

THz-basierte Wanddickenmessung in der Kunststoffextrusion

Philipp BERNHARDT*, Ralph KLOSE*

* iNOEX GmbH

Kurzfassung. Die Anforderungen an die Produktionsprozesse in der Kunststoffindustrie, insbesondere in der Rohrextrusion, werden fortlaufend komplexer und anspruchsvoller. So wird beispielsweise eine nahezu hundertprozentige Prüfung der Rohreigenschaften wie Wand- bzw. Schichtdicke und Fehlermerkmale gefordert. Um eine fortlaufende Regelung und Überprüfung der Wand- bzw. Schichtdicken zu gewährleisten, ohne dabei die Rohreigenschaften zu beeinflussen, kommen für die Messung ausschließlich zerstörungsfreie Inline-Prüfverfahren in Frage. Bisher wurden hierfür Messtechniken basierend auf Ultraschall oder Röntgenstrahlung eingesetzt. Ein neues, vielversprechendes Verfahren stellt die Terahertz-Technologie dar. Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit dem SKZ, der Philipps Universität Marburg, der Firma Batop und der Firma Menlo wurde ein THz-Messsystem entwickelt mit welchem die Autoren erste Messungen zur Bestimmung der Wanddicke bei unterschiedlichen Kunststoffrohren durchführen konnten.

Einführung

Die Produktionsprozesse sowie die erzeugten Produkte in der Kunststoffindustrie, werden fortlaufend komplexer und anspruchsvoller. Insbesondere in der Rohrindustrie steigt die Zahl der verwendeten Schichten durch die Einbringung von z.B. Funktionsschichten, Kleber und Schaumsschichten. Neben der Überprüfung der Qualität und der Einhaltung von Schichtdickentoleranzen wird für diese komplexen Rohre auch eine nahezu 100%-ige Fehlerprüfung gefordert. Um eine fortlaufende Regelung und Überprüfung der Wand- bzw. Schichtdicken zu gewährleisten, ohne dabei die Rohreigenschaften zu beeinflussen, kommen für die Messung ausschließlich zerstörungsfreie Inline-Prüfverfahren in Frage. Bisher wurden hierfür Messtechniken basierend auf Ultraschall oder Röntgenstrahlung eingesetzt.

Zur Bestimmung der Wandstärke von Kunststoffrohren existieren verschiedene Verfahren. Folgende Auflistung gibt einen Überblick über diese Verfahren [2]:

- Ultraschall
- induktive Messung
- radioaktive Messung

Heutzutage werden in Extrusionslinien für die Rohrextrusion zur Qualitätskontrolle vorwiegend Ultraschallsysteme eingesetzt. Hierfür kommt eine digitale Mehrkanal-



Ultraschalltechnologie zum Einsatz, mit der Wanddicken- und Durchmessermessungen mit statischen und elektronisch rotierenden Sensoren durchgeführt werden. [4] Grundsätzlich funktionieren die Ultraschallsysteme zur Wanddickenmessung von Kunststoffrohren nach dem Laufzeitverfahren. Es wird ein Ultraschallpuls ausgesendet, der an der Rohroberfläche zum Teil reflektiert wird und zum Teil durch die Außenwand des Rohres läuft und an der Rohrinneenseite bzw. auch an den eventuell vorhandenen verschiedenen Schichten des Rohres reflektiert wird. Diese zu verschiedenen Zeitpunkten entstandenen Echos werden nacheinander detektiert. Durch den Laufzeitunterschied der Signale kann die Wanddicke bzw. die Dicke der einzelnen Schichten ermittelt werden. Da Ultraschall mit steigender Frequenz immer stärker von Luft gedämpft wird, ist für die Messung ein Koppelmedium, in diesem Fall Wasser, notwendig. Aus diesem Grund wird zusätzlich zum eigentlichen Ultraschallsystem eine relativ aufwändige Mechanik in Form von Wasserbädern.

