

Prüfung von Blattfedern aus Faserverbundwerkstoff mittels Millimeterwellen

Christoph SKLARCZYK, Valerie MELEV, Sergey LUGIN,
Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren, Saarbrücken

Kurzfassung. In Blattfedern aus glasfaserverstärkten Kunststoff können oberflächennah fehlerhafte Faserverteilungen auftreten, die die Lebensdauer herabsetzen können. Mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen im Millimeterbereich ist es möglich, diese kritischen Bereiche zerstörungsfrei und berührungslos mittels eines scannenden Verfahrens abzubilden und mit Hilfe einer speziellen Software automatisch zu charakterisieren. Die erwünschte Eindringtiefe der Millimeterwellen sowie die laterale Auflösung der Methode können durch eine Optimierung der Antenne eingestellt werden.

Problemstellung

In Blattfedern aus faserverstärktem Kunststoff (Abb. 1) können im Bereich der größten mechanischen Belastung irreguläre Faserverteilungen (Faserwirbel, Ondulationen) auftreten, die die Lebensdauer der Feder herabsetzen können. Es wird daher eine Methode gesucht, die es erlaubt, die Faserverteilung insbesondere an den vier stärker belasteten, kritischen Stellen nahe den Enden der Blattfeder berührungslos und zerstörungsfrei bei der Herstellung zu untersuchen und hinsichtlich Fehler automatisch zu bewerten. Da die obersten ein bis zwei Faserlagen entscheidend für die Lebensdauer sind, soll die Prüfmethode nur eine Eindringtiefe von ca. 1 mm aufweisen. Die optische Methode scheidet daher aus, da sie eine Eindringtiefe von mehreren mm aufweist. Zudem kann die Schutzfolie (grün in Abb. 1) die optische Untersuchung beeinträchtigen. Um die vier kritischen Bereiche zu untersuchen, steht pro Blattfeder ca. eine Minute zur Verfügung.



Abb. 1: Blattfeder aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)

Lösungsweg

Prüfverfahren auf der Basis von Mikrowellen oder Millimeterwellen eignen sich prinzipiell, da sie berührungslos arbeiten können. Die benötigten abgestrahlten Leistungen sind gering,

so dass keine Erwärmung und sonstige Veränderung der Probe erfolgt. Eine schnelle Prüfung ist machbar, da sich die elektromagnetischen Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Die Millimeterwellen-Messgrößen sind empfindlich gegenüber Dichteschwankungen, Anisotropien und Defekten, so dass diese über Änderungen der Messgrößen detektiert werden können. Bei entsprechender Kalibrierung sind auch Aussagen über Absolutwerte möglich. Eine Bildgebung ist durch eine ein- bis dreidimensionale Abrasterung (Scan) des Objekts möglich.

Messaufbau

Bislang war die Mikrowellentechnik im Bereich der ZFP meistens aufwändig und teuer und daher nur wenig verbreitet. Mit der Entwicklung der MMIC's (**monolithic millimeterwave integrated circuit**), d.h. hochintegrierter Chips, die alle Hochfrequenzbauelemente auf einem oder einigen wenigen Chips vereinigen, kann sich diese Situation ändern, da die MMIC's je nach Stückzahl deutlich preisgünstiger sein können als herkömmliche Millimeterwellenkomponenten. Das IZFP hat ein vielseitig einsetzbares Mess- und Prüfsystem auf der Basis eines im Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (IAF), Freiburg, entwickelten 94 GHz-frequenzmodulierten Dauerstrich-Radar-Moduls (FMCW-Radar, **F**requency **M**odulated **C**ontinuous **W**aves) aufgebaut (Abb. 2). Die Anschlüsse des FMCW-Moduls sind niederfrequent, so dass die Messungen mit herkömmlicher preisgünstiger Elektronik durchgeführt werden können. Mit diesem Messsystem ist es möglich, Flächen-Rasterscans an relativ ebenen Flächen der Blattfeder durchzuführen.

