

Vermessung von Faserwellen in GFK-Gelegen mittels Mikrowellen

Johann HINKEN^{*,***}, Felix KÖSTER^{**}, Christian ZIEP^{*}

^{*} FI Test- und Messtechnik GmbH, Breitscheidstr. 17, 39114 Magdeburg,

E-mail: johann.hinken@fitm.de, Tel.: 0391-8868129

^{**} Fachhochschule Flensburg, Postfach 1561, 24905 Flensburg

^{***} Hochschule Magdeburg-Stendal, Breitscheidstr. 2, 39114 Magdeburg

Kurzfassung. Bei der Herstellung von Komponenten aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) können sich Faserwellen in Richtung senkrecht zur Oberfläche ausbilden. Nach einer Beschichtung mit Lack sind diese Faserwellen nicht mehr erkennbar. Sie beeinträchtigen die Festigkeit des Bauteils jedoch erheblich. Hier wird über eine Machbarkeitsstudie berichtet, die zeigt, dass ein geeignetes Mikrowellensystem in der Lage ist, solche Faserwellen zu finden und in ihrem Verlauf quantitativ zu bestimmen.

1. Einleitung und Problemstellung

Bei der Herstellung von Komponenten aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) wird häufig ein Vakuum-Infusionsverfahren mit einem unidirektionalen Glasfasergelege verwendet. Wie in Bild 1a angedeutet, wird dabei auf eine glatte Negativform zunächst das Fasermaterial, umschlossen mit einem luftdichtem Sack, eingelegt. Der Sack wird evakuiert, und temperiertes, flüssiges Harz wird durch das Vakuum in das Fasergelege eingesaugt. Nach Abkühlen und Aushärten befindet sich das Glasfasermaterial starr im Laminat. Bild 1b zeigt das Foto eines Bauteils während der Infusion des flüssigen Harzes, das sich als dunkle Bereiche nach links und rechts ausbreitet.

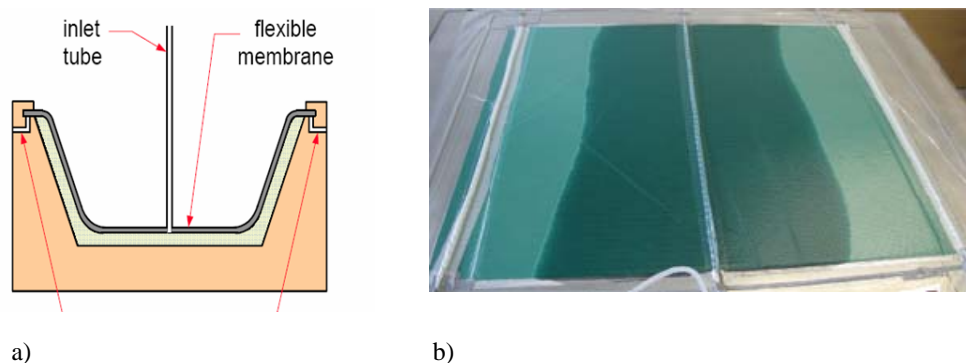


Bild 1. Vakuum-Infusionsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK).
a) Prinzip, nach ETH Zürich, IMES-ST. b) Foto während der Harzinfusion, nach BaltiCo GmbH

Die Unterseite des Laminats ist glatt wie die Negativform, die Oberseite ist weniger glatt. Es zeigt sich, dass sich bei diesem Verfahren gelegentlich an der Unterseite des Bauteils

Harzanreicherungen, d.h. Faserwellen (Ondulationen, Schlingerungen) in Richtung senkrecht zur Oberfläche ausbilden. Spätestens nach einer Beschichtung des Bauteils mit Gelcoat und/oder Lack sind diese Faserwellen nicht mehr erkennbar. Sie beeinträchtigen die Festigkeit des Bauteils jedoch erheblich.

Die im Folgenden beschriebene Machbarkeitsstudie zur Erkennung solcher Faserwellen mit Mikrowellen wurde an der in Bild 2 dargestellten Probe durchgeführt.

