OIALOG

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.



F. Balle^{1, 2}, S. Backe², M. Becker¹, M. Liesegang², F. Staab¹, D. Weibel²

Alles wird leichter?! Potentiale und Herausforderungen hybrider Werkstoffsysteme

¹Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH), Engineering of Functional Materials, Technische Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

²Fachgebiet Hybride Werkstoffsysteme, Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK), Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, TU Kaiserslautern

Das Ziel leichtere und effizientere Strukturen bei gleichzeitiger Erhöhung von Funktionalität sowie kostenneutraler Fertigung herzustellen, ist durch monolithische Werkstoffkonzepte kaum noch zu erreichen. Vielversprechende Eigenschaftsprofile sind hingegen durch die Entwicklung hybrider Werkstoffsysteme möglich. Ein hybrides Werkstoffsystem entsteht durch die geschickte Kombination von verschiedenen Werkstoffen oder gar Werkstoffklassen mit Hilfe neuer Herstellungsverfahren zu einem Verbundwerkstoff oder alternativ zu einem Werkstoffverbund durch einen materialspezifischen Fügeprozess.



Kontakt

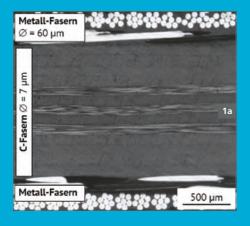
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Institut für Nachhaltige
Technische Systeme (INATECH)
Engineering of Functional Materials
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Balle
Emmy-Noether-Straße 2
D-79110 Freiburg
frank.balle@inatech.uni-freiburg.de
www.inatech.uni-freiburg.de

Im nachfolgenden Beitrag werden ausgewählte hybride Werkstoffsysteme vorgestellt, die aktuellen Herausforderungen im konstruktiven Werkstoffleichtbau begegnen. So wird ein neuer Hybridwerkstoff vorgestellt, der die Eigenschaften von Metallen und polymeren Faserverbundwerkstoffen für Flugzeuganwendungen nutzt, um einerseits leichte Strukturen zu ermöglichen, andererseits aber dennoch elektrisch leitfähig, schadenstolerant und überwachbar zu sein. Anschließend werden weitere Metall/Faserverbund- sowie Multi-Metall-Strukturen diskutiert, die jedoch nicht in einem Herstellungsschritt, sondern durch einen Fügeprozess mittels Leistungsultraschall zu hybriden Werkstoffsystemen werden. Im abschließenden Teil wird ebenfalls auf Basis von Leistungsultraschall ein neues Prüfverfahren zur beschleunigten Ermüdungsprüfung von Faserverbundwerkstoffen vorgestellt, so dass die Anwendung moderner Ultraschalltechnik zum Fügen und Ermüden von hybriden Werkstoffsystemen eine inhaltliche Klammer der Arbeiten bildet.

Metal and Carbon united: Multifunktionale Verbundwerkstoffe durch integrierte Metallfasern

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden auf Grund ihrer hervorragenden gewichtsspezifischen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften insbesondere in der Luftfahrt- und Automobilindustrie eingesetzt. So bestehen die modernsten zivilen Flugzeuge (Boeing 787 und Airbus A350) zu über 50 Gew.-% aus Faserverbundwerkstoffen. Die zunehmend komplexer werdenden Anforderungen an Konstruktionswerkstoffe begrenzen jedoch oftmals das Leichtbaupotenzial von faserverstärkten Primärstrukturen. So sind in aktuellen Flugzeugkonzepten metallische Zusatzmassen nötig, um elektrische Funktionen, wie u.a. Blitzschutz, Signaltransfer oder elektromagnetische Abschirmung des Flugzeugrumpfes zu erfüllen. Ferner führt das spröde Versagensverhalten sowie die unzureichende Schadenstoleranz von CFK zu einer konservativen Auslegung der Strukturen verbunden mit entsprechender Gewichtsbilanz. Frühere Lösungsansätze zur Verbesserung der elektrischen Eigenschaften konzentrierten sich auf eine Modifikation des Matrixsystems, leider bislang ohne die erhoffte Steigerung der elektrischen Leitfähigkeit. In einem Gemeinschaftsprojekt mit dem Institut für Verbundwerkstoffe (IVW GmbH, Kaiserslautern) ist ein neuartiger Verbundwerkstoff entwickelt worden, der durch die zusätzliche Integration von Stahlfasern in ein konventionelles CFK-Laminat die elektrischen Eigenschaften sowie die Schadenstoleranz durch die leitfähigen duktilen Metallfasern verbessert, siehe **Abb.1a**. Untersuchungen an unidirektional verstärkten Metall-/C-Faser-Kunststoffen (MCFK) belegen eine deutliche Steigerung der elektri-



