

ENTWICKLUNG EINES INDUKTIONSBEHEIZTEN WERKZEUGS FÜR OUT-OF-AUTOCLAVE-FERTIGUNGSPROZESSE FÜR FASERVERBUNDBAUTEILE

D. Fricke, S. Tröger
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
Pfaffenwaldring 38-40
70569 Stuttgart

K. Kerker, M. Schneider
msquare GmbH
Augsburger Straße 704
70329 Stuttgart

Zusammenfassung

Hoch beanspruchte Bauteile aus Faserverbundkunststoffen (FVK) werden aufgrund der erforderlichen Materialeigenschaften häufig in Autoklaven gefertigt. Der hohe Energie- und Zeitaufwand macht die Entwicklung alternativer Out-Of-Autoclave-Prozesse (OOA) mit vergleichbarer Qualität interessant. Insbesondere additive Verfahren wie Automated Fiber Placement (AFP) besitzen ein hohes Einsparungspotenzial. Bei der Verwendung von FVK mit thermoplastischer Matrix und In-Situ-Konsolidierung lassen sich kurze Zykluszeiten erreichen. Allerdings sorgen der hohe Temperaturgradient und die inhomogene Aufheizung des Bauteils beim Ablegen der Tapes für hohe Spannungen und bei teilkristallinen Werkstoffen auch für ungleichmäßige Kristallisationen. Um gleichbleibende Bauteilqualität bei besserer Energieeffizienz und kürzeren Zykluszeiten zu realisieren und dabei den Verzug und die Eigenspannungen zu minimieren, haben Untersuchungen aus der Vergangenheit deutliche Vorteile bei der Verwendung von beheizten Werkzeugen gezeigt. Klassisch kommen bei der Werkzeugheizung entweder integrierte Heizsysteme über Medien wie Öl oder Wasser oder externe Wärmequellen wie Heizdecken oder Infrarotstrahler zum Einsatz. In das Werkzeug integrierte Heizungen erhöhen allerdings die Kosten für das Werkzeug, so dass sich die Anschaffung erst bei größeren Stückzahlen amortisiert. Externe Heizsysteme hingegen interferieren bei additiven Fertigungsverfahren mit dem Prozess, da z.B. bei AFP der Tapelegekopf freien Zugang zum Bauteil im halboffenen Werkzeug benötigt. Für diesen Anwendungsfall ist also eine neuartige Werkzeugheizung erforderlich.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Werkzeug entwickelt, bei dem die Heizung durch mehrere Induktionsspulen realisiert wird. Hierdurch kann eine homogene Temperaturverteilung bei gleichzeitig effizienter Energiezufuhr gewährleistet werden. Durch eine angepasste Konstruktion des Werkzeugs können deutliche Energieeinsparungen und hohe Aufheizraten erzielt werden, was wiederum kürzere Taktzeiten ermöglicht. Mit Hilfe von Prozesssimulationen sowohl der Induktionsheizung als auch des AFP-Prozesses wurden die Fertigungsparameter optimiert und werden mit einem mehrfach gekrümmten Demonstratorbauteil validiert. Die Laminatqualität wird abschließend mittels diverser Analysemethoden wie z.B. 3D-Scans überprüft.

1. EINLEITUNG

Faserverbundkunststoffe (FVK) mit duromerer und thermoplastischer Matrix gewinnen zunehmend an Bedeutung. Insbesondere Sekundärstrukturen in der Luftfahrt werden routinemäßig aus FVK gefertigt. Für den Einsatz in Primärstrukturen werden allerdings höhere Anforderungen an die Werkstoffe, insbesondere an die Matrix, gestellt. Hochleistungsmatrixwerkstoffe wie z.B. Polyetheretherketone (PEEK) stellen insbesondere aufgrund ihrer hohen Verarbeitungstemperatur und teilkristalliner Werkstoffeigenschaften eine Herausforderung an die Fertigungstechnologie dar und erfordern häufig aufwendige Toolings und Öfen oder sogar Autoklaven. Auch Out-of-Autoclave-

Fertigungsprozesse (OOA) erfordern häufig beheizte Werkzeuge, um eine zufriedenstellende Bauteilqualität zu erreichen. [1]

Bei vorhergehenden Arbeiten zum Thema Reparatur von thermoplastischen Flugzeugstrukturen [2] wurde eine Technologie zur induktiven Erwärmung entwickelt, die sich flexibel auf Oberflächen anpassen kann [3]. Basierend auf diesen Arbeiten wurde die Induktionsspule vergrößert und eine Methode zur Erwärmung einer beliebig skalierbaren Fläche entwickelt.

