



DURCHBLICK MIT MILLIMETER-, TERAHERTZ- UND OPTISCHEN WELLEN

Dem menschlichen Auge bleibt viel verborgen: Die meisten Materialien sind undurchsichtig, so dass wir meist nur die Oberfläche von Objekten optisch erfassen können. Für die Kontrolle, ob Bauteile fehlerfrei gefertigt wurden, ist dies nicht ausreichend: Klebeverbindungen in Verbundwerkstoffen, z. B. in Windkraftrotorblättern oder auch an Fensterscheiben in Fahrzeugen, können so nicht geprüft werden.

Am Zentrum für Materialcharakterisierung und -prüfung entwickeln wir zerstörungsfreie und berührungslose Prüfverfahren, die auf den Einsatz in der Fertigungslinie optimiert sind und eine zuverlässige Kontrolle des Produktionsprozesses ermöglichen. Unsere Terahertz-Schichtdickenmessgeräte messen Dicke und Materialparameter jeder einzelnen Schicht. Mit unseren Rohrinspektionssystemen wird die Wandstärke direkt am Extruder kontrolliert. Defekte in Verbundwerkstoffen spürt unser FMCW-Radar-basiertes Prüfsystem auf. Auch Verklebungen lassen sich so überprüfen. Und manchmal prüfen wir sogar die Farbschichten berühmter Kunstwerke.

Unsere Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen, Ingenieure und Techniker greifen für maßgeschneiderte Kundenlösungen auf Technologien von der optischen Kohärenztomographie (OCT) im sichtbaren Spektralbereich über die Zeitbereichsspektroskopie im Terahertz-Frequenzbereich bis zu elektronischen Systemkonzepten im Millimeterwellenbereich zurück. Die Kompetenz unserer Mitarbeitenden umfasst ein detailliertes Prozessverständnis. Das erlaubt uns die Übertragung von Ergebnissen aus der Grundlagenforschung in die Anwendung, so dass neueste technologische Entwicklungen als Lösung für herausfordernde Anwendungen identifiziert und eingesetzt werden können.

Kontakt

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

www.itwm.fraunhofer.de/mc

SCHWERPUNKTE

- Zerstörungsfreie Prüfung
 - Schichtdickenmessung
 - Chemische Analyse
 - Optische Messtechnik
-





NEUE WEGE BEI DER RESTAURATION VON KUNSTWERKEN

1 *Untersuchung des Abendmahls von Leonardo da Vinci (Cenacolo Vinciano, Polo Museale Regionale della Lombardia, Ministero per i Beni e la Attività Culturali)*

Der Erhalt historischer Kunstschätze erfordert nicht nur Restauratorinnen und Restauratoren, sondern auch Forschung und daraus resultierende Hightech-Lösungen. Das gilt insbesondere für weltberühmte Kunstwerke, wie »Das Abendmahl« von Leonardo da Vinci, die aufgrund ihres Alters zusätzliche Herausforderungen an Museen stellen. Zu einem neuen Restaurationsansatz trägt nun auch die Abteilung Materialcharakterisierung und -prüfung bei.

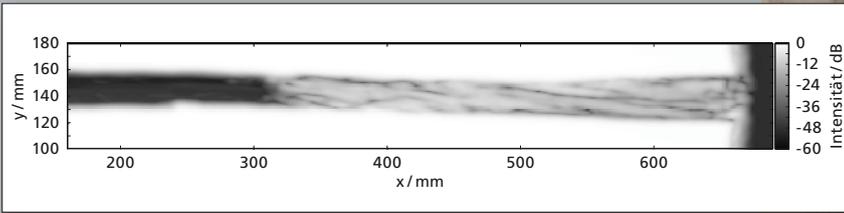
Das Thema Kulturerbe ist mittlerweile hoch auf der politischen Agenda der EU angesiedelt, was sich unter anderem darin zeigt, dass es im nächsten Forschungsrahmenprogramm Horizon Europe (2021–2027) prominent mit dem Thema Sicherheit und Klimawandel in Verbindung gebracht wird. Das Kulturerbe ist in Gefahr – der Klimawandel mit zunehmenden Extremwetterereignissen, aber auch menschengemachte Katastrophen wie der Brand der Kathedrale Notre-Dame in Paris im letzten Jahr und vor allem der boomende Massentourismus bedrohen ganz akut das kulturelle Erbe. Um diese Herausforderungen zu meistern, braucht es Forschung und technologische Entwicklung: Nachhaltige Konservierungsmaterialien, neue Analysemethoden, sozioökonomische Studien und vor allem neue Digitalisierungstechnologien und Künstliche Intelligenz.

