



WINDWIRKUNGEN UND WINDLASTEN AN PV-DACHANLAGEN



© SCHÜßLER-PLAN 2024

EINE KRITISCHE BESTANDSAUFNAHME ZUM STAND DER TECHNIK

Bochum, den 15.09.2026

NIEMANN INGENIEURE GbR

GESELLSCHAFTER:

DR.-ING. N. HÖLSCHER, GF

DR.-ING. F. LUPI

PROF. DR.-ING. R. HÖFFER

WISSENSCHAFTLICHER BERATER:

PROF. DR.-ING. H.-J. NIEMANN



SENIOR EXPERTIN:

Dipl.-Ing. S. Diburg

KLIMATISCHE EINWIRKUNGEN

Technologiezentrum Ruhr · Konrad-Zuse-Str. 18 · D 44 801 Bochum

WINDWIRKUNGEN UND WINDLASTEN AN PV-DACHANLAGEN

EINE KRITISCHE BESTANDSAUFNAHME ZUM STAND DER TECHNIK

AUFTRAGGEBER:



**Landesvereinigung der
Prüfsingenieure für Bautechnik NW e.V.**
Lise-Meitner-Str. 1b
33104 Paderborn

AUFTRAGNEHMER:



NIEMANN INGENIEURE GbR

Gesellschafter

Dr.-Ing. N. Hölscher, GF

Dr.-Ing. F. Lupi

Prof. Dr.-Ing. R. Höffer

Wissenschaftlicher Berater

Prof. Dr.-Ing. H.J. Niemann

Senior Expertin

DIPL.-ING. S. DIBURG

KLIMATISCHE EINWIRKUNGEN

PROJEKTLEITUNG:

Dr.-Ing. Norbert Hölscher

Gesamtkoordination

BEARBEITUNG:

Dr.-Ing. Francesca Lupi

Technische Projektleitung

Dipl.-Ing. Susanne Diburg

Internationale Normung

Dr.-Ing. Norbert Hölscher

Projektstudien

Dr.-Ing. Ulf Winkelmann

Windkanalstudien

Dr.-Ing. Ibrahim Güven

In-Situ Studien

Dipl.-Ing. Nico Jordan

CFD-Untersuchungen

BSc. Eugenio BrenaBrena

Internationale Normung

Dipl.-Kfm. Mathias Joemann

Controlling

Bericht: W24-1015/1.V2

Auftrag: W24-1015

Bochum, den 15.09.2026



INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	5
1. Einleitung	6
1.1 Aufgabenstellung und Anlass	6
1.2 Literatur	10
2. Grundlagen zur Bestimmung der Einwirkungen auf Wind	11
3. Windkanaluntersuchungen zur Windlastermittlung	13
4. Internationaler Status von Normen und anderer Regelwerke	15
5. Die niederländische Norm NEN 7250:2021	16
6. Die amerikanische US Norm ASCE 7-22	18
7. Anwendungsbeispiel	22
8. Empfehlung zur Normweiterentwicklung	25
9. Bild- und Tabellenverzeichnis	27

1. EINLEITUNG

1.1 Aufgabenstellung und Anlass

Der vorliegende Beitrag verfolgt das Ziel, eine kritische Bestandsaufnahme des aktuellen Stands der Technik hinsichtlich der Windwirkungen und Windlasten auf dachinstallierte Photovoltaikanlagen zu geben. Zunächst werden die grundlegenden Mechanismen der Windbeanspruchung solcher Systeme erläutert, um den aktuellen Stand der Technik in Wissenschaft, Normung und Praxis einordnen zu können. Darauf aufbauend erfolgt eine Bewertung ausgewählter Regelwerke.

Die Motivation für die vorliegende Studie ergibt sich aus einer wesentlichen Lücke im aktuellen Regelwerk über Windwirkungen. Sowohl die derzeit gültige Fassung der Windlastnorm DIN EN 1991-1-4:2010-12 einschließlich des zugehörigen Nationalen Anhangs als auch die aktuell in Überarbeitung befindliche Version prEn 1991-1-4:2025 enthalten keine hinreichenden Regelungen zur Erfassung von Windwirkungen an dachinstallierten Photovoltaikanlagen.

In der Ingenieurpraxis führt diese Situation dazu, dass auf alternative Informationsquellen – insbesondere die Fachliteratur zu PV-Dachanlagen – zurückgegriffen werden muss. Deren inhaltliche Tiefe und Anwendbarkeit entsprechen jedoch nicht in allen Fällen den Anforderungen konkreter Planungsaufgaben.

Im Fall von Photovoltaikanlagen verschärft sich diese Problematik zusätzlich: Zwar liefern einschlägige wissenschaftliche Veröffentlichungen wertvolle Erkenntnisse zu grundlegenden aerodynamischen Zusammenhängen, eine unmittelbare Übertragbarkeit in die Entwurfspraxis ist jedoch häufig nur eingeschränkt möglich.

Insgesamt fehlt bislang eine konsistente und übergreifende Bewertung des vorhandenen Kenntnisstandes. Insbesondere ist nicht abschließend geklärt, welche Ansätze zur Bestimmung von Windlasten als gesichert gelten können, wo die Anwendungsgrenzen bestehender



Untersuchungen liegen und welche Fragestellungen weiterhin offen sind.

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Studie das Ziel, nationale und internationale Erkenntnisse zu Windlasten dachinstallierter Photovoltaikanlagen systematisch zusammenzustellen, zu analysieren und kritisch zu bewerten.

Im Rahmen dieser Aufgabenstellung wurde das Ingenieurbüro **Niemann Ingenieure GbR** in Bochum vom Verband der Prüfsingenieure beauftragt, auf Grundlage einer systematischen Auswertung wissenschaftlicher Veröffentlichungen, praxisbezogener Erfahrungsberichte sowie nationaler und internationaler Regelwerke eine kritische Bestandsaufnahme zu erarbeiten. Ziel der Ausarbeitung ist es, die vorhandenen Erkenntnisse zusammenzuführen, zu bewerten und daraus sachgerechte Empfehlungen für die Weiterentwicklung der Normung abzuleiten. Die vollständigen Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Bericht [1] dokumentiert.

