

Windlasten am Dach

von Dipl.-Ing. Markus Friedrich

Stürme stellen gerade in unserer scheinbar gemäßigten Klimazone eine zunehmende Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Aufgrund des Klimawandels nahm die Sturmhäufigkeit markant zu. Namen wie Anatol, Wibke, Lothar und Anna stehen für Orkane, die lt. DIN 1055 Teil 4 nur alle 10 Jahre (Norddeutschland) bis 50 Jahre (Süddeutschland) auftreten sollten! Der Klimawandel hat uns offenbar erreicht, so dass ein genaueres Verständnis für den Wind und seine Wirkung auf Baukonstruktionen erforderlich wird.

Was ist Wind?

Wind ist bewegte Luft. Diese besteht aus Stickstoff, Sauerstoff und div. anderen Gasmolekülen. Gasmoleküle wiederum kann man sich als kleine Kugeln vorstellen, welche wir im Raum umherschwirren und beim Zusammenprall mit anderen Gasmolekülen perfekt elastisch aneinander abprallen. Bildlich am ehesten vergleichbar mit einer Squash-Kabine voller Squashbälle, die chaotisch durch die Kabine fliegen.

Ruhend ist die Luft nicht, wenn sich kein Gasmolekül mehr bewegt. Dieser Zustand tritt ein, wenn die Temperatur den absoluten Nullpunkt bei ca. -273°C erreicht. Für uns ist Luft ruhend, wenn genauso viele Gasmoleküle nach links wie rechts, oben wie unten und nach vorne wie hinten fliegen. Schräge Flugbahnen werden im kinetischen Gasmodell auf diese 6 Flugrichtungen aufgeteilt. Bei Wind bevorzugen die Gasmoleküle eine der 4 Richtungen von Ost, West, Süd oder Nord. Bei Orkanen ist es meist die West -> Ost-Richtung. Thermik ist Wind von unten nach oben, Fallwinde kennt man von Gebirgsseen und Flusstälern.

Steht dem Wind nun ein Gebäude im Weg, so stoßen mehr Gasmoleküle auf die Außenwand als von der Gebäudeinnenseite entgedrückt. Schließlich stößt innen nur jedes sechste Gasmolekül auf die Tapete der Außenwand, während es von außen einige mehr sind. Der Druck der sich an der Außenwand *staut* und somit gegen diese Wand *drückt* nennt sich *Staudruck*. Neben dem Staudruck entsteht an windparallelen oder -abgewandten Seiten ein Sog. Dessen Ursache ist der

Bernoulli-Effekt

Am Beispiel eines Flachdachmodells und unter Zuhilfenahme des kinetischen Gasmodells lässt sich Windsog bildlich verständlich erklären.

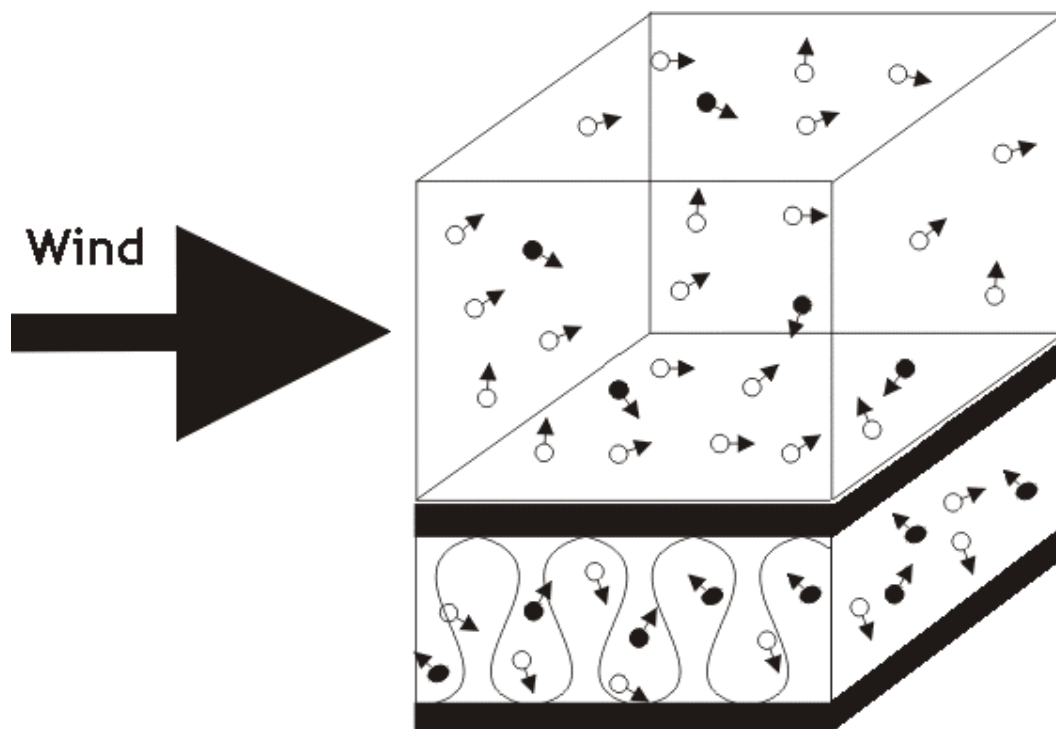


Bild: Gasteilchen in nicht belüfteter Dachabdichtung unter Luftsäule bei Wind. Schwarze Gasmoleküle drücken auf die Abdichtung.

