

INLINE-PREFORMPROZESSKONTROLLE IN DER CFK-FERTIGUNG

Göttinger, M.; Weimer, C.; Eurocopter Deutschland GmbH, 81663 Ottobrunn
Miene, A.; Faserinstitut Bremen e.V., Am Biologischen Garten 2, 28359 Bremen

Zusammenfassung

Im Rahmen der Industrialisierung neuer Fertigungstechnologien zur Herstellung von CFK-Bauteilen ist die parallele Entwicklung und Qualifikation neuartiger Qualitätssicherungsmethoden von zentraler Bedeutung. Insbesondere die Handhabung von trockenen Materialien, deren Verarbeitung zu einem erheblichen Kostenvorteil gegenüber Prepregs beitragen kann, erfordert eine Fertigungskette mit engen Toleranzfeldern zur Vermeidung von Fertigungsfehlern.

Eine gesteigerte Wertschöpfung wird nur durch die Möglichkeit einer frühzeitigen Fehlererkennung erreicht. Werden Fehler inline erkannt, können diese vor weiteren Prozessschritten beseitigt oder Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Dadurch lässt sich der Ausschuss minimieren und eine entsprechende Kostenreduktion durch die Prozesskontrolle erzielen.

Derzeit ist in der Preformfertigung ausnahmslos eine manuelle und subjektive Sichtprüfung vor und nach der Verarbeitung Stand der Technik. Fehlerhafte Bereiche in einem Halbzeug oder einer Subpreform (z. B. Gaps, Faservorzugsrichtung, Fuzzballs) müssen manuell ausgesondert werden.

Der Beitrag gibt einen Überblick, welche neuen Verfahren eine objektive, automatisierte Qualitätssicherung in der Prozesskette ermöglichen. Bauteilabhängige Toleranzwerte, Materialeigenschaften und vorgegebene Prozesszeiten werden dabei berücksichtigt und geben die Anforderungen an die Messsysteme vor.

1. ANWENDUNGSBEDARF ZUR PREFORMPROZESSKONTROLLE

Unabhängig von der Vielzahl der unterschiedlichen Injektionstechnologien, die mittlerweile in der CFK-Industrie etabliert sind, nimmt die Preformfertigung eine Schlüsselfunktion ein. Um das gesamte wirtschaftliche Potential bei der Fertigung von CFK-Strukturbauteilen zu erzielen, sind prozesssichere Verfahren mit entsprechenden Qualitätssicherungsmethoden unabdingbar. Eine verbesserte Wertschöpfung einer durchgängigen Preformprozesskette wird u. a. durch die Möglichkeit einer frühzeitigen Fehlererkennung erreicht. Werden Fehler erkannt, können diese vor weiteren Prozessschritten beseitigt werden. Dadurch lässt sich der Ausschuss minimieren und eine entsprechende Kostenreduktion erzielen. Zusätzlich stellt die manuelle Sichtprüfung (derzeit Stand der Technik) einen Zeitaufwand dar, der sich mit den vorgestellten Qualitätssicherungsmethoden reduzieren lässt. Momentan ist die Herstellung von montierten Preforms (speziell mit unbefestigten, flächigen Halbzeugen) im kontinuierlichen Betrieb nur bedingt möglich. Aufgrund fehlerhafter Bereiche im Halbzeug muss ein Prozess gestoppt und das Halbzeug manuell entfernt werden. Dabei entstehen ein Rüstaufwand und ein zusätzlicher Verschnitt, der ebenfalls durch die entwickelten Qualitätssicherungsmethoden durch automatisierbare Prozesseingriffe reduziert werden kann.

Die hohen Qualitätsstandards, speziell in der Luft- und Raumfahrt, machen aufwendige NDT-Methoden (z. B. US, CT) zur abschließenden Bewertung der Bauteilgüte notwendig. Durch eine verbesserte Prozessüber-

wachung/-dokumentation und die damit mögliche Beweisführung zur Prozessbeherrschung können die zurzeit notwendigen NDT-Prozesse am fertigen CFK-Bauteil in Zukunft ggf. reduziert werden.

Letztlich können moderne CFK-Strukturbauteile auch nur so exakt auf die Gewichts- und Lastanforderungen der Endprodukte ausgelegt werden, wie es die angewendeten Fertigungsverfahren erlauben und Qualitätssicherungsmethoden in der Prozesskette belegen können.

2. ANFORDERUNGEN AN EINE PREFORMPROZESSKONTROLLE

Neben den für unterschiedliche Aufgaben notwendigen Anforderungen an Messgenauigkeit und -auflösung ist eine Reproduzierbarkeit der Messmethoden von entscheidender Bedeutung. Dabei ist bei den in dieser Arbeit vorgestellten Messmethoden die Herausforderung, entsprechende Standards und Referenzwerte für eine mögliche Kalibrierung in den jeweiligen Anwendungsfällen zu schaffen.

Derzeitige Fertigungsprozesse und Halbzeuge zur Herstellung von Preforms sind Gegenstand aktueller Forschung. Dabei sind die Fertigungsprozesse und eingesetzten Materialien vielfältig.