Das Ingenieurbüro **Niemann Ingenieure GbR** ist in den Bereichen Windingenieurwesen, Baudynamik sowie klimatische Einwirkungen tätig. Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erfolgen unter anderem in enger Zusammenarbeit mit der Ruhr-Universität Bochum, insbesondere mit der Arbeitsgruppe für Windingenieurwesen und Strömungsmechanik, die über einen Grenzschichtwindkanal für experimentelle Untersuchungen verfügt.

Die Ermittlung von Windlasten auf dachinstallierten Photovoltaikanlagen ist mit erheblichen Herausforderungen verbunden, da es sich um ein komplexes strömungsmechanisches Problem handelt. Eine wesentliche Ursache hierfür liegt in der Überlagerung mehrerer Strömungseffekte: Zum einen wirkt die atmosphärische Grenzschicht als turbulente Anströmung. Zum anderen beeinflusst das Gebäude selbst die Strömung, indem es eine globale Umströmung sowie charakteristische Wirbelstrukturen erzeugt. Zusätzlich führen die Photovoltaikmodule zu lokalen Strömungsänderungen, die das Strömungsfeld weiter modifizieren.



Daraus ergibt sich eine ausgeprägte Wechselwirkung zwischen drei maßgeblichen Einflussgrößen – Wind, Gebäude und Photovoltaikanlage. In Abhängigkeit von Gebäudegeometrie und Anströmung bildet sich auf dem Dach ein komplexes Druckfeld aus, das durch großskalige Wirbel der Gebäudeumströmung sowie durch kleinskalige Strukturen im Bereich der PV-Module geprägt ist.

Die Komplexität wird zusätzlich dadurch erhöht, dass eine Vielzahl von Parametern die resultierenden Einwirkungen auf Wind maßgeblich beeinflusst und zu erheblichen Unterschieden führen kann. Diese lassen sich in mehrere Kategorien einteilen:

- **Strömungsmechanische Effekte:** Ablösungs- und Wiederanheftungsprozesse der Dachüberströmung, Eck- und Kantenwirbel bei langgestreckten Bauwerksgeometrien, Ventilation von Hinterlüftungsräumen sowie Über- und Unterströmung der PV-Module. Darüber hinaus treten Verdrängungs- und Abschattungseffekte auf, die lokal zu verstärkten oder verminderten Windbeanspruchungen führen können.
- **Einfluss der Installationsparameter:** Die Modulanordnung (dachparallel oder geneigt), das Vorhandensein seitlicher Verkleidungen oder Rückwände sowie die Ausbildung von Belüftungssituationen (z. B. Firstbelüftung) spielen eine entscheidende Rolle. Ebenso relevant sind die Anordnung der Module in Reihen (hintereinander oder nebeneinander) sowie die Art der Unterkonstruktion, beispielsweise in Form von Ballastierungen, Ständerwerken oder Modulverbänden. Auch die Positionierung auf dem Dach (Dachkante, Dachecke oder Dachmitte) beeinflusst die Belastungssituation wesentlich.
- **Bauliche Randbedingungen:** Die Form und Größe der Dachflächen (z. B. Flach-, Pult-, Sattel- oder Giebeldach), die Dachneigung, das Vorhandensein von Attiken sowie zusätzliche Dachaufbauten wirken sich ebenfalls signifikant auf die Windbeanspruchung aus.



Insgesamt zeigt sich, dass die Bestimmung von Windlasten auf Photovoltaikanlagen nur unter Berücksichtigung eines vielschichtigen Zusammenspiels von Strömung, Bauwerksgeometrie und Anlagenausführung möglich ist.

Grundsätzlich lassen sich zwei Haupttypen von dachinstallierten Photovoltaikanlagen unterscheiden: Systeme in Südausrichtung sowie Systeme in Ost-West-Ausrichtung. Diese unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich ihrer geometrischen und konstruktiven Eigenschaften, sondern auch im Hinblick auf den Stand der wissenschaftlichen Untersuchung und normativen Erfassung.

- Photovoltaikanlagen in Südausrichtung: Dieser klassische und weit verbreitete Anlagentyp wird sowohl auf Flach- als auch auf Schrägdächern eingesetzt. Üblicherweise kommen Dickschichtmodule mit einem vergleichsweise hohen Eigengewicht (typischerweise etwa 20 kg oder mehr pro Modul) zum Einsatz, was zu einer signifikanten zusätzlichen Last auf die Dachkonstruktion führt. Diese Systeme zeichnen sich durch einen hohen energetischen Wirkungsgrad aus und erreichen insbesondere bei direkter und intensiver Sonneneinstrahlung hohe Energieerträge.
- Photovoltaikanlagen in Ost-West-Ausrichtung: Systeme in Ost-West-Ausrichtung werden überwiegend auf Flachdächern eingesetzt und bieten trotz eines geringeren energetischen Wirkungsgrads wirtschaftliche und betriebliche Vorteile. So können auch bei nicht optimaler Sonneneinstrahlung stabile Energieerträge erzielt werden, und häufig sind diese Anlagen in Anschaffung und Betrieb kostengünstiger.

Charakteristisch ist der Einsatz leichter und oft dünnerer Module (z. B. Dünnschichtmodule) mit einem typischen Modulgewicht von etwa 10 kg. Das reduzierte Eigengewicht wirkt sich zwar günstig auf die Tragstruktur aus, führt jedoch gleichzeitig zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber abhebenden Windkräften, sodass in der Regel eine zusätzliche Ballastierung erforderlich wird.



Für Photovoltaikanlagen in Südausrichtung liegt eine umfangreiche wissenschaftliche Datenbasis vor. Darüber hinaus sind entsprechende Konfigurationen in internationalen Normen berücksichtigt, so dass vergleichsweise belastbare Ansätze zur Bestimmung von Windlasten existieren. Im Gegensatz dazu ist die Datenlage für Ost-West-Systeme deutlich eingeschränkter. Zwar existieren einzelne experimentelle Untersuchungen, insbesondere aus Windkanalstudien, jedoch fehlt bislang eine systematische Verallgemeinerung der Ergebnisse in Form belastbarer theoretischer Modelle. Entsprechend sind weder in internationalen Normen noch in der Fachliteratur allgemein anerkannte Lastansätze für diesen Anlagentyp verfügbar; die Bewertung erfolgt häufig auf Grundlage von Einzelfallgutachten.

