

Materialcharakterisierung und -Prüfung

Von sichtbarem Licht bis Terahertz – von Schicht-
dickenmessung bis Materialerkennung



Unsere Leidenschaft: Messtechnik

Die Abteilung »Materialcharakterisierung und -prüfung«

Mit unserer langjährigen Erfahrung im Bereich »Zerstörungsfreie Messtechnik« unterstützen wir Sie effizient bei Messaufgaben sowie bei Industrie- und Entwicklungsprojekten.

Unsere qualifizierten Mitarbeitenden forschen an den Themen

- Schichtdickenmessung von Einzel- und Mehrschichtproben
- Erkennung von Strukturen und Defekten in Bauteilen
- Untersuchung und Prüfung von Lacktrocknungsprozessen
- Materialerkennung aufgrund spektraler Eigenschaften

Dabei nutzen wir das gesamte Spektrum von sichtbarem Licht über Infrarotstrahlung bis hin zu Terahertz- und Millimeterwellen.

Unser Team besteht aus engagierten Techniker:innen, CAD-Designer:innen, Ingenieur:innen und Physiker:innen, die mit ihrer Expertise im Bereich optische Messtechnik, Softwareentwicklung und praktischer Erfahrung in Systemauslegung und -design die gesamte Entwicklungskette eines Messsystems bis zur Integration beim Unternehmen anbieten.

 www.itwm.fraunhofer.de/mc

Anwendungszentrum »TeraTec«

Dienstleistungen und Studien

Mit dem Anwendungszentrum »TeraTec« stehen wir Ihnen mit Dienstleistungen in Form von kostenlosen Voruntersuchungen, Machbarkeitsstudien, Geräteverleih und Messungen vor Ort bei der Lösung Ihrer Messaufgabe zur Seite.

In unseren Laboren setzen wir neben selbstentwickelten Messsystemen auch kommerzielle Systeme sowie neueste Roboter- und Kamertechnik ein. In der sogenannten »DigiCell« werden große Freiformproben

untersucht, indem die Bauteile zuerst in 3D erfasst werden, um anschließend die robotergestützten Sensoren automatisch per simulierter Pfadplanung exakt zum Bauteil auszurichten.



www.itwm.fraunhofer.de/TeraTec



Portfolio

Optische Messtechnik – die Basis unserer Lösungen

Unsere Abteilung »Materialcharakterisierung und -prüfung« bietet individuelle Lösungen in den Schwerpunkten:

- Schichtdickenmessung
- Struktur- und Defekterkennung
- Materialerkennung

Dazu nutzen wir verschiedenste Messtechniken aus dem gesamten optischen Spektrum – von interferometrisch/konfokalen Lösungen im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich für transparente Materialien

bis hin zu unseren Konzepten im Millimeter- und Terahertz-Bereich für transparente und opake Proben.

Zur Materialerkennung werden mittels Hyperspektraler Bildgebung und Terahertz-Systemen spektrale Eigenschaften im passenden Wellenlängenbereich analysiert. Zudem stehen wir Ihnen auch bei der Entwicklung, Auslegung sowie Integration des Systems zur Seite. Messdienstleistungen und Machbarkeitsstudien bedienen wir über das angegliederte Anwendungszentrum »TeraTec«.

Wellenlänge / μm										
0,3	0,4	0,75	1	3	10	30	100	300	1000	3000
UV	VIS	NIR	MIR	FIR	THz	MMW				
konfokal		interferom.		OCT		THz-TDS		FMCW		Schichtdickenmessung
Fluoreszenz		HSI		Photonische THz-FMCW						
Fluoreszenz		OCT						FMCW		Struktur-erkennung
HSI						THz-TDS		VNA		Material-erkennung



Kostenlose Voruntersuchungen
als risikolose Ersteinschätzung



Schichtdickenmessung

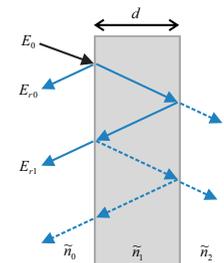
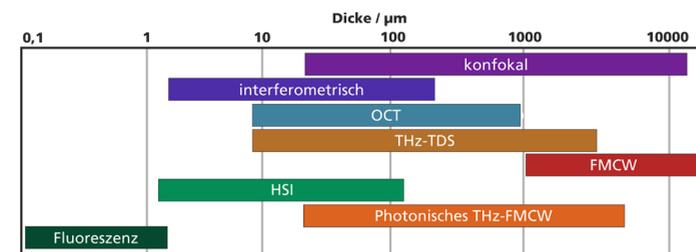
Wir bieten die verschiedensten Schichtdickenmesssysteme, allen gemeinsam: Sie unterliegen den Gesetzen der Optik. An der Grenzfläche zwischen verschiedenen, im jeweiligen Wellenlängenbereich transparenten Schichten, wird die genutzte elektromagnetische Strahlung gemäß der Fresnel-Gleichungen teilweise reflektiert und transmittiert.

