

Terahertz Synthetic Aperture Radar zur Detektion von Defekten in Kunststoffprodukten

Benjamin LITTAU, Artemii IEGORENKOV, Stefan KREMLING, Thomas HOCHREIN, Peter HEIDEMEYER

SKZ - Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg

Kurzfassung. Viele Kunststoffe sind für Strahlung im Spektralbereich von Terahertz (THz)-Frequenzen nahezu transparent. Aus diesem Grund eignen sich THz-Systeme ideal zum Einsatz in der zerstörungsfreien Prüfung und Qualitätskontrolle von Kunststoffprodukten. Vorangegangene Untersuchungen demonstrierten die Möglichkeiten zur Analyse von kunststoffspezifischen Materialeigenschaften wie z. B. Additiv- und Feuchtegehalt sowie Faserausrichtung. Gleichzeitig ist die Erfassung von Bauteilgeometrie und innenliegenden Defekten wie Rissen und Lunkern möglich.

Ein zentrales Problem bei bildgebenden THz-Systemen sind die Kosten für Teilkomponenten. Aus diesem Grund werden Systeme meist mit wenigen Senderund Empfangseinheiten realisiert und erfordern für eine Bildgebung deshalb eine zeitintensive Relativbewegung der Probe beim Rasterscan-Verfahren. Weiterhin ist die laterale Auflösung bei klassischen bildgebenden Verfahren durch die Wellenlänge der Strahlung beugungsbegrenzt. Bei den vollelektronischen THz-Systemen, welche typischerweise im niedrigen THz-Frequenzbereich arbeiten, liegt diese bei wenigen Millimetern.

Ein Verfahren basierend auf dem Prinzip des Synthetic Aperture Radars (SAR) verspricht eine erhebliche Reduktion der Messzeit bei gleichzeitig verbesserter Auflösung. Zur großflächigen Beleuchtung eines Bauteils wurde ein vollelektronisches THz-System mit einer divergenten Optik ausgestattet. Das System nimmt die reflektierte Strahlung an Grenzflächen und Defekten im Bauteil auf. Durch die großflächige Beleuchtung entsteht ein unscharfes, verzerrtes Bild. Die Aufnahme aus verschiedenen Perspektiven ermöglicht das Scharfstellen des Bildes mittels SAR-Algorithmus. Ein dreidimensionales Bild zur Lokalisation von Grenzflächen und Defekten kann so rekonstruiert werden. Die Messzeit wird durch die Aufnahme einiger weniger Perspektiven erheblich verkürzt. Der schnelle Algorithmus würde theoretisch die Aufnahme und Darstellung von Schichtbildern des Bauteils in Echtzeit erlauben.



1 Einführung

THz-Wellen bezeichnen elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich zwischen 100 GHz und 10 THz, entsprechend dem Bereich zwischen Mikrowellen und Infrarotstrahlung. In den letzten Jahrzehnten konnten leistungsfähige und praktikable Sender und Empfänger entwickelt werden [1]. Aktuell werden mit dieser Technik zahlreiche neue industrielle Anwendungen erschlossen [2, 3]. Grundsätzlich kann zwischen zwei Arten bei der Erzeugung von THz-Strahlung unterschieden werden: Optische THz-Systeme beinhalten einen oder mehrere Laser und spezielle Halbleiterantennen, in denen die Laserstrahlung in THz-Strahlung umgewandelt wird. Vollelektronische THz-Systeme basieren auf Hochfrequenzelektronik und beinhalten im Wesentlichen weiterentwickelte Komponenten aus der Mikrowellentechnik.

THz-Strahlung zeigt bei vielen Anwendungen besondere Vorteile gegenüber anderen Verfahren: Zahlreiche Kunststoffe sind nahezu transparent für THz-Strahlung, was THz-Wellen für die zerstörungsfreie Prüfung von Kunststoff-Produkten prädestiniert. Zahlreiche Untersuchungen demonstrierten bereits die Möglichkeiten z. B. geometrische Defekte und Verunreinigungen zu detektieren. Weiterhin können auch Materialeigenschaften, wie z. B. Faserausrichtung, Füllstoff- und Feuchtegehalt, quantifiziert werden [4].

