AUTOMATISIERTE ULTRASCHALLUNTERSUCHUNG VON CFK-STRUKTUREN MIT INTEGRIERTEN FUNKTIONSTRÄGERN

F. Lehmann, S. Kroll, A. Saleem, K. Unnasch
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Nöthnitzer Straße 44, 01187 Dresden, Deutschland

Zusammenfassung

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) sind aufgrund ihrer hohen Designflexibilität und ihrer außergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften im Flugzeugbau nicht mehr weg zu denken. Der Aufbau des Materials aus einzelnen Lagen ermöglicht es lokale, lastpfadgerechte Verstärkungen und Sensorik in das Laminat zu integrieren, um somit etwa der örtlichen Beanspruchung Rechnung zu tragen oder einen hohen Leichtbaugrad zu realisieren. Daher wurden am Fraunhofer IWU Funktionsträger in unterschiedlichen Varianten entwickelt, mithilfe einer Tape-Lege Anlage gefertigt und zwischen multiaxialen Carbonfaser-Halbzeugen eingebracht und qualifiziert. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Funktionsträger hinsichtlich Positioniergenauigkeit und Ausrichtung in der Struktur, erfolgte die Entwicklung einer roboterbasierten Ultraschalluntersuchung mit automatischem Datenmanagement. Dabei wurden ein kollaborierender Roboter eingesetzt, um den Ultraschallsensor über das Bauteil zu führen und neue Wege hinsichtlich Auswertung sowie Datenmanagement beschritten. Die Untersuchung unterschiedlicher Parameter wie Prüfgeschwindigkeit, Rasterweite und die Fokussierung des Sensors, erlaubte die Ableitung von Standards, sowie die Gestaltung eines hocheffizienten zerstörungsfreien Prüfprozesses mittels Ultraschall-Analyse. Dadurch lassen sich die hohen Anforderungen aus der Luftfahrt erfüllen und Kosten durch automatische Inspektion und Bewertung deutlich reduzieren. Die innovativen Funktionsträger der Tape-Lege Anlage liefern darüber hinaus beste Voraussetzungen für die Integration in CFK-Luftfahrtstrukturen von morgen.

Keywords

Zerstörungsfreie Prüfung, Ultraschall, Carbonfasern, CFK, Faserverbundwerkstoffe, Funktionsintegration, Automatisierung, Verstärkungsstruktur, Patch-Integration, Tape-Lege Anlage, Automated Tape Laying

1. EINLEITUNG

In der Luftfahrt nimmt der Anteil der Bauteile, welche aus Faser–Kunststoff–Verbunden (FKV) gefertigt werden, seit Jahren stark zu. Durch die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit dieser Werkstoffe können erhebliche Gewichtseinsparungen am Flugzeug erreicht werden, was zu einer effizienteren Treibstoffnutzung führt [1]. Ein Großteil der momentan verwendeten Verbundwerksstoffe sind dabei die carbonfaserverstärkten Kunststoffe (CFK), die sowohl in Sekundär- als auch in Primärstrukturen, wie beispielsweise in Rumpfsegmenten, Tragflächen, Einlaufkegeln und Leitwerken Verwendung finden. Diese Bauteile sind oft mit Hilfe von Schraub- oder Nietverbindungen mit anderen Komponenten des Flugzeuges verbunden. Insbesondere an diesen Verbindungsstellen treten komplexe Lastfälle auf, die eine lokale Verstärkung des CFK-Bauteils erfordern. Derartige lokale Verstärkungen können etwa in Form von Funktionsträgern in das Laminat integriert werden, um Spannungen und Verformungen zu reduzieren, ohne das Leichtbaupotential vom CFK maßgeblich zu beeinträchtigen.

Infolge der Integration derartiger Funktionsträger (FT) entsteht jedoch auch ein höherer Qualitätssicherungsbedarf etwa hinsichtlich Form- und Lagetoleranzen oder Positionsgenauigkeit. Insbesondere in der Luftfahrt sind diese Anforderungen recht hoch. Bei der Integration von Funktionsträgern muss darüber hinaus zum einen sichergestellt werden, dass dieser unter Berücksichtigung des Lastpfades ausgerichtet ist und zum anderen, dass er sich fehlerfrei mit dem Basismaterial des Bauteils verbunden hat.

In diesem Paper wird daher ein automatisiertes Qualitätssicherungssystem mit Ultraschallsensorik (US) erläutert, welches zur automatischen Untersuchung von beispielsweise thermoplastischen CFK-Strukturen mit integrierten Funktionsträgern dient.

Für die Entwicklung und Validierung des Prozesses wurden zunächst Probeplatten mit integrierten Funktionsträgern ausgelegt und mithilfe eines innovativen Fertigungsprozesses hergestellt. Anschließend erfolgte die automatisierte, robotergestützte Untersuchung der Probekörper mit dem Ultraschallprüfsystem. Die Untersuchungsergebnisse wurden am Ende mithilfe von Bildverarbeitung und -auswertung u.a. bezüglich der Positionsgenauigkeit der Funktionsträger bewertet.

2. FUNKTIONSINTEGRIERTE CFK-STRUKTUREN IM FLUGZEUGBAU

Die Funktionsintegration verfolgt das Ziel, mit einem Bauteil eine multifunktionale Nutzung zu ermöglichen, und dadurch

CC BY-NC-ND 4.0

doi: 10.25967/570267

beispielsweise das Gewicht zu reduzieren, die Kosten zu senken oder die Funktionalität zu erhöhen [2].

Besonders im Flugzeugbau bietet die Funktionsintegration daher ein großes Leichtbau-Potential, wenn beispielsweise Anbauteile für separate Sensoren aufgrund einer Sensorintegration wegfallen oder durch örtliche Verstärkungen die Krafteinleitung ohne zusätzlich montierte Krafteinleitungselemente erfolgen kann.

