

Karl-Friedrich Berger,
Sandra Kiefer (Hrsg.)

JAHRBUCH 2025

Dichten. Kleben. Polymer.

Automatisiertes dynamisches Dichten mit Thermoplasten

Automatisiertes Spaltfüllen an thermoplastischen CFK-Flugzeugrumpfschalen zur Vermeidung von Feuchtigkeits- und Gaseinschlüssen

LUFT- UND RAUMFAHRT – Die stetige Weiterentwicklung der Luftfahrtindustrie erfordert permanente Anpassungen, um die Leistungsfähigkeit von Flugzeugen zu optimieren und gleichzeitig ihr Gewicht zu minimieren. In dem Zusammenhang gewinnen thermoplastische carbonfaserverstärkte Kunststoff-(CFK-)Strukturen, kombiniert mit fortschrittlichen Fügekonzepten, an Relevanz. Trotz hochentwickelter Fügeverfahren entstehen aufgrund fertigungsbedingter Toleranzen gelegentlich Spalte und Hohlräume, die im Anschluss gezielt aufgefüllt werden müssen. Die Versiegelung der Fügezonen und Spalte – zum Schutz vor externen Einflüssen wie Witterung und somit zur Gewährleistung der vielfältigen Vorteile der thermoplastischen CFK-Strukturen – kann durch die Entwicklung automatisierter Spaltfüllprozesse realisiert werden. Dies zeigen die Ergebnisse des 2024 abgeschlossenen Clean Sky 2/Clean Aviation „Large Passenger Aircraft“ („LPA“) -Projekts „BUSTI“.

Ein Schritt in Richtung klimaneutrale Zukunft in der Luftfahrt war bereits die Substitution von Aluminiumlegierungen durch Faserverbundkunststoffe (FVK) in Luftfahrzeugstrukturen. Technologisch bewährt haben sich besonders FVK auf duroplastischer Basis. Die Implementierung wiederaufschmelzbarer, thermoplastischer Polymermatrices bringt eine Menge Vorteile gegenüber einer duroplastischen Matrix mit sich: kürzere Zykluszeiten, unbegrenzte Lagerzeit der Halbzeuge sowie bessere mechanische Eigenschaften und Recyclingmöglichkeiten. Thermoplastische Faser-



Von Flavius Pavel,
Wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Abteilung Fügetechnologien

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung IFAM |
Außenstelle Stade



und Leander Brieskorn,
Stellvertretender Abteilungsleiter,
Abteilung Fügetechnologien

Automatisierung und Produktionstechnik
www.ifam.fraunhofer.de/stade

kunststoffverbunde verfügen zudem über ein höheres Automatisierungspotenzial, was eine wirtschaftliche Fertigung von Bauteilen in großen Stückzahlen ermöglicht. Zudem werden völlig neue Fügeprozesse realisierbar, die eine stoffschlüssige Verbindung der Fügepartner ohne zusätzliche Anwendung von Verbindungselementen oder Klebstoffen gewährleisten. Allerdings treten beim Fügen einzelner FVK-Bauteile zu einer Gesamtstruktur fertigungs- und montagebedingt Spalte und Fugen (Gaps) variierender Breite und Länge auf. Solche Gaps lassen Flüssigkeiten und Gase ein- bzw. austreten, was zur Beeinträchtigung der Strukturfestigkeit führen kann. Besonders in der Luftfahrt müssen Fügestellen dicht gegenüber Flüssigkeiten und Gasen sein. Je nach Fügeverfahren und nachgelagerter Bearbeitung werden Spalte und Fugen heutzutage mit gängigen Dichtstoffen gefüllt („Gap-Filling“) bzw. versiegelt. Bei den Dichtstoffen handelt es sich meist um Epoxide, Polyurethane, MS-Polymere, Polysulfide und Silikone, die für Faserkunststoffverbunde mit duroplastischer Matrix von Bedeutung sind.

