

3D-Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mittels vollelektronischer Terahertz-Systeme

Franziska MINOLTS, Stefan KREMLING, Dominik STICH, Peter HEIDEMEYER, Martin BASTIAN, Thomas HOCHREIN SKZ - Das Kunststoff-Zentrum, Friedrich-Bergius-Ring 22, 97076 Würzburg, F.Minolts@skz.de

Kurzfassung. Für den Bereich der Faserverbundstrukturen wird auch für die nächsten Jahre ein stetiges Wachstum prognostiziert. Faserverbundstrukturen erfreuen sich unter anderem wegen der freien Gestaltungsmöglichkeiten in Bezug auf Form und Eigenschaften einer großen Beliebtheit. Dies bedingt auch einen großen Bedarf an Prüfmethoden für die Prozess- und Qualitätsüberwachung. Etablierte zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP-Verfahren) wie Ultraschall, Röntgenmethoden, Thermografie, Shearografie oder Mikrowellen stoßen hierbei jedoch teilweise an ihre Grenzen, sodass entsprechender Bedarf an alternativen Prüfverfahren besteht.

Da die meisten Kunststoffe für Terahertz-(THz)-Strahlung weitgehend transparent sind, bietet diese vergleichsweise neue zerstörungsfreie Prüfmethode einen vielversprechenden Ansatz. Vor allem vollelektronische Systeme zeigen aufgrund ihrer Robustheit und Messgeschwindigkeit ein erhebliches Potential für industrielle Anwendungen. Zudem sind Messungen in Reflexionsanordnung und ohne Ankoppelmedium möglich, was die THz-Technologie von einigen der bereits genannten Prüfverfahren unterscheidet. Des Weiteren können auch hohle Strukturen und Schäume untersucht werden. Bisherige bildgebende THz-Systeme basieren auf planaren XY-Scannern, welche bei der freien Formgebung vieler Bauteile ungeeignet sind.

Wir berichten hier über die Prüfung von 3D-Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen mit einem vollelektronischen THz-System. Das System arbeitet bei 0,1 THz in 0°-Reflexionsgeometrie. Für die Prüfung der Freiformflächen muss der Messkopf so geführt werden, dass eine senkrechte Ausrichtung der THz-Strahlung zur Oberfläche gewährleistet ist. Die Abhängigkeit der Messergebnisse vom Einfallswinkel des THz-Strahls auf die Oberfläche wurde grundlegend untersucht. Hierfür wird ein Roboterprüfstand genutzt. Die abzufahrenden Bahnkurven werden aus den CAD-Konstruktionszeichnungen der Bauteile berechnet. Des Weiteren werden Ergebnisse von Messungen an Freiformflächen mit unterschiedlicher Bauteilgeometrie und diversen Fehlerbildern vorgestellt.

1. Einführung

Die Einsatzgebiete von Faserverbundkunststoffen (FVK) haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Mögliche Beispiele sind unter anderem der Leichtbau im Fahrzeug- und Luftfahrtbereich sowie Rotorblätter für Windkraftanlagen. Ein großer Vorteil dieses Materialsystems liegt vor allem in der freien Formgebung sowie der variablen Festlegung der



Eigenschaften. Diese werden durch die verwendeten Verstärkungsfasern, textile Halbzeuge und das Matrixmaterial aber auch durch den Herstellungsprozess des Bauteils beeinflusst. Darüber hinaus kann das Gewicht im Vergleich zu herkömmlichen Materialien bei gleichbleibenden mechanischen Kennwerten signifikant reduziert werden. Zur Gewährleistung der speziellen Eigenschaften ist es zwingend notwendig, die Qualität des erzeugten Verbundwerkstoffes zu überprüfen.

Hierbei fehlt es zum Teil noch an anwendungsgerechten Prüfmethoden zur Überwachung der Bauteilqualität und des Herstellungsprozesses. Momentan werden vor allem zerstörende Prüfverfahren zur Bestimmung der Materialkennwerte angewendet. Jedoch können nur stichprobenartig Aussagen z. B. über Fehlstellen im Bauteil getroffen werden, welches bei der Prüfung zudem zerstört wird. Eine zerstörungsfreie Prüfung weist hier offensichtliche Vorteile auf und ermöglicht eine 100 %-Kontrolle. Aktuell wurden unterschiedliche ZfP-Verfahren erprobt, welche jedoch teils verschiedene Nachteile aufweisen. Ultraschallwellen werden an geschäumten Strukturen und bei Lufteinschlüssen stark dämpft. Außerdem ist meist ein Koppelmedium notwendig [1,2]. Röntgenstrahlen müssen aufgrund ihrer ionisierenden Strahlung aus Sicherheitsgründen abgeschirmt werden und die Systeme sind bezüglich Mobilität und Messvolumen meist stark eingeschränkt. Des Weiteren ist ein beidseitiger Probenzugang notwendig [3]. Thermografie hat aufgrund der spezifischen Wärmeleitfähigkeit von FVK eine geringe Eindringtiefe. Dies führt zu einer Abnahme der Messgenauigkeit bei zunehmender Fehlertiefe und reduzierter Fehlergröße im Bauteil [4]. Auch bei Shearografie ist die Auflösung von Defekten abhängig von der Tiefenlage eingeschränkt [5]. Mikrowellen sind aufgrund der Wellenlänge im Zentimeterbereich in der lateralen Auflösung begrenzt [6].

