

Automatische Prüfung von Carbonfaser-Tape-Gelegen zur Überführung in den digitalen Zwilling

Jan OSWALD¹, Christian JUNGSMANN¹, Rainer RICK¹, Jannik SUMMA¹, Ute RABE¹, Dirk KOSTER¹, Sergey PUDOVIKOV¹, Hans-Georg HERRMANN¹, Tobias LINK², Ralf SCHLIMPER³, Klaus WOLF⁴

¹ Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken, Campus E3 1

² Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Pfinztal

³ Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS, Halle (Saale)

⁴ Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen SCAI, Sankt Augustin

Kontakt E-Mail: jan.oswald@izfp.fraunhofer.de

Kurzfassung. Durch die zunehmende Verwendung von Bauteilen aus Kohlenstoff- oder Glasfaserverstärkten Kunststoffen gewinnt auch deren Qualitätssicherung stark an Bedeutung. Besonders bei sicherheitsrelevanten Teilen ist es entscheidend, dass Schwankungen der Materialeigenschaften in Breiten- und Längenrichtung detektiert und lückenlos dokumentiert werden können. Dabei gibt es bei unterschiedlichen Prozessschritten, von der Faser- oder Tape-Herstellung bis hin zur Konsolidierung oder der Umformung im Hybrid-Spritzguss verschiedene Ansätze zur Prüfung relevanter Eigenschaften.

Eigenschaften wie Fasergehalt, Tapedicke oder Homogenität können bereits in frühen Herstellungsschritten geprüft werden, um somit schon vor der Weiterverarbeitung wichtige Erkenntnisse über das Ausgangsmaterial zu erlangen. Die Herangehensweise und Ergebnisse zur Herstellung unidirektionaler (UD) Tapes wurden im vergangenen Jahr vorgestellt.

Wie sich die individuellen Eigenschaften einzelner Tapes in weiteren Verfahrensschritten auf die Qualität der daraus gefertigten Halbzeuge und Bauteile auswirken, ist dabei Gegenstand aktueller Forschung und bietet Möglichkeiten zur Optimierung.

In diesem Beitrag steht die Prüfung von konsolidierten Tape-Gelegen im Fokus. Dabei wird die Anwendbarkeit ausgewählter Testmethoden für den Prozessschritt diskutiert und es werden Ergebnisse vorgestellt. Des Weiteren wird ein Inlinesystem vorgestellt, das es erlaubt, die Tape-Gelege vor dem Hybrid-Spritzguss sowie die fertig hergestellten Bauteile zu prüfen und die dadurch erhaltenen Qualitätsdaten in einen digitalen Zwilling einzupflegen. Im Zuge dessen wird auch die einheitliche Bereitstellung von Daten unterschiedlicher Verfahren besprochen, da diese die Grundlage für die Zusammenführung aller Prüfdaten darstellt.

1. Einführung

Endlosfaserverstärkte thermoplastische Verbundwerkstoffe (Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastics - CFRP) weisen eine hohe Steifigkeit bei geringem Gewicht auf. Die wesentlichen Vorteile von thermoplastbasierten Systeme gegenüber duroplastischen liegen in der Umformbarkeit unter warmen Temperaturen (Glasübergangs- und Erweichungstemperatur) sowie dem größeren Recyclingpotenzial. Besonders bewährt hat sich der Einsatz von unidirektionalen endlosfaser Tapes (UD-Tapes) als Halbzeuge. Dabei wird ein guter Kompromiss zwischen mechanischen Eigenschaften und wirtschaftlicher Fertigung durch die hohe Automatisierbarkeit der Prozessschritte Schneiden, Legen, Konsolidieren, Umformen erreicht. Die konsolidierten zweidimensionalen Gelege werden in geschlossenen Werkzeugen im Hybrid-Spritzguss-Verfahren zu 3D Bauteilen umgeformt. Im Spritzguss-Verfahren werden Versteifungen wie z. B. Rippen sowie Montagehalterungen angebracht und die Bauteile hiermit funktionalisiert. Dieser Prozess ermöglicht somit die effiziente Herstellung von Leichtbaustrukturen in Großserien und stellt eine Alternative zu Fertigungsverfahren auf Basis metallischer Werkstoffe dar [1].

Als beispielhaftes Bauteil kann der Sitz in einem Kraftfahrzeug betrachtet werden. Aufgrund von Sicherheitsanforderungen werden an diese Fahrzeugkomponente hohe Ansprüche bezüglich Steifigkeit und Bruchfestigkeit gestellt. Gleichzeitig gewünscht sind ein möglichst geringes Gewicht, sowie ein möglichst effektiver, serientauglicher Herstellungsprozess. Erste Konzepte zur Entwicklung der tragenden Struktur von Fahrzeugsitzen auf Basis von CFRP sind schon länger bekannt [2]. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes “Modulare Produktionsanlage für hochbelastbare Hybridbauteile” (MoPaHyb) wurde eine solche Sitzschale als exemplarisches Bauteil entwickelt und hergestellt.

Zur Qualitätssicherung in sicherheitsrelevanten Bauteilen müssen Fehler vermieden und Schwankungen der Bauteil- und Materialeigenschaften lückenlos dokumentiert werden. Hierzu kommen beim sogenannten Automated Fiber Placement (AFP) von faserverstärkten Tapes bereits optische Sensoren und Methoden der Thermographie zum Einsatz [3]. Ein laufendes, auf MoPaHyb aufbauendes Fraunhofer-internes Projekt erstellt über die reine Fehlerdokumentation hinaus einen digitalen Zwilling entlang der Wertschöpfungskette von der Tapeherstellung [4] bis zum fertigen Bauteil. Hierzu werden individuelle Material- bzw. Halbzeug-Eigenschaften des realen Bauteils sensorisch erfasst und mit Maschinendaten der Produktion sowie Simulationsdaten zusammengeführt.