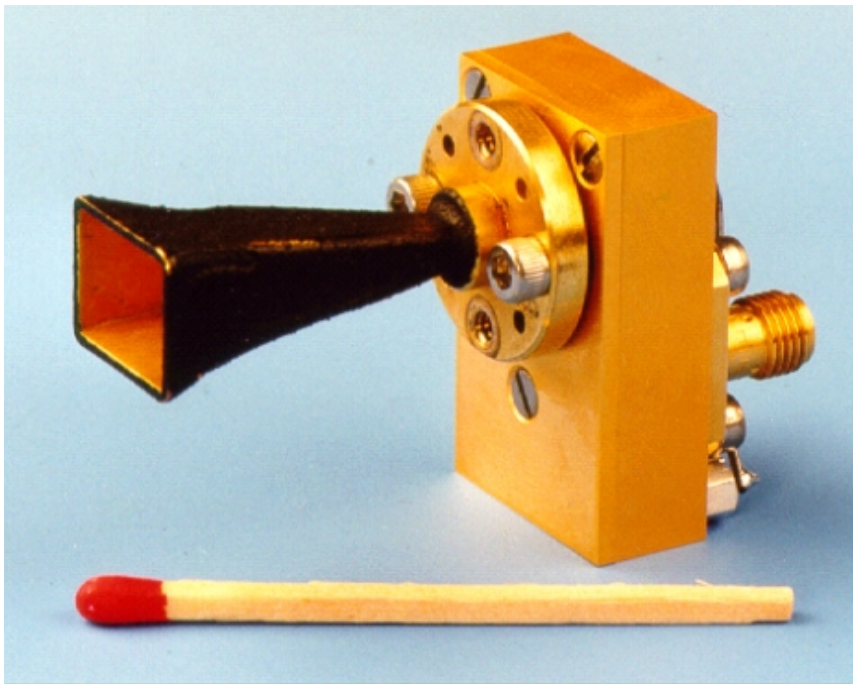


Abb. 2: Hochintegriertes 94 GHz-FMCW-Radar-Modul (Foto: Fraunhofer IAF)

Durch die Gestaltung der Antenne kann die vom Radarstrahl im Nahbereich erfasste Fläche und Tiefe im Objekt in weiten Grenzen variiert werden. Mit kleiner werdender Antennenapertur wird die laterale Auflösung besser, und die Eindringtiefe in das Objekt verringert sich. Die Nahfeldeffekte können genutzt werden, um laterale Auflösungen zu erreichen, die wesentlich kleiner als eine Wellenlänge sind. Jedoch ist dann für Linien- oder Flächenscans auch eine kleinere Schrittweite nötig. Um die hohe laterale Auflösung zu er-

reichen, muss auch der Abstand zwischen Antenne und Objekt klein sein (mm- und sub-mm-Bereich).

Messergebnisse

1. *Abbildung der Faserverteilung*

Der Vergleich eines lichtoptisch gewonnenen Bildes eines Faserwirbels mit einem Millimeterwellen-Flächenscan zeigt, dass der Faserwirbel auch im Millimeterwellenbild, das mit einer Hornantenne mit sehr kurzem Horn aufgenommen wurde, deutlich zu erkennen ist (Abb. 3).

2. *Eindringtiefe der Millimeterwellen*

Um die Eindringtiefe der Millimeterwellen in das Prüfobjekt für verschiedene Antennentypen zu bestimmen, wurden in eine GFK-Probe Bohrungen in unterschiedlichen Tiefenlagen eingebracht und Flächenscans durchgeführt (Durchmesser der Bohrungen 1 bis 4 mm). Mit abnehmender Apertur der Antenne verringert sich die Eindringtiefe. Während mit einer Normalhorn-Antenne (Apertur ca. $24 \times 18 \text{ mm}^2$) bei einer Probendicke von 30 mm alle Bohrungen sichtbar sind (Abb. 4), obgleich sie aufgrund der relativ großen Antennenapertur unscharf abgebildet werden, findet man bei einem Scan mit einem offenen Hohlleiter (Apertur ca. $2,4 \times 1,3 \text{ mm}^2$, dies entspricht dem inneren Querschnitt des Rechteck-Hohlleiters) nur noch Anzeigen der Bohrungen in den obersten Lagen (bis ca. 7 mm Tiefe).

