

# WINDLASTMINIMIERUNG AN PHOTOVOLTAIKANLAGEN

Prof. Dr.-Ing. Hans Ruscheweyh  
Dipl.-Ing. Reiner Windhövel

Ruscheweyh Consult GmbH, Aachen

## ZUSAMMENFASSUNG

Der vorliegende Aufsatz gibt einen Überblick über die Ergebnisse von mehr als 20 von den Verfassern durchgeführten Windkanalversuchen und zeigt Möglichkeiten auf, die Windlasten an großen Photovoltaikanlagen realitätsnah zu erfassen und ggf. durch Modifikation zu minimieren. Es werden sog. aufgeständerte Anlagen betrachtet.

## 1. EINLEITUNG

Die Windlasten an Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) sind i. d. R. für die Realisierung von großen PV-Anlagen sowohl auf Flachdächern als auch im Freiland von entscheidender Bedeutung. Der Wind erzeugt an den PV-Elementen je nach Windrichtung abhebbende, abwärts gerichtete und horizontal wirkende Kräfte. Diese Kräfte müssen von der Unterkonstruktion der PV-Elemente aufgenommen werden und bei einer Flachdachanlage über das Dach, bzw. bei einer Freilandanlage direkt in die Gründung abgeleitet werden. Im Fall einer Flachdachanlage bedeutet dies, daß die Hallenkonstruktion das Eigengewicht der PV-Anlage nebst ggf. erforderlicher Ballastierung, die abwärts gerichteten Windkräfte bei südlichen Winden und die resultierenden Horizontalkräfte aufnehmen muß. Es besteht also seitens der z. Z. stark expandierenden Solarindustrie das Interesse, die Windlast an PV-Anlagen realistisch zu bestimmen und durch geschickte Gestaltung zu minimieren.

## 2. STRÖMUNGSVERHÄLTNISSE AN DEN PV-ELEMENTEN

Bestehende Windlastvorschriften wie z. B. die DIN 1055-4 liefern keine verlässlichen Daten für PV-Anlagen. In der ersten Veröffentlichung der Verfasser zum Thema PV-Anlagen [1] wird eine beispielhafte Berechnung der Windlasten nach Norm und Literatur vorgestellt. Diese Berechnungen unter Verwendung von Druckbeiwerten für Dächer führen zu unrealistischen Ergebnissen. Es ist in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung, die aerodynamischen Verhältnisse an einem PV-Element zu kennen, um realistische Druckbeiwerte angeben zu können. Ein schräg aufgestelltes PV-Element wirkt wie eine Tragfläche mit Bodeneffekt, gleichzeitig erfolgt jedoch eine Beeinflussung durch die Nachbarelemente. Die zurück liegenden Elemente erfahren durch den Windschatteneffekt eine deutliche Lastminderung. Freie Flächen infolge Lichtkuppeln, Dachdurchdringungen etc. können wiederum lokal

---

die Windlasten an den angrenzenden Elementen erhöhen. Weitere Einflußgrößen sind die Reihenabstände, der Anstellwinkel  $\alpha$ , der Randabstand, die Attika u. a. Dies macht allgemeine Angaben der Windlasten schwierig, wenn sie realistisch sein sollen. Zahlreiche Parameterstudien im Grenzschichtwindkanal der Ruscheweyh Consult GmbH haben gezeigt, wie in den einzelnen Fällen die Windlasten an den PV-Elementen verteilt sind. Die größte Belastung tritt dann auf, wenn der Wind das Gebäude über Eck anströmt. Die Randelemente werden am höchsten belastet. Die Windlasten nehmen jedoch durch den Windschatteneffekt schnell ab und erreichen im hinteren Feld relativ kleine Werte. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Druckbelastung bei südlichen Winden. Auch hier werden wieder die Randelemente am stärksten belastet und die Lasten nehmen stromabwärts deutlich ab.