Dementsprechend müssen die zu entwickelnden Qualitätssicherungsmethoden grundsätzlich ein Spektrum an Materialien abdecken bzw. für die jeweilige Inline-Kontrollaufgabe optimiert werden. Ökonomisch vertretbare Messzeiten sind jeweils für eine Inline-Prüfkontrolle ebenso zu berücksichtigen.

2.1. Kontext Hubschrauber

Aufgrund der sehr guten gewichtsspezifischen Eigenschaften von CFK-Bauweisen werden bereits heute Hubschrauberstrukturen mittels dieser Werkstoffe konzipiert und gefertigt. In der Zukunft werden die Bauteilanforderungen durch erweiterte Missionen weiter steigen, sodass weitere Optimierungen notwendig sind. Derartige Optimierungen werden auf der Ausnutzung der Werkstoffanisotropie beruhen. Dies hat zur Folge, dass während der Fertigung die genaue Faserposition und die Ablagequalität reproduzierbar sein müssen.

Als zweiten wesentlichen Punkt, der die Prozessbeherrschung entlang der Fertigungskette erfordert, kann das erhöhte Fertigungsrisiko bei großen Hubschrauberzellen genannt werden. Bei derartigen Strukturen wird die Wertschöpfung vor dem abschließenden NDT-Check – nach der Aushärtung – immer größer. Folglich muss während der Fertigung die zu erwartende Bauteilqualität bekannt sein. Zudem müssen auch Gegenmaßnahmen zur Fehlerbehebung eingeleitet werden können.

Zusammenfassend sind folgende Hubschrauberanforderungen wesentlich:

- Strukturoptimierung durch Ausnutzung der Anisotropie wird durch die Nachverfolgbarkeit und Reproduzierbarkeit der Drapier- und Legeprozesse möglich.
- Große und Komplexe Bauteile mit hohem Wertschöpfungsanteil in den Legeprozessen erfordern eine gesteigerte Prozessbeherrschbarkeit.

2.2. Möglichkeiten zur Integration in eine Preformprozesskette

Bei der Herstellung von flächigen Halbzeugen zu einem Gewebe oder Gelege können Fertigungsunregelmäßigkeiten auftreten, die nach definierten Qualitätsstandards nicht weiterverarbeitet werden dürfen. Das sind z. B. Gaps oder Fuzzballs, die nur in einer bestimmten Anzahl bzw. Größe auf einer definierten Fläche vorhanden sein dürfen. Gleiches gilt für Abweichungen der Faserorientierung, die im fertigen Strukturbauteil zerstörungsfrei quasi nicht mehr zu detektieren sind. Um eine Verarbeitung unzu-lässiger Bereiche automatisch auszuschließen, sind diese vor der weiteren Verarbeitung zu kontrollieren. BILD 1 zeigt schematisch, wie beim Abwickeln eines Biaxialgeleges die Oberfläche beidseitig gescannt wird. Treten unzulässig viele Gaps auf, kann dieser Bereich vor der weiteren Prozessverarbeitung (z. B. vor dem Zuschnitt oder einer Vernähung) automatisch ausgesondert werden. Die Folgeprozesse – ausgehend von einer kontinuierlichen Prozesskette – erfordern ein Stoppen des Abwickelns. Innerhalb dieser Zeit (Messzeit $< 1 \text{ min/m}^2$) muss eine Inline-Prozesskontrolle abgeschlossen sein. Die Durchlaufzeit zur Fertigung der Preform ändert sich dabei nicht.

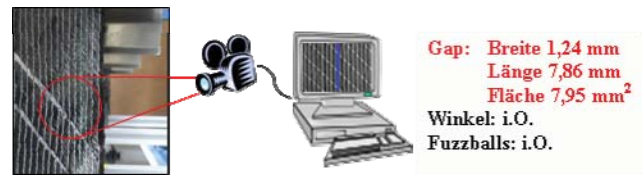


BILD 1. Prozesskontrolle beim Abwickeln eines Biaxialgeleges

Versuche zur Fertigung von Strukturbauteilen haben auch bei der Verarbeitung von trockenen Halbzeugen gezeigt, dass Zwischenkompaktierungsschritte vor der Montage von Subpreforms (Lagenpaket aus Multiaxialgelege) zum Einstellen eines optimalen Faservolumengehalts hilfreich sind. Siehe hierzu auch [1]. Diese Zwischenkompaktierung kann z. B. durch eingebrachte Kompaktierungsnähte oder Binderapplikation realisiert werden. Das Messen der eingestellten Preformdicke kann nur nach dem Prozessschritt „Kompaktieren“ inline erfolgen und verlängert die Durchlaufzeit einer Preformfertigung. Qualitätssicherungsmethoden müssen dementsprechend auf ein Maximum an Messgeschwindigkeit – ggf. durch Reduzierung der Auflösung in der Ebene – ausgelegt werden.