Hier bietet die THz-Technologie einen Ansatz zur zerstörungsfreien und berührungslosen Prüfung, welcher zudem nicht gesundheitsgefährdend ist. Diese im Kunststoffbereich vielversprechende ZfP-Methode bietet vor allem bei vollelektronischen Systemen aufgrund der Robustheit und der hohen Messgeschwindigkeit ein großes Potential für industrielle Anwendungen. Wie im folgenden Abschnitt aufgezeigt wird, bieten THz-Systeme einige Alleinstellungsmerkmale, die sie von anderen ZfP-Methoden abheben.

In diesem Beitrag erfolgt eine Evaluierung des Potentials von vollelektronischen THz-Systemen zur Messung an Freiformflächen von Faserverbundbauteilen. Aufgrund der 0°-Reflexionsgeometrie muss das Signal immer senkrecht zur Oberfläche einfallen, um optimale Messergebnisse zu erhalten. Hierbei kommt ein Roboterprüfstand zum Einsatz. Anhand von Messungen an Freiformflächen mit unterschiedlicher Geometrie wird das Potenzial der 3D-Messung aufgezeigt. Des Weiteren erfolgt ein Vergleich zu Messungen in planarer Messanordnung.

2. Grundlagen

2.1 THz-Technik

THz-Wellen oszillieren mit Frequenzen von 100 GHz bis zu 10 THz und können daher entweder als sehr hochfrequente Mikrowellen oder sehr langwellige Infrarotstrahlung angesehen werden (vgl. Abbildung 1). Dielektrische Materialien können von THz-Strahlen gut durchdrungen werden. Ein Großteil der Kunststoffe wirkt daher äußerst transparent. Auch viele Gläser, Keramiken oder auch Silizium sind für die Strahlen transparent und dienen daher häufig als optische Komponenten im THz-Bereich [7]. Wasser, Metalle und leitfähige Materialien können von THz-Wellen kaum oder nicht durchdrungen werden. Die Sensitivität gegenüber Wasser eröffnet aber neue Möglichkeiten zur präzisen Detektion des Wassergehalts [8]. Zudem sind die THz-Strahlen nicht ionisierend. Es kann auf eine Abschirmung verzichtet werden. Außerdem ist es möglich, neben Transmission- auch in Reflexionsanordnung zu messen. Ein einseitiger Probenzugang ist somit für solche Messsysteme ausreichend.



Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum: Der THz-Bereich liegt zwischen Mikrowellen und Infrarot.

2.2 THz-Eigenschaften

Aufgrund ihrer Eigenschaften lassen sich THz-Wellen im Kunststoffbereich vielseitig einsetzen. So können mit THz-Messungen entsprechende Materialeigenschaften wie Brechungsindex und Absorption, (verborgene) Unregelmäßigkeiten und Defekte sowie innere Strukturen charakterisiert werden [9-12] Zudem sind Messungen in geschäumten und luftgefüllten Proben möglich [2]. Des Weiteren können THz-Wellen zur Wand- und Schichtdickenmessung in der Kunststoffextrusion eingesetzt werden [2,14]. Bei der Detektion von Fehlstellen und Materialeinschlüssen ist der Brechungsindex im Vergleich zum umgebenden Material entscheidend. Hierbei beschreiben die Fresnel´schen Formeln die Reflexion und Transmission einer elektromagnetischen Welle an einer Grenzschicht. Abgesehen vom Bereich der Kunststoffe findet die Technologie auch Anwendung in der Sicherheitstechnik [15,16], der Lebensmittelindustrie [17] oder der Medizin [8]. Die Verwendung von mehreren Sender- bzw. Empfängermodulen ermöglicht auch die Realisierung von THz-Tomografie-Systemen [19,20].