Vor diesem Hintergrund konzentriert sich der vorliegende Beitrag auf Photovoltaikanlagen in Südausrichtung. Diese können sowohl dachintegriert als auch aufgeständert ausgeführt sein. Letztere werden auf Flach- und Schrägdächern installiert und können sowohl parallel als auch geneigt zur Dachfläche angeordnet sein.

1.2 Literatur

- [1] **Windwirkungen und Windlasten an PV-Dachanlagen. Eine kritische Bestandsaufnahme zum Stand der Technik.**
Report W24-1015/1. Niemann Ingenieure GbR, Bochum, 13.01.2026
- [2] **ASCE 7-22**
Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, 2022.
- [3] **Dutch Standard NEN 7250:2021**
Solar energy systems – Integration into roofs and facades – Construction aspects

2. GRUNDLAGEN ZUR BESTIMMUNG DER EINWIRKUNGEN AUF WIND

Auf ein frei umströmbares Paneel wirkt der Wind sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite. Aus dem Unterschied beidseitiger Drücke ergibt sich der sogenannte Nettodruck, der für die Bemessung des Moduls maßgeblich ist. Abhängig von der Anströmrichtung kann der Nettodruck andrückende oder abhebende Belastungen verursachen. Für die Konstruktion sind insbesondere die abhebenden Lasten von Bedeutung, da sie häufig eine zusätzliche Ballastierung erfordern, um ein Abheben der Module zu verhindern.

Allgemein lässt sich feststellen, dass die Windlasten mit zunehmender Neigung der Photovoltaikmodule ansteigen. Bei großen Neigungswinkeln von mehr als 10° gegenüber der Dachneigung treten insbesondere auf Sattel- und Walmdächern deutlich höhere abhebende Lasten auf als bei Flachdachkonfigurationen.

Dieser Effekt lässt sich durch mehrere Strömungsmechanismen erklären: Zum einen entsteht neben der vom Gebäude verursachten Turbulenz auch eine zusätzliche Turbulenz infolge der Modulneigung selbst. Dadurch kommt es bei geneigten Paneelen zu stärkeren lokalen Änderungen der Strömung. Zudem bildet sich an den Gebäudekanten infolge von Strömungsablösungen eine sogenannte Rezirkulationsblase zwischen der Kante und dem Wiederanheftungsbereich. Befindet sich das Modul innerhalb dieser Blase, wie dies bei flach montierten Modulen der Fall ist, sind die zusätzlichen Belastungen relativ gering. Bei stark geneigten Modulen trifft hingegen das abgelöste Strömungsschicht direkt auf die Moduloberfläche, was zu deutlich erhöhten lokalen Windlasten führt. Diese Beobachtungen verdeutlichen, dass sowohl die Größe als auch die Neigung der Photovoltaikmodule einen erheblichen Einfluss auf die Windbeanspruchung haben. Module mit geringer Neigung begünstigen zudem einen verbesserten Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite, wodurch der resultierende Nettodruck insgesamt geringer ausfällt.

Bei Modulen, die parallel zum Dach installiert sind, besteht eine Analogie zu hinterlüfteten Fassaden, insbesondere im Hinblick auf den Hinterlüftungsdruck. Prinzipiell kann das Konzept der hinterlüfteten Fassade auch auf Photovoltaikanlagen angewendet werden. Wie bei geneigten Modulen ist der Druckunterschied zwischen Ober- und Unterseite maßgebend. In diesem Fall wirkt auf der Oberseite der Außendruck, während auf der Unterseite ein Hinterlüftungsraum vorhanden ist. Der Druck im Hinterlüftungsraum reduziert die Nettolasten auf das Modul und wirkt damit günstig auf die Bemessung.

Damit der Hinterlüftungsdruck wirksam bleibt, darf der Abstand zwischen Modul und Dach nicht zu groß sein. Liegt der Abstand innerhalb eines geeigneten Bereichs (vergleichbar mit etwa 10 cm bei Fassaden und bis zu 25 cm bei PV-Modulen), kann der lastmindernde Effekt durch einen Druckausgleichsfaktor (kleiner als 1), der auf die Druckbeiwerte angesetzt wird, modelliert werden. Neben dem Abstand zwischen Modul und Dach ist auch der Abstand zwischen den Modulen (Fugen) ein wichtiger Parameter, um den Druckausgleich im Hinterlüftungsraum zu verbessern. Durch größere oder gezielt dimensionierte Fugen kann die Belüftung optimiert werden, was zu einer weiteren Reduzierung der Nettolasten auf den Modulen führt.

Ein weiterer relevanter Aspekt ist der Wind über Eck bzw. geneigte Anströmungen, die an Gebäudekanten Eckwirbel erzeugen. Die Größe und Intensität dieser Wirbel hängt von den Gebäudedimensionen ab: Niedrige Gebäude und Gebäude mit langen Kanten erzeugen in der Regel größere Eckwirbel. Attiken beeinflussen diesen Effekt ebenfalls. Zwar könnte man annehmen, dass Attiken die Module abschatten und damit schützen, tatsächlich können sie jedoch die Eckwirbel verstärken, insbesondere bei niedrigen Gebäuden. Daher sind Attiken nicht als generelle Schutzmaßnahme gegen Windlasten auf PV-Dachanlagen zu interpretieren, sondern müssen im Zusammenspiel mit der vom Gebäude erzeugten Grundströmung betrachtet werden.

3. WINDKANALUNTERSUCHUNGEN ZUR WINDLASTERMITTLUNG

In Windkanälen können Windlasten auf ein spezifisches Objekt sehr detailliert erfasst werden. Die Messungen erfolgen für PV-Module, Befestigungen, Unterkonstruktionen und weitere Bauteile, wobei Einflussgrößen wie Dachabstand, Aufstellposition, Lüftungsfugen, Kopfprofile und Windrichtungen berücksichtigt werden.