Die typischerweise in Reflexion arbeitenden Messsysteme sammeln das reflektierte Licht, welches die Informationen des zu untersuchenden Schichtsystems als Phasen- bzw. Laufzeitinformation enthält. Diese Information wird mit unseren echtzeitfähigen Softwarelösungen extrahiert und nutzerfreundlich individuell aufbereitet.

Mit unseren breit gefächerten Systemlösungen decken wir einen Dickenbereich

von etwa einem Mikrometer bis hin zu mehreren Millimetern ab. Dabei können wir die Dicken von Einzelschichten, aber auch von Schichten im Mehrschichtverbund separat erfassen.

Je nach Messverfahren führen wir die Messungen punktuell oder als Linien- und Flächenscans durch, um die entscheidenden Informationen je nach Anwendung zu gewinnen.



Lackierungen und Beschichtungen

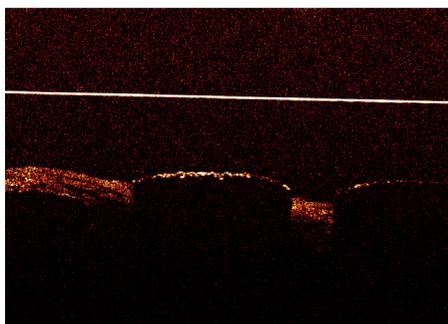
Beschichtungen sind für viele Produkte in den Branchen Automobil, Luft- und Raumfahrt, Papier- und Möbelindustrie sowie im Lebensmittel- und Medizinbereich entscheidende Qualitätsmerkmale.

Die als Einzel- oder Mehrschichtsysteme vorliegenden Beschichtungen können berührungs- und zerstörungsfrei gemessen werden. Die dazu eingesetzten Techniken sind gesundheitlich unbedenklich und gleichzeitig robust und stabil.

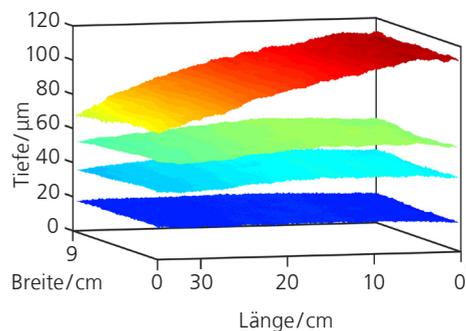
Durch Messung der Dicke dieser immer dünner werdenden Schichten mit Mikrometereauflösung kann der Produktionsprozess überwacht und optimiert werden.

Die Messköpfe, mit Zuleitungen von bis zu 20 m können per Hand, Linearachsen oder Roboter exakt für die inlinefähige Messung positioniert werden.

Hohe Messraten bei gleichzeitig ausgezeichneter Reproduzierbarkeit von besser als $1 \mu\text{m}$ erlauben den Einsatz der industrietauglichen Messsysteme in der Produktion. Echtzeitfähige Auswertalgorithmen in Kombination mit spezifischer Software ergänzen die Systeme.



OCT-Messung einer lackierten Holzprobe. Lackoberseite und Holzoberseite sind deutlich erkennbar. Messzeit: 7 ms.



Ermittelte Schichtdicken einer Vier-Schicht-Lackprobe mit Dickenverlauf im Klarlack



© Stephan Lessing

Messen von Ein- und Mehrschichtlackierungen auf

- Metall
- Kunststoff und Verbundwerkstoff
- Holz
- Grünkeramik und gebrannter Keramik
- und weiteren Materialien

Vorteile

- Prozesse verstehen und kontrollieren
- Qualität steigern
- Material einsparen

Spezifikationen

- Berührungs- und zerstörungsfrei
- Einzel- und Mehrschichtproben
- Messbereich von $10 \mu\text{m}$ bis 3mm
- Reproduzierbarkeit besser $1 \mu\text{m}$
- Messrate bis 1600Hz
- Trockene und nasse Schichten
- Robotergeführte Messungen

Nasse Lacke und weiche Schichten

Dank unserer kontaktlos arbeitenden Terahertz-Systeme können auch nasse oder weiche Beschichtungen untersucht werden.

So können Trocknungsverläufe und Lackierprozesse besser verstanden und überwacht werden. Diese Informationen werden genutzt, um Ausschuss frühzeitig zu erkennen und damit Energie, Material, Zeit und Geld zu sparen.

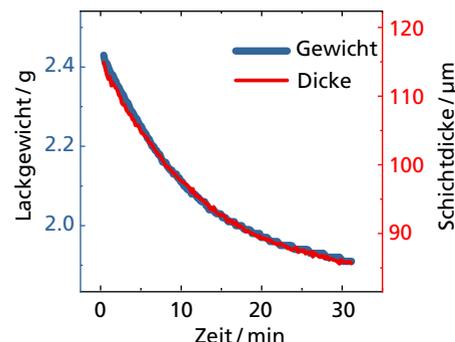
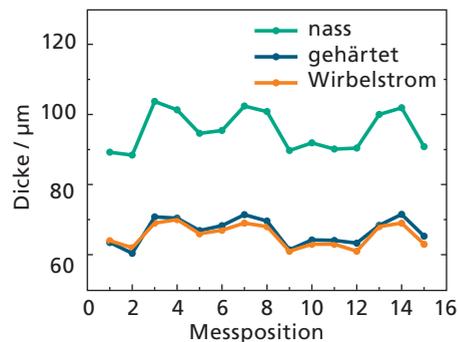


© BMW Group

Mit Kenntnis der genauen Schichtdickenentwicklung während der Lacktrocknung, kann der Lackier- und Produktionsprozess optimiert werden, um das bestmögliche Ergebnis zu erreichen. Zudem untersuchen wir Ein- und Zweikomponenten Uni- und Metallic-Lacke und nehmen Trocknungskurven für diese Lacke auf.

