

Mechanisches Verhalten ausgewählter Werkstoffsysteme verbundstranggepresster Leichtbauprofile unter quasistatischer Belastung

T. Hammers, M. Merzkirch, K.A. Weidenmann, E. Kerscher
Institut für Werkstoffkunde I, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe

1 Einführung

Durch Verbundstrangpressen hergestellte drahtverstärkte Profile auf Aluminiumbasis besitzen ein großes Leichtbaupotenzial z. B. im Bereich des Kraftfahrzeugbaus und der Luftfahrtindustrie. Die Wahl des Matrixwerkstoffes sowie des Werkstoffes der Verstärkungselemente beeinflussen hierbei die spezifischen mechanischen Eigenschaften des Verbundes erheblich. Im Rahmen dieser Arbeit werden Verbundprofile aus drei verschiedenen Werkstoffsystemen vorgestellt, welche auf hochfesten Aluminiumlegierungen basieren. Die mechanische Charakterisierung dieser Verbunde erfolgte mittels Zugversuchen und Push-Out Tests. Ergänzend wurden die Verbunde hinsichtlich der Einbettung der Verstärkungselemente metallographisch untersucht.

Eine schematische Zugverfestigungskurve eines Verbundes sowie der einzelnen Komponenten nach [1] ist in Bild 1 dargestellt. Hierbei unterscheidet man vier Bereiche:

Im Bereich I werden sowohl das Verstärkungselement als auch das Matrixmaterial rein elastisch verformt. Der Bereich II zeichnet sich dadurch aus, dass das Verstärkungselement weiterhin elastisch, die Matrix jedoch bereits elastisch-plastisch, verformt wird. Im weiteren Verlauf der Beanspruchung (Bereich III) unterliegen beide Komponenten einer elastisch-plastischen Verformung, bevor es im Übergang zu Bereich IV zum Bruch des Verstärkungselementes kommt und anschließend der verbleibende Matrixwerkstoff bis zum Bruch verformt wird [2, 3].

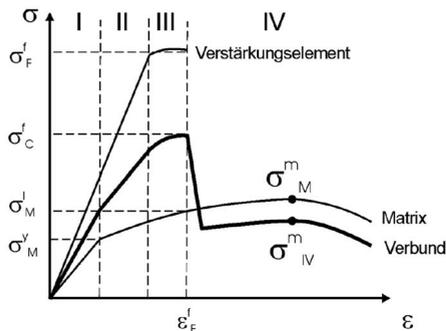


Bild 1: Schematische Zugverfestigungskurve eines Verbundes und seiner jeweiligen Komponenten nach [1]

Unter der Annahme, dass Matrix und Verstärkungselement die gleiche Dehnung ertragen, ist es möglich, gemäß Gleichung 1 die Verbundfestigkeit σ_C^f zu berechnen. Dies setzt voraus, dass die mechanischen Eigenschaften der beiden Komponenten bekannt sind [3].

$$\sigma_C^f = f_M \sigma_M^f(\varepsilon_F^f) + f_F \sigma_F^f \quad (1)$$

Die Größen f_M und f_F bezeichnen hierbei die jeweiligen Volumenanteile für Matrix und Faser, σ_F^f bezeichnet die Bruchspannung des einzelnen Verstärkungselementes und $\sigma_M^f(\varepsilon_F^f)$ die Spannung der unverstärkten Matrix bei Bruchtotaldehnung des einzelnen Verstärkungselementes.

2 Experimentelles

2.1 Probenmaterialien und Probengeometrien

Die Proben wurden aus verbundstranggepressten Profilen entnommen, die auf einer 10 MN-Strangpresse gefertigt wurden [4, 5]. Die Verbunde bestehen aus EN AW-6082 (AlMgSi1) verstärkt mit austenitischem Federstahldraht 1.4310 (X10CrNi18-8), EN AW-6056 (Al-Mg-Si-Legierung) verstärkt mit Kobaltbasisdraht 2.4782 (Nivaflex 45/18) und EN AW-2099 (Al-Cu-Li-Legierung) verstärkt mit Federstahldraht X2CrNiMo12-9-4 (Nanoflex), welche vor dem Verpressen mit Aceton gereinigt wurden.

