

Forschungsprojekt

Materialgerechtes Fügen von Faserverbundprofilen

Kurzbericht

August 2014



Universität Stuttgart

*Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
(ILEK)*

M. Eng. Jürgen Denonville

Dr.-Ing. Walter Haase

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c. Werner Sobek

Institut für Umformtechnik (IFU)

Dipl.-Ing. Kim Riedmüller

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Mathias Liewald MBA

Inhalt

Inhalt.....	2
1 Ziel der Forschungsaufgabe.....	3
1.1 Problemstellung	3
1.2 Lösungsansatz	3
1.3 Realisierung	4
1.4 Ziele	5
2 Durchführung der Forschungsaufgabe (Arbeitsplan).....	6
3 Zusammenfassung und Ergebnisse.....	7
3.1 Zusammenfassung	7
Literatur.....	8

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert (Aktenzeichen SF-10.08.18.7-10.22 / II 3-F20-10-1-054). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Abschnitte dieses Forschungsberichts sind eine genehmigte Vorveröffentlichung der Dissertation von Herrn Jürgen Denonville [1] und stimmen mit dieser zum Teil inhaltlich und wörtlich überein.

Stuttgart, 31.08.2014

1 Ziel der Forschungsaufgabe

1.1 Problemstellung

Die im Bauwesen vorrangig eingesetzten Faser-Kunststoff-Verbundbauteile sind pultrudierten Profilbauteile und Lamellen. Sie besitzen aufgrund des Herstellungsverfahrens einen sehr hohen Anteil an unidirektional angeordneten Fasern in Bauteillängsrichtung. Ihr Leichtbaupotential kann für normalkraftbeanspruchte Bauteile wie Zugelemente oder Fachwerkstäbe besonders gut genutzt werden.

Im Bereich der Lasteinleitung bzw. Fügung mit anderen Bauteilen wirkt sich die Orthotropie dieser Bauteile nachteilig aus. Denn in diesen Bereichen treten mehrdimensionale Spannungszustände auf, die bei UD-Schichten vorrangig durch die schwache Matrix aufgenommen werden müssen. In Abhängigkeit von Art und Ausführung der Fügung kommt es zusätzlich zu Spannungskonzentrationen im Bauteil, die im Vergleich zu isotropen Werkstoffen deutlich höher ausfallen und aufgrund des linear-elastischen Materialverhalten nicht abgebaut werden können [2].

Damit ist die Fügung gerade bei UD-Verbunden von zentraler Bedeutung.

Die bestehenden Fügetechnologien sind zum Teil unter Baustellenbedingungen schwer oder gar nicht umzusetzen (z.B. Kleben), benötigen deutlich mehr Platz als Verbindungen anderer Werkstoffe (z.B. Klemmen), sind aufgrund ihrer Dauerhaftigkeit kritisch zu bewerten oder in der Vorfertigung aufwendig und teuer.

Die zu lösende Aufgabe besteht folglich darin, eine neue Verbindungstechnologie zu entwickeln, die die Leistungsfähigkeit des Faserverbundwerkstoffs erhält und den Anforderungen an eine einfache Ausführbarkeit, Robustheit, und Dauerhaftigkeit genügt. Darüber hinaus sollen die Vorteile der wirtschaftlichen, automatisierten Produktion nicht eingeschränkt werden.

1.2 Lösungsansatz

Der am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) entwickelte und in diesem Forschungsprojekt sowie in [1] verfolgte Ansatz sieht vor, die Kunststoffmatrix im Bereich der Lasteinleitung durch eine leistungsfähigere metallische Matrix zu ersetzen.

Unter der Annahme eines konstanten Faservolumengehalts werden folgende vorteilhafte Veränderungen postuliert:

- Durch die deutlich höhere Steifigkeit der metallischen Werkstoffe gegenüber der Kunststoffmatrix werden die Fasern im metallisch gebundenen Bereich entlastet.
- Das Verhältnis zwischen der Steifigkeit in Faserrichtung und orthogonal zur Faserrichtung (E_1/E_2) wird reduziert. Dies wirkt sich positiv auf mögliche Spannungskonzentrationen aus.
- Das plastische Verformungsverhalten der metallischen Matrix ermöglicht, Spannungsspitzen abzubauen.
- Konzentrierte Lasten können aufgrund der höheren Schubsteifigkeit auf kürzere Distanzen verteilt werden.
- Die Lochleibungsfestigkeit von stiftförmigen Verbindungen wird erhöht.
- Die Tragfähigkeit der matrixdominierten Beanspruchungsrichtungen wird durch die höheren Festigkeiten des metallischen Werkstoffs erhöht.
- Eine metallische Matrix ermöglicht die Anbindung an andere metallische Werkstoffe mittels geeigneter Schweißverfahren.

