

Fachliche Stellungnahme: durchdringende Befestigung von Solaranlagen mit Stockschrauben bzw. Stahlschrauben

Für den Anwendungsfall der Montage einer Photovoltaikanlage auf Dächern mit Eindeckungen des Metallleichtbaus gibt es grundsätzlich zwei alternative Befestigungsarten. Der Begriff Eindeckung des Metallleichtbaus steht für Trapezbleche und Wellbleche aus Stahl oder Aluminium, Sandwichelemente und Falzdächer. In diesen Fällen kann die Befestigung durchdringend an der tragenden Unterkonstruktion zur Aufnahme der Gebäudehülle erfolgen. Alternativ ist bei diesen Dachtypen eine Befestigung an der Deckschale durch Trapezschellen oder Falzklemmen möglich. In beiden Fällen ist ein Verwendbarkeitsnachweis für die Befestigungsart durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder durch eine Zustimmung im Einzelfall durch die oberste Baubehörde des Landes, in dem ein Projekt realisiert wird, erforderlich.

Die durchdringende Befestigung an der Unterkonstruktion erfolgt je nach Art der tragenden Dachkonstruktion in Holz-, Stahl- oder Stahlbetonbauweise mit spezifischen Befestigungsmitteln. Dabei handelt es sich im Regelfall um Stockschrauben für Holztragsysteme, selbstbohrende Stahlschrauben für Stahlssysteme und Betonschrauben oder Gewindestäbe mit chemischem Befestigungsankern für Betonkonstruktionen.

Entsprechend der Art der Dacheindeckung muss unterschieden werden zwischen einer gestützten und einer ungestützten Verbindung. Die gestützte Verbindung steht für eine Konstellation, bei der sich die Schraube unter Biegung infolge von Hangabtriebskräften aus Eigengewichtslasten und Schnee am Obergurt der Dacheindeckung abstützen kann. In allen anderen Fällen, wie z.B. bei Faserzementwelle oder eine Verschraubung im Untergurt, handelt es sich um eine ungestützte Verbindung.

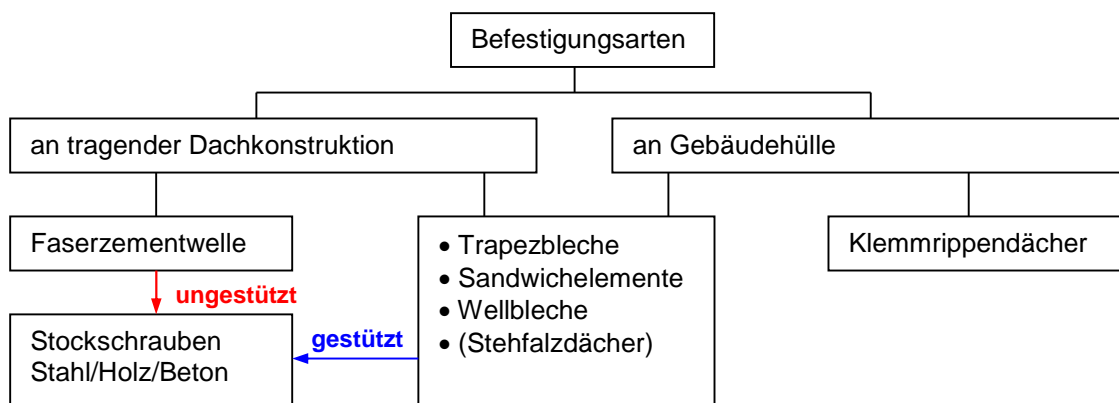


Bild 1 Klassifizierung der Befestigungsarten

Gegenstand der vorliegenden fachlichen Stellungnahme ist eine Erläuterung der grundsätzlichen Tragwirkung und der erforderlichen rechnerischen Nachweise für Befestigungssysteme mit Stockschrauben. In den meisten Anwendungsfällen werden die Profile (Modulträger oder Grundträger bei Kreuzschienen) nicht zentrisch über der Schraube befestigt, sondern es werden herstellerepezifische Adaptionen eingesetzt, die gleichzeitig auch eine Justierung des Gestells auf dem Dach erlauben. Die Adaption kann aus einem Flachblech ggf. mit Langloch, einem Winkel oder auch innovativen Klemmsystemen bestehen. Bild 2 stellt die grundsätzlichen Anwendungsfälle dar. Die Montage auf einer Flachdacheindeckung oder bei Faserzementtafeln fällt in die Kategorie der ungestützten Stockschraube, der Einsatz in Trapez- oder Wellblechen fällt unter die gestützten Verbindungen, sofern ein Formschluss unter geringfügiger Biegedeformation möglich ist.