Der Schwerpunkt des hier vorliegenden Beitrags bezieht sich auf den Teilaspekt des digitalen Zwillings, der sich mit der Erfassung relevanter Qualitätsmerkmale der konsolidierten Gelege und des fertigen Bauteils beschäftigt. Einerseits kann die Detektion von qualitätskritischen Merkmalen, wie z. B. Position der Tapezuschnitte, Gaps, Overlaps, Faserorientierung, Formfehler, Rückschlüsse auf den vorangegangenen Lege- und Konsolidierungsprozess liefern. Ursächliche Prozessparameter können zeitnah korrigiert und dadurch Ausschuss vermieden werden. Andererseits wird die Qualität der fertigen Bauteile lückenlos dokumentiert. Der Beitrag zeigt zunächst Voruntersuchungen zur Bewertung verschiedener ZfP-Methoden (Dickenprüfung, Thermografie, Wirbelstrom) hinsichtlich ihres Detektionsvermögens von relevanten Qualitätsmerkmalen und Fehlern der Tape-Gelege (Position der Tapezuschnitte, Gaps bzw. Gassen, Overlaps, Faserorientierung) sowie die Ultraschallprüfung der fertigen Bauteile (Tapeposition, Anbindungsfehler, Anbindung der spritzgegossenen Streben). Zusätzlich wird die Robustheit und Inlinefähigkeit der Methoden bewertet. Abschließend wird ein System zur Inline-Prüfung vorgestellt, dass auf der Datengrundlage der Untersuchungen entwickelt und umgesetzt wurde. Der Beitrag schließt mit Ergebnissen aus der Inline-Prüfung, deren Daten und Metadaten in ein Datenökosystem eingebunden werden.

2. Herstellprozess und typische Fehler von Carbonfaser-Tape-Gelegen

Für die Voruntersuchungen wurden zwei Serien von konsolidierten Gelegen am Fraunhofer ICT hergestellt. Eine der Serien bestand aus Tapezuschnitten mit variierender Dicken, die am Fraunhofer IMWS hergestellt wurden. Anhand der gemessenen Halbzeugdicken kann der Einfluss der Tapedicke auf das Laminat untersucht werden. Die weitere Serie, welche im Beitrag näher betrachtet wird, wurde aus unidirektionalen Carbonfasertapes mit Polycaprolactam(PA)6 hergestellt und mit verschiedenen Testfehlern versehen. Die Tapes werden mit einer Tapelegeanlage (Fiberforge der Firma Dieffenbacher) zugeschnitten und zu Laminaten der Größen 40 cm x 40 cm abgelegt, wobei die Dicke jeweils 1,12 mm (8 Lagen) und 2,08 mm (12 Lagen) beträgt. Die Gelege wurden in einem Niederdruck-Verfahren konsolidiert, bei dem das Material durch Anlegen eines Vakuums mit Druck beaufschlagt und mittels Infrarotstrahlung aufgeheizt wird. Die Abkühlung erfolgt über Konduktion zwischen zwei Kühlplatten. Zur besseren Bewertbarkeit des Fehlerauffindvermögens der einzelnen ZfP-Methoden wurden die Gelege gezielt mit typischen und qualitätskritischen Defekten versehen. Diese Defekte sind Gaps, Overlaps, Dickenunterschiede sowie variierender Faservolumengehalt (durch eingebrachte Glasfaser-(GF) Tapes, vgl. Abbildung 1).

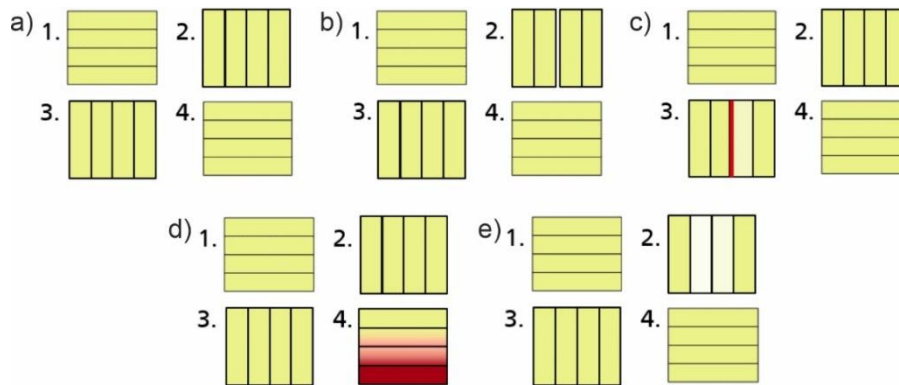


Abbildung 1: Skizze der betrachteten Fehlerarten im Gelege a) fehlerfrei, b) Gap (hier in 2. Lage dargestellt), c) Overlap (hier in 3. Lage dargestellt), d) variierende Dicke, e) Faservolumengehalt

3. Methodenvergleich und Bewertung

3.1 Dickenprüfung

Die Dickenprüfung wurde durch zwei gegeneinander positionierte konfokale Laserabstandssensoren (CL-P030), die den jeweiligen Abstand zum Gelege messen und verrechnen, realisiert. Als Ergebnis wird die Dicke des Geleges am Messpunkt ausgegeben. Unter Zuhilfenahme eines Manipulators mit Inkrementalgebersignalen können definierte Bereiche abgescannt und positionsgenaue Dickenlandkarten erstellt werden. Zur reproduzierbaren Positionierung der Gelege und zwecks Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurde ein Spannrahmen und 3 Marker zur Definition des Koordinatensystems appliziert.