Die zylindrischen Zugproben besitzen eine Messstreckenlänge von 20 mm und einen Messstreckendurchmesser von 3 mm. Die Verstärkungselemente mit einem Durchmesser von 1 mm liegen mittig in der Probe. Der Verstärkungsanteil beträgt in der Messstrecke 11 Vol.-%. Die Probengeometrie ist in Bild 2 links dargestellt.

Die Proben für die Push-Out Tests besitzen eine Höhe von 1 mm, wobei der Draht ebenfalls mittig in der Probe liegt (siehe Bild 2 rechts).

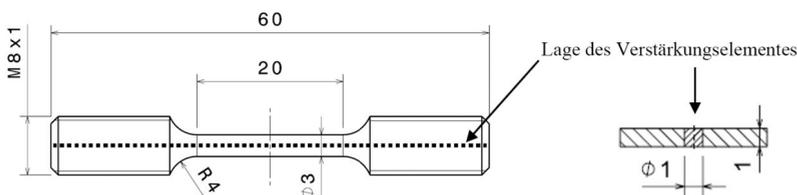


Bild 2: Probengeometrien (Abmessungen in mm), links: Zugversuchsprobe, rechts: Push-Out Probe

2.2 Versuchsdurchführung

Die Zugversuche wurden auf einer Universalprüfmaschine der Bauart Zwick 1478 durchgeführt. Die Querhauptgeschwindigkeit wurde gemäß Normen [6, 7] vorgegeben. Die Dehnungsmessung erfolgte mittels Ansatzdehnungsaufnehmer direkt in der Messstrecke.

Die Push-Out Tests zur Bestimmung der Grenzflächenscherfestigkeit zwischen Verstärkungselement und Matrixmaterial wurden mit einer Prüfmaschine der Bauart Zwick I 2,5 kN und

einem konischen Indenter mit einem Kalottenradius von 0,5 mm, wie in [8] beschrieben, durchgeführt. Die Geschwindigkeit des Indenters betrug hierbei 0,5 mm/min. Der Versuch wurde nach 500 μm Indenterweg abgebrochen, da es andernfalls zum Kontakt zwischen der Mantelfläche des Indenters und dem Matrixmaterials gekommen wäre.

3 Versuchsergebnisse

3.1 Ergebnisse der Zugversuche

Die Ergebnisse der Zugversuche wurden analysiert und mit theoretischen Modellen zur Beschreibung unidirektional verstärkter Verbunde [2, 3] verglichen.

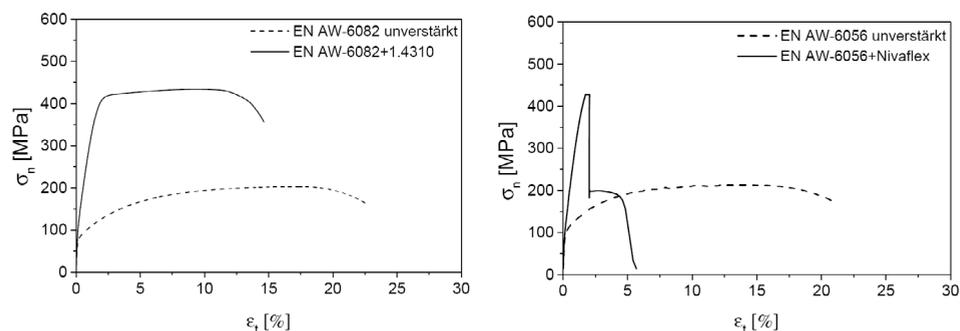


Bild 3: links: Zugfestigkeitskurven von EN AW-6082 unverstärkt und verstärkt mit 1.4310, rechts: Zugfestigkeitskurven von EN AW-6056 unverstärkt und verstärkt mit Nivaflex

