

Statische Anforderungen für Dach- und Freiflächenmontagen

Dr.-Ing. Cedrik Zapfe

Dr.-Zapfe GmbH, Ingenieurbüro für Konstruktiven Ingenieurbau und Solartechnik

Phone: +49(0)8072 9191280; Fax: +49(0)8072 91919280

E-Mail: cedrik.zapfe@ing-zapfe.de

Internet: www.ing-zapfe.de

Überblick

Photovoltaikanlagen zur Gewinnung von solarer Energie sind den natürlichen klimatischen Umgebungsbedingungen des Standorts ausgesetzt. Aus Wind, Schnee und Temperatureinwirkungen entstehen Beanspruchungen, die die Module und die Gestell-Komponenten über den geplanten Nutzungszeitraum zuverlässig ertragen müssen. Photovoltaikanlagen gelten im Sinne der Bauordnung als Teil eines Gebäudes oder als Bauwerk an sich, so dass die einschlägigen Regelungen des Bauwesens zu berücksichtigen sind. Aus dieser Forderung leitet sich der Bedarf nach einer statischen Auslegung nach den anerkannten Regeln der Technik und der Baukunst ab. Neben den planerischen Anforderungen sind auch bei der Herstellung der Komponenten die Qualitäts- und Zertifizierungsanforderungen der Bauproduktenrichtlinie anzuwenden. Für sämtliche in der Bauregelliste nicht geregelten Produkte, die sich auf Grundlage der eingeführten technischen Regelwerke nicht nachweisen lassen, sind allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen vorzulegen oder projektbezogen eine Zustimmung im Einzelfall durch die obersten Baubehörden der Länder einzuholen. Bei Solaranlagen auf oder an Gebäuden ist zusätzlich der Standsicherheit des Gebäudes unter Berücksichtigung der zusätzlichen Last aus der Photovoltaikanlage nachzuweisen. Bei dach- und wandparallelen PV-Anlagen brauchen keine zusätzlichen Belastungen aus Wind und Schnee berücksichtigt werden. Aufgeständerte Anlagen bewirken hingegen zusätzliche Belastungen aus Wind und Schnee, die im Rahmen einer Bestandsprüfung nachzuweisen sind.

1. Einleitung

Im Sinne des Baurechts und der Bauordnungen der Länder sind Photovoltaikanlagen als Teil eines Gebäudes oder als Gebäude an sich einzustufen. Dementsprechend obliegt dem Bauherrn einer Photovoltaikanlage die Pflicht, die verbindlichen Regeln der Bauordnung einzuhalten.

