

## Einfluss des Dachrandabstandes auf die Windlast an Photovoltaikanlagen auf Flachdächern

Prof. Dr.-Ing. Hans Ruscheweyh,  
Dipl.-Ing. Angela Polyzoides

Ruscheweyh Consult GmbH,  
Aachen, Deutschland

**Kurzfassung:** Der vorliegende Artikel befasst sich mit dem Einfluss einer Variation des Randabstandes auf die Windlasten einer Flachdach-Photovoltaikanlage im Windkanalversuch. Neben der Gebäudeumströmung im Allgemeinen, Modell und Versuchsaufbau, sowie der Ermittlung der stationären und instationären Windlasten aus den Messergebnissen, werden die Auswirkungen einer Vergrößerung des Randabstandes dargestellt. Eine deutliche Reduktion der meist bemessungs-bestimmenden maximalen Soglasten lässt sich durch eine Vergrößerung des Randabstandes nicht erreichen.

---

## Einführung

Um Ballast bei Photovoltaik (PV)-Anlagen auf Flachdächern einzusparen, steht die Frage im Raum, ob sich die maximalen Windbelastungen der PV-Anlagen durch eine Erhöhung des Randabstandes reduzieren lassen. Die Windlasten, die auf PV-Elemente auf Flachdächern wirken, werden neben dem Randabstand durch zahlreiche weitere Parameter beeinflusst. Zu nennen sind unter anderem der Anstellwinkel  $\alpha$ , die Größe der Reihenabstände, das Vorhandensein bzw. die Höhe der Attika, freie Flächen infolge von Lichtkuppeln, Dachdurchdringungen etc., und die Lage der PV-Elemente im Feld in Verbindung mit dem Windschatteneffekt.

Zahlreiche Parameterstudien im Grenzschichtwindkanal der Ruscheweyh Consult GmbH haben gezeigt, wie in den einzelnen Fällen die Windlasten an den PV-Elementen verteilt sind [4]. Der Wind erzeugt an den PV-Elementen je nach Windrichtung abhebende, abwärts gerichtete und horizontal wirkende Kräfte. Diese Kräfte müssen von der Unterkonstruktion der PV-Elemente aufgenommen und bei einer Flachdachanlage über das Dach abgeleitet werden. Das bedeutet, dass die Hallenkonstruktion das Eigengewicht der PV-Anlage nebst ggf. erforderlicher Ballastierung, sowie die resultierenden Horizontalkräfte aufnehmen muss. Es besteht also seitens der Photovoltaikindustrie das Interesse, die Windlast an PV-Anlagen durch geschickte Gestaltung zu minimieren.

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.

Zunächst werden einige grundlegende Aspekte bezüglich der Gebäudeumströmung aufgegriffen. Es folgt die Beschreibung der Versuchsmethodik und der Aufbereitung der Messwerte. Im Anschluss daran wird näher auf die Ergebnisse der Randabstandsuntersuchungen eingegangen.

## Gebäudeumströmung

Die Windströmung reißt an der Dachkante ab und bildet ein turbulentes Nachströmgebiet. Abbildung 1 zeigt die Dachumströmung eines Flachdachs sowohl ohne als auch mit PV-Elementen.

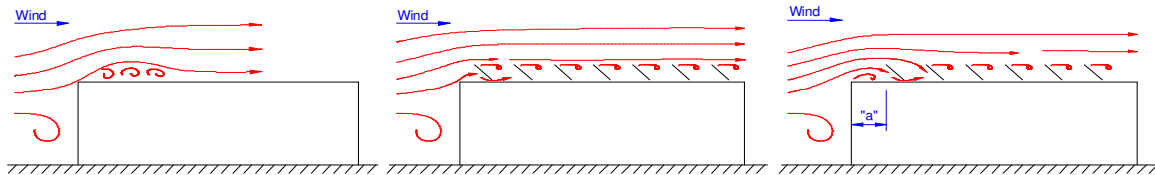


Abbildung 1: Dachumströmung ohne (links), mit PV-Elementen (Mitte) und mit PV-Elementen und größerem Randabstand (rechts)

Bei Anblasung über Eck entsteht ein Vorderkantenwirbelsystem, das sich auf einer längeren Strecke auf dem Dach auswirkt (s. Abbildung 2).

