

# Inlinetauglichkeit von zerstörungsfreien Prüfmethoden für den digitalen Zwilling von thermoplastischen Carbonfaser-Tapes

Dirk KOSTER<sup>1</sup>, Jannik SUMMA<sup>1</sup>, Christian JUNGSMANN<sup>1</sup>, Ute RABE<sup>1</sup>, Hans-Georg HERRMANN<sup>1</sup>, Tobias LINK<sup>2</sup>, Marianne JOHN<sup>3</sup>, Frank NAGEL<sup>3</sup>, Ralf SCHLIMPER<sup>3</sup>, Ahmad DELFOROUZI<sup>4</sup>, Josef ROGGENBUCK<sup>4</sup>, Klaus WOLF<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer IZFP, Saarbrücken

<sup>2</sup> Fraunhofer ICT, Pfinztal

<sup>3</sup> Fraunhofer IMWS, Halle (Saale)

<sup>4</sup> Fraunhofer SCAI, Sankt Augustin

Kontakt E-Mail: dirk.koster@izfp.fraunhofer.de

**Kurzfassung.** Die Verwendung von endlosfaserverstärkten thermoplastischen Verbundwerkstoffen ermöglicht die effiziente Herstellung von Leichtbaustrukturen in großserientauglichen Fertigungsverfahren, wie der Hybrid-Spritzguss-Technologie. Für viele Branchen stellen unidirektionale (UD) Tape Halbzeuge mit Kohlenstoff- oder Glasfaser einen guten Kompromiss bezüglich mechanischer Eigenschaften und einer wirtschaftlichen Fertigung dar. Die in einem kontinuierlichen Verfahren hergestellten Tapes werden in weiteren Prozessschritten zu Laminaten gestapelt und konsolidiert. Die konsolidierten zweidimensionalen Halbzeuge werden anschließend in geschlossenen Werkzeugen zu 3D Bauteilen umgeformt und per Spritzguss funktionalisiert. Damit der Einsatz in sicherheitsrelevanten Bauteilen ermöglicht werden kann, müssen jedoch Schwankungen der Materialeigenschaften in Breiten- und Längenrichtung detektiert und lückenlos dokumentiert werden. Hierbei spielen Merkmale wie z. B. Tapedicke, Homogenität, Imprägnierung sowie das Faservolumen eine entscheidende Rolle.

Der wirtschaftliche Einsatz von UD-Tapes wird dann ermöglicht, wenn die Qualität früh in der Wertschöpfungskette erfasst und somit der Ausschuss minimiert werden kann. Hierbei ist eine Inlineprüfung und Dokumentation während der Tapeherstellung besonders interessant. Im Kontext der gesamten Bauteilherstellung kann eine weitere Verminderung von Ausschuss erzielt werden, wenn von klassischen Fehlerschwellen Abstand genommen wird. Indem die hochaufgelösten, ortsgenauen Materialcharakteristika in einen digitalen Zwilling eingespeist werden, können die Tapes, angepasst an die Qualitätsklasse, an entsprechende Positionen im Bauteil platziert werden.

Der Beitrag vergleicht experimentelle Ergebnisse verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Charakterisierung von Tapes. Da kein Verfahren alle relevanten Informationen liefern kann und eine Integration während der Produktion gewissen Randbedingungen unterliegt, muss eine Bewertung zur Nutzung sich ergänzender inline-fähiger Modalitäten zur Maximierung der Erkennung von qualitätskritischen Merkmalen vorgenommen werden. Ein Konzept zur Datenübermittlung in den digitalen Zwilling sowie für ein Inline-Prüfsystem wird ebenfalls vorgestellt.

## 1. Einführung

Endlosfaserverstärkte thermoplastische Verbundwerkstoffe (Continuous Fiber-Reinforced Thermoplastics) weisen eine hohe Steifigkeit bei geringem Gewicht auf und können warm umgeformt werden. Besonders bewährt hat sich der Einsatz von unidirektionalen endlosfaser Tapes (UD-Tapes) als Halbzeuge. Durch die Prozessschritte Schneiden, Legen, Konsolidieren, Umformen erreicht man einen guten Kompromiss bezüglich mechanischer Eigenschaften und wirtschaftlicher Fertigung. Die konsolidierten zweidimensionalen Gelege werden in geschlossenen Werkzeugen zu 3D Bauteilen umgeformt. Im Spritzguss-Verfahren werden Versteifungen wie z. B. Rippen sowie Montagehalterungen angebracht und die Bauteile hiermit funktionalisiert. Dieser Hybrid-Tapelegeprozess 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 dieser 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 thermoplastischer Faser-Komposite sind schon länger bekannt [2]. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes “Modulare Produktionsanlage für hochbelastbare Hybridbauteile” (MoPaHyb) haben 12 Partner aus Industrie und Forschung eine modulare Produktionsanlage zur Herstellung von hochbelastbaren Hybridbauteilen auf Basis thermoplastischer Faserverbunde entwickelt. 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 Projekt bei Fraunhofer erstellt über die reine Fehlerdokumentation hinaus einen Zwilling, in dem individuelle Material- und Halbzeug-Eigenschaften des realen Bauteils erfasst und mit simulierten Daten zusammengeführt werden.

