

Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mittels vollelektronischer Terahertz-Systeme

Dominik STICH, Franziska MINOLTS, Bertram EVERS MANN,
Peter HEIDEMEYER, Martin BASTIAN, Thomas HOCHREIN
SKZ - Das Kunststoff-Zentrum
Friedrich-Bergius-Ring 22, 97076 Würzburg
d.stich@skz.de

Kurzfassung. Faserverbundkunststoffe erfahren in den letzten Jahren einen rasanten Zuwachs an Anwendungen und Marktvolumen. Die produktionsbegleitende Prüfung sowie Überwachung verbauter Faserverbundkunststoffe gewinnen somit ebenfalls erheblich an Bedeutung. Hierbei fehlt es jedoch in einigen Bereichen noch an geeigneten und anwendungsgerechten Mess- und Prüftechniken zur Prozess- und Qualitätsüberwachung.

Zur zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) von Faserverbundkunststoffen wurden bislang Ultraschall, Röntgenmethoden, Thermografie, Shearografie und Mikrowellen erprobt. Eine vergleichsweise neue - aber insbesondere im Kunststoffbereich äußerst vielversprechende - ZfP-Methode ist die Terahertz-(THz)-Technologie. Die THz-Geräte-Technik erzielte in den letzten Jahren rasante Fortschritte. Vor allem vollelektronische THz-Systeme bieten durch ihre Robustheit und Messgeschwindigkeit ein erhebliches Potenzial für industrielle Anwendungen. Des Weiteren weist die THz-Technologie gegenüber den zuvor genannten Verfahren eine Vielzahl von Alleinstellungsmerkmalen auf. So kann auf ein Ankopplungsmedium verzichtet werden. Auch Messungen bei nur einseitigem Probenzugang in Reflexion sind möglich. Des Weiteren können mit THz-Strahlen auch Schäume und hohle Faserverbundkunststoff-Sandwichstrukturen untersucht werden.

In diesem Beitrag berichten wir über die Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mittels eines vollelektronischen THz-Systems, das bei einer Frequenz von 0,1 THz arbeitet. Hierbei wird auf das erreichbare Auflösungsvermögen sowie die Detektionsschwelle für Fehlerbilder wie Luftporen und Hohlräume in Abhängigkeit von Größe, Tiefe und Material eingegangen. Außerdem wird dargestellt, in welchem Maße die Faserausrichtung in Faserverbundwerkstoffen detektiert werden kann. Des Weiteren stellen wir erste Ergebnisse vor, die Detektierbarkeit von Fehlerbildern mit einem theoretischen Modell vorherzusagen.

1. Einführung

In den letzten Jahren hat die Verwendung von Faserverbundkunststoffen rasant zugenommen. Die Hauptvorteile dieses Materialsystems liegen in der hohen Festigkeit, der freien Formgebung sowie der Gewichtsreduzierung gegenüber herkömmlichen Materialien. Einsatzgebiete von Faserverbundkunststoffen sind u. a. Fahrzeugbau, Luftfahrt, Windenergie und Bauindustrie. Prominente Beispiele wie Rotorblätter für Windkraftanlagen oder der Leichtbau im Fahrzeug- und Luftfahrtbereich zeigen einerseits die Bedeutung für die moderne Industriegesellschaft und verdeutlichen die bereits erreichten und noch zu erwartenden Marktvolumina. Die Qualitätsansprüche an Produkte aus Faserverbundkunststoffen



werden häufig direkt aus den oben genannten Anwendungen bestimmt. Eine produktionsbegleitende Prüfung und Überwachung verbauter Faserverbundkunststoffe ist somit von erheblicher Bedeutung und wird in allen Anwendungsgebieten angestrebt.

In vielen Bereichen fehlen jedoch noch geeignete und anwendungsgerechte Prüftechniken zur Prozess- und Qualitätsüberwachung. Zur ZfP von Faserverbundkunststoffen werden bislang Ultraschall, Röntgenmethoden, Thermografie, Shearografie und Mikrowellen erprobt oder bereits eingesetzt. All diese Methoden sind mit individuellen Nachteilen behaftet. Röntgenmethoden erfordern einen beidseitigen Probenzugang und besondere Sicherheitsvorkehrungen. Ultraschall kann geschäumte Materialien und Luft nur schlecht durchdringen und es wird in der Regel ein Ankoppelmedium benötigt. Thermografie und Shearografie haben meist eine stark begrenzte Eindringtiefe. Die Auflösung von Mikrowellen ist aufgrund der verwendeten Wellenlängen oft im Zentimeterbereich.

Eine vergleichsweise neue - aber insbesondere im Kunststoffbereich äußerst vielversprechende - ZfP-Methode ist die THz-Technologie. Die THz-Gerätetechnik erzielte in den letzten Jahren rasante Fortschritte. Vor allem vollelektronische THz-Systeme bieten durch ihre Robustheit und Messgeschwindigkeit ein erhebliches Potenzial für industrielle Anwendungen. Des Weiteren weist die THz-Technologie gegenüber den zuvor genannten Verfahren eine Vielzahl von Alleinstellungsmerkmalen auf. So kann auf ein Ankoppelmedium verzichtet werden. Auch Messungen bei nur einseitigem Probenzugang in Reflexion sind möglich. Des Weiteren können mit THz-Strahlen auch Schäume und hohle Faserverbundkunststoff-Sandwichstrukturen untersucht werden.

In diesem Beitrag erfolgt eine Untersuchung, welche Materialeinschlüsse, Hohlräume und Lunker in Abhängigkeit ihrer Größe und Tiefenposition nachweisbar sind. Dies ist beispielsweise beim Bau und der Überprüfung von Rotorblättern von Bedeutung, da hierbei Faserverbundstrukturen von bis zu 40 mm verwendet werden. Des Weiteren wird untersucht, inwiefern die Faserausrichtung in Verbundkunststoffen ermittelt werden kann.