In der Prozessdurchführung beim Fibre Placement können schwankende Prozessparameter (Andruckkraft, Aktivierungstemperatur) und eine Breitenvarianz in den Halbzeugen unzulässige Überlappungen oder Spalten zur Folge haben. Um während der Prozessdurchführung auf Abweichungen reagieren zu können, ist eine Prozesskontrolle während der Prozessdurchführung erforderlich (schematisch in BILD 2 skizziert). Bekannte Anwendungen für trockene Fasern arbeiten mit einer Ablegegeschwindigkeit von bis zu 30 Meter/Min. Um einzelne Tows segmentieren zu können, ist bei den zurzeit verfügbaren Flächengewichten eine Auflösung in Dickenrichtung (Z-Richtung) von mindestens 0,01 mm und in der Ebene von mindestens 0,1 mm notwendig.



BILD 2. Prozesskontrolle beim Fibre Placement

3. FORSCHUNGSINHALT

Die Grundlagen dieser Arbeit sind im Forschungsvorhaben ProCFK/PROSA entstanden, bei dem eine Fehlerhäufigkeits- und Ursachenanalyse durchgeführt worden ist. Auf dieser Basis erfolgten im Projekt die Bestimmung von Fehlerindikatoren sowie die Erarbeitung erster Messkonzepte. Als häufige und bauteilkritische Fehler wurden in der Preformfertigung **Faserwinkelabweichungen**, **Gaps** und **Dickenabweichungen** bestimmt. Details zu den Ergebnissen des Projekts sind in [1] zu finden.

Diese gewonnenen Erkenntnisse, speziell zur Entwicklung von Messkonzepten, werden im aktuellen Projekt LOKOST/PROBEC weiterentwickelt. Dabei liegt der

Schwerpunkt auf der Optimierung der Messmethoden (hinsichtlich Reproduzierbarkeit und Performance) sowie Anwendbarkeit auf komplexe Strukturen. Dieser Beitrag gibt einen Zwischenstand einiger Ergebnisse aus dem Projekt LOKOST/PROBEC aus dem Arbeitspaket zur Preformqualitätssicherung wieder. Die Auswahl der Ergebnisse ist reduziert auf wesentliche Aspekte der Bildanalyse. Auf untersuchte Aufnahmestrategien (z. B. Beleuchtung) zur Bildaufnahme an komplex gekrümmten Strukturen wird nicht eingegangen. BILD 3 und BILD 4 zeigen exemplarisch die Relevanz der Faserorientierung im Raum bei der Aufnahme einer Oberflächentopologie an komplex gekrümmten Strukturen. Dabei ist deutlich an der dreidimensionalen Darstellung der Messdaten zu erkennen, dass bei einer bestimmten Messanordnung (siehe BILD 4) die Fehlmessungen überwiegen.

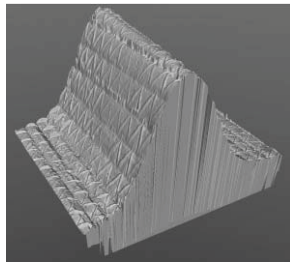
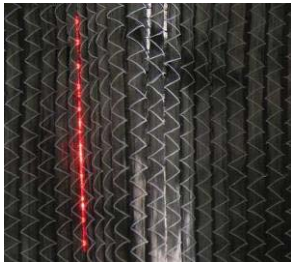


BILD 3. Struktur mit konvexer Krümmung, Messrichtung quer

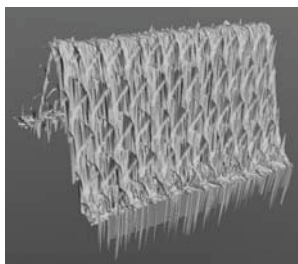
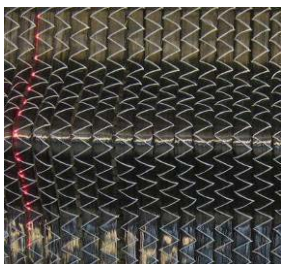


BILD 4. Struktur mit konvexer Krümmung, Messrichtung längs

Auch im neu gestarteten Projekt FACT/ViTech (siehe Kapitel 4) und dem EU-Projekt IMac-Pro werden ergänzende Arbeiten durchgeführt. Dabei hat sich die Zusammenarbeit zwischen dem Faserinstitut Bremen und Eurocopter Deutschland kontinuierlich weiterentwickelt. In den Projekten werden entwickelte Messstrategien und Prinzipversuche in industriereife Lösungen einschließlich Eignung umgesetzt.

3.1. Messen von Faserwinkelabweichungen

Die Messung der Faserorientierung erfolgt basierend auf Grauwertbildern der Oberfläche, die unter diffuser Beleuchtung aufgenommen werden. So lassen sich störende Reflexionen vermeiden.

Sind auf der Oberfläche Gelege- oder Preformnähte zu sehen, müssen die betroffenen Bildpunkte aus der Analyse ausgeschlossen werden, da ihre abweichende Orientierung das Ergebnis verfälschen kann. Die Nähfäden aus Polyester erscheinen stets heller als die darunter liegenden Kohlenstofffasern.

Die Segmentierung der Nähfäden erfolgt unter Verwendung einer adaptiven lokalen Schwellwertbinarisierung. Dieses Verfahren ist robust gegenüber lokalen Helligkeitsschwankungen im Bild, die sich bei gekrümmten Oberflä-

chen selbst unter diffuser Beleuchtung nicht völlig vermeiden lassen.