Vorteil der traversierenden konfokalen Laserabstandssensoren ist die hohe Genauigkeit der Dickenmessung, die reproduzierbaren Ergebnisse auch auf unterschiedlichen Prüfobjektmaterialien, die einfache Ausrichtung der optischen Achsen zueinander und die Unempfindlichkeit gegenüber Störgrößen im Betrieb. Dem steht das Problem gegenüber, dass sich durch die traversierende Messung mit Punktsensoren eine hohe Messdauer ergibt und folglich keine vollflächige Inline-Prüfung im Betrieb erfolgen kann. Die Dickenprüfung wurde folglich als Referenzmessung eingesetzt, um den Einfluss der Gelegedicke auf andere Prüfmethode zu referenzieren.

Die Messungen wurden mäandernd über den Prüfbereich durchgeführt. Die Daten wurden in Scanrichtung (Y-Achse) mit 0,1 mm und in Indexrichtung (X-Achse) mit 1,0 mm örtlicher Auflösung aufgenommen.

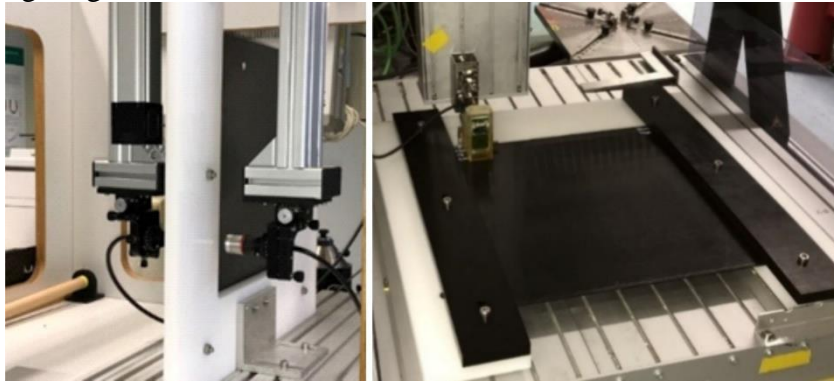


Abbildung 2: Messaufbau mit u-förmigem Spannrahmen für die Sensoren der Dickenprüfung (links) und Messaufbau mit u-förmigem Rahmen für die Wirbelstromprüfung (rechts).

3.2 Thermografie

Bei der thermografischen Prüfung wird die Wärmeabstrahlung von einer Oberfläche mit Hilfe eines auf einen charakteristischen Wellenlängenbereich begrenzten Infrarot-Detektors aufgenommen. Bei der aktiven Thermografie (externe Anregungsquelle) kann zwischen der Art der Anregung (z.B. Blitzlicht, Laser, Impuls-Anregung, Moduliert) unterschieden werden. Die Methode eignet sich vor allem bei großflächigen, dünnen Bauteilen und bei Oberflächen mit einem guten Abstrahlverhalten, wie es für Carbonfaser-verstärkte Kunststoffe der Fall ist (typische Emissivität $\sim 0,9$). Das Abstrahlverhalten wird durch die Emissivität ε angegeben, dem Verhältnis des Strahlungsspektrums eines Körpers zu dem des schwarzen Strahlers. Die Tape-Gelege werden unter Zuhilfenahme einer Blitzlichtlampe mit einer Gesamtenergie von 9 kJ angeblitzt und dadurch erwärmt. Die dadurch erzeugte Infrarotstrahlung des Probekörpers wird mit einer Flir SC5000 Thermokamera (320 x 256 Pixel, 3-5 μm Spektrales Fenster, Sensitivität bzw. „Noise Equivalent Thermal Detection“ von 20 mK, Aufnahme von 120 Frames pro Sekunde) detektiert. Der Versuch ist in Reflexionsanordnung aufgebaut und in Abbildung 3 dargestellt. Der Prüfablauf ist so eingestellt, dass die Blitzlampen 200 ms nach Start der Thermografieaufnahme ausgelöst werden, wobei die Kamera 1000 Bilder mit einer Rate von 120 fps aufnimmt.

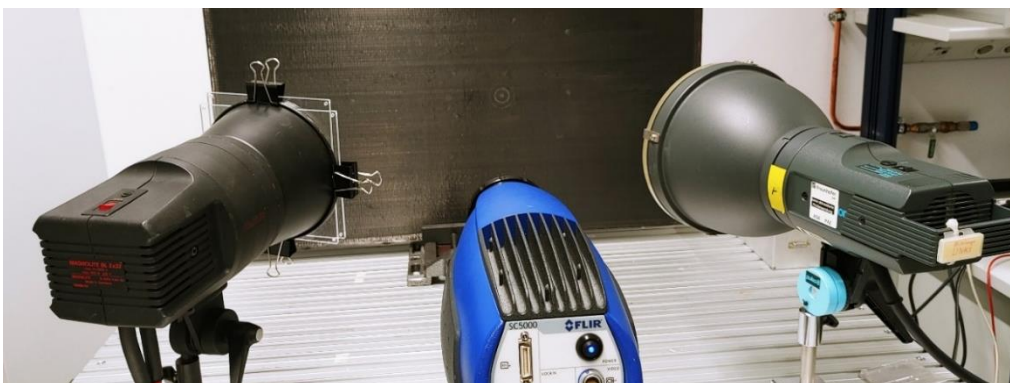


Abbildung 3: Thermografie an Laminat-Gelege. Einsatz zweier synchron geschalteter Blitzlampen mit je 4,5 kJ und der Thermografiekamera Flir SC5000

3.3 Wirbelstrom

Das Wirbelstromverfahren basiert auf der Induktion von Wirbelströmen in elektrisch leitfähigen und/oder magnetisch permeablen Materialien. Änderungen der

Materialeigenschaften, z. B. Schwankungen des Carbonfaser-Volumens sowie die Orientierung von C-Fasern können erfasst werden [5]. Aufgrund der guten Eignung zeigt der Stand der Forschung bereits Konzepte für Inline-Prüfsysteme auf [6, 7]. Für die Labormessungen wurden die Laminatgelege in einem Spannrahmen fixiert, waagrecht auf einen Manipulator montiert und mittels kontaktierender Prüfung abgescannt (Abbildung 2, rechts).

