

## Fachliche Stellungnahme: Einfluss klimatischer Temperatureinwirkung auf Solaranlagen

Bei Solargeneratoren an oder auf Gebäuden handelt es sich um ein Bauwerk oder einen Teil eines Gebäudes, das grundsätzlich dem Einfluss aus klimatischer Temperatureinwirkung ausgesetzt ist. Sowohl kurzfristige Schwankungen der Lufttemperatur über den Tag als auch saisonale Temperaturunterschiede bewirken thermische Verformungen und Zwängungskräfte, die durch das Montagegestell sowie durch die Anschlüsse an das Gebäude aufzunehmen sind. Zudem können Bauteile, die direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind entsprechend ihrer Wärmekapazität erhebliche Temperaturen annehmen. Hier hat auch die Farbgebung einen signifikanten Einfluss. Abhängig von der Wärmeleitfähigkeit können sich zwischen sonnenbeschienenen und verschatteten Bauteilflächen Temperaturunterschiede aufbauen, die eine Verkrümmung von Profilen und im Falle einer behinderten Verkrümmung ausgeprägte Zwängungen bewirken.

Diese Effekte sind qualitativ bekannt und werden bei der Planung basierend auf Erfahrungswerten berücksichtigt, ohne dass eine genaue Berechnung vorgenommen wird. In den Klempnerfachregeln [1] z.B. wird ein Temperaturfenster  $-20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 80^{\circ}$  definiert. Das entspricht einem Temperaturunterschied von 100 K zwischen der kältesten und der wärmsten Situation. Einer genauen Rechnung steht im Weg, dass sich die Temperatur über den Tagesverlauf ändert und der genaue Status während der Montage nicht bekannt ist. Blechdächer werden in der Weise mit Festhaften und Schiebhaften am Gebäude befestigt, dass sich diese zwängungsarm ausdehnen und zusammenziehen können. Zudem werden Grenzlängen definiert, ab denen eine Dehnungsfuge vorzusehen ist.

Temperatureinwirkungen sind gemäß Eurocode 1 Teil 1-5 [2], [3] auch bei der Tragwerksplanung (statischen Berechnung) zu berücksichtigen, sofern diese zu bemessungsrelevanten Beanspruchungen oder Verformungszuständen führen. Dies trifft z.B. im Brückenbau, im Behälterbau und im Fall von Türmen und Masten zu. Bei normalen Gebäuden werden Temperatureinwirkungen im Regelfall nicht berücksichtigt. Als wesentliche Ausnahme sind hier Sandwichelemente für Dach- und Wand zu nennen, die aus Temperatureinwirkungen tragfähigkeitsrelevante Beanspruchungen erfahren (EN 14509). Die maximale Temperatur im Sommer ist je nach Farbe zwischen  $+55^{\circ}\text{C}$  und  $+80^{\circ}\text{C}$  anzusetzen. Die niedrigste Temperatur im Winter liegt je nach Region zwischen  $-30^{\circ}\text{C}$  und  $0^{\circ}\text{C}$ .

Der Eurocode definiert eine Tiefsttemperatur  $T_{\text{Min}} = -24^{\circ}$  und eine Höchsttemperatur der Luft  $T_{\text{Max}} = 37^{\circ}$ . Für sonnenbeschienene Bauteile ist für dunkle Oberflächen dann noch ein Anteil von 42 K dazuzurechnen, was in der Summe eine maximale Temperatur von  $+85^{\circ}\text{C}$  bedeutet.

