

# dIALOG

**Materialwissenschaft und Werkstofftechnik**

**Analyse**



**Beratung**

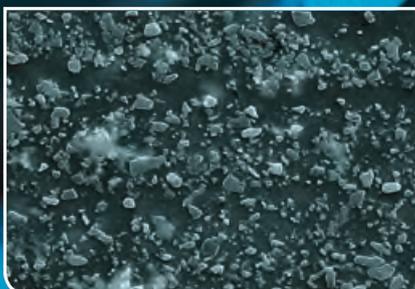
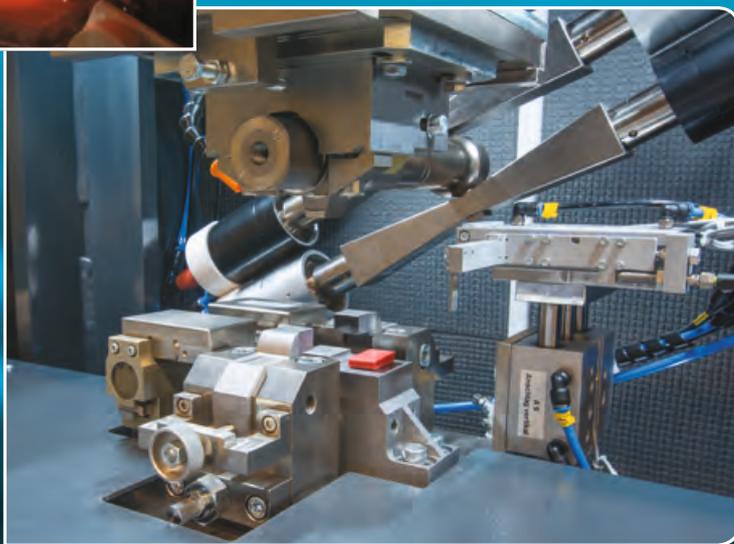
**Produktlösungen**

**Arbeitskreise**

**Fachausschüsse**

**Fortbildungen**

**Tagungen**



Die Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V. vertritt die Interessen ihrer Mitglieder – als Garant für eine kontinuierlich inhaltliche, strukturelle und personelle Weiterentwicklung des Fachgebiets der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.

**DGM**

ISSN 2193-3383

# Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde mit umfassendem Forschungsportfolio

Die Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde der Technischen Universität Chemnitz besteht bereits seit mehr als 20 Jahren und wird seit Juli 2014 durch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Guntram Wagner geleitet. Die Forschungsfelder der Professur sind breit gefächert und reichen von der Entwicklung sowie der Funktionalisierung von Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden über das Löten und wärmearme Fügen bis hin zur Legierungsentwicklung und der hochauflösenden Mikrostrukturanalyse. Sie bietet somit sowohl wissenschaftlichen als auch industriellen Forschungspartnern vielfältige Möglichkeiten für gemeinsame Kooperationen. Die zentralen Forschungsschwerpunkte werden im Folgenden vertieft dargestellt.

## Verbundwerkstoffe

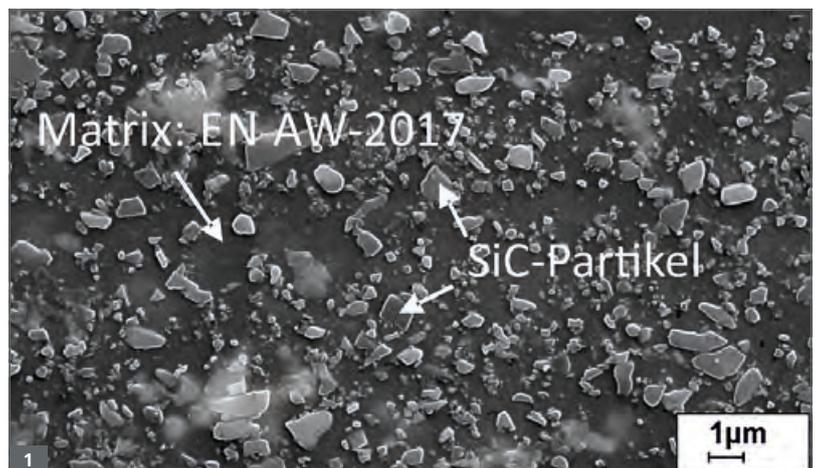
Ein zentraler Forschungsschwerpunkt ist die Herstellung, Charakterisierung und Funktionalisierung von Verbundwerkstoffen mit metallischer, keramischer und polymerer Matrix. Ein weiterer Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten liegt auf der Faserbeschichtung für ein angepasstes Grenzflächendesign bzw. der Funktionalisierung dieser Werkstoffgruppe.

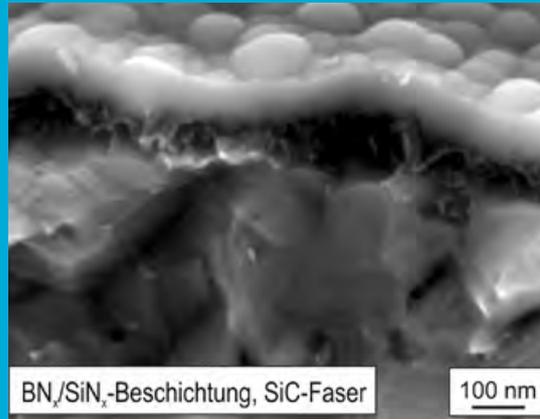
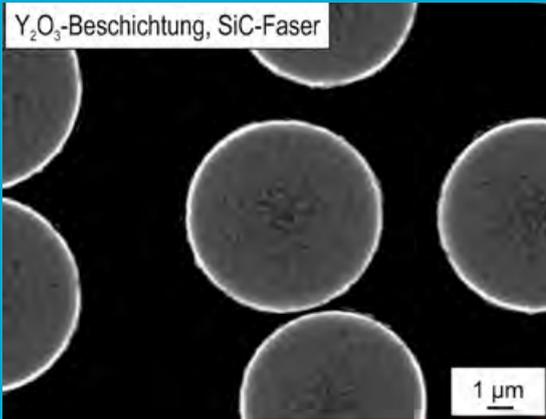
## Metallmatrix-Verbundwerkstoffe (MMCs)