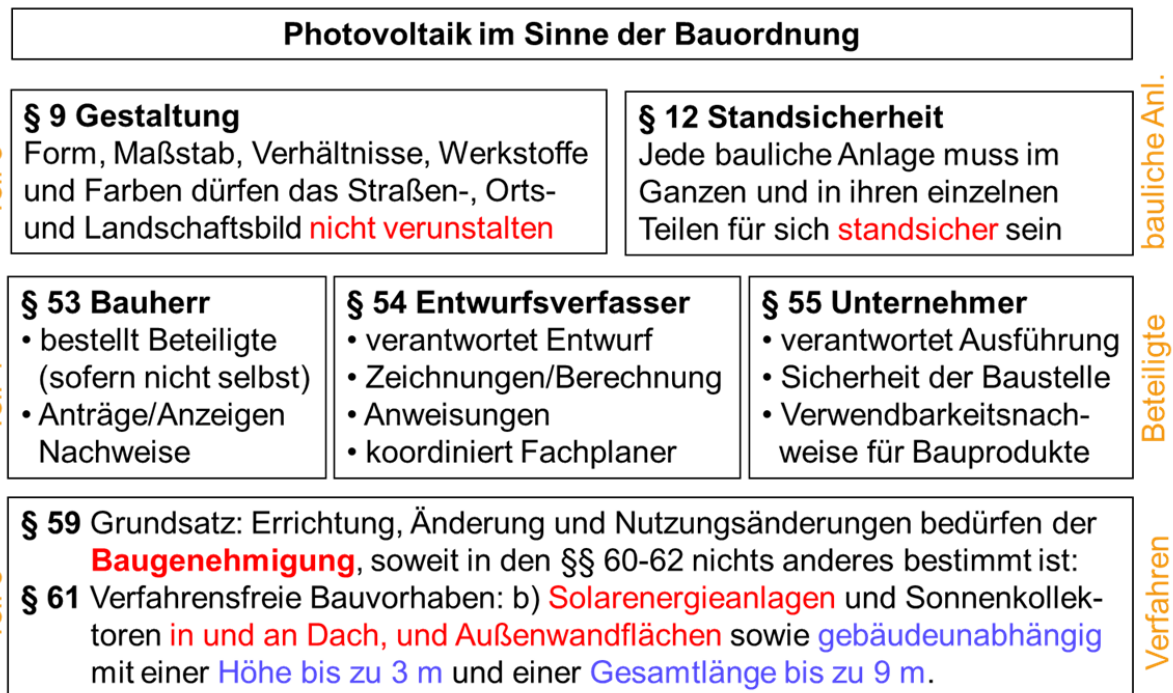


Bild 1 Einordnung der Photovoltaik im Sinne der Bauordnung

In Bild 1 sind die grundlegenden Anforderungen der Musterbauordnung zusammengefasst, die für die Errichtung von Photovoltaikanlagen zutreffen. Neben der den Regelungen zur Gestaltung, dass sich ein Bauwerk harmonisch in die Umgebung einfügen muss, ist die Standsicherheit der Anlage als Ganzes und ihrer einzelnen Teile als wesentliches Merkmal hervorzuheben. Da der Bauherr im Regelfall nicht über die fachlichen Kenntnisse bei der Planung und Montage verfügt, bestellt er Beteiligte wie den Entwurfsverfasser und den ausführenden Unternehmer. Häufig werden beide Aufgabenstellungen durch den Installationsbetrieb wahrgenommen, der damit in die Verantwortung für die Standsicherheit und die ausschließliche Verwendung zugelassener Produkte tritt. In der gängigen Praxis übernimmt der Gestell-Hersteller den Nachweis der Standsicherheit für das Montagegestell. Der Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes unter den zusätzlichen Lasten aus der Photovoltaikanlage verbleibt in der Verantwortung des Bauherrn. In dieser Fragestellung sollten Ingenieurbüros mit dem fachlichen Schwerpunkt der Tragwerksplanung eingeschaltet werden. Auch wenn die Musterbauordnung verfahrensfreie Bauvorhaben für Solaranlagen definiert, entbindet dies den Bauherrn nicht von der Beachtung der entsprechenden Vorschriften. Per Ergänzungserlass haben zahlreiche Länder die Genehmigungspflicht für aufgeständerte Solaranlagen auf Dächern konkretisiert.

2. Lastannahmen

Die Ermittlung der Lasten erfolgt auf Grundlage der DIN 1055 in ihren Teilen bzw. DIN EN 1991 (Eurocode 1) mit nationalen Anhängen, die DIN 1055 im Zuge der europäischen Harmonisierung der technischen Regelwerke ablösen wird.

Ständige Lasten (Eigengewicht g)

Das Eigengewicht g der Gesamtkonstruktion wird im Wesentlichen durch das Gewicht der Module bestimmt. Das Gewicht der Unterkonstruktion ist vernachlässigbar klein, kann aber aus dem Produkt der Querschnittsfläche des Tragprofils und der spezifischen Dichte des Werkstoffs Aluminium ermittelt werden. Das Gewicht eines Moduls ist im Herstellerdatenblatt angegeben.

