

Tomografische Bildgebung mit vollelektronischen Terahertz-Systemen zur Prüfung von Kunststoff-Bauteilen

Benjamin LITTAU¹, Jens TEPE², Stefan KREMLING¹, Thomas SCHUSTER², Thomas HOCHREIN¹, Peter HEIDEMEYER¹

¹ SKZ - Das Kunststoff-Zentrum, Würzburg ² Universität des Saarlandes, FR 6.1 Mathematik Campus, Saarbrücken

Kurzfassung. Terahertz (THz)-Strahlung weist besonders in der Kunststoffverarbeitung beachtliches Potenzial für die zerstörungsfreie Prüfung und Qualitätskontrolle auf. Zweidimensionale bildgebende Verfahren zur Prüfung an ebenen Bauteilen zeigten bereits die Möglichkeiten zur Identifizierung verschiedener Materialparameter, wie z. B. Additiv- und Feuchtegehalt oder Faserausrichtung. Gleichzeitig ist die Detektion von Verunreinigungen, Rissen und Lunkern im Bauteil möglich. Die zerstörungsfreie Prüfung von Bauteilen mit einer komplexen dreidimensionalen Geometrie geschieht häufig mit dem Einsatz von tomografischer Bildgebung. Stand der Technik ist die Untersuchung mit Röntgen-Computertomografie (CT).

Die THz-Tomografie ist ein vergleichsweise junges Gebiet, auf dem aktiv geforscht wird. Bisherige Ergebnisse demonstrierten die grundsätzliche Funktionsweise und das Prinzip der tomografischen Bildgebung mit THz-Strahlung. Bei der Bildrekonstruktion treten häufig noch erhebliche Probleme auf. Stark ausgeprägte Artefakte im Bild sind durch die Eigenschaften der THz-Strahlung bedingt. Das Fehlen geeigneter Algorithmen zur Bildrekonstruktion ist einer der Hauptgründe, welcher einem industriellen Einsatz entgegensteht.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde ein Demonstrator zur tomografischen Bildgebung mit THz-Strahlung aufgebaut. Zusätzlich wurden neuartige Algorithmen entwickelt und erprobt. Durch Berücksichtigung von Brechung und Reflexionsverlusten beim Auftreffen der Strahlung auf eine Grenzfläche konnte als Ergebnis eine erhebliche Verbesserung des rekonstruierten Bildes erreicht werden. In einem ersten Schritt nutzt der Algorithmus die gemessene reflektierte Strahlung zur Rekonstruktion eines Grenzflächenbildes. Im zweiten Schritt wird diese Information genutzt, um ein Bild der Materialparameter zu rekonstruieren. Dieser zweistufige Algorithmus erzielt eine erhebliche Reduktion von Bildartefakten. Es ergeben sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für den Einsatz des THz-Tomografie-Systems in der zerstörungsfreien Prüfung von Kunststoff-Bauteilen.



1 Einführung

In den vergangenen Jahren erzielte die Geräte-Technik der THz-Technologie rasante Fortschritte. Allmählich erschließen sich reale Anwendungen auch außerhalb von Entwicklungslaboren. Im Bereich der Werkstoff- und Bauteilprüfung sind v. a. Kunststoffe in den Fokus des Interesses getreten, da diese in den meisten Fällen leicht von THz-Strahlung zu durchdringen sind [1, 2].

Die THz-Technologie kann erhebliche Entwicklungserfolge aus den letzten Jahren vorweisen, was eine breitere Nutzung verspricht. Jedoch sind die Möglichkeiten zur Umsetzung für räumlich bildgebende Verfahren bislang nur rudimentär untersucht worden. Bildgebende THz-Systeme vereinen die Vorteile von Röntgen- und Ultraschallverfahren und eliminieren gleichzeitig Nachteile in einzigartiger Weise. THz-Strahlen besitzen aufgrund ihrer vergleichsweise großen Wellenlänge nur ein sehr eingeschränktes laterales Auflösungsvermögen. Jedoch können, analog zur Ultraschalltechnik und im Gegensatz zu den klassischen tomografischen Techniken, durch den Einsatz modulierter THz-Strahlung zusätzlich zeitaufgelöste und spektrale Informationen gewonnen werden [3]. THz-Strahlung wird, ähnlich wie Ultraschall- oder Lichtwellen, an Grenzflächen teilweise reflektiert bzw. transmittiert und ermöglicht somit bei zeitaufgelösten Messungen zusätzliche Laufzeitinformationen, was Tiefeninformationen in Ausbreitungsrichtung entspricht. Durch diese Zusatzinformationen bietet die Technologie die Voraussetzung, das Auflösungsvermögen verglichen mit konventionellen Tomografieverfahren weiter zu verbessern und zusätzliche Informationen über die Geometrie, Zusammensetzung und dielektrischen Eigenschaften zu gewinnen. Die THz-Technologie kann durch Kombination von zeitaufgelösten Informationen in Ausbreitungsrichtung (analog zur klassischen Ultraschalltechnik) und der Abschwächung der Intensität von elektromagnetischen Wellen (analog zu Röntgenstrahlen) die Nachteile beider Verfahren aufheben.

