OPEN ACCESS
OPUS AUGSBURG

Universität Augsburg
Universitätsbibliothek

Werkstoffsysteme für verstärkte Leichtbauprofile

Kay A. Weidenmann, E. Kerscher, Volker Schulze, D. Löhe

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Weidenmann, Kay A., E. Kerscher, Volker Schulze, and D. Löhe. 2007. "Werkstoffsysteme für verstärkte Leichtbauprofile." In Integration von Umformen, Trennen und Fügen für die flexible Fertigung von leichten Tragwerkstrukturen: Ergebnisbericht der Phase I, 1. Januar 2003 bis 31. Dezember 2006, edited by Matthias Kleiner and A. E. Tekkaya, 69–105. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Nutzungsbedingungen / Terms of use: **licgercopyright**

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:
Deutsches Urheberrecht
Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:
https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publiz/

Werkstoffsysteme für verstärkte Leichtbauprofile

Kay A. Weidenmann[1, a], Eberhard Kerscher[1, b], Volker Schulze[1, c], Detlef Löhe[1, d]

[1]Institut für Werkstoffkunde I, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

[a]weidenmann@iwk1.uka.de, [b]kerscher@iwk1.uka.de, [c]schulze@iwk1.uka.de, [d]loehe@iwk1.uka.de

Keywords: Verbundstrangpressen, Verbundwerkstoffe, Mechanische Charakterisierung

Zusammenfassung

Mit dem Verbundstrangpressen, das ursprünglich zur Herstellung von Aluminium-Edelstahl-Verbundstromschienen entwickelt wurde, lassen sich potenziell endlosverstärkte Profile für leichte Tragwerkstrukturen endkonturnah fertigen. Auf diese Weise gefertigte Profile wurden bisher weder auf strukturmechanische Eigenschaften hin untersucht oder optimiert noch wurde bislang eine Suche weiterer Werkstoffkombinationen für das Verbundstrangpressen angestrengt.

Daher steht am Anfang dieser Untersuchungen ein systematischer Werkstoffauswahlprozess für Matrix- und Verstärkungselementwerkstoffe unter Berücksichtigung möglicher Verstärkungselementvorbehandlungen.

Nach dieser Auswahl wurden vom Institut für Umformtechnik und Leichtbau der Universität Dortmund im Rahmen der Kooperation innerhalb des Sonderforschungsbereichs/Transregio 10 Verbundstrangpressprofile mit Aluminiummatrix hergestellt. Diese wurden im Teilprojekt A3 „Werkstoffsysteme für verstärkte Leichtbauprofile" unter quasistatischer Zug- und Druckbelastung und unter dynamischer sowie zyklischer Beanspruchung untersucht.

Die mechanischen Eigenschaften eines Verbundwerkstoffes werden neben den Matrix- und Verstärkungselementeigenschaften entscheidend durch die Kraftübertragung zwischen Matrix und Verstärkungskomponente bestimmt. Die Leistungsfähigkeit der Verstärkungselement-Matrix-Grenzfläche ist dabei Grundlage dieser Kraftübertragung. Ein Hauptaugenmerk liegt daher auf der Korrelation von makroskopischen mechanischen Eigenschaften der Versuchsproben mit verschiedenen Grenzflächenzuständen, die durch die Wahl von Verstärkungselementwerkstoff und -vorbehandlung eingestellt werden können. Dazu wurde die Grenzflächenscherfestigkeit mit Hilfe von Push-out-Tests quantifiziert und die Grenzflächenmorphologie durch den Einsatz metallographischer

Methoden begleitend zu hochauflösender Raster- und Transmissionselektronenmikroskopie qualitativ charakterisiert.

Summary

Light-metal matrix composites are considered to be an innovative material for lightweight structures for different applications such as aircraft and vehicle space-frames, railway carriages and ropeway cars. Composite extrusion is a recently rediscovered process representing a flexible technique for rapid in-line production of unidirectionally reinforced lightweight profiles. The composite extrusion technology was originally developed in the 1970s in order to facilitate the production of composite conductor rails for subway systems combining the functional properties of the individual components, such as electric conductivity and wear resistance. The investigation of mechanical properties focused primarily on the adhesive strength of the cladded steel ribbon, as the mechanical reinforcing effect under tensile or compressive load played a minor role for the aspired application. Therefore, no further investigations concerning the mechanical properties of composite-extruded composites under quasi-static loading conditions, which may be used for predicting the functionality of weight-bearing structures composed of composite-extruded profiles, were performed. A systematic materials selection process was performed by the present authors to provide a list of preferable material combinations suitable for the composite extrusion process and, additionally, featuring good mechanical properties. In addition to ropes, reinforcing wires made from stainless spring steels as well as nickel- and cobalt-based alloys embedded in an aluminum alloy with a prominent extrudability turned out to be a promising solution. To increase the fiber-matrix bonding strength, the chosen reinforcements were subject to different pretreatments, e.g. grinding or pickling.

According to the results of the selection process, the reinforced profiles were co-extruded by the Institute for Forming Technology and Lightweight Construction within the cooperation of the Collaborative Research Center SFB/TR10. The profiles were then characterized at the Institute for Materials Science and Engineering 1, University of Karlsruhe (TH) under quasistatic, dynamic and cyclic loads. As the internal load transfer between reinforcements and matrix taking place at the interface is a crucial factor for the performance of composite materials, metallographic investigations focused on this aspect. Furthermore the investigations aimed at correlations between microstructure and properties of the composite profiles, which may be designed by the choice of mate-

rials and pre-treatments. Hence, the debonding shear strength was determined by push-out-tests parallel to accompanying high resolution SEM and TEM.

Einleitung

In vielen technischen Anwendungsbereichen und besonders in der Verkehrstechnik gewinnen Leichtbaukonstruktionen zunehmend an Bedeutung. Aluminium hat auf Grund seiner geringen Dichte ein hohes Leichtbaupotenzial. Die spezifische Steifigkeit kann jedoch legierungstechnisch nur unwesentlich beeinflusst werden, weshalb eine gewichtsneutrale Steifigkeitssteigerung nur durch Formleichtbau erreicht wird. Bei eingeschränktem Bauraum sind daher Verbundwerkstoffe mit Aluminiummatrix und hochsteifen sowie -festen Verstärkungselementen (VE) interessante Kandidaten zur gleichzeitigen Steifigkeits- und Festigkeitssteigerung.

Das Verbundstrangpressen von Profilen zur Herstellung leichter Tragwerkstrukturen wurde im TR10 vor allem in Kooperation der Teilprojekte A2 (Prozesstechnologie), A3 (Werkstoffe) und B1 (Prozesssimulation) intensiv erforscht. Der Forschungsauftrag des TP A3 war dabei die Auswahl und Charakterisierung von Werkstoffsystemen für verstärkte Leichtbauprofile.

In den folgenden Kapiteln werden die wesentlichen erarbeiteten Erkenntnisse dargestellt. Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Ein systematischer Werkstoffauswahlprozess zur Eruierung geeigneter Werkstoffkombinationen zum Verbundstrangpressen
- Einstellung verschiedener Grenzflächenzustände durch mechanische und chemische Oberflächenbehandlungs- und Beschichtungsverfahren und Untersuchung deren Auswirkungen auf die Gefüge- und Grenzflächenentwicklung sowie auf das Verformungs- und Versagensverhalten.
- Die qualitative Gefügeanalyse mit Hilfe metallographischer Methoden – unter stützt durch den Einsatz von Lichtmikroskopie, hochauflösender Elektronenmikroskopie und Mikro-Röntgencomputertomographie – zur Charakterisierung des Gefüge- und Grenzflächenzustands.
- Methodische Arbeiten zur Anpassung der quantitativen Charakterisierung des Grenzflächenzustandes mit Hilfe der Push-out-Methode an die Verbundabmessungen und Bestimmung der Debonding-Scherfestigkeit.
- Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften verschiedener Verbundwerkstoffsysteme unter quasistatischer und zyklischer Beanspruchung und

Korrelation der Ergebnisse mit dem Grenzflächen- und Gefügezustand zur Ableitung von Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen.

Zielsetzung

Ziel des Teilprojekts A3 ist die Analyse potenzieller Werkstoffsysteme für das Verbundstrangpressen unter Beachtung der generellen Zielvorgaben für leichte Tragwerkstrukturen aus Strangpressprofilen wie hohe Steifigkeit, hohe spezifische Festigkeit bei quasistatischen, dynamischen, zyklischen und korrosiven Beanspruchungen, hinreichend hohe und im Verbundstrangpressprozess auch potenziell erzielbare Grenzflächenhaftung sowie Aussicht auf eine gute Fügbarkeit mit den im SFB/TR10 eingesetzten Verfahren.

Werkstoffauswahl

Nachdem die bisherigen Anwendungen des Verbundstrangpressen sich auf Stromschienen und Opferanoden konzentrierten, d.h. Anwendungsgebiete, bei denen vor allem funktionelle Eigenschaften der Verbundkomponenten wie Korrosionspotenzial, Leitfähigkeit und Verschleißbeständigkeit im Vordergrund stehen, war ein systematischer Werkstoffauswahlprozess zur Eruierung weiterer möglicher Materialkombinationen unter Berücksichtigung strukturmechanischer und prozesstechnischer Vorgaben im Vorlauf zu den geplanten Untersuchungen notwendig. Dabei ist stets zu berücksichtigen, dass ein Verbund aus zwei verschiedenen Werkstoffen mit jeweils charakteristischen Eigenschaften auch Probleme mit sich bringen kann. Dies sind vor allem Korrosionsrisiken (Lokalelementbildung) und die Entwicklung von Eigenspannungen aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten. Darüber hinaus waren bei der Werkstoffauswahl durch das Verbundstrangpressen gegebene Prozessvorgaben vorhanden, die neben den angesprochenen Aspekten berücksichtigt werden mussten [WeiFl05c].

Als Matrixwerkstoff bietet sich aufgrund der Vorgaben für leichte Tragwerkstrukturen die Verwendung einer Magnesium-, Titan- oder Aluminiumlegierung an. Da das Strangpressen der erstgenannten Werkstoffgruppe eine sorgfältige Temperaturführung aufgrund der gitterstrukturell bedingten schlechten Kaltumformbarkeit und der gleichzeitigen Entzündungsgefahr erfordert und das Strangpressen von Titan einen Nischenprozess darstellt, erschien die Selektion einer gut strangpressbaren Aluminiumlegierung für erste Untersuchungen als sinnvoll. Da eine Wärmebehandlung im Anschluss an das

Strangpressen zu Grenzflächenproblemen aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten hätte führen können, gleichzeitig aber Ausscheidungshärtung zur Steigerung der mechanischen Eigenschaften genutzt werden sollte, kam eine kaltaushärtbare Legierung in Betracht.

Die Anforderungen an das Verstärkungselement sind strukturmechanisch durch die Anforderungen an den Verbundwerkstoff gegeben und sollten dessen mechanische Eigenschaften im Vergleich zum unverstärkten Matrixmaterial verbessern und zusätzlich den prozessbedingten Vorgaben gerecht werden. Als potenzielle Lösung kamen neben Federstählen sowie Nickel- und Kobaltbasislegierungen auch Fasern aus technischer Keramik, also z.B. Al_2O_3- oder C-Fasern in Betracht [WeiFl05c] [Ashby99].

Zusammengefasst bieten dabei die selektierten metallischen Verstärkungen folgende Eigenschaftsprofile [LöSchu04]:

- *Federharte Nickel- und Kobaltbasislegierungen* besitzen sowohl bei Raum- als auch bei Strangpresstemperatur hohe Streckgrenzen und Zugfestigkeiten.
- *Austenitische Federstähle* zeigen bei Raumtemperatur ebenfalls hohe Zugfestigkeiten und Streckgrenzen, die beim Verbundstrangpressen erhalten bleiben, sofern die thermische Belastung nur kurzzeitig wirkt.
- *Spannungsarmgeglühte Kobaltbasislegierungen* (beispielsweise Haynes® 25) bieten ein geringes Streckgrenzenverhältnis bei gleichzeitig hoher Zugfestigkeit und damit eine Verformungsreserve beim Strangpressen mit der Möglichkeit zur Verformungsverfestigung.

