

INNOVATIONEN FÜR DIE FERTIGUNG HYBRIDER STRUKTURBAUTEILE AUS FML UND DUROMER/THERMOPLAST-HYBRIDEN

Autoren: J. Faber¹, A. Hindersmann², C. Bäns², S. Torstrick-von der Lieth², F. Behrens²

¹DLR Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie, Institut für Bauweisen und Struktur-
technologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg

²DLR Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie, Institut für Systemleichtbau, Ottenbe-
cker Damm 12, 21684 Stade

Zusammenfassung

Die Kombination verschiedener Leichtbaumaterialien verspricht einerseits eine Optimierung auf die individuelle mechanische und physikalische Beanspruchung. Andererseits schafft Sie neue Möglichkeiten des Strukturdesigns. Hybridbauweisen bieten die Chance das Strukturgewicht zu reduzieren, Herstellverfahren zu vereinfachen und schließlich das Automationspotential für die Produktion zu erhöhen.

Im Rahmen eines DLR-internen Forschungsprojekts werden drei Ansätze innovativer Fertigungstechnologien zu Duromer-Thermoplast und Faser-Metall-Hybriden entwickelt. In Anlehnung an eine Flugzeugrumpfstruktur, werden Methoden untersucht, die ein hohes Automationspotential unter Berücksichtigung von Leichtbauweisen zulassen. Gleichzeitig steht ein „Dustfree Assembly“ im Fokus, wozu schweißbare Materialien auf thermoplastischer Basis zum Einsatz kommen. Im Konkreten werden ein Anbindungskonzept für eine Thermoplast/Duromer-Struktur per RTM-Verfahren, die Integration von thermoplastischen Funktionsschichten in eine duromere Hautstruktur per Vakuuminfusionsverfahren und die Herstellung von Faser-Metall-Laminaten (GLARE) mit einer Vakuuminfusionsmethode vorgestellt und diskutiert.

Zunächst werden die jeweiligen Fertigungstechnologien erläutert und die wesentlichen Prozessmerkmale herausgearbeitet. Anschließend werden die technologischen Herausforderungen diskutiert und Neuerungen gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren dargestellt. Abschließend werden die Konzepte gegenübergestellt und hinsichtlich ihres Integrationspotentials in zukünftige Anwendungen diskutiert.

Keywords

Faserverstärkter Kunststoff, Faser-Metall-Lamine, Infusionsverfahren, RTM-Technologie, Materialhybride, Faserverbund-Fertigungstechnologie

1. EINLEITUNG

Hybride Leichtbaustrukturen sind Gegenstand aktueller Untersuchungen in Forschung und Industrie, um innovative Lösungen zur Reduktion der Kohlenstoffdioxid-Emissionen durch Gewichtseinsparung unter wirtschaftlichen und technologischen Gesichtspunkten zu erarbeiten. Ausgangsbasis ist die Sammlung, Analyse und Bewertung verschiedener Bauweisen bzw. Technologien hinsichtlich ihrer Eignung für den Rumpf eines Minimal-Emissions-Flugzeuges.

Die in diesem Paper beschriebenen Fertigungstechnologien sind an die Herstellung zukünftiger Flugzeugrumpfstrukturen angelehnt. Die untersuchten Methoden sind jedoch auch auf andere Anwendungsfälle übertragbar.

Anforderungen

Basierend auf Top Level Requirements für eine LH2-Tankintegration in Flugzeugrumpfstrukturen, wurden aus dem Projekt EXACT [1] Anforderungen für Fertigungstechnologien abgeleitet. Außerdem wurden Vorarbeiten zu verschiedenen Rumpfbauweisen (z.B. Spant/Stringer, Aniso-Grid [2], Lampassen[3]) und Materialien (z.B. Duromer, Thermoplast, Faser-Metall-Lamine) recherchiert und mit den identifizierten Ansprechpartnern diskutiert. Dabei wurden Inhalte aus vergangenen (z.B. CFK-

Rumpf NG [4], Maaximus [5], AutoGlare, ALF [6], ALaSCA [7]), aktuellen (z.B. MFFD-ICASUS [8]) und geplanten Rumpfprojekten (ZEUS, AutoBond) zusammengetragen. Daraus ergeben sich drei wesentliche Anforderungen an zukünftige Rumpfbauweisen:

1. Automatisierungspotential für Hochratenfähigkeit
2. Integration von Funktionen
3. Hybride Bauweisen für eine staubfreie Montage

Automatisierungspotential und vorkonfektionierte Bauteile für Hochratenfähigkeit

Um die Effizienz der Produktion und gleichzeitig Qualität und Flexibilität zu erhöhen, ist die Automatisierbarkeit der Fertigungsverfahren ein wichtiges Kriterium. Zudem ist es aus Gründen der Erreichbarkeit und Modularität sinnvoll, große Komponenten bereits vor der Montage mit ihren Systemen (z.B. Klima, Elektrik usw.) auszurüsten.

Integrationsmöglichkeiten für Funktionen und Leiterbahnen

Der Faserverbundleichtbau bietet durch seinen schichtweisen Aufbau besondere Möglichkeiten zur Integration von Funktionen, die bei rein metallischer Bauweise nicht umsetzbar wären. Diese Funktionen können passiver Natur sein, wie etwa die lokal lastoptimierte Faserorientierung oder auch aktiv, indem bereits Sensorik oder Leiterbahnen direkt in den Verbund integriert werden. Das er-

höht einerseits das Leichtbaupotential und ermöglicht andererseits die oben genannte Vorausstufung von Komponenten, da empfindliche Systeme bereits durch den Verbund geschützt sind.

Hybride Bauweisen ermöglichen ein "Dustfree Assembly"

CFK-Strukturen werden typischer Weise vor der Montage mechanisch bearbeitet und auf ihre Endkontur gefräst. Beim Fügen von Hauptkomponenten werden bei der herkömmlichen Bauweise Niete gesetzt, deren Bohrungen durch beide Fügepartner erst während der Montage vorgenommen werden. Dadurch wird sichergestellt, dass die Bohrpositionen deckungsgleich sind. Der beim Bohren entstehende und elektrisch leitfähige CFK-Staub muss jedoch unbedingt vermieden werden, wenn die Hauptkomponenten bereits vor der Montage mit Elektronik, Sitzen usw. ausgestattet sein sollen. Da das Schweißen von Strukturen im Gegensatz zum Kleben als eine stoffliche Verbindung gilt, kann hierbei auf das Setzen von Niete verzichtet werden. Die Schweißbarkeit der CFK-Strukturen ist also eine Voraussetzung für die staubfreie Montage, kann aber nur bei Verbundwerkstoffen mit thermoplastischer Matrix erzielt werden. Da jedoch nicht alle strukturmechanischen, thermischen oder fertigungstechnischen Anforderungen von thermoplastischen Verbundwerkstoffen erfüllt werden können, wird eine Hybridbauweise erforderlich.

2. HYBRIDE BAUWEISEN – STAND DER TECHNIK

Duromere Matrixwerkstoffe sind nicht schmelzbar und können daher nur durch kraftschlüssige Bolzenverbindungen oder stoffschlüssig durch Einsatz von Klebstoffen verbunden werden. Aufgrund der materialspezifischen Eigenschaften eignen sich faserverstärkte duromere Kunststoffe für großflächige Strukturbauteile (z.B. Rumpfsegmente). Thermoplastische Kunststoffe eignen sich hingegen für geometrisch komplexe Bauteile, die in thermischen Umformprozessen in großer Stückzahl gefertigt werden (z.B. Verstärkungselemente, wie Stringer u. Clips) [9]. Durch die Kombination von duroplastischen und thermoplastischen Kunststoffen können die Vorteile beider Kunststoffarten kombiniert werden. Hierzu werden chemisch kompatible thermoplastische Kunststoffe mit einem duroplastischen Epoxidharz verbunden.

