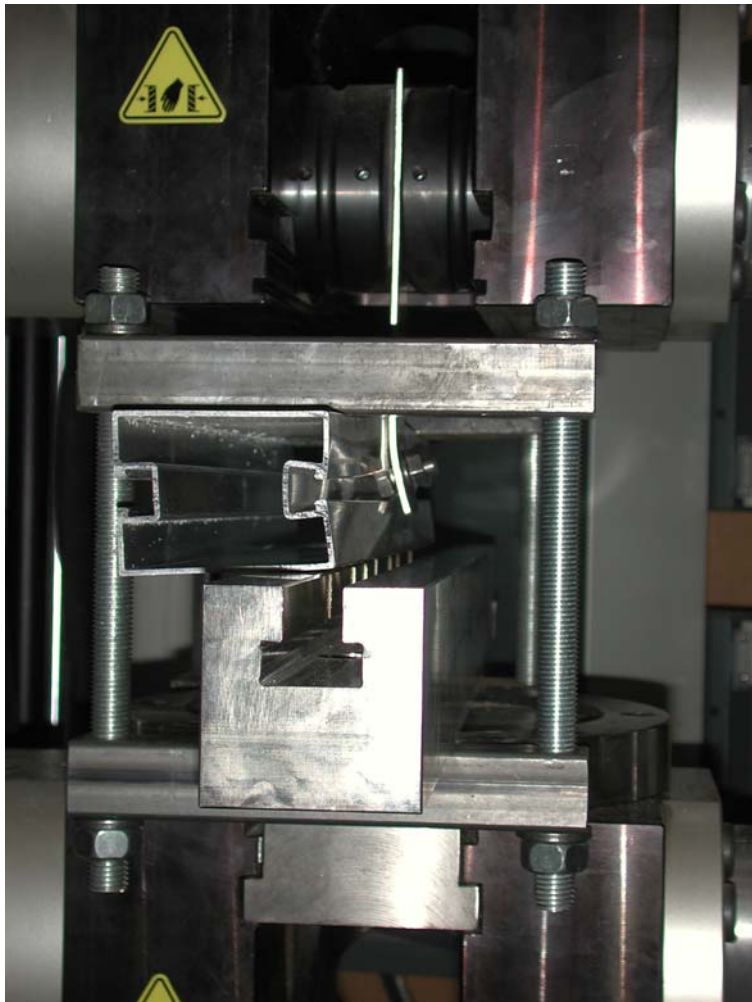


## ***Versuchsbericht:***

### ***Experimentelle Untersuchung der Tragfähigkeit von Schraubanschlüssen an Strangpressprofile aus Aluminiumwerkstoffen***



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**

### **Auftraggeber:**

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

### **Auftragnehmer:**

Mangerig und Zapfe  
Beratende Ingenieure  
Schlierseestraße 73  
D-81539 München

München 06.04.2005

---

Univ.-Prof. Dr.-Ing. I. Mangerig

---

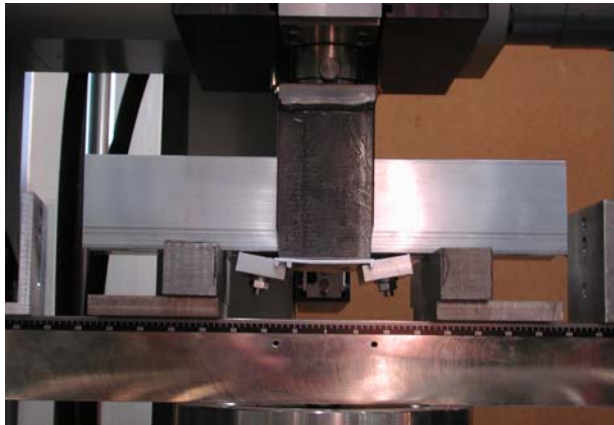
Dr.-Ing. C. Zapfe

### **Inhalt**

1	Allgemeines .....	1
2	Versuchsprogramm .....	2
3	V Versuchsergebnisse .....	3
3.1	Auswertungsmodalitäten .....	3
3.2	Versuchsreihe 1 .....	4
3.3	Versuchsreihe 2 .....	5
3.4	Versuchsreihe 3 .....	6
3.5	Versuchsreihe 4 .....	7
4	Zusammenfassung .....	9

### 1 Allgemeines

Gegenstand des vorliegenden Versuchsberichts ist die Dokumentation und Bewertung von Belastungsversuchen an Schraubanschlüssen zur Fixierung von Flachblechen an Strangpressprofilen aus einem Aluminiumwerkstoff, bei denen der Schraubenkopf in einer Führungsnut aufgenommen wird. Die betrachteten Anschlussdetails werden 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 wurden sind.



