



ZENTRUM FÜR MATERIALCHARAK- TERISIERUNG UND -PRÜFUNG



Hinter der Flugzeugnase aus Verbundwerkstoff – dem Radom – verbirgt sich das Radargerät. Ein von uns entwickeltes Millimeterwellen-Terahertzsystem prüft bei der Firma MEGGITT jeden einzelnen Radom in der Fertigung auf Defektfreiheit.



OPTISCHE MESSTECHNIK – ZERSTÖRUNGSFREI MESSEN MIT TERAHERTZ- UND MILLIMETERWELLEN

Wir entwickeln industrietaugliche Mess- und Prüfsysteme für die Qualitätskontrolle von Verbundwerkstoffen und Beschichtungen. Dabei greifen die Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker zurück auf Kompetenzen aus der optischen System- und Messtechnik, der Spektroskopie und der Entwicklung von Kristall- und Halbleiterkomponenten.

Die Technologien reichen von der optischen Kohärenztomographie (OCT) im sichtbaren Spektralbereich über die Zeitbereichsspektroskopie im Terahertz-Frequenzbereich bis zu elektronischen Systemkonzepten im Millimeterwellenbereich. Unsere Systeme werden für den Kunden maßgeschneidert. Dies umfasst sowohl die Anwendungs- als auch die Auswertesoftware, welche die wesentlichen Zielgrößen übersichtlich darstellt. Während der gesamten Entwicklung profitieren unsere Kunden vom Prozessverständnis unserer Mitarbeiter.

In der Qualitätskontrolle spüren unsere Systeme Defekte in Keramiken, Kunststoffen oder auch faserverstärkten Verbundwerkstoffen zerstörungsfrei auf. Besonderes Interesse gilt der berührungslosen Schichtdickenmessung, zum Beispiel in Lackierprozessen. Neben OCT sind hier vor allem die Terahertz- und Millimeterwellen-Messtechnik eine Alternative zu Ultraschallmessungen und zur Röntgentechnik: Es ist kein mechanischer Kontakt zur Probe nötig und die Strahlungsenergie ist nicht-ionisierend. Zusätzlich zur Dickenbestimmung ermitteln unsere Messsysteme auch die Materialparameter der einzelnen Schichten. Chemometrische Auswertemethoden identifizieren die Zusammensetzung der Materialien eindeutig und zuverlässig.

Kontakt

georg.von.frey mann@itwm.fraunhofer.de

www.itwm.fraunhofer.de/mc



SCHWERPUNKTE

- Zerstörungsfreie Prüfung
- Schichtdickenmessung
- Chemische Analyse



© istockphoto.com/wertorer

UNTERSUCHUNG SEHR DÜNNER SCHICHTEN MIT INTERFEROMETRISCHER BILDGEBUNG

1 Lackdraht wird zum Bau von elektrischen Spulen und Transformatoren verwendet. Wir messen berührungslos die Schichtdicke des isolierenden Lackes auf dem Draht.

Beschichtungen erhöhen oftmals nicht nur die Ästhetik, sondern besitzen auch funktionelle Eigenschaften; dazu zählen der Schutz vor mechanischen Einwirkungen und schädlichen Witterungseinflüssen oder die Verbesserung der Haptik. In der Industrie kommt daher der Beschichtungsdicke eine besondere Bedeutung zu.

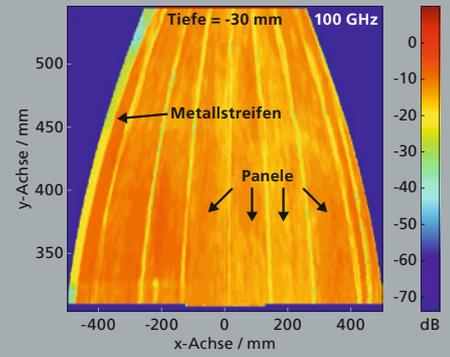
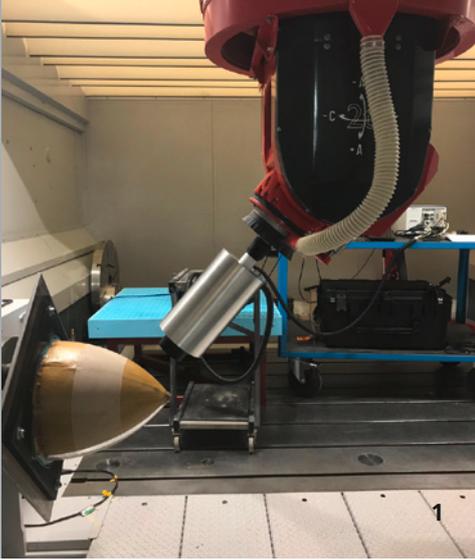
Funktionelle Eigenschaften erfordern eine Mindestdicke, unnötig dicke Schichten verschwenden Ressourcen und erhöhen damit die Herstellungskosten. Zur Messung sehr dünner, semitransparenter Schichten gibt es nun eine Lösung: die Optische Kohärenztomographie (OCT). Dieses Verfahren wurde ursprünglich für die tiefenaufgelöste Visualisierung biologischer und medizinischer Materialien entwickelt. Dank intensiver Forschung hat es sich inzwischen auch außerhalb der Medizin etabliert. Hochaufgelöste Probenquerschnitte, die mit sichtbarem Licht oder Infrarotlicht völlig zerstörungsfrei in Echtzeit erzeugt werden, machen die OCT deshalb zur idealen berührungslosen Prüftechnik für viele Anwendungen.