2.1. RTM und Thermoplast-AFP

Resin Transfer Moulding (RTM) ist eine etablierte Fertigungstechnologie für Strukturbauteile aus Faserverbundwerkstoffen. Bei diesem Verfahren wird ein textiler Preform, i.d.R. bestehend aus umgeformten und konsolidierten, bebinderten Halbzeugen in die Kavität eines mindestens zweiteiligen Formwerkzeugs eingesetzt. Nach dem Verschließen und Aufheizen des Formwerkzeugs z.B. in einer Presse wird flüssiges Epoxidharz injiziert und der Preform somit getränkt. Nach dem Aushärten im Formwerkzeug kann dieses geöffnet und das Bauteil entformt werden. Der RTM-Prozess eignet sich gut für eine automatisierte Fertigung, da keine Hilfsstoffe, wie etwa ein Vakuumaufbau mit seinen Folien, Dichtbändern und Abreißgeweben nötig ist. Zudem kann das trockene Halbzeug in komplexere Geometrien drapiert werden, als dies z.B. bei der Umformung von Organoblechen möglich ist [10].

2.2. Duromer-Thermoplast-Anbindung

Eine in der Literatur gut beschriebene Duromer/Thermoplast-Kombination ist das Verbinden von thermoplastischem Polyetherimid (PEI) mit dem Epoxidharz Hexflow RTM6, Hexcel. Voraussetzung für die chemische Anbindung ist, dass amorphe Thermoplaste eingesetzt werden, welche durch das Epoxidharz gelöst werden können. In der Fügezone wird eine Interdiffusionsschicht ausgebildet, die auf chemischen Verbindungen zwischen den Thermoplast- und Duromer-Molekülen beruht. Dadurch wird eine stoffschlüssige Anbindung erzeugt [11, 12].

Erste Untersuchungen am DLR-ZLP Augsburg zur Anbindung mit Hilfe von Vakuuminfusionsverfahren wurden im Rahmen einer Fertigungsstudie untersucht. Dabei konnte grundsätzlich die Machbarkeit nachgewiesen werden [13].

Eine Methode zum stoffschlüssigen Verbinden von duromeren Kunststoffen mit thermoplastischen Funktionsschichten beschreibt das „Film Interdiffusion Joining“ (FIDJ-Prozess). Dabei werden ausgehärtete, mit einer thermoplastischen Folie (thermoplastische Funktionsschicht) versehene Faserverbundkunststoffkomponenten mit einer ungehärteten Faserverbundkunststoffkomponente zusammengebracht und in einem anschließenden Härteprozess gefügt. Während des Härteprozesses härtet die ungehärtete Komponente aus. Gleichzeitig entsteht ein chemischer Verbund zwischen der TP-Folie und dem aushärtenden Epoxidharz [12, 14].

Eine alternative Fertigungstechnologie stellt die b-Staging-Methode (auch Co-curing-Methode) dar. Es wird eine teilweise vernetzte duromere „b-stage“-Komponente mit einer unvernetzten duromeren Komponente zusammengebracht und gemeinsam vollständig ausgehärtet. So bildet sich ebenfalls eine stoffschlüssige Verbindung aus. Entscheidend für die Festigkeit der Fügung ist insbesondere der Vernetzungsgrad der „b-stage“-Komponente. Dieser muss so niedrig sein, dass noch ausreichend Vernetzungspotential für den zweiten Aushärteschritt mit der „a-stage“-Komponente besteht. Entsprechend sind die Härtetemperaturen und Haltezeiten anzupassen. Die „b-staging“-Methode kann sowohl mit trockenen Faserpreforms per Vakuuminfusion oder RTM-Prozess und anschließender Teilhärtung als auch mit Prepregs und Teilhärtung im Autoklav eingesetzt werden [15, 16].

2.3. Faser-Metall-Laminare

Faser Metall Laminare (FML) sind hybride Faserverbundwerkstoffe, die aus einer Kombination aus Faserverbundwerkstoff und Metall bestehen. Ein Laminat besteht im Allgemeinen aus mehreren, schichtweise aufgebauten Einzellagen des Fasermaterials. Bei FML werden einzelne Fasermateriallagen durch Metallfolien ersetzt. Als Metallfolien werden Aluminium, Stahl oder Titan eingesetzt. Aus dem Flugzeugbau bekannt ist das hybride FML Material Glass Laminare Aluminum Reinforced Epoxy (GLARE). Bei GLARE bilden glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) und Aluminium den hybriden Laminataufbau [17]. Die Verbindung zwischen Fasermaterial und Metallfolie wird durch die Matrix hergestellt. Für die Herstellung von FML Bauteilen wird überwiegend die Prepregtechnologie verwendet. Prepregs sind Faserhalbzeuge die schon vor dem Ablegeprozess mit der Matrix getränkt sind [18]. Bei diesem Verfahren wird das Laminat unter Druck und Temperatur in einem Autoklav ausgehärtet. Vereinzelt wird auch die Vakuuminfusionstechnologie für die Herstel-

lung von FML in Forschungsprojekten untersucht [19, 20]. Anders als beim Prepreg-Verfahren kommt bei der Vakuuminfusion die Matrix erst nach der Herstellung des Laminataufbaus mit dem Fasermaterial in Kontakt. Hierfür wird aus einem formgebenden, starren Formwerkzeug, einem Laminataufbau ohne Matrix und einer flexiblen Folie eine luftdichte Kavität gebildet. Ein Druckunterschied zwischen Kavität und Harzvorrat sorgt für ein fließendes Harzes in die Kavität. Meistens wird der Druckunterschied durch evakuieren der Kavität hergestellt [21].

3. KONZEPTE UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

In dem DLR internen Forschungsprojekt „Function Integrated Fuselage for a Minimum Emission Aircraft (FrAME)“ werden Fertigungstechnologien für hybride Flugzeugrumpfstrukturen entwickelt. Dabei werden drei Technologiedemonstratoren unter Einsatz unterschiedlicher Materialien und Herstellverfahren untersucht und gegenübergestellt (siehe TAB 1). In einer ersten Studie wird eine CFK-Struktur bestehend aus einer thermoplastischen Haut und duromeren Versteifungselementen betrachtet (*Demonstrator 1*). Im Fokus der zweiten Studie liegt der umgekehrte Fall mit einer duromeren Haut auf Epoxidharz-Basis und thermoplastischen Versteifungselementen (*Demonstrator 2*). In der dritten Fertigungsstudie wird ein Panel aus Faser-Metall-Laminat (GLARE) per Infusionsverfahren hergestellt (*Demonstrator 3*). Bei allen drei Demonstratoren steht die Verbindung verschiedener Materialklassen im Mittelpunkt. *Demonstrator 1* erlaubt es ebenso bolzen- und klebstofffreie Materialhybride zu fertigen. Bei *Demonstrator 2* bietet die Integration thermoplastischer Folien während des Infusionsprozesses neue Fügemöglichkeiten. Für *Demonstrator 3* wurde eine spezielle Infusionstechnologie zur Tränkung von Fasermatten zwischen den Metalllagen entwickelt.

TAB 1. Übersicht der untersuchten Material-Kombinationen und Fertigungstechnologien

Nr.	Hautmaterial	Versteifungsmaterial	Fertigungstechnologie	Funktionsintegration
1	Thermoplast	Thermoset mit Thermoplast-Inserts	Haut: TP AFP Versteifungen: One-Shot-RTM + Aufbringen von Thermoplast-Einlegern für Schweiß-Verfahren	SHM Netzwerk
2	Thermoset mit Thermoplast-Doppler	Thermoplast oder Thermoplast mit Thermoplast-Inserts	Haut: Vakuuminfusionsverfahren (VAP) mit B-stage-Methode + Aufbringen von Thermoplast-Einlegern für Schweiß-Verfahren	Leiterbahnen (Low Voltage)
3	Faser-Metall-Laminat (GLARE)	Metall (Aluminium)	Vakuuminfusionsverfahren (VADPI) + Versteifungselemente aus CFK	Leiterbahnen (High Voltage)

3.1. Demonstrator 1: Konzeptmodell

Im *Demonstrator 1* sollen Hybridbauteile aus duromeren Versteifungselementen hergestellt werden, welche mit lokalen Thermoplast-Einlegern versehen werden, damit sie nachfolgend auf eine Haut mit thermoplastischer Matrix aufgeschweißt werden können. Die Versteifungselemente sollen dabei im RTM-Prozess hergestellt werden. Die Thermoplast-Einleger werden zuvor im Preforming-Prozess mit trockenen Gewebelagen verpresst, um eine bestmögliche Anbindung zu gewährleisten. Der strukturelle Aufbau ist in BILD 1 dargestellt.