Unsere Messsysteme werden im industriellen Umfeld mit Roboterführung zuverlässig eingesetzt.

Daraus kann dann im Prozess die finale Lackdicke bereits unmittelbar nach dem Auftrag berechnet werden.



Kunststofffolien

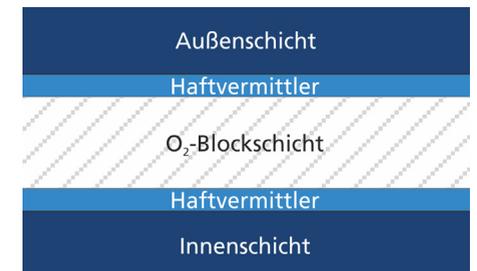
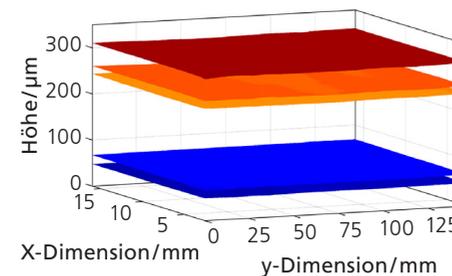
Kunststofffolien bestehen häufig aus bis zu sieben, dünnen Einzelschichten, inkl. Haftvermittler und Sauerstoff-Blockschicht (EVOH).

Aufgrund dieser komplexen Zusammensetzung stellen Folien hohe Ansprüche an die Messsysteme, insbesondere an Genauigkeit und Reproduzierbarkeit.

Zur Anwendung kommen bei der Folienuntersuchung unsere Terahertz-, OCT- und Hyperspektralsysteme. Sie rastern die Proben mit bis zu 1600 Punktmessungen bzw. bis zu 300 Linienmessungen pro Sekunde ab und können die Schichtdicken in der Produktion fortlaufend überwachen.



© freepik.com



Tiefendarstellung einer Folie mit zentraler EVOH-Schicht, Außen- und Innenschicht sowie Haftvermittler

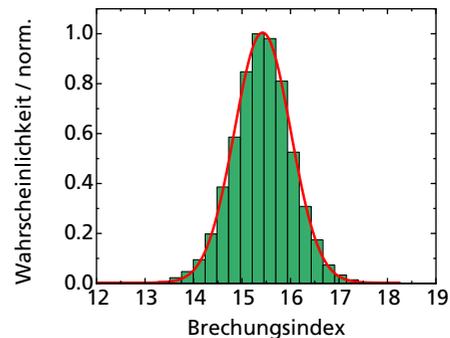
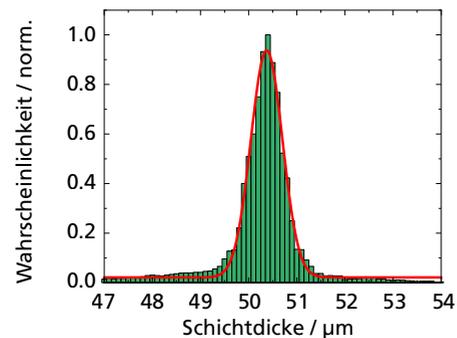
Die EVOH-Schicht kann mit Wiederholgenauigkeit im Sub-Mikrometerbereich gemessen werden

Batteriefolien

Batteriefolien sind die Hauptkomponenten in Lithium-Ionen-Batteriezellen. Die kontinuierliche Überwachung der Materialparameter – Schichtdicke und Leitfähigkeit – ist entscheidend für die Produktqualität.

Lithium-Batterien – eingesetzt in Elektrofahrzeugen sowie in großen Batteriespeichersystemen – bestehen aus Anoden- und Kathodenfolien, die entsprechend ihrer Aufgabe unterschiedliche Eigenschaften aufweisen müssen. Das Messen dieser Eigenschaften, insbesondere der Leitfähigkeit und der Schichtdicke, ist essenziell bei der Entwicklung und Produktion effizienter Batterien bzgl. Energiedichte und Langlebigkeit.

Dabei zeichnen sich Kathoden durch eine geringe Leitfähigkeit aus. Anoden zeigen hingegen eine deutlich größere Leitfähigkeit, was die Messbarkeit erschwert. Mit unseren, speziell für diese Anwendung optimierten photonischen Terahertz-FMCW Systemen sind wir dennoch in der Lage präzise Informationen der einige 10 µm dicken Folien zu generieren, gezeigt am Beispiel einer Anodenfolie.