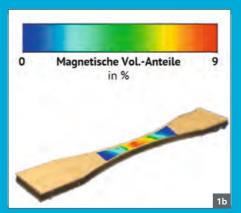


Abb. 1: Entwickelter multifunktionaler Hybridwerkstoff "MCFK":
a) Mikrostruktur (Querschliff), b) Magnetische Volumenanteile einer zyklisch beanspruchten MCFK-Probe infolge verformungsinduzierter Phasenumwandlung.

schen Leitfähigkeit bei gleichzeitig erhöhtem Energieabsorptionsvermögen unter Biege-Zug-Beanspruchung [1]. Ermüdungsexperimente der multidirektionalen Laminate zeigen ebenfalls ein Verbesserungspotential durch MCFK-Laminate im Vergleich zum identisch aufgebauten CFK-Laminat für Luftfahrtanwendungen.

Die gezielt ausgewählten metastabilen CrNi-Stahlfasern bieten ferner die Möglichkeit als intrinsische Schadenssensoren im MCFK synchron genutzt zu werden. In Folge einer mechanischen Verformung wandeln die zunächst paramagnetischen austenitischen Stahlfasern in die ferromagnetische martensitische Phase um. Diese Phasenumwandlung kann durch magnetinduktive Messverfahren zerstörungsfrei nachgewiesen werden. Schädigungen unter dynamischer Impakt-Beanspruchung sowie zyklischer Beanspruchung konnten durch das magnetinduktive Messverfahren reproduzierbar detektiert werden (vgl. Abb.1b). Zusammenfassend zeigt der neue Hybridwerkstoff MCFK ein vielversprechendes Eigenschaftsprofil für zukünftige multifunktionale Leichtbauanwendungen [2].

Ultraschall verbindet! – Fügen von Metall/CFK-Verbunden durch Leistungsultraschall

"Platzhirsch" unter den Fügetechniken im metallischen Flugzeugbau ist nach wie vor das Nieten. Neue

Luftfahrtwerkstoffe wie Faser-Kunststoff-Verbunde stellen diese Technologie vor Herausforderungen. Durch das Einbringen von Bohrungen in Strukturbauteile werden durch Fasern getragene Lastpfade gekappt. Eine Kompensation dieser Schwachstellen durch lokale Verstärkungen führt zu erhöhtem Materialeinsatz. So wird der zunehmende Leichtbaugedanke nicht mehr nur über die Wahl des richtigen Werkstoffs sondern auch durch geeignete Fügeverfahren geprägt. Eine aussichtsreiche Alternative zum stoffschlüssigen Fügen von Leichtmetallen und Faserverbundwerkstoffen stellt das Ultraschallschweißen dar. Hohe Prozessgeschwindigkeiten bei geringem Energiebedarf und somit vergleichsweise niedrige Temperaturen sind vielversprechende Vorteile neben der prinzipiellen Eignung zur Herstellung von Multi-Material-Strukturen. Beim Ultraschallschweißen wird eine

moderate statische Fügekraft Fus auf beide Fügepartner ausgeübt und von einer hochfrequenten Schwingung des Schweißwerkzeugs, der sogenannten Sonotrode, im Ultraschallbereich überlagert (Abb. 2). Durch die Relativbewegung der Fügepartner bei Frequenzen von zumeist 20 kHz entsteht eine stoffschlüssige Verbindung. Mit diesem Schweißverfahren können nicht nur artgleiche Verbunde aus thermoplastischen Kunststoffen oder den meisten Metallen realisiert werden, sondern insbesondere auch artfremde Verbunde. Beispiele hierfür sind Metall/Keramik-, Metall/ Glas- oder Metall/Polymer- bzw. CFK/ GFK-Verbunde [3, 4].

