

Belastung von Rauchabzügen bei Windangriff

H. J. Gerhardt, C. Kramer

1. Einleitung

Rauchabzüge (RA) werden hauptsächlich unter dem Gesichtspunkt der Funktionssicherheit und möglichst großen aerodynamischen Wirksamkeit entwickelt. Demgegenüber wird häufig die Standsicherheit von RA und deren Bestandteilen unter Windangriff kaum oder nur nachrangig berücksichtigt. Dies gilt übrigens auch dort, wo derlei Geräte für eine Normalbelüftung von Hallen eingebaut wurden.

Gerade auf hohen Flachbauten in exponierter Lage, z. B. auf den Dachflächen von Flugzeughallen und Hochregallagern konnten jedoch in den vergangenen Jahren zahlreiche Schäden an Lichtkuppel-RA und insbesondere an deren Windleitwänden beobachtet werden. Ein wesentlicher Grund für die mangelnde Standsicherheit ist das Fehlen verlässlicher Windlastannahmen für RA auf flachen und wenig geneigten Dachflächen. Während in der Norm DIN 1055 Teil 4 „Lastannahmen für Bauten; Verkehrslasten, Windlasten nicht schwingungsanfälliger Bauwerke“ Angaben über die anzunehmenden Windlasten auf quaderförmigen Baukörpern mit flachen und wenig geneigten Dachflächen zu finden sind, fehlten solche Informationen über Windlasten von RA auf derartigen Dachflächen völlig.

Ferner geht die Windlastvorschrift von quasistatischen Belastungen für nicht schwingungsgefährdete Bauwerke aus. Dagegen sind übliche Windleitwände von Lichtkuppel-RA infolge ihrer geringen Steifigkeit und niedrigen Dämpfung in hohem Maße dynamischen Belastungen mit einer Vielzahl von Lastwechseln ausgesetzt. Angaben über die Dynamik der Belastung sind für Bauteile auf Flachdächern kaum bekannt und natürlich auch nicht in den einschlägigen Fachregeln zu finden. Auch die Angabe einer dynamischen Ersatzlast, die im übrigen weder in den einschlägigen Windlastvorschriften noch in der Literatur zu finden ist, würde dem Konstrukteur kaum hel-

fen, da eine kostengünstige Konstruktion der Windleitwandbefestigung Informationen über das zu erwartende Windlastkollektiv voraussetzt.

Im folgenden sollen zunächst typische Schäden an Lichtkuppel-RA analysiert werden. Danach werden Angaben zur quasistatischen Windbelastung von RA und zu den von schwingungsgefährdeten Komponenten des RA aufzunehmenden Windlastschwankungen gemacht und mit den Angaben der DIN 18 232 Teil 3 „Rauchabzüge – Prüfungen“ verglichen. Schließlich werden aus den mitgeteilten Angaben Schlußfolgerungen gezogen, die dem Anwender helfen sollen, Schwierigkeiten zu vermeiden, und die dem Konstrukteur dringend erforderliche Informationen zur betriebsfesten Dimensionierung schwingungsanfälliger Bauteile von RA an die Hand geben.

2. Analyse typischer Schäden an Lichtkuppel-RA

2.1 Schäden an RA-Kuppeln und -Kränzen

Schäden an RA-Kuppeln und -Kränzen werden fast ausnahmslos in randnahen Bereichen der Dachfläche beobachtet. Typische Schäden treten durch Herausreißen der Kuppel an den Scharnierpunkten oder an den diesen gegenüberliegenden Verschlussvorrichtungen auf. Falls die Verschlüsselemente und Scharniere hinreichend stark dimensioniert sind, kann es auch zu Beschädigungen der Aufsetzkränze kommen. Dagegen konnte bisher kein Lösen des Flansches von der Unterkonstruktion beobachtet werden. Als kritische Stellen von Lichtkuppel-RA unter großer Windbelastung müssen daher die Scharniere und Verschlüsselemente angesehen werden.