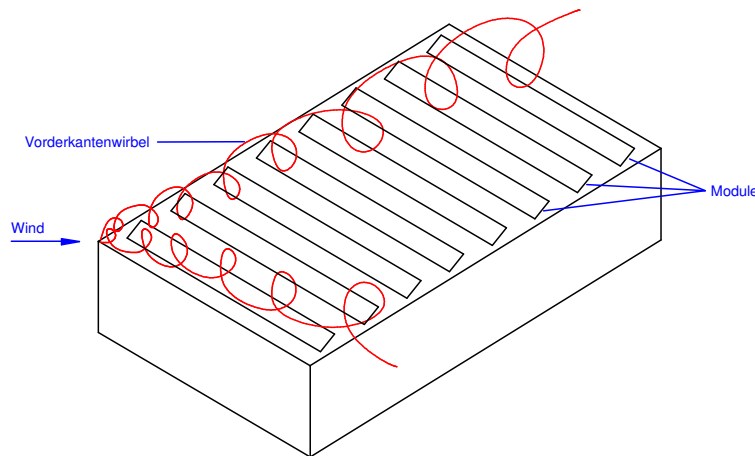


Abbildung 2: Vorderkantenwirbelsystem bei Anblasung über Eck

Beide Phänomene bestimmen die Windlasten an den Rand- und Eckenbereichen einer Photovoltaikanlage auf dem Flachdach. Aus den zahlreichen Versuchen, die im Windkanal an PV-Anlagen durchgeführt worden sind, ist bekannt, dass die Rand- und Eckenelemente der PV-Anlage die höchsten Windlasten erfahren.

Werden die Randabstände der PV-Module zur Dachkante vergrößert, kann erwartet werden, dass der Einfluss des Vorderkantenwirbels etwas abnimmt, dafür aber das Nachströmgebiet hinter der Strömungsablösung kleiner wird und eine Erhöhung der Windlast bewirkt. Beide Phänomene laufen also entgegengesetzt, so dass eine einheitliche Aussage ohne Modellversuch nicht getroffen werden kann.

## Modell und Versuchsaufbau

Die Modellmaßstäbe liegen je nach Gebäude- bzw. Modulgröße üblicherweise im Bereich 1:20 bis 1:80. Im Grenzschichtwindkanal werden die Eigenschaften des natürlichen Windes, wie Geschwindigkeitsverteilung und Turbulenzverteilung über der Höhe, simuliert. Das Windgrenzschichtprofil und das Turbulenzprofil werden mit Hilfe von Wirbelgeneratoren und Bodenrauigkeiten nach der Counihan-Methode [2] erzeugt. Diese Einrichtung ist in Abbildung 3 zu sehen.

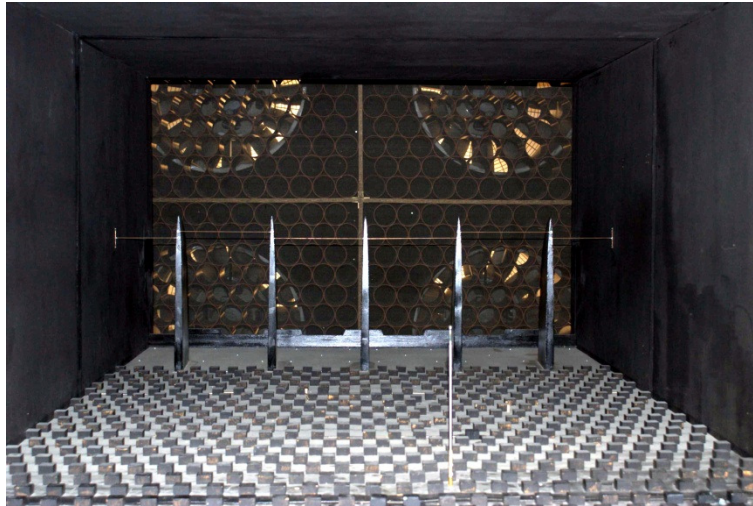


Abbildung 3: Blick in den Windkanal der Ruscheweyh Consult GmbH, Aachen

Es wurde ein Windgrenzschichtprofil eingestellt, das einer wenig bebauten Landschaft entspricht. Das Grenzschichtprofil ist mit Gleichung (1) beschrieben.

$$\frac{v(z)}{v_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (1)$$

worin  $v(z)$  die Windgeschwindigkeit in der Höhe  $z$  über Grund bedeutet. Der Wert  $v_{ref}$  ist eine Bezugsgeschwindigkeit in der Höhe  $z_{ref}$ . Üblicherweise wird die meteorologische Höhe 10 m verwendet. Der Exponent  $\alpha$  ist durch die Umgebungslandschaft geprägt und wurde im Windkanalversuch auf  $\alpha = 0,16$  eingestellt. Das entspricht der Geländekategorie II in der DIN EN 1991-1-4 [1]. Die Abbildung 4 zeigt eine Skizze eines typischen Versuchsaufbaus im Windkanal. Weiterhin wird die gesamte Versuchsmethodik nach den Regeln der „Windtechnologischen Gesellschaft e.V.“ [3] durchgeführt.