2.3 Vollelektronische THz-Systeme

Vollelektronische THz-Systeme kommen ohne laser- und faseroptische Komponenten aus und zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit und Industrietauglichkeit aus. Die Erzeugung erfolgt auf Basis von Hochfrequenztechnik auf rein elektronischem Weg. Hierbei dient ein spannungsgesteuerter Oszillator zur Erzeugung von Mikrowellen. Diese werden mit einem Frequenzvervielfacher in den THz-Spektralbereich transformiert und über eine Antenne ausgekoppelt. Somit ist eine Richtwirkung der Strahlung, welche durch den charakteristischen Abstrahlwinkel beschrieben wird, möglich. Die Polarisation der Strahlung, welche durch die zeitliche und örtliche Lage der elektrischen und magnetischen Feldstärke definiert wird, wird hauptsächlich durch die Antennengeometrie bestimmt. Ist die Polarisation linear, so stehen beide Feldvektoren und die Ausbreitungsrichtung senkrecht zueinander und sind konstant [21].

Das THz-Messsystem arbeitet nach dem Prinzip der frequenzmodulierten Dauerstrichmethode (FMCW). Hierbei sendet der Messkopf ein frequenzmoduliertes Signal aus, welches am Objekt reflektiert wird (vgl. Abbildung 2 a). Der hier verwendete Messkopf arbeitet mit Frequenzen im Bereich von 0,07 bis 0,11 THz. Das reflektierte Signal wird anschließend vom Messkopf detektiert. Um im Dauerstrichbetrieb messen zu können, wird ein Frequenzsweep in Form einer sich periodisch wiederholenden Frequenzrampe des Sendesignals angelegt. Aufgrund der endlichen Signallaufzeit des reflektierten THz-Signals kommt es zu einer Frequenzverschiebung zwischen dem momentanen Sende- und Empfangssignal (vgl. Abbildung 2 b). Durch eine kohärente Detektion ist es möglich, ortsaufgelöste Informationen in Ausbreitungsrichtung zu erhalten. Die Messzeit pro Messpunkt beträgt in etwa 100 μ s. Durch die schnelle Datenerfassung ist das System für die 2D/3D-Bildgebung hervorragend geeignet.



Abbildung 2: Darstellung der Funktionsweise eines vollelektronischen THz-Systems: a) FMCW-Prinzip: Die Quelle sendet eine frequenzmodulierte Welle aus, welche am Messobjekt reflektiert und vom kohärenten Empfänger detektiert wird. b) Das Sendesignal (dunkelblau) wird mit einer periodischen Frequenzrampe moduliert. Das reflektierte Empfängersignal (hellblau gestrichelt) ist in Laufzeit und Frequenz verschoben.

3. Versuchsdurchführung

3.1 THz-Prüfstand

Für optimale Messergebnisse ist eine senkrechte Ausrichtung des THz-Messkopfes zur Bauteiloberfläche maßgeblich. Ist dies nicht der Fall, so kommt es zu Reflexionsverlusten am Bauteil und somit zu geringerer Signalintensität. Zudem ist ein konstanter Abstand zur Oberfläche notwendig, sodass sich der Fokuspunkt immer in derselben Schichttiefe des Bauteils befindet. Nur so können Aussagen über die exakte (Tiefen-)Lage von Fehlstellen getroffen werden.



Abbildung 3: Fotografien des THz-Prüfstandes: a) Sicherheitseinhausung mit Roboter in hängender Anordnung abgebildet, b) Messkopf, welcher über eine Adapterplatte am Roboter angebracht ist, während einer Messung an einem planaren Probekörper.

Um dies zu gewährleisten, ist der Messkopf an einem 6-Achs-Roboter (Firma Mitsubishi) angebracht. Der Roboterarm hat eine Reichweite von 900 mm und eine Tragkraft von 6 kg. Aus Gründen des Arbeitsschutzes ist das Robotersystem mit einer entsprechenden Sicherheitseinhausung versehen. Die Probe kann im Arbeitsbereich einfach ausgerichtet und fixiert werden. An der Werkzeugaufnahme des Roboters sind Linsen und Spiegel zur Strahlführung angebracht. Die Geometrie ist so gewählt, dass ein Spiegel das THz-Signal um 90 ° umlenkt und der Fokuspunkt des THz-Signals so in der Verlängerung der sechsten Achse des Roboters liegt. Zudem ermöglicht eine zusätzliche Aluminiumleiste an der Einhausung das automatische Kalibrieren des Messkopfes. Mit dem Messsystem sind sowohl Messungen an planaren Probekörpern mit einer linearen Verfahrgeschwindigkeit von 50 mm/s möglich, als auch Messungen an Freiformflächen, wobei das Bauteil punktweise abgerastert wird.

3.2 Erstellung der Bahnkurven

Für jede Bauteilgeometrie wird eine individuelle Bahnkurve erstellt, welche der Roboter für die Messungen an Freiformflächen benötigt. Voraussetzung sind jeweils CAD-Konstruktionszeichnungen des Bauteils. Mit Hilfe der Toolbox MelfaWorks für SolidWorks von Mitsubishi können diese Bahnkurven einzeln definiert werden. Da dieses Tool jedoch nur Kanten an Bauteilen erkennt, werden die CAD-Daten noch mit Schnitten im gewünschten Raster der Bahnkurven ergänzt.