- Die Nutzung der Vorspannung bei Lochleibungsverbindungen wird verbessert.

Infolge dieser günstigen Veränderung des mechanischen Werkstoffverhaltens kann weiter angenommen, dass die punktuelle Fügung mit stiftförmigen Verbindungsmitteln insgesamt eine höhere Leistungsfähigkeit als bei polymeren Matrixwerkstoffen erreicht. Das Leichtbaupotential des Ausgangswerkstoffe könnte erhalten bleiben.

In Abbildung 1-1 ist der Lösungsansatz für drei unterschiedliche Profile aus GfK visualisiert. Von bestehenden Lösungen im Bauwesen unterscheidet sich dieser Ansatz darin, dass die Lösung des Fügeproblems auf der Werkstoffebene behandelt wird. Die wesentliche Eigenschaft der Faserverbundwerkstoffe ist die gezielte Eigenschaftssteuerung durch die Wahl geeigneter Verbundpartner bzw. Materialien. Folglich handelt es sich bei diesem Ansatz mehr um eine materialgerechte als um eine fasergerechte Lösung.



Abbildung 1-1 Visualisierung des Lösungsansatzes am Beispiel verschiedener Profile aus GfK; *links*: Doppel-T-Profil; *mittig*: U-Profil; *rechts*: Flachprofil

1.3 Realisierung

Zur Realisierung dieses Lösungsansatzes ist es notwendig, Endlosfasern ohne Eigenschaftsverluste in eine metallische Matrix einzubringen. Für die Herstellung von Faser-Metall-Verbundwerkstoffen (FMV), häufig auch MMC (metall matrix composites) genannt, kommen verschiedene Verfahren in Frage.

Am Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart werden seit 1998 Formgebungsverfahren metallischer Werkstoffe im teilerstarten Zustand (Semi Solid Metal Forming (SSMF)) untersucht.

Bei diesen Umformungsverfahren werden die thixotropen Eigenschaften von teilerstarten Metalllegierungen genutzt [3]. Thixotropie bezeichnet in der Rheologie eine Zeitabhängigkeit der Fließeigenschaften bei nicht-newtonschen Flüssigkeiten, deren Viskosität mit zunehmender mechanischer Beanspruchung sinkt [4], d.h. je höher die mechanische Einwirkung, desto flüssiger wird das teilerstartete Metall.

Diese Eigenschaft führt dazu, dass im Vergleich zu anderen Verfahren mit niedrigeren Prozesstemperaturen und niedrigerem Druck umgeformt werden kann. Beide Effekte sollten sich positiv auf den Erhalt der Fasereigenschaften auswirken.

Die Herstellung von metallischen Verbundwerkstoffen durch die teilflüssige bzw. thixotrope Formgebung wurde bereits in [3] untersucht und es konnten vielversprechende Ergebnisse erzielt werden.

Die speziellen Anforderungen des hier untersuchten Lösungsansatzes bedingen jedoch eine grundlegende Veränderung des in [3] vorgestellten Herstellungsverfahrens. Denn die partielle Aufbringung der metallischen Matrix soll aus Gründen der Wirtschaftlichkeit für die Herstellung von endloslangen Bauteilen geeignet sein, deshalb müssen die Fasern durch das Herstellungswerkzeug hindurchgeführt werden. Die sich aus dieser Anforderung ergebenden Einflüsse und Lösungen für das Umformverfahren sind in Kapitel 5 des Abschlussberichts beschrieben.

1.4 Ziele

Das vorrangige Ziel dieses Projekts ist es, die Machbarkeit des vorgeschlagenen Ansatzes zur Lösung eines grundsätzlichen Problems der Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe zu prüfen und zu bewerten. Dies erfolgt am Beispiel eines Zugstabs mit Flachprofil aus GfK und CfK (Abbildung 1-1 rechts).

In enger Kooperation mit dem IFU soll ein neues Verfahren entwickelt werden. Anhand einer Parameterstudie werden Einflussgrößen auf die Werkstoffgüte identifiziert und gezielt manipuliert.

Nach Sicherstellung einer reproduzierbaren Werkstoffgüte soll diese anhand von mechanischen Kennwerten quantifiziert werden. Hierfür erfolgt eine experimentelle Untersuchung ausgewählter, aussagekräftiger Materialkennwerte des metallischen Verbundwerkstoffs.

Weiterführende experimentelle Untersuchungen sollen Aufschluss über das Tragverhalten und die Tragfähigkeit des Mischverbundwerkstoffs im Übergangsbereich von der polymeren zur metallischen Matrix geben.