Forschungsallianz Kulturerbe unterstützt Konservatoren

In Deutschland und Europa kommt der Fraunhofer-Gesellschaft eine besondere Rolle zu, mit ihrer innovativen technologischen Forschung zur Erhaltung unseres kulturellen Erbes und zu einer nachhaltigen Entwicklung beizutragen. Die Forschungsallianz Kulturerbe (FALKE) – bestehend aus Einrichtungen der Fraunhofer-Gesellschaft, den Leibniz Forschungsmuseen, der Stiftung Preußischer Kulturbesitz und den Staatlichen Kunstsammlungen Dresden – hat sich seit ihrer Gründung 2008 zur Aufgabe gemacht, Innovationen und Technologien für den Erhalt unseres kulturellen Erbes zu entwickeln. Das betrifft neben den Ingenieurwissenschaften vor allem die Disziplinen der Kunstgeschichte und -rezeption sowie die Gewerke der Restaurierung und Konservierung. Das Fraunhofer ITWM bringt als Mitglied der Forschungsallianz seine Millimeterwellen- und Terahertztechnologie ein.

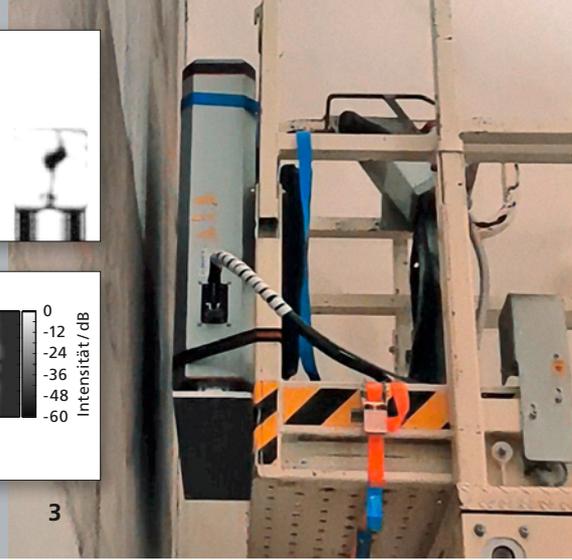
Untersuchung empfindlicher Oberflächen möglich

Durch die gute Transparenz vieler elektrisch nicht-leitender Materialien für Millimeterwellen- und Terahertz-Wellen bietet die bildgebende Millimeterwellen- und Terahertz-Prüfung komplementär zur etablierten Ultraschall-Prüfung viele Einsatzpotenziale für Untersuchungen an Kulturgütern. Die Prüftechnik ermöglicht kontaktfreie Aufnahmen innerer Strukturen von beispielsweise



2

3



Marmor oder Gipsfiguren und kann daher auch bei Objekten mit empfindlicher Oberfläche eingesetzt werden. Auch lassen sich hervorragend Holzmaserungen und gegebenenfalls Beschädigungen durch Holzwürmer erfassen. Die starke Absorption von Terahertz-Wellen durch polare Flüssigkeiten, wie zum Beispiel Wasser, ermöglicht Feuchteuntersuchungen, wohingegen metallische Strukturen das Messsignal vollständig reflektieren und dadurch beispielsweise Armierungen in Skulpturen untersucht werden können. Gleichzeitig ist die zerstörungsfreie Technologie gesundheitlich unbedenklich und kann durch kompakte mobile Systemkonzepte auch in rauen Umgebungen eingesetzt werden.

Auf Initiative des Mailänder Museo del Cenacolo Vinciano, des Instituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro in Rom sowie dem Engagement des japanischen National Institute of Information and Communications Technology konnten wir »Das Abendmahl« von Leonardo Da Vinci mittels Millimeter- und Terahertz-Wellen untersuchen.