Abb. 2: Ultraschallschweißvarianten für Metall/CFK-Verbunde: Punktschweißen (links), Torsionsschweißen (Mitte), Rollnahtschweißen (rechts).



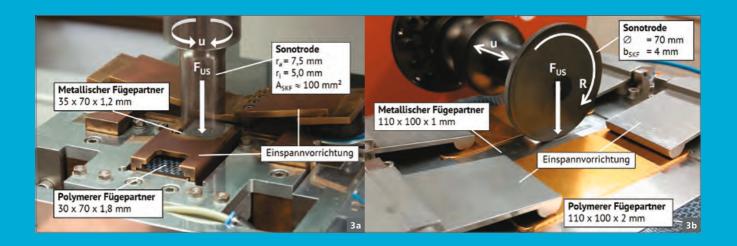


Abb. 3: Ultraschallschweißsysteme für Metall/CFK-Verbunde: a) Torsionsschweißsystem der Fa. Telsonic Ultrasonics b) Rollnahtschweißsystem für ebene Hybridstrukturen der Fa. Branson Ultraschall.

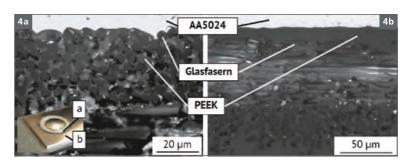
In aktuellen Forschungsvorhaben werden das Ultraschall-Torsionsschweißen sowie das Ultraschall-Rollnahtschweißen als interessante Ultraschallschweißtechnologien für hybride Metall/CFK-Strukturen betrachtet. Im Gegensatz zu einer longitudinalen Ultraschallschwingung u beim Punktschweißen, schwingt das Schweißwerkzeug beim Torsionsprozess namensgebend torsional mit 20 kHz in der Fügeebene (Abb. 3a). Durch den speziellen Aufbau des Schwingungssystems ist ein höherer Energieeintrag in die Fügezone und eine vereinfachte Zugänglichkeit möglich. Das Ultraschall-Rollnahtschweißen ist im Prinzip dem Ultraschall-Punktschweißen sehr ähnlich. Der longitudinalen Schwingung ist zumeist eine zusätzliche Rotation R des Schweißwerkzeuges überlagert, welche einen kontinuierlichen Fügeprozess ermöglicht (Abb. 3b). So lassen sich quasi-endlose Schweißnähte mediendicht herstellen. Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich mit der Entwicklung rohrförmiger Hybridverbindungen.

Der Bindungsmechanismus ultraschallgeschweißter Metall/CFK-Verbunde ist unabhängig von der Ultraschallschweißtechnologie eine Kombination aus Form- und Stoffschluss. Während des Schweißprozesses überträgt die profilierte Sonotrode die Ultraschallschwingungen in den oberen metallischen Fügepartner. Durch die Relativbewegung zwischen den Fügepartnern und die Verformungen im metallischen Fügepartner schmilzt die thermoplastische Matrix an der Grenzfläche Metall/ Faserverbundwerkstoff auf und wird durch die Ultraschallschwingungen nach außen verdrängt. Im weiteren Schweißverlauf kann der metallische Fügepartner so in direkten Kontakt mit den Fasern des Verbundwerkstoffes treten und diese zudem mechanisch umschließen (Abb. 4).

