

Zerstörungsfreie Prüfung von GFK-Werkstoffen mit THz-Wellen

Martin NEZADAL¹, Jan SCHÜR¹, Lorenz-Peter SCHMIDT¹

¹ Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik (LHFT),

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Erlangen

Kurzfassung. Zur zerstörungsfreien Prüfung von glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) wurde ein synthetisches Apertur Radar (SAR) im W-Band (75–110 GHz) eingesetzt und evaluiert. Dazu wurden verschiedene GFK-Proben in Reflexionskonfiguration vermessen und künstlich eingebrachte Defekte detektiert. Zusätzlich zur Auswertung in der Kopolarisation wurde auch das Signal in Kreuzpolarisation ausgenutzt, wodurch eine deutliche Erhöhung des Bildkontrastes erzielt werden konnte. Durch die Verarbeitung beider Polarisationen konnten verborgene Defekte in GFK-Platten bis zu einer Tiefe von 14,5 mm detektiert und Fehlstellen in Sandwichstrukturen aus GFK-Laminaten und Honigwabenelementen sichtbar gemacht werden.

Einführung

Durch den steigenden Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen in vielen Industriezweigen, etwa in der Luft- und Raumfahrt oder für Flügel von Windkraftanlagen, steigt auch der Bedarf an Möglichkeiten zur zerstörungsfreien Prüfung. Da glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) für Millimeter- und THz-Wellen relativ transparent sind, bietet es sich an, ein Tomographiesystem zur Untersuchung zu verwenden [1]. Von großem Interesse sind auch sogenannte Sandwichstrukturen, bei denen GFK-Lamine mit einer leichteren Zwischenschicht, etwa einer geschäumten Schicht oder Honigwabenstrukturen, verbunden sind. Bei diesen Werkstoffen ist eine Prüfung mit herkömmlichen zerstörungsfreien Methoden, etwa Ultraschall oder Thermographie, schwer bis gar nicht möglich, da ein sehr großer Impedanzsprung an der Grenzschicht zwischen Laminat und der eingeschlossenen Luft in der Zwischenschicht entsteht und ein Ausbreiten des Messsignals verhindert.

1. Grundlagen

GFK-Materialien weisen eine mit der Frequenz steigende Dämpfung auf, daher ist ein Kompromiss zwischen Eindringtiefe und der Auflösung, die üblicherweise zur verwendeten Wellenlänge proportional ist, zu treffen. Für die untersuchten GFK-Proben die aus 43 Lagen gewebten GF-Matten und Epoxidharz bestehen und eine Dicke von 15 mm aufweisen, ergab sich in Messungen ein mittlerer Extinktionskoeffizient von ca. 0,45. Dadurch steigen die Verluste im Material relativ stark mit der Frequenz an, da diese exponentiell mit der Wellenzahl wachsen. Zusätzlich werden durch die große relative Brechzahl von 2,15 an der Probenoberfläche direkt ca. 13 % der Leistung reflektiert. Daher wurde ein Frequenzbereich von 75–110 GHz im W-Band gewählt, in dem die Verluste



noch relativ gering sind. Dieser Frequenzbereich hat auch den Vorteil, dass Signalquellen vorhanden sind, die ein kostengünstiges System und einen kohärenten Empfang ermöglichen.

2. Verwendetes Messsystem

Das verwendete Messsystem beruht auf dem Prinzip eines synthetischen Apertur Radars. Da für normale Radarsysteme die laterale Auflösung $\delta_{x,y}$ durch die Wellenlänge λ und die Größe der Antennenapertur d_a nach folgender Gleichung festgelegt wird:

$$\delta_{x,y} \approx R_0 \frac{\lambda}{d_a}, \quad (1)$$

ist für eine hohe Auflösung eine sehr große Antenne notwendig. R_0 ist hier der Abstand zwischen Empfänger und Ziel. Durch Spiegel oder Linsen ist es möglich Aperturen zu generieren, die Auflösungen im Millimeterbereich möglich machen, allerdings ist dann üblicherweise die Schärfentiefe relativ klein. Dadurch lassen sich nur schmale Bereiche einer Probe in Entfernungsrichtung scharf darstellen.