Wegen der schwachen elektrischen Leitfähigkeit der Carbonfasern mussten Prüffrequenzen von mehreren MHz für die Wirbelstrommessungen verwendet werden. Die Ortsauflösung betrug 0,1 mm in Scanrichtung (X-Achse) und 0,1 mm in Indexrichtung (Y-Achse). Für die speziellen Anforderungen von CFK wurde der am IZFP entwickelte Wirbelstromsensor 061TA HF verwendet. Bei diesem handelt es sich um eine Hochfrequenz-Tastspule, welche im Vergleichsverfahren betrieben wird. Im Postprocessing werden C-Bilder der Y-Komponente der Impedanzebene erzeugt. Hierbei kann durch Auswahl geeigneter Phasenwinkel auf verschiedene relevante Merkmale fokussiert werden, um so den Kontrast z. B von Gaps/Overlaps oder der Gelegeorientierung zu verbessern.

3.4 Versuchsergebnisse

Das Detektionsvermögen der Methoden Dickenprüfung, Wirbelstrom und Thermografie können anhand der folgenden repräsentativen Ergebnisse verglichen werden. Abbildung 4 zeigt die Platte V5 ([0/90°] Gelege, 8 Lagen / 1,28 mm Dicke) mit Gapping Fehler in der 3. und 4. Lage, wohingegen Abbildung 5 die Platte V9 ([0°] UD-Gelege, 7 Lagen / 1,28 mm) mit dem Fehler "variabler Faservolumengehalt", künstlich erzeugt durch eingelegte Glasfaser(GF)-Tapes in der 2., 3. und 4. Lage, zeigt.

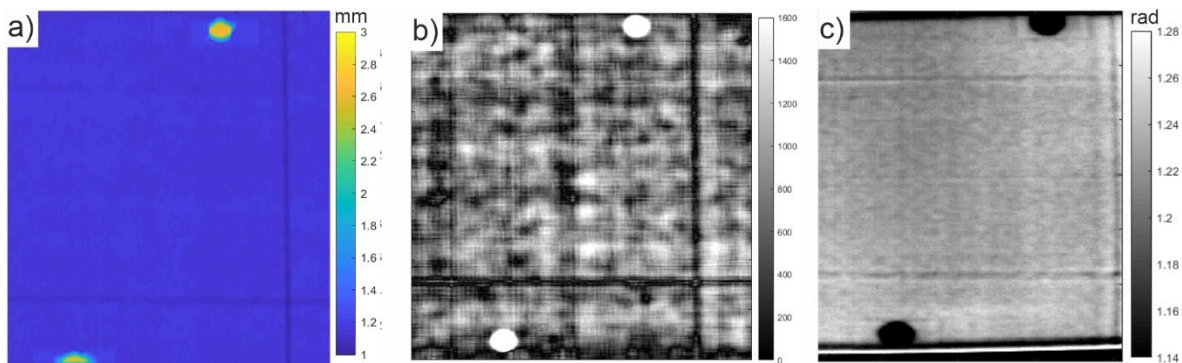


Abbildung 4: Platte V5 mit Gapping Fehler, a) Dickenprüfung mit konfokalem Laser, b) Wirbelstromprüfung C-Bild der Y-Komponente, c) Phasenbild der Lock-In Thermografie (5 mHz Anregungsfrequenz, 120 Hz Aufnahme Frequenz)

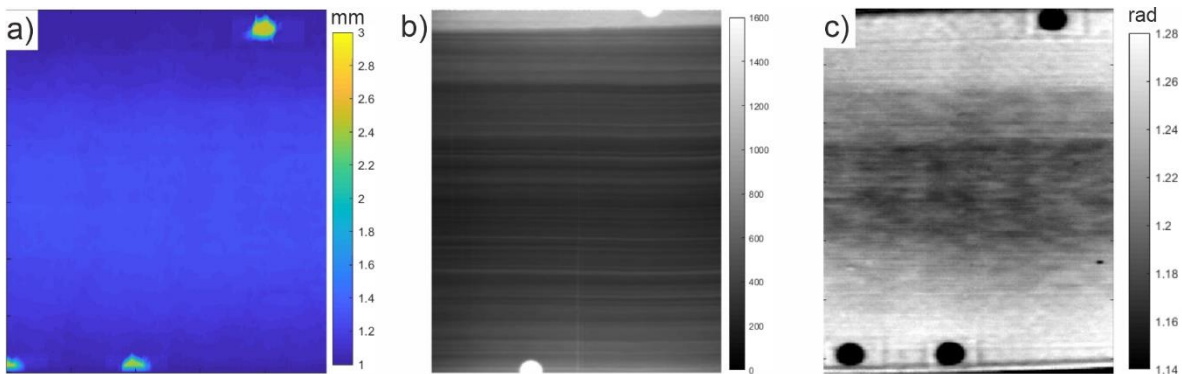


Abbildung 5: Platte V9 mit unterschiedlichem Faservolumengehalt durch eingebrachte GF-Tapes, a) Dickenprüfung mit konfokalem Laser, b) Wirbelstromprüfung C-Bild der Y-Komponente, c) Phasenbild der Lock-In Thermografie (5 mHz Anregungsfrequenz, 120 Hz Aufnahme Frequenz)