Spaltfüllen bei thermoplastischen Flugzeugrümpfen

Die Anwendung der gängigen Dichtstoffe ist bei thermoplastischer Matrix allerdings nicht mehr so einfach möglich. Die Gründe dafür sind: Die niedrige Oberflächenenergie sowie Apolarität einiger technisch und wirtschaftlich bedeutsamer Thermoplaste erfordert für eine ausreichende Anbindung zwischen Dichtstoff und Bauteiloberfläche eine spezielle Vorbehandlung. Zudem sind die meisten Dicht- und Fugenfüllstoffe für nachgelagerte Bearbeitungen – wie z.B. dem Thermoplast-Schweißen – ungeeignet, da sie besonders auf Hochleistungsthermoplasten keine ausreichende Beständigkeit gegenüber den hohen Prozess- und Bearbeitungstemperaturen von bis zu 370 °C aufweisen.

Die Anwendung von thermoplastischem Versiegelungsmaterial ist in dem hier beschriebenen Fall von besonderer Bedeutung. Für die Materialverträglichkeit während der Bearbeitung wird bestenfalls sogar dasselbe Material zum Füllen verwendet, in das auch die Fasern des FVK-Bauteils eingebettet sind.

Zielstellung des Projekts „BUSTI“ („Butt strap integration technology development with tooling design, validation, implementation in major component assembly and operation“) war die materialgleiche Fügung eines Demonstrators, dem „Multifunctional Fuselage Demonstrator“ („MFFD“), der aus zwei vorgefertigten Rumpfhälbschalen eines Passagierflugzeugs zusammengesetzt wurde. Dabei wurden die Fügestellen durch das Aufeinandertreffen der stufig geschäfteten Enden der Rumpfhälbschale definiert. Mehrlagige, multidirektional verstärkte FVK-Laminatstreifen („Straps“)

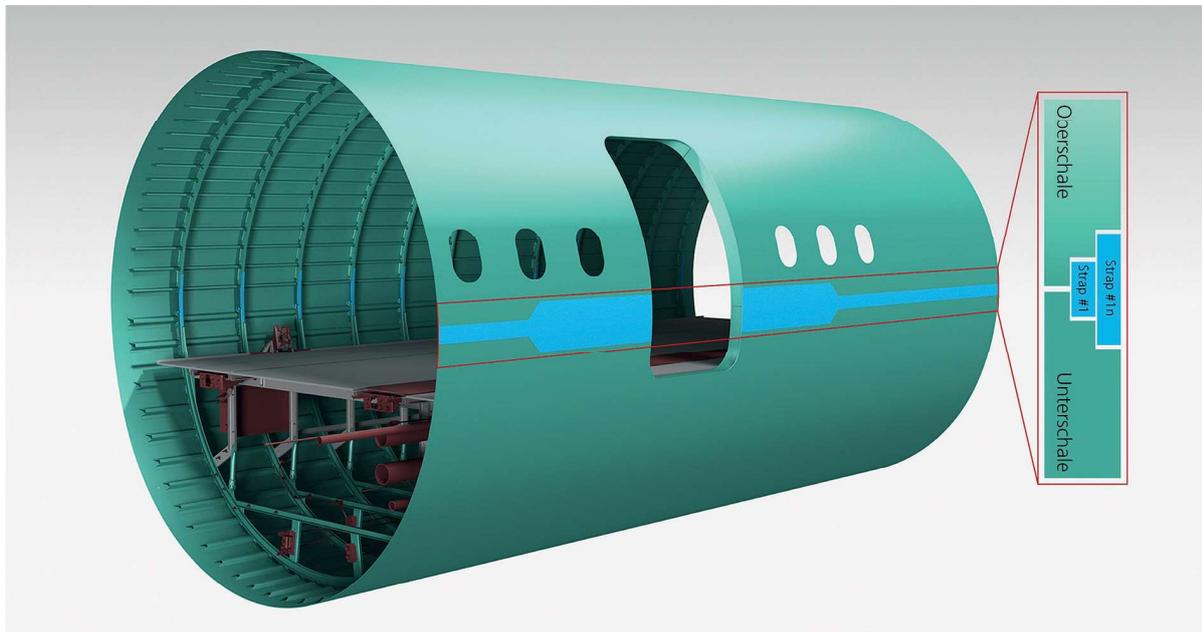


Bild 1: Visualisierung des „Multifunctional Fuselage Demonstrator“ („MFFD“) und der Fügezone des CO₂-Laserschweißverfahrens. In Blau dargestellt sind die aufgeschweißten CFK-Laminatstreifen, in Grün die beiden Schalenhälften. Die Schnittdarstellung auf der rechten Seite zeigt das Prinzip der zueinander positionierten, gestuften Flugzeugrumpfschalen und wie die Streifen in den Stufen liegen (Bild: Fraunhofer IFAM)

