

Untersuchung der Bauteileigenschaften von Kunststoffprodukten mittels zeitaufgelöster Terahertz-Spektroskopie

Johannes HAUCK, Dominik STICH, Peter HEIDEMEYER, Martin BASTIAN,
Thomas HOCHREIN
SKZ - Das Kunststoff-Zentrum
Friedrich-Bergius-Ring 22, 97076 Würzburg,
j.hauck@skz.de

Kurzfassung. Die Terahertz-(THz)-Technologie bietet ein großes Potential für die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP). Insbesondere Kunststoffe transmittieren gut im THz-Spektralbereich und sind somit für die ZfP mittels THz-Strahlung prädestiniert. Bisher wurde meist an speziell ausgewählten Kunststoffen gezeigt, dass mit zeitaufgelöster THz-Spektroskopie neben Wanddickenmessungen unter anderem die Füllstoffverteilung, Glasübergangstemperatur sowie der Feuchtegehalt untersucht werden können. Eine grundlegende Evaluierung der Potenziale der zeitaufgelösten THz-Spektroskopie durch orts aufgelöste Messungen an industrierelevanten Kunststoffen ist bisher noch nicht erfolgt. Als ersten Schritt in diese Richtung präsentieren wir Beispiel in diesem Beitrag zur Anwendbarkeit der zeitaufgelösten THz-Spektroskopie für unterschiedliche, häufig verwendete Kunststoffe. Unser Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Detektionsfähigkeit von Füllstoff- und Feuchteverteilungen sowie der strukturellen Aufklärung an Spritzgießbauteilen. Alle Messungen wurden orts aufgelöst mit einem zeitaufgelöstem THz-System in Transmissionsgeometrie durchgeführt. Zukünftig sollen vor allem die Möglichkeiten der Reflexionsmessung tiefergehend evaluiert werden, da dies der eigentlich industrierelevanten Messanordnung mit nur einseitigem Probenzugang entspricht.

1. Einführung

Der THz-Spektralbereich umfasst im elektromagnetischen Spektrum die Frequenzen von 0,1 bis 10 THz. Im niederfrequenten Bereich befinden sich die Mikrowellen- und Radartechnik (elektronische Technologie) in unmittelbarer Nachbarschaft zum THz-Spektralbereich. Dieser wird im hohen Frequenzbereich von der Infrarotstrahlung begrenzt (optische Technologie). Aufgrund dieser besonderen Lage im elektromagnetischen Spektrum zwischen Elektronik und Optik sind erst seit den letzten Jahrzehnten geeignete Quellen und Detektoren verfügbar [1,2]. Momentan ist die THz-Technologie an der Schwelle zur industriellen Nutzung [3,4]. Besonders hervorzuheben ist im Gegensatz zu Röntgenstrahlen aufgrund der geringen Photonenenergien im meV-Bereich die fehlende ionisierende Wirkung. Daher können THz-Wellen mit geringen Energiedichten als gesundheitlich unbedenklich angesehen werden. Dielektrische Materialien und somit auch die meisten Kunststoffe können von THz-Wellen gut durchdrungen werden [5]. Daher ist diese Strahlungsart



zur ZfP von Kunststoffen prädestiniert. Je nach Wellenlänge beträgt das laterale Auflösungsvermögen 0,05 bis 1 mm.

Unpolare Polymere wie Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) weisen kaum Absorption im THz-Spektralbereich auf. Kunststoffe mit polaren Molekülketten wie beispielsweise Polyamide (PA) zeichnen sich durch charakteristische Absorptionsbanden aus. Im Gegensatz zu elektrischen Isolatoren reflektieren elektrisch leitfähige Materialien die THz-Strahlung nahezu vollständig. Bei Frequenzen ab 0,5 THz beeinflusst auch die Luftfeuchtigkeit aus der Umgebung die Messungen, da charakteristische Wasserabsorptionslinien auftreten.

Zur Erzeugung und Detektion von THz-Wellen sind je nach Einsatzgebiet unterschiedliche THz-Systemarten verfügbar. Diese gliedern sich zunächst in optische und elektronische Messtechnik. Elektronische Systeme basieren auf dem Prinzip der Mikrowellentechnologie es sind Frequenzen von 0,1 bis 1 THz verfügbar. Vollelektronische THz-Systeme werden meistens als frequenzmoduliertes Dauerstrichradar (FMCW) betrieben, sodass Tiefenprofile aufgenommen werden können [6, 7]. Optische THz-Systeme hingegen basieren auf der Erzeugung von THz-Wellen durch Laser. Bei optischen CW-Systemen wird durch Überlagerung von zwei Lasern eine Schwebungsfrequenz im THz-Bereich generiert [8]. Optische THz-Zeitbereichsspektrometer verwenden Femtosekundenlaser, um mittels fotoleitender Schalter die THz-Pulse zu erzeugen [5]. Die zuletzt genannte Technologie wird im Rahmen der hier präsentierten Untersuchungen verwendet, sodass im Folgenden näher auf diese Technologie eingegangen wird.