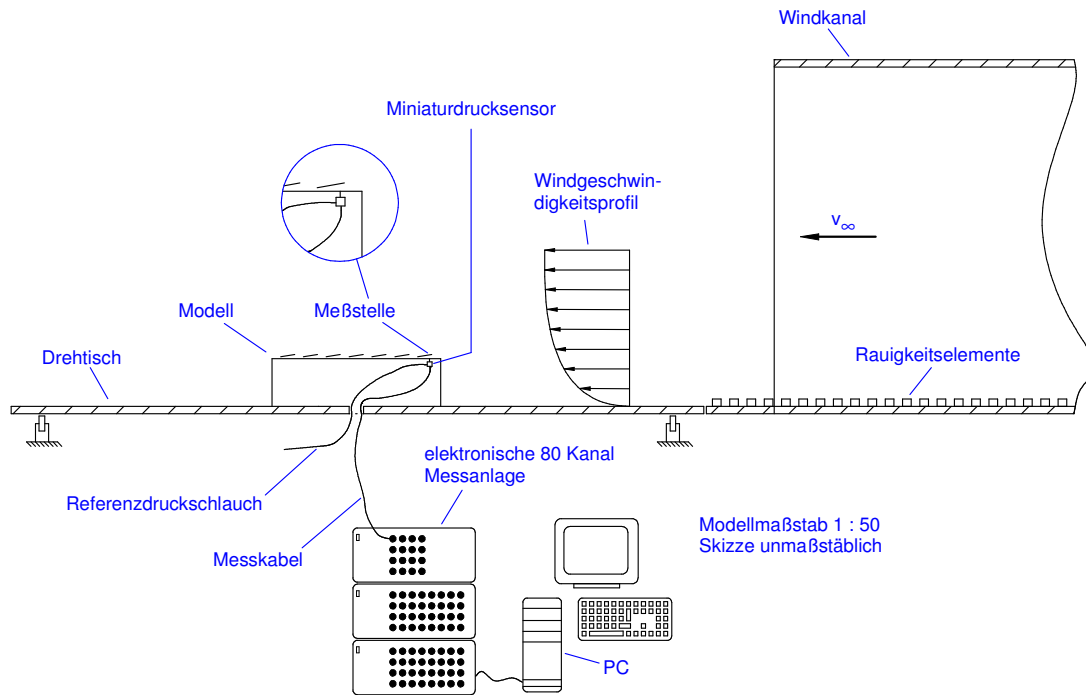


Abbildung 4: Versuchsaufbau im Windkanal der Ruscheweyh Consult GmbH

### Messelement mit Schließwinkel

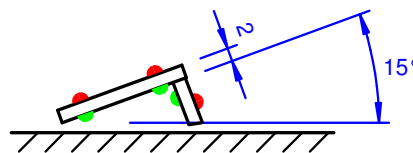


Abbildung 5: Verteilung der Messstellen auf den Elementen

Die PV-Elemente und die Schließwinkel werden durch Messelemente nachgebildet, in denen zur Bestimmung der Windlasten Druckmessstellen angeordnet sind. Die Anordnung der Druckmessstellen auf den Messelementen ist in Abbildung 5 dargestellt. Mit den installierten PV-Reihen können jeweils die wesentlichen Lastwerte (Eckenelement, Randelement, übriges Feld) erfasst werden.

Das Modell wurde auf einen Drehtisch montiert, mit dem alle Windrichtungen eingestellt werden können. Es wurde alle  $15^\circ$  gemessen. In kurzer Entfernung hinter der Messstelle sind Miniaturdrucksensoren angeschlossen. Die Drucksignale werden in ein elektrisches Signal umgewandelt, parallel mit einer Abtastrate von 5 kHz abgefragt und als Zeitreihen im Rechner gespeichert. Die Aufzeichnung erfolgt zeitgleich. Es können 144 Messstellen zur gleichen Zeit gemessen werden. Im Rechner werden die Werte verarbeitet und als dimensionslose Druckbeiwerte  $c_p$  ausgegeben. Es wurden sowohl die stationären als auch die instationären Winddrücke gemessen.

Um die verschiedenen Randabstände zu simulieren, wurde das Modell um die jeweilige Differenz zum nächstgrößeren Randabstand erweitert und es wurde eine erneute Messung durchgeführt. Insgesamt wurden vier Dachrandabstände (s. Abbildung 6) simuliert: 1,5 m (nicht dargestellt), 3,0 m (links), 6,0 m (Mitte) und 9,0 m (rechts).