Wie in Bild 3 links zu sehen, bewirkt der Federstahldraht in der EN AW-6082 Matrix eine deutliche Festigkeitssteigerung um mehr als 100 %, wobei die Bruchdehnung des Verbundes sich deutlich von der der unverstärkten Matrix unterscheidet. Des Weiteren bricht der Verbund unmittelbar nach Versagen des Verstärkungselementes, was nicht dem in Bild 1 dargestellten Modellverhalten entspricht. Bild 3 rechts stellt die Zugfestigkeitskurven von unverstärkten und verstärkten Proben aus EN AW-6056 (+Nivaflex) dar. Analog zu den verstärkten EN AW-6082+1.4310 Proben ist auch hier deutlich die festigkeitssteigernde Wirkung der Verstärkungselemente zu erkennen. Im Gegensatz zu EN AW-6082+1.4310 fällt jedoch die Totaldehnung bei Bruch des Verstärkungselementes deutlich größer aus, als auf Grund der theoretischen Modelle zu erwarten. Des Weiteren besitzen die Verbunde EN AW-6056+Nivaflex und EN AW-6082+1.4310 etwa gleiche Verbundfestigkeiten, was auf die ähnlichen Festigkeiten der Matrixmaterialien und der verwendeten Verstärkungselemente zurückzuführen ist. Dabei zeigt der EN AW-6056+Nivaflex Verbund allerdings eine kleinere Bruchtotaldehnung, welche auf die geringe Duktilität des Verstärkungsdrahtes (Nivaflex) zurück zu führen ist.

Bei den in Bild 4 dargestellten Zugfestigkeitskurven von unverstärkten und verstärkten Proben aus EN AW-2099 (+Nanoflex) ist analog zu den verstärkten EN AW-6082+1.4310 oder EN AW-6056+Nivaflex Proben wiederum deutlich die Wirkung des Verstärkungselementes zu erkennen.

Die Totaldehnung bei Bruch des Verstärkungselementes liegt zwischen der von EN AW-6082+1.4310 und EN AW-6056+Nivaflex. Weiterhin ist hierbei deutlich der Einfluss der im Vergleich zu EN AW-6082 und EN AW-6056 höheren Matrixfestigkeit auf die Verbundfestigkeit fest zu stellen.

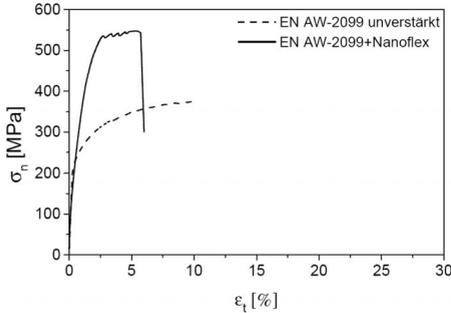


Bild 4: Zugverfestigungskurven von EN AW-2099 unverstärkt und verstärkt mit Nanoflex

3.2 Vergleich der Versuchsergebnisse mit den theoretischen Modellen

Tabelle 1 zeigt den Vergleich der gemessenen ($\sigma_{C,exp}^f$) und der mit dem theoretischen Modell berechneten ($\sigma_{C,ber}^f$) Verbundfestigkeiten. Die mechanischen Eigenschaften des Verbundes lassen sich aus denen der einzelnen Komponenten konservativ abschätzen, welches der Quotient $Q_1 = \sigma_{C,exp}^f / \sigma_{C,ber}^f$ verdeutlicht.