Auf allen Abbildungen sind die kreisrunden Marker, die zur lateralen Positionsbestimmung aufgebracht wurden, klar ersichtlich. In Abbildung 4 können die eingebrachten Gapping Fehler anhand der Blautöne bzw. der hell/ dunkel Kontraste sehr gut entnommen werden. In der Thermografieaufnahme ist der vertikale Gapping-Fehler (am rechten Bildrand) nicht so klar erkennbar, wie im Wirbelstrombild. Zudem zeigt das Thermografiebild im oberen Bereich fälschlicherweise einen weiteren horizontal orientierten Gappingfehler an. In der Thermografieabbildung lässt sich die Lage einiger Tape-Streifen vermuten, wobei nur schwer zwischen den Kontrasten unterschieden werden kann, die durch Lage der Tape-Streifen einerseits und durch Gapping andererseits verursacht werden. Das Wirbelstrombild ist dagegen deutlich kontrastreicher und lässt die Faserorientierung sowie die Lage von Tape-Streifen deutlich besser erkennen. Aufgrund der unterschiedlich starken Intensitätskontraste kann klar zwischen Tapelage und Gappingfehler unterschieden werden. Aus der Dickenprüfung kann entnommen werden, dass das Gelege entlang der Gappingfehler minimal dünner ist.

In Abbildung 5 fällt zunächst die unterschiedliche Dicke auf, die mit den eingebrachten GF-Tapes einhergeht. Sowohl Wirbelstrom (elektrische Leitfähigkeit) als auch Thermografie (thermische Leitfähigkeit) reagieren ähnlich sensitiv auf den geringeren Kohlefaservolumengehalt in der Mitte des Laminats.

Tabelle 1 fasst die Untersuchungsergebnisse zur Bewertung des Detektionsvermögens der Methoden hinsichtlich Gappingfehler, Overlaps, Faserorientierung und Faservolumengehalt zusammen. Hierzu ist zu erwähnen, dass mittels der Dickenprüfung auch Fehler detektiert werden können, sofern sich diese auch auf die Dicke auswirken (vgl. Abbildung 4). Darüber hinaus kann die Inlinetauglichkeit (Prüfgeschwindigkeit) der Wirbelstromprüfung durch die Verwendung von Sensorarrays deutlich erhöht werden. 4. Prüftechnische Umsetzung Inhomogene Eigenschaften innerhalb des Laminats und Fehler können von den verwendeten Methoden mittels der Wirbelstromprüfung am klarsten unterschieden werden. Dies wird bei der Konzeption und dem Aufbau des Inline-Prüfsystems berücksichtigt, siehe Kapitel 4.

	<i>Dickenprüfung</i>	<i>Wirbelstrom</i>	<i>Thermografie</i>
<i>Messzeit pro Laminat (40 cm x 40 cm)</i>	<i>Ca. 1 h (1,6 Mio Punkte)</i>	<i>Ca. 1 h (1,6 Mio Punkte)</i>	<i>Ca. 10-30 s</i>
<i>Detektion Gassen</i>	<i>/</i>	<i>Sehr gut</i>	<i>Gut</i>
<i>Detektion Overlaps</i>	<i>/</i>	<i>Sehr gut</i>	<i>Gut</i>
<i>Detektion C-Faservolumen</i>	<i>/</i>	<i>Sehr gut</i>	<i>Sehr gut</i>

Tabelle 1: Bewertung der Untersuchungsergebnisse

3.5 Ultraschallprüfung der Bauteile

Die Sitzschalen werden aus Laminat-Zuschnitten im Hybrid-Spritzgießprozess hergestellt. Dazu werden die Zuschnitte umgeformt und mit der thermoplastischen Matrix überspritzt. Das komplexe Bauteil wird mittels Ultraschall in zwei Bereichen geprüft (A und B Markierung in Abbildung 6/Abbildung 7). Hierzu wird das Bauteil auf einem 3-Achs-Manipulator befestigt und die definierten Bereiche (570 mm x 70 mm) in Scanrichtung (x) mit 0,5 mm und Indexrichtung (y) mit 2 mm in Kammfahrt abgescannet. Aufgrund der gebogenen Form der Sitzschale wird der Ultraschallprüfkopf (5 MHz Einzelschwinger) in einer federnden Aufhängung geführt, um so einen gleichbleibenden Anpressdruck des Prüfkopfs auf die Probenoberfläche zu gewährleisten. Der Ultraschallsensor in der beschriebenen Aufhängung ist in Abbildung 6 zu sehen. Als Koppelmedium wird Wasser verwendet.

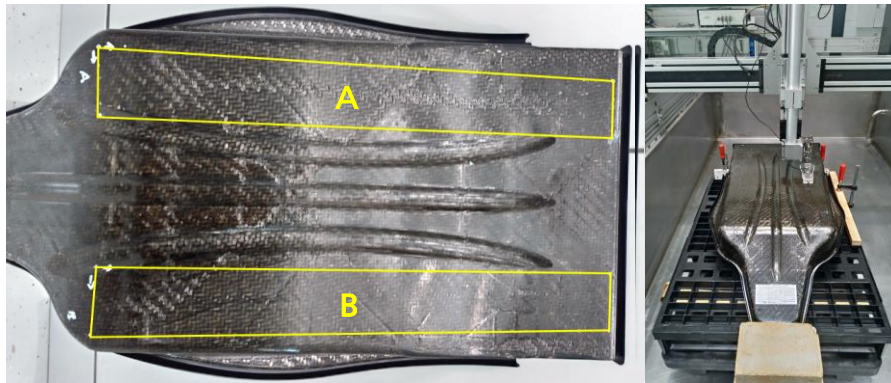


Abbildung 6: links) Bild des Bauteils mit Koordinatenursprung der beiden Scanbereiche A und B, rechts) Ultraschallprüfung des eingespannten Bauteils in 3-Achs-Manipulator

Als weitere Prüfparameter werden 80 MHz Abtastrate und 6 mm Prüftiefe bei einer angenommenen Schallgeschwindigkeit von 3000 m/s gewählt. Abbildung 7 zeigt C-Bilder bei ausgewählten Prüftiefen.