Der Schwerpunkt des hier vorliegenden Beitrags bezieht sich auf einen Teilaspekt des digitalen Zwillings und zwar auf einen der ersten Prozessschritte, die Tape-Herstellung auf Basis von Carbonfasern (CF). Wenn qualitätskritische Merkmale des CF-Halbzeugs wie z. B. Tapedicke, Homogenität, Imprägnierung sowie der C-Faservolumengehalt in frühen Stadien des Prozesses ermittelt werden, können die Auswirkungen dieser Parameter auf spätere Prozessschritte individuell untersucht und kontrolliert werden. Fehler oder Abweichungen von Zielparametern können frühzeitig erkannt, die Prozessführung angepasst, Ausschuss vermieden und damit eine wirtschaftliche Prozessführung erzielt werden.

Um individuelle Eigenschaften (Tapedicke, C-Volumengehalt, Gassen) ermitteln zu können, sind entsprechende in-situ Messeinrichtungen notwendig. Die Verfahren müssen robust und schnell sein, um die Verortung der Messdaten im Tape zu ermöglichen. Es sind zwar Verfahren wie Röntgen-Computertomographie oder Analyse optischer Schlifffbilder bekannt, mit denen die oben genannten Parameter hochgenau bestimmt werden können. Diese eignen sich jedoch aufgrund ihrer Geschwindigkeit oder einer (zerstörenden) Probennahme, nicht für die in-situ Prozesskontrolle. Andere, beim AFP-Prozess eingesetzte, Methoden [4] sind für die Detektion der für die Tapeherstellung relevanten Fehler zu bewerten. Wie im Folgenden gezeigt wird, wurden verschiedene Methoden im Hinblick auf ihre Prozesstauglichkeit und Aussagekraft evaluiert. Auf zwei Verfahren, die sich bezüglich ihrer Inline-Tauglichkeit und deren Fähigkeit wichtige oder priorisierte Merkmale zu detektieren, qualifizierten, wird im Folgenden genauer eingegangen.

## 2. Herstellprozess und typische Fehler von Endlosfasertapes

Unidirektionale thermoplastische Endlosfasertapes können durch verschiedene Fertigungsprozesse hergestellt werden. Gängige Verfahren sind die Produktion mittels Pulver- und Folienimprägnierung. Seit einigen Jahren werden Anlagen entwickelt, die UD-Tapes durch Schmelzdirektimprägnierung herstellen [5]. Diese weisen große Vorteile in wirtschaftlicher wie auch mechanischer Hinsicht auf. Im Projekt wurde die am Fraunhofer PAZ installierte UD500-Anlage zur Herstellung von UD-Tapes mittels Schmelzdirektimprägnierung vom Hersteller KraussMaffei verwendet. Von Rovingspulen mit unterschiedlichen Materialien wie z. B. Kohlenstoff, Glas oder natürlichen Fasern wird die Anlage über ein Abspulgatter bestückt. Das Kunststoffgranulat wird über einen Extruder aufgeschmolzen und dem Werkzeug zugeführt. Die trockenen Fasern werden zunächst mechanisch zu einem Faserbett aufgespreizt und anschließend in das Werkzeug eingezogen. Mittels der in der Benetzungsdüse integrierten Angussysteme wird die thermoplastische Schmelze auf die Fasern aufgebracht. Die vollständige Imprägnierung wird stromabwärts durch wellenförmige Elemente, sogenannte „Pins“, realisiert. Durch diese Pins baut sich ein Druckgradient zwischen dem Faserbett und der Matrix auf und die Schmelze strömt in die Fasern. Für eine effiziente Herstellung endlosfaserbasierter Tapes ist es zusätzlich notwendig, dass die Fasern im Tape sehr gleichmäßig verteilt vorliegen. Bei nicht optimal eingestellter Spreizung können sich Unterschiede im Faseranteil über die Breite des Halbzeugs ergeben. Durch eine inhomogene Faserverteilung kann es im Tape zu deutlichen Unterschieden der mechanischen Eigenschaften sowie der Verbunddicke kommen und damit eine industrielle Anwendung erschweren. Für die Matrix können unterschiedliche Kunststoffe wie z. B. Polycarbonat (PC), Polyamid (PA) oder Polyimide (PI) verwendet werden. Der Benetzungsdüse ist ein Glättwerk nachgeschaltet, welches den Fasermatrixverbund kalibriert und kühlt. Im nächsten Schritt wird das weiter abgekühlte Band an den Rändern auf die gewünschte Bandbreite geschnitten. Der Randabschnitt kann wegen fertigungsbedingter Qualitätseinbußen in den Randbereichen nicht vermieden werden. Die Anlage kann maximal 500 mm breite Bänder mit einer Maximalgeschwindigkeit von 20 m/min produzieren. Am Ende der Anlage wird das Band mit einem Zweistufenwickler auf große Haspeln aufgerollt und mittels Querschneider abgeschnitten. Für den weiteren Einsatz muss das Band noch beim sogenannten „Slitten“ in einem weiteren Prozessschritt auf gängige Breiten geschnitten werden. Aktuell beziehbare Produkte variieren in einer Bandbreite von ca. 30 mm bis zu ca. 1500 mm. Auch die Dicke der UD-Tapes kann sehr unterschiedlich sein und im Bereich von 150 µm bis zu 500 µm schwanken.

UD-Tapes müssen abhängig vom Endprodukt verschiedene Qualitätskriterien einhalten. So stellen Produkte zur Dekoration wie z. B. Interieurbauteile im Automobilbereich deutlich geringere Qualitätsansprüche als strukturelevante Bauteile. Typische Fehler bei der Herstellung von UD-Tapes sind Dickenabweichungen, Gassenbildung, trockene Stellen, Faservolumenschwankungen und Faserondulationen, die sich unterschiedlich stark auf die mechanischen Eigenschaften auswirken können [3].

