

Basiswissen für Dachhandwerker

Windsog

Teil 1: Physikalische Grundlagen

Autor: Dipl.-Ing. Markus Friedrich, 15732 Eichwalde

© Copyright

Dipl.-Ing.
Markus Friedrich
- Datentechnik -
Bahnhofstraße 74
15732 Eichwalde bei Berlin
GERMANY

www.friedrich-datentechnik.de

Alle Rechte sind geschützt.

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Autors.

Einleitung

Die Häufigkeit von Extremwetterereignissen in Folge des Klimawandels nimmt kontinuierlich zu. Diesem Trend folgend, wurden die zugehörigen Normen und die Fachregeln der Berufsverbände überarbeitet und dabei deutlich komplexer.

Mit dieser Einführung möchte ich Ihnen einen Einblick in die Grundlagen der Windsogphysik geben. Diese sind für das Verständnis der Normen und die darauf aufbauenden Berechnung der Windsogkräfte unerlässlich. In Teil 2 gebe ich Ihnen einen Einblick in die DIN EN 1991-1-4 und deren Anwendung.

Hinweis: Die hier gemachten Aussagen repräsentieren einzig den Kenntnisstand des Autors. Sie erheben nicht den Anspruch auf rechtliche oder technische Korrektheit. Insbesondere können nicht alle Aspekte für die Planung und Prüfung von Dachkonstruktionen erschöpfend behandelt werden. Der Autor haftet nicht für Schäden, die aus der Nutzung dieser Broschüre entstehen!

Normen und Regeln

Bei der Erstellung von Einzelnachweisen zur Windsogsicherung von Dächern sind folgende Normen bzw. Fachregeln verbindlich anzuwenden:

- DIN EN 1991-1-4 Einwirkungen auf Tragwerke - Allgemeine Einwirkungen – Windlasten
DIN EN 1991-1-4/NA Nationaler Anhang
DIN EN 1990 Grundlagen der Tragwerksplanung
- ZVDH Fachregeln des Deutschen Dachdeckerhandwerks – Fachregel für Dächer mit Abdichtungen
- ZVDH Fachregeln des Deutschen Dachdeckerhandwerks – Fachregel für Dachdeckungen
- ZVSHK Befestigung von Metaldächern und -fassaden –
Berechnungsgrundlagen zur Windlastnorm DIN 1055-4: 2005-03

Luft, Wind, Sog

Luft ist ein Gasgemisch, bestehend aus ca. 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff und 1 % sonstigen Gasteilchen. Die Gasteilchen kann man sich als kleine Kugeln vorstellen, welche im Raum umherschwirren und bei einer Kollision mit anderen Kugeln aneinander abprallen.

Könnte man Gasmoleküle sichtbar machen, wäre schnell klar, dass ruhende Luft alles andere als ruhend ist. In Wahrheit fliegen nahezu unendlich viele Gasteilchen kreuz und quer durch den Raum. Ruhend ist die Luft nur, weil genauso viele Gasteilchen nach links wie rechts, oben wie unten und nach vorne wie hinten fliegen. Daraus folgt:

- Bei *Windstille* sind die Flugbahnen der Gasteilchen gleichverteilt auf die 6 möglichen Flugrichtungen (nach rechts, links, oben, unten, vorne und hinten)
- Bei *Wind* fliegen mehr Gasteilchen in Windrichtung als in die restlichen 5 Richtungen

Steht den in Windrichtung fliegenden Gasteilchen ein Hindernis im Weg, passiert das gleiche, wie wenn tausende von Tennisspieler ihren Aufschlag an einer Wand trainieren. Ist die Wand nicht stabil genug, stürzt sie ein. Dies begründet viele Orkanshäden, nicht jedoch Windsog am Flachdach. Die Tennisbälle üben einen Druck auf die Mauer aus, Sog jedoch ist das Gegenteil von Druck.

