $R_S$  ergibt sich dann mit den in Bild 1 gewählten Bezeichnungen zu:

$$R_S = R_N \frac{v_W}{v_F} \text{ (mm/h)} \quad (1)$$

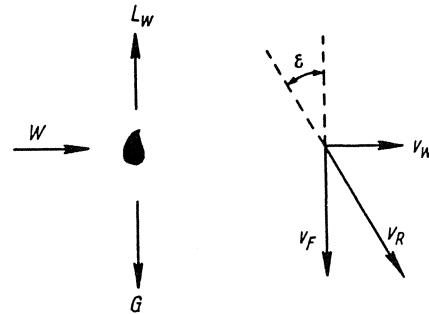


Bild 1: Kräfte und Geschwindigkeitsvektoren an einem fallenden Regentropfen.

G :	Schwerkraft
$L_w$ :	Luftwiderstand
W :	Windkraft
$v_F$ :	Fallgeschwindigkeit
$v_w$ :	Windgeschwindigkeit
$v_R$ :	resultierende Geschwindigkeit
$\epsilon$ =	Einfallsinkel

Nach Lacy [4] läßt sich zwischen Fallgeschwindigkeit  $v_F$  der Tropfen und Normalregenmenge  $R_N$  die Beziehung<sup>2)</sup> angeben:

$$v_F = 4,505 R_N^{0,123} \text{ (m/s)} \quad (2)$$

Aus (1) und (2) ergibt sich dann der folgende Zusammenhang zwischen Schlagregenmenge  $R_S$ , Windgeschwindigkeit  $v_W$ <sup>2)</sup> und Normalregenmenge  $R_N$ <sup>2)</sup>:

$$R_S = 0,222 v_W \cdot R_N^{0,88} \text{ (mm/h)} \quad (3)$$

Lacy schränkt jedoch die Gültigkeit von Gleichung (3) auf den Idealfall einer ungestörten Windströmung und auf das Gegebensein von Regentropfen mittlerer Größe ein.

Untersuchungen von Grunow [5] [6] haben gezeigt, daß Niederschläge im allgemeinen ein breites Tropfenspektrum aufweisen. Auch kann bei Niederschlägen in der Regel nicht mit einer idealisierten, ungestörten Windströmung gerechnet werden (vgl. Abschnitt 4). Unter

2) In den Beziehungen (2), (3) und (4) ist die Normalregenmenge  $R_N$  in mm/h und die Windgeschwindigkeit  $v_W$  in m/s einzusetzen.

1) CIB = Conseil International du Batiment pour la Recherche, l'Etude et la Documentation.

Berücksichtigung dieser Umstände erscheint die folgende von Lacy [4] empfohlene Vereinfachung der Beziehung<sup>2)</sup> (3) vertretbar:

$$R_S = a \cdot v_W \cdot R_N \text{ (mm/h)} \quad (4)$$

Danach ist die auf eine Vertikalfäche treffende Schlagregenmenge  $R_S$  proportional dem Produkt aus der über die Dauer des Niederschlags gemittelten Windgeschwindigkeit  $v_W$  und der Normalregenmenge  $R_N$ . Für den Proportionalitätsfaktor  $a$  gibt Lacy einen auf Grund zahlreicher Niederschlagsmessungen unterschiedlicher Dauer und Stärke abgeleiteten Wert  $a = 0,2 \text{ (}^{\circ}/\text{m)}$  an, dessen Gültigkeit auch bei Messungen in der Außenstelle Holzkirchen des Instituts für Bauphysik [3] grundsätzlich bestätigt werden konnte.

Aus Gleichung (4) geht hervor, daß die eine Vertikalfäche treffende Schlagregenmenge proportional der Normalregenmenge ist und daß schon bei verhältnismäßig geringen Windgeschwindigkeiten (etwa bei  $v_W = 5 \text{ m/s}$ , „schwache Brise“) die Werte des Schlagregens die des Normalregens übertreffen<sup>3)</sup>.

Wegen der komplizierten Zusammenhänge, die am Auftreten von Schlagregen an Fassaden beteiligt sind, erscheint es unmöglich, die an Gebäuden anfallenden Schlagregenmengen nach Gleichung (4) rechnerisch zu erfassen. Einblick in Größe und Verteilung der Schlagregenintensitäten an Fassaden ist nur auf dem Wege der Messung zu erhalten (Abschnitt 5).

### 3. Die verschiedenen Arten der Schlagregeneinwirkung (Rain Penetration) auf Fassaden und ihre Ursachen

Bildet sich infolge intensiven Schlagregens an der Oberfläche einer Fassade ein geschlossener Wasserfilm, so ist ein Eindringen von Feuchtigkeit durch unterschiedliche Ursachen möglich, deren Auftreten in Beziehung zur Größe der Eintrittsöffnungen aus Tabelle 1 ersichtlich wird. Untersuchungen hierüber wurden vor allem von Birkeland [8], [9], Ritchie und Davison [10], Sasaki [11] und Isaksen [12] durchgeführt. Im folgenden werden die einzelnen Ursachen näher erläutert:

#### 3.1 Kapillarkraft

Die unter Ziffer 1 der Tabelle 1 genannten Kapillarkräfte werden durch die Oberflächenspannung des in die Kapillaren des benetzten Materials eintretenden Wassers ausgelöst. Dabei hängt die Größe des Kapillarzuges im wesentlichen vom Durchmesser der Kapillaren ab (Bild 2). Bei sehr kleinen Poren unter 0,01 mm verhin-

3) Eine Bindung des Begriffes Schlagregen an eine bestimmte Windgeschwindigkeit wurde in der Literatur häufiger vorgeschlagen [7], wonach beispielsweise feintropfiger Regen ab Windstärke 3 (= 4 m/s), Regen mit größeren Tropfen ab Windstärke 5 (= 8 m/s) als Schlagregen zu bezeichnen sei. Nähere Einblicke in die Struktur des Windes (Abschnitt 4) und des Tropfenspektrums [5], [6] lassen solche Versuche jedoch nicht als sinnvoll erscheinen.

dern Reibungskräfte rasches Eindringen von Flüssigkeit, wogegen bei Öffnungsgrößen von über 0,5 mm der Kapillarzug zur Aufrechterhaltung eines Flüssigkeitstransports nicht mehr ausreicht.

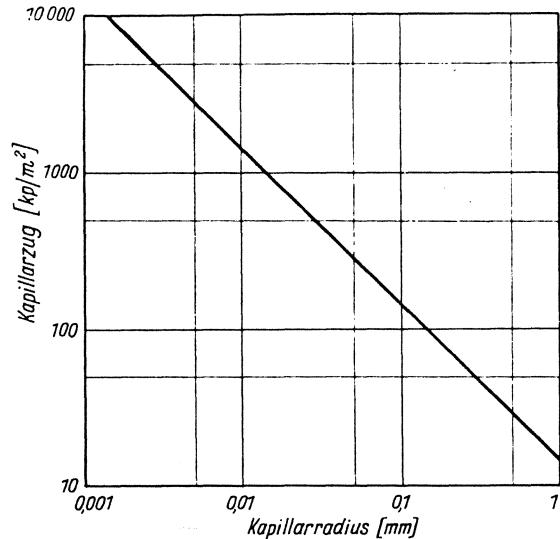


Bild 2: Kapillarzug ( $p_s$ ) für Wasser bei 20 °C in einer kreiszylindrischen Kapillare in Abhängigkeit vom Kapillarradius ( $r$ ).

#### 3.2 Schwerkraftwirkung

Die unter Ziffer 2 von Tabelle 1 angeführte Schwerkraftwirkung macht sich erst bei Öffnungen von mehr als 0,5 mm beim Wassertransport bemerkbar. Nach Birkeland [8], [9] wird die Schwerkraftwirkung insbesondere dann entscheidend, wenn das an Fassaden herabrinrende Wasser an horizontalen Fugen einen Stau erfährt, der den Wassereintritt in die Fugen begünstigt.

#### 3.3 Luftströmung mit Wassermitsführung

Auch die von der Luftströmung durch Fugen bewirkte Wassermitsführung (Ziffer 3 von Tabelle 1) kann bei größeren Öffnungen eine Rolle spielen, vorausgesetzt, daß eine durch die Windanströmung bewirkte Druckdifferenz zu beiden Seiten der Öffnung vorhanden ist. Nach Untersuchungen von Birkeland [8], [9], Garden [14], Isaksen [15], Harrison und Bonshor [16] und anderen Autoren ist eine solche Führung von Regentropfen im Luftstrom bei Öffnungen und Abmessungen zwischen 1 bis 4 mm zu erwarten.

#### 3.4 Kinetische Energie der Regentropfen

Eine weitere Ursache für die Wasseraufnahme bzw. für das Eindringen von Schlagregen ins Wandinnere liefert die kinetische Energie der Regentropfen (Ziffer 4 von Tabelle 1). Diese hat zur Folge, daß ganze Tropfen in Fugenöffnungen größerer Weite hineingedrückt werden können oder daß nach Aufprall und Zerstäuben größerer Tropfen ein Weitertransport der kleineren Tropfenpartikel ins Fugeninnere erfolgt [8] [9].

**Tabelle 1**

Ursachen für das Eindringen von Regenfeuchtigkeit in einen Baustoff oder eine Wandkonstruktion in Beziehung zur Größe der Öffnungen (Kapillaren, Risse, Fugen), bei denen Eindringen zu erwarten ist.

	Ursache	Größe der Öffnung	Bemerkung
1	Kapillarkraft (Kapillarzug)	0,01 bis 0,5 mm	Bei Kapillaren unter 0,01 mm ist trotz zunehmenden Kapillarzuges (vergl. Bild 2) die beförderte Wassermenge gering. Bei Kapillaren über 0,5 mm wird der Kapillarzug für den Feuchttetransport bedeutungslos.
2	Schwerkraft	über 0,5 mm	Bei Öffnungen unter 0,5 mm keine Wasseraufnahme wegen Wirksamwerden der Oberflächenspannung des Wassers. Bei größeren Öffnungen und geschlossenem Wasserfilm kann Schwerkraft dominieren.
3	Luftströmung (mit Wassermitführung)	1 mm bis 4 mm	Wassermitführung zu Öffnungen dieser Größe möglich bei Vorhandensein einer Druckdifferenz zu beiden Seiten der Öffnung.
4	Kinetische Energie der Regentropfen	über 4 mm	Eindringen schnell bewegter Tropfen in Fugen und Risse der angeführten Größe.
5	Windkräfte	0,01 mm bis 4 mm	Bei Öffnung von 0,1mm bis 0,2 mm Windkraft und Kapillarkraft etwa von gleicher Wirksamkeit. Bei Öffnungen über 4 mm kann Abreißen des Wasserfilmes auftreten, dann Winddruck wegen Druckausgleichs bedeutungslos.

### 3.5 Windkräfte

Als wichtigste Ursache für das Eindringen von Regenfeuchtigkeit in Fassaden sind schließlich Windkräfte anzusehen (Ziffer 5 Tabelle 1). Die Druckkräfte der Windströmung auf den Wasserfilm können das Wasser in die Fugen hinein und durch diese hindurch pressen. Ist die Öffnung relativ klein, so kann unter Bestehenbleiben des Filmes die Winddruckwirkung ein ständiges Eindringen des Regens verursachen. Beim Vorhandensein größerer Öffnungen kann der Wasserfilm reißen, was eine Minderung oder den gänzlichen Abbau der Druckdifferenz zwischen den Außenwänden und dem Inneren der Öffnung (z.,B. einer Fuge) zur Folge haben kann. Für die Zeit innerhalb welcher der Wasserfilm unterbrochen bleibt, fällt dann die treibende Windkraft für den Wassertransport weg. Nach neuerlichem Aufbau des Filmes und wiedererstandener Druckdifferenz setzt der Wassertransport von neuem ein, so daß sich in den Fugen einer Fassade örtlich und zeitlich pulsierende Regeneindringungsvorgänge abspielen können, deren Einzelheiten z. Z. noch Gegenstand der Untersuchungen in verschie-

denen Bauforschungsinstituten sind [17], [18], [19], [20], [21], [22].

Aus Tabelle 1 läßt sich ein Überblick gewinnen, welche Arten der Wasseraufnahme bzw. des Regeneindringens bei den jeweiligen Bauarten und Fassaden-Konstruktionen dominieren [3]. Bei fachgerecht erstelltem und intakt gebliebenem Mauerwerk können die unter Ziffer 3 und 4 genannten Ursachen (Luftströmung und kinetische Energie der Tropfen) praktisch außer Betracht bleiben, wogegen sie für Wandkonstruktionen mit offenen Fugen oder mit vorgesetzten, hinterlüfteten Plattenbekleidungen besondere Bedeutung gewinnen können. Bei Mauerwerk aus feinporigen Materialien werden vor allem Kapillarkräfte die Wasseraufnahme maßgebend beeinflussen. Zu diesen Kräften gesellt sich die Schwerkraft, die besonders bei größeren Öffnungen und geschlossenem Wasserfilm bedeutsam wird. Und schließlich sind es die Windkräfte, deren Einfluß auf das Eindringen von Regenfeuchtigkeit in Wände unabhängig von deren Bauart und Konstruktion von zentraler Bedeutung ist. Entsprechend der Sonderstellung, die der

Windwirkung bei der Erfassung von Schlagregenproblemen zukommt, wird im folgenden Abschnitt auf die vom Winde herrührenden Bauwerksbeanspruchungen ausführlicher eingegangen.

#### 4. Zur Frage der Windeinwirkung auf Fassaden

##### 4.1 Allgemeines

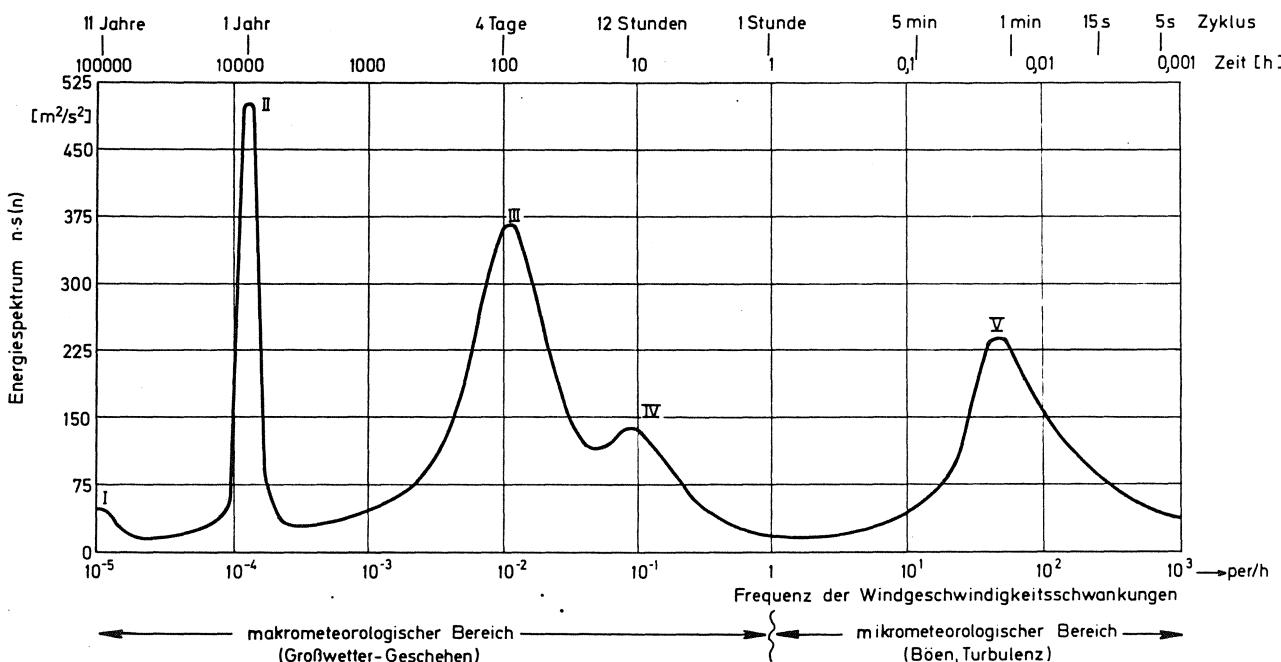
Zu den vom Winde herrührenden Bauwerksbeanspruchungen ist in erster Linie die Windlast zu zählen, deren Kenntnis für den Bauingenieur bei der Standsicherheitsberechnung eines Bauwerkes von vorrangiger Bedeutung ist. Die in den internationalen Normblättern niedergelegten Windlastvorschriften greifen auf bestimmten Gebieten auch auf den Kreis der Schlagregenprobleme über. Die Winddruckforschung, deren Ergebnisse in den Windlastnormen der Länder ihren Niederschlag gefunden haben, war bis etwa zur Mitte der 60iger Jahre [23] nur unzureichend mit der Struktur des natürlichen Windes vertraut. Erst die im letzten Jahrzehnt von der meteorologischen Wissenschaft und von der Ingenieurforschung erarbeiteten Ergebnisse brachten wichtige neue Einsichten in die Eigenschaften des natürlichen Windes. Doch spiegelt sich der noch heute hier bestehende Nachholbedarf beispielsweise darin, daß in den meisten Windlastvorschriften die Bauwerksbelastung durch Wind als ein im *stationär* gedachten Windstrom sich abspielender,

gleichsam *statischer* Vorgang aufgefaßt wird. Im Unterschied zu dieser idealisierenden Annahme handelt es sich beim natürlichen Wind jedoch um einen *instationären* Strömungsvorgang, der im wesentlichen als Funktion der Zeit und der Höhe über dem Gelände aufzufassen ist. Der Versuch, dem instationären Charakter des Windes wenigstens annähernd durch Anbringung dynamischer Lastzuschläge zum stationären Mittelwert des Windes gerecht zu werden, erscheint heute nach Vorliegen eines befriedigenden Konzeptes zur Erfassung der „Dynamik“ des Windes nicht mehr akzeptabel.