**Bild 1.1** Belastung senkrecht zur Schraubenachse



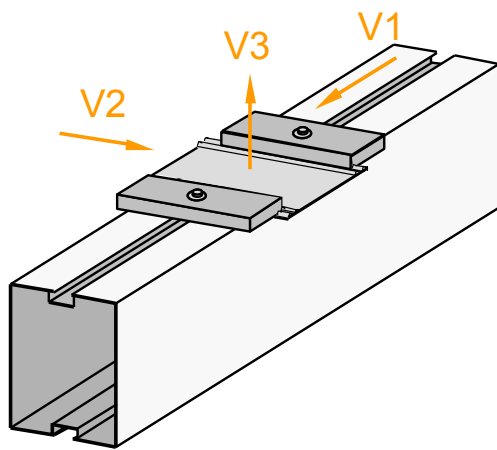
**Bild 1.2** Scherbelastung senkrecht zur Schraubenachse

Aufgrund fehlender technischer Nachweisvorschriften sind Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit erforderlich. Entsprechend möglicher Beanspruchungszustände in der realen Konstruktion wurden verschiedene Lastkonfigurationen betrachtet. Entsprechend der photographischen Darstellung in Bild 1.1 wurden Versuche mit einer Belastung senkrecht zur Schraubenachse durchgeführt. Infolge der Exzentrizität der Belastungsachse zur Schraubenachse ist der Beanspruchungszustand der Schrauben und des Strangpressprofils mit Biegeanteilen überlagert, die das Versagensverhalten und damit das Tragvermögen des spezifischen Anschlusses beeinflussen. Als weitere Lastkonfigurationen wurden Scherbeanspruchungen senkrecht zur Schraubenachse betrachtet. Aufgrund der Nachgiebigkeit der Komponenten liegt auch hier ein Zustand mit anteiliger Biegebeanspruchung vor. Um abgesicherte Werte der Beanspruchbarkeit zu erhalten werden mehrere Versuche durchgeführt, um charakteristische Werte des Tragvermögens zu ermitteln.

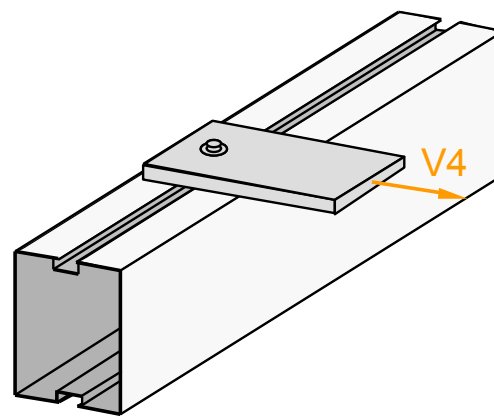
## 2 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm umfasste 4 Versuchsreihen mit jeweils 3 gleichartigen Versuchen:

- Versuchsreihe 1: Scherbeanspruchung parallel zur Achse des Strangpressprofils
- Versuchsreihe 2: Scherbeanspruchung senkrecht zur Achse des Strangpressprofils
- Versuchsreihe 3: Beanspruchungen senkrecht zur Schraubenachse
- Versuchsreihe 4: Scherbeanspruchung senkrecht zur Achse des Strangpressprofils (Flachblech)



**Bild 2.1** Belastungsrichtung der Versuchsreihen 1-3



**Bild 2.2** Scherbelastung bei der Versuchsreihe 4

Mit den Versuchsreihen V1-V3 wird eine Konstellation untersucht, in der ein flaches Pressprofil mittels verschraubter Klemmblöcke am Strangpressprofil befestigt ist. Dabei verfügt das an den Rändern über eine Aufkantung, die in Nuten in der Unterseite der Klemmblöcke eingeführt wird. Die Befestigung der Klemmblöcke am Strangpressprofil erfolgt über jeweils 1 Schraube M10, die mit dem Schraubenkopf in die Führungsnut des Strangprofils eingeführt wird. Die Belastung wird entsprechend der schematischen Darstellung in Bild 2.1 parallel zur Längsachse des Strangpressprofils (V1), quer zur Nut, bzw. in der Achse des fixierten Profils (V2) und senkrecht zur Hauptachse des Strangpressprofils aufgebracht.