Reflexion liefert Informationen

Das physikalische Prinzip hinter dieser Methode ist die interferometrische Überlagerung eines Lichtstrahls, der aus unterschiedlichen Probentiefen reflektiert wird, mit einem Referenzstrahl. Aus Intensität und zeitlicher Verschiebung des reflektierten Strahls lässt sich die Tiefeninformation der Probe mathematisch ermitteln und als Querschnittsbild darstellen. Das Auflösungsvermögen beträgt je nach spektraler Breite zwischen 1 und 20 μm . Die Optische Kohärenztomographie eignet sich für alle Materialien, die für sichtbares oder nahinfrarotes Licht zumindest teiltransparent sind. Dies sind viele Kunststoffe, Verbundmaterialien, Gläser, Keramiken oder Halbleitermaterialien.

Inspektion von Lackdraht

Lackdraht, der auch als Wickeldraht bezeichnet wird, ist ein Metaldraht, der bei der Fertigung mit einer elektrisch isolierenden Lackschicht überzogen wurde. Die Dicke und das Gewicht dieser Lackisolation sind im Vergleich zu anderen Isolierstoffen mit gleicher Wirkung sehr gering. Dieser Draht wird daher bevorzugt zum Bau elektrischer Spulen, Transformatoren und Maschinen verwendet. Wir setzen OCT erfolgreich zur Vermessung der Lackdicke auf Kupferdrähten ein. Der dünnste Draht hatte hier einen Durchmesser von 50 μm und eine Lackdicke von 3 μm .



QUALITÄTSKONTROLLE IN DER LUFTFAHRTINDUSTRIE: RADOM-INSPEKTION MIT TERAHERTZ

Die bildgebende Prüfung mit Terahertz-Wellen eignet sich hervorragend zur zerstörungsfreien Inspektion glasfaserverstärkter Kunststoffe (GFK). Solche Strukturen werden beispielsweise für Radarkuppeln (Radome) von Flugzeugen eingesetzt, unter anderem zum Schutz der empfindlichen Radartechnik. Die Terahertz-Technologie ermöglicht die berührungslose Überprüfung der Strukturbeschaffenheit im Feldeinsatz oder bereits bei der Herstellung.

Radarkuppeln müssen rauen Witterungsbedingungen und Einschlägen standhalten. Sie werden im Einsatz routinemäßig überprüft, aber bereits bei der Herstellung ist es wichtig, sie auf ihre strukturelle Integrität und Transmissionseigenschaften für Funksignale zu optimieren. Bisher verwendete Prüftechniken wie Ultraschallverfahren und Klopftests können hierfür oftmals nur bedingt und gegebenenfalls nur unter speziellen Voraussetzungen eingesetzt werden.

Die bildgebende Terahertz-Prüfung erlaubt eine berührungslose und zerstörungsfreie Untersuchung der äußeren und inneren Struktur von Verbundwerkstoffen bei jedem Herstellungsschritt oder auch im Feldeinsatz. Weiterhin können bildverarbeitende Methoden zur automatischen Erkennung von Defekten oder anderen Merkmalen eingesetzt werden.

Spiralförmiges Abrastern des Radoms

Für das britische Unternehmen Meggitt Polymers & Composites haben wir ein industrielles 3D-Terahertz-Bildgebungssystem für die Inspektion von Radarkuppeln entwickelt. Die einfache Integration der Messeinheit in die Fertigungsanlage des Unternehmens ermöglicht ein spiralförmiges Abrastern des gesamten bis zu zwei Meter langen Radoms.