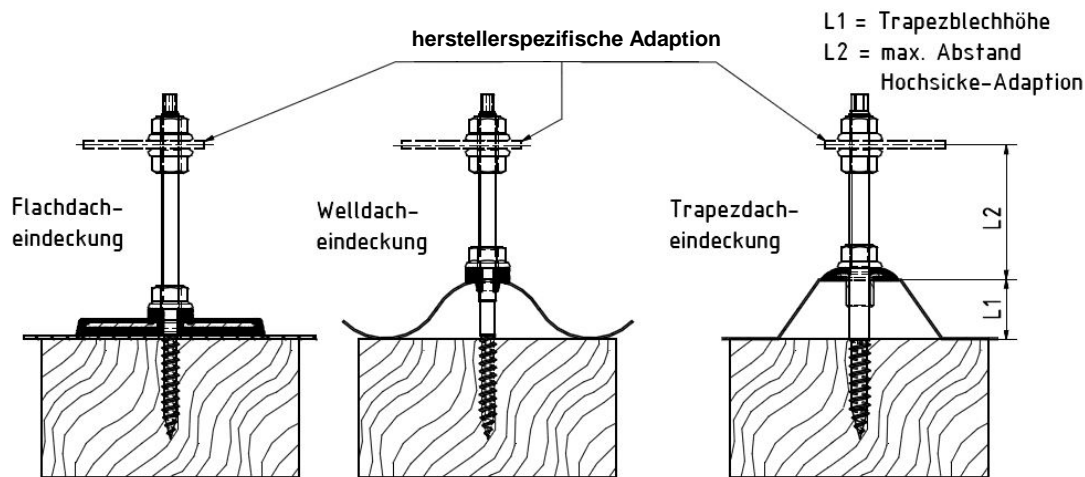


Bild 2 Ausführungsvarianten mit Stockschrauben

Zahlreiche Hersteller im Markt verfügen für die angebotenen Stockschrauben über eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, in der die Stockschraube an sich betrachtet wird, nicht aber die mögliche Exzentrizität aus seitlichen Anbindungselementen. Gestrichelte Signaturen wie in Bild 2 können den fälschlichen Eindruck erwecken, dass alle denkbaren Anschluss-exzentrizitäten in den entsprechenden Formelmechanismen einer Zulassung enthalten sind.

In Bild 3 ist schematisch die resultierende Belastung $P_{E,d}$ dargestellt, die sich für abhebende Lasten aus dem Eigengewicht der Solaranlage und Windsoglasten und im Falle drückender Lasten aus dem Eigengewicht, Schneelasten und drückenden Windlasten zusammensetzt. Der Lastangriffswinkel der resultierenden Kraft hängt von der Dachneigung und dem Verhältnis von Windbelastung zur Eigengewichts- und Schneebelastung ab und ist Gegenstand einer statischen Berechnung.

