



Lagesicherung von PV-Flachdachanlagen
gegen Verschiebung aufgrund thermischer
Dehnungen („Temperaturwanderung“)

Einleitung

PV-Flachdach-Anlagen stellen ein wichtiges Marktsegment der Photovoltaik dar und bieten ein großes Potenzial zum Ausbau der Photovoltaik in Deutschland. Insbesondere Gewerbe- und Industriegebäude bieten große Flächen und können aktuell vom Eigenverbrauch profitieren.

Ganz überwiegend werden die PV-Anlagen auf Flachdächern mit Ballast aufgeständert. Vorteile:

- Ertragsoptimierung
- Selbstreinigungseffekte
- Durchdringungsfreie Dachabdichtung
- Aerodynamisch ballastarme Lagesicherung gegen Windsog und Winddruck möglich

Im Regelfall handelt es sich bei den ballastarmen PV-Anlagen um aerodynamisch optimierte Systeme, bei denen die Ermittlung der erforderlichen Ballastmenge gegen Windsog und Winddruck aus den Ergebnissen von Windkanalversuchen resultiert. Temperatureffekte wie beispielsweise die Verschiebung der PV-Anlage auf der Dachhaut – auch als Temperaturwanderung oder Raupeneffekt bezeichnet – werden hierbei jedoch nicht berücksichtigt.

Bei der Installation sind diese allerdings zu berücksichtigen, denn mittlerweile ist bekannt, dass es auch bei sehr flacher Dachneigung (z. B. 1°)¹ durch wiederholte Temperaturveränderungen zu Wanderungseffekten des Gestells auf der Dachabdichtung kommen kann. Dieser Effekt ist unabhängig von der Windbelastung und dem Gewicht der Ballastierung! Deshalb müssen zur Lagesicherung auch Temperatureffekte wie Temperaturwanderung berücksichtigt werden.

Anwendungsbereich

Dieses Hinweispapier soll Empfehlungen geben, wie eine ausreichende Lagesicherung gegen Temperaturwanderung auf Flachdächern mit Abdichtungen vorgenommen werden kann. Die universell geltenden Formeln für Zwangs- und Hangabtriebskräfte bieten darüber hinaus den planenden Fachleuten Hilfestellungen für die jeweilig einzelnen Lösungsansätze.

Wie entsteht die Temperaturwanderung?

Sowohl kurzfristige Schwankungen der Lufttemperatur am Tag als auch saisonale Temperaturunterschiede sowie direkte Sonneneinstrahlung bewirken thermische Verformungen und Zwängungskräfte, die durch das Montagegestell sowie durch die Auflagerungen aufzunehmen sind. In den einschlägigen Dachdecker-Fachregeln (Flachdachrichtlinie) und Abdichtungsnormen (DIN 18531) wird für Dachanwendungen ein Temperaturfenster von $-20\text{ °C} < T < 80\text{ °C}$ definiert, das entspricht einem maximalen Temperaturunterschied von 100 Kelvin zwischen der kältesten und der wärmsten Situation.² Bei Temperaturänderungen verlängern und verkürzen sich die Profile des PV-Montagegestells regelmäßig aufgrund thermischer

Dehnungen (Tag/Nacht, saisonal) und rutschen dabei zwar nur wenige Millimeter aber wiederholt auf der Dachabdichtung. Auch bei kleinsten Dachneigungen wirken Hangabtriebskräfte, so dass sich die PV-Anlage beim Verrutschen um einen kleinen Betrag (zehntel Millimeter) hangabwärts bewegt. Im Laufe der Zeit kann es so zu einer kontinuierlichen Wanderung kommen. Temperaturbedingte Verschiebungen ballastierter Systeme auf dem Dach sind kein einmaliger Vorgang, sondern kontinuierliche Prozesse, die sich bei jedem Erwärmungs- und Abkühlzyklus ereignen. Dieser Vorgang einer langsamen Verschiebung wird auch anschaulich als „Raupeneffekt“ bezeichnet.

¹ Dächer mit Abdichtungen sind zur Entwässerung häufig flach geneigt mit bis zu 5% bzw. 3°.

² Die Maximaltemperatur ist insbesondere abhängig von der Farbe und kann von diesen Angaben abweichen.