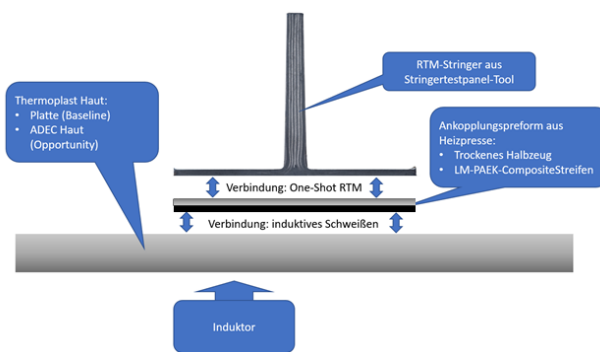


BILD 1: Struktureller Aufbau von *Demonstrator 1*

Ferner sollen SHM-Netzwerke, bzw. deren Leitungen integriert werden. Während die Sensoren nachfolgend auf die Haut appliziert werden, sollen die elektrischen Leitungen in den Faserverbundaufbau integriert werden. Dazu soll insb. der Zwickelbereich eines T-Stringers genutzt werden, der i.d.R. mit einem strukturellmechanisch nicht relevanten Füllstoff versehen wird (BILD 2).

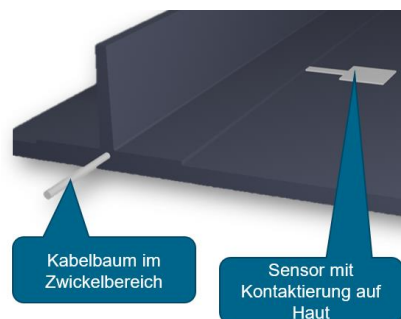


BILD 2: Integration von Leiterbahnen und Kontaktierungsstellen für SHM-Netzwerke

Ein Mehrwert durch diese Bauweise ist die prozesstechnische Separation von Sensorapplikation und Kabelbaumverlegung. Ein offener Punkt ist die Kontaktierung von Kabelbaum und Sensor. Dazu müsste in die Thermoplast-Zwischenlage ein Kontaktierungs-Insert integriert werden, der beim Schweißen Kabelbaum und Sensorkabel verbindet.

3.2. Demonstrator 1: Experimentelle Untersuchung

Eine RTM-Platte wurde mit verschiedenen Thermoplast-Einlegern aus LM-PAEK versehen, injiziert und ausgehärtet. Die verwendeten Thermoplast-Folien sind in BILD 3 dargestellt.

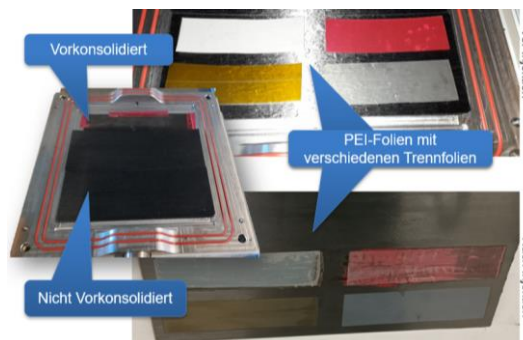


BILD 3. Materialkombinationen im RTM-Prozess

Bei den Einlegern handelte es sich um dünne Streifen des reinen Polymers ohne Verstärkungsfasern. Einige Einleger wurden nur auf den NCF-Preform gelegt, andere wurden zuvor auf einer Heizpresse auf den trockenem Preform gepresst. Ferner wurden verschiedene Trennfolien getestet, die ein Hinterspülen der Einleger durch das Injektionsharz verhindern sollten (siehe BILD 3). Zur Charakterisierung der Duromer-Thermoplast-Anbindung wurden Schliffproben erstellt und auf einem Mikroskop analysiert. Des Weiteren wurden Vorversuche zur Herstellung von Hybrid-Stringerpreforms durchgeführt.

Der eigentliche T-Stringer besteht dabei aus zwei verpressten L-Subpreforms aus bebinderten C-Faser Gelege. Darauf wird eine unbinderte Glasfaser-Gewebeschicht gelegt, die zuvor in ein LM-PAEK Organoblech heißgepresst wurde (siehe BILD 4).

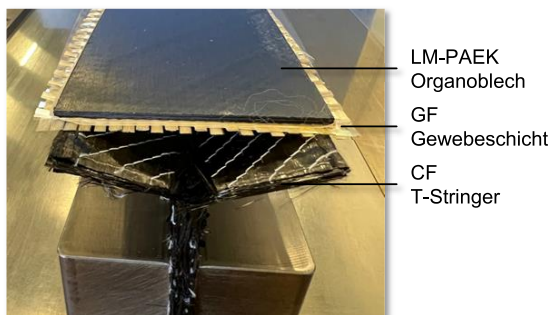


BILD 4: Aufbau des hybriden Stringers

Die Tränkung und Aushärtung des Stringers wird in der Unterseite eines eigentlich zweiteiligen RTM Formwerkzeugs durchgeführt. Da das Angusskonzept angepasst werden müssen, wurde die Oberseite durch einen Vakuumaufbau ersetzt und anstelle einer Injektion eine Infusion durchgeführt (siehe BILD 5).

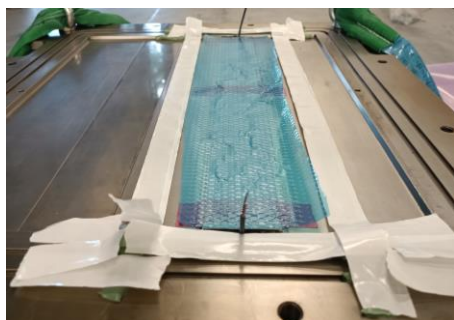


BILD 5: Vakuumaufbau für Stringerfertigung

3.3. Demonstrator 2: Konzeptmodell

Demonstrator 2 besteht aus einer duromeren Haut und thermoplastischen Versteifungselementen. Der dazu benötigte Faseraufbau wird in einem autonomen roboti-

schen Preforming-Prozess aus Kohlenstoffasergelege erzeugt. Zur Anbindung thermoplastischer Versteifungsstrukturen, werden lokal in die Oberfläche thermoplastische Funktionsschichten aus PEI-Folie (Typ ULTEM 100, Dicke 0,125 mm, Vink König Deutschland GmbH) integriert (siehe BILD 7).

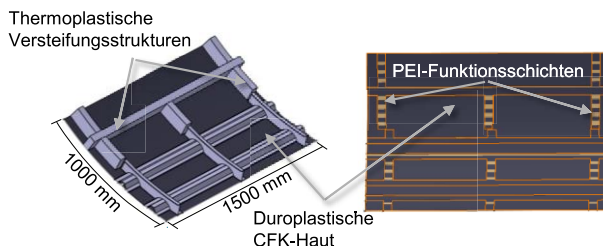


BILD 7: Demonstrator 2 aus faserverstärktem Epoxidharz mit thermoplastischen Funktionsschichten

Zur Integration der PEI-Funktionsschichten werden zwei Infusionsmethoden untersucht. Die konventionelle Infusion nach dem Vacuum Assisted Process (VAP) dient als Referenzmethode. Zusätzlich wird ein neues Konzept aufbauend auf der b-staging-Methode validiert.

Konventionelle Infusionsmethode

Bei der konventionellen Infusions-Methode werden die PEI-Funktionsschichten auf den Faser-Preform aufgebracht und in den Vakuuminfusionsaufbau integriert. Während der Infusion mit Epoxidharz werden sie umströmt und bei der anschließenden Härtung in den Verbund eingebunden. Damit die Oberfläche der Funktionsschichten während der Infusion an der Oberseite nicht mit Epoxidharz benetzt werden können, werden sie zuvor mit einer Schutzschicht abgedeckt. Hierzu werden Metallbleche eingesetzt, welche harzdicht auf der PEI-Folie fixiert werden.