Im Rahmen verschiedener Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung in der Kunststoffindustrie wurde die THz-Technik ausgiebig erprobt [5]. Dabei spielt das Thema Bildgebung zur Fehlerfindung eine wichtige Rolle. Dazu wurde am Kunststoff-Zentrum ein Verfahren entwickelt, welches auf dem Prinzip eines Synthetic Aperture Radar (SAR) basiert. Typische THz-Prüfsysteme, wie sie meist kommerziell erhältlich sind, verwenden reflektierende oder refraktierende Optiken zum fokussieren des THz-Strahls auf die zu untersuchende Probe. Da THz-Sender und Empfänger vergleichsweise teuer sind, wird zur Bildgebung häufig auf ein Rasterscanverfahren zurückgegriffen. Einige wenige Sender und Empfänger rastern die Probe im Fokus ab und das Bild wird sehr zeitintensiv Punkt für Punkt erzeugt, weshalb viele Systeme in ihrer Echtzeitfähigkeit stark begrenzt sind. Ein Lösungsansatz, welcher auch im hier beschriebenen Verfahren verfolgt wurde, ist die Verwendung einer großflächigen divergenten Beleuchtung.

Bei bildgebenden Verfahren im z. B. niederfrequenten elektromagnetischen Bereich oder bei mechanischen Ultraschall-Wellen ist der Einsatz von Optiken häufig unüblich. Typischerweise wird mit divergenten Kugelwellen großflächig beleuchtet und detektiert. Die Informationen mehrerer Bildpunkte werden damit in einer Messung erfasst. Allerdings wird ein summierter Messwert detektiert. Aus diesem Grund erscheint das aufgenommene Bild unscharf. Durch die Aufnahme unter unterschiedlichen Perspektiven kann das Bild durch einen Algorithmus rechnerisch im Nachhinein fokussiert werden. Dabei kann die Anzahl der unterschiedlichen Perspektiven (Messpunkte), unter denen aufgenommen werden muss, im Vergleich zum Rasterscanverfahren stark reduziert werden.

2 Rekonstruktionsalgorithmus

Zur rechnerischen Fokussierung des Bildes wird aus der Radartechnik der SAR-Algorithmus von Richards adaptiert [6]. Eine typische Messarchitektur ist in Abbildung 1 a) dargestellt. Ein THz-Sensor, bestehend aus einer Sender-Empfangs-Einheit, beleuchtet die Probe mit einer elektromagnetischen Welle und detektiert das an z. B. einer Fehlstelle rückreflektierte Signal. Die Laufzeiten t_i unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Position des Sensors.



Abbildung 1: a) Typische Messarchitektur zur Bildgebung mittels THz-SAR. Die Laufzeiten der reflektierten Signale an einer Fehlstelle sind Abhängig von der Position des Sensors.

b) Schematische Darstellung eines Laufzeitbild (A-Scan) des Sensors an einer beliebigen Position

An jeder Position nimmt der Sensor ein Laufzeitbild, ähnlich einem A-Scan bei der Ultraschall-Technik, auf (vgl. Abbildung 1 b). Jedes reflektierte Signal einer Grenzfläche resultiert in einem Puls bei entsprechender Zeitposition t_i im A-Scan. Die Amplitude des Pulses ist dabei abhängig von der Stärke des rückreflektierten Signals. Diese ist abhängig vom Materialunterschied an der Grenzfläche, der Entfernung und der Geometrie. Zur Verdeutlichung des Verfahrens wird zunächst nur die Reflexion von der Fehlstelle betrachtet. Die Reflexionen von der Probenvorder- und -rückseite sowie den Seitenwänden werden zunächst vernachlässigt.