Beim induktiven Verfahren misst ein hochfrequenter, induktiver Sensor den Abstand zwischen der Oberfläche des Rohres zu einem an der Rohrinne wand angebrachte Reflektor. Dieses Messverfahren ist materialunabhängig, da nur der Abstand zwischen Sensor und Reflektor für die Auswertung wichtig ist. Die radiometrische Messung beruht auf den Gesetzmäßigkeiten der Isotopenmesstechnik, wobei ein Teil der Strahlung vom Material absorbiert und ein anderer reflektiert wird. Um die Wanddicke zu bestimmen, wird der reflektierte Teil der Strahlung gemessen. Für die Messung muss der Abstand zwischen Messsonde und Rohroberfläche konstant sein und nach jedem Materialwechsel muss neu kalibriert werden. [2]

Terahertz

Ein neues, vielversprechendes Verfahren stellt die Terahertz-Technologie dar. Terahertz-Strahlung durchdringt dielektrische Materialien wie z.B. Kunststoff und kann daher ideal in der kunststoffverarbeitenden Industrie eingesetzt werden. Wichtige Vorteile der Terahertz-Technik sind die kontaktfreie Funktion (kein Wasserbad zum Ankoppeln der Welle nötig), eine sehr geringe Temperaturabhängigkeit sowie die gesundheitliche Unbedenklichkeit der nicht-ionisierenden Terahertz-Strahlung gegenüber Röntgen- und radioaktiver Strahlung.

Die ersten photoleitenden Dipolantennen für den Terahertz-Bereich wurden im Jahre 1989 präsentiert. Diese wurden mit ultrakurzen optischen Pulsen geschaltet. [1] Vor dieser Zeit existierten keine Sende- oder Empfangsantennen für den Terahertz-Bereich. Seit den frühen 90er Jahren ist das Interesse an diesen Frequenzbereich gestiegen und seit kurzer Zeit hat die Industrie das hohe Potential dieser Technik entdeckt. Es wurden bereits einige Anwendungen in verschiedenen Bereichen wie der Sicherheitstechnik, der Kunststofftechnik oder der Medizin gefunden. Heutzutage werden Terahertz-Systeme jedoch hauptsächlich im akademischen Umfeld verwendet und sind noch nicht robust im industriellen Umfeld einsetzbar. [3]

Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit dem SKZ, der Philipps Universität Marburg, der Firma Batop und der Firma Menlo wurde ein THz-Messsystem zur Wanddickenbestimmung entwickelt. Die Wanddickenmessung mit Terahertz-Strahlung funktioniert, wie die Ultraschallmessung auch, nach dem Laufzeitverfahren. Es wird ein Terahertz-Puls gesendet und aus dem Laufzeitunterschied der reflektierten Signale wird die Wanddicke bestimmt. Dabei wird unterschieden zwischen der Reflektionsanordnung, die z.B. für die Bestimmung der Wandstärke von mehrschichtigen Kunststoffrohren eingesetzt werden kann, und der Transmissionsanordnung, mit der die Dicke von Kunststoffplättchen

oder Kunststoffblöcken bestimmt werden kann. Bei der Reflektionsanordnung wird ein Terahertz-Puls gesendet und aus dem Laufzeitunterschied der reflektierten Signale wird die Wanddicke bestimmt. Bei der Transmissionsanordnung wird zunächst ein Referenzpuls ohne Probe aufgenommen und gespeichert. Im zweiten Schritt wird eine Probe in den Strahlengang gehalten und der Puls aufgenommen. Der zweite Puls hat durch den zu Luft verschiedenen Brechungsindex der Probe eine Änderung der Phasengeschwindigkeit erfahren und trifft später beim Empfänger ein. Durch diesen Laufzeitunterschied kann die Dicke der Probe mit bekanntem Brechungsindex bestimmt werden. Die Transmissionsanordnung ist zur Bestimmung der Wanddicke von Kunststoffrohren nicht geeignet, da nur ein Mittelwert der Wandstärke aus beiden durchleuchteten Wänden des Rohres gebildet werden kann. Für die verwendeten Hardwarekomponenten spielt es letztendlich aber keine Rolle, ob in Transmission oder Reflektion gemessen wird. Lediglich die Auswertung wird anders durchgeführt. Um die generelle Machbarkeit der Wanddickenmessung mit Hilfe von THz nachzuweisen wurden von den Autoren zunächst Messungen in Transmissionsanordnung durchgeführt.