Im Rahmen vorliegender Studie wurden Versuchsergebnisse bewertet und miteinander verglichen. Ein direkter Vergleich tabellarischer Werte ist jedoch oft nicht zielführend, da diese Werte ähnlich oder stark unterschiedlich ausfallen können. Entscheidend ist, ihre Herkunft und Berechnung zu verstehen, da viele Einflussfaktoren in der Fachliteratur nicht immer ausreichend dokumentiert sind, aber zu Abweichungen führen können.

Ein konkretes Beispiel ist die Skalierung der atmosphärischen Grenzschicht im Windkanal: Typischerweise werden Windkanäle für Gebäudeaerodynamik entwickelt, und die Prozesse auf den Maßstab des Gebäudemodells skaliert. So wird die atmosphärische Grenzschicht meist im Maßstab 1:200 dargestellt, entsprechend dem geometrischen Maßstab der getesteten Modelle. PV-Module hingegen sind wesentlich kleiner, weshalb für eine ausreichende Detailgenauigkeit im Windkanal ein Maßstab von etwa 1:50 erforderlich ist. Dies führt zu einem Mismatch zwischen der skalierten Turbulenz (z.B. 1:200) und dem Maßstab des untersuchten Objekts (z.B. 1:50), was die Messergebnisse verzerren kann. Letztlich stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage der Korrelation der Lasten zwischen Versuch und Realität, die insbesondere die Spitzenlasten beeinflussen kann. Es ist daher entscheidend, diesen Hintergrund zu kennen, um die Ergebnisse korrekt zu interpretieren.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die experimentelle Bestimmung der Spitzenwerte des Nettodrucks. Im Zeitbereich ergibt sich der Nettodruck zu jedem Zeitpunkt als Differenz zwischen den Druck- bzw. Soganteilen auf der Ober- und Unterseite des Moduls. Die Spitzenwerte auf Ober- und Unterseite treten jedoch aufgrund der begrenzten Korrelation der turbulenten Strömung nicht gleichzeitig auf.

Daher überlagern sich die Einzelbeiträge nicht linear, was die Bestimmung repräsentativer Extremwerte zusätzlich erschwert.

Im Zusammenhang mit der Interpretation von Versuchsergebnissen ist es zudem entscheidend zu klären, ob die angegebenen Druckbeiwerte als mean-to-mean- oder als peak-to-peak-Werte bestimmt wurden. In vielen Fällen werden aus Vereinfachungsgründen Mittelwerte der gemessenen Zeitreihen herangezogen. Dabei werden die Druckbeiwerte aus dem zeitlichen Mittel der Drucksignale, normiert mit dem mittleren Geschwindigkeitsdruck, gebildet. Die Ermittlung von Spitzenwerten hingegen erfordert eine Extremwertanalyse, bei der mehrere (typischerweise 20–30) Sturmereignisse im Windkanal simuliert werden müssen. Dies führt zu einem deutlich höheren experimentellen Aufwand. Die so bestimmten Extremwerte werden anschließend mit dem Böengeschwindigkeitsdruck normiert und entsprechen damit den in Normen verwendeten Druckbeiwerten, die definitionsgemäß peak-to-peak-Werte darstellen.

In vielen Fällen zeigen Mittelwerte und Extremwerte ein ähnliches Verhältnis, sodass vereinfachte Ansätze auf Basis von Mittelwerten zulässig erscheinen. Für Photovoltaikanlagen ist dies jedoch nicht immer gegeben. Aufgrund komplexer lokaler Strömungseffekte – wie Ablösungen, Wirbelbildung und Abschattung – können signifikante Abweichungen auftreten. Besonders deutlich zeigen sich diese Unterschiede bei Windrichtungen, die infolge von Abschattung im Mittel nur geringe Kräfte verursachen, jedoch gleichzeitig große Schwankungen aufgrund körperinduzierter Turbulenz aufweisen.

Daher ist es bei der Bewertung und dem Vergleich von Versuchsergebnissen unerlässlich, die zugrunde liegende Auswertemethode kritisch zu hinterfragen. Ein reiner Vergleich tabellarischer Werte ist ohne Kenntnis dieser Hintergründe in der Regel nicht ausreichend. Vor diesem Hintergrund erfolgt der Vergleich zwischen Normen und Fachliteratur in der vorliegenden Studie nicht primär auf Basis von Endwerten, sondern auf Grundlage der zugrunde liegenden Methoden und Konzepte.

4. INTERNATIONALER STATUS VON NORMEN UND ANDERER REGELWERKE

In mehreren Ländern existieren Normen, die spezifische Regelungen zu Windlasten auf Photovoltaikanlagen enthalten. In Europa ist insbesondere die niederländische Norm NEN 7250:2021 [3] hervorzuheben. Darüber hinaus sind entsprechende Ansätze unter anderem in den USA, Kanada und Japan zu finden.

In Deutschland befindet sich derzeit ebenfalls ein Regelwerk für Photovoltaikanlagen in Bearbeitung. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um eine spezifische Windlastnorm, sondern um ein übergeordnetes Dokument mit der geplanten Bezeichnung DIN 18199. Dieses enthält Leitlinien zu den grundlegenden Prinzipien und Anforderungen für Planung, Bemessung, Ausführung, Abnahme und Instandhaltung von Montagesystemen für Solaranlagen (Photovoltaik und Solarthermie) sowie deren Befestigung an Dach- und Fassadenkonstruktionen.

Im weiteren Verlauf dieses Beitrags wird der Fokus ausschließlich auf Windlastnormen gelegt, die eine detaillierte Beschreibung der Windbeanspruchung von Photovoltaikanlagen ermöglichen. In diesem Zusammenhang sind die niederländische Norm NEN 7250:2021 [3] sowie die US-amerikanische Norm ASCE 7-22 [2] von zentraler Relevanz.