Keramische Werkstoffe zeigen aufgrund ihrer Sprödigkeit als Vollmaterial nur geringe Festigkeiten unter Zugbeanspruchung. Dennoch sind keramische Verstärkungen denkbar, sofern diese als Fasern, gesponnene Fasergarne oder in Form von Verbunddrähten [BluNar01] eingesetzt werden. Vor allem Kohlenstofffasern versprechen einen starken Verstärkungseffekt, da bei einer Dichte von 1,8 g/cm³ Elastizitätsmoduln bis zu 600 GPa (***H***igh ***M***odulus-Fasern) und Zugfestigkeiten von bis zu 5,7 GPa (***H***igh ***T***ensile-Fasern) möglich sind [Saeger70]. Aluminiumoxidfasern bieten dagegen die beste Oxidationsbeständigkeit der genannten Werkstoffe.

Neben den Werkstoffkennwerten stellt sich für die Anwendung der gewählten Werkstoffe auch die Frage, ob diese auch in der gewünschten Geometrie kommerziell erhältlich sind. Für das Verbundstrangpressen von Konstruktionsprofilen können metallische Verstärkungen in Form von Bändern, Seilkonstruktionen oder Drähten eingesetzt werden. Diese Spezifikationen sind für die gewählten Werkstoffe prinzipiell verfügbar, aber vor

allem für Nickel- und Kobaltbasislegierungen sehr teuer im Vergleich zu austenitischen Federstählen, die nicht zuletzt aus Gründen der Wirtschaftlichkeit verbreitet Anwendung in Verbundwerkstoffen finden.

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit eines Verbundwerkstoffes ist die Kraftübertragung zwischen Verstärkung und Matrix. Drei Strategien zielen darauf, diese zu verbessern. Eine Möglichkeit ist das Beschichten des Verstärkungselementes mit Werkstoffen, die als Haftvermittler dienen und die Ausbildung von Diffusionszonen unterstützen. Die zweite Möglichkeit ist ein formschlüssiger Verbund zwischen Verstärkungselement und Matrix. Dazu muss die Oberfläche des Verstärkungselementes strukturiert sein, was durch die Verwendung von Seilkonstruktionen, wie Seilen und biegsamen Wellen möglich ist. Seilkonstruktionen gewährleisten auch eine innere Kraftübertragung, da die einzelnen Litzen miteinander versponnen sind. Hinsichtlich des Einsatzes beim Verbundstrangpressen ist der im Vergleich zum Seil kleine Durchmesser der einzelnen Litzen vorteilhaft: Die in der Zuführung maximal auftretende Biegespannung ist klein, gleichzeitig ist der Querschnitt der gesamten Seilkonstruktion, der die Zugspannung beim Verbundstrangpressen trägt, groß. Als dritte Möglichkeit kann die Haftung zwischen Verstärkungselement und Matrix auch durch eine Aktivierung der Verstärkungselementoberfläche herbeigeführt oder unterstützt werden. Denkbar ist das Entfernen von Oxidschichten durch Beizen oder das Aufrauen der Oberfläche durch mechanische Vorbehandlungsschritte wie Sandstrahlen, Schleifen oder Bürsten. Drähte bieten per se auf Grund ihrer glatten Oberfläche nur die Möglichkeit zum Reib- oder Stoffschluss. Letzterer beruht vor allem auf hohen Herstellungstemperaturen und -drücken, die die Bildung von Diffusionszonen und intermetallischen Verbindungen forcieren.

Die letztlich zur Herstellung von Verbundprofilen verwendeten Verstärkungselementkonfigurationen sind in **Tabelle 1** zusammengefasst. Der jeweils verwendete Matrixwerkstoff war die Aluminiumlegierung EN AW-6060.

Tabelle 1: Verwendete Verstärkungselemente und deren Eigenschaften

Verstärkungselement	Konstruktion; Durchmesser; Fasergehalt; Fasertyp	Werkstoff
Seil	7x7; 1 mm	Inconel 601 (Ni-Basis-Leg.)
Seil (biegsame Welle)	1x5; 1 mm	austen. Federstahl 1.4310
Seil	1x7; 1 mm	austen. Federstahl 1.4310
Draht	1 mm	austen. Federstahl 1.4310
Draht	1 mm	Inconel 718 (Ni-Basis-Leg.)
Draht	1 mm	Haynes 25 (Co-Basis-Leg.)
Verbunddraht	1,4 mm; 44 Vol.-%; Thornel 25	Al 99,99 + C-Faser
Verbunddraht	1,4 mm; 60 Vol.-%; Nextel 440	Al 99,99 + Al_2O_3-Faser
Verbunddraht	2,1 mm; 60 Vol.-%; Nextel 610	Al 99,99 + Al_2O_3-Faser

Experimentelle Untersuchungen

Alle Probenmaterialien – ausgenommen der faserverstärkten Proben, die im Rahmen von Voruntersuchungen im Teilprojekt A3 auf einer Modellpresse gefertigt wurden [WeiSch05] – wurden vom Teilprojekt A2 zur Verfügung gestellt [KlScho04] [SchoKl04] [KleKla04]. Sofern die verwendeten Verstärkungselemente keine weitere Vorbehandlung erfuhren, wurden diese vor dem Verpressen mit Aceton gereinigt (Grundzustand).

Untersuchungen des Verformungsverhaltens von Verstärkungselementen unter quasistatischer Zugbelastung wurden auf einer elektromechanischen Tischzugprüfmaschine mit einer Maximalprüflast von 2,5 kN durchgeführt. Die Befestigung der Drähte bzw. Seile erfolgte mit Hilfe zweier fester Rollen, über die die zu prüfenden Verstärkungselemente unter Ausnutzung der Umschlingungsreibung geschlagen wurden. Die Versuche wurden verfahrwegskontrolliert bei einer Traversenverfahrgeschwindigkeit von 2mm/min durchgeführt. Die Dehnungsmessung erfolgte über den Traversenverfahrweg der Maschine.

Das Verformungsverhalten verstärkter und unverstärkter Proben wurde auf derselben Prüfmaschine untersucht. Die Dehnungsmessung erfolgte kombiniert durch Einsatz eines optischen Grauwertkorrelationsmesssystems aus dem Hause GO und der Ermittlung der Dehnung aus dem Traversenverfahrweg. Für die Versuche wurden aus den Halbzeugprofilen zylindrische Vollproben gefertigt. Sofern die Proben verstärkt waren, lag das Verstärkungselement in der Probenlängsachse (**Bild 1**).

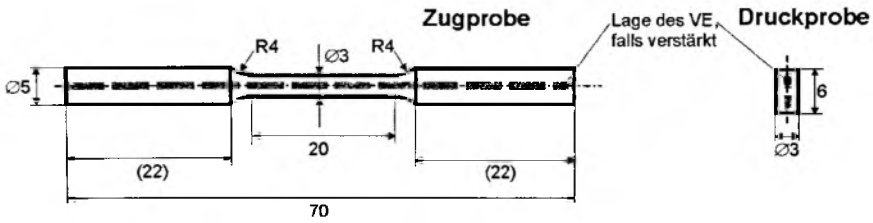

Bild 1: Probengeometrien für quasistatische Beanspruchung

Für die seilverstärkten Proben wurde eine formschlüssige Einspannung gewählt. Die Probenköpfe waren in diesem Fall nicht wie dargestellt glatt, sondern mit einem Gewinde M5 versehen. Diese Möglichkeit bot sich für die drahtverstärkten Proben aufgrund der zu geringen Tragfähigkeit des Gewindes nicht. Die Proben für die Zugversuche wurden von TP A2 hergestellten Rechteckprofilen mit den Maßen 20x5 mm^2 (seilverstärkt) und 56x5 mm^2 (drahtverstärkt) und einem Rundprofil mit dem Durchmesser 9 mm (seilverstärkt) entnommen. Das Verformungsverhalten drahtverstärkter Proben erforderte höhere Prüflasten und wurde daher auf einer elektromechanischen Prüfmaschine mit einer Maximalprüflast von 200 kN charakterisiert. Es wurden auf dieser Maschine zusätzlich Messungen an unverstärkten Proben vorgenommen. Die Dehnung wurde auch hier teilweise optisch, im Totaldehnungsbereich bis 2 % auch mit Hilfe eines Dehnmessstreifens aufgenommen. Grundsätzlich wurde der Traversenverfahrweg registriert. Aufgrund des Einsatzes der optischen Dehnungsmessung bzw. deren maximaler Bildaufnahmefrequenz wurde als Traversengeschwindigkeit 1 mm/min gewählt. Die Dehnrate war konstant und betrug bei allen Versuchen $5 \cdot 10^{-2}$/min ($8{,}3 \cdot 10^{-4}$/s).

Die Druckversuche an Proben nach **Bild 1** wurden auf einer elektromechanischen Prüfmaschine mit einer Maximalprüflast von 500 kN durchgeführt. Die konstante Dehnrate betrug analog zu den Zugversuchen $5 \cdot 10^{-2}$/min ($8{,}3 \cdot 10^{-4}$/s), wobei die Dehnungsmessung mit Hilfe eines kapazitiven Dehnungsaufnehmers erfolgte. Die Proben wurden aus Stäben gedreht, die Rechteckprofilen mit den Maßen 56x5 mm^2 entnommen wurden.

Untersuchungen unter zyklischer Beanspruchung wurden auf einer Universalprüfmaschine mit Linearmotorantrieb und einer maximalen statischen Prüfkraft von 6 kN durchgeführt. Zur Ermittlung der zyklischen Spannungs-Dehnungskurve (ZSD) wurden kraftkontrollierte Laststeigerungsversuche bei einem Lastverhältnis von R = -1 gefahren, wobei die Last ausgehend von 50 MPa in der ersten Stufe alle 500 Zyklen um 10

MPa erhöht wurde. Die Belastungsfrequenz betrug 2 Hz. Die zyklischen Versuche wurden ebenfalls an zylindrischen Vollproben vorgenommen. Zur Probenfertigung wurden den Rechteckprofilen mit den Maßen 40x10 mm^2 zunächst prismatische Stäbe entnommen, die dann auf einer CNC-Drehmaschine zu Proben gemäß der in **Bild 2** dargestellten Form gedreht wurden.

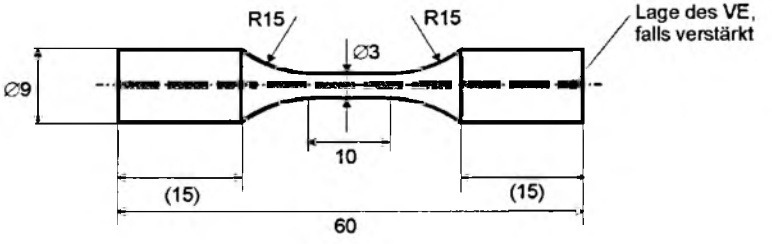

Bild 2: Probengeometrie für Untersuchungen unter zyklischer Beanspruchung

Da die Verstärkungselementgehalte in den Halbzeugprofilen auf Grund des aktuellen Forschungsstandes beim Verbundstrangpressen noch sehr gering waren, ca. 10 Vol.-% jedoch als realistisches Entwicklungsziel angesehen werden, wurde der Verstärkungselementgehalt in den Zug- und Druckproben sowie den Proben für zyklische Beanspruchungen durch entsprechende Dimensionierung der Messstrecke auf rund 11 Vol.-% eingestellt. Dieser Wert berücksichtigt das gesamte Verstärkungselement mit einem Außen- bzw. Umkreisdurchmesser von 1 mm.