Tomografieverfahren, welche mit THz-Wellen arbeiten, sind bisher nicht sehr ausführlich untersucht worden [4, 5]. Daher befindet sich dieser Bereich noch im Anfangsstadium der Forschung. Viele häufig als "THz-Tomografie" bezeichneten Veröffentlichungen zeigen keine tomografischen Aufnahmen im eigentlichen Sinne (Schnittbildverfahren), sondern beruhen auf einer normalen zweidimensional bildgebenden Technik [4, 6]. Bildrekonstruktionen beruhen häufig auf der Anwendung konventioneller Algorithmen aus der Computertomografie. Die rekonstruierten Aufnahmen zeigen aus diesem Grund typischerweise noch Bildartefakte, die durch das Vernachlässigen der Welleneigenschaften der THz-Strahlung entstehen [7].

In dieser Arbeit wird ein speziell für die THz-Tomografie entwickelter Rekonstruktionsalgorithmus vorgestellt, welcher optische Phänomene wie z. B. Brechung und Reflexionsverluste an Grenzflächen berücksichtigt. Der Algorithmus zeigt eine erhebliche Reduktion von Bildartefakten in den rekonstruierten Bildern. Weiterführende Untersuchungen zur quantitativen Bewertung der Auflösung sowie der Möglichkeiten zur Fehlerdetektion und Materialprüfung werden damit ermöglicht.

2 THz-Tomografie-System

Das hier verwendete THz-Tomografie-System basiert auf vollelektronischer THz-Technologie und arbeitet analog zu einem frequenzmodulierten Dauerstrich-Radar (FMCW). Der Signalpfad eines Ein-Kanal-Messsystems ist schematisch in Abbildung 1 skizziert.



Abbildung 1: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines vollelektronischen THz-Systems

Ein Digital-Analog-Umsetzer (ADU) erzeugt unterschiedliche Spannungswerte, welche anschließend durch ein Tiefpassfilter geglättet und an einen spannungsgesteuerten Oszillator (VCO) übergeben werden. Der VCO erzeugt ein von der Eingangsspannung abhängiges sinusförmiges Signal. Wird eine Sägezahnspannung am Eingang des VCO angelegt, ist das Ergebnis am Ausgang des VCO ein linear-frequenzmoduliertes Dauerstrich-Signal. Die Frequenz bewegt sich im Bereich zwischen 10 und 20 GHz und wird mit einem aktiven Frequenzvervielfacher ins W-Band zwischen 70 und 110 GHz transformiert. Über eine Hornantenne wird die THz-Strahlung in den freien Raum ausgekoppelt. Nach entsprechender Strahlformung und Interaktion mit einer Probe wird das THz-Signal in den Empfänger eingekoppelt. Für eine kohärente Detektion wird das gesendete Signal, wie in Abbildung 1 dargestellt, auch in den Mischer des Empfängers gespeist. Beim Messvorgang resultiert am Mischer im Empfangspfad eine Multiplikation der ausgesendeten Schwingung $\cos(\omega_s t)$ und des empfangenen Signals $\cos(\omega_e t)$:

$$f_{mixer}(t) = \cos(\omega_s t) \cdot \cos(\omega_e t) = \frac{1}{2}(\cos[(\omega_s - \omega_e)t] + \cos[(\omega_s + \omega_e)t])$$
 2.1

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. Die Differenzfrequenz ist bei linearer Frequenzmodulation proportional zur Laufzeit der elektromagnetischen Welle. Beim Auftreten mehrerer gestreuter Wellen an der Probe sind mehrere Differenzfrequenzkomponenten im detektierten Signal enthalten, welche durch z. B. eine Fourier-Analyse getrennt werden können. Das verwendete THz-Messsystem besteht insgesamt aus einen THz-Sender und vier Empfängern, welche alle identisch aufgebaut sind.



