

Teilflüssige Formgebung hybrider Werkstoffsysteme

Dipl.-Ing. L. Kertesz, Prof. Dr.-Ing. M. Liewald MBA, Dipl.-Ing. F. Abt

Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Holzgartenstraße 17, 70174 Stuttgart, Germany

Die Herstellung von Verbund- bzw. Hybridwerkstoffen, die durch die Kombination verschiedener Materialien den Leichtbauanforderungen gerecht werden, steht im Fokus zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, sowohl im universitären, als auch im industriellen Bereich. Der großflächige Einsatz dieser Werkstoffverbunde beispielsweise im Automobilbau wird in der Regel durch die komplexen und kostenintensiven Fertigungsprozesse beschränkt, so dass deren Anwendung meist auf Nischenprodukte und Sonderanfertigungen begrenzt ist. Während im Bereich der Verbundwerkstoffe mit Kunststoffmatrix die Verarbeitungstemperaturen vergleichsweise niedrig sind, stellen die hohen Temperaturen und die notwendigen Formgebungsdrücke bei der Verbundsynthese mit metallischer Matrix eine besondere Herausforderung für die Prozessführung dar.

Schlüsselwörter: Teilflüssige Formgebung, Thixo-Schmieden, Verbund-/ Hybridwerkstoff, Werkzeugkonstruktion, CFD-Simulation, Verbundsynthese

1. Einleitung

Auf dem Gebiet der teilflüssigen Formgebung hybrider Werkstoffsysteme werden am IFU derzeit Forschungsarbeiten im Rahmen der DFG-Forschergruppe FOR 981 „Hybride intelligente Konstruktionselemente“ (HIKE) durchgeführt. Dabei wird seit 2009 mit sechs weiteren Instituten der Universität Stuttgart das Ziel verfolgt, neuartige Konstruktionselemente zu entwickeln welche eine erhöhte Funktionalität und eine integrierte Sensorik und Aktorik besitzen. Zur Demonstration der Leistungsfähigkeit der in den einzelnen Teilprojekten entwickelten, Konstruktionselemente wird ein adaptives Schalentragwerk (**Bild 1**) aufgebaut, das sich eigenständig an Umwelteinflüsse (z.B. wechselnde Windlasten) anpasst. Die Potenziale der semi-solid Formgebung zur Herstellung von Hybridwerkstoffen auf metallischer Basis werden am Beispiel eines intelligent agierenden Kraftumlenkelements aufgezeigt.

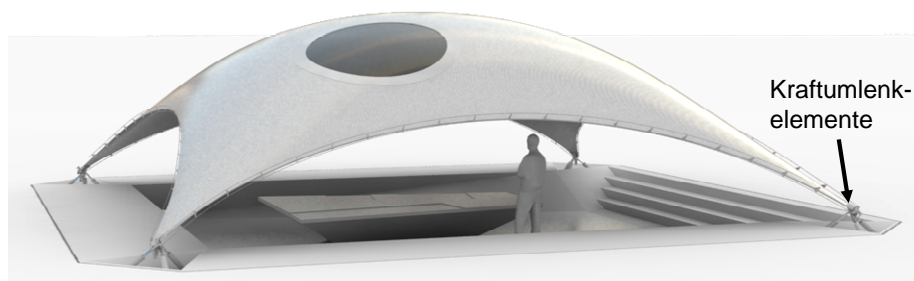


Bild 1: Adaptives Schalentragwerk als Demonstrator der DFG-Forschergruppe FOR 981 'HIKE'

Innerhalb des am IFU bearbeiteten Teilprojekts „Herstellung eines intelligenten Kraftumlenkelements durch teilflüssige Formgebung“ werden verschiedene Charakterisierungskomponenten mit einer Aluminiummatrix kombiniert, so dass sich durch die Art, die Form, den Volumenanteil und die Lage der Verstärkungskomponente gezielt die mechanischen Eigenschaften des Werkstücks global oder gezielt lokal einstellen lassen [1, 2, 3]. Abhängig von der Halbzeugwahl der Charakterisierungskomponente und des Matrixwerkstoffes erfolgt deren Verbundsynthese in einer spezifischen Prozessgestaltung. **Bild 2** zeigt die Prozessroute für die teilflüssige Formgebung eines Werkstoffverbundes am Beispiel eines geschichteten Blech-Faser-Deposit [4, 5].