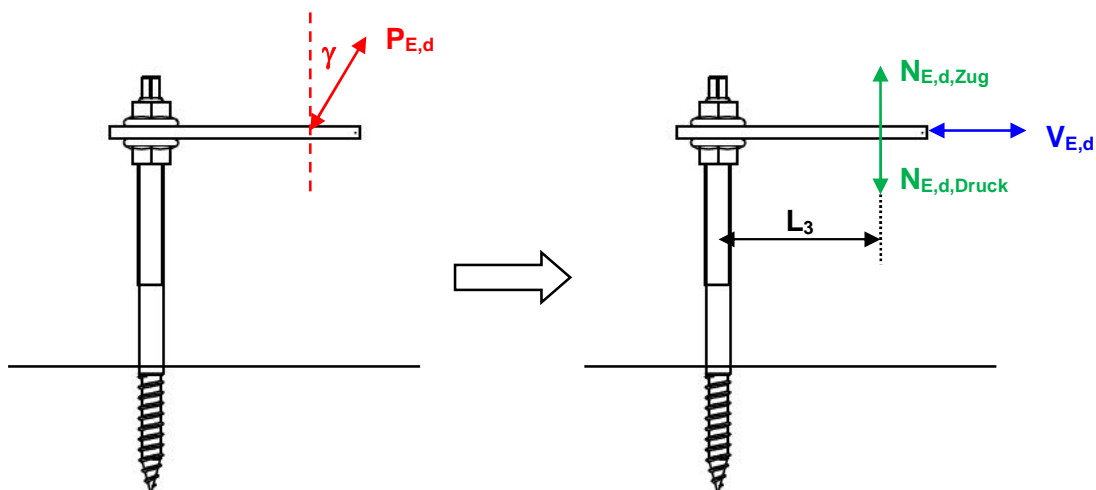


Bild 3 Einwirkung auf Stockschrauben mit einseitiger Anbindung und Zerlegung in Kraftkomponenten.

Aus berechnungspraktischen Gründen wird die resultierende Belastung für die Nachweise in Kräfte parallel zu Schraubenachse $N_{E,d}$ und Kräfte senkrecht zur Schraubenachse in Höhe der Anbindung $V_{E,d}$ zerlegt. Letztere resultieren aus Hangabtriebskräften aus Eigengewicht und Schnee und bilden insbesondere in Regionen mit hohen Schneelasten die kritische Konstellation, da Biegemomente in der Stockschraube entstehen, für die diese vordergründig nicht ausgelegt ist.

Der Nachweis einer Stockschraube kann sich folglich nicht in einer Betrachtung von übertragbaren Zugkräften und Drückkräften erschöpfen, sondern es ist eine ganze Reihe von Nachweisen zu führen, die den verschiedensten Versagensarten und Versagensorten Rechnung tragen. Bild 4 zeigt die verschiedenen Nachweisschnitte.

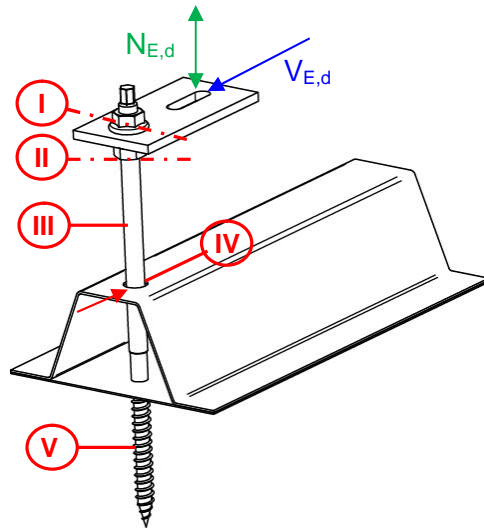


Bild 4 Nachweise und Nachweisschnitte für den Nachweis von Stockschrauben

In den Nachweisschnitten sind folgende rechnerischen Nachweise zu erbringen:

- I Nachweis der seitlichen Anbindung (Nettoquerschnitt) auf Biegung und Normalkraft
- II Nachweis des metrischen Schraubenquerschnitts auf Biegung mit Längskraft
- III Nachweis des metrischen Gewindebereichs auf Stabilität (Knicken)
- IV Nachweis der Lochleibungstragfähigkeit (nur bei gestützten Verbindungen)
- V Tragfähigkeit der Schraube im Holz incl. Randabstände (EN 1995-Eurocode 5)