Schneelasten (s)

Die Ermittlung der Schneelasten hängt von folgenden Einflussfaktoren ab:

- Schneelastzonenkarte
- Höhe des Projektstandorts ü.NN
- Modulneigung
- Höher liegende Dachbereiche

Nebenstehende Karte (Bild 2) entspricht den Angaben der DIN EN 1991-1-1-3/NA (04/07). Sie enthält die Einteilung des Gebiets der Bundesrepublik Deutschland in 3 Schneelastzonen. Die standortspezifischen Schneelasten am Boden sind in Abhängigkeit von der Schneezone mit folgenden Gleichungen zu ermitteln:

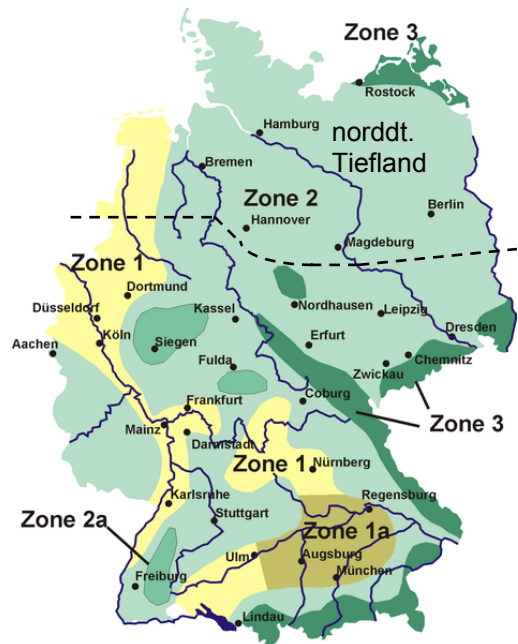


Bild 2 Schneezonenkarte

$$\text{Zone 1: } s_k = 0,19 + 0,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \quad \text{mindestens } 0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zone 2: } s_k = 0,25 + 1,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \quad \text{mindestens } 0,85 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Zone 3: } s_k = 0,31 + 2,91 \cdot \left(\frac{A + 140}{760} \right)^2 \quad \text{mindestens } 1,10 \text{ kN/m}^2$$

A Höhe des Projektstandorts über Normalnull

Die Schneelasten der Zonen 1a und 2a sind durch Multiplikation der Werte der Zonen 1 und 2 mit dem Faktor 1,25 zu ermitteln. Die Regelungen gelten bis zu einer Höhe über Normalnull bis 1500 m. In höheren Lagen sind die Schneelasten bei den zuständigen Behörden zu erfragen. In der norddeutschen Tiefebene (Bild 2) ist zusätzlich ein außergewöhnlicher Lastfall mit dem 2,3 fachen Wert der Schneelasten zu betrachten. Hier sind jedoch andere Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte zu verwenden, so dass dieser Sonderfall nur zu geringfügig höheren Gesamtlasten führt. Für die Feststellung der Bemessungsschneelasten sind die Schneelasten am Boden s_k mit einem Formbeiwert μ_1 in Abhängigkeit von der Dachneigung bzw. Modulneigung α zu multiplizieren. Dieser ergibt sich zu:

$$\begin{aligned} \alpha \leq 30^\circ & \quad \mu = 0,8 \\ 30^\circ < \alpha \leq 60^\circ & \quad \mu = 0,8 \cdot (60 - \alpha) / 30 \\ \alpha > 60^\circ & \quad \mu = 0 \end{aligned}$$

Der Berechnungswert der Schneelast beträgt:

$$S = s_k \cdot \mu_1$$

Darunter ist die vertikale Schneelast auf einer horizontalen Fläche zu verstehen. Diese kann angesetzt werden, sofern angrenzend kein höheres Dach vorhanden ist, von dem Schnee abrutschen könnte. In derartigen Fällen sind genauere Detailbetrachtungen erforderlich.

Windlasten (w)

Bei den Windlasten ist grundsätzlich zwischen Winddruck und Windsog zu unterscheiden. In erster Instanz wird der Böengeschwindigkeitsdruck ermittelt, der nicht mit den Windlasten gleichgesetzt werden darf. Unter Böengeschwindigkeitsdruck (Staudruck) versteht man den Druck, den die mit definierter Geschwindigkeit bewegte Luft im gestauten Strömungsfeld bewirkt.