B-staging-Methode

Ein neues, am DLR-ZLP Augsburg entwickeltes Verfahren beruht auf der sogenannten b-staging-Methode (Prozessablauf siehe BILD 6). Dabei erfolgt die Härtung der Epoxidharz-Matrix in zwei separaten Schritten. Der erste Härteschritt erfolgt, nachdem die CFK-Haut ohne Funktionsschichten mit Hilfe des Vakuuminfusionsverfahrens imprägniert wurde. Die Härtung wird bei einem definierten Aushärtegrad abgebrochen. Der Aushärtegrad wird so gewählt, dass einerseits die Glasübergangstemperatur T_g der teilvernetzten Matrix oberhalb der Raumtemperatur bzw. Entformungstemperatur liegt. Andererseits muss das verbleibende Vernetzungspotential ausreichend für eine Anbindung der thermoplastischen Funktionsschichten sein. Nach dem ersten Härteschritt, werden der Vakuumaufbau entfernt und die thermoplastische Funktionsschicht aufgebracht. Anschließend wird der Aufbau erneut mit einem Vakuumaufbau versiegelt und unter Vakuum vollständig ausgehärtet. Während dieser zweiten Härte-

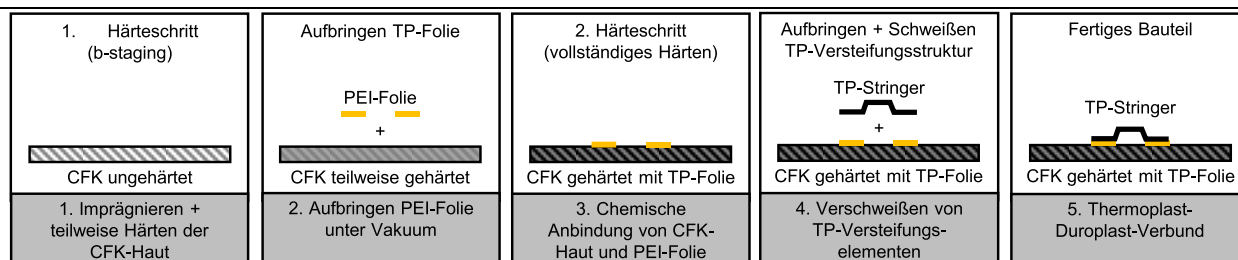


BILD 6: Prozessfolge der „b-staging“-Methode mit thermoplastischen Funktionsschichten

phase bildet sich die für die RTM6/PEI-Anbindung charakteristische Diffusionsschicht aus. Nach der Entformung können die thermoplastischen Versteifungsstrukturen wie bspw. Stringer und Spante auf die Funktionsflächen gefügt werden.

3.4. Demonstrator 2: Experimentelle Untersuchung

Der Fokus der experimentellen Untersuchungen liegt im Besonderen auf dem Infusionskonzept zur Herstellung des Hautsegments mit integrierten thermoplastischen Funktionsschichten. Für beide Konzepte wird das Vakuuminfusionsverfahren Vacuum Assisted Process (VAP) eingesetzt (Infusionsaufbau siehe BILD 8).

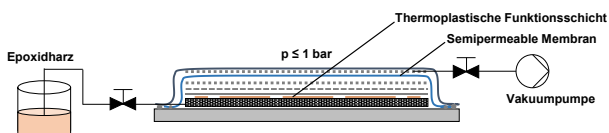


BILD 8. VAP-Infusionsaufbau

Das flüssige Epoxidharz strömt aus dem Harztopf in den Infusionsaufbau unterhalb einer semipermeablen Membran. Mit Hilfe eines Fließmediums wird das Epoxidharz auf der Preform-Oberseite eingebracht. Der Preform wird somit von oben nach unten durchtränkt.

Konventionelle Infusionsmethode

Ziel der Untersuchungen mit der konventionellen Infusionsmethode ist es, herauszufinden, ob eine vollständige Durchtränkung ohne Porenbildung mit integrierten Funktionsschichten möglich ist. Des Weiteren muss eine homogene Anbindung zwischen thermoplastischer Funktionsschicht und duromerer Harzmatrix sichergestellt sein. Dabei muss die Oberfläche der Funktionsschichten möglichst eben ohne Materialausbrüche ausgeprägt sein. Zur Härtung wird der Standard-Temperaturzyklus für RTM6 mit einer zweistündigen Haltestufe bei 180°C verwendet. Damit eine möglichst große Grenzschicht in der Anbindungszone von Thermoplast und Duromer ausgebildet werden kann, wird mit einer erhöhten Heizrate von 3°C/min nach der Infusion von 120°C auf 180°C aufgeheizt.

Aufgrund der Demonstratorgröße werden zwei Linienangüsse in den Infusionsaufbau eingebracht, welche nacheinander geöffnet werden. So kann eine gleichmäßige und vollständige Tränkung des Preforms sichergestellt werden.

B-staging-Methode

Ziel der Untersuchungen mit der B-staging-Methode ist es, herauszufinden, ob mit Hilfe des Verfahrens eine homogene Anbindung zwischen thermoplastischer Funktionsschicht und duromerer Harzmatrix realisiert werden kann. Dazu müssen für den ersten Härteschritt der erforderliche Aushärtegrad und das dafür notwendige Temperaturprofil ermittelt werden. Zur Definition der Prozessparameter werden zunächst vereinfachte Infusionsversuche mit einem reduzierten Laminataufbau auf einer Heizplatte durchgeführt. Für den Versuchsaufbau werden zwei Szenarios gewählt, bei denen die PEI-Folie einmal auf der Plattenunterseite (Versuch 1) und einmal auf der Plattenoberseite (Versuch 2) aufgelegt wird. Dadurch kann un-

tersucht werden, ob die durch das Abreißgewebe strukturierte Oberfläche für eine Anbindung der PEI-Folie geeignet ist. Die Ergebnisse werden anschließend auf den Demonstrator 2 übertragen.

3.5. Demonstrator 3: Konzeptmodell

Für den *Demonstrator 3* soll die Herstellung des Laminats durch ein Vakuuminfusionsverfahren untersucht werden. Gegenüber den vorimprägnierten Materialien, besteht die Möglichkeit Lieferketten und die Lagerung von Halbzeugen zu vereinfachen. Die trockenen Halbzeuge müssen nicht tiefgekühlt gelagert oder transportiert werden und es fällt auch kein Fertigungsabfall in Form von "backing paper" an [22]. Dafür werden bei den konventionellen Vakuuminfusionsverfahren Hilfsstoffe wie z.B. Fließhilfe benötigt. Außerdem müssen für die Infusion die Bleche perforiert werden, damit alle Einzellen mit Harz versorgt werden können. Damit möglichst wenige Löcher in die Metallfolien eingebracht werden müssen, soll die Tränkung des Fasermaterials in der Ebene und nicht senkrecht zur Ebene stattfinden. BILD 9 zeigt den strukturellen Aufbau von *Demonstrator 3*.

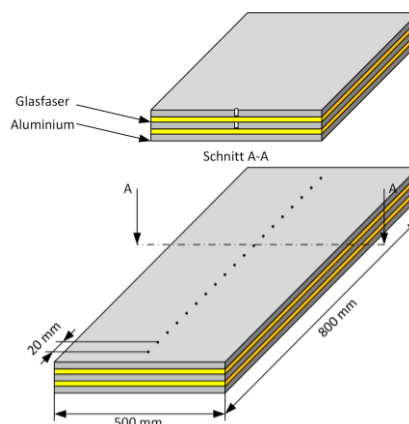


BILD 9. *Demonstrator 3* aus Glasfaser-Metall-Laminat (FML)

Das Laminat besteht aus drei Aluminiumfolien (0,4 mm stark) und zwei Glasfaserlagen (Hexcel HiMax FGE 247 mit 400 g/m²). Dieses GLARE 3/2 Laminat besitzt lediglich in den beiden oberen Metallfolien eine Lochreihe, über die das Harz in die Glasfaserlagen (GF Lagen) strömen kann. Die untere Metallfolie, die später die Außenseite des Demonstrators darstellt, besitzt keine Bohrungen. Die Abmessungen betragen 500 mm x 800 mm.