Quantitative Messungen der Grenzflächenscherfestigkeit zur Bestimmung des Einflusses von Vorbehandlungen und Beschichtungen des Verstärkungselementes auf den Grenzflächenzustand erfolgten mit Hilfe von Push-out-Tests. Dazu wurden mit Hilfe einer Präzisionstrennmaschine 1 mm hohe Plättchen aus drahtverstärkten Rechteckprofilen mit den Maßen 56x5 mm^2 entnommen. Dabei war lateral um den Draht ausreichend Material vorhanden, um eine hinreichend große Auflagefläche zu gewährleisten. Die Versuche wurden wegen des relativ großen Drahtdurchmessers von 1 mm auf einer Universalprüfmaschine mit einer Maximallast von 2,5 kN, die mit einem registrierenden Härteprüfkopf versehen war, unter Verwendung eines kegelförmigen Indenters mit Kalottenspitze durchgeführt. **Bild 3** zeigt den eigens entworfenen Versuchsaufbau und den Positioniervorgang mit Hilfe einer Lichtpositionierspitze. Aus dem gemessenen Kraftmaximum wurde die Debonding-Scherfestigkeit bestimmt [WeiFl05a] [WeiKer05] [WeiKe06b].

Bild 3: Versuchsaufbau Push-out-Tests: Härteprüfkopf mit Indenter (links), Positionierung mit Hilfe einer Lichtpositionierspitze (Mitte), Probe mit ausgedrücktem Draht (rechts)

Untersuchungen unter Verwendung eines Mikrocomputertomographen dienten der zerstörungsfreien Charakterisierung des Grenzflächenzustandes und dessen dreidimensionaler Darstellung. Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit der RJL GmbH, Karlsdorf-Neuthard, durchgeführt. Bei einer maximalen Röhrenbeschleunigungsspannung von 100 kV konnten in Abhängigkeit von der Probengröße Auflösungen (Voxelgrößen) von bis zu 2x2x2 μm^3 erreicht werden. Für die lichtmikroskopische Charakterisierung des Gefügezustandes der untersuchten Halbzeugprofile, der makroskopischen Grenzflächen- und Bruchmorphologie sowie der Klärung der Frage nach der spaltfreien und schädigungsfreien Einbettung der Verstärkungselemente kamen verschiedene Lichtmikroskope zum Einsatz. Neben Bruchflächen von geprüften Zug-, Druck- und Kerbschlagbiegeproben wurden auch Quer- und Längsschliffe der Verbundprofile untersucht. Letztere wurden geschliffen und bis 0,05 µm mit Siliziumdioxidsuspension endpoliert und bei Bedarf nach Flick makro- bzw. mit 1% HF mikrogeätzt [PetCar94].

Detaillierte Untersuchungen der Grenzflächenmorphologie erfolgten unter Einsatz hochauflösender Elektronenmikroskopie. Bei Notwendigkeit hoher Schärfentiefe zur Charakterisierung von Bruchflächen und Grenzflächen wurde ein Rasterelektronenmikroskop vom Typ LEO EVO 50 eingesetzt. Die Suche nach grenzflächennahen Ausscheidungen und Diffusionszonen erfolgte im Transmissionselektronenmikroskop vom Typ Zeiss EM Ω 912 mit einer maximalen Beschleunigungsspannung von 120 kV. Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen wurden jeweils begleitet durch ortsaufgelöste Elementanalysen mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenspektralanalyse (EDX).

Ergebnisse

Qualitative Grenzflächenuntersuchungen mit Hilfe metallographischer Methoden

Da insgesamt drei verschiedene Grundtypen von Verstärkungselementen in den Verbundwerkstoffe zum Einsatz kamen, soll an dieser Stelle **Bild 4** mit Hilfe dreier lichtmikroskopischer Aufnahmen seil-, draht- und verbunddrahtverstärkter Profile einen Überblick über die Unterschiede in der Mikrostruktur der Verbundarten geben.

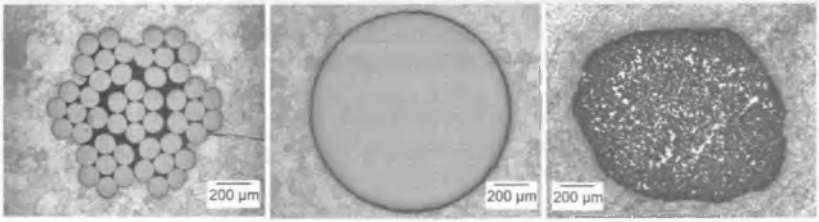

Bild 4: Gefüge der verschiedenen Verbundstrangpressprofilsysteme: seil-, draht- und verbunddrahtverstärkte Verbunde (v.l.n.r.)

Das links dargestellte Seil ist in einer 7x7 Konstruktion geschlagen und besteht demnach aus 49 Einzeldrähten in 7 Bündeln zu je 7 Drähten. Der Volldraht in der Bildmitte weist im ungeätzten Zustand keine besonderen Gefügemerkmale auf, während im Verbunddraht (rechts) die einzelnen Fasern klar auszumachen sind. Das angeätzte Matrixgefüge der Legierung EN AW-6060 weist sowohl im Quer- als auch im Längsschliff (nicht dargestellt) rundliche Körner auf, wobei die Korngröße in der direkten Umgebung des Verstärkungselementes etwas kleiner ist. Dies ist auf Unterschiede bei der Rekristallisation zurückzuführen, die vermutlich durch die lokal starken plastischen Deformationen bedingt durch das Einbringen des Verstärkungselementes begründet sind.

Neben den Proben, die mit infiltrierten Fasern in Form von Verbunddrähten verstärkt waren, kamen auch oberflächenbehandelte Drähte zum Einsatz. Dabei handelte es sich zum einen um beschichtete Federstahldrähte, zum anderen um Drähte, die vorab mit Edelstahlbeize gebeizt, mit Schleifpapier manuell geschliffen oder mit Abrasivstoff sandgestrahlt wurden. Da die letztgenannten Vorbehandlungen nach dem Verpressen der Drähte nicht mehr metallographisch darstellbar sind, zeigt **Bild 5** REM-Bilder der Drahtoberflächen vor dem Verpressen. Beschichtungen aus Zink wurden durch Lichtbogenspritzen (LS) in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Werkstofftechnik der Universität Dortmund appliziert [TilVog05]. In Zusammenarbeit mit der Firma Schröder Galva-

nik, Berlin wurden alternativ Nickel- und Zinkschichten auf Federstahldrähten elektro chemisch abgeschieden.

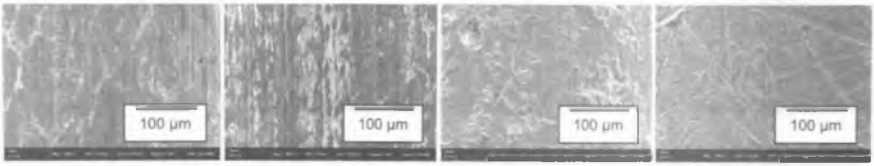

Bild 5: Oberflächenzustände unterschiedlich vorbehandelter Drähte: Grundzustand, gebeizt, sandgestrahlt und geschliffen (v.l.n.r.)

Die Auswirkungen der Grenzschichtmorphologien bzw. allgemein der Grenzflächenmorphologien auf die quantitative Grenzflächenscherfestigkeit werden weiter unten näher ausgeführt.

Im Falle von verbunddrahtverstärkten – also faserverstärkten – Proben, deren prinzipielle Herstellung im Teilprojekt mit Hilfe einer Modellpresse erstmals gelang, gibt es mit der inneren Grenzfläche zwischen Einzelfaser und Verbunddrahtmatrix eine zusätzliche Grenzflächenproblematik [WeiSch05]. **Bild 6** zeigt lichtmikroskopische Aufnahmen von Verbunden, die zum einen mit einem Verbunddraht aus Al99,99 und 44% Thornel 25 Kohlenstofffaser und zum anderen mit Al99,99 und Nextel 610 Aluminiumoxidfaser verstärkt sind.

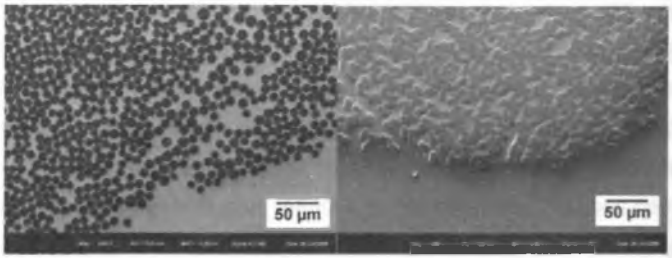

Bild 6: REM-Bilder von Verbunden mit unterschiedlichen keramischen Verstärkungselementen: C(Thornel25)-Fasern (links) und Al_2O_3(Nextel610)-Fasern (rechts)

Vor allem im ersteren Fall ist die Verbunddraht-Matrix-Grenzfläche nur noch durch die Lage der Fasern markiert. Dieser Eindruck wird durch zusätzliche REM-Aufnahmen noch verstärkt. Damit stellt die Verbunddraht-Matrix-Grenzfläche nicht zwangsweise eine Schwachstelle im Verbund dar.

Um die Verhältnisse an der Faser-Verbunddraht-Grenzfläche aufzuklären und – im Falle der Verbunde mit metallischen Verstärkungselemente – um grenzflächennahe Diffusions- und Ausscheidungsvorgänge zu charakterisieren, wurden an Verbunden mit unbehandelten Drähten aus Haynes 25, Inconel 718 und Federstahl 1.4310 sowie an den faserverstärkten Verbunden TEM-Untersuchungen durchgeführt. Im Falle des aluminiumoxidfaserverstärkten Verbundes belegen die durchgeführten TEM-Untersuchungen die rissfreie Ausbildung der Grenzfläche im Inneren des Verbunddrahtes [WeiSch05]. Untersuchungen zwischen Matrixwerkstoff und äußerer Verbunddrahtgrenze wiesen ebenfalls keine Spalten nach, wie es aufgrund der REM-Untersuchungen schon vermutet wurde. Letzteres gilt auch für die kohlenstofffaserverstärkten Verbunde. Auffällig ist hier jedoch, dass die Grenzfläche innerhalb des Verbunddrahtes teilweise nicht intakt ist – es treten sichtbare Spalten auf. Dieses Phänomen lässt sich auf die geringe Benetzbarkeit von Kohlenstoff durch Aluminium zurückführen. Für die Federstahl verstärkten Drähte konnten im TEM an der Grenzfläche zwischen Draht und Aluminiummatrix feine Ausscheidungspartikel gefunden werden, deren EDX-Analyse schließen lässt, dass es sich um Teilchen der Al-Fe-Cr-Phase handelt, die bereits von [WagHod83] gefunden wurde.

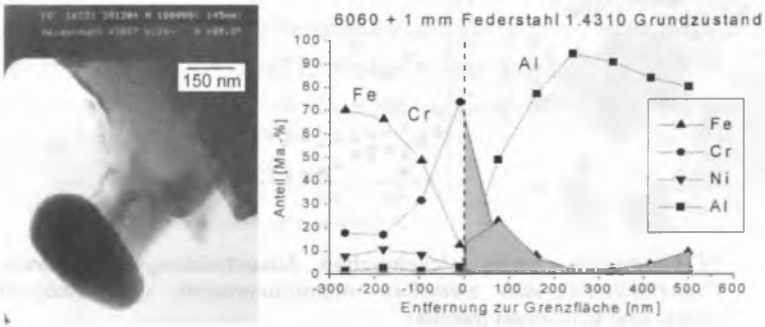

Bild 7: TEM-Aufnahme eines Al-Fe-Cr-Partikels im Grenzflächenbereich zwischen Aluminiummatrix und Federstahldraht (links).