Millimeterwellen ermöglichen Inspektion unterhalb des Wandgemäldes

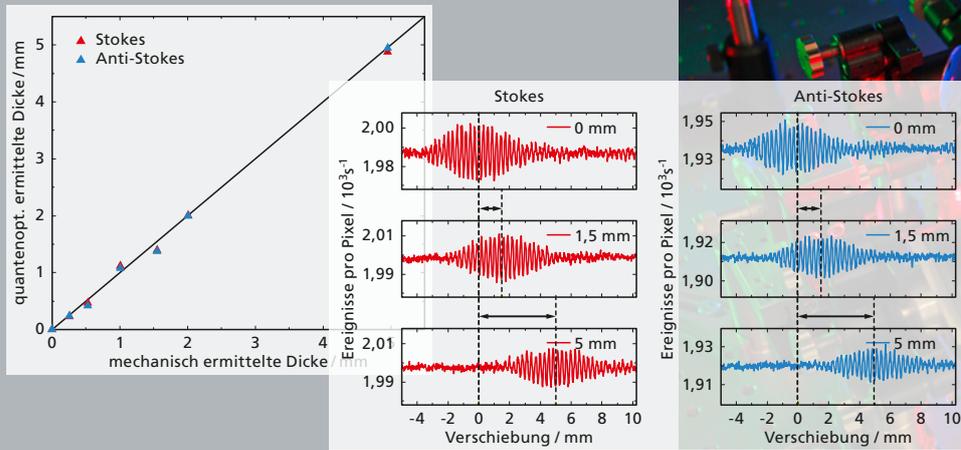
Das National Institute of Information and Communications Technology gilt als Pionier auf dem Gebiet der Terahertz-Messtechnik im Bereich Kulturerbe und nutzt die Terahertz-Technologie vor allem zur Untersuchung von Farbschichten und oberflächennahen Merkmalen. Komplementär dazu ermöglicht unsere Millimeterwellen-Technologie durch die größere Eindringtiefe die Erfassung von Beschädigungen und strukturellen Merkmalen unterhalb des Wandgemäldes. Der Einsatz dieser Technologien gibt beispielsweise Aufschluss auf frühere Restaurierungsmaßnahmen sowie Auswirkungen durch nahegelegene Bombeneinschläge in Kriegszeiten und kann wesentlich zur Erhaltung und Instandsetzung entsprechender Kulturgüter beitragen.

Das Fraunhofer ITWM und 19 weitere Fraunhofer-Institute sind aktuell an dem von der Fraunhofer-Gesellschaft mit 1,9 Millionen Euro geförderten Forschungsprojekt »Kulturerbe in Gefahr – Auswirkungen des Klimawandels, Chancen der Digitalisierung« beteiligt.

2 *Oben: Millimeterwellen- und Terahertzaufnahmen einer Holzschatulle, einem Marmorblock mit Bohrung, einem vergleichbaren Marmorblock (90°Grad gedreht) und einem zerbrochenen und wieder zusammengeklebten Marmorwürfel mit Hohlraum (v. l. nach r.). Es lassen sich eindeutig die Maserung der Holzschatulle und die Hohlräume in den Marmorblöcken sowie Risse bzw. Verklebungen erkennen.*

Unten: Die Messtechnik erlaubt die Erkennung von Feuchte, wie diese 100GHz-Aufnahme eines trockenen Stocks, welcher für kurze Zeit auf einer Seite (auf der linken Seite der Aufnahme) im Wasser stand, zeigt.

3 *Das Messsystem ist auf einer mobilen Hebebühne montiert und kann bis auf wenige Zentimeter an das Wandgemälde herangefahren werden, um relevante Ausschnitte zu inspizieren.*



1

QUILT – QUANTENOPTISCHE TERAHERTZ-MESSUNG

1 *Erste Demonstration von Schichtdickenmessung mittels Quanteninterferenz im Terahertz-Spektralbereich*

2 *Experimenteller Aufbau zur quantenoptischen Schichtdickenmessung im Terahertz-Spektralbereich durch Messen sichtbarer Photonen*

Erfolgreiche und nachhaltige Beiträge zum industriellen Fortschritt sind ohne Grundlagenforschung auch am Fraunhofer ITWM nicht zu leisten. Im Leitprojekt QUILT detektieren wir Terahertz-Wellen auf Basis neuer quantenoptischer Phänomene. Im vergangenen Jahr haben unsere Forschenden durch die Detektion sichtbarer Strahlung erstmals Schichtdicken verschiedener Proben über Quanteninterferenz im Terahertz-Spektralbereich gemessen. Damit wird »Schrödingers Katze« vom Gedankenexperiment zur aufregenden und anwendbaren Realität.

Trotz der stetigen Weiterentwicklung der Terahertz-Technologie in den letzten Jahren ist das Aufnehmen eines Bildes in diesem Spektralbereich weiterhin eine große technische Herausforderung. Im Gegensatz dazu sind gängige Kameras in Smartphones oder PCs hochentwickelt und bieten hohe Auflösung sowie Detektionseffizienz bei moderaten Kosten.