2. STAND DER TECHNIK

Bei der Herstellung von Leichtbaustrukturen unter der Verwendung von FVK werden einzelne Lagen aus Fasern und einer Kunststoffmatrix in dafür vorgesehenen Werkzeugen abgelegt. Eine Variante für OOA-Prozesse ist das Tape Placement mit in-situ Konsolidierung. Dabei wird mit einem Laser die thermoplastische Matrix eines FVK-Tapes auf- oder angeschmolzen und anschließend auf das Ziellaminat aufgeschweißt. In mehreren Durchläufen wird so das Ziellaminat konsekutiv aufgebaut. Da Werkstoffe wie PEEK eine hohe Verarbeitungstemperatur erfordern und zudem Kristallisationsprozesse ablaufen, muss für geringen Verzug und niedrige Eigenspannungen während des Prozesses Wärme über die Formwerkzeuge eingebracht werden. Der Einfluss verschiedener Fertigungsparameter wurde in vielen Studien genauer untersucht. [4] [5] [6] [7]



BILD 1. Tape Placement [8]

Durch die Fertigungsmethode ist die Art der Wärmezufuhr eingeschränkt. Der Tapelegekopf erfordert einseitigen Zugang zur Werkzeugoberfläche, so dass Heizaufbauten auf der offenen Seite nicht möglich sind. Dafür bietet sich aber die Integration in das Werkzeug selbst an. Bei metallischen Werkzeugen, wie sie bei höheren Einsatztemperaturen erforderlich sind, kommen häufig Heizpatronen oder ähnliche Technologien zum Einsatz. Diese bieten bei ausreichender Werkzeugstärke eine homogene Temperaturverteilung, können aber bei komplex geformten Geometrien nicht verwendet werden. Insbesondere die Anforderungen an eine homogene Temperaturverteilung können dann nur schwer erfüllt werden. Flexible Heizdecken, die sich an die Werkzeugform anpassen, müssten auf der Werkzeugunterseite aufgebracht werden und die Wärme so mittels Konvektion auf das Werkzeug übertragen, was häufig zusätzliche Energie erfordert. Zudem können diese Matten oft nur begrenzt an komplex gekrümmte Geometrien angepasst werden. Induktive Werkzeugheizungen werden bereits im Bereich Spritzguss eingesetzt. Hier werden meist starre gekühlte Induktionsspulen verwendet, die explizit für den Anwendungsfall ausgelegt werden müssen. Die Kosten sind für diese Art der Erwärmung sind sehr hoch, zudem kann die Technologie nicht auf großflächige Strukturen übertragen werden.

Die im Projekt betrachteten Induktionsspulen sind flexibel und werden an der Werkzeugfläche aufgebracht. Sie induzieren die Wärme direkt in die Werkzeugoberfläche. Die Wärme wird direkt im Werkzeug erzeugt und muss nicht erst konvektiv übertragen werden. Dadurch ist die erforderliche Energie niedriger als bei vergleichbaren Methoden. Zudem können die Spulen auch einzeln an die Werkzeugunterseite angebracht werden und somit auch komplexe Geometrien abbilden. Das Startup msquare GmbH hat eine flexible

Induktionsheizung für die Reparatur von FVK entwickelt. Diese Technologie wurde im Rahmen des Projekts „Neues Fertigungsverfahren und Werkzeugkonzept zur energieeffizienten Herstellung von Faserverbundstrukturen“ (NeFeFa) zusammen mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) für die Verwendung in der Fertigung von FVK adaptiert.

3. WERKZEUGENTWICKLUNG

Das Ziel des Verbundprojekts ist die Entwicklung eines komplex geformten induktionsbeheizten Werkzeugs für die Verwendung beim Tape Placement. Zu diesem Zweck wurde als Demonstratorgeometrie ein Ausschnitt aus der Außenhaut eines generischen unbemannten Luftfahrzeugs gewählt, da dieser sowohl komplex gekrümmt ist als auch ausreichend große Krümmungsradien aufweist, um den Zugang des Tapelegekopfes nicht zu behindern. Auf BILD 2 ist ein CAD-Modell der Geometrie zu sehen. Die minimalen Krümmungsradien sind ca. 0,9 m in Richtung der starken Krümmung und 10 m in Richtung der schwachen Krümmung.