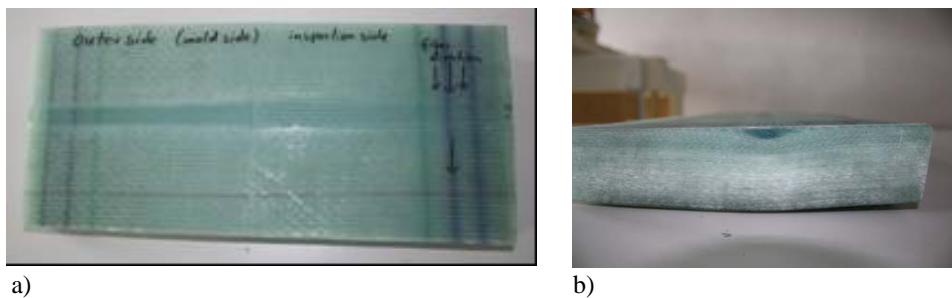


Bild 2. Probe mit künstlicher Faserwelle. a) Draufsicht .b) Seitenansicht

In Bild 2b ist an der Oberseite die dunkel erscheinende Harzanreicherung mit der Fasewelle an ihrer Unterseite zu erkennen. Auf der Oberseite wurde als Deckschicht des Bauteils noch eine dünne Schicht biaxialen GFKs aufgebracht. Bild 2a zeigt in der Draufsicht, waagrecht liegend und durchscheinend durch die biaxiale GFK-Schicht, die Harzanreicherung.

2. Lösungsansatz

Zur zerstörungsfreien Vermessung dieser Faserwelle wurde die Probe in mehreren Linienscans, in vertikaler Richtung des Bildes 2a) abgetastet. Momentan ergibt sich dann die Situation so wie sie in Bild 3a) prinzipiell dargestellt ist. Von einem Sender wird über eine Antenne ein auf die Probe einfallendes Signal abgegeben. Ein weiteres Signal wird reflektiert und von einem Empfänger ausgewertet. Das reflektierte Signal setzt sich aus mehreren Teilsignalen zusammen, die durch die einzelnen Schichten bestimmt sind: die außen befindliche Luft, das biaxiale GFK, der Harzbereich und das sehr dicke unidirektionale GFK. Bild 3b) zeigt das Hochfrequenzleitungsschaltbild dieser Anordnung. Die einzelnen Bereiche sind mit ihren Feldwellenwiderständen Z_0 , Z_G und Z_H berücksichtigt. Das nahezu unendlich dicke unidirektionale GFK ist im Abschlusswiderstand Z_G berücksichtigt. Die konstante Dicke des biaxialen GFK ist b , die variable Harzdicke ist d .

Zur Berechnung der Feldwellenwiderstände und der Phasenkoeffizienten dieser Leitungsabschnitte wurden folgende Dielektrizitätszahlen verwendet. Luft 1; Epoxidharz 3,0; E-Glas 6,5. Bei einem bekannten Faservolumenverhältnis von 51% ergibt sich aus einer gewichteten Mittelung eine Dielektrizitätszahl des GFK von 4,7. Das stimmt mit in anderen Zusammenhängen direkt gemessenen Werten recht gut überein.

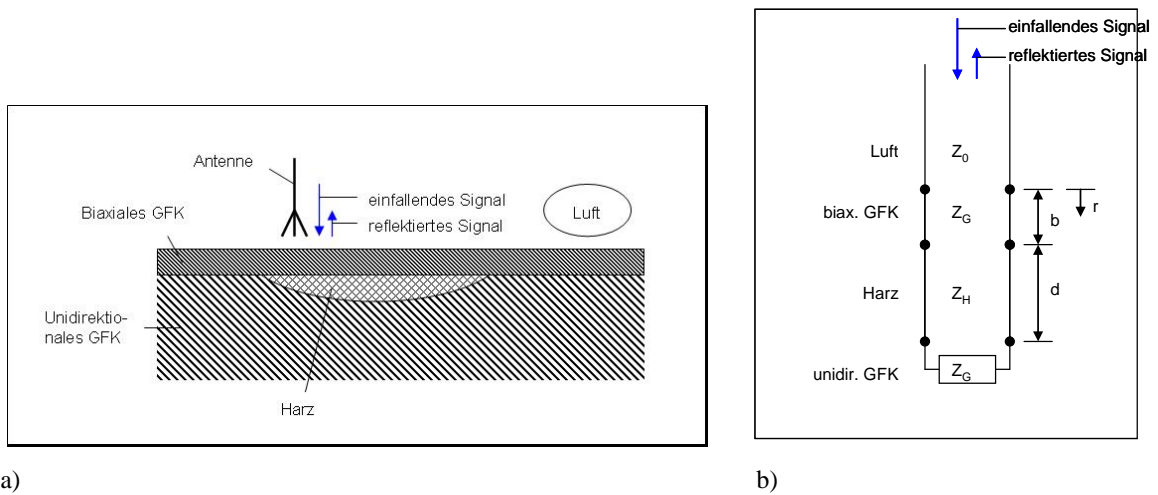


Bild 3. Prinzipieller Aufbau und Rechenmodell der Faserwelle. a) Prinzipieller Aufbau. b) Hochfrequenztechnisches Rechenmodell mit Leitungen

Das Verhältnis von reflektiertem Signal zu einfallendem Signal, also der komplexe Reflexionsfaktor r , wurde für dieses Modell rechnerisch bestimmt und in Abhängigkeit von der Harzdicke d in der komplexen Ebene des Reflexionsfaktors eingetragen.