Im Fokus der Untersuchungen stehen jedoch nicht ausschließlich Festigkeitsaspekte. Es werden zudem elektrochemische Wechselwirkungen der Fügepartner und die daraus resultierenden Einflüsse auf die Alterungsbeständigkeit der gefügten Hybridstrukturen betrachtet. Die direkte Werkstoffpaarung Aluminium-Kohlenstoff stellt ein kritisches elektrochemisches Potential dar und birgt somit die Gefahr galvanischer Kontaktkorrosion. Folgende Konzepte werden aktuell untersucht, um dieser werkstofftechnischen Herausforderung beim Einsatz hybrider Werkstoffsysteme zu begegnen:

Beim sogenannten Textilkonzept besitzt der thermoplastische CFK-Fügepartner eine Glasfaserdecklage. Damit wird der Hybridverbund elektrisch entkoppelt und eine Korrosion ausgeschlossen (Abb. 4a). Beim Metallkonzept wird zwischen Aluminium- und CFK-Organoblech eine Titanfolie mittels Ultraschallschweißen eingebracht, die die Potentialdifferenz reduziert und eine korrosionsresistente Übergangsstruktur ermöglicht. Im dritten Konzept werden direkte Hybridverbunde bestehend aus Titan und CFK untersucht, für die ebenfalls keine elektrochemische Kontaktkorrosion zu erwarten ist [5].

Abb. 4: Mikrostruktur eines ultraschallgeschweißten Al/GF-CFK-Verbundes: a) innerhalb und b) außerhalb des Sonotrodeneingriffes.



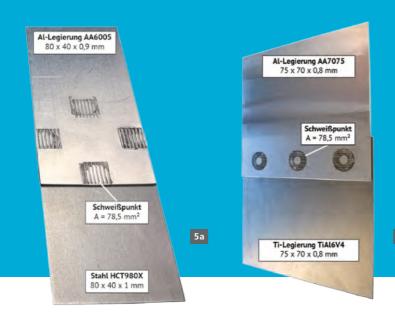


Abb. 5: Ultraschallgeschweißte Multi-Metall-Verbindungen: a) Al/Stahl-, b) Al/Ti-Verbund.

Der Ultraschallschweißprozess besticht nicht nur durch kurze Schweißzeiten. moderate Fügetemperaturen unterhalb der Schmelztemperaturen der Metalle sowie einen robusten Prozess. Alle zentralen Prozessparameter können neben der Prozessregelung direkt zur Bewertung der Verbundqualität genutzt werden. Diese lässt sich einerseits dazu nutzen, den Fügeprozess noch genauer zu verstehen, wie beispielsweise zeitliche Abläufe in der Bindungsbildung. Andererseits können mit Hilfe statistischer Versuchsmethoden Korrelationsmodelle zwischen den Prozessparametern und den resultierenden Eigenschaften einer Hybridschweißung entwickelt und zur qualitätssichernden Prozessbewertung für industrielle Anwendungen genutzt werden. Neben Metall/CFK-Verbindungen können mit den identischen Verfahren auch verschiedene Multi-Metall-Verbunde, wie z. B. Al/Cu, Al/ Stahl oder Al/Ti mittels Metallultraschallschweißen hergestellt werden, die im Nachfolgenden beschrieben werden.

Kurz und schmelzlos – Ultraschallschweißen von Multi-Metall-Verbindungen

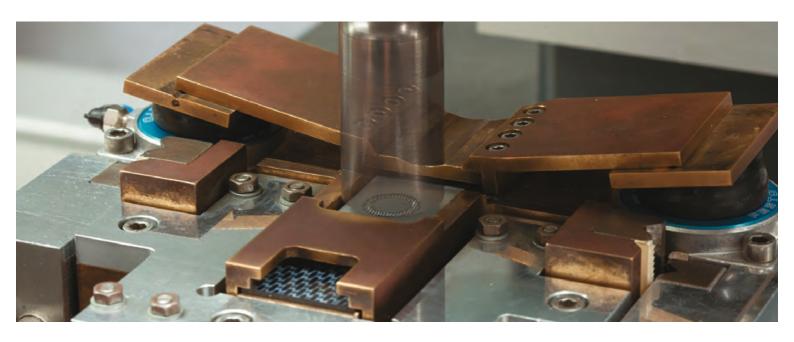
Die Verbindung von Metallen mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen stellt für konventionelle Schmelzschweißverfahren eine große Herausforderung, teilweise sogar ein Hindernis dar. Das Metall-Ultraschallschweißen ermöglicht stoffschlüssige Verbindungen unterschiedlichster Metalle in fester Phase, d.h. ohne ein Aufschmelzen der Fügepartner und somit eine geringe thermische Beeinflussung und Veränderung der Mikrostruktur.