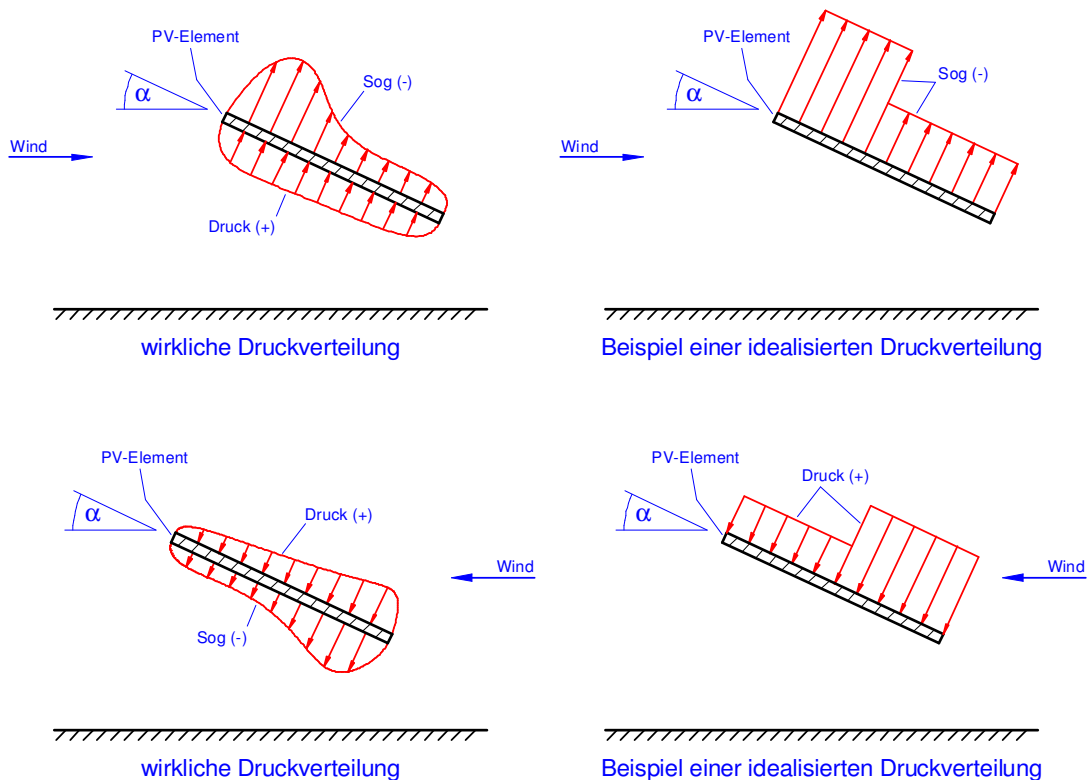


Bild 1: Wirkliche und idealisierte Druckverteilung am PV-Element

### 3. WINDLAST UND WINDLASTMINIMIERUNG

Nachfolgend wird ein Beispiel für die Bestimmung der Windlasten an einer konventionellen PV-Anlage vorgestellt und Möglichkeiten zur Minimierung der Windlast aufgezeigt. Der Begriff konventionell meint in diesem Zusammenhang eine Aufständigung des PV-Elementes auf einer offenen Unterkonstruktion mit einem Systemwinkel von  $\alpha = 25^\circ$ .

Der Winddruck an den Photovoltaikerelementen ist eine Funktion der Windrichtung und der Position auf dem Hallendach. Der ungünstigste Fall ergibt sich bei Windrichtungen aus NW-N-NE. Hier werden die Photovoltaikerelemente von „hinten“ angeströmt, und es entsteht eine abhebende Kraft. Bei südlichen Winden treten die größten Kräfte im Ecken- und Randbereich als nach unten gerichtete Kräfte auf. Es entstehen sowohl vertikale als auch horizontale Kräfte.

Zur Bemessung der gesamten Anlage werden 5 Lastfälle betrachtet: Wind aus NW, N, NE, Wind aus südlichen Richtungen und Wind von der Seite (E und W). Die auftretende Reibung der Luftströmung an den PV-Elementen muß zusätzlich rechnerisch berücksichtigt werden. Hier wird exemplarisch der NE-Wind betrachtet.