Bild 4 zeigt die entsprechende Ortskurve für eine Dicke der biaxialen GFK-Schicht von 1,2 mm und veränderlicher Harzdicke d zwischen 0 mm und 6 mm. Nach diesem Rechenmodell ist die Ortskurve eigentlich ein Kreis, der mehrfach durchlaufen wird. In Bild 4 ist aber zur besseren Erkennung der beginnende zweite Umlauf ein wenig verschoben eingezeichnet. Diese berechnete idealisierte Kurve wurde bei der Auswertung der im Folgenden beschriebenen Messungen zugrunde gelegt.

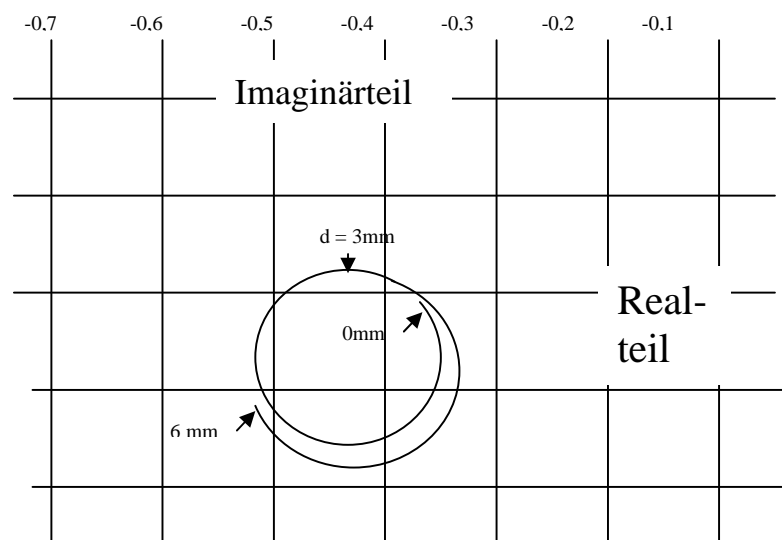


Bild 4. Ortskurve des Reflexionsfaktors bei veränderlicher Harzschichtdicke d

3. Messungen und Auswertung

Bild 5 zeigt die Probe in der Draufsicht, wobei die vier Scanlinien mit eingezeichnet sind.

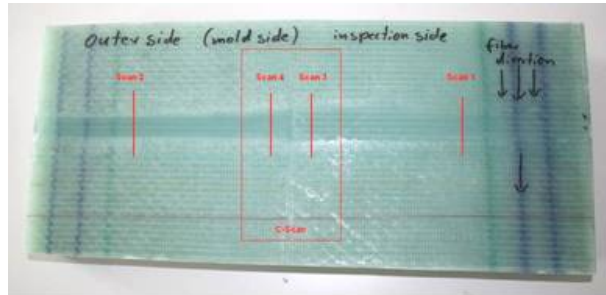


Bild 5. Probe mit Scanlinien

Bild 6 zeigt einen Teil des 24-GHz-Messaufbaus mit Verfahrtsch. Über das nach rechts führende Kabel ist ein Netzwerkanalysator zur Messung des Reflexionsfaktors angeschlossen. In ca. 1 mm über der Probe schwebend befindet sich die Mikrowellenantenne: ein offener Hohlleiter mit Flansch.