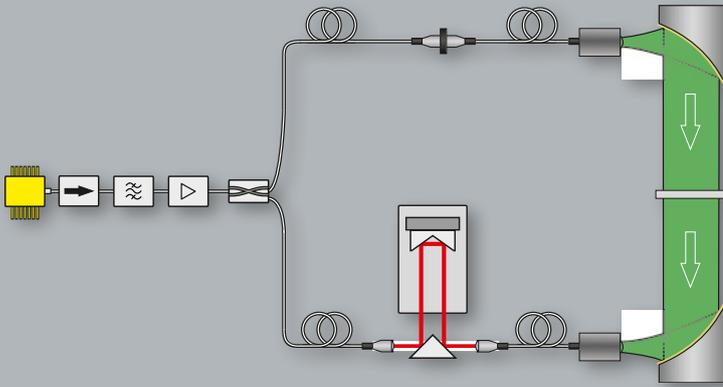
Quantenoptische Messmethode

Mithilfe quantenoptischer Methoden lassen sich die Eigenschaften von Photonen (Lichtteilchen) im Terahertz-Spektralbereich auf leichter zu detektierende sichtbare Photonen übertragen. Diese haben den Vorteil, dass hochentwickelte Detektoren genutzt werden, um die über die Terahertz-Photonen erhaltene Information auszuwerten. Im vorangegangenen Jahr haben wir die Grundlagen für das zu realisierende Messprinzip geschaffen, jetzt konnten wir Quanteninterferenz im Terahertz-Spektralbereich mithilfe sichtbarer Photonen beobachten. Dabei gelang es unseren Forschenden erstmals, die Terahertz-Wellen auch für Experimente an verschiedenen externen Proben zugänglich zu machen.

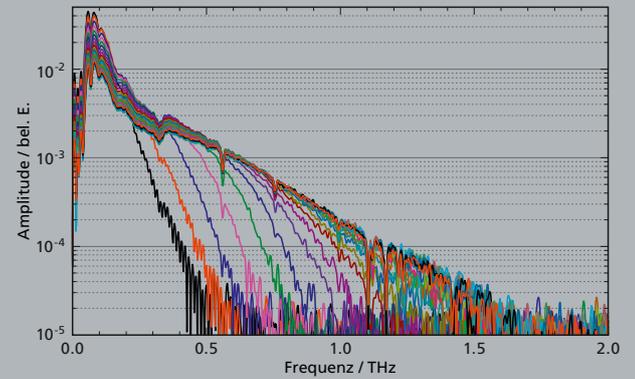
Erste Realisierung von Schichtdickenmessung

So war es möglich, die Schichtdicke verschiedener Proben mit Terahertz-Wellen durch die Detektion von sichtbarem Licht zu bestimmen. Hierbei handelt es sich weltweit um die ersten Untersuchungen dieser Art. Durch die Proben im Strahlengang ändert sich die optische Weglänge und die beobachtete Interferenz verschiebt sich entsprechend (Abb. 1). Die mit dieser Methode ermittelten Ergebnisse stimmen sehr gut mit den mechanisch gemessenen Dicken überein. Da die verwendeten Proben für die detektierten Photonen im sichtbaren Spektralbereich undurchlässig sind, wird diese Messung auch als »Messung mit undetektierten Photonen« bezeichnet.

Auf diesen Fortschritten aufbauend betreten wir auch zukünftig am ITWM wissenschaftliches Neuland, indem eine bildgebende Kamera im Terahertz-Spektralbereich mit diesem Prinzip realisiert wird.



1



2

CHAOTISCHES LICHT BEFLÜGELT DIE TERAHERTZ-MESSTECHNIK

Die Terahertz-Technologie hat in den letzten Jahren den Sprung von der angewandten Forschung in die Industrie geschafft – dabei hat sich die Schichtdickenmessung als interessanteste Anwendung erwiesen. Hierbei kommen im Bereich dünner Schichtdicken fast ausschließlich sogenannte Zeitbereichsspektroskopie-Systeme zum Einsatz, die auf kostspieligen und komplexen Ultrakurzpulslasern basieren. Wir haben jetzt den Einsatz von inkohärentem Licht zur Realisierung eines ähnlichen Messprinzips demonstriert und dessen Tauglichkeit zur Schichtdickenmessung bewiesen.

Zeitbereichsspektroskopie im Terahertz-Spektralbereich basiert auf der Erzeugung kurzer Terahertz-Impulse und deren Abtastung mit ultrakurzen Laserpulsen. Hierbei ist essentiell, dass diese Pulse eine wohldefinierte Zeitbeziehung zueinander besitzen. Dadurch wird die Messung auf Zeitskalen von wenigen Pikosekunden möglich – eine Zeitskala, die bisher kein herkömmliches Messgerät erreicht.