Das Infusionskonzept für den *Demonstrator 3* soll skalierbar sein. Zur Vermeidung von unnötigen Fertigungsabfällen, soll der Demonstrator im Vacuum Assisted Differential Pressure Infusion Verfahren (VADPI) hergestellt werden. Bei diesem Verfahren, werden wiederverwendbare Harzverteilungskanäle für die Infusion verwendet. Der genaue Verfahrensablauf wird in [23] beschrieben. Damit die trockenen Glasfaserlagen gleichmäßig mit Harz versorgt werden können, wird in der Mitte des Demonstrators eine Lochreihe in den Blechen vorgesehen. Entlang der Lochreihe wird ein Harzverteilungskanal positioniert. Die Harzausbreitung ist schematisch in BILD 10 dargestellt. Ausgehend von den einzelnen Bohrungen bilden sich Punktangüsse und die einzelnen Fließfronten schließen sich zu einer Linie. Wenn Bauteile die Demonstratorab-

messungen überschreiten, können mehrere Angusskanäle verwendet werden und parallel (siehe BILD 10 b)) verwendet werden. Bei einer parallelen Verwendung sind zwischen den Harzverteilungskanälen allerdings zusätzliche Drainageleitungen vorzusehen.

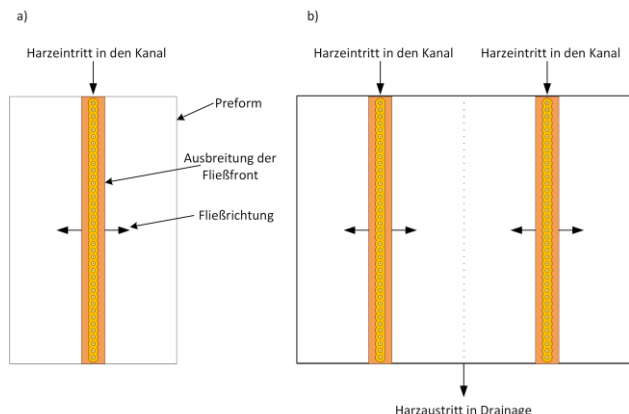


BILD 10. Infusionskonzept mit Bohrungen zur Harzausbreitung

3.6. Demonstrator 3: Experimentelle Untersuchung

Zur Untersuchung der Machbarkeit des Demonstrators sind Vorversuche notwendig, mit denen der Fließweg festgelegt und eine ausreichende Drainagewirkung überprüft werden kann. Die Metallfolien stellen nicht nur eine Barriere für den Harzfluss dar, sondern auch die visuelle Überprüfung der Fließfront wird durch die Folien behindert. Für den Vorversuch werden die Metallfolien daher durch Acrylglasplatten (2 mm Stärke) ausgetauscht. Damit das Fasermaterial zwischen den Metallfolien bzw. den Acrylglasplatten ausreichend entlüftet werden kann, werden Abreißgewebestreifen im Randbereich eingelegt. Eine Überlappung von ca. 10 mm mit dem Fasermaterial wird als praktikabel eingeschätzt. Der schematische Versuchsaufbau ist in BILD 11 dargestellt.

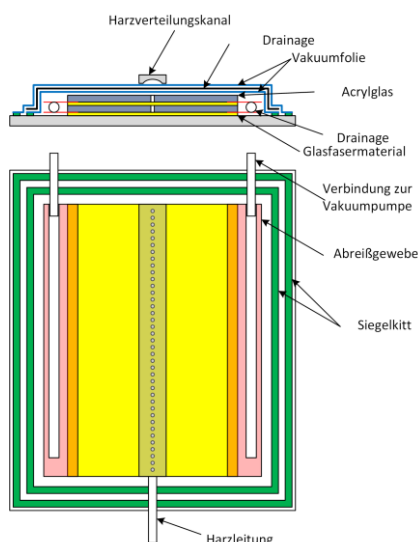


BILD 11. Infusionsaufbau für Demonstrator 3

An den langen Rändern werden Drainageleitungen (Spiralschläuche) positioniert. Eine mittig angeordnete Harzleitung versorgt den Harzverteilungskanal mit Harz. Ab-

schließend wird die Kavität mit zwei Vakuumsfolien luftdicht verschlossen und evakuiert. Für eine ausreichende Drainage zwischen den Vakuumsfolien dient eine transparente Fließhilfe. Auf der zweiten Vakuumsfolie wird der Harzverteilungskanal entlang der Lochreihe positioniert und mit Siegelkitt gedichtet. Der Harzverteilungskanal wird nach dem evakuieren des Vakuumaufbaus an eine zweite Vakuumpumpe angeschlossen. Durch evakuieren des Hohlraums wird im Kanalbereich eine Druckdifferenz eingestellt und das einströmende Harz drückt die Vakuumsfolien in den Kanalhohlraum. Hierdurch wird ein Harzfluss entlang der Lochreihe ermöglicht. Der gesamte Versuchsaufbau wird auf 50°C temperiert und vor Versuchsbeginn 24 Stunden evakuiert. Unmittelbar vor der Infusion wird das Harzsystems (Hexion LR135/LH137) für 30 min bei einem Druck von 1 mbar entgast. Für die Aushärtung wird der Versuchsaufbau auf Raumtemperatur abgekühlt und nach 12 Stunden für 8 Stunden bei 50°C getempert.

Anders als beim Vorversuch, werden beim Demonstrator Aluminiumfolien verwendet. Die Folien müssen für eine gute Anbindung zum Epoxidharz geschliffen, gereinigt und mit Solgel (3M AC130-2) vorbehandelt werden. Nach dem Schleifen mit einer Schleifmaschine (Schleifpapier 240er Körnung) werden die Folien mit Aceton gereinigt und anschließend in einem Tränkbad mit dem Solgel getränkt. Nach 60 min. Trocknungszeit wird das Laminat direkt abgelegt und der Vakuumaufbau hergestellt. Nach 24 Stunden wird das Laminat infiltriert.

4. ERGEBNISSE

4.1. Demonstrator 1: Ergebnisse

Auf Grund der dünnen Schichtdicke des Epoxidfilms gab es keine Schwierigkeiten beim Ablösen der Schicht. Es war mitunter aufwändiger, die aufgeklebte Trennfolie zu entfernen, als die Epoxidschicht selber. Daher wurde in den folgenden Versuchen ohne Trennfolie weitergearbeitet. Schlibbilduntersuchungen zeigten, dass sich die zuvor verpressten Einleger deutlich besser mit dem Faserhalbzeug verbinden (siehe BILD 12).

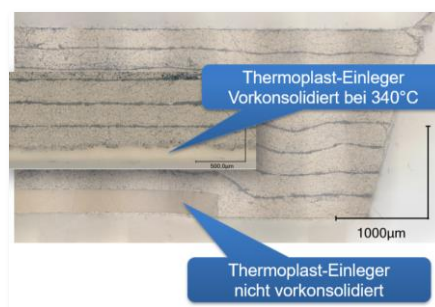


BILD 12: Schlibprobe zur Charakterisierung der Duomer-Thermoplast-Anbindung

Bei der Vorkonsolidierung wird die Thermoplast-Matrix aufgeschmolzen und die trockenen Fasern des NCF-Halbzeugs werden in die Matrix gedrückt. Dabei kommt es zu einer formschlüssigen Verbindung durch die Einbettung der äußeren Fasern in die Thermoplast-Matrix. Makroskopisch ließen sich die nicht vorkonsolidierten Thermoplast-Einleger leicht von Hand abziehen, die Verbindung der vorkonsolidierten Lamine waren deutlich stärker.

ker. Die Integration von Thermoplasteinlegern in einem RTM-Bauteil funktioniert ohne größere Probleme, sofern die zusätzlichen Prozessschritte bei der Auslegung berücksichtigt werden. BILD 13 zeigt den ausgehärteten Hybrid-Stringer mit integrierter Kabelführung.