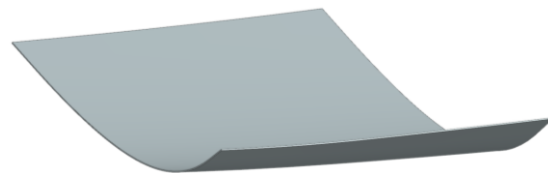


BILD 2. CAD-Modell des Zielausschnittes der Außenhautgeometrie

3.1. Spulenentwicklung

Die FlexIn Heat Induktionsspule ist eine flexible Komponente, die sich aufgrund ihrer besonderen Bauart leicht auf gekrümmte Oberflächen applizieren lässt. Die Spule wurde ursprünglich für die Reparatur von CFK Bauteilen entwickelt und wurde im betrachteten Projekt auf große Oberflächen skaliert. Neben der Bauart der Spule und dem Herstellungsprozesses wurde das System komplett neu entwickelt. Speziell wurden die folgenden Aspekte betrachtet: 1. Die Geometrie der Spule, 2. Die Elektronik zur Erzeugung des EM-Feldes.

In BILD 3 sind die einzelnen Komponenten des Heizungssystems dargestellt: Eine Regeleinheit, ein Netzteil, ein Generator/Oszillator, Temperatursensoren und die eigentliche Induktionsspule.

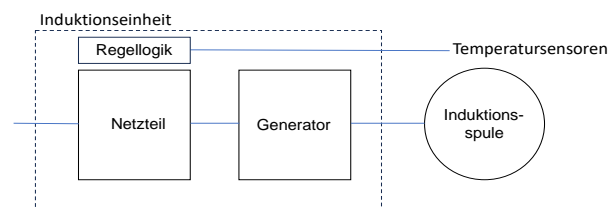


BILD 3. Auslegung der Induktionsspulen

Ein wichtiger Parameter des Systems ist die Frequenz, die durch die verwendete Kapazität des Kondensators und der Induktivität der Spule bestimmt wird. Für die Arbeiten im Rahmen des Projektes wurden Frequenzen von 20 kHz bis 400 kHz untersucht.

Um die optimale Spuleneigenschaften zu bestimmen, wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Dabei wurden 5 verschiedene Spulen hergestellt und auf dem msquare eigenen Prüfstand in Betrieb genommen und analysiert. Ziel war es dabei den Wirkungsgrad des Systems zu maximieren und gleichzeitig die Wärmeverteilung auf der Probenoberfläche zu optimieren. Im nachfolgenden Bild ist die daraus entstandene „Kettenspule“ zu sehen. Diese besitzt 23 Einzelspulen in Reihe geschaltet mit jeweils 7 Windungen. Bei dieser Konfiguration wurde ein Kompromiss zwischen Leistungsfähigkeit und Homogenität der Temperaturverteilung erzielt.

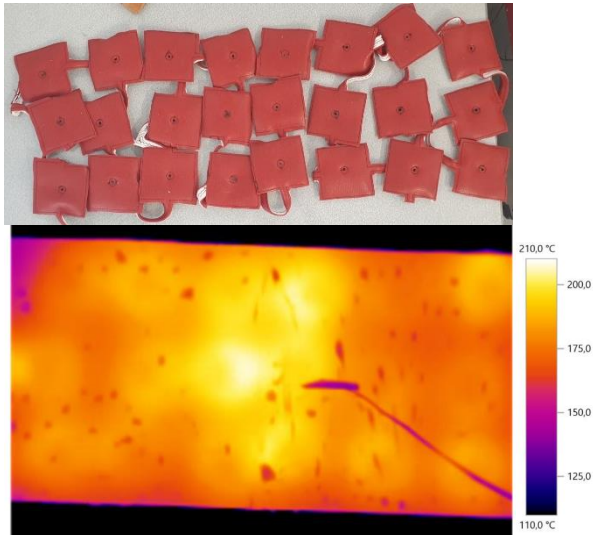


BILD 4. Msquare RedInduktion; oben: Induktionsspulen; Mitte: Wärmebild des beheizten Werkstücks; unten: Induktionsgenerator

3.1.1. Skalierung des Systems

Im nächsten Schritt wurde eine Induktionseinheit entwickelt, die eine Skalierung auf beliebige Größen der Heizfläche ermöglicht. Dazu wurde der RedInduktion entwickelt. Die Eigenschaften der Regeleinheit wurden auf die Spule und das verwendete Material abgestimmt. Eine Werkzeugheizung kann damit aus einer beliebig großen Fläche bestehen, wobei eine Zone aus 23 Spulen in Verbindung mit einem RedInduktion aufgebaut sind.