Einige wesentliche Bestandteile dieser wirklichkeitsnahen Auffassung – so vor allem Spektrum und Böigkeit des Windes, Höhenprofil und Momentangeschwindigkeit – sollen, da ihre Bedeutung auch im Zusammenhang mit Schlagregenproblemen evident ist, im folgenden behandelt werden.

##### 4.2 Windspektrum

Das Spektrum des Windes, d. h. seine in einem weiten Frequenzgebiet sich abspielenden Geschwindigkeits- und Intensitätsschwankungen, wurden unter Heranziehung statistischer Methoden von Davenport entwickelt [24], [25], [26], [27], der sich auf zahlreiche Messungen von van der Hoven [28] stützen konnte (Bild 3). Das Davenport'sche Windspektrum zeigt gewisse Analogien



##### Gipfel und Zwischengipfel im Spektrum

- 11-Jahres-Zyklus (Sonnenflecken-Tätigkeit) (Gipfel I)
- 1-Jahres-Zyklus (Jahresschwankung der Windgeschwindigkeit) (Gipfel II)
- 4-Tage-Zyklus (Änderung der Großwetterlage) (Gipfel III)
- 12-Stunden-Zyklus (Sonnenauf- u. -untergang) (Gipfel IV)
- 2-Minuten-Zyklus (Bodenrauhigkeits-Turbulenz) (Gipfel V)
- 1-Sekunden-Zyklus („Dissipationsbereich“)

Bild 3: Windspektrum über einen ausgedehnten Frequenzbereich (in 100 m Höhe über Gelände) (nach Van der Hoven [28] und Davenport [24]).

zum Intensitätsspektrum der Sonnenstrahlung. Die als Ordinate des Diagrammes eingetragene spektrale Dichte  $n \cdot S(n)$ , die angibt, wie hoch bei den zufällig oszillierenden Werten der Geschwindigkeit der Anteil einer bestimmten Frequenz ist, läßt sich ermitteln, wenn man das in elektrische Impulse umgewandelte Windgeschwindigkeitssignal einer Frequenzanalyse unterzieht. Trägt man, wie dies in Bild 3 geschehen ist, die Windfrequenzen in logarithmischem Maßstab auf, so ist ein zwischen zwei beliebigen Frequenzen liegendes, von dem Kurvenzug begrenztes Flächenstück proportional der Energie (in der Dimension  $m^2/s^2$ ), innerhalb dieses Frequenzbereiches.

Aus Bild 3 ist zu entnehmen, daß sich innerhalb des gesamten Windspektrums zwei große Frequenzgebiete unterscheiden lassen: Ein „makrometeorologischer“, niederfrequenter Bereich, in dem sich das „Großwettergeschehen“ abspielt und ein „mikrometeorologischer“ Bereich höherer Frequenz, der von der mechanischen Turbulenz des Windes, also seiner Böigkeit beherrscht wird. Die starken Schwankungen der spektralen Dichte mit energiereichen Gipfeln und energiearmen Tälern lassen ausgeprägte Zyklen erkennen. So beginnt das niederfrequente Gebiet mit einem kleineren, sekundären Energiemaximum, dessen Entstehen dem 11jährigen Sonnenfleckencyklus zuzuschreiben ist. (Gipfel I Bild 3) Sein Auftreten ist mit starken Fluktuationen der Windgeschwindigkeit verbunden. Ihm folgt bei steigender Frequenz ein jährlich wiederkehrendes, besonders energieresches Maximum (Gipfel II). Es röhrt her von den im Jahreszyklus ablaufenden, globalen, thermisch bedingten Windgeschwindigkeitsschwankungen, deren Ursache darin liegt, daß im Winter die Temperaturdifferenzen zwischen Äquator und den Polen wesentlich größere Werte erreichen als im Sommer. In dem folgenden, mit viertägigem Rhythmus sich wiederholenden Energiegipfel (Gipfel III) äußern sich die mit Änderungen der Luftdruckverteilung einhergehenden Umstellungen der Großwetterlage. Einen letzten Beitrag im makrometeorologischen Bereich liefert schließlich die Erdumdrehung, in deren Gefolge sich – mit zwölfstündiger Periode – bei Sonnenauf- und Untergang erhöhte Schwankungen der Windgeschwindigkeit einstellen (Gipfel IV).

Anschließend wird in Bild 3 ein etwa über eine Zehnerpotenz sich erstreckendes Frequenzgebiet erkennbar, das durch sehr geringe Schwankungen der Windgeschwindigkeit gekennzeichnet ist und den Übergang vom makrometeorologischen zum mikrometeorologischen Bereich ankündigt. Auf die Bedeutung dieser Übergangszone für die Wahl eines geeigneten Mittelungskontinuums zur Windgeschwindigkeitsmessung wird im folgenden noch näher eingegangen.

Der im mikrometeorologischen Bereich dominierende Energiedipfel (Gipfel V) ist ein Ausdruck der Böigkeit des natürlichen Windes, dessen mechanische Turbulenz vorwiegend von den Rauigkeitseinflüssen der Geländeoberflächen herröhrt, mit denen verglichen immer vor-

handene thermische Instabilitäten der Windströmung nur von sekundärer Bedeutung sind. Nach den von Davenport benutzten Meßwerten liegen die energiereichsten Böen in einem Frequenzgebiet von etwa 50 Per/h, was einer Böendauer von 1 bis 2 min. entspricht.

### 4.3 Böigkeit des Windes

Genauere Einsichten in den Turbulenzcharakter des natürlichen Windes lieferten die auf stochastischer Grundlage geführten Untersuchungen Davenports [24], [25], [26], [27], Bermans [29] und Klugs [30], [31]. Diese wurden ergänzt durch Arbeiten aus dem kanadischen Bauforschungsinstitut Ottawa, (von Newberry, Eaton und Mayne [32], Schriever und Dalglesch [33]) und durch Beiträge aus der britischen Building Research Station Garston. Für die horizontale Böigkeit des Windes bei hohen Windgeschwindigkeiten hat Davenport das in Bild 4 dargestellte „normalisierte Spektrum“ entwickelt, dem die folgende empirische Formel zugrunde gelegt wurde:

$$S_{(n)} = 4 k \bar{v}_1 \frac{1}{n} \frac{x}{(1+x^2)^{4/3}} \quad (5)$$

Hierin bedeuten:

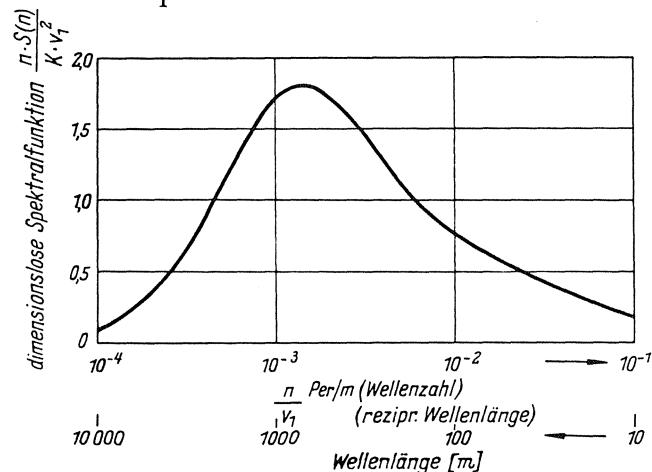
$S_{(n)}$ : spektrale Dichte der horizontalen Böigkeit ( $m^2/s$ )

$k$ : Widerstandsbeiwert der Oberflächenrauhigkeit bezogen auf das Stundenmittel der Windgeschwindigkeit  $\bar{v}_1$  in der Bezugshöhe  $z_1 = 10$  m

$n$ : Böenfrequenz in  $H_z$

$\bar{v}_1$ : Stundenmittel der Windgeschwindigkeit in  $m/s$  in der Bezugshöhe  $z_1$

$$x = 1200 \frac{n}{\bar{v}_1} \text{ (Per/m)}$$



$S(n)$  : Energiespektrum in Höhe  $z_1$  (10 m) bei der Frequenz  $n$  (Hz)

$v_1$  : Stundenmittel der Windgeschwindigkeit in Höhe  $z_1$

$k$  : Widerstandsbeiwert der Oberfläche (vergl. Bild 1)

$z_1$  : Standardbezugshöhe (10 m)

Bild 4: Normiertes Spektrum der horizontalen Böigkeit (bei hohen Windgeschwindigkeiten) nach Davenport [24]

Bei der von Davenport gewählten Darstellung gemäß Bild 4 ergibt sich die auf der Ordinate aufgetragene dimensionslose Spektralfunktion

$$\frac{n \cdot S_{(n)}}{k \cdot \bar{v}_1^2}$$

als Funktion der „Wellenzahl“ (reziproke Wellenlänge) der Bö, die als Quotient der Böenfrequenz  $n (H_z)$  und der mittleren Windgeschwindigkeit  $\bar{v}_1$  (m/s) aufzufassen ist.

Die spektrale Dichte  $S_{(n)}$  der Böigkeit dient als Ausgangspunkt zur Gewinnung der Standardabweichung  $\sigma_{vz}$  der Momentanwerte der Windgeschwindigkeit  $v_z(t)$  in der Höhe  $z$ . Da die Geschwindigkeitsschwankungen des Windes nach Davenport einer Gauß'schen Normalverteilung folgen, läßt sich der dem Verhältnis von Standardabweichung  $\sigma_{vz}$  zum Stundenmittel der Windgeschwindigkeit  $\bar{v}_z$  proportionale Variationskoeffizient der Geschwindigkeitsschwankungen

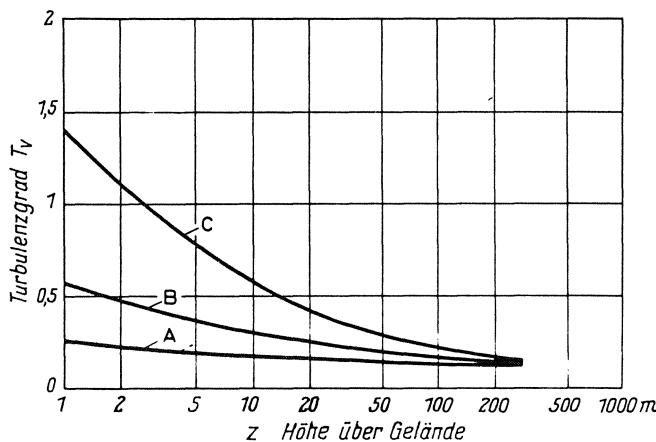
$$T_v = \frac{\sigma_{vz}}{\bar{v}_z} \quad (6)$$

ermitteln, der nach Davenport durch die Beziehung

$$T_v = 2,45 k^{1/2} \left(\frac{z}{z_1}\right)^{-a} \quad (7)$$

ausgedrückt werden kann (Bild 5).

Dieser als „Turbulenzgrad“ [36] oder „Böigkeitsintensität“ [37] bezeichnete, vom Geschwindigkeitsmittel unabhängige Ausdruck ist lediglich eine Funktion der Kennwerte der Bodenrauhigkeit  $k$  und  $a$ . Wie aus Bild 5



$$T_v = 2,45 k^{1/2} \left(\frac{z}{z_1}\right)^{-a}$$

Turbulenzgrad, Böigkeitsintensität  
 $z_1$  : Standardbezugshöhe (10 m)

A offenes Gelände	$a = 0,16$	$k = 0,005$
B Stadt, Wald	$a = 0,28$	$k = 0,015$
C Stadt, Hochhausbebauung	$a = 0,40$	$k = 0,05$

Bild 5: Turbulenzgrad  $T_v$  in Abhängigkeit von der Höhe  $z$  bei verschiedener Bodenrauhigkeit (nach Davenport [24] und König und Zilch [37])

hervorgeht, nimmt der Turbulenzgrad mit wachsender Höhe ab und zeigt charakteristische Unterschiede in Abhängigkeit von den Gelände- und Rauhigkeitskategorien, denen – wie im folgenden Abschnitt näher erläutert – auch bei der Gewinnung des Höhenprofils der Windgeschwindigkeit besondere Bedeutung zukommt.

#### 4.4 Windgeschwindigkeitsprofile

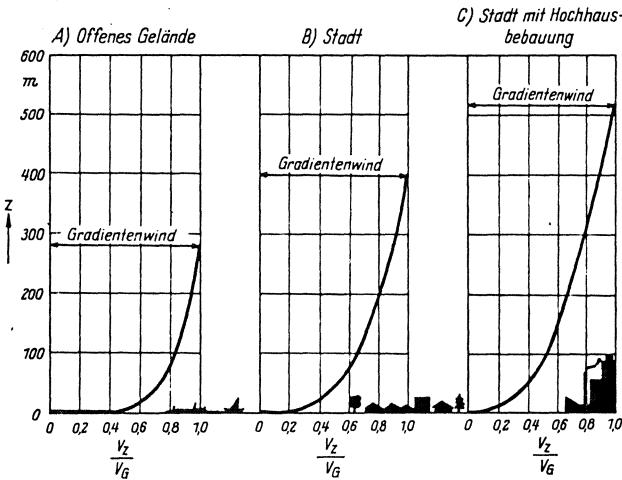
Zur Gewinnung eines repräsentativen Höhenprofils der Windgeschwindigkeit hat Davenport umfangreiche Vergleichsstudien von Geschwindigkeitsmessungen [24], [38], [39], [40], [97], [98] durchgeführt, aus denen zu erkennen war, daß die Gewinnung eines Regelprofils in entscheidender Weise von der Wahl des Mittelungsintervales abhängt, das der Geschwindigkeitsmessung zugrunde gelegt wird. Würde hierzu beispielsweise ein Wochen- oder Minutenintervall herangezogen werden so müßten sich die gemäß Bild 3 in diesen Frequenzgebieten gegebenen, hohen Windgeschwindigkeitsgradienten vorsätzlich auf das Profil auswirken. Hingegen liegt bei Frequenzen von der Größenordnung von etwa 1 Per/h (Bild 3) eine besonders geringe Spektraldichte des Energiespektrums vor. Da in diesem, dem Übergang vom Großwettergeschehen zur Böigkeit charakterisierenden Frequenzgebiet somit die Windtätigkeit relativ stationär ist, bietet sich ein Mittelungsintervall in der Größenordnung von einer Stunde zur Gewinnung eines repräsentativen Höhenprofils an. Für die Wahl dieses Intervalles spricht zudem noch der Umstand, daß das Stundenmittel der Windgeschwindigkeit ohnehin zu den Standard-Meßwerten der Wetterstationen gehört, so daß umfangreiche Meßdaten dieser Größe vorliegen.

Unter Heranziehung zahlreicher Geschwindigkeitsmeßwerte auf Geländen verschiedener Bodenrauhigkeit sind von Davenport die aus Bild 6 ersichtlichen Windgeschwindigkeitsprofile entwickelt worden. Die Profile zeigen eine Analogie zu den typischen Grenzschichtprofilen einer parallel angeströmten Platte und folgen einem Potenzgesetz von der Form

$$\frac{v_z}{v_G} = \left(\frac{z}{z_G}\right)^a \quad (8)$$

Mit zunehmender, im Rauhigkeitsparameter  $a$  zum Ausdruck kommender Bodenrauhigkeit werden die Profile flacher. Der von der Bodenrauhigkeit nicht mehr beeinflußte „Gradientenwind“ (mit der Gradientengeschwindigkeit  $v_G$ ) wird in der „Gradientenhöhe“  $z_G$  erreicht, die mit zunehmender Bodenrauhigkeit wächst (Bild 6). Die in Gradientenhöhe herrschende Windgeschwindigkeit hängt von großräumigen Luftdruckunterschieden ab, die ihrerseits wieder durch Größe und Verteilung der Sonneneinstrahlung in die Erdatmosphäre bedingt sind. Wegen dieser allein vom Großwettergeschehen beherrschten Abhängigkeit ist die Gradientengeschwindigkeit als Bezugsgröße für ausgedehnte Gebiete besonders geeignet.

Über den für  $50^\circ$  n.B. in Europa geltenden Zusammenhang zwischen dem Gradienten des barometrischen



Rauhigkeitskategorien:	Rauhigkeitsparameter $\alpha$	Widerstandsbewert der Oberfläche K	Gradientenhöhe $z_G$ (m)
A Offenes Gelände (Grasboden, flache Küste)	0,16	0,005	280
B Stadt, Wald (offene Bauweise, Stadtrand)	0,28	0,015	400
C Stadt (City, Hochhäuser)	0,40	0,05	520

$V_z = \left(\frac{z}{z_G}\right)^\alpha$  Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeit nach einem Potenzgesetz, hierdurch Windgeschwindigkeit in beliebiger Höhe abschätzbar aus Meßwert in bestimmter Höhe oder aus Gradientengeschwindigkeit.

$V_z$  Mittlere Windgeschwindigkeit in der Höhe  $z$  über Gebäude.

$V_G$  Gradientengeschwindigkeit (von Bodenrauhigkeit unabhängige Geschwindigkeit) in Gradientenhöhe  $z_G$ .