Schichtdicken- und Leitfähigkeitsmessungen mit höchster Genauigkeit



© Studio Wiegel für Fraunhofer FFB

Pilotanlage für Batteriezellen beim Projektpartner, der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

Die inlinefähigen Messsysteme, mit Messgeschwindigkeiten von bis zu 1000 Messpunkten pro Sekunde sind zudem skalierbar in der Anzahl und Position der Messköpfe.

Die Einsatzfähigkeit mit Reproduzierbarkeiten von besser als 1 µm wurde erfolgreich an verschiedensten Proben sowie in einer Pilotanlage gezeigt.

Vorteile

- Anoden und Kathoden sind messbar
- Produktion kontinuierlich überwachen
- Produktqualität sicherstellen

Spezifikationen

- Berührungs- und zerstörungsfrei
- Messbereich von 10 µm bis 300 µm
- Messrate größer 1 kHz
- Reproduzierbarkeit besser 1 µm

Rohre und Schläuche

Extrudierprozesse von Kunststoff- und Gummi-Ummantelungen stellen Endlosprodukte her. Ein inline-fähiges Messverfahren zur Dickenkontrolle der Erzeugnisse ist daher zur Qualitätskontrolle unumgänglich.

Diese Anforderungen erfüllen wir mit unseren optischen und Terahertz-Systemen zuverlässig auch in industriellen Arbeitsumgebungen. Mit hohen Messraten, um feine räumliche Auflösungen zu erreichen, werden die Daten erfasst, in Echtzeit ausgewertet und grafisch aufbereitet.

Die Systemintegration in bestehende Produktionsanlagen gehört ebenfalls zu unseren Kompetenzen.

Vorteile

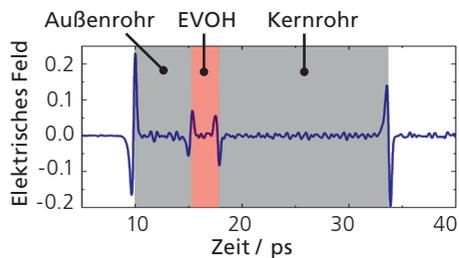
- Extrudierprozess inline überwachen/regeln
- Trends im Prozess erkennen
- Material einsparen

Spezifikationen

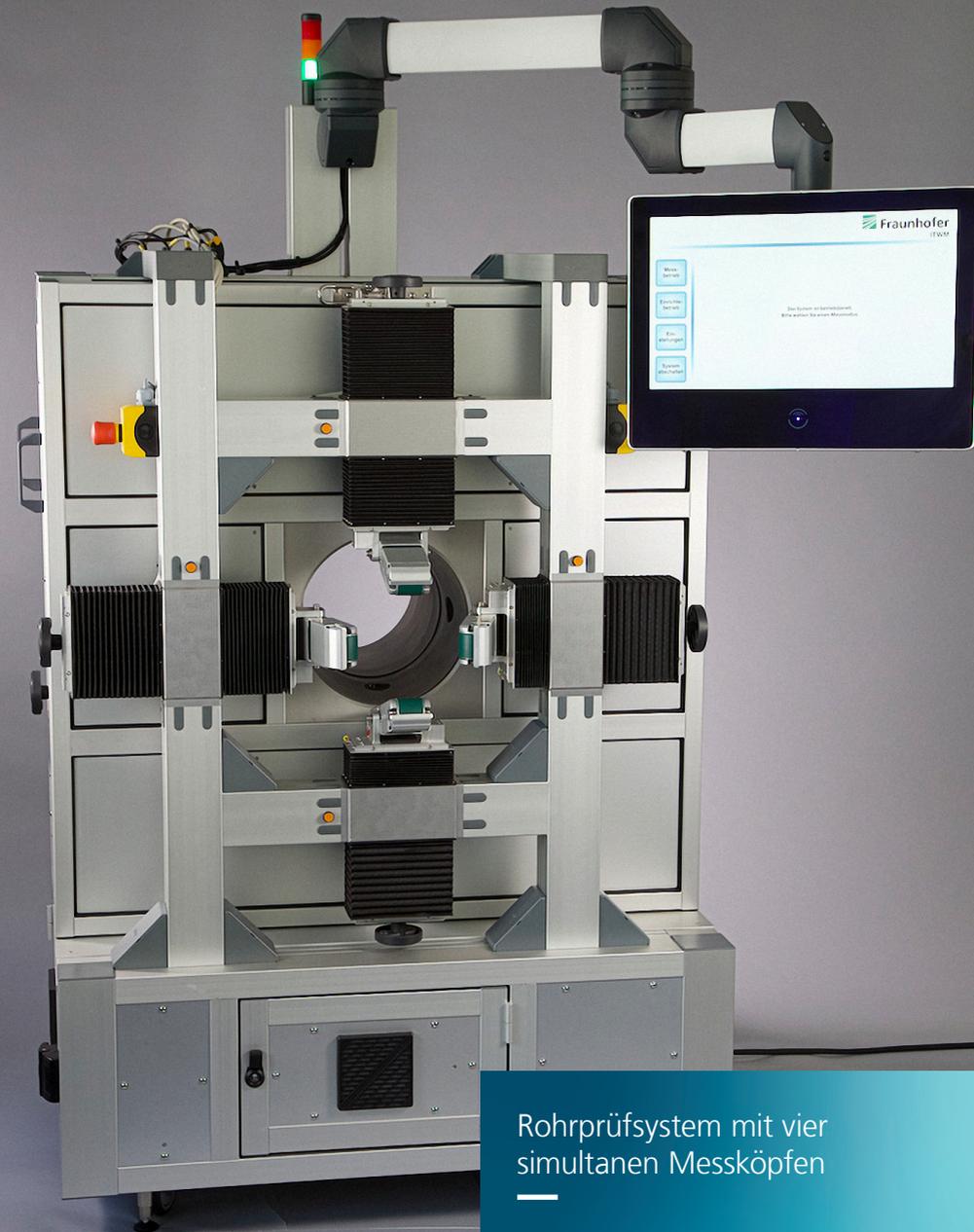
- Berührungs- und zerstörungsfrei
- Inline-fähig
- Robust auch in anspruchsvoller Umgebung
- Messbereich von 3 μm bis mehreren cm
- Reproduzierbarkeit besser 1 μm
- Grafische Darstellung