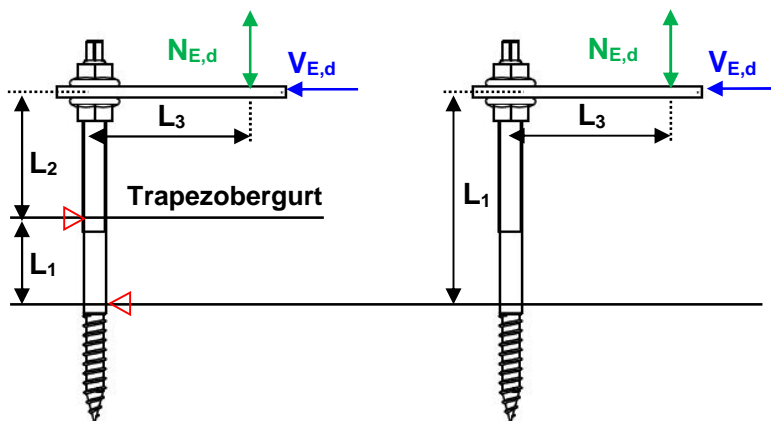


Bild 5 geometrische Parameter gestützt/ungestützt

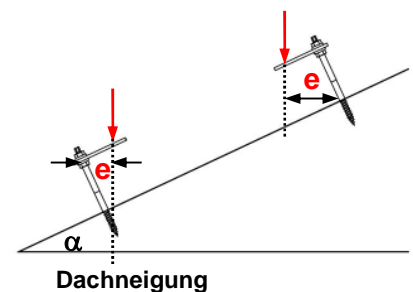


Bild 6 Einfluss seitlicher Adaption

Bei Stockschrauben mit einseitigen Anbindungen kann man allein durch die Ausrichtung der Anbindung die Beanspruchung der Stockschraube günstig beeinflussen. Bei einer Ausrichtung der Adaption zum Dachfirst nimmt die Exzentrizität der Resultierenden Kraft vom Anbindungspunkt der Adaption bis zum Einschraubpunkt in das Holz ab, oder anders ausgedrückt wirkt die Hangabtriebskraft rückstellend zur drückenden Belastung (Bild 6). Demnach dürfte für den Nachweis der Schraube der Nachweisschnitt II direkt unterhalb der Adaption maßgebend sein. Bei kleiner Exzentrizität ist in den meisten Fällen der Biegeknicknachweis des metrischen Gewindes ausschlaggebend. In einer Konstellation mit zur Traufe ausgerichteter Adaption bewirken die Hangabtriebskräfte eine Vergrößerung der Biegung in der Schraube (Bild 6). Demnach ist mit einer deutlich geringeren Biegetragfähigkeit des Gesamtsystems Stockschraube mit seitlicher Anbindung zu rechnen. Eine Ausrichtung der Adaption zum Giebel wird bezogen auf die Beanspruchbarkeit ungefähr in der Mitte der zuvor beschriebenen Konstellationen liegen.

Nachfolgend werden die Nachweise des Systems Stockschraube mit seitlicher Anbindung exemplarisch dargestellt und erläutert. Der **Nachweis-Schnitt I** betrifft die Adaption. Idealerweise ist der Nachweis der Adaption in einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung geregelt. Ansonsten muss der Nachweis rechnerisch erbracht werden, sofern Regelungen dafür existieren. In Bild 7 ist eine verbreitete Ausführung einer Adaption dargestellt, die am Anschluss an die Stockschraube über eine Bohrung verfügt. Zum Zweck der Justierbarkeit ist für den Anschluss der Montageschiene ein Langloch vorgesehen. Für dieses Anschlusselement ist der Spannungsnachweis maßgebend. Für den Nachweis ist der Nettoquerschnitt nach Abzug von Lochbohrungen maßgebend:

effektive Breite: $b_{\text{eff}} = b - \varnothing_{\text{Loch}}$ (1)

effektive Querschnittsfläche: $A_{\text{eff}} = b_{\text{eff}} \cdot t$ (2)

effektives Widerstandsmoment: $W_{\text{eff}} = A_{\text{eff}} \cdot t / 6$ (3)

Spannungsnachweis: $\sigma_x = V_{\text{Ed}} / A_{\text{eff}} \pm k \cdot N_{\text{Ed}} \cdot L_3 / W_{\text{eff}} \leq f_{0,2}$ (4)