Eine signifikante Erweiterung der Einsatzgrenzen von Leichtbauteilen gelingt vor allem durch die Entwicklung innovativer Verbundwerkstoffe auf Basis konventioneller Leichtmetalle. Bei Aluminium lässt sich dies eindrucksvoll durch im Werkstoff fein verteilte Hartstoffpartikel realisieren. Bei diesen sogenannten Aluminiummatrix-Verbundwerkstoffen (AMCs) (vgl. Abb. 1) wird eine Verbesserung

der mechanischen Eigenschaften, wie E-Modul, Festigkeit und Streckgrenze von Aluminiumlegierungen durch eine Verstärkung mit SiC- oder  $Al_2O_3$ -Partikel erreicht. Der Einfluss der Verstärkung auf die einzelnen Eigenschaften hängt maßgeblich von Art, Größe, Menge und Verteilung der eingebrachten Hartstoffpartikel ab. Eigene Forschungsarbeiten im Rahmen des SFB 692 HALS belegen, dass fein- und nanoskalige Partikel ( $< 2 \mu m$ ) die Streckgrenze einer EN AW-2017 von 275 MPa auf bis zu 540 MPa erhöhen können. Dies entspricht einer Steigerung von fast 100 %. Die möglichst homogene Verteilung der Verstärkungskomponente in der Aluminiummatrix ist dabei essentiell für die Eigenschaftsverbesserung und wird erst

Abb. 1: Partikelverstärkter Aluminiummatrix-Verbundwerkstoff.





3

durch die geeignete Kompaktierung eines speziell entwickelten Verbundpulvers erreicht. Dazu werden die Hartstoffpartikel mit dem Aluminiumlegierungspulver in einem Hochenergiemahlprozess verarbeitet. Anschließend wird das Verbundpulver über einen heißisostatischen Pressprozess (HIP) oder durch feldaktiviertes Sintern zum kompakten AMC verarbeitet. Diese pulvermetallurgische Route erlaubt es, durch Zugabe weiterer Elemente während des Mahlprozesses, einzelne Eigenschaften des AMC gezielt zu beeinflussen. So ist es bspw. gelungen, die geringe Kriechfestigkeit von AMCs durch Zugabe von Bor erheblich zu verbessern. [1]

### Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe (CMCs)

Faserverstärkte Keramikmatrix-Verbundwerkstoffe (CMCs) besitzen hervorragende chemische, thermische

und mechanische Eigenschaften. Sie werden zum Beispiel als Bremscheibenwerkstoff in Sportwagen eingesetzt. Ein bekannter Vertreter dieser Gruppe ist kohlenstofffaserverstärkter Kohlenstoff, welcher mit Silizium infiltrierte wird (C/C-SiC) (vgl. Abb. 2). Die herkömmliche Prozessroute dieser CMCs umfasst mehrere aufwendige Schritte aus Herstellung des kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffes, Pyrolyse und Silizierung mit langen Zykluszeiten. Die Generierung von serientauglichen Herstellungsverfahren ist daher ein wesentlicher Schlüssel, um diesen Verbundwerkstoff in marktfähige Produkte zu überführen. Die Substitution des bisher üblichen aufwendigen Handlaminierprozesses durch einen großserientauglichen Formgebungsprozess, wie dem Spritzgießen, kann die Herstellungsrouten dieser Werkstoffe wesentlich verbessern. Dies erfordert die Entwicklung von

Abb. 3: Faserbeschichtung von SiC-Faserbündel mittels CVD.

geeigneten Kohlenstoff-Precursoren für den Spritzgießprozess sowie deren Charakterisierung bzgl. Porosität und Verarbeitbarkeit für die weiteren Prozessschritte. Ziel ist es, eine großserientechnische Herstellung von C/C-SiC-Verbunden zu erreichen. Wissenschaftliche Fragestellungen wie die Anpassung des Faser/Matrix-Interface im Verbundwerkstoff durch Faserbeschichtung sowie das Fügen und die Weiterverarbeitung zu Werkstoffverbunden sind Bestandteil dieser Forschungsarbeiten. [2]

### Faserbeschichtung

Ein geeignetes Interface zwischen Fasern und Matrix ist für die Qualität eines Verbundwerkstoffes von entscheidender Bedeutung. Funktionen wie Rissablenkung, Diffusionsunterdrückung oder Schutz vor Korrosion können über die Beschichtung der Verstärkungsfasern erreicht werden. Einen weiteren Schwerpunkt eigener Forschungsarbeiten stellt die Beschichtung von Multifilamentfasern mittels chemischer Gasphasenabscheidung (CVD) dar. Mit dem Verfahren ist es möglich, bis in den Kern eines Faserbündels gleichmäßige und homogene Schichten aus  $Y_2O_3$ , BN und SiN sowie Kombinationen daraus auf SiC-Multifilamente abzuscheiden (vgl. Abb. 3). Die beschichteten Fasern sind für die

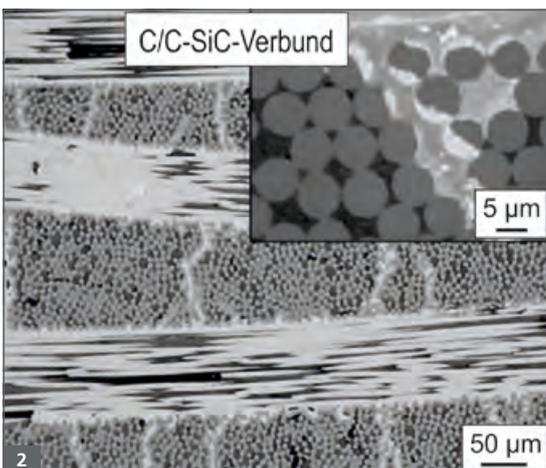


Abb. 2: Keramikmatrix-Verbundwerkstoff.