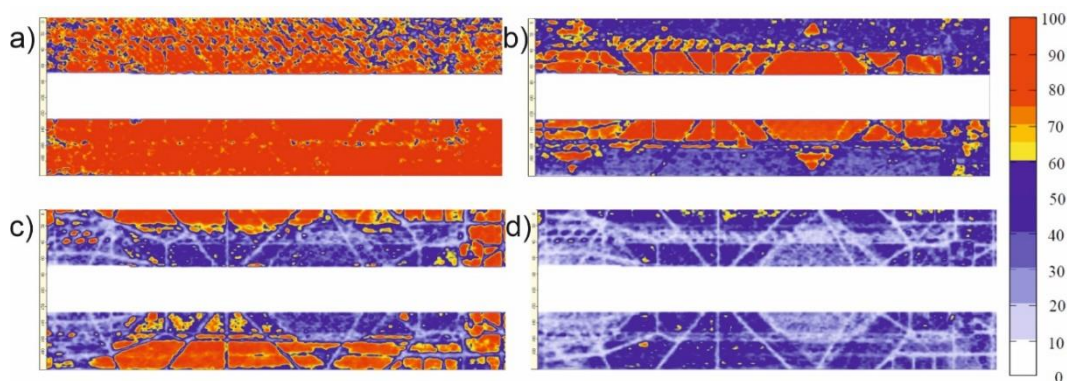


Abbildung 7: Ultraschall C-Bilder der relativen Schallamplitude in den Prüfbereichen A (jeweils oben) und B (jeweils unten) bei Prüftiefen von a) 0 mm, b) 1 mm, c) 1,5 mm d) 1,9 mm

In den Ultraschall C-Bilder lassen sich bei unterschiedlichen Tiefen die verstärkenden UD-Tapes (b/c: hohe Amplitude), sowie die gute Anbindung der spritzgegossenen Stege (d: niedrige Amplitude) erkennen. Aus den Amplitudenunterschieden, beispielsweise in c) oben und unten, lässt sich auf die Anbindung und auf lokale Fehler schließen.

4. Prüftechnische Umsetzung

4.1. Allgemeines Prüfkonzept

Die Prüfung der am Fraunhofer ICT durchzuführenden Prozessschritte (Legen, Konsolidieren und Zuschneiden der Gelege, Hybridspritzguss) erfolgt unmittelbar vor und nach der Umformung von CFK-Gelegen zu komplexeren Bauteilen. Vor der weiteren Verarbeitung und Umformung erfolgt eine nahezu vollflächige Untersuchung dieser Bauteile mittels Wirbelstromprüfung. Für diese und die im Kapitel 4.3 beschriebene Prüfung der umgeformten Bauteile mittels Ultraschall wurde eine Prüfanlage zur Integration in den Fertigungsprozess konzipiert. Im Maschinenkorpus eines marktüblichen 3-Achsen-Flachbettscanners wurden neben der CNC-Maschinensteuerung auch die gesamte Prüftechnik und ein Industrie-PC-System zur Datenauswertung integriert. Der gesamte Prozessablauf wird durch ein am Fraunhofer IZFP entwickeltes System gesteuert, welches mit der Robotersteuerung der Fertigungsanlage interagiert.

Nach der Umformung und Hinterspritzung nimmt ein Roboter das Bauteil aus der Presse und legt es zur Nachprüfung mittels Ultraschalls wieder auf den Scantisch der Prüfanlage. Durch die komplexe Formgebung des Bauteils ist in der momentanen Ausbaustufe nur eine Prüfung der planen Flächen vorgesehen, bei Bedarf muss die Manipulation des Prüfkopfhalters durch räumlich flexiblere Mehrachspositionierungs-Systeme ergänzt werden. Die Ultraschallprüfung erfolgt in Kontakt, das erforderliche Koppelmittel wird in der Prüfanlage vorgehalten und während der Prüfung an den Ultraschallsensor gepumpt. Nach Abschluss der Prüfung signalisiert die Anlage Entladebereitschaft an den Roboter und bereitet einen neuen Prüfzyklus vor.