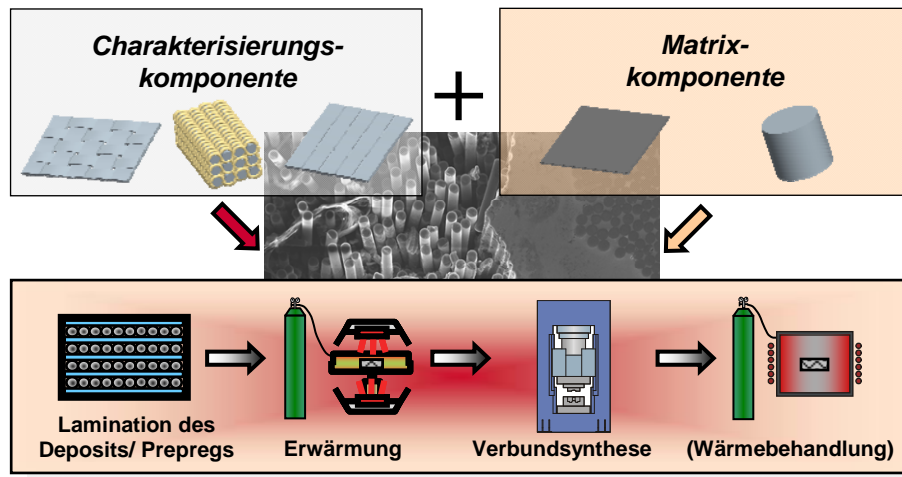


Bild 2: Prozessroute für die teilflüssige Formgebung von Verbund-/Hybridwerkstoffen

Hierzu wird neben der kraftflussgerechten Verstärkung mittels Kohlenstofffasern unter anderem die teilflüssige Formgebung partikelverstärkter Legierungssysteme untersucht, womit sich z.B. verschleißoptimierte Laufflächen erzeugen lassen. Ein weiterer Schwerpunkt der Forschungsarbeiten liegt bei der Integration sensorischer Elemente mittels des teilflüssigen Formgebungsvorgangs, die es dem Kraftumlenkelement ermöglichen, den mechanischen Belastungszustand während des Einsatzes zu erfassen. Diese registrierende Eigenschaft des Bauteils ist die Grundlage für die in diesem Forschungsvorhaben angestrebte Intelligenz, die in einer aktori-schen Modifikation des Kraftumlenkelements münden soll, um sich so an wechselnde Randbedingungen aktiv anzupassen.

2. Kompaktierung von flächigen Hybrid-/Verbundwerkstoffen

Zur Untersuchung der Herstellbarkeit verschiedener hybrider Werkstoffsysteme und zur Untersuchung der erzielbaren mechanischen Kennwerte wurden in Voruntersuchungen plattenförmige Bauteile generiert. Dabei wurde die Aluminiumlegierung AlMg1 als Matrixwerkstoff gewählt und mit Hochmodul-Kohlenstofffasern und Edelstahl-drähten (1.4301) in unterschiedlichen Volumenanteilen kombiniert. Zur Verbesserung der Handhabbarkeit wurde sowohl bei den Kohlenstofffasern, als auch bei den Stahldrähten ein Halbzeug in gewebter Form verwendet. Die Aluminiumlegierung AlMg1, welche die Matrix des Werkstoffverbundes darstellt wurde als Blechhalbzeug (Dünmband; $s=0,280\text{mm}$) gewählt. Mit diesen drei verschiedenen Werkstoffen

wurden im Rahmen von ersten Untersuchungen, unterschiedliche geschichtete Konstellationen zusammengestellt, die nach der eigens dafür ausgelegten Erwärmung mittels Infrarotstrahler, in einem modifizierten teilflüssigen Formgebungsprozess kompaktiert wurden. In der folgenden Tabelle ist die Zusammensetzung der generierten Schichtverbunde mit den berechneten Volumenanteilen der Matrixlegierung und der Verstärkungskomponenten zusammengefasst.