Zur Erzeugung eines Schweißpunktes werden die Ultraschallschwingungen über das Schweißwerkzeug, die Sonotrode, in den oberen Fügepartner eingebracht. Der untere Fügepartner wird zumeist fixiert, um eine Relativbewegung an der Grenzfläche der zu verbindenden Metalle sicherzustellen. Zunächst werden die Werkstoffoberflächen plastisch verformt und angenähert, wodurch Verunreinigungen und Oxidschichten an Rauhigkeitsspitzen lokal abgetragen und in Folge der Ultraschallschwingungen aus der Schweißzone verdrängt werden. Ein direkter metallischer Kontakt juveniler Oberflächen führt zu atomaren Wechselwirkungen, die im weiteren Verlauf der Schweißung durch metallische Bindungen verstärkt werden. Diese Prozesse finden in sehr kurzer Zeit statt. Die Schweißzeiten liegen für Metall/Metall-Verbindungen i.d.R. deutlich unterhalb einer Sekunde. In Verbindung mit dem geringen thermischen Energieeintrag kann die Bildung zumeist spröder intermetallischer Phasen beim Ultraschallschwei-Ben auf ein Minimum begrenzt oder gänzlich vermieden werden.

Aktuell wird das Ultraschall-Punktschweißen u.a. für Aluminium/ Stahl-Verbunde untersucht, die ohne Schweißzusatzstoffe hergestellt werden können. Im Hinblick auf zukünftige automobile Anwendungen werden hierzu im Karosseriebau eingesetzte Legierungen betrachtet. Neben den Auswirkungen eines zinkbeschichteten Stahls auf die Verbundeigenschaften mit Al-Legierungen wird die gegenseitige Beeinflussung mehrerer Schweißpunkte untersucht, um das Punktschweißen auf größere Bauteilabmessungen anwenden und Gestaltungsrichtlinien ableiten zu können. In diesem Zusammenhang werden verschiedene Möglichkeiten zur Fixierung der Blechhalbzeuge sowie Variationen der Punktreihenfolge betrachtet. Neben Al/Stahl-Verbunden wurden auch Al/Ti-Verbindungen mit dem Ultraschallpunktschweißen realisiert (Abb. 5).

Schneller zum Ziel mit Ultraschall: Beschleunigte Ermüdungsprüfung von Verbundwerkstoffen

"They weren't metals, after all, and everyone knew that only metals suffered from fatigue." – Ermüdungsvorgänge, welche die Leistungsfähigkeit von Bauteilen durch zyklische Beanspruchung während ihrer Einsatzdauer reduzieren, treten entgegen der bis noch in die 1970er Jahre reichenden Meinung auch bei polymeren Faserverbundwerkstoffen auf [6]. Die Ermüdungsmechanismen unterscheiden sich jedoch z.T. deutlich von denen metallischer Werkstoffsysteme. Während im Bereich



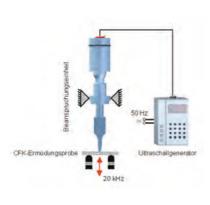
typischer Lebensdauer von bis zu 1 Million Lastzyklen gesicherte Erkenntnisse vorliegen, existieren im Bereich sehr hoher Lastspielzahlen (engl. very high cycle fatigue: VHCF) nur sehr wenige Untersuchungen für GFK- oder CFK-Laminate, wie sie jedoch in Primärstrukturen von Windkraftanlagen und modernen Flugzeugen mit entsprechend langen Lebensdauern von z.T. mehr als 20 Jahren aktuell eingesetzt werden. Ein wesentlicher Grund für die Wissenslücke im Bereich der VHCF-Eigenschaften von CFK sind insbesondere fehlende Ermüdungsprüfkonzepte mit höheren Beanspruchungsfreguenzen bei geringen Lastamplituden, um in vertretbaren Versuchszeiten bis zu eine Milliarde Lastwechsel ohne eine gleichzeitig unzulässige Erwärmung der Verbundwerkstoffe zu erreichen. Diese Werkstoffreaktion ist der viskoelastischen Natur der polymeren Matrixsysteme geschuldet, die zu Energiedissipation durch Dämpfungsvorgänge sowie Grenzflächenreibung

