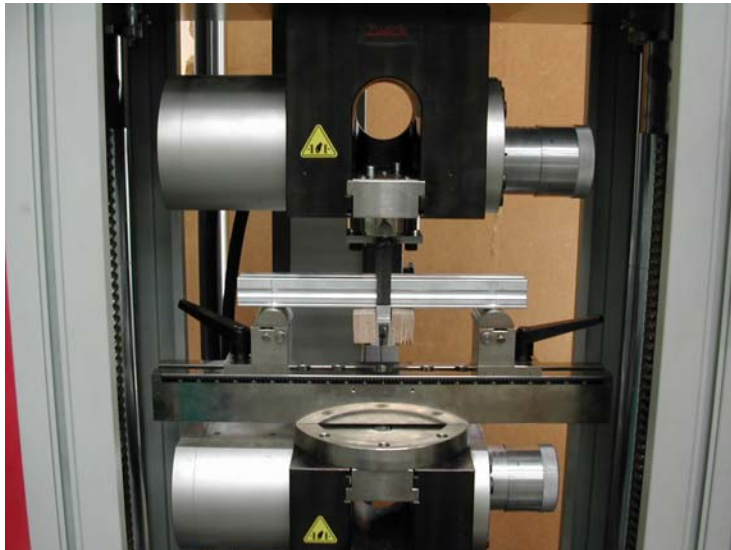


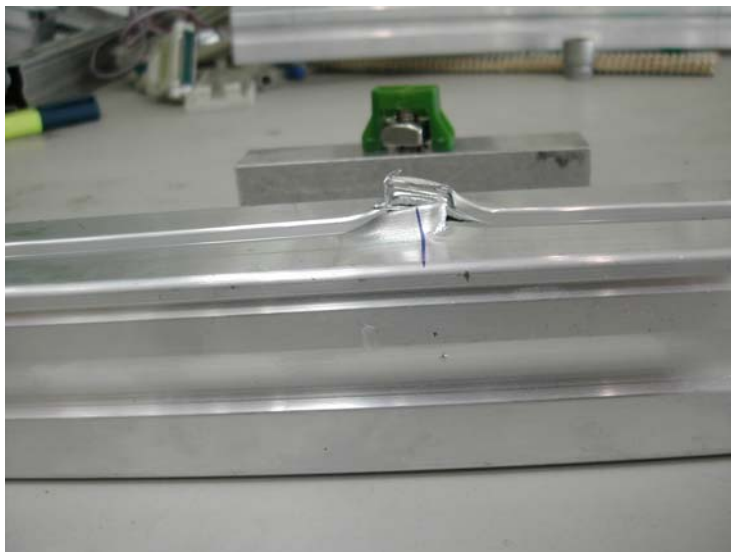
Versuchsbericht:

Experimentelle Untersuchung der Tragfähigkeit von Schraubanschlüssen an Strangpressprofile aus Aluminiumwerkstoffen (Schletter Typ Solo)



Im Auftrag der

Schletter GmbH
Solar Montagesysteme
Heimgartenstraße 41
D-83527 Haag i. OB



Versuchsbericht

Experimentelle Untersuchung der Tragfähigkeit von Schraubanschlüssen an Strangpressprofile aus Aluminiumwerkstoffen (Schletter Typ Solo)

Auftraggeber:

Schletter
Solar Montagetechnik
Heimgartenstraße 41
D- 83527 Haag i. OB

Auftragnehmer:

Mangerig und Zapfe
Beratende Ingenieure
Schlierseestraße 73
D-81539 München

München 06.08.2005

Dr.-Ing. C. Zapfe

Inhalt

1	Allgemeines	1
2	Versuchsprogramm.....	2
3	Versuchsergebnisse	3
3.1	Auswertungsmodalitäten.....	3
3.2	Dokumentation der Versuchsergebnisse	4
3.3	Charakteristischer Wert der Bruchlast	6
3.4	Charakteristischer Wert des elastischen Tragvermögens.....	6
4	Zusammenfassung	8