Ferner wurde ein EDX-Linescan senkrecht zur Grenzfläche durchgeführt, um Interdiffusionsvorgänge nachzuweisen. **Bild 7** zeigt ein Hellfeldbild der gefundenen Partikel und den durchgeführten EDX-Linescan. Aus dem Linescan ist deutlich zu erkennen, dass sowohl Eisen als auch Chrom in die Aluminiummatrix eindiffundieren. Dabei werden Diffusionswege von bis zu 250 nm zurückgelegt. Der starke Anstieg der Chromkonzentration im grenzflächennahen Bereich ist auf die Passivschicht des austenitischen Fe-

derstahldrahtes zurückzuführen, die aus Chromoxid besteht. Für einen Verbund mit Nickelbasisdraht wurden entsprechende Analysen durchgeführt, deren Ergebnisse in **Bild 8** zusammengefasst sind. Hier sind Ausscheidungsagglomerate nachzuweisen, die sich offensichtlich auf Grund einer starken Nickeldiffusion in der Matrix bilden. Neben Nickel enthalten diese Agglomerate Aluminium sowie teilweise Eisen und Chrom. Ähnliche Agglomerate sind auch in kobaltbasisdrahtverstärkten Verbunden zu finden, wie **Bild 9** zeigt. Hier können ebenfalls Diffusionsprozesse nachgewiesen werden, wobei insbesondere Kobalt in die Aluminiummatrix einwandert. Damit konnte nachgewiesen werden, dass sich in allen untersuchten Aluminiummatrixverbunden mit metallischem Verstärkungselement eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Matrix und Draht ausbildet. Entscheidender Vorteil der letztgenannten Verbunde ist, dass der festigkeitssteigernde Charakter nickel- oder kobalthaltiger Ausscheidungen bereits mehrmals nachgewiesen wurde [LemHer65] [Leon02], während ein gehäuftes Auftreten der spröden Eisenaluminiden zu einem Festigkeitsverlust an der Grenzfläche führen kann [Til76].

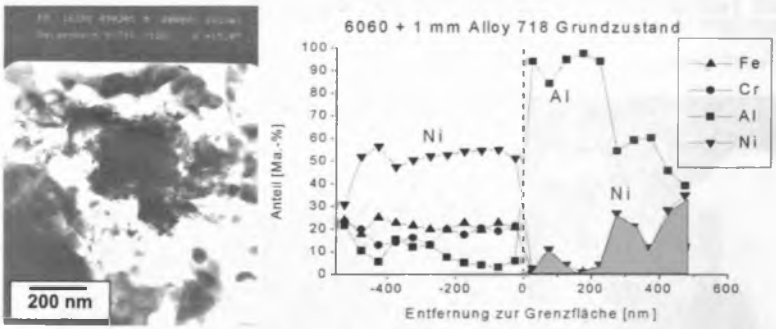

Bild 8: TEM-Aufnahme eines nickelreichen Ausscheidungsagglomerats im Grenzflächenbereich zwischen Aluminiummatrix und Inconeldraht (links) und EDX-Scan (rechts).

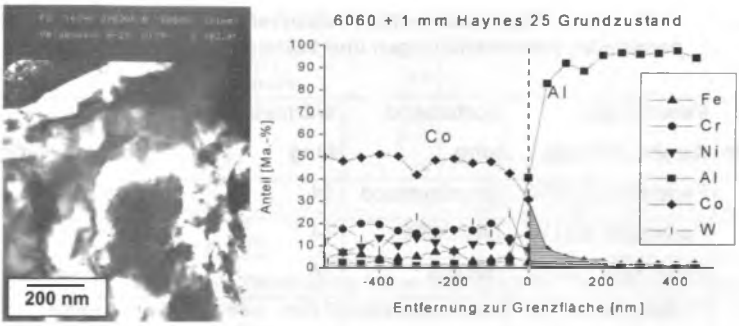

Bild 9: TEM-Aufnahme eines kobaltreichen Ausscheidungsagglomerats im Grenzflächenbereich zwischen Aluminiummatrix und Kobaltbasisdraht (links) und EDX-Scan (rechts).

Quantitative Grenzflächencharakterisierung unter Berücksichtigung von Vorbehandlungseinflüssen

Der Grenzflächenzustand verschiedener Verbunde wurde durch Messung der Eigenspannungen im Grenzflächenbereich [WeiFl05b] und durch Bestimmung der Debonding-Scherfestigkeit mit Hilfe von Push-out-Tests quantifiziert. **Tabelle 2** fasst die untersuchten Probenzustände zusammen. Neben den primären Einflüssen durch Vorbehandlungen und Beschichtungen wurde hier auch der Einfluss der Pressgeschwindigkeit und einer anschließenden Wärmebehandlung quantifiziert. Ziel der Untersuchungen war, die optimale Vorbehandlung zur Steigerung der Grenzflächenfestigkeit zu finden, um so auch das Verhalten der Verbundprofile unter mechanischen Belastungen gezielt einzustellen.

Tabelle 2: Im Push-out-Test untersuchte Probenvarianten, deren Herstellstellparameter, Vorbehandlungen und Wärmebehandlungszustand

Probenvariante	Verstärkung (Draht, ∅1 mm)	Vorbehandlung	Wärmebehandlung	Pressgeschwindigkeit
F1	Federstahl 1.4310	Grundzustand	T4	1 mm/s
F2	Federstahl 1.4310	Geschliffen	T4	1 mm/s
F3	Federstahl 1.4310	Gebeizt	T4	1 mm/s
F4	Federstahl 1.4310	Sandgestrahlt	T4	1 mm/s
F5	Federstahl 1.4310	Grundzustand	T4	0,5 mm/s
F6a	Federstahl 1.4310	Grundzustand	T6 nach erneutem Lösungsglühen	1 mm/s
F6b	Federstahl 1.4310	Grundzustand	T6	1 mm/s
F7	Federstahl 1.4310	zinkbeschichtet durch Lichtbogenspritzen	T4	0,5 mm/s
F8	Federstahl 1.4310	Galvanisiert (Zn)	T4	0,5 mm/s
F9	Federstahl 1.4310	Vernickelt	T4	0,5 mm/s
C1	Haynes 25	Grundzustand	T4	1 mm/s
C2	Haynes 25	Geschliffen	T4	1 mm/s
N1	Inconel 718	Grundzustand	T4	1 mm/s
N2	Inconel 718	Geschliffen	T4	1 mm/s

Als Referenzzustand für die Push-out-Versuche diente die Probenvariante F1, d.h. der Grenzflächenzustand eines Verbundprofils, das mit einem Federstahldraht der Legierung 1.4310 im Grundzustand verstärkt war. Die Messergebnisse sind im Folgenden in Form Gaußscher Glockenkurven aufgetragen, deren Breite ein quantitatives Maß für die Streuung der Messwerte darstellt.

Bild 10 zeigt den Einfluss mechanischer und chemischer (Beizen) Vorbehandlungen auf die Debonding-Scherfestigkeit federstahlverstärkter Verbunde sowie den Einfluss verschiedener Beschichtungen.

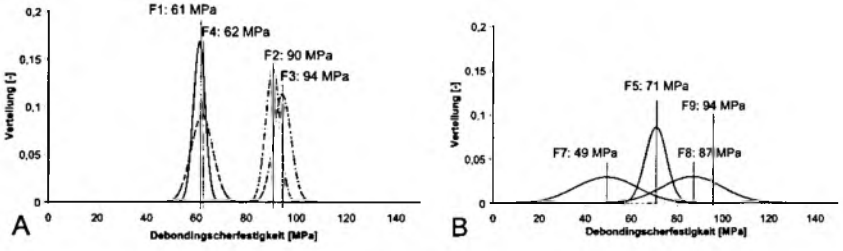

Bild 10: Gaußkurven der Debonding-Scherfestigkeiten von federstahldrahtverstärkten Verbunden mit unterschiedlichen Vorbehandlungen (A) und Beschichtungen (B)

Im Vergleich zur Variante F1, die im Mittel einen Wert von 61 MPa erreicht, lässt sich die Debonding-Scherfestigkeit durch Schleifen (F2) auf 90 MPa, d.h. um fast 50% steigern. Dagegen liefert die sandgestrahlte Variante F4 im Vergleich zu F1 keine signifikante Änderung der Grenzflächenscherfestigkeit. Der Verbund mit gebeiztem Federstahldraht F3 erreicht mit 94 MPa den höchsten Wert der mit mechanisch oder chemisch vorbehandelten Federstahldrähten ausgestatteten Verbunde. Eine Sandstrahlvorbehandlung aktiviert die Drahtoberfläche nur unzureichend, da die vorhandene Chromoxidoberflächenschicht des Drahtes zwar aufgeraut aber nicht wirksam entfernt wird. Für die mit Hilfe von Lichtbogenspritzen oder mit elektrochemischen Verfahren beschichteten Drähte ist festzuhalten, dass nur die elektrochemisch aufgebrachten Schichten die Grenzflächenfestigkeit steigern. Der Grund hierfür ist, dass – wie in **Bild 11** gezeigt – die Zinkschichten beim Verbundstrangpressen teilweise abgerieben werden, während die Nickelschichten erhalten bleiben. Die Nickelschichten der Proben F8 (dort als Haftvermittler) und F9 bleiben erhalten und führen zu Debonding-Scherfestigkeiten von 87 bzw. 94 MPa. Bei F8 ist dabei der Einfluss der teilweise noch vorhanden Zinkschicht für den Unterschied zwischen F8 und F9 verantwortlich. **Bild 11** zeigt, dass die deutliche Verschlechterung der Grenzflächenscherfestigkeit der Variante F7, die einen Wert von 49 MPa erreicht, im Vergleich zu F8 bzw. F5 auf die Bildung von Zirkularrissen zurückzuführen ist.

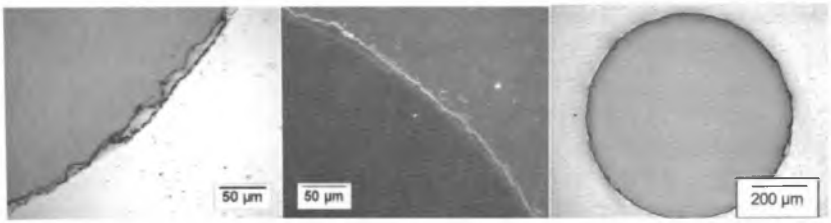

Bild 11: Metallographische Untersuchungen an F7 (links) und F8 (Mitte): Die Grenzfläche der Probe F7 ist zirkularrissbehaftet (links). Die Zinkschicht wird beim Verbundstrangpressen teilweise abgerieben (rechts).

Hier dient ausnahmsweise die Variante F5 als Referenzzustand, da die beschichteten Drähten auf Grund der teilweisen Schichtablösung nur bei einer Stempelgeschwindigkeit von 0,5 mm/s verpresst werden konnten. Damit ist festzustellen, dass Zinkbeschichtungen in Verbundstrangpressprofilen wenig zweckmäßig sind, während das elektrochemische Vernickeln deutliches Potenzial zur Debonding-Scherfestigkeitssteigerung bietet. Vergleicht man jedoch die erreichten Werte mit den Scherfestigkeiten mechanisch oder chemisch vorbehandelter Drähte, können vergleichbare Ergebnisse auch durch Schleifen oder Beizen der Drähte vor dem Verpressen erreicht werden.

Die Ergebnisse der Probenvarianten F8 und F9 weisen darauf hin, dass auch die metallurgischen Partner an der Grenzfläche eine Rolle spielen. Grenzflächenscherfestigkeiten von Verbunden mit Nickel- oder Kobaltbasisdrahtverstärkung (Inconel 718 und Haynes 25) im geschliffenen bzw. unbehandelten Zustand sind in **Bild 12** dargestellt.