## 3. Methodenvergleich und Bewertung

### 3.1 Dickenprüfung

Die Dickenprüfung wurde durch zwei gegeneinander positionierte Laserabstandssensoren, die den jeweiligen Abstand zum Tape messen und verrechnen, realisiert. Als Ergebnis wird die Dicke des UD-Tapes am Messpunkt ausgegeben. Unter Zuhilfenahme eines Manipulators mit Inkrementalgeberausgängen können definierte Bereiche abgescannt und positionsgenau

Dickenlandkarten erstellt werden. Zur reproduzierbaren Positionierung der UD-Tapes in vergleichenden Vorversuchen wurde ein Spannrahmen für jeweils drei UD-Tapes angefertigt. Der Messaufbau ist in Abbildung 3.1 links dargestellt.

Zu Beginn wurden Messungen mit zwei unterschiedlichen Sensorsystemen an denselben Tapeabschnitten durchgeführt, um verschiedene Inline-Konzepte für die spätere Implementierung in der Tape-Herstellanlage bewerten zu können. Das erste Konzept verwendet zwei konfokale, quer zur Tapelänge traversierende Wegmesssensoren. Vorteilhaft ist die hohe Genauigkeit der Dickenmessung, gleichbleibende Ergebnisse auch auf unterschiedlichen Prüfobjektmaterialien, die einfache Ausrichtung der optischen Achsen zueinander und die Unempfindlichkeit gegenüber Störgrößen im Betrieb. Nachteile sind, dass durch den sich quer zur Laufrichtung des Bandes bewegenden Punktsensor nur ein kleiner Teil der UD-Tapefläche erfasst werden kann, Vibrationen eingebracht werden, und dass zusätzliche Kosten für die mechanische Traversierung und die dadurch notwendigen regelmäßigen Wartungsvorgänge entstehen. Das zweite Konzept verwendet zwei Laser-Profilometer, die an einer fixen Position über und unter dem Tape angebracht werden. Vorteilhaft ist die Datenaufnahme des UD-Tapes über die Breite der Laser-Profilbreite. Nachteil ist der Positionieraufwand bei der präzisen Ausrichtung der Laser-Profilometer, der zusätzlich zur Sensorgenauigkeit für die Systemgenauigkeit der Dickenmessung verantwortlich ist.

Der konfokale Sensor wurde bei der Vergleichsmessung mäandernd über den Prüfbereich geführt. Die Daten wurden in Scanrichtung (Y-Achse) mit 0,1 mm und in Indexrichtung (X-Achse) mit 1,0 mm örtlicher Auflösung aufgenommen. Die Messung mit dem Laser-Profilometer wurde mit einer Auflösung von 0,1 mm in Scanrichtung (X-Achse) und von 0,0125 mm in Indexrichtung die (Y-Achse, Profilauflösung) durchgeführt. Abbildung 3.1 zeigt rechts die Vergleichsmessungen mit den beiden Sensorsystemen.

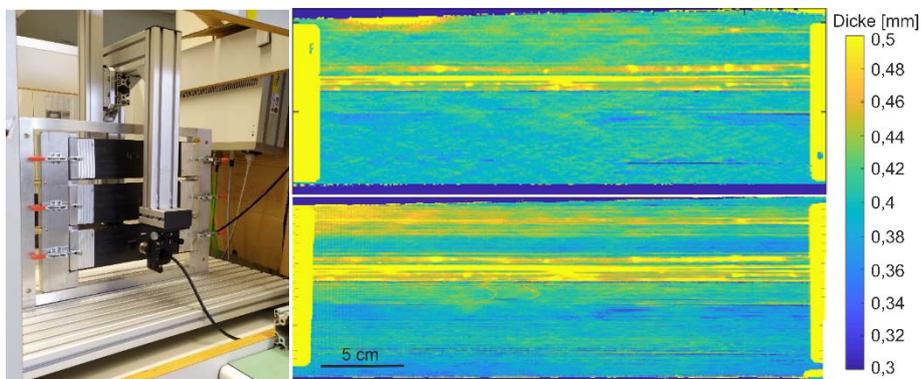


Abbildung 3.1: Messaufbau zur Datenaufnahme beider Sensorsysteme (links) sowie Vergleich der Dickenlandkarte Tape 90-3-3 mit konfokalem Wegmesssensor (rechts oben) und Laser-Profilometer mit maximaler Profilbreite von 80 mm (rechts unten)

In beiden C-Bildern sind vergleichbare Dickenbereiche dargestellt. Einen guten Kontrast zeigen ungenügend imprägnierte Stellen, Risse, Gassen und Welligkeiten. Die Messdauer beträgt  $< 2$  min mit Laser-Profilometer und etwa 60 min beim konfokalen Messsensor. Der Ansatz mit Laser-Profilometer hat somit einen deutlichen Zeit-Vorteil für ein Inline-Prüfsystem zur Dickenprüfung, wodurch eine UD-Tapefläche in Breite des Zeilensensors mit hoher Auflösung ohne ersichtliche Genauigkeitseinbußen abgescannt werden kann.

### 3.2 Thermografie

Bei der thermografischen Prüfung wird die Wärmeabstrahlung von einer Oberfläche mit Hilfe eines auf einen charakteristischen Wellenlängenbereich begrenzten Infrarot-Detektors aufgenommen. In den meisten Fällen ist dies der langwellige IR-Bereich von 7,5 bis 14  $\mu\text{m}$ .