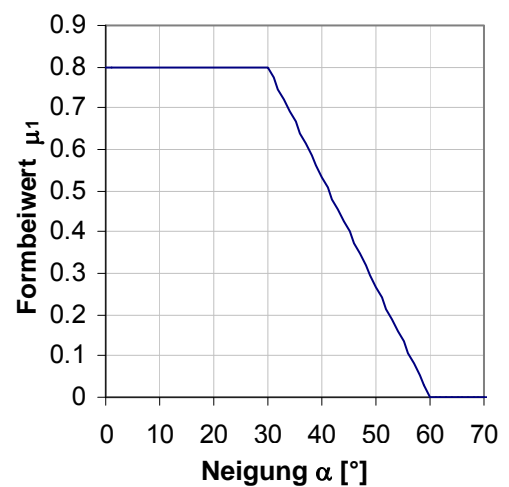


Bild 3 Formbeiwert

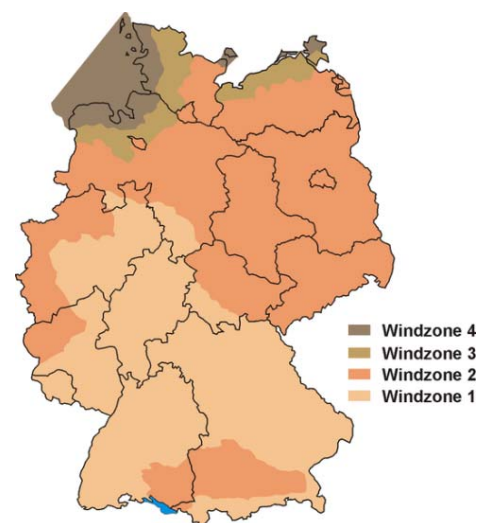


Bild 4 Windzonenkarte

Tabelle 1 Geschwindigkeitsdrücke nach dem vereinfachten Verfahren.

Windzone		Geschwindigkeitsdruck Q		
		h ≤ 10 m	10 m < h ≤ 18 m	18 m < h ≤ 25 m
1	Binnenland	0.50	0.65	0.75
2	Binnenland	0.65	0.80	0.90
	Küste und Inseln der Ostsee	0.85	1.00	1.10
3	Binnenland	0.80	0.95	1.10
	Küste und Inseln der Ostsee	1.05	1.20	1.30
4	Binnenland	0.95	1.15	1.30
	Küste und Inseln der Ostsee	1.25	1.40	1.55
	Inseln der Nordsee	1.40		

Beim vereinfachten Verfahren nach DIN 1055-4 (03/05) ist von einer stufenweisen Erhöhung des Staudrucks auszugehen. Die Schwellen liegen bei 10 und bei 18 m. Oberhalb von 25 m ist das genauere Verfahren anzuwenden. Beim vereinfachten Verfahren wird die maximale Gebäudehöhe als Referenzhöhe zur Ermittlung des vereinfachten Geschwindigkeitsdrucks (Staudruck) verwendet. Die tatsächlich auf ein Bauteil wirkende Windbelastung hängt von den aerodynamischen Eigenschaften des angeströmten Baukörpers ab. Zur Ermittlung der Windbelastung wird der vereinfachte Geschwindigkeitsdruck gemäß Tabelle 1 mit den aerodynamischen Beiwerten multipliziert.

$$w_e = c_{pe} \cdot q(z_e)$$

mit c_{pe} aerodynamischer Beiwert (abhängig von der Gebäudegeometrie)

$q(z_e)$ Geschwindigkeitsdruck

Im Fall von Dachanlagen sind die Dimensionen des Solargenerators im Regelfall untergeordnet gegenüber Gebäudeabmessungen. In diesem Fall sind die globalen Strömungseigenschaften des Gebäudes dominant gegenüber den lokalen Eigenschaften der Solaranlage. Bild 5 zeigt eine Zusammenstellung der häufigsten Anwendungsfälle für PV-Anlagen. Bei an der Gebäudehülle anliegenden Dach- und Fassadenanlagen entstehen durch die PV-Anlage nach allgemeiner Auffassung der Fachschaft keine ungünstigen zusätzlichen Wind- und Schneelasten. In diesen Fällen dürfen die Druckbeiwerte der DIN 1055 Teil 4 (07/05) für die verschiedenen Gebäudegrundformen uneingeschränkt angewendet werden. Anders verhält es sich bei aufgeständerten Dachanlagen und Freiland- und Carportanlagen.