Tabelle 1: Zusammensetzung der hergestellten Schichtverbunde in Volumenanteilen

	I	II	III
AlMg1	80 %	76 %	78 %
Kohlenstofffasergewebe	20 %	-	10 %
Stahldrahtgewebe	-	24 %	12 %

Bild 3 zeigt die für die Erwärmung des Schichtaufbaus verwendete Infraroterwärmungsanlage, sowie die am Institut für Umformtechnik vorhandene hydraulische Hochgeschwindigkeitspresse, die im Bereich der teilflüssigen Formgebungsverfahren zum Einsatz kommt.



Bild 3: Infraroterwärmungsanlage und Hochgeschwindigkeitspresse

3. Mechanische Kennwerte der hergestellten Schichtverbunde

Aus den gefertigten plattenförmigen Bauteilen wurden Zugproben nach DIN 50125 – E 4 × 10 × 35 entnommen. **Bild 4** zeigt repräsentative Verläufe der Spannung in Abhängigkeit von der Dehnung für die hergestellten Werkstoffverbunde sowie der Matrixlegierung AlMg1 [6]. Durch das Einbringen von Kohlenstofffasern konnten mit dem Schichtverbund des Typs I die Zugfestigkeit im Vergleich zum reinen Matrixwerkstoff um etwa 30 % auf 240 MPa gesteigert werden. Die Bruchdehnung des Verbundwerkstoffs ist aufgrund des verschiedenen Dehnungsvermögens der Kohlenstofffasern mit weniger als 0,4 % sehr gering. Die Kombination von Stahldrahtgewebe (Typ II) mit der Aluminiummatrix führt zu einer deutlichen Verringerung der Zugfestigkeit auf 135 MPa, bei einer annähernden Verdoppelung der Bruchdehnung. Grund für die starke Abnahme der Zugfestigkeit sind die zur Zugrichtung quer liegenden Drähte des Gewebes, die zum einen den Matrixwerkstoff schwächen und zum anderen durch die Umlenkung der in Zugrichtung liegenden Drähte eine Spreizwirkung im Verbund bei Zugbeanspruchung hervor-

rufen. Bei der Betrachtung des Verlaufs der Spannung für den Typ III Hybridwerkstoff wurde festgestellt, dass hier vor allem der Einfluss der Kohlenstofffasern auf die mechanischen Eigenschaften des Verbundes dominiert. Die geringere Zugfestigkeit und die geringfügig höhere Bruchdehnung im Vergleich zum Typ I sind auf den geringeren Volumenanteil der Kohlenstofffasern zurückzuführen.

