Time of Flight Diffraction – Technik (ToFD) mit THz-Strahlung zur Untersuchung von Kunststoffobjekten

Jörg BECKMANN, Lars S. VON CHRZANOWSKI, Uwe EWERT,
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Unter den Eichen 87, 12205 Berlin
joerg.beckmann@bam.de

Kurzfassung. Als Terahertz-Strahlung bezeichnet man eine elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich zwischen 0.3 und 6 THz. Sie ist zwischen der Mikrowellen- und der Infrarotstrahlung eingeordnet und steht erst seit einigen wenigen Jahren infolge der Entwicklung von effizienten THz-Systemen für Untersuchungen im Labormaßstab zur Verfügung. Weit verbreitet ist heutzutage die THz-Spektroskopie (Time-Domain Spectroscopy, TDS) und THz – Bildgebung (THz-Imaging). Die THz-Strahlung hat wesentliche Vorteile für die Materialuntersuchung und -charakterisierung. Sie ist nicht ionisierend und verfügt über eine vergleichsweise große Eindringtiefe bei vielen nichtleitenden optisch opaquen Materialien. Verpackungsmaterialen wie z.B. Papier, Kunststoffe, Keramiken und am menschlichen Körper getragene Kleidungsstücke erscheinen im Wellenlängenbereich der THz Strahlung transparent. Unterschiedliche Materialien, wie z.B. Sprengstoffe oder Drogen zeigen im THz-Spektrum infolge kollektiver molekularer Anregungsmechanismen im Material charakteristische Absorptionsbereiche, die als „Fingerprints“ in der Pharmazie oder bei der Kriminalitätsbekämpfung zu deren Identifizierung verwendet werden. Beim THz-Imaging wird die Probe z.B. mit Hilfe eines fokussierten THz-Strahls berührungslos abgetastet, um Reflexions- oder Transmissionseigenschaften (Amplitude, Zeitverzögerung, spektrale Information) ortsaufgelöst zweidimensional zu detektieren. Sowohl das THz-Imaging als auch die THz-Spektroskopie weisen ein hohes Anwendungspotential für die berührungslose zerstörungsfreie Werkstoffprüfung von Kunststoffen, Glasfaser-Verbundstoffen oder Keramiken auf. Die ortsaufgelöste Messung der Feuchte in einem Bauteil, der Nachweis von Defekten oder von Einschlüssen im Probeninneren oder die Delaminationsvorgänge in Verbundwerkstoffen sind beispielgebend genannte Anwendungsmöglichkeiten. Die Auflösung lag dabei, bedingt durch die Wellenlänge der THz-Strahlung, im Millimeter-Bereich und ist somit vergleichbar mit der typischen Wellenlänge bei Ultraschalluntersuchungen. Die BAM verfügt über ein glasfasergekoppeltes Picometrix T-Ray 2000 System, mit dem durch die Integration eines Mehrkreisgoniometers der THz-Sender, THz-Detektor und der Probenkörper beliebig und unabhängig voneinander positioniert werden können.

Bei getrennter V-förmige Reflexanordnung der Sende- und Empfangsantenne (z. B. 45º) in Bezug zur Oberflächennormale des Prüfgegenstandes können z.B. Risse, Bohrungen oder Kerben, die sich im Inneren des „beleuchteten“ Probenvolumens befinden, nachgewiesen werden, weil die eingelagerten Inhomogenitäten sowohl eine zusätzlich Reflexion als auch eine Beugung des THz – Pulses verursachen. Charakteristisches Merkmal von TOFD (Beugungslaufzeitmethode) ist die Nutzung der von den Fehlerrändern verursachten (schwachen) Beugungssignale zur Bildgebung. Damit bietet TOFD in Analogie zum gleichnamigen Ultraschallprüfverfahren generell nicht nur die Möglichkeit zum Fehlernachweis, sondern vor allem auch die der Fehlergrößenbestimmung und Fehlerlage. Der Beitrag zeigt, wie mit Hilfe der Time of Flight - Diffractions - Technik künstlich in Kunststoffkörper eingebrachte Fehlstellen berührungslos nachgewiesen und deren laterale Ausdehnungen bestimmt werden können.