Der Faktor k steht für den Einspanngrad und berücksichtigt, in wieweit eine Verdrehbehinderung der Adaption durch das Montagegestell bzw. den Modulrahmen gegeben ist. Die geringsten Beanspruchungen der Adaption ergeben sich bei einem Einspanngrad von 50 % ($k = 0,5$), da sich das Biegemoment an beiden Enden gleichmäßig aufbaut. In diesem Fall ist die Verträglichkeit des Montageprofils bzw. des Modulrahmens auf die entsprechenden Biege- bzw. Torsionseinwirkungen zu prüfen. Auf der sicheren Seite kann $k = 1,0$ gewählt werden. Wenn eine gezielte Einstellung der Montage vorgenommen wird, darf L_3 entsprechend der tatsächlichen Montageposition angesetzt werden. Ansonsten ist für L_3 die ungünstigste Konstellation mit einer Montage am Ende des Langlochs anzunehmen. Es bleibt anzumerken, dass ein Langloch durch die Regelwerke des Stahl- und Aluminiumbaus nicht abgedeckt ist. Folglich ist für den Nachweis der übertragbaren Kräfte in Richtung des Langlochs eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich.

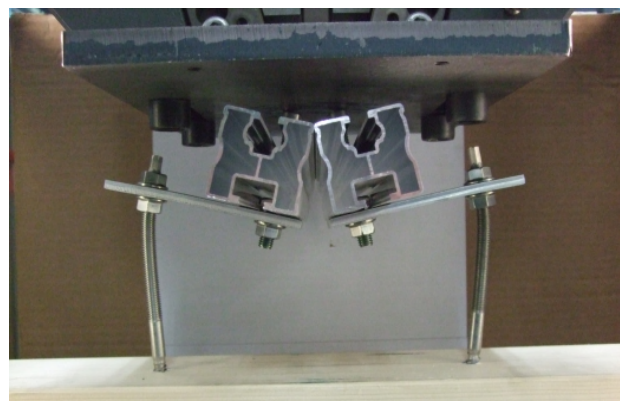
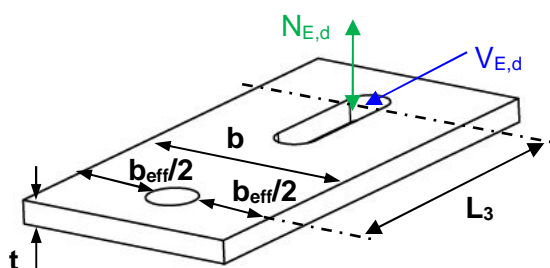


Bild 7 geometrische Parameter einer Adaption (Beispiel) **Bild 8** Verformung im Versuch

Ähnlich funktioniert der Nachweis am oberen Schnitt der Gewindeteils (**Nachweis-Schnitt II**) der Stockschraube. Bild 8 veranschaulicht anhand der Aufnahme eines Belastungsversuchs, dass Biegung am Anschnitt das maßgebende Versagenskriterium darstellen kann.

Spannungsnachweis:
$$N_{Ed} / N_{pl,d} \pm k \cdot N_{Ed} \cdot L_3 / M_{pl,d} \leq 1,0 \quad (5)$$

mit $N_{pl,d}$ plastische Grenznormalkraft der Stockschraube (metrisch)

$M_{pl,d}$ plastisches Grenzmoment der Stockschraube (metrisch)

k Einspanngrad $0 \leq k \leq 1,0$

$N_{pl,d}$ und $M_{pl,d}$ sind Beanspruchbarkeitsgrößen, die typischerweise durch Versuch ermittelt werden. Diese können der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung der Stockschraube entnommen werden.

Komplexer wird die Nachweisführung beim Stabilitätsnachweis der Stockschraube (**Nachweis-Schnitt III**). Bild 9 verdeutlicht diesen Zusammenhang anschaulich. Setzt man ein Plastiklineal einer Druckbeanspruchung aus, so weicht dieses schon unter geringer Druckkraft seitlich aus. Das gleiche Lineal könnte aber deutlich größeren Zugkräften standhalten. An dieser Stelle muss erstmalig zwischen ungestützter und gestützter Montage unterschieden werden. Stabilitätsversagen durch seitliches ausweichen hängt ausgeprägt von der Länge des gedrückten Elements ab. Da eine gestützte Stockschraube in der Obergurtebene gegen seitliches Ausweichen gesichert ist, knickt diese erst auf einem deutlich höheren Lastniveau. Diese Effekte sind bei der Nachweisführung zu berücksichtigen.