Im Folgenden werden zunächst grundlegende Eigenschaften der THz-Technik und das vollelektronische THz-System sowie Anwendungen im Kunststoffbereich vorgestellt. Anschließend wird auf Messungen an beispielhaften Probekörpern eingegangen. Ausgehend von Messungen an einem idealen Reflektor wird schließlich ein Modell entwickelt, in dem die von Fehlstellen zu erwartenden Messsignale simuliert werden.

2. Grundlagen

2.1 Die Terahertz-Technik

THz-Wellen sind, wie in Abbildung 2 gezeigt, im elektromagnetischen Spektrum zwischen Mikrowellen und dem infraroten Spektralbereich angesiedelt. Mit einer Wellenlänge von einigen Millimetern bis in den Submillimeter-Bereich können sie als sehr kurzwellige Mikrowellen bzw. sehr langwellige Wärmestrahlung angesehen werden. Zu den besonderen Eigenschaften von THz-Wellen zählt ihr gutes Durchdringungsvermögen von elektrischen Isolatoren wie z. B. Keramiken, Glas und Kunststoffen. Insbesondere unpolare Kunststoffe wie PE und PP sind weitestgehend transparent. Polare Kunststoffe, wie PA weisen hingegen eine relativ starke Absorption auf. Wasser und elektrisch leitfähige Materialien (z. B. Metalle) können von THz-Wellen kaum oder nicht durchdrungen werden und wirken als Spiegel. Da THz-Strahlung nicht ionisierend und somit für den Menschen unbedenklich ist, kann generell auf eine Abschirmung der Versuchsanordnung verzichtet werden.

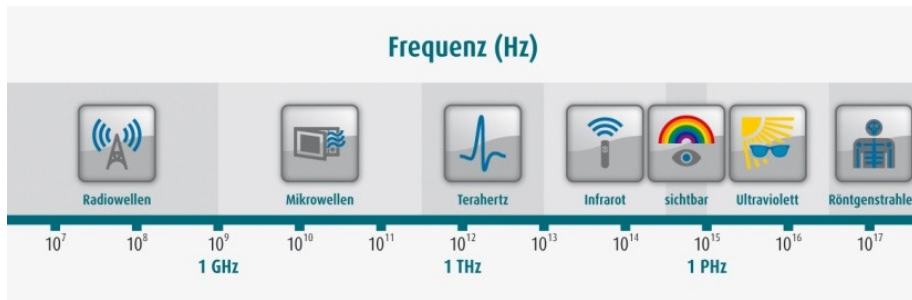


Abbildung 1: Lage des THz-Bereichs im elektromagnetischen Spektrum

THz-Signale werden typischerweise kohärent detektiert. Neben der Intensität steht somit auch die Phaseninformation zur Verfügung. Hieraus ergeben sich Absorptionskoeffizient und Brechungsindex, die polarisations- und wellenlängenabhängig zur Verfügung stehen. Typische Messaufbauten arbeiten entweder in Transmissions- oder Reflexionsgeometrie.

Im Kunststoffbereich ergibt sich eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten. THz-Strahlung bietet sich zur Detektion von Fremdkörpern oder Einschlüssen, zur Schichtdickenmessung oder zur Schweißnahtinspektion in Kunststoffbauteilen an. Auch die Detektion der Füllstoffpartikel- und Molekülkettenausrichtung, die Feuchtigkeitsdetektion sowie die Bestimmung der Dispergiertüte und der Partikelverteilung mittels THz-Strahlen wurden bereits demonstriert [1-6].

THz-Systeme unterscheiden sich grundsätzlich durch die Art der Strahlungserzeugung. Prinzipiell steht eine Reihe von Quellen zur Verfügung [7]. Die gebräuchlichsten sind aufgrund der Lage im elektromagnetischen Spektrum optische laserbasierte Erzeugungsarten, die gepulste oder durchstimmbare cw-THz-Strahlung liefern, oder vollelektronische THz-Systeme [8]. Letztere basieren auf modifizierter hochfrequenter Mikrowellentechnik und sind aufgrund ihrer Robustheit und Messgeschwindigkeit für den industriellen Einsatz prädestiniert. Im Folgenden wird das verwendete vollelektronische THz-System vorgestellt.

2.2 Vollelektronische Terahertz-Systeme

Die vollelektronische THz-Erzeugung und -Detektion basiert gewöhnlich auf modifizierter Hochfrequenz-Mikrowellentechnik. Im Sender erzeugt ein spannungsgesteuerter Oszillator ein cw-Signal im Gigahertzbereich. Dieses wird frequenzvervielfacht und mittels einer Antenne, oft in Verbindung mit einem Hohlraumresonator und einer Hornantenne, abgestrahlt.

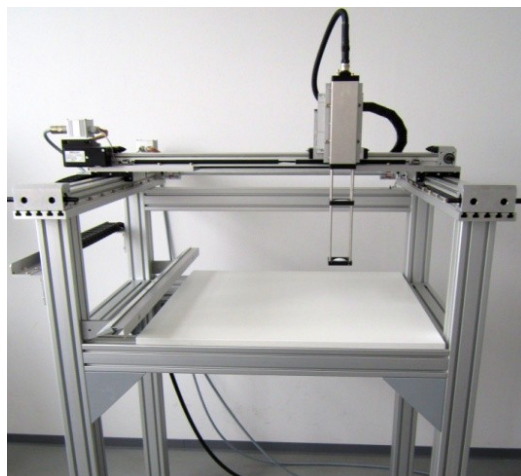


Abbildung 2: Abbildung des verwendeten SynViewScan-Aufbaus mit SynViewHEAD 100.

