

# FÜGEN VON THERMOPLAST-DUROPLAST-HYBRIDEN MIT FUNKTIONSIMTEGRATIVER VERSIEGELUNG

S. Jarka; O. Hellbach; M. Heckl, DLR BT, Augsburg, Deutschland; S. Bauer, DLR BT Stuttgart, Deutschland; M. Löbbcke, DLR WF, Köln, Deutschland; N. Menke, DLR SY, Stade, Deutschland; T. Karrasch, Universität Augsburg, Augsburg, Deutschland

## Zusammenfassung

Es werden die in Luftfahrtstrukturen relevanten Materialkombinationen und deren Verarbeitungsprozesse zusammengefasst und durchgeführte Analysen aufgezeigt. Dabei werden Hybride aus Werkstoffkombinationen, deren unterschiedliche Vorbehandlungs- und Verarbeitungsverfahren sowie Anwendungsbeispiele beleuchtet.

Zum Fügen von Hybridverbindungen werden im DLR Projekt FraME (Function Integrated Fuselage for a Minimum Emission Aircraft) ausgewählte, anwendungsnahe Bauweisen und Fertigungstechnologien für Rumpfstrukturen weiterentwickelt. Bei „Demonstrator 2“ des Projekt-Konsortiums liegt der Fokus auf einer duroplastischen, kohlefaserverstärkten Haut, die mit thermoplastischen Versteifungsstrukturen und integrierten Niedervolt-Leitungen ergänzt wird.

## 1. EINLEITUNG

Um das Leichtbaupotential sowie die fertigungstechnische Effizienz für Luftfahrtstrukturen maximal auszureizen, kann eine Kombination von Werkstoffklassen unumgänglich sein. Bei einer CFK-Bauweise sind Schnittstellen zu metallischen Strukturen außerdem unumgänglich. Dabei kann es sich um Schnittstellen im flächigen Format handeln, etwa bei einer Mischbauweise in der Primär- und Sekundärstruktur, oder um kompakte, aber durchaus hoch belastete Hybridverbindungen, beispielhaft bei der Anbindung der CFK-Struktur zum Seitenleitwerk.

Erfolgsversprechende Halbzeuge bestehen in der Regel aus duroplastischen oder thermoplastischen Kohle- oder Glasfaserverbunden, aus Aluminium oder Titan. Die Vielfalt bringt jedoch neue Herausforderungen im Bereich der Füge- und Montagetechnik mit sich. Das werkstoffgerechte Verbinden von unterschiedlichen Materialien mit den hohen Anforderungen an die Fügung erfordert die Weiterentwicklung der Fertigungstechnologien sowie die vertieften Untersuchungen der erreichbaren Anbindungsqualität.

Bei der Fügeverbindung kann es sich um eine reine stoff- und/oder formschlüssige Anbindung des Matrixwerkstoffs durch den Einsatz geeigneter Materialkombinationen und -modifikationen handeln, oder aber um eine Kombination mit dem mechanischen Fügen.

## 2. HYBRIDVERBINDUNGEN

Eine Vielzahl an Hybridverbindungen wird durch mechanisches Fügen hergestellt. Dadurch wird der Einfluss der Halbzeug-Materialien reduziert. Klassisches Verkleben, speziell von thermoplastischen Matrices, ist zwar möglich, aufgrund der Werkstoffeigenschaften aber generell eher schwierig.

An dieser Stelle soll vor allem die Verbindung durch eine stoff- und/oder formschlüssige Anbindung des Matrixwerkstoffs durch den Einsatz geeigneter Materialkombinationen und -modifikationen sowie angepasste Prozessführungen betrachtet werden.

Eine besonders offensichtliche Variante einer Hybridbaugruppe ist der Verbund aus CFK und metallischem Halbzeug. Hierbei wird metallseitig die Oberfläche vorbehandelt, um eine hohe Anbindungsqualität zu erreichen. CFK-seitig kann das Herstellen der Verbindung im Urformprozess oder nachgeschaltet erfolgen. Es kommen also klassische CFK-Prozesse wie Pressverfahren, auch in Kombination mit Insert-Techniken, aber genauso thermische Fügeverfahren in Betracht.

