

Zerstörungsfreie Bauteilanalyse mit Terahertz-Wellen

Dr. Joachim Jonuscheit,
Fraunhofer IPM Kaiserslautern

Moderne Bauteile sind oft mit komplexen Schichtsystemen veredelt. Oder das Bauteil selbst ist aus mehreren Materialien aufgebaut. Will man hierbei die Materialdicke überprüfen, so greift man derzeit meist auf zerstörende Verfahren zurück. Das ist jedoch zeitaufwändig und zur Produktionsüberwachung eher ungeeignet. Mithilfe von Terahertz-Wellen, die im Spektrum zwischen Infrarotlicht und Mikrowellen liegen, geht die Dickenmessung einfacher und vor allen Dingen zerstörungsfrei. Die hier vorgestellte Methode zur Terahertz-Dickenanalyse errechnet aus den Laufzeitunterschieden der an Materialgrenzen reflektierten Teilwellen die Dicke des Materials.

Warum wird das Wissen um die Qualität von Werkstoffen für die Industrie so wichtig? Weil moderne Bauteile immer speziellere Eigenschaften der Werkstoffe nutzen und diese mit immer größerer Zuverlässigkeit auch über lange Zeit garantieren müssen. Zum Beispiel kann der innere Aufbau von Leichtbauteilen sehr komplex sein oder die Beschichtung verschleißarmer Bauteile sehr diffizil. Die Lösung zur Qualitätssicherung in solchen Fällen wäre eine geeignete Analyse dieser Strukturen – am besten online in der Produktion. Mit dem auf der Terahertz-Technologie basierenden Verfahren lässt sich die Schicht- oder Materialdicke nicht-metallischer Werkstoffe überwachen – online in der Produktion. Dabei wird die Dicke jeder einzelnen Materialschicht exakt erfasst. Entsprechend kann anhand dieser Parameter die Produktion exakt gesteuert werden.

Bisher genügte es meist, die Gesamtdicke von Werkstoffen zu erfassen. Doch immer häufiger wird die Dickenkontrolle

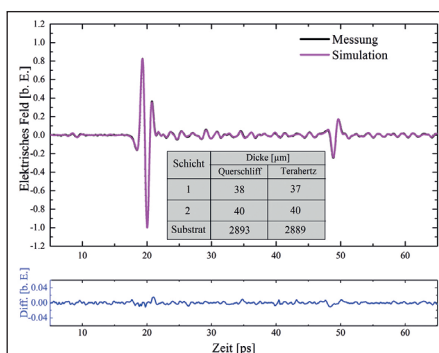


Abbildung 2: Vergleich zwischen Messung und Simulation eines Zweischichtsystems auf Kunststoffsubstrat. Die Auswertung ist auf die höchste Übereinstimmung optimiert. Zum Vergleich wurden zusätzlich die Einzelschichtdicken durch Querschliff ermittelt.

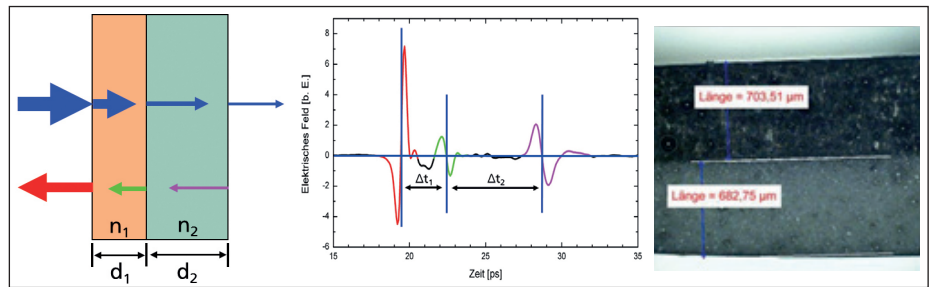


Abbildung 1: Messprinzip der Schichtdickenbestimmung in Reflexion am Beispiel eine zweischichtigen Kunststofffolie aus dem Automobilbereich. Die Folie wird von links mit Terahertz-Wellen beleuchtet (blauer Pfeil). Die Wellen werden dann an den Grenzflächen aufgrund des Brechungsindexunterschieds ($n_1 \neq n_2$) teilreflektiert (links). Aus den Laufzeitunterschieden Δt_1 und Δt_2 (mitte) lassen sich mit der Kenntnis der Brechungsindizes die Schichtdicken d_1 und d_2 bestimmen. (Querschliff rechts)