2

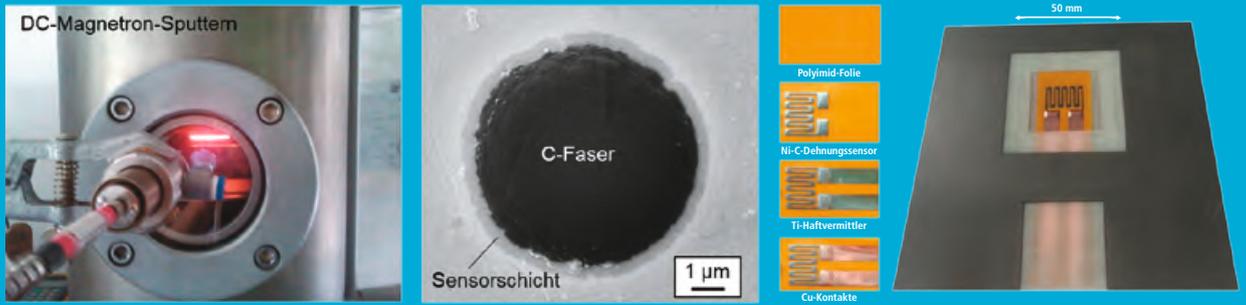


Abb. 4: Funktionalisierung von Kohlenstoffeinzelfasern und Dünnschichtbeschichtung für artefaktfreie sensorische Anwendungen in Verbundwerkstoffen.

schmelzmetallurgische Integration in Titanmatrix-Verbundwerkstoffe vorgesehen. Neben diskontinuierlichen Beschichtungsexperimenten zur Grundlagenforschung wird die CVD-Anlagentechnik aktuell für eine kontinuierliche Beschichtung der Faserbündel erweitert, um die textiltechnische Verarbeitung der Fasern zu ermöglichen. [3]

#### Funktionsintegration in Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden

Um die Funktionalität neuartiger Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde qualitativ abzusichern, ist die Entwicklung von intrinsischen Zustandsüberwachungssystemen unerlässlich. Durch Structural Health Monitoring (SHM) werden bspw. zulässige mechanische Spannungen innerhalb von Faser-Kunststoff-Verbunden gemessen. Die Hauptaktivitäten der Forschung an der Professur auf diesem Gebiet liegen insbesondere in der Abscheidung und Untersuchung von folienbasierten Dünnschichtsensoren sowie funktionalisierten Kohlenstoffeinzelfasern. Diese bieten die Möglichkeit, artefaktfreie Sensorsysteme für faserverstärkte Kunststoffe zu gestalten. Die sensorisch aktiven Schichtsysteme auf Basis von NiC und NiTi werden durch das DC-Magnetron-Sputtern abgeschieden. Ziel ist es, eine höhere Sensitivität im Vergleich zu handelsüblichen Dehnungssensoren und eine orts aufgelöste Messung zu erreichen (vgl. Abb. 4). [4]

#### Werkstoffverbunde

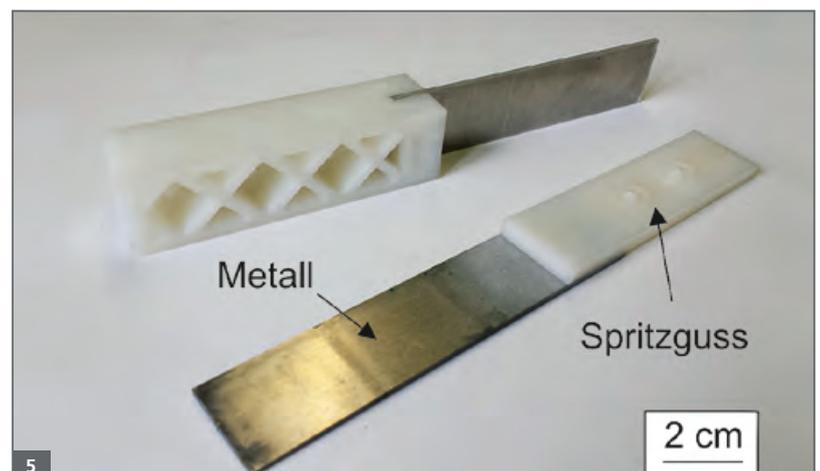
Das stoffschlüssige Verbinden artgleicher oder artfremder Werkstoffe stellt vor dem Hintergrund einer zunehmenden Materialvielfalt in technischen Konstruktionen ein wichtiges Forschungsgebiet dar. Die Arbeiten der Professur konzentrieren sich in diesem Bereich vorwiegend auf Metall/Metall- sowie Metall/CFK(GFK)-Verbunde und die geeignete Gestaltung der Grenzfläche. Ein weiteres Tätigkeitsgebiet ist die Erzeugung von Schichtverbunden aus Metall und thermoplastischen faserverstärkten Kunststoffschichten, den sogenannten hybriden Laminaten, welche im Rahmen des Bundesexzellenzclusters MERGE an der TU Chemnitz in den letzten Jahren intensiv erforscht wurden.

#### Metall/Kunststoff-Verbunde

Metall/Kunststoff-Verbunde besitzen ein großes Potenzial für industrielle

Anwendungen. Diese Werkstoffverbunde vereinen die geringe Dichte und vielseitige Verarbeitbarkeit der Kunststoffe sowie die hohe Steifigkeit und Festigkeit des Metalls. Die Realisierung solcher Verbunde setzt werkstoff- sowie einsetzungsgerechte Fügeverfahren voraus. Ein wichtiger Schwerpunkt der eigenen Forschungstätigkeiten liegt dabei in der Gestaltung eines innovativen Übergangsbereiches (z. B. Draht- oder Schaumstrukturen) sowie eine spezielle Vorbehandlung von metallischen Einlegern die durch Spritzgießen mit Kunststoff verbunden werden (vgl. Abb. 5). [5]

Abb. 5: Metall/Kunststoff-Verbund hergestellt im Spritzgießverfahren.



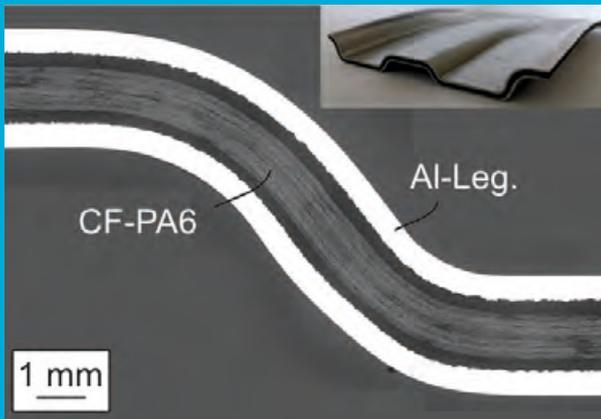


Abb. 6: Umgeformtes hybrides Laminat.