2. Versuchsdurchführung

2.1 THz-Systemtechnik

Die Untersuchungen wurden mit einem gepulsten Zeitbereichsspektrometer durchgeführt. Die fotoleitenden Schalter der THz-Antennen basieren auf einem LT-InGaAs/InAlAs-Halbleitersubstrat, in welchem durch Fotogeneration mit einem ultrakurzen Laserpuls kurzzeitig freie Ladungsträger erzeugt werden [5]. Die Ladungsträger werden in einem angelegten elektrischen Feld beschleunigt. Dieser kurzzeitige Stromimpuls im fotoleitenden Schalter der Senderantenne ist nach der Maxwellschen Theorie mit der Abstrahlung eines breitbandigen elektromagnetischen Pulses mit Frequenzanteilen von 0,1 bis ca. 3,5 THz verbunden. Somit besitzt dieser eine zeitliche Ausdehnung von wenigen Pikosekunden. Die Detektion des THz-Pulses geschieht auf umgekehrtem Weg. Bei gleichzeitigem Auftreffen von Laser- und THz-Puls werden die generierten Ladungsträger im Feld des THz-Pulses beschleunigt. Der resultierende Fotostrom ist proportional zur Amplitude des elektrischen Felds des THz-Pulses und wird nach einem Lock-in Verstärker gemessen. In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau eines solchen THz-Zeitbereichsspektrometers dargestellt. Die prinzipielle Funktionsweise derartiger Systeme ist bereits in verschiedenen Quellen detailliert beschrieben [2,5].

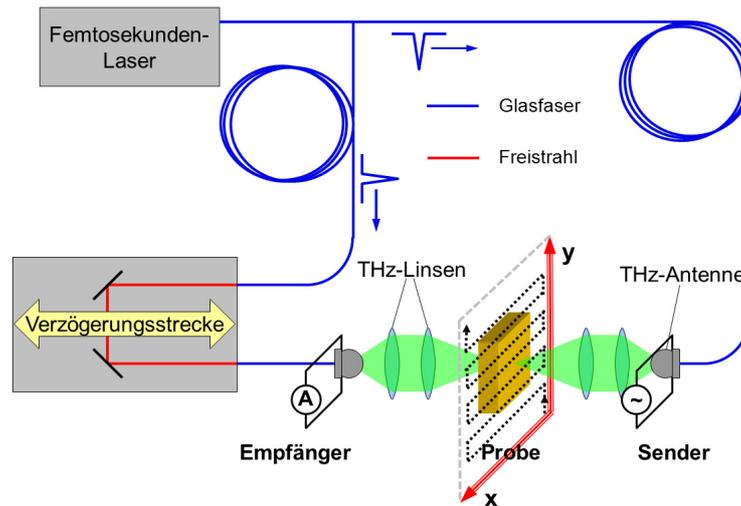


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines THz-Zeitbereichsspektrometers: In der Senderantenne werden THz-Pulse durch Laserpulse generiert. Die Detektion des durch die Probe gelaufenen Pulses erfolgt im Empfänger durch einen zweiten Laserpuls. Die Verzögerungsstrecke verschiebt den vergleichsweise sehr kurzen Laserpuls gegenüber dem längeren THz-Puls und ermöglicht so ein Abtasten.

Die von einem Femtosekundenlaser (Fa. Menlo Systems GmbH, zentrale Wellenlänge 1550 nm, maximale Pulsdauer 100 fs) erzeugten Laserpulse gelangen über Lichtwellenleiter zu den Antennenmodulen. Durch die Faserkopplung wird die Robustheit und Stabilität zu den in Laboren üblichen Freistrahlsystemen deutlich verbessert. Polarisierungserhaltende Fasern gewährleisten optische Stabilität bei einer Bewegung und Berührung der Lichtwellenleiter. Lediglich in der gekapselten einstellbaren Verzögerungsstrecke ist der Laser noch im Freistrah geföhrt. Durch eine Änderung des Auftreffzeitpunktes zwischen des Laser- und THz-Puls auf der Detektorantenne durch die variable optische Verzögerungsstrecke kann der einige Pikosekunden breite THz-Puls durch den vergleichsweise scharfen Laserpuls abgescannt werden.