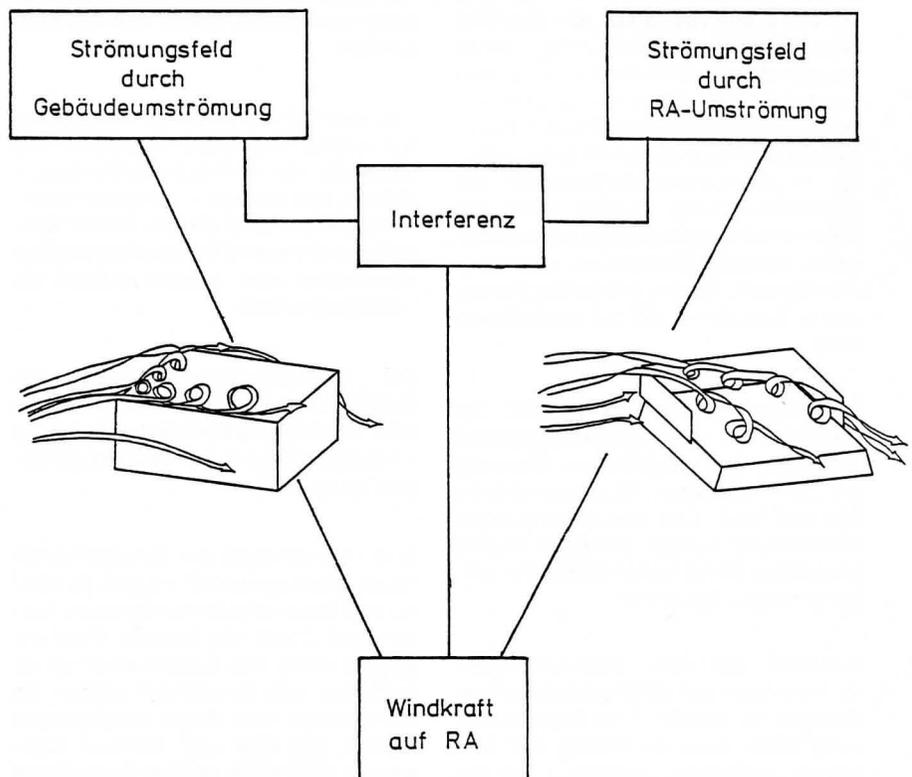


Bild 1. Schematische Darstellung der Haupteinflüsse der Windkraft auf ein RA.

Prof. Dr.-Ing. Carl Kramer,
Prof. H.-J. Gerhardt, M. Sc.,
Fachhochschule Aachen

Das Thema wurde von den Verfassern auch im Zentralblatt für Industriebau Heft 3/Mai 84 – Vincentz-Verlag Hannover – behandelt.

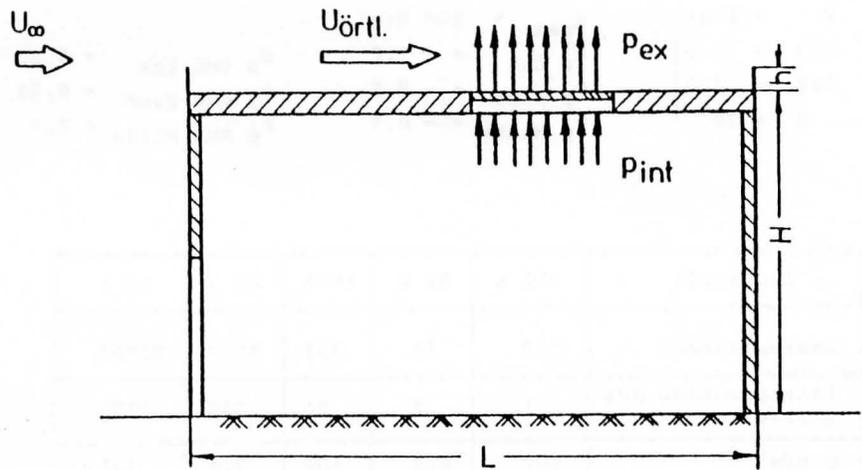
2.2 Schäden an Windleitführungen

Bei Windleitführungen, die an Lichtkuppel-RA im allgemeinen als Windleitwände ausgeführt werden, können zwei unterschiedliche Schadensbilder beobachtet werden. Gelingt es nicht, die an den Windleitwänden angreifenden Windkräfte sachgemäß über die Windleitwandhalterungen in den Kranz abzuführen, werden die Halterungen aus den zumeist in Glasfaserverstärkten Kunststoffen (GfK) gefertigten Kranzen herausgerissen. Andererseits werden häufig in den Windleitwänden, insbesondere wenn diese aus Blechteilen gefertigt sind, Risse festgestellt. Diese Ribbildung deutet im Gegensatz zu den vorher beschriebenen Schadensarten auf einen dynamischen Belastungsvorgang hin. Neben der bei der Dimensionierung nicht schwingungsanfälliger Bauten und Bauteile zu berücksichtigenden quasistatischen Windlast ist daher bei der Konstruktion und Dimensionierung schwingungsfähiger Bauteile, wie sie z. B. Windleitwände darstellen, das durch Windlastschwankungen hervorgerufene Lastkollektiv zu beachten.