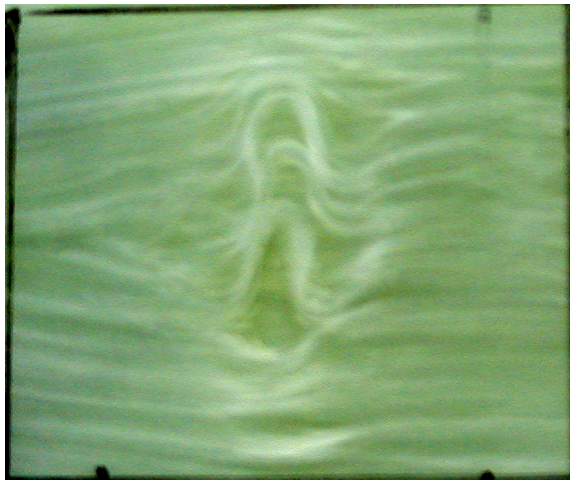


Abb. 3a: Lichtoptisches Bild eines Faserwirbels

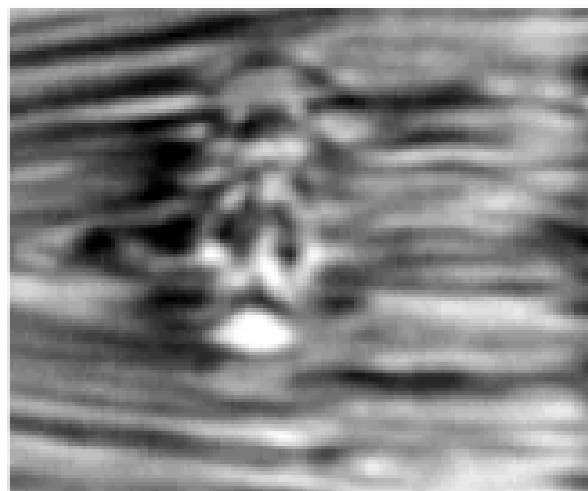


Abb. 3b: Millimeterwellenbild derselben Stelle, Scanfläche $60 \times 50 \text{ mm}^2$

Eine weitere Verringerung der Apertur und somit der Eindringtiefe ist durch eine teilweise Abdeckung der Apertur möglich, z.B. durch ein mit einem Schlitz versehenes metallisches Plättchen, das den größten Teil der Apertur des offenen Hohlleiters abdeckt. Eine Bohrung in 4 mm Tiefe ist bei Verwendung einer solchen Abdeckung nur noch schwach erkennbar (Abb. 5). Die Größe des Schlitzes bestimmt die Eindringtiefe. Mit kleiner werdendem Schlitz muss der Abstand zwischen Objekt und Antenne weiter verringert werden (auf unter 1 mm), da die durch den Schlitz gelangende Millimeterwellenleistung ebenfalls deutlich abnimmt. Zur Einstellung einer definierten Eindringtiefe sollte eine dreidimensional arbeitende Simulations-Software eingesetzt werden, mit der die optimale Form

des Schlitzes, die Form des elektrischen Feldes im Objekt und somit die Eindringtiefe und der Objekt-Antenne-Abstand ermittelt werden können [1].

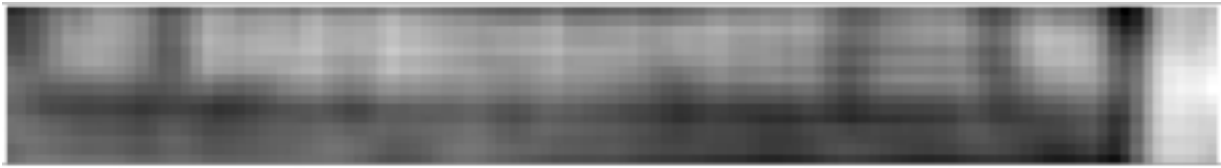


Abb. 4: Flächenscan einer GFK-Probe mit Bohrungen in verschiedenen Tiefenlagen (von links nach rechts: 3 mm bis 15 mm), Normalhorn-Antenne, Scanfläche 110 x 20 mm².