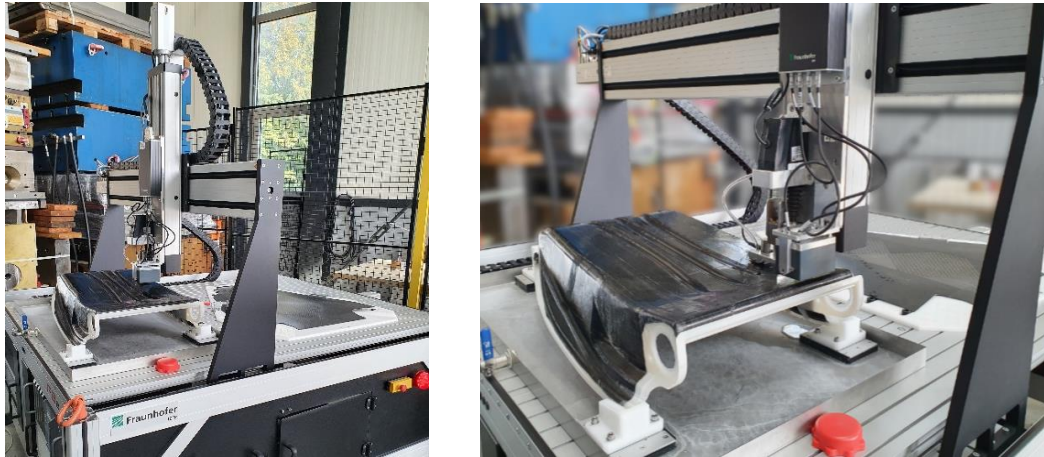


Abbildung 8: Gesamtsystem mit eingelegtem Prüfkörper

4.2. Wirbelstromprüfung

Die Wirbelstromprüfung eines CFK-Geleges wird nach manuellem Einlegen des Prüfkörpers in die Anlage durch den Bediener ausgelöst. Durch den Einsatz eines Arrays mit vier Wirbelstromsensoren lässt sich die erforderliche Auflösung mit einer schnellen Prüfung des Bauteils kombinieren. Um bei der kontaktbasierten Prüfung die Oberfläche des Bauteils nicht zu beschädigen und einen gleichbleibenden Abstand der Sensoren zu gewährleisten, wurde sowohl das gesamte Array als auch jeder einzelne Prüfsensor federnd gelagert. Wegen Kanteneffekten und durch die Fixierung des Bauteils kann keine 100% Prüfung erfolgen, jedoch werden alle relevanten Bereiche abgedeckt, wie in Abbildung 9 (links) zu sehen ist. Die Prüfung wird in Mäanderfahrt mit einer Auflösung von 0,1 mm in Scanrichtung und einem Versatz von 1 mm in Indexrichtung durchgeführt. Nach der vollständigen Prüfung des Geleges fährt der Manipulator das Sensorarray in die Ruheposition zurück und signalisiert dem Nutzer das Ende der Prüfung und somit die Möglichkeit zur sicheren Entnahme des Prüfteils. Unmittelbar nach dem Beenden der Datenaufnahme werden diese automatisch auf dem im Fraunhofer IZFP bereitgestellten DICONDE-Server archiviert.

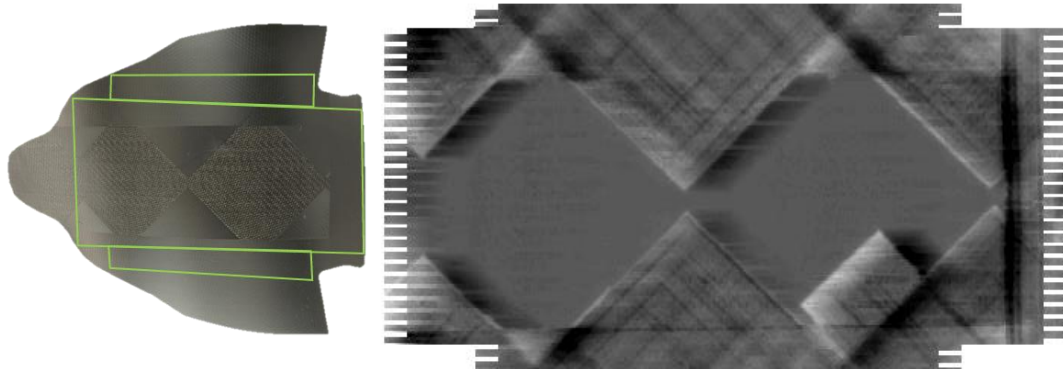


Abbildung 9: links) Wirbelstrom-Prüfbereich auf dem CFK-Gelege, rechts) entsprechendes C-Bild

In den Messdaten sind die Übergänge zu den verstärkten Bereichen gut sichtbar. In Abbildung 9 (rechts) sind falsch gelegte Tape-Streifen an der rechten Raute zu erkennen. Zudem sind Rückschlüsse auf den Fasergehalt des Prüfteils möglich. Die Rauten (Organoblech) in der Mitte sind klar von den C-Faser verstärkten Rändern unterscheidbar, deren Faserorientierung ebenfalls klar entnommen werden kann. Da das Wirbelstromsignal mit dem Fasergehalt korreliert, ist durch Kalibrierung eine Dickenbestimmung der Platte möglich, sofern das Bauteil aus einem homogenen Material besteht.

4.3. Ultraschallprüfung

Anders als die Wirbelstromprüfung, wird die Ultraschallprüfung automatisch abgearbeitet. Die Anlage wird durch den Nutzer in dem Ultraschallprüfmodus umgeschaltet und wartet dann in Ruheposition auf Signale des Be- und Entladeroboters. Die Prüfung beginnt, wenn der Roboter signalisiert, dass ein Bauteil in das Prüfsystem eingelegt wurde und der Roboter den Arbeitsbereich des Manipulators verlassen hat. Die Prüfung erfolgt auch hier in Kontakttechnik durch einen federnd gelagerten Sensor. Abbildung 10 zeigt die Prüfbereiche A und B auf dem Bauteil links) sowie dazugehörige C-Bilder rechts). Während der Prüfung wird automatisch Koppelmittel zum Ultraschallsensor gepumpt, um die Signalqualität sicherzustellen. Nach Abschluss beider Prüfabschnitte wird die Pumpe angehalten, der Sensor in Ruheposition zurückgefahren und das Entladesignal an den Roboter gesendet. Während des Entladens des Prüfsystems durch den Roboter werden die Ultraschalldaten im DICONDE-Format gespeichert und zum Upload bereitgestellt. Sobald das fertig geprüfte Bauteil entnommen ist, wartet das System auf das Beladen mit einem neuen Bauteil, wodurch automatisch der nächste Prüfzyklus gestartet wird.