3. Windlasten an RA

3.1 Quasistatische Windbelastung

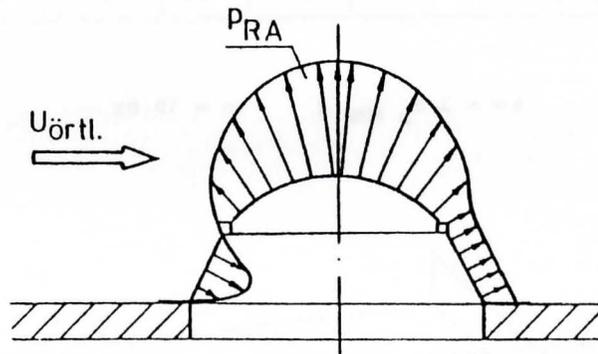
Die an einem RA angreifende quasistatische Windlast wird von dem durch die Gebäudeumströmung auf der Dachfläche hervorgerufenen Druckfeld und von dem durch die örtliche Umströmung des RA hervorgerufenen Druckfeld beeinflusst (Bild 1). Da beide Strömungsfelder nicht unabhängig voneinander sind, muß unter Umständen auch die Interferenzwirkung beachtet werden. Für eine erste Abschätzung der auftretenden Windkräfte dürfte es jedoch ausreichen, die Interferenzwirkung zu vernachlässigen. Die abhebend wirkende Windlast ergibt sich dann durch Addition der gebäudebedingten Differenz von auf der Dachfläche wirkendem Außendruck und in dem Gebäude herrschenden Innendruck und dem senkrecht zur Dachfläche wirkenden Anteil der Druckbelastung infolge RA-Umströmung (Bild 2). Haupteinflußgrößen für den äußeren Druck p_{ex} und den Innendruck p_{int} sind die relativen Gebäudeabmessungen H/B , L/B , h/B und die Anströmbedingungen (H = Gebäudehöhe, B = Gebäudebreite, L = Gebäudelänge, h = Attikahöhe). Der Innendruck ist ferner von der Durchlässigkeit der Wände abhängig. Die DIN 1055 Teil 4 macht vereinfachte Angaben über die auf Dachflächen von Flachbauten anzusetzenden Winddrücke, (Bild 3, entnommen: Entwurf DIN 1055 Teil 4). Ferner finden sich in der einschlägigen Literatur z. B. [1], [2], [3], [4] detaillierte Angaben über die Außendruckverteilung und den Innendruck in Abhängigkeit von den angegebenen Haupteinflußgrößen.



$$p_{ex} = f(H/B, L/B, h/B, \alpha)$$

$$p_{int} = f(H/B, L/B, \alpha, A_{\text{Öff}}/A_{\text{Wand}})$$

+



$$p_{RA} = f(\text{Form; Strömung auf der Dachfläche})$$

Bild 2. Schematische Darstellung der Bestimmung der Windkraft auf ein RA durch Überlagerung der gebäudebedingten und RA-bedingten Druckfelder.

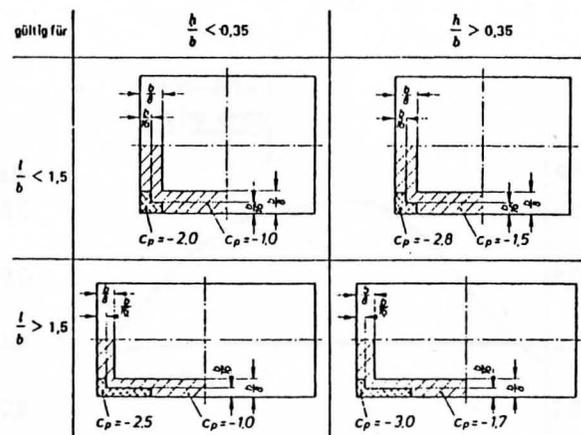


Bild 3. Vorschlag zur Festlegung der Lastannahmen auf glatten Flachdächern (entnommen: Entwurf DIN 1055 Teil 45).