Die Laufzeit der THz-Strahlung zwischen Sender und Empfänger wird durch die aus der Radartechnik bekannte FMCW-Methode (Frequency Modulated Continuous Wave) bestimmt. Hierbei erfährt die ausgesendete THz-Frequenz einen Sweep. Am Empfänger steht die gesendete Frequenz als Referenz bereit. Aus der Frequenzdifferenz zwischen empfangenen THz-Signal und der Referenz berechnet sich zusammen mit der Steigung der Frequenzrampe die Laufzeit des THz-Signals.

Die hier vorgestellten Messungen wurden mit einem SynViewScan 100 der Firma SynView GmbH durchgeführt, der in Abbildung 2 gezeigt ist. Dieser besteht aus einer Sender-/Empfängereinheit SynView HEAD 100, der auf einem xy-Scantisch installiert ist und bei einer mittleren Frequenz von 0,1 THz arbeitet. Die abscannbare Fläche beträgt $0,65\text{ m} \times 0,65\text{ m}$ und kann bei typischen Rasterpunktabständen von 1 mm in etwa 30 min gescannt werden. Der Scanner arbeitet in Reflexionsgeometrie. Die abgestrahlte THz-Strahlung wird von PE-Linsen erst kollimiert und dann auf den Probekörper fokussiert. Der THz-Strahl wird an allen Grenzflächen reflektiert, an denen sich der Brechungsindex ändert (Luft/Material, Material/Material). Der rückreflektierte Anteil wird durch den Messkopf detektiert. Aus der Laufzeit der Rückreflexe ergibt sich die Tiefeninformation der Grenzfläche, was in Kombination mit dem Rasterscan eine 3D-Reflexionsmessung des Probekörpers ermöglicht. Typische Daten einer Reflexionsmessung an einem einfachen Probekörper sind in Abbildung 3 c) dargestellt.

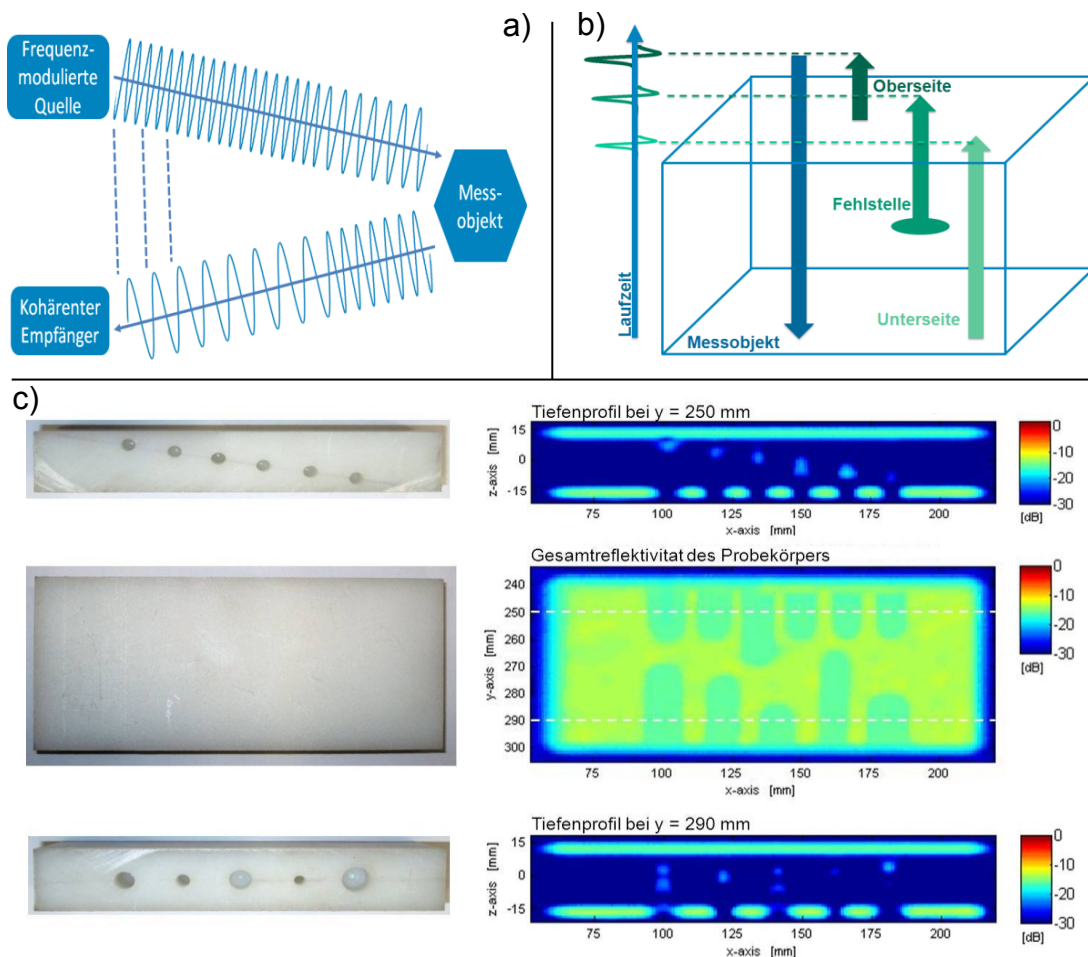


Abbildung 3: Darstellung der Funktionsweise des vollelektronischen THz-Systems: a) FMCW-Prinzip: Die Quelle sendet ein frequenzmoduliertes cw-THz-Signal aus, das vom Messobjekt reflektiert wird. Der Empfänger ermittelt den Frequenzunterschied zwischen empfangenen und gerade gesendeten Signal, woraus die Laufzeit bestimmt wird. b) Messprinzip Schema: Die THz-Strahlung wird vom Probekörper an Ober- und Unterseite sowie Fehlern und Materialgrenzschichten im Probekörper reflektiert. Mittels der Laufzeitinformation wird jedes Signal einer Tiefenebene zugeordnet. c) Exemplarische Messungen an einem PE-Probekörper mit Bohrungen (links Foto, rechts: THz-Bild).