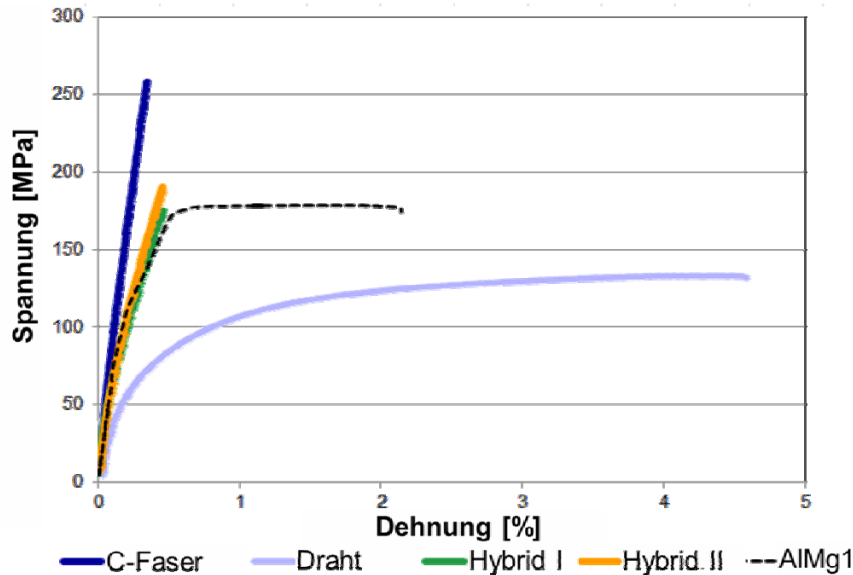


Bild 4: Gemessene Spannungs-Dehnungs-Verläufe der hergestellten Hybridwerkstoffe

Die in **Tabelle 1** angegebenen Werte für die Volumenanteile der eingebrachten Verstärkungskomponenten, sind die Summe der Volumenanteile in Quer- und Längsrichtung der plattenförmigen Bauteile. Da die bei den Zugversuchen quer zur Zugrichtung liegenden Fasern und Drähte keine verstärkende Wirkung besitzen, ist der tatsächliche Volumenanteil, d.h. der Anteil, der zur Verstärkung des Schichtverbundes beiträgt, deutlich geringer. So liegt beim Kohlenstofffasergewebe (Leinwandbindung 3K/1K) nur ein Anteil von 75 % der Fasern in Zugrichtung und beim Stahldrahtgewebe sogar nur 50 %. Durch eine Erhöhung des Volumenanteils der Kohlenstofffasern im Schichtverbund ist eine weitere Steigerung der Zugfestigkeit zu erwarten, wobei die Orientierung der Fasern möglichst beanspruchungsgerecht erfolgen sollte.

4. Metallografische Untersuchungen

Bild 5 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme eines geätzten Schliffs des hybriden Werkstoffsystems des Typs III. Der Aufbau des Schichtverbundes mit den abwechselnden Lagen der Kohlenstoff- und Stahldrahtgewebe lässt sich deutlich erkennen. In den einzelnen Schichten des Kohlenstofffasergewebes lassen sich die Faserbündel in Kettenrichtung (quer liegende C-Fasern) und in Schussrichtung (senkrecht liegende C-Fasern) abgrenzen. Dabei wird auch der unterschiedliche Volumenanteil der Kohlenstofffasern in Ketten- und Schussrichtung erkennbar. Generell kann mit dem bisher erreichten Stand der Technik von einer guten Infiltrationsgüte der Fasern und Drähte mit Matrixwerkstoff gesprochen werden, da keine Poren und Lunker auftreten und die AlMg1-Matrix auch zwischen den einzelnen Filamenten des Fasergewebes eingedrungen ist.

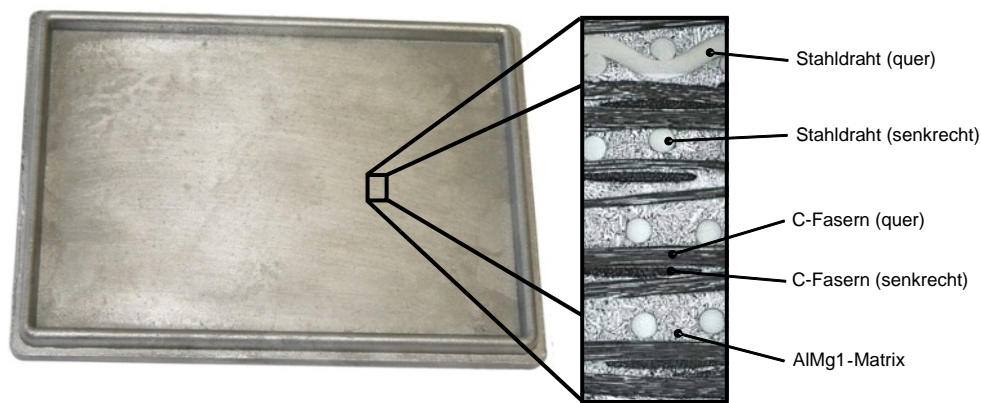


Bild 5: Längsschnitt durch den hergestellten Hybridwerkstoff-Plattenbauteil (Typ III)

Eine gute Infiltration der Kohlenstofffasermatten mit der Aluminiummatrix wird in **Bild 6** bei höherer Vergrößerung ebenfalls bestätigt. Auch hier sind keine Poren zu erkennen und selbst die engsten Bereiche zwischen den einzelnen Filamenten wurden von der AlMg1-Legierung umschlossen.