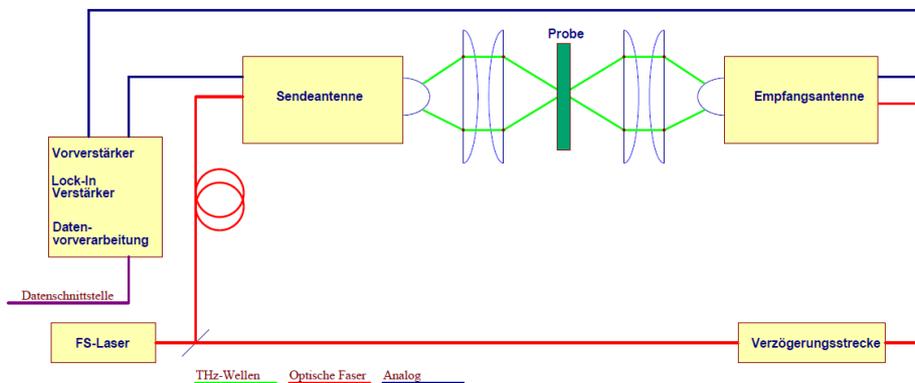


Abbildung 1: Aufbau des THz-Systems

Bild 1 zeigt den Aufbau eines Systems zur Erzeugung von THz-Wellen mit Hilfe eines Kurzpulslasers (Femtosekundenlaser). Diese Pulse werden über eine optische Glasfaserleitung (im Bild in rot dargestellt) auf die Sendeanne und auf eine Verzögerungsstrecke gegeben. Die Verzögerungsstrecke verzögert den Femtosekundenpuls und speist ihn über eine Glasfaserleitung in die Empfangsanne ein. An die Sendeanne wird eine Wechselspannung mit der Frequenz des Modulationstaktes des Lock-In-Verstärkers angelegt (im Bild blau dargestellt). Die erzeugte THz-Strahlung (im Bild grün dargestellt) wird durch vier plankonvexe Linsen kollimiert, fokussiert und wieder kollimiert, um sie dann letztendlich auf die Empfangsanne zu fokussieren. Die Empfangsanne, welche durch den verzögerten Laserpuls aktiviert wird, liefert einen Strompuls in Abhängigkeit der Position der Verzögerungsstrecke, der Amplitude des THz-Pulses und der zeitlichen Verzögerung des THz-Pulses durch die Probe, welche sich im Fokus der plankonvexen Linsen befindet. Das Ausgangssignal der Empfangsanne (im Bild blau dargestellt) wird über verschiedene Verstärkerstufen verstärkt, um anschließend digitalisiert zur Weiterverarbeitung an einer Schnittstelle bereitgestellt zu werden

Lock-In

Da das empfangene Signal sehr verrauscht ist und zusätzlich nur eine sehr kleine Amplitude besitzt, ist es sinnvoll das Lock-In-Prinzip zu nutzen. Mit einem Lock-In-Verstärker ist die Detektion von einem Analogsignal in einem um Größenordnungen

stärkeren Rauschsignal möglich. Die Funktionsweise des Lock-In-Verstärkers beruht dabei auf der Modulation der zu messenden Größe mittels eines Referenzsignals gleicher Frequenz. Durch Multiplikation des modulierten Messsignals mit dem Referenzsignal und anschließender Integration in einem Tiefpass wird das Signal demoduliert. Es wird also die Kreuzkorrelation von dem Mess- und dem Referenzsignal berechnet. Da das Ausgangssignal der Empfangsantenne im einstelligen Nanoamperebereich liegt ist es nötig, dieses vom Rauschen zu trennen. Um das Signal mit einem Lock-In-Verstärker vom Rauschen trennen zu können muss das Terahertz-Signal moduliert werden. Die Modulation geschieht durch die Spannung an der Sendeantenne, welche in Abhängigkeit von einem Rechtecksignal einer bestimmten Frequenz polarisiert wird. Das Terahertz-Signal wird dementsprechend durch die Antennenspannung mit ihrer Polarisation moduliert. Durch die bekannte Phasenlage der Modulationsfrequenz kann das Terahertz-Signal demoduliert werden. Das Rauschen, welches in deutlich höheren Frequenzbereichen als die Modulationsfrequenz liegt, wird durch dieses Verfahren herausgefiltert.