Mögliche Auswirkungen der Temperaturbewegung

Bei der Wartung von ballastierten Solaranlagen wird daher in vielen Fällen festgestellt, dass sich die Solaranlage auf dem Dach verschoben hat. Die Verschiebung findet entweder zwischen dem Gestell und der Bautenschutzmatte oder zwischen der Bautenschutzmatte und der Dachabdichtung statt.

Das Gestell der PV-Anlage kann auf andere Komponenten auf dem Dach stoßen oder sich verhaken. Es können Schäden an der Dachabdichtung oder anderen Komponenten wie Attika, Lichtkuppeln, Lüftungsrohren, Blitzschutzanlagen, Kabelzuführung etc. entstehen. Im schlimmsten Fall, wenn keine „Hindernisse“ vorhanden sind und keine Inspektion und Wartung durchgeführt wird, kann sich die PV-Anlage im Laufe der Jahre bis über die Dachkante hinaus bewegen.

Neben mechanischen Schäden, z. B. an der Dachabdichtung, können durch Anlagenbewegungen außerdem Schäden an elektrischen Komponenten entstehen, wie z. B. Leitungsschäden, und damit verbunden Risiken durch blanke Leitungen (elektrischer Schlag, Lichtbogengefahr). Ohne mechanische Befestigung kann eine Wanderung der Anlage in den meisten Fällen nicht ausgeschlossen werden. Die Höhe des Haftreibungskoeffizienten (z. B. zwischen Dachabdichtung und Bautenschutzmatte) beeinflusst die Temperaturwanderung hierbei kaum.

Eine Sicherung der PV-Anlage gegen Bewegungen ist daher zwingend notwendig, nicht nur zum Schutz der Dachabdichtung, sondern auch aus Gründen der elektrischen Sicherheit und des Brandschutzes.

Lösungsansätze

Zum Schutz der Abdichtung ist zwingend eine Schutz- und Gleitlage zwischen Montagesystem und Dachabdichtung erforderlich. Eine dickere Schutzlage hat einen deutlich positiven Effekt bezüglich der Temperaturwanderung, da thermische Ausdehnungen besser aufgenommen werden können und dadurch ein möglicher Kraftaufbau zwischen Montagegestell, Schutzlage und Dachabdichtung („Zwängungskräfte“) evtl. vermieden werden kann. In jedem Fall muss darauf geachtet werden, dass ein Verrutschen der Unterkonstruktion auf den Matten verhindert wird, indem z. B. die Schutz-/Trennlagen mit der Bodenschiene verbunden werden (z. B. Verklebung, Klemmung oder andere mechanische Befestigung). Darüber hinaus ist selbstverständlich darauf zu achten, dass die jeweiligen Schutzlagen und Dachabdichtungen materialverträglich sind. Aufgrund der Vielzahl der hier möglichen Materialien ist dies ggf. im Einzelfall abzuklären. Nachfolgend werden drei Lösungsansätze zur Vermeidung von Temperaturwanderung vorgestellt.



Bild 1: Wirkung der Ausdehnungskräfte →

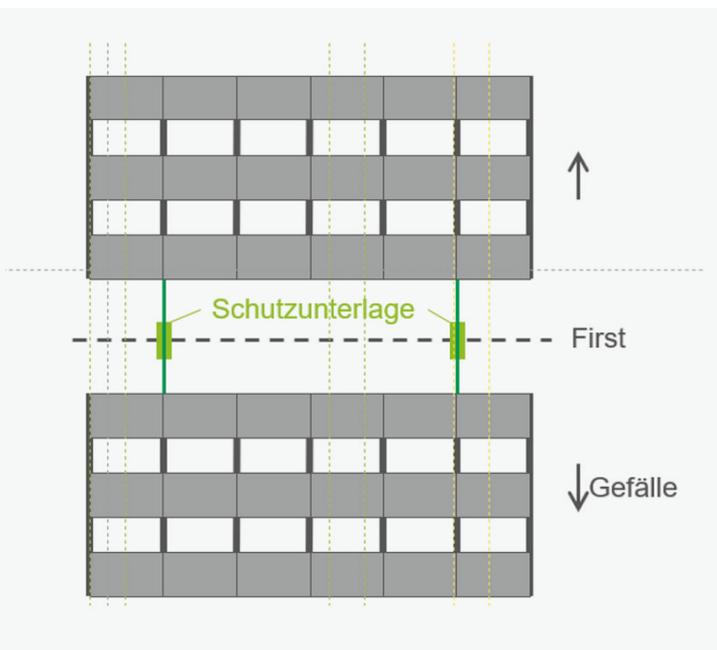


Abbildung 1: Kopplung zweier Felder mit unterschiedlichem Gefälle ↑

Lösungsansatz 1:

Kopplung der Felder untereinander

Aus entwässerungstechnischen Gründen ist ein Gefälle auf dem Flachdach notwendig (mindestens 2 % bzw. 1° Dachneigung ([7], [8])). Häufig laufen die Neigungen von (Teil-) Dachflächen in verschiedene Richtungen. Wenn PV-Anlagenteile auf unterschiedlich geneigten Flächen installiert werden, kann durch eine Kopplung der Anlagenteile, z. B. mit Drahtseilen, auf eine Befestigung zur Lagesicherung verzichtet werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass Felder annähernd gleicher Masse und gleicher, aber entgegengesetzter, Neigung miteinander gekoppelt werden können (Kräftegleichgewicht).

Hinweis zur sicheren Ausführung

Die Kopplung muss so ausgeführt werden, dass eine Beschädigung des Firstes verhindert wird, z. B. mittels lastverteilernder Schutzunterlage.

Lösungsansatz 2:

Aufteilung in kleine Felder

Der Temperaturwanderungseffekt ist abhängig von der Größe eines zusammenhängenden Modulfeldes, den Eigenschaften der Dachoberfläche (Dachabdichtungsbahn) und der Zwischenlage unter dem Montagesystem. Maßgeblich für die Temperaturverformung ist der Abstand zwischen den Bewegungsfugen.

Durch zusätzliche Bewegungsfugen (z. B. alle 5–8 Meter) kann eine Aufteilung in kleinere Felder erfolgen und so der Wanderungseffekt reduziert werden. Übliche Größen in der Praxis liegen hingegen bei 15 bis 20 Metern mit Bewegungsfugen von 5 bis 10 cm.

Durch eine Kopplung der einzelnen Modulfelder bzw. der einzelnen Module untereinander mittels Verbindungselementen kann der zusätzliche Ballast in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit der Verbindung entsprechend reduziert werden. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass aus der Aufteilung in kleine Felder ein erhöhter erforderlicher Ballast und, damit verbunden, eine erhöhte Dachflächenbelastung resultieren. Dies kann zu einer Überschreitung der zulässigen Lastreserve des Daches führen. In diesem Fall ist diese Variante nicht möglich. Außerdem ist ein

zusätzlicher Materialbedarf (Basis-Schiene) die Folge und es muss sichergestellt sein, dass keine Schädigung der Dachabdichtung oder ggf. der Dämmung durch die Last erfolgt.

Auch in diesem Lösungsansatz kann eine Wanderung der Anlage ohne mechanische Befestigung nicht ausgeschlossen werden. Im Rahmen von regelmäßigen Inspektions- und Wartungsarbeiten können die einzelnen Modulfelder in die Ausgangslage zurückgelegt werden. Ist eine Repositionierung verschobener Generatoreinheiten notwendig, so ist dies in den meisten Fällen nur nach einer Entballastierung möglich.

Bei diesem Lösungsansatz haben die Schutzmatte eine besonders wichtige Bedeutung, denn sie können einen Teil der Temperaturverformung kompensieren. Dadurch verringern sie insbes. bei kleinen Generatoreinheiten die Wanderungseffekte deutlich oder heben diese sogar auf (kleine thermische Längenänderungen und hohe Elastizität der Auflager). Zu beachten sind dabei Materialeigenschaften wie z. B. die Schubweichheit und die Dicke (üblicherweise 6–25 mm), die außerdem noch einen Einfluss auf die Aerodynamik und die Belastbarkeit hat.

