



Qualitätskontrolle von UD-Tapes durch Inline-Thermographie

Zerstörungsfreie Analyse von Qualitätsmerkmalen ermöglicht effiziente Herstellung thermoplastischer UD-Tape-Halbzeuge für Leichtbauanwendungen

Unidirektional verstärkte thermoplastische Tapes (UD-Tapes) revolutionieren den Leichtbau mit Faserverbundwerkstoffen durch ihre schnelle und wirtschaftliche Herstellung. Eine zuverlässige Qualitätskontrolle im Produktionsprozess ist unerlässlich, um die Leistungsfähigkeit der späteren Bauteile zu gewährleisten. Die Inline-Thermographie ermöglicht die präzise und nicht-invasive Erfassung von Qualitätsmerkmalen, während digitale Bauteilakten den gesamten Produktlebenszyklus dokumentieren.

Benjamin Tillner, Thomas Wagner

Die kontinuierliche Schmelze-Imprägnierung macht die Herstellung unidirektional verstärkter thermoplastischer Tapes (UD-Tapes)

schnell und wirtschaftlich. Mit ihren hohen gewichtsspezifischen Steifigkeiten und Festigkeiten bieten diese Materialien ein enormes Leichtbaupotenzial. Für eine zu-

verlässige Anwendung in späteren Bauteilen ist jedoch eine gründliche Qualitätskontrolle während des Herstellungsprozesses unverzichtbar. Insbesondere für struk-

turelle Bauteile gewinnen digitale Bauteilakten an Bedeutung. Diese ermöglichen es, sämtliche inneren und äußeren Einflüsse auf Material und Struktur über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu dokumentieren.

Die Integration von zerstörungsfreier Inline-Prüftechnik hat die Qualitätssicherung in der Produktentwicklung weiter vorangetrieben. Mithilfe dieser Technologie können Qualitätsmerkmale bereits im Entstehungsprozess erfasst werden. Die Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethoden wie Thermographie, Luft-Ultraschall und Röntgen-CT ermöglicht die sichere Detektion verschiedener Fehlertypen von UD-Tapes, wie beispielsweise Fasergasen, Welligkeiten und nicht-imprägnierte Faserbündel.

Versuchsaufbau der Thermographie

Für die Prüfung während des Produktionsprozesses sticht die Inline-Thermographie jedoch durch ihre besonderen Vorzüge hervor. Im Gegensatz zu optischen Methoden kann sie Fehlerarten erkennen, die mit bloßem Auge nicht sichtbar sind. Dies ist besonders bei opaken Matrixmaterialien von Vorteil. Anhand von Versuchen am Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen (IMWS) wurde die Effektivität der Inline-Thermographie bei der Qualitätskontrolle von kohlefaserverstärktem PA6-UD-Tape nachgewiesen.

In den Versuchen wurde eine UD-Tape-Forschungsanlage genutzt, die die Herstellung von UD-Tapes mit einer Breite von 50 mm ermöglicht. In diesem Versuchsaufbau wurde eine hochauflösende Thermographiekamera mit einer Auflösung von 640 x 512 Pixeln in Verbindung mit einem Infrarot-Linienstrahler eingesetzt. Der IR-Linienstrahler bewirkt eine gezielte thermische Anregung des UD-Tapes, während die Thermographiekamera den nachfolgenden Abkühlungsprozess in Echtzeit aufzeichnet. Die Aufnahmerate der Versuche betrug bis zu 100 Bilder pro Sekunde. Diese Bildsequenzen wurden durch einen speziellen Abroll-Algorithmus der gerätespezifischen Bilderfassungs- und Auswertungssoftware zu einem Gesamtbild des Tapes zusammengefügt, das als Ausgangspunkt für die weiterführende Bildanalyse diente.