Im Mittelfeld beträgt $c_d = -0,5$

In dieser Abbildung: $h = H$
 $l = L$
 $b = B$

$$\begin{array}{l}
 H = 8 \text{ m:} \\
 H/B = 0,3 \\
 L/B = 2,0 \\
 \theta = 20^\circ
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 q_{\max} = 500 \text{ N/m}^2 \\
 c_{p \text{ Eck}} = -1,2 \\
 c_{p \text{ Rand}} = -0,9 \\
 c_{p \text{ Mitte}} = -0,9
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 c_{p \text{ RMS Eck}} = 0,33 \\
 c_{p \text{ RMS Rand}} = 0,33 \\
 c_{p \text{ RMS Mitte}} = 0,1
 \end{array}$$

Laststufe	100 %	90 %	80 %	60 %	40 %
Lastspielzahl	10	90	900	9000	90000
Lastspielzahl pro Lastkollektiv	1	9	90	900	9000
$q \text{ N/m}^2$	500	450	400	300	200
$w_{\text{Eck}} \text{ N/m}^2$	600	540	480	360	240
$w_{\text{Rand}} \text{ N/m}^2$	450	405	360	270	180
$w_{\text{Mitte}} \text{ N/m}^2$	450	405	360	270	180
$\pm \Delta w_{\text{Eck}} \text{ N/m}^2$	500	450	400	300	200
$\pm \Delta w_{\text{Rand}} \text{ N/m}^2$	500	450	400	300	200
$\pm \Delta w_{\text{Mitte}} \text{ N/m}^2$	150	135	120	90	60

$$w = c_p \cdot q \quad \Delta w = 3 \cdot c_{p \text{ RMS}} \cdot q \quad n = 10 \text{ Hz}$$

Tabelle 1.

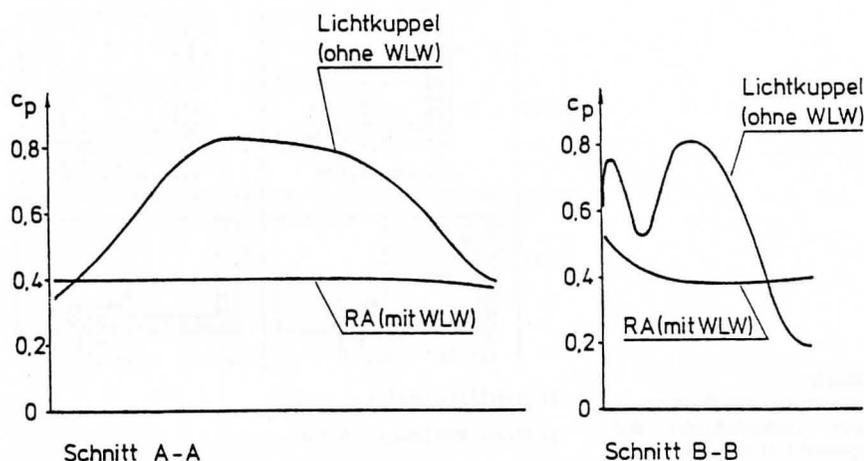
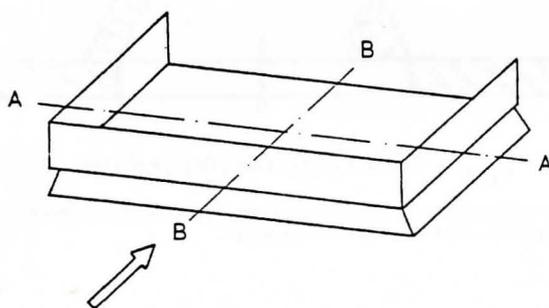


Bild 4. Typische Druckverteilung entlang der Hauptachsen einer Lichtkuppel und eines RA.