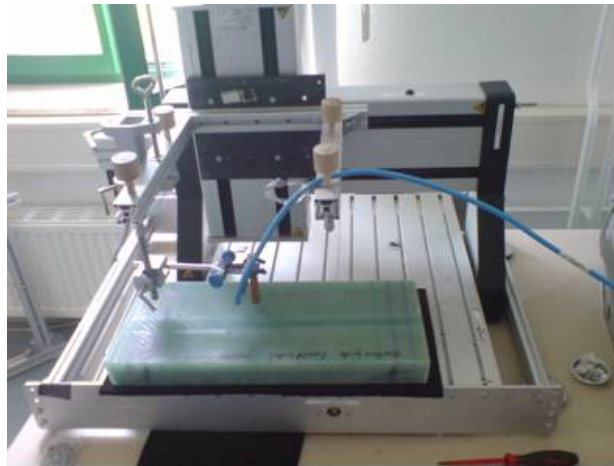


Bild 6. Messaufbau und Verfahrtsch

Bild 7 zeigt auf der rechten Seite die gemessene Ortskurve des komplexen Reflexionsfaktors. Der Knoten auf der rechten Seite ergibt sich durch das Verfahren in Bereichen außerhalb der Harzanreicherung. Inhomogenitäten des Materials führen zu einer Aufweitung des Messpunktes zu diesem Knoten. Wenn die Antenne über die Faseranreicherung geführt wird, wird der dargestellte Kreis zunächst im Uhrzeigersinn durchlaufen bis hin zur dicksten Stelle der Harzanreicherung. Sie stellt sich in der Ortskurve als links unten befindliches Ende der weißen Kurve dar. Bei einem Weiterfahren der Antenne über Bereiche mit abnehmender Harzdicke wird die Kurve rückwärts, d.h. gegen den Uhrzeigersinn wieder durchlaufen und endet in dem genannten Knoten. Dass dabei die beiden Schriebe in und gegen den Uhrzeigersinn nicht genau deckungsgleich sind, ergibt sich aus einer Unsymmetrie der Harzanreicherung. Auf der linken Seite von Bild 7 ist der Imaginärteil des Reflexionsfaktors in Abhängigkeit von der Längskoordinate des Linienscans aufgetragen. Aus dieser Kurve ergibt sich, markiert durch die

grünen, waagerechten Linien die Breite der Faserwelle. Im rechten Bild, also in der Ortskurve sind 2 grüne Hilfslinien eingetragen, die vom Kreismittelpunkt ausgehen und einmal nach rechts oben durch den genannten Knoten verlaufen und damit einer Harzdicke 0 entsprechen, bzw. nach links unten durch das Ende der Kurve gehen und damit der maximalen Harzdicke entspricht. Der überstrichene Winkelbereich dieses Fahrstrahls wurde mit Hilfe des Bildes 4 ausgewertet hinsichtlich der maximalen Dicke der Harzanreicherung.

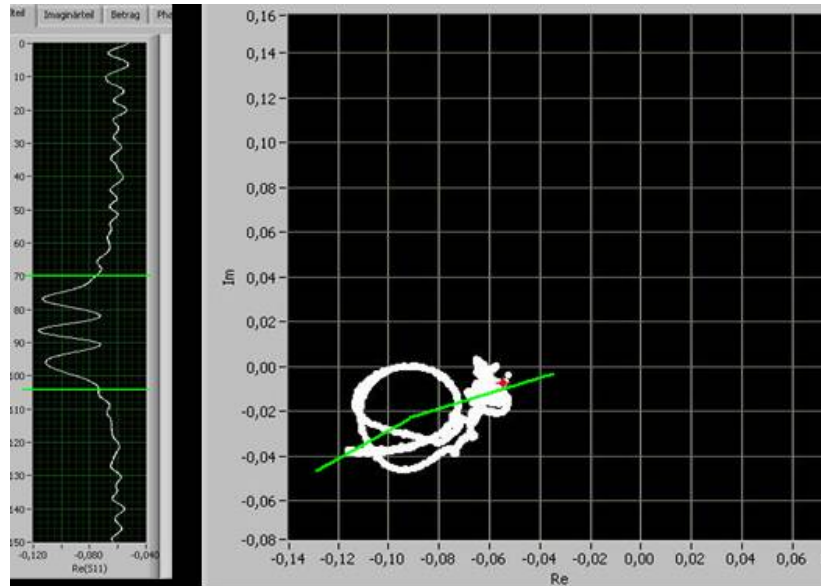


Bild 7. Imaginärteil (links) und Ortskurve (rechts) des Scans 2

Das zugrunde gelegte, einfache Rechenmodell hat seine Schwächen. So wird eine Dämpfung im GFK beispielsweise durch Aufweitung des Sendestrahles und durch Streuung an den Glasfasern nicht berücksichtigt. Dieser und weitere Effekte führen dazu, dass die Ortskurve nicht immer so kreisförmig ist, wie in Bild 7. Sie kann beispielsweise auch so aussehen wie in Bild 8, die den Scan 1 zeigt.