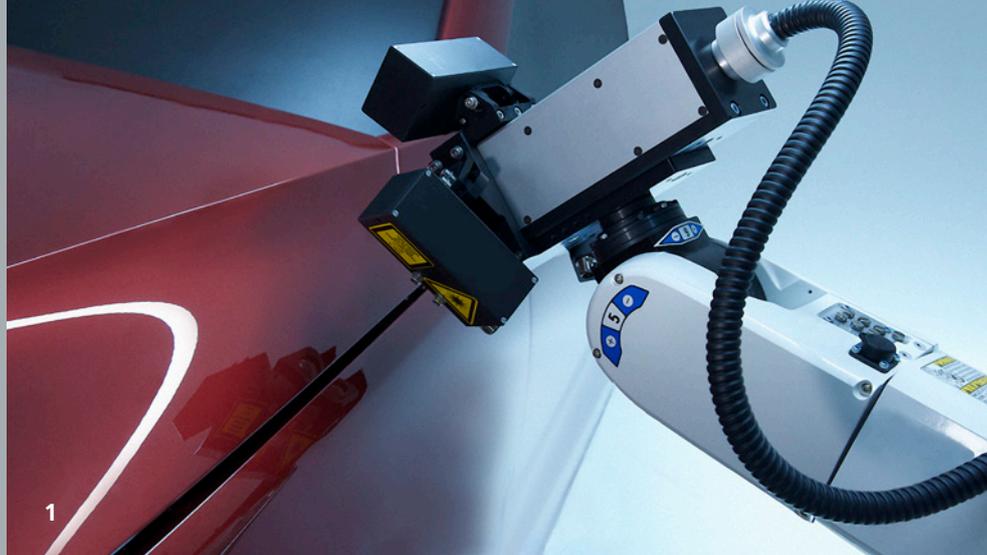
Abhängig vom Typ des Radoms können Dicke und Zusammensetzung der Struktur stark variieren. Dies hat einen wesentlichen Einfluss auf die Eindringtiefe des Terahertz-Messsignals. Die Wahl der Sensorik erfordert oftmals einen Kompromiss zwischen Bildauflösung und Eindringtiefe. Damit sowohl einige Zentimeter dicke als auch dünnere Strukturen mit der bestmöglichen Auflösung untersucht werden können, haben wir zwei unterschiedliche Terahertz-Sensoren mit aneinandergrenzenden Frequenzbereichen in ein Messsystem integriert. Für die verbesserte Tiefenaufklärung lassen sich die Messdaten der beiden Sensoren miteinander kombinieren.

1 *Sensoreinheit in der Werkzeugaufnahme der Fertigungsmaschine*

2 *Die Struktur des Radoms besteht aus verschiedenen Lagen unterschiedlicher Materialien (z. B. Aramid und Schaumstrukturen).*

3 *Terahertz-Messeinheit mit angeschlossener Datenverbindung und Stromversorgung*

4 *Rekonstruierte Aufnahme des Radoms bei 100GHz, welche die Rückseite des Radoms zeigt. Die einzelnen Elemente des Radoms können deutlich erkannt werden.*



TERAHERTZ-SCHICHTDICKENMESSUNG FÜR DIE SELBSTPROGRAMMIERENDE LACKIERZELLE

1 *Robotergeführter Terahertz-Messkopf mit drei Positionierungssensoren bei der Schichtdickenmessung an einer Autokarosserie*

Der Lackierprozess stellt viele Unternehmer vor große Herausforderungen, denn Automatisierung und Individualisierung der Produkte passen in puncto Lackiertechnik bisher nicht zusammen. In zahlreichen Branchen wird deshalb weit über die Hälfte aller Bauteile von Hand lackiert – die Variantenvielfalt ist einfach zu groß.

Einen Lackierroboter zu programmieren lohnt sich nur dann, wenn zahlreiche baugleiche Teile spritzlackiert werden müssen. Abhilfe schafft hier das automatische Lackiersystem SelfPaint: Es bietet Unternehmen erstmals einen Kompromiss zwischen Automatisierung und Individualisierung – und wartet zudem mit zahlreichen Einsparpotenzialen auf: 20 Prozent weniger Lack, 15 Prozent weniger Energie, fünf Prozent weniger Produktionszeit – seine Vorteile gegenüber der bislang dominierenden Handlackierung sind enorm. Und es eignet sich erstmals auch für Einzelstücke.