1 Allgemeines

Gegenstand des vorliegenden Versuchsberichts ist die Dokumentation und Bewertung von Schraubanschlüssen zur Befestigung von Klemmen zur Fixierung von Solarmodulen an Strangpressprofilen aus einem Aluminiumwerkstoff EN AW 6060 T6 (F22), bei denen eine patentierte Lösung aus einem Kunststoffelement und einer Mutter in einer Führungsnut aufgenommen wird, unter axialer Beanspruchung. Das betrachtete Anschlussdetail wird in Konstruktionen verwendet, die der Aufstellung von Solarelementen für Photovoltaikanlagen mit definierter Neigung gegenüber der Aufstellfläche dienen. Die lokale Lasteinleitung bei entsprechenden Anschlüssen stellt einen komplexen Beanspruchungszustand, der mit einfachen rechnerischen Methoden nicht mit einer hinreichenden Zuverlässigkeit erfasst werden kann. Darüber hinaus sind den technischen Regelwerken und der Fachliteratur keine Nachweisformate zu entnehmen, die auf Grundlage wissenschaftlicher Untersuchungen aufgestellt worden sind.

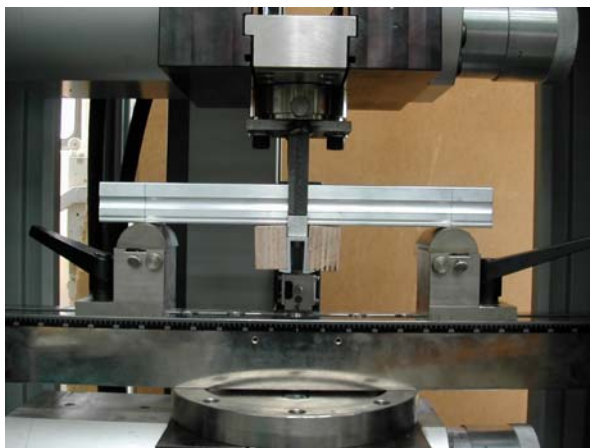


Bild 1.1 Versuchsaufbau in der Prüfmaschine

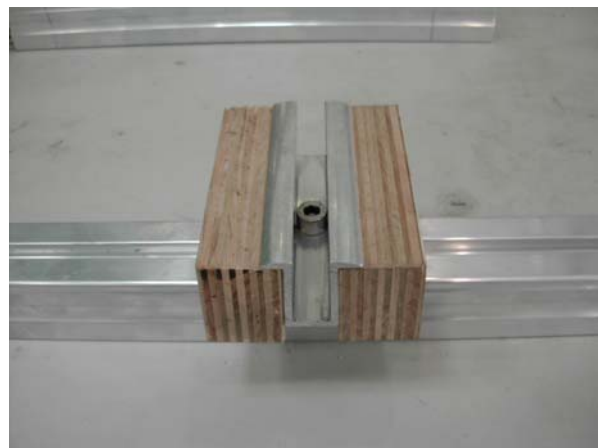


Bild 1.2 Hartholzkörper zur Darstellung des Moduls

Der Versuchsaufbau zum Test der Beanspruchbarkeit der Schraubverbindung entsprach den Lasteinwirkungen unter realen Bedingungen in der Konstruktion. Die wesentliche Lasteinwirkung für die Verbindung zwischen Solarpanel und der aufnehmenden Trägerebene liegt in einer abhebenden Windkraft, durch die die Verbindung Zugbeanspruchungen ausgesetzt ist. Entsprechend der fotografischen Darstellung in Bild 1.1 wurden Versuche mit einer Belastung senkrecht zur Schraubenachse durchgeführt. Um auch den Einfluss der Profilverformung aus der planmäßigen Biegebeanspruchung des Profils bewerten zu können, wurde dieses für die Belastungsversuche mit einer Zweipunktlagerung bei einer Stützweite $l_{st} = 300$ mm in die Prüfmaschine eingebaut. Um eine wirklichkeitsnahe Beanspruchung des Klemmprofils zu erreichen, wurde als Ersatz für das Solarpanel Hartholzkörper mit einer Höhe $h = 40$ mm verwendet. Die Schraube zur Fixierung der Klemme wurde mit einem Drehmoment $M_V = 18,0$ Nm angezogen.

