

Fachliche Stellungnahme hinsichtlich der Windlasten bei unterströmten Solarmodulen mit verschiedenen Neigungen

Bei der statischen Berechnung von geneigten Solaraufständerungen auf Dächern und im freien Feld müssen die äußeren Einflüsse aus Wind, Schnee und wechselnden Temperaturbedingungen berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der erforderlichen Sicherheit der betrachteten Konstruktion. Bei einer Betrachtung der Marktsituation in der PV-Branche kann festgestellt werden, dass hier eine unterschiedliche Handhabungspraxis vorliegt. Während einzelne Anbieter konsequent nach den Verordnungen der Behörden und den technischen Regelwerken des Bauwesens vorgehen, arbeiten andere eher mit pragmatischen Schätzungen.

Dazu ist festzuhalten, dass in der Musterbauordnung und den Bauordnungen der Länder Solaranlagen unmissverständlich als Teil eines Bauwerks oder als Bauwerk an sich definiert sind, und damit auf Grundlage der technischen Regelwerke des Bauwesens auszulegen sind. Hinsichtlich der anzusetzenden Belastungen gilt für die Wind- und Schneelasten DIN 1055 in der neuen Fassung (2005-2006), die seit dem ersten Januar 2007 verbindlich anzuwenden ist. Hinsichtlich der Schneelasten enthält DIN 1055 eindeutige Regelungen, die dem Anwender keinen Interpretationsspielraum lassen. Anders verhält es sich bei den Windlasten. In DIN 1055 Teil 4 in der Ausgabe März 2005 sind die Windgeschwindigkeit und Berechnung der Böengeschwindigkeitsdrücke in Abhängigkeit vom Standort, der Geländekategorie und der Gebäudehöhe eindeutig festgelegt. Mit der Eingangsgröße der Böengeschwindigkeitsdrücke sind die Windlasten durch Multiplikation mit Druckbauwerten c_p bzw. Kraftbeiwerten c_f zu ermitteln. Die Druck- bzw. Kraftbeiwerte sind für verschiedene Bauwerksgrundformen in der Norm dargestellt. Für eine aufgeständerte, unterströmte Solaranlage ist in DIN 1055 keine Bauwerksgrundform enthalten. In der Praxis verwenden viele Statiker daher die Regelungen für frei stehende Dächer. In Bild 1 sind die Voraussetzungen und die Druckbeiwerte für diese Grundform dargestellt. Per Definition gelten die Druckbeiwerte für geneigte Dächer (z.B.) Bahnsteigdächer mit einer Dachneigung von maximal 10° .

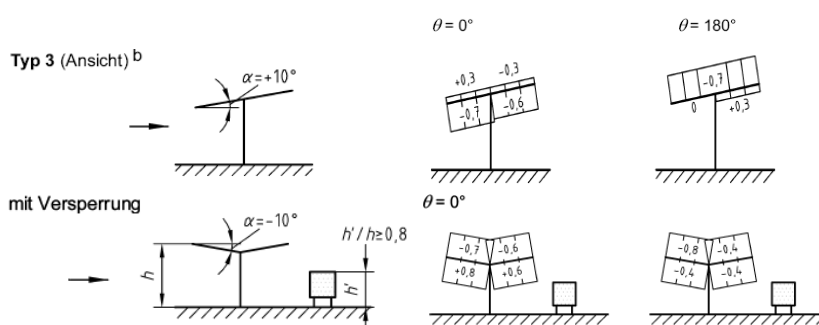


Bild 1 Druckbeiwerte für freistehende Dächer (DIN 1055-4 Tabelle 8)

In Ermangelung spezifischer Regelungen haben einzelne Tragwerksplaner die Druckbeiwerte für geneigte freistehende Dächer auch auf Neigungswinkel $\alpha > 10^\circ$ extrapoliert, was dem üblichen Anwendungsspektrum von Solaraufstellungen entspricht. Diese Vorgehensweise ist unzulässig, so dass derartig ausgelegte Konstruktionen nicht den anerkannten Regeln der Technik entsprechen [2]. Die typische Vorgehensweise zur Erlangung zuverlässiger Druckbeiwerte ist in der angegebenen Reihenfolge:

- Auswertung anderer technischer Regelwerke oder der Fachliteratur
- strömungsdynamische Berechnungen
- Versuch

Bei der vorliegenden Problemstellung liefert bereits die Auswertung der Fachliteratur umfassende Hinweise. In [1] wird für geneigte Solarmodule ein Ansatz der Belastungen auf Grundlage der Druckbeiwerte und Kraftbeiwerte nach Eurocode 1 vorgestellt. Diese Vorgehensweise basiert auf Forschungsergebnissen der Universität Chemnitz. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde die Problemstellung sowohl rechnerisch als auch durch Langzeitversuche untersucht, so dass hiermit anerkannte Regeln der Technik verfügbar sind. Im Eurocode 1 werden die Windlasten bei freistehenden Dächern bei Winkel zwischen $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ als Einzellasten in den Viertelpunkten der Dachlänge angesetzt (Bild 2). In Bild 3 ist exemplarisch die rechnerische Druckverteilung aus einer Strömungsberechnung dargestellt. Die Lage der Maximaldrücke, die in roter Signatur dargestellt sind, verdeutlicht die Richtigkeit dieses Berechnungsansatzes.