Ob die Bauteileigenschaften für Lochleibungsverbindungen geeignet sind, wird anhand ausgewählter Verbindungen geprüft.

Auf Grundlage der umfangreichen Versuchsergebnisse soll eine numerische Simulation Aufschluss über das Potential dieses Lösungsansatzes und Optimierungsmöglichkeiten aufzeigen.

2 Durchführung der Forschungsaufgabe (Arbeitsplan)

Arbeitspaket 1: Grundlagen

- ILEK - Analyse der möglichen Anwendungsbereiche und der sich hieraus ergebenden Anforderungen an Faserverbundwerkstoffprofile und deren Knotenverbindungen im Bauwesen
- Analyse bestehender Verbindungstechnologien
- IFU - Konstruktion von Modulen für ein Thixoschmiedewerkzeug

Arbeitspaket 2: Entwurf und Konzeption

- ILEK - Theoretische Entwicklung und Konzeption der Knoten
- Untersuchung des Übergangs harzgebundene–metallgebundene Faserverbundwerkstoffe
- Festlegung der Versuchsgeometrie des Matrixübergangsbereichs
- IFU - Strömungssimulation zur Verifikation der rheologischen Verhältnisse im konstruierten Werkzeug
- Thermodynamische Auslegung des Werkzeugs

Arbeitspaket 3: Bemessungskonzepte und Herstellung des Schmiedewerkzeugs

- ILEK - Vergleich bestehender Bemessungskonzepte für FKV-Bolzenverbindungen
- IFU - Fertigung des Thixoschmiedewerkzeugs
- Auswahl geeigneter metallischer Matrixkomponenten und Ermittlung der rheologischen und mechanischen Kennwerte

Arbeitspaket 4: Verfahrensentwicklung

- IFU - Aufbau und Inbetriebnahme des Werkzeugs
- Formgebungsversuche mit Matrixwerkstoff
- ILEK und IFU - Entwicklung einer Vorspanneinrichtung zur Einbringung der Fasern in die Aluminiummatrix
- Parameterstudie zur Erfassung und Einstellung der prozessrelevanten Herstellungsparameter

Arbeitspaket 5: Experimentelle Untersuchungen

- ILEK - Bewertung der erzielbaren Materialeigenschaften anhand von Zugversuchen an Zugproben mit variierenden Faserarten und Fasermengen
- Auszugsversuche zur Erfassung der Tragverhaltens des Materialübergangs unter Variation der Faserart und Fasermenge
- Durchführung von Bauteilversuchen zur Ermittlung des Tragverhaltens einer zweischnittigen Lochleibungsverbindung für einen Faservolumengehalt je Faserart
- IFU - Herstellung der für die Versuche notwendigen Grundbauteile

Arbeitspaket 6: Numerische Simulation

- ILEK - Erstellung eines numerischen Modells zur Abbildung der im Arbeitspaket 5 durchgeführten Bauteilversuche und Ermittlung des theoretisch möglichen Potentials der neuen Verbindungstechnologie

Arbeitspaket 7: Dokumentation

3 Zusammenfassung und Ergebnisse

3.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts ist es gelungen, ein Verfahren zu entwickeln, das eine partielle Aufbringung einer metallischen Matrix auf Glas- und Carbonfasern ermöglicht. Die Fasern sind wie bei Pultrusionsprofilen unidirektional angeordnet und endlos lang.

Das verwendete Verfahren basiert auf dem Prinzip des Umformens im teilerstarrten Zustand (semi solid forming). Die wesentliche Neuerung des Verfahrens gegenüber bestehenden Verfahren ist die seitlich offene Form, die eine durchgehende Faserführung ermöglicht. Der für die Umformung notwendige Verschluss der Form wird durch eine gezielte Erstarrung der Aluminiumschmelze an den offenen Seiten erreicht. Folglich verschließt die umzuformende Masse die Form selbst. Dieser Selbstverschluss wird durch eine kontrollierte Beheizung und Kühlung des Umformwerkzeugs ermöglicht.

Anhand einer Parameterstudie konnten die relevanten Einflussgrößen des neuen Verfahrens auf die Bauteilqualität erfasst, quantifiziert und angepasst werden. Hierbei wurden die Einflüsse aus der Faserart, der Fasermenge, der Fasernordnung, der Vorspannung, der Einbringung der Aluminiumschmelze, der Aluminiumlegierung sowie dem Temperaturprofil des Werkzeugs untersucht.