Aus diesem Grund wurde für das hier verwendete System ein alternativer Ansatz gewählt, um auch relative dicke Proben vermessen zu können. Wird das empfangene Signal vektoriell, also nach Betrag und Phase vermessen, so ist es möglich eine synthetische Apertur zu bilden und die Fokussierung des Bildes mit einem geeigneten Rekonstruktionsalgorithmus durchzuführen [2]. Die resultierende Auflösung in lateraler Richtung ist dann von der Länge der synthetischen Apertur L abhängig, die nun entsprechend groß gewählt werden kann [2].

$$\delta_{x,y} \approx \frac{\lambda R}{2L} \quad (2)$$

Das hier verwendete Messsystem hat eine Aperturlänge von 30 cm in x-Richtung und 17 cm in y-Richtung bei einer Zielentfernung von 0,4 m. Dadurch ergibt sich im verwendeten Frequenzbereich von 75–110 GHz eine laterale Auflösung in x-Richtung von ca. 2,2 mm und in y-Richtung von ca. 3,7 mm.

In Entfernungsrichtung, hier also in z-Richtung, ergibt sich die Auflösung durch die verwendete Pulsbreite τ , oder Bandbreite B des Messsignals [3]:

$$\delta_z = \frac{c_0}{2Bn} = \frac{c_0 \tau}{2n} \quad (3)$$

Dabei skaliert die Auflösung im Material noch mit der Brechzahl n der Probe. Bei dem hier verwendeten System wurde eine Bandbreite von 35 GHz verwendet, wodurch sich eine Entfernungsauflösung von 1,4 mm im Vakuum und ca. 0,7 mm im GFK Material ergibt. Der große Vorteil der numerischen Fokussierung gegenüber einer physikalischen Fokussierung ist die Möglichkeit, die Probe in allen Entfernungen bzw. schichtweise im Probeninneren scharf darstellen und hierdurch ein komplettes dreidimensionales Bild der Probe rekonstruieren zu können.

Um einen verbesserten Kontrast der Defekte gegenüber dem Hintergrund zu erreichen, wurden zusätzlich die Signalanteile in Kreuzpolarisation vermessen [4]. Dazu wurde das Signal in vertikaler linearer Polarisation ausgesendet und die gestreuten Anteile in horizontaler Polarisation gemessen. An ebenen Grenzflächen, etwa der Probenober- oder Rückseite, erfolgt normalerweise nur eine Streuung oder Reflexion in der Kopolarisation, es findet also keine Drehung der Polarisationsebene statt. Anders sieht dies an Kanten oder Rissen aus, hier findet abhängig von der Orientierung des Defekts eine Streuung in die Kreuzpolarisation statt. Der Anteil der Kreuzpolarisation ist hierbei wie bei einem Dipol vom Sinus des doppelten Winkels zwischen einfallender Orientierung der Polarisation und

des Dipols abhängig. So ist es möglich den Kontrast der Fehlstellen gegenüber der spiegelnden Reflexion an den Probenoberflächen zu erhöhen.

3. Ergebnisse an Probekörpern

Zur Evaluierung des Messsystems wurden verschiedene Probekörper untersucht. Zum einen 15 mm dicke GFK-Platten mit 43 Lagen GF-Gewebe mit Sacklochbohrungen auf der Rückseite. Die GFK-Platten weisen Restwandstärken in den Löchern zwischen 0,5 und 14,5 mm auf. Die Lochdurchmesser betragen zwischen 5 und 20 mm. Außerdem wurden Proben mit Delaminationen versehen. Dafür wurden Sandwichstrukturen mit Honigwabenkern untersucht. Der strukturelle Aufbau dieser Proben ist in Abbildung 1 dargestellt. Es wurden zwei Proben untersucht, eine mit nur einem Honigwabenkern zwischen den GFK-Laminaten und eine zweite mit zwei Honigwabenkernen zwischen drei GFK-Laminaten.