Die durch das Strömungsfeld bedingte Druckverteilung hängt hauptsächlich von der Form des RA und den Anströmbedingungen ab. Dabei ist insbesondere zu beachten, daß die Strömungsgeschwindigkeiten in Gebieten anliegender Strömung auf flachen und wenig geneigten Dachflächen zum Teil erheblich größer sind als die Geschwindigkeit in Dachkantenhöhe der ungestörten Windströmung. Für eine überschlägige Abschätzung der an einem RA angreifenden Windkraft kann die örtliche Geschwindigkeit auf der Dachfläche mit hinreichender Genauigkeit aus der Druckverteilung berechnet werden:

$$U_{\text{örtl.}}/U_{\infty} = \sqrt{1 - c_{p \text{ ex}}}$$

Auf vergleichsweise niedrigen Hallen ist nach Bild 3 im Randbereich ein Druckbeiwert $c_p = -1$ anzunehmen. Die dort zu erwartenden Windgeschwindigkeiten betragen somit $U_{\text{örtl.}} = 1,4 U_{\infty}$. Für z. B. eine Flugzeughalle mit der Höhe von 22 m mit einer Bemessungswindgeschwindigkeit $U_{\infty} = 42 \text{ m/s}$ ist im Randbereich mit maximalen Windgeschwindigkeiten $U_{\text{örtl.}} = 60 \text{ m/s}$ zu rechnen.

Bild 4 zeigt für ein Lichtkuppel-RA ohne und mit Windleitwand den Druckverlauf entlang der Hauptachsen bei Anströmung senkrecht zur Längsseite. Durch die Verdrängungswirkung wird die Strömung beschleunigt. Dies führt bei anliegender Strömung zu einem Druckminimum im Bereich der größten Kuppelerhebung. Bei Verwendung einer Windleitwand löst dagegen die Strömung stromab der Kuppel von der Oberkante der Windleitwand ab. Dies führt zu einer Vergleichmäßigung der Druckverteilung im Gebiet abgelöster Strömung mit einer deutlichen Reduzierung der Unterdrücke. Die Größe des Unterdruckes im Kuppelbereich ist von der Größe der Verdrängungswirkung und somit von der Höhe der verwendeten Windleitwände abhängig.

Für eine Flugzeughalle der Höhe $H = 21 \text{ m}$, der relativen Höhe $H/B = 0,25$ und der relativen Länge $L/B = 1,2$ soll beispielhaft die an einem RA im Mittenbereich angreifende Windlast berechnet werden. Nach Bild 3 ist für den Mittenbereich der Beiwert für den äußeren Druck $c_{p \text{ ex}} = -0,6$ anzunehmen. Unter Berücksichtigung möglicher Öffnungen in den Außenwänden erhöht sich der resultierende Winddruckbeiwert um den Innendruckbeiwert $c_{p \text{ int}} = +0,6$ [5]. Die anzunehmende gebäudebedingte Windlast wird unter Beachtung des Bemessungswinddruckes $q = 1100 \text{ N/m}^2$

$$w_{\text{Gebäude}} = (c_{p \text{ int}} - c_{p \text{ ex}}) \cdot q = (0,6 + 0,6) \cdot 1100 = 1320 \text{ N/m}^2$$

Für die Windbelastung infolge Geräteumströmung kann mit einem Beiwert $c_{p,RA} = -0,4$ gerechnet werden, (Bild 4). Unter Beachtung der örtlichen Übergeschwindigkeiten ergibt sich

$$w_{RA} = -c_{p,RA} \cdot q_{\text{örtl.}} = c_{p,RA} \cdot (1 - c_{p,ex}) \cdot q$$

$$w_{RA} = 0,4 \cdot 1,6 \cdot 1100 = 704 \text{ N/m}^2$$

Die Gesamtwindlast beträgt somit $w_{\text{ges}} = 2024 \text{ N/m}^2$ und ist etwa doppelt so groß wie die beim Standsicherheitsnachweis nach DIN 18 232 Teil 3 bei üblichen Gebäuden bis zu einer Höhe von 20 m vorgeschriebene Prüflast. Man erkennt, daß der nach DIN 18 232 Teil 3 „Baulicher Brandschutz im Industriebau; Rauch- und Wärmeabzugsanlagen, Prüfungen“ Ziff. 3.1. für höhere Gebäude in exponierter Lage geforderte gesonderte Standsicherheitsnachweis sinnvoll ist.