Einige der typischen Fertigungsprozesse für CFK-Luftfahrtstrukturen eignen sich sehr gut für die Integration von zusätzlichen Funktionen. Durch den lagenweisen Aufbau der Strukturen etwa mithilfe von Fertigungsverfahren wie Tailored Fiber Placement (TFP), Automated Tape Laying (ATL), Automated Fibre Placement (AFP), etc. [3], können gleich bei der Herstellung an der gewünschten Stelle im Laminat Funktionsträger in verschiedensten Formen eingebracht werden. Auch bei Reparaturen oder Modifikationen an bestehenden Flugzeugen ist das zusätzliche örtliche Verstärken/Integrieren möglich, um etwa die lokale Festigkeit und Steifigkeit (z.B. Lochleibungsvermögen) zu erhöhen. Aber auch an Schnittstellen oder Krafteinleitungspunkten nützen diese, wo hohe Spannungen zu erwarten sind. Ein besonderer Anwendungsfall sind hierbei die Multimaterialverbindungen von CFK mit beispielsweise metallischen Werkstoffen, da bei denen in der Regel Schraub- beziehungsweise Nietverbindungen zum Einsatz kommen. Diese Verbindungsarten sind für Faserverbundbauteile oftmals kritisch, so dass eine lokale lastpfadgerechte Verstärkung mithilfe eines integrierten Funktionsträgers das System effizient verstärkt, ohne die Gesamtmasse deutlich zu erhöhen.

Die Entwicklungen in der Luftfahrt zeigen mehr und mehr die steigende Bedeutung von Hochtemperatur-Thermoplasten für Strukturbauteile. Die Vorteile der Thermoplaste wie beispielsweise gute Umformbarkeit unter Temperatureinwirkung, hohe Impact-Beständigkeit und sehr gute Recycling-sowie Reparatur-Fähigkeit überwiegen oftmals den Nachteilen wie sehr hohe Materialkosten und Verarbeitungstemperaturen [4]. Es existiert bereits eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsprojekten, in denen Bauteile wie Tragflächen, Rumpfsegmente, Stringer oder Spante aus thermoplastischen Faserverbundwerkstoffen entwickelt werden [5] [11]. Für derartige Strukturen und das Flugzeug der Zukunft bieten sich die im Folgenden aufgezeigte Funktionsintegration und Qualitätssicherung im enormen Maße an. Darüber hinaus lassen sich die lokalen Verstärkungen bzw. Funktionsträger nicht nur an Bohrungen, sondern auch bei Ausschnitten wie Wartungsklappen, Fenstern und Türen einsetzen.

Ein weiterer Vorteil von verstärkenden Funktionsträgern aus thermoplastischen Halbzeugen ist, dass sie sowohl während der Fertigung des Strukturbauteils integriert als auch nachträglich aufgebracht werden können.

Neben Funktionsintegration mithilfe von lokalen lastpfadgerechten Verstärkungen, existieren noch verschiedene andere Möglichkeiten der Funktionsintegration bei CFK-Flugzeugstrukturen. Unter anderem können Sensoren direkt in das Laminat eingebracht werden, um das Structural Health Monitoring (SHM) an Flugzeugkomponenten durchzuführen. Außerdem sind Integrationen von beispielsweise Antennen oder Systemen zu Verbesserung der Aerodynamik an der Flugzeugoberfläche möglich.

Alle derartigen Funktionsintegrationen müssen jedoch sowohl in der Fertigung als auch bei der Bauteilfreigabe gesondert überwacht werden. Es bedarf somit einer gezielten Weiterentwicklung der Qualitätskontrolle solcher funktionsintegrierten Bauteile. Dabei muss u.a. sichergestellt werden, dass der Funktionsträger an der korrekten Stelle der Struktur positioniert und er richtig mit dem Basismaterial verbunden ist. Durch das große Spektrum an Funktionsträgern, steht die Qualitätssicherung vor einer großen Herausforderung diese notwendigen, präzisen und effizienten Systeme zu entwickeln, welche CFK-Strukturen mit integrierten Funktionsträgern untersuchen können.

3. ENTWICKLUNG VON CFK-STRUKTUREN MIT INTEGRIERTEN FUNKTIONSTRÄGERN

3.1. Auslegung der Funktionsträger und deren Integration

Die Auslegung und Betrachtung unterschiedlicher Integrationspositionen des Funktionsträgers (FT) erfolgte mit der Finite Elemente Methode (FEM). Dazu wurde eine rechteckige Platte (L=1000 mm, B=350 mm) und ein FT (D=150 mm) (siehe BILD 1) mit zwei unterschiedlichen Lagenaufbauten (zwei fünfer bzw. ein zehner Tape(s)) modelliert, sowie mehrere Lastfälle analysiert.

Bei der Definition der FT-Geometrie wurden die Randbedingungen der Fertigungstechnologie aufgrund der Verwendung der am Fraunhofer IWU vorhandenen Tape-Lege-Anlage (TL-Anlage) berücksichtigt (siehe BILD 3). Neben der max. Tape-Breite, -Dicke, -Faserorientierung und dem FT-Mindestdurchmesser betraf dies insbesondere die Trennschnittform sowie die Fixierung. Mit den zwei Mustervarianten (5er und 10er) sowie der Referenzvariante (ohne FT) erfolgte dann die Analyse von insgesamt 9 Variationen [8].

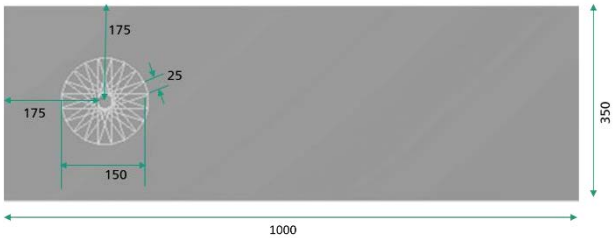


BILD 1. Geometrie der CFK-Platte mit Position des FTs [11]

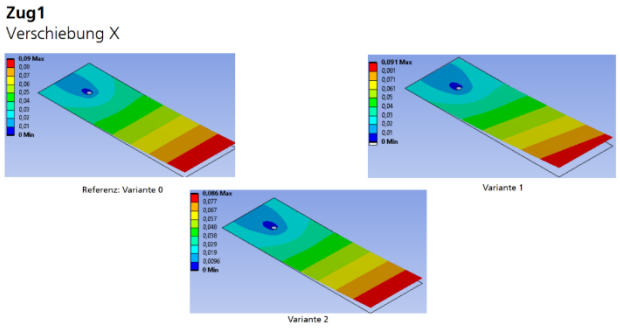
Die Modellierung als Schalenmodel fand unter Berücksichtigung der Schnittposition bzw. Dickenverlaufs der verbundenen FT-Tapes statt. Darüber hinaus wurde von einer optimalen Vernetzung bzw. Kontaktierung ausgegangen.