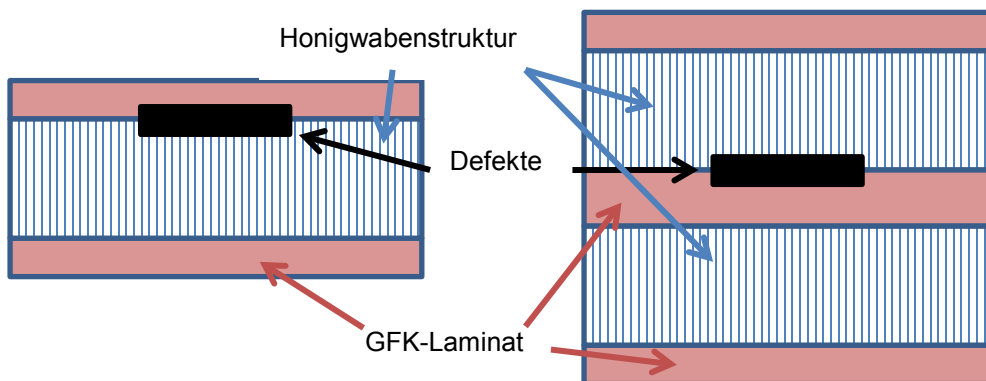


Abbildung 1: Aufbau der Sandwich-Strukturproben mit GFK-Laminaten und dazwischen liegendem Honigwabenkern.

3.1 Ergebnisse Kopolarisation GFK-Platten

Zunächst folgen die Ergebnisse der GFK-Platten. In der Kopolarisation ist bei den Löchern mit einer Restwandstärke bis ca. 9 mm eine Detektion aller Löcher auch mit einem Durchmesser von 5 mm möglich. Für die Defekte mit Restwandstärken über 9 mm und einem Durchmesser von 5 mm ist eine Detektion nur über die Kanten möglich. Beispielhaft ist in Abbildung 2 ein Zeitschnittbild bei 214,3 ps einer Probe dargestellt. Die Restwandstärken betragen bei dieser Probe 3,0 bis 5,5 mm. Die Signale der beiden recht schwach erscheinenden Löcher ganz links, haben ihr Maximum bereits einen Zeitschritt früher, also ca. 28,6 ps früher, da die Signallaufzeit hier auf Grund der dünneren Wand kürzer ist. Bei den Löchern mit 5 mm Durchmesser in der oberen Reihe erreicht das Signal auf Grund von größeren Brechungseffekten an den Kanten den Empfänger erst einen Zeitschritt später [6].