5. DIE NIEDERLÄNDISCHE NORM NEN 7250:2021

Die niederländische Norm NEN 7250:2021 unterteilt PV-Dachanlagen in mehrere Klassen in Abhängigkeit von der Montageart, beispielsweise dachintegriert, aufgeständert, mechanisch befestigt, ballastiert oder geklebt. Diese Klassifizierung erweist sich jedoch im Hinblick auf die Windlast nicht in allen Fällen als vollständig zielführend, da etwa die Art der Befestigung (mechanisch oder ballastiert) keinen direkten Einfluss auf die aerodynamischen Lasten hat. Aus ingenieurtechnischer Sicht sind vielmehr die geometrischen und strömungsrelevanten Parameter entscheidend, insbesondere die Anordnung der Module (parallel oder geneigt zur Dachfläche) sowie die Dachgeometrie (Flach- oder Steildach).

Für parallel zur Dachfläche angeordnete Module basiert das Konzept der Norm auf dem Prinzip des Druckausgleichs, analog zu hinterlüfteten Fassaden. Hierfür werden Druckausgleichsfaktoren in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Modul und Dach sowie von den Fugen zwischen den Modulen angegeben, die zu einer Reduzierung der Nettodruckbelastung führen.

Für geneigt angeordnete Module – sowohl auf Flach- als auch auf Schrägdächern – werden die Windlasten hingegen direkt in Form von Nettodruckbeiwerten angegeben. Die Druckanteile auf Ober- und Unterseite werden dabei nicht separat ausgewiesen, sondern nur deren Differenz. Diese Werte basieren auf Windkanaluntersuchungen.

Im Folgenden wird ein Anwendungsbeispiel näher betrachtet, bei dem geneigte Module auf einem Flachdach angeordnet sind. In diesem Fall beeinflussen mehrere Parameter die Windlasten, darunter die Höhe der Attika, das Vorhandensein seitlicher Verkleidungen, die Position auf dem Dach sowie innerhalb des Modulfeldes und die Neigung der Module. Das Konzept der Norm besteht darin, für die verschiedenen Kombinationen der Parameter tabellierte Nettodruckbeiwerte bereitzustellen, die unmittelbar für die Bemessung herangezogen werden können.



Ein wesentliches Konzept der niederländischen Norm NEN 7250:2021 ist die Unterscheidung zwischen Dachzonen und Lastzonen. Die Dachzonen ergeben sich aus der globalen Umströmung des Gebäudes. Durch die vom Gebäude erzeugte Grundströmung entstehen, insbesondere in Randbereichen, erhöhte Windlasten. Entsprechend wird das Dach in Zonen unterteilt, wobei die Randstreifen höhere Lasten aufweisen. Die Breite dieser Randzonen hängt von der Gebäudegeometrie ab: Bei niedrigen Gebäuden ist die Gebäudehöhe der maßgebende Parameter, während bei hohen Gebäuden die kürzere Gebäudeseite bestimmend ist. Diese Zonierung ist somit gebäudeabhängig. Zusätzlich definiert die Norm sogenannte Lastzonen, die sich auf das PV-Feld beziehen. In diesem Fall ist die maßgebende Größe die Höhe der Module über der Dachfläche, von der auch die Ausdehnung der Zonen abhängt. Diese Zonierung ist feldabhängig und existiert nur in Bereichen, in denen PV-Module angeordnet sind.

Eine besondere Fragestellung ergibt sich für Module, die sich sowohl am Rand des Daches als auch am Rand des PV-Feldes befinden. Physikalisch wäre hier eine Überlagerung der Effekte und damit eine Erhöhung der Lasten zu erwarten. Die Norm verfolgt jedoch einen pragmatischen Ansatz: In Fällen der Überlagerung wird kein kombinierter Effekt angesetzt, sondern es wird jeweils der ungünstigere Wert aus Dachzone und Lastzone maßgebend. Für die Bemessung bedeutet dies, dass für jedes Modul sowohl die zugehörige Dachzone als auch die entsprechende Lastzone zu bestimmen ist und der jeweils ungünstigere Nettodruckbeiwert anzusetzen ist. Dieser Ansatz ist nicht unmittelbar physikalisch begründet, ermöglicht jedoch eine einfache und praxisgerechte Anwendung.

6. DIE AMERIKANISCHE US NORM ASCE 7-22

In der US-amerikanischen Norm ASCE 7-22 wird grundsätzlich zwischen zwei Anordnungen unterschieden: Modulen, die parallel zur Dachfläche installiert sind, und geneigt angeordneten Modulen. Parallel angeordnete Module kommen sowohl auf Flach- als auch auf geneigten Dächern vor, während geneigte Module typischerweise auf Flachdächern oder Dächern mit geringer Neigung installiert werden.

Für parallel zur Dachfläche angeordnete Module sind insbesondere die Parameter maßgebend, die den Druckausgleich beeinflussen. Hierzu zählen der Abstand zwischen Modul und Dach sowie die Breite der Lüftungsfugen zwischen den Modulen. Der Abstand zum Dach darf dabei nicht zu groß sein, um einen wirksamen Hinterlüftungsraum zu gewährleisten, während die Fugen ausreichend dimensioniert sein müssen, um einen Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite der Module zu ermöglichen.

Bei geneigt angeordneten Modulen ist insbesondere die Modulneigung von Bedeutung. Zusätzlich spielt – sofern vorhanden – die Höhe der Attika im Verhältnis zur Modulhöhe eine wichtige Rolle für die Windbeanspruchung.

Das grundlegende Konzept der US-amerikanischen Norm unterscheidet sich deutlich von jenem der niederländischen Norm NEN 7250:2021. Während die niederländische Norm eine Vielzahl von Parameterkombinationen berücksichtigt und für jede Kombination direkt tabellierte Druckbeiwerte bereitstellt, basiert die US-Norm auf einem schrittweisen Ansatz, bei dem die Einwirkungen durch die Überlagerung mehrerer Effekte schrittweise modifiziert werden. Ausgangspunkt ist eine Referenzsituation, beispielsweise ein Modul im Bereich der Dachmitte. Die Einflüsse weiterer Parameter werden anschließend über Korrekturfaktoren (γ -Faktoren) berücksichtigt, die je nach Effekt größer oder kleiner als 1,0 sein können. Auf diese Weise lässt sich systematisch abschätzen, wie einzelne Einflussgrößen die Windlasten verändern. Dieser Ansatz ermöglicht eine transparentere Nachvollziehbarkeit der Druckbeiwerte, während die niederländische

Norm eine unmittelbare Anwendung durch direkt verfügbare Bemessungswerte erlaubt.