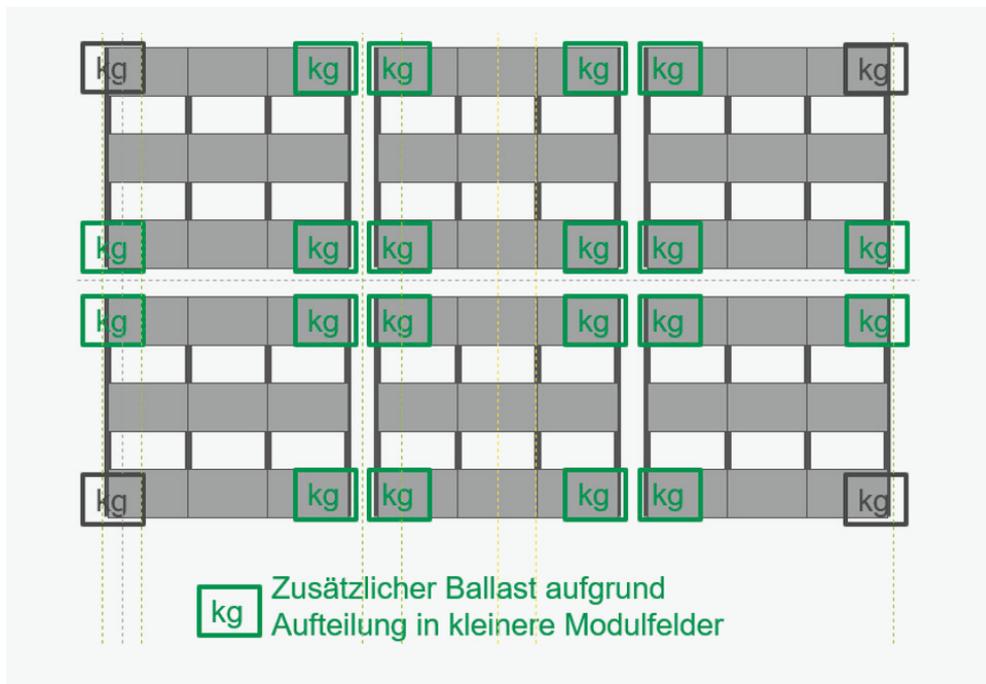


Abbildung 2: Aufteilung eines großen Modulfeldes in drei kleinere Modulfelder
←

Lösungsansatz 3:

Befestigung an Fixpunkten am Gebäude

Lösungsansatz 3a: Befestigung an zusätzlichen Fixpunkten

Die Befestigung des Gestells an zusätzlichen Lastanbindungspunkten ist eine weitere Möglichkeit, die PV-Anlage gegen Temperaturwanderung zu sichern.

Achtung!

Vorhandene Lastanschlagpunkte (Sekuranten) dürfen nicht verwendet werden.

Es müssen zusätzliche Anschlagpunkte vorgesehen werden, die vom Dachdecker angebracht werden müssen.

Achtung!

Auch die meisten handelsüblichen Lastanschlagpunkte zur Absturzsicherung sind für die Lagesicherung nicht geeignet, da sie sich für den Einsatzzweck als Absturzsicherung bei Horizontalbeanspruchung wunschgemäß elastisch und plastisch stark verformen.

Achtung!

Für die Dimensionierung der Fixpunkte muss ein Statiker hinzugezogen werden.