Der Wind strömt von links nach rechts, d.h. oberhalb der Dachabdichtung bewegen sich mehr Gasteilchen nach rechts als in die restlichen 5 Richtungen. Innerhalb des Abdichtungspaketes ruht die Luft, die Gasteilchen bewegen sich gleichmäßig verteilt in alle 6 Richtungen. Resultat: von unten stoßen mehr Gasteilchen nach oben als Gasteilchen des Windes nach unten drücken. Die Oberlage wird angehoben.

Ergänzendes Wissen: der Satz von Bernoulli

Vereinfacht gesagt entdeckte Bernoulli, dass die Summe der statischen (= Luftdruck) und der kinetischen Energie (= Staudruck) nicht komprimierbarer Gase und Flüssigkeiten konstant ist (Energieerhaltungssatz). Steigt die Windgeschwindigkeit (= kinetische Energie) sinkt die statische Energie = Luftdruck.

Der Bernoulli-Effekt lässt auch Flugzeuge fliegen. Bei Geschwindigkeiten > 200 km/h bilden sich um einen Flügel herum zwei eng anliegende (= laminare) Strömungen: eine über und eine unter dem Flügel. Da die Gasmoleküle oben in derselben Zeit einen längeren Weg zurücklegen als die Teilchen unterhalb des Flügels, muss deren Geschwindigkeit (Weg / Zeit) höher sein als unten. Folglich ist oben die kinetische Energie höher und somit der statische Druck geringer als unten. Der Flügel wird vom höheren statischen Druck unterhalb des Flügels nach oben gedrückt, das Flugzeug fliegt.

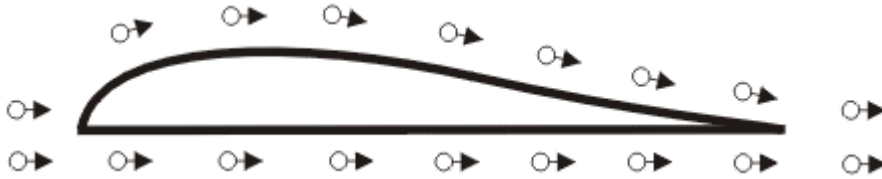


Bild: Strömung um ein vereinfachtes Tragflächenprofil

Anströmung realer Gebäude

Reale Gebäude unterliegen i.d.R. sowohl Winddruck als auch Windsog. Beide Fälle können sich überlagern und die Windwirkung in der Summe verstärken.

Der Druckanteil lässt sich mit der Staudruckformel ermitteln:

$$\text{Staudruck} = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad \begin{array}{l} \rho = \text{Luftdichte} = 1,25 \text{ kg/m}^3 \\ v = \text{Luftgeschwindigkeit (höhenabhängig)} \end{array}$$

Die resultierende Kraft F ergibt sich aus [1]

$$F = c_{pe} * \text{Staudruck} * \text{Fläche} \quad \begin{array}{l} c_{pe} = \text{Formbeiwert, vgl. } c_w\text{-Wert bei Autos} \\ p_e \text{ steht für pressure extern} = \text{Druck von außen} \end{array}$$

Für reale Bauwerke muss ein Sicherheitsfaktor beaufschlagt werden. In der Baustatik ist dieser für dynamische Lasten wie Wind 1,5. Die Formel lautet dann:

$$F / \text{Fläche} = \text{Winddruck} = c_{pe} * \text{Staudruck} * 1,5$$

Wesentlich aufwändiger ist es die Sogkräfte zu ermitteln. Hierzu muss bekannt sein, wo oberflächenparallele Strömung anliegt und wo welche Art von Wirbel entstehen. Wirbel erhöhen auf eng begrenztem Raum die Sogwirkung. Bewirkt dies einen Anfangsschaden, weitet sich dieser schnell zu einem großen Schaden aus. Anders ausgedrückt: wird das Bauteil nicht vom Wind weggedrückt, ist die Suche nach Wirbeln der erste Schritt zur Schadensvermeidung!

Wirbelentstehung und -wirkung

Wind staut sich nicht vor einer Wand und bleibt dort stehen wie das Wasser vor einer Staumauer. Er beginnt das Gebäude zu umströmen. An Ecken und Kanten bilden sich Wirbel, deren Entstehung ich am Beispiel der vorderen Dachkante eines kubischen Gebäudes erklären möchte.