Zu beachten ist, dass die Kohlefasern als Verstärkungsmaterial eine geringere

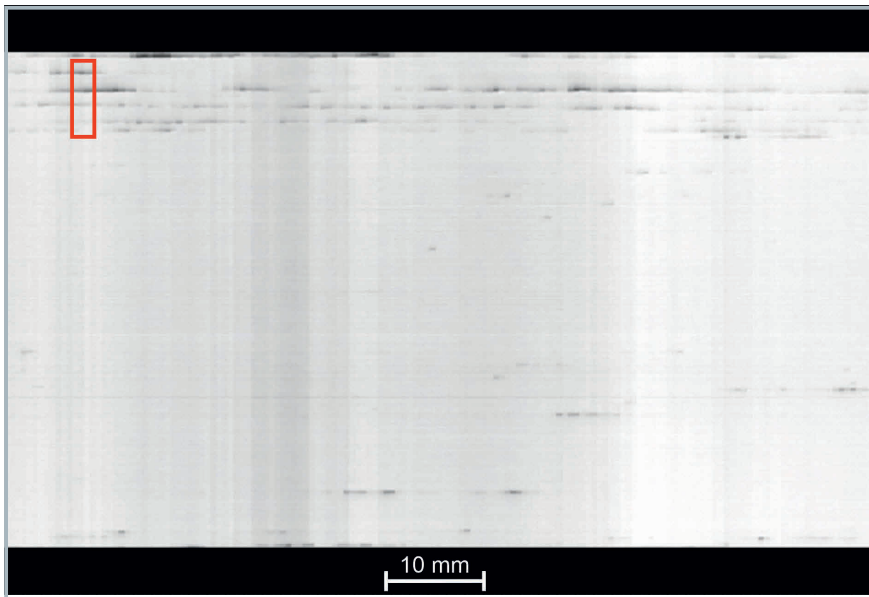


Der Transmissionsaufbau einer Inline-Thermographie. © Fraunhofer IMWS

spezifische Wärmekapazität aufweisen als das Matrixmaterial PA6. Infolgedessen sind Bereiche des Tapes zum Zeitpunkt t der Aufnahme, in denen der Faservolumengehalt niedrig ist, wärmer als Bereiche mit einem höheren Faservolumengehalt, da das Tape in den erstgenannten Bereichen bis zum Zeitpunkt t bereits stärker abgekühlt ist. In den abgerollten Thermographiebildern werden wärmere Bereiche als dunkel dargestellt, während Bereiche mit höherem Faservolumengehalt (und somit geringerer Temperatur) heller erscheinen. Diese Darstellung ist essenziell für die nachfolgende Interpretation und Analyse der Thermographiedaten.

Die Analyse in der Praxis

Nebenstehende Bildsequenz veranschaulicht das resultierende zusammengesetzte Thermographiebild für einen Tape-Abschnitt mit einer Lauflänge von 80 mm. Hierbei sind dunklere horizontale Abschnitte als potenzielle Fehlstellen im UD-Tape zu interpretieren. Zur präzisen Zuordnung dieser Bereiche zu spezifischen Fehlerklassen erfolgten nachfolgende Untersuchungen der auffälligen Regionen, »»



Bildsequenz eines Tapeabschnitts mit einer Lauflänge von 80 mm. © Fraunhofer IMWS

wobei eine Region in der Abbildung beispielhaft durch eine rote Markierung hervorgehoben wurde. Diese detaillierte Untersuchung wurde mittels Lichtmikroskopie (Limi) durchgeführt.

Die Detailansicht einer Lichtmikroskopieaufnahme der markierten Region verdeutlicht die inhomogene Faserverteilung im Querschnitt des Tapes. Die im Limi-Bild hell dargestellten Fasern wurden in diesem Bereich nicht vollständig aufgespreizt, sodass sich die Fasern nicht homogen über die Tapebreite verteilen.