Die Versuchsreihe 4 dient der Untersuchung einer Konfiguration, in der ein Flachblech mit nur einer Schraube am Strangpressprofil befestigt ist und senkrecht zur Achse belastet wird. Eine schematische Darstellung des Anschlussdetails und der Belastungsrichtung ist in Bild 2.2 skizziert.

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. Bei einer größeren Anzahl von Versuchen steht eine größere experimentelle Grundgesamtheit für die Festlegung des charakteristischen Niveaus zu Verfügung, die eine sichere Bewertung gestattet. Demnach können günstigere Werte für die 5%-Fraktile, die das charakteristische Niveau kennzeichnet, ausgewiesen werden.

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

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

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

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

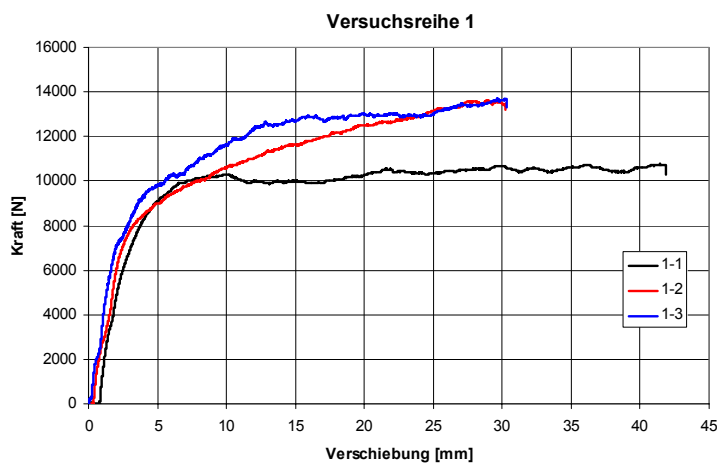
mit

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

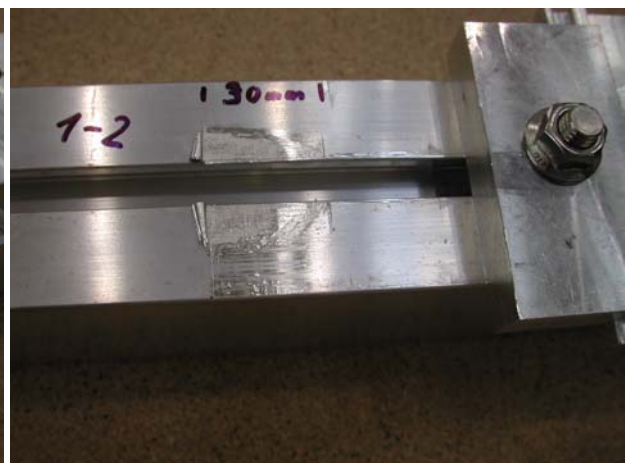
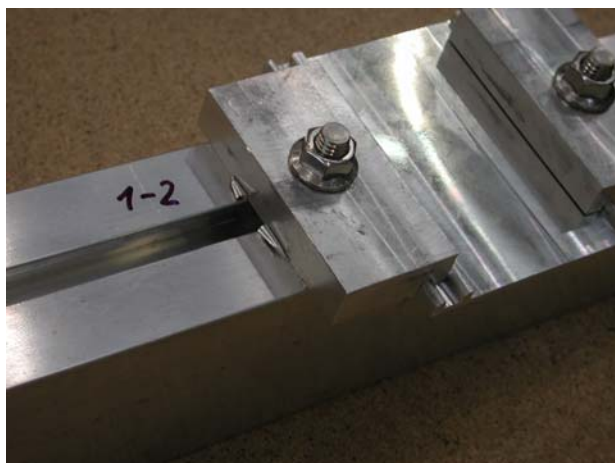
Aus der Abnahme der  $k_n$ -Werte mit zunehmender Probenanzahl wird ersichtlich, dass eine größere experimentelle Grundgesamtheit im Regelfall günstigere Werte liefern dürfte. In den nachfolgenden Abschnitten sind die Versuchsreihen mit den zugehörigen Messkurven und der statistischen Auswertung dokumentiert.