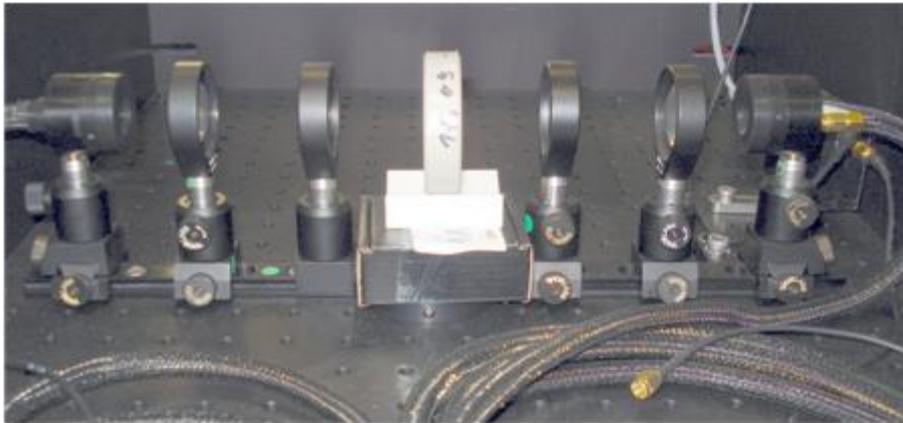


Abbildung 2: Messaufbau

Messungen

Der Aufbau des Systems, mit welchem die Messungen durchgeführt werden, ist in Bild 2 zu sehen. Zur Durchführung der Messung wird zunächst ein Referenzpuls aufgenommen. Dieser dient dazu, die Laufzeitverzögerung des Signals Δt , welche durch die Probe verursacht wird, bestimmen zu können. Der Referenzpuls wird aufgenommen und anschließend ausgewertet. Im nächsten Schritt werden nacheinander die 2,5 mm und 5 mm Proben in den Terahertz-Strahlengang (vgl. Bild 2) gehalten und es wird jeweils ein Puls aufgenommen. Zu erwarten ist eine Laufzeitverzögerung des Terahertz-Signals und eine Abschwächung der Amplitude. Bild 3 zeigt den Referenzpuls und die beiden Pulse für die verschiedenen Proben. Für die Ermittlung der Laufzeitdifferenz wird die Zeit jeweils an den Nulldurchgängen der Pulse abgelesen. Wie erwartet sind die Signale zeitlich verzögert und in ihrer Amplitude leicht abgeschwächt. PP scheint folglich für Terahertz-Strahlung sehr gut durchlässig zu sein.