Das Bild wird in lokale Teilbilder gerastert. Die Texturrichtung wird unter Verwendung eines isotropen Gradientenfilters [9] in jedem relevanten Bildpunkt berechnet.

Für jedes Teilbild wird mithilfe von Texturrichtungshistogrammen die häufigste Texturorientierung bestimmt, die der Faserorientierung in diesem Bildbereich entspricht. Um die Robustheit des Verfahrens zu gewährleisten, werden zwei Qualitätskriterien berechnet, mit deren Hilfe die Güte bzw. der Inhalt der Bilddaten im Teilbild bewertet werden kann. Ist eine geforderte Mindestqualität nicht zu erreichen, wird keine Faserorientierung für das betroffene Teilbild berechnet. Das erste Kriterium misst den prozentualen Anteil gültiger Kantenpunkte, die in die Berechnung einfließen. Dieser Anteil kann reduziert sein, wenn das Bild unscharf bzw. schlecht ausgeleuchtet oder am Rande eines Bauteils der Hintergrund zu sehen ist. Das zweite Kriterium misst die Varianz des Texturrichtungshistogramms. Ist sie erhöht, kann die Faserorientierung nicht eindeutig aus dem Histogramm abgeleitet werden, da es z. B. mehrere lokale Maxima aufweist. Dies kann darauf hindeuten, dass sich ein Fremdkörper auf der Oberfläche befindet. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich in [8].

Das Verfahren lässt sich auf Gewebe übertragen, indem zur Bestimmung der zweiten Faserorientierung des Gewebes ein zweites lokales Maximum im Texturrichtungshistogramm bestimmt und ausgewertet wird.

Das Messergebnis ist eine Matrix, die pro Teilbild höchstens zwei Winkel enthält. Zur Bewertung der Faserorientierung sind die gemessenen Winkel mit der Sollorientierung zu vergleichen. Hierzu eignet sich entweder ein globaler Sollwinkel oder eine Matrix mit lokalen Sollwinkeln. Die gemessenen Winkel werden mit den Sollwerten verglichen, wobei auch eine Bewertung der Abweichung anhand von zwei Toleranzen erfolgt. Das Ergebnis ist eine Klassifizierung als gut (grün), fragwürdig (gelb) oder fehlerhaft (rot; vgl. BILD 5).

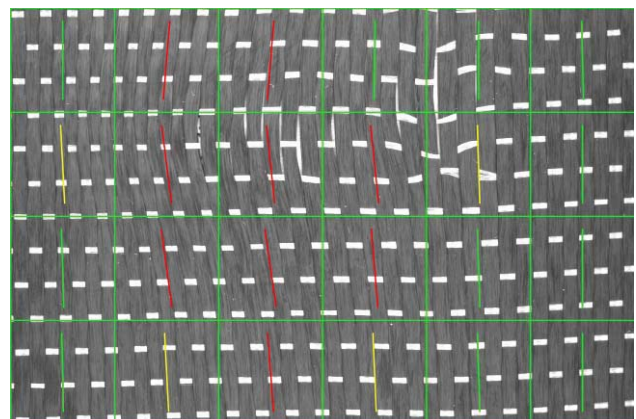


BILD 5. Ergebnis der Faserorientierungsmessung

3.2. Messen von Gaps

Als Gaps bezeichnete Fehler entstehen, wenn sich Rovings einer Faserlage verschoben haben oder diese fehlen. An diesen Stellen sind die Fasern der darunter liegenden Lage sichtbar. Unter diffuser Beleuchtung können Gaps daher anhand der Faserorientierung erkannt

werden, sofern sich die Orientierung der oberen und der darunter liegenden Faserlage mindestens um 30° unterscheidet. Die Orientierung der oberen Faserlage kann wie in Abschnitt 3.1 beschrieben berechnet werden, die der darunter liegenden Lage muss relativ zur oberen Lage vorgegeben werden.

Häufig entspricht die Orientierung der Nähfäden der Orientierung der unteren Faserlage, was zu einer Fehlklassifikation von Nähfäden als Gaps führt. Wie bei der Messung der Faserorientierung müssen daher die Nähfäden von der Analyse ausgeschlossen werden (vgl. Abschnitt 3.1).