Bild 6: Windgeschwindigkeitsprofile bei Mittelungsintervall 1 Stunde (nach Davenport [27]) in Abhängigkeit von der „Bodenrauhigkeit“.

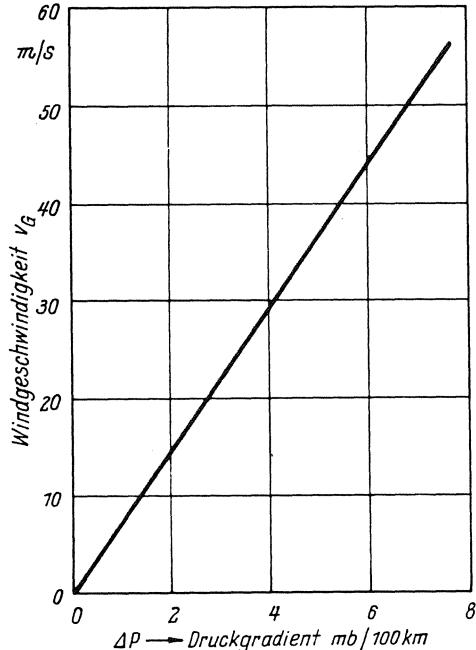
Druckes  $\Delta P$  und der Gradientengeschwindigkeit  $v_G$  unterrichtet Bild 7. Unter dem Druckgradienten  $\Delta P$  wird das Druckgefälle in mb senkrecht zu den Isobaren auf eine Entfernung von 100 km verstanden. Die zwischen Luftdruckgefälle und Luftbewegung gemäß Bild 7 bestehende Beziehung wurde von Caspar [41] durch Auswertung von Wetterkarten für Deutschland gewonnen, wobei auch die Zahl der Tage mit Druckgradienten

größer oder gleich 3,0; 3,5 und 4,0 mb für jedes Jahr ausgezählt wurde. Daraus ergaben sich die bei Bild 7 angeführten Zahlen der Tage mit einem Druckgradienten von beispielweise  $\Delta P > 3,5$  mb für Hamburg zu 12,8 und für München zu 4,5. Frimberger und Lange [36] schätzten hieraus die für Deutschland geltenden Werte der Gradientengeschwindigkeit, wobei sich als Richtwerte für Hamburg ein  $v_G = 60$  m/s und für München ein  $v_G = 43$  m/s ergaben.

Eine abschließende Beurteilung der Windgeschwindigkeitsprofile zeigt, daß es mit ihrer Hilfe gelingt, Auskunft über die mittlere, stündliche Windgeschwindigkeit in beliebiger Höhe zu erhalten. Als Ausgangswerte können hierbei entweder – wie oben gezeigt – Richtwerte der Gradientengeschwindigkeit oder die von einer meteorologischen Station vorliegenden Meßwerte der Stundenmittel (in der Regel für eine Höhe von 10 m über Gelände geltend) dienen. Unter Verwendung der den Rauhigkeitskategorien gemäß Bild 6 entsprechenden  $\alpha$ -Werte lassen sich dann die Geschwindigkeitswerte in der gewünschten Höhe mit einer für die Zwecke des Bauphysikers und Bauingenieurs ausreichenden Genauigkeit angeben.

#### 4.5 Maximale Windgeschwindigkeiten

Zur Gewinnung von Windprofilen hatte sich die Wahl eines einstündigen Mittelungsintervales als zweckmäßig



Druckgradient (Druckgefälle senkrecht zu den Isobaren)  
Zahl der Tage mit Druckgradient  $\Delta P > 3,5$  mb/100 km

Hamburg 12,8

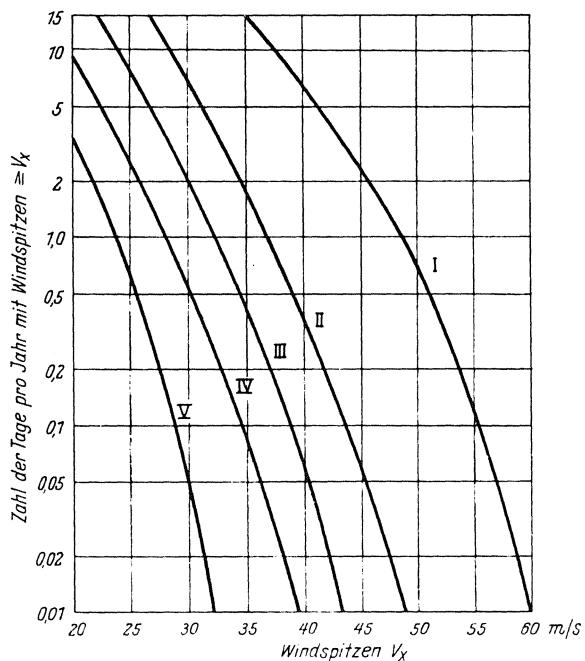
München 4,5

Gradientenwind: Hamburg  $v_G = 60$  m/s  
München  $v_G = 43$  m/s

Bild 7: Gradientenwind, Windgeschwindigkeit  $v_G$  als Funktion des Druckgradienten (für 50° n.B.) (nach Caspar [41]) und Frimberger u. Lange [36])

erwiesen. Zur Kennzeichnung der maximalen Beanspruchung eines Bauwerkes oder einzelner seiner Teile durch den Wind ist jedoch die Kenntnis von Momentan- oder Spitzenwerten kürzerer Dauer der Windgeschwindigkeit erforderlich. So haben insbesondere die in der Building Research Station Garston [34], [42] und im National Research Council of Canada [33] durchgeführten Untersuchungen ergeben, daß zur Ermittlung örtlicher Windspitzenlasten an großen Gebäuden Mittelungsintervalle in der Dauer von wenigen Sekunden heranzuziehen sind. Bei den genannten Untersuchungen war der komplexe Zusammenhang erkannt worden, der zwischen Windwirkung und Bauwerk besteht und der es praktisch unmöglich macht, die beiden als voneinander unabhängige Größen zu behandeln.

Die in der Meteorologie benutzten Spitzen- oder Momentanwerte der Windgeschwindigkeit stützen sich auf Messungen von Böenregistriergeräten, die je nach deren Bauart über eine Dauer von etwa 2 bis 10 s integrierte Geschwindigkeitsmittelwerte liefern. Die aus Messungen solcher Art von Caspar [43] ausgewerteten, für Deutschland geltenden Windgeschwindigkeiten zeigt



- I exponierte Berglage (Schwarzwald, Harz-Gipfel)
- II exponierte Mittelgebirgslage (Voralpen, Taunus, Rhön, Eifel u. a.) Deutsche Bucht
- III weite Teile des deutschen Flachlandes, mittel- und süddeutsche Plateaulagen
- IV mäßig exponierte Lagen (Teile des Alpenvorlandes, Schwäbisch-Fränkisches Stufenland, Münstersche u. Kölnische Bucht)
- V windgeschützte Tallagen des Mittel- u. Süddeutschen Raumes

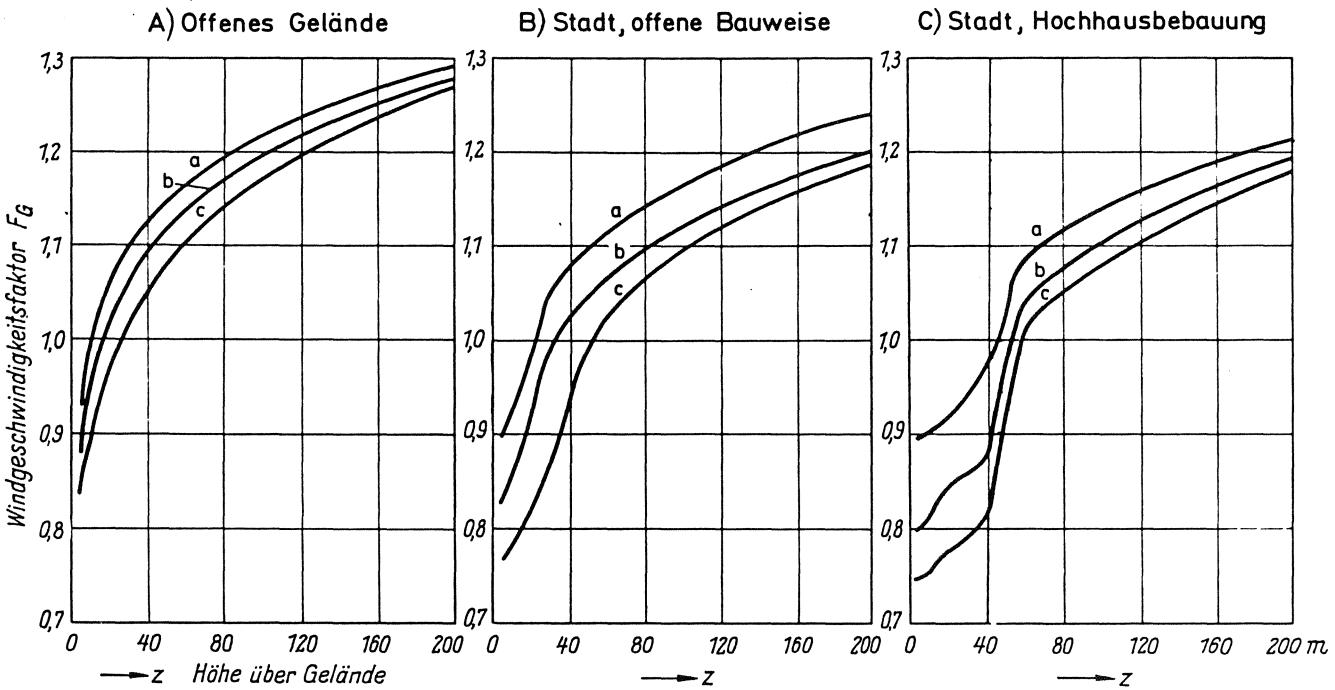
Bild 8: Windspitzen („Momentanwerte“) in 15 m Höhe, die in Deutschland an einer bestimmten Zahl von Tagen pro Jahr überschritten werden (nach Caspar [43])

Bild 8. Sie stützen sich auf umfangreiche über längere Zeiträume durchgeführte Böenregistrierungen und geben brauchbaren Aufschluß über die in Mitteleuropa zu erwartenden Windspitzen. In Bild 8 sind die Meßwerte in Form von Summenhäufigkeitskurven nach fünf Klassen zusammengefaßt, aus denen sich eine gebietsmäßige Gliederung von Intensität und Häufigkeit der Windböen entnehmen läßt.

Ein erster Versuch, Böengeschwindigkeiten von der in Bild 8 angeführten Art hinsichtlich ihrer Einwirkung auf Bauwerke und Gebäudefassaden zu beurteilen, wurde bei dem im Jahre 1968 ausgearbeiteten Entwurf der britischen Windlastvorschriften unternommen [42]. Als Ausgangspunkt dient hierbei ein – etwa dem Caspar'schen „Momentanwert“ (Bild 8) entsprechender – Windspitzenwert (in der Norm als „basic wind speed“ bezeichnet), der sich unter Benutzung eines Mittelungsintervales einer Bö von 3 s Dauer ergibt und dessen Auftreten einmal im Verlauf von 50 Jahren zu erwarten ist. Die Zahlenwerte dieser Windspitzen sind aus einer für das Vereinigte Königreich ausgearbeiteten Isoplethenkarte zu entnehmen, deren Linien gleicher Windgeschwindigkeit, im Bereich von 36 m/s bis 56 m/s liegend, aufgrund langjähriger statistischer Windstudien ermittelt wurden. Zur Berücksichtigung der Gebäuderückwirkung auf den Wind sind die Werte der „basic wind speed“ mit einem Faktor  $F_G$  (Bild 9) zu multiplizieren, dessen Größe außer von der Gebäudeform bzw. den Bodenrauhigkeitskategorien auch von der Geometrie des Bauwerkes abhängt. Die der Entwicklung des Faktors  $F_G$  zugrunde liegenden Untersuchungen [32], [44], [45] hatten gezeigt, daß die bei Anströmung kleinerer Hindernisse entstehende starke Verwirbelung des Windes relativ kleine Turbulenzelemente entstehen läßt, deren Böendauer – entsprechend ihren zwischen 1 bis 20 m betragenden Wirbelgrößen – unter 3 s liegt. Deshalb ist eine dem Mittelungsintervall von 3 s entsprechende maximale Böengeschwindigkeit dann heranzuziehen, wenn es sich um die Erfassung der Windbeanspruchung von Bauwerksteilen (Verglasungen, Bekleidungen, Dachteilen) oder von Bauten überhaupt handelt, deren größte vertikale oder horizontale Dimension weniger als 20 m beträgt.

Mit steigenden Gebäudeausmaßen, denen eine Zunahme der Wirbeldimension bzw. der Böendauer entspricht, ist auch das Mittelungsintervall zur Erfassung der zugehörigen Böengeschwindigkeit zu vergrößern, so daß sich die im folgenden Schema skizzierte Abhängigkeit zwischen Wirbelgröße bzw. Bauwerksdimension einerseits und Böendauer bzw. Mittelungsintervall für die Windgeschwindigkeit andererseits ergibt:

Wirbelgröße Bauwerks- dimension	Böendauer Mittelungs- intervall	Geschwindigkeits- wert
bis 20 m	bis 3 s	maximal
20 – 50 m	3 – 5 s	reduziert
über 50 m	5 – 15 s	reduziert



#### Gebäude-Klassen:

Rauhigkeitskategorien  
A, B, C vergl. Bild 6.

- a Gebäude, deren größte horizontale oder vertikale Dimension weniger als 20 m beträgt, Bauteile (Verglasungen, Bekleidungen, Dächer)
- b Gebäude, deren größte horizontale oder vertikale Dimension zwischen 20 bis 50 m liegt
- c Gebäude, deren größte horizontale oder vertikale Dimension mehr als 50 m beträgt.

*Bild 9: Windgeschwindigkeitsfaktor  $F_G$  in Abhängigkeit von „Bodenrauhigkeit“ und „Gebäudeklasse“ (nach „Entwurf der britischen Windlastnorm“ [42]).*

Die dem britischen Normenentwurf entnommenen, in Bild 9 dargestellten  $F_G$ -Faktoren sind als erste Ausgangspunkte für eine wirklichkeitsnahe Erfassung der Windbeanspruchung von Gebäudefassaden zu betrachten. Sie lassen sich unter Heranziehung der von Caspar (Bild 8) angegebenen Windspitzenwerte auch zur Beurteilung der für deutsche oder mitteleuropäische Verhältnisse gelgenden Gebäude- und Geländeabhängigen Windbeanspruchung von Fassaden benutzen.

#### 4.6 Neuere Messungen der Beanspruchung von Fassaden im natürlichen Wind

Großuntersuchungen über die Beanspruchung von Bauwerken durch den natürlichen Wind liegen erst seit etwa einem Jahrzehnt vor. Bis dahin war die Forschung fast ausschließlich auf Modelluntersuchungen von Bauwerken im Windkanal beschränkt geblieben [23]. Dabei wurden Gebäudemodelle zumeist im Maßstab 1 : 200 einer laminaren Strömung ohne „Höhenprofil“ ausgesetzt, deren idealisierte Strömungsform sich wesentlich von der durch Bodenrauhigkeit und Böigkeit gekennzeichneten Strömung des natürlichen Windes unterschied. Ein erster Anstoß zur Durchführung von Großuntersuchungen an Bauwerken im natürlichen Wind ging vom „First Inter-

national Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures“ aus, das im Jahre 1963 im „British Physical Laboratory“ abgehalten wurde [46]. Über Teilergebnisse der damals angeregten Untersuchungen wurde auf der zweiten internationalen Tagung berichtet, die 1967 als Forschungsseminar in Ottawa stattfand [32], [47], [48], [49], wobei Meßergebnisse an Hochhäusern verschiedener Höhe und Fassadengestaltung in London, Melbourne, Delft und Montreal vorgelegt wurden. Da einige der hierbei gewonnenen Ergebnisse auch im Zusammenhang mit der Beurteilung von Schlagregenbeanspruchungen von Fassaden Bedeutung besitzen, wird im folgenden auf die von Newberry, Eaton und Mayne [32] am Royex House in London durchgeföhrten Untersuchungen näher eingegangen. Das mit glatten Fassaden ausgestattete, 18geschossige Geschäftshaus (mit einer Höhe von 66 m und den Grundrissmaßen 18 m x 43 m) wurde im 7., 13. und 17. Stockwerk mit insgesamt 48 über die Fassaden netzförmig verteilten Druckmeßdosen versehen (Bild 10). Die bei Westwind (Spitzengeschwindigkeit 21 m/s) im Verlauf von 4 Min. von den 11 Meßdosen der Westfassade aufgezeichneten Druckschwankungen (in  $\text{kp}/\text{m}^2$ ) gehen aus Bild 11 hervor. Da mit den verwendeten Druckmeßdosen kurzfristige Schwankungen der Windlast bis zu einer Dauer von 1 s

und darunter registriert werden konnten, ergab sich ein Einblick in die Feinstruktur des Windes und seiner zeitlichen und örtlichen Verteilung über die Fassade. Während bei streifendem Wind (Bild 10 Fall a) die Hauptfassaden stark pulsierende und rasch veränderliche Saugbeanspruchungen erfuhren, bildeten sich bei senkrechter Anströmung der Westfassade (Bild 10 Fall b) Druckbeanspruchungen der in Bild 11 ersichtlichen Form aus, die im Unterschied zu den Verhältnissen bei streifendem Wind weniger rasch wechselten. Man erkennt, daß die markant ausgebildeten Druckschwankungen sich nahezu gleichzeitig über die gesamte Fassade hin erstrecken. Eine eindeutige Abhängigkeit der Druck-

