

THz-SAFT Rekonstruktion von HDPE-Bauteilen

Holger SPRANGER¹, Jörg BECKMANN¹

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kontakt E-Mail: holger.spranger@bam.de

Kurzfassung. Obwohl THz-TDS-Systeme vielfältige Qualitätsparameter von Dielektrika ermitteln können, ist deren industrielle Nutzung im Bereich der zerstörungsfreien Bauteilprüfung noch nicht anerkannter Stand der Technik. Ein pragmatischer Weg, TDS-Systeme neben traditionellen Prüfverfahren zu etablieren, sind systematische Untersuchungen an Modellbauteilen, mit dem Ziel einer Methodenentwicklung zur zuverlässigen berührungslosen Prüfung von Dielektrika. Anhand von THz-TDS-Messungen an Polyethylen-Testkörpern mit künstlich eingebauten Fehlstellen werden anfänglich die Möglichkeiten der Laufzeitmessung zur Ermittlung von Tiefenlagen von Ungängen in Testkörpern präsentiert. Im weiteren Teil wird gezeigt, wie durch eine veränderte Versuchsdurchführung und Verwendung eines modifizierten SAFT-Rekonstruktions-Algorithmus Tomogramme berechnet werden können, in denen die künstlich eingebrachten Fehlstellen hinsichtlich ihrer Größe und Lage geometrisch richtig dargestellt werden.

1. Einführung

Der spektrale Frequenzbereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen 0.1 und 10 THz wird häufig als THz-Strahlung (T-rays) bezeichnet [1]. Die Benennung des zwischen dem IR- und mm-Wellenlängenbereich liegenden Terahertz Frequenzintervalls hat sich in der Fachwelt durchgesetzt, weil die Begriffsbildung in einem engen Zusammenhang mit der vor einigen Jahren entwickelten photoptisch zeitaufgelösten THz-Spektroskopie (THz-TDS) zu sehen ist. THz-TDS Systeme arbeiten impulsbasiert und zeitaufgelöst. Der Vorteil des verwendeten Messprinzips besteht in der gleichzeitigen Detektierbarkeit von Amplitude und Phase des zwischen der Sendeantenne (T_x) und der Empfangsantenne (R_x) sich ausbreitenden elektrischen Feldes eines Impulses. Der Impuls besteht aus elektromagnetischen Wellen mit Frequenzen innerhalb einer im THz-Bereich liegenden Bandbreite. Mit der phasenempfindlichen Detektion werden Phasenbeziehungen bei gleichzeitiger Unterdrückung der wegen der fehlenden Phasenbeziehung existierenden inkohärenten Störstrahler, wie z.B. thermische Rauschquellen ermittelt. Die gleichzeitig messbare Amplitudenänderung ermöglicht die vollständige Bestimmung des komplexen Brechungsindex dielektrischer Materialien. Die THz-Spektroskopie weist Vorteile auf, die es vor allem in Zukunft für die industrielle Qualitätskontrolle, bei Sicherheitsanwendungen und in der biomedizinischen Bildgebung zu nutzen gilt. Neben der Spektroskopie von Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern im bis dahin experimentell schwer zugänglichen THz-Frequenzbereich sind vor allem die Anwendung der nichtionisierenden und kohärenten THz-Strahlung zur berührungslosen Charakterisierung und Prüfung dielektrischer



Materialschichten und Bauteile zu erwarten. Begleitet werden die bisher praktizierten methodischen Entwicklungen für zukünftige THz-Applikationen von seit Jahren konsequent betriebenen Geräteentwicklungen hin zu weniger voluminösen, leichten, einfach handhabbaren und kostengünstigeren THz-TDS Spektrometern [2,3]. Obwohl durch das berührungslose Abtasten mit der THz-TDS-Technik vielfältige Qualitätsparameter ermittelt werden können, wird sie erst dann für die industrielle Nutzung im Bereich der Zerstörungsfreien Werkstoffprüfung zum Tragen kommen, wenn es gelingt, im Vergleich zu bereits bestehenden andersartig funktionierenden ZfP-Prüfsystemen genauer, billiger oder einzigartig zu sein. Ein pragmatischer Weg dahin besteht, wenn man von der technologischen Entwicklung absieht, vor allem in systematischen Untersuchungen an dielektrischen Modellbauteilen, mit dem Ziel einer Methodenentwicklung zur zuverlässigen Eigenschaftsbestimmung anhand der aus dem THz-TDS-Experiment gewonnenen Daten. Im Folgenden werden repräsentative Verfahren zur quantitativen Bauteilanalyse unter Verwendung der THz-TDS präsentiert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile anhand von Modellkörpern diskutiert.