Abbildung 2: Aufbau zur Durchführung tomografischer Messungen in Transmission. Die Probe wird um 360° an verschiedenen Positionen entlang der X-Achse rotiert.

3 Rekonstruktionsalgorithmus

Der Algorithmus zur Berechnung des komplexen Brechungsindex berücksichtigt die hybride Struktur der Messdaten des vollelektronischen THz-Tomografie-Systems und verwendet sowohl Intensitätsdaten als auch gemittelte Laufzeiten, d. h. tiefenaufgelöste Zeitsignale. Der SAFT-Algorithmus erlaubt, aus den Pulsdaten die Grenzflächen des Objektes zu bestimmen. Diese Grenzflächen werden als a priori Information genutzt. Der neue Algorithmus setzt also voraus, dass Grenzflächen des Objektes in den betroffenen Pixeln bekannt und deren Orientierung durch Normalenvektoren <u>n</u> senkrecht zu den jeweiligen Grenzflächen (Lot) gegeben sind, wie in Abbildung 3 a) schematisch dargestellt.



Abbildung 3: a) Skizze der Normalen auf den Grenzflächen eines Objektes.
b) Snellius'sches Brechungsgesetz mit der Normalen <u>n</u> auf der Grenzfläche und den Richtungsvektoren <u>v</u>_e, v_g und <u>v</u>_r des einfallenden, gebrochenen und reflektierten Strahls.

Für die Rekonstruktion wird die klassische Algebraic Reconstruction Technique (ART) um die Brechung an den Grenzflächen nach dem Snellius'sches Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \gamma_1}{\sin \gamma_2} = \frac{n_2}{n_1} \tag{3.1}$$

und der Einbeziehung von Reflexionsverlusten nach den Fresnel'schen Formeln

$$t_{s} := \frac{E_{ts}}{E_{0}} = \frac{2n_{1}\cos\gamma_{1}}{n_{1}\cos\gamma_{1} + n_{2}\cos\gamma_{2}}$$

$$r_{s} := \frac{E_{rs}}{E_{0}} = \frac{n_{1}\cos\gamma_{1} - n_{2}\cos\gamma_{2}}{n_{1}\cos\gamma_{1} + n_{2}\cos\gamma_{2}}$$
3.2

erweitert, wie in Abbildung 3 b) skizziert. Das Ergebnis ist eine modifizierte ART für die THz-Tomografie, welche Brechung und Transmission berücksichtigt und anhand gemittelter Laufzeiten und Intensitätsdaten den Brechungsindex und den Absorptionskoeffizienten simultan innerhalb des Algorithmus bestimmen kann. Die Berücksichtigung der Ablenkung des Strahls und der Reflexionsverluste wurde bereits bei Mukherjee [8] für zylinderförmige Objekte beschrieben und wird hier für allgemeine Objekte mit gegebener Geometrie und Grenzflächen erweitert.

3.1 Berücksichtigung des Snellius 'schen Brechungsgesetzes

Das Aufstellen der Matrix A in der klassischen ART beschränkt sich auf die Berechnung der Länge, mit der der Strahl *i* den Pixel *j* durchläuft. Da die Brechung von THz-Strahlen

an Grenzflächen und die damit verbundene Richtungsänderung der Strahlen eine entscheidende Rolle spielt, sollen bei der Berechnung von A nun die Grenzflächen mit berücksichtigt werden. Die neue Strahlrichtung, unter Berücksichtigung des Snellius'schen Brechungsgesetz (3.3) ist der Einfallswinkel γ_1 zwischen dem Richtungsvektor des einfallenden Strahls ν_e und der Normalen <u>n</u>:

$$\gamma_1 = \operatorname{acos} \frac{\left| \langle \underline{\nu}_e, \underline{n} \rangle \right|}{\left\| \underline{\nu}_e \right\|_2 \left\| \underline{n} \right\|_2} \,. \tag{3.3}$$