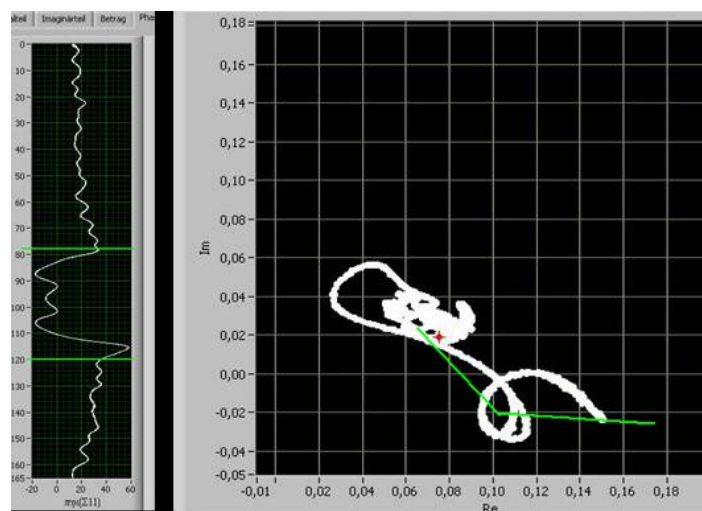


Bild 8. Imaginärteil (links) und Ortskurve (rechts) des Scans 1

Weil aber die Phasenbeziehungen auch trotz Dämpfung weitgehend erhalten bleiben, kann auch aus einer solchen Kurve die Harzdicke berechnet werden. Die grünen Fahrstrahlen in Bild 8 geben dabei die charakteristischen Winkel an, die der Situation Harzdicke = 0 und Harzdicke maximal entsprechen.

Dieses Verfahren ist nicht nur in der Lage die maximale Harzdicke zu bestimmen, sondern man kann mit ihm auch das Profil der Harzdicke in Abhängigkeit von der Scanrichtung aufnehmen. Bild 9 zeigt die Auswertung für den Scan 2.

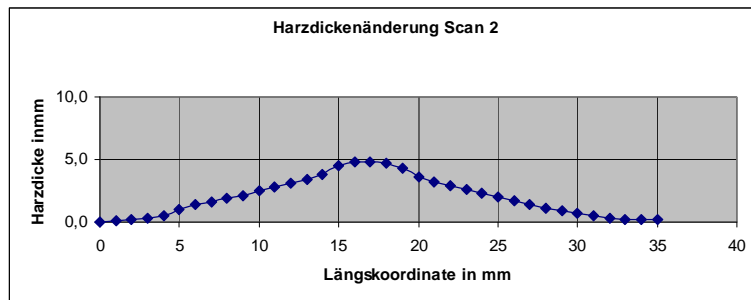


Bild 9. Gemessenes Profil der Harzdicke in Abhängigkeit von der Scankoordinate

Tabelle 1: Aus den Linienscans ermittelte charakteristische Werte der Faserwelle

Nr. des Linienscans	Länge der Harzanreicherung l in mm	Höhe der Harzanreicherung d in mm	Steigung m_{linear}	Steigung m_{trigon}
1	42	4,9	13,4°	21°
2	34	5,3	17,9°	28,2°
3	39	4,9	14,4°	22,7°
4	32,5	5,5 4,6 Mittel: 5,1	19,5° 16,3° Mittel: 17,9°	30,5° 25,6° Mittel: 28,1°

Die Tabelle 1 gibt die wesentlichen Messergebnisse der vier Linienscans wieder, nämlich die Ausdehnung l der Harzanreicherung in Scanrichtung, die maximale Dicke d der Harzanreicherung sowie die aus diesen beiden Werten ermittelte Steigung m der Grenzschicht zwischen Harzanreicherung und Glasfaser. Dabei gibt m_{linear} die Steigung an, wenn die eben genannten Längen die Grundlage eines dreieckförmigen Verlaufes sind. Wenn nicht linear interpoliert wird und ein sinusförmiger Verlauf der Faserwelle unterstellt wird, ergibt sich die Steigung m_{trigon} . Mit dem hier dargestellten Verfahren braucht eine solche Interpolation allerdings nicht durchgeführt zu werden, denn aus Darstellung wie in Bild 9 kann die maximale Steigung direkt entnommen werden. Diese maximalen Steigungen sind kritische Größen, aus denen die Belastbarkeit der GFK-Materialien ermittelt werden kann.

4. Schluss

Diese Machbarkeitsstudie zeigt:

- Faserwellen in GFK können mit einem geeigneten Mikrowellenverfahren erkannt und vermessen werden.
- Auch durch isolierende Schichten, wie biaxiales GFK, Gelcoat oder Farbe hindurch ist das möglich.
- Diese Aussagen gelten für Faserwellen, die nicht zu weit von der Oberfläche entfernt liegen. Das ist in der Praxis zumeist gegeben.