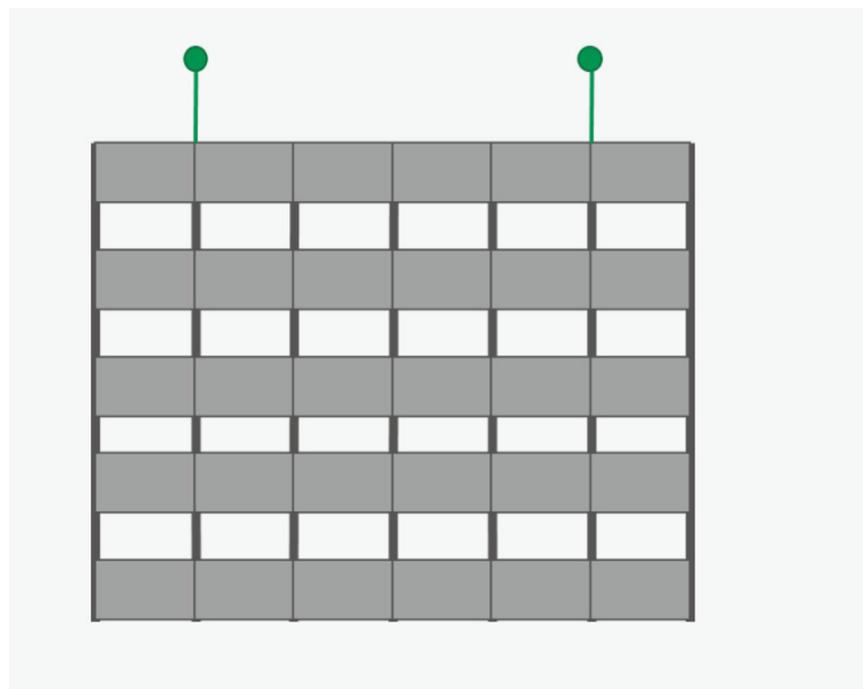
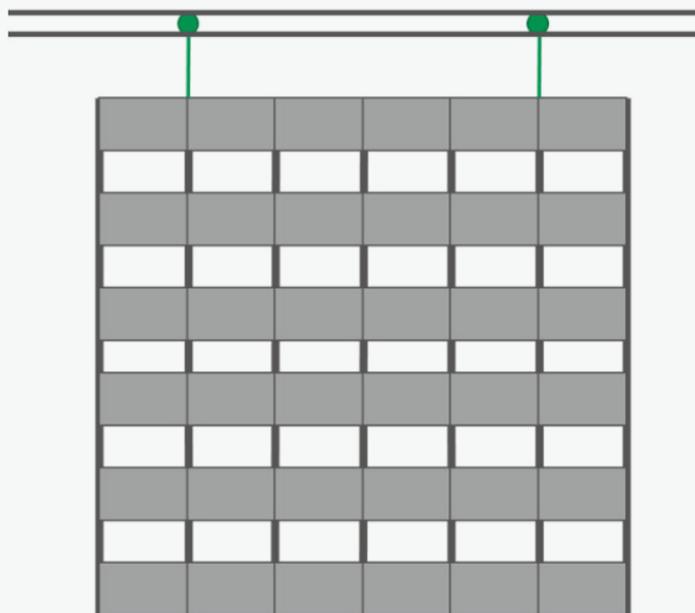


Abbildung 3: Befestigung an zusätzlichen Fixpunkten ↑



Attika (First)

← Abbildung 4: Befestigung an der Attika

Lösungsansatz 3b: Befestigung an der Attika

Eine weitere Möglichkeit der mechanischen Anlagensicherung besteht in der Befestigung an der Unterkonstruktion der Attika (nicht an der Blechabdeckung). Dabei ist zu beachten, dass es sehr viele unterschiedliche Ausführungen der Attika gibt, z. B. aus Stahlbeton, Holzbohlen oder Stahlprofilen.

Achtung!

Soll diese Möglichkeit zur Anwendung kommen, muss eine Überprüfung der Lasteinleitung sowie der horizontalen Belastbarkeit der Attika durch einen Statiker erfolgen.

Idealerweise werden beim Neubau bereits in der Planung geeignete Anschlagpunkte zur Lagesicherung der PV-Anlage vorgesehen, inkl. der evtl. notwendigen Abdichtung dieser Anschlagpunkte.

Hinweis

Systeminterne statische Auswirkungen auf das PV-Montagesystem müssen beachtet werden.

Lösungsansatz 3c: Abstützung gegen die Attika

Auch ist es möglich, das Gestell großflächig gegen die Attika abzustützen. Voraussetzung ist, dass Lasten in die Tragkonstruktion des Gebäudes sicher abgeleitet werden können. Vorteil dabei ist, dass keine Durchdringung der hochgezogenen Dachabdichtung oder des Blechs an der Attika notwendig ist. Allerdings muss eine Schutzlage an der Kontaktfläche vorgesehen werden, so dass keine Beschädigungen entstehen können (KEINE scharfen Kanten!). Außerdem dürfen Entwässerungen an den Dachrändern nicht gestört werden.

Der Vorteil dieser Variante ist, dass bei einer kontinuierlichen Lasteinleitung in die Attika sich geringere Lastkonzentrationen ergeben als bei dem Lösungsansatz 3b. Ein Statiker sollte auch hier hinzugezogen werden.

Herstellerspezifische Lösungen

Anzumerken ist, dass es herstellerspezifische Lösungen gibt, die den Wanderungseffekt ganz vermeiden oder kompensieren.