2 Versuchsprogramm

Das Ziel der Versuche war die Ermittlung statistisch abgesicherter Wert für die Beanspruchbarkeit der betrachteten Anschlusskonfiguration. Demnach wurden 5 gleichartige Versuche durchgeführt, um die Streuung bewerten zu können.

Als Profil zur Aufnahme der Klemmverbindung wurde ein Strangpressprofil mit der Produktbezeichnung Solo (Bild 2.1 und Bild 2.2) untersucht, bei dem der obere Nutenkanal spezifisch nach den Anforderungen an die Montage der Verbindung geformt ist. Die Schraubverbindung wird hergestellt, indem das Kunststoffelement in die Führungsnut eingeführt, und die speziell geformte Mutter mit quadratischem Querschnitt und konischer Oberseite mit leichtem Druck in die Führungsnut hineingedrückt wird. Anschließend wird die Schraube zur Fixierung des Klemmprofils mit definiertem Drehmoment $M_v = 18 \text{ Nm}$ angezogen. Unter axialer Zugbeanspruchung ist demnach annähernd das Tragverhalten einer Hammerkopfschraube zu erwarten. Die Schraube mit dem Kunststoffelement und dem Klemmprofil ist in den Bildern 2.3 und 2.4 dargestellt.

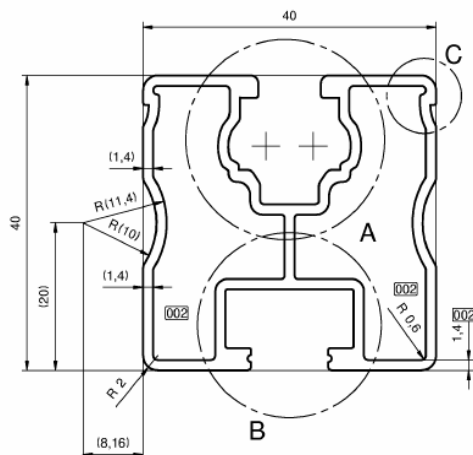


Bild 2.1 Abmessungen des Strangpressprofils

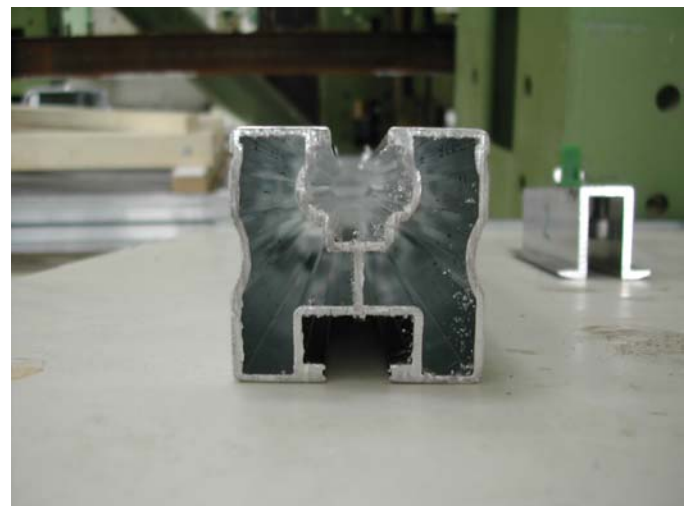


Bild 2.2 Geometrie des Prüfprofils (Schletter Typ Solo)