Für die nach Ausgrenzung der Nähfäden verbliebenen Bildpunkte wird die Texturorientierung berechnet. Für jeden Bildpunkt kann nun aufgrund der Differenz zwischen seiner Texturorientierung und der Orientierung der beiden Faserlagen eine Wahrscheinlichkeit berechnet werden, mit der er im Bereich eines Gaps liegt. Diese Wahrscheinlichkeit liegt zwischen 0 (die Texturorientierung des Punkts entspricht der Faserorientierung der oberen Faserlage) und 100 (die Texturorientierung des Punkts entspricht der Faserorientierung der darunter liegenden Faserlage). Nachdem Ausreißer mithilfe eines Medianfilters entfernt wurden, werden die fehlenden Werte an den Stellen, an denen sich die Nähfäden befinden, mit Werten aus einer passend gewählten lokalen Nachbarschaft aufgefüllt. Nachdem die Werte erneut in Richtung der Faserorientierung der oberen Faserlage geglättet wurden, können die Gaps mittels eines Bereichswachstumsverfahrens segmentiert werden. Häufig zerfallen lange Gaps in mehrere Regionen, weil einzelne Fasern oder gespaltene Rovings der oberen Faserlage den Gap überspannen. Daher ist es sinnvoll, Regionen bis zu einem vorzugebenden maximalen Abstand in mm miteinander zu verschmelzen. Die Verschmelzung findet nur entlang der Faserorientierung der oberen Lage statt. Durch morphologische Schließen mit einem linienförmigen, in Faserrichtung orientierten strukturierenden Element, dessen Länge dem Abstand zum Verschmelzen entspricht, werden die Regionen miteinander verbunden. Nach einer weiteren Aufbereitung der Regionen mittels morphologischer Operationen ist die Segmentierung der Gaps abgeschlossen. Ein Beispiel für eine Gaperkennung ohne Verschmelzen zeigt BILD 6. Drei der vier einzelnen Gaps gehören tatsächlich zu einem langen Gap. BILD 7 zeigt dieselbe Oberfläche nach Verschmelzen der Gapregionen. Die Verschmelzung erfasst nur die in Faserrichtung nebeneinander liegenden Regionen. Der zweite kleine Gap (im Bild links) bleibt separat.

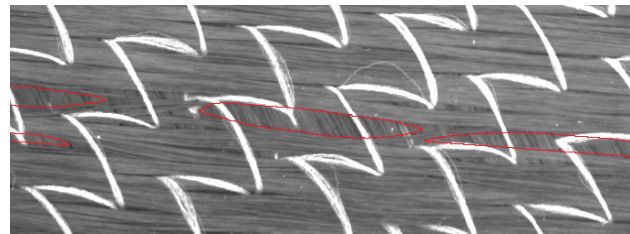


BILD 6. Ergebnis der Gaperkennung ohne Verschmelzung

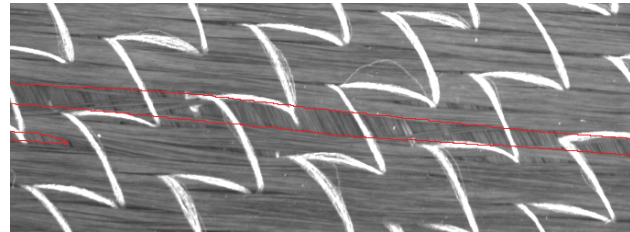


BILD 7. Ergebnis der Gaperkennung mit Verschmelzung

Die Gaps werden bezüglich Länge, Breite und Flächeninhalt vermessen. Gaps, welche die erlaubten Toleranzen für mindestens eines dieser Kriterien überschreiten, werden als Oberflächenfehler klassifiziert.

3.3. Messen der Oberflächentopologie

Trockene Kohlenstofffasern haben besondere Reflexionseigenschaften, die eine Vermessung mit optischen Sensoren erschweren. Daher wurden zunächst verschiedene Sensoren bzw. Verfahren zur Erfassung der Oberflächentopologie evaluiert:

- Streifenprojektion [4]
- Streifenreflexion [5]
- Fokusvariation [1], [7]
- Lasertriangulation [6]

Die Streifenprojektion hat sich aufgrund der Reflexionseigenschaften des Materials als nicht anwendbar erwiesen. Die anderen drei Verfahren sind prinzipiell anwendbar. Die Messungen mittels Fokusvariation wurden mit dem Messgerät InfiniteFocus der Firma Alicona durchgeführt [1]. Die größte verfügbare Auflösung der Fokusvariation in der Ebene beträgt hierbei 0,005 mm, womit sie sich bereits im Bereich der Rauheitsmessung bewegt. Die Ergebnisse lassen sogar Gaps erkennen, jedoch ist diese Form der Messung mit einem Zeitaufwand von mindestens 9 Stunden pro Quadratmeter wegen der Größe der zu vermessenden Oberflächen zum gegenwärtigen Stand der Technik nicht anwendbar. Sowohl mit der Streifenreflexion [5] als auch mit der Lasertriangulation lassen sich Höhenprofile in der geforderten Auflösung und Genauigkeit erfassen. Wegen der geringeren Kosten und der einfacheren Handhabung fiel die Wahl auf den Laser-liniensensor LJ-G 200 der Firma Keyence [6]. Der Sensor hat einen Messbereich von ± 48 mm bei einem Arbeitsabstand von 200 mm. Bei einem idealen Arbeitsabstand von 200 mm hat die Laserlinie eine Breite von 62 mm. Mit jeder Messung wird eine 62 mm breite Linie gemessen. Die Auflösung in der Ebene entspricht mit einem Abstand der Messpunkte von 0,1 mm entlang der Laserlinie den Anforderungen.

Die maximale Messfrequenz beträgt 60 Profile/sek., sodass der Sensor mit einer Geschwindigkeit von 6 mm/sek. bewegt wird, um auch in dieser Richtung einen Abstand von 0,1 mm zwischen den Messwerten zu erreichen. Der Zeitbedarf für die Vermessung einer Fläche von 1000 x 120 mm beträgt ca. 5,5 Minuten.