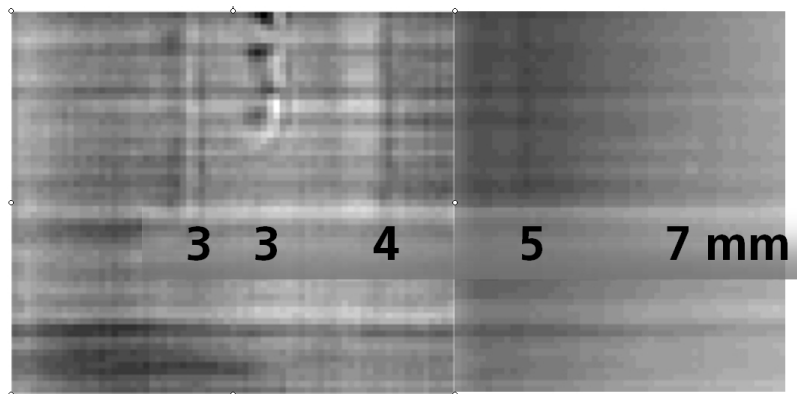


Abb. 5: Flächenscan von Bohrungen in verschiedenen Tiefenlagen (bis 7 mm) mit offenem Hohlleiter mit reduzierter Apertur, Scanfläche 65 x 30 mm². Nur die Bohrungen in 3 mm und 4 mm Tiefe sind sichtbar, wobei die rechte 3mm-Bohrung weniger lang ist als die anderen Bohrungen.

3. Charakterisierung der Faserverteilung

Aus den Millimeterwellenbildern und gegebenenfalls den optischen Bildern lässt sich die Faserverteilung mit Hilfe der im IZFP entwickelten Software NDEVO (**N**on**D**estructive **E**valuation of **F**ibre **O**rientation) automatisch charakterisieren und auswerten. Bestimmte Bereiche des Bildes können extrahiert und die Faserverteilung als Histogramm dargestellt werden (Abb. 6). Der Bereich 1 weist im Wesentlichen eine parallele Faserausrichtung auf, die jedoch gegenüber der Probenachse etwas verkippt ist (Abb. 7). Dementsprechend findet man ein Histogramm mit einem ausgeprägten Maximum bei ca. 10° gegenüber der Probenachse. Bereich 2 zeichnet sich durch eine parallele Faserausrichtung entlang der Probenachse aus. Dies spiegelt sich in dem ausgeprägten Maximum des Histogramms bei 0° wider. Für Bereich 3, der mitten im Faserwirbel liegt, zeigt das Histogramm kein Maximum. Dies zeigt einen eindeutig fehlerhaften Zustand an. Durch das Setzen von Schwellwerten kann die Erkennung der fehlerhaften Bereiche automatisiert werden.