Bild 2.3 Schraube mit Kunststoffführung



Bild 2.4 Schraube mit Klemmprofil

Die Versuche wurden im Labor des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau an der Universität der Bundeswehr München in Neubiberg durchgeführt.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Auswertungsmodalitäten

Ziel der Versuche war neben der Beobachtung der spezifischen Versagensmechanismen auch die Ermittlung von Tragfähigkeitswerten, die bei der Auslegung und Dimensionierung entsprechender Konstruktionen der Nachweisführung zugrunde gelegt werden können. Für die Ableitung charakteristischer Werte des Tragvermögens sind immer mehrere gleichartige Versuche erforderlich, um Aussagen über die Streuungen, sprich die Standardabweichungen treffen zu können, die ein Maß für das erforderliche Herabsetzung der mittleren Tragfähigkeiten auf das charakteristische Niveau bilden. Für eine statistische Bewertung sind mindestens drei Versuche erforderlich. Im Rahmen des vorliegenden Versuchsprogramms wurden 5 gleichartige Versuche durchgeführt. Bei der Auswertung wird sowohl das Bruchniveau, das sich aus der maximalen Prüflast ergibt, als auch die Proportionalitätsgrenze als Übergang in den nichtlinearen Bereich betrachtet. Die Proportionalitätsgrenze gestattet eine Abschätzung des Plastizierungsbeginns.

Die statistische Bewertung der Versuche erfolgt nach DIN EN 1990, Grundlagen der Tragwerksplanung, Anhang D: Versuchsgestützte Bemessung. Grundlage bildet das Bayessche Verfahren für unsichere Verteilungen mit unbekanntem Variationskoeffizienten. Dieses basiert auf einer logarithmischen Normalverteilung. Folgende Eingangsgrößen werden benötigt:

P_i Tragvermögen des Einzelversuchs mit $i = 1$ bis n

n Anzahl der verfügbaren Versuche

$$m_y = \frac{1}{n} \sum \ln(P_i)$$

$$s_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (\ln P_i - m_y)^2}$$

$$P_{Rk} = X_d = e^{m_y - k_n \cdot s_y}$$

mit

n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
k_n	-	-	3,37	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

Aus der Abnahme der k_n -Werte mit zunehmender Probenanzahl wird ersichtlich, dass eine größere experimentelle Grundgesamtheit im Regelfall günstigere Werte liefern dürfte. In den nachfolgenden Abschnitten sind die Versuchsreihen mit den zugehörigen Messkurven und der statistischen Auswertung dokumentiert.

3.2 Dokumentation der Versuchsergebnisse

Die Versuchsdurchführung erfolgte in einer servohydraulischen Prüfmaschine mit geregelter Wegvorschub. Dabei war das Strangpressprofil gemäß Bild 3.1 mit unten liegender Klemmvorrichtung in die Prüfmaschine eingebaut. Die Belastung wurde durch eine Traverse beiderseits vom Strangpressprofil gleichmäßig in das Klemmprofil eingeleitet. Unmittelbar vor dem Versagen der Verbindung fielen die Hartholzkörper, die im Versuch die geklemmten Solarmodule simulierten, aufgrund der Längung der Schraubverbindung heraus.