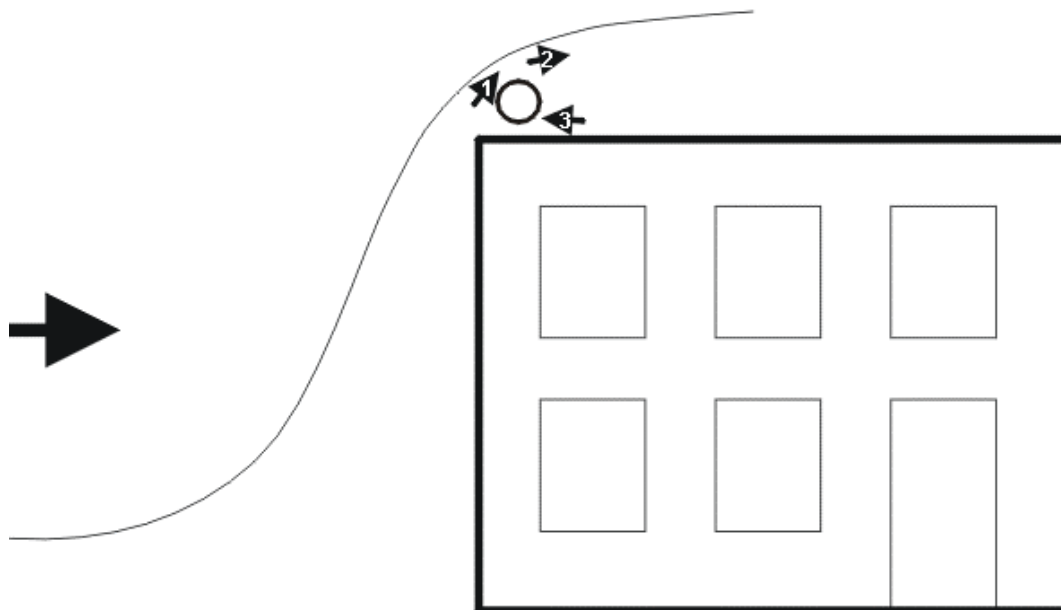


Bild: Randwirbel bei senkrechter Anströmung

Die Pfeile 1 und 2 geben die Anströmrichtung der Gasmoleküle an. Diese Gasmoleküle reißen weitere Gasmoleküle mit, wodurch an der vorderen Dachkante ein Mangel an Gasmolekülen entsteht. Die Folge: ein lokaler Unterdruck. Pfeil 3 kennzeichnet die Gasmoleküle, welche nachströmen und diesen Unterdruck auszugleichen versuchen. In der Summe ergibt sich ein Wirbel, der nahe am Dachrand zu erhöhter Sogbelastung führt. Dort strömen die Gasmoleküle vorwiegend nach oben, was den Sog gegenüber der rein parallelen Strömung noch vergrößert.

Merkregel:

Der Sog ist umso größer, je höher die Windgeschwindigkeit und je kleiner der Wirbelradius ist.

Dies erklärt auch, weshalb der Sog auf Dächern über dem Gebäudeeck am höchsten ist. Dort geschieht folgendes:

Über-Eck-Anströmung

Strömt der Wind über Eck an, bildet sich über beiden Dachrändern ein Wirbel. Diese werden, ausgehend vom Eck, trichterförmig größer.