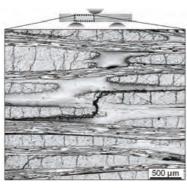
führt. Gleichzeitig wird die resultierende Erwärmung aufgrund der für Polymerwerkstoffe charakteristischen niedrigen Wärmeleitfähigkeit nur langsam abgebaut. Ferner zeigen die mechanischen Eigenschaften der Matrix eine Dehnratenabhängigkeit, die bei erhöhten Prüffrequenzen zu einer Erhöhung des Speichermoduls und einer Reduzierung der viskosen Materialparameter führt.

Einen alternativen Ansatz zur Lösung dieser Herausforderungen stellen Ultraschall-Resonanzprüfsysteme dar, die bereits erfolgreich zur VHCF-Untersuchung metallischer Werkstoffe eingesetzt werden. Die Prüffrequenz der auf Ultraschall (US) basierenden Systeme liegt typischerweise bei 20 kHz. Hinsichtlich der Versuchsführung ist allerdings zu beachten, dass ein dauerhafter Ultraschallimpuls selbst bei niedrigen Spannungsamplituden zu unzulässig starker Probenerwärmung führen würde – übrigens auch bei Metallen [8]. Deshalb wird

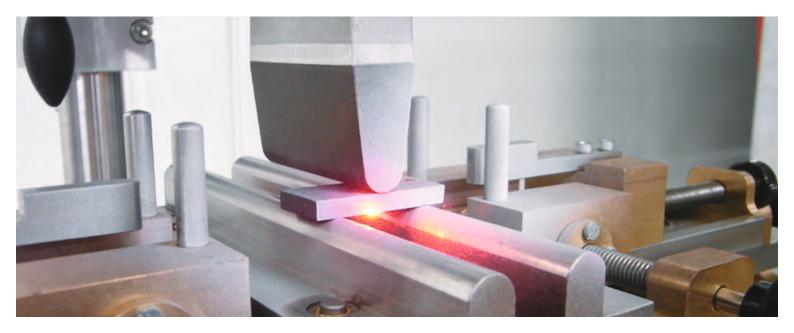
der aufgeprägte Prüfzyklus in modernen US-Systemen zumeist in eine Beanspruchungs- und eine Kühlphase aufgeteilt. Die folgende reale Beanspruchungsfrequenz von ca. 1000 Hz liegt aber immer noch erheblich höher als bei konventionellen Prüfkonzepten. So wird eine Grenzlastspielzahl von 1 Milliarde ($N = 10^9$) bereits nach 12 Tagen für CFK erreicht. Um das Prüfkonzept der Ultraschallermüdung auf polymere Faserverbundwerkstoffe anzuwenden, wird die Probengeometrie material- und prüfspezifisch so ausgelegt, dass die Probe bei einer Anregungsfrequenz von ~20 kHz im ersten transversalen Biegeeigenmode schwingt. Die weggeregelten Ermüdungsexperimente induzieren in Folge der 3-Punkt-Biege-Beanspruchung sowohl Schubals auch Zug- und Druckspannungen

Abb. 6: Versuchsprinzip für 3-Punkt-Biege-Beanspruchung von CFK bei 20 kHz (links), Mikrostruktur nach einem VHCF-Experiment: CF-PPS (Mitte), CF-EP (rechts).