wurden oberflächennah durch einen CO₂-Laser aufgeschmolzen, in den Schäftungen abgelegt, angepresst und in situ co-konsolidiert (**Bild 1**). Der Fokus liegt nachfolgend auf dem Zwischenschritt eines jeden der insgesamt sechs Schweiß-Schritte, dem Spaltfüllen jeweils zwischen den Rumpfschalen und den FVK-Laminatstreifen.

Verwendung als Füllmaterial fand der Hochleistungsthermoplast LMPAEK™. Er lag in seiner Ursprungsform als Granulat vor. Das Applikationswerkzeug war ein Einschnecken-Schweißextruder, welcher das Ausgangsgranulat plastifizierte und über eine Schnecke förderte. Eine spezielle Düse sorgte anschließend dafür, dass das Material den Spalt gleichmäßig füllte, bevor es unmittelbar nach dem Düsenaustritt aushärtete. Zur Bestimmung der Spaltgeometrie während des Prozesses verfügte das Werkzeug über einen 2D-Linienscanner. Durch die intelligente Kommunikation zwischen Messsensorik und Extruder war ein volumengenaueres und überschussfreies Füllen von Spalten bis ca. 20 mm möglich. Für eine ausreichende Anhaftung des Füllmaterials erforderte es eine thermische Vorbehandlung der Spaltoberfläche. Die Vorbehandlung erfolgte unmittelbar vor der Applikation des Füllmaterials über einen am Werkzeug angebrachten kurzwelligen Infrarotstrahler, der die Spaltoberfläche auf 300 °C erwärmte.

Anforderungsdefinition und Vorversuche zur Entwicklung des Automatisierungskonzepts

Anforderungen an das Spaltfüllmaterial resultierten aus dem Material der zu fügenden Rumpfschalen bzw. der aufgeschweißten FVK-Laminatstreifen sowie aus dem Fügeverfahren. Bei beiden Bauteilen handelt es sich um kohlefaserverstärktes low-melt PAEK (LMPAEK™) mit einer Schmelztemperatur von 305 °C. Da beim Schweißen die Schmelztemperatur deutlich überschritten wurde, war zum Füllen ein Material nötig, welches sich auch bei solch hohen Temperaturen verarbeiten ließ. Somit kam nur das Matrixmaterial der zu fügenden Komponenten als Füllmaterial in Frage.

Die grundlegenden Anforderungen bezüglich der Spaltgeometrien waren durch das Fügedesign der Rumpfschalen bestimmt. Toleranzbedingt konnten aus dem Fügeverfahren Spaltbreiten bis zu 20 mm auftreten. Es bestand die Vorgabe, Spalte mit einer Breite zwischen 3 und 20 mm zu versiegeln. Die Spalttiefe von 1 mm resultiert ebenfalls aus dem Design der Fügezone. Die Spaltgeometrien sind in **Bild 2** zu sehen.

Da das Spaltfüllen innerhalb einer automatisierten Montageanlage durchgeführt werden sollte, musste der Prozess den Gegebenheiten innerhalb der Anlage angepasst werden. Das betraf in erster Linie die Prozessgeschwindigkeit, da sie durch die Anlagensteuerung vorgegeben war. Somit durfte der Prozess mit einer Geschwindigkeit zwischen 0,2 bis 1 m/min (3,33 bis 16,67 mm/s) betrieben werden.