Die Fourier-Transformation des gemessenen THz-Pulses im Zeitbereich liefert ein frequenz aufgelöstes Spektrum, das typischerweise eine Frequenzbandbreite von etwa 0,1 bis 3,5 THz aufweist. Der Vorteil von derartigen THz-TDS-Systemen (Time Domain Spectroscopy) liegt in der Möglichkeit, durch die Verwendung von gepulster Strahlung simultan Amplituden- und Phaseninformation spektral aufgelöst messen zu können. Durch die Kenntnis des Amplituden- und Phasenspektrums können die Materialparameter Brechungsindex und Absorption berechnet werden.

2.2 THz-Prüfstand

Zur orts aufgelösten Messung von Kunststoffbauteilen wurde ein THz-Prüfstand (siehe Abbildung 2) basierend auf dem oben beschriebenen THz-Zeitbereichsspektrometer aufgebaut. Die Aufnahme von THz-Bildern in Transmission erfolgt durch eine zeilenweise Verschiebung des zu charakterisierenden Bauteils durch den THz-Fokus. In jedem Pixel wird die Amplitude des durch das Bauteil transmittierten THz-Pulses in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Somit liegen in jedem Bildpunkt die vollständigen spektralen Informationen vor. Da bei höheren Frequenzen auch Absorption durch die Luftfeuchtigkeit auftritt, ist eine Spülung des Prüfstandes mit Trockenluft (Taupunkt unter $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ erforderlich). Dies wiederum erfordert eine Einhausung des THz-Aufbaus.

Die THz-Strahlung der Antennenmodule ist linear polarisiert, d. h. der elektrische Feldvektor schwingt vorwiegend in einer Ebene. Durch eine Messung unter verschiedenen Winkeln können vorhandene Anisotropien der Orientierung in den Kunststoffbauteilen detektiert werden. Zur Betrachtung von polarisationsabhängigen Effekten sind daher die Antennenmodule entlang der optischen Achse in Dreheinheiten positioniert. Durch eine

gleichsinnige Drehung des Senders und Empfängers ist die Detektion von optischer Anisotropie in den fixierten Proben möglich. Dieser Aufbau ist erst durch die fasergekoppelte Antennenmodule möglich, da eine Drehung der Antenne bei einem Laserfreistrahlaufbau nahezu nicht realisierbar ist.

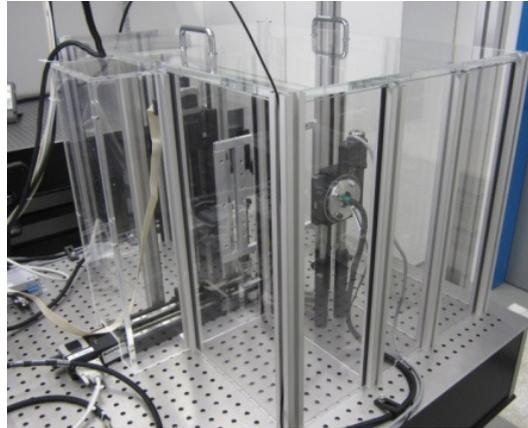


Abbildung 2: THz-Prüfstand zur orts aufgelösten Charakterisierung von Kunststoffbauteilen in Transmissionsanordnung. Da THz-Wellen verstärkt von Luftfeuchtigkeit absorbiert werden, ist für genaue Untersuchungen zunächst eine Messung unter getrockneter Luft erforderlich. Dies wiederum macht eine Einhausung des THz-Strahlenbereichs notwendig.

2.3 Probenherstellung

In den meisten Kunststoffanwendungen kommen keine reinen Polymere sondern mit Zuschlagstoffen gefüllte Compounds zum Einsatz. Füllstoffe können zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (z. B. PP mit Glasfasern oder Kreide), als Flammschutzmittel (z. B. PA6 und Magnesiumhydroxid) oder einfach zur Kostenreduktion des Materials dienen. Zu diesem Zweck wurden Kunststoffcompounds mit unterschiedlichen Füllgraden auf einem gleichläufigen Doppelschneckenextruder hergestellt und granuliert. Das Kunststoffgranulat wurde mittels Heißpressen zu plattenförmigen Probekörpern (120 mm x 120 mm x 3 mm) weiterverarbeitet. Zur orts aufgelösten Detektion des Füllstoffgehalts wurden auch Proben mit segmentweise unterschiedlichen Compounds gepresst. In Tabelle 1 ist eine Übersicht über die hergestellten Kunststoffcompounds sowie die Verfahren zur Herstellung der Bauteile gegeben.