Die bei der Bemessung der Windleitwände anzusetzenden Windlasten ergeben sich durch die örtliche Strömungsbeaufschlagung auf der Dachfläche. Für das Beispiel der Flugzeughalle ergibt sich für senkrecht angeströmte Windleitwände ein resultierender Druckbeiwert

$$c_{p,WLW, \text{res}} = c_{p, \text{Druckseite}} - c_{p, \text{Sogseite}} \cdot (U_{\text{örtl.}} / U_{\infty})^2 = 0,8 + 0,4 \cdot 1,6 = 1,44$$

Für eine typische Windleitwandhöhe $h_{WLW} = 600 \text{ mm}$ ergibt sich bei der Bemessungswindgeschwindigkeit eine Windkraft

$$W_{WLW} = c_{p,WLW, \text{res}} \cdot q \cdot h_{WLW} = 1,44 \cdot 1100 \cdot 0,6 = 950 \text{ N/lfd m}$$

Derartig große Windkräfte lassen sich nur unter erheblichem konstruktiven Aufwand in Kränze aus glasfaserverstärktem Kunststoff einleiten.

Wesentlich geringer sind die quasistatischen Windlasten an Lichtkuppel-RA beim Einbau in den Mittenbereich (Bemessungsstaudruck = 800 N/m^2) der Dachfläche von geschlossenen Hallen mit einer Höhe unter 20 m:

$$w_{\text{Gebäude}} = 0,6 \cdot 800 = 480 \text{ N/m}^2$$

$$w_{RA} = 0,4 \cdot 1,6 \cdot 800 = 512 \text{ N/m}^2$$

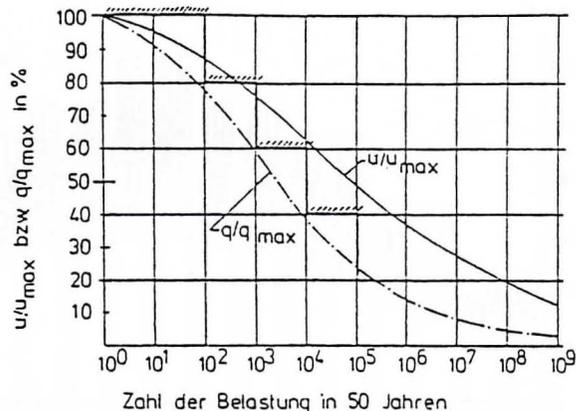
$$w_{\text{ges}} = 992 \text{ N/m}^2$$

Dieser Wert stimmt gut mit der in DIN 18 232 Teil 3 gegebenen Prüflast von

$$w = 1,6 \cdot c_{p, \text{Gebäude}} \cdot 1100 = 1056 \text{ N/m}^2$$

überein.

Bild 5. Frequenzverteilung für Windgeschwindigkeit und Windausdruck nach dem Neuentwurf der DIN 1055.



3.2 Windlastschwankungen und Windlastkollektiv

Lastschwankungen auf Dächern kantiger Baukörper treten durch Windböen auf und durch Schwankungen in der sich an den Dachkanten ablösenden und zum Teil sich auf der Dachfläche wieder anlegenden Strömung. Zur Beurteilung der Belastung von Bauteilen, die auf der Dachfläche diesen Windschwankungen ausgesetzt sind, kann die Frequenzverteilung für Windgeschwindigkeit und Windausdruck (Bild 5) herangezogen

werden. Die Laststufe 100% entspricht der Windgeschwindigkeit, bzw. dem Windstaudruck, der in 50 Jahren im Durchschnitt einmal auftritt. Für praktische Anwendungen kann die gezeigte Frequenzverteilung durch das ebenfalls in Bild 5 eingezeichnete Stufenprofil angenähert werden.

Die Energie der Druckschwankungen auf der Dachfläche infolge Strömungsinstabilität kann Bild 6 entnommen werden. Dargestellt ist als Maß für die Energie der Druckschwankungen der auf der Dach-