Mikroskopaufnahme eines Kunststoffrohres



Terahertz-Messdaten eines Kunststoffrohres mit deutlich erkennbarem Schichtaufbau



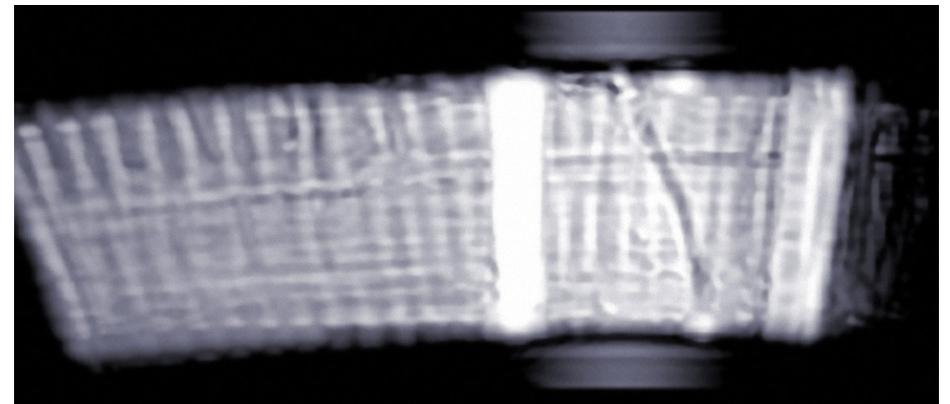
Rohrprüfsystem mit vier
simultanen Messköpfen



Strukturanalyse der Glimmerisolierung von Generatorstäben

Struktur- und Defekterkennung

Ein Blick ins Innere von nichttransparenten Materialien, wie z. B. Kunst- und Verbundstoffe oder Schäumen ist mit herkömmlichen Messverfahren nur eingeschränkt möglich. Millimeter- und Terahertz-Wellen können jedoch in nicht oder schwach leitende Materialien eindringen und liefern somit Informationen zum inneren Aufbau der Bauteile.



Terahertz-Aufnahme eines Generatorstabs mit Riss in der Isolierung

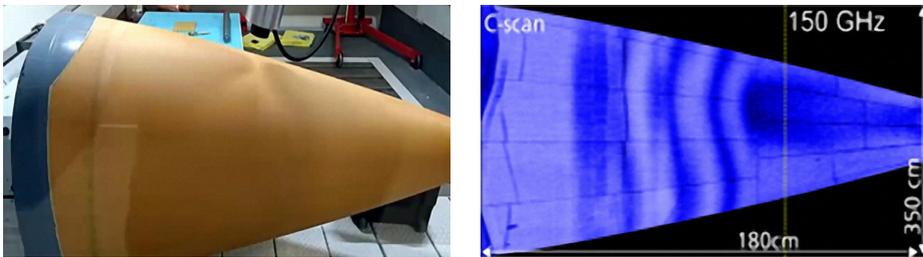
Mit unserem Portfolio bieten wir Messsysteme zur Untersuchung von äußeren und inneren Bauteilstrukturen. Auch große und schwierig zugängliche Objekte messen wir mit unseren Ansätzen.

Die Glimmerisolierung von Generatorstäben kann mittels dielektrischer Messspitze als quasi Nahfehlsonde an allen kritischen

Positionen auf Fehlstellen, wie feine Risse untersucht werden.

Erreicht werden laterale Auflösungen von unter 1 mm und Tiefenaufösungen von wenigen Millimeter bei Eindringtiefen von bis zu mehreren Zentimeter. Die Aufbereitung der Ergebnisse wird individuell an Ihre Wünsche angepasst.