Tabelle 1: Übersicht über die hergestellten Kunststoffcompounds sowie die Verfahren zur Herstellung der Bauteile

Polymer	Füllstoff	Herstellung der Bauteile
Polypropylen	Kreide	Pressen
Polypropylen	Glasfasern	Pressen, Spritzgießen
Polyamid 6	Magnesiumhydroxid	Pressen
Polypropylen	Holzfaser	Pressen

Das Spritzgießen ist die wichtigste formgebende Verarbeitungsverfahren für Kunststoffbauteile. In Abbildung 3 ist eine Spritzguss-Simulation eines plattenförmigen Bauteiles aus Polypropylen gefüllt mit 30 % Glasfasern dargestellt. Das Bauteil hat eine Abmessung von 70 mm x 50 mm x 4 mm und wurde in einem Werkzeug mit einer Doppelkavität mittels Filmanguss hergestellt. In ein Nest der Kavität wurde ein Fließhindernis eingebracht.

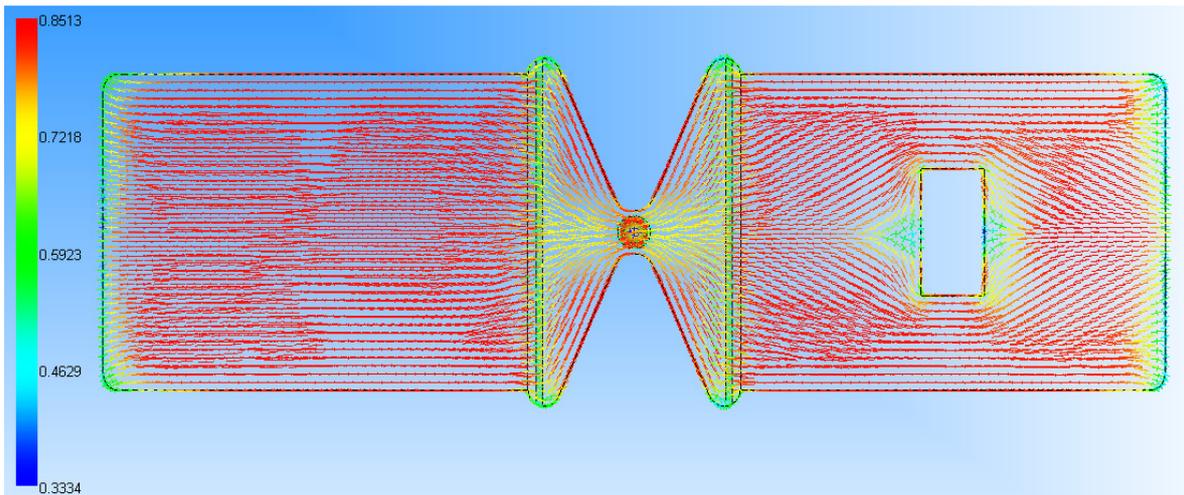


Abbildung 3: Simulation des Faserausrichtungstensors einer spritzgegossenen Platte aus PP mit 30 % Glasfasern mit (rechts) und ohne (links) Fließhindernis. In der Falschfarbendarstellung ist der Faserausrichtungsvektor im Bezug zur Längsrichtung der Bauteile (horizontal im Bild) dargestellt.

Die Simulation bestätigt die Erfahrung, dass bei einer Platte in der Probenmitte von einer nahezu vollständig isotropen Ausrichtung des Füllstoffes ausgegangen werden kann. Bei der Probe mit dem Fließhindernis in der Kavität findet durch das Umströmen, was mit einer Teilung der Schmelzefront verbunden ist, eine entsprechende anisotrope Faserausrichtung statt. Nach dem Fließhindernis tritt am Ort der Vereinigung beider Schmelzefronten eine Bindaht auf.



Abbildung 4: Zur Befeuchtung wurde eine spritzgegossene Platte aus Polypropylen gefüllt mit 70 Gew.-% Holzmehl für 11 Tage teilweise in Wasser getaucht.

Für die Untersuchungen zur Feuchtegehaltsbestimmung wurde eine mit 70 Gew.-% Holzmehl gefüllte und spritzgegossene PP-Platte zunächst für die Dauer von zwei Wochen in einem Exsikkator getrocknet (Trockenmittel: Silicagel). Anschliessend wurde sie für 11 Tage teilweise in Wasser getaucht (siehe Abbildung 4). Nach der Entnahme aus dem Wasserbad wurde das Bauteil äußerlich abgetrocknet und sogleich der THz-Messung zugeführt.

3. Ergebnisse

In diesem Teil werden die Ergebnisse orts aufgelöster THz-Messung an Kunststoffbauteilen präsentiert. Alle Messungen wurden mit dem oben beschriebenen THz-Prüfstand unter getrockneter Luft und in Durchstrahlanordnung vorgenommen.