der einzelnen Materialien innerhalb eines Bauteils gefordert z. B. bei Rohren oder Schläuchen. Solche komplexen Werkstoffe werden vor allem im Flugzeug- und im Automobilbau eingesetzt. Darüber hinaus werden inzwischen viele weitere Produkte auch durch Beschichtungen veredelt.

Hierzu zählen so unterschiedliche Dinge wie Rotor- und Turbinenblätter, Schiffsrümpfe oder auch Tabletten. Im Hinblick auf Ressourcenschonung und Qualitätskontrolle ist die Industrie in all diesen Fällen sehr stark an einer Messtechnik interessiert, die Einzelschichtdicken in Multischichtsystemen erfassen kann. Besonders die Mehrschichtanalyse auf Kunststoffsubstraten wird immer wichtiger, da diese zur Gewichts- und Kostenreduzierung immer stärker eingesetzt werden. Autohersteller verarbeiten z. B. zunehmend kohlefaserverstärkten Kunststoff (CFK), um leichtere und somit energieeffizientere Autos zu bauen.

Stand der Technik

Für die Dickenmessung im industriellen Umfeld werden aktuell verschiedene Techniken eingesetzt, wie z. B. Ultraschall, Wirbelstrom, Röntgenfluoreszenz, optische Kohärenztomografie und photothermische Verfahren. Diese Techniken haben jedoch bei der Mehrschichtanalyse oder der Analyse moderner Multimaterialwerkstoffe ihre Grenzen:

Entweder können sie keine Mehrschichtbeschichtungen auflösen (wie z. B. das erwähnte Wirbelstromverfahren und das photothermische Verfahren), oder sie durchdringen relevante Materialien nicht ausreichend (wie die optische Kohärenztomografie), oder sie arbeiten nicht berührungslos (wie die Ultraschall-Messtechnik).

Einzig die Röntgenfluoreszenz könnte hier eingesetzt werden, sie scheidet jedoch oftmals wegen der Strahlenschutzproblematik aus. Aktuell kann daher als

einziges Messverfahren die Terahertz-Messtechnik im industrierelevanten Dickenbereich von zehn Mikrometern bis zu mehreren Millimetern Einzelschichten in Mehrschichtsystemen zerstörungsfrei und berührungslos nachweisen. Dies hat das Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Kaiserslautern, in Zusammenarbeit mit Industriepartnern bereits gezeigt. Das Messsystem basiert auf der Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie.

Prinzip der Terahertz-Dickenanalyse

Bei der Dickenmessung mit der Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie (THz-TDS) wird ausgenutzt, dass der einfallende Terahertz-Strahl bei Materialübergängen teilreflektiert wird (Abbildung 1).

Im einfachsten Fall erhält man zwei Reflexe: einen vom Übergang Luft-Beschichtung und einen zweiten vom Übergang Beschichtung-Substrat. Aus der Zeitdifferenz zwischen den beiden Reflexen und mit Kenntnis des Brechungsindex kann die Materialdicke der Beschichtung bestimmt werden. Besteht die Beschichtung aus mehreren Schichten, erscheinen zwischen den beiden beschriebenen Reflexen weitere Reflexe, die auch die Analyse komplizierter Mehrschichtsysteme erlaubt.

Die meisten THz-TDS-Systeme nutzen Kurzpuls laser mit einer Pulsdauer im Bereich kleiner 100 fs. Mit entsprechenden Systemen wurden im Labor bereits Messraten von bis zu 250 Hz erreicht. Für den in THz-TDS-Systemen eingesetzten Kurzpuls laser haben sich drei mögliche Wellenlängen etabliert: 780 bis 800 nm, 1030 nm und 1550 nm. Letztere hat das größte Potenzial, um kompakte und günstige Systeme zu realisieren, da hier auf die Komponentenvielfalt der optischen Nachrichtenübertragung zurückgegriffen werden kann.