Auf Basis all dieser Anforderungen konnte mit der Entwicklung zum automatisierten Spaltfüllen begonnen werden. Doch bevor diverse Konzepte ausgearbeitet wurden, war die umfassende

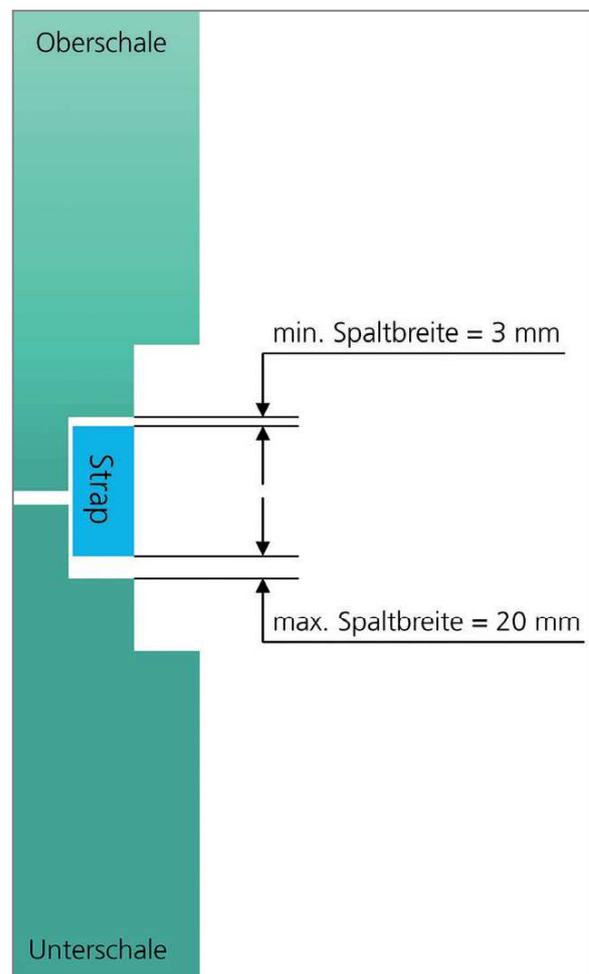


Bild 2: Prinzipskizze der zu erwartenden Spaltbreiten nach dem Schweißen eines CFK-Laminatstreifens (blau). Die Tiefe der Spalte bleibt konstant bei 1 mm und ist durch die Stufentiefe und die Materialstärke der Laminatstreifen definiert (Bild: Fraunhofer IFAM)

Materialcharakterisierung des Füllmaterials und der Rumpfschale bzw. der aufgeschweißten Laminatstreifen erforderlich. Dazu wurden zu Beginn Versuche an eigens gefertigten und mit Spalten versehenen CFK-Probepplatten zur Ermittlung der Spaltfüllfähigkeit durchgeführt. Sie hatten den Zweck herauszufinden, bei welchen Temperaturen das Füllmaterial verarbeitet werden sollte, um vorgegebene Spaltabmessungen ausfüllen zu können. Zudem sollten Erkenntnisse darüber gewonnen werden, wie das Düsendesign für die Spaltfüllanwendung ausgeführt werden musste.

Daraufhin folgten Untersuchungen zur Ermittlung der Haftungstemperatur sowie der Heiz- und Kühlgradienten. Letztere waren besonders wichtig, um zu wissen, wie schnell das Extrudat für eine ausreichende Anbindung auf die Oberfläche aufgetragen werden musste.

Die ermittelte optimale Haftungstemperatur an der Spaltoberfläche lag zwischen 295 °C und 300 °C. Die Versuche zeigten auch, dass zwischen Aufheizen und Applizieren nicht mehr als 1 bis 2 s liegen durften, weil die Spaltoberfläche für eine ausreichende Anbindung des Füllmaterials sonst zu „kalt“ war. Da eine Temperaturüberwachung aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit der CFK-Bauteile sowie des IR-Strahler-Lichts erschwert war, wurde eigens eine Leistungskennlinie des Strahlers ermittelt. Somit ließ sich die Leistung der Prozessgeschwindigkeit anpassen und die geeignete Haftungstemperatur sicherstellen.