2. Prinzip der zeitaufgelösten THz-Spektroskopie (THz-TDS: Terahertz Time Domain Spectroscopy)

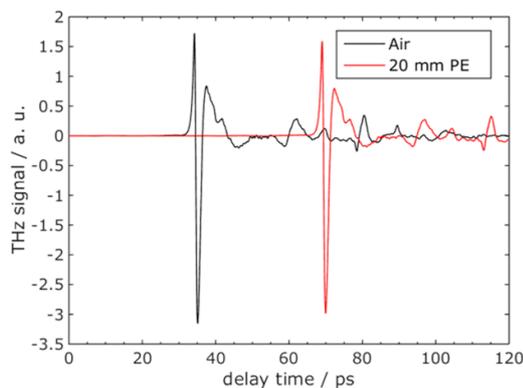


Bild 1: Die im THz-TDS Experiment ermittelbaren Messgrößen Amplitude und Laufzeit (ToF). Während der Durchstrahlung einer 20 mm starken Polyethylenplatte ändern sich die Laufzeit und Amplitude des THz-Signals im Vergleich zum Impuls des Leerstrahls.

Die THz-TDS verfügt über zwei jeweils mit einem Auston-Schalter [4] ausgerüsteten Dipolantennen, die zur Erzeugung (T_x) und Detektion (R_x) von elektromagnetischer Strahlung von einem Femtosekunden-Laser gepulst werden. Der am Sender erzeugte Impuls verändert seine Amplitude und Laufzeit (ToF: time of flight), wenn er ein dielektrisches Material durchdringt bzw. von ihm reflektiert wird (siehe Bild 1). Bei der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in isotropen sehr schwach absorbierenden dielektrischen im THz-Bereich dispersionsfreien Materialien bestehen zwischen der Laufzeit und der Phasengeschwindigkeit sowie zwischen den Amplituden im Zeit- und Frequenzbereich einfache direkte Zusammenhänge, die sich mit Hilfe der Fourier Transformation ineinander überführen lassen. Der Vergleich der Amplituden- und Zeitverläufe mit denen eines Impulses des Leerstrahls ermöglicht im Frequenzbereich die quantitative Ermittlung der spezifischen optischen Eigenschaften in Form des komplexen Brechungsindex. Infolge des berührungslosen Messverfahrens sowie im Fall von z.B. Schichtsystemen können im Strahlengang Grenzflächen existieren, die zur Reflexion und Brechung der Strahlung führen. Im Ergebnis dessen kann bei geeigneter Wahl der Detektionszeit (delay time) eine Folge von zu unterschiedlichen Zeiten eintreffenden Impulsen beobachtet werden. Änderungen spezifischer Parameter, wie z.B. das Pulsmaximum, -minimum, Pulsintegral über ein

vorgegebenes Zeitintervall oder die relative Laufzeitänderung können bereits als probenspezifische Kennwerte genutzt werden, stehen aber in keinem direkten physikalischen Bezug. Die Fourier Transformation des THz-Impulses ermöglicht vor allem die spektrale Charakterisierung des untersuchten Materials.

3. Zeitaufgelöste Synthetische Fokussierungstechnik (SAFT)

Für den zerstörungsfreien Nachweis von Fehlstellen in Dielektrika mit Hilfe der THz-TDS bedarf es geeigneter Rekonstruktionsverfahren und Versuchsaufbauten, um unter Verwendung gewonnener Messdaten Schnittbilder (Tomogramme) zu generieren, mit denen die Art, Größe Position und Verteilung der im Innern des Prüfkörpers existierenden Fehlstellen ermittelt werden können. Mit diesem Ziel wurden anfänglich die für die röntgenographische Durchstrahlungsprüfung entwickelten CT Rekonstruktionsalgorithmen für THz-TDS Untersuchungen angewendet [5]. Zuverlässige Tomogramme konnten jedoch nur dann rekonstruiert werden, wenn sich die Fehlstellen und das umgebende Material nur wenig bezüglich des Brechungsindex unterschieden. Zusätzliche Artefakte konnten in den Schnittbildern beobachtet werden. Die Grenzen der röntgenographischen CT Rekonstruktion für die Inspektion von Dielektrika mit THz-TDS ergeben sich vor allem aus dem Sachverhalt, dass bei der Durchdringung mit Röntgenlicht Reflexion und Brechung an Grenzflächen vernachlässigt werden kann. Die für die Ultraschallprüfung entwickelte Beugungsdurchlauftechnik (Time of Flight Diffraction) detektiert die an den Ungängen in Schweißnähten entstehenden Beugungssignale. Beugungssignale können bei der Einstrahlung des Ultraschall-Signals an mehreren Orten innerhalb der mit komplexer Geometrie behafteten Fehlstellen entstehen. Laufzeitunterschiede der gebeugten Wellen werden am Detektor gemessen, aus denen sich anhand eines Rekonstruktionsmodells Position und Größe der Fehlstelle ermitteln lassen. Die Amplituden der gebeugten Welle werden nicht für die Bestimmung der geometrischen Parameter bewertet. Die Modelle zur Rekonstruktion und das Messverfahren wurden für die THz-TDS adaptiert und als Zeitaufgelöste Synthetische Fokussierungstechnik (TD-SAFT) vorgestellt [6,7].