Zur Rekonstruktion des Bildes werden alle Laufzeitbilder, abhängig von der Position des jeweiligen Sensors, ausgewertet. Wird der Algorithmus zunächst nur im zweidimensionalen Raum betrachtet, sind die Positionen der Sensoren z. B. auf einer Gerade entlang der x-Achse verteilt. Um das Bild des Objekts zu rekonstruieren, werden in jedem Pixel o(x, y) die zugehörigen Amplitudenwerte der Laufzeitbilder der unterschiedlichen Sensorpositionen aufsummiert:

$$o(x,y) = \sum_{n} u(x_n,t) . \qquad 2.1$$

Die Laufzeit t zum Pixel o(x, y) ergibt sich in diesem Zusammenhang aus der jeweiligen Sensorposition x_n :

$$o(x,y) = \sum_{n} u(x_n, \frac{2}{c}\sqrt{(x-x_n)^2 + z^2}) , \qquad 2.2$$

wobei c der Geschwindigkeit der THz-Welle im umgebenden Material entspricht. Anschaulich beschreibt das Vorgehen das Zeichnen von Kreisen um die jeweilige Sensorposition, wie in Abbildung 2 grafisch dargestellt. Die Kurven der jeweiligen Maxima-Positionen in den Laufzeitbildern schneiden sich im Punkt der reflektierenden Fehlstelle.



Abbildung 2: Veranschaulichung der Rekonstruktion mittels SAR anhand Schnittkurven von Kreisen an verschiedenen Positionen x_i mit unterschiedlichen Laufzeiten t_i

Der beschriebene SAR-Algorithmus liefert in vielen Fällen zuverlässige Ergebnisse. Allerdings wird im konventionellen SAR-Algorithmus eine Näherung vorgenommen, die besonders bei dickeren Proben zu Bildfehlern bei der Rekonstruktion führt und die Fähigkeiten des Algorithmus stark begrenzt. Üblicherweise wird angenommen, dass sich die THz-Welle immer mit konstanter Geschwindigkeit *c* ausbreitet. Die Geschwindigkeit der THz-Strahlung ist allerdings abhängig vom umgebenden Material. Schon bei einer homogenen Kunststoffprobe unterscheidet sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der THz-Strahlung innerhalb der Probe erheblich von der Ausbreitungsgeschwindigkeit in der umgebenden Luft. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 3 veranschaulicht. Zur besseren Verdeutlichung des Phänomens sind Sender und Empfänger räumlich voneinander getrennt dargestellt.

Der rote Pfad zeigt den durch den konventionellen SAR-Algorithmus vorhergesagten Strahlengang. Die reflektierende Fehlstelle wird an der roten Position vermutet. Die tatsächliche Position der reflektierenden Fehlstelle befindet sich allerdings an der grün markierten Position. Um die fehlerhafte Position der Fehlstelle zu korrigieren muss der Einfluss des Materials auf die Strahlung mit berücksichtigt werden. Ein solches Kompensationsverfahren wurde bei niederfrequenten Bodenradaren bereits durch Johannsen und Mast erfolgreich angewendet [7]. Grundsätzlich wird der Einfluss verschiedener Materialien auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Strahlung durch den Brechungsindex nbeschrieben. Der Brechungsindex von Luft entspricht in etwa dem Wert $n_0 = 1$. Verschiedene Materialien weisen typischerweise einen höheren Brechungsindex auf. Das Kompensationsverfahren betrachtet nun zunächst zwei Grenzfälle:

- 1. Der Brechungsindex entspricht dem Brechungsindex der umgebenden Luft $n = n_0 = 1$.
- 2. Der Brechungsindex ist um ein Vielfaches größer als der Brechungsindex von Luft $n \gg n_0$.

Im ersten Fall ergibt sich der vom konventionellen SAR-Algorithmus angenommene Strahlungsverlauf entlang des roten Pfades. Im zweiten Fall ergibt sich der in Abbildung 3 a) dargestellte schwarze Ausbreitungspfad der THz-Welle. Da es sich um Grenzfälle handelt wird der tatsächliche Verlauf der THz-Welle dazwischen liegen (grüner Pfad).