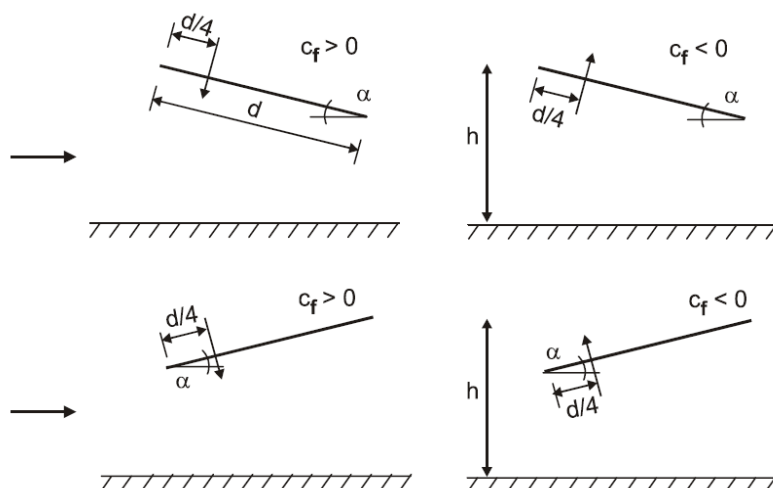


Bild 2 Lastangriffspunkte für die Windkräfte (Eurocode 1)

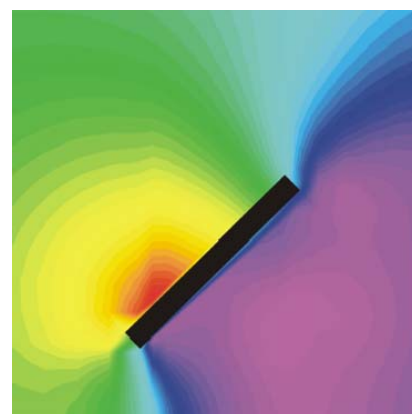


Bild 3 Druckverteilung [1]

Im Anhang 1 sind die Druck- und Kraftbeiwerte für geneigte Dächer $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ nach Eurocode 1 tabellarisch dargestellt. Die Druckbeiwerte gelten für das Modul und die Modulträger, während die Kraftbeiwerte für die Unterstützung und die Nachweise der Befestigung am Dach oder im Boden anzusetzen sind. Der Vergleich der ausgewiesenen Werte für 10° zeigt, dass die Größenordnung annähernd den Regelungen in DIN 1055 entspricht. Mit zunehmender Neigung nehmen die Absolutwerte der Druck- und Kraftbeiwerte signifikant zu. Bei einer Aufständigung mit 30° sind in guter Näherung doppelt so große Windlasten anzusetzen. Dieser Vergleich zeigt, dass ein Nachweis mit den Druckbeiwerten nach DIN 1055 bei größeren Aufstellwinkeln signifikant auf der unsicheren Seite liegt.

Die normativ geregelten Druckbeiwerte für freistehende Dächer gemäß Eurocode 1 müssen naturgemäß eine Vielzahl von möglichen Konstellationen für die bauliche Umgebung, Anströmrichtung und Mindesthöhe erfassen. Zudem wird die gegenseitige Windabschattung im Fall einer Vielzahl hintereinander stehender Reihen nicht explizit ausgewiesen.

Entsprechend der spezifischen Bedingungen für aufgeständerte Photovoltaikmodule lassen sich genauere Werte durch Versuche im Windkanal ermitteln. Diese Vorgehensweise lässt DIN 1055 Teil 4 im Kapitel 6.3 ausdrücklich zu. Für diese Art von Versuchen zur Bewertung von Gebäudeaerodynamik ist ein Grenzschichtwindkanal zu verwenden.