Für die Lastfälle wurden statisch-mechanische Zug- und Biegekräfte an der kurzen Kante (350 mm) mit maximalem Abstand zum FT definiert. Da der Funktionsträger als Lochverstärkung eingesetzt werden sollte, erfolgte ferner die Modellierung des Lochausschnitts (Durchmesser 25 mm) sowie die Fixierung an der Kante [8].

CC BY-NC-ND 4.0

Die Auswertung der Simulation erfolgte hinsichtlich Verformung (BILD 2) und inversem Reservefaktor. Dabei zeigten sich bei hohen Lasten, folgende Zusammenhänge:

- Der inverse Reservefaktor ist bei 10 FT-Tapes kleiner als bei fünf FT-Tapes.
- Ein integrierter FT gemäß Variante V2 hat einen geringeren inversen Reservefaktor zur Folge als ein einseitig aufgebrachter FT (V1).
- Bei geringen Lasten zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Varianten.



Lastfall	Verschiebung in Kraftrichtung [mm]			IRF nach Puck		
	Referenz (V0)	V1	V2	Referenz (V0)	V1	V2
Zug1	0,09	0,088	0,086	0,79	0,84	0,62
Zug2	0,099	0,097	0,095	0,81	0,84	0,66
Biegung 1	32	30	30	0,28	0,17	0,16
Biegung 2	32	29	30	0,3	0,21	0,15

BILD 2. Vergleich der Berechnungsergebnisse unter Berücksichtigung der Lastfälle und Varianten (Verschiebung und inverser Reserve Faktor) [8]

Da sich runde Funktionsträger auch verdreht einsetzen lassen, ist es wichtig auf die Ausrichtung (Verdrehwinkel) des FT im Vergleich zur Faserorientierung der Platte zu achten. Daher wurde bei der automatischen Qualitätssicherung der Focus insbesondere auf die Auswertung des Winkels gelegt.

3.2. Fertigung von CFK-Strukturen mit integriertem Funktionsträger

Um die automatisierte Ultraschalluntersuchung für CFK-Strukturen mit integrierten Funktionsträgern entwickeln zu können, wurden die zuvor ausgelegten Funktionsträger mittels der Tape-Lege-Anlage gefertigt, in einen Plattenlagenaufbau integriert und in einem Spezialwerkzeug verpresst. Bei der verwendeten Tape-Lege-Anlage handelte es sich um eine einzigartige Anlage, die in erster Linie aus einem drehbaren Tisch und einem statischen Legekopf mit Infrarot (IR)-Strahler besteht. Das Tape für den FT wird innerhalb des Fertigungsablaufes aus der Spule durch eine Förderrolle gezogen, die thermoplastische Tape-Matrix mittels IR-Strahler aufgeschmolzen und mithilfe einer Konsolidierungsrolle auf dem Grundmaterial (z.B. thermoplastische Kunststofffolie) fixiert. Um die Effizienz der Anlage zu steigern, werden dabei mehrere Tapes (mit einer Tape-Breite von 25 mm) gleichzeitig abgelegt und mehrere Funktionsträger (mit dem Durchmesser von 150 mm) gleichzeitig gefertigt [8].

BILD 3. Tape-Lege-Anlage des Fraunhofer IWU

Für die Prüfkörper/CFK-Strukturen wurden die FT aus CF/PA6-Tape (25 mm x 0,16 mm) hergestellt. Bei dem 10er FT bestehend aus zehn Tapes verteilten sich die einzelnen Tapes auf 180°, so dass jedes FT-Tape-Ende einen 18°-Versatz zum nächstgelegenen hatte. Bei dem 5er-FT wurde im Gegensatz dazu ein Versatz von 36° zwischen den nächstgelegten FT-Tape-Enden realisiert und gespiegelt. Als Untergrundmaterial diente eine PA6-Folie (siehe BILD 4) [8].

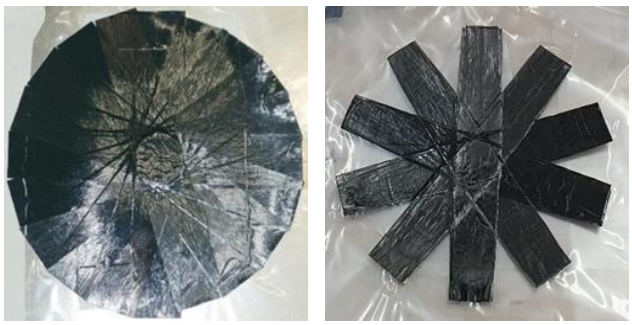


BILD 4. 10er Funktionsträger (links), 5er Funktionsträger (rechts)

Um eine gleichmäßige Verpressung der CFK-Struktur mit FT durchführen zu können, wurden diese mit einem 3D-Scanners vermessen und die Daten bei der Konstruktion und Fertigung des Werkzeuges berücksichtigt.

Für die Herstellung der CFK-Basislagenaufbaus erfolgte der Zuschnitt von 18 Einzellagen sowie das Drapieren eines nahezu quasiisotropen Lagenaufbaus. Dabei wurde auf CF/PA6 unidirektional endlosfaserverstärkte thermoplastische Halbzeuge zurückgegriffen [11].