### 3.2 Versuchsreihe 1

Der Versuchsaufbau der Versuchsreihe 1, bei der die Anschlusskonfiguration parallel zu Längsachse des Strangpressprofils belastet wurde, ist in Bild 3.1 mit den zugehörigen Kraft-Verschiebungskurven dargestellt. Bei den Versuchskurven ist festzustellen, dass diese bis zu einem Lastniveau von 10.000 N eine übereinstimmende Charakteristik aufweisen. Bei ca. 8.000 N setzt ein nichtlineares Last-Verformungs-Verhalten mit überproportionaler Verformungszunahme ein. Die Versuche 1-2 und 1-3 weisen im Nachbruchbereich noch eine weitere Lastzunahme auf während beim Versuch 1-1 eine annähernd konstantes Lastniveau aufrecht erhalten werden kann. In den Bildern 3.2 und 3.3 ist exemplarisch eintypisches Merkmal der Versuchsfolge dargestellt. Mit fortschreitender Verformung wird auf einer zunehmenden Breite der Oberfläche durch den Klemmblock abgefräst. Dieser Effekt ist mit einer Verformung des Strangpressprofils infolge einer Zugbeanspruchung der Schraube in Verbindung mit einer Verkantung des Klemmblocks zu erklären.



**Bild 3.1** Versuchsaufbau und Messschriebe der Versuchsreihe 1



**Bild 3.2** Abfräsen des Grundmaterials nach dem Versuch **Bild 3.3** Ausdehnung des Schädigungsbereichs

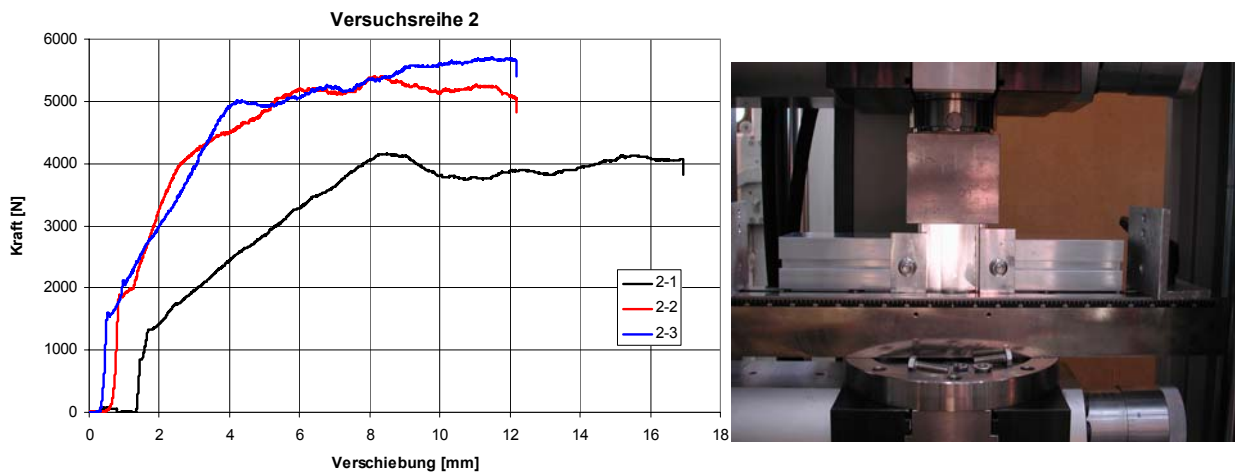
Zur Ableitung von charakteristischen werden die aufgezeichneten Bruchlasten der Versuche einer statistischen Auswertung unterzogen. Die Ergebnisse der statistischen Analyse sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. Mit einem Wert  $P_{Rk} = 7.925,1$  N liegt das charakteristische Tragvermögen auf einem Niveau von 62,5 % des Mittelwerts der Versuchsreihe.

**Tabelle 3.1** Statistische Analyse der Versuchsreihe 1 zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit

		$P_i = x_i$ [N]	$\ln x_i$	$(\ln x_i - m_y)^2$	$m_y = (\sum \ln x_i) / n$	<b>9.44228542</b>
Versuch 1-1	$P_1$	10755.1	9.283135340	0.025328747	$\sum (\ln x_i - m_y)^2$	<b>0.03799544</b>
Versuch 1-2	$P_2$	13640.3	9.520783925	0.006162016	$s_y$	<b>0.13783221</b>
Versuch 1-3	$P_3$	13669.7	9.522936984	0.006504675	$k_n$	<b>3.37</b>
					$P_{Rk}$	<b>7925.10507</b>

### 3.3 Versuchsreihe 2

Analog zur Auswertung der Versuchsreihe 1 sind in Bild 3.4 der Versuchsaufbau und die aufgezeichneten Last-Verschiebungs-Kurven sowie in Tabelle 3.2 die statistische Auswertung der experimentell ermittelten Maximalwerte der Versuche aufgetragen. Das charakteristische Niveau liegt mit  $P_{Rk} = 2.854,5$  N bei 56 % des Mittelwerts. Diese große Distanz ist auf das niedrigere Lastniveau des Versuchs 2-1 zurückzuführen, das eine hohe Standardabweichung bedingt.