Abbildung 3: a) Prinzip der Laufzeitkompensation aufgrund der Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Material.

b) Zusammenhang zwischen den Auftreffpunkten y_i sowie den Winkeln α_i und β_i

Zur Bestimmung des tatsächlichen Verlaufs muss der Brechungsindex des Probenmaterials n bekannt sein. Daraufhin können die in Abbildung 3 b) dargestellten Auftreffpunkte y_4 und y_5 berechnet werden.

$$y_{4} = y_{1} + \frac{n_{0}(y_{3} - y_{1})}{n}$$

$$y_{5} = y_{2} + \frac{n_{0}(y_{2} - y_{3})}{n}$$

2.3

Sind die Auftreffpunkte bekannt können die Einfallswinkel α_1 und α_2 über die Positionen von Sender und Empfänger ermittelt werden. Die Ausfallswinkel β_1 und β_2 ergeben sich nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz.

3 Versuchsaufbau

Das hier verwendete vollelektronische THz-System arbeitet nach dem Prinzip eines frequenzmodulierten Dauerstrich-Radar (FMCW), wie in Abbildung 4 schematisch dargestellt.



Abbildung 4: Schematische Darstellung der Funktionsweise des vollelektronischen THz-Systems

Über einen Digital-Analog-Umsetzer (ADU) werden unterschiedliche Spannungswerte erzeugt. Dass durch einen Tiefpassfilter geglättete Signal wird anschließend an einen spannungsgesteuerten Oszillator (VCO) übergeben. Ein VCO erzeugt ein sinusförmiges Signal, dessen Schwingungsfrequenz abhängig vom Level der Eingangsspannung ist. Wird eine Sägezahnspannung am Eingang des VCO angelegt resultiert am Ausgang des VCO ein linear-frequenzmoduliertes Dauerstrich-Signal mit Frequenzen zwischen 10 und 20 GHz. In einem aktiven Multiplikator wird die Frequenz des Signals um den Faktor sechs ins W-Band zwischen 70 und 110 GHz erhöht. Über einen Hornstrahler wird die THz-Strahlung in den freien Raum ausgekoppelt. Nach entsprechender Strahlformung und Interaktion mit einer Probe wird das THz-Signal über einen weiteren Hornstrahler in den Empfänger eingekoppelt. Der Empfänger besteht aus einem harmonischen Mischer und wird mathematisch durch eine Multiplikation zweier Signale beschrieben.

Zur Realisierung einer kohärenten Detektion wird das gesendete Signal, wie in Abbildung 4 dargestellt, zusätzlich in den Mischer des Empfängers gespeist. Beim Messvorgang eines transmittierten Signals erfolgt am Mischer im Empfangspfad eine Multiplikation von ausgesendetem $\cos(\omega_s t)$ und empfangenem Signal $\cos(\omega_e t)$, woraus der Ausdruck

$$f_{mixer}(t) = \cos(\omega_s t) \cdot \cos(\omega_e t) = \frac{1}{2} (\cos[(\omega_s - \omega_e)t] + \cos[(\omega_s + \omega_e)t]), \qquad 3.1$$

resultiert und sich aus zwei Frequenzkomponenten zusammensetzt. Die hochfrequente Komponente $\cos[(\omega_s + \omega_e)t]$ wird herausgefiltert und die Frequenz der niederfrequenten Komponente $\cos[(\omega_s - \omega_e)t]$ an den Analog-Digital-Umsetzer (ADU) übergeben. Diese Differenzfrequenz ist bei linearer Frequenzmodulation proportional zur Laufzeit der elektromagnetischen Welle. Bei mehreren gestreuten Wellen durch die Probe sind entsprechend mehrere Differenzfrequenzkomponenten im detektierten Signal enthalten, welche durch z. B. einer Fourier-Analyse in die jeweiligen Komponenten getrennt werden können.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen den häufig zu findenden fokussierenden Messanordnungen zu der SAR-Methode liegt in der Beleuchtung des Messobjekts. Wie bereits eingangs erwähnt, wird der Probekörper mit einem divergenten Strahlprofil illuminiert. Zur Vereinfachung wird dies zunächst nur in einer Raumdimension ausgeführt, was jedoch die prinzipielle Arbeitsweise nicht beeinflusst. Zudem ermöglicht die Fokussierung in einer Raumdimension ein höheres Signal-zu-Rausch-Verhältnis, da die insgesamt abgestrahlte Leistung so auf eine kleinere Fläche konzentriert wird.