Deshalb kommt diese Laserwellenlänge in unseren Systemen zum Einsatz.

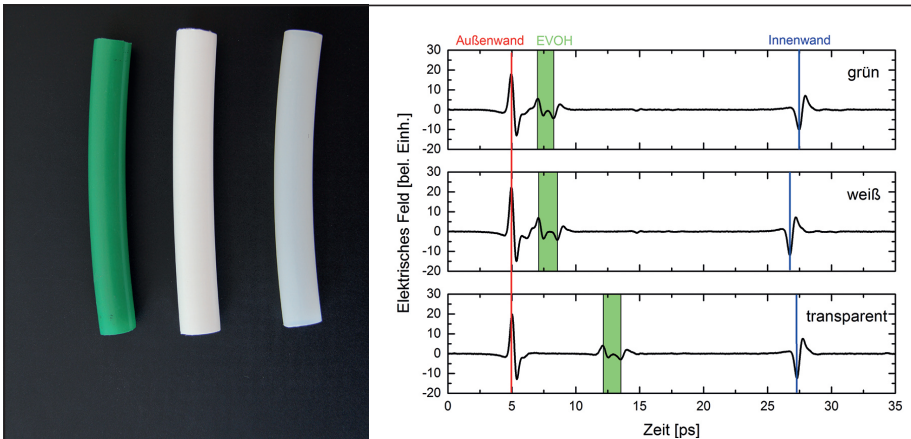


Abbildung 3: PE-Schläuche mit Diffusionsbarriere aus EVOH. Die beiden rechten Schläuche bestehen aus PE-RT, der linke Schlauch aus PE-Xb. Lage und Dicke der Diffusionsbarriere können unabhängig von der Einfärbung genau bestimmt werden.

Komplexe Materialsysteme? Kein Problem!

Materialsysteme können aus ganz unterschiedlichen Materialien wie Farben, Lacken, Kunststoffen, Keramiken etc. aufgebaut sein. Die Substrate – also die Trägermaterialien – sind unter anderem Metalle, Kunststoffe, Gläser und Verbundwerkstoffe. Mithilfe der Terahertz-Messtechnik können solche, ganz unterschiedlichen Beschichtungen hinsichtlich Funktion und Materialeinsatz während oder nach dem Beschichtungsprozess kontrolliert werden – auch auf nicht-metallischen Substraten. Das ist ein großer Pluspunkt, denn die Schichtdickenmessung auf nicht-metallischen Substraten war bislang ein großes Problem, und meist nur zerstörend möglich. Bei Mehrschichtsystemen, die aus dünnen Einzelschichten bestehen, können die einzelnen Reflexe zeitlich nicht mehr aufgelöst werden. Zur Auswertung der Spektren müssen daher geeignete mathematische Modelle herangezogen wer-

den. Letztendlich vergleicht man die gemessene mit der simulierten Wellenform und berücksichtigt dabei frequenzabhängige Materialparameter der Einzelschichten (Brechungsindex und Extinktion – Abbildung 2) Einschränkungen bei den Schichtmaterialien gibt es kaum. Vergleichbar groß sind die Freiheiten auch bei der Ebenheit der Schichten. Selbst auf gekrümmten Oberflächen lassen sich Schichtdicken zuverlässig bestimmen. Im Automobil-Bereich ist das Erscheinungsbild sehr wichtig, gleichzeitig sind aber auch die Anforderungen hinsichtlich Ressourcenschonung und Langzeitstabilität hoch. Um allen Aspekten gerecht zu werden, unterliegen die Oberflächen im Exterieur- und Interieurbereich engen Vorgaben. Diese zu prüfen, ist eine wichtige Aufgabe der Qualitätssicherung. Die Kunststoffteile im Interieurbereich müssen zum einen widerstandsfähig gegen Abreiben sein, andererseits dürfen sie im Falle eines Unfalls die Entfaltung des Airbags