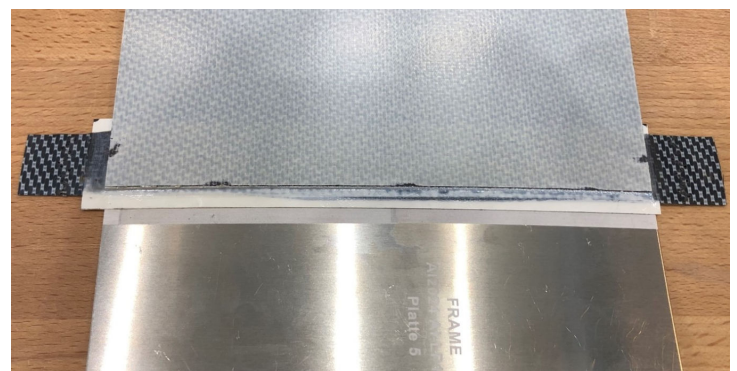


BILD 1. Durch elektrisches Widerstandsschweißen gefügte Hybridprobe aus oberflächenvorbehandeltem Aluminium (AL2024) und thermoplastischem Gewebelaminat (CF PPS) [1]

Eine andere Variante ist die Kombination aus duroplastischem und thermoplastischem CFK. Die Matrixsysteme unterscheiden sich verarbeitungsseitig deutlich. Auch hier kann die Fügung mit der Herstellung der duroplastischen Komponente erfolgen und muss im

Herstellprozess der Halbzeuge bereits berücksichtigt werden. Ein nachgeschaltetes Verbinden durch angepasste Schweißprozesse oder in einem chemischen Reaktionsprozess ist möglich. Eine bekannte Kombination mit praxistauglicher Verbindungsqualität sind Epoxidharze (Hexcel HexFlow® RTM6) und PEI. [2]

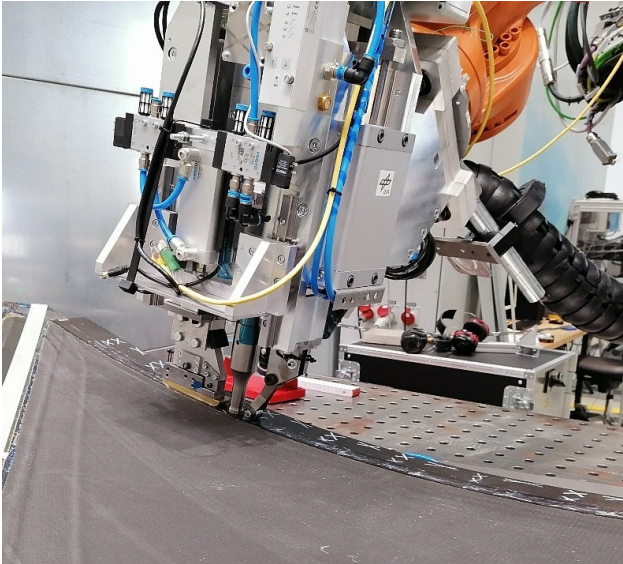


BILD 2. Thermoplastische Oberflächenmodifikation ermöglicht Verschweißen von duroplastischen Laminatstrukturen [3]

Die Kombination unterschiedlicher Thermoplaste kann durch deren unterschiedliche Eigenschaften und Kosten, aber auch aufgrund der im Folgenden noch beschriebenen Funktionalisierung von Interesse sein. Dabei muss auf die Kompatibilität untereinander geachtet werden. Diese ist zum einen durch die chemische Mischungsneigung, aber auch durch die Verarbeitungsparameter gegeben.

Auch gleiche Werkstoffpaarungen mit unterschiedlicher Herstellhistorie können den Hybriden zugeordnet werden. Betrachtet man thermoplastische CFK-Bauweisen, sind Kombinationen aus thermogeformten, heißgepressten und AFP-gelegten oder gewickelten Strukturen anzutreffen.