Verbundwerkstoffe



Strukturerkennung an Flugzeugradomen mittels 150 GHz-FMCW System. Die robotergeführte Messung erfasst die gesamte Freiform.

Verbundwerkstoffe – wie CFK, GFK und NFK – sind zukunftsfähige Materialien, um gezielt Performanceansprüche von Produkten zu erreichen. Mittels Radartechnik können Fehlstellen im Aufbau von Verbundschichten großflächig mit bis zu 1 mm Auflösung detektiert werden, wie hier am Beispiel eines Radoms dargestellt.

Die substratunabhängigen Messsysteme aus unserem Portfolio können zur Prüfung von Verbundwerkstoffen auf GFK und NFK-Basis sowohl an der Oberfläche als auch im Volumen herangezogen werden.

Messung von

- Dickenunterschieden der Beschichtung und des Substrats
- Fehlstellen
- Einschlüssen und Hohlräumen
- Porosität

Vorteile

- Komplexe Proben messbar
- Beschichtung und Substrat gleichzeitig analysieren
- Defekte frühzeitig erkennen

Spezifikationen

- Substratunabhängig
- Inline-fähig
- Flächenscans mit wenigen min pro m²
- Räumliche Auflösung von besser 1 mm
- Reproduzierbarkeit besser 1 µm

Kunststoffe

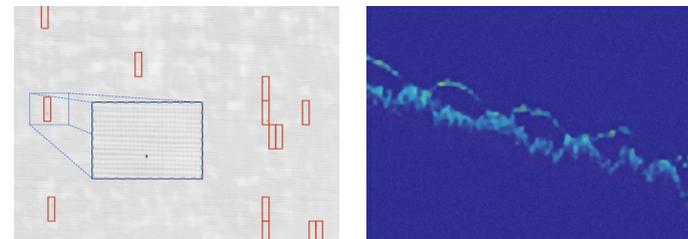
Lufteneinschlüsse, Delaminationen und raue Oberflächen sind häufige Ursachen für fehlerhafte Kunststoffbauteile.

Die optische Kohärenztomografie als bildgebendes Messverfahren für semitransparente sowie die Terahertz-Technik für nicht-transparente Produkte sind sehr gut geeignet, um feinste Defekte bereits während der Produktion aufzuspüren. So können weitere Produktionsschritte an Ausschussware

vermieden und somit Kosten sowie Energie eingespart werden. Auch topografische Messungen der Oberflächenbeschaffenheit werden mit unseren Techniken adressiert. Die Überwachung der Rauigkeit, aber auch von Rissen und Kratzern führen wir mit Mikrometergenauigkeit durch.



Oben: Flächige Untersuchung von Pressmäntel auf innere Defekte. Die automatische Auswertung auf KI-Basis findet im Hintergrund statt.



Unten links: Terahertz-Aufnahme eines Pressmantels mit automatisierter Fehlererkennung (rot)

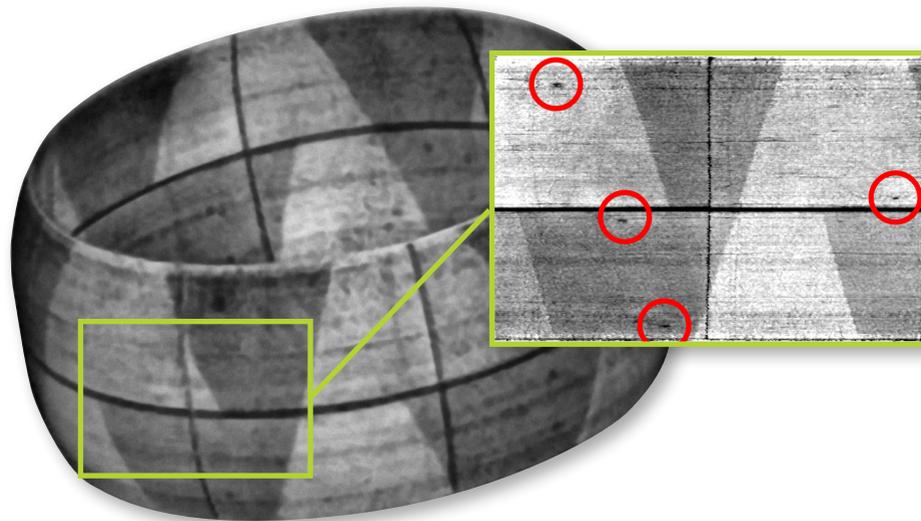
Unten rechts: Rauigkeitsmessungen mit Mikrometerauflösung

Schäume und Verklebungen

Eine »100 Prozent Kontrolle« von modernen High-Performance Bauteilen ist herausfordernd. Wir bieten verschiedenste Lösungen zur Bauteilanalyse.