In diesen CFK-Basislagenaufbau (mit Außenabmessungen von 270 mm x 270 mm) erfolgte die zentrische Integration der FT in der Symmetrieebene. So ergab sich ein symmetrischer, verzugsfreier Aufbau, der im Werkzeug unter Druck (ca. 70 bar) und Temperatur (bis 270°C) verpresst und ausgehärtet werden konnte. Da das Werkzeug die Aufdickung durch die FT aufgrund des 3D-Scans berücksichtigte, fand eine vollflächige und homogene Konsolidierung statt. So lagen für die Entwicklung der automatischen US-Prüfung schließlich mehrere Platten ohne und mit FT (5er und 10er) vor (vgl. BILD 5).

CC BY-NC-ND 4.0

BILD 5. Probeplatte mit integriertem Funktionsträger

4. ENTWICKLUNG DER AUTOMATISCHEN QUALITÄTSSICHERUNG MITTELS ULTRASCHALL

4.1. Prüfequipment

Bei der Qualitätssicherung von CFK-Strukturen mit FT müssen gegenüber denen ohne FT weitere Qualitätsmerkmale überprüft werden. Zu derartigen Qualitätsmerkmalen zählen etwa die genannte Form- und Lagetoleranz, die Position aber auch die Ausrichtung sowie die Haftung. So kann beispielsweise eine unzureichende Verbindung zwischen Grundwerkstoff und FT auftreten.

Um die Qualität von funktionsintegrierten CFK-Strukturen zu analysieren und zu bewerten, gibt es unterschiedliche Verfahren der zerstörenden sowie zerstörungsfreien Werkstoffprüfung. Eine der effektivsten Untersuchungsmethoden für CFK-Strukturen ist die Ultraschalluntersuchung, da mit ihr, sehr viele Daten über den Zustand des Bauteils erfasst und verschiedenste Defekte im Bauteil zuverlässig ermittelt werden können. Aus diesem Grund wurde ein automatisiertes Phased Array (PA) Ultraschallsystem entwickelt, das erlaubt Bauteile mit integrierten Funktionsträgern schnell zu untersuchen und ihre Qualität zu bewerten.

Durch die Nutzung eines PA-Ultraschallsensors kann im Vergleich zu einem Einzelelementsensor eine große Fläche effektiv und zeitsparend Untersuchung werden. Die Einzelelemente der PA-Sensoren können dabei auf verschiedene Arten angeordnet sein und ermöglichen somit unterschiedliche Manipulationen des Schallfeldes. Ein Linearsensor ist hierbei am weitesten verbreitet. Bei diesem Aufbau sind die Elemente auf einer Achse nebeneinander linear angeordnet. Dabei gibt es grundsätzlich drei verschiedene Arten das Schallfeld eines solchen PA-Sensors zu steuern [6] [7]:

- Bündelfokussierung
- Winkel-Einschallung (Bündelschwenk)
- Linear-Scan (Bündelverschiebung)

Die Flexibilität des PA-Sensors ermöglicht es verschiedenste Schadensarten zu untersuchen, ohne den Sensor auszutauschen. Dies macht ihn besonders für die effiziente Untersuchung von integrierten Funktionsträgern mit ihren verschieden Schadensvarianten essenziell [12].

Um für QS von Luftfahrt-Strukturen ein taugliches, effizientes, sicheres und wiederholgenaues Prüf-System aufzubauen, war ein Ziel der sehr hohe Automatisierungsgrad. Dies konnte mit Hilfe eines kollaborierenden Roboters umgesetzt werden. Dieser übernimmt u.a. die Aufgabe den US-Sensor über das Bauteil zuführen, so dass Fehler und Aufwendungen durch eine manuelle Handhabung entfallen.

Kollaborierende Roboter verfügen meist über eine integrierte Kraft- und Momentregelung, die es dem Bediener erlauben, die Prozesskräfte exakt einzustellen und somit auch Roboter-Bediener-Interaktionen ermöglichen. Weitere Steuermöglichkeiten und Sensoren sorgen dafür, dass der Roboter entweder eine Kollision mit Menschen verhindert oder die Kräfte bei einer Kollision so gering sind, dass keine Gefahr für den Menschen vorliegt. Durch derartige Sicherheitsfunktionen ist es möglich auf gewisse Schutzmaßnahmen wie beispielsweise eine Einhausung zu verzichten. Dies erleichtert beispielsweise die Integration solcher Cobots (engl. Collaborative Robot) bei mobilen Prüfanwendungen direkt am Flugzeug. Eine Interaktion zwischen Bediener und Cobot reduziert zusätzlich die komplexe Programmierung des Roboterarms, da der Cobot z.B. per Hand an eine gewünschte Position geführt werden kann, um dort einen neuen Prüfabschnitt anzulernen. Die Verwendung eines Roboterarms hat außerdem den Vorteil, dass reproduzierbare Ultraschallergebnisse generiert werden und somit die Fehlertoleranz und Wiederholgenauigkeit enorm steigt [12].

4.2. Entwicklung des US-Prüfprozesses

Für den automatischen US-Prüfprozess mussten sowohl mechanische und digitale Schnittstellen als auch Programme und standardisierte Prozessabläufe entwickelt werden. Um etwa den PA-Sensor vom Cobot aufnehmen zu können, wurde ein Endeffektor entwickelt. An diesen wurden unterschiedliche Anforderungen gestellt wie z.B. formschlüssige Aufnahme des Sensors, Ermöglichung einer Kraftsteuerung, senkrechte Ausrichtung des Sensors zur Bauteiloberfläche und Gewährleistung der Drehbarkeit des Sensors, um unterschiedlich gekrümmte Bauteile erfassen zu können. Das BILD 6 zeigt den am Roboterarm montierten Endeffektor. Mithilfe eines Zwei-Finger-Greifers ist es möglich, unterschiedliche Sensoren schnell zu greifen, um beispielsweise mit dem alternativen Sensor andere Ultraschallfrequenzen zu untersuchen [9] [12]