BILD 3. Lamine aus identischen CF und Matrix, aber mit unterschiedlichen Verarbeitungsverfahren hergestellt (von oben nach unten: AFP, thermogeformt, heißgepresst) [6]

### 3. FÜGEVERFAHREN

Das Pressen eignet sich sehr gut, um hochfeste Verbunde aus unterschiedlichen Werkstoffen herzustellen, denn die für die Verarbeitung erforderlichen Drücke und Temperaturen können sicher abgebildet werden. Für die Herstellung von TP CFK – Alu Hybriden kann es sich anbieten, den Heißpressprozess als Referenz zu wählen. Nachteilig hierbei kann jedoch das Wärmeausdehnungsverhalten sein.

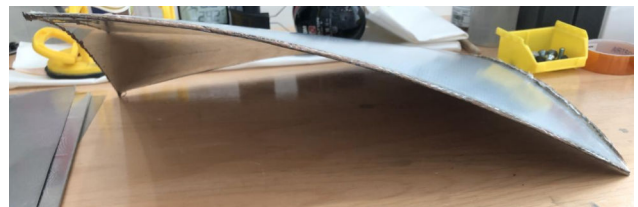


BILD 4. Im Heißpressprozess hergestellt CFK-Aluminium-Hybridplatte mit deutlichem Verzug durch den unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizient [1]

Das Schweißen ist ein geeignetes Fügeverfahren, um thermoplastische Faserverbundkunststoffe zu verbinden.

Mit entsprechender Anpassung der Halbzeuge und Prozesse kann es gelingen, anforderungsgerechte Hybride aus CFK- und CFK-Metall-Kombinationen zu erzeugen. Auch hier spielt zum einen wieder der Wärmeausdehnungskoeffizient, bei duroplastischen Matrices aber auch das Degradationsverhalten eine wichtige Rolle.

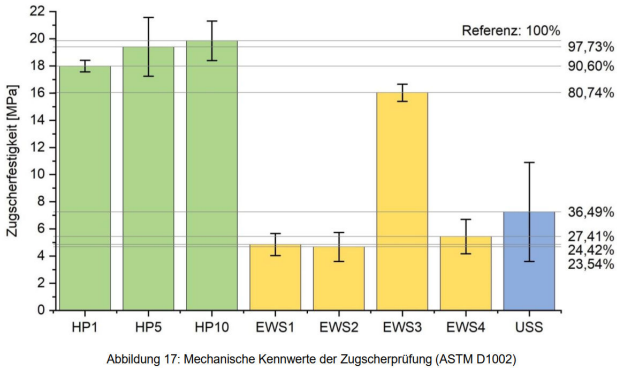


BILD 5. Mechanische Kennwerte von hybriden Zugscherprüfungen (Alu – CF PPS), heißgepresst (grün), widerstandsgeschweißt (gelb) und ultraschallgeschweißt (blau) [1]

Verschweißen unterschiedlicher Thermoplasttypen, etwa amorphe mit teilkristallinen, kommt aufgrund der unterschiedlichen Kristallitschmelz- bzw. Erweichungstemperatur und der unter anderem temperaturabhängigen Viskosität an seine Grenzen. So waren Untersuchungen mit PEI und dem klassischeren PEEK weniger vielversprechend, als die Kombination aus LM PAEK und PEI. [4, 5] Seitens Scherfestigkeit (in Anlehnung an ASTM1002) spiegelt sich dies am Beispiel des statischen Ultraschallschweißens durch eine Steigerung um ca. 10% wieder (CF-PEI – CF-PEEK: 31,6MPa, CF-PEI – CF-LM-PAEK: 34,6MPa), allerdings auch bei einer geringfügig höheren Streuung (CF-PEI – CF-PEEK: 3,79%, CF-PEI – CF-LM-PAEK: 5,22%).