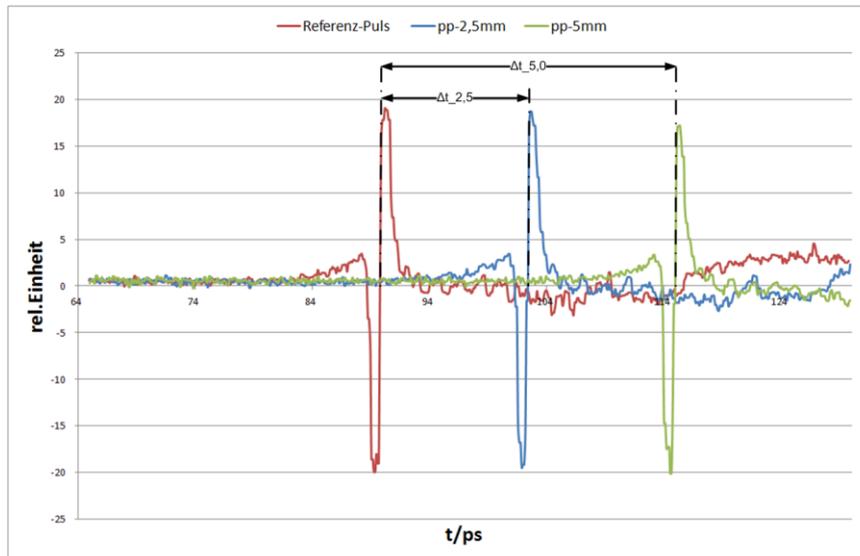


Abbildung 3: Laufzeitmessung

Ergebnisse

Für die Auswertung der Messungen wird zunächst die zeitliche Verzögerung der Terahertz-Signale der Messungen mit Proben zu der Referenzmessung bestimmt. Als Bezugspunkt wird jeweils der Nulldurchgang der Signale genommen. Folgende Werte konnten in den Daten abgelesen werden, mit t_0 als Nulldurchgang vom Referenzpuls, $t_{2,5}$ als Nulldurchgang der Messung der 2,5 mm Probe und $t_{5,0}$ als Nulldurchgang der Messung der 5 mm Probe:

$$\begin{aligned} t_0 &= 89,6 \text{ ps} \\ t_{2,5} &= 102,3 \text{ ps} \\ t_{5,0} &= 114,9 \text{ ps} \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich für die Messung der 2,5 mm Probe eine Laufzeitdifferenz von:

$$\begin{aligned} \Delta t_{2,5} &= t_{2,5} - t_0 \\ \Delta t_{2,5} &= 102,3 \text{ ps} - 89,6 \text{ ps} = 12,6 \text{ ps} \end{aligned}$$

Für die Messung der 5mm Probe ergibt sich eine Laufzeitdifferenz von:

$$\begin{aligned} \Delta t_{5,0} &= t_{5,0} - t_0 \\ \Delta t_{5,0} &= 114,9 \text{ ps} - 89,6 \text{ ps} = 25,2 \text{ ps} \end{aligned}$$

Mit diesen Werten der Laufzeitdifferenz lassen sich jetzt bei bekanntem Brechungsindex der Proben und bekannter Lichtgeschwindigkeit in der Umgebung der Proben die Waddicken der Proben bestimmen.