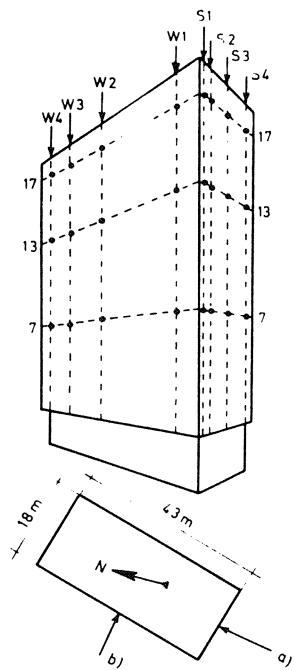


Bild 10: Anordnung der Druckmeßdosen am Royex-House, London (12 Dosen pro Fassade im 7., 13. u. 17. Stockwerk) nach [32]

Hauptwindrichtungen:

- a) Südlicher Wind, die Hauptfassaden streifend
- b) Westlicher Wind, fast senkrecht zur W-Fassade

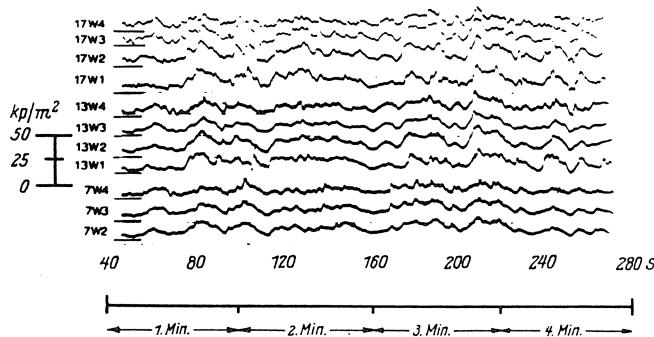


Bild 11: Winddruck-Messwerte am Royex-House, London; nach [32]

An 11 Druckmeßdosen an der Westfassade bei Westwind, max. Böengeschwindigkeit 21 m/s (3s Böe).

maxima und der größten Druckschwankungen von der Gebäudehöhe ist aus Bild 11 nicht erkennbar. Bild 11 bringt eine Bestätigung für den Einfluß der Wahl des Mittelungsintervales auf die Erfassung der Windbeanspruchung: Durch Summieren der Anzeigenwerte der Meßdosen in den einzelnen Stockwerken und für das ganze Gebäude konnten die auf die jeweiligen Mittelungsdauern von 1 bis 60 s bezogenen Lastwerte errechnet werden, die den in Bild 12 gezeigten Zusammenhang zwischen Mittelungsdauer und Windlast ergaben. Man

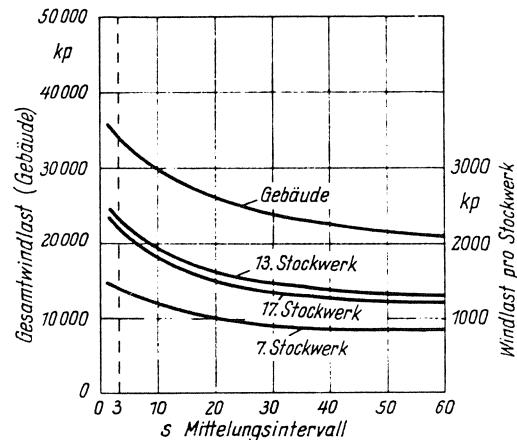


Bild 12: Einfluß des Mittelungsintervalls der Windgeschwindigkeit auf die Windlast (nach [32])

Westwind, max. Böengeschwindigkeit 16,5 m/s (3s Böe)  
Die Lastwerte der Stockwerke sind auf eine Höhe von 0,3 m bezogen.

Die auf ein Mittelungsintervall von 3 s bezogenen Lastwerte sind für die einzelnen Stockwerke und für das ganze Gebäude um etwa 60 % größer als die korrespondierenden 1-min-Lasten.

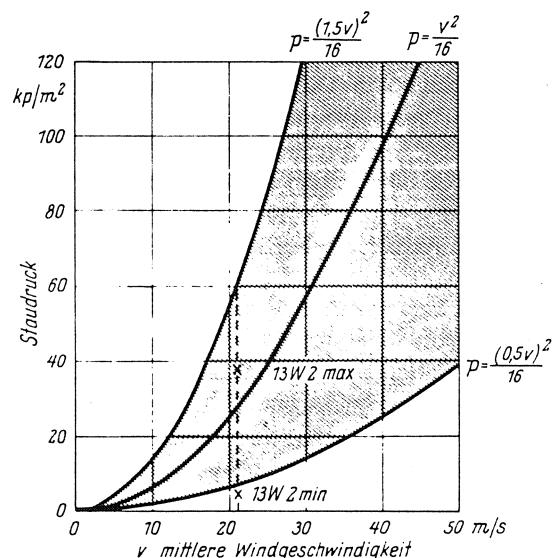


Bild 13: Zusammenhang zwischen der mittleren Windgeschwindigkeit und dem Staudruck (nach Birkeland [8])

Der schraffierte Bereich berücksichtigt die durch Böigkeit verursachten Druckschwankungen. Zum Vergleich Meßwerte 13 W2 (max. u. min.) aus Bild 11.

erkennt, daß bei einem Intervall von 3 s, das im britischen Normenentwurf einer Böendauer von 3 s entspricht, sich Windlastwerte ergeben, die um rund 60 % höher liegen als diejenigen, die bei einem 1-min-Intervall gemessen wurden, das bisher in einer Reihe von Ländern zur Erfassung der Spitzenbelastung als ausreichend angesehen worden war.

Von Birkeland wurden bereits im Jahre 1962 Angaben über die durch die Böigkeit des Windes bewirkten Geschwindigkeits- und Druckschwankungen gemacht [8] (Bild 13). Danach betragen die Geschwindigkeitsschwankungen in der Regel  $\pm 50\%$  der mittleren Windgeschwindigkeit. Überträgt man die am Royex-House bei einer Spitzengeschwindigkeit von 21 m/s gemessenen Extremwerte der Winddruckschwankungen (Bild 11, Meßstelle 13 W<sub>2</sub>, Maximum 48 kp/m<sup>2</sup>) in Bild 13, so liegt dieser Meßwert der Schwankungsbreite etwa in dem nach Birkeland zu erwartenden Bereich. Ein exakter Vergleich ist jedoch durch die unterschiedlichen Mittelungsintervalle in Frage gestellt. (Nach Birkeland: mit Schalen-

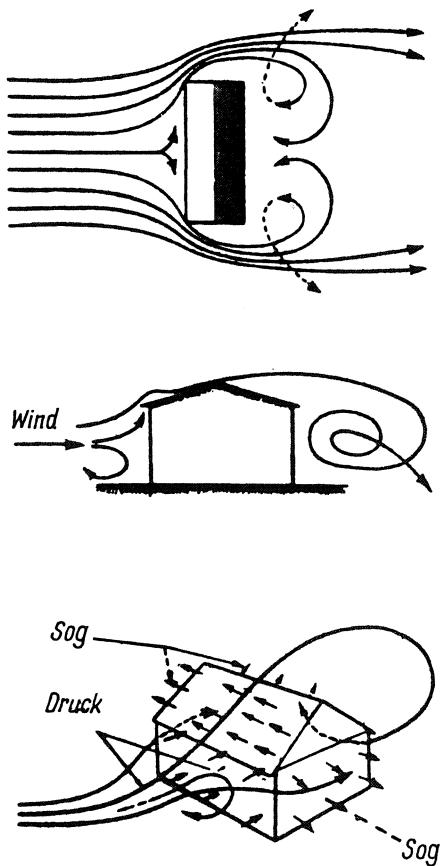


Bild 14: Strömungsverhältnisse an Gebäuden (nach [34]).

Bei senkrecht angeströmter Fassade wird in der Mitte eine etwa dem Staudruck  $p = \frac{v^2}{16}$  entsprechende Druckbelastung erzeugt. In Dach- u. Eckennähe wird die Strömung abgelenkt und beschleunigt.

Die Verwirbelung der Strömung bewirkt Saugbeanspruchungen. An der direkt angeströmten Fassade treten aufwärts und abwärts gerichtete Strömungen auf.

kreuzanemometer in 10-min-Intervall gemessene mittlere Windgeschwindigkeit; beim Royex-House: mit Böenschreiber gemessene Böengeschwindigkeit).

Zur Veranschaulichung der an Gebäuden auftretenden Strömungsverhältnisse wurden in den letzten Jahren Modellversuche durchgeführt, bei denen die in Windkanälen überprüften Bauwerksmodelle aerodynamischen Bedingungen ausgesetzt waren, die denen des natürlichen Windes möglichst nahe kamen. Moderne Windkanäle dieser Art sind mit den erforderlichen Anlagen ausgestattet, Bodenrauhigkeitskategorien und Windprofile entsprechend den natürlichen Gegebenheiten simulieren zu können und die Strömungsverhältnisse durch Rauchbeimengung oder andere Mittel sichtbar zu machen [45].

Zum Teil haben die aus solchen Untersuchungen gewonnenen Einsichten bereits Eingang in neuere Fassungen der Windlastnormen gefunden [42]. Bild 14 und 15 zeigen die nach Modellversuchen der geschilderten Art bei angeströmten Gebäuden und Gebäudekomplexen herrschenden An- und Umströmungsverhältnisse, aus denen charakteristische Unterschiede der Strömungs- und Geschwindigkeitsverteilungen an Fassaden zu erkennen sind [45], [50]. So geht aus Bild 14 hervor, daß vor dem Auftreffen der Strömung auf die Gebäudewand eine Spaltung und teilweise Umlenkung des Windstromes um Dach und Hauskanten erfolgt. Die sich daraus ergebende Verwirbelung spielt sich im Luv und Lee der Vertikalebene und im Lee der Horizontalebene ab und hat eine komplizierte Verteilung von Druck- und Saugbeanspruchungen zur Folge. Ein vorgelagertes Gebäude (Bild 15) bewirkt im Verwirbelungsgebiet eine teilweise Umkehr der vertikalen Strömung an der Fassade des höheren Gebäudes, wodurch Luftmassen aus größerer Höhe wieder in Bodennähe herabgeführt werden können.

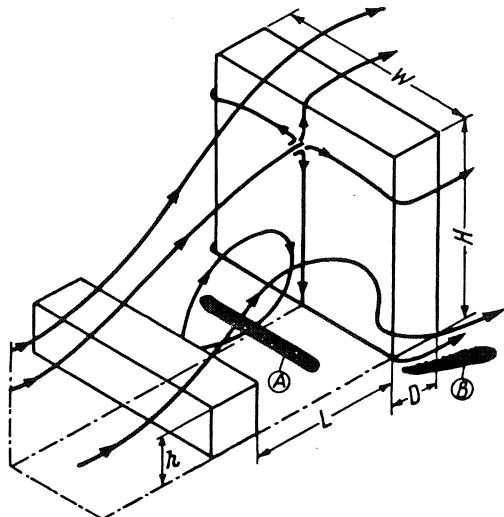


Bild 15: Strömungsverhältnisse an hintereinander liegenden Gebäuden (nach Wise [50]).

Die Wirbelbildung hinter dem vorgelagerten Gebäude bewirkt eine Umkehr der Vertikalströmung an der Fassade des Hauptgebäudes. An der Hochhausfassade wird die rascher strömende Luft aus der Höhe in bodennahen Zonen A und B abgelenkt.

Zusammenfassend läßt sich das Problem der Windeinwirkung auf Fassaden wie folgt beurteilen: Anstelle des bisher üblichen einfachen Konzeptes, das auf der idealisierenden Annahme einer stationären Windströmung beruht, ist eine wirklichkeitsnahe Beschreibung der Windstruktur und der Windwirkung auf statistischer Grundlage getreten. Mit ihrer Hilfe lassen sich Windeinwirkungen auf Gebäude durch eine mittlere Windgeschwindigkeit (Gradientenwind oder Meßwerte von Wetterstationen) sowie durch eine ihr überlagerte Turbulenz (Böigkeitspektrum) beschreiben. Eine erfolgreiche Klärung der auch beim heutigen Stand der Forschung noch offenen Fragen – wobei insbesondere an den komplexen Zusammenhang zwischen Wind und Bauwerk zu denken ist – wird von den Ergebnissen praktischer Untersuchungen abhängen, die sich sowohl auf detaillierte Messungen der Windbeanspruchung von Gebäuden als auch auf Windkanalmessungen von Gebäudemodellen zu erstrecken haben werden [90], [97], [98], [101].

## 5. Schlagregenmessungen an Fassaden

Zur Erfassung des auf Fassaden auftreffenden Schlagregens sind Meßgeräte entwickelt worden, die im Unterschied zu dem mit horizontaler Auffangöffnung ausge-

statteten Geräten zur Messung des Normalregens vertikale Auffangöffnungen besitzen (Bild 16). Als Beispiel für eine bewährte Konstruktion eines Gerätes zur Erfassung des Schlagregens an Fassaden sei auf das von Schwarz beschriebene Gerät der Freilandversuchsstelle Holzkirchen des Instituts für Bauphysik verwiesen (Bild 17) [3]. Zur Erleichterung der Montage an Fassadenwänden ist das vertikale Auffanggefäß flach und kompakt gebaut. Der im Bild 17 rechts dargestellte Regenmesser mit der Auffangfläche bündig zur Wandebene kommt der Forderung nach möglichst geringer Störung der Strömungsverhältnisse an der Wand besonders entgegen. Seine Anbringung an fertigen Fassaden ist jedoch wegen der dann erforderlich werdenden Ausbruchsarbeiten nicht immer zu realisieren. Zur Ermittlung der Feinstruktur des auftreffenden Niederschlages können die Geräte mit einer automatischen Meßeinrichtung verbunden werden, die – auf dem Prinzip der Tropfenzählung beruhend – eine volumetrische Bestimmung der Regenmenge ermöglicht und Aufschlüsse über Dauer, Intensität und örtliche sowie zeitliche Verteilung des an einer Fassade auftretenden Niederschlages ergibt (Bild 18 und 19) [51].

Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die bisher an Fassaden durchgeföhrten Schlagregenmessungen gegeben werden. Von Lacy [4] wurden 1965 Untersuchungsergebnisse über die Schlagregenbeanspruchung in acht- und zehngeschossigen Wohnbauten in der Nähe von Glasgow vorgelegt, aus denen hervorgeht, daß an den in 21 m Höhe über Gelände angebrachten Meßgeräten erst bei einer Windgeschwindigkeit von über 7 m/s Schlagregen verzeichnet wurde. Da die Fassaden der untersuchten Gebäude nicht mit Meßgeräten in unterschiedlicher Höhe ausgestattet waren, ergaben sich keine Aufschlüsse über die örtliche Verteilung des Schlagregens. Weitere – bisher nicht publizierte – Untersuchungen Lacy's an eingeschossigen Gebäuden in Tredegar (einer in Süd-Wales gelegenen Kleinstadt) im Winter 1967/68 ergaben, daß ein bemerkenswerter Unterschied der Schlagregenbeanspruchung bestand zwischen den im Stadtinnern und den am Strand gelegenen Häusern: danach betrug das über die gesamte Versuchszeit gemittelte Verhältnis der Schlagregenbeanspruchung der im Stadtinnern gelegenen Häuser zu den am Strand gelegenen 1 : 6,5 und erreichte an manchen Tagen die Werte 1 : 15. Von Lacy [4] wurde erstmals auf die höheren Beanspruchungen der Randzonen von Fassaden gegenüber den in Wandmitte gelegenen Stellen hingewiesen. Von Ritchie und Davison wurde in – bisher nicht veröffentlichten – Untersuchungen an mehrgeschossigen Gebäuden in Ottawa und Halifax festgestellt, daß sich sehr markante Unterschiede der Schlagregenmengen bei Anbringung der Geräte in Dachnähe und im Erdgeschoß ergaben. Eine Bestätigung dieser Betrachtungen ergibt sich aus Messungen an der Fassade eines 60 m hohen Gebäudes in Göteborg (Schweden), über die anlässlich des CIB-Symposiums Klimatologie und Bauwesen (Wien 1970) von H. Ryd berichtet wurde [52]. Das in relativ unge-

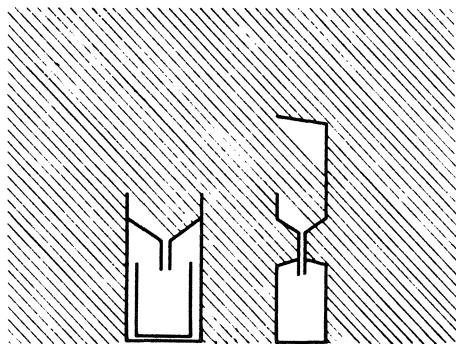


Bild 16: Prinzip der Niederschlagsmessung [3]

links: Normalregen  
rechts: Schlagregen

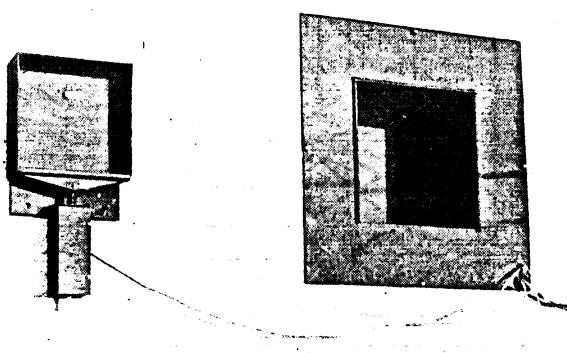


Bild 17: Schlagregenmessgeräte an einer Wand [3]

rechts: Regenmesser mit Auffangfläche in Wandebene  
links: an der Wandoberfläche angeschraubter Regenmesser