Tabelle 1: Theoretisch nach [2] berechnete und gemessene Festigkeiten der verschiedenen Verbunde

Material	$\sigma_{C,exp}^f$ [MPa]	σ_F^f [MPa]	ε_F^f [%]	$\sigma_M^I(\varepsilon_F^f)$ [MPa]	$\sigma_{C,ber}^f$ [MPa]	Q_1 [-]	$\varepsilon_{F,r}^f$ [%]	$\sigma_M^I(\varepsilon_{F,r}^f)$ [MPa]	Q_2 [-]
EN AW-6082 +1.4310	434	2010	1,03	106	315,4	1,38	14,6	401,8	1,08
EN AW-605 +Nivaflex	428	2240	2,07	153,7	383,2	1,12	2,03	155,9	1,11
EN AW-2099 +Nanoflex	543	1640	1,50	273,5	423,8	1,28	5,67	354,3	1,09

Unberücksichtigt bleibt hierbei, dass die Verstärkungselemente aus Federstahldraht bei allen untersuchten Verbunden deutlich höhere Dehnungen bis zum Bruch ertragen können als die einzelnen Verstärkungselemente im nicht eingebetteten Zustand. Dies führt zu der größeren Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Festigkeiten dieser Verbunde, da im theoretischen Modell σ_M^I auf Grund der Dehnungsdifferenz unterschätzt wird.

Berücksichtigt man hingegen die realen Dehnungen bis zum Bruch der Verstärkungselemente innerhalb des Verbundes $\varepsilon_{F,r}^f$ und berechnet mit der realen Spannung in der Matrix $\sigma_M^I(\varepsilon_{F,r}^f)$ die

Verbundfestigkeit, so zeigt sich ein deutlich geringerer Unterschied zwischen berechneter und gemessener Verbundfestigkeit $\sigma_{C,ber,r}^f$, was mit dem Quotient $Q_2 = \sigma_{C,exp}^f / \sigma_{C,ber,r}^f$ verdeutlicht wird. Diese verbleibende Unterschätzung könnte auf den Eigenspannungszustand zurück zu führen sein, welcher sich nach dem Verbundstrangpressprozess, resultierend aus den unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Matrix und Verstärkungselement, einstellt.

3.3 Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen

Bei allen Materialkombinationen konnte eine sehr gute Einbettung erzielt werden, wie in Bild 5 zu erkennen ist.

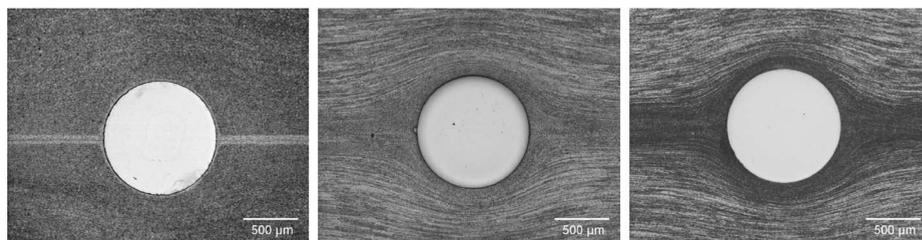


Bild 5: Geätzte Querschliffe der Verbunde, links: EN AW-6082+1.4310, Mitte: EN AW-6056+Nivaflex, rechts: EN AW-2099+Nanoflex

Die Verstärkungselemente liegen hierbei in der Längspressnaht, welche sich durch sehr feine Körner auszeichnet. Deren Bildung ist auf Rekristallisationsvorgänge zurück zu führen, bedingt durch die starke lokale plastische Verformung beim Verbundstrangpressprozess [1]. Die Anbindung zwischen den Komponenten ist von besonderer Bedeutung, da diese eine ausreichende Kraftübertragung zwischen Matrix und Verstärkungselement sicherstellt.

3.4 Ergebnisse der Push-Out Test

Die Grenzflächenscherfestigkeit σ_{deb} wird durch die im Push-Out Versuch bestimmte Maximalkraft F_{max} , die benötigt wird, um das Verstärkungselement aus der Matrix herauszudrücken, und der Mantelfläche πdh des eingebetteten Verstärkungselementes mittels Gleichung 2 bestimmt [9]:

$$\sigma_{deb} = \frac{F_{max}}{\pi dh} \quad (2)$$

In Tabelle 2 sind die Mittelwerte sowie Standardabweichungen der Grenzflächenscherfestigkeiten der verschiedenen Werkstoffkombinationen aufgeführt.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der Grenzflächen