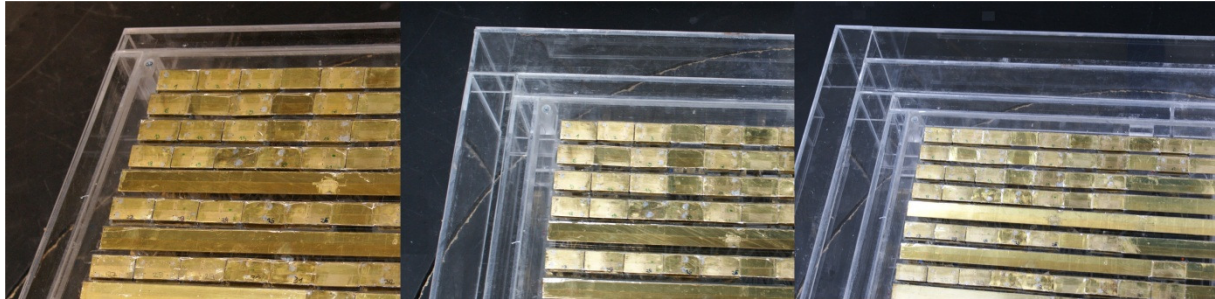


Abbildung 6: Modelle mit verschiedenen Randabständen im Windkanal der Ruscheweyh Consult GmbH, Aachen

## Ermittlung der Windlasten

Die Windlastermittlung erfolgt über Druckmessung an den einzelnen Modulen. Für den im Windkanal ermittelten Druckbeiwert gilt:

$$c_p = \frac{\Delta p}{q_{m(h)}} \quad (2)$$

Es werden die resultierenden Druckbeiwerte  $c_{p,res}$  zwischen Ober- und Unterseite der Module dargestellt.

$$c_{p,res} = \frac{\Delta p_{oben} - \Delta p_{unten}}{q_m(h)} \quad (3)$$

wobei  $q_m(h)$  der mittlere Windstaudruck im Modell in Dachhöhe und  $\Delta p$  die gemessene Winddruckdifferenz (je nach Windlastkonzept entweder stationär oder instationär) ist. Für die Anwendung des quasi-statischen Windlastkonzeptes nach DIN EN 1991-1-4 [1] wird der Böenstaudruck verwendet, d.h. die Beiwerte nach Gleichung (2) werden damit multipliziert. Es sind jedoch auch momentane extreme Lasten zu beachten, die sich aus der lokalen Einwirkung von Böen und Wirbelablösungen, gemittelt über eine Einwirkungszeit von 0,5 sec im Original, ergeben. Sie sind lokal begrenzt und werden zweckmäßigerweise durch das stochastische Windlastkonzept beschrieben, das sich auf den mittleren Windstaudruck (Index m) bezieht. Es werden die Extremwerte der Winddruckbeiwerte aus den Zeitreihen ermittelt:  $(\max/\min c_p)_m$ . Zweckmäßigerweise werden diese Beiwerte auf den Böenstaudruck

(Index  $b$ ) umgerechnet, so dass in der Praxis nur mit einem Staudruck gerechnet werden muss.

$$(\max/\min c_{p,res})_b = (\max/\min c_{p,res})_m \frac{q_m}{q_b} \quad (4)$$

Diese sog. instationären Lasten wirken auf einem begrenzten Raum. Die Messungen haben gezeigt, dass sie etwa auf einer Fläche von 3 m x 3 m einwirken.

## Ergebnisse Randabstandsuntersuchungen

### Allgemeines

Ein schräg aufgestelltes PV-Element wirkt wie eine Tragfläche mit Bodeneffekt, gleichzeitig erfolgt jedoch eine Beeinflussung durch die Nachbarelemente. An den Rand- und Eckenbereichen der Photovoltaikanlagen ist die Windbelastung am höchsten. Bemessungbestimmend sind üblicherweise die Soglasten bei nördlichen Winden, wobei die höchsten Windlasten bei Windrichtungen über die Gebäudeecke (NW- und NE-Wind) in dem Eckenbereich auftreten, der dem Wind zugewandt ist.

Für eine maximale Nutzung der Dachfläche erfolgt die Belegung mit Photovoltaikerelementen üblicherweise bis auf einen Dachrandabstand von etwa 1,5m. Dieser Abstand wird in der Regel für die Aufstellung und Wartung der Anlage benötigt. Für die Windbelastung von Flachdächern liefert die DIN EN 1991-1-4, Kapitel 7 [1] eine Aufteilung der Dachfläche in verschiedene Bereiche mit jeweils konstanter Windbelastung (s. Abbildung 7).