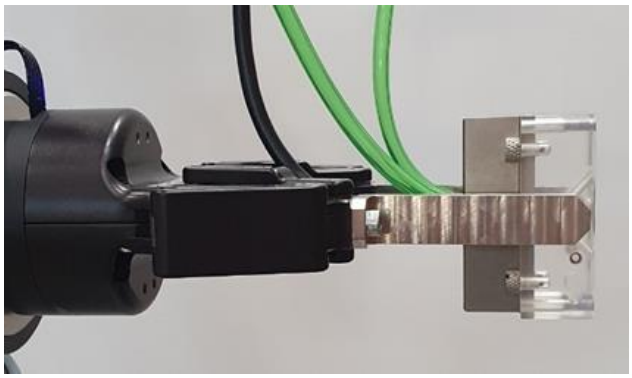


BILD 6. PA-Sensor montiert am Roboterarm mittels Zwei-Finger-Greifer [12]

CC BY-NC-ND 4.0

Das ausgewählte Prüfequipment erfordert die Verwendung eines Koppelmediums, um den Schall in das Bauteil einleiten zu können. Aufgrund von Luftfahrt-Anforderungen etwa hinsichtlich rückstandsloser und leichter Entfernbarkeit sowie Vermeidung von Materialbeschädigung wurde Wasser als Koppelmedium ausgewählt. Um eine möglichst geringe Menge Wasser, bei gleichzeitig konstantem, luftblasenfreien Wasserfilm zu gewährleisten wird während der Prüfung die Wasserzufuhr extern gesteuert. Außerdem wurde ein Dichtungssystem entwickelt, welches am Vorlaufkeil des US-Sensors angebracht wird und die benötigte Wassermenge deutlich reduziert [9] [12].

Um den gesamten Ablauf der Prüfung zu automatisieren, erfolgte die Entwicklung und Programmierung einer Steuerung. Diese regelt sowohl, die Roboterbewegung, Wasserzufuhr, Ultraschalldatenaufnahme, C-Bildgenerierung als auch das Datenmanagement. Die Roboterbewegung für den Prüfablauf wird dabei automatisiert generiert, indem von Bediener drei Positionen auf dem Bauteil angelernt werden. Über diese Positionen erfolgt die Definition des Prüfbereichs und Prüfweges, den der Sensor entsprechend der Bauteil-Geometrie automatisiert abfährt. Dadurch ist es möglich, verschieden große Prüfbereiche und verschieden geformte Bauteile zu untersuchen, ohne dass der Roboter jedes Mal erneut programmiert werden muss [9] [12].

Das entwickelte Programm steuert außerdem die Aufnahme der Ultraschall-Daten und generiert nach austauschbaren Prüfvorlagen automatisch zusammengesetzte C-Bilder des gesamten Prüfbereichs. Bei funktionsintegrierten Bauteilen können so automatisiert gefensterte C-Bilder erstellt werden, um z.B. fokussiert auf einer Ebene die Verbindung zwischen Funktionsträger und Basismaterial zu untersuchen, sowie die Positionsgenauigkeit zu bestimmen. Die Speicherung dieser automatisiert erstellten US-Datensätze findet dann in einer Datenbank statt. Ferner werden diese an Bildauswertungsprogramme zur Algorithmen-basierten Auswertung weitergegeben. Mit diesem System ist es daher möglich bauteilspezifisch und automatisiert verschiedene Ultraschalldatensätze von CFK-Strukturen zu generieren und auszuwerten, wobei unterschiedliche Defekte erfasst werden [9].

Mit dem entwickelten US-Qualitätssicherungssystem wurden verschiedene Tests durchgeführt, um zum einen die Wiederholgenauigkeit und Reproduzierbarkeit und zu anderen die Effizienz im Vergleich zur manuellen Ultraschalluntersuchung zu untersuchen und zu bewerten. Einige dieser Tests zielten daher auf die automatisierte Ultraschall-Datenaufnahme ab, wobei unterschiedliche Prüfgeschwindigkeiten, Prüfabläufe, Materialkombinationen, Oberflächenbeschaffenheiten sowie Bauteilgeometrien analysiert wurden. Anhand dieser Ergebnisse erfolgte die Ableitung von Systemparametern und Standardvorlagen für die Ultraschalluntersuchung [12]. Außerdem wurde das neue Datenmanagement getestet, um einen automatisierten und effizienten Datentransfer zwischen Ultraschallsystem, Datenbank, Steuer- und Auswertungsprogramm zu gewährleisten [10].

Der hohe Automatisierungsgrad des Systems erlaubt somit für die Luftfahrt genaue und reproduzierbare Ergebnisse abzuleiten und somit eine sehr gute Qualitätssicherung durchzuführen. Darüber hinaus ist diese nicht nur innerhalb der Fertigung von CFK-Strukturen mit integrierten Funktionsträgern, sondern auch bei der Wartung und Reparatur einsetzbar.

5. AUTOMATISIERTE PRÜFUNG UND AUSWERTUNG VON ULTRASCHALLERGEBNISSEN

5.1. Versuchsdurchführung

Die in Kapitel 2 und 3 erläuterten Probeplatten (siehe hierzu auch BILD 5) wurden mithilfe des automatisierten Ultraschallsystems (siehe Kapitel 4) hinsichtlich folgender Aspekte untersucht:

- Genereller Zustand der Probeplatten mit und ohne FT
- Positionierung der Funktionsträger im Bezug zur 0° Faserorientierung im Bauteil
- Winkel zwischen den einzelnen FT-Tapes

Dazu erfolgte die Einspannung und Ausrichtung in einem Probengestell (siehe BILD 7).