Für die Realisierung wurden zunächst spezielle Zylinderoptiken berechnet und gefertigt. In Abbildung 5 a) ist eine mit Zemax® errechnete Simulation in x-z- und y-z-Richtung dargestellt. Als Linsenmaterial wurde Polyethylen (PE) mit einem Brechungsindex von



Abbildung 5: a) Simulation x-z- und y-z-Richtung des Strahlenprofils mit zwei Zylinderlinsen b) gemessenes Strahlprofil in x- und y-Richtung

n = 1,5 und einer vernachlässigbaren Absorption gewählt. Es ist klar zu erkennen, dass in x-Richtung eine Fokussierung auf der Probe realisiert ist, wohingegen in y-Richtung ein divergenter Strahlenverlauf herrscht. Abbildung 5 zeigt das experimentell gemessene Strahlprofil mit den nach der Simulation berechneten und gefertigten Zylinderlinsen. Wie gewünscht entstehen eine Fokussierung in der x-Richtung und eine Strahlaufweitung in der dazu senkrechten y-Richtung.

4 Ergebnisse und Diskussion

Für die Verifizierung des entwickelten Rekonstruktionsalgorithmus auf Basis von SAR wurde ein Probekörper aus Polymethylmethacrylat (PMMA), wie das Foto in Abbildung 6 a) zeigt, verwendet. In dem Probekörper mit den äußeren Abmaßen von 60 mm x 30 mm sind vier Bohrungen mit einem Durchmesser von 4 mm eingebracht. Diese wurden in verschiedenen Tiefenebenen ausgeführt und stellen künstliche Fehlstellen (Lufteinschlüsse) dar.

Zunächst wurde der Probekörper entlang einer Linie in x-Richtung mit dem divergenten Strahl gemessen. Die so aufgenommenen Rohdaten sind in Abbildung 6 b) als Schnittbild (B-Scan) dargestellt. Die Rohdaten entsprechen den gemessenen Laufzeiten der Pulse zwischen Sender/Empfänger und Reflexionen an möglichen Grenzflächen. Die Farbcodierung der Konturdarstellung spiegelt die Reflektivität wieder. Aufgrund der vielen internen Reflexionen sind die Daten sehr verrauscht und die Fehlstellen sind nicht klar von der Umgebung getrennt. Außerdem sind diese aufgrund der Divergenz in der Beleuchtung unscharf und verzerrt.

Die Rohdaten wurden zunächst mit dem Standard-SAR-Algorithmus rekonstruiert, was in Abbildung 6 c) dargestellt ist. Im Gegensatz zu den Rohdaten sind hier die Laufzeiten in Tiefenpositionen umgerechnet. In dieser Darstellung sind vier Bereiche mit erhöhter Reflektivität zu erkennen. Jedoch ist die genaue Lage und Ausdehnung der Fehlstellen nicht eindeutig und strak verzerrt.

Dagegen ist bei der Rekonstruktion mit zusätzlicher Materialkompensation, wie in Abschnitt 2 beschrieben wurde, deutlich verbessert (vgl. Abbildung 6 d). Nicht nur, dass die Bereiche der Reflexionen genauer rekonstruiert werden können, auch die absolute Position entlang der x-Achse und in Tiefenposition stimmt mit den taktil gemessenen Werten deutlich besser überein. Die Verzerrungen wurden signifikant reduziert.

Es ist jedoch auch ersichtlich, dass die Messung und anschließende Rekonstruktion, auch mit dem materialkompensierten SAR-Algorithmus, keine Aussage über die genaue Form der Fehlstelle zulässt. Grund liegt in der nur einseitige Beleuchtung des Probekörpers. Für eine vollständige und genaue Rekonstruktion ist die Messung von allen Seiten notwendig, wie es bei tomografischen Methoden Anwendung findet [8, 9].