Schrägdach dachparallel



Isotop aufgeständert



Alulight ballastarm



Freilandanlagen



Carportanlagen

Bild 5 Anlagenkategorien für Photovoltaikanlagen (Schletter Solarmontage GmbH)

Nachfolgend sind exemplarisch die Regelungen zur Ermittlung der Windlasten für Satteldächer und Pultdächer zusammengefasst. Aufgrund der Umströmung des Gebäudes, das als Hindernis für den Windstrom zu betrachten ist, entstehen Sogspitzen an den Dachrändern und insbesondere in den Dacheckbereichen, die mit erhöhten Lastansätzen zu berücksichtigen sind. Die normierten Sogbeiwerte sind in DIN 1055-4 (03/05) für verschiedene Dachzonen aufgeführt (Bild 6):

- F Eckbereich
- G Randbereich
- H Innenbereich

Die Größen e_x und e_y sind entweder von der Gebäudeabmessung oder von der Gebäudehöhe h (Firsthöhe) abhängig:

$$e_x = \min(x; 2 \cdot h) \quad e_y = \min(y; 2 \cdot h)$$

In Tabelle 2 sind die Druckbeiwerte für die Zonen F, G und H (negatives Vorzeichen bedeutet Sog) für die Satteldach und die Pultdachkonfiguration eingetragen. Dabei handelt es sich um eine Zusammenfassung der normativen Vorgaben, die für Anströmung aus verschiedenen Richtungen ausgeführt sind. Da Wind an einem Gebäude aus verschiedenen Richtungen einströmen kann, ist jeweils der ungünstigste Fall zu betrachten.