Schäume und deren Verklebungen sind häufig mehrere Millimeter dick und bestehen aus unterschiedlichen Schichtabfolgen. Mit unseren Terahertz-Systemen bieten wir Techniken mit sehr großen Messraten und gleichzeitig Eindringtiefen bis einige Zentimeter bei Tiefenauflösungen im Mikrometerbereich. Damit können komplexe Bauteile, wie z. B. mehrere verklebte Schäume auf

CFK vollflächig auf Defekte und Einschlüsse untersucht und zwischen Auffälligkeiten in den einzelnen Schichten unterschieden werden. Dank der Robotertauglichkeit unserer Messköpfe können wir auch große Proben mit komplexen Formen erfolgreich inspizieren. Die Datenaufbereitung erfolgt in 1D, 2D oder 3D, ganz nach Ihren Wünschen.



Terahertz-Aufnahmen der Schaumisolierung auf einem zylindrischen CFK-Träger



Defektprüfung in der
Raumfahrt

Materialerkennung und -charakterisierung

Werden Materialien mit sichtbarem oder nicht sichtbarem Licht bestrahlt, zeigen viele Materialien spezifische Absorptionseigenschaften, die zur Charakterisierung genutzt werden können.

Wir setzen sowohl sichtbares und Infrarotlicht als auch Terahertz- und Millimeterwellen zur spektralen Analyse von Substanzen ein. Drogen und Sprengstoffe zeigen spezifische »Fingerabdrücke« im Terahertz-Bereich. Holz, Papier und Früchte zeigen im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich unterscheidbare Eigenschaften, wie auch beschichtete Gummimischungen im UV-Fluoreszenzverhalten. Die Detektion all dieser Eigenschaften

ermöglicht das Erkennen und Charakterisieren der Materialien, was zur Detektion, Sortierung und Konzentrationsbestimmung genutzt werden kann. Eingesetzt als Laborgerät oder direkt in den Produktionslinien werden mit unseren Systemen wichtige Informationen generiert, analysiert und aufbereitet. Systemauslegung, Umsetzung, Integration und Software kommen dabei aus einer Hand.



Netzwerkanalysator – VNA

Der Einsatz von etablierter Hochfrequenzmesstechnik, wie beispielsweise Netzwerkanalysatoren zur Materialcharakterisierung und -prüfung, ermöglicht die komplexen Reflexions- und Transmissionskoeffizienten von Materialien präzise über einen großen Frequenzbereich zu messen.

Diese Informationen können zur Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Materialien verwendet werden. Die Einsatzmöglichkeiten entsprechender Systeme sind sehr vielseitig.

Dielektrische Materialien

Es können die dielektrischen Eigenschaften von Materialien gemessen werden, z. B. ihre Dielektrizitätskonstante und ihr Verlusttangens.

Leitende Materialien

Sie können zur Messung der Leitfähigkeit von Materialien wie Metallen und Halbleitern verwendet werden.

Dünne Filme und Beschichtungen

Netzwerkanalysatoren kommen zur Messung der Dicke von dünnen Filmen und Beschichtungen zum Einsatz.



Netzwerkanalysator mit Hochfrequenzmessspitzen

Antennen, Radome und andere Komponenten

Sie können zur Messung der Impedanz von Antennen und anderen Bauteilen verwendet werden.

Postscanner

Die Drogen- und Sprengstoffdetektion von Briefen – auf Basis der Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie – erhöht die Sicherheit in Justizvollzugsanstalten.

Terahertz-Strahlung durchdringt viele nicht-leitende Materialien, darunter auch Papier und Kunststoffe. Dabei wird ein Teil der Strahlung absorbiert, damit verändert sich die spektrale Antwort der Probe. Weisen diese im Terahertz-Spektralbereich charakteristische Einbrüche auf – wie bei Drogen und Sprengstoffen der Fall – werden diese anhand dieser »Fingerabdrücke« erkannt.

Der von uns in Zusammenarbeit mit Hübner Photonics entwickelte Postscanner untersucht automatisiert Briefe und analysiert in Echtzeit den Inhalt auf nichterwünschte Substanzen. Wird er in Justizvollzugsanstalten und anderen relevanten Einrichtungen eingesetzt, kann der Scanner zur Sicherheit beitragen.



© hubner-photonics.com

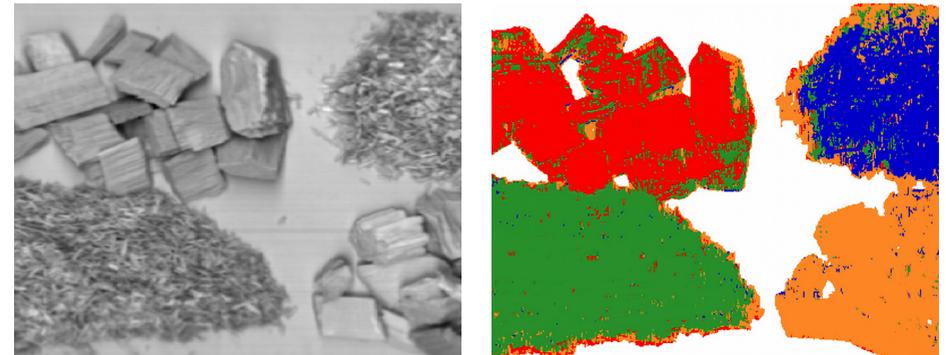


Erkennen von Holzarten

Verschiedene Holzarten zeigen unterscheidbare Merkmale im optischen Spektrum, die beim Erkennen unterstützen. Damit ist die Bestimmung der Zusammensetzung von Holzspan- und schnitzelschüttungen möglich.