	Mittelwert σ_{deb} [MPa]	Standardabweichung [MPa]	Anzahl Proben
EN AW-6082+1.4310	76	9,40	20
EN AW-6056+Nivaflex	132	5,64	11
EN AW-2099+Nanoflex	100	4,87	11

Die erreichbaren Grenzflächenscherfestigkeiten σ_{deb} sind sehr stark von den Werkstoffkombinationen abhängig und die Streuung bei den höherfesten Werkstoffkombinationen ist geringer. Die höchste Grenzflächenscherfestigkeit wird bei der Matrixlegierung EN AW-6056+Nivaflex erreicht, also bei der Kombination mit dem Verstärkungselement auf Kobaltbasis. Dies wurde auch in [8] beobachtet. Des Weiteren ist die Grenzflächenscherfestigkeit umgekehrt proportional zur Totaldehnung des Verstärkungselementes bei Bruch.

4 Zusammenfassung und Diskussion

Es wurde für die drei untersuchten Werkstoffkombinationen gezeigt, dass durch die Verstärkung der Profile ein signifikanter Anstieg der mechanischen Festigkeit im Zugversuch erreicht wird. Bei allen Werkstoffkombinationen lassen sich die erreichbaren Zugfestigkeiten durch das Kelly-Modell [3] konservativ abschätzen.

Weiterhin konnte bei EN AW-2099+Nanoflex und EN AW-6082+1.4310 festgestellt werden, dass die Totaldehnung bei Bruch des Verstärkungselementes im Verbund größer ist als die Bruchtotaldehnung der einzelnen uneingebetteten Verstärkungselemente. Als Ursache für diese Dehnungsdifferenzen wurde bereits in [1] mehrfache Einschnürung des Verstärkungselementes innerhalb der Messstrecke vermutet. Diese scheinen abhängig von der Haftung in der Grenzfläche zu sein: Je besser diese Haftung ist, umso stärker wird die Einschnürung des Verstärkungselementes behindert. Werden bei der Berechnung der Verbundfestigkeiten die realen Dehnungen bei Bruch der Verstärkungselemente im Verbund berücksichtigt, zeigt sich eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen dem Modell und den gemessenen Werten. Die hier postulierten mehrfachen Einschnürungen des Verstärkungselementes im Verbund werden in Zukunft untersucht. Zusätzlich könnte durch Berücksichtigung des Eigenspannungszustandes eine genauere Vorhersage der Verbundfestigkeit getroffen werden.

5 Danksagung

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Transregio SFB/TR 10, welcher von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. Des Weiteren wird das Projekt durch Alcan, Alcoa, Aleris, Alu Menziken, EADS Innovation Works, Sandvik Materials Technology und VAC Vacuumschmelze unterstützt.

6 Literatur

- [1] Kleiner et. al. (Hrsg.), in Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen, Fortschr. Ber. VDI Reihe 2 Nr. 661, VDI-Verlag Düsseldorf, **2007**.
- [2] T. H. Courtney, *Mechanical Behavior of Materials*, McGraw-Hill, New York, **1990**.
- [3] A. Kelly, G. J. Davies, *Metallurgical Reviews*, 10 [37], **1965**, pp. 1–78 .
- [4] M. Kleiner, M. Schomäcker, M. Schikorra, A. Klaus, *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 35 [7], **2004**, pp. 431–439.
- [5] T. Kloppenborg, T. Hammers, M. Schikorra, E. Kerscher, A. E. Tekkaya, D. Löhe, *Advanced Materials Research* Vol. 43, **2008**, pp. 167–174.
- [6] DIN EN 2002-001: Luft- und Raumfahrt - Metallische Werkstoffe - Prüfverfahren - Teil 1.
- [7] DIN EN 10002-1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1.
- [8] K.A. Weidenmann, E. Kerscher, V. Schulze, D. Löhe, *Materials Science and Engineering A* 424, **2006**, pp. 205–211.
- [9] D. B. Marshall, *Journal of the American Ceramic Society* 67, **1984**, pp. 259–260.