Die Platten waren dabei derartig fixiert, dass sich die 0°-Orientierung in der Horizontalen befand. Anschließend wurde das automatisierte Ultraschallsystem mithilfe von drei Positionen für die jeweilige Probeplatte ausgerichtet und somit der Prüfbereich definiert. Danach folgte die automatische Generierung des Prüfablaufes und die Ultraschalleinstellung entsprechend der Probeplatte. Im Anschluss daran startete der Prüfprozess, wobei der PA-Sensor die Probeplatten abfährt und die Ultraschalldaten generierte. Diese Daten wurden dann automatisiert zu C-Bildern zusammengesetzt und in einer Datenbank gespeichert. Von der Datenbank erfolgte der automatische Transfer der C-Bilder an eine externe Auswertungssoftware, wo sie entsprechend von vorher definierten Kriterien ausgewertet wurden. In dieser Software waren dabei Luftfahrtanforderungen etwa hinsichtlich Größe und Abstand unter Berücksichtigung eines Structural Repair Manuals hinterlegt.

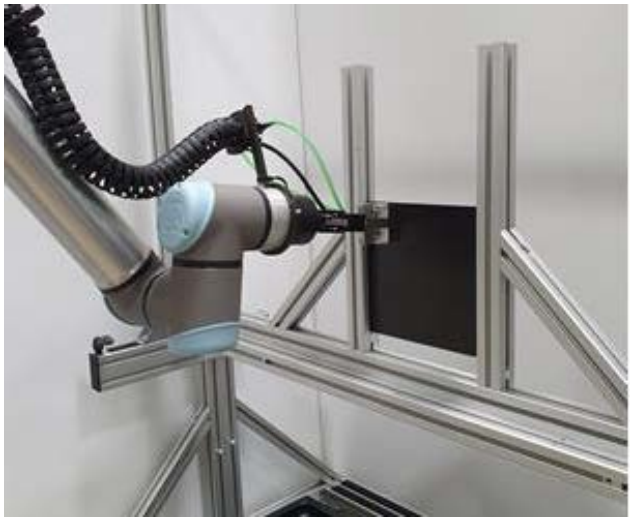


BILD 7. Versuchsaufbau für die automatisierte Ultraschalluntersuchung

Nachdem der Roboter eine automatische Ultraschalluntersuchung durchgeführt hatte, fand die Einspannung und Ausrichtung der nächsten Probeplatte statt. Aufgrund der identischen Dimensionen und Materialien der unterschiedlichen Platten konnten dabei sowohl die Ultraschalleinstellungen als auch die die drei Position zur Definition des Prüfbereichs übernommen werden. Durch die Nutzung des

CC BY-NC-ND 4.0

Cobots mit seiner sehr hohen Positionsgenauigkeit war außerdem sichergestellt, dass die Prüfung alle Probeplatten unter den gleichen Bedingungen erfolgte.

5.2. Versuchsergebnisse

Die automatisiert erzeugten C-Bilder der Ultraschalluntersuchung gliedern sich in zwei verschiedene Datensätze. Der erste Datensatz dient dazu, die gesamte Dicke der Probeplatte abzubilden, um somit etwaige Defekte wie Fehlkonsolidierungen, Delaminationen oder Einschlüsse zu erkennen. Hierfür wird eine Blende so eingestellt, dass sie das Maximum nach dem Einschallecho betrachtet. Durch die Veränderung der Amplitude des Rückwandechos, können Rückschlüsse bezüglich der genannten Defekte gezogen werden. Neben dem Amplitudenbild wird auch ein TOF-Bild (Time-Of-Flight) erstellt.

Das BILD 8 zeigt einen derartigen Ultraschalldatensatz einer Probeplatte mit integriertem FT. Im US-Bild kann deutlich der Abfall der Amplitude in der Mitte der Probeplatte erkannt werden, dies weist auf eine unzureichende Konsolidierung der Probeplatte im mittleren Bereich des FTs hin. Die Ursache dieser Abweichung deutet etwa auf einen ungleichmäßigen Druck beim Heißpressen etwa infolge fehlerhafter Ausrichtung oder fehlerhafter Werkzeuggeometrie hin. Während die restliche CFK-Struktur homogen ist.

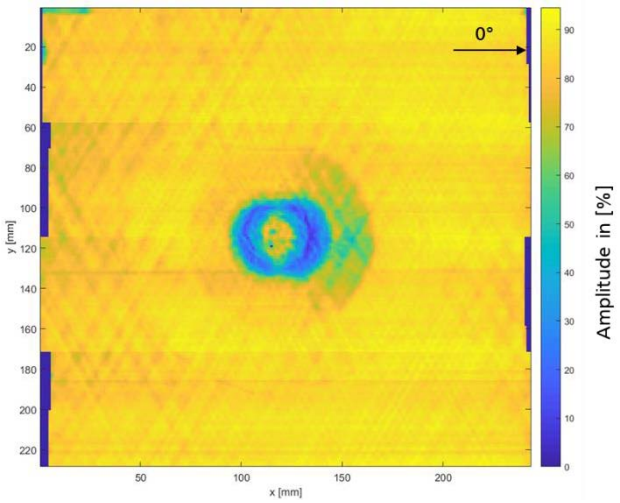


BILD 8. C-Bild der Amplitude einer Probeplatte mit integriertem Funktionsträger

Gefensterte C-Bilder

Neben dem Datensatz zur Bestimmung der allgemeinen Probeplatten-Qualität, wurde auch ein zweiter US-Datensatz automatisch generiert. Dabei erfolgte die Anordnung der Blende derartig, dass das C-Bild nur den Bereich der US-Daten wiedergibt, indem der Funktionsträger liegt. Durch dieses „gefensterte“ C-Bild, ist man in der Lage den Funktionsträger detaillierter zu erkennen, etwaige Defekte auszuwerten und ihre Position und Lage zu bestimmen. (siehe BILD 9)