Die dunklen Bereiche im Thermographiebild korrelieren mit Stellen, an denen Fasern fehlen. Sie erstrecken sich über eine gewisse Lauflänge des Tape-Halbzeugs und werden daher als Fasergassen bezeichnet. Diese Gassen werden im Prozess durch das Matrixmaterial aufgefüllt. Bei opaken Matrixmaterialien, wie sie für technische Anwendungen typischerweise zum Einsatz kommen, sind diese Fehlstellen von außen optisch nicht erkennbar. Die Thermographie liefert hier wertvolle Einblicke in die innere Morphologie des Materials, ohne dass

dieses dafür speziell dem Produktionsprozess entnommen und präpariert werden muss. Durch grundlegende Untersuchungen mit hochauflösender morphologischer Charakterisierung in Kombination mit zerstörungsfreier Thermographie-Aufnahmen im Produktionsprozess konnten spezifische Fehler und Merkmale wie strukturelle Veränderungen im Querschnitt des UD-Tape-Halbzeugs präzise identifiziert und zugeordnet werden.

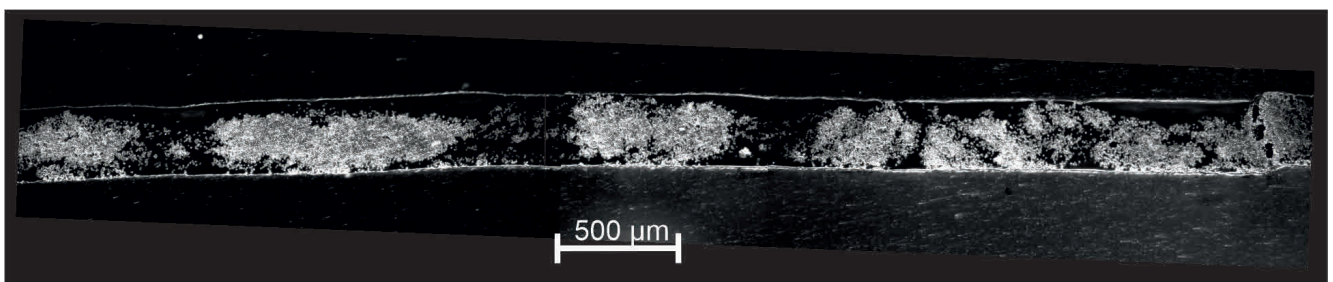
Das zusammengesetzte Thermographiebild des untersuchten Tape-Abschnitts bildet die Grundlage für die systematische Analyse von detektierten Fehlstellen, wie zum Beispiel Gassen innerhalb des abgebildeten Tapeabschnitts. Diese Analyse erfordert zunächst die Differenzierung zwischen den Gassen und den fehlerfreien Bereichen im Bild. Dafür wurde ein automatisiertes Thresholding-Verfahren aus dem auf der Open Source-Software ImageJ basierenden Plattform Fiji genutzt. Durch zusätzliche benutzerdefinierte Parameter wurde der Algorithmus an die individuellen materialspezifischen Gegebenheiten

angepasst. Nach erfolgreicher Erkennung der Gassen werden deren Anzahl, Größe und Position im Bild präzise erfasst.