Satz von Bernoulli

Selbst im stärksten Sturm fliegt nur ein Bruchteil der Gasteilchen in Windrichtung. Die Mehrzahl der Gasteilchen fliegt nach wie vor kreuz und quer durch den Raum. Die kreuz und quer fliegenden Teilchen bilden den „statischen Luftdruck p_{stat} “, wobei das p für pressure (englisch: Druck) steht. Die in Windrichtung fliegenden Teilchen bilden den „dynamischen Luftdruck q “, Staudruck genannt.

Formel: $p = p_{\text{stat}} + q$

Parameter: p_{stat} = statischer Luftdruck
 q = Staudruck

Bei Windstille wird q zu 0. Den verbleibenden statischen Luftdruck kann man an einem Barometer ablesen. Bernoulli fand heraus, dass sich bei Wind der statische Luftdruck in dem Maße verringert, in dem der Staudruck zunimmt. Daraus ergibt sich, leicht vereinfacht formuliert, der

Satz von Bernoulli: Die Summe von statischem und dynamischem Luftdruck ist konstant.

Sog = Druckmangel

An einem Warmdachaufbau lässt sich die Entstehung von Sog als Folge mangelnden (statischen) Luftdrucks anschaulich darstellen.

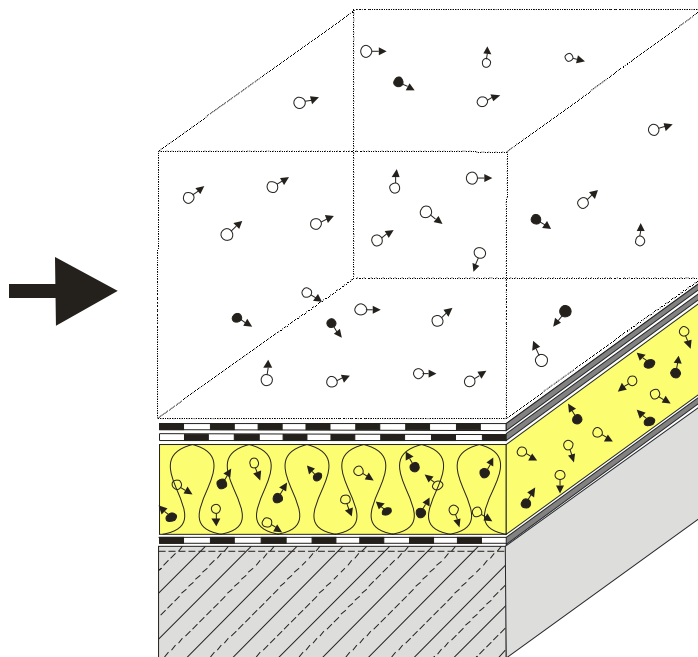


Bild 1: Bewegung der Gasteilchen ober- und unterhalb der Abdichtungslage

Bei Wind von links bewegen sich oberhalb der Dachabdichtung mehr Gasteilchen nach rechts als in die restlichen 5 Richtungen, also auch der Richtung nach unten. Innerhalb der Dämmung hingegen bewegen sich alle Gasteilchen gleichverteilt in alle 6 Richtungen. Damit bewegen sich innerhalb der Dämmung mehr Gasteilchen nach oben als in der Luftströmung des Windes nach unten. Resultat: Die Oberlage der Dachabdichtung wird von innen heraus nach oben gedrückt.

Der Windsog von außen entpuppt sich somit als mangelnder Gegendruck nach unten. Dies erklärt auch die große Windsogstandsicherheit von Kompaktdächern. Beim Einschwemmen geschlossenzelliger Dämmung in Bitumen gibt es kaum freie Gasteilchen, welche die Abdichtung nach außen „abstoßen“ könnten.

Anströmung von Gebäuden

Würde der Wind parallel zur Dachfläche strömen, hätten wir mit Bernoulli alles erklärt. Halbwegs parallel strömt der Wind aber nur im Dachmittenbereich. Im Eck- und Randbereich sind Wirbel die Hauptverursacher erhöhten Windsogs.