### Hybride Lamine

Eine weiterer Forschungsschwerpunkt sind hybride Lamine, bestehend aus Schichten von Leichtmetallen und faserverstärkten Kunststoffen. Diese Schichtverbunde können durch Variation der Werkstoffe sowie Anzahl, Dicke und Orientierung des faserverstärkten Kunststoffes ein breites Eigenschaftsprofil abdecken. Die thermoplastische Matrix ermöglicht eine effiziente und kostengünstige Herstellung bei gleichzeitig guter Umformbarkeit und Recyclingfähigkeit. Durch die Integration zusätzlicher Dünnschichtensoren (Feuchtigkeit, Dehnung) lassen sich hybride Lamine hervorragend funktionalisieren. Die Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde beschäftigt sich mit den Kombinationen von Leichtmetalllegierungen auf Basis von Al, Mg und Ti und faserverstärkten thermoplastischen Kunststoffen wie Polyamid 6. Insbesondere die Lösungswege zur Realisierung einer hohen Adhäsion zwischen den einzelnen Schichten

werden wissenschaftlich untersucht (vgl. Abb. 6). [6]

### Löten

Das Löten ermöglicht die Herstellung einer Vielzahl von Verbindungen innerhalb komplexer Baugruppen in einem Prozessschritt. Die eigene Forschung im Bereich des Lötens gliedert sich in drei Hauptfelder. Neben Untersuchungen im Bereich des Hart- und Weichlötens, werden auch Lotentwicklung und Lotmodifikation sowie die Entwicklung und Optimierung von Lötprozessen wissenschaftlich untersucht.

### Hart- und Weichlöten

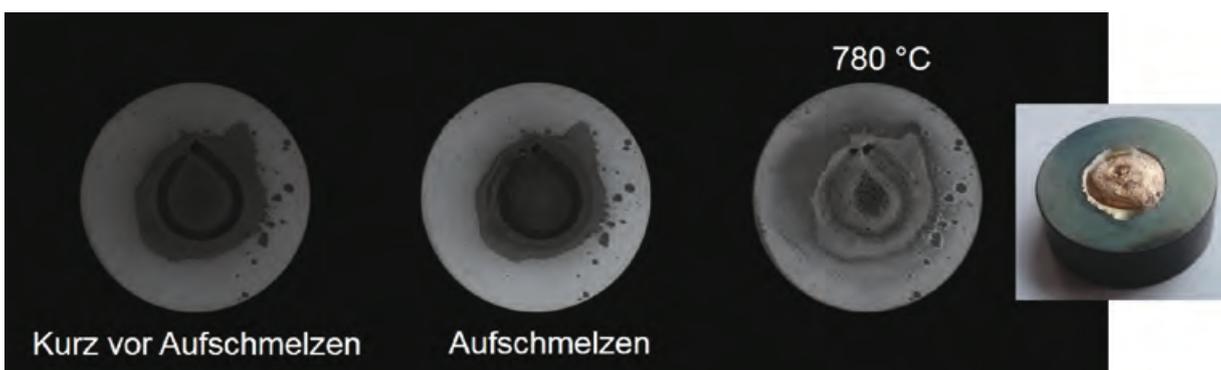
Die Forschungsthemen reichen von zuverlässigen Weichlötverbindungen in der Elektrotechnik bis hin zu hochfesten und temperaturbeständigen Hartlötverbindungen von rost- und säurebeständigen Stählen. Derzeit stehen besonders Untersuchungen des Benetzungs- und Fließverhaltens von Hartloten (vgl. Abb. 7), der Einfluss der Lötatmosphäre auf die

Lebensdauerfestigkeit von Lötverbindungen sowie das Aktivlöten von Metall-Keramik-Verbindungen im Fokus der Betrachtungen. [7]

### Lotentwicklung und Lotmodifikation

Die stetige Weiterentwicklung von Lötprozessen erfordert auch eine kontinuierliche Entwicklung und Modifikation von Lotwerkstoffen. Hierbei kann auf seit vielen Jahren bestehende Erfahrungen in der Entwicklung von Eisenbasisloten zurückgegriffen werden. Dabei stehen insbesondere Untersuchungen der Gefüge-Eigenschafts-Beziehungen und der Korrosionsbeständigkeit für den Einsatz der Lote in trinkwasserkontaktierten Bauteilen im Vordergrund. Ferner wurden zum Hochtemperaturlöten von mechanisch und thermisch stark belasteten Bauteilen neuartige Cobaltbasislote

Abb. 7: Untersuchung des Benetzungsverhaltens von Hartloten.



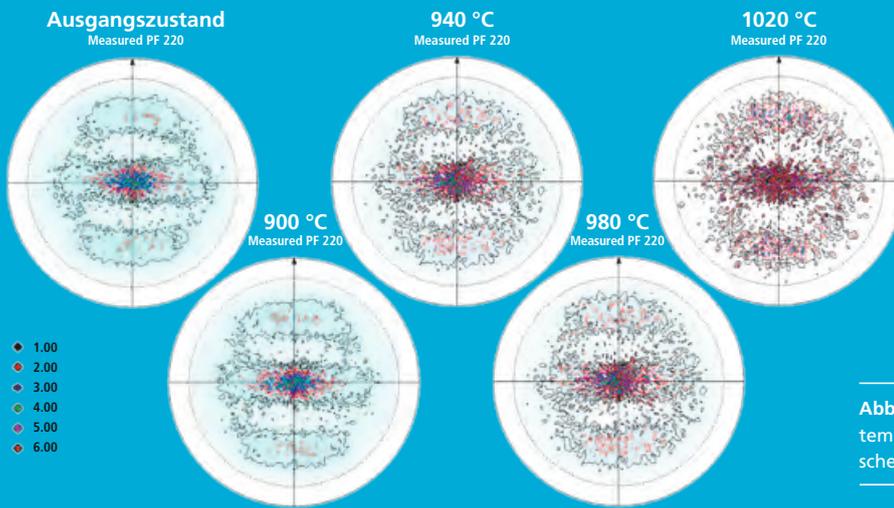


Abb. 9: Einfluss der Wärmebehandlungstemperatur auf die Textur von austenitischem Stahl.