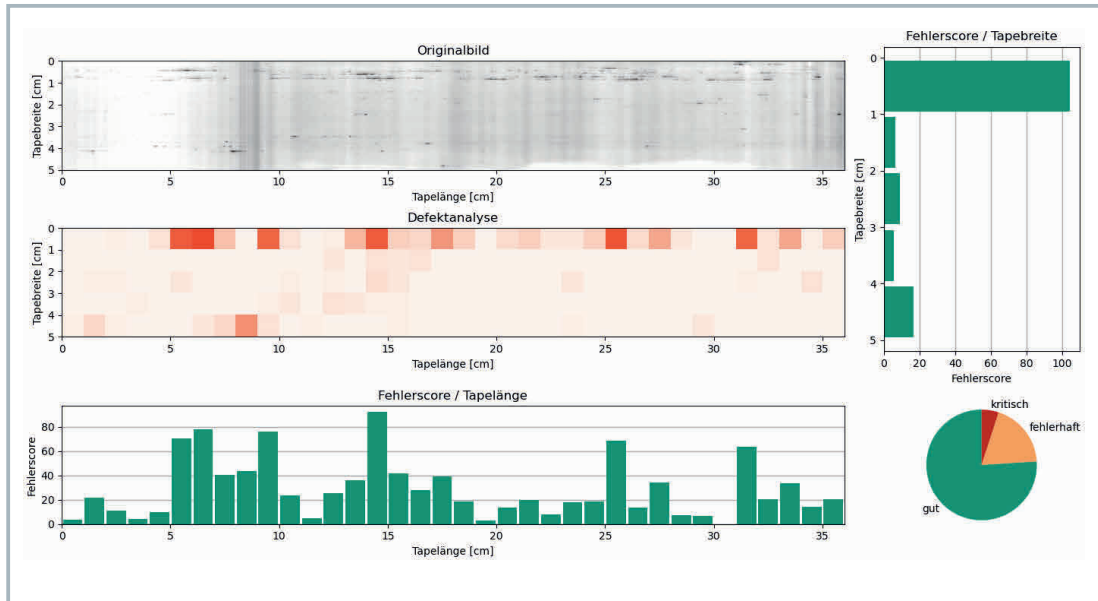
Ein speziell entwickeltes Skript nutzt diese Daten zur Berechnung eines Fehlerwertes (Fehlerscore) für den jeweiligen Tapeabschnitt. Dieser Score ist direkt mit der Anzahl der erkannten Fehler im Tape verbunden; demnach steigt der Fehlerscore mit zunehmender Fehleranzahl. Dieser Ansatz ermöglicht eine objektive Beschreibung der Tapequalität, wodurch ein Vergleich zwischen verschiedenen Abschnitten ermöglicht wird. Die Methode erlaubt nicht nur die Auswertung des gesamten Tapeabschnitts, sondern gestattet auch eine detaillierte Untersuchung kleinerer Teilbereiche. Auf diese Weise können Fehlstellen im Tape präzise bis auf den Millimeter lokalisiert werden. Darüber hinaus erfolgten die Erfassung und Analyse der Verteilung der Gassen nicht nur entlang der Längsachse in Produktionsrichtung, sondern auch über die Breite des Tapes hinweg. Im gezeigten Beispiel ist eine signifikant höhere Fehlerdichte im oberen Tapebereich erkennbar. Dieser umfassende Analyseansatz gewährleistet eine präzise Fehlererkennung und eine umfassende Charakterisierung der Qualität thermoplastischer UD-Tapes.

Ergebnisse vielversprechend

Die durch Thermographie identifizierten Fehlstellen üben einen unmittelbaren Einfluss auf die mechanischen Charakteristika des Tapes aus. Diese Korrelation wurde mit Hilfe von Zugversuchen an separaten Tapestreifen verifiziert. Hierbei wurde das untersuchte Tape längs in fünf Streifen von je 10 mm Breite unterteilt. Mithilfe der erfassten Thermographiedaten wurde eine Bewertung jeder Zugprobe durchgeführt, wodurch ein entsprechender Fehlerwert ermittelt wurde. Gemäß den Vorgaben der ISO 527-5 wurde im Zugversuch der E-Mo-



Lichtmikroskopische Aufnahme des rot markierten Tape-Bereichs mit Fasergassen im Querschnitt. © Fraunhofer IMWS



Übersicht der bildanalytischen Auswertung von Thermographie-Aufnahmen mittels Fehlerscore: Oben das zusammengesetzte Thermographiebild des untersuchten Tape-Abschnitts. Die Erfassung und Analyse der Verteilung der Gassen erfolgt nicht nur entlang der Längsachse in Produktionsrichtung (unten), sondern auch über die Breite des Tapes hinweg (rechts). © Fraunhofer IMWS

dul für jeden einzelnen Tapestreifen ermittelt. Die resultierenden E-Moduln wurden gemeinsam mit den ermittelten Fehlerscores aus der thermographischen Tapeanalyse in nebenstehender Abbildung dargestellt. Dieser integrative Ansatz ermöglichte eine präzise Untersuchung der Beziehung zwischen den thermographisch detektierten Fehlstellen und den mechanischen Eigenschaften des Tapes.