Abbildung 4: Erstellen der Bahnkurven in SolidWorks: a) Konstruktionszeichnung der Hutze, b) Roboter während der Erstellung der Bahnkurven im vorderen Teil der Hutze.

In einer virtuellen Arbeitsumgebung, welche den vorhandenen Prüfstand simuliert, wird das Bauteil ausgerichtet. Zur Definition der Bahnkurven wird jedes einzelne Segment ausgewählt und zu einer Kurve zusammengefügt. Abbildung 4 zeigt die hierfür benötigte Konstruktionszeichnung sowie den Roboter mit Werkzeugaufnahme bei der Erstellung der Bahnkurven. Diese lassen sich anschließend exportieren. In der virtuellen Arbeitsumgebung ist es zudem möglich, die Bewegungsabläufe des Roboters zu verfolgen. Somit lassen sich schon im Voraus mögliche Kollisionen des Messkopfes mit dem Roboter, dem Bauteil oder der Einhausung ausschließen.

Die so definierten Bahnkurven werden anschließend noch zu einer Ablaufdatei zusammengefügt. Hierfür steht eine Matlab-Routine zur Verfügung, welche die Daten in ein für den Roboter lesbares Format umwandelt.

3.3 Herstellung der Probekörper

Für die Herstellung der Freiform-Probekörper wurden Formen mit unterschiedlicher Geometrie eingesetzt. Die Herausforderung bei der Fertigung besteht darin, die Faserlänge der textilen Halbzeuge zu erhalten, möglichst wenige Teilstücke zu verwenden, die Symmetrie und Optik zu wahren und jede Lage faltenfrei zu legen. Hier bewusst eingebrachte Fehlstellen haben einen Einfluss auf die mechanischen Kennwerte und die Optik des späteren Bauteils.

Bei der Herstellung wird auf die gesäuberte Form zunächst ein Trennmittel aufgetragen, welche das Entformen am Ende des Prozesses sichert. Anschließend werden die zugeschnittenen Faserhalbzeuge passgenaus auf dem Formgebungswerkzeug drapiert und mit Hilfe von Bindemitteln fixiert. Ist die vollständige Anzahl der Lagen erreicht, so werden Abreißgewebe und Hilfsstoffe wie z. B. Fließhilfen und Harzzuleitungen appliziert. Das Bauteil ist somit für die Vakuuminfusion vorbereitet.

Das VARI- bzw. Vakuuminfusionsverfahren ist ein häufig eingesetztes Verfahren. Es ermöglicht eine zügige und gleichmäßige Durchtränkung von großen Flächen mit dem Harz. Der gesamte Formenaufbau wird hierzu mit einer Folie überspannt und abgedichtet. Über eine Pumpe wird ein Vakuum erzeugt. Ist der gewünschte Unterdruck aufgebaut, so werden die Leitungen geöffnet und der Aufbau mit Harz getränkt. Überschüssiges Harz sammelt sich dabei sich am Bauteilrand. Um dies abzuführen, sind mit einer Harzfalle versehene Schläuche vorhanden. Nach vollständiger Durchtränkung des Bauteils wird der Harzzufluss gestoppt. Das Vakuum muss jedoch bis zur vollständigen Aushärtung des Bauteils erhalten werden. Kommt es zum Zusammenbruch des Vakuums vor der vollständigen Aushärtung, so entstehen Lufteinschlüsse im Laminataufbau, was die Bauteileigenschaften negativ beeinflusst.

Vorteil dieses Herstellungsverfahrens ist die hohe Qualität der Proben. Bei einem dichten Vakuumaufbau entstehen keine Lufteinschlüsse im Material. Das Harz-Faser-Verhältnis im Bauteil ist gleichmäßig und die Qualität reproduzierbar.

4. Ergebnisse

4.1 Abhängigkeit des Einfallwinkels

Trifft das THz-Signal auf eine Grenzfläche zwischen zwei dielektrischen Medien mit unterschiedlichen Brechungsindizes, so kommt es zur teilweisen Reflexion und Transmission. Wie bereits oben beschrieben, arbeitet der THz-Messkopf in 0°-Reflexionsgeometrie. Um abschätzen zu können, bis zu welchem Winkel noch genug Intensität zurück zum Empfänger reflektiert wird, wurden Messungen an einer Kunststoffplatte aus Polypropylen (PP) vorgenommen. Hierbei wurde der Einfallwinkel des THz-Signals auf die Oberfläche der Platte durch ein Drehen des Roboters variiert. Der Fokuspunkt, d. h. der Abstand zwischen Bauteil und Messsystem, blieb konstant an einem Punkt. Diese Messung wurde mit drei unterschiedlichen Fokusebenen durchgeführt: auf der Oberfläche der Platte sowie mit einer Tiefe von 5 bzw. 10 mm unter der Oberfläche.