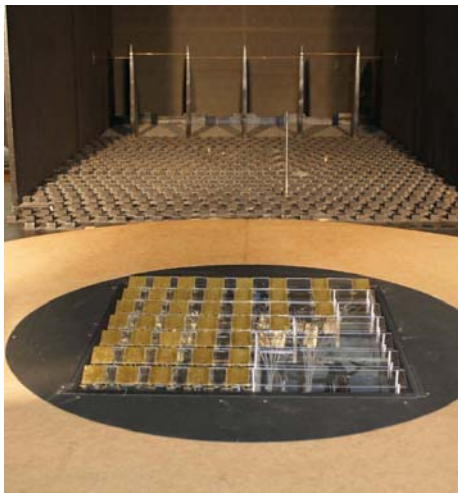


Bild 3 Grenzschichtwindkanal [3]

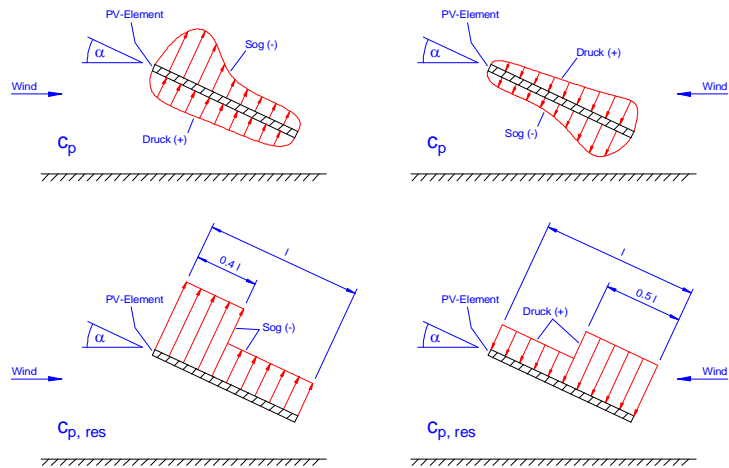
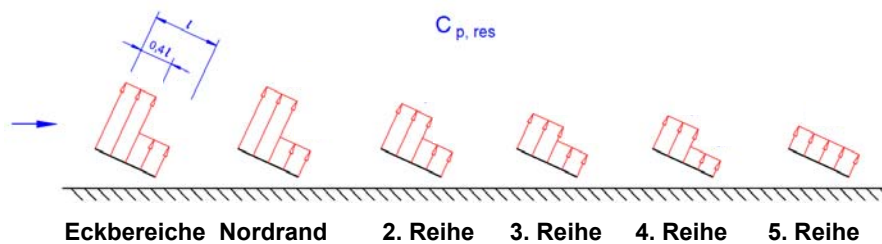


Bild 4 Wirkliche und idealisierte Druckverteilung [3]

Bild 3 zeigt einen Grenzschichtwindkanal, in dem ein Modell des betrachteten Gebäudetyps, im vorliegenden Fall mehrere hintereinander angeordnete Reihen einer Photovoltaik-Freilandanlage, auf einer drehbaren Scheibe angeordnet ist. Dadurch wird der Einfluss sämtlicher Anströmrichtungen explizit berücksichtigt. In Bild 4 sind im oberen Bereich qualitativ gemessene Druckverteilungen für Windanströmungen von der Vorderseite und von der Rückseite aufgetragen. Da diese nichtlinearen Sog- und Druckfelder in der Tragwerksplanung nur mit großem rechnerischem Aufwand erfasst werden könnten, werden diese in idealisierte Druck- und Sogverteilungen umgesetzt, die am Modulfeld gleiche Belastungen und Momente bewirken. Qualitativ stimmen die Ergebnisse gut mit den Untersuchungen in [1] und dem Eurocode 1 überein, die Absolutwerte und der Schwerpunkt des Lastbildes gestatten jedoch eine wirtschaftlichere Auslegung. In Bild 5 ist der Einfluss der Windabschattung hintereinander stehender Reihen dargestellt. Bei Windanströmung von der Rückseite (im Regelfall Norden) erfahren die Aufständerungen kontinuierlich abnehmende Beanspruchungen aus Windeinwirkung. Ab der fünften Reihe verbleibt nur noch eine annähernd gleichmäßig verteilte Last auf der gesamten Modulfläche. Bei größeren freien Flächen innerhalb einer Anlage sind aber neuerlich Randbereiche zu berücksichtigen. Da Anströmung aus Nordwest oder Nordost auch zu höheren Windbeanspruchungen der Randtische an den Ost- und Westflanken einer PV-Anlage führen, sind diese als Randbereiche auszulegen.