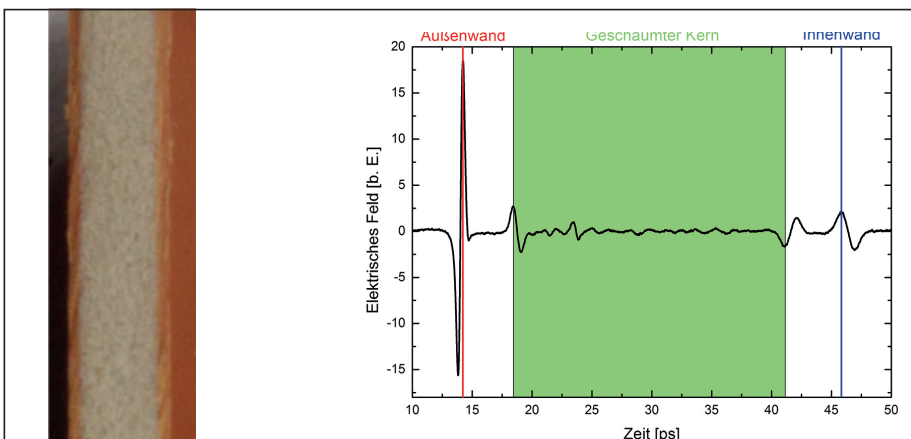


Abbildung 4: Geschäumtes PVC-Rohr. Der PVC-Schaum besitzt einen wesentlich kleineren Brechungsindex als massives PVC-Material. Die gemessene optische Dicke entspricht dem Produkt aus geometrischer Dicke und Brechungsindex. Deshalb sind die absoluten Laufzeiten durch geschäumtes Material länger als durch massives Material, da der Brechungsindex von geschäumtem Material kleiner ist.

nicht behindern. Deshalb ist hier die Bauteildicke von entscheidender Bedeutung. Abbildung 1 zeigt eine entsprechende Dickenmessung an einer zweilagigen Kunststoffolie im Interieurbereich. Beide Schichten – Dekor- und Trägerschicht – können aufgelöst und somit in der Schichtdicke individuell vermessen werden.

Die »Außenhaut« eines Autos ist einer Vielfalt von Belastungen wie UV-Licht und Steinschlag ausgesetzt und soll trotzdem noch für einen langen Zeitraum optisch möglichst einwandfrei bleiben. Um diese Aufgaben zu erfüllen, besteht die Lackierung aus mehreren Funktionsschichten, deren Dickeneinhaltung zur Funktionserfüllung notwendig ist. Deshalb ist die Schichtdickenmessung innerhalb von Mehrschichtsystemen von entscheidender Bedeutung.

Abbildung 2 zeigt hier die Schichtdickenmessung an einer Zweischichtlackierung auf Kunststoff aus dem Bereich eines Stoßfängers. Hier kann zusätzlich noch eine Dickenmessung des Kunststoffteils durchgeführt werden.

Bei Schläuchen und Rohren sind die Anforderungen an die Wandstärke und den Schichtaufbau ebenfalls sehr hoch. Beide Produkte sind nach dem Einbau in Gebäuden oder im Erdboden oftmals nicht mehr zugänglich, so dass hier eine lange Standfestigkeit gefordert ist. Zu geringe Dicken können zu einem vorzeitigen Versagen führen; ist die Sicherheitsmarge und somit die Wandstärke zu hoch, werden bei den großen Mengen an produzierten Rohren und Schläuchen riesige Rohstoffmengen unnötig verbraucht.

Beispielhaft sind in Abbildung 3 drei unterschiedliche Schläuche aus Polyethylen (PE) mit einer innenliegenden Sauerstoff-Diffusionsbarriere aus Ethylen-Vinylalcohol-Copolymer (EVOH) gezeigt. Hier konnten die Lage und die Dicke der Diffusionsbarriere bestimmt werden, unabhängig von der Einfärbung der Schläuche. Um Gewicht und Rohstoffe bei der Rohrerstellung zu sparen und dabei die mechanische Festigkeit nicht zu stark zu reduzieren, werden zunehmend geschäumte Rohre hergestellt. Diese besitzen zwischen der Innen- und Außenwand eine geschäumte Struktur, meist aus dem gleichen Material (Abbildung 4). Durch die Schaumstruktur wird die Dickenbestimmung oftmals erschwert, so ist Ultraschall nicht mehr in der Lage diese zu durchdringen. Die Terahertz-Messtechnik hingegen kann diese Strukturen durchdringen und somit eine Schichtdickenmessung ermöglichen.