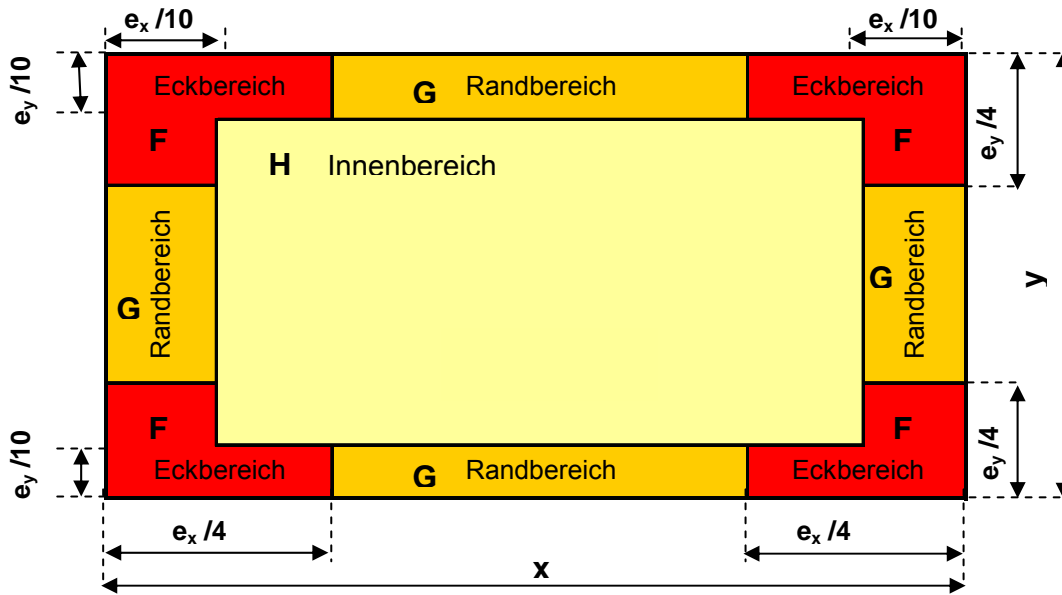


Bild 6 Aufteilung der Dachzonenbereiche für Satteldächer und Pultdächer

Tabelle 2 Druckbeiwerte für Satteldächer und Pultdächer

α	Satteldach				Pultdach			
	Zone F c_{p10}	Zone G c_{p10}	Zone H c_{p10}	Druck	Zone F c_{p10}	Zone G c_{p10}	Zone H c_{p10}	Druck
0	-2.00	-1.25	-0.70	0.20	-1.80	-1.20	-0.80	0.20
5	-1.70	-1.30	-0.70	0.20	-2.30	-1.80	-0.80	0.20
15	-1.30	-1.30	-0.60	0.20	-2.50	-1.90	-0.80	0.20
30	-1.10	-1.40	-0.80	0.40	-2.10	-1.50	-1.00	0.40
45	-1.10	-1.40	-0.90	0.60	-1.50	-1.40	-1.00	0.60
60	-1.10	-1.20	-0.80	0.70	-1.20	-1.20	-1.00	0.70
75	-1.10	-1.20	-0.80	0.80	-1.20	-1.20	-1.00	0.80

Bedingt durch die begrenzte räumliche Ausdehnung einer Windböe wird zwischen den Druckbeiwerten für eine Lasteinzugsfläche $A = 1 \text{ m}^2$ und $A = 10,0 \text{ m}^2$ unterschieden. Gemäß nachstehendem Bild sind bei kleinen Einzugsflächen größere Druckbeiwerte anzusetzen. Die erhöhten Werte c_{p1} gelten für die Anschlüsse der Module. Bei Solargeneratoren mit zusammenhängendem Untergestell sind im Regelfall die Druckbeiwerte c_{p10} maßgebend.

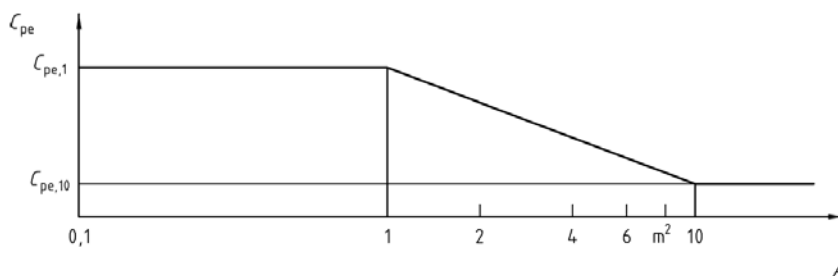


Bild 7 Aufteilungen der Dachzonenbereiche für Satteldächer und Pultdächer

Für aufgeständerte Systeme auf dem Dach und auf dem Boden (Carports und Freilandanlagen) enthält DIN 1055-4 explizit keine Regelungen. Gemäß NABau (Normungsausschuss Bauwesen) dürfen in diesem Fall die Regelungen des Eurocode 1 (EN 1991-1-4) für freistehende Dächer angewendet werden.

Die Druckbeiwerte für den Nachweis der Dachkonstruktion (hier nicht dargestellt) folgen einer ähnlichen Systematik wie bei den Pultdächern, sind aber aufgrund der Unterströmung signifikant höher. Für den Nachweis der Unterkonstruktion bei Carports und Freilandanlagen und für den Nachweis der Befestigung an der Dachhaut bei Dachanlagen sind Kraftbeiwerte gemäß Tabelle 3 in Verbindung mit Bild 8 zu verwenden. Die Positionierung der Gesamtwindlast in den Viertels Punkten des Dachs trägt in erster Linie den Strömungseigenschaften der Dachform, andererseits aber auch der Schwingungsgefahr Rechnung.