3.1 Füllstoffgehaltsdetektion

In sind die Ergebnisse der THz-Messungen in Transmissionanordnung an den Kunststoffcompounds mit unterschiedlichen Füllgraden dargestellt. Hierbei wurde der Brechungsindex bei 1,0 THz gegen den volumetrischen Füllstoffgehalt aufgetragen. Der volumetrische Füllstoffgehalt wurde aus dem gravimetrischen Anteilen sowie den korrespondierenden Rohmaterialdichten ermittelt. Der Brechungsindex ist ein Maß für die Ausbreitungsgeschwindigkeit des THz-Pulses im jeweiligen Medium. Alle Materialsysteme können durch einen linearen Zusammenhang zwischen Brechungsindex und Füllstoffgehalt beschrieben werden (siehe Abbildung 5). Dies ist bereits aus vorausgegangenen Publikationen bekannt [9,10].

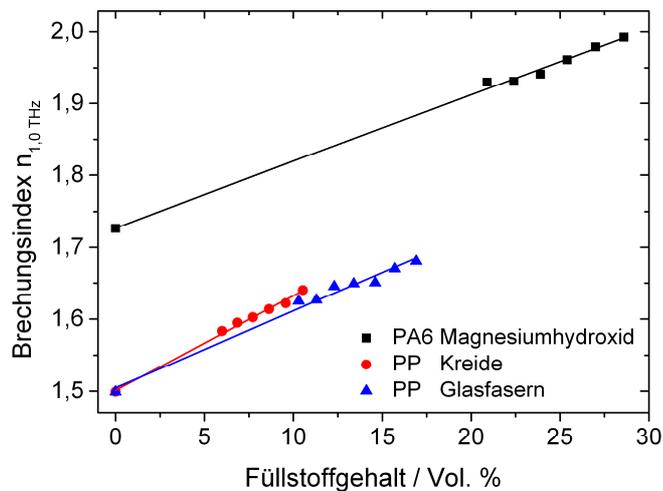


Abbildung 5: Lineare Regression des gemessenen Brechungsindex bei 1,0 THz über den volumetrischen Füllstoffgehalt. Es sind die Compounds PA6-Magnesiumhydroxid, PP-Kreide und PP-Glasfaser aufgetragen. Das Bestimmtheitsmaß R^2 der linearen Regression beträgt 0,995, 0,996 bzw. 0,982.

Wie in den Diagrammen ersichtlich ist, wirken sich bereits geringe Füllstoffschwankungen auf den Brechungsindex aus. Somit ist es bei typischen gefüllten Compounds mittels THz-Technologie möglich, Füllstoffgehaltsunterschiede im einstelligen gravimetrischen Prozentbereich zu differenzieren.

Mit dem oben beschriebenen THz-Prüfstand wurden die Bauteile mit inhomogener Füllstoffgehaltsverteilung in Transmissionsanordnung örtlich abgerastert. Aus diesen Daten kann jedem Bildpunkt die THz-Pulsverzögerung als Phaseninformation sowie die Abschwächung des THz-Pulses zugeordnet werden. In Abbildung 6 ist das THz-Phasenbild einer Probe aus PA6 mit Magnesiumhydroxid in unterschiedlichen Anteilen zu 40, 42, 44 und 46 Gew.-% dargestellt.

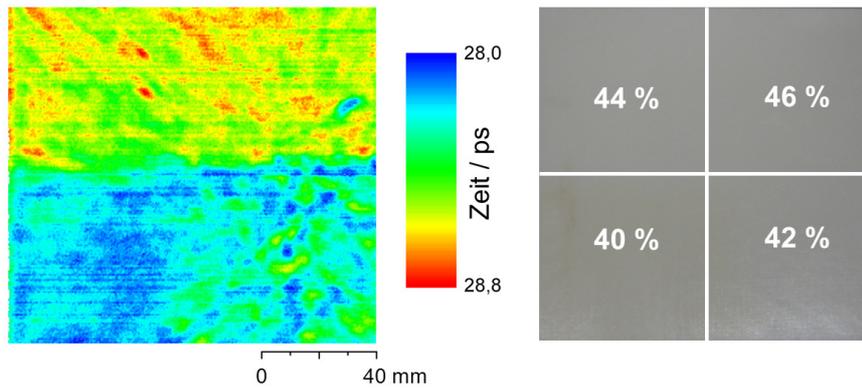


Abbildung 6: THz-Phasenbild (links) und Foto (rechts) einer mit unterschiedlichen Anteilen an Magnesiumhydroxid gefüllten PA6-Probe. Die gravimetrischen Füllstoffgehalte sind in den jeweiligen Bereichen eingetragen.