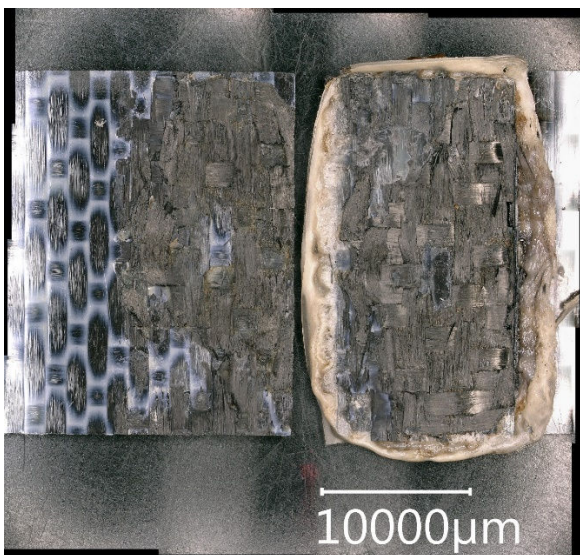


BILD 6. Bruchflächen von ultraschallgeschweißten Hybridproben aus CF-PEI und CF-PEEK

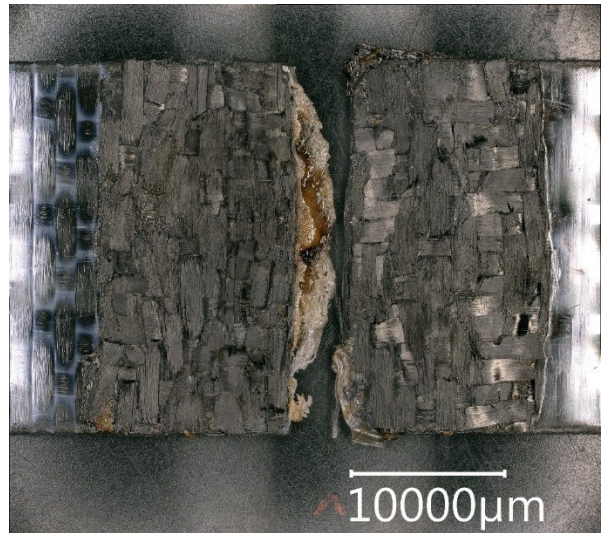


BILD 7. Bruchflächen von ultraschallgeschweißten Hybridproben aus CF-PEI und CF-LM-PAEK

Das Schweißen von unterschiedlich hergestellten, werkstofflich gleichartigen CFKs gilt es zu betrachten, da sich die Morphologie teilweise stark unterscheiden kann. Die im Schweißprozess erzeugte Wärmeinflusszone prägt ebenfalls eine spezifische Morphologie aus und hängt mit den Ausgangsbedingungen zusammen. So konnten mittels elektrischem Widerstandsschweißen bei heißgepressten Laminaten Zugscherfestigkeiten von über 33MPa erreicht werden, 27,5MPa bei der Paarung thermogeformt – AFP-gelegt.

Durch den sogenannten FIDJ-Prozess, eine geläufige Abkürzung für „FilmInterDiffusionJoining“, kann eine chemische Anbindung zwischen kompatiblen thermoplastischen und duroplastischen Werkstoffen erzeugt werden. Dabei kommt es zu einem Anlösen der Thermoplast-Oberfläche durch das duroplastische Harzsystem und Diffusionsvorgängen in der Fügezone.

Der FIDJ-Prozess kann entweder zum Fügen geeignet präparierter Halbzeuge eingesetzt werden, oder in den Urformprozess eines der Halbzeuge integriert werden. Der Prozess grenzt sich vom Schweißen ab, da keine thermische Energie zum Aufschmelzen erforderlich ist. Im Gegensatz zum klassischen Kleben werden jedoch auch nicht nur die Oberflächen der Fügepartner angebonden.

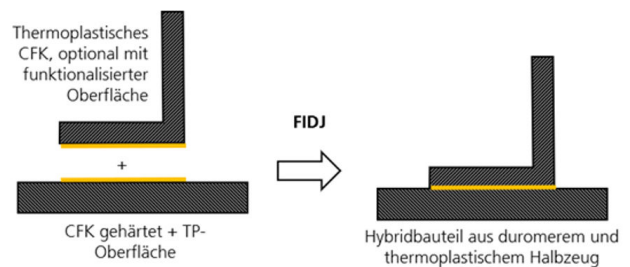


BILD 8. Prinzip des FIDJ-Prozesses bei der Anbindung zweier fertig hergestellter Halbzeuge, in diesem Fall duro- und thermoplastisches CFK