Rein physikalisch ist die minimale Fokusgröße, welche die laterale Auflösungsgrenze bestimmt, auf etwa die halbe Wellenlänge begrenzt. Im verwendeten Aufbau liegt die Fokusgröße mit etwa 3 mm im Bereich der Wellenlänge. Die Fokusgröße wurde aus der reflektierten THz-Aktivität beim Scannen einer Metallkante ermittelt.

3. Messungen an Glasfaserverbundkunststoffen

3.1 Fehler und Einschlüsse

Abbildung 4 a) zeigt ein Freiformbauteil, das eine Reihe von Material- und Lufteinschlüssen aufweist. Die mittlere Wandstärke beträgt 5 mm. Das Bauteil wurde aus Epoxidharz mit Glasfasern (Biaxialgelege, Gewebe) als Handlaminat mittels Vakuuminfusionstechnik hergestellt. Abbildung 4 b) ist ein Falschfarbenbild, in dem die insgesamt detektierte THZ-Reflektivität dargestellt ist. Der Lufteinschluss sowie einige der Materialeinschlüsse sind klar erkennbar (Geldstück, Aluminiumfolie, Schaum, Holzspatel). Der Latex- und Basaltschnipsel sind nicht erkennbar. Die Wirrfasermatte ist nur durch eine Umrandung auszumachen, die auch bei anderen Einschlüssen zu sehen ist. Diese stammt von mit Aerosil gedicktem Harz, das für eine Kantenanpassung um die Materialien eingebracht wurde.

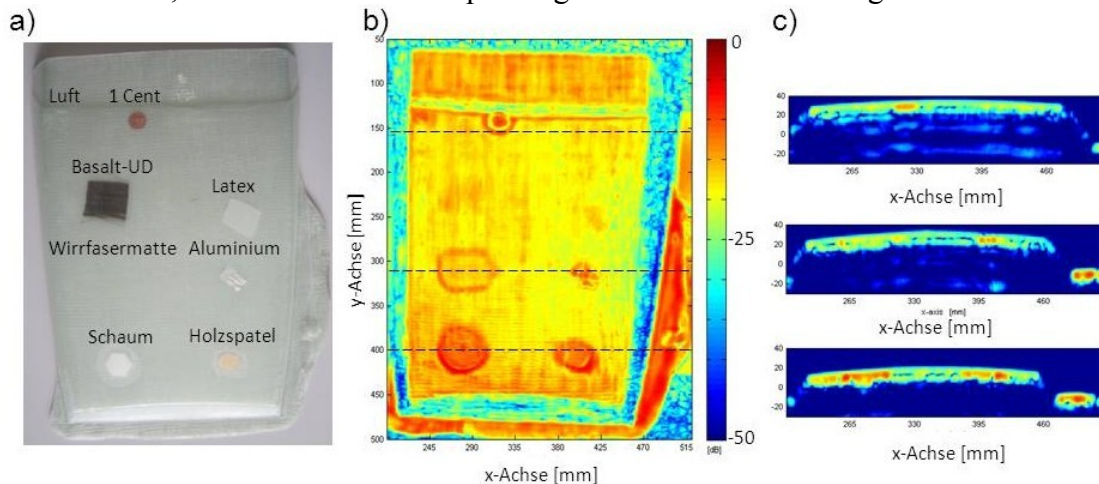


Abbildung 4: Freiformbauteil mit Luft- und Materialeinschlüssen: a) Foto, b) Gesamtreflektivität in Draufsicht, c) Profile der in der Draufsicht gekennzeichneten Schnitte.

Entscheidend dafür, ob ein Fehler oder Einschluss detektiert werden kann, ist der an der Grenzschicht Faserverbund/Einschluss hervorgerufene Reflexionsgrad des THz-Signals. Elektrisch leitende Materialien wie Aluminium und Kupfer sind ideale THz-Spiegel und somit in den THz-Aufnahmen gut erkennbar. Bei nichtleitenden Materialien hängt die Reflektivität an der Grenzschicht nach den Fresnelschen Formeln hauptsächlich vom Brechungsindexunterschied ab. Dieser ist zwischen Luft und Material relativ groß, weswegen Lufteinschlüsse sowie Schaumstoff, der im Wesentlichen eine Luftschicht darstellt, gut detektierbar sind, insofern der Einschluss eine ausreichend große flächige Ausdehnung aufweist. Hierauf wird später noch näher eingegangen. Das Basalt, Latex und die Wirrfasermatte sind in Ihrem Brechungsindex der Faserverbundstruktur jedoch sehr ähnlich, so dass sie höchstens als leichter Schatten wahrnehmbar sind.

Aus den Tiefenschnitten in Abbildung 4 c) ist zudem ersichtlich, dass die Schärfentiefe die Materialschicht kaum auflösen kann. Aufgrund des im Material vorherrschenden Brechungsindex ist die Lichtgeschwindigkeit deutlich langsamer als in Luft, weswegen die Schichtdicke größer als in Realität dargestellt wird. Des Weiteren ist ersichtlich, dass nur von Ebenen senkrecht zur Einfallrichtung des THz-Strahls ein Signal detektiert wird.