Im Phasenbild ist die zeitliche Position des THz-Pulses nach dem Passieren der Probe dargestellt. Hierbei entsprechen Bereiche mit einer vergleichsweise geringen Pulsverzögerung (Blaufärbung) einem niedrigen Brechungsindex. Im THz-Bild kann also der gravimetrische Füllstoffgehalt 40 und 42 % noch unterschieden werden. Bei einem Anteil von 44 und 46 % ist im THz-Bild keine eindeutige Trennung mehr möglich. Die Gründe für das fleckige Erscheinungsbild sind minimale Dickenschwankungen und Einfallstellen der Probe sowie auch eine unregelmäßige innere Struktur. Teilweise sind in den Bildern noch die Grenzen zwischen den Granulatkörnern auszumachen, welche in der Presse zu einer Platte verschmolzen wurden. Den Umständen wird in weiteren Untersuchungen noch tiefgehend nachgegangen.

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind Probekörper mit jeweils drei unterschiedlichen Füllstoffgehalten an Glasfasern bzw. Kreide in PP gezeigt. In den THz-Phasenbildern zeigt sich, dass hier alle Füllstoffkonzentrationen, die eine Abstufung von 4 Gew.-% besitzen, noch sicher voneinander unterschieden werden können.

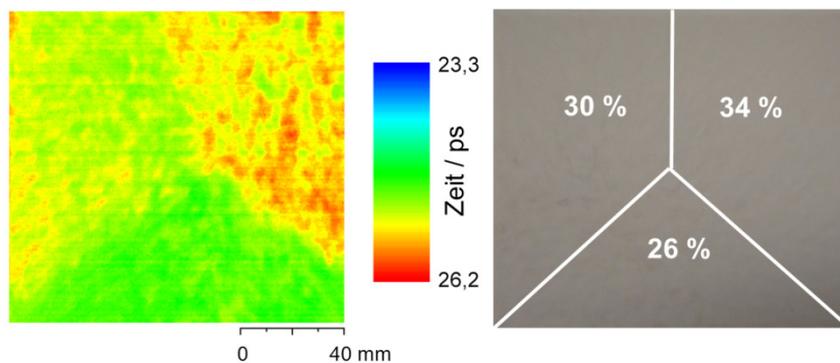


Abbildung 7: THz-Phasenbild (links) und Foto (rechts) einer mit unterschiedlichen Anteilen an Glasfasern gefüllten PP-Probe. Der gravimetrische Füllstoffgehalt ist in den jeweiligen Bereichen eingetragen.

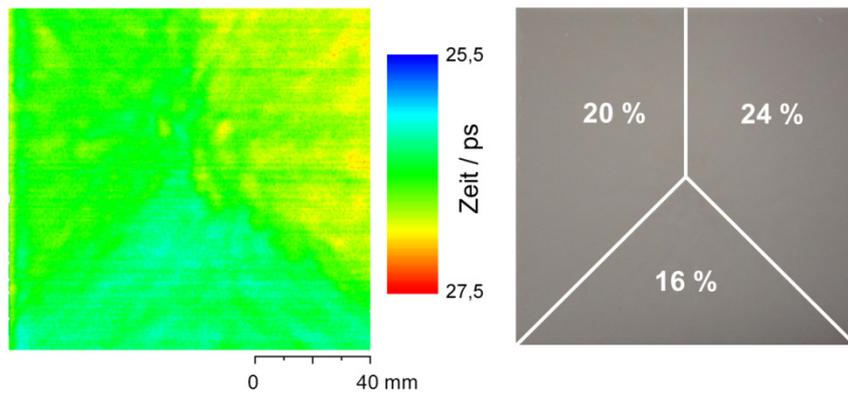


Abbildung 8: THz-Phasenbild (links) und Foto (rechts) einer mit unterschiedlichen Anteilen an Kreide gefüllten PP-Probenscheibe. Die gravimetrischen Füllstoffgehalte sind in den jeweiligen Bereichen eingetragen.

Auch im Falle von Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigt sich, dass bei beiden Compounds mögliche gravimetrische Füllstoffschwankungen im Bereich von 4 % noch detektiert bzw. unterschieden werden können.

3.2 Untersuchungen spritzgegossener Bauteile

In Abbildung 9 ist das gemessene THz-Phasen- und -Amplitudenbild der simulierten Spritzgießbauteile (siehe Abbildung 3) dargestellt. Vor allem im Amplitudenbild tritt die Bindenaht nach dem Fließhindernis deutlich in Erscheinung. Im Phasenbild wird der Puls im Bereich neben der Bindenaht früher detektiert, da hier Einfallstellen vorliegen.