an der Professur Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde entwickelt, mit denen die von vielen Hochtemperaturloten bekannte, spaltbreitenabhängige Sprödphasenbildung vermieden werden kann. Zudem werden niedrigschmelzende Al-Basislote für das Löten von Aluminium-Stahl-Mischverbindungen betrachtet (vgl. Abb. 8), um die Bildung intermetallischer Fe/Al-Phasen zu vermeiden und damit die Lebensdauer der Verbindungen zu erhöhen. [8]

#### Entwicklung und Optimierung von Lötprozessen

Zur Herstellung zuverlässiger Lötverbindungen ist eine exakte Prozessführung essentiell. Die Weiterentwicklung und Überwachung von Lötprozessen trägt da-

bei entscheidend zur Verbesserung der Eigenschaften von auf diese Weise erzeugten Verbindungen bei. Neben Ofenlötprozessen, Induktionslötprozessen und ultraschallunterstützten Widerstandslötprozessen werden auch Lichtbogenlötprozesse mit sehr stark lokalisierter Energieeinbringung sowie Wärmebehandlungsstrategien zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit gelöteter Plattenwärmeübertrager untersucht (vgl. Abb. 9). [9]

#### Wärmearme Fügeverfahren

Die Forschungsaktivitäten im Bereich der wärmearmen Fügeverfahren untergliedern sich in die drei Hauptthemenfelder temperatursensitives Fügen mit Nanopartikeln, Rührreibschweißen (Friction Stir Welding –

FSW) und Ultraschallschweißen. Derartige wärmearme Fügeverfahren, bei denen mit Fügetemperaturen deutlich unterhalb der Schmelztemperaturen der Fügepartner gearbeitet wird, bieten zahlreiche Vorteile bei der Realisierung artgleicher und artfremder stoffschlüssiger Fügeverbindungen.

#### Temperatursensitives Fügen mit Nanopartikeln

Nanopartikel weisen eine verringerte Schmelz- und Sintertemperatur im Vergleich zum entsprechenden Massivmaterial auf. Nach dem Schmelz- und Sinterprozess der Partikel während des Fügevorganges, liegen jedoch die Eigenschaften des Massivmaterials vor. Damit können Verbindungseigenschaften erreicht werden, die einer Hartlötverbindung

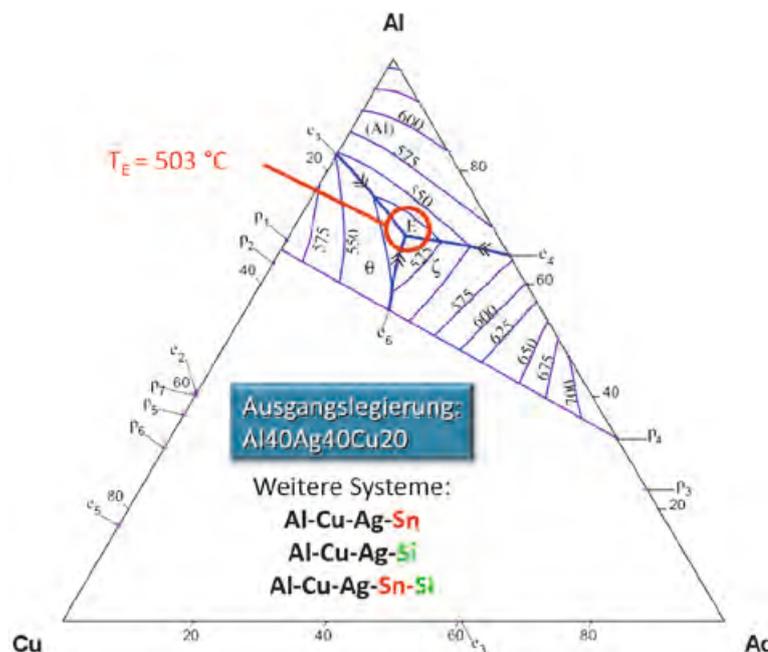
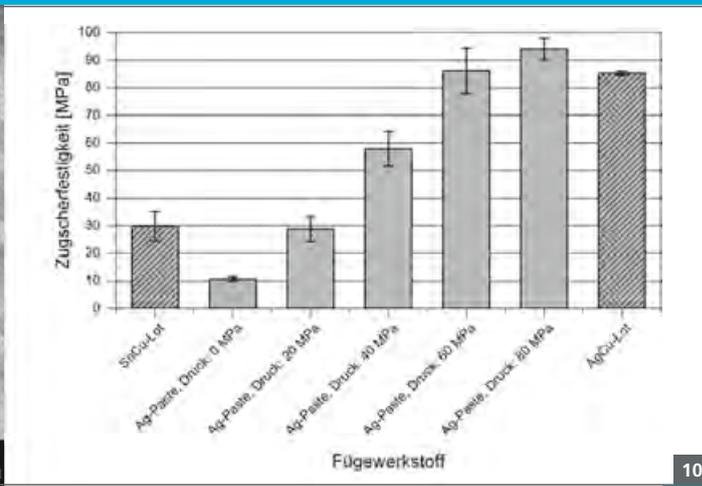
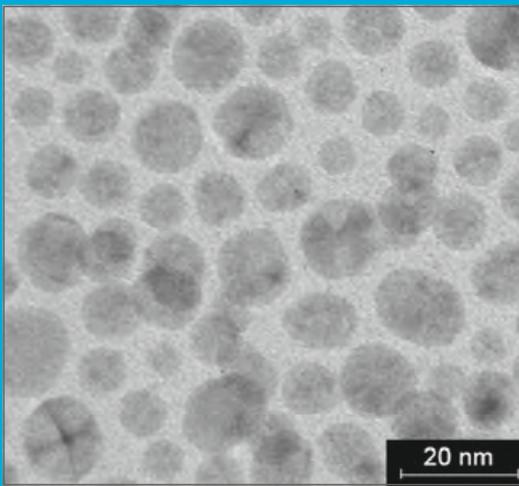


Abb. 8: Ternäres Phasendiagramm zur Entwicklung niedrigschmelzender Al-Lote. (Quelle: G. Effenberg et al.: Light Metal Systems. Part 1: Ag-Al-Cu (Silver – Aluminium – Copper). Landolt-Börnstein, Volume 11A1 (2004) 1-7.)