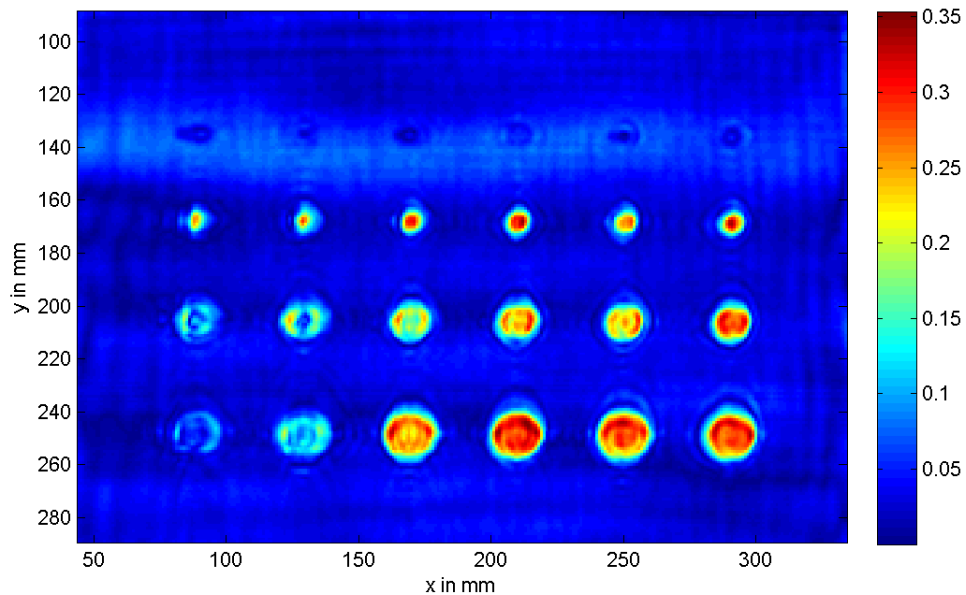


Abbildung 2: Zeitschnitt bei 214,3 ps: Restwandstärken von links nach rechts 3,0 bis 5,5 mm. Durchmesser der Löcher von unten nach oben 20 bis 5 mm.

Bei einer weiteren Probe mit den größten Restwandstärken mit 12,0 bis 14,5 mm reicht die zeitliche Auflösung nicht mehr aus, um die Reflexion am Defekt von der an der Rückseite auftretenden zu unterscheiden. Allerdings ist es auch hier möglich die Defektkanten zu detektieren, da an diesen ein Großteil der Leistung in Richtungen gestreut wird, in denen kein Empfang mehr möglich ist und somit als Schatten zu erkennen sind.

3.2 Ergebnisse Kopolarisation Sandwich-Strukturen

Bei der Sandwich-Probe mit nur einem Honigwabenkern sind die Reflexionen relativ einfach zu detektieren, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Es fällt aber auf, dass die einzelnen Honigwaben der Zwischenschicht eine störende Textur über das Bild legen, die eine Detektion erschweren können.

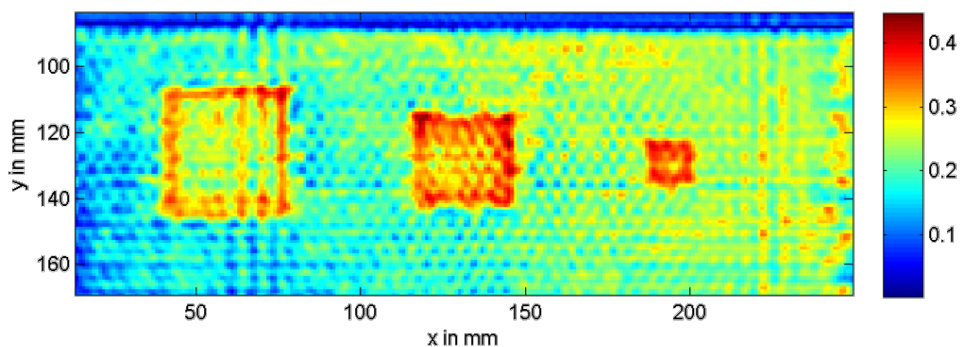


Abbildung 3: Betrag bei Zeitschnitt bei 371 ps: Sandwichstruktur mit drei Delaminationen

Bei der Probe mit drei GFK-Laminaten und jeweils zwei dazwischen liegenden Honigwabenstrukturen sind die Defekte in das mittlere Laminat eingebracht worden. Auch hier ist eine Detektion der Defekte möglich, allerdings erschwert das Muster der Honigwaben die Detektion, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Der Kontrast durch die unterschiedliche elektrische Weglänge ist aber trotzdem groß genug um die Luftpinschlüsse sichtbar zu machen. Es ist außerdem davon auszugehen, dass weitere Inhomogenitäten in der Probe enthalten sind, etwa im Bereich um den Defekt rechts unten. Da durch den hohen Luftgehalt und den damit verbundenen hohen Impedanzsprung in den Honigwabenstrukturen eine Untersuchung mit Ultraschall und Thermographie an ihre

Grenzen stößt, ist dieses Prüfverfahren bisher als einziges in der Lage Defekte in dieser Lage zu detektieren.