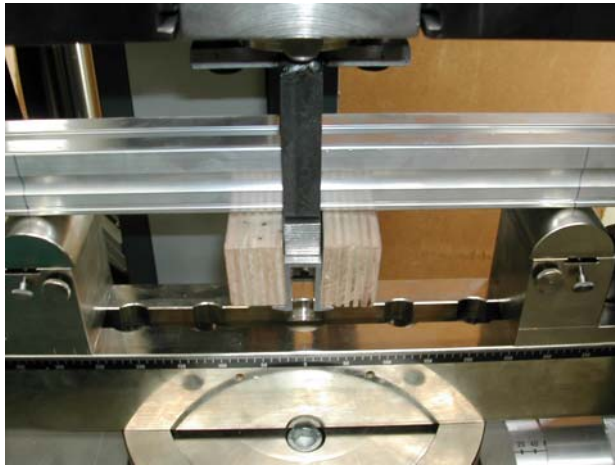


Bild 3.1 Schraube mit Kunststoffführung

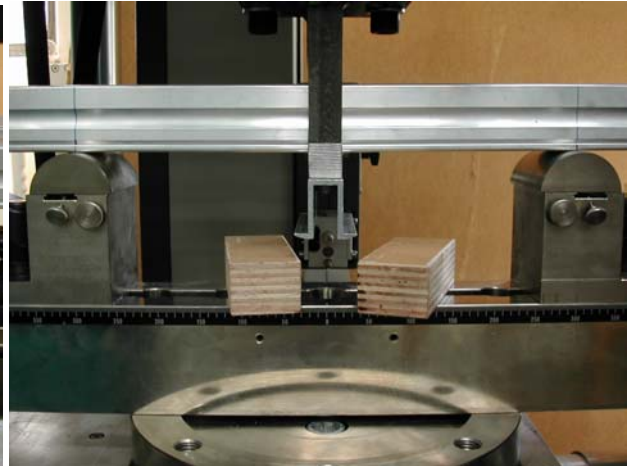


Bild 3.2 Schraube mit Klemmprofil

In den Bildern 3.3-3.6 sind die Einzelkomponenten und Detailansichten des Bruchbereichs der Versuchskörper 1 und 2 abgebildet. Es kann festgehalten werden, dass bei allen 5 Versuchen ein übereinstimmender Versagensmechanismus vorgelegen hat, der sich mit einem Herausknöpfen der Mutter aus der Führungsnut des Strangpressprofils beschreiben lässt. Dabei bleiben plastische Deformationen und Gewaltbrüche auf den unmittelbaren lokalen Bereich der Schraubverbindung beschränkt. Profilverformungen mit größerer Ausdehnung über die Länge des Strangpressprofils konnten nicht festgestellt werden.