10

entsprechen, während die Fügtemperatur im Bereich des Weichlötens liegt. Diese Möglichkeit, hochfeste und temperaturbeständige Verbindungen bei gleichzeitig niedrigen Fügtemperaturen herzustellen, ist für eine Vielzahl von Fügeaufgaben von großem Interesse. So können bspw. Gefügeveränderungen wie Kornwachstum und Rekristallisationsvorgänge der Grundwerkstoffe, aber auch thermisch induzierte Eigenspannungen beim Fügen von Grundwerkstoffen mit unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten vermieden werden. Die Professur beschäftigt sich bisher insbesondere mit dem Fügen metallischer, polymerer und keramischer Substrate mittels Ag- und Ni-Nanopartikeln (vgl. Abb. 10). [10]

### Rührreibschweißen (Friction Stir Welding – FSW)

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt im Bereich des wärmearmen Fügens setzt sich mit dem Rührreibschweißen, welches zu den Festphasenfügeprozessen zählt, auseinander. Dieses Verfahren zeichnet sich durch seine Robustheit, sehr hohe Verbindungsfestigkeiten sowie eine hundertprozentige Dichtheit der Fügeverbindungen aus. Weiterhin ist dieses Verfahren sehr gut geeignet, artfremde, als schwer oder nicht schweißbar geltende Werkstoffpaarungen wie bspw. Aluminium/Stahl, Aluminium/Titan oder Aluminium/Magnesium hochwertig miteinander zu verbinden (vgl. Abb. 11), weswegen sich der Einsatz dieses Verfahrens besonders für Leichtbauanwendungen anbietet.

Abb. 10: TEM-Aufnahme von Ag-Nanopartikeln (links) und erreichbare Zugfestigkeiten mit Ag-Nanopartikeln im Vergleich zu einem Weich- und Hartlot (rechts).

Die beim Schmelzschweißen für derartige Verbindungen auftretenden und häufig schädlichen, charakteristischen spröden intermetallischen Phasen können beim wärmearmen FSW weitgehend vermieden werden. Mit dem an der Professur entwickelten hybriden Verfahren des ultraschallunterstützten Rührreibschweißens (USE-FSW) kann zudem die Ausbildung und Verteilung der noch verbliebenen Sprödphasen gezielt beeinflusst und damit negative Auswirkungen auf die Verbundfestigkeiten weiter reduziert werden.

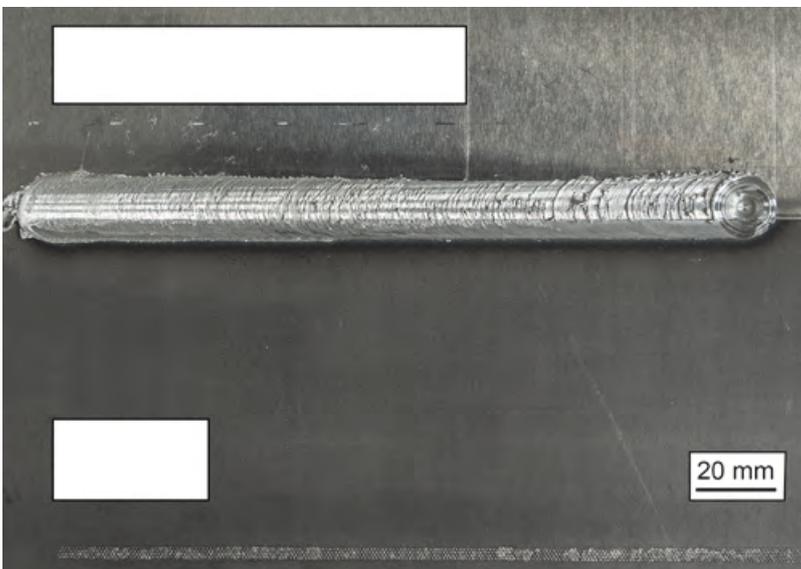


Abb. 11: USE-FSW-Verbund Aluminium/Stahl (EN AW-6061/C45).



Abb. 12: Arbeitsraum des zur Verfügung stehenden PowerWheel-Ultraschallschweißsystems.



Abb. 13: Erschmelzen einer Eisenbasislegierung im Induktionsschmelzofen.

Ferner besteht mit der vorhandenen Technologie die Möglichkeit zum generativen Schweißen sowie durch die Variante Friction Stir Processing zur Beeinflussung der mechanischen Oberflächeneigenschaften von Werkstoffen. An der Professur werden diese Technologien aktuell hinsichtlich ihrer Eignung für Hochleistungswerkstoffe wie Metallmatrix-Verbundwerkstoffe oder hochfeste Stähle betrachtet. Für die Durchführung von Forschungs- und Industrieprojekten in diesem Bereich stehen ein parallelkinematisches 5-Achs-Bearbeitungszentrum sowie über ein für das Rührreißschweißen modifiziertes Universalbearbeitungszentrum zur Verfügung. [11]

#### Ultraschallschweißen

Das Ultraschallschweißen ist ebenfalls den Festphasenfügeprozessen zuzuordnen. Dieses Verfahren ist überaus wirtschaftlich, gut automatisierbar und zeichnet sich durch geringe Zykluszeiten aus; ein Schweißprozess dauert in der Regel zwischen 500 ms und 2 s. Aus diesem Grund findet es bereits in der industriellen Serienfertigung verbreitete Anwendung. An der Professur werden vorwiegend drei verschiedene Einleitungsarten des Leistungultraschalls in die Fügepartner untersucht. Zur linearen Einleitung von Ultraschall steht ein