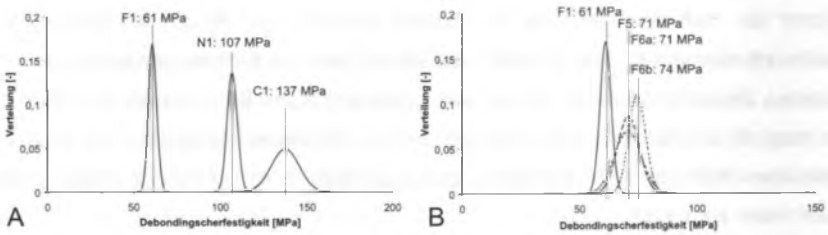

Bild 12: Gaußkurven der Debonding-Scherfestigkeiten von nickel- und kobaltbasisdrahtverstärkten Verbunden (A) und von Verbunden mit unterschiedlichen Wärmebehandlungen und Herstellparameter (B)

Die Zustände N1 und C1 erreichen 107 bzw. 137 MPa. Vergleicht man diesen Wert mit der Scherfestigkeit des Aluminiummatrixmaterials EN-AW 6060, der bei einer Zugfestigkeit von ca. 160 MPa im Zustand T4 bei ca. 120 MPa liegt, so sieht man, dass hier

ein absolutes Maximum der Debonding-Scherfestigkeit wohl erreicht ist. Die oben dargestellten TEM-Untersuchungen zeigen bereits, dass alle Systeme das Potenzial zur Bildung von Ausscheidungen an der Grenzfläche besitzen, was durch andere Autoren ebenfalls belegt wurde [LemHer65] [Leon02] [SuzUme93] [GuhAar84].

Hinsichtlich des Fertigungseinflusses ist festzustellen, dass alle getroffenen Maßnahmen, d.h. sowohl eine Reduzierung der Pressgeschwindigkeit (F5) als auch eine nachfolgende Wärmebehandlung auf Zustand T6 mit (F6a) oder ohne (F6b) Zwischenglühung bei 450 °C zu einer leichten Steigerung der Grenzflächenscherfestigkeit um ca. 10 MPa führen. Dies lässt sich zum einen durch eine längere Verweildauer bei höheren Temperaturen sowohl beim Strangpressen direkt als auch anschließend erklären, was dem Verbundsystem mehr Zeit zur Diffusion und der damit verbundenen Festigkeitssteigerung durch Mischkristall- und Ausscheidungsbildung lässt. Gleichzeitig steigert aber auch eine Wärmebehandlung des Verbundes die Scherfestigkeit des Matrixmaterials und damit konsequenterweise auch die Debonding-Scherfestigkeit sofern keine Ausscheidungen gebildet werden, die die Haftung verschlechtern.

Die Unterschiede in der Debonding-Scherfestigkeit der verschiedenen Systeme verdeutlichen auch die nachstehend aufgeführten REM-Aufnahmen ausgewählter Systeme, die nach dem Push-out-Test gemacht wurden. Das Hauptaugenmerk galt dabei der Oberfläche des ausgedrückten Drahtes.

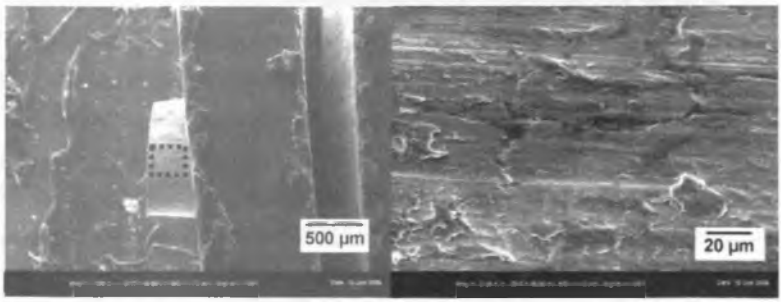

Bild 13: REM-Aufnahmen der Probenvariante F1 nach Push-out (Drahtoberfläche) bei verschiedenen Vergrößerungen

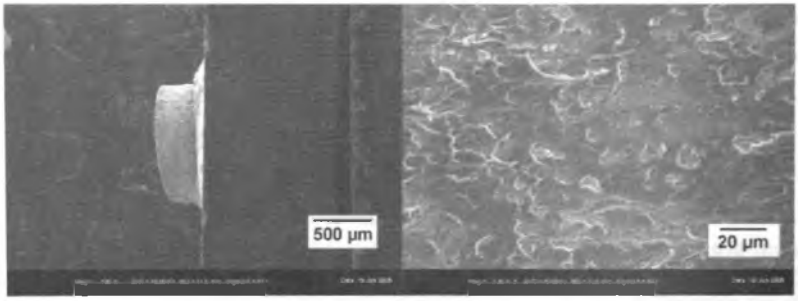

Bild 14: REM-Aufnahmen der Probenvariante F3 nach Push-out (Drahtoberfläche) bei verschiedenen Vergrößerungen

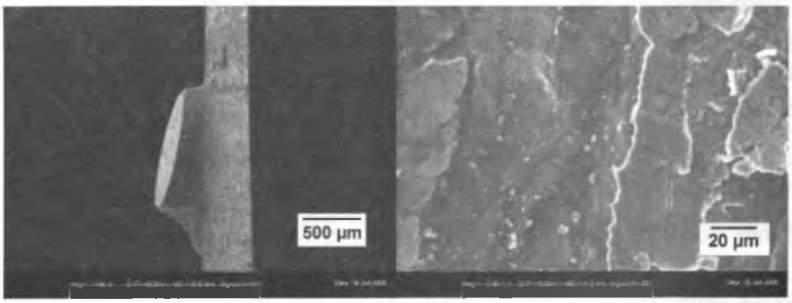

Bild 15: REM-Aufnahmen der Probenvariante C1 nach Push-out (Drahtoberfläche) bei verschiedenen Vergrößerungen

Vergleicht man **Bild 13** und **Bild 14** mit **Bild 15,** ist zu erkennen, dass im Fall der Variante F1 auf der Drahtoberfläche nur wenig Aluminium anhaftet, während alle anderen Probenvarianten deutliche Bedeckungen des Drahtes mit Aluminium aufweisen, das Versagen des Verbundes also für F1 an der Grenzfläche, im Falle der anderen Varianten in der Matrix stattfindet. Gleichzeitig weisen die Varianten F3 und C2 an der Grenzfläche einen Wulst auf, der die plastische Deformation der Matrix vor dem Versagen der Grenzfläche widerspiegelt. Bei beschichteten Verstärkungselementen erfolgt das Versagen teilweise in der Matrix, teilweise innerhalb der applizierten Grenzschicht.

Mechanische Charakterisierung verstärkter Proben unter quasistatischer Beanspruchung zur Ermittlung von Werkstoffkennwerten

Ausgangspunkt für die mechanische Charakterisierung verschiedener Verbundstrangpressprofile war die Zugprüfung potenzieller Verstärkungselemente [WeiFle04] in Form von Seilen und Drähten, die in **Tabelle 1** aufgeführt sind. In **Bild 16** sind die ermittelten

Nennspannungs-Totaldehnungs-Diagramme aufgetragen. Für die Seilkonstruktionen wurde die Nennspannung auf den Außendurchmesser bezogen und eventuelle Kavitäten vernachlässigt, da gezeigt werden konnte, dass die Kavitäten auch im Verbund nicht gefüllt werden.

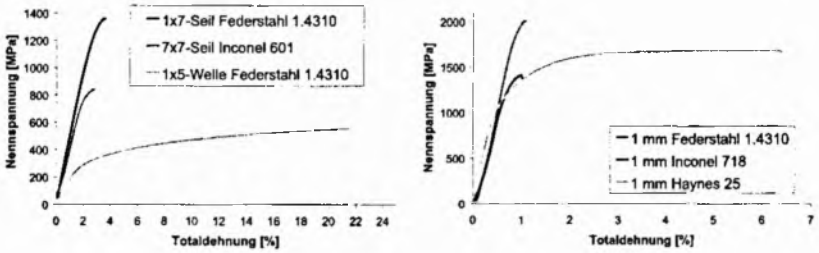

Bild 16: Nennspannungs-Totaldehnungs-Diagramme für Verstärkungselemente: Seilkonstruktionen (links) und Drähte (rechts)

Die Zugverfestigungskurven zeigen, dass zum einen die Drähte insgesamt geringere Totaldehnungen beim Bruch und zum anderen generell höhere Festigkeiten aufweisen, was zum einen werkstoffabhängig, zum anderen jedoch in der Vernachlässigung des geringeren Füllgrades der Seile begründet ist. Der Federstahldraht erreicht rund 2000 MPa, der Draht aus Haynes 25 rund 1700 MPa, der Inconeldraht jedoch nur 1400 MPa. Vergleicht man die Seilkonstruktionen untereinander, so ist ein deutlicher Unterschied zwischen der biegsamen Welle aus Federstahl (1x5-Konstruktion) und dem 1x7-Seil aus demselben Werkstoff mit einer Zugfestigkeit von 1800-2000 MPa (Herstellerangabe) festzustellen. Dieser Unterschied lässt sich aufgrund der unterschiedlichen Konstruktion von Seil und biegsamer Welle erklären [WeiFle07]. Der Festigkeitsunterschied zwischen der 1x7- und der 7x7-Konstruktion leitet sich einerseits aus den unterschiedlichen Zugfestigkeiten der verwendeten Drähte ab – diese liegt für die Nickelbasislegierungsdrähte bei rund 1450 MPa – zum anderen liegt der Füllgrad des 1x7-Seiles bei 76%, der des 7x7-Seiles bei 59%. So liefert z.B. das 7x7-Seil eine Zugfestigkeit von 840 MPa, die somit bei Berücksichtigung des Füllgrades fast den erwarteten Wert von 856 MPa erreicht.

Die mechanische Prüfung an Verbundproben [WeiKe06a] [WeiFle07] unter quasistatischen Belastungen erfolgte an den in **Tabelle 3** aufgeführten Probenvarianten.

Tabelle 3: Unter quasistatischer Beanspruchung untersuchte Probenvarianten

Proben-variante	Verstärkungs-werkstoff	Konstruktion	Vor-behandlung	Zugver-such	Druck-versuch
F1	Federstahl 1.4310	Draht, Ø1 mm	Grundzustand	X	X
F2	Federstahl 1.4310	Draht, Ø1 mm	Geschliffen	X	
F3	Federstahl 1.4310	Draht, Ø1 mm	Gebeizt	X	
C1	Haynes 25	Draht, Ø1 mm	Grundzustand	X	
C2	Haynes 25	Draht, Ø1 mm	Geschliffen	X	
N1	Inconel 718	Draht, Ø1 mm	Grundzustand		
N2	Inconel 718	Draht, Ø1 mm	Geschliffen	X	
S1	Inconel 601	Seil, 7x7, Ø1 mm	Grundzustand	X	
S2	Federstahl 1.4310	Seil, 1x7, Ø1 mm	Grundzustand	X	X
S3	Federstahl 1.4310	Seil, 1x5, Ø1 mm	Grundzustand	X	
M	-	-	unverstärkt	X	X

Die unverstärkte Matrix EN AW-6060 bildet den Referenzzustand für die drahtverstärkten Proben. **Tabelle 4** und **Bild 17** geben eine Übersicht über die durchschnittlichen mechanischen Eigenschaften verschiedener drahtverstärkter Proben.