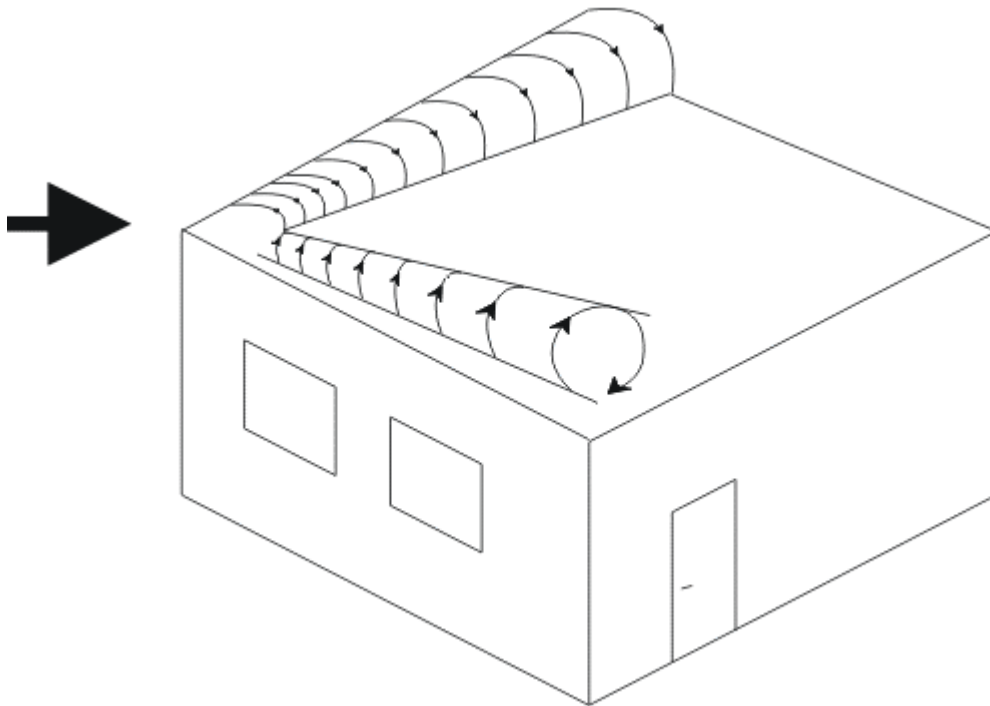


Bild: Anströmung über Eck

Im Eck entsteht aufgrund kleiner Wirbelradien starker Sog. Diesem überlagert sich eine longitudinale Windkomponente entlang der Rotationsachse.

Zusammenfassend ergeben sich 4 Wirkeffekte, die bei der Beurteilung der Windwirkung berücksichtigt werden müssen:

1. direkter Druck auf Bauteiloberflächen (Staudruck)
2. der „reine“ Bernoulli-Effekt bei paralleler Umströmung
3. zylindrische Wirbel am Bauteilrand
4. tütenförmige Wirbelpaare über Eckbereichen

Hierbei handelt es sich natürlich um eine idealisierte Darstellung. Diese genügt jedoch in den meisten Fällen für eine Lastabschätzung. Aufwändigere Verfahren sind baupraktisch i.A. nicht mehr berechenbar. Da diese Betrachtung auch den Normen und somit den Berechnungsverfahren zugrunde liegt, werde ich mich fortan darauf beschränken.

Bemessung

Zur windtechnischen Bemessung von Gebäuden sind folgende Schritte erforderlich:

- 1.) Bestimmung der Wirkmechanismen (Druck, Sog, Wirbeltypen) an den jeweiligen Flächen
- 2.) Ermittlung der Eck- und Randflächen. Rest = Innenfläche.
- 3.) Bestimmung der Kräfte in den jeweiligen Flächen.

Zur Bestimmung der Wirkeffekte an den jeweiligen Flächen überlegt man zunächst, bei welcher Anströmungsrichtung Druck bzw. Sog auftritt. Im Sogfall folgt noch die Wirbelermittlung. Hierfür existieren Nachschlagewerke aus denen anhand von Beispielen abgelesen werden kann, wo welche Art von Wirbel auftreten. Die Berechnung erfolgt dann für den Worst-Case, evtl. ergänzt um die Überlagerung von Eck- und Randbereichen weiterer Anströmsituationen.

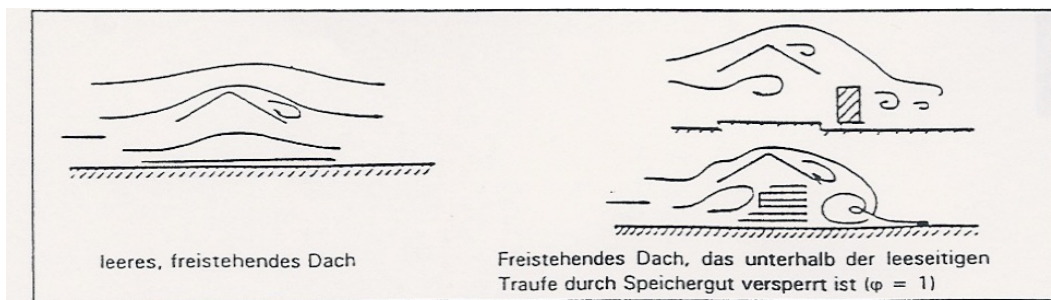


Bild 10.3.1: Umströmung von freistehenden Dächern

Bild: Bestimmung der Wirbel an freistehenden Dächern (Auszug aus dem Eurocode 1991-2-4)

Die Bestimmung der Rand- und Eckflächen erfolgt anhand der zu erwartenden Wirbelarten. Zylindrische Windrollen bilden den Rand, tütenförmige Wirbel Ecken. Nach DIN 1055 Teil 4 ist die Randbreite $1/8$ der kürzeren, am Eck anliegenden Fassade. Physikalisch ausgedrückt: der Durchmesser der Windrolle = $1/8$ der kürzeren Fassadenlänge.

Die Eckschenkel sind halb so breit wie der Rand und entweder $1/8$ (nahezu quadratische Grundrisse) oder halb (Länge $> 1,5 \cdot$ Breite) so lang wie die kürzere Fassade.

Im nachfolgenden Beispiel sind die Ecken 1, 3 und 5 eher quadratischen Ursprungs, die Ecken 2 und 6 eher länglich.