Abbildung 5: Abschätzung des maximalen Einfallswinkel des THz-Signals zur Oberfläche des Messobjekts: Dargestellt ist die Intensität des Signal der Oberfläche in Abhängigkeit vom Einfallswinkel.

Abbildung 5 stellt die Intensität des an der Oberfläche der Platte reflektierten THz-Signals aufgetragen über den Einfallwinkel dar. Der Einfallswinkel ist als Winkel zwischen der Flächennormalen des Bauteils und dem THz-Signal definiert. Wie zu erwarten, ist die Intensität bei senkrechtem Einfall maximal und nimmt mit zunehmendem Einfallwinkel ab. Im Bereich von +/- 5° ist die Intensität im Vergleich zum Maximum lediglich um -2 dB abgefallen. Hier sind noch optimale Ergebnisse zu erwarten. Ab einem Signal von -35 dB geht das Messsignal im Rauschen unter. Als untere Intensitätsgrenzen zur eindeutigen Bestimmung von Messsignalen werden daher -30 dB angenommen. Betrachtet man die Einfallswinkel in diesem Bereich, so liegen diese in allen Tiefenebenen bei etwa +/- 13°. Daraus lässt sich schließen, dass bei Oberflächen mit einem Neigungswinkel von maximal 13° mit planaren Messungen noch gute Ergebnisse zu erwarten sind.



Abbildung 6: Skizze des einfallenden und reflektierten THz-Signals bei einem um a gedrehtem Probekörper

Dies lässt sich auch theoretisch begründen. Die im Messaufbau verwendete Fokussierlinse hat eine Brennweite f von 50 mm und einen Durchmesser d von ebenfalls 50 mm. Der Probekörper ist nun um den Winkel α gekippt, wie in Abbildung 6 dargestellt. Das THz-Signal trifft mit dem Fokuspunkt auf den gedrehten Probekörper. Setzt man Einfallswinkel und Ausfallswinkel identisch, so wird das THz-Signal im gleichen Winkel vom Lot wegreflektiert, d. h. der Winkel zwischen einfallendem und reflektiertem Signals beträgt zweimal dem Einfallwinkel des THz-Signals bezüglich des Lots:

$$\frac{d}{2 \cdot f} = \tan(2 \times \alpha) \tag{1}$$

Berechnet man den maximalen Einfallwinkel über Gleichung 1, so ergibt sich hier für den Fokuspunkt auf der Oberfläche ein Winkel von 13,3°. Dies stimmt mit der Abschätzung aus der Messung in Abbildung 5 gut überein. Bei diesem maximalen Einfallswinkel trifft vom einfallenden Signal (blau) noch ungefähr die Hälfte des reflektieren Signals (rot, gestrichelt) auf die Linse. Der maximale Einfallwinkel des THz-Signals auf die Oberfläche, der zu guten Messergebnissen führt, ist somit vom Linsendurchmesser und der Brennweite abhängig.

4.2 Messung an Freiformflächen

4.2.1 Motorhaube

Bei diesem Probekörper handelt es sich um das Modell einer Motorhaube im Maßstab 1:2. Diese hat die Abmaße von 880 x 700 mm und ist somit für den XY-Scanner (maximale Bauteilgröße 650 x 650 mm) zu groß. Da die Struktur im Bereich der eingebrachten Materialeinschlüsse nur eine geringe Krümmung von etwa 7° hat, wurde diese in planarer Anordnung im Roboterprüfstand vermessen. Die Motorhaube besteht aus mehreren Lagen Glasfasergewebe mit unterschiedlichen Vorzugsrichtungen und definierten Fehlstellen, eingebettet in einer Epoxidharzmatrix.



Abbildung 7: Fotografien der Motorhaube vor der Vakuuminfussion a) sowie nach der Entformung b). Der blau markierte Bereich ist in c) als maximale THz-Reflektivität dargestellt. d) zeigt das Phasenbild einer Lock-In-Thermografie-Messung.