Die Längenänderung eines Profils kann mit nachstehender Gleichung berechnet werden:

$$\Delta l = \frac{N \cdot l}{E \cdot A} + \alpha_T \cdot \Delta T \cdot l \quad [1]$$

mit:	$\Delta l$	Längenänderung
	N	Normalkraft im Profil
	l	Profillänge
	E	Elastizitätsmodul (Aluminium $E = 70.000 \text{ N/mm}^2$ , Stahl $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$ )
	A	Querschnittsfläche des Profils
	$\alpha_T$	Wärmedehnzahl
	Stahl	$\alpha_T = 1,2 \cdot 10^{-5}$
	Edelstahl	$\alpha_T \approx 1,6 \cdot 10^{-5}$
	Aluminium	$\alpha_T = 2,4 \cdot 10^{-5}$
	$\Delta T_u$	Temperaturänderung in Kelvin

Eine Zwängungskraft tritt dann auf, wenn die Temperaturdehnung behindert wird. Anschaulich bedeutet dies, dass  $\Delta l = 0$  anzusetzen ist. Danach kann Gleichung [1] nach N aufgelöst werden.

$$N = -\alpha_T \cdot \Delta T_u \cdot E \cdot A \quad [2]$$

Das negative Vorzeichen weist auf Druckkräfte hin. Das heißt, dass bei einer Erwärmung Druckkräfte und bei einer Abkühlung Zugkräfte entstehen. Bei der Auflösung der Gleichung [1] kürzt sich zudem die Profillänge heraus. Demnach ist die ungehinderte Zwängungskraft unabhängig von der Profillänge.

Die Größe der maximal möglichen Zwängung soll nachstehend durch ein Beispiel verdeutlicht werden. Bei einer Montage im Winter bei einer Lufttemperatur von  $0^\circ \text{ C}$  ist die maximale Temperaturänderung nach Eurocode mit  $\Delta T = 37 \text{ K}$  anzusetzen. Als Modultragprofil wird ein typisches Aluminiumprofil mit den Abmessungen  $40 \times 40 \text{ mm}$  mit einer Querschnittsfläche  $A = 3,64 \text{ cm}^2$  (Solo05 der Schletter GmbH) angenommen. Unabhängig von der Profilgeometrie ergibt sich nach Gleichung [2] eine Zwängungsspannung von  $\sigma = 6,0 \text{ kN/cm}^2$ , was annähernd 30% der Werkstofffestigkeit von Aluminium entspricht, und eine Zwängungskraft  $N_k = 21,5 \text{ kN}$ . Das entspricht anschaulich einer Last von 2,15 Tonnen.

Geht man hingegen von einer unbehinderten Längenänderung aus, so beträgt diese 0,9 mm pro Meter Profillänge. Bei einer Modulträgerlänge von  $l = 10 \text{ m}$  stellt sich unter der Annahme, dass der Schubruhepunkt in der Mitte liegt, eine Längung  $\Delta l = 4,5 \text{ mm}$  in beide Richtungen ein. Im Gegensatz zur Zwängungskraft ist der Verschiebeweg der Profilen abhängig von der Profillänge.

Die tatsächlich vorhandene Zwängungskraft in den Profilen ist abhängig von der Nachgiebigkeit der Befestigungselemente in horizontaler Richtung. Bei weichen bzw. nachgiebigen Anschlüssen treten demnach nur sehr geringe Zwängungskräfte auf. Eine exakte Berechnung ist in den meisten Anwendungsfällen nicht möglich, da die Nachgiebigkeit der Anschlüsse nicht bekannt ist. Zur Vermeidung von Schäden infolge thermischer Zwängungen wird deshalb in der Praxis die Länge eines Modulfeldes begrenzt. Dabei spielt der Abstand des Modulfeldes zum Anbindungspunkt eine erhebliche Rolle. Bei einer dachparallelen Schrägdachanlage liegt wenig Verformungsspielraum vor, so dass eine maximale Länge von 10 m vernünftig erscheint. Bei einer Freilandanlage mit einer Pfostenhöhe von 1,0 m können längere Montage-Einheiten gewählt werden. Bei einer Länge von 30 m stellt sich am Stützenkopf der Randstützen einer Verformung von ca. 15 mm ein. Dies entspricht einer Schiefstellung der Stütze um ca.  $0,9^\circ$ , was im Regelfall toleriert werden kann.