Strömt der Wind auf eine Fassade, **staut** er sich und übt einen **Druck** auf die Fassade aus. Der Begriff **Staudruck** wird anschaulich. Der Wind bleibt jedoch nicht vor der Fassade stehen. Er strömt entlang der Fassade und über das Dach. Dabei entstehen Wirbel an den Gebäudekanten.

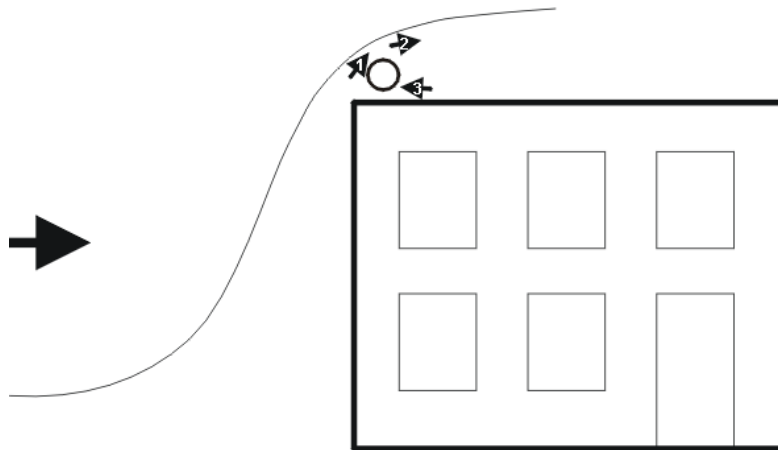


Bild 2: Randwirbel am Dachrand

Die Pfeile 1 und 2 geben die Hauptflugrichtung der Gasteilchen des Windes an. Durch das Mitreißen von Gasteilchen oberhalb der Dachkante entsteht ein Unterdruck am Dachrand. Dieser wird von den mit Pfeil 3 gekennzeichneten Gasteilchen ausgeglichen. Es bildet sich ein Wirbel, der nahe am Dachrand zu erhöhter Sogbelastung führt. Die erhöhte Sogbelastung ergibt sich hierbei aus der Flugrichtung der Gasteilchen nahe am Dachrand. Dort strömen besonders viele Gasteilchen nach oben, was den Sog gegenüber dem reinen Bernoulli-Effekt mit paralleler Strömung vergrößert.

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

Die Zunahme der Kräfte mit kleiner werdenden Wirbeln ergibt sich aus der geringeren Entfernung der nach oben fliegenden Gasteilchen zur Dachoberfläche. Dies erklärt auch, weshalb die Sogspitzen bei Anströmung über Eck am stärksten sind. Dort geschieht folgendes:

Strömt der Wind über Eck heran, bilden sich 2 Wirbel. Diese werden vom Eck ausgehend größer, wodurch sich eine Tütenform ergibt.

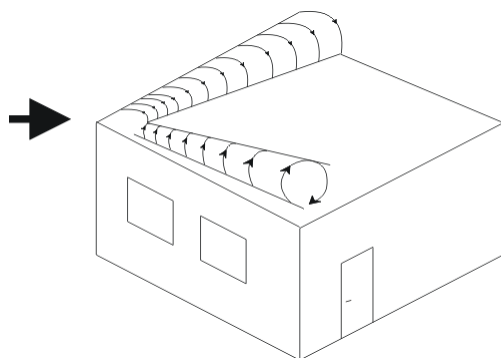


Bild 3: Über-Eck-Anströmung

Im Eck entsteht aufgrund kleiner Wirbelradien die größte Sogwirkung. Hinzu kommt ein Windanteil der entlang der Rotationsachse strömt und dadurch die effektive Windgeschwindigkeit erhöht.

Innendruck

Neben dem Sog von außen kann auch der Druck von innen das Dach nach oben drücken. Sog und Innendruck addieren sich zu einer gemeinsamen Last.