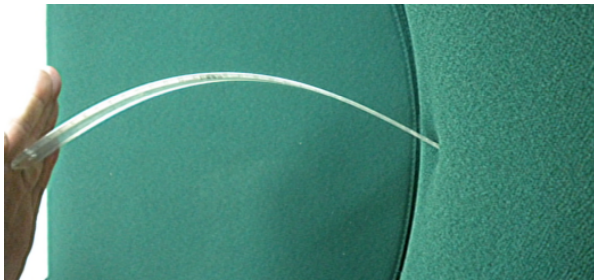


Bild 9 Knicken eines Lineals

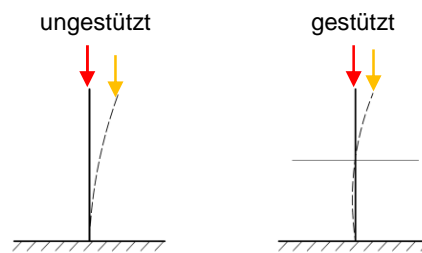


Bild 10 Knickfigur von Stäben

Der sogenannte Nachweis des Biegeknickens setzt als Eingangswerte die Ermittlung des Knicklängenbeiwertes β_1 voraus. Dieser kann für gestützte und ungestützte Stockschrauben der Tabelle 1 entnommen werden. Zusätzlich angegeben ist die effektive Schraubenlänge L_i . Während bei gestützten Stockschrauben nur der Abstand zwischen dem Obergurt der Dachschaale und dem Schwerpunkt der Adaption L_2 anzusetzen ist, muss bei ungestützten Stockschrauben der Abstand zwischen der Oberkante des Holzbalkens und dem Schwerpunkt der Adaption eingesetzt werden (Bild 2).

Tabelle 1 Knicklängenbeiwerte und effektive Schraubenlängen

	β_1	L_i
ungestützt	2,55	$L_1 + L_2$
gestützt	$0,7 + 1,85 \cdot L_2 / L_1$	L_2

Der Nachweis des Biegeknickens ist mit nachfolgender Gleichung zu führen.

$$\frac{N_{E,d,Druck}}{N_{pl,i}} + \frac{\alpha \cdot M_{E,d,Druck}}{M_{y,Rd,i}} + \frac{\alpha \cdot N_{E,d,Druck} \cdot L_i}{20 \cdot M_{y,Rd,i}} \leq 1 \quad (6)$$

mit

$N_{E,d,Druck}$ Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft

$M_{E,d,Druck}$ Bemessungswert des Biegemoments

$$M_{E,d,Druck} = \sqrt{(V_{E,d} \cdot L_i - N_{E,d,Druck} \cdot L_3 \cdot \sin\delta)^2 + (N_{E,d,Druck} \cdot L_3 \cdot \cos\delta)^2} \quad (7)$$

$N_{pl,i}$ Bemessungswert der plastischen Grenznormalkraft (Zulassung)

$M_{y,Rd,i}$ Bemessungswert des Fließmoments (Zulassung)

δ Ausrichtung der Adaption (Traufe -90° /Giebel 0° /First $+90^\circ$)

Die Bemessungswerte der plastischen Grenznormalkraft und des Fließmoments sind produktspezifisch und der jeweiligen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung zu entnehmen. Tabelle 2 enthält exemplarisch eine Bandbreite der Bemessungswiderstände für Stockschrauben.

Tabelle 2 Bemessungswerte der plastischen Grenznormalkraft $N_{pl,i}$ und des Fließmoments $M_{y,Rd,i}$

	\emptyset	M10	M12	\emptyset	M10	M12
ungestützt	$N_{pl,L1}$	10-15 kN	20-25 kN	$M_{y,Rd}$	36-41 Nm	72-80 Nm
gestützt	$N_{pl,L2}$	20-25 kN	33-38 kN	$M_{y,Rd}$	55-57 Nm	90-92 Nm

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{N_{d,Druck}}{N_{ki,d}}} \quad (8) \quad \text{mit} \quad N_{ki,d} = \frac{\pi^3 \cdot E \cdot d^4}{64 \cdot (\beta_1 \cdot L)^2 \cdot 1,1} \quad (9)$$