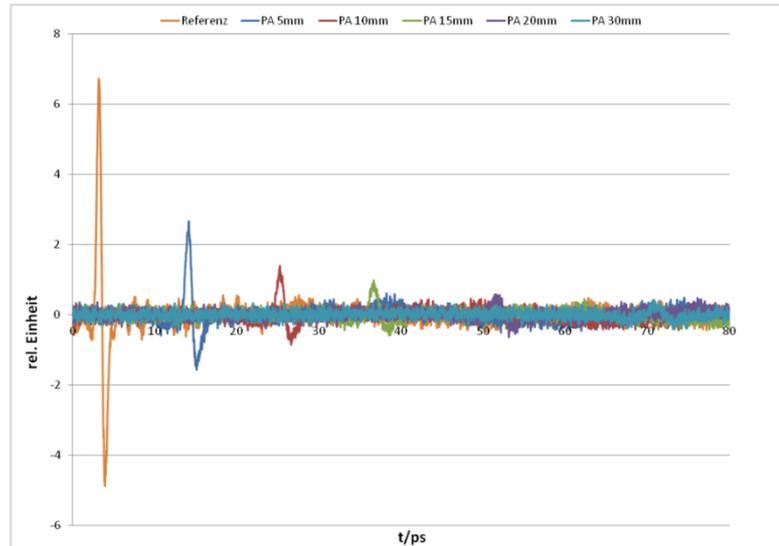


Abbildung 4: Messergebnis PA Probe

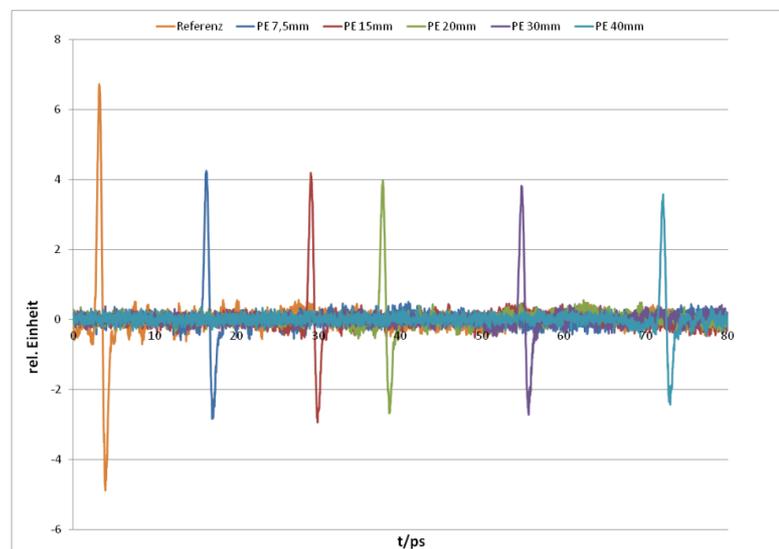


Abbildung 5: Messergebnis PE Probe

In Tabelle 1 wurde die Dämpfung des THz-Signals für verschiedene Kunststoffe qualitativ bewertet. Für die Bewertung wurden verschiedene Materialien mit verschiedenen Wandstärken untersucht. Die Messergebnisse für PA und PE sind beispielhaft in den Bildern 4 und 5 zu sehen. Hierbei hat sich herausgestellt, dass PP das am besten für THz-Wellen durchlässige Material ist. Die beiden Perbunan – Nitrilkauschuk (Perb)–Proben dämpfen so stark, dass diese mit THz-Strahlung nicht messbar sind. Es konnte kein Signal mehr erkannt werden. Polyvinylchlorid (PVC)–Proben dämpfen ebenfalls sehr stark.

Tabelle 1: Qualitative Bewertung der Messbarkeit unterschiedlicher Kunststoffe

Kunststoff	Dicke	Dämpfung des THz-Signals
PA	5mm	–
PA	10mm	–
PA	15mm	–
PA	20mm	--
PA	30mm	--
PE	7,5mm	+
PE	15mm	+
PE	20mm	+
PE	30mm	+
PE	40mm	+
PVC	7,5mm	–
PVC	10mm	–
PVC	15mm	--
PVC	20mm	--
PVC	30mm	--
PP	5mm	+++
PP	15mm	++
PP	20mm	++
PP	25mm	++
PP	40mm	++
PP	50mm	++
Perb 50	10mm	---
Perb 80	10mm	---
Plexiglas klar	10mm	+
POM	40mm	--

Legende: +++ keine Dämpfung messbar, ++ sehr geringe Dämpfung, + geringe Dämpfung, -- kein Signal messbar, -- sehr hohe Dämpfung, - hohe Dämpfung

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes mit dem SKZ, der Philipps Universität Marburg, der Firma Batop und der Firma Menlo wurde ein THz-Messsystem entwickelt mit welchem es möglich war, erste Versuche zur Wanddickenvermessung von Kunststoffrohren durchzuführen. Die Messungen haben ergeben, dass grundsätzlich die Ermittlung der Wandstärke von Kunststoffproben in einer Transmissionsanordnung möglich ist. Die Kunststoffe PP und PE erwiesen sich hierbei als besonders gut messbar. In einem nächsten Schritt werden die Messungen mit Hilfe der Reflexionsanordnung und in Verbindung mit Mehrschichtrohren durchgeführt.

Referenzen

[1] Fattinger, C. und Grischkowsky, D.: *Terahertz beams*. Applied Physical Letters 54, 490, 1989.

[2] Felger, H. K., Becker, G. W. und Braun, D.: *Polyvinylchlorid*. Hanser Verlag, München, 1986.

[3] Hübers, H.-W., Böttger, U., Richter, H. und Semenov, A.: *Detektion verborgener Objekte mittels eines abbildenden THz Heterodynempfängers*. Technisches Messen 75, 37, 2008.

[4] iNOEX GmbH: *AUREX – The next dimension of ultrasonic wall thickness control*. Februar 2012. <http://www.inoex.de/de/aurex/>, Stand: März 2012.