Zusätzlich kann zwischen aktiver (externe Anregungsquelle) und passiver Thermographie (ohne externe Anregungsquelle) sowie der Art der Anregung unterschieden werden. Die Methode eignet sich vor allem bei großflächigen, dünnen Bauteilen und bei Oberflächen mit einem guten Abstrahlverhalten, wie es für Carbonfaserverstärkte Kunststoffe annähernd der Fall ist. Das Abstrahlverhalten wird durch die Emissivität  $\varepsilon$  angegeben, dem Verhältnis des Strahlungsspektrums eines Körpers zu dem des schwarzen Strahlers. Die erhöhte Temperatur der Tapes nach der Herstellung führt zu einem besseren Signal-Rausch Verhältnis und einer besseren Kontrastierung zwischen einer qualitativ guten und qualitativ schlechten Oberfläche (z. B. Rauigkeit oder Welligkeit). Im Rahmen der Labor-Untersuchungen kommen die Blitzlichtthermografie und die Messung der Abkühlung aus dem erwärmten Zustand zum Einsatz. Letzteres stellt die Abkühlung der Tapes nach der Herstellung nach. Die Versuchsaufbauten sind in Abbildung 3.2 dargestellt.

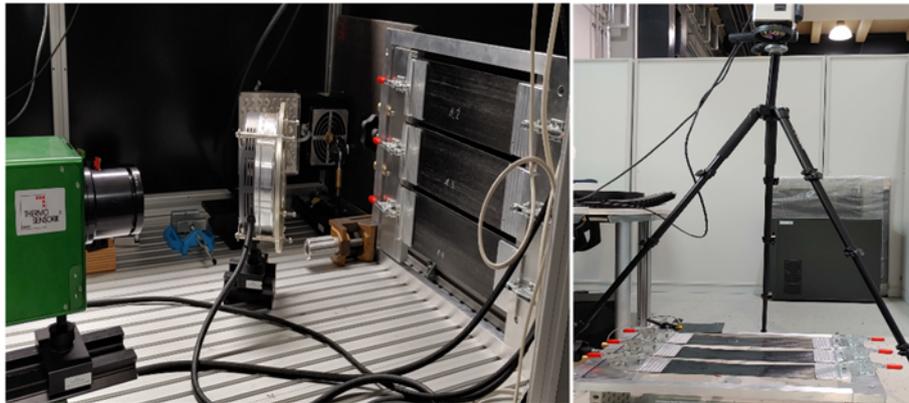


Abbildung 3.2: links) experimenteller Aufbau aktive Thermografie mit Dual-Band Kamera (links), Ringblitz (mitte) und Spannwerkzeug mit drei UD-Tapes (rechts), rechts) experimenteller Aufbau passive Thermografie mit Bolometerkamera (oben) und Spannwerkzeug mit drei UD-Tapes (unten), die Heizplatte unter den Tapes wurde entfernt

Bei der aktiven Thermografie wird mit dem Start der Messung ein Blitzlicht impulsartig innerhalb von 7 ms und mit 3,2 kJ in Richtung der Tapes entladen. Die eingesetzte Dualband-Kamera (Thermo Sensorik QWIP 384) nimmt 200 Bilder mit 145 Hz auf. Die Kamera besitzt zwei Detektoren mit den spektralen Fenstern von 4,4-5,2  $\mu\text{m}$  und von 7,8-8,8  $\mu\text{m}$  Wellenlänge und eine Auflösung von 384 x 288 Pixel. Um den Einsatz der Thermografie im Prozess nachzustellen, wurden die Tapes mit einer Heizplatte auf 40 °C aufgeheizt und die Abkühlung nach dem Entfernen der Heizplatte über einen Zeitraum von ca. 30 Sekunden mit 10 Hz aufgenommen. Aufgrund der metallischen Einspannungen und der Richtung der C-Fasern ist ein starker thermischer Gradient zu sehen, weshalb die Bilder im Postprocessing mit einem Gaussfilter bearbeitet wurden. Abbildung 3.3 vergleicht die beiden Thermogramme aus der Blitzlichtanregung und der Abkühlung eines Tape Streifens.

Die abgebildeten hell/dunkel-Kontraste sind digitale Intensitätswerte. Die Interpretation ihrer Lage, Größe und Ausbreitungsrichtung ermöglichen eine Aussage oder Eingrenzung der Defektart. Das markanteste Merkmal des Bildes ist der flächenförmige dunkle Kontrast im mittleren Bereich des Tapes. Dieser wird durch Dickenunterschiede oder durch eine schlechte Harzimprägnierung hervorgerufen. Die dunkle horizontale Linie unten im aktiven Thermografiebild ist durch seine Form deutlich auf die Faserverteilung zurückzuführen. Hier kann es sich um eine Gasse oder durch eine örtliche Anhäufung von Fasern handeln. Im passiven Thermografiebild ist dieser Kontrast durch den hellen Rand unten überlagert, der in Folge des Gaussfilters entsteht. Im Vergleich dazu lassen beide Bilder jeweils rechts und links oben Zonen ohne Kontraste erkennen, was auf eine homogene Tapequalität schließen lässt.