Damit der Wind in das Gebäude eindringen und den Innendruck aufbauen kann, muss die Fassade luftdurchlässig sein. Mehr oder weniger sind dies fast alle Fassaden, was wiederum bedeuten würde, dass sich über kurz oder lang der Staudruck von der Fassade ins Gebäudeinnere überträgt. Damit wären die meisten Gebäude als offen zu betrachten und der Innendruck immer zu berücksichtigen. Dem ist jedoch nicht so, denn der entscheidende Schadensverursacher ist nicht der gleichmäßig strömende Wind. Schäden entstehen i.d.R. durch Böen, also kurzzeitige Luftstöße mit stark erhöhten Windgeschwindigkeiten. Für den Innendruck ist entscheidend, ob während der Böe ausreichend Druck im Gebäude aufgebaut wird. Dies ist bei großen, geöffneten Toren der Fall, jedoch nicht bei Ritzen und Fugen oder wenigen, gekippten Fenstern.

Eine Voraussetzung für die Einbeziehung des Innendruckes ist die Beschaffenheit der Tragdecke. Bei Betondecken kann der Druck aus dem Innenraum nicht bis zur Dachabdichtung dringen. Nur wenn sowohl Gebäudehülle als auch Tragdecke luftdurchlässig sind, wird der Innendruck wirksam.

Interessant ist noch der Fall „Geschlossene Gebäudehülle mit luftdurchlässiger Tragdecke (typ. Trapezblech)“. Bei geschlossener Gebäudehülle kann der Wind nicht ins Gebäudeinnere eindringen und Innendruck aufbauen. Dennoch schmälert die durchlässige Tragdecke die Widerstandsfähigkeit der Dachabdichtung.

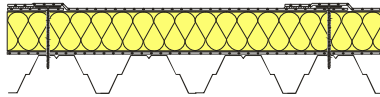


Bild 4a: Dachbahn bei Windstille

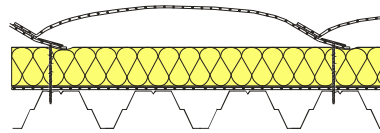


Bild 4b: Aufbauchende Dachbahnen bei Wind

Hinweis: Trapezbleche sind symbolisch gezeichnet. In Realität liegen diese um 90° gedreht.

Ursache: Unter Windsog bauchen die Dachbahnen zwischen den Befestigerreihen auf (Tunnelbildung). Dadurch vergrößert sich das Volumen zwischen Tragdecke und Dachbahnen, was eine Verringerung des Luftdruckes bewirkt. Dieser „Unterdruck“ könnte die Dachbahnen zurückhalten, würde nicht Luft aus dem Gebäudeinneren nachströmen und den Effekt verringern.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann man von vier Windphänomenen am Dach sprechen:

- 1) Bernoulli-Effekt im Dachmittenbereich
- 2) zylindrische Wirbel am Dachrand
- 3) tütenförmige Wirbelpaare im Eckbereich
- 4) Innendruck

Dieses stark vereinfachende Modell ist die Grundlage aller Berechnungsmethoden. Da eine exakte Berechnung nicht möglich ist, übertragen wir dieses vereinfachte Modell auf einen realen, komplexen Baukörper. Unter Zuhilfenahme einer Norm nennt sich dieses Vorgehen Bemessung.

Bemessung

Die windtechnische Bemessung von Gebäuden erfolgt in 3 Schritten:

- 1.) Bestimmung von Eck- und Randflächen. Der Rest wird zur Innenfläche.
- 2.) Bestimmung der Kräfte in den jeweiligen Flächen.
- 3.) Wahl der Befestigungsart und Berechnung der Befestigungsmittel

- Zu 1.) Die Bestimmung der Flächen erfolgt anhand der zu erwartenden Wirbel am Dachrand. Laut DIN EN 1991-1-4 ist die Randtiefe 1/10 der Gebäudebreite oder 1/5 der Gebäudehöhe. Der kleinere Wert ist maßgeblich. Der o.a. Rand ist der Außenrand. Ergänzend existiert noch ein Innenrand mit 5-facher Tiefe. Im Innenrand existiert zwar kein stabiler Wirbel, andererseits ist die Luft dort noch sehr „aufgewühlt“ und nicht mit einer zur Dachoberfläche parallelen Strömung vergleichbar. Die Eckschenkel sind so tief wie der Außenrand und 2,5-mal so lang.
- Zu 2.) Die Kräfte sind direkt abhängig von der Flächenart. Im Eck entstehen die höchsten Sogkräfte, gefolgt von Außenrand, Innenrand und Innenbereich.
- Zu 3.) siehe „Basiswissen Windsog: Lagesicherung“ dieser Schriftenreihe