Eine Analyse der Befestigungsmethoden für die Induktionsspulen wurde durchgeführt. Im Hinblick auf die Servicefähigkeit des Systems wurde beschlossen eine lösbare Verbindung zu verwenden. Dazu wurden Befestigungselemente aus PTFE konstruiert, die über Schrauben an dem Werkzeug befestigt werden. Zur Anpassung der Spulen an eine gekrümmte Oberfläche wurden Gewinde an den Kreuzen angebracht um die Spule ggf. punktuell mit einer Schraube anzupressen.



BILD 5. „Kettenspule“ mit PTFE Befestigungselementen

3.1.2. Regelelektronik

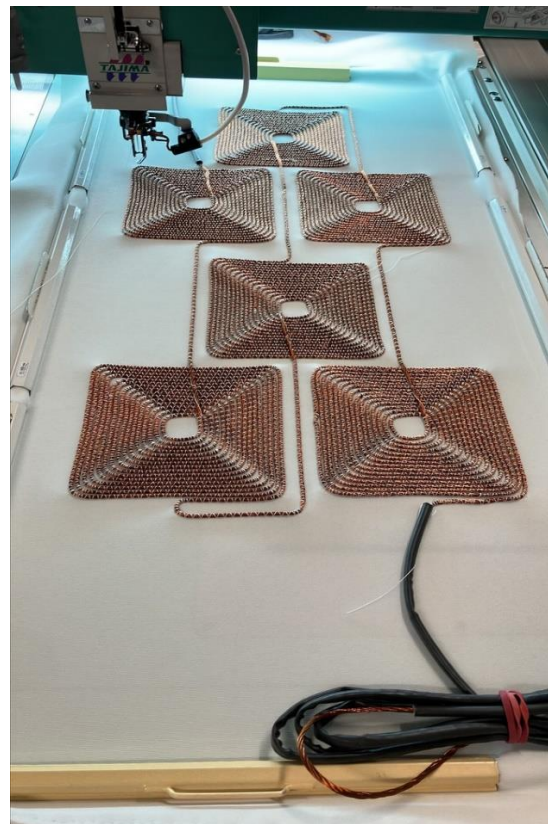


BILD 6. Fertigung einer FlexIn Heat Spule

Mit dem Ziel eine möglichst homogene Temperaturverteilung zu erhalten wurde jede Reduktion Einheit mit einer eigenen PID Regelung versehen. Zur Messung der Temperatur wurden spezielle Thermocouples Typ E eingesetzt, die aufgrund der verwendeten Legierung nur eine minimale Einkopplung in das System aufweisen. Jede Zone wird auf diese Weise individuell geregelt. Die Zonen wurden derart konzipiert, dass sie Bereiche mit ähnlichem thermischen Verhalten abdecken.

3.2. Strukturentwicklung

Die ausgewählte Struktur stellt einen Ausschnitt aus der Außenhaut eines generischen unbemannten Luftfahrzeugs dar. Für die Verwendung des Werkzeugs im Tape Placement Prozess müssen folgende Voraussetzungen erfüllt werden:

- Temperaturbeständigkeit bis 500° C
- Thermische Isolierung von beheizter Werkzeugoberfläche und unbeheiztem Unterbau
- Schwimmende Lagerung zwischen Werkzeugoberfläche und Unterbau, um Wärmedehnung aufzufangen
- Homogene Temperaturverteilung im beheizten Bereich, daher homogene Dicke des Blechs für die Werkzeugoberfläche
- Ausreichende Steifigkeit für die im Tape Placement Prozess auftretenden Belastungen (der Tapelegekopf belastet das Werkzeug mit bis zu 6 bar)

Um die Anforderungen zu erfüllen, bietet sich ein Werkzeug in Differenzialbauweise an, bei dem die Werkzeugoberfläche und der versteifende Unterbau getrennte Bauteile und nur schwimmend miteinander verbunden sind. Dies bietet zudem Vorteile bei der Wartung und eventuellem Austausch von Teilen der Induktionsheizung. Um die Kosten und den Fertigungsaufwand niedrig zu halten, wird ein Unterbau aus Rippen vorgesehen, die per Wasserstrahlschneiden aus ebenen Blechen ausgeschnitten werden. Mithilfe von zusätzlichen Öffnungen in den Rippen kann das Gewicht des gesamten Werkzeugs ohne Heizung zudem unter 50 kg gehalten werden.