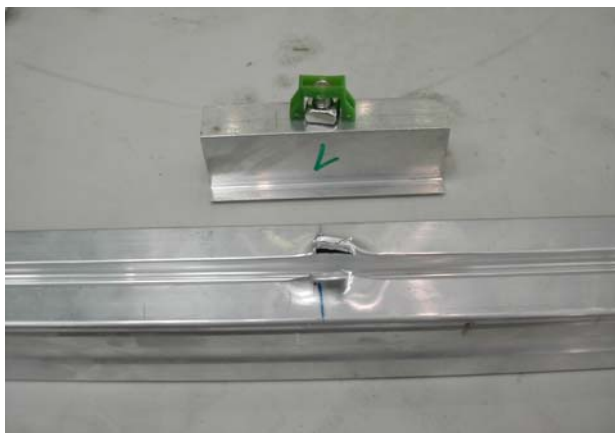


Bild 3.3 Komponenten des Versuchskörpers 1



Bild 3.4 lokale Deformation des Strangpressprofils



Bild 3.5 Komponenten des Versuchskörpers 2

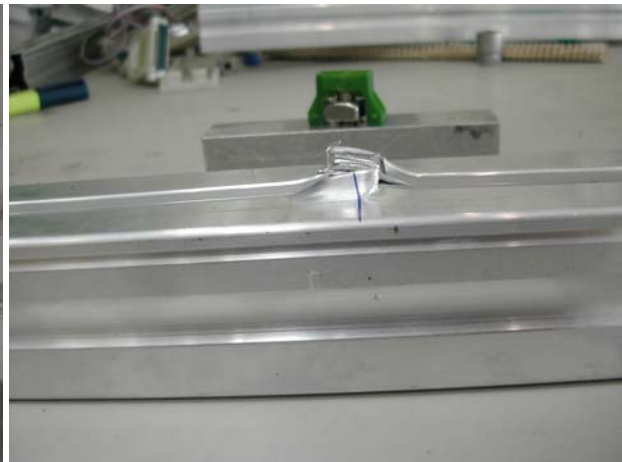


Bild 3.6 lokale Deformation des Strangpressprofils

Die messtechnisch aufgezeichneten Last-Verformungs-Kurven sind in Bild 3.7 graphisch aufgetragen. Es zeigte sich bei allen 5 Versuchen korrelierende Verformungs- und Versagenseigenschaften. Bis zu einem Prüflastniveau in einer Größenordnung von 4.000-5.000 N zeichnete sich ein lineares Last-Verformungsverhalten ab. Die aufgezeichneten Gesamtverformungen setzen sich anteilig aus einer Durchbiegung des Strangpressprofils infolge des statischen Systems und lokalen Anteilen aus Profilverformung zusammen. Mit zunehmender Last stellte sich eine nichtlineare Last-Verformungscharakteristik bis zum Bruch bei einer Gesamtverformung zwischen 4,0 und 5,5 mm ein.

Bereinigt um die statische Durchbiegung aus der Längstragwirkung kann von Deformationen von $w > 3$ mm ausgegangen werden. Demnach kann auf ein duktiles Verhalten geschlossen werden.

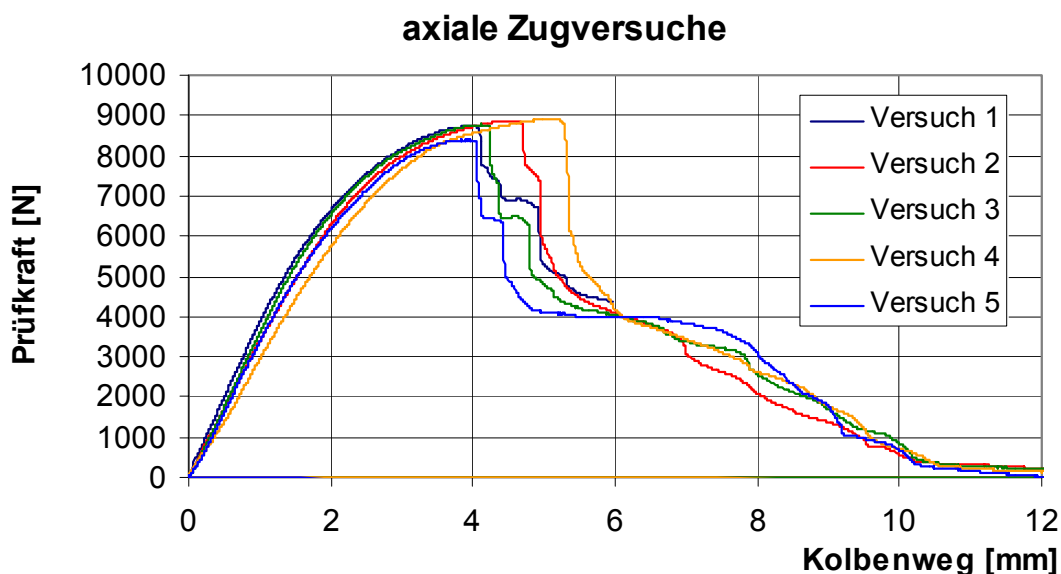


Bild 3.7 Messkurven der axialen Belastungsversuche an Strangpressprofilen des Typs Solo

3.3 Charakteristischer Wert der Bruchlast

Die Auswertung von experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung des charakteristischen Tragvermögens erfolgt üblicherweise für das Bruchniveau. Der als 5%-Fraktile der experimentellen Grundgesamtheit definierte und um den Teilsicherheitsbeiwert der Widerstandsseite reduzierte Wert R_d darf unter γ -fachen Lasten E_d nicht überschritten werden. Der Teilsicherheitsbeiwert auf der Widerstandsseite γ_v wird bei Versagen durch Bruch mit $\gamma_v = 1,25$ angesetzt. Die statistische Auswertung des charakteristischen Werts des Tragvermögens gemäß Kapitel 3.1 ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Begünstigt durch die geringen Streuungen der experimentellen Grundgesamtheit der Versuchsreihe ergibt sich ein charakteristisches Tragvermögen unter axialem Zug von:

$$P_{uk} = 8071 \text{ N} \approx 8,0 \text{ kN} \qquad P_{Rd1} = 8,0/1,25 = 6,4 \text{ kN}$$