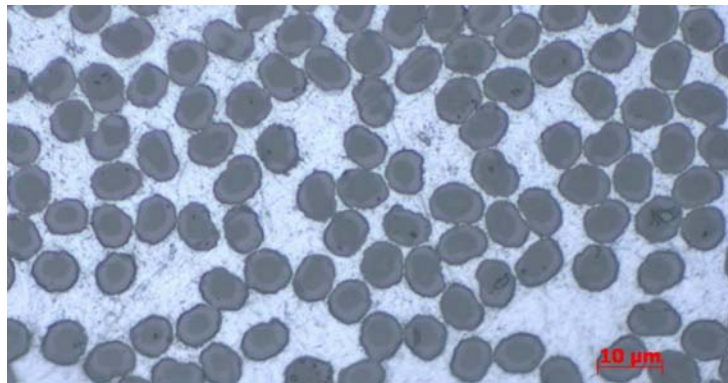


Bild 6: Kohlenstofffasern in der Aluminiummatrix

5. Werkzeug zur Herstellung eines hybriden Kraftumlenkelements

Für erste Untersuchungen zur Herstellung eines hybriden Kraftumlenkelements wurde ein Versuchswerkzeug entwickelt, mit dem verschiedene Hebelgeometrien mit integrierten Lagerbohrungen erzeugt werden können. Durch partielles Verschließen des Formhohlraums lassen sich wahlweise Bauteile mit zwei oder drei Tragarmen herstellen. In **Bild 7** sind der Aufbau des Versuchswerkzeugs und die herstellbaren Hebelformen, die sich in der Anzahl der Tragarme und deren Länge unterscheiden, dargestellt. Aufbauend auf den Forschungsergebnissen der Voruntersuchungen an den gezeigten Hebelbauformen, wird im Rahmen des Forschungsvorhabens ein Formgebungswerkzeug konstruiert, mit dem das intelligent agierende Kraftumlenkelement für den Demonstrator 'Schalentragswerk' hergestellt wird [8].

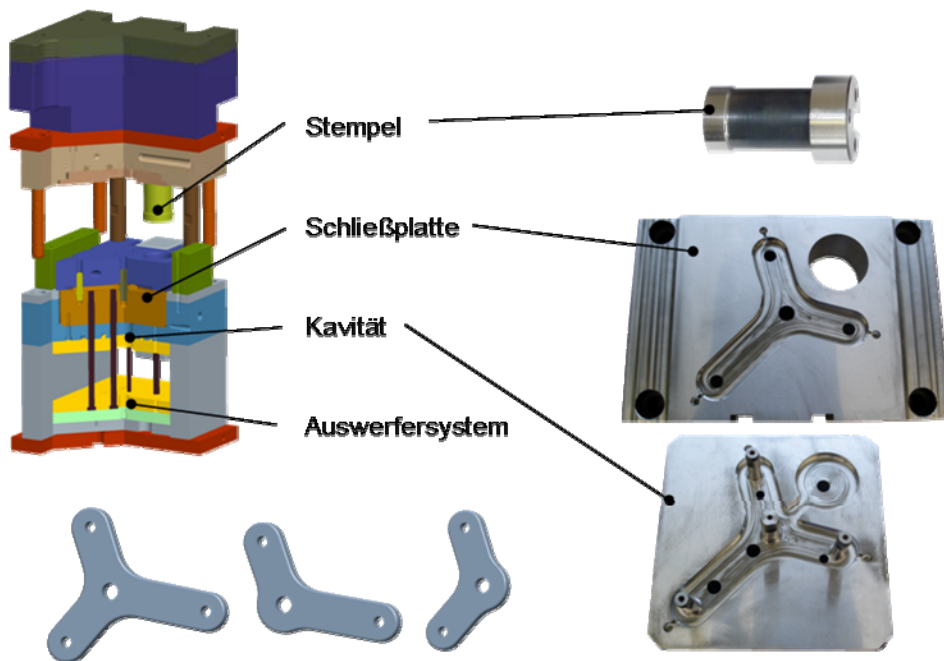


Bild 7: Aufbau des Versuchswerkzeugs und die damit herstellbaren Bauteilgeometrien