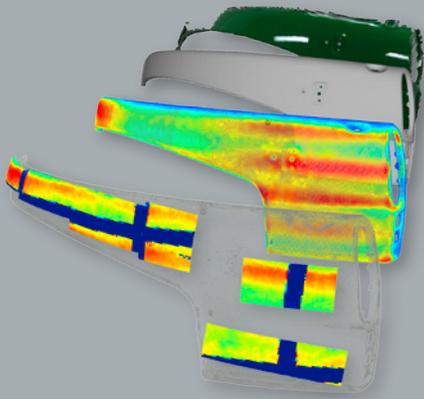
Entwickelt haben wir die selbstprogrammierende Lackierzelle gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA und dem schwedischen Fraunhofer-Chalmers Research Centre for Industrial Mathematics FCC.

Algorithmen errechnen optimale Roboterbahn

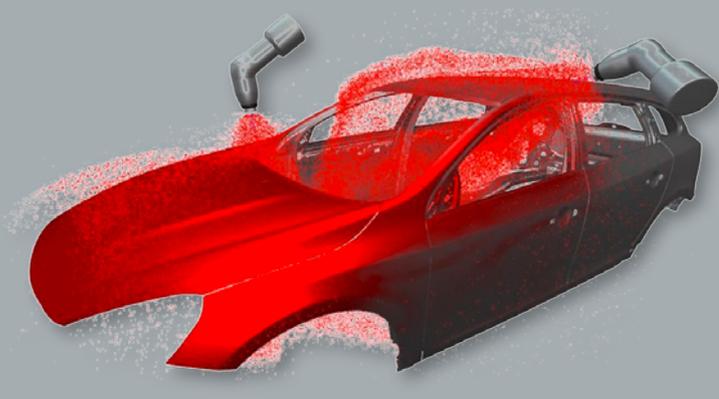
Der automatische Lackierprozess besteht aus fünf Schritten. Zunächst einmal wird das Bauteil dreidimensional gescannt, woraufhin die Scandaten die Basis für eine fluiddynamische Simulation bilden. Algorithmen simulieren die Flugbahn der Lackteilchen und bestimmen, welche Lack- und Luftmengen für die gewünschte Schichtdicke optimal sind. Aus diesen Simulationsdaten bestimmt das System im dritten Schritt die bestmögliche Roboterbahn für den Lackierprozess. Nun folgt der eigentliche Lackierprozess, der im letzten Schritt mithilfe von Terahertz-Technik kontrolliert wird. Wir realisieren im Projekt die dreidimensionale Erfassung des Bauteils und die Terahertz-Schichtdickenmessung.

Dreidimensionale Objekt- und Lageerkennung

Damit die Lackierzelle die Lage des Objekts für die Simulation und Lackierung kennt, muss dieses dreidimensional erfasst werden. Für den industriellen Einsatz konzipierte Systeme zur 3D-Objekt-erfassung sind aber meist für sehr genaue topografische Vermessungen unbekannter Objekte ausgelegt, was diese teuer macht.



2



3

© FCC

Liegen a priori Informationen der Objektgeometrie in Form von CAD-Daten vor, können sehr kostengünstige Produkte aus dem Bereich der Consumer-Elektronik verwendet werden. Es genügt hier nämlich die Bestimmung der Bauteillage im Raum.

In der selbstprogrammierenden Lackierzelle kommen 3D-Sensoren zum Einsatz, die ursprünglich zur Steuerung von Videospielen – einem globalen Massenmarkt – entwickelt wurden. Die Genauigkeit der Lageerkennung ist dabei exakter als die Abweichungen gängiger Bauteile von den CAD-Daten und liegt somit innerhalb der Fertigungs- und Positionierungstoleranzen. Ermöglicht wird diese hohe Auflösung durch maßgeschneiderte Algorithmen zur Datenaufbereitung. Das reine dreidimensionale Bild, das von dem Sensor erfasst wird und das als Punktwolke oder Netz vorliegt, kann im Regelfall nicht direkt für die Positionserkennung verwendet werden. Werden aber Filter genutzt, die sich Abbildungseigenschaften des Sensorsystems zunutze machen und fehlerhafte Informationen automatisiert aus der Messung entfernen, lassen sich die Punktwolken so nachbearbeiten, dass diese in hoher Güte vorliegen. Hoch genug, um eine vollautomatisierte 3D-Lageerkennung durchzuführen und damit die Lacksimulation und Lackierung zu ermöglichen.

Terahertz-Technologie zur Qualitätskontrolle

Im letzten Prozessschritt der automatisierten Lackierung wird schließlich die Qualität überprüft: Ist die Dicke der Lackschicht wie gewünscht? Für diese Qualitätskontrolle nutzen wir Terahertz-Wellen. Mit dieser von uns entwickelten Technologie können nasse und farbige Lacke berührungslos gemessen werden. Schon während des Lackierens oder auch im Nachgang kann die Qualität der Lackschichten kontrolliert werden.