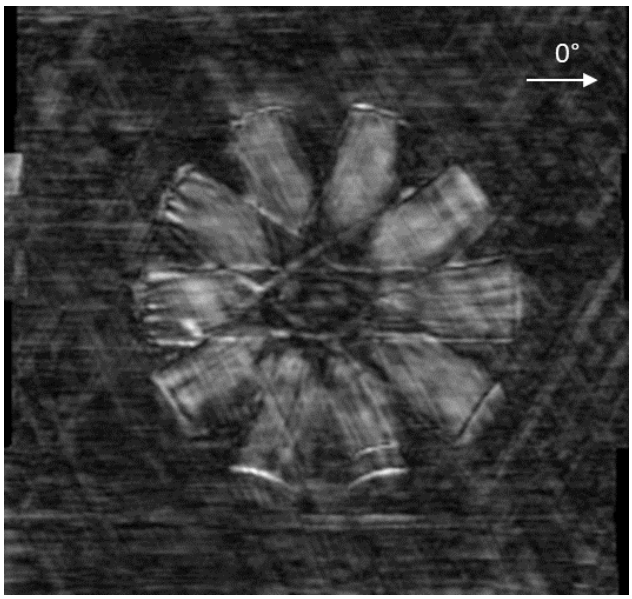


BILD 9. Gefenstertes C-Bild der Amplitude mit detailliertem Funktionsträger der 5er-Variante

Die gefensterten C-Bilder werden automatisch vom Algorithmus erzeugt, in der Datenbank abgelegt und an den Bildauswertealgorithmus weitergegeben. Bei den Probeplatten befindet sich der Funktionsträger in einer Tiefe von 1,5-1,6 mm. Im Programm erfolgt lediglich die Eingabe diese Tiefe, um das gefensterten US-Bilder zu erzeugen. Dabei ist es möglich verschiedene gefensterte C-Bilder zu erzeugen, um beispielsweise Funktionsträger, in unterschiedlichen Tiefen zu betrachten.

5.3. Bildanalyse und Auswertung

Die automatisiert erstellten gefensterten C-Bildern wurden zur Bildanalyse und Auswertung an ein Programm weitergegeben. Bei den Versuchen lag dabei das Augenmerk zum einen auf den Winkeln zwischen den Tapes der Funktionsträger und zum anderen auf der Orientierung des FT im Bezug zur 0°-Lage des Platten-Laminates. Nachfolgend ist dafür die Auswertung einer Probeplatte mit integriertem 5er Funktionsträger dargestellt (siehe BILD 4 rechts und BILD 10).

Um die Winkel zwischen den einzelnen Tapes genau bestimmen zu können, ist eine Vorverarbeitung der Ultraschallbilder erforderlich. Die Verwendung von einfachen Bildfiltern zum Scharfzeichnen, Kontrast- und Helligkeitsverändern führen dazu, dass die Kanten der einzelnen Tapes besser herausgearbeitet werden, um die spätere Bildanalyse zu verbessern. Die Auswahl der entsprechenden Filter erfolgte auf Basis einer ersten Sensitivitätsanalyse, indem die Parameter der Bildfilter variiert wurden, um eine allgemeine Anwendbarkeit auf alle Probekörper zu gewährleisten. Unter Anwendung der resultierenden Parameter erfolgte anschließend die Bestimmung eines passenden Kantenfilters, um die Abgrenzung zwischen den Tapes und dem Basismaterial der Platten beim US eindeutiger erkennen zu können. Mittels einer zweiten Sensitivitätsanalyse wurden unterschiedliche Kantenfilter verglichen und anhand von vorab definierten Anforderungen (Zusammenhang der Kanten, Erkennbarkeit der Tape-Kanten) bewertet.

CC BY-NC-ND 4.0

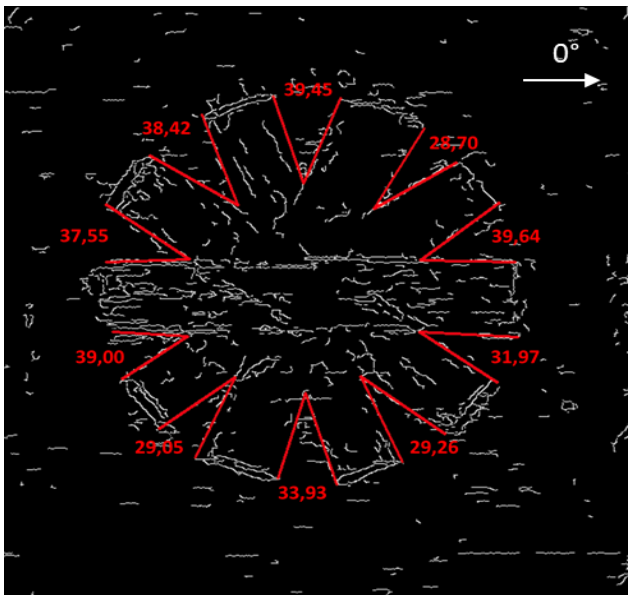


BILD 10. Auswertung der Winkel zwischen den einzelnen Tapes des Funktionsträgers

Das BILD 10 zeigt eine unter Berücksichtigung der Sensitivitätsanalyse und Kantenfilter optimierte Auswertung, in der die Winkel zwischen zwei benachbarten Tapes mit Hilfe von drei Punkten analysiert wurden. Dabei liegen zwei Punkte jeweils auf einer Kante der zu kontrollierenden Tapes. Der dritte Punkt befindet sich im Schnittpunkt der beiden Tapes.

Bei der Gesamtauswertung der Tape-Winkel von vier Probekörpern mit integriertem 5er-FT ergab sich ein arithmetischer Mittelwert von 39,1° mit einer Standartabweichung von 7°. Der Mittelwert zeigte somit eine recht geringe Abweichung im Vergleich zum geplanten theoretischen Wert von 36°. Während die Standartabweichung in Höhe von 7° auf Optimierungsbedarf im Fertigungs- und Auswertungsprozess hinwies. Ursachen können dabei etwa im Tape-Lege-Prozess, bei der Integration des FT in die Platte oder auch in der schwierigen Analyse der Tape-Kante innerhalb der Bildauswertung gefunden werden.