Der Winkel γ_2 zur Berechnung der neuen Richtung des gebrochenen Strahls ist dann:

$$\gamma_{2} = \begin{cases} \pi - \gamma_{1}, & \text{falls } n_{1} > n_{2} \land \gamma_{1} \ge \operatorname{asin} \frac{n_{2}}{n_{1}} \text{ (Total reflexion)} \\ \operatorname{asin} \frac{n_{1} \sin \gamma_{1}}{n_{2}}, & \text{sonst.} \end{cases}$$

$$3.4$$

Der neue Richtungsvektor des Strahls ist gegeben durch:

$$\nu_g = \pm R_\theta \underline{n} \tag{3.5}$$

mit der Rotationsmatrix

$$R_{\theta} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$
 3.6

mit $\theta = \pm \gamma_2$. Die Vorzeichen von R und γ_2 richten sich nach der Orientierung der Normalen <u>n</u> zum einfallenden Strahl. Abbildung 4 zeigt eine Simulation von Strahlverläufen unter Berücksichtigung von Brechung an einem rechteckigen Probekörper mit einem Brechungsindex von n = 1,5. Die Brechung der Strahlen an den Grenzflächen sowie teilweise die Totalreflexionen an der Rückseite der Probe sind eindeutig zu erkennen.



Abbildung 4: Berücksichtigung der Brechung nach dem Snellius'schen Brechungsgesetz beim Auftreffen auf einen rechteckigen Probekörper.

3.2 Berücksichtigung der Fresnel'schen Formeln

Im Gegensatz zur Computertomografie mit Röntgenstrahlen haben Reflexionsverluste signifikanten Einfluss auf den gemessenen Transmissionsgrad τ . Ziel ist daher, die gemessenen Intensitätsdaten insofern zu korrigieren, sodass Reflexionsverluste für die Rekonstruktion des Absorptionskoeffizienten berücksichtigt werden. Nach den Fresnel'schen Formeln (3.2) ergeben sich die Reflexionsverluste an einer Grenzfläche, hier beispielhaft für die senkrechte Polarisation, als

$$\rho = \left|\frac{E_r}{E_0}\right|^2 = \left|\frac{n_1 \cos \gamma_1 - n_2 \cos \gamma_2}{n_1 \cos \gamma_1 + n_2 \cos \gamma_2}\right|^2.$$
 3.7

Die Intensität verringert sich nach N Grenzflächen um den Faktor

$$C_{abs} \coloneqq \prod_{i=1}^{N} (1 - \rho_i) \,. \tag{3.8}$$

Hinzu kommt der Verlust durch Absorption:

$$a = exp\left(-\int_{\gamma} \alpha dx\right).$$
 3.9

Am Empfänger wird demnach folgender Transmissionsgrad gemessen:

$$\tau = a \prod_{i=1}^{N} (1 - \rho_i) \,. \tag{3.10}$$

Die Rekonstruktion des Absorptionskoeffizienten α kann wie folgt umgeformt werden:

$$\int_{\gamma} \alpha dx = \ln \left(\frac{I_0}{I_1} \right) = \ln \left(\frac{1}{\tau} \prod_{i=1}^{N} (1 - \rho_i) \right).$$
 3.11

Die Berücksichtigung der Brechung erfordert eine komplexere Berechnung der Strahlwege und damit der Matrix A, während die Einbeziehung der Fresnel'schen Verluste direkt auf die Messwerte einwirkt. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Rekonstruktion des reellen Brechungsindex einen direkten Einfluss auf die Rekonstruktion des Absorptionskoeffizienten hat, da die Reflexionsverluste unter Verwendung der Brechungsindizes vor und nach der Grenzfläche berechnet werden. Für die Rekonstruktion von n und α kann die gleiche Matrix A verwendet werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

Zur Validierung der Funktionalität des Algorithmus werden verschiedene Probekörper aus unterschiedlichen Materialien gemessen und anschließend mit konventionellen als auch mit dem modifizierten Verfahren rekonstruiert.

Das erste Testobjekt besteht aus einer homogen Platte aus Polyethylen (PE) mit einem Brechungsindex von $n \approx 1,5$. Die Höhe des Objektes wird vernachlässigt und nur ein Schnittbild der *x-y*-Ebene rekonstruiert. Das Objekt misst 59,5 mm in der Breite und 30,25 mm in der Tiefe. Abbildung 5 a) zeigt die Rekonstruktion des PE-Probekörpers mittels gefilterter Rückprojektion. Der Brechungsindex in Falschfarbendarstellung codiert. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kanten des Objektes nicht korrekt wiedergegeben werden. Eine etwas homogenere Rekonstruktion kann mit dem klassischen ART-Verfahren erzielt werden. Aber auch hier sind die Kanten des Objektes noch etwas abgerundet bzw. es kommt zur Ausbildung von Artefakten. Die Berechnung mittels modifizierter ART mit den Messdaten hingegen liefert die beste Rekonstruktion des Probekörpers, wie Abbildung 5 c) eindrucksvoll beweist.