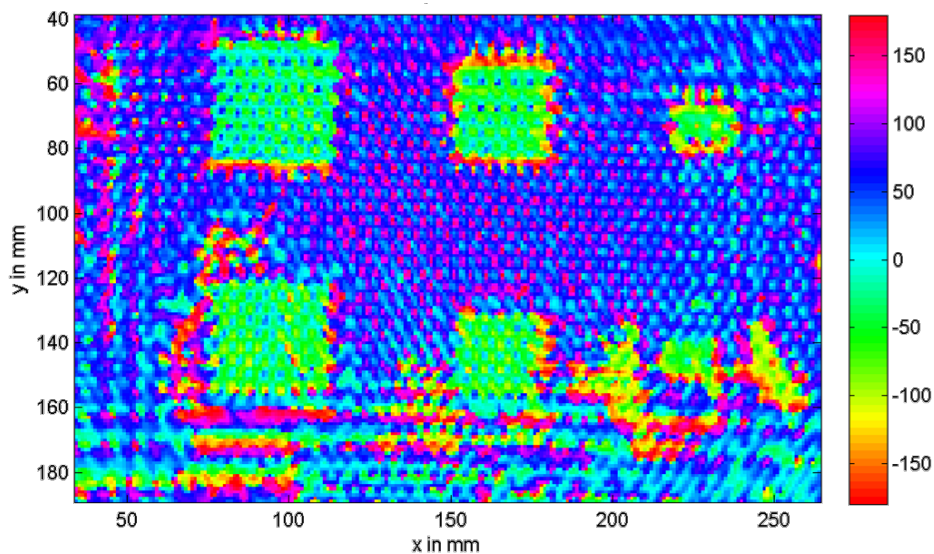


Abbildung 4: Phase bei Zeitschnitt 400 ps: Doppelsandwichstruktur mit Delaminationen im mittleren GFK-Laminat. Starke Inhomogenitäten in der unteren Reihe evtl. durch weitere Defekte.

3.3 Ergebnisse Kreuzpolarisation

Um das Problem der Überlagerung von Reflexionen an der Rückseite der Probe und sehr nahe an der Rückseite liegenden Defekten zu beheben, wurden die Proben auch in der Kreuzpolarisation vermessen. Die Probe mit Restwandstärken von 12,0 bis 14,5 mm ist in Abbildung 4 abgebildet. Man erkennt sehr gut die Streuung des Signals an den Kanten der Löcher, die ihr Maximum unter einem Winkel von 45° und ungeradzahligem Vielfachen davon erreicht. Da in der Kreuzpolarisation fast keine Streuung an der Rückseite der Probe auftritt, ergibt sich ein hoher Kontrast der Lochkanten gegenüber dem Hintergrund. Allerdings treten auch mehr Inhomogenitäten der Probe zum Vorschein als im Fall der Kopolarisation, was eine Erkennung erschweren kann. Außerdem muss man beachten, dass Defekte wie z.B. Risse, die ausschließlich in horizontaler oder vertikaler Orientierung verlaufen, kaum Signalanteile in die Kreuzpolarisation streuen und somit der Detektion entgehen würden. Daher erscheint es sinnvoll, die Kreuzpolarisation als ergänzende Messung zu verwenden und somit eine vollpolarimetrische Messung durchzuführen, damit keine Defekte unerkant bleiben.