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der drahtverstärkten Proben im Vergleich zur unverstärkten Matrix

Proben-variante	E-Modul [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Totaldehnung beim Drahtbruch [%]	Totaldehnung beim Bruch [%]
F1	83	91	346	16,0	19,4
F2	83	136	342	14,8	17,6
F3	81	110	345	15,4	19,3
C 1	85	105	310	13,1	17,0
C 2	80	120	317	15,5	19,6
N2	85	118	293	21,4	23,7
M	72	71	157	/	31,2

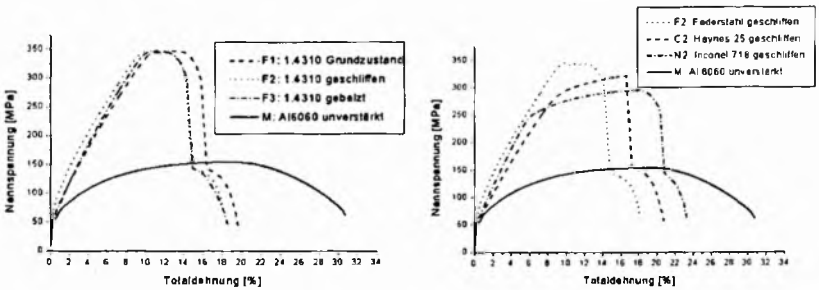

Bild 17: Spannungs-Dehnungskurven der federstahldrahtverstärkten Proben im Vergleich zur unverstärkten Matrix (links) und Zugkurven der Verbunde F1, C1, N1 mit geschliffenem Verstärkungselement im Vergleich zur unverstärkten Matrix (rechts)

Durch die Verstärkungselemente wird der Elastizitätsmodul um bis zu 15 % und die 0,2 %- Dehngrenze um bis zu 92 % im Vergleich zur unverstärkten Matrix gesteigert. Die Zugfestigkeit wird um bis zu 121 % erhöht. Dabei zeigen die verstärkten Proben vor Erreichen der Zugfestigkeit ausgeprägte plastische Verformungen. Nachteilig wirkt sich die Verstärkung auf die Totaldehnung beim Bruch aus, die um bis zu 44 % herabgesetzt wird. Der Einfluss der verschiedenen Vorbehandlungen der Verstärkungselemente auf die mechanischen Eigenschaften ist gering. Lediglich ein deutlicher Einfluss auf die Bruchdehnungen ist festzustellen, diese sind z.B. bei F1 tendenziell größer als bei F2 und F3.

Die Verbunde mit Co-Basisdrähten weisen wie die federstahlverstärkten Proben deutlich erhöhte Festigkeitswerte im Vergleich zum Referenzmaterial auf. Proben mit geschliffenen Verstärkungselementen (C2) besitzen leicht höhere Zugfestigkeiten sowie Bruchdehnungen im Vergleich zu Proben mit unbehandelten Drähten. Korreliert man die Abweichungen in der Dehnung beim Bruch des Drahtes für die Probentypen F und C mit den im vorherigen Kapitel diskutierten Debonding-Scherfestigkeiten, so ist festzustellen, dass ein Anstieg der Debonding-Scherfestigkeit tendenziell die Dehnung beim Bruch des Drahtes im Verbund reduziert. Dieser Effekt ist vermutlich mit einer zunehmenden Dehnungslokalisation mit steigender Grenzflächenfestigkeit zu begründen. Vergleicht man die jeweils geschliffenen Zustände des Federstahles (F2), der Kobalt-Basislegierung Haynes 25 (C2) und der Nickel-Basislegierung Inconel 718 (N2) miteinander, so zeigt sich, dass die Proben mit geschliffenem Federdraht die vergleichsweise höchsten Verbundzugfestigkeiten von 342 MPa zeigen, gefolgt von denen mit Kobaltbasisdraht und mit Nickelbasisdraht. Bei der Gesamtbruchdehnung verhält es sich genau entgegengesetzt. Entsprechende Versuche an Proben, die mit den Verstärkungselementen S1 bis S3 verstärkt waren, ergeben die in **Bild 18** links dargestellten Zugkurven.

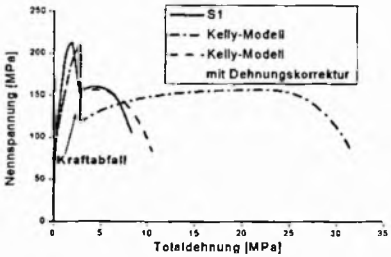

Bild 18: Zugkurven der Verbunde S1, S2, S3 mit Verstärkungen aus verschiedenen Seilkonstruktionen und –werkstoffen im Vergleich zur unverstärkten Matrix (links) und Vergleich zwischen Experiment und Modell für den Zustand S1 (rechts)

Die entsprechenden mechanischen Kennwerte sind in **Tabelle 5** aufgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die mechanischen Eigenschaften des Matrixmaterials je nach Probencharge etwas schwanken, v.a. hinsichtlich der Streckgrenze und der Zugfestigkeit. Daher sind in **Tabelle 5** zusätzlich Kennwerte des Matrixmaterials aufgeführt, dass derselben Profilcharge wie die Proben S1 bis S3 entstammt.

Tabelle 5: Mechanische Kennwerte der Verbunde S1, S2 und S3 mit Verstärkungen aus verschiedenen Seilkonstruktionen und -werkstoffen im Vergleich zur unverstärkten Matrix

Proben-variante	E-Modul [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	Totaldehnung beim Drahtbruch [%]	Totaldehnung beim Bruch [%]
S1	73	120 (195)[1]	213	2	8
S2	77	162	278	7	12
S3	70	138	223	22	27
M	69	105	178	/	32

Insgesamt besitzen die Verbunde S1-S3 deutlich geringere Zugfestigkeiten als die drahtverstärkten Proben. Darüber hinaus weist unter den seilverstärkten Verbunden nur die Probe S1 einen klaren Übergang zwischen Bereich I und Bereich II, wie er von Kelly [KelDav65] [Cou90] vorausgesagt wurde, auf. Dieser Übergang ist bei S1 deutlich weniger stark ausgeprägt, als dies bei allen drahtverstärkten Proben der Fall ist. Offensichtlich führt der bei Seilverbunden vorhandene Formschluss zu einem deutlich unterschiedlichen Verformungsverhalten im Vergleich zu den nur stoffschlüssig angebundenen Drähten. Die generell festzustellende Abweichung der Totaldehnung beim Versagen des Verstärkungselementes im Verbund im Vergleich zum nicht eingebetteten Verstärkungselement kann nur durch das Auftreten eines mehrachsigen Spannungszustandes im Verbund erklärt werden. Diese Mehrachsigkeit wird im Kelly-Modell nicht berücksichtigt.

Vergleicht man die Elastizitätsmoduln der Verbunde im Bereich I und die Verbundzugfestigkeiten mit Vorhersagen unter Verwendung des Kelly-Modells, so stellt man teilweise sehr gute Übereinstimmungen fest, wie **Tabelle 6** zeigt. Für die Verbunde S1-S3 war keine Vorhersage von E unter Verwendung des Kelly-Modells möglich, da zu erwarten ist, dass die Seilsteifigkeit im Verbund aufgrund der fehlenden Möglichkeit des Drillens sich von der Steifigkeit eines freien Seiles im Zugversuch völlig unterscheidet. Ansonsten ist festzuhalten, dass die experimentell ermittelten Elastizitätsmoduln der seilverstärkten Proben wohl auf Grund der nicht gegebenen Ausrichtung aller Drähte in Lastrichtung kleiner sind als die Werte der drahtverstärkten Proben. Des Weiteren stimmen die vorhergesagten Verbundfestigkeiten mit den Messwerten fast immer überein.

Tabelle 6: Vergleich der experimentell ermittelten Verbundeigenschaften mit Vorhersagen nach dem Kelly-Modell

Proben-variante	E-Modul I (theo.) [GPa]	E-Modul I (exp.) [GPa]	R_m (theo.) [MPa]	R_m (exp.) [MPa]
F	84	81 - 83	345	341 - 346
C	88	80 - 85	312	310 - 322
N	87	85	273	291 - 294
S1	-	73	202	213
S2	-	77	284	278
S3	-	70	218	228

Dennoch ist eine deutliche Abweichung der Verbundbruchdehnungen vom Kelly-Modell festzustellen, das davon ausgeht, dass diese mit der Bruchdehnung der unverstärkten Matrix übereinstimmt [Cou90]. Die Erklärung dieses Phänomens lieferten Zugversuche mit optischer Dehnungsaufnahme, die zeigten, dass nach Versagen des Verstärkungselementes eine Dehnungslokalisation auftrat. Unter Berücksichtigung dieser Dehnungslokalisation konnte ein Werkstoffmodell erstellt werden, das diese Diskrepanz korrigiert [WeiFle07]. **Bild 18 rechts** zeigt die sehr gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen Kurve für die Probe S1 im Vergleich mit einer Kurve, der das Modell zur Dehnungskorrektur zu Grunde liegt und zusätzlich das nach Kelly vorausgesagte Verhalten. Diese Ergänzung des Kelly-Modells stellt einen Ansatz zur Abschätzung der Verbunddehnung für Verbunde mit nur einem Verstärkungselement dar.

Um Rückschlüsse auf die während der Verformung im Verbund ablaufenden Prozesse zu ziehen, wurden gebrochene Proben im Anschluss an die Zugversuche im REM untersucht. **Bild 19** zeigt rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von Bruchflächen von Proben der Variante F2. Es ist eine beträchtliche Ablösung des Drahtes vom Matrixmaterial zu erkennen. Aufnahmen bei höherer Vergrößerung zeigen, dass der Draht noch mit Matrixmaterial bedeckt ist. Ferner sind Bruchwaben zu erkennen. Da die Bruchmorphologien für die Varianten F1 und F3 mit F2 vergleichbar sind, wird hier auf eine entsprechende Darstellung verzichtet. Die Kobaltbasislegierung Haynes 25 weist im Verbund einen geringen Abstand des abgelösten Drahtes von der Matrix und auch keine plastische Verformung des Drahtes auf. Tendenziell zeigt der geschliffene Draht in C2 eine stärkere Ablösung (größerer Abstand), was sich hier mit der größeren

Bruchdehnung und der geringeren Debonding-Scherfestigkeit deckt (**Bild 20**). Bruchflächenuntersuchungen der nickelbasisverstärkten Proben (**Bild 21**) belegen, dass sich der Draht zwar von der Matrix ablöst und auch gering einschnürt, dies aber weniger stark ausgeprägt ist als bei den mit Federstahl verstärkten Proben.

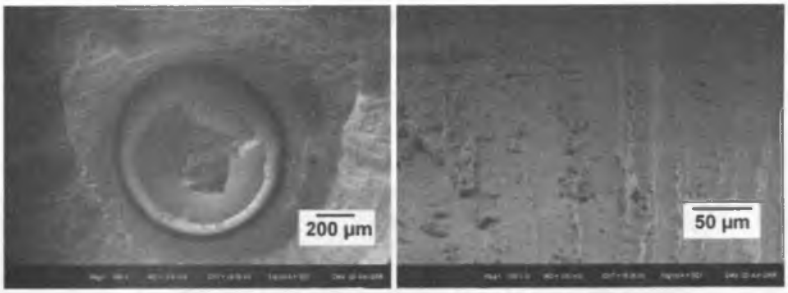

Bild 19: Bruchflächen von Proben der Variante F2 nach quasistatischem Zugversuch

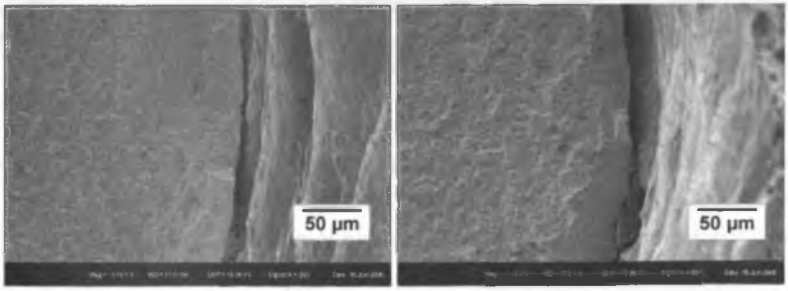

Bild 20: REM-Aufnahmen der Bruchflächen der Proben C1 (links) und C2 (rechts) nach quasistatischem Zugversuch

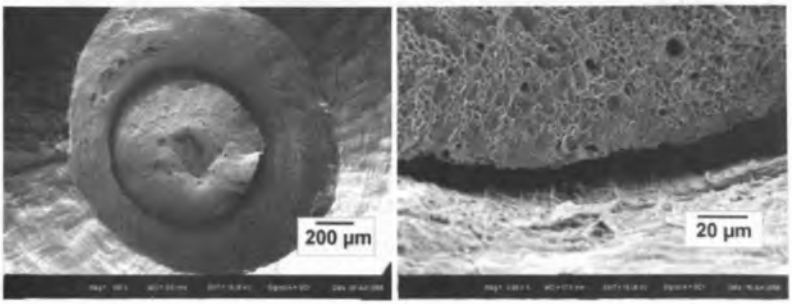

Bild 21: REM-Aufnahmen der Bruchfläche der Probenvariante N2 bei verschiedenen Vergrößerungen nach quasistatischem Zugversuch

Im Falle der seilverstärkten Proben ist in **Bild 22** zu sehen, dass alle Systeme einen formschlüssigen Verbund mit der umgebenden Matrix bilden. Für die Variante S2 ist deutlich zu erkennen, dass der mittlere Draht beim Zugversuch nicht versagte, sondern ausgezogen wurde. Dieser Draht ist konstruktiv nur kraftschlüssig angebunden. Da dieser Draht offensichtlich nicht voll zur Verbundzugfestigkeit beiträgt, wird hier der nach dem Kelly-Modell erwartete Festigkeitswert nicht ganz erreicht, wie **Tabelle 6** zeigt. Auch hier konnte mit Hilfe von EDX-Analysen an den Drähten anhaftendes Matrixmaterial nachgewiesen werden, was das zusätzliche Auftreten eines stoffschlüssigen Verbundes beweist [LöSchu04].