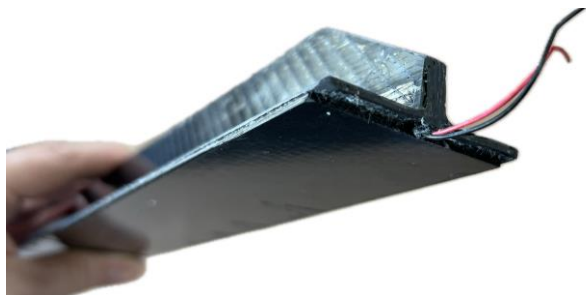


BILD 13: Hybrid-Stringer mit integrierter Kabelführung

4.2. Demonstrator 2: Ergebnisse

Der VAP-Infusionsaufbau ist in BILD 14 dargestellt. Aufgrund der Größe des Demonstrators (1500 mm x 1000 mm) erfolgt die Infusion mit Hilfe von zwei parallelen Linienangüssen, die am Bauteilrand (Linienanguss 1) und in der Bauteilmitte positioniert sind. Linienanguss 2 wird geöffnet, sobald die Fließfront dort angekommen ist. Infusion und Härtung werden in einem Heißluftofen durchgeführt.

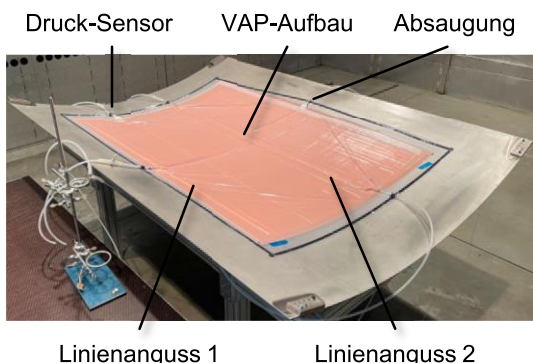


BILD 14. Infusionsaufbau für Demonstrator 2

Konventionelle Infusionsmethode

Das Hautsegment weist nach der Fertigung mit der konventionellen Infusionsmethode eine homogene Anbindung der PEI-Funktionsflächen an die RTM6-Matrix auf (siehe BILD 15). Die metallischen Deckbleche lassen sich rückstandsfrei von den Funktionsflächen entfernen. An der Unterseite weist das Hautsegment leichte Poren („pin holes“) auf der Rückseite der Funktionsflächen auf. In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass dieser Effekt mit der Bauteildicke zunimmt. Je höher die Lagenanzahl des Hautsegments, desto kritischer wirken sich die Funktionsflächen als Störkontur während der Tränkung aus. Für Demonstrator 2 ist die Einbringung der Funktionsflächen in einem Infusionsschritt somit mit einem erhöhten Risiko der Porenbildung auf der Bauteilunterseite verbunden.

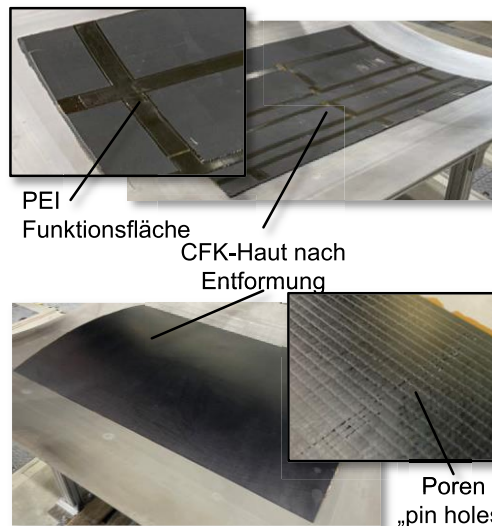


BILD 15. Gehärtetes Haut-Segment für Demonstrator 2 mit integrierter PEI-Funktionsschicht – gefertigt mit der konventionellen Infusionsmethode (VAP)

B-staging-Methode

Die erforderlichen Temperaturkurven wurden aus Literaturwerten und Vorversuchen ermittelt. Es zeigte sich, dass im ersten Härteschritt eine Teilhärtung zu einem Aushärtegrad von etwa 35 % erforderlich ist. Dieser ermöglicht einerseits eine ausreichende Formstabilität nach dem Entformen bei Raumtemperatur. Andererseits konnte gezeigt werden, dass das noch bestehende Vernetzungspotential für die Anbindung der PEI-Folie ausreicht. Um die Heiz- und Kühlzeiten möglichst gering zu halten, wurde die Härtezeit im ersten Härteschritt auf 120°C festgelegt. Als Nebeneffekt wird dadurch auch der Energiebedarf des Ofens für diesen Härteschritt reduziert. Die Härtezeit betrug 190 min. Der zweite Härteschritt erfolgte für 2 h bei 180°C (BILD 16).

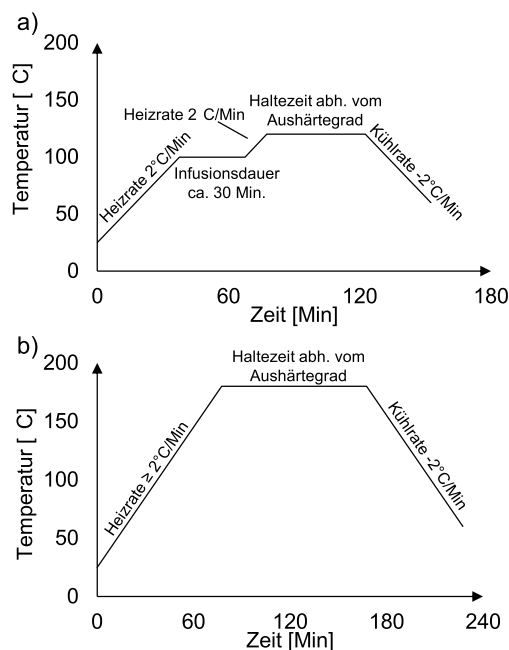


BILD 16. Temperaturkurven für 1. und 2. Härteschritt mit der B-staging-Methode

Bei Entformung der teilgehärteten Komponente nach dem ersten Härteschritt verhält sich die Epoxidharzmatrix spröde. Dies zeigt sich insbesondere beim Entfernen des Abreißgewebes von der Bauteil-Oberseite. Die Versuche an ebenen Platten zeigen, dass ein Aufbringen der PEI-Funktionsschicht auf der Bauteil-Oberseite (BILD 17 a)) kritisch ist, da dort die Harzmenge an der Oberfläche gering ist. Auf der werkzeugseitigen Bauteil-Unterseite (BILD 17 b)) ist die Anbindung hingegen vollflächig ausgeprägt.

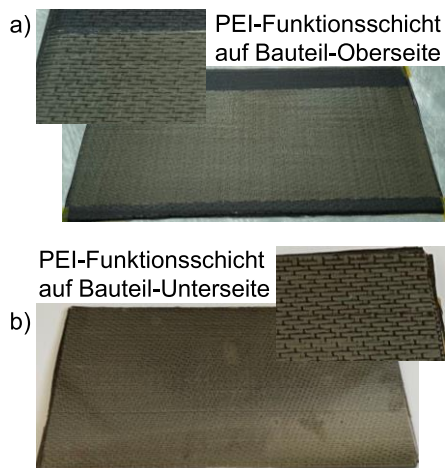


BILD 17. Versuchsplatten mit integrierter PEI-Funktionsschicht hergestellt mit der B-staging-Methode

Für den Übertrag der b-staging-Methode muss eine ausreichende Harzmenge zur Anbindung auf der Bauteiloberseite sichergestellt werden. Dies kann entweder durch Aussparung des Abreißgewebes an der Fügefläche oder durch zusätzlichen Harzauftrag vor dem zweiten Härteschritt erfolgen.

4.3. Demonstrator 3: Ergebnisse

In BILD 18 a) ist der Versuchsaufbau gezeigt. In BILD 18 b) und c) ist die Fließfront des Harzes dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Fließfront in der unteren Glasfaserschicht (blaue Linie in BILD 18 c)) schneller fortschreitet als die Fließfront in der oberen Lage (rote Linie in BILD 18 c)). Dieses Verhalten ist auf den Temperaturgradienten zurückzuführen.