**Bild 3.4** Versuchsaufbau und Messschraube der Versuchsreihe 2

**Tabelle 3.2** Statistische Analyse der Versuchsreihe 2 zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit

		$P_i = x_i$ [N]	$\ln x_i$	$(\ln x_i - m_y)^2$	$m_y = (\sum \ln x_i) / n$	<b>8.52630257</b>
Versuch 2-1	$P_1$	4161.66	8.333669312	0.037107574	$\sum (\ln x_i - m_y)^2$	<b>0.05714477</b>
Versuch 2-2	$P_2$	5406.65	8.595384956	0.004772375	$s_y$	<b>0.16903368</b>
Versuch 2-3	$P_3$	5709.3	8.649853455	0.01526482	$k_n$	<b>3.37</b>
					$P_{Rk}$	<b>2854.52027</b>

### 3.4 Versuchsreihe 3

Die Versuchsreihe 3 diente der Untersuchung des Tragvermögens der Verbindung unter Lasteinwirkung senkrecht zur Achse des Strangpressprofils und parallel zur Achse der Schrauben. Der Versuchsaufbau und die Messschriebe der 3 Einzelversuche der Serie sind in Bild 3.5 dargestellt. Bei dieser Versuchsreihe zeigten sämtliche Versuche eine gute Übereinstimmung. Bis zu einer Laststufe von 12.000 N lag ein annähernd lineares Tragverhalten vor. Bei weiterer Laststeigerung konnten nichtlineare Effekte, die auf Materialplastizierungen zurückzuführen sind festgestellt werden. In den Bildern 3.6 und 3.7 ist exemplarisch der Versuch 3-2 in einem fortgeschrittenen Belastungsstadium dargestellt. Es zeichnet sich eine ausgeprägte Verdrehung der Klemmblöcke zur Fixierung des Flachblechs ab. Diese resultiert aus einem Moment, das sich aus einem Kräftepaar aus Zugbeanspruchung der Schraube und Kantenpressung an der lastabgewandten Seite der Klemmblöcke aufbaut. Versagenskriterium bei dieser Belastungsart ist ein Bruch durch übermäßige Deformation des Strangpressprofils im Bereich der zugbeanspruchten Schrauben.