Die Messung des Höhenprofils einer Oberfläche resultiert in einer zweidimensionalen Matrix von z-Werten, auf der die weitere Auswertung und Interpretation stattfindet. BILD 1 zeigt eine Oberfläche mit aufprojizierter Laserlinie, BILD 2 bis BILD 5 zeigt die verschiedenen Visualisierungen der an dieser Oberfläche gemessenen Daten und ihrer Bewertung. BILD 2 zeigt eine Visualisierung der Höhendaten mithilfe von Falschfarben. Da es gelegentlich zu Ausreißern im Höhenprofil kommt, z. B. aufgrund von aufragenden Fasern oder Nähfäden, wurden die Daten zunächst durch Anwendung eines Medianfilters – gefolgt von einem Mittelwertfilter – leicht geglättet. Standardmäßig liefert der Sensor die z-Werte mit einer Auflösung von 1 µm. Diese Auflösung kann optional verringert werden. Aufgrund der Materialeigenschaften gibt es Messstellen, an denen kein gültiger Höhenwert gemessen werden kann. Dies erkennt der Sensor automatisch und setzt die Messung aus. Die betroffenen Stellen werden in den Bildern schwarz dargestellt. Das Intervall der relevanten Höhenwerte kann durch Vorgabe eines minimalen und maximalen Höhenwerts beschränkt werden. Höhenwerte, die außerhalb dieses Bereichs liegen, werden bei der weiteren Interpretation der Daten nicht berücksichtigt und in den Bildern weiß dargestellt.



BILD 1. Ansicht der vermessenen Oberfläche

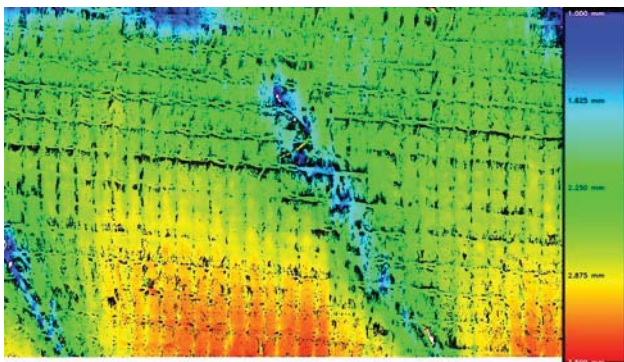


BILD 2. Höhenprofil in Falschfarbendarstellung, Auflösung in der Ebene 0,1 mm

Der nächste Schritt besteht in einer Reduktion der Auflösung in der Ebene. Von der feinen Auflösung von 0,1 mm wird abstrahiert, indem ein Raster über die Matrix gelegt wird, dessen Feinheit einstellbar ist. Für jede Rasterzelle werden die Höhenwerte durch Bildung des Mittelwerts zu einem Wert zusammengefasst. BILD 3 zeigt eine Rasterung auf 1x2 mm, d. h. pro Rasterzelle wurden 10 x 10 = 100 Messwerte zu einem Wert zusammengefasst. Rasterzellen, deren prozentualer Anteil gültiger Messwerte eine einstellbare Grenze unterschreitet, werden schwarz dargestellt.

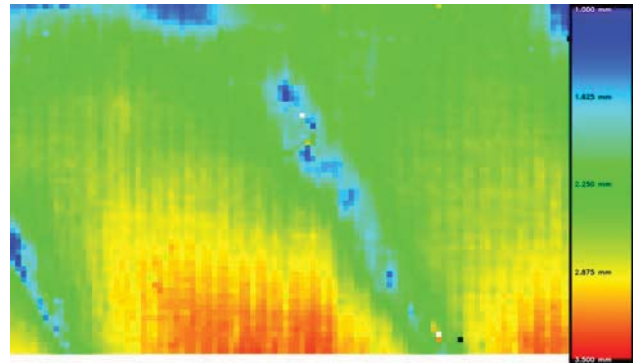


BILD 3. Auf 1x1 mm gerastertes Höhenprofil

Zur Interpretation der Höhendaten werden die Sollwerte wahlweise mit einem einzelnen globalen Schwellwert verglichen oder mit einer Matrix lokaler Schwellwerte pro Rasterzelle. Eine solche Matrix wird durch die Messung eines Bauteils mit einer idealen Oberflächentopologie sowie dem anschließenden Speichern der Werte als Sollwertmatrix erreicht. Die Abweichungen vom Sollwert werden ebenfalls als Falschfarbendarstellung visualisiert. Abweichungen nach unten erscheinen blau, Abweichungen nach oben rot (BILD 4).