Chaotisches Licht statt kurzer Pulse

Nutzt man anstatt kurzer Pulse dagegen willkürlich fluktuierendes (»chaotisches«) Licht, so kann man erstaunlicherweise ebenfalls Messungen im Terahertz-Spektralbereich realisieren. Ermöglicht wird dies durch eine sogenannte Kreuzkorrelation zwischen der Terahertz-Welle und dem chaotischem Licht, welches diese in einem photoleitenden Mischer erzeugt hat. Interessanterweise ähneln die erhaltenen Signale bis auf wenige Unterschiede den Signalen der herkömmlichen Zeitbereichsspektroskopie-Systeme und lassen sich somit auch für die gleichen Anwendungen nutzen.

Hidden Champion

Japanische Wissenschaftler legten vor 20 Jahren die Grundlagen für dieses Forschungsgebiet und setzten damals noch einfache Laserdioden als Lichtquellen ein. In der Zwischenzeit forschten nur wenige Gruppen weltweit an diesem Messprinzip und demonstrierten einige Anwendungen. Den Hauptnachteil dieses Prinzips auf Basis der Laserdioden konnten wir durch den Einsatz von inkohärentem Licht sogenannter Superlumineszenzdioden überwinden. Zuvor störende Mehrdeutigkeiten wurden hierdurch eliminiert, was die Einsatzmöglichkeiten dieser Messsysteme erweitert. Das große Potenzial dieser Messtechnik besteht neben der Anwendbarkeit aber auch in dem großen Einsparpotenzial bei den Systemkosten. Somit wird diese Messmethode den Einstieg in neue, kostensensitive Anwendungsfelder ermöglichen.

1 Schematischer Aufbau des neuen Messsystems

2 Das Terahertz-Spektrum lässt sich flexibel auf die Anwendung anpassen.

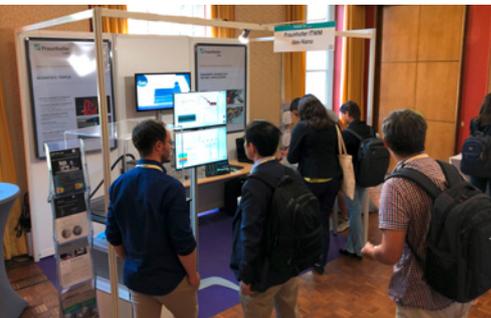


TECHNOLOGIETRANSFER TERAHERTZ-SCHICHTDICKENMESSUNG

Unsere Terahertz-Technologie zur berührungslosen und zerstörungsfreien Schichtdickenmessung in der Automobilindustrie wurde erfolgreich an die Firma das-nano transferiert. Mitarbeitende von das-nano wurden im Verlauf des Technologietransfers von ITWM-Mitarbeitenden in Aufbau und der Justage der Geräte geschult, so dass die Serienfertigung am Firmensitz von das-nano aufgebaut werden kann. Wir stehen das-nano auch weiterhin beratend zur Seite und arbeiten gemeinsam an Technologieverbesserungen.

INNOVATIVES LASERKONZEPT VERLÄSST DAS LABOR

Ein von unseren Forschern entwickeltes Lasersystem wurde vergangenes Jahr erstmals außerhalb des Labors erfolgreich auf Messen und Konferenzen präsentiert: Zunächst im Juni 2019 auf einem Kundenstand der LASER World of PHOTONICS in München, bei der über 30 000 internationale Fachbesucher die Möglichkeit zur Demonstration des Systems hatten. Im September konnte sich dann die Terahertz-Community erstmals einen persönlichen Eindruck auf der begleitenden Ausstellung der »International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)« in Paris machen.



TRILATERALE FORSCHUNG ERMÖGLICHT NEUES MESSPRINZIP

Unter der Leitung des Physikalischen Instituts der Goethe-Universität Frankfurt sind die Firma TOPTICA Photonics AG und wir an einem trilateralen Forschungsprojekt beteiligt, welches gemeinsam von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Fraunhofer-Gesellschaft zum Erkenntnistransfer in die Wirtschaft gefördert wird. Ziel des gemeinsamen Forschungsvorhabens mit dem Kurztitel »TeraSpect« ist die Entwicklung eines Terahertz-Spektroskopiesystems auf Basis frequenzselektiver Detektorchips für den Einsatz als inlinefähige industrielle Prüftechnik. Dabei werden zwei erfolgreiche Techniken der Terahertz-Messtechnik zu einem neuen Messprinzip kombiniert.