Für das Dach eines L-förmigen Gebäudes ergeben sich die Flächen wie folgt:

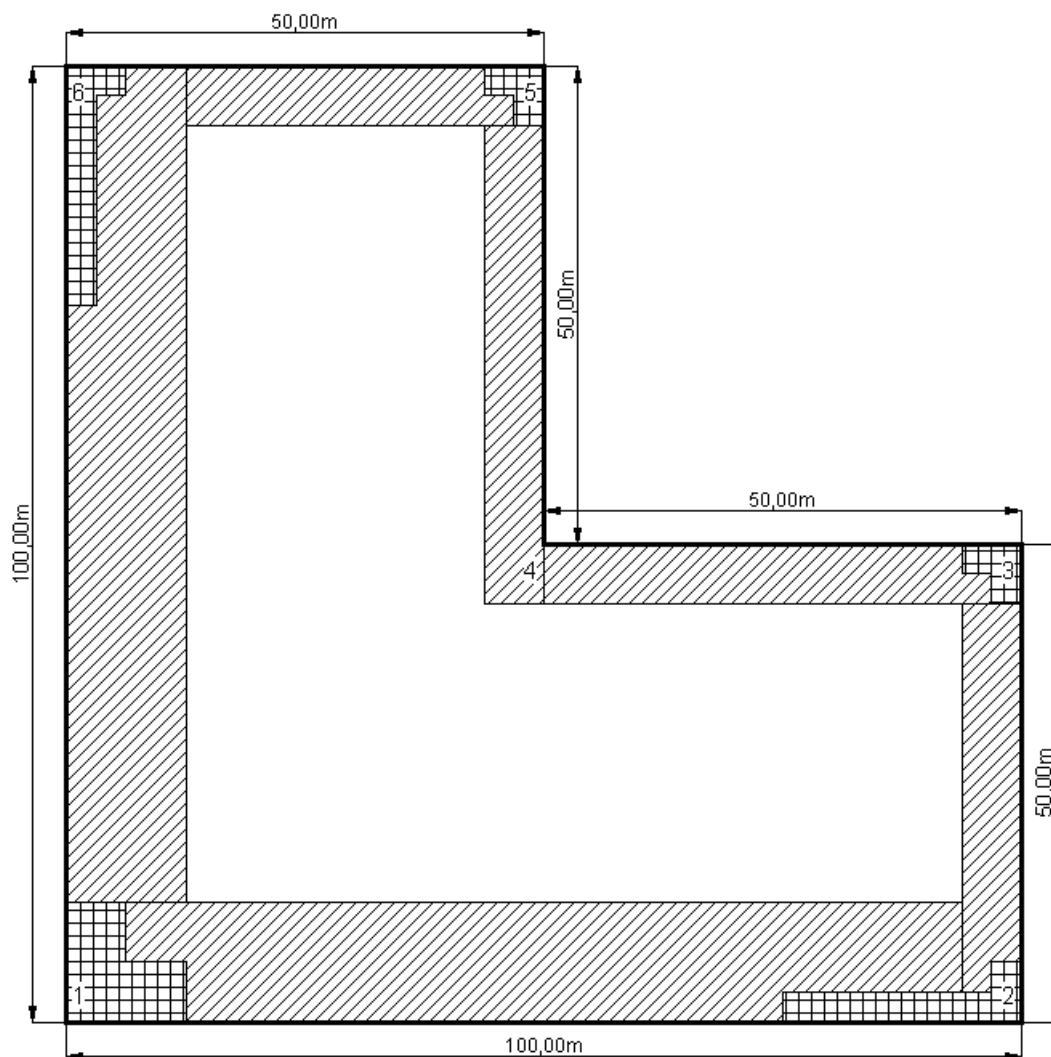


Bild: L-förmiger Grundriß (Quelle: MF Windsog Version 3.8)

Für Ecke 1 sind die Fassaden mit jeweils 100 m Länge maßgebend, da der hier anströmende Wind auf das Dach umgelenkt wird und dort verwirbelt. Für die wirksamen Fassadenlängen an den Ecken gelten folgende Zuordnungen:

	waagrecht	senkrecht
Ecke 1	100 m	100 m
Ecke 2	100 m	50 m
Ecke 3	50 m	50 m
Ecke 4	Inneneck	
Ecke 5	50 m	50 m
Ecke 6	50 m	100 m

Hinweis: da sich über der Innenecke 3 keine tütenförmige Wirbel ausbilden, wird dort nur ein Rand ausgebildet.

Abgerundete Grundrisse, insbesondere zylindrische Gebäude, sind weniger kritisch, da mehr Wind um die Fassade geleitet wird und am Dach weniger Wirbel, insbesondere keine Eckwirbel, auftreten.