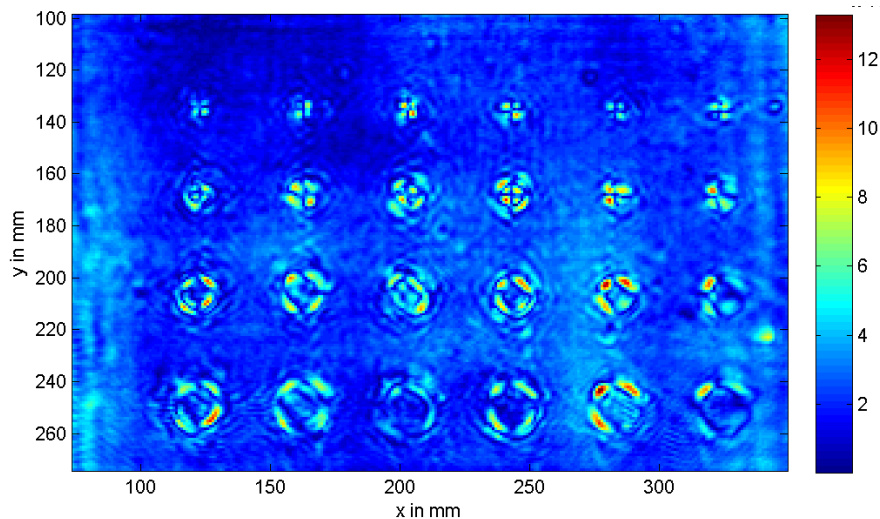


Abbildung 5: Betrag bei Zeitschnitt bei 328 ps: Restwandstärken von links nach rechts 12,0 bis 14,5 mm. Lochdurchmesser von unten nach oben 20 bis 5 mm.

4. Zusammenfassung

Zur zerstörungsfreien Prüfung von GFK-Materialien wurde ein bildgebendes Radarsystem mit synthetischer Apertur für Nahbereichsabbildungen aufgebaut und evaluiert. Der verwendete Frequenzbereich des W-Bandes (75–110 GHz) stellt einen Kompromiss zwischen lateraler Auflösung und Dämpfung im Material dar, um auch bei relativ dicken Platten eine hohe Eindringtiefe zu erreichen. Mit dem verwendeten System war es möglich die künstlichen Defekte in einem 15 mm starken GFK-Laminat bis in eine Tiefe von 14,5 mm zu detektieren, dabei wird die Erkennung durch den Einsatz der Kreuzpolarisation erheblich verbessert.

Bei GFK-Laminaten in einer Honigwaben-Sandwichstruktur war es ebenfalls möglich die künstlich eingebrachten Delaminationen zu detektieren. Auch in einer Doppelsandwichstruktur, bei der das innere GFK-Laminat beschädigt war, konnten alle Defekte identifiziert werden. Dies ist mit allen herkömmlichen Verfahren zur zerstörungsfreien Materialprüfungen kaum oder gar nicht möglich.

Referenzen

- [1] I. Amenabar, F. Lopez and A. Mendikute, “In Introductory Review to THz Non-Destructive Testing of Composite Mater,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 34, no. 2, pp. 152-169, 2012.
- [2] D. M. Sheen, D. L. McMakin und T. E. Hall, „Three-Dimensional Millimeter-Wave Imaging for Concealed Weapon Detection,“ *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Bd. 49, Nr. 9, pp. 1581-1592, 2001.
- [3] S. Ahmed, A. Schiessl, F. Gumbmann, M. Tiebout, S. Methfessel and L.-P. Schmidt, “Advanced Microwave Imaging,” *Microwave Magazine, IEEE*, vol. 13, no. 6, pp. 26-43, 2012.
- [4] H. Klausning und W. Holpp, Radar mit realer und synthetischer Apertur, München Wien: Oldenburg Verlag, 2000.
- [5] M. Nezadal, J. Schür und L.-P. Schmidt, „Cross-Polarized Imaging of Glass-Fibre Reinforced Plastics at mm-Waves,“ in *GeMiC 2014 - The 8th German Microwave Conference (GeMiC 2014)*, Aachen, 2014.
- [6] M. Nezadal, J. Schür und L. Schmidt, „Imaging System for Non-Destructive Testing of Glass Fibre Reinforced Plastics,“ in *5th International Symposim on NDT in Aerospace*, Singapore, 2013.