Nicht-quaderförmige Baukörper

Zur Bemessung nicht-quaderförmiger Gebäude betrachtet man Eck für Eck und Rand für Rand die Anströmung des Windes und schätzt ab, welche Art Wirbel zu erwarten sind und wie groß diese Wirbel werden können.

Für ein L-förmiges Gebäude ergibt sich die Zuordnung der Fassadenlängen wie folgt:

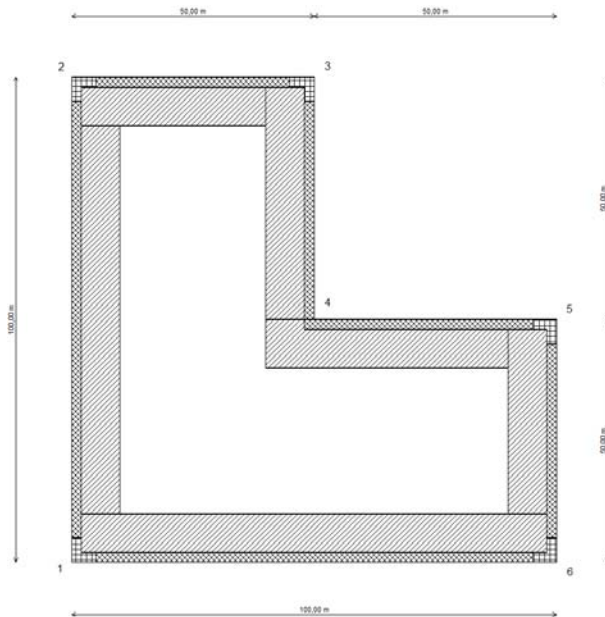


Bild 5: L-förmiger Grundriss (Quelle: MF Windsog)

Für Ecke 1 sind die Fassaden mit jeweils 100 m Länge maßgebend, da der von links-unten 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	50 m	100 m
Ecke 3	50 m	50 m
Ecke 4	Inneneck	
Ecke 5	50 m	50 m
Ecke 6	100 m	50 m

Da sich über der Innenecke kein tütenförmiges Wirbelpaar ausbildet, wird dort nur ein Rand ausgebildet. Im Innenbereich hinter dem Inneneck treten die geringsten Windsogkräfte auf.

Doch Vorsicht: Die o.a. Lösung gilt nicht für alle L-förmigen Grundrisse! Bei deutlich kleineren Innenschenkellängen (3 -> 4 und 4 -> 5) wird das Gebäude zu einem Quader und ist auch wie ein solcher zu bemessen. In diesem Fall sind alle Ecken wie Ecke 1 auszubilden.

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. Vorausgesetzt allerdings, die Rundungen sind groß genug.

Teilgebäude

Bei der Sanierung von Teildachflächen ist darauf zu achten, dass der Wind vom Auftragsvolumen des Dachdeckers keine Kenntnis hat. Die Bemessung muss immer mit dem realen Gebäudegrundriss, nicht mit den Maßen der zu sanierenden Teildachfläche, erfolgen! Im nachfolgenden Beispiel wären die maßgeblichen Gebäudelängen B und L_{ges} . Dadurch werden die 2 Ecken größer und die Ränder tiefer. Andererseits müssen am Übergang zur Bestandsdachfläche keine Ecken ausgebildet werden.