In diesem Fall korreliert die Anzahl der Fehlstellen mit dem E-Modul der Tapes im Zugversuch. Dies unterstreicht die Relevanz der präzisen Qualitätskontrolle für die langfristige Zuverlässigkeit und Leistungs-

fähigkeit von thermoplastischen UD-Tapes, insbesondere für deren Einsatz in hochbelasteten Strukturbauteilen in thermoplastbasierter Faserverbund-Leichtbauweise.

Die Kombination aus zerstörungsfreier Thermographie und mechanischer Bewertung eröffnet ein umfassendes Verständnis der Materialintegrität und ermöglicht gezielte Optimierungsmaßnahmen in der Herstellung und Verarbeitung. In weiterführenden Forschungs- und Entwicklungsprojekten verfolgt das Fraunhofer IMWS das Ziel, die Qualität von thermoplastischen UD-Tapes zu verbessern und damit die Material- und Prozesseffizienz für die

Realisierung thermoplastischer Leichtbaustrukturen deutlich zu erhöhen. ■

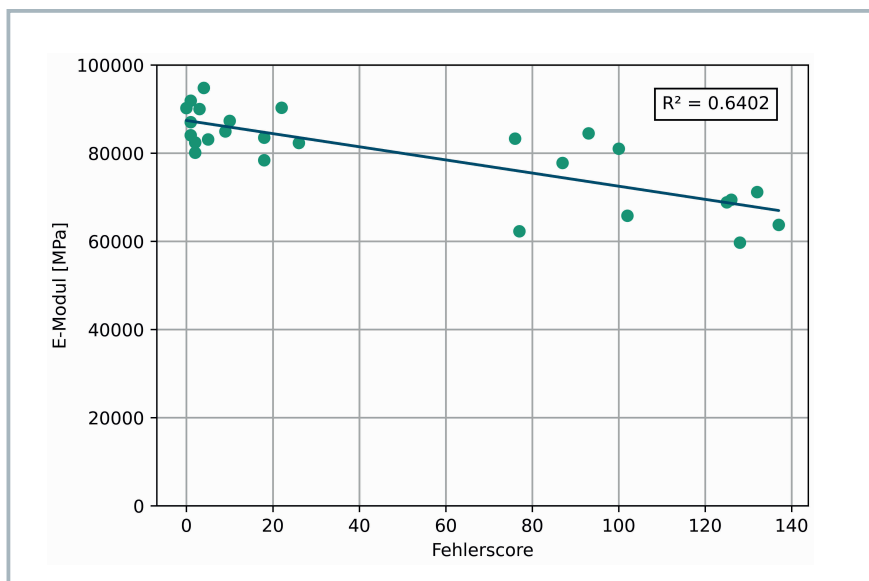


Diagramm: E-Modul in Abhängigkeit des Fehlerscores. © Fraunhofer IMWS

INFORMATION & SERVICE

FÖRDERHINWEIS

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des vom Land Sachsen-Anhalt geförderten Forschungsprojekts „QualiTape“ (Förderkennzeichen: I 193) generiert.

AUTOREN

Thomas Wagner studierte Wirtschaftsingenieurwesen an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und ist seit 2010 als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer IMWS beschäftigt. Dort ist er zuständig für die Bewertung von Faserverbundsystemen im Geschäftsfeld Polymeranwendungen des Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS in Halle.

Benjamin Tillner studierte Polymer Material Science an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg und ist seit 2015 am Fraunhofer IMWS. Er arbeitet heute in der Gruppe „Thermoplastbasierte Faserverbund-Halbzeuge“ am Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS in Schopau.

KONTAKT

Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS
www.imws.fraunhofer.de