Lizenz: http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de

TIME of FLIGHT DIFFRACTION-Technik (ToFD) mit THz-Strahlung zur Untersuchung von Kunststoffobjekten

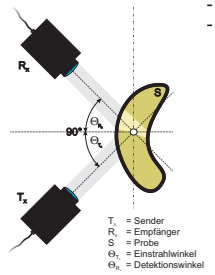
Jörg Beckmann[a], Lars S. von Chrzanowski[a], Benjamin Ewers[b] und Uwe Ewert[a]
[a] BAM - Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, [b] Philipps-Universität Marburg

Einführung und Motivation

- Terahertz (THz) Strahlung besteht aus elektromagnetischen Wellen in einem Frequenzbereich zwischen 0,3 und 6 THz.
- Optisch trübe Materialien, wie Kunsstoffe und andere isolierende bzw. schwach leitende Materialien sind für die THz-Strahlung transparent.
- Mit Hilfe der zeitaufgelösten THz-Spektroskopie (THz-TDS) werden die Wechselwirkungen des elektrischen Feldes mit dem Material untersucht.
- Bei der THz-TDS wird die elektromagnetische Strahlung an Grenzflächen gebrochen, reflektiert und innerhalb des Materials absorbiert.
- Die FFT-Analyse der THz-Pulsantwort ermöglicht die Bestimmung des materialspezifischen komplexen Brechungsindexes im THz-Wellenlängenbereich.
- Die Analyse des Pulses in der Zeitdomäne bezüglich der Laufzeit (TOF) und Signalamplitude ermöglicht die Bestimmung von Materialkennwerten (Brechungsindex, Absorption) und Tiefenlagen von im Material liegenden Grenzflächen.
- Im Gegensatz zum Ultraschall können mehrere hintereinander liegende Grenzflächen gleichzeitig detektiert werden.