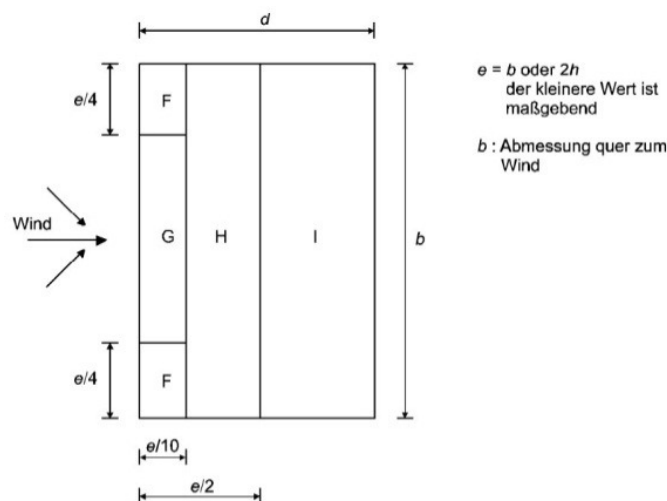


Abbildung 7: Einteilung der Dachflächen bei Flachdächern, Bild 7.6 [1]

Bei der Anwendung von Abbildung 7 für eine PV-Anlage auf einem 10 m hohen Gebäude ergäbe sich die Breite der Zonen F und G mit den höheren aerodynamischen Beiwerten zu  $e/10 = 2$  m. Wie man aus Abbildung 8 erkennt, ist diese Breite wesentlich zu klein.

Die Zonen des Flachdachs dürfen also nicht auf die PV-Anlage übertragen werden. Bei einer PV-Anlage auf dem Dach handelt es sich um einen Aufbau auf der Dachfläche, der anderen aerodynamischen Gesetzmäßigkeiten unterliegt als ein Flachdach ohne Aufbauten.

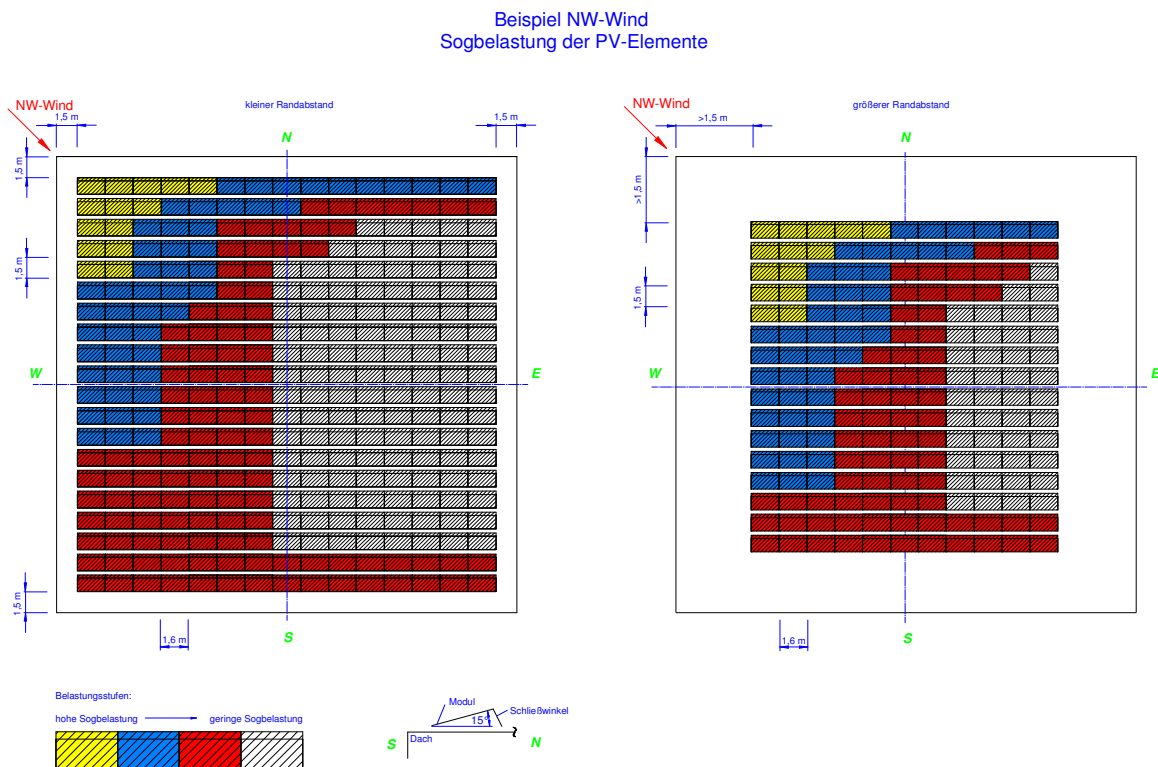


Abbildung 8: Soglasten bei NW-Wind für verschiedene Randabstände

Wenn der Dachrandabstand vergrößert, das Feld also verkleinert wird, werden die Elemente, die nun zu Randelementen geworden sind höher belastet. Abbildung 8 gibt ein Beispiel für die Sogbelastung bei NW-Wind der Elemente einer PV-Anlage auf einem Flachdach, wobei die gelben Elemente einen hohen Auftrieb erfahren und die Windbelastung über blau und rot bis hin zu den weißen Elementen mit geringer Belastung abnimmt.