in den Prüfkörpern. Mittels Thermographie, Laser-Doppler-Vibrometrie und hochdynamischen Kraftsensoren wird jedes Ultraschallermüdungsexperiment überwacht. Das patentierte Versuchsprinzip ist in [9] näher beschrieben. Erste lebensdauerorientierte Untersuchungen wurden für kohlenstofffasergewebeverstärktes Polyphenylensulfid (CF PPS) sowie Epoxidharz (CF EP) realisiert. Im Vergleich zu CF-PPS zeigt CF-EP erwartungsgemäß eine deutliche höhere absolute Ermüdungsschubfestigkeit [10]. Bezogen auf die interlaminare Schubfestigkeit liegt die normierte Ermüdungsschubfestigkeit der beiden Werkstoffsysteme mit etwa 50% der quasistatischen Eigenschaften auf einem Niveau. Die Schädigungsmechanismen weisen hingegen aufgrund der Matrix- und Laminateigenschaften erhebliche Unterschiede auf (Abb. 6). Untersuchungen zum Frequenzeinfluss sind Bestandteil zukünftiger Arbeiten. Zudem soll das Prüfkonzept weiterentwickelt und für weitere Verbundwerkstoffe sowie Werkstoffverbunde genutzt werden.

Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten sind in verschiedenen Forschungsvorhaben entstanden, die durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanziell unterstützt wurden und werden. Die Autoren möchten ferner den Kollegen/innen am Lehrstuhl für Werkstoffkunde (WKK), am Institut für Verbundwerkstoffe (IVW) der TU Kaiserslautern sowie den Projektpartner der Firmen Airbus (Bremen, Hamburg), PFW Aerospace (Speyer), CTC (Stade) sowie Toyota Motor Europe (Belgien) für die konstruktiven Diskussionen und die Bereitstellung von Werkstoffen danken.

Literatur und Referenzen

- [1] B. Hannemann, S. Backe, S. Schmeer, F. Balle, U.P. Breuer: Metal fiber incorporation in carbon fiber reinforced polymers (CFRP) for improved electrical conductivity, Mat. Sci. and Eng. Techn., 47 (2016), p. 1015-1023.
- [2] B. Hannemann, S. Backe, S. Schmeer, F. Balle, U.P. Breuer: Hybridisation of CFRP by the use of continuous metal fibres (MCFRP) for damage tolerant and electrically conductive lightweight structures, Composites Structures, 172 (2017), p. 374-382.
- [3] G. Wagner, F. Balle, D. Eifler: Ultrasonic Welding of Hybrid Joints, Journal of the Minerals, Metals & Materials Society JOM, 64 (2012), p. 401-406.
- [4] G. Wagner, F. Balle, D. Eifler: Ultrasonic Welding of Aluminum Alloys to Fiber Reinforced Polymers, Adv. Eng. Mat., 15 (2013), p. 792-803.
- [5] F. Staab, F. Balle, J. Born: Ultrasonic Torsion Welding of Aging Resistant Al/CFRP Joints Concepts, Mechanical and Microstructural Properties, Key Engineering Materials, 742 (2017), p. 395-400.
- [6] F. Balle, J. Magin: Ultrasonic Spot and Torsion Welding of Aluminum to Titanium Alloys: Process, Properties and Interfacial Microstructure, Physics Procedia 70 (2015), p. 846-849.
- [7] B. Harris: Fatigue in composites: Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics, Boca Raton, Fla, Cambridge (UK), CRC Press, 2003.
- [8] S. Heinz, F. Balle, G. Wagner, D. Eifler: Analysis of fatigue properties and failure mechanisms of Ti6Al4V in the very high cycle fatigue regime using ultrasonic technology and 3D laser scanning vibrometry, Ultrasonics, 53 (2013), p. 1433-1440
- [9] D. Backe, F. Balle and D. Eifler: Fatigue testing of CFRP in the very high cycle fatigue (VHCF) regime at ultrasonic frequencies, Composites Science and Technology, 106 (2015), p.93-99.
- [10] D. Weibel, F. Balle and D. Backe: Ultrasonic Fatigue of CFRP Experimental Principle, Damage Analysis and Very High Cycle Fatigue Properties, Key Engineering Materials, 742 (2017), p. 621-628.