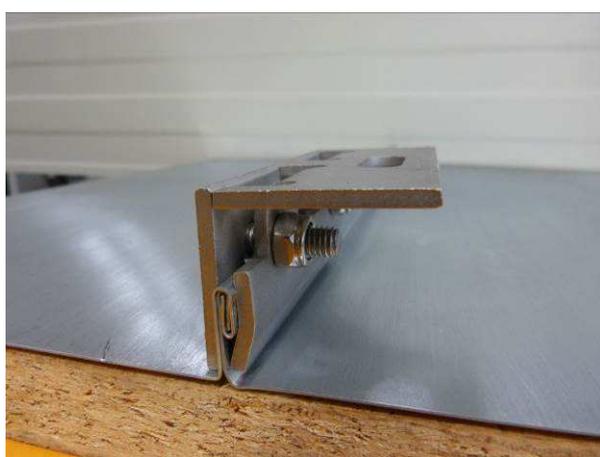
Eine Vernachlässigung der Temperaturdehnungen bei der Planung führt in der Praxis häufig zu Schäden, die bei Einhaltung der konstruktiven Begrenzung der Modulfeldgrößen vermeidbar gewesen wären. Nachfolgend soll die Problemstellung der thermischen Dehnungen anhand von Beispielen verdeutlicht werden.

Ein prominenter Anwendungsfall sind handwerklich gefertigte Stehfalzdächer und hier insbesondere Zink-Titan-Bleche. Gemäß Darstellung in Bild 1 können sich jeweils am Ende einer Montageschiene Risse in der unteren Kantung parallel zum Stehfalz einstellen. Diese sind auf wiederholte Bewegung des Stehfalzes durch die Temperaturdehnung zurückzuführen. Begünstigt wird das Schadensbild durch die Art der Befestigung einer Stehfalzklemme (Bild 2). Die typische Stehfalzklemme wird auf dem Falz aufgesetzt und durch Anziehen der Schrauben mit einem definierten Drehmoment seitlich am Falz geklemmt. Abhebende Kräfte aus Windsog werden demnach durch Formschluss eingeleitet, während Schubkräfte aus dem Hangabtrieb von Eigengewichts- und Schneelasten durch Reibung übertragen werden. Die Klemmung erfolgt mit diesem Klemmentyp verhältnismäßig weit unten am Stehfalz, so dass thermische Dehnung wiederholte lokale Belastungen bewirkt, die zu Ermüdungsrissen mit der Konsequenz der Dachundichtigkeit führen können. Bild 3 zeigt eine mögliche Ertüchtigung derartiger Fehlstellen.

Für das Falzblech deutlich günstiger sind Falzklemmen entsprechend der Darstellung in Bild 4. Hier wird die Falzklemme ausschließlich am Bördel festgeklemmt ohne die senkrecht stehenden Blechstege des Falzes zu berühren. Dadurch wird der keilförmige Spalt zwischen den Blechscharnieren nicht gezwängt. Die elastische Verformbarkeit des Stehfalzes erlaubt damit ein gewisses Maß an Temperaturdehnungen. Es gilt jedoch auch hier, dass eine Begrenzung der Profillängen das Risiko von Schäden an der Dacheindeckung deutlich reduziert.