α Vergrößerungsfaktor

$N_{ki,d}$ ideale Knicklast der Stockschraube

E Elastizitätsmodul 190.000 N/mm²

d Mittelwert des Außen- u. Kerndurchmessers (M10 = 8,6 mm; M12 = 10,6 mm)

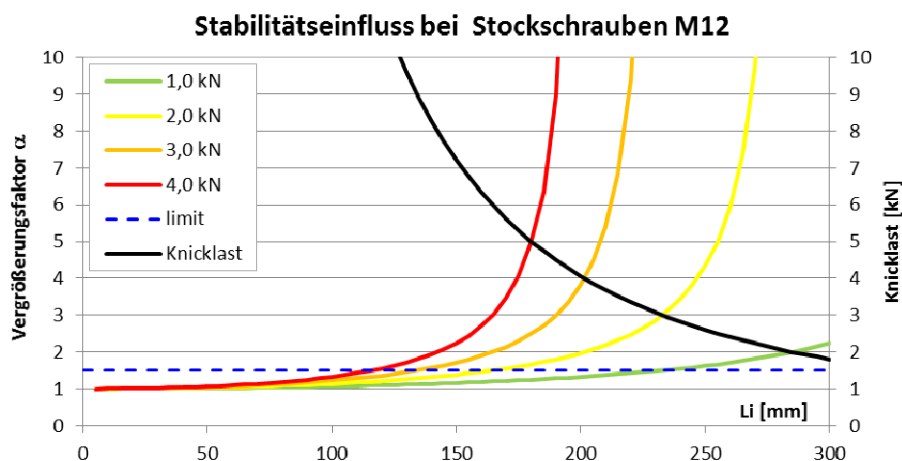


Bild 11 graphische Auswertung des Stabilitätseinflusses von Stockschrauben

Zur Veranschaulichung der zuvor durch Formeln beschriebenen Zusammenhänge sind diese in Bild 11 graphisch aufgetragen. Die schwarze Kurve hebt deutlich hervor, dass die Knicklast mit zunehmender effektiver Schraubenlänge weit überproportional abnimmt.

Gleichzeitig nimmt der Vergrößerungsfaktor α , der in Gleichung 6 auf das Biegemoment infolge Hangabtriebskräften (2. Term) und auf die ungewollte Schiefstellung (3. Term) aus Montageimperfektionen anzuwenden ist, progressiv zu. Unter der Annahme, dass ein Vergrößerungsfaktor $\alpha = 1,5$ eine ungefähre Anwendbarkeitsgrenze darstellt, liegen die möglichen effektiven Längen der Stockschrauben bei $L_i = 100$ mm bei einer Drucklast von $N_{E,d} = 4,0$ kN und bei $L_i = 240$ mm bei einer Drucklast von $N_{E,d} = 1,0$ kN. Unter dem Strich zeigt diese Auswertung, dass Stockschrauben in alpinen Regionen mit hohen Schneelasten nur einen sehr begrenzten Anwendungsbereich haben. Der Nachweis der Biegezugtragfähigkeit ist mit nachstehender Gleichung zu führen:

$$\frac{N_{E,d,Zug}}{N_{pl,i}} + \frac{M_{E,d,Zug}}{M_{y,Rd,i}} \leq 1 \quad (10)$$

mit

$N_{E,d,Zug}$ Bemessungswert der einwirkenden Zugkraft pro Schraube

$M_{E,d,Zug}$ Bemessungswert des Biegemoments pro Schraube

$$M_{E,d,Zug} = \sqrt{(V_{d,S} \cdot L_i - N_{d,S,Zug} \cdot L_3 \cdot \sin\delta)^2 + (N_{d,S,Zug} \cdot L_3 \cdot \cos\delta)^2} \quad (11)$$

Nur im Fall einer gestützten Verbindung, bei der punktuell horizontale Kräfte in den Obergurt des Trapezblechs eingeleitet werden (**Nachweisschnitt IV**), ist der Nachweis der Lochleibungstragfähigkeit des Trapezblechs zu führen.