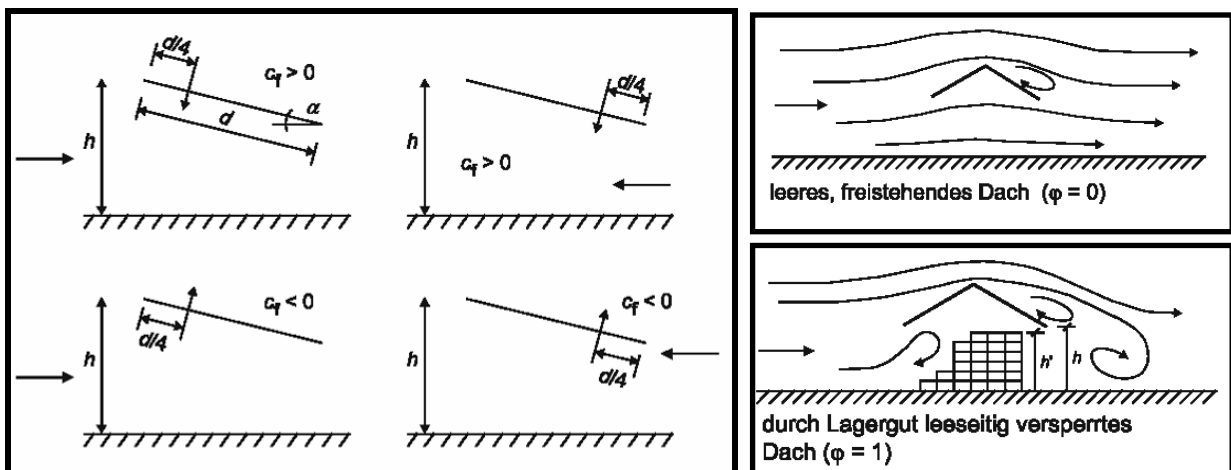


Bild 8 Lastansätze für freistehende Dächer nach EN 1991-1-4

Tabelle 3 Kraftbeiwerte c_f für freistehende Dächer nach EN 1991-1-4

	Neigungswinkel α						
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
drückend	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,2
abhebend $\varphi = 0$	-0,5	-0,7	-0,9	-1,1	-1,3	-1,6	-1,8
abhebend $\varphi = 1$	-1,3	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4	-1,4

Der zuvor beschriebene Lastansatz stellt insbesondere für Dachanlagen eine konservative Lösung dar, da die gegenseitige Verschattung hintereinander liegender Reihen nicht berücksichtigt wird. Windkanalversuche versprechen deutlich wirtschaftlichere Lösungen. Aufgrund fehlender systematischer Untersuchungen können die Ergebnisse gegenwärtig noch nicht allgemeingültig standardisiert werden.

3. Lastkombinationen

Entsprechend den Regelungen in DIN 1055-100 ist bei den Nachweisen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit das Konzept der geteilten Sicherheitsbeiwerte zu beachten. Demnach sind die Lasteinwirkungen mit spezifischen Teilsicherheitsbeiwerten zu versehen. Es gelten folgende Konventionen:

$\gamma_g = 1,35$ für ungünstig wirkende ständige Lasten (Konstruktionseigengewicht)

$\gamma_g = 0,9$ für günstig wirkende ständige Lasten (in Verbindung mit Windsog)

$\gamma_q = 1,5$ für veränderliche Lasten (Wind und Schnee)

Die Lastansätze für Wind und Schnee gelten jeweils für dasjenige Ereignis, das über einen 50-jährigen Beobachtungszeitraum einmal auftritt bzw. einmal überschritten wird. Da die Wahrscheinlichkeit, dass das ungünstigste Schneeeignis gleichzeitig mit dem ungünstigsten Windereignis eintritt sehr gering ist, dürfen die Wind- oder die Schneelasten mit den sogenannten Kombinationsbeiwerten abgemindert werden:

$\psi_{0,w} = 0,6$ Kombinationsbeiwert mit Schnee als Leiteinwirkung und Wind

$\psi_{0,s} = 0,5$ Kombinationsbeiwert mit Wind als Leiteinwirkung und Schnee

Aus den zuvor beschriebenen Regelungen ergeben folgende Lastkombinationen:

$$\text{Lastkombination 1: } \gamma_g \cdot g + \gamma_q \cdot s + \psi_{0,w} \cdot \gamma_q \cdot w = 1,35 \cdot g + 1,5 \cdot s + 0,6 \cdot 1,5 \cdot w$$

$$\text{Lastkombination 2: } \gamma_g \cdot g + \psi_{0,w} \cdot \gamma_q \cdot s + \gamma_q \cdot w = 1,35 \cdot g + 0,5 \cdot 1,5 \cdot s + 1,5 \cdot w$$

$$\text{Lastkombination 3: } \gamma_g \cdot g + \gamma_q \cdot w_{\text{Sog}} = 0,9 \cdot g + 1,5 \cdot w_{\text{Sog}}$$