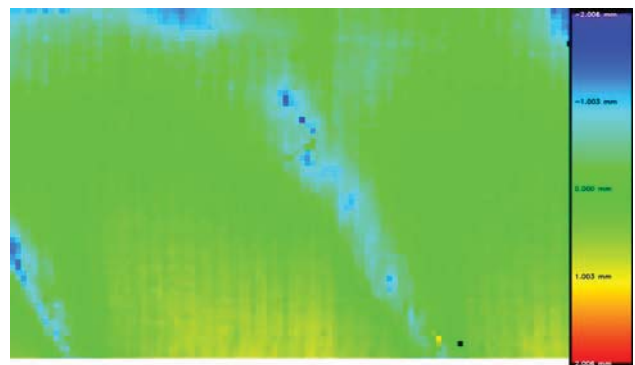


BILD 4. Abweichung der Höhenwerte von einem globalen Sollwert in Falschfarbendarstellung

Zwei einstellbare Toleranzen erlauben die Bewertung der Abweichungen von den Sollwerten. Abweichungen werden innerhalb der ersten Toleranz grün, innerhalb der zweiten Toleranz gelb und bei Überschreitung der zweiten Toleranz rot dargestellt (BILD 5).

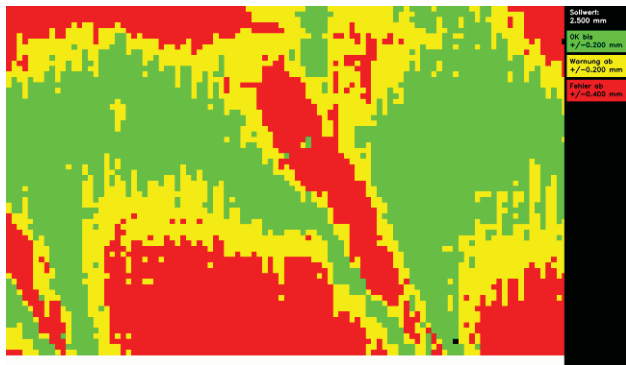


BILD 5. Bewertung der Abweichungen vom Sollwert; grün bis $\pm 0,2$ mm, gelb bis $\pm 0,4$ mm, darüber rot

4. AUSBLICK

4.1. Möglichkeiten zur Erhöhung der Performance

Bei der Auswertung der Grauwertbilder beträgt die Auflösung der Bilder ca. 20 Bildpunkte/mm. Bei der Vermessung großer Flächen fallen entsprechend hohe Datenmengen an, die effizient zu verarbeiten sind. Die Algorithmen werden daher nicht nur in Bezug auf die ständige Verbesserung der Ergebnisse weiterentwickelt, sondern auch hinsichtlich maximaler Effizienz. Eine Beschleunigung der Analyse durch Reduktion der Auflösung ist möglich, reduziert aber zugleich die Feinheit der Ergebnisse. Sehr schmale Gaps können beispielsweise nicht mehr erkannt werden. Daher muss eine Herabsetzung der Auflösung mit den Grenzwerten für die Größe der zu erkennenden Fehler in Einklang stehen. Da die Geschwindigkeit, mit der die Grauwertbilder erfasst werden, hier kein beschränkender Faktor ist, kommt auch eine verteilte Verarbeitung der Einzelbilder in einem PC-Cluster infrage, bei der die Ergebnisse zum Schluss wieder zusammengeführt werden.

Bei der Messung der Oberflächentopologie ist die Auflösung mit 10 Messpunkten/mm geringer und die Algorithmen zur Auswertung sind weniger aufwändig. Der beschränkende Faktor ist hier die Messfrequenz des Laserliniensensors, der bei der vorgegebenen Auflösung keine höheren Verfahrensgeschwindigkeiten erlaubt. Eine Verkürzung der Messzeit ist hier nur durch eine Reduktion der Auflösung oder durch parallele Messungen mit mehreren Sensoren möglich.

4.2. Implementierung eines 3D-Messkopfes in eine Roboterzelle

Die in Kapitel 3.3 vorgestellten Ergebnisse wurden auf Basis von Messversuchen im Labormaßstab durchgeführt. BILD 6 zeigt den Versuchsaufbau zur Vermessung der Oberflächentopologie. Um ganze Preforms im Raum messen zu können, wird im Rahmen vom Projekt LOKOST/PROBEC eine Implementierung der Laborlösung in eine Roboterzelle umgesetzt. Diese Integration wird zur weiteren Bestimmung von Prozess- und Messparametern genutzt.

Somit ist eine Evaluierung von erzielbaren Messgeschwindigkeiten in einer industriereifen Lösung möglich.

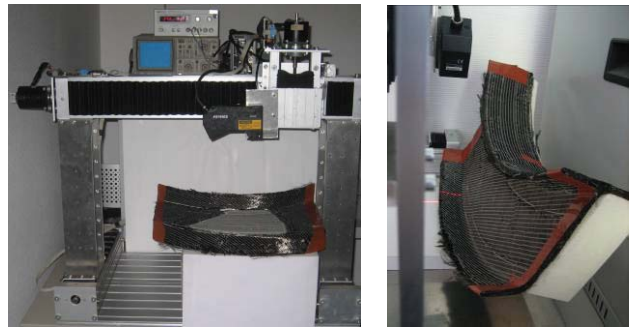


BILD 6. Laboraufbau zur Aufnahme der Oberflächentopologie

Die Implementierung in die Roboterzelle soll auch für das Projekt FACT/ViTech eine Rolle spielen. Über die Koordinaten im Raum können die lokalen Messergebnisse zu einer Landkarte zusammengesetzt werden. Weiterhin lässt sich die Höheninformation nutzen, um Bildaufnahmen von gekrümmten Strukturen zu entzerren. Sind diese Bilder entzerrt, ist es denkbar, die beschriebenen Algorithmen aus Abschnitt 3.1 und 3.2 für diese Bereiche anzuwenden. Damit wäre eine Quantifizierung von Faserwinkeln und Gaps in stark gekrümmten Bereichen möglich.