Innendruck

Druck und Sog von außen können durch Druck von innen verstärkt werden. Damit Innendruck entstehen kann, muss die Fassade luftdurchlässig sein. Nur so kann der Staudruck von außen nach innen gelangen. Zumindest in geringem Maße sind fast alle Fassaden luftdurchlässig, wodurch klar ist, daß sich über kurz oder lang der Staudruck von außen nach innen überträgt. Damit wären nahezu alle Gebäude als offen zu betrachten und der Innendruck müsste immer berücksichtigt werden. Das allerdings wäre zu kurz gegriffen.

Schadensverursachend ist i.d.R. nicht der gleichmäßig strömende Wind. Die überwiegende Mehrzahl der Schäden entsteht durch Böen, also kurzzeitige Luftstöße mit stark erhöhten Windgeschwindigkeiten. Für den Innendruck kommt es nun darauf an, daß während der Dauer einer Böe, der Staudruck in das Gebäudeinnere übertragen wird. Dies ist bei großen, geöffneten Sektionaltoren sicherlich der Fall, bei vereinzelt Fugen und Spalten eher nicht.

Ergänzend ist zu berücksichtigen, ob der Innendruck auf das zu bemessende Bauteil einwirkt. Hierbei spielen Trennwände und Decken eine Rolle. Bauteile mit luftdichten Unterkonstruktionen sind weit weniger gefährdet als offene Dachstühle mit Luftverbindungen in Anströmrichtung.

Berechnung der Sogkräfte

Windsogkräfte berechnen sich ebenso wie Winddruckkräfte anhand der Formel [1], lediglich das Vorzeichen des Formbeiwertes ändert sich:

$$\text{Windsog} = \text{Staudruck} * \text{Formbeiwert} * \text{Sicherheitsfaktor}$$

In Formelschreibweise: $W = q * c_p * 1,5$

In der Norm wird der Formbeiwert c_p aufgeteilt in c_{pe} und c_{pi} . c_{pe} steht für den Sog von außen, c_{pi} für den Innendruck. Die Formel lautet damit:

$$[2] \quad W = q * (c_{pe} - c_{pi}) * 1,5$$

Da Sog negativ definiert ist, erhält c_{pe} ein negatives Vorzeichen. Die Formbeiwerte summieren sich somit trotz des Minuszeichens zwischen c_{pe} und c_{pi} , d.h. Sog von außen und Druck von innen ergänzen sich.

Die Parameter haben hierbei folgende Bedeutung:

1. der **Staudruck** ergibt sich nach Tabelle 2 (siehe unten) oder dem Anhang zur DIN 1055 Teil 4 mit $v(h) = v_{ref} * (h/10)^{0,11}$ wobei h = Gebäudehöhe und $v_{ref} = 34,6$ m/s
2. der **Formbeiwert** gibt an, wie der Staudruck auf die betroffene Bauteilfläche übertragen wird (z.B. von der Fassade auf das Dach).

3. der **Sicherheitsfaktor** kompensiert die Unterschiede von Theorie (Kubus auf ebener Fläche) zu Praxis (komplexer Baukörper in realer Landschaft).
Er soll keinesfalls Ausführungsmängel ausgleichen!

Da die Windgeschwindigkeit v mit zunehmender Höhe über Gelände zunimmt, ist der Staudruck ($1/2 * \rho * v^2$) von der Gebäudehöhe abhängig. Die DIN 1055 Teil 4 bietet zur vereinfachten Berechnung die nachfolgende Tabelle an:

Tabelle 2:

Höhe [m]	Staudruck [kN/m ²]
von 0 – 8	0,5
über 8 – 20	0,8
über 20 – 100	1,1
über 100	1,3

Anmerkung: bei exponierter Gebäudelage beträgt der Staudruck mind. 1,1 kN/m²

Die Anmerkung führt zu einer der am häufigsten Fragen bzgl. der DIN 1055 Teil 4: Ab wann wird ein Gebäude als exponiert betrachtet? Antwort: Genau dann, wenn das Gebäude stärker dem Wind ausgesetzt ist als ein Gebäude im freien Feld.

Die Anströmung über freiem Feld stellt den Norm-Fall dar. Gebäude die auf einer Böschung oder einem Berg stehen, bekommen auch den Wind ab, der sich am Abhang staut und sind als exponiert zu betrachten. Hier muß der Staudruckermittlung zumindest die effektive Höhe h_{eff} ab der Talsohle zugrundegelegt werden.