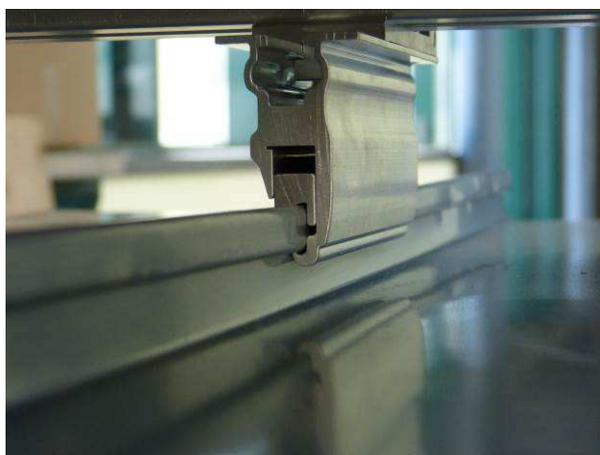
**Bild 1** Schaden am Stehfalzdach



**Bild 2** Montage einer herkömmlichen Falzklemme



**Bild 3** Reparatur Stehfalzdach



**Bild 4** Stehfalzklemme auf dem Bördel

Ein weiterer Anwendungsfall, bei dem Temperatureinwirkungen eine erhebliche Rolle spielen, sind ballastierte Systeme auf Flachdächern mit Bitumen oder Folieneindeckung. Dabei handelt es sich im Regelfall um aerodynamisch optimierte Systeme, bei denen die Ermittlung der erforderlichen Ballastmenge auf den Ergebnissen von Windkanalversuchen resultiert. Eine wesentliche Erkenntnis daraus ist, dass die erforderliche Ballastierung geringer ausfallen kann, wenn möglichst viele Module in einem festen Verbund angeordnet sind. Dann ist nicht mehr die begrenzte Ausdehnung einer Windböe oder Verwirbelung für die Bemessung ausschlaggebend, sondern es kann mit einer mittleren Beanspruchung des verbundenen Modulfeldes gerechnet werden. Ein Konzept zur Vergrößerung der im Verbund liegenden Montageeinheiten liegt in der Verwendung durchlaufender Grundträger (Bild 5), auf denen Aufständerreihen fixiert sind. Dadurch wird auch ein Kippen aufgeständerter Module wirkungsvoll ausgeschlossen, so dass bei der Nachweisführung nur noch das Abheben der Montageeinheit und das Gleiten auf dem Dach infolge horizontaler Windeinwirkungen durch Ballastierung kompensiert werden muss.

Generell handelt es sich demnach bei der Minimierung der Ballastierung infolge Windeinwirkung und bei der Betrachtung thermischer Bewegungen um zwei konkurrierende Optimierungsziele. Eine Minimierung der Ballastmenge verlangt nach möglichst großen Montageeinheiten während die Minimierung der temperaturbedingten Verformungen zu möglichst kleinen Montageeinheiten führt.



**Bild 5** ballastiertes System mit Grundschiene



**Bild 6** Ballastierung mit Kantensteinen

Bei der Wartung von ballastierten Solaranlagen wird in vielen Fällen festgestellt, dass sich die Solaranlage auf dem Dach verschoben hat. Die Verschiebung findet entweder zwischen dem Gestell und der Bautenschutzmatte (Bild 7) oder zwischen der Bautenschutzmatte und der Dachfolie (Bild 8) statt.



**Bild 7** Verschiebung der Fußpunkte



**Bild 8** Verschiebung der Bautenschutzmatte

Sicherlich auch begünstigt durch negative Erfahrungen in der Vergangenheit mit „ballastfreien“ Systemen, die in vielen Fällen Stürmen nicht standgehalten haben, und bekanntermaßen fehlerhaften statischen Berechnungen, bei denen die Ballastierung nicht nach den anerkannten Regeln der Technik ermittelt wurden, wird bei Bewegungen des Generators an der Menge des vorhandenen Ballasts gezweifelt. Bei fehlerhaften Lastansätzen oder zu hoch angesetzten Reibbeiwerten zwischen Dach und Montagesystem sind Verschiebungen des Solargenerators infolge Windwirkung möglich. Aber selbst bei hinsichtlich der Windeinwirkung korrekt geplanten Solaranlagen sind auch bei kleinen Dachneigungen Bewegungen der Anlagen infolge Temperatureinwirkung möglich oder sogar wahrscheinlich.

In der Bewertung der Ursachen ist eine systematische Beobachtung der Verschiebungsrichtung hilfreich. Wenn sich das Gestell in Richtung der Entwässerungsneigung verschoben hat, dann kann dies als Indiz für Temperatureffekte betrachtet werden. Die Bilder 9 und 10 zeigen ein Beispiel, in dem sich Gestelle offenkundig im Tiefpunkt berühren bzw. auf der Bautenschutzmatte zum Tiefpunkt des Dachs verschoben haben. Da die Verschiebungen quer zur Aufständering erfolgten, kann die Ursache für die Bewegungen eindeutig Temperatureffekten zugeordnet werden.