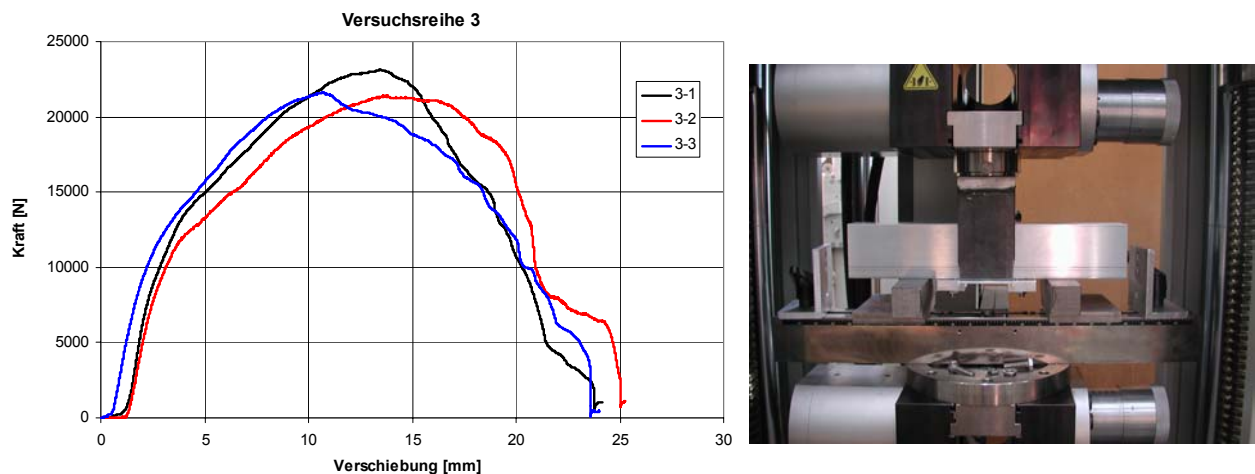


Bild 3.5 Versuchsaufbau und Messschriebe der Versuchsreihe 2

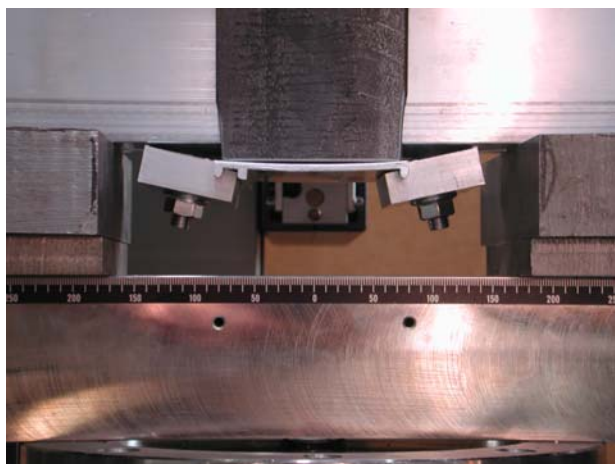


Bild 3.6 Deformation des Anschlussdetails

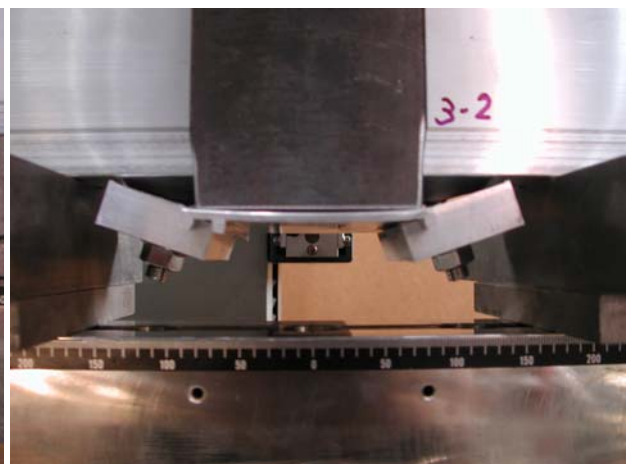
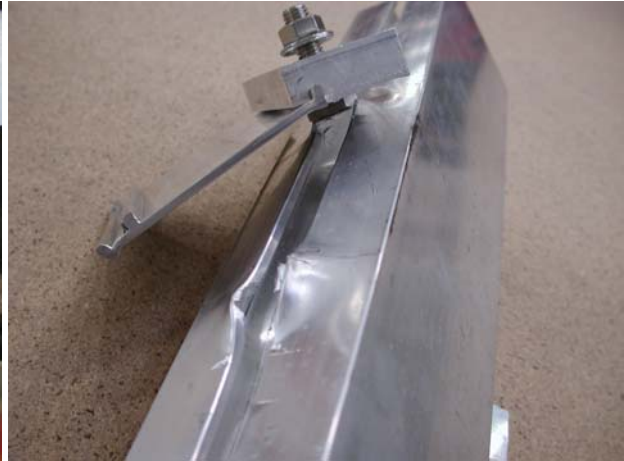


Bild 3.7 Deformation unmittelbar vor dem Bruch



Das Bruchbild ist in Bild 3.8 und Bild 3.9 exemplarisch für den Versuch 3-2 dargestellt. Bei allen 3 Versuchen stellte sich ein übereinstimmender Versagensmechanismus ein. In Tabelle 3.3 ist die statistische Auswertung zur Ermittlung des charakteristischen Tragvermögens der Betrachteten Anschlusskonfiguration unter der spezifischen Belastung angegeben. Begünstigt durch die geringe Streuung der experimentell ermittelten Bruchlasten ergibt sich mit  $P_{Rk} = 19.094 \text{ N}$  ein charakteristischer Wert des Tragvermögens auf einem Niveau von 87 % des mittleren Tragvermögens.