Beim thermoplastischen Tapelegen bzw. Automated Fiber Placement, kurz T-AFP-Prozess, kann die Erstlage auch direkt auf einem metallischen Fügepartner anstatt auf der Werkzeugoberfläche erfolgen. Dabei muss die

Oberfläche, wie beim Schweißen, vorbehandelt werden. Analog zu den weiteren Lagen des AFP-Bauteils muss bei der Erstlage durch den Energieeintrag ein Aufheizen, Aufschmelzen und Verbinden erreicht werden. Ein großer Vorteil der In-situ-Konsolidierung beim Tapelegen ist der minimale und sehr lokal begrenzte Wärmeeintrag, der thermische Ausdehnungseffekte des gesamten Bauteils abschwächt.

Wird beim AFP-Prozess als Hitzequelle ein Diodenlaser verwendet, so kommen hier neben den thermomechanischen und chemischen auch die optischen Eigenschaften dieser sehr unterschiedlichen Materialien zum Tragen; für ein Metallsubstrat ist in etwa die 10fache Laserleistung nötig, um auf dieselbe Verarbeitungstemperatur zu erhitzen wie ein CFK-Tape. Ansatz für eine höhere Laser-Absorption des Metalls sowie eine mechanische Verzahnung („mechanical interlocking“) zum CFK-Tape ist eine Oberflächenmodifikation des Metalls durch Vorbehandlung und -beschichtung.

Ein direktes Legen der AFP-Tapes auf den metallischen Fügepartner ist möglich [7,8], jedoch ist eine vorherige Beschichtung des Metalls mit einer Polymerschicht von großem Vorteil. So konnte festgestellt werden, dass der notwendige Energieeintrag bei der Erstlage auf eine Thermoplastoberfläche lediglich 1/3 beträgt, sich die Scherzugfestigkeit des Verbunds trotzdem um 75% erhöht, im Vergleich zur Anbindung direkt auf der metallischen Oberfläche. [7]

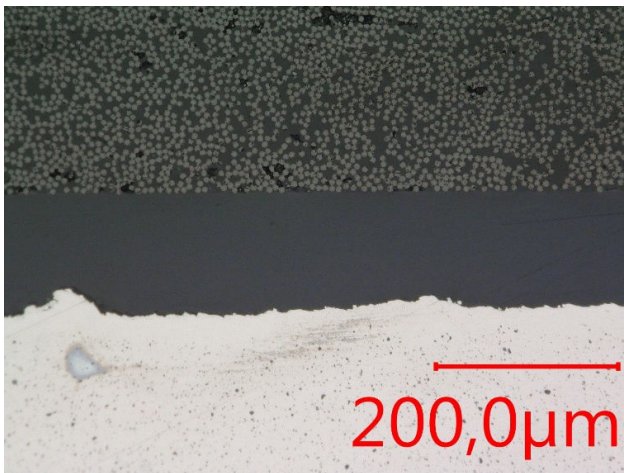


BILD 9. Mit Polymerfolie (Mitte) beschichtetes Metallsubstrat (unten), per laserbasierter T-AFP-In-situ-Konsolidierung gelegte CFK-Tapes (oben)

#### 4. HERAUSFORDERUNGEN BEIM FÜGEN

Bei Luft- und Raumfahrt-Strukturen gibt es besondere Herausforderungen, im Zusammenhang mit den verwendeten Materialien, explizit bei Hybridverbindungen, bei den dafür erforderlichen Verarbeitungsprozessen, im speziellen aufgrund der Bauteildimensionen und der Hochleistungswerkstoffe, sowie im Zusammenhang mit den Anforderungen in der Anwendung.

Speziell beim Fügen, vor allem dem Schweißen, können die folgenden fünf allgemein gültigen Schwierigkeiten zusammengefasst werden: Zunächst gibt es über die Fügeverbindung hinweg keine faserverstärkende Wirkung. Dies muss durch die Auslegung des Fügezonensbereichs berücksichtigt werden.