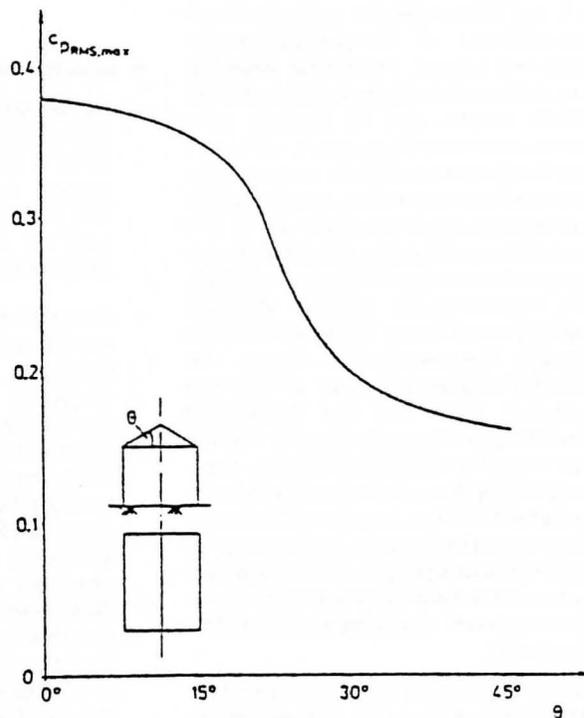


Bild 6. Maximale RMS-Druckbeiwerte in Abhängigkeit von der Dachneigung.

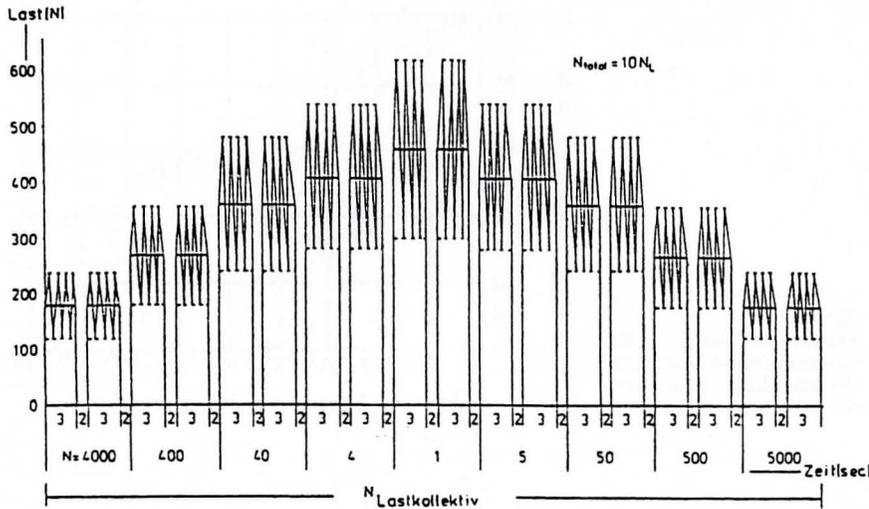


Bild 7. Lastzyklus für den Mittenbereich eines Flachdachs entsprechend den Daten aus der Tabelle 1.

fläche im Windkanalversuch gemessene maximale Effektivwert in Abhängigkeit vom Dachneigungswinkel. Man erkennt, daß auf flachen und wenig geneigten Dachflächen erhebliche $c_{p, RMS}$ -Werte erreicht werden. Nimmt man für eine Abschätzung der Amplituden der Lastschwankungen einen sinusförmigen Verlauf der Druckschwankungen an, so entspricht die Amplitudengröße näherungsweise dem Dreifachen des $c_{p, RMS}$ -Wertes. Dies bedeutet, daß sich in kritischen Bereichen auf Flachdächern der Druck infolge Strömungsinstabilität um etwa einen Staudruck der Windgeschwindigkeit ändert. Die Frequenzen, mit denen diese Schwankungen erfolgen, können z. B. aus Messungen der spektralen Energieverteilung in Windkanalversuchen bestimmt werden. Ergebnisse einer bisher nicht veröffentlichten umfangreichen Studie zeigen, daß im Bereich einer dimensionslosen Frequenz $n \cdot H/U = 7$ (mit n = Frequenz) ein sehr ausgeprägtes Energiemaximum auftritt. Dies entspricht bei Windgeschwindigkeiten von 10 m/s und mehr und üblichen Gebäudeabmessungen Frequenzen im Bereich von 5 Hz. Die Eigenfrequenz üblicher Windleitwandkonstruktionen dürfte ebenfalls in diesem Frequenzbereich liegen. Die Geschwindigkeit von etwa 10 m/s wird während etwa 5% der Gesamtzeit erreicht oder überschritten. Für RA, die auf den der Hauptwindrichtung zugewandten Teilbereichen eines Flachdachs eingebaut werden, ergeben sich hieraus etwa eine Viertelmillion Lastwechsel im Jahr. Für derartige dynamische Belastungen sind übliche Windleitwandanordnungen meist nicht ausreichend betriebsfest konstruiert.