**Bild 3.8** Deformation unmittelbar nach dem Bruch

**Bild 3.9** Detailauszug Strangpressprofil

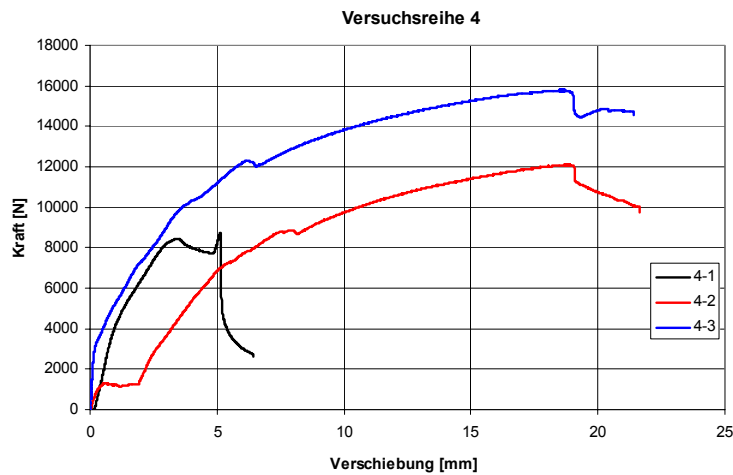
**Tabelle 3.3** Statistische Analyse der Versuchsreihe 2 zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit

		$P_i = x_i \text{ [N]}$	$\ln x_i$	$(\ln x_i - m_y)^2$	$m_y = (\sum \ln x_i) / n$	<b>10.0003032</b>
Versuch 3-1	$P_1$	23132.2	10.048980865	0.00236952	$\sum (\ln x_i - m_y)^2$	<b>0.00360897</b>
Versuch 3-2	$P_2$	21391.2	9.970734901	0.000874281	$s_y$	<b>0.04247925</b>
Versuch 3-3	$P_3$	21616.1	9.981193686	0.000365172	$k_n$	<b>3.37</b>
					$P_{Rk}$	<b>19094.3563</b>

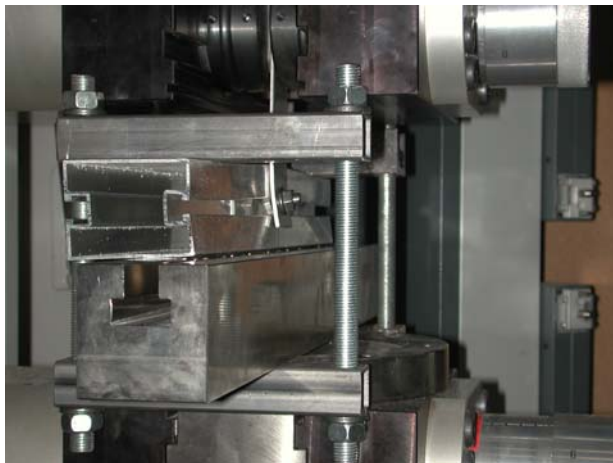
### 3.5 Versuchsreihe 4

Der Versuchsaufbau und die Messschriebe der Versuchsreihe 4, in der ein mit einer Schraube am Strangpressprofil fixiertes quer zur Längsachse des Strangpressprofils belastet wurde, sind in Bild 3.10 zusammengestellt. Als Besonderheit dieser Versuchsreihe ist anzumerken, dass der Versuch 4-1 abweichend von den beiden anderen Versuchen in der Weise belastet wurde, dass eine Druckkraft auf das Flachblech aufgebracht wurde. Bei den Versuchen 4-2 und 4-3 wurde das Flachblech gezogen. Das signifikant geringere Trag- und Verformungsvermögen des Versuchs 4-1 ist auf Stabilitätsversagen des Flachblechs zurückzuführen, das ausgeknickt ist und damit gleichzeitig eine Verdrehung des Schraubanschlusses bewirkt hat. Die ausgewiesenen Bruchlasten der Versuche 4-2 und 4-3 liegen auf einem signifikant höheren Niveau. In den Bildern 3.11 und 3.12 sind Verformungen der Anschlüsse in verschiedenen Belastungssta-

dien dargestellt. Es ist zu erkennen, dass durch die Querschnittsdeformation des Strangpressprofils die typische Lastabtragung eine Schraubverbindung nicht mehr gegeben ist, sondern dass die Lastabtragung eher durch eine Verkantung der Schraube in der Führungsnut erfolgt.