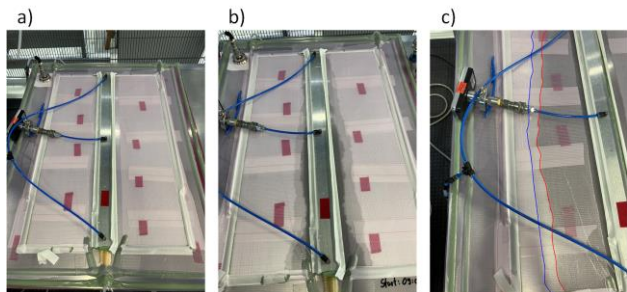


BILD 18. Fließfrontverlauf während der Infusion

Der Versuchsaufbau wird von unten über das Plattenwerkzeug erwärmt und die Acrylglasplatten wirken als thermische Isolation zwischen den Glasfaserschichten. Für den Demonstrator sind die Metallfolien mit 0,4 mm deutlich dünner als die 2 mm starken Acrylglasplatten im Vorversuch. Auch die Wärmeleitfähigkeit von Aluminium

(160 W/mK) ist höher als die von Acrylglas (0,2 W/mK). Daher werden die Fließfronten beim Demonstrator keinen großen Unterschied aufweisen. An den Bauteilrändern sind nach der Aushärtung Poren erkannt worden. Aus diesem Grund wird für den Demonstrator kein Abreißgewebe als Drainageschicht verwendet. Das Glasfasermaterial wird an den langen Rändern ca. 50 mm größer zugeschnitten und der Überstand als Anbindung an die Drainageleitung verwendet. Das Infusionskonzept, das im Vorversuch untersucht worden ist, kann für die Infusion des Demonstrators verwendet werden. In BILD 19 ist der Vakuumaufbau gezeigt.

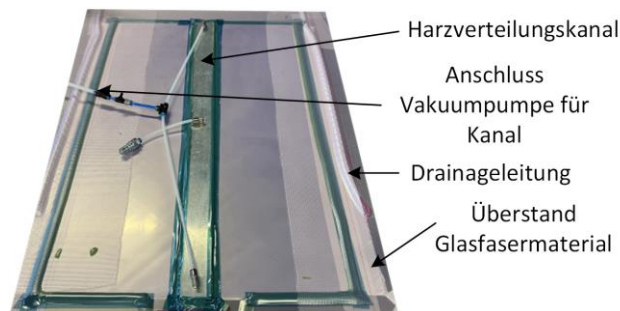


BILD 19. Vakuumaufbau für Demonstrator 3 mit Harzverteilkanal

Im Unterschied zum Vorversuch, wird das Glasfasermaterial direkt mit der Drainageleitung verbunden und kein Abreißgewebe verwendet. Ansonsten ist der Versuchsablauf äquivalent mit dem Vorversuch. Der ausgehärtete und besäumte Demonstrator ist in BILD 20 dargestellt. Poren sind am Bauteilrand nicht erkennbar.



BILD 20. Gehärteter Demonstrator 3 nach dem Entformen

5. KONZEPTBEWERTUNG UND VERGLEICH

Als Anforderungen für die Fertigungskonzepte wurden das *Automatisierungspotential für eine hochratenfähige Produktion*, die *Integration von Funktionen in die Leichtbaustruktur* und die Möglichkeit zum „*Dustfree Assembly*“ der Einzelkomponenten definiert. Die Konzepte werden im Folgenden hinsichtlich dieser Kriterien bewertet und verglichen.

Die Integration von Kabeln im Zwickelbereich des T-Stringers ist machbar, jedoch muss beim Tooldesign berücksichtigt werden, dass ggf. Kabelenden über das eigentliche Bauteil hinausragen und eine geeignete Kavität dafür vorgesehen werden muss. Die Kontaktierung der Kabel wurde jedoch noch nicht betrachtet und kann eine Herausforderung darstellen. Ferner ist noch zu untersuchen, in wie weit der Epoxidharzbereich beim Schweiß-

prozess thermisch entlastet werden kann, bzw. wie sich die Wärmeeinflusszone bei unterschiedlichen Schweißparametern und -verfahren auswirkt. Es erscheint sinnvoll, als Gewebelage im Ankopplungs-Preform ein Glasfaser-Halbzeug zu verwenden, das es die C-Fasern des Stringerpreforms von den Wirbelströmen beim Induktiven Erwärmen entkoppelt. Bei den Versuchen wurden exemplarisch nur gerade Stringer verwendet, um das Konzept an sich zu untersuchen. Im Realfall könnten gerade T-Stringer ebenso aus gekanteten Organoblechen gefertigt werden. Einen Vorteil wird dieses Konzept nur bringen, wenn die Anforderungen aus Geometrie, Performance und Materialkosten den Einsatz von RTM rechtfertigen.

Die b-staging-Methode zur Integration thermoplastischer Funktionsschichten bietet die Möglichkeit der Automation insbesondere in Bezug auf ein robotisches Halbzeug-Handling. Dabei können sowohl die Fasermatten bei der Preform-Erstellung, als auch die Funktionsschichten robotisch positioniert werden [24]. Weiterhin bestehen bereits Lösungen zur sensordatenbasierten Prozesssteuerung, sodass insbesondere eine automatisierte Aushärtetradregelung beim Härteprozess implementiert werden kann [25]. Diese eignen sich sowohl für RTM als auch für Vakuuminfusionsprozesse. Die Integration von elektrischen Leitern in den Demonstrator 1 wird im Projekt FraME mit Hilfe des WeldSealer-Prozesses untersucht. Das Verfahren wurde im Rahmen des Projekts HoTStufF entwickelt [26]. Dabei können Leiterbahnen beim Versiegeln von Fügekanten mit zusätzlichem thermoplastischen Matrixmaterial eingebracht werden. Das Aufbringen von Versteifungsstrukturen auf thermoplastische Funktionsschichten mit Hilfe des Ultraschall-Schweißens wurde durch S. Jarka im Projekt FraME untersucht [27]. Insgesamt bietet die Kombination aus b-staging-Methode und Weld-Sealer-Prozess das Potential einer industrietauglichen, temperatur- und hydraulikbeständigen Fügung. Negativ wirkt sich bei dem Konzept „b-staging-Methode“ der zusätzliche Härteschritt auf die Energiebilanz und auf den Einsatz von Verbrauchsmaterialien aus. Hierbei können ein Härten bei niedrigeren Temperaturen in Kombination mit dem VADPI-Infusionsprozess (siehe Demonstrator 3) weiteres Optimierungspotential ausschöpfen.

Mit Faser-Metall-Laminaten können die zwei Anforderungen Funktionsintegration und Automatisierungspotential prinzipiell erfüllt werden. Die Metallschichten eines FML können prinzipiell als Leiterbahnen dienen und decken damit die Funktionsintegration ab [28]. Wie oben beschrieben, ist in anderen Projekten gezeigt worden, dass die Ablage von trockenem Fasermaterial automatisiert erfolgen kann. Die Herstellung von GLARE ist bislang ein manueller Prozess. Eine mögliche Prozessautomatisierung wurde allerdings im Forschungsprojekt Autoglare gezeigt [29, 30]. Dabei ist Prepreg als Fasermaterial verwendet worden. Eine Steuerung des Infusionsprozesses ist ebenfalls anhand eines Sensornetzwerks denkbar. Das Aufbringen von Versteifungsstrukturen sowohl aus faserverstärktem Kunststoff oder Metall, erfordert bei diesem Konzept Bolzenverbindungen, da Klebverbindungen in Primärstrukturen in der Luftfahrt nicht zugelassen sind. Im Gegensatz dazu konnte jedoch der Einsatz von Verbrauchsmaterialien mit Hilfe des VADPI-Infusionsprozesses im Vergleich zu herkömmlichen Vakuuminfusionsmethoden deutlich reduziert werden.