Abbildung 5 zeigt ein Glasfaserkunststoff-(GFK)-Bauteil mit einer Schichtdicke von 22 mm. In dieses wurden konische und Flachbodenbohrungen eingebracht, welche Fehler simulieren sollen. Durchmesser und Bohrtiefe wurden hierbei variiert. Im Gegensatz zu Messungen an homogenen Kunststoffen (vgl. Abbildung 3) weist das Tiefenprofil starke Schwankungen in der Reflektivität auf, die durch die Vielzahl von Grenzschichten Glasfaser/Epoxidharz entstehen. Um einen Fehler in einer Tiefenebene sicher nachweisen zu können, muss dessen Reflektivität über diesem Hintergrundsignal liegen. Bei Durchsicht der Messebenen zeigt sich, dass keine der konischen Bohrungen senkrecht zur Probekörperoberfläche sowie der Bohrungen parallel zur Oberfläche detektiert werden können. Die meisten der nahe an der Oberfläche liegenden Flachbodenbohrungen sind identifizierbar. Mit zunehmenden Abstand zur Oberfläche sowie abnehmenden Durchmesser nimmt die Detektierbarkeit ab und das Reflexionssignal einiger Bohrungen verschwindet im Hintergrundsignal. Bei Betrachtung der Tiefenebene der Bauteilrückseite sind Bohrlöcher durch die verminderte Reflektivität klar erkennbar. Auch die Bohrungen parallel zur Oberfläche werden in diese Ebene projiziert und setzen sich durch eine verminderte Reflektivität ab.

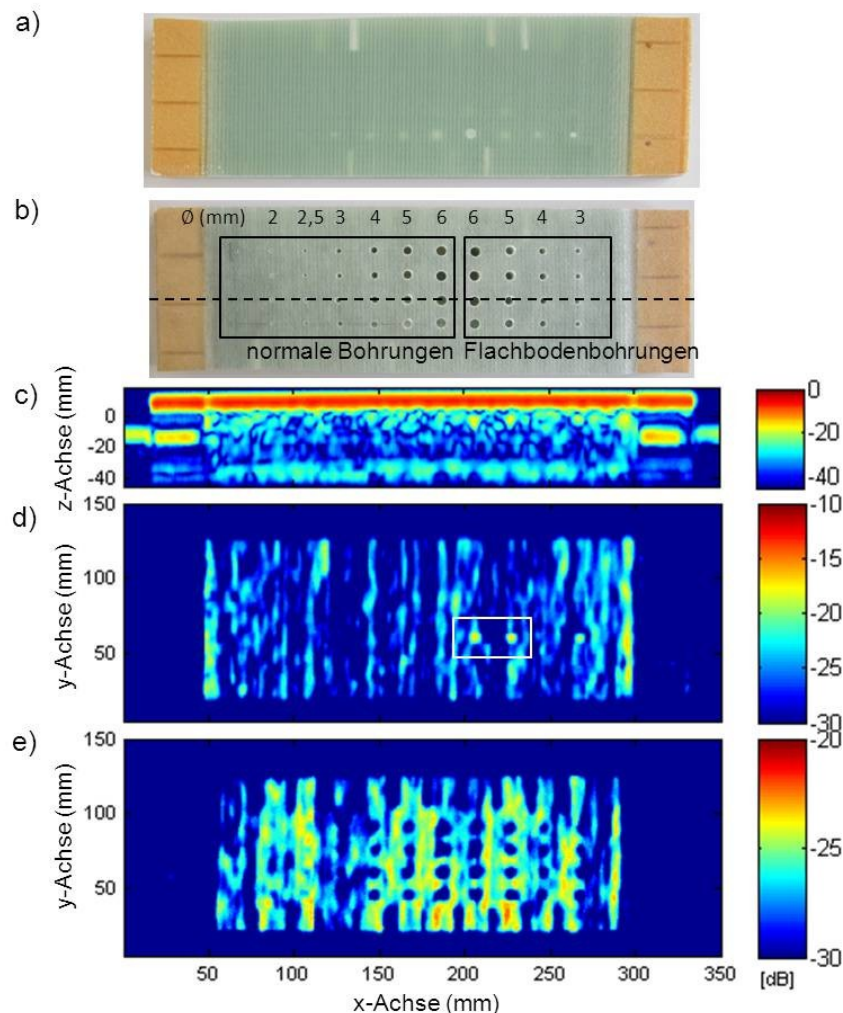


Abbildung 5: Dickwandiges GFK-Laminat aus Epoxidharz und unidirektionalem Glasfaserlege, das auf dünnes Glasfaserfließ aufgenäht ist. In den Probekörper wurden vertikale und horizontale Bohrungen eingebracht. a) Foto Probenoberseite, b) Foto Probenunterseite mit Bohrungen unterschiedlichen Durchmessers und Tiefe, c) Tiefenprofil des in b) gekennzeichneten Schnitts, d) Reflektivität der Ebene 4 mm unter der Oberfläche. Der weiße Kasten markiert das Signal der Flachbodenbohrungen mit 6 mm (links) und 5 mm (rechts) Durchmesser. Die maximale Signalamplitude beträgt -16 dB und -19 dB. e) Reflektivität der Rückseite.

3.2 Faserausrichtung

Die Ausrichtung der Fasern in Faserverbundstrukturen ist entscheidend für die mögliche Zugbelastung. Die Detektion einzelner Rovingstränge in einer Epoxidharzmatrix ist möglich, wie in Abbildung 6 a) zu sehen. Die Intensitätsverteilung entlang der Rovings ist nicht gleichmäßig. Die Ausrichtung ist jedoch klar erkennbar und die Rovings sind voneinander unterscheidbar. Abbildung 6 b) und c) zeigen Aufnahmen von Probekörpern, in die nur eine einzelne Glasfaserplatte eingelegt wurde.