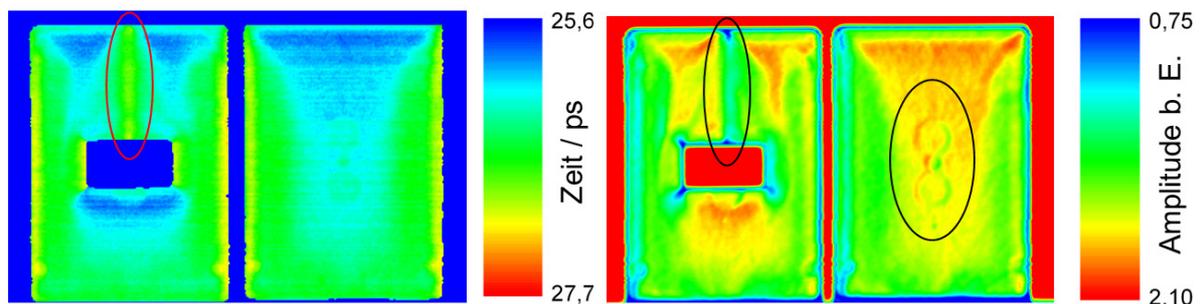


Abbildung 9: THz-Phasen- (links) und -Amplitudenbild (rechts) einer spritzgegossenen Platte aus PP gefüllt mit 30 % Glasfasern mit und ohne Fließhindernis. Beim Bauteil mit Fließhindernis ist die Bindenaht (siehe Kennzeichnung in THz-Bild) zu erkennen. Beim Bauteil ohne Fließhindernis sind im Amplitudenbild die Abdrücke der Auswerfer erkenntlich.

3.3 Feuchtegehalt

Da THz-Wellen stark von Wasser absorbiert werden, eignen sich diese für eine sensitive Detektion von Feuchte. Für eine ortsaufgelöste Messung an Kunststoffbauteilen ist im Falle der Feuchtedetektion somit das Amplitudenbild maßgeblich. Beim Durchdringen der Probe werden in Bereich mit erhöhtem Feuchtegehalt verstärkt THz-Wellen absorbiert, was sich in einer verringerten Amplitude am Detektor bemerkbar macht.

Um diesen Effekt zu untersuchen, wurde die vorab beschriebene und speziell mit Wasser behandelte PP-Holz-Probenscheibe untersucht. Nach der Befeuchtung wurde eine Gewichtszunahme von 1,4 % beobachtet. In Abbildung 10 ist das aufgenommene THz-Amplitudenbild in Gegenüberstellung mit einem Probenfoto dargestellt.

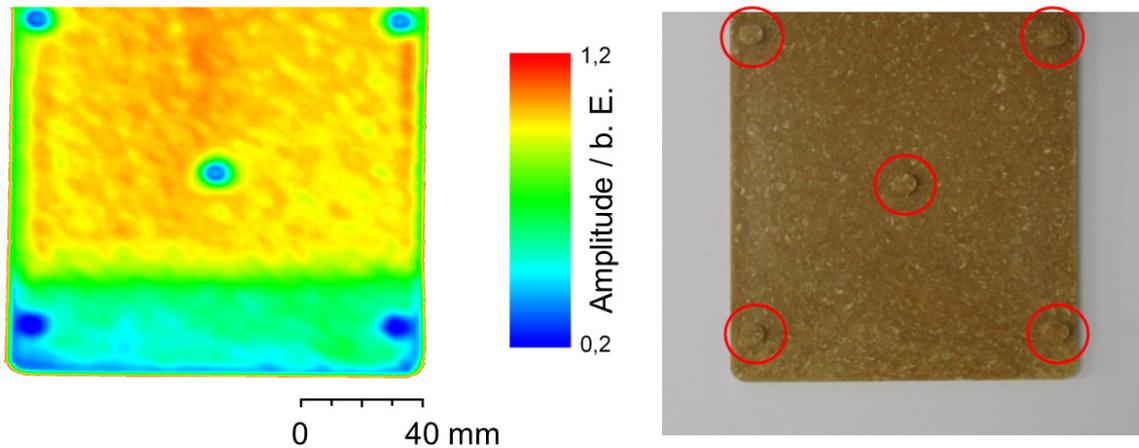


Abbildung 10: THz-Amplitudenbild (links) einer mit 70 % Holzmehl gefüllten PP-Probe, welche zuvor teilweise in ein Wasserbad eingebracht wurde. In den Bereichen mit erhöhtem Feuchtegehalt wird vermehrt THz-Strahlung absorbiert, was sich in einer geringeren transmittierten Intensität im Amplitudenbild zeigt. Zum Vergleich ist rechts ein Foto des Probekörpers gezeigt. Die rot gekennzeichneten Noppen weisen eine größere Wandstärke und damit Absorption auf.