Nachdem die Machbarkeit des Verfahrens und eine für diesen Entwicklungsstand vertretbare reproduzierbare Bauteilqualität sichergestellt werden konnten, folgten umfangreiche experimentelle Untersuchungen. Anhand von Zugversuchen wurde das Verbundverhalten erfasst, mittels Auszugsversuchen konnte die in die Aluminiummatrix für den jetzigen Entwicklungsstand übertragbare Kraft ermittelt werden. Durch Versuche an einer zweischnittigen Lochleibungsverbindung erfolgte die Bestimmung der Bauteilbruchkräfte.

Es konnte gezeigt werden, dass mittels dieses Verfahrens tragfähige metallische Verbundwerkstoffe im Bereich der Lasteinleitung eines unidirektionalen Faserkunststoffverbunds herzustellen sind. Die Materialeigenschaften sind in hohem Maße abhängig von der Wirkung des Selbstverschlussprinzips. Dieses wiederum ist unter anderem von der Fasermenge abhängig. Daher streuen die Ergebnisse über alle durchgeführten Versuche sehr.

Die bei den Zugversuchen erzielten Werte für die Zugfestigkeiten sind niedriger als erwartet. Die ausführliche Diskussion der Ergebnisse erbrachte, dass die schwankende Qualität der Aluminiummatrix die Streuungen und die niedrigen Bruchdehnungen verursacht. Ein negativer Einfluss des Verfahrens auf die Fasereigenschaften war nicht festzustellen.

Die Auszugsversuche zeigten die Abhängigkeit der übertragbaren Kräfte von der Art und Menge des Aluminiumausgusses und der Infiltrationsgüte in der Übergangzone. Es konnten Ausnutzungsgrade in Abhängigkeit der Faserart und -menge von mehr als 20 % bis zu 75 % der theoretischen Faserfestigkeit erzielt werden.

Anhand der Bauteilversuche konnte je Faserart für eine gewählte Fasermenge die Tragfähigkeit einer Lochleibungsverbindung ermittelt werden. Die Bauteile versagen an der Austrittsstelle der Fasern aus der Aluminiummatrix infolge eines gekrümmten Faserverlaufs. Die erreichten Bruchlasten liegen bereits bei diesem Entwicklungsstand über den Bruchlasten der Pultrusionsprofile und nahe an der einer Standard-Aluminiumknetlegierung. Hervorzuheben ist, dass die übertragenen Kräfte mit einem deutlich kleineren Faservolumen realisiert werden konnten und damit auch bei den Bauteilversuchen die Faserausnutzungsgrade mit 19 % bzw. 25 % deutlich über denen der UD-Bauteile aus FKV ($< 5\%$) liegen. Aufgrund

der Auszugsversuche ist bei entsprechender Ausbildung der Faseraustrittsstelle mit einer weiteren Steigerung zu rechnen.

Aufgrund der hohen Streuungen der Materialeigenschaften wurden keine weiteren Materialversuche zur Bestimmung der Festigkeiten quer zur Faserrichtung sowie der Schubfestigkeiten durchgeführt. Folglich konnte kein geschlossenes Materialmodell für den metallischen Verbundwerkstoff aufgestellt werden.

Die durchgeführten numerischen Berechnungen basieren daher auf vereinfachten Annahmen und sollen anhand einer Grenzwertbetrachtung das über die Versuchsergebnisse hinaus bestehende Potential aufzuzeigen. Das numerische Modell konnte anhand der Bauteilversuche, für diese Zwecke ausreichend, validiert werden. Die Simulationen ergaben, dass bei den ausgeführten Faservolumengehalten der Bauteilversuche eine weitere Laststeigerung bis etwa $F_{\max} = 103 \text{ kN}$ bis 110 kN möglich erscheint.

Insgesamt wird die neue Verbindungstechnologie seitens der Verfasser als sehr vielversprechend eingestuft. Die bisherigen Ergebnisse sind für den Entwicklungsstand sehr gut, die Optimierungsmöglichkeiten sind bekannt und können anhand der im Rahmen dieses Projekts genutzten Bewertungskriterien schnell beurteilt und weiterentwickelt werden.

Literatur

- [1] Denonville, J.: Eine neue materialgerechte Fügetechnologie für unidirektionale Faser-verbundwerkstoffe durch partielle Substitution des polymeren mit einem metallischen Matrixwerkstoff am Beispiel von Carbon- und Glasfaser-Kunststoff-Verbunden, Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, noch nicht veröffentlicht.
- [2] Carlsson, L.A.; Pipes, R.B.: Hochleistungsfaserverbundwerkstoffe: Herstellung und experimentelle Charakterisierung, Stuttgart: Teubner, 1989.
- [3] Unseld, P.: Ein Beitrag zur Herstellung metallischer Verbundwerkstoffe durch teilflüssige/thixotrope Formgebung, Frankfurt am Main: MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2009.
- [4] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1342-1: Viskosität - Rheologische Begriffe, November 2003.