In Abbildung 6 b) wurde ein bidirektionales Glasfasergewebe eingearbeitet, in dem die Breite der Rovings etwa 4 mm beträgt und aus dem ein Roving entfernt wurde. In der THz-Aufnahme ist die Ausrichtung des Gewebes anhand der parallel und senkrecht zu den Bildkanten verlaufenden Strukturierung erkennbar. Einzelne Rovings sind nicht erkennbar. Dies ist jedoch auch nicht zu erwarten, da die im Aufbau erreichte Fokusgröße im Bereich der Fadenbreite liegt. Die bedeutend kleineren Abstände zwischen Rovings können somit nicht aufgelöst werden. Beim Abscannen der Probe senkrecht zu einer Rovingrichtung ergeben sich aufgrund von Inhomogenitäten des Gewebes in dieser Richtung (u. a. Wechsel Roving-Roving, leicht elliptische Form der Rovings) Schwankungen in der Reflektivität, was die zuvor angesprochene Strukturierung hervorruft. Somit ist die Ausrichtung des Gewebes detektierbar. Eine ähnliche Strukturierung ist beispielsweise auch in der zuvor vorgestellten THz-Messung des Freiformbauteils zu sehen (vgl. Abbildung 4). Der fehlende Roving in Abbildung 6 b) ist zudem schwach durch die in diesem Bereich leicht verminderte Reflektivität erkennbar.

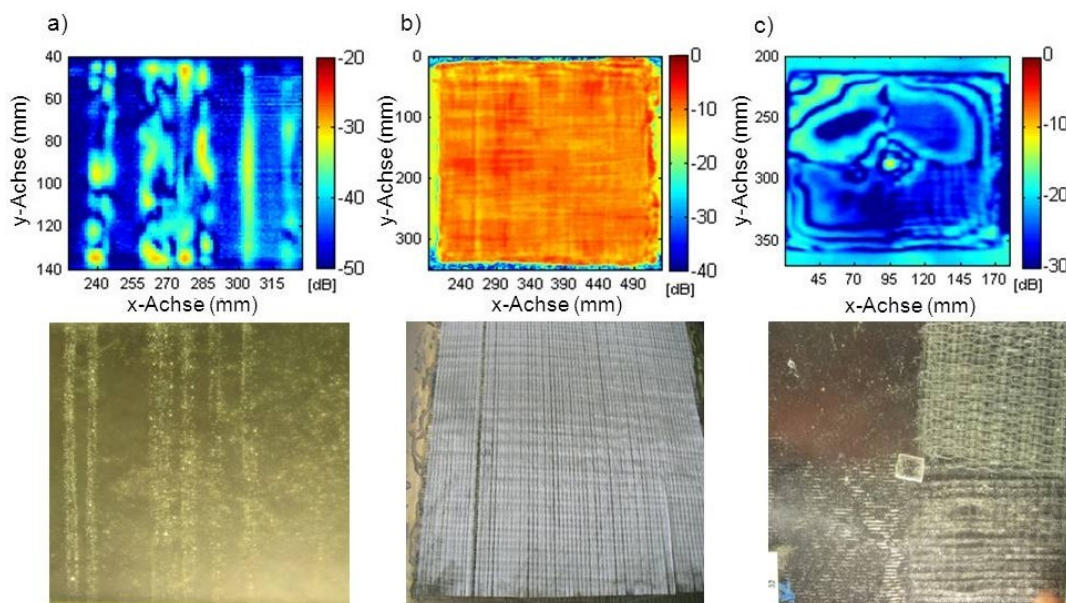


Abbildung 6: a) Einzelne Glasfaserrovings in Epoxidharz, b) Glasfasergefülltes Laminat mit fehlendem Roving in Epoxidharz, c) Glasfasergelege und Gewebe mit unterschiedlichen Rovingbreiten in Epoxidharz, jeweils THz-Aufnahme (oben) und Foto (unten).

In Abbildung 6 c) ist ein Probekörper gezeigt in dem drei Gewebe sowie ein Gelege verwendet wurden. Diese weisen Fadenbreiten von etwa 1 bis 4 mm auf. In der THz-Aufnahme kann nur die Faserausrichtung des Gewebes mit der größten Fadenbreite bestimmt werden. Bei den anderen Geweben/Gelegen liegt die Breite deutlich unter dem Fokusbereich. Variationen in der Reflektivität können somit nicht detektiert werden, da die gemessene Reflektivität von einer Vielzahl von Rovings im Fokus stammt und Schwankungen somit ausgemittelt werden.

Im nächsten Schritt stellt sich die Frage, inwiefern die Faserausrichtung auch in dicken mehrlagigen GFK-Bauteilen detektiert werden kann. Betrachtet man hierzu die THz-

Messungen in Abbildung 5, so ist hier ebenfalls klar eine Strukturierung erkennbar, die eine vertikale Vorzugsrichtung aufweist. Dies stimmt mit der Ausrichtung des verwendeten unidirektionalen Glasfasergeleges überein.

Um allgemeinere Aussagen über die Detektion der Faserorientierung in dickwandigen GFK-Bauteilen treffen zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig. Insbesondere sollte hierbei genauer untersucht werden, wie die systembegrenzte Schärfentiefe die Detektionsfähigkeit unterschiedlicher Gewebeausrichtungen beeinflusst und wo hinsichtlich der Ausrichtung die Detektionsgrenze in Abhängigkeit der Rovingbreite in ein- und mehrschichtigen Systemen liegt.

4. Abschätzung der Detektionsgrenze

In diesem Abschnitt wird eine einfache Methode vorgestellt, mit der untersucht werden kann, welche Fehler oder spezifische Materialeigenschaften bei einem bestimmten Material prinzipiell noch orts aufgelöst detektiert werden können.