In TAB 2 werden die Fertigungskonzepte hinsichtlich der Bewertungskriterien verglichen. Das Automatisierungs-

potential konnte bereits im laufenden oder in vorherigen Projekten aufgezeigt werden. Jedoch ist der Industriereifegrad noch nicht ausreichend für eine serielle Produktion, insbesondere, wenn man die Integration der Funktionsschichten oder auch das Handling der Infusionshilfsstoffe in die Betrachtung einbezieht. Die Schweißbarkeit bzw. das „Dustfree Assembly“ ist für die ersten beiden Konzepte prinzipiell möglich. Für den GLARE-Demonstrator sind Bolzenverbindungen notwendig. Bei den Integrationsmöglichkeiten ist GLARE besonders gut bewertet, da die leitende Struktur in Form der Metallbleche bereits Teil des Laminats ist. Bei den anderen Konzepten werden die Leiterbahnen unter den Stringer (*Demonstrator 1*) oder in die Fügekante (*Demonstrator 2*) integriert. Diese Methoden bedürfen weitere Untersuchungen und Charakterisierungen hinsichtlich eines Einsatzes in Primärstrukturen.

TAB 2. Vergleich der Fertigungskonzepte

Kriterien	Demonstrator 1	Demonstrator 2	Demonstrator 3
Automatisierbarkeit	+	++	++
Integrationsmöglichkeiten	++	++	+++
Schweißbarkeit/ Dustfree Assembly	tbd	++	---

+++ sehr gut --- sehr schlecht

6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen konnten die drei Fertigungskonzepte experimentell validiert und zum Teil auch schon in Anwendungsdemonstratoren überführt werden. Hierbei zeigte sich das Optimierungspotential durch einen hybriden Laminataufbau. Sowohl die Schweißbarkeit der Thermoplast-Duromer-Hybride, also auch die Herstellung von GLARE-Laminaten im Vakuuminfusionsverfahren bieten auch über die Luftfahrtindustrie hinaus Anwendungsmöglichkeiten.

Darüber hinaus zeigen die Projektergebnisse weiteres Entwicklungspotential auf. So sind die Thermoplast-Duromer-Hybride bisher auf wenige Materialkombinationen beschränkt. Hier bedarf es einer umfassenden Materialcharakterisierung. Bei allen drei Konzepten müssen die Funktionsintegration und elektrische Kontaktierung im Detail untersucht werden. Schließlich sind die Reifegrade der Fertigungsprozesse unter industriellen Bedingungen abzubilden.

7. REFERENZEN

[1] K. Wicke, K. Dahlmann, Lifecycle Evaluation of Concept Aircraft for Sustainable Aviation, DLRK, Virtuelle Konferenz, 2021

- [2] C. Hühne, S. Niemann, Anisogrid Design for Fuselage Primary Structures – Results of EU/RU Projects ALaSCA and POLARBEAR, 5th Aircraft Structural Design Conference, GB, Manchester, 2016
- [3] S. Niemann, B. Kolesnikov, Design and Numerical Validation of a Lattice Fuselage Structure Concept, 3rd EASN Association International Workshop on Aerostructures, Italien, Mailand, 2013
- [4] H. Wilmes, M. Kleineberg, Schwarzer Rumpf - Technologie- und Bauweisenentwicklung für einen CFK-Rumpf, DLRK, Jahrbuch Band I + II, S. 1-9, Stuttgart, 2002
- [5] F. Kruse, M. Kühn, Production of a Full-Scale Demonstrator-Structure within the FP7 Project “Maaximus”, 5th International Workshops on Aerostructures, GB, Manchester, 2015
- [6] H. Ucan, J. Scheller, Automated, Quality Assured and High-Volume-Oriented Production of Fiber Metal Laminates (FML) for the Next Generation of Passenger Aircraft Fuselage Shells, Science and Engineering of Composite Materials (26), S. 1-7, 2019
- [7] S. Niemann, B. Kolesnikov, The use of topology optimisation in the conceptual design of next generation lattice composite aircraft fuselage structures, The Aeronautical Journal, 117 (1197), S. 1139-1154, 2013
- [8] F. Fischer, Towards a thermoplastic upper shell demonstrator: Production technologies for future fuselages, DLRK, Virtuelle Konferenz, 2020
- [9] G.W. Ehrenstein, Faserverbund-Kunststoffe, Werkstoffe – Verarbeitung - Eigenschaften, Carl Hanser Verlag, München, 2006
- [10] S. Torstrick, F. Kruse, EVO: Net Shape RTM Production Line, Journal of Large-Scale Research Facilities JLSRF, 2 (A66), 2016
- [11] C. Brauner, Co-curing behaviour of thermoset composites with a thermoplastic boundary layer for welding purposes, Review Article, Advanced Composites Letters, Vol. 29: 1-0, 2020
- [12] P. Bruckbauer, Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von Interphasen zwischen Epoxidharz und thermoplastischen Funktionsschichten für Faserverbundwerkstoffe Dissertation, Technische Universität München, 2018201–219, 2018
- [13] J. Faber, A. Huber, Manufacturing study on CFRP rear pressure bulkhead using vacuum assisted process, SAMPE Europe Conference, Hamburg, 2022
- [14] F. Weiland, U. Beier, US Patent: Method for joining thermoset components, Publication No. 20170028698, 2017
- [15] J. Moosburger-Will, Influence of partial cross-linking degree on basic physical properties of RTM6 epoxy resin, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 130 (6), S. 4338-4346, 2013
- [16] F.T. Rieger, Entwicklung eines modifizierten Co-Curing-Verfahrens zur Herstellung von Komponenten aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, Dissertation, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, 2019
- [17] J.W. Gunnink, Glare technology development 1997–2000, Applied Composite Materials, 9(4), S. 201–219, 2002
- [18] G. Wu, The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures, JOM, Vol. 57, S. 72-79, 2005
- [19] D. Stefaniak, Chances and challenges in the application of fiber metal laminates, Advanced Materials Letters, 10 (2), S. 91-97, 2019
- [20] S. Dariushi, An experimental investigation on infusion time and strength of fiber metal laminates made by vacuum infusion process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 235 (8), S. 1800–1808, 2021
- [21] A. Hindersmann, Confusion about infusion: An overview of infusion processes. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 126, S. 105583, 2019
- [22] G. Nilakantan, Reuse and upcycling of thermoset prepreg scrap: Case study with out-of-autoclave carbon fiber/epoxy prepreg. Journal of Composite Materials, 52(3), S. 341-360, 2018
- [23] A. Hindersmann, Experimental investigation of a method to avoid channel marks during vacuum infusion, Journal of Composite Materials, 54(16), S. 2147–2158, 2020
- [24] M. Malecha, Robot preformed CFRP rear pressure bulkhead as an example for highly automated manufacturing of large carbon fibre aircraft parts, 7th Transport Research Arena TRA, Wien, 2018
- [25] J. Faber, Sensor-based process monitoring of in-situ polymerization in T-RTM manufacturing with caprolactam, SAMPE Europe, Schweiz, 2021
- [26] S. Jarka, S. Bauer, Thermoplastic Processing Technologies Towards Industrialization, SAMPE Europe, Deutschland, 2022
- [27] S. Jarka, Fügen von Thermoplast-Duroplast-Hybriden mit Funktionsintegrativer Versiegelung, DLRK, Stuttgart, 2023
- [28] A. Pototzky, D. Stefaniak, Potentials of lead carrying conductor tracks in new vehicle structures, Technologies for Economical and Functional Lightweight Design, S. 79-90, 2019
- [29] H. Ucan, H. Apmann, Production technologies for lightweight structures made from fibre–metal laminates in aircraft fuselages, CEAS Aeronautical Journal, 10(2), S. 479-489, 2018
- [30] C.D. Nguyen, C. Krombholz, Vergleich von Legetechnologien für die automatisierte Glasfaserablage in der GLARE-Bauteilfertigung, Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress (DLRK), Friedrichshafen, 2018

8. KONTAKTADRESSE

Jan Faber M.Sc.
 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) e.V.
 Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie
 Am Technologiezentrum 4
 86159 Augsburg
 jan.faber@dlr.de