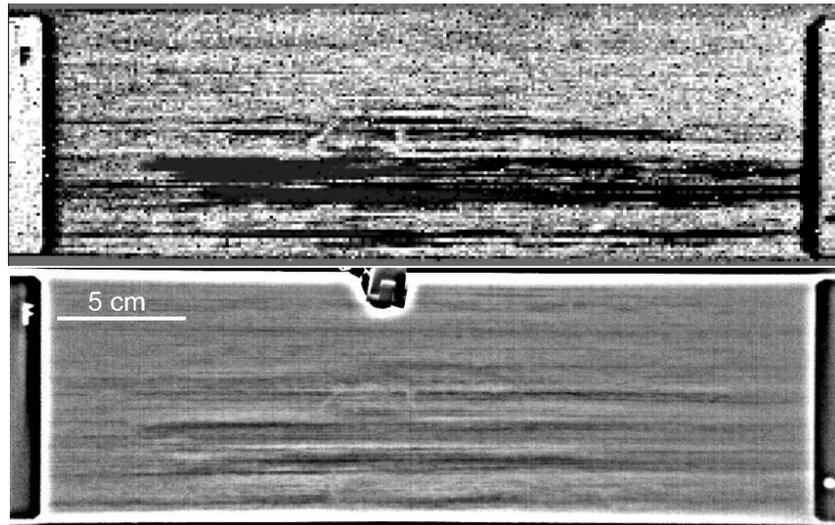


Abbildung 3.3: Tape 90-2-3, oben) Blitzlicht-Thermografie: 2. Hauptkomponente der Principal-Component Analyse, unten) mit Gauß-Filter korrigierte Differenztemperatur nach 0,83 s bezogen auf erstes Bild nach entfernen der Heizplatte, Thermoelement im oberen Bildrand

Die beiden Abbildungen zeigen eine gute Kontrastierung von Qualitätsmerkmalen, insbesondere trockene Stellen/Harzimprägnierung, Welligkeit, Gassen und Risse. Der Vergleich von Blitzlichtanregung mit Erwärmung über Heizplatte zeigt, dass durch die prozessbedingt erhöhte Temperatur der Tapes ein sehr guter Kontrast zu erwarten ist, ohne dass eine zusätzliche Anregungsquelle benötigt wird. In Kombination mit den sehr kurzen Prüfzeiten für große Flächen folgt eine sehr gute Tauglichkeit der passiven Thermografie für eine 100% Inline-Detektion von Tape-Qualitätsmerkmalen.

### 3.3 Wirbelstrom

Die Wirbelstromprüftechnik zählt zu den elektromagnetischen Verfahren und basiert auf der Induktion von Wirbelströmen in elektrisch leitfähigen Materialien. Das Wirbelstromverfahren ist sehr gut geeignet, um die Orientierung von C-Fasern zu messen [6], und es wurden bereits Konzepte für Inline-Prüfsysteme vorgeschlagen [7, 8]. Für die Labormessungen wurden die UD-Tapes in den Spannrahmen fixiert, waagrecht auf einen Manipulator montiert und mittels kontaktierender Prüfung abgerastert. Abbildung 3.4 zeigt den Vergleich von Dickenlandkarte mit einem Absolutsensor aufgenommenen Wirbelstrom C-Bild. Der Scan wurde mit einer Prüffrequenz von 30 MHz und einer Auflösung von 0,1 mm in Scanrichtung (X-Achse) und 0,1 mm in Indexrichtung (Y-Achse) aufgenommen.

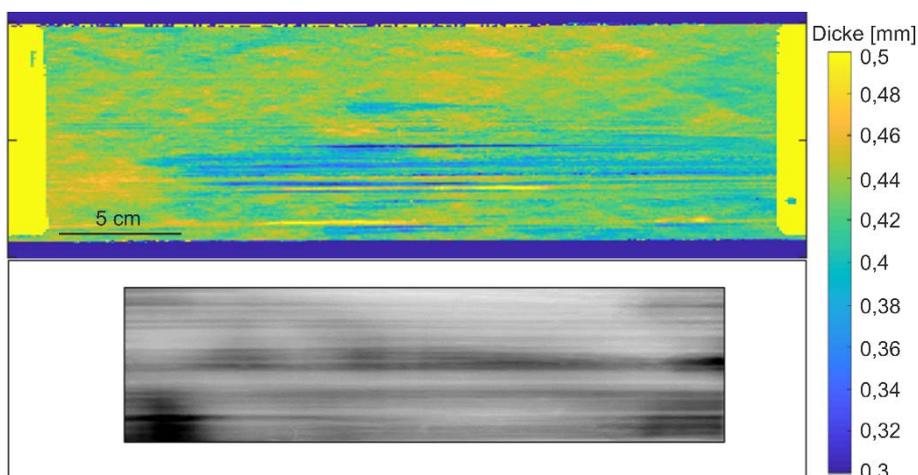


Abbildung 3.4: Vergleich der Dickenlandkarte Tape 90-2-3 mit konfokalem Messsensor (oben) und ortsgenauer C-Bild Ausschnitt der Wirbelstromprüfung (unten)

Das Wirbelstrom-Ergebnis zeigt kontrastreiche Bereiche. Im Vergleich mit der Dickenlandkarte kann an einigen Stellen eine Korrelation mit der Dicke festgestellt werden. Es besteht jedoch kein eindeutiger Zusammenhang, da die Tape-Dicke vom Faser- und Matrixvolumen abhängt, das Wirbelstromverfahren jedoch lediglich empfindlich auf das Faservolumen ist. Es können Faservolumen, Gassen und Risse charakterisiert werden. Gegen den Inline-Prüfsystem Einsatz spricht der notwendige Kontakt der Sensoren mit dem Tape sowie die hohe Anzahl von Sensoren, die für eine genügend hohe Orts-Auflösung in Tapebreite bei gleichzeitig schneller Messung benötigt werden würden.