In Abbildung 7 sind zwei Fotografien sowie die Messergebnisse der THz und Lock-In-Thermografie an der Motorhaube dargestellt. In a) ist der Probekörper vor der Vakuuminfusion abgebildet. Die eingebrachten Materialeinschlüsse sind jeweils gekennzeichnet. Die Fotografie in b) stellt die Außenseite des Bauteils dar. Hier ist zudem der Ausschnitt der THz-Messung c) blau markiert. Die THz-Messung zeigt die maximale Reflektivität des Bauteils und somit der einzelnen Messpunkte. Bei dieser Messung war die nach außen gewölbte Seite des Bauteils dem Messkopf zugewandt. Bei den blauen Bereichen (Intensität < -30 dB) konnte kein eindeutiges Messsignal mehr detektiert werden. Dies lässt sich über die in diesen Bereichen sehr stark ausgeprägte Krümmung des Bauteils erklären. Der Unterschied in der Intensität der detektierten Bauteiloberfläche lässt sich über den unterschiedlichen Abstand des Messkopfes zur Oberfläche begründen. In der Probe sind zudem vier Bereiche mit einer Intensität von ca. -5 dB ersichtlich (schwarz markiert). Dies sind die eingebrachten Materialeinschlüsse der beiden Unterlegscheiben, des Plastilins sowie des Latex. Das faserverstärkte Klebeband konnte nicht detektiert werden. Das Aluminium und das eingebrachte Stück des beschichteten Pappbechers konnten aufgrund ihrer Lage im schrägen Randbereich des Probekörpers in der planaren Messgeometrie ebenfalls nicht detektiert werden. Bei der Messung mit Lock-In-Thermografie d) lag die Probe mit der nach innen gewölbten Seite vor der Kamera. Die nach außen gewölbte Oberfläche reflektierte sehr stark, sodass hier nur ungenügende Messergebnisse möglich waren. Im Gegensatz zur THz-Messung können hier auch die Materialeischlüsse in den schrägen Randbereichen detektiert werden.



Abbildung 8: 3D-Ansicht der THz-Messung der Motorhaube: In a) ist die Oberfläche und in b) die Fehlstellen des Bauteils derselben Messung mit unterschiedlichem Blickwinkel dargestellt.

Abbildung 8 zeigt die THz-Messung aus Abbildung 7 c) in dreidimensionaler Darstellung mit unterschiedlichen Blickwinkeln. Für die 3D-Darstellung wurden die Messdaten zu einem Multilayer-TIFF verarbeitet und mittels ImageJ® graphisch aufbereitet. In Teilbild a) wurde Wert auf eine bestmögliche Darstellung der Oberfläche gelegt, sodass die Bauteilstruktur zu erkennen ist. Der mittlere Bereich der Motorhaube liegt tiefer als die an beiden Seiten angrenzenden Flächen. Somit sind Rückschlüsse auf die Geometrie des Bauteils möglich. Über eine Änderung der Transferfunktionen der Farbkanäle kann Einfluss auf den Kontrast und die Sättigung genommen werden, sodass innerhalb des Bauteils liegende Fehlstellen sichtbar werden (Abbildung 8 b). Es sind die Materialeinschlüsse von Plastilin und die Unterlegscheiben aus Metall klar zu erkennen (rot markiert). Im Vergleich zur 2D-Darstellung kann der Blickwinkel auf das Bauteil beliebig verändert werden. Somit können über unterschiedliche Einstellungen in ImageJ® die Ergebnisse in verschiedener Darstellung ausgegeben werden.

Die Messung an der Freiformfläche zeigt die Grenzen der planaren Messmethode an gekrümmten Bauteilen auf. In schrägen und gewölbten Bereichen ist ab Krümmungen von $> 13^{\circ}$ keine Detektion der Oberfläche als auch von innenliegenden Fehlstellen in diesen Bereichen mehr möglich.

4.2.2 Hutze

Die Hutze ist ein Bauteil mit einer leicht gekrümmten Oberfläche sowie stark abfallenden Randflächen. Das Bauteil besteht aus Glasfasern mit Epoxidharz mit einer mittleren Wandstärke von 5 mm. In diese wurden ebenfalls verschiedene Materialeinschlüsse eingebracht.

In der Darstellung der maximalen Reflektivität in Abbildung 9 a) sind die Oberfläche des Bauteils sowie die eingebrachten Fehlstellen zu erkennen. Eine Fotografie des Probekörpers mit der Beschreibung der jeweiligen Materialeinschlüsse ist in Abbildung 10 a) gezeigt. Verschiedene Materialeinschlüsse (Münze, Schaum, Holzspatel, Aluminium) sowie der Lufteinschluss sind anhand der Falschfarbkodierung des reflektierten THz-Signals gut zu identifizieren. Latex und das Basaltgewebe können hingegen nicht detektiert werden. Von der Wirrfasermatte ist nur der Randbereich zu erkennen. Dieser wurde, wie bei allen anderen Materialeinschlüssen, durch mit Aerosil angedicktem Harz geglättet, um eine stufenlose Kantenanpassung sicherzustellen. In b) und c) sind zwei B-Scans in x-Richtung der Probe an den in a) gekennzeichneten Stellen (gestrichelte Linien) herausgehoben. Hier sind die Krümmung der Oberfläche sowie die eingebrachten Fehlstellen am Kontrast der Oberfläche deutlich erkennbar. Die schräg abfallende Randfläche im rechten Bereich der Probe ist bei planaren Messungen nicht mehr detektierbar. Dasselbe gilt für die Randbereiche des in d) dargestellten Schnittbildes in y-Richtung. Auch hier können die schrägen Flächen nicht detektiert werden. Zudem sind hier die Materialeinschlüsse ebenfalls durch eine erhöhte Reflektivität klar ersichtlich.