Beim TD-SAFT wird die Probe entlang der x-Achse an der Probenoberfläche oder auch oberhalb der Fläche mit der Sende- und Empfangsantenne abgetastet (Bild 2: links). Die gestreuten Signale aller in der Probe existierenden Punktstrahler (hier im Bild nur ein Strahler) werden für unterschiedliche Sende- und Empfangspositionen zu unterschiedlichen Zeiten detektiert (Bild 2 mitte). Bei der Rekonstruktion werden die detektierten Signale anhand der S/E Positionen in das Material zurückgerechnet, unter der Annahme, dass sie von Punktstrahlern verursacht werden, deren Wellen sich nach dem Huygensschen-Superposition-Prinzip überlagern (Bild 2 rechts).

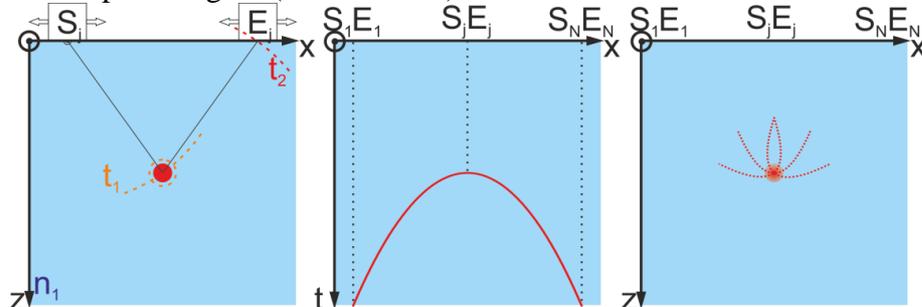


Bild 2: Schematische Darstellung des Messverfahrens und der SAFT-Bildrekonstruktion

links: Sender an der Position S_j sendet ein Signal, welches den Punktstrahler zum Zeitpunkt t_1 erreicht. Das gestreute Signal erreicht den Empfänger in der Position E_j zum Zeitpunkt t_2 ; mitte: B-Scan, berechnet aus den A-Scans für verschiedene S/E –Positionen ($\{R_{S,i}, R_{E,i}\}, i = 1, 2, \dots, j, \dots, N$), mit konstantem Abstand ($R_{S,j} - R_{E,j}$); rechts: Punktquellenposition, berechnet via SAFT Rekonstruktion (Superposition der hypothetischen Laufzeitparabeln)

3. Messungen: Terahertz Time of Flight (THz ToF)

Die BAM verfügt über ein kommerziell verfügbares in Bild 3 gezeigtes THz-TDS System T-Ray 2000 von der Firma Picometrix. Polyethylen Linsen können optional in den Strahlengang zum Zweck der Strahlenfokussierung integriert werden. Zusätzlich wurde das Spektrometer mit einem Zweikreisgoniometer (Huber, Serie 402) und einem X-Y-Tisch ausgerüstet, um das zu untersuchende Material oder die zu untersuchenden Testkörper winkel- und ortsabhängig für eine beliebig vorgegebene Sender-/Empfängerposition scannen zu können. Wegen der Faserkopplung können beide Antennen leicht bezüglich der Probenormale auf den Manipulationseinheiten positioniert werden. Für die Bewertung des TD-SAFT-Rekonstruktionsverfahrens wurden selbst entwickelte quader- und zylinderförmige Testkörper aus Polyethylen (PE) mit künstlich eingebauten Fehlstellen hergestellt. Sie wurden mit dem THz-TDS System gescannt, um hinreichendes Datenmaterial für die sich anschließende Datenrekonstruktion zur Verfügung zu haben.