### 3.4 Luft-US

Die Verwendung von Luft-Ultraschall zum Inline Monitoring von thermoplastischen Tapes wurde vorgeschlagen [9, 10]. Die Luft-Ultraschalltechnik hat im Vergleich zu anderen Ultraschallverfahren den Vorteil der Koppelmittelfreiheit. Zwei piezoakustische Wandler werden in Transmissionsanordnung vor- bzw. hinter das Prüfobjekt platziert. Bei schräger Einschallung können auch geführte Wellen angeregt werden. Wegen der hohen akustischen Verluste in Luft, insbesondere bei Frequenzen  $> 1$  MHz, weisen die verwendeten Prüfköpfe eine niedrige Mittenfrequenz (hier 580 kHz) auf. Um die laterale Auflösung zu verbessern wurden fokussierende Prüfköpfe eingesetzt. Der Fokusabstand zwischen akustischem Wandler und Prüfkörper beträgt 50 mm. Abbildung 3.5 (oben) zeigt den Aufbau.

Die US-Wandler werden vor der Messung ausgerichtet und kalibriert. Nach Positionierung der Probe zwischen den Wandlern rastert ein Manipulator die zu prüfende Oberfläche ab. Die Schrittweite in Scan- und Indexrichtung wird auf den Fokusdurchmesser von etwa 0,5 mm eingestellt. Zu jedem Messpunkt wird ein A-Bild mit einer Samplingrate von 20 MS/s und 4 Mittelungen abgespeichert. Abbildung 3.5 (unten) zeigt im C-Bild die maximale Amplitude in Transmission.

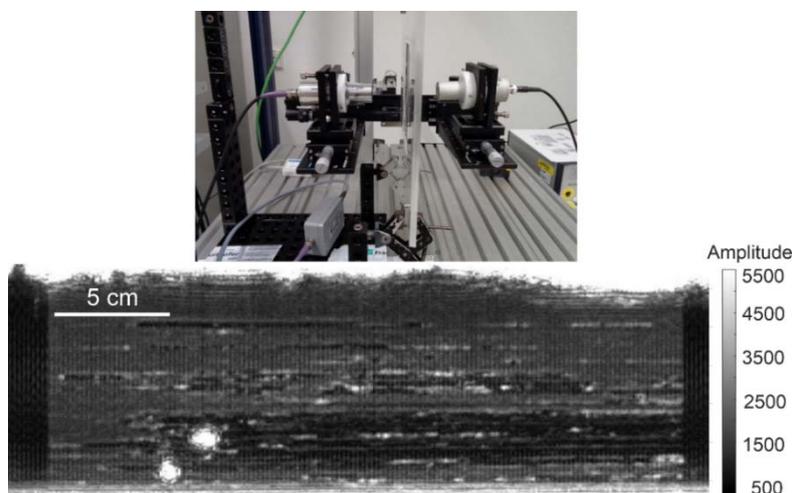


Abbildung 3.5: (oben) experimenteller Aufbau mit den beiden Luft-US Wandlern in Transmissionsanordnung, (unten) Luft-US C-Bild des Tapes 90-2-3 mit 0,5 mm Schussabstand, 580 kHz fokussierende Prüfköpfe

Helle Merkmale (hohe Schallintensitäten) weisen auf Risse und dünne Stellen des Tapes, dunkle Merkmale auf dicke Bereiche oder trockene Stellen hin. Das Tape weist im unteren Bildbereich eine dickere Materialstärke oder schlechtere Harzimprägnierung auf, wohingegen mehrere dünne oder gar rissige Bereiche über das Tape verteilt vorliegen. An den Rändern gerät ein Teil des emittierten Schalls ohne Wechselwirkung mit der Probe zum Empfänger, wodurch dieser Bereich stark übersteuert und hell dargestellt wird.

Aufgrund der punktförmigen Abrasterung der Probenoberfläche liegt die Messzeit bei ca. 30 min, was gegen die Inline-Fähigkeit spricht. Die Messzeit hängt jedoch stark von der gewünschten lateralen Auflösung und Anzahl der Mittelungen ab.

## 4. Prüftechnische Umsetzung

### 4.1. Allgemeines Prüfkonzept

Die Bewertung der Ergebnisse aus dem vorherigen Kapitel sowie die Randbedingungen für die Vorort-Implementierung, zeigten die beste Eignung der Thermografie und Dickenprüfung. Die Auswahl des Aufstellungsortes des Prüfsystem wurde auf einen Bereich kurz vor der Aufwickelstation festgelegt. Abbildung 4.1 zeigt das 3D-Modell des mechanischen Aufbaus für die Sensorintegration.