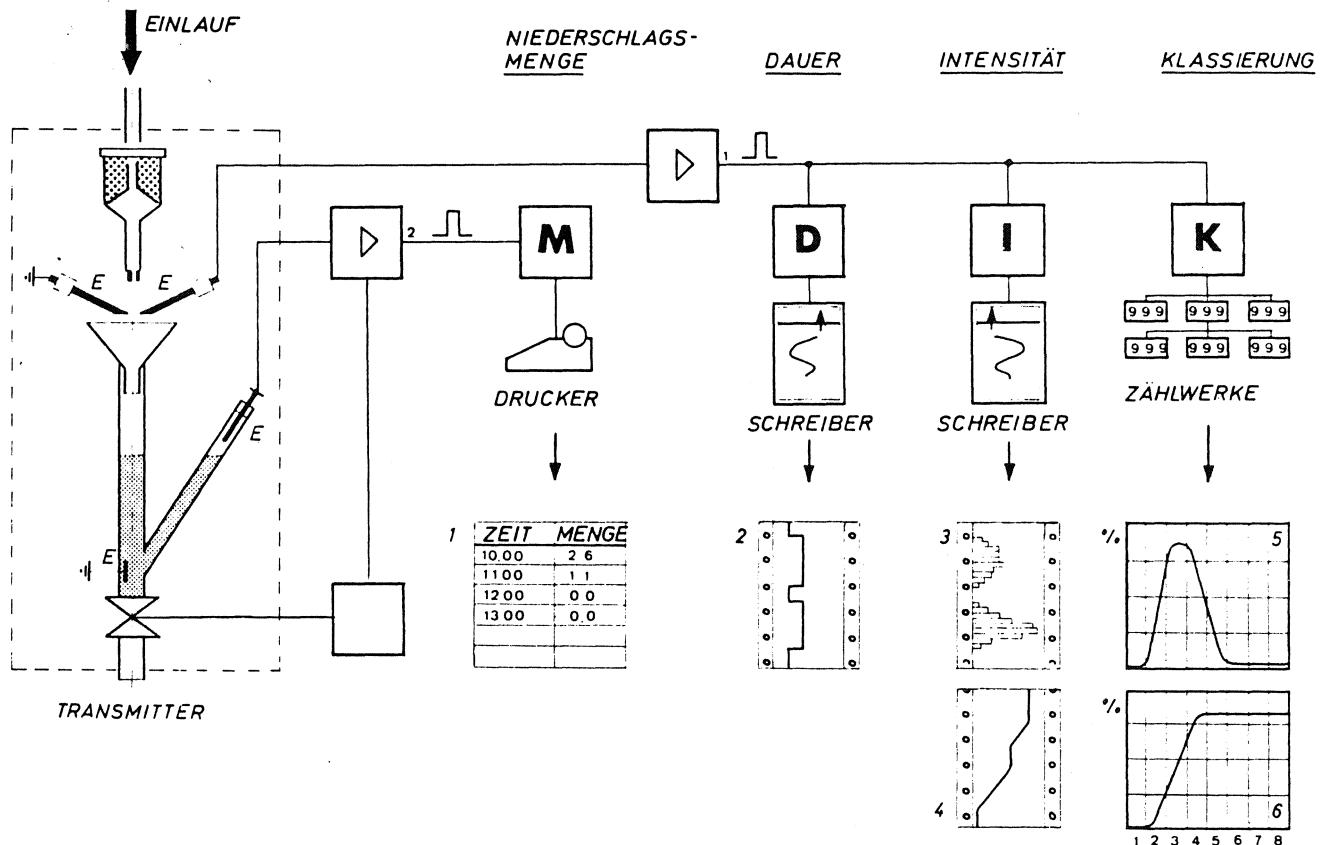


Bild 18: Schematische Darstellung der automatischen Meßanlage zur Erfassung des Regens (Schlagregen oder Normalregen, je nach Art des Regenauffanggerätes). Die Niederschlagsmenge wird in Teilmengen aufgeteilt; diese werden dann ausgezählt, Die Zählimpulse dienen dazu, die angeschlossenen Auswerte- und Registriergeräte anzusteuern. Dies sind von links nach rechts:

M = Zählwerke zur Registrierung der Niederschlagsmenge (z. B. Stundenwerte).

D = Ereignisschreiber für Niederschlagsdauer.

I = Schreiber zur Erfassung der auf 1-Minuten-Intervalle bezogenen Regenintensität (Säulendiagramm oder Summenkurve).

K = Zählwerke zur Klassierung der Intensität nach Intensitätsklassen. Hierdurch kann unmittelbar die Häufigkeitsverteilung der Niederschlagsintensität gewonnen werden. [51]

schützter Lage errichtete Gebäude wurde mit 40, über die Fassade verteilten Schlagregenmeßgeräten versehen, deren flache Konstruktion eine möglichst geringe Störung der Strömungsverhältnisse am Meßort gewährleisten sollte. Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Normalregen werden in einer Entfernung von etwa 400 m vom Gebäude durch Geräte registriert, die auf einem freistehenden Mast von 10 m Höhe angebracht sind. Das umfangreiche Meßprogramm von Göteborg war 1970 noch nicht abgeschlossen. Die wenigen bis dahin vorliegenden Meßergebnisse zeigten jedoch, daß die Schlagregenintensität an den Randzonen der Fassaden und insbesondere an Kanten- und Dachnähe Extremwerte erreicht.

Quantitativ aufschlußreiche Meßergebnisse über die vertikale und horizontale Schlagregenverteilung an Fassaden und über die Abhängigkeit der Schlagregenmengen vom Aufstellungsort der Meßgeräte wurden erstmalig von der Außenstelle Holzkirchen des Instituts für Bauphysik vorgelegt [3], [53]. Danach wurde bei einem Gebäude

von etwa 4 m Höhe die aus Bild 20 ersichtliche horizontale Schlagregenverteilung gemessen, aus der zu erkennen ist, daß die Schlagregenmenge zur Wand hin beträchtlich abnimmt. Bei Windgeschwindigkeiten unter 5 m/s (Stundenmittel) liegen die Meßwerte fast durchweg unterhalb der stark ausgezogenen Linie, wobei in Grenzfällen in Wandmitte nur etwa 30 % der in etwa 10 m Entfernung festgestellten in „ungestörter Strömung“ auftretenden Schlagregenmenge gemessen wurden. Bei höheren Geschwindigkeiten liegen die Meßwerte größtenteils über dem Mittelwert und erreichen maximal etwa 80 % der im Bezugspunkt festgestellten Menge. Aus dem Bild läßt sich die „Störzone“ vor der angeströmten Wand erkennen. Die vertikale Schlagregenverteilung vor dem Gebäude zeigt Bild 21. Die stark ausgezogene Linie stellt die mittlere prozentuale Schlagregenmenge dar und bezieht sich auf die in 2 m Höhe und 9,5 m Entfernung vom Gebäude in „ungestörter Strömung“ gemessene Regenmenge, wobei die schraffierten Zonen wieder den Streubereich der Einzelmessungen verdeutlichen.

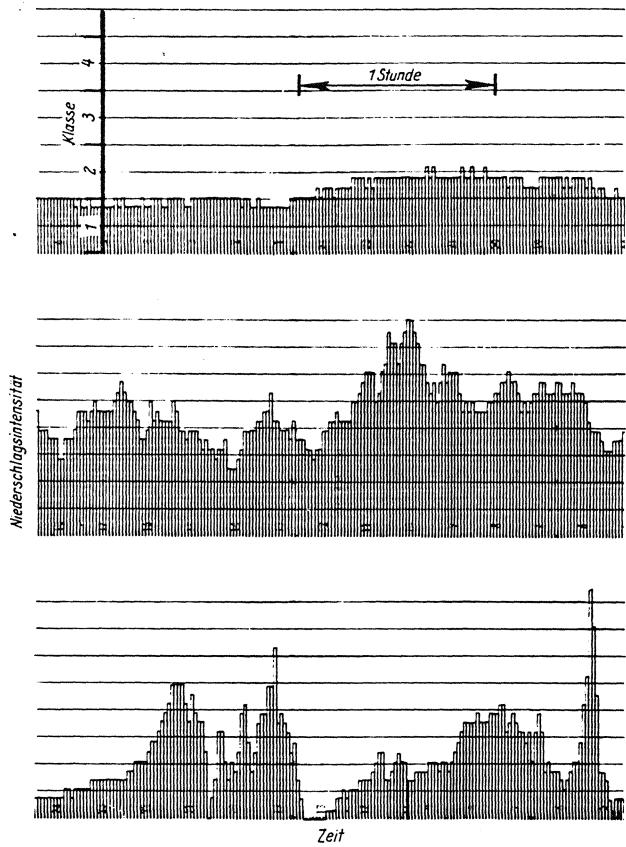


Bild 19: Beispiele für Zeitverläufe der Niederschlagsintensität (Schlagregen). Jede Säule repräsentiert die Niederschlagsintensität während einer Minute. [51]

Oben: Gleichmäßiger, geringer Schlagregen.  
Mitte: Stärkerer Regen mit üblichen Schwankungen der Intensität.  
Unten: Typischer Schauerregen bei böigem Wind.

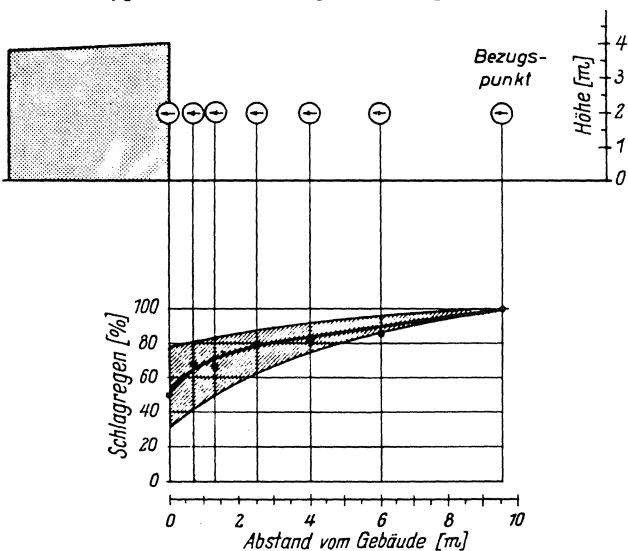


Bild 20: Anordnung der Schlagregen-Meßgeräte vor dem Versuchshaus (oben) und prozentuale Verteilung der Schlagregenmenge in 2 m Höhe (unten). Die durchgezogene Linie gibt den mittleren prozentualen Anteil des während der ganzen Meßperiode aufgefangenen Schlagregens an, bezogen auf die Schlagregenmenge in 9,5 m Entfernung vor dem Gebäude. Schraffiert: Streubereich der Einzelmessungen. [3]

Ein Vergleich der Meßwerte an der Wand und in „freier Strömung“ ergibt, daß im zweiten Fall die Schlagregenwerte mit der Höhe bei größeren Geschwindigkeiten weniger stark zunehmen als bei kleineren. Die Mehrzahl der Meßwerte mit Geschwindigkeiten über 5 m/s liegt in Bild 21 oben (Wandoberfläche) rechts vom Mittelwert, in Bild 21 unten (freie Strömung) links vom Mittelwert. Die aus Bild 20 und 21 entnehmbaren Zusammenhänge sind offensichtlich aus der Rückwirkung des Gebäudes auf die An- und Umströmungsverhältnisse zu erklären. Sie lassen sich dahingehend deuten, daß in dem jedem Gebäude vorgelagerten Wirbelgebiet sich eine Art von Luftpolster ausbildet, in dem ein Teil der herangeführten Tropfen abgebremst wird und noch vor Erreichen der Wandoberfläche zu Boden fällt. Erst bei höheren Windgeschwindigkeiten, die eine Zunahme der kinetischen Energie der Tropfen bewirken, erreicht eine größere Tropfenzahl die Wand [3].

Eine Ergänzung und Bestätigung dieser Ergebnisse brachten neuere von der Freilandversuchsstelle Holzkirchen des Instituts für Bauphysik angestellte Untersuchungen über die Schlagregenverteilung an der fünfgeschossigen Fassade eines am Ortsrand von Holzkirchen in stark exponierter Lage errichteten Wohnhauses [53]. An der, starken westlichen Winden ausgesetzten, nach WSW

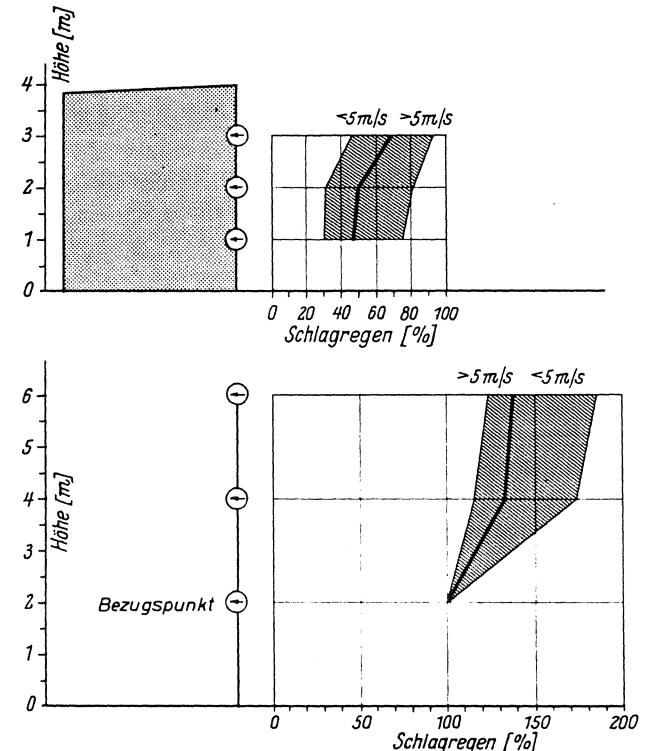


Bild 21: Anordnung der Schlagregen-Meßgeräte in verschiedenen Höhen an der Wandoberfläche (oben) und in freier Strömung (unten) und prozentuale Verteilung der Schlagregenmenge in der Höhe. Die durchgezogenen Linien geben den mittleren, prozentualen Anteil des während der ganzen Meßperiode aufgefangenen Schlagregens an, bezogen auf die Schlagregenmenge in 2 m Höhe in freier Strömung (9,5 m vom Gebäude entfernt). Schraffiert: Streubereiche der Einzelmessungen. [3]

orientierten Fassade dieses Gebäudes wurden insgesamt 6 Schlagregenmeßgeräte von der in Bild 17 (links) dargestellten Art horizontal und vertikal verteilt angebracht (Bild 22). Aus den an insgesamt 47 Regentagen gewonnenen Ergebnissen war zu entnehmen, daß die Fassade in ihrer Höhen- und Längenausdehnung höchst unterschiedliche Schlagregenbeanspruchungen erfährt (Bild 23). Mit zunehmender Höhe über dem Gelände ergab sich ein deutlicher Anstieg der Meßwerte der Regenintensität. Im oberen Fassadenbereich des 5. Geschosses wurde eine um den Faktor 12 (in Extremfällen 20) größere Schlagregenmenge registriert als im unteren (3 m über dem Gelände gelegenen) Bereich. Beträchtliche Unterschiede ergaben sich auch in der horizontalen Verteilung der Schlagregenbeanspruchung.

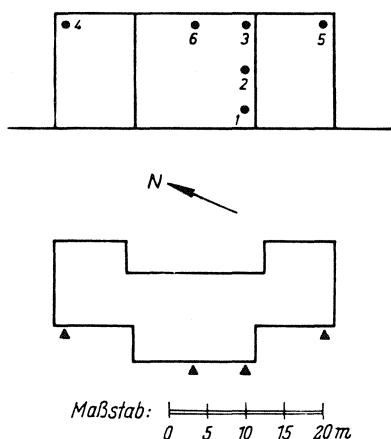


Bild 22: Anordnung der Schlagregenmeßgeräte in der WSW-Fassade eines Wohnblocks. [53]

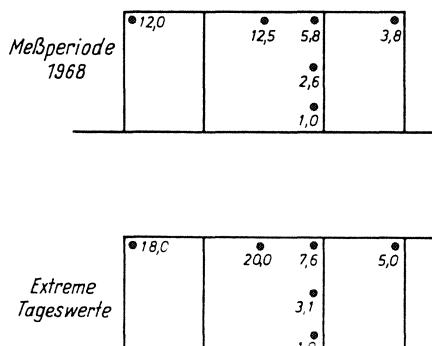


Bild 23: Darstellung der Schlagregenverteilung auf der Fassadenfläche durch Angabe der Verhältniszahlen der Schlagregenmengen, bezogen auf die vom untersten Meßgerät erfaßten Menge. [53]

oben: Werte der gesamten Meßperiode (47 Regentage)  
unten: Werte eines Tages mit extremem Schlagregen.