Die Verarbeitung des Granulats erfolgte bei Temperaturen von bis zu 390 °C, sodass es einen schmelzflüssigen Zustand erreichte und das ausfließende Extrudat jede geforderte Spaltgeometrie füllen konnte. Eine gleichmäßige Füllung wurde durch das spezielle Düsendesign realisiert. Durch das Aufliegen der Düsenoberfläche auf den Spaltkanten wurde der Spalt lokal nach oben verschlossen und das extrudierte Material somit in den Spalt gedrückt. Durch die Kombination aus Gegendruck und der Fahrtbewegung resultiert eine ebene und glatte Bauteiloberfläche. Eine erhöhte Aufmerksamkeit galt der Düsenoberfläche und dem Druck der Düse auf den Spaltkanten. Die Oberfläche musste besonders glatt und der Druck durfte nicht zu hoch sein, um die CFK-Bauteile nicht zu beschädigen. Parallel musste aber ein ausreichender Druck auf den Spaltkanten aufliegen, sodass das Füllmaterial nicht zu den Kanten hinauslaufen konnte. Als zuverlässig erwies sich hierbei ein Druck von 1 bar.

Die Spaltvermessung wurde mittels eines 2D-Linienscanners erprobt und in das Automatisierungskonzept eingebunden. Der Scanner saß in Prozessrichtung an erster Stelle und vermaß die zu füllenden Spalte, bevor die Spaltoberfläche erwärmt und das

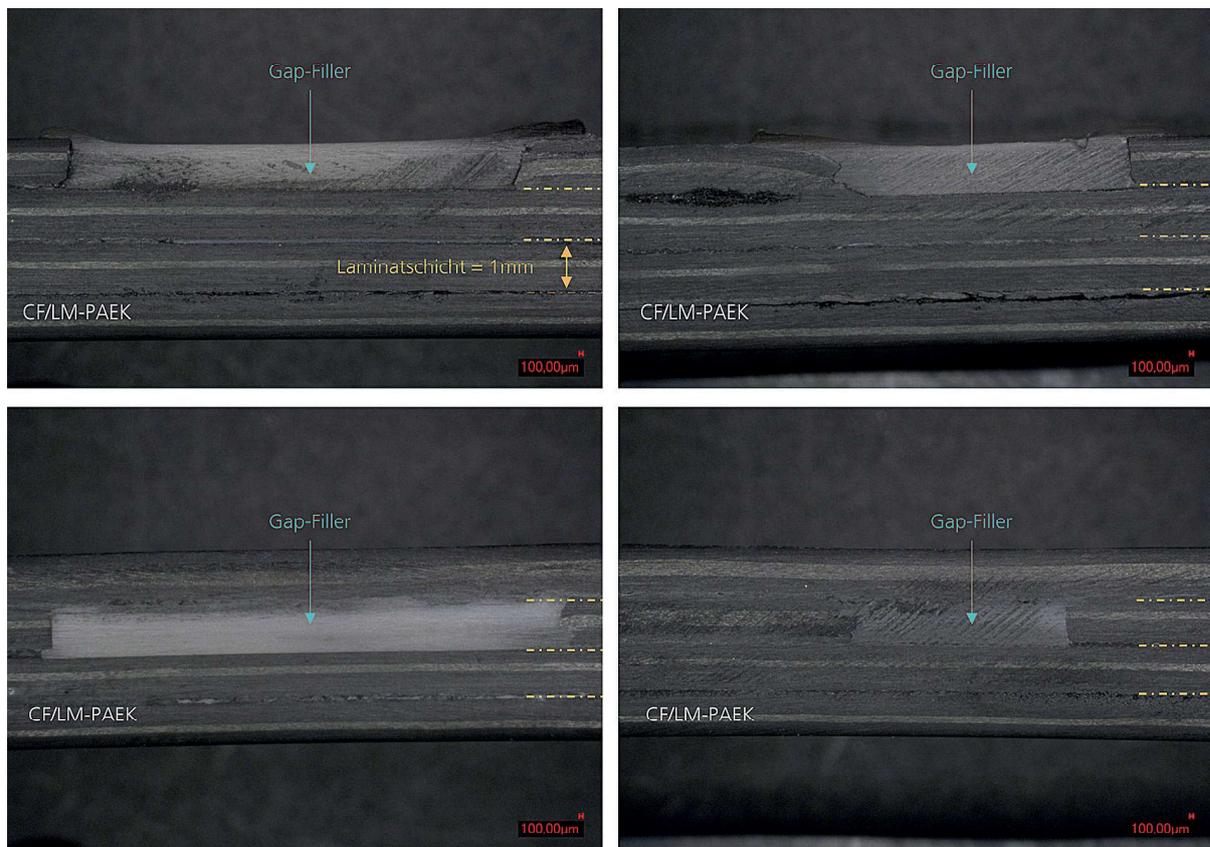


Bild 3: Mikroskopische Schlibbilder der geschweißten und gefüllten Probebauteile, die die Qualität der Spaltfüllung darstellen. Die Bauteile bestehen aus insgesamt vier miteinander verschweißten Laminatschichten. In den oberen Bildern sind „Gap-Filler“ an der Bauteiloberfläche zu sehen. Die unteren Bilder zeigen „Gap-Filler“, über die geschweißt wurde (Bild: Fraunhofer IFAM)