Oft wird fälschlicherweise angenommen, dass durch Freilassen der höher belasteten Bereiche nur die Dachareale mit kleineren Belastungen mit PV-Elementen belegt werden können. Diese Denkweise führt zu der Annahme, dass wenn von Photovoltaikanlagen die hoch belasteten Rand- und Eckenbereiche weggelassen werden, der Randabstand also erhöht wird, die Rand- und Eckenbereiche des nun verkleinerten Feldes die gleichen kleinen Belastungen erfahren, wie vorher, als sie im Windschatten von weiteren Photovoltaikelementreihen standen. Auf dieser Grundlage erfolgt dann eine falsche Bemessung der PV-Anlage und die Standsicherheit ist nicht mehr gegeben.



Anhand von einigen Randelementen wird im folgenden Kapitel der Randabstandseinfluss genauer beleuchtet. Kleinere Randabstände als 1,5m sind nicht sinnvoll, da zum einen die Windbelastung der Randelemente stark zunimmt und zum anderen Montage und Wartung erschwert werden.

### Darstellung des Randabstandeinflusses auf ausgewählten Randelemente

Zur Darstellung des Randeinflusses werden einige Randelemente herausgegriffen und deren resultierende stationäre und instationäre Windlasten über dem Randabstand graphisch dargestellt. Negative Druckbeiwerte kennzeichnen eine Sogbelastung und positive Druckbeiwerte bedeuten Druckbelastung. Zunächst werden die Elemente E01 bis E03, sowie E08, E13 und E18 des nordwestlichen Eckenbereiches näher betrachtet, deren Lage im Feld in Abbildung 9 dargestellt ist.