Windanströmung von Norden



Windanströmung von Süden

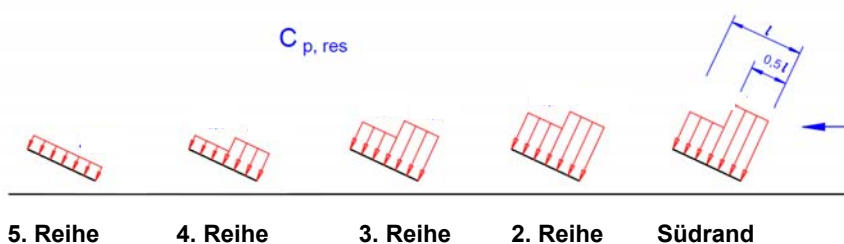


Bild 5 Qualitative Darstellung des Einflusses der Windabschattung hintereinander stehender Reihen

Ein ähnlicher Effekt stellt sich bei Betrachtung einer Anströmung von Süden ab. Hier sind konzentrierte Drücke im unteren Bereich des Modulfeldes zu betrachten. Ab der fünften Reihe stellt sich auch hier ein homogenes Druckfeld über die Fläche ein.

Die qualitative Abbildung der Druckverhältnisse in Bild 5 gilt für typische Solarmontagegestelle unabhängig vom Hersteller, quantitativ ist ein gewisser Einfluss der spezifischen Lösung in Abhängigkeit von den Profilabmessungen und den Spaltmaßen zwischen den Modulen zu erwarten. Zudem hängen die Druckbeiwerte ausgeprägt von der Neigung der Modulfläche ab.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

Berechnungsansätze für Windlasten auf Grundlage eingeführter technischer Normen in den dort genannten Anwendungsgrenzen sind für den Nachweis der Standsicherheit grundsätzlich zulässig. Analogieschlüsse zu anderen Gebäudetypen wie Pultdächer, Bahnsteigdächer oder hintereinander stehende senkrechte Werbetafeln sind unzureichend und entsprechen nicht den anerkannten Regeln der Technik. Spezifische Windtunneltests im Grenzschichtwindkanal entsprechen ebenfalls dem Stand der Technik und bieten im Fall von homogenen Modulfeldern ohne ausgeprägte Fehlflächen insbesondere durch Abminderung der Windbelastung im Innenbereich ökonomisches Optimierungspotenzial. Bei korrekter Anwendung der aerodynamischen Beiwerte in der Tragwerksplanung ist die Standsicherheit uneingeschränkt gewährleistet.

Dr.-Ing. C. Zapfe



- [1] Erfuth/Bahner: Tragkonstruktionen für Solaranlagen, Planungshandbuch zur Aufständigung von Solarkollektoren, Solarpraxis Supernova AG, 2001. ISBN 3-934595-11-1
- [2] Univ. Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider: Gutachterliche Stellungnahme zum Ansatz der Windlasten bei unterströmten (Freiland-) Solaranlagen. Darmstadt, April 2010
- [3] Ruscheweyh Consult GmbH: Windkanalversuche zur Windlast an der Photovoltaik-Freilandanlage für die Firma Schletter GmbH, Aachen, Juni 2010

Anlage 1: Druck- und Kraftbeiwerte für geneigte Dächer $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ (DIN EN 1991-1-4; Eurocode 1)

			Net Pressure coefficients $c_{p,net}$ Key plan		
			<p>The diagram shows a rectangular key plan of a roof. The total width is labeled 'd' and the total height is 'b'. The roof is divided into three zones: Zone A is the central rectangular area; Zone B consists of two vertical strips on the left and right sides, each with a width of 'd/10'; Zone C consists of four corner rectangular areas, each with a height of 'b/10' and a width of 'd/10'.</p>		
Roof angle α	Blockage φ	Overall Force Coefficients c_f	Zone A	Zone B	Zone C
0°	Maximum all φ	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,8	+ 1,1
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,5	- 0,6	- 1,3	- 1,4
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,3	- 1,5	- 1,8	- 2,2
5°	Maximum all φ	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,1	+ 1,3
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,7	- 1,1	- 1,7	- 1,8
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,2	- 2,5
10°	Maximum all φ	+ 0,5	+ 1,2	+ 2,4	+ 1,6
	Minimum $\varphi = 0$	- 0,9	- 1,5	- 2,0	- 2,1
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,6	- 2,7
15°	Maximum all φ	+ 0,7	+ 1,4	+ 2,7	+ 1,8
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,1	- 1,8	- 2,4	- 2,5
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
20°	Maximum all φ	+ 0,8	+ 1,7	+ 2,9	+ 2,1
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,3	- 2,2	- 2,8	- 2,9
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,6	- 2,9	- 3,0
25°	Maximum all φ	+ 1,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 2,3
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,6	- 2,6	- 3,2	- 3,2
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,5	- 2,8
30°	Maximum all φ	+ 1,2	+ 2,2	+ 3,2	+ 2,4
	Minimum $\varphi = 0$	- 1,8	- 3,0	- 3,8	- 3,6
	Minimum $\varphi = 1$	- 1,4	- 1,5	- 2,2	- 2,7
NOTE + values indicate a net downward acting wind action - values represent a net upward acting wind action					