Mit der Information über den fluktuierenden Windangriff und die zu erwartenden

Winddruckschwankungen infolge Instabilität der abgelösten Strömung läßt sich ein Windlastkollektiv entwickeln [6], das für Betriebsfestigkeitsversuche an RA-Windleitführungen geeignet erscheint. Dieses Kollektiv ist in Bild 7 dargestellt. Dabei wurde von Daten für ein hallenartiges Gebäude ausgegangen, die in der Tabelle 1 zusammengefaßt sind. Das dargestellte Lastkollektiv entspricht einem Belastungszeitraum von 5 Jahren. Um einen 50-Jahreszeitraum zu simulieren, müßte es zehnmal hintereinander durchfahren werden. Dies erfordert eine Versuchsdauer von ca. 138 Stunden.

4. Schlußfolgerungen

- Für den Mittenbereich von Bauten mit flachen Dächern mit einer Höhe unter 20 m in nicht besonders windexponierten Lagen erscheint die in DIN 18 232 Teil 3 Ziff. 3.1 angegebene Last zur Überprüfung der Standsicherheit ausreichend.
- Übliche RA, insbesondere Lichtkuppel-RA sollten möglichst nicht in Bereichen erhöhter Windsoglasten eingebaut werden. Ferner ist die Standsicherheit derartiger RA auf Dachflächen von Gebäuden mit einer Höhe über 20 m, die sich in exponierter Lage befinden und/oder Öffnungen in den Gebäudewänden besitzen, zumindest fragwürdig. Dabei ist zu beachten, daß bereits eine auf die Gesamtwandfläche bezogene Öffnungsfläche von etwa 5% ausreichend groß ist, um den äußeren Druck an der Stelle der Öffnung dem Inneren des Gebäudes aufzuprägen.

- Falls RA in windgefährdeten Dachteilflächen eingebaut werden müssen, ist nicht nur auf den Nachweis der Standsicherheit der RA-Kuppeln sondern auch auf den Nachweis der Standsicherheit der verwendeten Windleitwände zu achten.
- Neben der quasistatistischen Windbelastung sind Windleitwände im allgemeinen erheblichen dynamischen Belastungen ausgesetzt. Zur Vermeidung von Ermüdungsbrüchen sollten die Windleitwände so am RA-Kranz befestigt sein, daß durch ausreichende Steifigkeit Eigenfrequenzen von 10 Hz oder mehr und eine möglichst große Strukturdämpfung erzielt wurden. Ferner sind die Verbindungen zwischen Windleitwand und Befestigung so zu konstruieren, daß Kerbwirkung und Spannungskonzentrationen vermieden werden.

5. Literatur

- [1] C. Kramer u. H. J. Gerhardt
Windlasten auf Flachdächern, BundesBauBlatt Heft 11, S. 496-499 (November 1977)
- [2] H. J. Gerhardt und C. Kramer
Windlasten auf nach innen geneigten Dachflächen, Der Bauingenieur 58 (1983)
- [3] C. Kramer und H. J. Gerhardt
Wind loads on permeable roofing systems, Proc. 6th Intern. Conf. on Wind Engineering, Gold Coast, Australia (March 1983)
- [4] C. Kramer, H. J. Gerhardt, B. Kuhnert
Die Windbeanspruchung von Flachdächern und deren konstruktive Berücksichtigung, in: E. Schild (Hgr.) Dach und Flachdach, (1979), Bauverlag, Wiesbaden und Berlin
- [5] C. Kramer und H. J. Gerhardt
Bituminöse Dachhaut auf Trapezblechen - Schäden an Dachhaut und Lichtkuppeln infolge Fehleinschätzung der Windkräfte, Bauschäden Sammlung Band 3, S. 16-19, Formen Verlag, Stuttgart (1978)
- [6] C. Kramer und H. J. Gerhardt
Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben „Untersuchungen der Schadenursache an Leichtbaufachdächern insbesondere aus Trapezblech mit besonderer Berücksichtigung der Windeinwirkung, Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Geschäftszeichen B I 5 - 800180 - 31