Das Dach in Bild 2 ist in verschiedene Belastungszonen eingeteilt (farbig markiert). Die zu diesen Zonen gehörenden stationären und instationären Druckbeiwerte sind in Bild 3 und 4 dargestellt, wobei der Druck auf der Ober- und Unterseite der PV-Elemente als Resultierende (Index: res) zusammengefaßt wurde.

Sämtliche angegebenen Druckbeiwerte beziehen sich auf den Böenstaudruck  $q_b$  (z. B. nach DIN 1055-4) am Standort der Anlage in Höhe OK Dachfläche. Die Verfasser weisen an dieser Stelle ausdrücklich darauf hin, daß es sich bei den angegebenen Werten um beispielhafte Werte handelt, die nicht so ohne weiteres auf andere Situationen übertragen werden können.

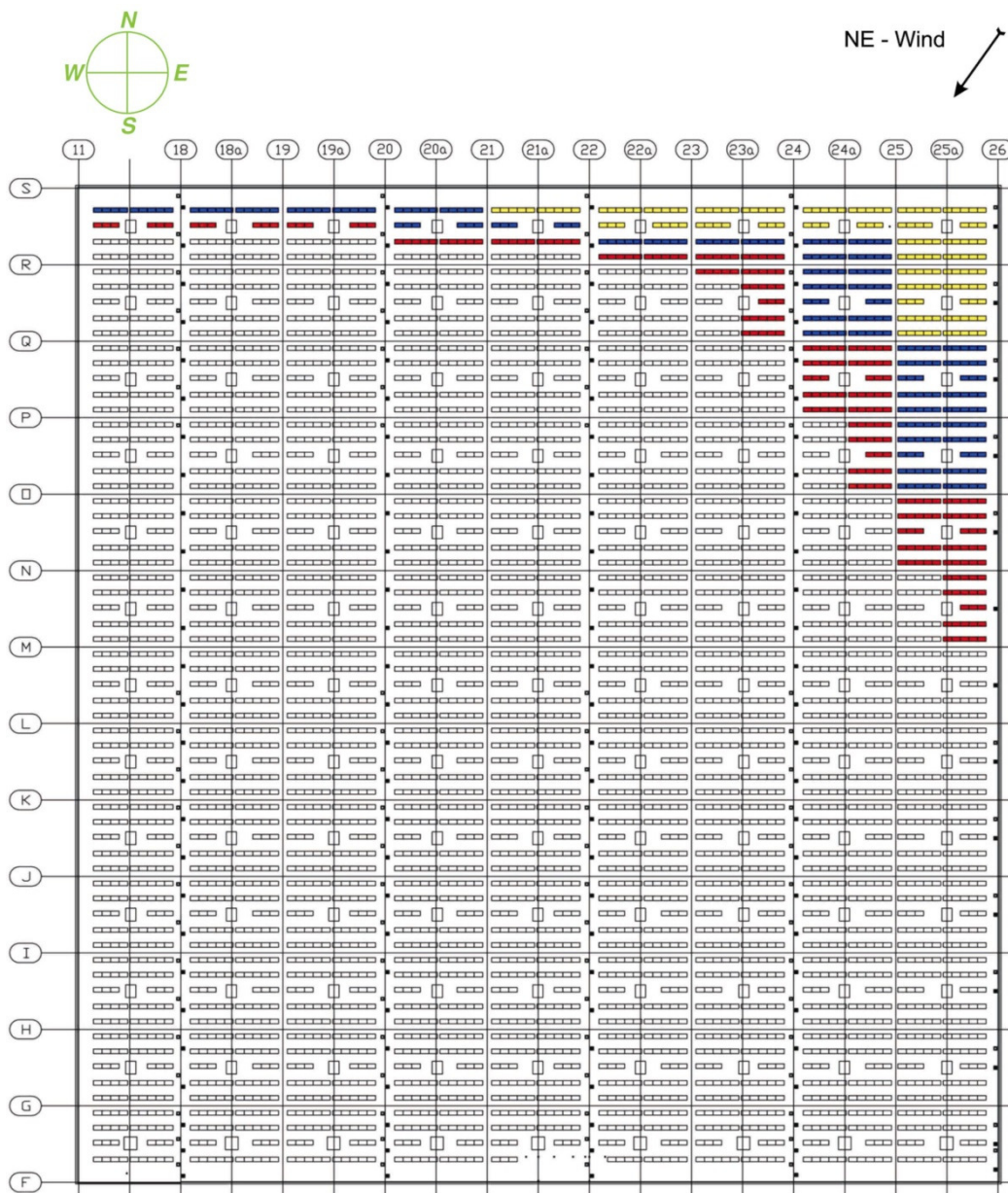


Bild 2: Exemplarische Belastungszonen einer PV-Anlage für den NE-Wind

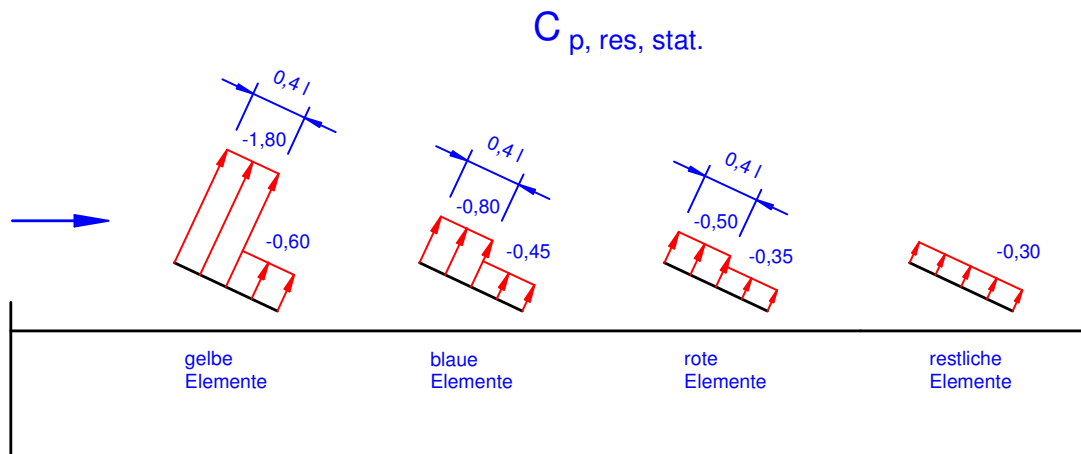


Bild 3: Exemplarisches stationäres Belastungsschema für den NE-Wind (bezogen auf  $q_b$ )

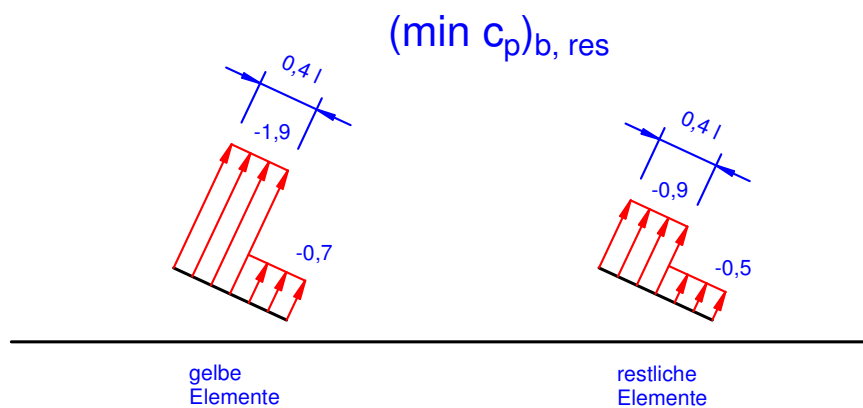


Bild 4: Exemplarisches instationäres Belastungsschema für den NE-Wind (bezogen auf  $q_b$ )