System mit einer Generatorleistung von 6,5 kW zur Verfügung, welches sich beispielsweise zum Fügen von Einzeldrähten und Folien oder dem Aufbau von Schichtverbunden eignet. Weiterhin wird ein torsionales Ultraschallschweißsystem mit einer Generatorleistung von ebenso 6,5 kW verwendet, mit welchem sich auch gasdichte und sonst nur schwer fügbare Verbindungen erzeugen lassen. Untersuchungsgegenstand ist hier insbesondere die Erzeugung von Verbunden aus Glaskeramiken und Metallen. Zur Fertigung von Litze-/Ableiternverbunden oder Spleißverbindungen existiert zudem ein spezielles Ultraschallschweißsystem mit einer Leistung von 10 kW, welches aufgrund der neuartigen wiegenden Abrollbewegung der torsional angeregten Sonotrode in der Lage ist, besonders große Litzenquerschnitten mit bis zu 240 mm<sup>2</sup> miteinander zu verschweißen (vgl. Abb. 12). [12]

#### Legierungsentwicklung/ Metallurgie

Für den Verschleißschutz von Anlagen und Bauteilen kommen oftmals Oberflächenbeschichtungen durch thermisches Spritzen oder Auftragschweißen zum Einsatz. In diesem Bereich beschäftigt sich die Professur mit der Entwicklung neuartiger Legierungen, mit denen richtungsweisende industrielle Anwendungsfelder im Fahrzeug- und Turbinen-

bau erschlossen werden können. Hierzu stehen ein Labor-Lichtbogenofen sowie eine Schmelzverdüngungsanlage zur Pulverherstellung im industrienahen Maßstab zur Verfügung (vgl. Abb. 13). Aktuell befasst sich die Professur mit der Entwicklung und Optimierung von verschleißbeständigen Eisenbasislegierungen mit hohen Hartstoffgehalten, hoch schlag- und abrasionsbeständigen Legierungen für Verschleißschutzschichten sowie carbidverstärkten Fe-Basislegierungen mit guter Korrosionsbeständigkeit. [13]

#### Werkstoffcharakterisierung

Die Charakterisierung des Zustandes von Werkstoffen, Verbundwerkstoffen, Werkstoffverbunden sowie von Ausgangsstoffen gliedert sich in drei Hauptfelder.

Im Rahmen der Materialografie und Mikrostrukturanalyse wird der Ausgangs- bzw. Behandlungszustand von Proben oder Bauteilen analysiert. Sowohl die Charakterisierung des Werkstoffgefüges einschließlich der Identifikation der Gefügebestandteile als auch die Charakterisierung von Randschichten und inneren Grenzflächen sind grundlegende Bestandteile der Forschungsprojekte und Auftragsuntersuchungen der Professur. Auf diese Weise können die Bedingungen im Herstellungs- bzw.

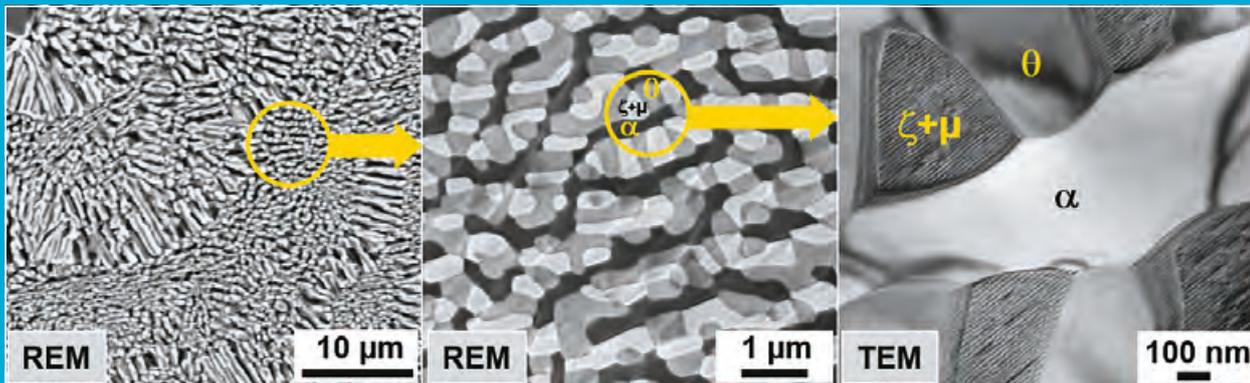


Abb. 14: Elektronenmikroskopische Gefügebildungen an einem Al-Ag-Cu-Lotwerkstoff mit eutektischem Gefüge aus den Phasen Al-Mischkristall ( $\alpha$ ),  $\text{Al}_2\text{Cu}$  ( $\theta$ ) und der lamellaren Phasenmischung  $\text{Ag}_2\text{Al}$  ( $\zeta$ ) +  $\text{Ag}_3\text{Al}$  ( $\mu$ ).

Behandlungsprozess effektiv kontrolliert, optimiert und Verknüpfungen mit dem erzielten Eigenschaftsprofil hergestellt werden. Nach der Schliifpräparation erfolgen die lichtmikroskopische Untersuchung und gegebenenfalls die erforderliche quantitative Bestimmung von Gefügeparametern im Metallografie Labor. Weiterführende mikroskopische und analytische Untersuchungen werden im Elektronenmikroskopielabor durchgeführt. An den Rasterelektronenmikroskopen werden die energiedispersive Röntgenmikrobereichsanalyse (EDX) und das Verfahren der Rückstreuungselektronenbeugung (EBSD) eingesetzt. Zusätzlich wird ein konfokales Raman-Imaging-System für die analytische Untersuchung von Proben mit polymeren oder keramischen Bestandteilen genutzt. Bei Bedarf werden mikroskopische und analytische Untersuchungen am Transmissionselektronenmikroskop angeschlossen. Die Ergebnisse münden in eine Gefüge- oder Grenzflächencharakterisierung mit einer der Aufgabenstellung entsprechenden Detaillierung (vgl. Abb. 14).