Das von der US-amerikanischen Norm verfolgte Konzept für PV-Anlagen wird im Folgenden für den konkreten Fall geneigter PV-Module auf flachen und leicht geneigten Dächern näher erläutert. Für geneigte PV-Module auf flachen und leicht geneigten Dächern definiert die US-amerikanische Norm ASCE 7-22 Nettodruckbeiwerte in Abhängigkeit von der wirksamen Angriffsfläche an. Dabei wird als erster der Größeneffekt berücksichtigt, wonach die resultierenden Lasten mit zunehmender Fläche infolge einer reduzierten räumlichen Korrelation der Druckschwankungen abnehmen. Ein ähnlicher Zusammenhang ist auch im Eurocode DIN EN 1991-1-4 enthalten, beispielsweise in der Unterscheidung zwischen $c_{p,1}$ und $c_{p,10}$. Für Gebäude wird der Korrelationseffekt darüber hinaus implizit über den Strukturbeiwert erfasst. Eine Besonderheit des Verfahrens für Photovoltaikanlagen in der US-Norm besteht jedoch darin, dass die anzusetzende Angriffsfläche nicht der tatsächlichen geometrischen Fläche der Module entspricht. Das zugrunde liegende Konzept wird in der Norm nicht explizit erläutert, basiert jedoch auf der physikalischen Vorstellung, dass die Windströmung maßgeblich durch die Gebäudegeometrie beeinflusst wird.

Die Größe des Gebäudes bestimmt die Ausbildung der Grundströmung sowie von Strömungsablösungen, Wiederanheftungsbereichen und insbesondere von Eckwirbeln. Je nach Gebäudehöhe und Kantenlängen können diese Effekte unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Die Norm versucht, diese Einflüsse gemeinsam mit der Modulgröße in einem einheitlichen Parameter abzubilden. Hierzu wird eine charakteristische Bezugslänge eingeführt, die sich als Minimum aus Gebäudehöhe, kürzerer Gebäudeseite und einer empirischen Kombination aus Höhe und längerer Gebäudeseite ergibt. Auf dieser Basis lässt sich eine repräsentative Gebäudelänge bestimmen.

Für eine gegebene physikalische Modulfläche werden die anzusetzenden Lasten daher in Abhängigkeit vom Flächenverhältnis



zwischen der projizierten Modulfläche und dem Quadrat der Bezugslänge modifiziert. Damit gelingt es, sowohl den Größeneffekt der Angriffsfläche als auch den Einfluss der Gebäudegeometrie in einem konsistenten Ansatz zu berücksichtigen. Diese Betrachtungsweise stellt einen wesentlichen Fortschritt dar und ist derzeit in der US-Norm insbesondere für geneigt angeordnete Module implementiert. Für parallel zur Dachfläche angeordnete Module ist eine entsprechende Regelung in ASCE7-22 nicht enthalten, befindet sich jedoch in Überarbeitung.

Die Druckbeiwerte nach diesem Konzept werden zunächst für eine Referenzposition in der Dachmitte bestimmt. In den Randbereichen des Daches treten erhöhte Lasten infolge von Randeffekten auf, während in den Dachecken nochmals deutlich höhere Beanspruchungen auftreten. Für alle diese Bereiche – Dachmitte, Dachkante und Dachecke – können entsprechende Nettodruckbeiwerte aus der Norm abgeleitet werden.

Die US-amerikanische Norm ASCE 7-22 bietet zusätzlich die Möglichkeit, weitere Einflüsse auf die Windlasten über sogenannte γ -Faktoren zu berücksichtigen. Hierzu zählen insbesondere der Attikaeffekt, der Sehnslängeneffekt sowie der Expositionsfaktor innerhalb des PV-Feldes.

Der Attikaeffekt hängt wesentlich vom Verhältnis zwischen Attikahöhe und Gebäudehöhe ab. Während bei hohen Gebäuden der Einfluss der Attika in der Regel vernachlässigbar ist, kann sie bei niedrigen Gebäuden die Strömung maßgeblich beeinflussen. In diesen Fällen führt die Attika zu einer Verstärkung der Eckwirbel, wodurch die Windlasten um bis zu etwa 20 % ansteigen können.

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist die Sehnslänge der Module. Entscheidend ist hierbei, ob sich ein Modul innerhalb der durch die Strömungsablösung am Gebäuderand entstehenden Blase befindet. Ist das Modul ausreichend klein – nach ASCE typischerweise kleiner als etwa 1,0 m – verbleibt es innerhalb dieser Blase, sodass reduzierte Windlasten (-20%) angesetzt werden können.



Schließlich berücksichtigt die Norm auch die Position der Module innerhalb des PV-Feldes über einen Expositionsfaktor. Module am Rand oder insbesondere in den Ecken eines PV-Feldes sind stärker exponiert und erfahren entsprechend höhere (+50%) Windlasten.

Sind die Paneele parallel zur Dachfläche angeordnet, können die anzusetzenden Lasten durch einen Druckausgleichsfaktor reduziert werden. Dieser Faktor liegt unter eins und wirkt somit lastmindernd. Er hängt sowohl von den Fugen zwischen den Paneelen als auch vom Abstand zwischen Paneelen und Dach ab. Die Fugen begünstigen dabei den Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite der Paneele. Der Abstand zur Dachfläche darf jedoch ein gewisses Maß nicht überschreiten, da sich andernfalls eine Strömung ausbilden kann, welche die günstigen Effekte des Druckausgleichs teilweise wieder aufhebt.