Da ausschließlich die Werkzeugoberfläche beheizt werden soll und zudem eine thermische Entkopplung zwischen beiden Komponenten vorgesehen ist, kann die Anforderung an die thermische Belastbarkeit für den Unterbau gelockert werden. Numerische und analytische Berechnungen ergaben eine maximale Temperatur von 160° C an dem Unterbau, was die Verwendung von einer Aluminiumlegierung ermöglicht.

Die Werkzeugoberfläche hingegen erfordert andere Werkstoffe. Insbesondere die induktive Heizung erfordert für ihre Funktion einen ferromagnetischen Werkstoff wie z.B. niedriglegierter Stahl. Zudem erfordern die Induktionsspulen eine vergleichsweise dünne Struktur mit homogener Dicke, um effektiv heizen zu können.

Für die Auslegung der Werkzeugoberfläche und der genauen Verteilung der Rippen des Unterbaus wurde eine einfache FEM-Simulation aufgesetzt und über geometrische Parameter optimiert. Dabei war das Ziel, bei möglichst geringer Werkzeugdicke und großen Rippenabständen eine geringe Durchbiegung bei voller Belastung durch den Tapelegekopf zu erreichen. Hierfür wurde mithilfe der FEM-Software Ansys 2021 R1 ein vereinfachtes Simulationsmodell aufgebaut, bestehend aus einem quadratischen Stahlteil mit gegebener Dicke. Eine Ecke war fest eingespannt, während die gegenüberliegende mit der zu erwartenden Last durch den Tapeleger belastet wurde. Die Seiten des

Rechtecks wurden mit Symmetrierandbedingungen versehen. Dies sollte den kritischen Lastfall darstellen, dass der Tapelegekopf möglichst weit von versteifenden Elementen entfernt ist (siehe BILD 7).

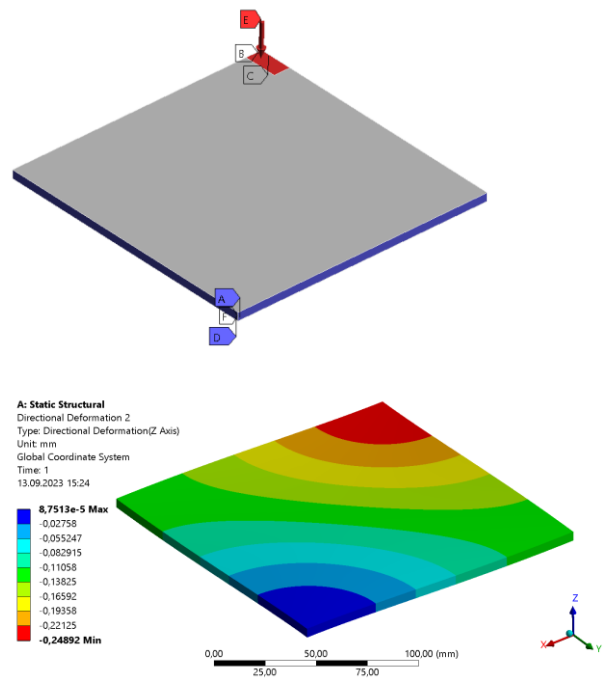


BILD 7. Oben: Setup der Optimierungssimulation für die Werkzeugdimensionierung (blau: Symmetrie, rot: Druck); Unten: beispielhafte Deformation durch Belastung in mm (negativ)

Die Blechdicke sowie die Kantenlänge des Quadrates wurden als Variablen definiert und mit dem Ziel der Masseminimierung bei einer definierten maximalen Durchbiegung mit einem Optimierungsalgorithmus bearbeitet. Ein 3 mm starkes Blech mit Rippen im Abstand von 480 mm hat sich dabei als Optimum herausgestellt.

3.2.1. Vergleich unterschiedlicher Werkzeugfertigungsverfahren

Um ein Stahlblech mit homogener Dicke für ein komplex geformtes Werkzeug zu fertigen, sind besondere Anforderungen an den Prozess zu stellen. Im Folgenden werden drei Fertigungsmethoden genauer untersucht und bewertet

3.2.1.1. Gebogene und verschweißte Bleche

Die einfachste Fertigungsmethode besteht darin, vorgefertigte ebene Bleche in Form zu biegen. Für einfach gekrümmte Bauteile ist dies ein bewährtes Verfahren, das breite Anwendung in der Industrie findet.