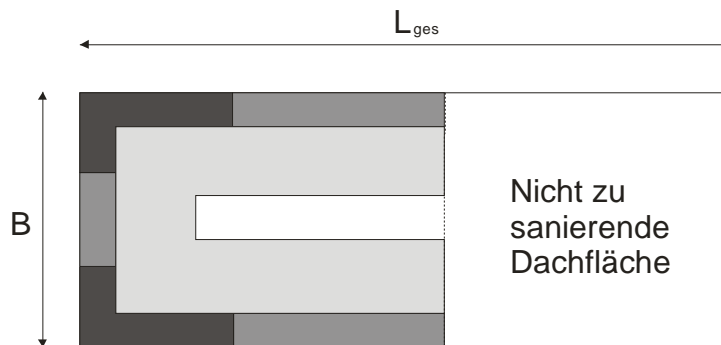


Bild 6: Bemessung von Gebäudeteilen

Auch bei der Bemessung eines Gebäudes, welches später planmäßig erweitert werden soll, sind u.U. die Endgebäudeabmessungen anzusetzen. Ohne diesen vorausseilenden Blick müsste nach Errichtung des zweiten Bauabschnitts der erste nachbefestigt werden. Ein i.d.R. recht aufwändiges Verfahren.

Aufgehende Gebäudeteile

Vor und hinter aufgehenden Gebäudeteilen bilden sich Luftwirbel. Bei Anströmung auf eine Wand bilden sich liegende, zylindrische Wirbel mit einem Durchmesser \leq der Wandhöhe. Strömt der Wind von hinten um das aufgehende Bauteil herum, können sich 2 stehende, zylindrische Wirbel hinter der Fassadenkante bilden. Deren Durchmesser liegt typ. im Bereich von 1/10 der Fassadenbreite.

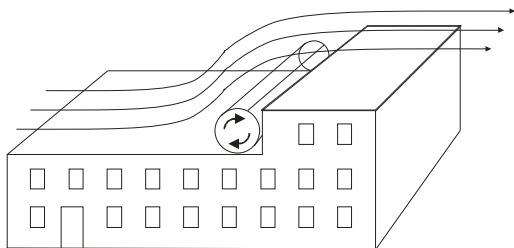


Bild 7a: Wirbel vor aufgehendem Gebäudeteil

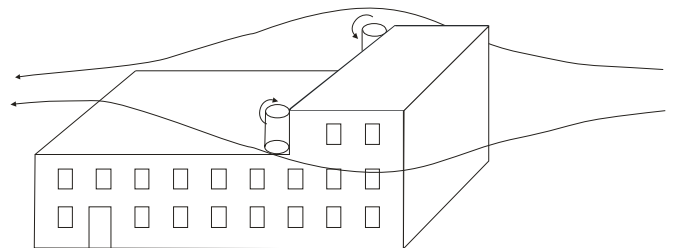


Bild 7b: Wirbel hinter aufgehendem Gebäudeteil

Bei Überströmung von rechts nach links (Bild 7b), kann sich hinter dem Aufbau ein liegender, zylindrischer Wirbel bilden, der jedoch die entgegengesetzte Drehrichtung des liegenden Wirbels in Bild 7a links hat.

Für die Bemessung sind alle möglichen Wirbelausbildungen zu überlagern und in Randbereiche umzusetzen. Der Randbereich sollte ungefähr so tief sein, wie die aufgehende Wand hoch ist.

Einen Sonderfall bilden aufgehende Gebäudeteile, welche höher als breit sind. Diese werden mit einem umlaufenden Rand in der halben Breite des aufgehenden Bauteils versehen. Stellt man sich die Verwirbelung an einem Kamin vor, wird klar, dass hier die Höhe nicht maßgeblich sein kann.