Das Versuchswerkzeug wird mittels elektrischer Hochleistungsheizpatronen temperiert, um den Wärmefluss vom Werkstück in das Werkzeug zu reduzieren und eine vorzeitige Erstarrung des noch nicht vollständig ausgeformten Bauteils zu vermeiden. Dabei werden die Heizelemente konstruktiv so angebracht, dass sich die Wärmeeinbringung auf den Bereich der formgebenden Werkzeugteile konzentriert. Durch die Anbringung von Isolierplatten wird eine thermische Entkopplung des Werkzeugs von der Presse gewährleistet. **Bild 8** zeigt die thermodynamische Simulation der Wärmeverteilung im Versuchswerkzeugs, das auf eine Zieltemperatur von etwa 300 °C erwärmt wird.

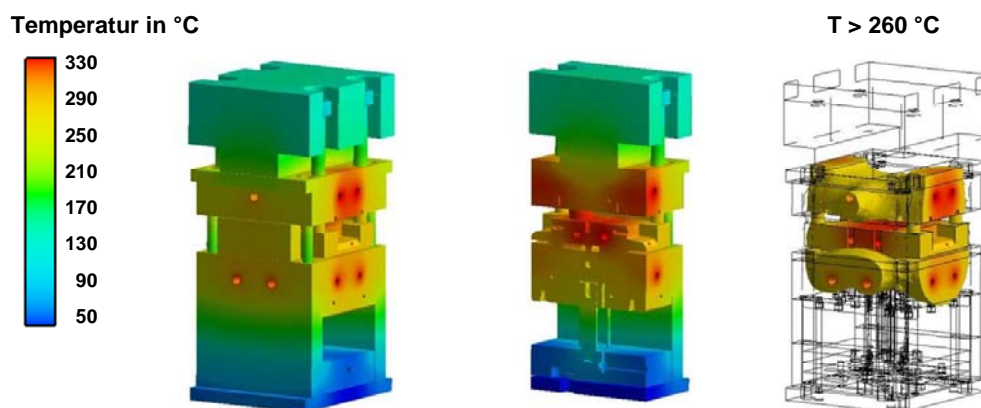


Bild 8: Numerisch berechnete Wärmeverteilung im Versuchswerkzeug

Ähnlich wie bei der thermodynamischen Auslegung werden bei der strömungstechnischen Gestaltung der Werkzeuge für die teilflüssige Formgebung numerische Berechnungsmethoden eingesetzt [7]. Zur Abbildung des Werkstoffflusses werden heute CFD-Programme (CFD: Compu-

tational Fluid Dynamics) verwendet, mit deren Hilfe sich die Formfüllung untersuchen und auch optimieren lässt. Damit kann beispielsweise die Anbringung und Gestaltung von Überläufen im Vereinigungsbereich geteilter Materialströme geprüft werden, um bei Bedarf konstruktive Änderungen an der Bauteilgeometrie beziehungsweise am Werkzeug vorzunehmen. Zur Berücksichtigung der werkstoffspezifischen fluiddynamischen Eigenschaften im teilflüssigen Zustand dienen Materialkennwerte, die anhand von rheologischen Untersuchungen im Vorfeld der Simulationsrechnungen messtechnisch erfasst und in die numerische Berechnung als Parameter des zeit- und scherratenabhängigen Viskositätsmodells übernommen werden. **Bild 9** zeigt die mittels CFD-Simulation berechnete Formfüllung des Kraftumlenkelements mit drei Tragarmen und den Verlauf des Temperaturprofils für eine AlSi7Mg0,3-Matrixlegierung.