Im Rahmen der Werkstoffanalyse und -prüfung kommen verschiedene Verfahren zum Einsatz. Mittels simultaner Thermoanalyse können in Abhängigkeit von der Temperatur Masseänderungen, Phasenumwandlungen und das Schmelzverhalten

bestimmt werden. Ein Dilatometer erlaubt die Aufzeichnung der thermischen Ausdehnung bei steigender sowie sinkender Temperatur. Mit der Kleinlast- und Mikrohärtprüfung mit Vickersindenter als auch mit der registrierenden Mikrohärtprüfung zwecks Ermittlung der Martenshärte kommen ortsaufgelöste Verfahren zur Bestimmung der Härte in ausgewählten Bauteilzonen und Härteverläufe zum Einsatz. Das Festigkeitsverhalten kleinformatiger Proben unter statischer Biege- oder Zugbelastung wird in speziellen Mikroprüfmodulen in situ entweder am Lichtmikroskop oder am Rasterelektronenmikroskop ermittelt. Hinzu kommt eine Zugprüfeinrichtung für einzelne Fasern. Die Ermüdungseigenschaften verschiedenster Werkstoffe können über die reguläre Dauerfestigkeit hinaus zukünftig mittels eines Very High Cycle Fatigue Systems (VHCF) bestimmt werden. Dabei werden die jeweiligen Ermüdungsproben mit einer hochfrequenten Ultraschallschwingung im Bereich von 20 kHz beaufschlagt, wodurch Lastspielzahlen bis  $10^9$  in einem zeitlich angemessenen Rahmen erreicht werden können.

Im Rahmen der Fehler- und Schadensanalyse findet die Untersuchung und Bewertung fehlerhafter bzw. geschädigter Bauteile statt. Die Analyse erfolgt von der visuellen Betrachtung bis zur rasterelektronenmikroskopi-

schen Untersuchung einschließlich ortsaufgelöster chemischer Analytik an der Oberfläche, Bruchfläche und/oder am Schliif. Ziel ist es, die Art, den Ausgangsort und den Verlauf der Schädigung und letztendlich die Ursache der Schädigung zu ermitteln. [14]

Unser umfangreiches Forschungsportfolio bietet vielfältige Möglichkeiten für gemeinsame Kooperationen, Forschungs- und Entwicklungsaufgaben sowie Dienstleistungen. Sprechen Sie uns an. Wir freuen uns auf Sie!



## Literatur

- [1] S. Siebeck, K. Roder, G. Wagner, D. Nestler: Influence of Boron on the Creep Behavior and the Microstructure of Particle Reinforced Aluminum Matrix Composites. *Metals* 8 (2018) 2, 110.
- [2] D. Nestler, N. Nier, K. Roder, E. Päßler, J. Weißhuhn, A. Todt, H. Würfel, L. Kroll, S. Spange, B. Wielage, G. Wagner: Development and Characterisation of Phenolic Resin Moulding Materials for the Production of New Short Fibre-Reinforced C/C-SiC Composites. *Materials Science Forum* 825-826 (2015) 215-223.
- [3] K. Roder, D. Nestler, D. Wett, B. Mainzer, M. Frieß, L. Wöckel, T. Ebert, G. Wagner, D. Koch, S. Spange: Development of a SiNx-Based Barrier Coating for SiC Fibres. *Materials Science Forum* 825-826 (2015) 256-263.
- [4] D. Wett, D. Nestler, G. Wagner, B. Wielage, T. Seider, J. Martin, T. Gessner: Preparation of Ni-C Thin Films for Strain Sensor Applications in New Hybrid Laminates with Thermoplastic Matrix. *Materials Science Forum* 825-826 (2015) 548-555.
- [5] D. Nestler, C. Döhler, B. Wielage, G. Wagner: Surface and fracture surface analysis of thermally bonded metal/FRP joints. *Materials Science Forum* 825-826 (2015) 328-335.
- [6] D. Nestler, M. Trautmann, S. Nendel, G. Wagner, L. Kroll: Innovative hybrid laminates of aluminium alloy foils and fibre-reinforced thermoplastic layers. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* 47 (2016) 11, 1121-1131.
- [7] V. Fedorov, M. Elßner, T. Uhlig, G. Wagner: Interfacial microstructure and mechanical properties of brazed aluminum/stainless steel-joints. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 181 (2017) 1, DOI: 10.1088/1757-899X/181/1/012009.
- [8] T. Uhlig, S. Weis, B. Wielage, G. Wagner, S. Schuberth: Properties of Newly Developed Co-Based Brazing Fillers. *Welding in the World* 61 (2017) 1, 171-180, DOI: 10.1007/s40194-016-0388-7.
- [9] T. Uhlig, V. Fedorov, M. Elßner, G. Wagner, S. Weis: Reduction of liquid metal embrittlement in copper-brazed stainless steel joints. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 181 (2017) 1, DOI: 10.1088/1757-899X/181/1/012032.
- [10] S. Hausner, S. Weis, B. Wielage, G. Wagner: Low temperature joining of copper by Ag nanopaste: correlation of mechanical properties and process parameters. *Welding in the World* 60 (2016) 6, 1277-1286, doi:10.1007/s40194-016-0381-1.
- [11] M. Thomä, G. Wagner, B. Strass, B. Wolter, S. Benfer, W. Fürbeth: Ultrasound enhanced friction stir welding of aluminum and steel: Process and properties of EN AW 6061/DC04-Joints. *Journal of Materials Science & Technology* 34 (2018) 1, pp. 163-172, DOI: 10.1016/j.jmst.2017.10.022.
- [12] F. Balle, S. Huxhold, G. Wagner, D. Eifler: Damage Monitoring of Ultrasonically Welded Aluminum/CFRP-Joints by Electrical Resistance Measurements. *Procedia Engineering* 10 (2011) 433-438, DOI: 10.1016/j.proeng.2011.04.074.
- [13] S. Schuberth, S. Weis, T. Uhlig, G. Wagner, B. Wielage: Development of alloys with high impact and abrasion resistance for wear-resistant weld overlays, *Welding and Cutting* 15 (2016) 3, pp. 184-187.
- [14] S. Weis, M. Elßner, B. Wielage, G. Wagner: Wetting behavior of AlAgCu brazing filler on aluminum matrix composites and stainless steel. *Welding in the World* 61 (2017) 2, 383-389, doi:10.1007/s40194-016-0416-7.