Hier sind die Kanten und Ecken des rechteckigen Probekörpers sowie eine homogene Verteilung des Brechungsindex im inneren sehr gut zu erkennen.

Neben dem PE-Probekörper wurde ein weiterer Probekörper aus Polyamid (PA) untersucht. Dieses Material absorbiert THz-Strahlung deutlich mehr als das zu zuvor untersuchte PE. Daher wurde in diesem Fall neben dem Brechungsindex (was hier nicht explizit gezeigt ist) auch der Absorptionskoeffizient rekonstruiert. Abbildung 6 zeigt die Rekonstruktion mittels konventionellen (a) sowie mittels modifizierten ART-Verfahren (b) in Falschfarbendarstellung. Die Skalierung der Farbdarstellung ist in cm⁻¹ angegeben.



Abbildung 6: Absorptionskoeffizient einer PA-Plattea) konventionelles Verfahren (klassisches ART-Verfahren)b) modifiziertes ART-Verfahren

Auch hier ist eindeutig zu erkennen, dass die Rekonstruktion mit dem klassischen ART-Verfahren (Abbildung 6 a)) die Kontur und Homogenität des Objektes schlecht wiedergibt. Dagegen ist die Rekonstruktion mit dem hier vorgestellten modifizierten ART-Verfahren signifikant besser (Abbildung 6 b)).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend zeigen sich durch den neu entwickelten, hybriden Rekonstruktionsalgorithmus erhebliche Potenziale für die THz-Tomografie auf. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Fehler in der Geometrie und Fremdkörper anhand der Rekonstruktion nun zuverlässig detektiert werden können. Weiterhin wird auch eine Bestimmung von Materialeigenschaften wie z. B. Brechungsindex und Absorptionskoeffizient des Probekörpers ermöglicht. Allerdings liegt die Dauer bei der Durchführung einer Messung eines einzelnen Schnittbildes noch immer im Bereich einiger Stunden. Anschließend muss dann noch die Bildrekonstruktion erfolgen.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Arbeit sollen nun weiterführende Entwicklungen, z. B. bezüglich einer Optimierung der Messdauer, erfolgen. Das THz-Tomografie-System kann so für den Einsatz in der kontinuierlichen Prozessüberwachung adaptiert werden. Eine stetige Überwachung von Materialparametern, Objektgeometrie und Fremdkörperdetektion im kontinuierlichen Prozess würde ermöglicht werden. In kunststoffverarbeitenden Prozessen, wie der Extrusion, würde dies zahlreiche Vorteile bieten. Anfahrtszeiten würden verkürzt und Ausschussmengen erheblich reduziert. Weiterhin wäre eine vollständige Automatisierung der Anlage denkbar und nahezu alle qualitätsrelevanten Daten des Endprodukts würden durch die tomografische Messung verfügbar.

6 Danksagung

Wir danken dem Fördermittelgeber für die finanzielle Unterstützung. Das IGF-Vorhaben 457 ZN der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das SKZ e. V. 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] 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.
- [2] T. Hochrein, "Markt, Entwicklung und Stand der Technik der Terahertz-Systeme: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft," DGZfP-Jahrestagung, Dresden, 2013.
- [3] 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.
- [4] B. Ferguson, S. Wang, D. Gray, D. Abbot und X.-C. Zhang, "T-ray computed tomography," *Optics Letters*, Bd. 27, Nr. 15, pp. 1312-1314, 2002.
- [5] S. Wang und X.-C. Zhang, "Pulsed terahertz tomography," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bd. 37, Nr. 4, pp. R1-R36, 2004.
- [6] T. Löffler und H. Quast, "3D-Terahertz-Bildgebung für die zerstörungsfreie Materialprüfung," *Technisches Messen*, Bd. 77, Nr. 6, pp. 349-352, 2010.
- [7] A. Brahm, A. Wilms, M. Tymoshchuk, C. Grossmann, G. Notni und A. Tünnermann, ,Optical Effects at projection measurements for Terahertz tomography," *Optics & Laser Technology*, Bd. 62, Nr. 0, pp. 49-57, 2014.
- [8] S. Mukherjee, J. Federici, P. Lopes und M. Cabral, "Elimination of Fresnel Reflection Boundary Effects and Beam Steering in Pulsed Terahertz Computed Tomography," *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, Bd. 34, Nr. 9, pp. 539-555, 2013.