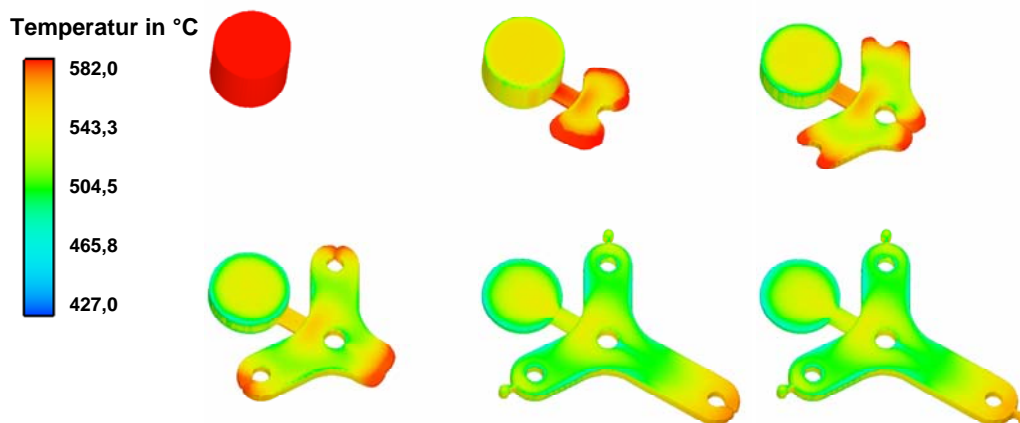


Bild 9: Werkstofffluss und Temperaturprofil bei der semi-solid Formgebung eines Kraftumlenkelements mit drei Tragarmen

Im Rahmen der ersten Formgebungsuntersuchungen wurden Lagerschalenelemente aus Messing in das genannte Hebelbauteil eingebracht (siehe **Bild 10**). Die Messinghülsen sind mit je vier radialen und zwei axialen Nuten versehen. Die Nuten werden bei der Formfüllung mit Aluminiummatrix umschlossen und dienen anschließend als Verdrehsicherung.

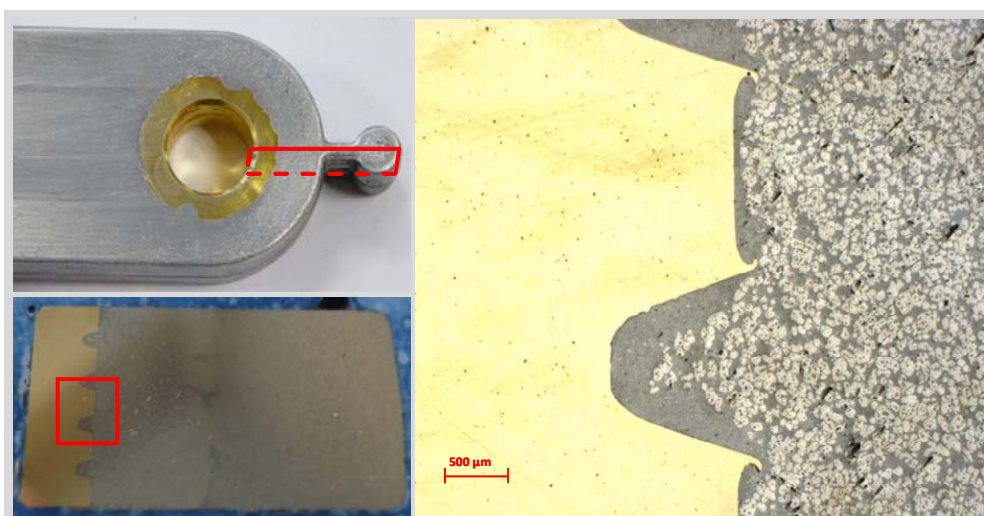


Bild 10: Probenentnahme und Aufnahme mit Schnitt durch die eingeschmiedete Messinghülse

Die makroskopische Betrachtung der hergestellten Versuchsbauteile lieferten zunächst recht zufrieden stellende Ergebnissen. Entlang der Grenzflächen wurden keine Poren, Lunker oder sonstige optisch sichtbaren Störungen oder Verunreinigungen erkennbar. Die mikroskopischen Aufnahmen zeigten jedoch dass sowohl im Kern- als auch im Randbereich eine ungleichmäßige Verteilung der flüssigen Phase vorliegt. Zudem liegen in beiden Fällen α -Mischkristalle mit eingeschlossenem Eutektikum vor. Im Kernbereich sind außer den primären auch sekundäre α -Mischkristalle zu sehen. Dies bedeutet, dass bei der Erwärmung außer der eutektischen Phase auch bereits Teile des α -Mischkristalls aufgeschmolzen wurden.