Abbildung 9: Darstellung der Messergebnisse des XY-Scanners an der Hutze. In a) ist die maximale Reflektivität dargestellt. Zudem sind die B-Scans bei x = 100 mm (b), x = 220 mm (c) und y = 355 mm (d) abgebildet.

Aufgrund der Tatsache, dass bei planaren Messungen schräge Wandflächen nicht detektiert werden können, wurden Messungen mit dem 3D-Roboter-Messsystem an zwei ausgewählten Bereichen des Probekörpers durchgeführt. In Abbildung 10 b) ist der vordere Bereich der Probe, welcher in a) rot markiert ist, dargestellt. Hier ist die schräge Seitenfläche, welche mit dem XY-Scanner nicht mehr detektiert werden konnte, klar ersichtlich. Ebenfalls sind die eingebrachten Materialeinschlüsse aus Holz und Aluminium eindeutig detektierbar. Betrachtet man einen weiteren Ausschnitt der Probe c), welcher in a) blau markierter ist, so sind die schräge Frontfläche sowie die eingebrachten Materialeinschlüsse aus Holz und Schaum ebenfalls detektierbar. Bei dem Übergang beider Flächen zueinander gibt es jedoch keine exakte Messinformation (Reflexion im Bereich von -20 dB). Da es sich um eine Kante handelt, kommt es hier immer zu erhöhten Reflexionsverlusten.



Abbildung 10: a) zeigt eine Fotografie des Probekörpers. Die maximale Reflektivität der 3D-Messung des rot markierten Ausschnitts ist in b), die des blau markierten Ausschnitts in c) dargestellt.

Bei allen durchgeführten Messungen hat sich gezeigt, dass 3D-Messungen an stark gekrümmten Bereichen weit mehr Informationen als planare Messungen mit einem XY-Scanner liefern.

5. Zusammenfassung

Dieser Beitrag zeigt die Prüfung von Freiformbauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Hierbei kam ein vollelektronisches THz-System zum Einsatz. Dieses wird mittels eines Robotersystems geführt und kann sowohl Messungen in planarer Anordnung als auch dreidimensional vornehmen. Die hierfür notwendigen Bahnkurven lassen sich mithilfe von Konstruktionszeichnungen der Bauteile definieren.

Es wurde gezeigt, dass der Einfallwinkel des THz-Signals auf die Oberfläche des Bauteils großen Einfluss auf das Messergebnis hat. Bei senkrechtem Auftreffen auf die Oberfläche ist die Intensität des reflektierten Signals maximal. Nimmt der Einfallswinkel zu, so nimmt die Intensität ab. Sowohl theoretische als auch experimentelle Untersuchungen brachten das Ergebnis, dass der maximale Einfallwinkel, welcher noch zu guten Messergebnissen führt, sowohl von der Brennweite als auch vom Durchmesser der Fokussierlinse abhängt.

Dieses winkelabhängige Reflexionsverhalten ließ sich auch bei planaren Messungen an gekrümmten Oberflächen beobachten. Die eingebrachten Materialeinschlüsse waren abhängig von der Krümmung der Bauteiloberfläche detektierbar. Wurde jedoch eine 3D-Messung am Bauteil vorgenommen, so ist auch eine Untersuchung stärker gekrümmte Flächen der Probekörper auf Fehlstellen möglich. Über eine dreidimensionale Darstellung der Messergebnisse ist es zudem möglich, Rückschlüsse auf die Geometrie des Bauteils sowie die genaue Lage der Fehlstellen zu ziehen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass vollelektronische THz-Systeme zur Prüfung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen sehr gut geeignet sind. Über eine Kopplung an einen Roboter ist es außerdem möglich, Bauteile mit stark gekrümmten Oberflächen auf Fehlstellen hin zu untersuchen.

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.