Ermittlung der auftretenden Horizontalkräfte

Die im Folgenden beschriebenen Berechnungen sind nur für befestigte Systeme – Lösungsansätze 3 – anzuwenden.

A) Hangabtriebskraft

Für den Fall, dass die Anbindung des PV-Systems sehr elastisch ist und sich keine Zwangskräfte aufbauen, werden die Haltekräfte so ermittelt, als würde gar keine Reibung zwischen Dachabdichtung und Schienen bestehen.

Die Haltekräfte entsprechen damit der Hangabtriebskraft und werden für das Eigengewicht der PV-Installation wie folgt ermittelt.

Gesamtgewicht G_{ges} (kN):

$$G_{ges} \text{ (kN)} = \text{Modulgewicht } m_{\text{Modul}} + \text{Gewicht Montagesystem } m_{\text{Montagesystem}} + \text{Ballast } m_{\text{Ballast}}$$

Hierbei ist der Bereich der PV-Anlage zu berücksichtigen, der auf den Fixpunkt wirkt (Lasteinzugsbereich).

$$H_{a,k} \text{ (kN)} = G_k \text{ (kN)} \times \sin \alpha$$

mit

$H_{a,k}$ = Hangabtriebskraft (Index k steht für den sog. charakteristischen Wert)

α = Dachneigungswinkel in Grad

Für den Nachweis der Befestigung mit Bemessungswerten (Index d) sollte ein Sicherheitsbeiwert g_d der Gebrauchstauglichkeit (SLS) auf die Hangabtriebskraft aufgeschlagen werden:

$$H_{a,d} = g_d \times H_{a,k} \text{ (kN)}$$

mit

g_d = Teilsicherheitsbeiwert für ungünstige veränderliche Lasten = 1,0 (DIN EN 1990, Anhang A)

Beim Nachweis des Fixpunktes sollte ein Material Sicherheitsbeiwert γ_M berücksichtigt werden.

Beispielrechnung zu A):

Betrachtet wird ein Modulfeld mit 9 Modulreihen à 10 Module, Dachneigung: 3°

Der Einbau von Zugdiagonalen ist dann erforderlich, wenn die gesamte PV-Anlage keine ausreichende Steifigkeit aufweist, um die Hangabtriebskraft von den einzelnen Modulen zu den Fixpunkten weiterzuleiten.

Berechnung der Gesamtgewichtskraft:

Gewicht Ballast:

$$m_{\text{Ballast}} = 183 \text{ Steine} \times 10 \text{ kg} = 1.830 \text{ kg}$$

Moduleigengewicht mit Beispielmodul mit 18,2 kg

$$m_{\text{Modul}} = 90 \text{ Module} \times 18,2 \text{ kg/Modul} = 1.638 \text{ kg}$$

Gewicht des Montagesystems: Eigengewicht 5 kg/Modul

$$m_{\text{Montagesystem}} = 90 \text{ Module} \times 5 \text{ kg/Modul} = 450 \text{ kg}$$

Summe des Gesamtgewichts des Modulfeldes

$$m_{\text{ges}} = 1.830 \text{ kg} + 1.638 \text{ kg} + 450 \text{ kg} = 3.918 \text{ kg}$$

Umrechnung in Gewichtskraft:

$$G_{\text{ges}} = 3.918 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 38.400 \text{ N}$$

$$\mathbf{G_{\text{ges}} = 38,4 \text{ kN}}$$

Berechnung der Hangabtriebskraft

Charakteristische Hangabtriebskraft für Dachneigung 3°:

$$H_{\text{a,k,ges}} = 38,4 \text{ kN} \times \sin(3^\circ) = 2,01 \text{ kN}$$

Die Beanspruchung verteilt sich gleichmäßig auf die 2 Fixpunkte:

$$H_{\text{a,k,Fixpunkt}} = 2,01 \text{ kN} / 2 = 1,01 \text{ kN}$$

Mit den Teilsicherheitsbeiwerten erhält man den Bemessungswert der Horizontalkraft, die auf einen Fixpunkt angreift:

$$H_{\text{a,d,Fixpunkt}} = 1,0 \times 1,01 \text{ kN} = 1,01 \text{ kN}$$

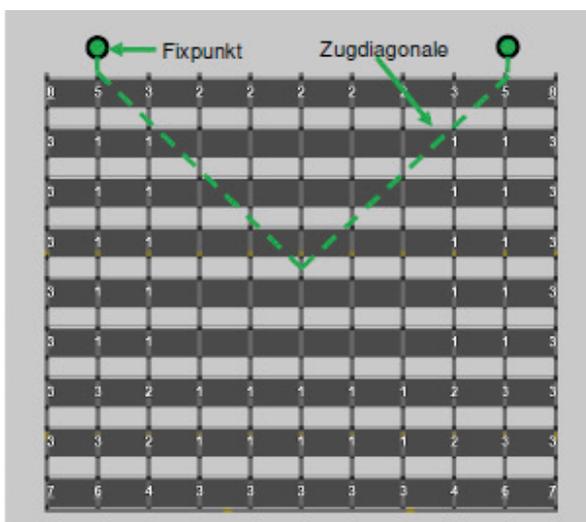


Abbildung 5: Ballastplan mit Angabe der Ballastierung in Anzahl Steine (à 10kg)



B) Zwangskraft (Haftreibung)

Für den Fall, dass bei einer temperaturbedingten Verkürzung der PV-Anlage die Fixierung zur Lagesicherung nicht nachgibt, kann sich im ungünstigsten Fall die Haftreibungskraft aufbauen:

Zwangskraft:

$$H_{z,k}(\text{kN}) = \mu \times G_k(\text{kN}) \times \cos \alpha$$

μ = Haftreibungsbeiwert [-]

Der Haftreibungsbeiwert kann im Versuch zusammen mit dem Gleitreibungsbeiwert vor Ort ermittelt werden (siehe BSW-Hinweispapier [9]). Hierbei wird die größte auftretende Kraft maßgebend, bevor das System zu gleiten beginnt.

Beispielrechnung zu B):

Für die oben ausgeführte Beispielrechnung wird unter Annahme eines Haftreibungsbeiwertes vor Ort von $\mu = 0,8$ die Zwangskraft H_z ermittelt:

$$H_{z,k,ges} = 0,8 \times 38,4 \text{ kN} \times \cos(3^\circ) = 24,5 \text{ kN}$$

$$H_{z,k,Fixpunkt} = 24,5 \text{ kN} / 2 = 12,3 \text{ kN}$$

$$H_{z,d,Fixpunkt} = 1,0 \times 12,3 \text{ kN} = 12,3 \text{ kN}$$

Die Belastung aus der Zwangskraft ist relativ hoch und nicht so einfach in das Gebäude einzuleiten. Insofern ist es sinnvoll, durch zusätzliche Maßnahmen (Einbau elastischer Federelemente o.ä.) den Aufbau einer Zwangskraft zu vermeiden.

Normen, Richtlinien und Hinweisblätter

- [1] DIN EN 1990 Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung
- [2] DIN EN 1991-1 Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke
- [3] DIN EN 1992 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken
- [4] DIN EN 1993 Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
- [5] DIN EN 1995 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
- [6] DIN EN 1999 Bemessung und Konstruktion von Aluminiumtragwerken
- [7] DIN 18531 (2017) Abdichtung von Dächern sowie von Balkonen, Loggien und Laubengängen – Teil 1: Nicht genutzte und genutzte Dächer – Anforderungen, Planungs- und Ausführungsgrundsätze.
- [8] Deutsches Dachdeckerhandwerk – Regeln für Abdichtungen (Flachdachrichtlinie des ZDVH)
- [9] Hinweispapier BSW-Solar: Empfehlung für anzusetzenden Haftreibungskoeffizienten bei ballastierten Solaranlagen

Bildnachweis: IBC Solar

Dieses Hinweispapier wurde erstellt durch den
Bundesverband Solarwirtschaft e. V. (BSW-Solar)
Fachgruppe Bautechnik

Stand: 2019

Herausgeber: Bundesverband Solarwirtschaft e. V.

Kontakt: Maria Roos

BSW – Bundesverband Solarwirtschaft e. V.

German Solar Association
EUREF-Campus 16
10829 Berlin

phone +49 30 2977788-43

fax +49 30 2977788-99

roos@bsw-solar.de

bsw.li/39RfrDZ 

twitter.com/BSWSolareV 

bsw.li/2usud3D 

www.solarwirtschaft.de/feed/ 