**Bild 9** Kontakt von Gestellen im Tiefpunkt



**Bild 10** Verschiebung auf der Bautenschutzmatte

Typische Schäden, die auf Verschiebungen ballastierter Systeme auf der Dachhaut zurückzuführen sind, sind Undichtigkeiten, wenn scharfkantige Elemente des Montagegestells in die Dachhaut einschneiden (Bild 11). Dies tritt auf, wenn die kritische Gleitebene zwischen der Bautenschutzmatte und dem Gestell liegt, da das Gestell sich in diesem Fall von der Bautenschutzmatte herunter bewegt. Bild 12 zeigt eine Situation, in der sich die Bautenschutzmatte in die Bitumenbahn eingearbeitet hat und diese verzerrt.

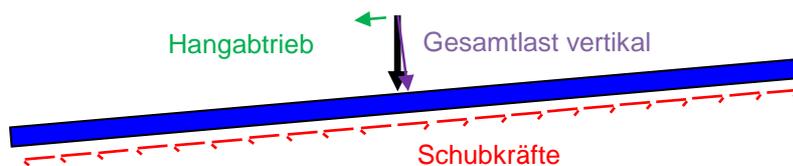


**Bild 11** Einschneiden des Gestells in die Dachhaut



**Bild 12** Verschiebung einer Bitumenbahn

Temperaturbedingte Verschiebungen ballastierter Systeme auf dem Dach sind kein einmaliger Vorgang, sondern kontinuierliche Prozesse, die sich bei jedem Erwärmungs- und Abkühlungszyklus ereignen. Betrachtet man die in den einleitenden Erläuterungen genannten Zwängungskräfte aus behinderter Temperaturdehnung, dann wird schnell offenkundig, dass diese über Ballastierung nicht aufgebaut werden können. Wenn die Schubnachgiebigkeit der Bautenschutzmatte überschritten wird muss es zu Verschiebungen kommen. Bild 13 gibt die wirkenden Kräfte wieder. Das Eigengewicht der Konstruktion lässt sich in eine reibungswirksame Auflast senkrecht zur Dachebene und eine Hangabtriebskomponente zerlegen. Damit wird die eine Verschiebung auslösende Haftreibung bei Erwärmung zuerst an der Traufseite und bei Abkühlung zuerst an der Firstseite überschritten. Anschaulich stellt sich eine raupenartige Bewegung dachabwärts ein.

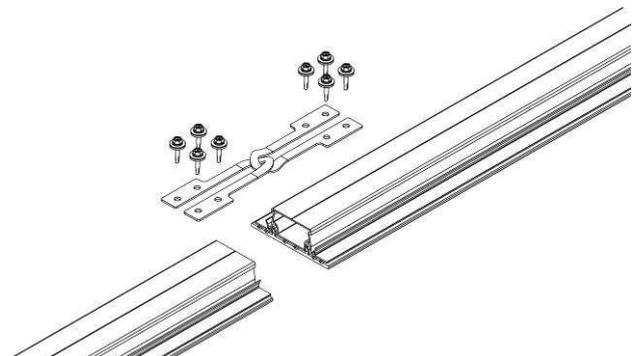


**Bild 13** Lastkomponenten

Dieser Bewegungsmechanismus wird durch die Temperaturspanne innerhalb eines Tages und die Verschiebewege, und damit die zusammenhängende Länge eines Teilgenerators, beeinflusst. Wenn die Dehnungen durch die Elastizität der Bautenschutzmatte aufgenommen werden können treten theoretisch keine Verschiebungen auf. In vielen Fällen kann es auch ausreichen, die Konstruktion in kleine Einheiten aufzuteilen. Wenn die thermischen Längenänderungen klein genug sind und von der Elastizität des Gesamtsystems bzw. des Dachaufbaus kompensiert werden können, wird die Haftreibung zwischen Dachhaut und Montagesystem nicht überschritten. Eine Wanderung des Systems ist dann nicht zu befürchten.