Mit den stationären Druckbeiwerten kann die globale Last auf die gesamte Hallenkonstruktion bestimmt werden. Für die Befestigung der einzelnen PV-Elemente sind die durch lokal einwirkende Böen hervorgerufenen instationären Druckbeiwerte zu beachten. Nach den bisherigen Untersuchungen im Windkanal sind mindestens Lastbeiwerte nach Bild 4 anzusetzen, wenn diese Lasten größer sind als die in Bild 3 angegebenen Werte. Der Einflußbereich einer Bö kann auf etwa 5 m x 5 m begrenzt werden. Es ist zu beachten, daß auch bei nördlichen Winden Drucklasten auftreten, die aber i. d. R. kleiner sind als die, die bei südlichen Winden auftreten.

Durch geschickte Gestaltung der PV-Anlagen und weitergehende Betrachtung der Ergebnisse der Windkanalversuche lassen sich die Belastungswerte herabsetzen. Dazu bieten sich an:

- Verkleinerung der Anstellwinkel der PV-Elemente
- Schließen der nördlichen Seite der PV-Elemente durch einen sog. Schließwinkel. Dadurch wird verhindert, daß sich bei nördlichen Winden ein Überdruck unter den Elementen aufbauen kann. Es zeigt sich jedoch, daß durch diese Maßnahme die Anzahl der möglichen Lastkombinationen ansteigt, so daß zusätzlich Überlegungen für die Lagesicherung und für die Hallenbelastung angestellt werden müssen.
- Wenn die Horizontalkräfte durch rechnerische Integration der Druck- und Sogkräfte an den PV-Elementen ermittelt werden, führt dies erfahrungsgemäß zu relativ hohen Lasten. Neue Messungen im Windkanal haben jedoch gezeigt, daß die effektiven Horizontalkräfte infolge des Integrationseffektes der Gesamtanlage deutlich kleiner sind. Die Horizontalkräfte können vereinfacht als Reibkräfte interpretiert werden. Zahlenwerte liegen inzwischen vor.

In vielen Windkanalversuchen konnte nachgewiesen werden, daß sich auf diese Art eine erhebliche Verkleinerung der Windlasten erreichen läßt.

#### **4. NORMUNG UND STANDARDISIERUNG**

Aufbauend auf den Ergebnissen von Windkanalversuchen und theoretischen Betrachtungen verschiedenster Urheber wird z. Z. versucht, die Windlasten auf PV-Elemente zu standardisieren. Ein Beispiel dafür ist der BRE digest 489 „Wind loads on roof-based photovoltaic systems“ [2]. Die Verfasser des vorliegenden Aufsatzes halten eine Normung / Standardisierung von Windlasten auf PV-Elemente zwar in der Zukunft für notwendig, im Moment jedoch für nicht zweckmäßig, da ständig neue Unterkonstruktionen entwickelt werden, die durch die Standards nicht erfaßt werden können. Dem Anwender einer solchen zukünftigen Norm muß deutlich gemacht werden, daß die dort vorgestellten Druckbeiwerte von einer Vielzahl von Einflußparametern abhängig sind und für seine spezielle Anwendung vielleicht einer grundlegenden Modifikation bedürfen. Bis eine brauchbare Norm vorliegt, sollten die Windlasten an PV-Anlagen von speziellen Fachingenieuren bestimmt werden.

#### **5. LITERATUR**

- [1] H. Ruscheweyh, R. Windhövel: Windlasten an großflächig angeordneten Photovoltaikanlagen, in WtG Berichte Nr. 9, 2005
- [2] Paul Blackmore: BRE digest 489: Wind loads on roof-based photovoltaic systems, BRE Centre for Structural and Geotechnical Engineering
- [3] Diverse interne Berichte der Ruscheweyh Consult GmbH