Tabelle 3.1 Statistische Analyse zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit (Bruchlastniveau)

		$P_i = x_i [\text{N}]$	$\ln x_i$	$(\ln x_i - m_y)^2$	$m_y = (\sum \ln x_i)/n$	9,07522223
Versuch 1	P_{u1}	8728,527	9,074351906	7,57471E-07	$\sum (\ln x_i - m_y)^2$	0,00231178
Versuch 2	P_{u2}	8878,438	9,091380920	0,000261103	s_y	0,03399842
Versuch 3	P_{u3}	8770,497	9,079148754	1,54176E-05	k_n	2,33
Versuch 2	P_{u4}	8919,791	9,096027795	0,000432871		
Versuch 3	P_{u5}	8393,407	9,035201796	0,001601635	P_{uk}	8071

3.4 Charakteristischer Wert des elastischen Tragvermögens

Wenn neben dem Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Verformungen maßgebend sind, muss der charakteristische Wert des Tragvermögens an diese Forderung angepasst werden. Auch wenn Windeinwirkungen beim Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit als quasi-statisch angesetzt werden, muss unter dem Gesichtspunkt, dass Windeinwirkungen wiederholt auftretende Beanspruchungen hervorrufen, sichergestellt werden, dass beim einmaligen Auftreten des maßgebenden Windereignisses keine bleibenden Deformationen entstehen. Daher werden die Versuche nachfolgend nach dem Lastniveau ausgewertet, bis zu dem elastische Verformungseigenschaften vorausgesetzt werden können. Ausgehend von der Voraussetzung, dass aus der Längstragwirkung keine plastischen Verformungen entstehen, werden aus den Versuchskurven die Prüflasten heraus gesucht, bis zu denen ein lineares Last-Verformungsverhalten vorhanden ist. In Bild 3.8 sind Auszüge aus den Last-Verformungskurven dargestellt, die eine Abschätzung der Grenze der Proportionalitätsverschiebungen gestatten. Eine exakte Angabe ist anhand der Messkurven nicht möglich.

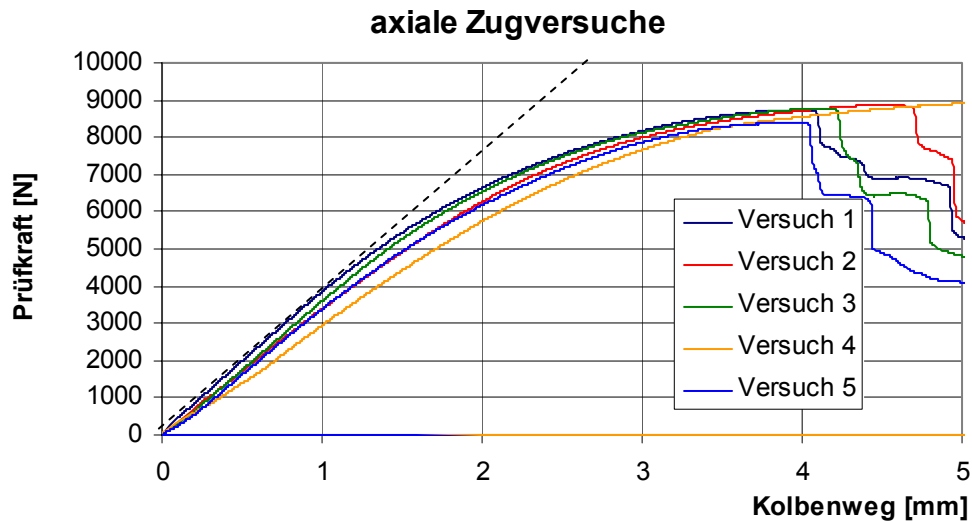


Bild 3.8 Auszug aus den Messkurven zur Abschätzung des Übergangs in den nichtlinearen Bereich

Die Ausmessung der Proportionalitätsgrenze aus den Versuchskurven in einem Spektrum zwischen 4500 - 5300 N ist in Tabelle 3.2 zusammengestellt.