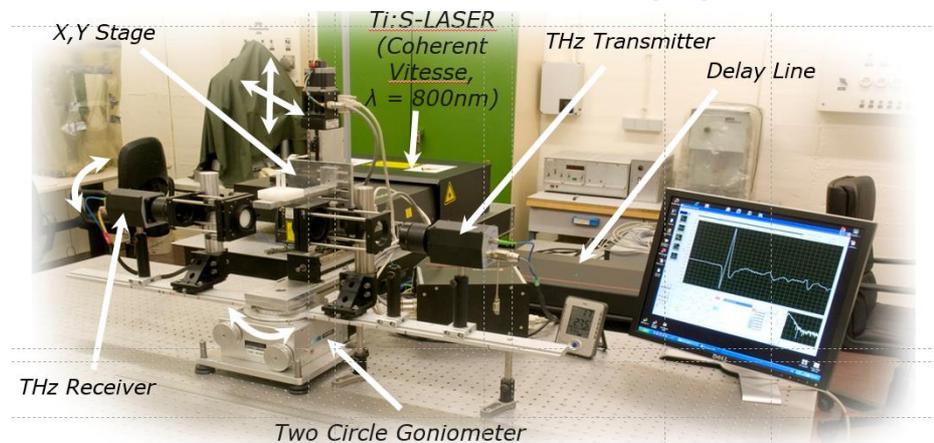


Bild 3: BAM-THz Labor mit einem PICOMETRIX T-ray 2000 THz-TDS system

Für die Abtastung der Testkörper wurde zusätzlich zum obigen Versuchsaufbau eine aus einer Si-Platte bestehende Strahlteilereinheit (BSU) konzipiert und erstellt. Wie der in Bild 4 schematische dargestellte Versuchsaufbau zeigt, kann der Sender und Empfänger als eine Einheit betrachtet werden. Die vor der BSU installierte Manipulationseinheit sichert eine Abtastung des Untersuchungsobjektes senkrecht zur Probenormale bei einem Einstrahlwinkel von null Grad an vorgegebener Abtastposition. Die vor dem Strahlteiler angebrachte Sammellinse fokussiert den parallelen Strahlengang zu einem Punkt mit bekannter Phasenfront auf die Probenoberfläche. Der Fokuspunkt beschreibt die für SAFT-Rekonstruktionen benötigte virtuelle Detektor-Empfänger-Position. Eine computergestützte Versuchsdurchführung ermöglicht die Detektion der Laufzeit und Amplitude der reflektierten Impulse (A-Scan) während der Probenabtastung (Probedrehung bzw. -verschiebung). Die vom PC-Messplatz definierte durchgeführte Probenpositionierung bzw. -drehung während der Probenabtastung, ermöglicht nach dem Scannen der Probe die Rekonstruktion orts aufgelöster B-Scans aus den A-scan Daten. Alle Experimente wurden computergestützt unter Laborbedingungen bei 25°C und einer Luftfeuchtigkeit zwischen 20 und 30% durchgeführt.

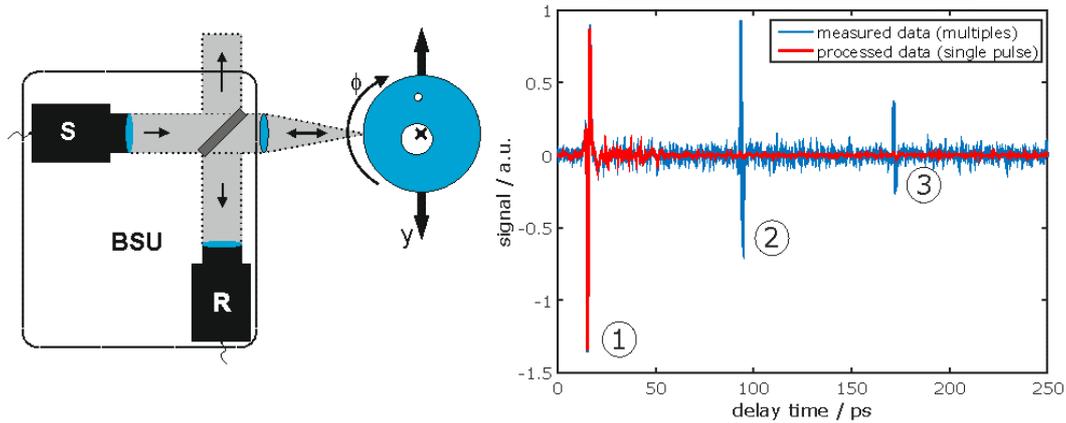


Bild 4: Schematischer Aufbau der BSU-Einheit (links) und A-Scan eines abgetasteten Goldspiegels (rechts). Die Pulsfolge entsteht durch die in der BSU verursachten Mehrfachreflektionen. Mit Hilfe einer Entfaltungsprozedur können die störenden Reflexe beseitigt werden.