Komplex geformte Geometrien stellen diesen Prozess jedoch vor Herausforderungen, da klassische Blechbiegetechniken nur für eindimensionale Krümmungen geeignet sind. Derartige Geometrien werden stattdessen bspw. per Tiefziehen hergestellt, was aber massive Werkzeuge erfordert und sich für kleine Stückzahlen selten rechnet. Für spezielle Anwendungsfälle kann das Bauteil aus mehreren kleinen gebogenen Blechstücken zusammengeschweißt werden. Mit Nachbearbeitungsschritten lassen sich somit

auch komplex geformte Bauteile fertigen. BILD 8 zeigt ein für das DLR mit diesem Verfahren hergestelltes Werkzeug. Die erreichbare Genauigkeit ist allerdings durch den inhomogenen Wärmeeintrag des Schweißprozesses gering, und durch innere Spannungen können zusätzliche Verformungen entstehen. Zudem sind der Aufwand und somit auch die Kosten für die Schweißungen relativ hoch. Für Bauteile in Luftfahrtanwendungen mit niedrigen Toleranzen ist dieser Prozess somit nur bedingt geeignet.

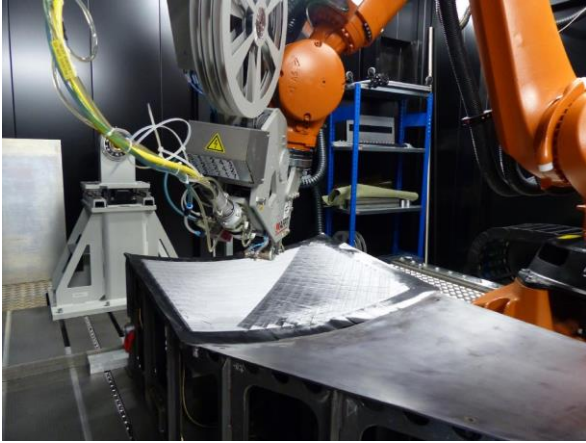


BILD 8. Beispiel eines mittels Blechbiegen hergestellten Werkzeugs mit zwei kombinierten, einfach gekrümmten Abschnitten (vorne: konisch, hinten: zylindrisch)

3.2.1.2. Gegossene und überfräste Bleche

Alternativ kann das Metall auch direkt in der gewünschten Geometrie gegossen werden. Hierzu wird oftmals eine Sandgussform verwendet, die mittels einer zuvor gefrästen Holzmatrize geformt wurde. Das entformte Gussbauteil wird anschließend spanend bis zur gewünschten Endkontur bearbeitet. Damit lassen sich sehr gute Toleranzen und homogene Strukturen erreichen. Von Nachteil ist aber der sehr hohe Fertigungsaufwand. Daher ist dieses Verfahren vor allem zu empfehlen, wenn sehr niedrige Toleranzen der wichtigste Punkt beim Bauteil sind oder die Bauteile dicker als ein paar Millimeter werden.

3.2.1.3. Inkrementelles Blechumformen

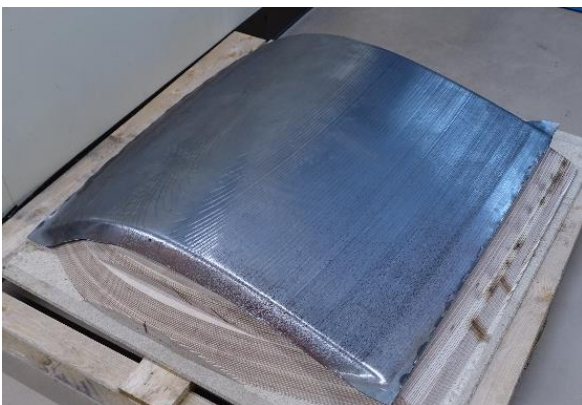


BILD 9. Unbesäumte Werkzeugo-oberfläche (Rückseite) auf Holzmatrize

Diese Fertigungsmethode ist diejenige, die von den hier vorgestellten am wenigsten verbreitet ist. Ein ebenes Blech wird in einen starren Rahmen eingespannt und anschließend punktuell von einem Roboter auf eine zuvor gefräste Holzmatrize gepresst. Alternativ kann auch von einem zweiten Roboter auf der Rückseite Gegendruck ausgeübt werden. Mit ausreichend Durchgängen kann das Blech auf die gewünschte Zielgeometrie umgeformt werden. Der Fertigungsaufwand ist abgesehen von der wiederverwendbaren Matrize gering. Von Nachteil ist die begrenzte Dicke des zu bearbeitenden Blechs. Bei zu dicken Blechen oder zu steifen Werkstoffen ist die zum Umformen erforderliche Kraft zu groß und kann zu Beschädigungen an der Roboteranlage führen. Außerdem ist die erreichbare Genauigkeit geringer als beispielsweise bei 3.2.1.2. Für den hier gegebenen Verwendungszweck ist diese aber ausreichend, weshalb dieses Verfahren zur Fertigung der Werkzeugo-oberfläche ausgewählt wurde.