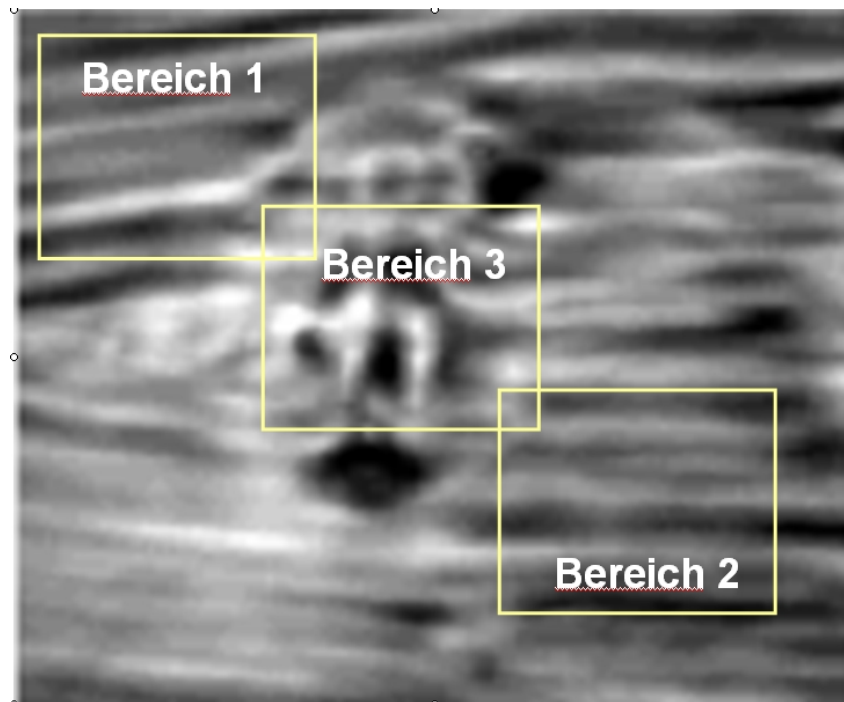


Abb. 6: Mit NDEFO-Software ausgewählte Flächen im Bereich eines Faserwirbels

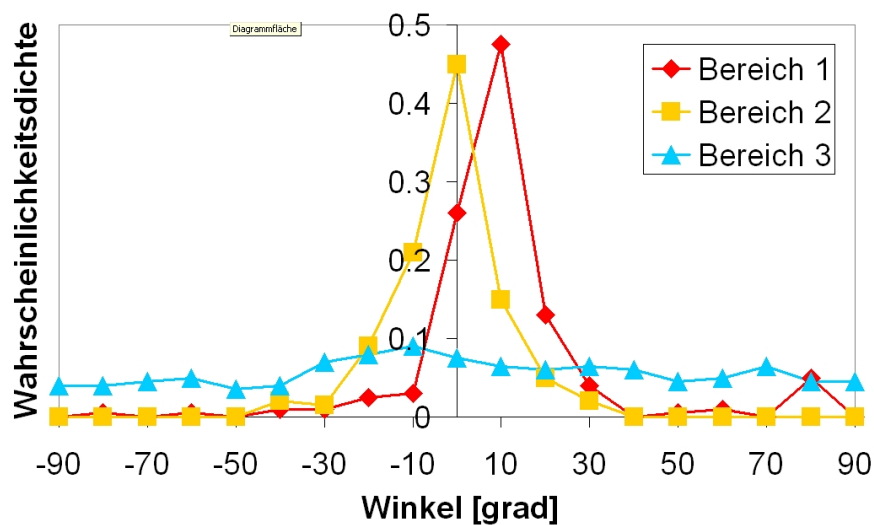


Abb. 7: Histogramme der drei ausgewählten Bereiche

Zusammenfassung

Eine Bilderzeugung ist bei 94 GHz mit hoher lateraler Auflösung möglich. Die notwendige Beschränkung der Messtiefe auf ca. 1 mm ist machbar durch eine Verkleinerung der Antennenapertur. Für die Optimierung der Feldstärkeverteilung sollten dreidimensionale Simulationsrechnungen durchgeführt werden. Eine hohe Messfrequenz ist günstig, da sie von vornherein aufgrund der frequenzabhängigen Absorption mit einer geringeren Eindringtiefe einhergeht und eine bessere Strahlbündelung als kleine Frequenzen erlaubt. Frequenzen oberhalb von 100 GHz sind gegenwärtig jedoch nur mit hohem Aufwand realisierbar.

Mittels einer statistischen Software ist eine automatische Bestimmung der Faserorientierungsverteilung über ein Netz kleinerer interessierender Bereiche möglich. Dabei

können charakteristische Parameter aus dem Histogramm (z.B. Hauptorientierungswinkel, Breite der Verteilung, statistische Momente) extrahiert werden.

Referenzen

- [1] Golosovsky, M.: "Near-field of a scanning aperture microwave probe: A 3-D finite element analysis", IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, Vol. 51 (3), 2002, 1090-1096