Zuvor wurde bereits das optische Auflösungsvermögen erwähnt. Hierunter versteht man nach Rayleigh die Distanz, die zwischen zwei Punktlichtquellen (in unserem Fall Punkte, von denen Reflexion ausgeht) gegeben sein muss, um diese gerade noch voneinander unterscheiden zu können. Im vorliegenden Fall ist es jedoch entscheidend, wann sich ein Fehler im gemessenen Signal stark genug abhebt, um detektiert werden zu können.

Ausgangspunkt ist hierfür die Instrumentenantwort des Systems bei Messungen an ideal reflektierenden größenabhängigen Fehlern. Hierfür wurden Messungen an zylinderförmigen Metallkörpern durchgeführt, die eine ebene Stirnfläche und Durchmesser von 1 bis 6 mm aufweisen. Hierbei wurde auch die Position entlang der optischen Achse variiert. Exemplarische Messungen sind in Abbildung 7 gezeigt. Hieraus wird ersichtlich, dass prinzipiell auch Fehler, die bedeutend kleiner als der Fokusbereich sind, detektiert werden können. Entscheidend für eine Detektion ist, dass das reflektierte Signal oberhalb der Detektionsschwelle liegt und sich vom Umgebungssignal abhebt.

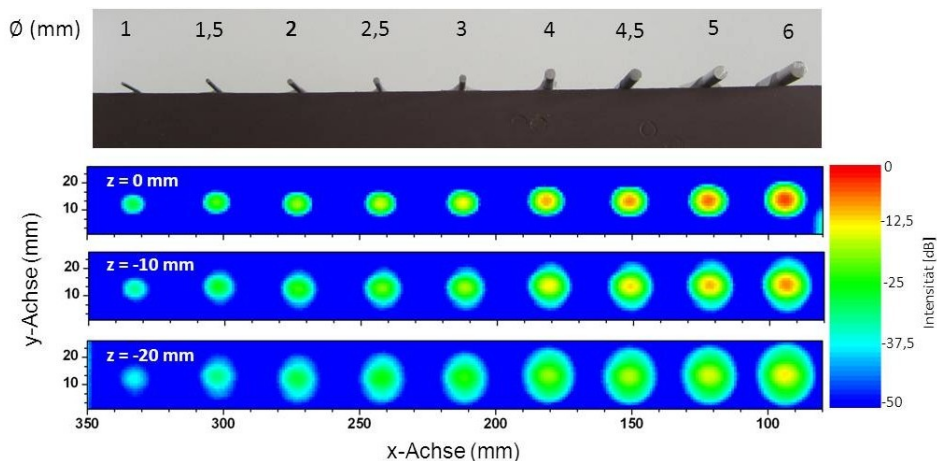


Abbildung 7: Instrumentenantwort des THz-Systems bei Messung an zylinderförmigen Metallkörpern mit ebener Stirnfläche und Durchmessern von 1 bis 6 mm, aufgenommen in der idealen Fokusebene ($z = 0$ mm) sowie 10 mm und 20 mm davon entfernt.

Sind nun Absorptionskoeffizient und Brechungsindex eines Probekörpers bekannt, kann mittels der zuvor vorgestellten Messungen auf das detektierte Signal eines idealisierten ebenen Fehlers geschlossen werden. Für eine Flachbodenbohrung ergibt sich die ideale detektierbare Intensität, indem man für den entsprechenden Durchmesser und die Tiefenebene die Instrumentenantwort mit den Transmissionskoeffizienten für Ein- und Austritt an der Bauteiloberfläche mit dem Reflexionskoeffizienten an der Grenzschicht Materi-

al/Bohrung multipliziert. Zusätzlich muss noch entsprechend dem Lambert-Beerschen Gesetz die Abschwächung der THz-Strahlung beim Durchlaufen des Bauteils berücksichtigt werden. Die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten ergeben sich aus den Fresnel'schen Formeln.

Abbildung 8 zeigt den hiermit gewonnenen Verlauf des THz-Signals für ein Polyp-ropylen-(PP)-Bauteil sowie für das GFK-Bauteil aus Abbildung 5. Dargestellt wird hierbei der Signalverlauf für Reflexion an Vorder- und Rückseite sowie an ebenen Fehlern mit unterschiedlichen Durchmessern. Der Brechungsindex und die Absorptionskonstante wurden experimentell für den PP-Block zu $n_{PP} = 1,52$ und $\alpha_{PP} = 0,05 \text{ cm}^{-1}$ sowie für das GFK-Bauteil zu $n_{GFK} = 2,2$ und $\alpha_{GFK} = 0,85 \text{ cm}^{-1}$ bestimmt.

Die simulierten Werte stimmen gut mit Messungen überein. Im Gegensatz zu dem sehr homogenen PP-Bauteil weist das GFK-Bauteil, wie in Abbildung 5 c) und d) zu sehen, eine sehr inhomogene Reflektivität auf. Aus dem Vergleich dieses Hintergrundsignals mit der modellierten Reflektivität des Fehlers kann eine Aussage über dessen Detektierbarkeit getroffen werden.