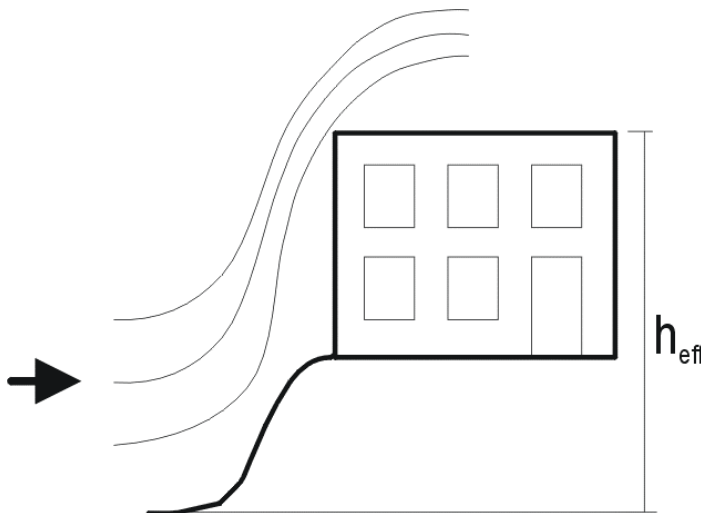


Bild 1: effektive Höhe bei exponierten Lagen

Gebäude die aus einer Gruppe weiterer Gebäude hervorragen, sehen für das Auge exponiert aus, sind es aber nicht für den Wind. Die umgebenden Gebäude können das hohe Gebäude sogar schützen.

Der Formbeiwert gibt an, wie der Staudruck auf Eck-, Rand und Innenbereiche übertragen wird. Er ergibt sich aus Bauteilhöhe, -länge und -breite. Kleine Formbeiwerte findet man an flachen Gebäuden mit eher quadratischem Grundriss. Windkritischer sind hohe Gebäude mit länglichem Grundriss. <Satz gelöscht>

Tabelle: Formbeiwerte für Flachdächer bis 8° Dachneigung

Länge/Breite	Höhe/Breite	Eck	Rand	Innen	Form
<= 1,5	<= 0,4	2	1	0,6	flach+quadratisch
	> 0,4	2,8	1,5	0,8	flach+länglich
> 1,5	<= 0,4	2,5	1	0,6	hoch+quadratisch
	> 0,4	3	1,7	0,8	hoch+länglich

Bei geneigten Dachflächen ist die Dachneigung der entscheidende Parameter zur Bestimmung der Formbeiwerte. Eckbereiche werden quadratisch ausgebildet, die Randausbildung erfolgt wie bei Flachdächern mit 1/8 der Gebäudebreite.

Tabelle: Formbeiwerte für Sattel- und Pultdächer

Dachneigung	Eck	Rand	Innen
8° - 25°	3,2	1,8	0,6
26° - 35°	1,8	1,1	0,6
> 35°	Kein Sog sondern Druck!		

Anmerkung: Die Norm gibt die Formbeiwerte mit negativem Vorzeichen an (Sog). Im Bereich zwischen 26° und 35° Dachneigung kann sowohl Sog als auch Druck auftreten.
Für offene Gebäude wird der Formfaktor um 0,8 erhöht (Innendruck).

Da Steildächer nur selten reine Pult- oder Satteldächer darstellen, ist die Bemessung nach DIN praktisch nur im Industriebau möglich. Insbesondere schuppenförmige Eindeckungen (Ziegel, Dachsteine, Schindeln...) auf gaubendurchsetzten Dächern mit Kaminen, größeren Dachdurchdringungen etc. sollten entsprechend der „Fachregeln Dachdeckungen“ des „Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks e.V.“ ausgeführt werden. Seit September 1997 existieren mit den „Hinweisen zur Lastermittlung“ detaillierte Bemessungsgrundlagen für diesen Anwendungsfall.

Unglücklicherweise basieren diese Hinweise nicht direkt auf der DIN 1055 Teil 4, so dass im Schadensfall aufgrund unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen für den Staudruck ein rechtliches Problem entstehen kann. Gilt die baurechtlich eingeführte DIN oder die Fachregel? Letztere ist in diesem Falle als „Anerkannte Regel der Technik“ anzusehen, die DIN 1055 Teil 4 ist in der Bauregelliste eingetragen und erlangt dadurch Gesetzeskraft.

Die Erhöhung der Formfaktors um 0,8 bei offenen Gebäuden führt unweigerlich zu einer der kritischsten Fragen bzgl. der DIN 1055 Teil 4: welche Gebäude sind als offen zu betrachten? Laut Norm nur solche Gebäude, bei denen entweder eine Gebäudewand komplett fehlt oder 1/3 der Außenwandfläche geöffnet werden

kann. Diese Aussage ist falsch! Und zwar so gravierend falsch, dass sie dem anerkannten Stand des Wissens vehement widerspricht und somit nicht angewendet werden darf. Einen korrekten, dafür aber komplizierten Ansatz enthalten Eurocode bzw. die kommende DIN ENV 1055 Teil 4. Bis zu deren baurechtlich verbindlicher Einführung sollten Gebäude als offen betrachtet werden, deren Außenhülle zu mehr als 3 bis 5 % geöffnet werden können.

Überträgt man den Staudruck, die Formbeiwerte und den Sicherheitsbeiwert in die Formel [2], erhält man den resultierenden Windsog.