Was in der Theorie recht kompliziert klingt, ist in der praktischen Anwendung denkbar einfach: Die benutzerfreundliche Auswertesoftware arbeitet mit einer intuitiven Benutzerführung. Kalibriert

wird das System durch definierte Referenzproben. Das Messergebnis liegt innerhalb einer Sekunde vor, da die Auswertung der Messung jeweils parallel zur darauffolgenden Messung erfolgt. So steht sowohl für die Messung, als auch für die Auswertung jeweils eine Sekunde zur Verfügung. Die Genauigkeit der Schichtdickenmessung beträgt $\pm 1 \mu\text{m}$. Das ist schnell und genau genug für fast alle Anwendungen.

Das äußerst kompakte Terahertz-Schichtdickenmesssystem von Fraunhofer IPM ist sehr robust und langzeitstabil. Sein fasergekoppelter Aufbau erlaubt eine einfache Integration in bestehende Produktionsprozesse, z. B. auf einen XY-Scanner (siehe Abbildung 5) oder Roboter.

Mithilfe der Terahertz-Messtechnik lassen sich komplizierte Materialsysteme, die aus sehr vielen Schichten bestehen, sicher analysieren. Auf diese Weise lassen sich Schichtdicken in einem sehr breiten Bereich zwischen zehn Mikrometern und mehreren Millimetern bestimmen – und das auf $\pm 1 \mu\text{m}$ genau.

Der Einsatz des Terahertz-Dicken-Messsystems ist unkompliziert. Je nach Aufgabe kann der Arbeitsabstand zwischen 5 und 20 cm betragen und bis zu 40 Messungen pro Sekunde durchführen. Darüber hinaus ist bei Terahertz-Wellen keine Abschirmung erforderlich; sie sind nicht ionisierend und daher gesundheitlich unbedenklich.

Autor

Dr. Joachim Jonuscheit ist stellvertretender Abteilungsleiter Materialcharakterisierung und -prüfung am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Kaiserslautern.

Dr. Joachim Jonuscheit

Fraunhofer
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
Telefon +49 631 2057-4011
joachim.jonuscheit@ipm.fraunhofer.de
www.ipm.fraunhofer.de

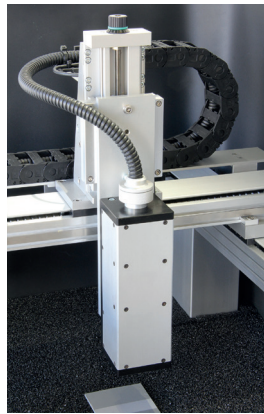


Abbildung 5: Fasergekoppeltes Terahertz-Messsystem, bestehend aus Basiseinheit und Messmodul. Die Basiseinheit enthält die zum Betrieb notwendige Optik und Elektronik sowie einen Rechner zur Systemsteuerung. Die Messmodule können individuell ausgelegt, hier für Reflexionsmessungen und auf einen XY-Scanner montiert.

Nürnberg, Germany
12. – 14.1.2016



EUROGUSS 2016

Internationale Fachmesse für Druckguss:
Technik, Prozesse, Produkte

[pre'tsi'zjo:n]

Wir sprechen Druckguss

Erleben Sie innovative Technik, effiziente Prozesse und neueste Produkte auf Europas führender Fachmesse.

euroguss.de



Ideelle Träger
VDD Verband Deutscher
Druckgießereien, Düsseldorf
CEMAFON
(c/o VDMA), Frankfurt am Main

Wir informieren Sie gern!
NürnbergMesse GmbH
Tel +49 (0) 9 11. 86 06-49 16
besucherservice@nuernbergmesse.de

NÜRNBERG MESSE