Füllmaterial anschließend appliziert wurde. Die Daten des Scanners umfassten die Spaltbreite und ermöglichten in Kombination mit der definierten Spalttiefe von 1 mm die Ermittlung der gesamten Spaltquerschnittsfläche.

Bevor es an die Integration in die Montageanlage ging, wurden zudem noch Versuche durchgeführt, die zeigen sollten, dass das Füllmaterial und der gesamte Füllprozess den eigentlichen Schweißprozess nicht beeinträchtigen. Hierfür wurden gestufte Probekörper hergestellt, die das Schweißen und Füllen der ersten drei Lagen widerspiegeln sollten. Die Probebauteile wurden dann nacheinander gefüllt und geschweißt, sodass nach jeder Füllung untersucht werden konnte, ob das Schweißen funktionierte. Die Ergebnisse zeigten, dass beide Prozesse sich nicht gegenseitig beeinflussen haben und sowohl für sich als auch gemeinsam umsetzbar waren. Schlibbilder der Probebauteile zeigen auch die Qualität der Füllungen (**Bild 3**). Alle Spalte, selbst kleinste Kavitäten, ließen sich lückenlos füllen.

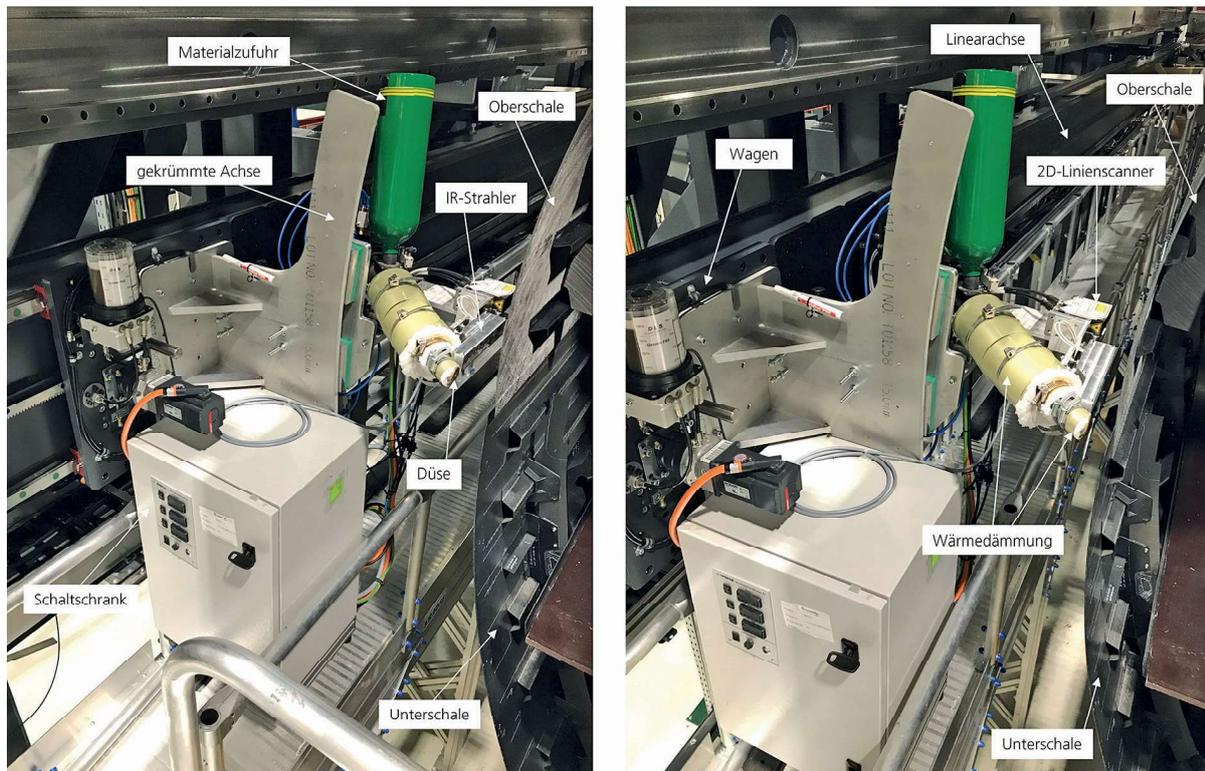


Bild 4: In die Montageanlage integrierter Gap-Filling-Endeffektor. Zu sehen sind die Achsen sowie alle Komponenten der Extrudereinheit. Zudem ist der begrenzte Bauraum innerhalb der Anlage ersichtlich und die daraus resultierende Schrägstellung des Extruders. Zum Schutz der Anlagenkomponenten und des in der Anlage arbeitenden Personals sind die Heizzonen und die Düse des Extruders mit einer Wärmedämmung versehen (Bild: Fraunhofer IFAM)

Auch die Haftfestigkeit wurde vorab in einem Versuch bestimmt. Dabei wurde eine Kunststoffraupe des Dichtmaterials auf ein Probelaminat appliziert und anschließend mit einem Prüfstempel innerhalb einer Universalprüfmaschine abgeschert. So konnten Scherfestigkeiten von circa 2 MPa erreicht werden, was in etwa dem Wert eines Dichtstoffs entspricht.

Integration in eine Montageanlage und Full-Scale-Tests