7. ANWENDUNGSBEISPIEL

Es wird ein typischer Anwendungsfall als Beispiel dargestellt, bei dem geneigte Paneele auf einem Flachdach installiert sind. Die Paneele weisen eine Neigung von 30° auf. Eine Modultafel hat eine Breite von 1,6 m und eine Schräglänge von etwa 1 m. Die Modultafeln sind zu Verbänden von jeweils vier Tafeln verbunden. Daher ist zwischen lokalen Lasten auf einer einzelnen Modultafel und globalen Lasten auf den gesamten Modulverband zu unterscheiden. Lokale Lasten wirken auf eine kleinere Fläche und sind beispielsweise für die Bemessung der Befestigungsmittel maßgebend. Globale Lasten hingegen sind infolge der reduzierten Lastkorrelation über die größere Fläche des Modulverbands abgemindert und werden beispielsweise für die Auslegung der Unterkonstruktion herangezogen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Modultafeln starr miteinander verbunden sind, sodass eine gleichmäßige Lastverteilung über die gesamte Fläche gewährleistet ist. Im vorliegenden Beispiel wird die Anwendung im Hinblick auf die lokalen Lasten auf einer einzelnen Modultafel durchgeführt.

Bei der Anwendung der ASCE-Norm spielen bei der Ermittlung der Nettodruckbeiwerte sowohl die Größe der Angriffsfläche der Paneele – in diesem Fall die projizierte Fläche einer einzelnen Tafel im Hinblick auf die lokalen Lasten – als auch deren Verhältnis zu den Gebäudeabmessungen eine wesentliche Rolle. Die ASCE-Norm ermöglicht es, die Nettodruckbeiwerte aus Diagrammen abzuleiten, in Abhängigkeit von der nominellen Angriffsfläche der Paneele (siehe Bild 29.4-7 in [2]). Diese nominelle Angriffsfläche ergibt sich aus der physikalischen Angriffsfläche, skaliert mit einem Faktor, der von einer Bezugslänge bzw. von den Gebäudeabmessungen abhängt. Das Gebäude hat eine Höhe von 8 m, eine Breite von 23,6 m und eine Länge von 27,1 m. In diesem Beispiel erweist sich das Verhältnis als günstig, da das Gebäude im Vergleich zur Angriffsfläche relativ klein ist. Dadurch bleiben die Strömungsstrukturen in der Grundströmung und insbesondere die Eckwirbel vergleichsweise gering.



Weitere Effekte, wie beispielsweise der Attikaeffekt und der Sehnslängen-Effekt, sind in der ASCE-Norm über die γ -Faktoren zu berücksichtigen. In diesem Fall, da keine Attika vorhanden ist und die Paneele relativ kurz sind, liegen beide γ -Faktoren unter 1 und wirken somit abmindernd. Der Expositionsfaktor erhöht die Lasten um 50 %, wenn sich die Paneele an einer Ecke des Feldes befinden.

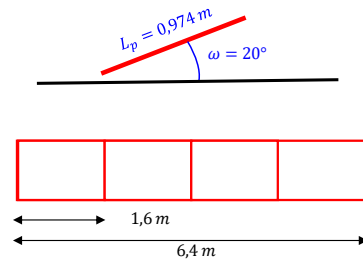
Bei den Berechnungen, wie in der folgenden Tabelle dargestellt, ergibt sich nach der ASCE-Norm für ein exponiertes Modul an einer Ecke ein Nettodruckbeiwert von **-2,1** für die abhebende Last (Druck mit negativem Vorzeichen). Für ein nicht exponiertes Modul in der Dachmitte beträgt der Nettodruckbeiwert **-0,8**.

In der niederländischen Norm lassen sich die Nettodruckbeiwerte direkt aus den angegebenen Tabellen ableiten. Die Werte unterscheiden sich je nach Dachzone und Lastzone. In diesem Fall ergibt sich für ein exponiertes Modul im Dacheckbereich ein Nettodruckbeiwert von **-2,4** (nach der ASCE-Norm hatten wir zuvor -2,1). In der Dachmitte beträgt der Wert hingegen **-0,6** statt -0,8 gemäß der ASCE-Norm.

Dieses Anwendungsbeispiel zeigt, dass – wie zu erwarten – unterschiedliche Werte bei der Anwendung verschiedener Normen auftreten. Der Zweck der Untersuchung besteht jedoch nicht darin, diese Zahlen kritisch zu bewerten, sondern die Modellansätze, die in beiden Normen verfolgt werden, und wie diese zur Ermittlung der Werte führen, aufzuzeigen. Auf dieser Grundlage wird im folgenden Abschnitt unsere Empfehlung für eine mögliche Weiterentwicklung einer Norm für PV-Anlagen in Deutschland bzw. in Europa gegeben.

PV-Flachdachanlage in Süd-Ausrichtung

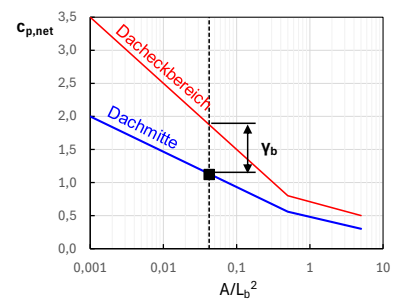
Geometrie				
PV	Sähnlänge	L_p	0,974	m
	Neigung	ω	20,0	°
	Breite des Moduls	B	1,6	m
	Breite des Modulverbandes	B_v	6,4	m
Gebäude	Höhe	H	8,0	m
	Breite	B	23,6	m
	Länge	L	27,1	m
	Attikahöhe	h_p	0,0	m



ASCE 7-22				
Längs- und Flächenparameter	Projektierte Fläche des Moduls	A	1,46	m ²
	Bezugsfläche des Gebäudes	L_b	5,89	m
	Flächenverhältnis $A/(L_b^2)$	A/L_b^2	0,04	[-]

s. Bild 29.4-7 in ASCE/SEI 7-22 für Definitionen

Nettodruckbeiwert	Nicht exponiertes Modul im Dachmitte		Exponiertes Modul im Dacheckbereich	
	Nettodruckbeiwert - Basiswert	$C_{p,net}^{(+/-)}$	1,12	1,12
	Eckbereich	γ_b	1,00	1,70
	Attikaeffekt	γ_p	0,90	0,90
	Sehnlängeneffekt	γ_c	0,80	0,80
	Expositions faktor	γ_E	1,00	1,50
	Nettodruckbeiwert - Ergebnis	$C_{p,net} \cdot \gamma_b \cdot \gamma_p \cdot \gamma_c \cdot \gamma_E$	+/-0,81	+/-2,06