Tabelle 3.2 Statistische Analyse zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit (Proportionalitätsgrenze)

		$P_i = x_i$ [N]	$\ln x_i$	$(\ln x_i - m_y)^2$	$m_y = (\sum \ln x_i) / n$	8,50373433
Versuch 1	P_{el1}	4500	8,411832676	0,008445914	$\sum (\ln x_i - m_y)^2$	0,01399855
Versuch 2	P_{el2}	5000	8,517193191	0,000181141	s_y	0,08366166
Versuch 3	P_{el3}	4900	8,496990484	4,54794E-05	k_n	2,33
Versuch 2	P_{el4}	5300	8,575462100	0,005144873		
Versuch 3	P_{el5}	5000	8,517193191	0,000181141	P_{Rk}	4059

Bedingt durch die größeren Streuungen der aus den Versuchskurven herausgelesenen Proportionalitätsgrenzen liegt die 5%-Fraktile der experimentellen Grundgesamtheit im Vergleich zur Auswertung der Bruchlasten mit $P_{Rk} = 4,0$ kN auf einem verhältnismäßig niedrigen Niveau. Da die Grenzwerte auf Plastizieren des Werkstoffs zurückzuführen sind, ist auf der Widerstandsseite der Teilsicherheitsbeiwert des Materials anzusetzen. Für Aluminium gilt $\gamma_M = 1,1$. Damit lassen sich als konservative Grenze für das charakteristische Tragvermögen und den Bemessungswert folgende Größen angeben.

$$P_{Rk} = 4059 \text{ N} \approx 4,0 \text{ kN}$$

$$P_{Rd2} = 4,0 / 1,1 = 3,6 \text{ kN}$$

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Versuchsbericht behandelt die Dokumentation und Bewertung von experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit von Schraubanschlüssen zur Fixierung von Solarmodulen an Strangpressprofilen aus Aluminiumwerkstoffen. Die geprüfte Verbindungskonstellation umfasst die Baugruppen Klemmprofil, Schraube mit einer spezifisch geformten Mutter mit quadratischer Aufstandsfläche in einer Führungshülse aus Kunststoff, und einem Strangpressprofil mit der Typenbezeichnung Solo aus dem Lieferprogramm der Fa. Schletter GmbH.

Die Schraubverbindung wurde zum Test der Beanspruchbarkeit unter axial wirkender Zugkraft aus Windeinwirkung anhand von 5 Versuchskörpern getestet, und das Last-Verformungsverhalten aufgezeichnet. Das Versagen wurde bei allen 5 Versuchskörpern übereinstimmend durch Herausknöpfen der Mutter aus der Führungsnut des Strangpressprofils herbeigeführt. Nach statistischer Auswertung können für diesen Verbindungstyp unter axialer Zugbeanspruchung folgende Tragfähigkeiten angegeben werden:

Bruchlast: $P_{uk} = 8,0 \text{ kN}$ $R_{Rd1} = 6,4 \text{ kN}$

Plastizieren: $P_{Rk} = 4,0 \text{ kN}$ $R_{Rd2} = 3,6 \text{ kN}$

Da bei der Aufstellung von Solaranlagen Windkräfte als veränderliche Einwirkungen zu beachten sind, wird empfohlen, bei den statischen Nachweisen der Verbindungen den kleineren Wert $R_{Rd2} = 3,6 \text{ kN}$ zugrunde zulegen.