Für das automatisierte Fügen und Montieren beider Rumpfschalen wurde eigens eine Forschungsplattform im CFK NORD in Stade entwickelt und errichtet. Die Plattform umfasste eine zentrale Anlagen- und Prozesssteuerung, in die Technologiebausteine weiterer Projektpartner integriert wurden. Das Schweißen sowie das darauffolgende Spaltfüllen entlang der Rumpflänge erfolgte innerhalb der Anlage über Endeffektoren, die automatisch an einer 12 m langen Achse geführt wurden. Die Führung entlang der Achse wurde durch Wagen (Carrier) realisiert. An den Carriern konnten die jeweiligen Endeffektoren montiert und über die Anlagensteuerung verfahren werden.

Anhand der Vorgaben der Anforderungsliste hinsichtlich des Bauraums und des Arbeitsbereichs sowie der Anforderungen an die Verarbeitung wurde der Endeffektor wie folgt ausgelegt und konstruiert (**Bild 4**): Am Carrier des Spaltfüll-Endeffektors (Gap-Filling-Endeffektors) war eine gekrümmte Achse angebracht. Der Krümmungsradius erlaubte die Bearbeitung und Positionierung der Extrudereinheit entlang des Rumpfumfangs. Auf der gekrümmten Achse saß die Einheit, bestehend aus dem 2D-Linienscanner, der IR-Lampe sowie dem Einschneckenextruder, auf einem pneumatisch gefederten Wagen. Der Wagen ermöglichte die Erreichbarkeit senkrecht zum Rumpfumfang und diente dazu, den Druck der Düse auf den Spaltkanten konstant zu halten. Ein besonderes Merkmal war auch die Schrägstellung des Extruders. Aufgrund des Bauraums konnte der Extruder nicht senkrecht zur Schale stehen, sondern musste mit einem Winkel von 45° positioniert werden. Dementsprechend wurde auch die Düse angewinkelt. Um möglichst wenig Wärmeverluste zu haben, wurden die beheizten Zonen des Extruders sowie die Düse gedämmt und mit einer Schale versehen.

Mit dem Aufbau konnten die finalen Versuche an der Anlage auf Testbauteiloberflächen durchgeführt werden, bevor es an das Füllen der Spalte am finalen thermoplastischen Flugzeugrumpf ging. Für die Vorversuche wurden Probeteile hergestellt, die mit Spalten unterschiedlicher Größen – teilweise auch sich verjüngend bzw. aufweitend – versehen waren. Die Bauteile wurden an die Anlage montiert und mit den im Vorfeld ermittelten Parametern getestet. Die Ergebnisse zeigten die Durchführbarkeit des Prozesses und die Richtigkeit der Parameter.