- b) Darstellung der Rohdaten
- c) Rekonstruktion mittels standardisiertem SAR-Algorithmus
- d) Kompensierte SAR-Rekonstruktion

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die THz-Technologie ist auf sehr gutem Wege sich als zerstörungsfreie Prüfmethode für die Kunststoffindustrie zu etablieren. In den vergangenen Jahren konnten bereits erste industrielle Anwendungsgebiete erschlossen werden. Die vollelektronische Technologie verspricht vergleichsweise kostengünstige und schnelle Messsysteme. Großer Forschungsbedarf besteht noch in der Bildgebung, da aus Kostengründen häufig nur ein oder wenige Sender/Empfänger eingesetzt werden. Daher sind hier neue Lösungen gefragt.

In diesem Beitrag wurde eine Bildgebung basierend auf einer Rekonstruktion mittels Synthetic Aperture Radar (SAR)-Algorithmen untersucht. Neben einem Standard-SAR-Algorithmus wurde zusätzlich die Kompensation von Materialeigenschaften mit implementiert. Dies ermöglicht die genauere Rekonstruktion von Streuzentren wie z. B. Lufteinschlüssen in einem Objekt. Die Messung mit divergentem Strahlprofil erlaubt eine schnellere Bildgebung, da im Gegensatz zur fokussierenden Messgeometrie insgesamt weniger Einzelaufnahmen notwendig sind, um ein Bild zu rekonstruieren. Dies ebnet den Weg für weitere potentielle Anwendungsgebiete wie z. B. eine kontinuierliche Echtzeit-Überwachung.

6 Danksagung

Wir danken dem Fördermittelgeber für die finanzielle Unterstützung. Das IGF-Vorhaben 457 ZN 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 Bundestages gefördert.

7 Literaturverzeichnis

- [1] C. Fattinger und D. Grischkowsky, "Terahertz beams," *Applied Physics Letters*, pp. Vol. 54, No. 6, 6 February 1989.
- [2] T. Hochrein, "Markt, Entwicklung und Stand der Technik der Terahertz-Systeme: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft," DGZfP-Jahrestagung, Dresden, 2013.
- [3] T. Hochrein, "Markets, Availability, Notice, and Technical Performance of Terahertz Systems: Historic Development, Present, and Trends," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, pp. Vol. 36, Issue 3, pp 235-254, 01 March 2014.
- [4] J. Hauck, S. Kremling, D. Stich, P. Heidemeyer, M. Bastian und T. Hochrein, "Zerstörungsfreie Prüfung von Kunststoffbauteilen mittels THz-Technologie," in *DGZfP-Jahrestagung*, Potsdam, 2014.
- [5] J. Hauck, S. Kremling, T. Hochrein und M. Bastian, "Systematische Evaluierung der Potentiale der zeitaufgelösten Terahertz-Spektroskopie zur Bauteilprüfung in der Kunststofftechnik," Würzburg, 2014.
- [6] M. A. Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [7] E. Johansson und J. Mast, "Three-dimensional ground-penetrating radar imaging using synthetic aperture time-domain focusing," *Proc. SPIE 2275*, pp. 205-214, 1994.
- [8] B. Littau, J. Tepe, S. Kremling, T. Schuster, T. Hochrein und P. Heidemeyer, "Tomografische Bildgebung mit vollelektronischen TErahertz-Systemen zur Prüfung von Kunststoff-Bauteilen," in *DGZfP-DACH-Jahrestagung*, Salzburg, 2015.
- [9] B. Littau, D. Stich, S. Kremling, P. Heidemeyer, M. Bastian und T. Hochrein, "Hybrid Terahertz Tomographic Imaging System for Non-Destructive Testing of Synthetic Materials and Assemblies," in 6th International Workshop on Terahertz Technology and Applications, Kaiserslautern, Germany, 2014.