Ersatztechnik für Ultraschallprüfung nichtmetallischer Werkstoffe

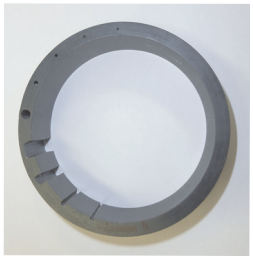
THz - ToFD
Time of Flight Diffraction



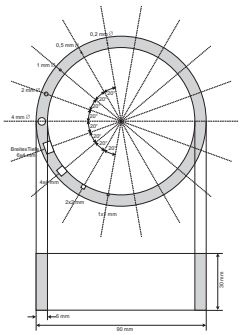
Messung

- ohne Koppelmittel
- berührungslos
- THz Puls mit 20 ps Auflösung

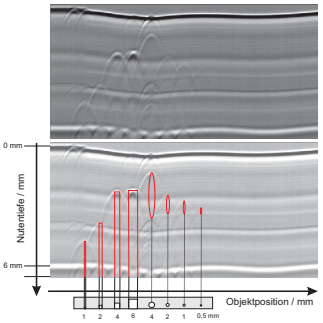
Nutenring aus PVC



Skizze: Nutenring

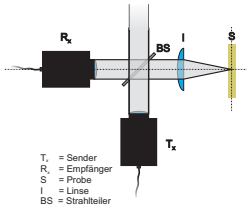


ToFD - Bild: Nutenring abgewickelt

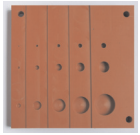


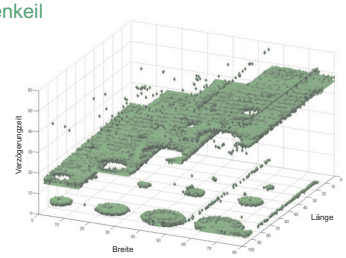
Nuten + Querlochprofile

THz - Scan
Time of Flight

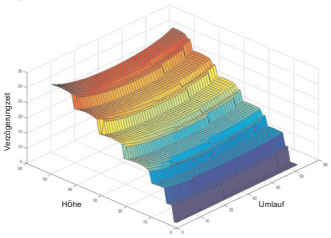


Stufenkeil

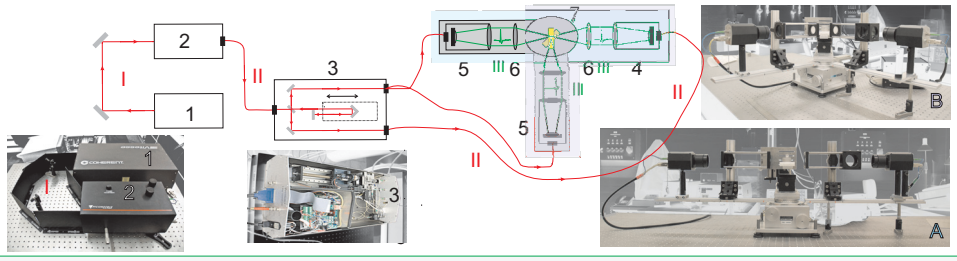




Stufenrohr



THz-TDS Experiment



1 - FS-Laser (Vitesse 800-2, Coherent)
2 - Dispersions Kompensator
3 - Strahlteiler und Verzögerungsstrecke
4 - THz Sender, 5 - THz Empfänger (Komponenten 2-5: T-Ray 2000, Picometrix)
6 - Polyethylen Linsen
7 - Goniometer (Huber, Serie 402) und Probe

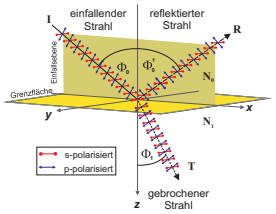
I - freier LASER Strahl
II - LASER in der Glasfaser
III - freier THz Strahl

A - Transmissionsanordnung
B - Reflexionsanordung

Schlussfolgerung

THz-TDS Laufzeitmessungen können in der Reflexionsanordnung sowohl zur Ermittlung geometrischer Abmessungen von isotropen Körpern als auch zur Bestimmung von Tiefenlagen der im Material eingebetteten Grenzflächen genutzt werden. Die THz-ToFD Technik kann in Analogie zur ToFD UT Methode für Nichtmetalle eingesetzt werden. Im Gegensatz zur UT benötigt THz-ToFD dabei keine Koppelmittel, keinen direkten Materialkontakt und liefert Reflexe von mehreren hintereinander gelegenen Oberflächen. Das Auflösungsvermögen des Messverfahrens wird durch die Pulsbreite, die Unterschiede der Brechungsindizes, der Einstrahlwinkel sowie vom Absorptionsverhalten des Testkörpers selbst bestimmt.

Theorie



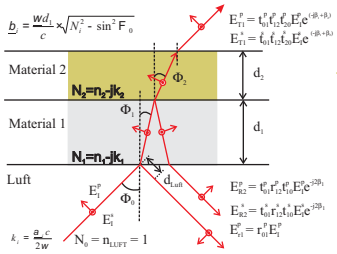
Fresnelsche Gleichungen

$$\frac{E_{\Phi s}}{E_{\Phi s}} = t_{\Phi p} = \frac{2 \cdot N_i \cos\Phi_i}{N_t \cos\Phi_t + N_j \cos\Phi_j}$$

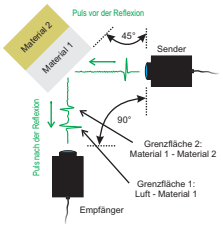
$$\frac{E_{\Phi s}}{E_{\Phi s}} = r_{\Phi p} = \frac{N_i \cos\Phi_i - N_j \cos\Phi_j}{N_i \cos\Phi_i + N_j \cos\Phi_j}$$

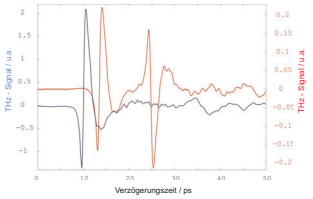
$$\frac{E_{\Phi p}}{E_{\Phi p}} = t_{\Phi p} = \frac{2 \cdot N_i \cos\Phi_i}{N_j \cos\Phi_t + N_i \cos\Phi_j}$$

$$\frac{E_{\Phi p}}{E_{\Phi p}} = r_{\Phi p} = \frac{N_j \cos\Phi_i - N_i \cos\Phi_j}{N_j \cos\Phi_t + N_i \cos\Phi_j}$$



Reflexion





Kontakt Information: Dr. Jörg Beckmann, VIII.3 Radiologische Verfahren
Telefon: +49 (30) 81 04 - 36 91, Telefax: +49 (30) 81 04 - 18 37, e-mail: joerg.beckmann@bam.de

BAM