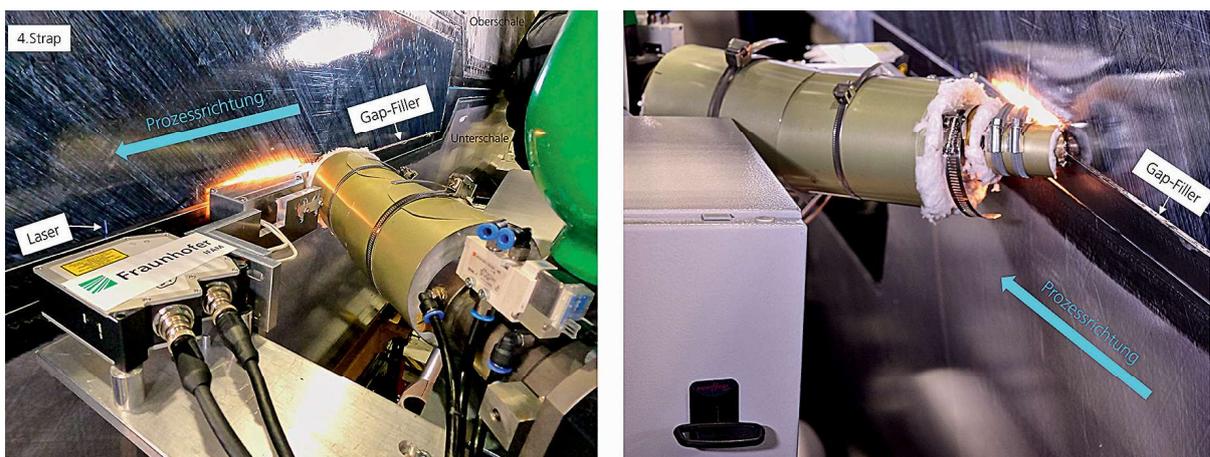


Bild 5: Gap-Filling nach dem Schweißen des 4. Straps des thermoplastischen Flugzeugrumpfs. Hier wird der untere Spalt zwischen Strap und Unterschale gefüllt. Auf dem linken Bild ist der Laser des 2D-Linienscanners zu sehen, der die Spaltgeometrie ausmisst. Zudem ist das Licht des Infrarotstrahlers zu erkennen, der die Spaltoberfläche auf die nötige Haftungstemperatur erwärmt. Unmittelbar nach der Erwärmung erfolgt das Füllen des Spalts über die Düse, wie im rechten Bild ersichtlich (Bild: Fraunhofer IFAM)

Der Schweißprozess der finalen CFK-Laminatstreifen und das Versiegeln der resultierenden Spalte am Thermoplast-Rumpf wurden durchgeführt und konnten die Anforderungen erfüllen. Das Fügen der Laminatstreifen führte in jedem Durchgang zu zwei gleichgroßen Spalten (oben und unten), die sich mittels des Spaltfüll-Endeffektors gleichmäßig füllen ließen (**Bild 5**).

Ausblick

Neben der erfolgreichen Demonstration des Füllens der Spalte am thermoplastischen Flugzeugrumpf arbeitet man an weiteren Innovationen im Bereich des Dichtens von thermoplastischen FVK-Strukturen. In Zukunft sind Weiterentwicklungen des Endeffektors sowie des gesamten Prozesses geplant. Zudem möchte man das automatisierte Füllen und Dichten mit Thermoplasten auch für andere Branchen – wie Schienenfahrzeug-, Nutzfahrzeug-, Automobil- oder Schiffbau – erproben und etablieren.

Projektpartner und Förderung

Die beschriebenen Ergebnisse wurden von Fraunhofer in Kooperation mit der Airbus Operations GmbH, Airbus Aerostructures GmbH und FFT Produktionssysteme GmbH & Co. KG im Rahmen des Clean Sky 2 / Clean Aviation Projekts „BUSTI“ (»Butt strap integration technology development with tooling design, validation, implementation in major component assembly and operation«; FKZ: CS2-LPA-2.1.6) erarbeitet.



Co-funded by
the European Union