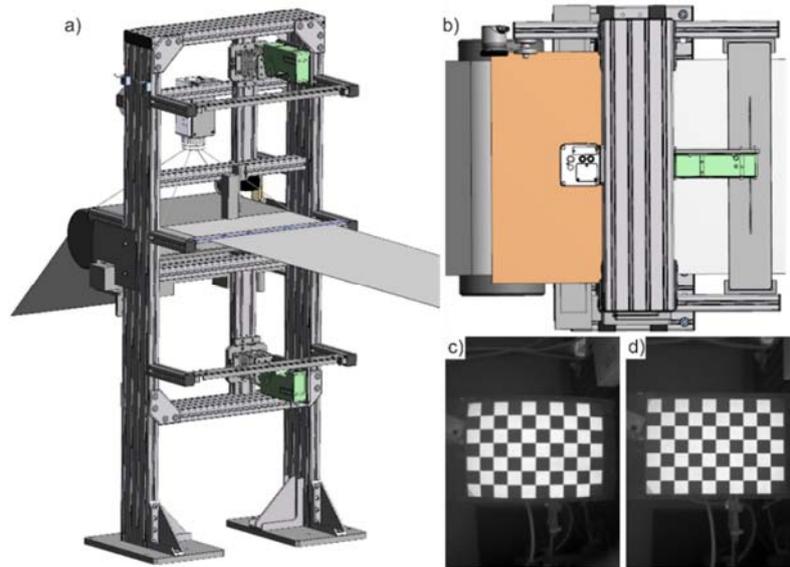


Abbildung 4.1: a) 3D-Modell des mechanischen Aufbaus des Sensorsystems, b) Draufsicht auf Thermografiesystem und Blickfeld auf Tape (braun), c) Thermogramm eines Schachbrettmusters mit Weitwinkelobjektiv, d) Thermogramm eines Schachbrettmusters nach Korrektur der Bildverzerrung

Die Elektronikkomponenten werden in einen Schaltschrank integriert. Zur individuellen Charakterisierung der UD-Tapes ist eine Verortung der Datenaufnahme mittels Reibrad erforderlich. Eine Elektroneinheit verteilt und verarbeitet die Inkrementalgebersignale und steuert das Komplettsystem. Ferner werden in der Elektroneinheit Pegelumsetzung und Datenverarbeitung durchgeführt. Ein Tintenstrahldrucker zur ortsgenauen Markierung der UD-Tapes ist ebenfalls vorgesehen. Das Drucksystem und das Dickenprüfsystem erhalten aufbereitete Inkrementalgebersignale. Die Druckbildsteuerung wird mittels Softwareschnittstelle realisiert und ausgeführt. Das Thermografiesystem besteht aus der Kamera und der Linieninfrarotquelle. Damit eine gleichbleibende Einbringung der Wärmeenergie in das UD-Tape stattfindet, wird die Leistung der Linieninfrarotquelle abhängig der Tapeeschwindigkeit geregelt. Mittels Framesync-Signal der Kamera wird eine ortsgenaue Datenaufnahme sichergestellt, indem die zurückgelegte Strecke zwischen jedem Framesync-Signal erfasst und der Thermografie-software als Offset bereitgestellt wird. Die Bedienung der Prüfanlage wird über eine grafische Benutzerschnittstelle (graphical user interface - GUI) sichergestellt.

### 4.2. Dickenprüfsystem

Das Prüfsystem zur Dickenbestimmung besteht aus zwei sich gegenüberstehenden Laser-Profilometern. Aktuell beziehbare Laser-Profilometer besitzen ähnlich leistungsfähige CMOS-Sensoren. Innerhalb einer Sensorserie werden gewöhnlich dieselben CMOS-Sensoren verwendet, wodurch sich das Verhältnis der lateralen Profilbreite (X-Achse) zur Profilauflösung immer auf die Datenpunkanzahl des CMOS-Sensors bezieht. Eine größere

Profilbreite bedeutet immer eine schlechtere laterale Auflösung. Ähnlich ist der Effekt bei der Auflösung des Abstandes (Z-Achse). Eine größere Profilbreite bedingt einen größeren Referenzabstand zum Prüfling, wodurch die Wiederholgenauigkeit und Linearität der Abstandswerte ungenauer wird. Ein Kompromiss bezüglich maximaler Profilbreite sowie X- und Z-Achsen Auflösung ist notwendig. Ein passendes System mit maximaler Profilbreite von 320 mm und zufriedenstellender Z-Achsen Wiederholgenauigkeit von 5 µm wurde ausgewählt. Zur Abdeckung der UD-Tapebreite von 500 mm werden so vier Laser-Profilometer benötigt. Im Projekt wird zuerst nur ein Laser-Profilometerpaar eingesetzt, jedoch wurde das System für eine spätere Erweiterung vorbereitet. Die Software lässt die Ein- und Ausjustage der Dickenprüfung an einem Normal vor und nach jeder UD-Tape Produktion zu. Zur Justage können die Profilometer in 5 Raumachsen so eingestellt werden, bis die Dickenwerte in einem geforderten Toleranzspektrum liegen.