$$\frac{M_{E,d,Druck}}{0,63 \cdot F_{b,R,k} \cdot L_1} \leq 1 \quad (12)$$

Die für den Nachweis notwendigen charakteristischen Werte der Lochleibungstragfähigkeit sind ausgeprägt von der Blechdicke, der Festigkeit des Blechs und von der Geometrie und Steifigkeit der Dichtung abhängig, da letztere ein seitliches Ausweichen des Blechs behindert. In Tabelle 3 sind exemplarisch Werte für die Stockschraube M10 des Herstellers Schletter angegeben. Diese dürfen nicht für den Nachweis beliebiger Stockschrauben verwendet werden.

Tabelle 3 Charakteristische Werte der Lochleibungstragfähigkeit $F_{b,R,k}$ für Profiltafeln aus Stahl

		Blechdicke $t_{II,N}$ [mm]						
		0,40	0,50	0,55	0,63	0,75	0,88	$\geq 1,00$
Stahlbleche								
M 10	$F_{b,R,k}$ [kN]	1,60	2,30	2,70	3,30	4,30	5,70	7,00

Der Nachweis der Tragfähigkeit der Stockschraube gegen Herausziehen aus dem Holz unter abhebenden Lasten (**Nachweisschnitt V**) und gegen drückende Belastung ist mit nachstehender Formel zu führen. Diese entstammt der europäischen Norm für Holzbau (Eurocode 5)

$$\frac{1,33 \cdot N_{E,d}}{k_{mod} \cdot F_{ax,Rk}} \leq 1 \quad (13)$$

Hierin bedeuten:

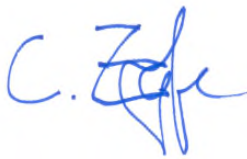
$$F_{ax,Rk} = 0,52 \cdot d^{0,5} \cdot l_{ef}^{0,9} \cdot \rho_k^{0,8} \quad (14)$$

d	Außendurchmesser des Gewindes (M10 = 10 mm; M12 = 12 mm)
l_{ef}	effektive Einschraubtiefe des Holzgewindes
ρ_k	charakteristische Rohdichte; $\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$ für die Festigkeitsklasse C24
k_{mod}	Modifikationsfaktor nach EN 1995 (Eurocode 5)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der statische Nachweis einer Stockschraube zur Anbindung von Solaranlagen an Dächer mit Holztragkonstruktionen nicht aus einem einzelnen Nachweisschritt besteht, sondern mehrere Einzelnachweise verlangt, von denen der jeweils ungünstigste maßgebend ist. Zudem muss an einen Standsicherheitsnachweis grundsätzlich die Forderung gestellt werden, dass dieser für den Fachmann, z.B. für den Sachverständigen/Prüfingenieur/Zivilingenieur, nachvollziehbar ist. Die einfache Angabe von Ausnutzungsgraden wird dieser Anforderung nicht gerecht.

Statische Nachweise für Solaranlagen werden aufgrund des großen Wiederholungsfaktors und dem Kostenfaktor für Planungsleistungen heute üblicherweise mit Hilfe von Softwarelösungen verschiedener Anbieter geführt. Der Input für die Software kommt dabei im Regelfall vom Hersteller des nachzuweisenden Bauteils. Bei den Programmierern der Software liegen nach Erfahrung des Verfassers keinerlei Kenntnisse der Baustatik vor. Deswegen werden häufig den berechneten Zug- und Druckkräften Datenbankwerte der Tragfähigkeit für Zug- und Druckkräfte gegenübergestellt, ohne dass spezifische Berechnungen durchgeführt wurden. Dies trifft mit hoher Wahrscheinlichkeit zu, wenn für den Nachweis notwendige Eingangsgrößen wie die Blechgeometrie und Festigkeit nicht abgefragt werden.

Schwierig ist im Schadensfall die Klärung der Verantwortlichkeit, da Softwarehersteller im Regelfall einen Gewährleistungsausschluss vornehmen. Als Installateur kann man sich beim Anbieter des Produkts absichern, indem man eine prüffähige statische Berechnung mit Stempel und Unterschrift eines Tragwerkplaners einfordert.



Dr.-Ing. C. Zapfe