Durch die Optimierung der Prozessparameter in weiteren Untersuchungen soll die ungleichmäßige Verteilung der dendritischen Flüssigphase im Grenzflächenbereich minimiert werden. Außerdem soll durch die Einbringung von definiert gewickelten Drähten oder Fasern die Festigkeit nachhaltig erhöht werden (siehe **Bild 11**).

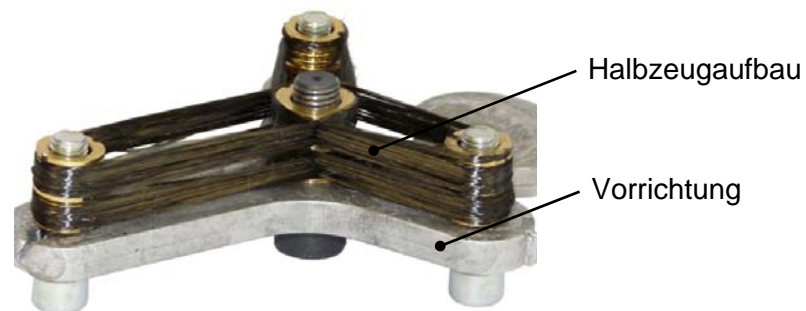


Bild 11: Halbzeugaufbau für die Herstellung eines hybriden Hebelbauteils durch semi-solid Formgebung

Hierbei werden im nächsten Schritt endlos Kohlenstoffasergarne um den Messinglager gewickelt. Diese Fasern werden von den eingebrachten umlaufenden Nuten der Hülsen vertikal in Position gehalten und dienen hauptsächlich zur Aufnahme von Zugkräften, deren Angriffspunkte in den äußeren Lagerstellen der Hebelarme liegen. Sie verleihen der Aluminiummatrix durch eine signifikante Erhöhung des E-Moduls eine hohe Steifigkeit bei geringerer Bruchdehnung.

6. Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung der vorgestellten Arbeiten durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe FOR 981 „Hybride intelligente Konstruktionselemente“.

7. Literatur

[1] Liewald, M.; Unseld, P.: Bauteil auf Basis eines Hybridwerkstoffes, Europäische Patentanmeldung, Anmeldedatum: 13.03.2007; Patentnummer: 07005138.8-2122.

[2] Kertesz, L.; Liewald, M.; Unseld, P.: Das Kompetenzzentrum Gießen und Thixo-Schmieden – Ein Beispiel für vernetzte Forschung, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Int. Konferenz, 2009, Felbach, Hrsg. M. Liewald, MAT INFO, ISBN 978-3-88355-374-0.

- [3] Unseld, P.; Siegert, K.; Gadow, R.; v. Niessen, K.: Herstellung langfaserverstärkter Strukturbauteile durch Thixo-Schmieden, Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Int. Konferenz, 2005, Fellbach, Hrsg.: M. Liewald, MAT INFO Werkstoff Informationsgesellschaft
- [4] Liewald, M. Unseld, P.: New Potentials for Lightweight Part Design of MMC utilising Semi-Solid Forming Technology, International Conference on Product Design and Manufacturing System, PDMS 2007, Chongqing, China, 12-15, October 2007
- [5] Siegert, K.; Unseld, P.; Baur, J.; Arzt, E.; Kauffmann F.; v. Niessen, K.: Thixoforging of continuous fiber-reinforced AlSi/AlMg-alloys, International Journal of Machine Tools and Manufacture; Volume 46, Issue 11, September 2006, pp. 1227-1232
- [6] Unseld, P.: Ein Beitrag zur Herstellung metallischer Verbundwerkstoffe durch teilflüssige/thixotrope Formgebung, Dissertation an der Universität Stuttgart; 2009
- [7] Kertesz, L.: Werkzeug- und Prozesstechnik für die semi-solid Formgebung von Leichtmetallwerkstoffen, Abschlusskolloquium Center of Competence for Casting and Thixoforging, 12.10.2009, Stuttgart.
- [8] Liewald, M.: Werkzeug- und Prozesstechnik für die teilflüssige Formgebung biokompatibler Werkstoffe, FTK 2010 Fertigungstechnisches Kolloquium Stuttgart, Gesellschaft für Fertigungstechnik in Stuttgart, 2010