Zusammenfassend läßt sich aus den bisher nur in geringer Zahl vorliegenden Meßergebnissen der Schlagregenbeanspruchung von Fassaden entnehmen, daß die in Gebäuderandzonen auftretende, erhöhte Bean-

spruchung durch die Rückwirkung des Gebäudes auf die Umströmungsverhältnisse des Windes bedingt ist. Hierfür bietet die von Sexton [45] beobachtete Einschnürung der Stromlinien bei der Umströmung von Gebäuden eine gewisse Erklärung, wenn auch die hierbei aus Modellversuchen im Windkanal gewonnenen Erkenntnisse nicht ohne weiteres auf die im natürlichen Wind herrschenden Strömungsbedingungen übertragbar erscheinen.

Doch können offensichtlich auch unter den Bedingungen des natürlichen Windes die mitgeführten Tropfen wegen ihrer größeren Trägheitskraft der Windströmung nicht folgen und treffen so in dichterer Konzentration auf die kantennahen Randzonen einer Wand. Da hierbei die Geometrie eines Gebäudes eine bisher im einzelnen noch nicht geklärte Rolle spielt, sind weitere Untersuchungen erforderlich.

## 6. Prüfmethoden zur Feststellung der Schlagregendichtheit

Der Mangel an eingehenden theoretischen Kenntnissen über den durch Schlagregen verursachten Wassertransport in Wänden sowie die Schwierigkeiten, die sich der Erfassung der natürlichen Schlagregenbeanspruchung an Fassaden in der Praxis entgegenstellen, führten zur Entwicklung von Prüfmethoden, bei denen Wandelemente, Fugenausbildungen oder Fensterkonstruktionen in Laboratorien Beanspruchungen ausgesetzt werden können, die dem unter *natürlichem* Schlagregen auftretenden Einwirkungsarten möglichst nahe kommen sollen.

Im Zuge einer etwa 20jährigen Entwicklungsarbeit wurden von den mit Schlagregenproblemen befaßten Bauforschungsinstituten zahlreiche Prüfmethoden ausgearbeitet [17], [54], [55], [56], [57], [58], [59], die sich nach den beiden folgenden Prinzipien unterscheiden lassen:

Die „statische Waaserdurchlässigkeit-Prüfmethode“ (static water-leakage test method), die kürzlich von der American Society for Testing and Materials zur allgemeinen Anwendung empfohlen wurde [60], beruht auf dem Prinzip, die Wirkung des natürlichen Windes durch eine stationäre „statische“ Winddruckdifferenz zu simulieren, der die jeweils zu prüfende Konstruktion, gleichmäßig verteilt über die gesamte Oberfläche, von außen nach innen ausgesetzt wird. Die Größe des zur Anwendung kommenden Prüfdruckes hängt von den Anforderungen ab, die der Hersteller an die zu untersuchende Konstruktion stellt. Die Simulation des Regens wird dadurch erzielt, daß Wasser aus feststehenden Düsen senkrecht zur Oberfläche der Konstruktion gesprührt wird. Die Prüfdauer, innerhalb derer eine bestimmte Wassermenge (nach dem amerikanischen Vorschlag 200 l/m<sup>2</sup>h entsprechend einer Regenhöhe von 200 mm/h) zugeführt wird, wird mit 15 min als ausreichend angesehen, um undichte Stellen in Materialien

mit geringer Wasseraufnahmefähigkeit sichtbar werden zu lassen. Wegen der Unmöglichkeit, bei der vorliegenden Methode die Größe der Druckdifferenz zu variieren, kann die "statische Wasserdurchlässigkeitsprüfmethode" nur für die Untersuchungen solcher Konstruktionen als geeignet angesehen werden, bei denen von vornherein ihr Verhalten gegenüber dynamischen Windeinwirkungen als uninteressant angesehen werden kann.

Im Unterschied zu den mit statischen Druckdifferenzen arbeitenden statischen Prüfmethoden bedienen sich die „dynamischen Prüfverfahren“ einer variabel gestaltbaren Windbelastung, wobei mit Hilfe von Ventilatoren oder Flugzeugpropellern ein Luftstrom unterschiedlicher Stärke und wechselnder Richtung gegen das Prüfelement geführt wird. So wurde beispielsweise von der amerikanischen „National Association of Architectural Metal Manufacturers“ ein dynamisches Regensimulationsgerät entwickelt [61], bei dem es gelingt, eine gleichmäßige Beimischung des von Düsen eingespritzten Wassers zum Luftstrom zu erreichen. Außerdem lässt sich durch Änderung der Geschwindigkeit des Luftstromes eine gewisse Simulation der Böigkeit des natürlichen Windes erzielen.

Welche der beiden genannten Prüfmethoden vorzuziehen ist, muß aufgrund der individuellen Anforderungen entschieden werden, denen das zu prüfende Element unter den tatsächlichen Witterungsbedingungen ausgesetzt sein wird.

## 7. Zur Problematik von Schlagregengebieten

In zahlreichen europäischen Ländern wurden in neuerer Zeit Versuche unternommen, die Schlagregengefährdung einzelner Gebiete festzustellen und womöglich den Grad der Schlagregenbeanspruchung durch Angabe geeigneter Kennwerte zu charakterisieren. Das Ziel solcher Untersuchungen sollte sein, Bewertungsmaßstäbe für die Eignung von Außenwandkonstruktionen bei unterschiedlichen klimatischen Beanspruchungen zu schaffen.

Nach einem Vorschlag von Lacy und Shellard wurden 1962 in England – in Ermangelung ausreichender Meßergebnisse über die Schlagregenverhältnisse des Landes – die aus langjährigen meteorologischen Beobachtungen vorliegenden Meßwerte der jährlichen Niederschlagsmengen (Normalregen in m) und der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit (m/s) herangezogen, um aus diesen beiden Größen Aufschluß über die Schlagregenverhältnisse des Landes zu gewinnen [62]. Das Produkt dieser Werte (in  $m^2/s$ ) – „Schlagregen–Index“ genannt – wurde als kennzeichnende Größe zur Beurteilung der Schlagregenbeanspruchung für einen bestimmten Ort oder ein ganzes Gebiet empfohlen. Der Vorschlag schien aussichtsreich, da die beiden wichtigsten, den Schlagregen beeinflussenden Faktoren zu einer Kennzahl zusammengefaßt wurden. Entsprechend der Größe dieses Schlagregenindex wurde die folgende Ein-

teilung in Gebiete unterschiedlicher Schlagregenbeanspruchung vorgenommen:

- Index < 3: geschützte Lage (sheltered)
- Index 3 – 7: mittlere Beanspruchung (moderate)
- Index > 7: starke Beanspruchung (severe)

Unter Zugrundelegung dieses Vorschlages wurde in der Sitzung der Arbeitsgruppe „CIB Working Commission on Rain Penetration“ in Madrid 1966 die Ausarbeitung von Schlagregenkarten in Angriff genommen.

Die inzwischen aus einer Reihe europäischer Länder vorgelegten Untersuchungen zur Beurteilung der Schlagregenverhältnisse wurden von Künzel 1968 kritisch gesichtet [63]. Aus seiner Stellungnahme ergibt sich, daß der von Lacy und Shellard vorgeschlagene Index für die britischen Inseln und für Teile Skandinaviens ausreichende Aussagekraft besitzt und die in diesen Ländern gegebenen Schlagregenverhältnisse zutreffend wieder gibt. So lassen sich aus der von Lacy und Shellard für Großbritannien vorgelegten Schlagregen–Index–Karte [62] drei deutlich voneinander abgegrenzte, zusammenhängende Gebiete mit von West nach Ost abnehmenden Indexzahlen erkennen, die mit den auf den britischen Inseln gesammelten praktischen Erfahrungen hinsichtlich der tatsächlichen Beanspruchung durch Schlagregen relativ gut übereinstimmen.

Für Dänemark ist nach einer von Jessing [64] aufgestellten Schlagregen–Index–Karte in den Küstengebieten der Ost- und Nordsee eine mittlere Schlagregenbeanspruchung (Index 3 – 7) zu erwarten, während das Landesinnere (mit Indexzahlen <3) als geschützt gelten müßte. Nach den Untersuchungen Jessings wird in Dänemark nirgends ein Index >7 (starke Beanspruchung) errechnet, was in einem gewissen Widerspruch zu Beobachtungen über tatsächlich vorhandene extremere Beanspruchungen in einzelnen Gebieten des Landes steht.

Unter Anwendung des Lacy'schen Schlagregen–Index für Polen ergeben sich nach Untersuchungen Blociszewskis [65], die in 40 Orten mit einer Meereshöhe unter 600 m angestellt wurden, Indexzahlen zwischen 0,7 und 1,9, die praktisch das gesamte polnische Staatsgebiet – in teilweisem Widerspruch zur Wirklichkeit – als geschützt kennzeichnen würden. Lediglich in einzelnen Gebirgslagen über 1 000 m Seehöhe werden Indexwerte von 5 bis 7 erreicht. Auch für Polen beschreibt somit die Lacy'sche Schlagregen–Indexzahl die tatsächlichen Schlagregenverhältnisse nicht zutreffend.

Ähnliches gilt auch für Rumänien, wo Untersuchungen von Jonesen und Marcu [66] an 15 für die Schlagregenverhältnisse repräsentativen Orten des Landes mit Indexwerten zwischen 1,6 und 2,7 – im teilweisen Widerspruch zu Beobachtungen – eine Gesamtbeurteilung des Landes als „geschützt“ liefern.

Für Spanien liegen Ermittlungen des Schlagregen–Index von P. Avendano [67] für 14 Orte vor (mit Indexzahlen von 0,7 bis 6,5). Auch hier ist die sich daraus ergebende

Klassifizierung nicht als ausreichend und genügend zu treffend anzusehen, da nach praktischen Erfahrungen wesentlich stärkere Gegensätze hinsichtlich der Schlagregenbeanspruchung auftreten.

Für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland wurde von Caspar [68] eine Schlagregenkarte ausgearbeitet, die sich auf Niederschlagsmessungen eines vierzigjährigen Zeitraumes (1891 – 1930) und auf die Werte der mittleren Geschwindigkeit des Jahres 1943 stützt, dessen Windverhältnisse denen eines "Normaljahres" entsprechen. Die von Caspar vorgelegten Indexzahlen der BRD nehmen im allgemeinen von Süden nach Norden und mit der Seehöhe zu, wobei die Maxima (mit 15) in Gipfellagen des Schwarzwaldes und des Harzes auftreten und Minima (unter 1) in ausgeprägten Tallagen zu finden sind. Der größte Teil der Bundesrepublik mit Indexzahlen unter 3 müßte als "geschützt" gelten. Etwa ein Sechstel des Gebietes (Schleswig-Holstein, ein Nordseeküstenstreifen, Teile der Deutschen Mittelgebirge und des Alpenvorlandes) mit Indexzahlen zwischen 3 und 7 würde eine "mittlere" Schlagregenbeanspruchung erfahren und nur weniger als ein Zehntel des Bundesgebietes (Inselbezirke im Mittel- und Hochgebirge) mit Indexzahlen über 7 würde eine starke Beanspruchung aufweisen. Diese die tatsächlichen Schlagregenverhältnisse nur unzureichend beschreibenden Indexwerte veranlaßten Caspar, auf die Problematik der Index-Erfassung hinzuweisen, die darin besteht, daß zur Indexbildung das Gesamtjahresmittel der Windgeschwindigkeit herangezogen wird, wogegen ein auf die Niederschlagsdauer bezogenes Geschwindigkeitsmittel offensichtlich ein repräsentativerer Wert wäre, um die Schlagregenwirkung zu erfassen.

Für die DDR wurde 1970 von Eichler ein Vorschlag zur Einteilung in Schlagregengebiete vorgelegt [2], in dem Indexzahlen entsprechend den von Lacy und Shellard verwendeten Werten benutzt werden. Die vom Meteorologischen Institut der DDR vorgelegten Werte der Niederschlagsmengen und Windgeschwindigkeiten beziehen sich jedoch auf andere Zeiträume als die von Caspar für die BRD verwendeten Werte. Nach Eichler ergibt sich aufgrund dieser Meßwerte ein durch Indexziffern unter 4 gekennzeichnetes Schlagregengebiet "1", das sich über das zentrale mitteldeutsche Gebiet erstreckt und etwa 40 % des Staatsgebietes der DDR umfaßt. Es reicht von der Oder-Neiße-Linie im Osten bis zu den Ausläufern von Erzgebirge, Thüringer Wald und Harz im Süden und Südwesten, weiter bis etwa Magdeburg und endet im Norden bei Neubrandenburg und Stralsund. Dieses Gebiet müßte – analog zum Einteilungsmaßstab in der BRD – als "geschützt" angesprochen werden. Ein dieses Kerngebiet umschließendes, im Süden, Westen und Norden bis an die Landesgrenzen bzw. an die Küsten reichendes Schlagregengebiet "2" mit Indexziffern über 4 und unter 8 würde dieser "mittleren Beanspruchung" unterworfen sein. Und schließlich würde das nach Eichler als Schlag-

regengebiet "3" gekennzeichnete Gebiet (mit Indexziffern über 8), das flächenmäßig geringe Gipfellagen des Erzgebirges, des Thüringer Waldes und des Harzes umfaßt, einer "starken Beanspruchung" unterliegen. Die nach Eichler an die 3 Schlagregengebiete zu stellenden, den Schlagregenschutz betreffenden Forderungen, (von traditioneller Standardbauausführung bis zu hochwertigen schlagregensicheren Konstruktion) sind z. Zt. offensichtlich noch Gegenstand weiterer Untersuchungen, mit denen die zuständigen Behörden und Forschungsinstitutionen der DDR befaßt sind.

Eine kritische Bewertung der Schlagregen-Index-Zahlen nach Lacy und Shellard wird sich nicht der Einsicht verschließen können, daß sie in der vorliegenden Form noch keine ausreichende Grundlage liefern, um eine praktikable Darstellungsform der Schlagregenbeanspruchung geben zu können. Während sie für die britischen Inseln und für einen Teil der skandinavischen Länder brauchbare Unterlagen liefern, gewähren sie – wohl wegen der andersartigen klimatischen und topographischen Bedingungen – für mitteleuropäische Verhältnisse bisher keine befriedigenden Beurteilungsmaßstäbe. Es erscheinen daher weitere Untersuchungen und Überlegungen auf dem genannten Gebiet wünschenswert.

## 8. Praxis des Schlagregenschutzes

### 8.1 Regenschutz von Wänden

Prinzipiell kann der Regenschutz eines Gebäudes auf zwei Arten erzielt werden, die im englischsprachigen Schrifttum als "one stage seal" und "two stage seal" bezeichnet werden; zu deutsch etwa "einstufige Dichtung" und "zweistufige Dichtung".

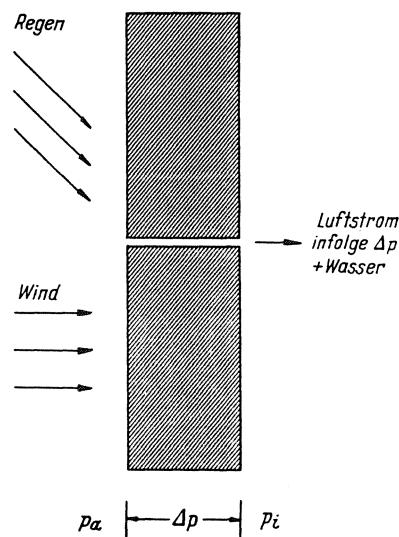


Bild 24: Schematische Darstellung einer nach dem Prinzip der einstufigen Dichtung aufgebauten Außenwand (nach Künzel [102]).

$p_a$ : Staudruck an der Wandaußenseite  
 $p_i$ : Druck im Innenraum

Bei der einstufigen Dichtung (Bild 24) sollen Regen- und Winddichtung von der äußersten Oberflächenschicht der Wand erbracht werden. Ist in diesem Fall eine durchgehende, nicht dichte Fuge oder ein Riß in der Wand vorhanden, dann kann bei Schlagregen von der "wasserführenden Oberfläche" mit dem Luftstrom infolge des gegebenen Druckgradienten Wasser nach innen geführt werden.

Bei der zweistufigen Dichtung hingegen liegen Regendichtung und Winddichtung in zwei verschiedenen Ebenen (Bild 25). Die Regendichtung – oder besser die regenabhaltende Schicht – wird durch eine vorgesetzte, hinterlüftete Schale erbracht. Durch die Hinterlüftung soll erreicht werden, daß bei Windanströmung vor der Schale und im Luftraum dahinter nur eine kleine Druckdifferenz auftritt. In diesem Falle kann bei Schlagregen praktisch kein Regenwasser über den Luftraum an die Oberfläche der inneren Schale gelangen; das Regenwasser läuft an der Außen- oder Innenseite der Vorsatzschicht ab. Befindet sich in der Innenschale, also der eigentlichen Wand, welche die Luftpichtung erbringen soll, eine Undichtheit (Fuge, Riß) dann kann hierdurch nur Luft, aber kein Regenwasser dringen. Je besser ein Druckausgleich zwischen dem Außenraum und dem Zwischenraum hinter der Außenschale möglich ist, desto besser funktioniert dieses Prinzip des Regenschutzes. Aus diesem Grunde werden außenseitige Plattenbekleidungen häufig mit offenen Fugen ausgeführt.