Mehr Orkane in Zeiten des Klimawandel

Wie ich eingangs bereits erwähnt habe, häuften sich die Orkane in den letzten Jahren. Dies ist nur in geringem Maße darauf zurückzuführen, daß die Klimaerwärmung zu mehr Energie in der Atmosphäre führt (vgl. Regenintensität im Sommer, Flutkatastrophen). Ursache für erhöhtes Sturmaufkommen sind die zunehmend warmen Winter, welche wiederum auf fehlende, stabile Hochdruckwetterlagen über Osteuropa zurückzuführen sind. Diese Hochdruckgebiete führen in Russland zu hartem Frost und lenken die stets über dem Nordatlantik vorhandenen Sturmtiefs an Mitteleuropa vorbei. Die Stürme treten dadurch in Schottland, der Nord-Irischen See und, vorwiegend um die Weihnachtszeit, im Mittelmeerraum auf. Fehlt das „Russland-Hoch“, dringen diese Stürme bis nach Mitteleuropa.

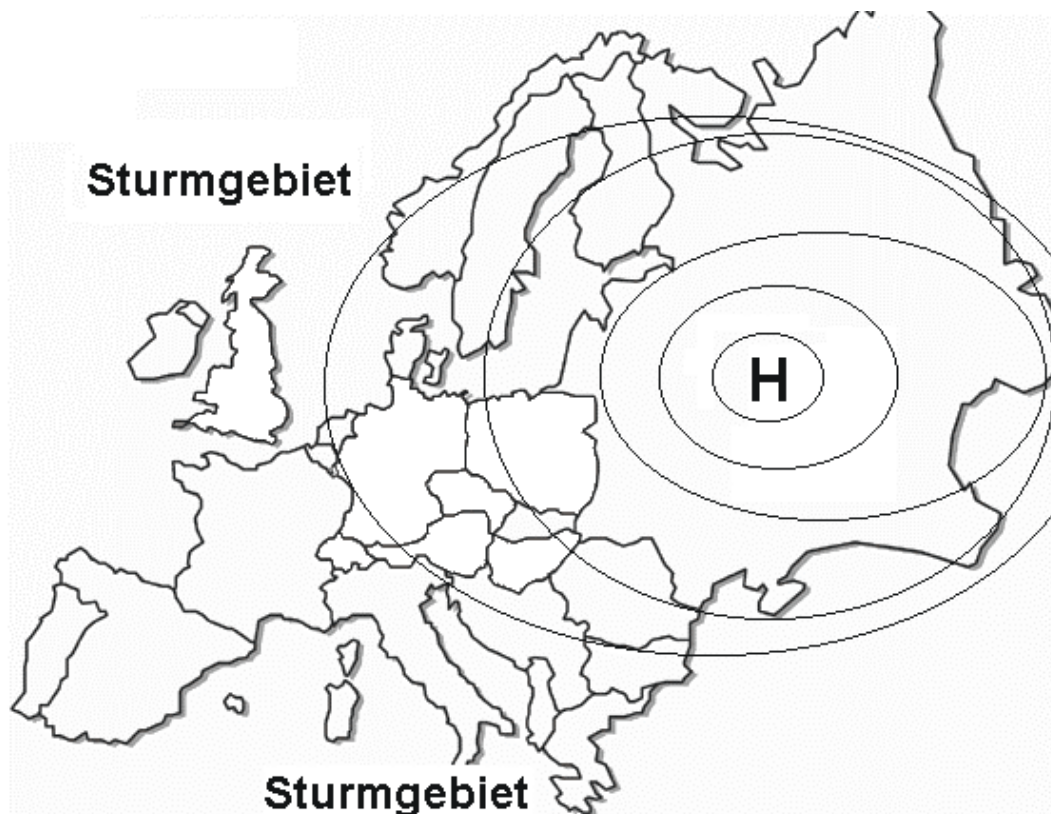


Bild: winterlicher Hochdruck über Osteuropa lenkt Stürme um Mitteleuropa herum

Da zwischen Mitteleuropa und dem Ural kein nennenswertes, größeres Gebirge liegt, ist das winterliche Russlandhoch leicht verschiebbar. Bereits geringe Klimaänderungen haben „stürmische“ Auswirkungen.

Literaturliste

Aerodynamik der Bauwerke
Autor: Prof. H. Sockel, TU Wien
Verlag: Vieweg (nicht mehr lieferbar)

The designer's guide to wind loading of building structures
Part 1: Background, damage survey, wind data and structural classification
Part 2: static structures
N J Cook, Building Research Station
Butterworths London, 1985 (nicht mehr lieferbar)

Dynamische Windwirkungen an Bauwerken, Teil 1 und 2
Prof. Dr.-Ing. Hans Ruscheweyh, Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin

Objektbezogene Beurteilung der Windbelastung für Industriebauten
Prof. H. J. Gerhardt, M. Sc. und Prof. Dr.-Ing. C. Kramer
DUD Frankfurt, Dezember 1995.

WTG-Berichte Nr. 7, Windeinwirkung im Bauwesen
Udo Peil (Hrsg.), Windtechnologische Gesellschaft WTG