Das Mischungsverhältnis zwischen Hart- und Weichholz entscheidet über Stabilität und Kosten einer Span- oder MDF-Platte. Dieses Verhältnis ist bei der Anlieferung der Rohwaren allerdings selten definiert. Daher sind Messmethoden zur zuverlässigen Analyse der Holzware nötig, um die bestmöglichen Verhältnisse sicherzustellen.

Hyperspektrale Bildgebung ermöglicht anhand von chemischen Charakteristiken zwischen den Holzarten eine schnelle und pixelweise Kategorisierung. Die Unterscheidung zwischen Hart- und Weichholz, aber auch zwischen verschiedenen Holzarten, wie u.a. Buche, Kiefer, Fichte, Birke usw. konnten wir bereits erfolgreich zeigen.



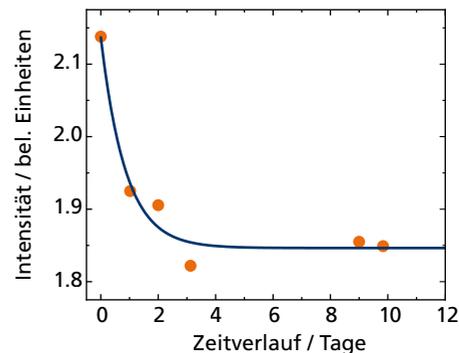
Die erfassten spektralen Bilddaten werden pixelgenau den vortrainierten Klassen in Echtzeit zugeordnet.

Bestimmen des Reifegrads

Ob Bananen, Avocados oder Tomaten, klimakterische Früchte im Reifeprozess ändern ihren Zuckergehalt. Über diesen kann der ideale Erntezeitpunkt mittels Hyperspektraler Bildgebung ermittelt werden.

Der Brix- bzw. Zuckergehalt kann mittels Hyperspektraler Bildgebung im nahinfraroten Spektrum gemessen werden. Dabei wird die spektrale Antwort der Früchte aus mehr als 200 Kanälen simultan mit einer Kamera erfasst, analysiert und das Ergebnis in Echtzeit aufbereitet. Aufgrund sehr

hoher Messraten von bis zu 300 Linienmessungen pro Sekunde und geringem Auslesehen ist diese Messtechnik ideal für den Einsatz am Fließband geeignet. Die Systeme bestehen aus einer kompakten Hyperspektalkamera und einer Lichtquelle zur gleichmäßigen Ausleuchtung der Produkte.



Das Beispiel zeigt die veränderte spektrale Antwort einer Avocado während des Reifeprozesses.

Abfallrecycling und Papiererkennung

Recycling von Abfällen ist ein wichtiger Bestandteil bei der Rohstoffeinsparung. Hyperspektrale Bildgebung und bildgebende Terahertz-Messtechnik können helfen, effizienter und umfangreicher Abfälle zu analysieren und zu trennen.

Obwohl die Bevölkerung bereits ein hohes Bewusstsein für Mülltrennung besitzt, ist eine maschinelle Analyse und Trennung der Abfälle unumgänglich, um eine hohe Recyclingquote zu erzielen.

Entscheidend ist hierbei auch die Trennung unterschiedlicher Stoffe und Sorten innerhalb der Abfallsparte. Die Hyperspektrale Bildgebung im sichtbaren und nahinfraroten

Spektralbereich kann Abfälle auf Grundlage der charakteristischen chemischen Zusammensetzung unterscheiden. Dabei kann grundsätzlich zwischen z. B. Metall, Kunststoff, Papier, Glas und Holz unterschieden werden, aber auch beispielsweise zwischen Normalpapier und nassfesten Papieren. Die Terahertz-Bildgebung bietet unter anderem das Potenzial auch verdeckte Kunststoffe und Holzarten zu identifizieren.



Im vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Forschungsprojekt »ASKIVIT« steht die Altholzgewinnung aus Sperrmüll durch Künstliche Intelligenz und Bildverarbeitung im Fokus.

Ansprechpartner

Dr. Joachim Jonuscheit

Stellv. Abteilungsleitung und Akquise
Tel. +49 631 31600 4911
joachim.jonuscheit@itwm.fraunhofer.de



Dr. Daniel Molter

Teamleitung »Optische Messtechnik«
Tel. +49 631 31600 4921
daniel.molter@itwm.fraunhofer.de



Dr. Fabian Friederich

Teamleitung »Elektronische Terahertz-Messtechnik«
Tel. +49 631 31600 4908
fabian.friederich@itwm.fraunhofer.de



Kontakt

Fraunhofer-Institut für Techno- und
Wirtschaftsmathematik ITWM

Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern

Telefon +49(0)6 31/3 1600-0
E-Mail info@itwm.fraunhofer.de
www.itwm.fraunhofer.de/mc