4.3. EUROPAS

Im Rahmen von LOKOST/PROBEC ist auch die Software EuroPAS (Eurocopter Preform Analysis System) entstanden (siehe BILD 7). Die Software entspricht einer durchgängigen Benutzeroberfläche zum Parametrieren und Auswerten aller Analyseverfahren. Dabei lassen sich z. B. Auflösung, Glättungsfilter und Messtoleranzen auf die jeweilige Messaufgabe zur Prozesskontrolle einstellen und testen.

Neben der Inline-Prozesskontrolle gibt es einen Anwendungsbedarf zur Validierung von Drapiersimulationssystemen. Erst ein Abgleich mit realen Messergebnissen ermöglicht das „Einstellen“ von Methoden zur Simulation für verschiedene Materialien. Die Integration einer Schnittstelle zu einer Simulationsumgebung ist Teil des Projekts FACT/ViTech.

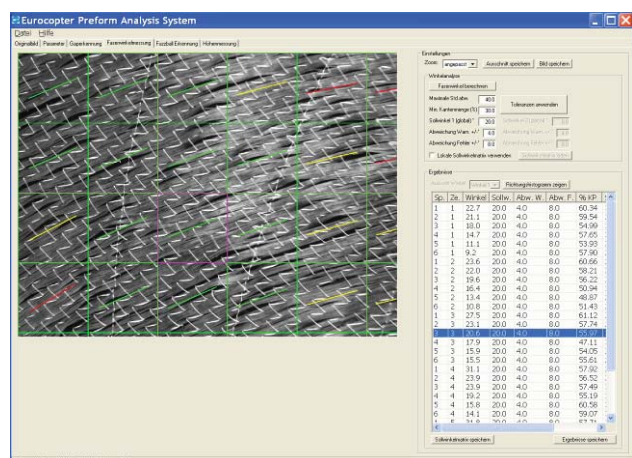


BILD 7. Software EuroPAS

5. DANKSAGUNG

Die diesem Bericht zugrunde liegenden FE-Vorhaben LOKOST/PROBEC (Förderkennzeichen: 20W0605G) und FACT/ViTech (Förderkennzeichen: 20W0804H) sind gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Die Bildverarbeitungsalgorithmen wurden unter Verwendung der Intel® Open Source Computer Vision Library implementiert [10].

6. LITERATUR

- [1] Stadtfeld, H.: Entwicklung einer Messzelle zur Bestimmung von Kompaktierungs- und Permeabilitätskennwerten bei flächigen Faserhalbzeugen, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Kaiserslautern, 2006, S. 27 ff.
- [2] Weimer, C.; Miene, A.; Landuyt, E.; Kranjenski, V.; Köhnke, B.; Stadler, F.; Preussler, S.; Göttinger, M.; Bischoff, T.: Prozessbegleitende Schadensanalyse (PROSA) - Ein wesentlicher Baustein für die kosteneffiziente Fertigung und Analyse von CFK-Strukturen. DGLR Tagung, Friedrichshafen, 2006.
- [3] Stefan Scherer. Fokus-Variation zur optischen 3-D-Messung im Mikro- und Nanobereich. In: Norbert Bauer (Hrsg.). Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung. Qualitätssicherung in der Praxis. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2007, S. 203 ff.
- [4] P. Kühmstedt, G. Notni. Mehrbild 3-D Messsysteme. In: Norbert Bauer (Hrsg.). Handbuch zur Industriellen Bildverarbeitung. Qualitätssicherung in der Praxis. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2007, S. 240 ff.
- [5] Klattenhoff, R., Bothe, T., Gesierich, A., Li, W., Kopylow, C., Jüptner, W., Flexibles Streifenreflexionssystem zur topologischen Prüfung der Flugzeugaußenhaut und anderer glänzender Oberflächen, Tagungsband der Oldenburger 3D-Tage, in "Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik", Hrsg. T. Luhmann, Wichmann Verlag, Augsburg, Februar 2006.
- [6] Keyence: Blitzschnelle Messung von Höhe und Breite. Hochpräzise 2D-Wegmesssensoren Modellreihe LJ-G (als Download über www.keyence.de verfügbar).
- [7] Tobias Dierig. Gewinnung von Tiefenkarten aus Fokusserien. Dissertation. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 2002.
- [8] Miene, A.; Herrmann, A. S.; Göttinger, M.: Quality assurance by digital image analysis for the preforming and draping process of dry carbon fibre material. SAMPE Europe Conference, Paris, April 1-3, 2008.
- [9] Scharr, H: Optimal Filters for Extended Optical Flow. In: Complex Motion, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 3417, Springer, (2007).
- [10] G. Bradsky, A. Kaehler. Software that sees. Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library. O'Reilly, 2008.