In der norddeutschen Tiefebene ist eine zusätzliche Lastkombination zu prüfen:

$$\text{Lastkombination 1a: } \gamma_{g,A} \cdot g + \gamma_{q,A} \cdot s = 1,0 \cdot g + 2,3 \cdot s$$

Nur wenn diese außergewöhnliche Lastkombination höhere Werte liefert als die Lastkombination LK1 ist diese anstelle der Lastkombination 1 für die Nachweisführung zu verwenden.

4. Bestandsprüfung

Ein wesentlicher Bestandteil der Projektierung von Solaranlagen ist die Untersuchung, ob das aufnehmende Gebäude oder der Baugrund (Freiland/Carport) die Belastungen aus der Photovoltaikanlage aufnehmen kann. Bei dachparallelen Anlagen kann dies häufig durch Lastvergleich und Prüfung der Tragreserven anhand der sta-

tischen Berechnung des Bestandsgebäudes erfolgen. Aufwändiger gestaltet sich die Aufgabenstellung bei aufgeständerten Anlagen, da durch den Solargenerator erhebliche zusätzliche horizontale Lasten aus Wind eingebracht werden, die durch die Aussteifungen des Gebäudes sicher in den Untergrund abgetragen werden müssen. Für die rechnerische Ermittlung der Windabschattung hintereinander liegender Reihen liegen keine normativen Regeln vor, so dass ingenieurmäßige Annahmen getroffen werden müssen. Nachträgliche Verstärkungsmaßnahmen gefährden zumeist aufgrund der Akzeptanz des Gebäudeinhabers und der Kosten die Realisierung eines Projekts. Dennoch ist der Nachweis der Standsicherheit des Gebäudes unter den zusätzlichen Lasten aus der Photovoltaikanlage zwingend erforderlich.

5. Zusammenfassung

Photovoltaikanlagen an Gebäuden oder auf dem Boden sind im Sinne der Bauordnung als Bestandteil eines Gebäudes oder als Gebäude an sich definiert. Daraus folgt neben anderen rechtlichen Voraussetzungen das Erfordernis eines Nachweises der Standsicherheit des Montagegestells und der Anbindungen der Tragkonstruktion an das Gebäude oder den Baugrund sowie den Nachweis der Standsicherheit für das aufnehmende Gebäude. Die Ermittlung der maßgebenden Lasteinwirkungen aus Eigengewicht, Wind und Schnee für Bauwerke ist in DIN 1055 geregelt. Während die Schneelast am Boden und der Böengeschwindigkeitsdruck unabhängig von der Disziplin Photovoltaik allgemein als zutreffend betrachtet werden können, müssen bei der Frage nach zusätzlichen Schneelasten auf dem Dach infolge aufgeständerter Photovoltaikanlagen und bei den Druckbeiwerten zur Ermittlung der Windlasten Annahmen getroffen werden. Die Ermittlung der Windlasten durch Analogiebetrachtungen zu den Bauwerksgrundformen der DIN 1005-4 liefern im Regelfall auf der sicheren Seite Ergebnisse, die in vielen Fällen beim Standsicherheitsnachweis des Gebäudes zu Problemen führen. Zur Ermittlung genauerer Werte gestattet DIN 1055-4 ausdrücklich Windkanalversuche in Grenzschichtwindkanälen bei in der WTG (Windtechnologische Gesellschaft) zusammengeschlossenen Instituten. Nach heutiger Erfahrung gestatten die genaueren Ergebnisse eine wirtschaftlichere Projektierung.