3.2.2. Entwurf des Unterbaus

Für den Unterbau sollen Rippen aus Aluminium ausgeschnitten werden, die der Formkontur der Werkzeugo-oberfläche möglichst exakt folgen. Die Anbindung der Rippen an die Werkzeugo-oberfläche erfolgt mithilfe von hochtemperaturbeständigem Silikonklebstoff. Die Rippen werden nach dem Ausschneiden ineinandergesteckt und verschweißt. BILD 10 zeigt eine beispielhafte Konstruktion mit jeweils drei Rippen in Längs- und Querrichtung. Um die Rippenkontur möglichst exakt an der Kontur der Werkzeugo-oberfläche halten zu können, wurde das fertig umgeformte Blech mit einem 3D-Scanner vermessen und als CAD-Geometrie für die Rippenkonstruktion verwendet.

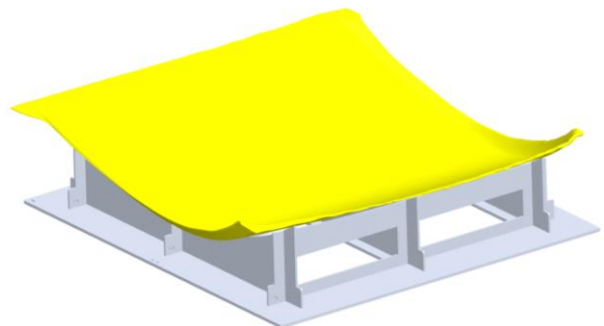


BILD 10. 3D-Scan der unbesäumten Werkzeugo-oberfläche (gelb) auf einem beispielhaften Unterbau (grau)

3.3. Zusammenbau

Nach der Fertigung der Einzelbauteile erfolgt der Zusammenbau des Gesamtwerkzeugs. Zunächst muss die Werkzeugo-oberfläche für die Anbringung der Induktionsspulen vorbereitet werden. Die Spulen werden über eine kreuzförmige Klemme an die Struktur angedrückt. Diese Klemme wird zentral auf Gewindestifte angeschraubt, die auf der Unterseite der Werkzeugo-oberfläche angeschweißt oder angeklebt werden. Dadurch können defekte Spulen sehr schnell und mit geringem Demontieraufwand ausgetauscht werden. Im Falle von Komplikationen bei der Anbringung der Gewindestifte können die Spulen auch mithilfe von Hochtemperatursilikonkleber direkt angeklebt werden. Dies behindert zwar die Wartung, aber kann dafür ohne

punktuellen Wärmeeintrag in das dünne Blech erfolgen. Nach Anbringung der Spulen muss die Werkzeugoberfläche auf den Unterbau fixiert werden. Hierzu wird der zusammengebaute Unterbau mit einem 2 mm breiten Spalt auf das Blech aufgeklebt. Als Klebstoff dient wieder Hochtemperatursilikon. Dies sorgt für eine schwimmende Lagerung zum Abfangen der Wärmedehnung des Werkzeugs. Die weitere erforderliche Infrastruktur für die Induktionsheizung kann über Steckverbindungen angebracht werden. Durch die Öffnungen im Unterbau sind die Spulen problemlos zugänglich, ohne das Werkzeug zu demontieren.

4. BAUTEILFERTIGUNG UND AUSBLICK

Die Funktionsfähigkeit des Systems konnte an einem Werkzeug am DLR Stuttgart getestet werden. Dafür wurden zwei Zonen installiert und über RedInduktion Regeleinheiten bedient.