Im THz-Bild sind Bereiche mit niedriger Amplitude (Blaufärbung) zu erkennen. Diese entsprechen einem vergleichsweise hohen Wassergehalt, da hier verstärkt THz-Wellen durch Wasser absorbiert werden. Es ist somit klar der Bereich zu erkennen, der ursprünglich direkten Kontakt mit Wasser hatte und somit einen erhöhten Wassergehalt aufweist. Die im THz-Amplitudenbild in Erscheinung tretenden fünf Punkte mit verringerter Amplitude sind auf erhabene Noppen auf dem Bauteil zurückzuführen (siehe Kennzeichnung Abbildung 10). Die Noppen stammen von den Auswerfern des Spitzgießwerkzeuges.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die THz-Zeitbereichsspektroskopie ist eine praktikable Methode, um Kunststoffbauteile bildgebend und berührungslos zu charakterisieren. Es konnte gezeigt werden, dass die Füllstoffverteilung von industrierelevanten Compounds orts aufgelöst detektiert werden kann. Ebenfalls ist eine lokale Bestimmung des relativen Feuchtegehalts in Kunststoffproben umsetzbar. An spritzgegossenen Probekörpern konnten Verarbeitungseinflüsse wie z. B. Bindenähte und Einfallstellen detektiert werden. Die bislang vorgestellten Ergebnisse wurden durch Messungen in Transmissionsanordnung erzielt.

Wesentlich effizienter und für industrielle Anwendungen besser geeignet wäre hingegen eine Charakterisierung von Bauteilen in Reflexionsanordnung, da hierfür nur ein einseitiger Probenzugang erforderlich ist. Aufgrund des hier deutlich niedrigeren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses im Vergleich zu Messungen in Reflexion stellen diese große Herausforderungen an die Systemtechnik und Auswertemethoden.

Die hier präsentierten Ergebnisse wurden zudem unter getrockneter Luft ermittelt, um Absorption durch Luftfeuchtigkeit zu unterdrücken. Um zukünftig auch zuverlässige Aussagen über kunststoffspezifische Eigenschaften aus Messung unter normaler Atmosphäre in der Praxis treffen zu können, sollen weitere Entwicklungen für Wasserlinienkorrekturmethode forciert werden.

5. Danksagung

Die IGF-Vorhaben 16546 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.

6. Referenzen

1. C. Fattinger, D. Grischkowsky: Terahertz beams, *Appl. Phys. Lett.* 54, 490 (1989).
2. P. Y. Han, X-C Zhang: Free-space coherent broadband terahertz time-domain spectroscopy, *Meas. Sci. Technol.* 12, 1747 (2001).
3. T. Hochrein: Markt, Entwicklung und Stand der Technik der Terahertz-Systeme: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, DGZfP-Jahrestagung, Dresden: 2013.
4. J. Hauck, D. Stich, P. Heidemeyer, M. Bastian, T. Hochrein: Industrielle Prozesswanddickenmessung in der Kunststoffrohrextrusion mittels zeitaufgelöster Terahertz-Systeme, DGZfP-Jahrestagung, Dresden 2013.
5. T. Hochrein, N. Krumbholz, S. Wietzke, K. Kretschmer, M. Bastian, M. Koch: Terahertz-Spektroskopie zur Schmelzeanalyse in der Compoundierung, *GAK Gummi Fasern Kunststoffe* 61, 517 (2008).
6. H. Quast: 3D-Materialprüfung mit Terahertz und mm-Wellen, DGZfP-Jahrestagung, Münster 2009.
7. D. Stich, F. Minolts, B. Eversmann, P. Heidemeyer, M. Bastian, T. Hochrein: Prüfung von Faserverbundwerkstoffen mittels vollelektronischer Terahertz-Systeme, DGZfP-Jahrestagung, Dresden 2013.
8. D. Stanze, A. Deninger, A. Roggenbuck, S. Schindler, M. Schlak, B. Sartorius: Compact cw Terahertz Spectrometer Pumped at 1.5 μm Wavelength, *J. Infrared. Milli. Terahz. Waves* 32, 225 (2010).
9. Steffen Wietzke, Christian Jördens, Christian Jansen, Norman Krumbholz, Maik Scheller, Ole Peters, Martin Bastian, Benjamin Baudrit, Thomas Hochrein, Thomas Zentgraf, Martin Koch, Terahertz-Spektroskopie an der Schwelle zur industriellen Praxis, *Kunststoffe* 4, 20-24 (2010).
10. Thomas Hochrein, Norman Krumbholz, Karsten Kretschmer, Martin Bastian, Martin Koch, Terahertz Spectroscopy – A New Tool for Monitoring Compounding Processes, *Proceedings of the 24th Annual Meeting of the Polymer Processing Society, Salerno (Italy): 2008.*