Das eingesetzte Verfahren ermöglicht die berührungslose Messung sogar von Einzelschichtdicken eines Mehrschichtsystems, welches in vielen Lackierprozessen ebenfalls eingesetzt wird. Substrate – die Grundlage der Lackschichten – müssen hierbei nicht metallisch sein, sondern können auch aus anderen Materialien bestehen. Die Messsysteme für diese Qualitätskontrolle haben in den letzten Jahren Industriereife erlangt und bewiesen.

Im Lackieralltag wird also bald alles automatisch ablaufen: Das Bauteil wird von Robotern gescannt, lackiert und auf die Qualität überprüft – ohne Zutun eines Mitarbeiters.

2 *Ablauf des automatisierten Lackierprozesses (von hinten nach vorne: 3D-Erfassung des Bauteils, Abgleich mit CAD-Modell, Simulation des Lackierergebnisses, Ergebnis der Terahertzmessung – blaue Bereiche für Vergleichsmessungen abgeklebt)*

3 *Multiphysikalische Simulation eines Hochrotationszerstäubers mit Kontaktaufladung zur Berechnung der Tropfenflugbahn am Beispiel einer Volvo V60 Karosserie*



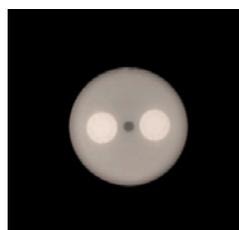
SCHUTZRECHTE FÜR INTERFEROMETRISCHE ABSTANDSKONTROLLE

Die interferometrische Abstandskontrolle erlaubt die Korrektur von Schwingungen, die bei der Terahertz-Schichtdickenmessung unter industriellen Randbedingungen unweigerlich auftreten. Sowohl die Fahrwege innerhalb des Spektrometers als auch der Abstand zur zu vermessenden Probe (z. B. Autokarosserie) werden quasi in Echtzeit gemessen, um daraus Korrekturwerte für die Schichtdickenmessung zu ermitteln. Gerade für die Messung industriell relevanter, dünner Schichten ($< 20 \mu\text{m}$) ist dieses Verfahren zur Ermittlung fehlerfreier Messwerte unabdingbar. Für beide Korrekturverfahren liegen die Schutzrechte bei uns.

DER SLAPCOPS LASER – EINE NEUE LICHTQUELLE FÜR DIE TERAHERTZ-ZEITBEREICHSSPEKTROSKOPIE

Für die Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie braucht man zwei variabel gegeneinander verzögerte Laserimpulse, um das Messsignal zeitaufgelöst abtasten zu können. Für die Zeitverzögerung sorgt meistens eine mechanische Verschiebeeinheit. Neuere Ansätze nutzen zwei Laserquellen, die entweder mit leicht verstimmtten Wiederholraten arbeiten oder zusätzlich die Wiederholrate des einen Lasers aktiv kontrollieren. Nachteil der mechanischen Kontrolle ist die Trägheit und Schwingungsanfälligkeit der Systeme, Nachteil der auf zwei Lasern basierenden Ansätze sind die hohen Kosten.

Wir haben jetzt ein Lasersystem entwickelt, das ohne mechanische Verfahrenheit auskommt und trotzdem nur einen Laser verwendet. Dieser emittiert Laserimpulse mit zueinander orthogonaler Polarisierung. Jede Polarisierung breitet sich mit einer unterschiedlichen Geschwindigkeit aus, woraus erneut unterschiedliche Wiederholraten resultieren. Durch eine gezielte Verstimmung der Resonatorlänge für eine der beiden Polarisierungen kann zudem eine scannende Verzögerung realisiert werden. Ein mechanisch robustes und zugleich kostengünstiges Verfahren. Die Schutzrechte liegen bei uns und unserem Auftraggeber Hübner GmbH & Co. KG.





Von vorne, links nach rechts: Jens Klier, Nina Schreiner, Robert Kranz, Dr. Joachim Jonuscheit, Prof. Dr. Georg von Freymann, Claudia Busch-Croll, Andreas Keil, Ph.D., Christoph Kaiser, Alexander Theis, Dr. Daniel Molter, Ute Rein-Rech, Raphael Hussong, Caroline Cappel, Wladimir Zwetow, Shiva Mohammadzadeh, Oliver Boidol, Dmytro Kharik, Maris Bauer, Sebastian Bachtler