Beispiele für einstufige Dichtungen sind alle einschaligen Mauerwerksarten mit Verfugung oder Außenputz, einschalige vorgefertigte Wandplatten u. dgl. Zweischaliges, hinterlüftetes Mauerwerk oder Außenwände mit vor-

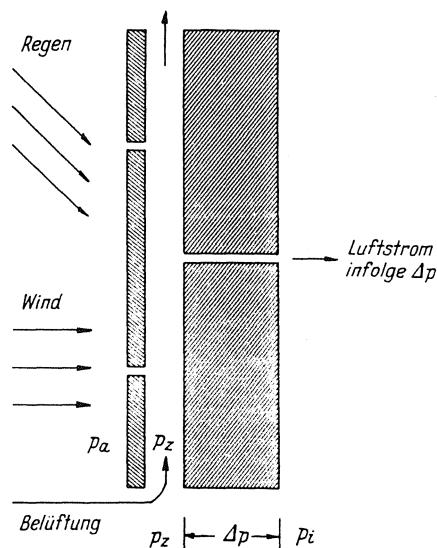


Bild 25: Schematische Darstellung einer nach dem Prinzip der zweistufigen Dichtung aufgebauten Außenwand (nach Künzel [102]).

- p<sub>a</sub>: Staudruck an der Außenwandseite
- p<sub>z</sub>: Staudruck im belüfteten Zwischenraum  
(bei starker Belüftung Differenz p<sub>a</sub>–p<sub>z</sub> klein)
- p<sub>i</sub>: Druck im Innenraum

gesetzten, hinterlüfteten Bekleidungen jeglicher Art zählen zu den zweistufigen Dichtungen.

Die Problematik offener Wandfugen gemäß Bild 25 und die Auswirkungen von Fugenbreite und Hinterlüftungsquerschnitt auf die Schlagregensicherheit solcher Wandkonstruktionen sind in Skandinavien und in Canada näher untersucht worden [69], [70], [71], [72], [73], [74], [75]. Hierbei ergab sich, daß "je nach der klimatischen Belastung" ein Offenlassen der Horizontal- und Vertikalfugen bis etwa 10 mm Fugenbreite empfohlen werden kann, wobei die Tiefe des Belüftungsquerschnittes hinter der Fassade an keiner Stelle des Wandbereiches den Wert von 2 cm unterschreiten sollte. Nur bei ausreichender Hinterlüftungstiefe und angemessener Fugenbreite sind bautechnisch und bauphysikalisch zufriedenstellende Lösungen von Vorhangsfassaden-Konstruktionen, die mit offener Fuge verlegt werden, zu erwarten [76].

Diese im Norwegischen Bauforschungsinstitut Trondheim gewonnenen Erkenntnisse wurden bestätigt und ergänzt durch Untersuchungen, die von Garden im National Research Council of Canada durchgeführt wurden [71], [72]. Hier wurde festgestellt, daß das richtige Funktionieren einer Vorhangsfassade bei Schlagregenbeanspruchung wesentlich davon abhängt, daß die Fugen durch die angemessene Wahl ihrer Breite, ihrer Anzahl und ihres Abstandes voneinander das Abrinnen von eingedrungenem Wasser aus dem hinterlüfteten Raum nach außen ermöglichen und für einen Druckausgleich zwischen Außenraum und hinterlüftetem Raum sorgen können.

Die in den zitierten Veröffentlichungen zum Thema der offenen Fugen anzutreffenden vagen Formulierungen lassen erkennen, daß auf diesem Gebiet allgemein gültige Hinweise noch nicht gegeben werden können. Konkrete Angaben darüber, was im Einzelfall "angemessen" ist, erfordern noch weitere Untersuchungen und Erfahrungen aus der Praxis [92], [94], [102].

Bei einschaligen Wänden (einstufige Dichtung) spielen Putz und Außenanstrich eine maßgebende Rolle zur Erzielung eines wirksamen Regenschutzes. Dies gilt insbesondere bei neuzeitlichen Wandbauarten von geringer Dicke, bei denen Putz und Anstrich – im Unterschied zu ihrer herkömmlichen, vorwiegend ästhetischen Aufgabe – nun die wichtige Funktion des Regenschutzes zu übernehmen haben. Hier ist insbesondere an die in der Freilandversuchsstelle Holzkirchen des Instituts für Bauphysik durchgeföhrten Untersuchungen Künzels [77], [78], [79], [80] zu erinnern, in denen über die Eigenschaften von Außenputzen und wasserabweisenden Zusätzen oder wasserabweisenden Anstrichen berichtet wird. In umfangreichen Versuchsreihen wurden hierbei die an verputzten und unverputzten Wänden auftretenden Werte der Wasseraufnahme bei Beregnung und der Wasserabgabe in den Trocknungsperioden untersucht. Außerdem wurden an Proben im Labor der Wasseereindring-Koeffizient A [kg/m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup>] und die diffusions-

äquivalente Luftschichtdicke  $\mu_s$  [m] der Putze bzw. Beschichtungen ermittelt. Aus diesen Untersuchungen ließen sich Anforderungen ableiten, die an Außenputze und Anstriche zu stellen sind, damit auch bei extremer Beanspruchung ein ausreichender Regenschutz gewährleistet ist.

Diese Anforderungen sind:

1. Die Wasseraufnahme darf nicht zu groß sein:  
Wassereindringkoeffizient  $A \leq 0,5 \text{ kg/m}^2 \text{h}^{0,5}$
2. Die Wasserdampf-Durchlässigkeit darf nicht zu klein sein:  $1/\mu_s \geq 0,5 \text{ m}^{-1}$
3. Die Wasserdampf-Durchlässigkeit muß in einer bestimmten Relation zum Wassereindringkoeffizienten stehen:  $1/\mu_s \geq 10 \text{ m h}^{0,5}/\text{kg}$

Ein Beispiel dafür, wie wirksam der Regenschutz eines Außenputzes ist, der diese Anforderungen erfüllt, geben die in Bild 26 dargestellten Meßergebnisse.

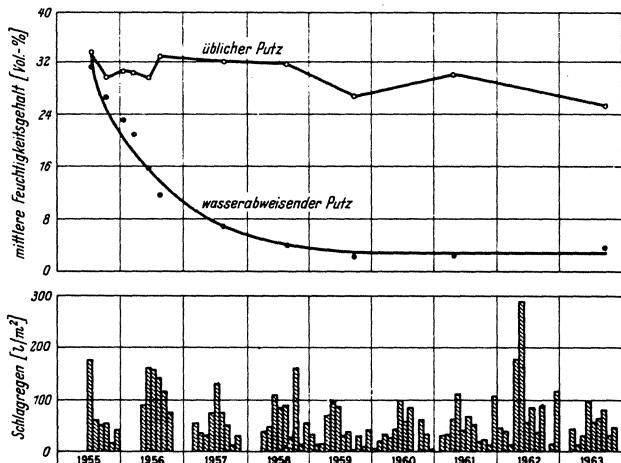


Bild 26: Zeitliche Verläufe der mittleren Feuchtigkeit der Westwand eines Gebäudes aus Gasbeton auf dem Versuchsgelände Holzkirchen. Die häufig beregnete Wand (siehe Schlagregenmengen) war zur Hälfte mit einem üblichen Kalkzementputz versehen, zur anderen Hälfte mit einem Außenputz mit wasserabweisendem Zusatzmittel. Im letzteren Fall trocknete die Wand trotz der Beregnung aus und erreichte einen niedrigen, konstant bleibenden Feuchtigkeitsgehalt. [51]

## 8.2 Schlagregenschutz bei Fugenausbildungen

Neuartige Probleme des Schlagregenschutzes traten im Zuge der Entwicklung der Fertigbauweise auf, die eine einwandfreie Ausbildung der zwischen großformatigen Wandplatten gegebenen horizontalen und vertikalen Fugen erforderlich macht.

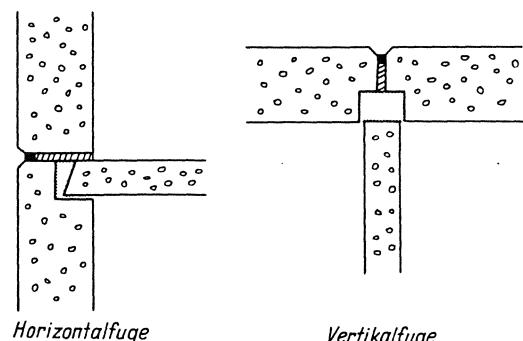
An Fugen der genannten Art sind die folgenden beiden Anforderungen zu stellen:

1. Sie müssen regen- und winddicht sein.
2. Sie müssen die Bewegungen der Wandplatten, bedingt durch Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen ausgleichen.

Um dies zu erreichen, erfolgte die Entwicklung in der Technik der Fugenausbildung in verschiedenen Richtungen.

Einmal hat sich die chemische Industrie bemüht, Fugenmassen zur Dichtung von Fugen ständig zu verbessern. Zum anderen wurden Lösungen gesucht, die darauf abzielten, durch eine geeignete konstruktive Ausbildung der Fugen regendichte Fassaden ohne absolute Dichtung der Fugen auf der Außenseite zu erzielen (vergl. Abschnitt 8.1, offene Fugen). Über den derzeitigen Stand der Entwicklung auf diesem Gebiet konnte anlässlich des CIB-Symposiums "Weathertight Joints for Walls", das im September 1967 in Oslo stattfand, ein guter Überblick gewonnen werden [69], [70], [71[72]], [73], [74], [75].

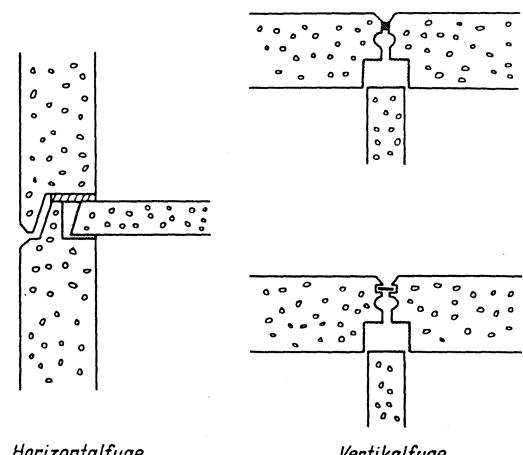
Bild 27 zeigt eine einstufige Fugendichtung. Hier werden Regen- und Winddichtung in "einer Stufe" erzielt, nämlich durch die Dichtungsmasse, die außenseitig in die Fuge eingebracht wird. Der Regenschutz hängt damit von der Qualität und Dauerhaftigkeit dieser Verfugung ab. Tritt eine Undichtheit in der Verfugung auf, dann ist mit einer Feuchtigkeitseindringung nach innen zu rechnen. Bei der zweistufigen Fugendichtung (Bild 28) folgt



Horizontalfuge

Vertikalfuge

Bild 27: Schematische Darstellung einer nach dem Prinzip der einstufigen Dichtung aufgebauten Horizontal- und Vertikalfuge (nach Künzel [102])



Horizontalfuge

Vertikalfuge

Bild 28: Schematische Darstellung einer nach dem Prinzip der zweistufigen Dichtung aufgebauten Horizontal- und Vertikalfuge (nach Künzel [102])

nach der außenseitigen Verfugung ein "Druckausgleichsräum", der mit der Außenluft über die offenen Horizontalfugen Verbindung hat. Damit entsteht bei Windanströmung kein nennenswertes Druckgefälle über den Bereich der Verfugung, so daß auch keine nennenswerte Wassereindringung zu erwarten ist. Statt durch eine Fugenmasse kann die äußere "Regenbremse" auch durch ein eingeschobenes Kunststoffband – bei entsprechender Profilierung der Platten – erzielt werden. Ein solches Band wird in Skandinavien z.T. perforiert, um die Möglichkeit des Druckausgleiches zwischen außen und dem Fugenausgleich zu erhöhen [92]. Allenfalls eindringendes Wasser läuft in dem verbreiterten Fugenraum ab und wird über die offene Horizontalfuge nach außen geführt. Die offene Horizontalfuge muß so ausgebildet sein, daß eine Regenschwelle von 7 – 10 cm vorhanden ist, die das Eindringen von Wasser nach innen verhindert. Diese Art der zweistufigen Fugendichtung – verständlicherweise auch als belüftete Fuge bezeichnet – bietet bei richtiger Ausführung einen sicheren und dauerhaften Regenschutz.

### 8.3 Schlagregenschutz bei Fenstern

Die in den Abschnitten 8.1 und 8.2 skizzierten Möglichkeiten einer ein- oder zweistufigen Ausbildung einer Fugendichtung bestehen grundsätzlich auch bei der schlagregensicheren Ausführung von Fensterkonstruktionen. Nach der von Garden [14], [81], Sasaki [54], [82], Dagliesch [83] und anderen Autoren [84], [85], [86], [87], [88] vorgelegten Untersuchungsergebnissen sind für die Gewährleistung eines wirksamen Schlagregenschutzes von Fenstern folgende spezielle Gegebenheiten zu berücksichtigen:

Eine gegen Schlagregen wirksame einstufige Ausführung einer Fensterdichtung ist nur dann zu erreichen, wenn die Gewähr besteht, daß die Fugenausbildung vollkommen luftdicht bleibt, weil ansonsten infolge der unvermeidlichen Benetzung der Fuge ein durch diese Druckdifferenz bedingter Wassertransport einsetzen würde. Da nach den vorliegenden Erfahrungen die bei modernen Fensterkonstruktionen zur Anwendung kommenden Kittmassen einem gewissen Verschleiß unterliegen und zudem natürliche Alterserscheinungen aufweisen, erscheint die einstufige Fugendichtung bei Fenstern nur für Schlagregenbeanspruchungen geringeren Ausmaßes empfehlenswert.

Bei den zweistufigen Fensterfugen-Ausbildungen (Bild 29), die vor allem bei extremen Werten der Schlagregenbeanspruchung zunehmend an Bedeutung gewinnen, wird in der Regel der luftdichte Abschluß an der Innenseite der Fuge angeordnet und durch Anbringen eines Profilbandes vor Benetzung geschützt. Auch hier trennt – wie bei den Wandfugen-Ausbildungen – ein Luftraum die beiden Stufen der Dichtung. Da auf diese Weise ein Feuchtwerden der "Winddichtung" vermieden wird, können selbst gewisse Unvollkommen-

heiten dieser Dichtung ohne Gefahr für das Eindringen von Wasser hingenommen werden. Auch die Wirksamkeit der außenliegenden "Regendichtung" kann dadurch weitgehend verbessert werden, daß sie keiner ins Gewicht fallenden Druckdifferenz ausgesetzt ist. Dies wird durch Anbringen von Druckausgleichsöffnungen zwischen dem Luftspalt und dem Außenraum erreicht, bei deren Anzahl, Öffnungsweiten und Verteilung über die Fugenlänge Bedacht darauf zu nehmen ist, daß auch bei pulsierender Druckdifferenz ein ausreichender Druckausgleich gewährleistet werden kann. Probleme des Druckausgleiches in zweistufigen Fugenausbildungen sowohl bei Fenstern als auch bei großformatigen Wandplatten sind Gegenstand von Untersuchungen, die z.Zt. in verschiedenen Bauforschungsinstituten durchgeführt werden, wobei Fragen der Böigkeit des natürlichen Windes sowie der Verteilung der Druckdifferenzen über die Gebäudeoberflächen eine wichtige Rolle spielen.

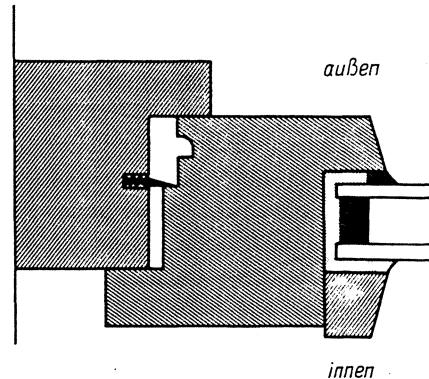


Bild 29: Zweistufige Dichtung einer Fuge zwischen Fensterflügel und Blendrahmen (nach Künzel [102])

Die bisher in der Bundesrepublik Deutschland gewonnenen Erkenntnisse zur Frage des Schlagregenschutzes bei Fenstern haben einen ersten Niederschlag in der Norm DIN 18055 [89] (Fenster, Fugendurchlässigkeit und Schlagregensicherheit, Ausgabe 1971) gefunden. In ihr werden unter Zugrundelegung bestimmter Werte von Gebäudehöhe und Windstärke vier Beanspruchungen von Fenstern bezüglich ihrer Schlagregensicherheit und Fugendurchlässigkeit nominiert. Mit der Ermittlung der Beanspruchungsgruppen ist die Möglichkeit gegeben, eine präzise Forderung an die Funktion eines Fensters hinsichtlich seines Schlagregenschutzes zu stellen.

### 9. Zusammenfassung und Folgerungen

Der aus der vorliegenden Arbeit gewonnene Überblick über die Beanspruchung von Gebäudefassaden durch Regen und Wind stützt sich auf die kritische Sichtung und Bearbeitung der einschlägigen, internationalen Literatur der letzten Jahrzehnte, eines Zeitraumes, der durch die Entwicklung neuartiger Wand- und Fassaden-Konstruktionen gekennzeichnet ist. Bei diesen Bauarten haben Fragen des Schlagregenschutzes erhöhte Bedeutung gewonnen, da deren erfolgreiche Lösung als Voraussetzung für die Gewährleistung der erforderlichen

Wärmedämmung der Außenwandkonstruktion zu betrachten ist.