Das führt zum zweiten Punkt; bei den Anbindungen handelt es sich in der Praxis immer um flächige Fügezonen. Im Prozess muss daher der Druck- und Temperaturhaushalt auf der gesamten Kontaktfläche eingestellt werden. Daraus ergeben sich gewollt große Anbindungsflächen, woraus jedoch auch hohe Schweißkräfte resultieren. Die anlagenseitige Umsetzung, im Zusammenhang mit globalen Bauteilgeometrien und eventuellen Störkonturen erschweren das Fügen.

Mit den flächigen, endlosfaserverstärkten Halbzeugen geht auch einher, dass der prozesseitig erforderliche Fügeweg sehr gering ausfällt. Dadurch wird die tatsächlich vollflächige Anbindung, die für das Versagensverhalten entscheidend ist, erschwert erreichbar.

Weite zu nennen sind die Anforderungen an die Bauteilperformance, vor allem durch extrem geringes Gewicht auf der einen Seite, und sehr hohe, bei einfachen Verbindungen auch recht ungünstige Lasten auf der anderen Seite. Die Fügeverbindung muss besonders der Rissinitiation im Randbereich standhalten, die lastübertragende Matrix in der Regel eine hohe Scherfestigkeit und Dauerschwingbelastung verkraften.

Letztlich ist auch noch zu berücksichtigen, dass bei einem möglichst eigenspannungsarmen Zusammenbau kaum Bauteiltoleranzen ausgeglichen werden können. Daher sollten die Fügezonen der Halbzeuge eine hohe Planparallelität aufweisen, trotz eventueller Dickensprünge und unterschiedlicher, globaler Krümmungen.

Im Zusammenhang von Hybridverbindungen ist neben dem eigentlichen Fügeprozess der unterschiedlichen Halbzeuge die Anpassung der Oberflächen besonders zu betrachten. Dabei kann ein Lösungsansatz die Oberflächenvorbehandlung zur besseren Anbindung, die Modifikation zur Kompatibilisierung oder die vorgeschaltete Beschichtung zur Verschiebung der Grenzfläche beim eigentlichen Fügeprozess sein.

#### 5. ANWENDUNGSBEISPIELE

Im Rahmen des DLR-Projekts FoF konnten duroplastische Druckschott-Segmente mit funktionalisierten Fügezonen hergestellt werden. Zum Verbinden käme hier auch der FIDJ-Prozess in Frage, aufgrund der Projektausrichtung wurde das Fügen von Verbindungselementen per Ultraschallschweißen umgesetzt.



BILD 10. Duroplast-Thermoplast-Strukturbauteil, mit Oberflächenmodifikation, per Ultraschallschweißen gefügt [3]

Im BayLu-Projekt LIGHT mit Airbus Helicopters als anwendungsbezogener Projektpartner wird eine zweischalige Hubschraubertür entwickelt, innenseitig aus SMC-Material (duroplastisch), außenseitig aus ebenfalls duroplastischem Prepreg. Dabei soll ein Klebprozess zum Einsatz kommen. Die final nur konzeptionell betrachtete, thermoplastische Bauweise der Innenschale sieht das Funktionalisieren und Ultraschallschweißen vor. Alternative wäre auch hier der FIDJ-Prozess.

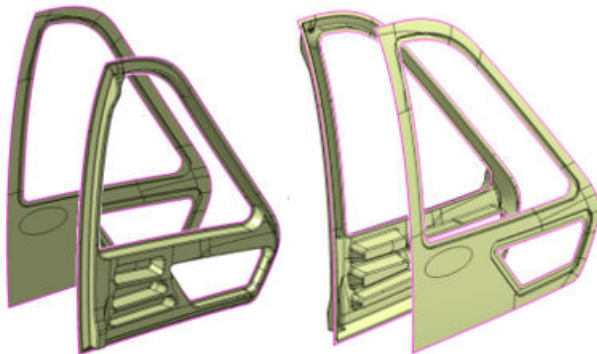


BILD 11. Zweischalige Hubschraubertür in Hybridbauweise mit Fügestelle für eine Klebeverbindung, optional als hybride Schweißverbindung [9]

Im Rahmen des BMBF-Verbundvorhabens TransHybrid wurde eine Antriebswelle des Heckrotors eines Hubschraubers neu ausgelegt. [10] Aufgrund der Position unterhalb der Triebwerksauslässe und den damit verbundenen Temperaturanforderung wurde die Werkstoffkombination Titan und CF/PEEK ausgewählt. Zwei metallische Titanflansche, die mit einem Laser vorbehandelt und mit einer PEEK-Folie beschichtet wurden, dienten als Interface für die CFK-Welle. Die CFK-Welle wurde mit laserbasiertem T-AFP mit In-situ-Konsolidierung hergestellt.