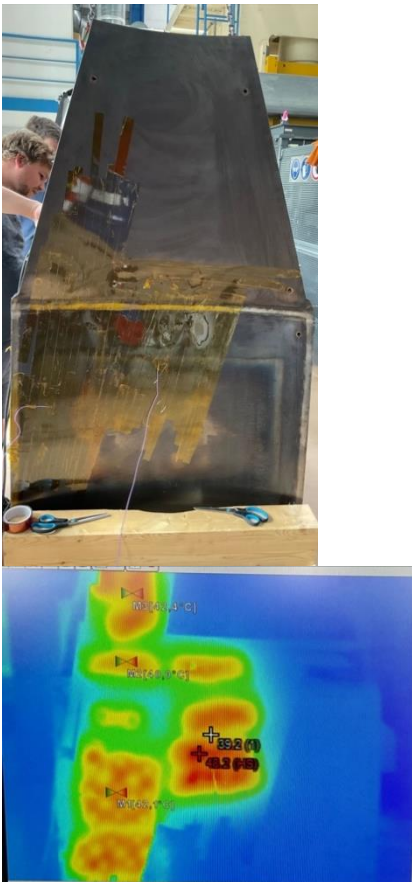


BILD 11. Vorversuche an einem Probekörper im DLR mit 2 Wärmezonen (Spulen auf der Rückseite)

Derzeit werden die finalen Fertigungsschritte für die einzelnen Bauteile des Werkzeugs durchgeführt. Anschließend werden der Zusammenbau und die Inbetriebnahme am DLR Stuttgart erfolgen. Die Beschreibung der dafür erforderlichen Arbeitsabläufe ist in Abschnitt 3.3 nachzulesen. Für die ersten Versuche mit dem Induktionsbeheizten Werkzeug wird ein quasiisotropes Laminat mit dem Tapeleger auf der beheizten Form abgelegt. Dieses Bauteil wird anschließend im 3D-Scanner vermessen und die Deformation mit einer per Prozesssimulation vorhergesagten verglichen. Als Referenz werden zudem Laminat mit

deaktivierter Induktionsheizung gefertigt, um den Effekt des beheizten Werkzeugs zu dokumentieren.

Mittelfristig wird die Anwendung induktionsbeheizter Werkzeuge beim Tape Placement intensiviert. Dabei wird unter anderem der Fertigungsprozess für die gekrümmte Werkzeugoberseite genauer untersucht, um die Nachteile des inkrementellen Blechumformens (siehe 3.2.1.3) wenn möglich zu kompensieren. Zudem ist geplant, die am DLR entwickelte Prozesssimulation (siehe [9]) zu intensivieren und auf komplex gekrümmte Geometrien zu erweitern und die Fertigungsparameter dadurch weiter zu optimieren.

5. SCHRIFTUM

- [1] Z. Qureshi, R. Scaife, T. Swait und H. M. El-Dessouki, „In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology: potential and possibilities,“ *Composites Part B: Engineering*, Bd. 66, pp. 255-267, 2014.
- [2] M. Kaden und R. Keck, „Repair concept supported by laser removal and inductive heating,“ in *28th International Congress of the Aeronautical Sciences*, Brisbane, Australia, 2012.
- [3] M. Schneider und M. Kaden, „Efficient and flexible heating technology using induction,“ in *SAMPE Technical Conference Series*, Long Beach, 2016.
- [4] P. N. Dreher, A. R. Chadwick und S. Nowotny, „Optimization of in-situ thermoplastic automated fiber placement process parameters through DoE,“ in *SAMPE Europe*, Nantes, Frankreich, 2019.
- [5] A. J. Comer, D. Ray, W. O. Obande, D. Jones, J. Lyons, I. Rosca, R. M. O'Higgins und M. A. McCarthy, „Mechanical characterisation of carbon fibre-PEEK manufactured by laser-assisted automated-tape-placement and autoclave,“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 69, pp. 10-20, 2015.
- [6] M. A. Khan, P. Mitschang und R. Schledjewski, „Identification of some optimal parameters to achieve higher laminate quality through tape placement process,“ *Advances in Polymer Technology*, Bd. 29, Nr. 2, pp. 98-111, 2010.
- [7] C. M. Stokes-Griffin und P. Compston, „The effect of processing temperature and placement rate on the short beam strength of carbon fibre PEEK manufactured using a laser tape placement process,“ *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Bd. 78, pp. 274-283, 2015.
- [8] DLR, „DLR - Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie - Tapelegen für thermoplastische Strukturen,“ 12 09 2023. [Online]. Available: https://www.dlr.de/bt/desktopdefault.aspx/tabid-2488/3746_read-59654/#/gallery/35406.
- [9] D. Fricke, L. Raps und I. Schiel, "Prediction of warping in thermoplastic AFP-manufactured laminates through simulation and experimentation," *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, vol. 8, no. 1, pp. 1-10, 2021.