4. Ergebnisse – THz – ToF

Bild 5 zeigt auf der linken Seite schematisch die Ausbreitung eines THz-Impulses in einem aus zwei Materialien bestehenden Probekörpers. Infolge des Materialübergangs findet an den Grenzflächen die mit den Fresnel Beziehungen beschreibbaren Reflexionen und Brechungen statt. Die Laufzeiten der Pulse lassen sich in optisch einfachen Materialien aus den lokalen Maxima bzw. Minima der einzelnen Pulse der Pulsfolge ermitteln.

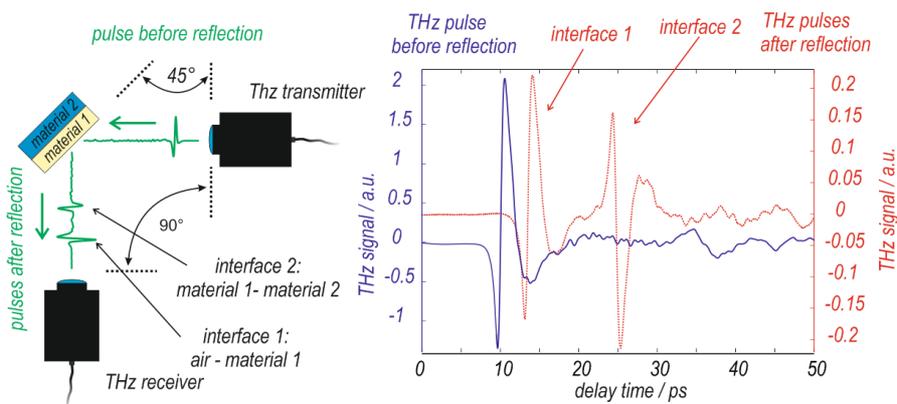


Bild 5: Ausbreitung eines elektromagnetischen THz-Impulses in einer Zweischichtenprobe; links: Darstellung des Reflexionsexperiments mit definierter Antennenposition; rechts: A-Scan des Eingangs- und Ausgangssignals.

In der Reflexionskonfiguration werden bei vorgegebener Empfängerposition die Laufzeit des ersten Impulses vom Abstand des Senders zur Probenoberfläche und die Laufzeitdifferenz zwischen dem ersten und zweiten Impuls von dem Brechungsindex und der Dicke der ersten Materialschicht bestimmt (Bild 5 rechts). Nach diesem Prinzip lassen sich aus Reflexionsmessungen Materialdicken bzw. Tiefenlagen von planaren Fehlstellen ermitteln. In Bild 6 wird das Ergebnis eines Flächenscanexperimentes unter Verwendung der BSU für einen geschlitzten quaderförmigen Probekörper aus Polyethylen (PE) präsentiert.

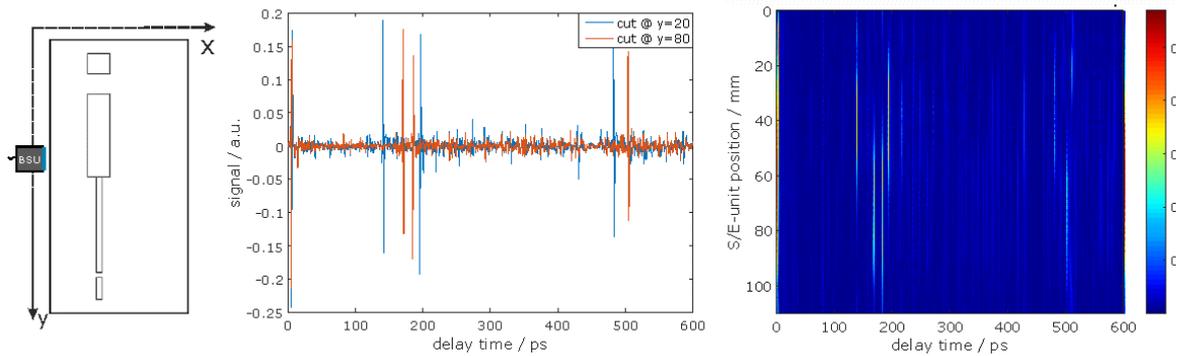


Bild 6: Flächenscan eines unterschiedlich geschlitzten Polyethylen-Testkörpers; links: PE-Quader mit unterschiedlichen Schlitzbreiten wird mit der BSU gescannt; mitte: Amplitudenverlauf des reflektierten THz-Impulses für zwei BSU-Positionen (A-Scan); rechts: aus A-scans berechnetes B-Bild. Die Farbskala beschreibt die absoluten Amplitudenwerte.