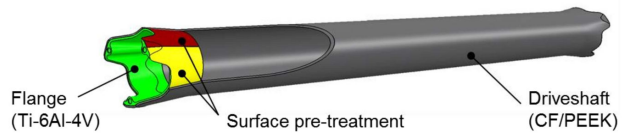


BILD 12. Hubschrauber-Antriebswelle aus CFK mit Gelenk-Anbindung aus Titan [10]

## 6. FRAME DEMONSTRATOR

Im DLR-Projekt FRAME soll zum einen die duroplastische und thermoplastische CFK-Mischbauweise eines Rumpfssegments mit werkstoffgerechten Füge-technologien, zum andern die Möglichkeit der Funktionenintegration in die Struktur und in den Fertigungsprozess dargestellt werden.

Dafür wird der Infiltrationsprozess zur Herstellung der duroplastischen Hautkomponente eingesetzt, inklusive einer Modifikation der Fügezonen für die nachgeschaltete Anbindung der Versteifungsstrukturen. Die Fügungen erfolgen dann im bereits beschriebenen FIDJ-Verfahren.

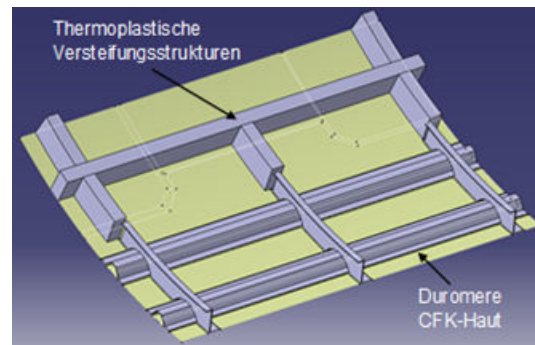


BILD 13. Im Projekt FRAME entstehender Hybrid-Demonstrator: duroplastisches Hautfeld und thermoplastische Versteifungsstrukturen

Die in der Anwendung geforderte Versiegelung von Fügstellen wird genutzt, um elektrische Signal- und/oder Steuerleitungen zu integrieren. Durch den Einsatz des im LuFo Projekt HotStuff entwickelten und vom DLR patentierten WeldSealer-Prozesses können in einem Schritt und automatisiert thermoplastische Fügstellen durch artgleichen Zusatzwerkstoff stoffschlüssig versiegelt werden und dabei Leitungen in die Struktur eingebunden werden. [11]

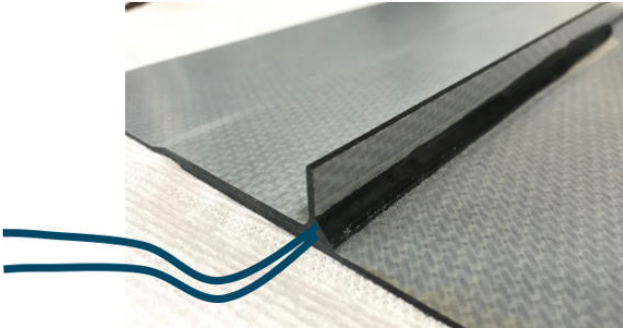
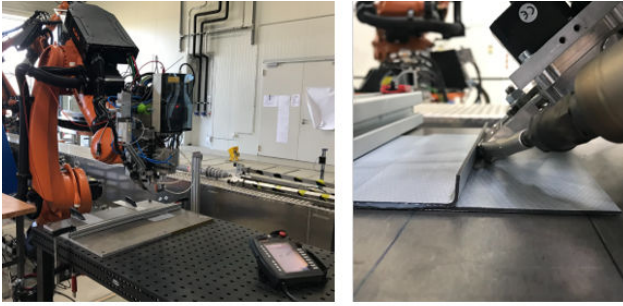