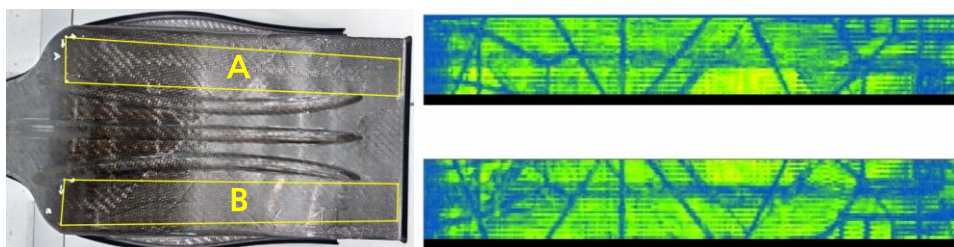


Abbildung 10: links) Ultraschall-Prüfbereiche auf dem Bauteil, rechts) entsprechende C-Bilder der Inline-Prüfung

4.4. Datenübermittlung in den digitalen Zwilling

Für die Steuerung der Prüfanlage ist eine übergeordnete Software zuständig. Diese übernimmt Aufgaben wie den Start, die Initialisierung sowie die Parametrierung der Wirbelstrom- und Ultraschallsoftware. Beide Prüfsoftwarepakete stellen ihre Ergebnisse

nach Prüfende in Form eines C-Bildes im DICONDE-Format zur Verfügung. DICONDE dient hierbei als einheitliche Schnittstelle für die Zusammenführung und automatische Weiterverarbeitung von Daten unterschiedlicher Prüfverfahren. Die Datenübermittlung in den digitalen Zwilling erfolgt standortübergreifend. Das bedeutet, die Prüfanlage schickt die Sensordaten automatisiert von einem Standort (hier Fraunhofer ICT, Pfinztal) auf den DICONDE Server (DIMATE Communication Server, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken) um danach mit Prozessdaten am Fraunhofer ICT und Simulationsdaten am Standort Fraunhofer SCAI, Sankt Augustin, fusioniert zu werden. Das Konzept kann flexibel an die unterschiedlichsten Anwendungsfälle adaptiert werden.

5. Zusammenfassung

Digitale Zwillinge stellen eine Verbindung her zwischen der realen Welt und einer Simulationswelt und erlauben eine kosteneffiziente, ressourcenoptimierte Produktion. Als ein Element des digitalen Zwillings für den thermoplastischen Composite-Leichtbau wurde ein System zur Inline-Prüfung von Qualitätsmerkmalen von Halbzeugen und Bauteilen vorgestellt. Für die Umsetzung des Inline-Prüfsystems wurde das Wirbelstromverfahren zur Prüfung von Laminaten und Ultraschall in Kontakttechnik zur Prüfung von Bauteilen in Voruntersuchungen ausgewählt. Beide Verfahren ermöglichen es, Realdaten mit genügend hohem Informationsgehalt zu erfassen, sodass die Daten den Bauteilen und Bauteilbereichen individuell zugeordnet werden können, eine genügend hohe Ortsauflösung besitzen und prozess- bzw. qualitätsrelevante Parameter erfassen (Faserorientierung, Faservolumengehalt, Fehler wie Gapping und Overlap). Zwecks der Einbindung der Inline-Prüfanlage in den digitalen Zwilling exportiert die Anlage die Prüfdaten (Messdaten und Metadaten) im DICONDE Standard auf einen DICONDE-Server.

6. Danksagung

Diese Arbeit wird durch das Projekt „digitalTPC“ der Fraunhofer Gesellschaft gefördert. Die Autoren danken N. Brosta für die Programmierung der Ultraschall-Software sowie N. Reimsbach und G. Di Gregorio für konstruktive Arbeiten und den Aufbau des Gesamtsystems.

Referenzen

- [1] M. Kropka, M. Muehlbacher, T. Neumeyer, V. Altstaedt, From UD-tape to final part – a comprehensive approach towards thermoplastic composites, *Procedia CIRP* 66 (2017) 96-100.
- [2] M. Steffens, Zur Substitution metallischer Fahrzeug-Strukturbauteile durch innovative Faser-Kunststoff-Verbund-Bauweisen, Dissertation, IVW Schriftenreihe Band 14, Kaiserslautern, 2000.
- [3] S. Sun, Z. Han, H. Fu, H. Jin, J. S. Dhupia, Y. Wang, Defect Characteristics and Online Detection Techniques During Manufacturing of FRPs Using Automated Fiber Placements: A Review, *Polymers* 2020, 12, 1337.
- [4] D. Koster et al., Inlinetauglichkeit von zerstörungsfreien Prüfmethode für den digitalen Zwilling von thermoplastischen Carbonfaser-Tapes, DGZFP Jahrestagung 2021, <https://jahrestagung.dgzfp.de/portals/jt2021/bb176/inhalt/23.pdf>
- [5] G. Mook, Zerstörungsfreie Charakterisierung von carbonfaserverstärkten Kompositen mit Hilfe des Wirbelstromverfahrens, DGZFP Jahrestagung 2001, <https://www.ndt.net/article/dgzfp01/papers/v37/v37.htm>
- [6] D. Berger, T. Will, H.-C. Töpfer, G. Lanza, D. Koster, H.-G. Herrmann, Characterization and optimization of in-process eddy current sensor arrays using computed tomography, *Procedia CIRP* 66 (2017) 243-248.
- [7] D. Berger, A. Egloff, J. Summa, M. Schwarz, G. Lanza, H.-G. Herrmann, Conception of an eddy current in-process quality control for the production of carbon fibre reinforced components in the RTM process chain, *Procedia CIRP* 62 (2017) 39-44.