7. Referenzen

- 1. Buckley B.: Air-Coupled Ultrasound A Millennial Review, World Conference on Non-Destructive Testing, Rom, 15.-21.12.2000.
- 2. J. Hauck, D. Stich, P. Heidemeyer, M. Bastian, T. Hochrein: Industrielle Prozesswanddickenmessung in der Kunststoffrohrextrusion mittels zeitaufgelöster Terahertz-Systeme, DGZfP-Jahrestagung, Dresden, 6.-8.5.2013.
- 3. T. Hochrein, G. Schober, E. Kraus, P. Heidemeyer, M. Bastian, Zerstörungsfreie Prüfverfahren (ZfP) Ich sehe was, was du nicht siehst, Kunststoffe 11, 70, 2013.
- 4. S. Neuhäusler, G. Zenzinger, T. Krell, V. Carl: Optimierung der Impuls-Thermografie-Prüftechnik durch Laserscans und Blitzsequenzen, DGZfP-Berichtsband 86-CD, Thermografie-Kolloquium, Stuttgart, 25.9.2003.
- 5. P. Menner: Erweiterte Möglichkeiten der Shearografie durch Verwendung thermischer Wellen, ZFP-Zeitung 117, 45, 2009.
- 6. T. Beller, J. Hinken, M. Voigt: Hochauflösende Mikrowellen Defektoskopie, DGZfP-Jahrestagung, Fürth, 14.-16-5.2007.
- 7. M. Naftaly, J. Leist, Investigation of optical and structural properties of ceramic boron nitride by terahertz time-domain spectroscopy, Appl. Opt. 52, 20, 2013.
- S. Wietzke, M. Koch, C. Jördens, C. Jansen, N. Krumbholz, M. Scheller, O. Peters, M. Bastian, B. Baudrit, T. Hochrein, T. Zentgraf: An der Schwelle zum industriellen Einsatz, Kunststoffe 4, 20, 2010.
- 9. C. Jansen, S. Wietzke, O. Peters, M. Scheller, N. Vieweg, M. Salhi, N. Krumbholz, C. Jördens, T. Hochrein, M. Koch: Terahertz Imaging: applications and perpectives, Appl. Opt. 49, E48, 2010.
- 10. D. Stich, S. Kremling, F. Minolts, M. Bastian, T. Hochrein: Kunststofferzeugnisse mit Terahertz beurteilen: Sinnvolle Ergänzung, Qualität und Zuverlässigkeit 58, 7, 2013.
- 11. S. Becker: 3D Terahertz: Bildgebung verborgener Kunststoffdefekte ohne Röntgen, 15. Dresdner Leichtbausymposium, 26.-27.5.2011
- 12. D. Stich, F. Minolts, B. Eversmann, P. Heidemeyer, M. Bastian, T. Hochrein: Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mittels vollelektronischer THz-Systeme, DGZfP-Jahrestagung, Dresden, 6.-8.5.2013.
- 13. J. Hauck, D. Stich, P. Heidemeyer, M. Bastian, T. Hochrein: Industrielle Untersuchung der Bauteileigenschaften von Kunststoffprodukten mittels zeitaufgelöster Terahertz-Spektroskopie, DGZfP-Jahrestagung, Dresden, 6.-8.5.2013.
- J. Hauck, D. Stich, P. Heidemeyer, M. Bastian, T. Hochrein: Terahertz Inline Wall Thickness Monitoring System for Plastic Pipe Extrusion, Proceedings of the 26th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Nürnberg, 15.-19.7.2013.
- 15. J. F. Federici, B. Schulkin, F. Huang, D. Gary, R. Barat, D. Zimdars: THz imaging and sensing for security applications explosives, weapons and drugs, Semicond. Sci. Tech. 20, 266, 2005.
- 16. H.-B. Liu, H. Zhong, N. Karpowitz, Y. Chen, X.-C. Zhang: Terahertz Spectroscopy and Imaging for Defense and Security Applications, Proceedings of IEEE, 95, 8, 2007.
- 17. C. Jördens, M. Koch: Detection of foreign bodies in chocolate with pulsed terahertz spectroscopy, Optical Engineering 47, 037003, 2008.

- 18. A. Singh: THz Medical Imaging, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 2012.
- 19. B. Littau, D. Stich, S. Kremling, P. Heidemeyer, M. Bastian, T. Hochrein: Hybrid Terahertz Tomographic Imaging System for Non-Destructive Testing of Synthetic Materials and Assemblies, 6th International Workshop on Terahertz Technology and Applications, Kaiserslautern, 11.-12.3.2014.
- 20. J. P. Guillet, B. Recur, L. Frederique, B. Bousquet, L Canioni, I. Manek-Hönninger, P. Desbarats: Review of Terahertz Tomography Techniques, Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 35, 382, 2014.
- 21. H. Quast: 3D-Terahertz-Tomography for Material Inspection and Security, The 34th Conference of Infrared, Millimeter and Terahertz waves, Busan, 21.-25.9.2009.