Bild 22: REM-Aufnahmen der Bruchfläche der Probenvarianten S1, S2 und S3 (v.l.n.r.) nach quasistatischem Zugversuch

Druckversuche wurden an unverstärkten Proben und an Proben der Variante F1 und S2 durchgeführt und mit dem Druckverformungsverhalten der Matrix verglichen. Dabei ergaben sich 0,2%-Druckdehngrenzen von 75 MPa für das unverstärkte Matrixmaterial bei einem erwartungsgemäß stetig ansteigenden Kurvenverlauf. Wird die Matrix mit einem 1x7-Seil verstärkt, so erhöht sich die 0,2%-Dehngrenze unter Druck auf 134 MPa. Die Kurve zeigt ein lokales Maximum bei 284 MPa, wie **Bild 23** illustriert. Verstärkt man die Aluminiummatrix mit einem Federstahldraht, steigt die 0,2%-Druckdehngrenze auf 219 MPa. Das lokale Maximum in der Druckkurve tritt für F1 bei 454 MPa auf.

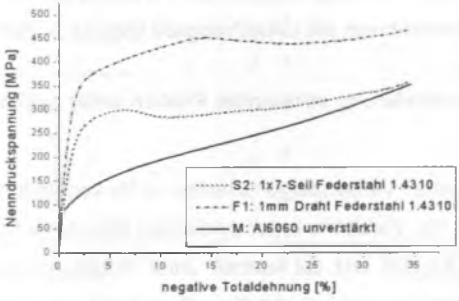

Bild 23: Druckkurven der Probenvarianten F1 und S2 im Vergleich zum unverstärkten Matrixmaterial

Das Deformationsverhalten der Verbundproben und vor allem des darin enthaltenen Verstärkungselementes wurde unter Einsatz der Micro-Röntgencomputertomographie visualisiert. **Bild 24** zeigt jeweils Aufnahmen vor und nach dem Druckversuch für eine seil- und eine drahtverstärkte Probe. Bei den seilverstärkten Proben kommt es jeweils an den Stirnflächen zu einem massiven Aufdrillen des Seiles, in der Probenmitte ist die Aufweitung deutlich geringer. Sind die Proben mit Drähten verstärkt, kann man sehen, dass der Draht an den Stirnflächen gestaucht wird, in der Probenmitte bei hinreichend hoher Belastung ausbaucht und anschließend ausknickt.

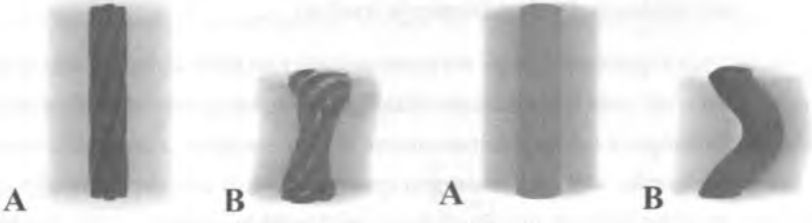

Bild 24: Druckproben vor (A) und nach (B) der Belastung, links: S2, rechts F1

Korreliert man diese Erkenntnisse mit den gemessenen Druckkurven, so ist festzuhalten, dass das Maximum der Fließspannungen offensichtlich mit dem „Versagen" des Verstärkungselementes durch Aufdrillen oder Ausknicken einhergeht. Vergleicht man diese Werte mit den gemessenen Zugfestigkeiten, so ergibt sich bei einer Seilverstärkung keine starke Änderung der Werte. Die durch das Maximum determinierte Druck-

festigkeit liegt um 2% über der Zugfestigkeit. Bei Verstärkungselementen aus Draht ergibt sich eine starke Abweichung, die Druckfestigkeit liegt 33 % über der Zugfestigkeit.

Mechanische Charakterisierung verstärkter Proben unter zyklischer Beanspruchung

Neben den quasistatischen Verbundeigenschaften ist für konstruktive Zwecke vor allem die Leistungsfähigkeit der Verbunde unter zyklischen Beanspruchungen entscheidend. Die Probenvarianten F1, C2 und S2 wurden unter mittelspannungsfreier Zug-Druck-Belastung im Laststeigerungsversuch (Multiple-Step-Test) zur Ermittlung der ZSD und des Verfestigungskoeffizienten nach Morrow [Morrow64] charakterisiert. Die angegebenen Mitteldehnungen sind jeweils Totalmitteldehnungen.

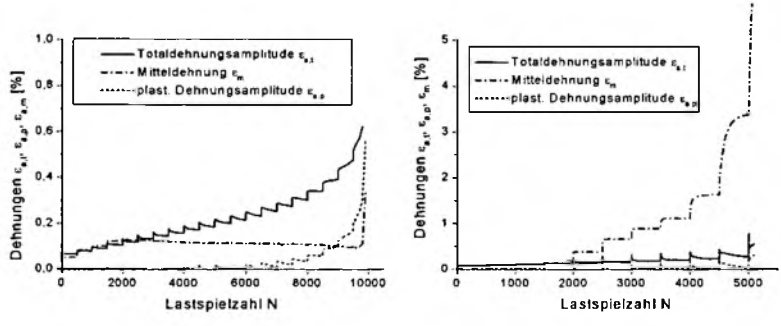

Bild 25: Wechselverformungskurven der Probenvariante F1 (links) im Vergleich zum unverstärkten Matrixmaterial (rechts)

Die gewonnenen Ergebnisse wurden mit den mechanischen Kennwerten der Matrix und mit den Kennwerten unter quasistatischer Beanspruchung verglichen. **Bild 25** stellt die Wechselverformungskurven der Probenvariante F1 im Vergleich zum Matrixmaterial dar. Erwartungsgemäß wird im Laststeigerungsversuch die Anzahl der Laststufen und damit auch die Zyklenzahl bis zum Bruch durch den Verstärkungsdraht erhöht. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich auch für die Probenvarianten C1 und S2 mit Kobaltbasisdraht- bzw. Seilverstärkung, wie **Bild 26** illustriert. Augenscheinlich ist hierbei der Unterschied zwischen Draht und Seilverstärkung, während die Unterschiede zwischen den verschiedenen Drahtwerkstoffen verschwimmen: Die Seilverbunde versagen bereits nach deutlich weniger Laststufen (bei 210 MPa) als die Drahtverbunde, während gleichzeitig alle Drahtverbunde unabhängig vom Material rund 20 Laststufen bis zum Bruch ertragen, also bei einem Lasthorizont von rund 250 MPa brechen.

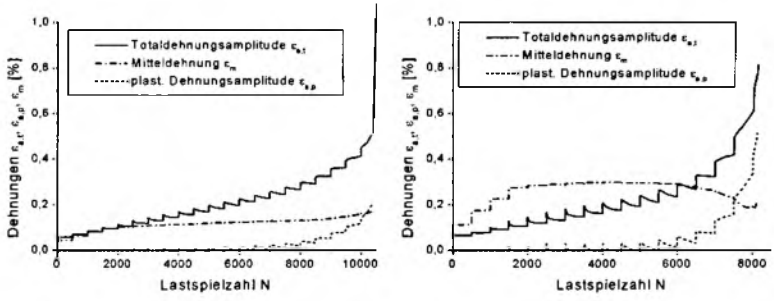

Bild 26: Wechselverformungskurven der Probenvarianten C1 (links) und S2 (rechts)

Augenscheinlich ist der Unterschied zwischen den Verbunden und der unverstärkten Matrix. Während die unverstärkte Matrix kontinuierlich zwischen den einzelnen Laststschritten Mitteldehnung aufbaut, verläuft die Mitteldehnung in den Verbunden ca. ab der 4. Laststufe (80 MPa) konstant. Die Fließgrenze der Matrix liegt ungefähr bei diesem Lasthorizont, so dass das Verstärkungselement die Matrix offensichtlich am fließen hindert. Generell zeigt die Matrix im Verbund und auch ohne Verstärkung innerhalb der einzelnen Laststufen ein verfestigendes Verhalten, wie jeweils der Verlauf der plastischen Dehnung zeigt. Die fließbehindernde Wirkung des Verstärkungselements gilt somit vor allem für die Laststufenwechsel. Die konstant bleibende Mitteldehnung führt schlussendlich auch zu einer geringeren Totaldehnungsamplitude der Verbunde beim Bruch. Die Verfestigungskoeffizienten n sowie die zyklische Streckgrenze ergeben sich aus der ZSD. **Bild 27** stellt im Vergleich zwischen **F1** und der Matrix die prinzipielle Ermittlung von n und $R_{eS;zykl}$ aus den Sättigungsamplituden am Ende der Laststufe dar.

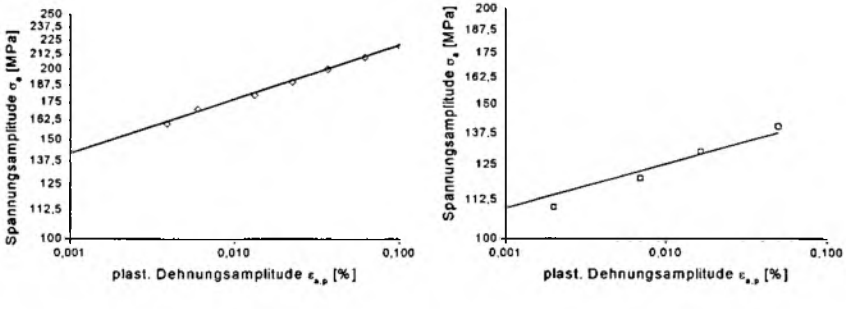

Bild 27: Zyklische Spannungs-Dehnungs-Diagramme (ZSD) der Probenvariante F1 (links) im Vergleich zum unverstärkten Matrixmaterial (rechts)

Alle Verfestigungskoeffizienten liegen bei 0,05 bis 0,15. Damit ist auch das Fließverhalten der Verbunde primär durch das Fließverhalten der Matrix bestimmt, während das weiterhin elastisch verhaltende Verstärkungselement bei der Verfestigung des Verbundes nur eine geringfügige Rolle spielt. Vergleicht man die in **Tabelle 7** aufgeführten zyklischen und quasistatischen Streck- bzw. Dehngrenzen der verschiedenen Zustände, so zeigt sich, dass die Verbunde und das unverstärkte Material unter zyklischer Beanspruchung ähnlich hohe Streckgrenze besitzen. Für das Matrixmaterial schlägt sich das zu erwartende verfestigende Verhalten deutlich in der Streckgrenze nieder.