Die im Wort "Schlagregen" oder in dem englischen Synonym "Driving Rain" zum Ausdruck kommende gegenseitige Verflechtung und Wechselwirkung der Einflußgrößen Regen und Wind machten es notwendig, neben einer eingehenderen Behandlung der Abhängigkeit des Schlagregens von Lage, Form und Art der Gebäude (Kap. 2 und 3), den aerodynamischen Fragen der Windeinwirkung besonderes Augenmerk zu schenken (Kap. 4). Gerade die Durchsicht und Wertung der auf dem Gebiet der Windeinwirkung auf Fassaden vorhandenen, zahlreichen Literatur machte es deutlich, daß von den genannten Einflußgrößen die Windprobleme als wesentlich eingehender erforscht und erfaßt gelten können, wogegen Fragen der eigentlichen Schlagregenbeanspruchung eines gründlichen weiteren Studiums bedürfen. Bereits vorliegende Erkenntnisse, insbesondere die Fragen der Meßpraxis des Schlagregens (Kap. 5), von Labor-Prüfmethoden (Kap. 6) und zur Problematik von Schlagregengebieten (Kap. 7) werden näher erläutert und in einem abschließenden Kapitel wird auf die Praxis des Schlagregenschutzes eingegangen.

Als Folgerung aus den entstehenden Fragen ergibt sich die Notwendigkeit, auf eine Klassifizierung der Bauarten (Wände, Fugenausbildung, Fenster) hinsichtlich ihrer Schlagregensicherheit hinzuarbeiten, wobei sich eine Gliederung in drei Beanspruchungsgruppen (Schlagregenbeanspruchung) als sinnvoll erweisen wird.

Während aufgrund der vorliegenden Forschungsergebnisse eine brauchbare Beurteilung von Außenputzen und Außenanstrichen hinsichtlich ihres Schlagregenschutzes bereits praktikabel erscheint, sind weitere Untersuchungen erforderlich, um auch eine Bewertung verschiedener Fugenausbildungen ermöglichen zu können. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der konstruktiven Erfordernisse bei belüfteten Fugen sowie im Hinblick auf Wandbekleidungen mit offenen Fugen und für spezielle Fassadenkonstruktionen.

## Literatur

- [1] CIB Report No 11. Norwegian Building Research Institute Oslo 1968
- [2] Eichler, F.: Schlagregen und seine Auswirkungen, Stadt- und Gebäudetechnik 1970, Nr. 6. S. 145–147. Nr. 7 S. 176–179
- [3] Künzel, H. und Schwarz, B.: Die Feuchtigkeitsaufnahme von Baustoffen bei Beregnung. Berichte aus der Bauforschung, Heft 51, S. 99–113, W. Ernst u. Sohn, Berlin 1968
- [4] Lacy, R. E.: Driving-Rain Maps and the Onslaught of Rain on Buildings, CIB Symposium, Helsinki 1965
- [5] Grunow, J.: Variation der Niederschlagsstruktur im Alpenvorland. Geofisica e Meteorologia, Genoa 1963, Vol. XI, S. 143–147
- [6] Grunow, J.: Investigations on the Structure of Precipitation, Deutscher Wetterdienst, Hohenpeißenberg 1961
- [7] Hader, F.: Schlagregen, Triebschnee und Starkniederschlag, Eternit 29, Zeitschrift der Eternitwerke 1966. Nr. 8 S. 10–16
- [8] Birkeland, O.: Weather-tightness of Walls of Light Components, International Council for Building Research, 5. Congress Paris 1971. Research into Practice, the Challenge of Application S. 473–476
- [9] Birkeland, O.: Curtain Walls, Norwegian Building Research Institute, Oslo 1962
- [10] Ritchie, T. and Davison, J. D.: The Wetting of Walls by Rain, Nat. Research Council of Canada, Ottawa 1969, Intern. Report No 367
- [11] Sasaki, I. R.: Testing Building Enclosure Elements for Rain Penetration, Nat. Research Council of Canada, Ottawa 1971
- [12] Isaksen, T.: Rain Penetration in Joints, Influence of Dimensions and Shape Joints on Rain Penetration, Rilem-CIB Symposium, Helsinki 1965
- [13] Isaksen, T.: Driving Rain on Joints, Norwegian Building Research Institute, Oslo 1970, Report to CIB Committee No W 11
- [14] Garden, G. K.: Rain Penetration and its Control, Canadian Digest, CBD 40, Ottawa 1963
- [15] Isaksen, T.: Wind-driven Rain and the Forming of Joints between Concrete Elements, Oslo 1966
- [16] Harrison, H. W. and Bonshor, R. B.: Weather-proofing of Joints: A Systematic Approach to Design, Building Research Station Garston, 1970
- [17] Sasaki, J. R.: Evaluating the Rain-Tightness of Joints between Exterior Wall Components, International Council for Building Research, 5. Congress Paris 1971, Research into Practise, The Challenge of Application, S. 485–487
- [18] Isaksen, T.: Driving Rain and Joints between Elements, CIB Rain Penetration Group, Munich 1968
- [19] Karpati, K. K. and Gibbons, E. V.: Experimental Prediction of Joint Movement in Building, National Research Council of Canada, Ottawa 1970
- [20] Hutcheon, N. B.: Requirements for Exterior Walls, Canadian Digest, CBD 48, Ottawa 1970
- [21] Tveit, A.: Moisture Absorption, Penetration and Transfer in Building Structures, WMO, Proceedings of the Symposium on Urban Climates and Building Climatology, Brussels 1968, Technical Note 109, S. 151–158
- [22] Boyd, D. W.: The Effect of Precipitation on the Design of Buildings, WMO, Proceedings of the Symposium on Urban Climates and Building Climatology, Brussels 1968, Technical Note 109, S. 121–128

- [23] Lusch, G. und Truckenbrodt, E.: Windkräfte an Bauwerken, Berichte aus der Bauforschung, Heft 41, W. Ernst u. Sohn, Berlin 1964
- [24] Davenport, A. G.: The Dependence of Wind Loads on Meteorological Parameters, Intern. Res. Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures, Proceedings, Vol. I Toronto, 1968
- [25] Davenport, A. G.: The Spectrum of Horizontal Gustiness near the Ground in High Winds, Quart. J. R. Met. Soc. Vol. 87 (1961) S. 194–211
- [26] Davenport, A. G.: Rationale for Determining Design Wind Velocities, Nat. Res. Council Canada, Res. Paper No 111, (1960)
- [27] Davenport, A. G.: The Application of Statistical Concepts to the Wind loading of Structures, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 19 (1961)
- [28] Van der Hoven, L.: Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0,0007 to 900 Cycles per Hour. J. Meteor. 1957, 14, 160
- [29] Berman, S.: Estimating the Longitudinal Wind Spectrum near the Ground, Quart. J. R. M. Met. Soc. Vol. 91 (1965) S. 302–317
- [30] Klug, W.: Zum vertikalen Windprofil, Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Bd. 36, S. 226–253 (1963)
- [31] Klug, W.: Zur Statistik der Böigkeit des Windes, Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Wien, Ser. A. Bd. 14 (1964/65) H. 3, S. 300–305
- [32] Newberry, C. W., Eaton, K. J. and Mayne, J. R.: The Nature of Gust Loading on Tall Buildings, Building Research Station Ottawa 1967
- [33] Schriever, W. R. and Dalglish, W. A.: Recent Research on Wind Forces on Tall Buildings, National Research Council Canada Ottawa 1969
- [34] Building Research Station Garston: Wind Loading on Buildings Dig. No 99, 101, 105, (1968/69)
- [35] Jones, M. E.: Wind Turbulence and Buildings, Building Research Station Garston, C.P. 85/86
- [36] Lange, F. und Frimberger, R.: Bericht über die Auswertung des neueren Schrifttums auf dem Gebiete der äußeren Aerodynamik der Bauwerke, Inst. f. Strömungsmechanik TH München 1970
- [37] König, G. und Zilch, K.: Zur Windwirkung auf Gebäude, Beton- und Stahlbetonbau 1972. Nr. 2 S. 32–42
- [38] Panofsky, H. A. and Mc Cormick, R. A.: The spectrum of Vertical Velocity near the Surface, Quart. J. R. Met. Soc. 1960. 86
- [39] Lettau, H. H.: Wind Profile Surface Stress and Geostrophic Drag Coefficients in the Almospheric Surface Layer. Advances in Geophysics, Acad. Press, New York 1959
- [40] Singer, J. A.: A Study of the Wind Profile in the Lowest 400 Feet of the Atmosphere. Progr. Rep. No 5 and No 9. 1960–61, Brookhaven National Laboratory, Long Island USA
- [41] Caspar, W.: Zur Sturmverteilung in der Bundesrepublik Deutschland. Der Maschinenbau 1958, Nr. 10/11. S. 122
- [42] Draft British Standard Code of Practice for Loading, Wind Loads, British Standard Institution 1968
- [43] Caspar, W.: Maximale Windgeschwindigkeiten in der Bundesrepublik Deutschland. Die Bautechnik 1970. Nr. 10. S. 335
- [44] Newberry, C. W., Eaton, K. J. and Mayne, I. R.: Wind Loading on a Tall Building in an Urban Environment. Building Research Station Garston, C.P. 59/68 (1968)
- [45] Sexton, D. E.: Building Aerodynamics, Building Research Station Garston, C.P. 64/68
- [46] National Physikal Laboratory, Wind Effects on Buildings and Structures, Vols. I and II, Symposium No 16, 1965
- [47] Joubert, P. N., Stevens, L. K., Good, M. C., Hoffmann, E. R. and Perry, A. E.: The Drag of Bluff Bodies Immersed in a Turbulent Boundary Layer, Proceedings of the International Research Seminar on Wind Effects on Buildings and Structures, Ottawa 1967
- [48] Van Koten, H.: Some Measurements on Tall Buildings in the Netherlands, (ebenda)
- [49] Dalglish, W. A., Wright, W. and Schriever, W. R. Wind Pressure Measurements on a Full-Scale High-Rise Office Building (ebenda)
- [50] Wise, A. F. W.: Wind Effects due to Groups of Buildings, Research Station Garston, CP 23/70 1970
- [51] Künzel, H.: Schlagregenschutz von Gebäuden, im Jahrbuch der Fraunhofer-Gesellschaft München, 70/71. S. 97–104
- [52] Ryd, H.: Research in Building Climatology with Special Reference to the Problem of Snow and Rain in Connection with Wind. CIB-Symposium Klimatologie und Bauwesen, Wien 1970. S. 162–177
- [53] Künzel, H., Frank, W. und Schwarz, B.: Schlagregen – Wandfeuchtigkeit – Wärmeverbrauch, Bericht an das Bundesministerium für Städtebau u. Wohnungswesen. B. Ho 10/71 1971
- [54] Sasaki, J. R.: Guide Lines for Designing Weather-tight Windows, Nat. Research Council of Canada, Ottawa 1971
- [55] Norwegian Building Research Institute, Joints in External Walls, Oslo 1966
- [56] Hayman, F.: Insulating Facades, National Swedish Building Research 1968

- [57] Birkeland, O.: Climatological Data for Assessment of Rain Penetration, CIB-Bulletin 1966, No 3
- [58] Birkeland, O.: The Design of Multi-Layer Walls, Norwegian Building Research Institute Oslo, Rep. No 24 (1957)
- [59] Hoppestad, S.: Slagregn i Norge. Norges Byggforskningsinstitut Oslo, Rapport Nr. 13 (1955)
- [60] Tentative Test Method for Water Resistance of Windows by Uniform, Static Air Pressure Difference, Amer. Soc. f. Test. and Materials. E 331, 1967
- [61] Methods of Test for Metal Curtain-Walls, Nation. Association of Architectural Metal Manufacturers TM – 1 – 68 T, 1968
- [62] Lacy, R. E. and Shellard, H. C.: An Index of Driving Rain, Meteor. Magazine, Vol. 91. 1962. S. 177–184
- [63] Künzel, H.: Zur Frage der Beurteilung der Schlagregenbeanspruchung in einzelnen Gebieten u. Ländern, Ber. a. d. Bundesministerium für Wohnungswesen und Städtebau, 1966
- [64] Jessing, J.: An Index of Driving Rain in Denmark, CIB Working Commission on Rain Penetration, Madrid 1966, (ebenda)
- [65] Blociszewski, S.: Driving Rain in Poland, 1966, (ebenda)
- [66] Jonesen, C. and Marcu, J.: Some Aspects on the Rain Penetration Problem through the Building Walls in Rumania, 1966, (ebenda)
- [67] Avendano, P.: Present State of EXCO's Research on Rain Penetration of Buildings. 1966 (ebenda)
- [68] Caspar, W.: Schlagregen-Index-Karte für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland, 1966, (ebenda)
- [69] Gjelsvik, T.: Design of Joints with Building Sealants, Norwegian Building Research Institute, Rep. 51C, (CIB-Rep. No 11), 1968
- [70] Svendsen, S. D.: The Principles of One-Stage and Two-Stage Seals (ebenda)
- [71] Garden, G. K.: Sensible Use of Sealants (ebenda)
- [72] Garden, G. K.: Some Experience with Joints (ebenda)
- [73] Isaksen, T.: Rain Leakage Tests on Through-Joints (ebenda)
- [74] Munch-Petersen, J. F.: Facade-Joints in Danish Precast Housing (ebenda)
- [75] Stubbs, K. E.: Why we have changed our approach to joint-design (ebenda)
- [76] Sellentin, R.: Asbestzement-Fassadenplatten-Verlegung mit offener Fuge? Sonderdruck aus: Deutsches Dachdecker-Handwerk, Eternit AG. Berlin 1968
- [77] Künzel, H.: Feuchtigkeitstechnische Untersuchungen in Zusammenhang mit Anstrichen auf Außenputz. Zement-Kalk-Gips 19 (1966) Nr. 1. S. 17–29
- [78] Künzel, H.: Untersuchungen über die Feuchtigkeitsverhältnisse in häufig beregneten Außenwänden, Ges.-Ing. 85 (1964) Nr. 9, S. 274–280
- [79] Künzel, H.: Untersuchungen über das feuchtigkeitstechnische Verhalten von Außenanstrichen- u. -Beschichtungen auf Gasbeton bei natürlicher Bewitterung, Betonstein-Zeitung 32 (1966) Nr. 1. S. 26–34
- [80] Künzel, H.: Anforderungen an Außenanstriche und Beschichtungen aus Kunstharzdispersionen, KIB Kunststoff im Bau. 1968/69 Nr. 12, S. 26–32
- [81] Garden, G. K.: Glazing Design, Nat. Research Council of Canada, Canadian Building Digest, CBD 55, Ottawa 1964
- [82] Sasaki, I. R.: Thermal Breakage Potential of Sealed Glazing Units, Nat. Research Council of Canada, Res. Paper No 491, Ottawa 1971
- [83] Dalgliesh, W. A. and Garden, G. K.: Influence of Wind Pressures on Joint Performance, Nat. Research Council of Canada, NRC 9873, Ottawa 1967
- [84] Van As, W.: Rain Penetration through Window, Joints, Norwegian Building Research Institute Rep. 51C (CIB-Rep. No 11) 1968
- [85] Van As, W.: Investigations into the Possibilities of Improving Rain-tightness of Wooden Windows, Doors and Frames in Brichwork (ebenda)
- [86] Bakke, B. and Knay, A.: Weathertight Joints. A Valuation of the Problems in Connection with the Installation of Glass (ebenda)
- [87] Gubas, G. A.: Experiance in the Promotion and Application of the "open Joint" Technique for Wall Cladding in United Kingdom (ebenda)
- [88] Isaksen, T.: Rain Leakage Tests on Open Joints in Ventilated Claddings (ebenda)
- [89] DIN 18 055
- [90] Davenport, A. G.: The Relationship of Wind Structure to Wind Loading, Symposium on Wind Effects on Building and Structures, Loughborrough University of Technology, Nat. Phys. Lab. Royal Aeronaut. Soc. 1968, Paper 2
- [91] Halasz, R. u. Tantow, G.: Großtafelbauten, Bauingenieur-Praxis, Heft 55, W. Ernst u. Sohn, Berlin 1966
- [92] Tamura, G. T. and Wilson, A. G.: Pressure Differences Caused by Wind on Two Tall Buildings, Nat. Research Council of Canada, NRC 10 628, 1968
- [93] Olgyay, V.: Windwirkungen und Strömungsbilder Bauwelt 1969, Nr. 19. S. 657

- [94] Christensen, G.: Future Work of CIB W 11. CIB W 11. CIB. Commission Göteborg 1970
- [95] Alkinsen, B. W.: The Reality of the Urban Effect on Precipitation, WMO, Proceedings of the Symposium on Urban Climates and Building Climatology, Brussels 1968, Techn. Note 109. S. 342
- [96] Olenko, L. R.: Wind and its Technical Aspects (ebenda) Techn. Note 108. S.37
- [97] Zeller, E.: Effects dynamiques du vent sur un batiment eleve, Construction Metallique no 1, 1971
- [98] Manuzio, C. et Zeller, E.: Structure du vent et effects sur un batiment a etages, Annales de l'institute technique du batiment et de travaux publies no 278, 1971
- [99] Atlas, D.: (et allii): Precipitation – Induced Mesoscale Wind Perturbations in the Melting Layer. Quart. Journ. Royal Met. Soc. (1969) 95, S. 544–560
- [100] Dezsö Szepesi: Zur Bestimmung des Windprofiles der unteren Luftschicht. Z. f. Meteorologie, Berlin 20(1968). Nr. 1–6, S. 88–93
- [101] Eaton, K. J.: Wind Loading on Low-rise Buildings. Building 1970, 37. S. 135–136
- [102] Künzel, H.: Wand und Fuge unter dem Gesichtspunkt des Regenschutzes, Bundesbaublatt 1972, Nr. 7.