Um die allgemeine Orientierung der FT im Bezug zur 0°-Lage der Probekörper auswerten zu können, werden zwei Punkte auf dem Tape ausgewählt, das horizontal zur Bauteilkante liegt. Der Winkel wird anschließend berechnet und ausgegeben. Die mittlere Verschiebung zur 0°-Lage aller untersuchten Probeplatten belief sich auf 2,2°. Dies ist ein sehr geringer Wert, wenn man bedenkt, dass die Funktionsträger manuell in den Platten-Lagenaufbau eingebracht werden.

Die Versuche und Auswertungen zeigten, dass sich Ultraschalluntersuchungen an CFK-Strukturen mit integrierten Funktionsträgern mit dem entwickelten System automatisch und effizient ausführen lassen.

6. ZUSAMMENFASSUNG

Die Funktionsintegration bei CFK-Strukturen im Flugzeugbau hat zunehmende Bedeutung, da mit ihr etwa der Leichtbaugrad deutlich gesteigert werden kann. Eine Funktionsintegration zieht aber gleichzeitig einen steigenden Bedarf an effizienten Qualitätssicherungssystemen nach sich.

In der aufgeführten Studie wurde daher zunächst ein Funktionsträger zur lokalen Verstärkung von Krafteinleitungspunkten (wie Nietbohrungen) ausgelegt. Anschließend erfolgte die Herstellung des FT aus thermoplastischen UD-Tapes mithilfe einer Tape-Lege-Anlage des Fraunhofer IWU, die Integration in einen Plattenlagenaufbau und die Verpressung. Diese Probeplatten wurden zerstörungsfrei untersucht. Hierfür fand die Entwicklung eines automatisierten Ultraschallsystems mithilfe eines kollaborierenden Roboters statt. Darüber hinaus erfolgte die Entwicklung einer automatischen Steuerung und eines automatischen Datenmanagements zur Aufnahme und Speicherung der Ultraschalldaten. Die generierten Ultraschalldaten wurden dann mithilfe von Bildauswertungsalgorithmen bezüglich der Positionsgenauigkeit der Funktionsträger im Bauteil analysiert. Dadurch konnte ein effizienter Ultraschallprozess für CFK-Strukturen aufgezeigt werden.

7. AUSBLICK

Das entwickelte automatisierte Ultraschallprüfsystem und der Prozessablauf zeigen, dass es möglich ist Funktionsträger in CFK-Strukturen effizient zu untersuchen. In der Studie lag dabei das Augenmerk auf Kohlenstofffaser verstärkten Strukturen mit spezifischen FT. Das US-Equipment und das Verfahren bieten darüber hinaus enormes Potential für weitere Anwendungen etwa für andere Funktionsträger, Lagenaufbauten und Materialien sowie unterschiedliche Materialverbunde. Die Bildverarbeitung und -auswertung hat z.B. hinsichtlich der Zuverlässigkeit einen großen Einfluss. Hier gilt es weitere Parameter abzuleiten. Ferner bietet sich der Einsatz künstlicher Intelligenz zur Optimierung des Ablaufes und der Ergebnisse an. Neben dem stationären Einsatz von kollaborierenden Robotern ist darüber hinaus auch der mobile Einsatz relevant, so dass die automatisierte Ultraschallprüfung am Flugzeug etwa bei der Wartung eingesetzt werden kann.

8. DANKSAGUNG

Dieses Paper wurde im Rahmen der Projekte WiVa-Halbzeug (gefördert durch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM)), Dig-CircLE und ThermoPros (gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK)) sowie ReCarbo (gefördert durch die Fraunhofer-Gesellschaft) erarbeitet.

Ein besonderer Dank gilt den Projektpartnern Elbe Flugzeugwerke GmbH, Aerosud, CTC GmbH, Carbon Truck & Trailer GmbH sowie der Technischen Universität Chemnitz.

Kontakt:

Falco.Lehmann@iwu.fraunhofer.de
Susanne.Kroll@iwu.fraunhofer.de

CC BY-NC-ND 4.0

BIBLIOGRAPHY

[1] H. Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: Mit 39 Tabellen. 2., bearb. und erw. Aufl. Springer, 2007.

[2] K. Ehrlenspiel, H. Meerkamm: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. In: Hanser Fachbuch. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München 2013

[3] A. Hiken: The Evolution of the Composite Fuselage: A Manufacturing Perspective. In: Aerospace Engineering. Hrsg. von George Dekoulis. IntechOpen, 2019

[4] M. Favaloro: Thermoplastic composites in aerospace – the future looks bright, https://www.composites-world.com/articles/thermoplastic-composites-in-aerospace-past-present-and-future (zuletzt besucht am 07.09.2022)

[5] CleanSky2: https://www.clean-aviation.eu/clean-sky-2 (zuletzt besucht am 07.09.2022)

[6] M. Kurras: Bestimmung der optimalen Array-Apertur für die Ultraschallprüfung von faserverstärkten Kunststoffen. Diss. Hochschule Osnabrück, 2017.

[7] Wade;Olsson Robin; Hellström Peter; Tsampas Spyros; Pankow Mark; McElroy Mark; Jackson: Interaction of delaminations and matrix cracks in a CFRP plate, Part I: A test method for model validation. In: Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 103 (2017), S. 314–326

[8] D. Brand, K. Fritzsche, M. Kausch, W.-G. Drossel, S. Nendel: Entwicklung einer Herstellungstechnologie für winkelvariable Halbzeuge mit integrierten Funktionsträgern - WiVa-Halbzeug Abschlussbericht, 2021

[9] J. Zambelli, A. Young, S. Kroll: Repair technologies for carbon fibre reinforced aircraft structures (ReCarbo) - midterm report, 31.09.2021

[10] S. Kroll: Digitalization in the Circular Economy of high performance Composites (Dig-CirclE) – Zwischenbericht, 11.02.2022

[11] A. Saleem: Continuous Forming of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Profiles for Structural Applications (ThermoPros) Zwischenbericht, 2022

[12] F. Lehmann: Entwicklung eines automatischen Ultraschallprüfprozesses für kollaborierende Roboter zur Untersuchung von CFK-Flugzeugstrukturen. Diplomarbeit TU Dresden, 06.2021

CC BY-NC-ND 4.0