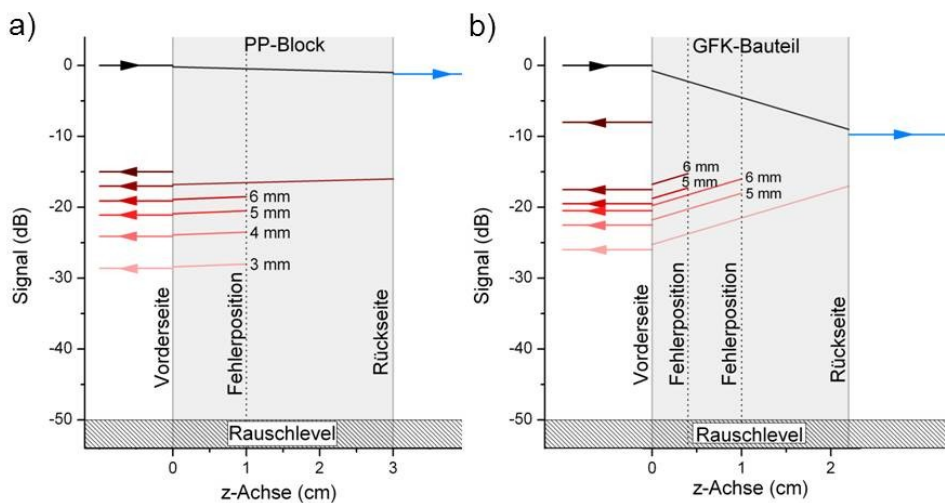


Abbildung 8: Verlauf der modellierten Amplitude des THz-Signals für a) einen PP-Block und b) das in Abbildung 5 dargestellte GFK-Bauteil. Die Signalamplitudensprünge an den Grenzflächen resultieren aus den Reflexionsgraden.

Die hier vorgestellte Methode lässt sich prinzipiell auf eine Vielzahl von Fehlerbildern anwenden, wie beispielsweise Lunker, Material- und Luftporen. Hierbei müssen gegebenenfalls analog zur vorgestellten Vorgehensweise mehrere Fehlergrenzschichten betrachtet werden. Entscheidend ist in jedem Fall eine sinnvolle Abschätzung der an der Reflektion beteiligten Fläche. Diese kann für Fehler, die keine ebene Oberfläche aufweisen, deutlich reduziert sein, wie z. B. im dem Fall der konischen Bohrungen in Abbildung 5 zu sehen ist.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Detektion von Fehlerbildern und der Faserausrichtung in Faserverbundwerkstoffen mittels eines vollelektronischen THz-Systems untersucht.

Es wurde gezeigt, dass einzelne Glasfaserrovings in Epoxidharz detektiert werden können. Die Detektion der Ausrichtung von Geweben und Gelegen ist unter gewissen Voraussetzungen möglich. Weitergehende Untersuchungen sind notwendig, um zu verstehen, wie die systembegrenzte Schärfentiefe die Detektionsfähigkeit unterschiedlicher Gewebeanrichtungen beeinflusst und wo im Fall der Faserausrichtung die Detektionsgrenze in Abhängigkeit der Rovingbreite in ein- und mehrschichtigen Systemen liegt.

Des Weiteren wurde auf die Detektionsschwelle für Fehlerbilder, wie Luft einschüsse und Hohlräume, in Abhängigkeit von Größe, Tiefe und Material eingegangen. Hierfür wurde auch ein einfaches Modell vorgestellt, mit dessen Hilfe das zu erwartende Signal eines Fehlers vorhergesagt werden kann. Dieses Modell wurde anhand für Bohrungen in einem Probekörper demonstriert. Eine Erweiterung auf eine Vielzahl von Fehlerbildern ist möglich.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass vollelektronische THz-Systeme sehr vielversprechend für die ZfP von Faserverbundkunststoffen sind. Da THz-Messungen zurzeit auf ebene Probekörper begrenzt sind, die freie Formgebung jedoch ein Charakteristikum von Faserverbundkunststoffen ist, sollte die Prüfung von Freiformflächen angegangen werden. Hierfür bietet es sich beispielsweise an den THz-Messkopf mit einem Mehrachsroboter zu koppeln. Solche Aktivitäten sind bereits begonnen.

6. Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17277 N der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das SKZ wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Wir danken dem Fördermittelgeber für die finanzielle Unterstützung.

Referenzen

- [1] T. Hochrein, N. Krumbholz, S. Wietzke, K. Kretschmer, M. Bastian, M. Koch: Terahertz-Spektroskopie zur Schmelzeanalyse in der Compoundierung, GAK Gummi Fasern Kunststoffe 61, 517 (2008).
- [2] H. Quast: 3D-Materialprüfung mit Terahertz und mm-Wellen, DGZfP-Jahrestagung, Münster: 2009.
- [3] S. Wietzke, C. Jördens, C. Jansen, N. Krumbholz, M. Scheller, O. Peters, M. Bastian, B. Baudrit, T. Hochrein, T. Zentgraf, M. Koch, Terahertz-Spektroskopie an der Schwelle zur industriellen Praxis, Kunststoffe 4, 20-24 (2010).
- [4] Johannes Hauck, Dominik Stich, Peter Heidemyer, Martin Bastian, Thomas Hochrein: Industrielle Prozesswanddickenmessung in der Kunststoffrohrextrusion mittels zeitaufgelöster Terahertz-Systeme, DGZfP-Jahrestagung, Dresden: 2013.
- [5] Johannes Hauck, Dominik Stich, Peter Heidemyer, Martin Bastian, Thomas Hochrein: Untersuchung der Bauteileigenschaften von Kunststoffprodukten mittels zeitaufgelöster Terahertz-Spektroskopie, DGZfP-Jahrestagung, Dresden: 2013
- [6] C. Jansen, S. Wietzke, M. Koch: Terahertz Spectroscopy of Polymers, in K.-E. Peiponen, A. Zeitler, M. Kuwata-Gonokami: Terahertz Spectroscopy and Imaging, Springer Series in Optical Science 171, Springer, Berlin: 2013.
- [7] J. R. Freeman, H. E. Beere, D. A. Ritchie: Generation and Detection of Terahertz Radiation, in K.-E. Peiponen, A. Zeitler, M. Kuwata-Gonokami: Terahertz Spectroscopy and Imaging, Springer Series in Optical Science 171, Springer, Berlin: 2013.
- [8] T. Hochrein: Markt, Entwicklung und Stand der Technik der Terahertz-Systeme: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, DGZfP-Jahrestagung, Dresden: 2013.