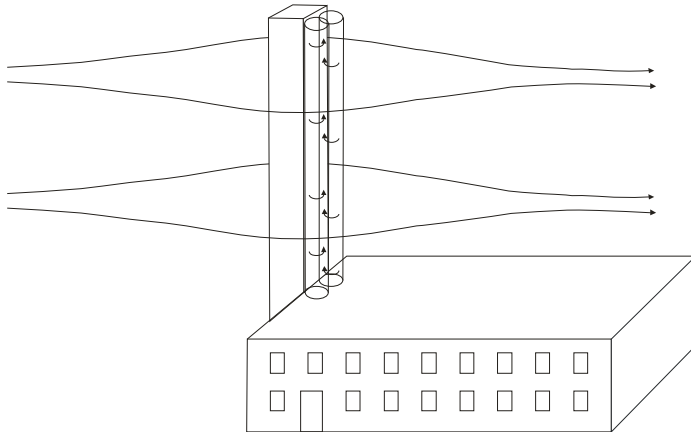


Bild: Wirbelbildung hinter hohen, schlanken Bauteilen

Eckbereiche sind um aufgehende Bauteile nicht einzusetzen, da sich i.d.R. keine tütenförmigen Wirbelpaare oder sonstige, vergleichbar kleine Wirbel bilden.

Windsogberechnung

Für Windkräfte an luftundurchlässigen* Oberflächen gilt die Formel

$$W = q * c_p * SF \quad [1]$$

Die Parameter haben folgende Bedeutung:

1. **W** ist der resultierende **Windsog**. Maßeinheit: kN / m² (= Kraft je Fläche)
2. Der **Staudruck q** repräsentiert den Druck, den der anströmende Wind ausübt.
Formel: $q = \frac{1}{2} * \rho * v^2$ mit $\rho =$ Luftdichte = 1,25 kg/m³ und $v =$ Windgeschwindigkeit
3. Der **Formbeiwert cp** gibt an, wie sich der Staudruck auf Oberflächen auswirkt.
Am Dach gilt: In den Ecken ist der Formbeiwert groß, im Dachrandbereich mittel und im Mittenbereich am geringsten. Der Innendruck wirkt auf alle Teilflächen gleich.
Der Formbeiwert cp setzt sich aus c_{pe} (e = extern = von außen wirkend) und c_{pi} (Innendruckbeiwert) zusammen.
4. Der **Sicherheitsfaktor** stellt sicher, dass die Unterschiede von Theorie (Quader auf ebener Fläche) zu Praxis (komplexer Baukörper in realer Landschaft) ausgeglichen werden.
Für Wind muss der Sicherheitsfaktor lt. DIN EN 1990 auf **1,5** gesetzt werden.

Setzt man die ausführlichen Parameter ein, entsteht die Formel

$$W = \frac{1}{2} * (1,25 \text{ kg/m}^3) * v^2 * (c_{pe} + c_{pi}) * 1,5 \quad [2]$$

Formel [2] enthält zwar nur 3 veränderliche Werte (v , c_{pe} und c_{pi}), diese selbst sind jedoch von mehreren Parametern abhängig. Die **Windgeschwindigkeit v** ist abhängig von Windzone, Geländerauhigkeit und Gebäudehöhe. Die **Formbeiwerte** ergeben sich aus Dachform, Dachbereich (c_{pe}) und der Durchlässigkeit von Gebäudehülle und Tragdecke (c_{pi}). All diese Werte entnehmen wir der DIN EN 1991-1-4. Mit der Handhabung dieser Norm befasst sich der zweite Teil dieser Schriftenreihe.

Hinweis: Der mit **1,5** festgeschriebene **Sicherheitsfaktor** entstammt dem Sicherheitskonzept der DIN EN 1990 (Kapitel 6 und Anhang A1.2 (A)). Windeinwirkungen gelten in DIN EN 1991-1-4 Punkt 3.3 als „veränderliche, freie Einwirkungen“ und werden in DIN EN 1990 Punkt 4.1.1 den „veränderlichen Einwirkungen (Q)“ zugeordnet.

* Dachziegel/Dachsteine werden bei Windangriff angehoben. Dadurch kann hoher Luftdruck von der Unterseite des Ziegels nach außen entweichen. Der Ziegel fällt zurück und das Dach beginnt zu klappern. Da dieser Effekt den Windsog teilweise ausgleicht, sollten „Windeinwirkungen auf kleinformatige, hinterströmbare Dach- und Wandbekleidungen“ entsprechend den Fachregeln ausgeführt werden (DIN EN 1991-1-4/NA, NDP zu 1.1 (11) Anmerkung 1).