#### *4.3. Thermografieprüfsystem*

Als Thermografiesystem kommt eine InfraTec VarioCam<sup>®</sup> HD Head 800 und eine Linienquelle vom Typ schnelle Mittelwelle (IRD S750SM, Optron) zum Einsatz. Die IR-Kamera weist eine spektrale Sensitivität von 7,5-14 µm, eine Auflösung von 1024 x 768 Pixeln sowie eine Aufnahmezeit von maximal 30 Bildern pro Sekunde (fps) auf und besitzt ein Weitwinkelobjektiv. Die Linienquelle emittiert Lichtwellen von 0,5 µm bis zu 10 µm, wobei das Maximum der Strahlungsintensität bei 1,6 µm liegt. Als Vorteile der schnellen Mittelwelle sind die hohe Reaktionsgeschwindigkeit, z. B. bei Tapestillstand, sowie das Strahlungsspektrum zu nennen. Letzteres liegt nur zum Teil im spektralen Fenster der Kamera, was eine Beschädigung des Detektors durch zu starke, direkte Bestrahlung verhindert. Durch die Linienquelle wird das Tape aufgeheizt und der zeitliche Verlauf der Tape-Abkühlung hinter dem Heizstrahler betrachtet. Zusätzlich liefert die Transmission durch das Tape Informationen. Abbildung 4.1 zeigt die Draufsicht (b) mit der Kamera und zugehörigem Blickfeld (braun) linksseits der Befestigungsstrebe. Aufgrund des verwendeten Weitwinkelobjektivs wird zusätzlich eine Korrektur der sehr geringen Bildverzerrung für einen Abstand Objektiv-Prüfobjekt von 42 cm durchgeführt (Abbildung 4.1 c/d)).

Die aufgenommenen Bilder werden über eine Maske auf einen relevanten Bildbereich von 1024 Pixel (Tapebreite) x 385 Pixel (Längsrichtung) zugeschnitten. Zu jedem Bild werden die Weginkremente der Software mitgeliefert, so dass die exakte Position der Aufnahme auf dem Tape bekannt ist. Mit dieser Ortsinformation werden die Bilder der entsprechenden Stelle zugewiesen und in Echtzeit zu einem virtuellen Tape abgewickelt.

#### *4.4. Datenübermittlung in den digitalen Zwilling*

Zur Steuerung der Prüfanlage ist eine übergeordnete Software zuständig. Diese übernimmt Aufgaben wie den Start, die Steuerung sowie die Parametrierung der Dicken- und Thermografiesoftware. Beide Prüfsoftwarepakete stellen ihre Ergebnisse in Form eines fortlaufenden C-Bildes während der Prüfung dar. Die Datenspeicherung in definierten UD-Tapeabschnitten erfolgt hierbei unter Zuhilfenahme des DICONDE Standards. Dazu werden Informationen wie die Länge der abzuspeichernden C-Bilder, der Ort der Datenspeicherung sowie DICONDE Tags wie z. B. Studiennummer, Prüfer, Datum oder Bauteilinformationen an die Softwaremodule übermittelt. 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 IMWS, Halle) auf den DICONDE Server (DIMATE Communication Server, Fraunhofer IZFP, Saarbrücken) um danach mit Prozessdaten am Fraunhofer IMWS 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 Beispiel wurde die Herstellung unidirektionaler Kohlenstofffaser-Tapes mit thermoplastischer Polymermatrix betrachtet. Bei komplexen Strukturwerkstoffen sind die Anforderungen an einen digitalen Material- und Komponentenzwilling besonders hoch. Realdaten mit genügend hohem Informationsgehalt müssen zur Verfügung stehen, das heißt Daten, die individuell zugeordnet werden können, eine genügend hohe Ortsauflösung besitzen und prozessrelevante Parameter erfassen (Dicke, Fasergehalt, Faserorientierung). Unter diesem Aspekt wurden im Rahmen von Vorversuchen verschiedene zerstörungsfreie Prüfverfahren auf ihre Inline-Tauglichkeit hin analysiert. Optische Dickenmessung und Thermografie erwiesen sich als am besten geeignet. Ein Inline-Prüfsystem wurde konzipiert. Das Gesamtsystem nutzt speziell gehaltete optische Zeilensensoren zur Dickenmessung und einen Thermografie-Zeilensensor. Mit Hilfe von Inkrementalgebern und einer eigens entwickelten Steuersoftware wird die individuelle Verortung der Messdaten im Tape ermöglicht. Über den DICONDE Standard werden die Daten exportiert und standortübergreifend für den digitalen Zwilling zur Verfügung gestellt.

## 6. Danksagung

Diese Arbeit wird durch das Projekt „digitalTPC“ der Fraunhofer Gesellschaft gefördert. Wir danken J. Oswald, A. Ehlen und N. Brosta für die Programmierung der Steuer-, Dickenprüf- und Thermografiesoftware sowie R. Rick für die Konzeption 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] C. Schmidt, P. Weber, T. Hocke, B. Denkena, Influence of prepreg material quality on carbon fiber reinforced plastic laminates by automated fiber placement, *Procedia CIRP* 67 (2018) 422-427.
- [5] M. Zschehyge, P. Michel, I. Jahn, Bauteile in thermoplastischer UD Endlosfaserverstärkung für die Automobilindustrie, 4. Leichtbau Tagung der Fraunhofer Allianz Leichtbau 2015, 11. -12. Februar 2015, Oberhausen
- [6] G. Mook, Zerstörungsfreie Charakterisierung von carbonfaserverstärkten Kompositen mit Hilfe des Wirbelstromverfahrens, DGZFP Jahrestagung 2001, <https://www.ndt.net/article/dgzfp01/papers/v37/v37.htm>
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] W. Essig, P. Fey, S. Meiler, and M. Kreutzbruck, Non-Contact Inline Monitoring of Thermoplastic CFRP Tape Quality Using Air-Coupled Ultrasound, *AIP Conference Proceedings* 1806, 050011 (2017)
- [10] W. Essig, M. Kreutzbruck, A. Bulavinov, R. Pinchuk, Industrielle Prüfung von thermoplastischen Tapes mit Luftultraschall, DACH Jahrestagung 2019, <https://www.ndt.net/article/dgzfp2019/papers/Mi.4.B.3.pdf>