Bei diesem Experiment wird innerhalb eines Zeitintervalls von 600 ps der Amplitudenverlauf des reflektierten THz-Impulses für die entlang der y-Achse gewählten S/E-Positionen detektiert. In der Mitte von Bild 6 werden repräsentative zeitliche Amplitudenabhängigkeiten (A-Scan) für zwei unterschiedliche BSU-Positionen gezeigt. Nach dem vollständigen Abtasten lassen sich B-Bilder berechnen (Bild 6 rechts), in denen die Amplituden farblich kodiert sind. Bereits die zwei A-scans zeigen charakteristische Verläufe. Der erste an der Probenoberfläche generierte Impuls bei 5 ps ist unabhängig von der S/E-Position immer gleich. Unterschiede in der Impulslage findet man in einem Zeitbereich zwischen 100 ps und 200 ps sowie in der Umgebung von 500 ps. Die Unterschiede ergeben sich aus den Schlitzpositionen und Schlitzbreiten. Die BSU detektiert in der Position $y=20$ den dickeren und in der Position $y=80$ den dünneren Schlitz des Probekörpers (Bild 6 links). Die in den A-scans beobachteten Impulsfolgen sind Anzeigen für die künstlich eingebauten Fehlstellen. Bei Kenntnis des Realanteils des komplexen Brechungsindex des eingesetzten PE-Materials kann aus der zeitlichen Peakposition (ToF) des zweiten Impulses die Tiefenlage des Schlitzes berechnet werden. Im Gegensatz zum US-Experiment offenbaren THz-Untersuchungen weitere Reflexe. Direkte Aussagen zu den Dicken planarer Fehlstellen anhand der weiteren Impulspositionen im ToF-Experiment sind nicht immer unmittelbar möglich und werden gerade dann schwierig, wenn Multischichtsysteme untersucht werden. Trotzdem ist es möglich, bei einer Signalanalyse unter Verwendung des Optical Layer Rekonstruktionsmodells (OLR-Modell) Tiefenlagen und Dicken planarer Diskontinuitäten zu berechnen [9]. Der Vorteil der BSU besteht vor allem in der Möglichkeit, zylinderförmige Testkörper so zu scannen, dass der Einstrahlwinkel in Bezug zur Flächennormale null Grad beträgt. Bild 7 präsentiert das B-Bild eines PE-Zylinders mit eingebrachten Fehlstellen, die als würfelförmige Quader unterschiedlicher Größe beschrieben werden können.

Das B-Bild in Bild 7 zeigt nur an wenigen Positionen stark ausgeprägte Amplitudenreflexe und die von der Objekt Oberfläche gleichmäßig verursachte erste Reflexion des eintreffenden Impulses. Der leicht wellenförmige Verlauf der Amplitudenlinie ergibt sich aus der Positionsungenauigkeit der Zylindermitte bezüglich der Drehachse des Manipulators. Die punktförmig angeordneten lokalen Maxima im relativen Laufzeitbereich um 500 ps werden von der vorderen Würfeloberfläche verursacht. Eine Position der Fehlstelle in Bezug zur Zylinderoberfläche kann berechnet werden. Die sich anschließenden lokalen Maxima zwischen 550 ps und 800 ps werden von der Würfelrückwand verursacht. Die Laufzeitabstände zwischen dem zweiten und dritten Reflex korrelieren mit der Würfel Dicke. Der B-Scan in Bild 7 verdeutlicht die Drehung der Probe im Uhrzeigersinn, beginnend mit der größten Fehlstelle. Die Ausdehnung (Würfelbreite) der planaren Flächen konnte nicht nachgewiesen werden, was zeigt, dass Impulse mit signifikanter Amplitude nur im Fall der gerichteten Reflexion zu beobachten sind. Diese ist bei planaren Fehlern unabhängig von

deren Ausdehnung. Sie sind im dokumentierten Fall genau dann zu detektieren, wenn die Flächennormalen der Zylinderoberfläche und der Würfelfläche in Bezug zur BSU-Einstrahlrichtung übereinstimmen. In allen anderen Fällen wird der einfallende Strahl von den inneren Würfelflächen so reflektiert, dass der reflektierte Strahlenanteil außerhalb des Sichtfeldes des Detektors liegt. Die Ergebnisse verdeutlichen aber, dass mit der ToF Methode ein einfaches Verfahren zur zuverlässigen Bestimmung von Ortslagen von Ungängen vorliegt. Werden genauere Kenntnisse zur Lage und Größe von Ungängen verlangt, bedarf es der TD-SAFT Rekonstruktion sowie einer dementsprechenden weitaus umfangreicheren Messmethodik.