BILD 14. Automatisierter „WeldSealer“-Prozess zum additiven Materialauftrag, z.B. für Versiegelungen

Konkret handelt es sich bei der Hautkomponente um ein Epoxid-System mit PEI-Funktionalisierung an den Fügezonenoberflächen. Bei den Versteifungen werden in Längsrichtung CF-PEI-Stringer im Omega-Format, in Umfangsrichtung CF-LMPAEK Spante in Differentialbauweise verwendet. Die Anbindungszone der Spanten erfordert ebenfalls eine PEI Oberflächenmodifikation für den FIDJ-Prozess. Die Materialkombination PEI-LMPAEK konnte bereits als kompatibel eingestuft werden [2]

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund der Vielzahl an gegebenen Anwendungsfällen und dem dort bestehenden Leichtbaupotential durch werkstoffgerechteres Fügen sollten die Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Werkstoffen weiter erforscht werden. Der Einsatz optimal geeigneter Werkstoffkombinationen bietet ökonomische und ökologische Vorteile, die es zu nutzen gilt. Dabei zielen die Entwicklungen auf die optimal geeigneten Materialien genauso wie auf die erforderlichen, häufig zu modifizierenden Verarbeitungsverfahren.

Die umfangreichen Forschungsanträge sind nur aufgrund der DLR-internen Projekte (FoF, FRAME) und Drittmittelgeber sowie die gemeinsame Ausrichtung der Arbeiten mit den kooperierenden Industriepartnern und Instituten möglich. Daher an dieser Stelle besonderen Dank an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Finanzierung des bis Anfang 2024 laufenden LuFo Projekts HoTStuff und an das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie für die Finanzierung des laufenden BayLu Projekts LIGHT. Außerdem Dank an die Mitarbeit und den Input aus der Industrie, besonders an die Airbus Aerostructures GmbH, Premium Aerotec GmbH und Airbus Helicopters.

## 8. QUELLENVERZEICHNIS

- [1] M. Heckl: Herstellung von thermoplastischen Faserverbund-Metall-Hybriden durch Press- und Schweißprozesse, Bachelorarbeit, DLR BT ZLP Augsburg, 2022
- [2] P. Bruckbauer: Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Interphasen zwischen Epoxidharz und thermoplastischen Funktionsschichten für Faserverbundwerkstoffe, Dissertation, TU München, 2018
- [3] DLR Projekt FoF, Institut BT, Augsburg und Institut OS, Berlin, 2021
- [4] I. F. Villegas et al.: Ultrasonic welding of carbon/epoxy and carbon/PEEK composites through a PEI thermoplastic coupling layer, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 109, 06.2018, P. 75-83
- [5] L. Zweifel et al.: Development Of A Resistance Welding Process For Thermoset Fiber Composite Components With Co-Cured Thermoplastic Boundary Layer, ECCM18, 18th European Conference on Composite Materials, Athens, Greece, 2018
- [6] C. Piazzini: The Influence of Manufacturing Processes on Resistance Welded Fiber-Reinforced Thermoplastics, Masterarbeit, DLR BT Stuttgart, 2022
- [7] V. Zinnecker 2022, Dissertation, „Manufacture of laser textured steel – Carbon fibre/PA6 hybrids using thermoplastic automated tape placement“
- [8] T. Peters, 2020, Dissertation, „Untersuchungen zum diodenlaserbasierten in-situ Tapelegen als Produktionstechnologie für einen großserienfähigen hybriden Leichtbau“
- [9] BayLu Projekt LIGHT, gefördert durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, DLR Augsburg, 2023
- [10] S. Ehard et al.: Development of a hybrid tail rotor drive shaft by the use of Thermoplastic Automated Fiber Placement, Proceedings of the 17th European Conference on Composite Materials, 2016
- [11] LuFo Projekt HoTStuff, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, DLR Augsburg, 2023