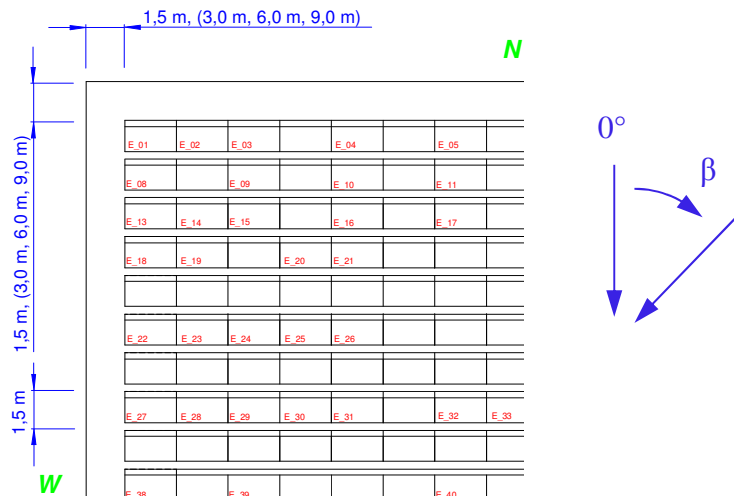


Abbildung 9: PV-Feld-Ausschnitt NW: Lage der Messelemente im Feld

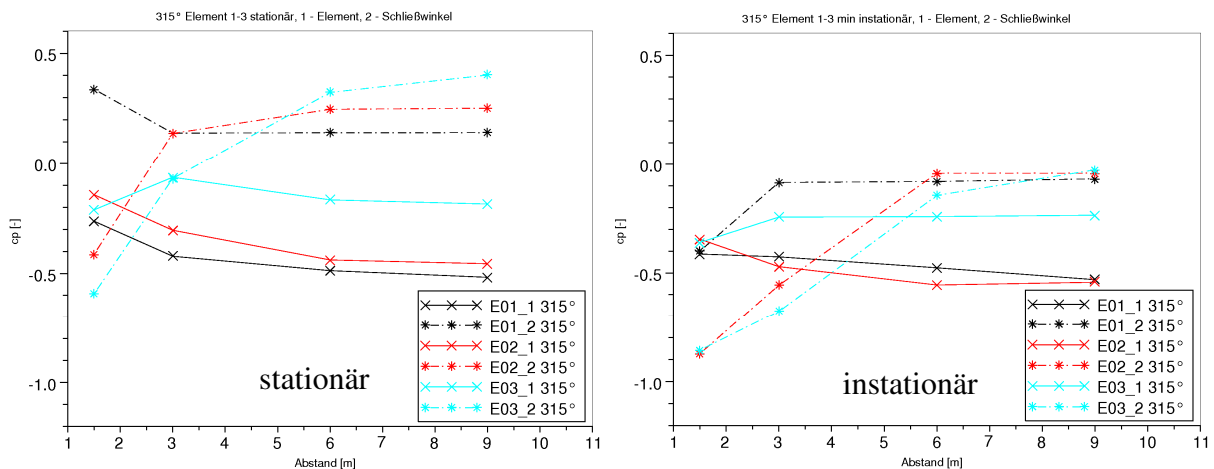


Abbildung 10: Druckbeiwerte  $c_p$  in Abhängigkeit vom Randabstand, Elemente E01, E02, E03, Windrichtung  $\beta = 315^\circ$  (NW-Wind), stationär und instationär

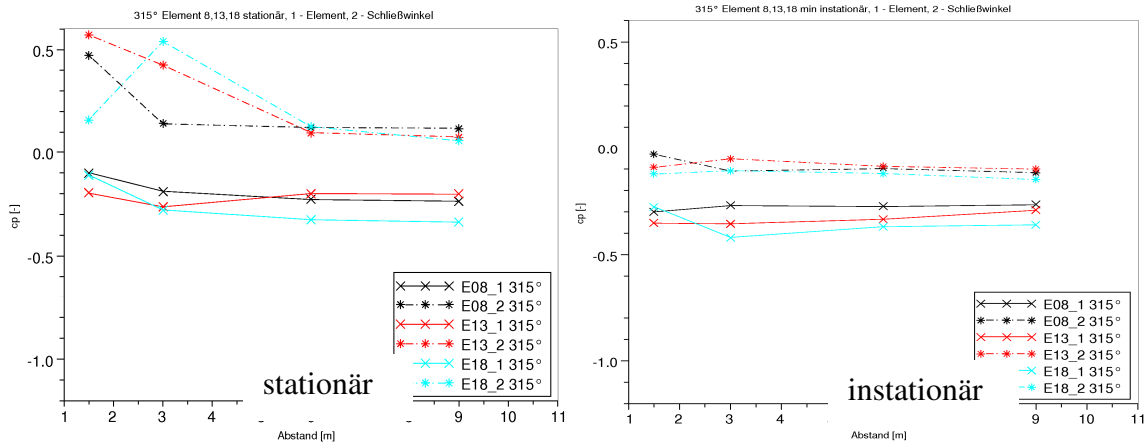


Abbildung 11: Druckbeiwerte  $c_p$  in Abhängigkeit vom Randabstand, Elemente E08, E13, E18, Windrichtung  $\beta = 315^\circ$  (NW-Wind), stationär und instationär

Die Abbildung 10 und Abbildung 11 geben den Verlauf des resultierenden Druckbeiwertes  $c_{p,res}$  mit steigendem Randabstand für die PV-Elemente getrennt nach Element (Index\_1) und Schließwinkel (Index\_2) bei einer nordwestlichen Windrichtung wieder. Die Versuche haben gezeigt, dass ein größerer Randabstand der Randmodule zur Dachkante für den aerodynamischen Auftrieb der Rand- und Eckenmodule keinen Vorteil bringt, im Gegenteil, die Werte steigen sogar etwas an, während die Werte auf den Schließwinkeln im Durchschnitt sinken oder sich vom negativen Wert zum positiven Wert entwickeln, was die horizontale Schubkraft erhöht. Im hinteren Bereich des Modulfeldes ändern sich die Windlasten nicht (hier nicht dargestellt). Die Werte sind dort klein. Der Randabstand von etwa 1,50 m für Modulgrößen von 1,0 m x 1,60 m erweist sich als optimale Größe. Ein kleinerer Abstand unter 0,50 m, der an anderen Objekten untersucht wurde, erhöht die Soglast wieder. Bei südwestlichen Windrichtungen ist die Auswirkung einer Randabstandsänderung auf den resultierenden Druckbeiwert  $c_{p,res}$  der Elemente E47, E50, E51, E52 und E53 der südwestlichen PV-Feldecke interessant, deren genaue Lage im PV-Feld aus Abbildung 12 ersichtlich ist. Für einige Elemente ist der Schließwinkel nicht dargestellt, da in dem Bereich nicht alle Schließwinkel mit Messstellen versehen wurden.