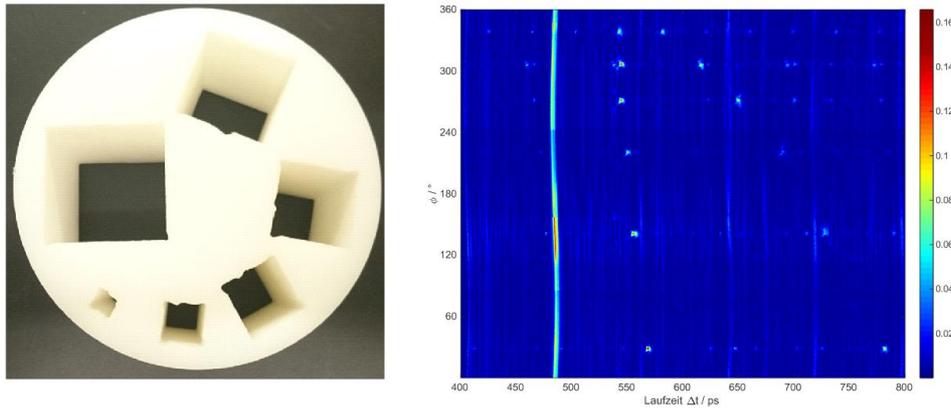


Bild 7: B-scan eines PE-Zylinders mit künstlich eingebrachten Fehlstellen; links: photographische Aufnahme; rechts: B-Bild mit farbskalierten Amplituden.

5. Ergebnisse – THz - SAFT

Bild 8 zeigt das Ergebnis einer THz-TDS-Messung an einem PE-Testkörper mit künstlich eingebrachten Fehlstellen. Voraussetzung für die Rekonstruktion sind Kenntnisse zum Reflexionsverhalten in Abhängigkeit von vorgegebenen S/E Positionen. Zu diesem Zweck wurde der Probekörper mit der BSU anfänglich gescannt. Die detektierten Daten können anfänglich wie bei der ToF als B-Bilder dargestellt werden (Bild 8 mitte, Bild 8 rechts).

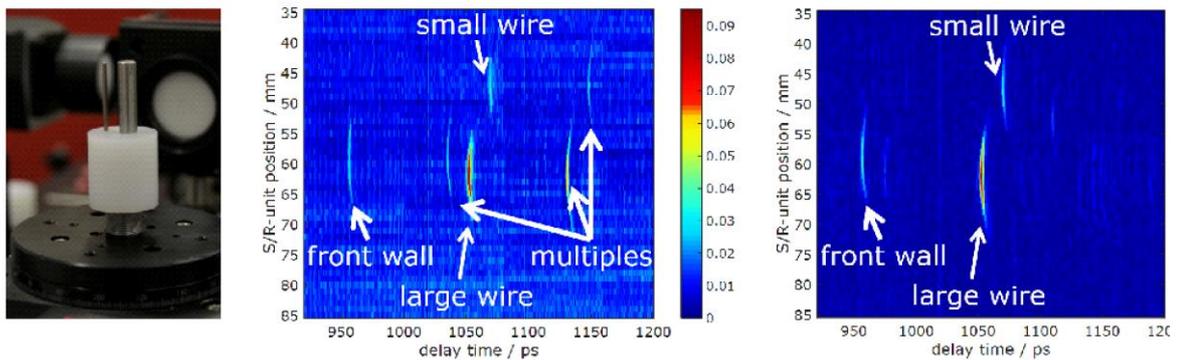


Bild 8: B-Bild (rechts) für einen vorgegebenen S/E –Positionsbereich eines mit der BSU gescannten PE-Testkörpers (links). Mit Hilfe eines Entfaltungsverfahrens wurden multiple Reflexe aus dem ursprünglichen B-Bild (mitte) herausgerechnet, um die Artefakte in der Rekonstruktion zu minimieren.

Mit Hilfe des oben beschriebenen SAFT-Algorithmus lassen sich aus den A-scans von 72 unterschiedlichen Winkelpositionen die in Bild 9 präsentierten Tomogramme rekonstruieren.