NEN 7250				
s. Tabelle 5, Bild 7 und Bild 14 in NEN 7250			Abhebbende Last	Andrückende Last
			$C_{p,net}^{(-)}$	$C_{p,net}^{(+)}$
Nettodruckbeiwert	Dachzonen	F Hochseite	-2,4	0,9
		F Niedrigseite	-1,1	0,9
		G	-0,8	0,7
	Lastzonen im PV-Feld	Z1	-1,5	1,2
		Z2	-1,1	1
		Z3	-1,1	1,4
		Z4	-0,8	0,7
		Z5	-0,6	0,5

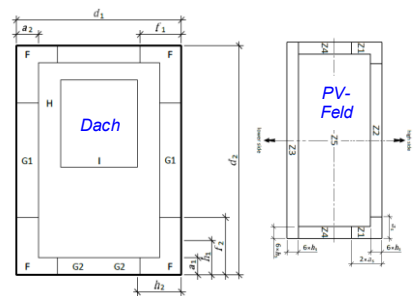


Bild 7.1: Anwendungsbeispiel

8. EMPFEHLUNG ZUR NORMWEITERENTWICKLUNG

Eine in Normen übliche Vorgehensweise, die auch von der niederländischen Norm für PV-Anlagen verfolgt wird, basiert auf einer umfangreichen Sammlung von Windkanalversuchen für möglichst viele Einzelfälle, aus denen tabellierte Bemessungswerte abgeleitet werden. Für die praktische Anwendung bedeutet dies, dass die relevanten Werte direkt entsprechenden Tabellen entnommen werden können. Dieses Vorgehen wird häufig bevorzugt, da es eine hohe Anwenderfreundlichkeit bietet. Ein Nachteil dieses Ansatzes liegt jedoch in der eingeschränkten Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse sowie in einer oftmals unzureichenden Dokumentation der zugrunde liegenden Annahmen. Darüber hinaus ist es schwierig, den Einfluss einzelner Effekte quantitativ zu erfassen und voneinander zu trennen.

Im Gegensatz dazu verfolgt die US-amerikanische Norm für Photovoltaikanlagen in der ASCE 7-22 einen modellbasierten Ansatz. Hier werden die relevanten physikalischen Effekte, wie beispielsweise Attikaeffekte oder Randzoneneinflüsse, explizit berücksichtigt. Auf dieser Grundlage lassen sich die resultierenden Bemessungswerte systematisch ausgehend von Referenzwerten, etwa für die Dachmitte ohne zusätzliche Einflüsse, sukzessive ableiten. Ein wesentlicher Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die einzelnen Einflussgrößen transparent dargestellt und fachlich fundiert diskutiert werden können.

Ein Vergleich zeigt, dass die resultierenden Werte der niederländischen und der US-amerikanischen Norm für typische Anwendungsfälle in guter Übereinstimmung liegen. Nach unserer Einschätzung sollte die fachliche Diskussion im Rahmen der Normentwicklung jedoch nicht ausschließlich auf dem Vergleich von Zahlenwerten basieren, die aus unterschiedlichen Sammlungen von Windkanalversuchen für eine Vielzahl von Varianten abgeleitet wurden. Vielmehr sollte der Schwerpunkt auf der Modellierung einzelner Einflussfaktoren liegen. Hierfür sind Benchmarks aus gut dokumentierten, wissenschaftlich fundierten Windkanalversuchen in Kombination mit numerischen Simulationen erforderlich. Die ASCE 7-



22 bietet hierzu derzeit einen vielversprechenden Ansatz, befindet sich jedoch noch in einer Weiterentwicklungsphase.



9. BILD- UND TABELLENVERZEICHNIS

Bildverzeichnis

Bild 7.1:	Anwendungsbeispiel	24
-----------	--------------------------	----

Tabellenverzeichnis



Dieser Bericht beinhaltet

30 Seiten

1 Bild

0 Tabellen

Autoren:innen

Dr.-Ing. Francesca Lupi
Dr.-Ing. Norbert Hölscher
B.Sc. Eugenio BrenaBrena

Niemann Ingenieure GbR
Niemann Ingenieure GbR
Niemann Ingenieure GbR

Kaufmännischer Leiter

Dipl.-Kfm. Mathias Joemann

Niemann Engineers GbR

Gesamtverantwortliche Autor:in

Dr.-Ing. Norbert Hölscher
Dr.-Ing. Francesca Lupi

Niemann Ingenieure GbR
Niemann Ingenieure GbR

Bochum, den 15. September 2026

Geschäftsleitung



Dr.-Ing. N. Hölscher, GF
(Niemann Ingenieure GbR)



Dr.-Ing. F. Lupi
(Niemann Ingenieure GbR)



Prof. Dr.-Ing. R. Höffer
(Niemann Ingenieure GbR)



NIEMANN INGENIEURE GbR

WINDINGENIEURWESEN • BAUDYNAMIK • UMWELTECHNIK • STRÖMUNGSTECHNIK

GESELLSCHAFTER:

DR.-ING. N. HÖLSCHER, GF
DR.-ING. F. LUPI
PROF. DR.-ING. R. HÖFFER

WISSENSCHAFTLICHER BERATER:

PROF. DR.-ING. H.-J. NIEMANN

SENIOR EXPERTIN:

KLIMATISCHE EINWIRKUNGEN

DIPL.-ING. S. DIBURG

Technologiezentrum Ruhr

Konrad-Zuse-Straße 18

44 801 Bochum

Tel. 02 34 / 90 48 68 - 0

Mobil: 0160 / 9721 0138

e-mail: Info@Niemann-Ing.de

Internet: <http://www.Niemann-Ing.de>