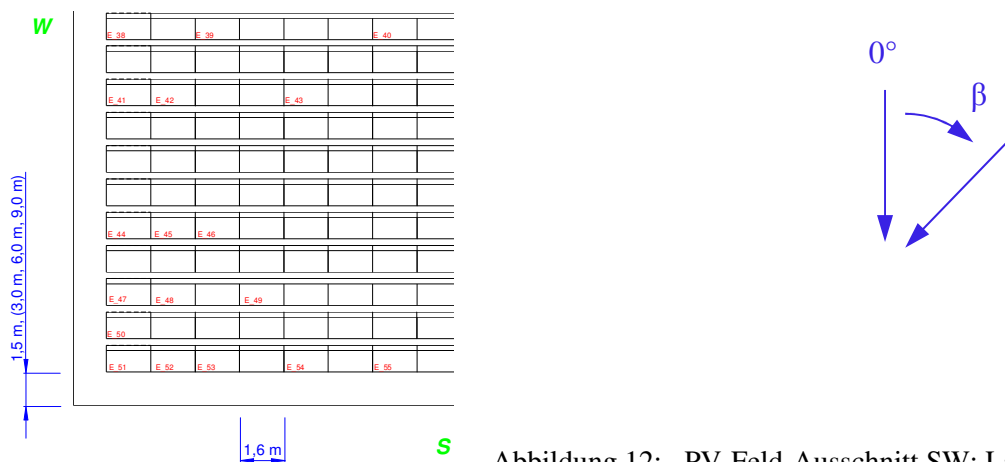


Abbildung 12: PV-Feld-Ausschnitt SW: Lage der Messelemente im Feld

Abbildung 13 zeigt das Druckverhalten der PV-Elemente bei einer südwestlichen Windrichtung. Die Druckkräfte am Element nehmen mit zunehmendem Randabstand ab. Dieser Fall ist aber selten bemessungsbestimmend.

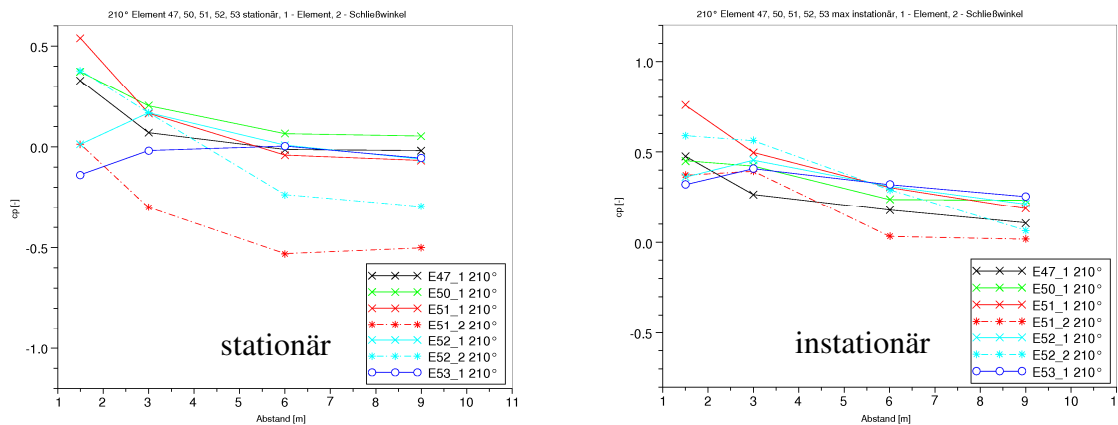


Abbildung 13: Druckbeiwerte  $c_p$  in Abhängigkeit vom Randabstand, Elemente E47, E50, E51, E52, E53, Windrichtung  $\beta = 210^\circ$  (SW-Wind), stationär und instationär

## Schlussfolgerung

Die Versuche haben gezeigt, dass die maximalen Soglasten, die in der Regel bemessungsbestimmend sind, mit zunehmendem Randabstand im Randbereich des PV-Feldes leicht ansteigen. In dem dargestellten Fall liegt die Lastreduktion durch Entfernung der Randelemente vom Vorderkantenwirbel unter der Lastvergrößerung durch die am Dachrand abgelöste Strömung, die sich auf der Dachfläche wieder formieren kann, wenn die Freifläche vor den Modulen vergrößert wird. Die maximalen Druckkräfte der Randmodule nehmen hingegen mit zunehmendem Randabstand ab. Dieser Fall ist jedoch selten bemessungsbestimmend. Der für die untersuchte Konfiguration optimale Randabstand für die relativ geringste Soglast ist etwa 1,50 m bei Modulgrößen von 1,0 m x 1,6 m.

## 6 Literatur

- [1] DIN EN 1991-1-4:2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen – Windlasten, Dezember 2010
- [2] Counihan, J.: An improved Method of Simulation an atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel - In: Atmos. Environ., 3 (1969), Seite 43 – 49
- [3] WtG- Merkblatt: Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik, WtG 001 / 1996
- [4] Ruscheweyh, H; Windhövel, R.: Windlastminimierung an Photovoltaikanlagen, WtG- Berichte Nr. 11 (2009), Windtechnologische Gesellschaft e.V.