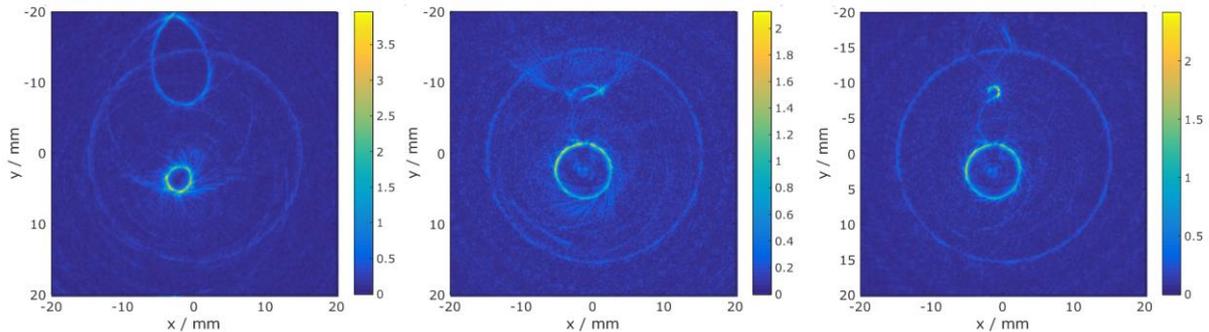


Bild 9: Aus der SAFT-Rekonstruktion berechnete Tomogramme des Testkörpers von Bild 7; links: SAFT mit $n=1$; mitte: SAFT mit $n=1.5$; rechts: TD-SAFT-Rekonstruktion

Wie in Bild 9 zu sehen, zeigen die links und mittig dargestellten Tomogramme die künstlich eingebrachten Fehlstellen nur teilweise und wenn, nicht in den richtigen Dimensionen an. Das liegt in der stark vereinfachten Annahme der Existenz eines Rekonstruktionsraumes mit nur einem Medium. Diese Annahmen dürfen im Gegensatz zum Ultraschall für die THz-Rekonstruktion nicht getroffen werden. Erst mit der Einführung eines speziellen Rekonstruktionsraumes, in dem die Existenz unterschiedlicher Impulslaufzeiten beachtet wird, führt zu einem befriedigenden Ergebnis (Bild 9 rechts). Das als TD-SAFT bezeichnet Verfahren ist in [8] detaillierter beschrieben worden.

6. Zusammenfassung

Zeitaufgelöste THz-Systeme sind für die zerstörungsfreie und berührungslose Prüfung dielektrischer Bauteile prädestiniert. Das Potential, Laufzeiten und Amplituden des sich ausbreitenden elektrischen Impulses gleichzeitig messen zu können, bietet einen wesentlichen Vorteil gegenüber anderer THz-Messverfahren. Mit ihnen lassen sich optische Materialeigenschaften über die Fouriertransformation der Zeitsignale leicht bestimmen. Vor allem die Kenntnis zur Ausbreitungsgeschwindigkeit (Realanteil des komplexen Brechungsindex) ermöglicht die Umrechnung von Laufzeiten in geometrische Größen.

Die genaue Laufzeitbestimmung von Impulsen gestatte ihre Verwendung zur einseitigen Inspektion. Die Signalanalyse der reflektierten Impulskette macht die Berechnung von Tiefenlagen von Ungängen im PE möglich. Unter Verwendung von THz-OLA können aus den reflektierten Impulsfolgen Dickenabschätzungen von planaren Fehlstellen, wie z.B. Risse oder Delaminationen bestimmt werden. SAFT-Rekonstruktionsalgorithmen basieren auf Laufzeitbestimmungen, die mit der THz-TDS detektiert werden können. Die dimensionsgerechte Rekonstruktion von gescannten Objekten erfordert jedoch im Gegensatz zum Ultraschall Verfahren Kenntnisse zur Verteilung der Laufzeiten im Rekonstruktionsraum. Dies wird in der TD-SAFT berücksichtigt. TD-SAFT bietet zudem den Vorteil einer SNR-Verbesserung um den Faktor 4.

Referenzen:

- [1] DIN 5031 Teil 7, *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche*. 1987.
- [2] D. van Mechelen, “An Industrial THz Killer Application?,” Nov. 2015.
- [3] S. S. Dhillon, M. S. Vitiello et al “The 2017 terahertz science and technology roadmap,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 4, p. 043001, Feb. 2017.
- [4] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith, “Picosecond photoconducting Hertzian dipoles,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 3, pp. 284–286, Aug. 1984.
- [5] S. Wang and X.-C. Zhang, “Pulsed terahertz tomography,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 4, pp. R1–R36, Feb. 2004.
- [6] M. Spies and W. Jager, “Synthetic aperture focusing for defect reconstruction in anisotropic media,” *Ultrasonics*, vol. 41, no. 2, pp. 125–131, 2003.
- [7] C. H. Samuel, “3-D Terahertz Synthetic-Aperture Imaging and Spectroscopy,” Portland State University, 2013.
- [8] H. Spranger, J. Beckmann, and R. Boehm, “THz-ToF techniques for the detection of inherent discontinuities in dielectric materials based on a SAFT – and an optical layer reconstruction algorithm,” in *DGZfP-Proceedings*, 2016, vol. 158, pp. 1–10.
- [9] H. Spranger and J. Beckmann, “THz – ToF Optical Layer Analysis (OLA) to determine optical properties of dielectric materials,” 2017, p. 120002.