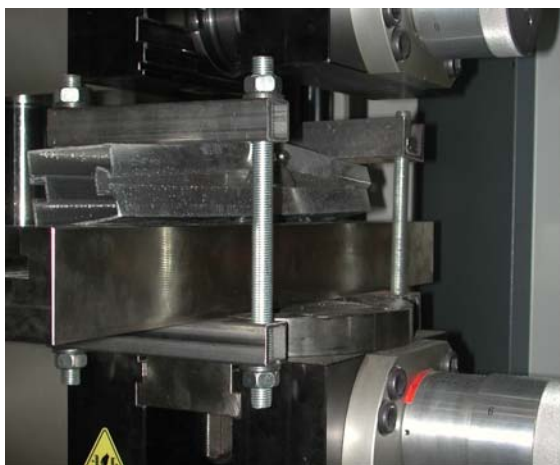
**Bild 3.10** Versuchsaufbau und Messschiebe der Versuchsreihe 4



**Bild 3.11** Versuchskörper bei niedrigem Lastniveau



**Bild 3.12** Detailbereich unter hohem Lastniveau



**Bild 3.13** Deformation im Bruchzustand



**Bild 3.14** Ansicht nach dem Versuch

In den Bildern 3.13 und 3.14 ist der Versuchskörper 4-3 nach Ende des Belastungsversuchs dargestellt. Dabei zeichnet sich eine deutlich ausgeprägte Profilverformung ab. Dazu ist anzumerken, dass die ausgewiesenen Beanspruchbarkeiten vom Versuchsaufbau und dem Abstand der Unterstützung der Strangpressprofile abhängen. Das bedeutet, dass die Ergebnisse nicht als allgemeingültig betrachtet werden sollten, und dass sich bei veränderten Randbedingungen durchaus ungünstigere Beanspruchbarkeiten ergeben können. Eine statistische Auswertung zur Ermittlung von charakteristischen Werten der Tragfähigkeit ist im vorliegenden Fall nur eingeschränkt möglich. Dies hängt damit zusammen, dass aufgrund der verschiedenen Lastrichtungen (Druckbelastung beim Versuch 4-1) die Streuung bei den 3 Versuchen so groß ist, dass mit der daraus resultierenden Standardabweichung nur ein extrem niedriger Wert für das charakteristische Tragvermögen ausweisbar ist. In Tabelle 4.3 wurde der Maximalwert der Beanspruchbarkeit des Versuchs 4-1 durch einen angenommenen Wert  $P_1 = 14.000 \text{ N}$  ersetzt, da eine statistische Auswertung mit zwei Versuchswerten nicht möglich ist. Mit dem fiktiven Wert für Versuch 1 ergibt sich ein charakteristisches Tragvermögen in einer Größenordnung von 65 % des mittleren Tragvermögens.

**Tabelle 3.4** Statistische Analyse der Versuchsreihe 4 zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit

		$P_i = x_i [\text{N}]$	$\ln x_i$	$(\ln x_i - m_y)^2$	$m_y = (\sum \ln x_i) / n$	<b>9.53799191</b>
Versuch 4-1	$P_1$	14000.0	9.546812609	7.78047E-05	$\sum (\ln x_i - m_y)^2$	<b>0.03533274</b>
Versuch 4-2	$P_2$	12099.1	9.400886349	0.018797935	$s_y$	<b>0.13291491</b>
Versuch 4-3	$P_3$	15776.5	9.66627677	0.016457006	$k_n$	<b>3.37</b>
					$P_{Rk}$	<b>8866.79494</b>

#### 4 Zusammenfassung

Der vorliegende Versuchsbericht behandelt die Dokumentation und Bewertung von experimentellen Untersuchungen zur Ermittlung der charakteristischen Tragfähigkeit von Schraubanschlüssen zur Fixierung von Profilstäben an Strangpressprofilen aus Aluminiumwerkstoffen. Im Rahmen des Versuchsprogramms wurde eine spezifische Anschlusskonstruktion in den 3 Hauptrichtungen beansprucht und anhand der Grundgesamtheit von 3 Versuchen pro Versuchsreihe das charakteristische Tragvermögen beziffert. In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Anschluss eines Flachblechs an das Strangpressprofil untersucht. Zu den Versuchsreihen ist anzumerken, dass jeweils isoliert eine Beanspruchungsrichtung betrachtet wird. Bei überlagerten Beanspruchungen ist eine Interaktion zu beachten, die verminderte Beanspruchbarkeiten zur Folge hat.

Unter diesem Gesichtspunkt sollten die Versuchsergebnisse als Anhaltswerte aufgefasst werden und die ausgewiesenen Tragfähigkeitswerte bei einer Dimensionierung realer Konstruktionen nur mit deutlichen Sicherheitsreserven ausgeschöpft werden.