**Bild 14** Fixierung des Generators an Sekuranten



**Bild 15** Kopplung über den First

Die Verschiebungen können vermieden werden, wenn der Solargenerator entweder an die Dachkonstruktion angebunden wird (Bild 14) oder bei annähernd symmetrischer Belegung über den First gekoppelt wird (Bild 15). In diesem Fall heben sich dann die Hangabtriebskräfte gegenseitig auf und die Konstruktion bleibt in der Position. Die Kräfte in dem Verbindungselement entsprechen dann dem Gewicht des ballastierten Solargenerators einer Dachhälfte multipliziert mit dem Reibbeiwert  $\mu$ , der im Zuge der Planung bekannt sein muss, um den Gleitnachweis führen zu können. Für die Dimensionierung der Verbindung sollte hier ein Sicherheitsbeiwert aufgeschlagen werden. Für den Gleitnachweis wird der ungünstigste und damit niedrigste Gleitbeiwert angesetzt. Für den Nachweis der Verbindung ist aber der maximale Gleitbeiwert maßgebend.

Der Gleitbeiwert hängt von verschiedenen Einflussfaktoren wie Verschmutzung, Dachunebenheiten, Folienübergängen usw. ab. Als geeignete Größe kann hier ein Faktor 2 angesetzt werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Effekte aus klimatischer Temperatureinwirkung erhebliche Zwängungen und im Fall von ballastierten Systemen Verschiebungen hervorrufen können. Planungstechnisch können diese Einflüsse durch Dehnungsfugen oder Aufteilung in kleinere Teilgeneratoren minimiert werden. Eine Aufhebung störender Einflüsse wäre nur durch Schaffung entsprechender Nachgiebigkeiten in der Montagekonstruktion oder bei den Anschlüssen an das Gebäude möglich. Diese müssen dann so ausgelegt sein, dass Temperaturdehnungen ohne den Aufbau von unverträglichen Zwängungskräften stattfinden können.

Für die Anwendungspraxis bei ballastierten Systemen bedeutet dies, dass diese nicht als wartungsfrei anzusehen sind. Im Rahmen turnusmäßiger Kontrollen müssen ggf. verrutschte Bautenschutzmatten (Bild 16) in die Ausgangslage zurückgelegt werden. Dies ist bei ballastarmen Systemen im Regelfall mit wenig Kraftaufwand möglich.

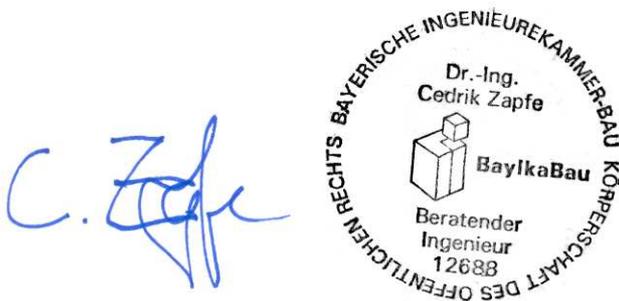


**Bild 16** verrutschte Bautenschutzmatte



**Bild 17** verschobene Gestelle

Eine Repositionierung verschobener Generatoreinheiten ist in den meisten Fällen nur nach einer Entballastierung möglich. Auch hier bieten kleinere Generatoren Vorteile gegenüber einem großen zusammenhängenden Modulfeld.



- [1] Richtlinien für die Ausführung von Klempnerarbeiten an Dach und Fassade (Klempnerfachregeln)
- [2] DIN EN 1991-1-5:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke-Teil 1-5: Allgemeine Temperatureinwirkungen
- [3] DIN EN 1991-1-5/NA:2010-12, Nationaler Anhang
- [4] EN 14509 Selbsttragende Sandwichelemente mit beidseitigen Metalldeckschichten