Tabelle 7: Mechanische Kennwerte ausgewählter Verbunde unter zyklischer Zug-Druck-Beanspruchung im Laststeigerungsversuch im Vergleich zur 0,2%-Dehngrenze

Probenvariante	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_{es,zykl.}$ [MPa]	R_m [MPa]	$\sigma_{a,max}$ [MPa]
F1	91	120	346	240
C1	105	105	310	260
S2	162	110	278	210
M	71	95	157	150

Bild 28 zeigt die Bruchfläche einer Probe der Variante F1. Am Verlauf der Schwingstreifen ist zu erkennen, dass der Bruch nicht an der Grenzfläche zwischen Draht und Matrix begonnen hat. Damit liegt an der inneren Grenzfläche nicht zwangsläufig eine Schwachstelle des Verbundes vor. Diese Ergebnisse stellen eine positive Prognose für das Ermüdungsverhalten dar. Zur endgültigen Aufklärung des Verbundverhaltens und der Schädigungsmechanismen sollen künftig geeignete Detektionsmethoden in Kombination mit HCF-Beanspruchungstests dienen.

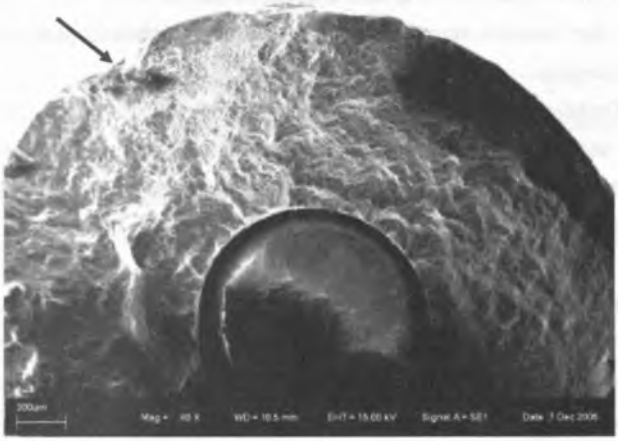

Bild 28: Bruchfläche der Probenvariante F1 mit Schwingstreifen, Pfeil zeigt den vermuteten Rissausgang an.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten konnten folgende Ergebnisse erarbeitet werden:

- Durch Verbundstrangpressen lassen sich endlos verstärkte Verbunde mit belastbarer, stoffschlüssiger Grenzfläche unter Verwendung von metallischen Drähten und Seilen reproduzierbar herstellen. Die Fertigung von Verbundstrangpressprofilen mit keramischer Faserverstärkung durch Einsatz von MMC-Verbunddrähten ist prinzipiell möglich.
- Push-out-Versuche zeigen deutliche Einflüsse der Verstärkungselement-Vorbehandlung und des Verstärkungselementwerkstoffes auf die Grenzflächenscherfestigkeiten verschiedener Systeme. *Beschichtungen* auf metallischen Drähten führen je nach Applikationsmethode zu keiner oder einer nur geringen Steigerung der Grenzflächenscherfestigkeit.
- Durch Verwendung von metallischen Seilen und Drähten kann die Zugfestigkeit bei einem Verstärkungselement-Gehalt von 11 Vol.-% um über 100% im Vergleich zum unverstärkten Werkstoff gesteigert werden. Die Verstärkungselement-Vorbehandlung hat auf Festigkeit und Elastizitätsmodul keinen Einfluss. Die gemessenen Verbundzugfestigkeiten und Elastizitätsmoduln stimmen mit Vorhersagen nach dem Kelly-Modell überein.

- Unter Druck versagen die Draht- und Seilverbunde durch Ausknicken oder Aufdrillen der Verstärkungselemente bei im Vergleich zur Zugbelastung erhöhter Versagensspannung.
- Eine Drahtverstärkung erhöht die Leistungsfähigkeit der Verbunde unter zyklischer Beanspruchung. Vorteilhaft ist die Reduktion des versagenskritischen Mitteldehnungsaufbaus gegenüber dem unverstärkten Werkstoff. Allerdings sind die Schädigungsmechanismen noch nicht vollständig aufgeklärt.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die bislang untersuchten Verbundwerkstoffe in allen untersuchten Belastungsszenarien eine deutlich bessere Leistungsfähigkeit als die unverstärkte Matrix besitzen. Zur endgültigen Aufklärung des Verbundverhaltens und der Schädigungsmechanismen sollen künftig geeignete Detektionsmethoden in Kombination mit verschiedenen Beanspruchungstests dienen. Darüber hinaus sollen nach Etablierung der prozesssicheren Herstellung von keramikfaserverstärkten Verbunden die mechanischen Eigenschaften charakterisiert werden, da diese Verbunde eine deutliche Steigerung der absoluten und spezifischen Steifigkeit und Festigkeit erwarten lassen. Bislang ungeklärt ist auch der Einfluss korrosiver Medien auf die verbundinterne Grenzfläche und die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften, insbesondere auf die Grenzflächenscherfestigkeit, sofern Zutrittsmöglichkeiten für solche Medien (z.B. an Trennstellen) gegeben sind.

Danksagung

Diese Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Sonderforschungsbereichs SFB/TR 10, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird.

Literatur

Aus dem Projekt entstandene Literatur

[TilVog05] TILLMANN, W., VOGLI, E., WEIDENMANN, K., FLECK, C.: Reinforced lightweight composite materials. Proc. of ITSC 2005, Basel/Schweiz, 2.–4.05.2005, Br. 658.

[WeiFle04] WEIDENMANN, K.A., FLECK, C., SCHULZE, V., LÖHE, D.: Charakterisierung koextrudierter Profile auf Aluminiumbasis mit verschiedenen Verstärkungselementen, Werkstoffwoche 2004, München

[LöSchu04] LÖHE, D., SCHULZE, V., FLECK, C., WEIDENMANN, K.A.: Verbundstranggepresste Aluminiummatrixverbunde – Werkstoffauswahl und Charakterisierung ausgewählter Metall-Metall-Systeme, Aluminium, 80 [12] 1374-1377, 2004

[WeiFl05a] WEIDENMANN, K.A., FLECK, C., SCHULZE, V., LÖHE, D.: Grenzflächencharakterisierung in drahtverstärkten Verbundstrangpressprofilen mit Aluminiummatrix in: M. Schlimmer, Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, DGM-Matinfo-Verlag, S.45-50, 2005

[WeiFl05b] WEIDENMANN, K.A., FLECK, C., SCHULZE, V., LÖHE, D.: Analyse der Mikrostruktur und des Eigenspannungszustandes seilverstärkter Aluminiumstrangpressprofile, Matwiss. und Werkstofftech., 36 [7] 307-312, 2005

[WeiKer05] WEIDENMANN, K.A., KERSCHER, E., SCHULZE, V., LÖHE, D.: Grenzflächen in Verbundstrangpressprofilen auf Aluminiumbasis mit verschiedenen Verstärkungselementen, Prakt. Met. Sonderband 37, 131-136, 2005

[WeiSch05] WEIDENMANN, K.A., SCHOMÄCKER, M., KERSCHER, E., LÖHE, D., KLEINER, M.: Compound extrusion of aluminium matrix specimens reinforced with continuous ceramic fibres, Light Metal Age, 63 [5] 6, 2005

[WeiFl05c] WEIDENMANN, K.A., FLECK, C., SCHULZE, V., LÖHE, D.: Materials selection process for compound-extruded aluminium matrix composites, Adv. Engin. Mater., 7 [12], 2005

[WeiKe06a] WEIDENMANN, K.A., KERSCHER, E., SCHULZE, V., LÖHE, D.: Mechanical properties of wire-reinforced aluminium extrusions under quasi-static loading conditions, Adv. Mater. Res.: Flexible Manufacture of Lightweight Frame structures, 10 23-34, 2006

[WeiKe06b] WEIDENMANN, K.A., KERSCHER, E., SCHULZE, V., LÖHE, D.: Characterization of the interfacial properties of compound-extruded lightweight profiles using the push-out-technique, Mat Sci. Engin. A, 424 205-211, 2006

[WeiFle07] WEIDENMANN, K.A., FLECK, C., SCHULZE, V., LÖHE, D.: Mechanical properties of rope-reinforced aluminium extrusions under quasistatic loading conditions, International Journal of Materials Research (früher: Z. Metallkunde), 98 [1], 2007 (im Druck)

Externe Literatur

[Ashby99] ASHBY, M. F.: Materials Selection in Mechanical Design. Butterworth Heinemann, Oxford, Großbritannien, 1999

[BluNar01] BLUCHER, J. T., NARUSAWA, U., KATSUMATA, M., NEMETH, A.: Continuous manufacturing of fiber-reinforced metal matrix composite wires – technology and product characteristics. Composites: Part A, 32 1759-1766, 2001

[Cou90] COURTNEY, T.H.: Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill, New York, 1990

[GuhAar84] GUHA, A., AARONSON, H.I., CLARK, W. A. T.: Structure of Interphase Boundaries in a Eutectic Co-Al Alloy, Metallurgical Transactions A, Volume 15a, August 1984-1623

[KelDav65] KELLY, A., DAVIES, G. J.: The Principles of the Fibre Reinforcement of Metals. Metallurgical Reviews. 10 [37] 1-78, 1965

[KlScho04] KLAUS, A., SCHOMÄCKER, M., KLEINER, M.: First Advances in the Manufacture of Composite Extrusions for Lightweight Constructions. Light Metal Age, 62 [8] 12-21, 2004

[SchoKl04] SCHOMÄCKER, M., KLEINER, M., SCHIKORRA, M., KLAUS, A.: Herstellung verbundverstärkter Aluminiumprofile für ultraleichte Tragwerke durch Strangpressen. Mat.wiss. und Werkstofftech., 35 [7] 431-439, 2004

[KleKla04] KLEINER, M., KLAUS, A., SCHOMÄCKER, M.: Verbundstrangpressen. Aluminium, 80 [12] 1370-1374, 2004

[LemHer65] LEMKEY, F. D., HERZBERG, R. W., FORD, J. A.: The microstructure, crystallography and mechanical behavior of unidirectionally solidified Al-Al_3Ni eutectic alloy. Trans. Met. Soc. AIME 233 334-341, 1965

[Leon02] LEON, C. A.: The influence of nickel coating on the wettability of aluminium on ceramics. Composites A, 33 1429-1432, 2002

[Morrow64] MORROW, J.: Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. In: Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity. ASTM STP 378, 45-87, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1964

[PetCar94] PETZOW, G., CARLE, V.: Metallographisches, Keramographisches und Plastographisches Ätzen. Borntraeger-Verlag, Stuttgart, 1994

[Saeger70] SAEGER, K. E.: Faserverstärkte Verbundstoffe mit Aluminium-Matrix. Aluminium, 46 [10] 681-686, 1970

[SuzUme93] SUZUKI, T., UMEHARA, H., HAYASHI, R., WATANABE, S.: Mechanical properties and metallography of aluminium matrix composites reinforced by the Cu- or Ni-plating carbon multifilament. J. Mater. Res., 8 [10] 2492-2498, 1993

[Til76] TILLMANN, L.: Der Einfluss von Faser/Matrix-Reaktionen auf die mechanischen Eigenschaften von Aluminium-Faserverbundwerkstoffen. Dissertation, Universität Stuttgart, 1976

[WagHod83] WAGNER, A., HODEL, U.: Verbundstrangpressen, ein Verfahren zur Herstellung metallisch gebundener Strangpressprofile aus Aluminium und Stahl. Konf.- Einzelbericht : Neue Verfahren der Massivumformung, Symp. D. DGM , Bad Nauheim, 1983