

Transparente Analyse

Photonische Terahertz-Technologie für Grundlagen und Anwendungen

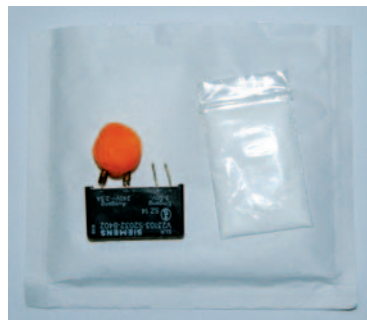
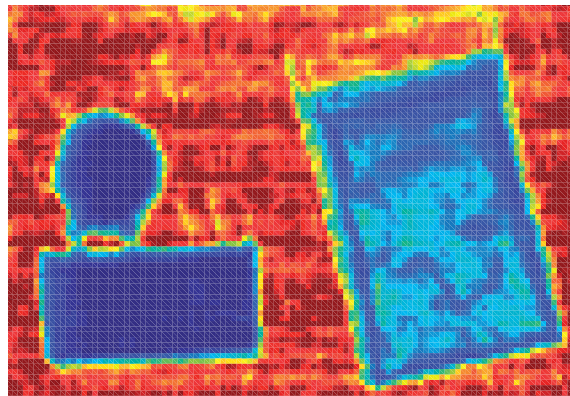
Joachim Jonuscheit, Michael Herrmann und René Beigang

Zwischen Radar und Infrarot liegt ein Teil des elektromagnetischen Spektrums, der neue Anwendungsmöglichkeiten in der Grundlagenforschung und Industrie eröffnet: Terahertz-Wellen. Diese zeichnen sich durch recht ungewöhnliche Eigenschaften aus und lassen sich mit modernen optischen Methoden effizient erzeugen und empfindlich nachweisen.

Eine verdächtige Briefsendung ohne Absender ist eingegangen. Enthält diese am Ende einen heimtückischen Sprengsatz? Praktisch wäre ein Prüfgerät, das innerhalb kürzester Zeit die Umrisse der enthaltenen Gegenstände zeigt, ohne dass man den Brief öffnen muss. Gleichzeitig sollte das Gerät eine spektrale Analyse liefern. Explosive oder giftige Substanzen sollten dabei gegebenenfalls erkannt werden. Anderenfalls kann der Brief rasch seinen Weg fortsetzen.

Für eine solche Analyse könnten sich Millimeter- und Mikrowellen anbieten, da sie tief in dielektrische Strukturen wie z. B. Kunststoffe, Kleidung und Keramik eindringen. Doch das räumliche Auflösungsvermögen lässt aufgrund der großen Wellenlänge zu wünschen übrig und liegt in der Regel im Zentimeterbereich. Technisch relevante Moleküle oder Chemikalien liefern zudem in diesem Frequenzbereich keine charakteristischen Absorptionen. Ein Gefahrenstoff im Brief bliebe somit unentdeckt. Im kurzwelligeren Infrarotbereich lassen sich dagegen charakteristische Molekülschwingungen in verschiedensten Stoffen und Stoffgemischen spektroskopisch nachweisen. Dummerweise sind gerade stark streuende Umgebungen wie Verpackungen oder Briefumschläge für Infrarotstrahlung undurchsichtig.

Doch gerade der elektromagnetische Spektralbereich zwischen den Mikrowellen und dem fernen Infraroten vereinigt die beiden Vorteile einer hohen Durchdringung dielektrischer Materialien und der spektralen Selektivität. Es handelt sich um die Terahertz-Strahlung mit Wellenlängen von 30 μm bis 3 mm, was Frequenzen zwischen 10 und 0,1 THz entspricht (Abb. 1). THz-Strahlung verspricht eine Fülle von technischen Anwendungen. Sie erlaubt es z. B., Bauteile aus Kunststoff oder Keramik, die sich von sichtbarem oder infrarotem Licht nicht durchleuchten lassen, auf Einschlüsse, Hohlräume sowie Fehlstellen zu kontrollieren. Zwar liefert auch Röntgenstrahlung einen gewissen Durchblick, aber für die Materialprüfung ist der Kon-



Eine Transmissionsmessung mit Terahertz-Strahlung (oben) erlaubt es, Elektronikbauteile und eine Tüte mit einem potenziellen Gefahrenstoff in einem verschlossenen Umschlag (links ausgepackt) zu identifizieren. Anhand des THz-Spektrums zeigt sich, dass die Tüte nur harmlose Laktose enthält.

trast zu gering. Dank der spektroskopischen Möglichkeiten lassen sich mit THz-Strahlung Gefahrenstoffe in Verpackungen identifizieren oder chemische Reaktionen während der Produktion verfolgen und steuern. Außerdem sind im Gegensatz zu Röntgenstrahlen keine aufwändigen Schutzmaßnahmen nötig, sodass sich THz-Wellen problemlos in technische und industrielle Anwendungen integrieren lassen: Aufgrund ihrer geringen Photonenenergie sind diese nämlich nicht ionisierend und für Menschen ungefährlich.

KOMPAKT

- Nahezu alle polaren Moleküle weisen im Terahertz-Bereich charakteristische Absorptionslinien auf. Die spektrale Breite der Absorptionsbanden nimmt von gasförmigen über kristalline zu flüssigen Proben zu.
- Die Dämpfung von Terahertz-Wellen durch viele dielektrische Materialien wie Papier, Kleidung, Kunststoff und Keramik ist sehr gering.
- Die nichtionisierende und daher gefahrlose Terahertz-Strahlung bietet sich daher für vielfältige Anwendungen in der Sicherheitstechnik und zerstörungsfreie Qualitätskontrolle an, aber auch für die Grundlagenforschung und industrielle Anwendungen in Medizin und Biologie.

Dr. Joachim Jonuscheit, Dr. Michael Herrmann, Prof. Dr. René Beigang, Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Erwin-Schrödinger-Straße, Gebäude 56, 67663 Kaiserslautern

Metalle und andere leitende Materialien sind allerdings für THz-Wellen nicht transparent und lassen sich daher nur in Reflexion untersuchen. Polare Flüssigkeiten wie Wasser absorbieren THz-Wellen sehr stark, weshalb die Eindringtiefe in wasserhaltige Proben meist geringer als ein Millimeter ist. Daher verhindert eine hohe Luftfeuchte breitbandige THz-Messungen in einem Abstand von mehr als wenigen Metern. Doch diese Nachteile lassen sich auch in einen Vorteil ummünzen, da die THz-Messtechnik somit einen sehr empfindlichen Nachweis von Wasser z. B. in Pulvern, Papier, Lebensmitteln oder Pflanzen erlaubt.

Kontinuierlich oder gepulst

Die viel versprechenden Eigenschaften der THz-Strahlung lassen sich nur dann flächendeckend anwenden, wenn sie sich problemlos erzeugen und detektieren lässt. Daher nimmt die Entwicklung von leistungsfähigen, kostengünstigen und kompakten Quellen und Detektoren eine Schlüsselstellung ein. Erst mit der Entwicklung starker Quellen seit den 1990er-Jahren blühte die THz-Forschung auf. Die mittlerweile zahlreichen neuartigen Quellen teilen sich in zwei Klassen auf: kontinuierliche Quellen mit engem Frequenzband sowie Quellen ultrakurzer THz-Pulse großer Bandbreite.

Kontinuierliche Terahertz-Quellen sind entweder rein elektronischer oder optischer Natur. Die rein elektronischen Quellen wie z. B. Gunn-Elemente oder nichtlineare Übertragungsleitungen haben wohl das größte Potenzial für preiswerte, kompakte Quellen. Sie arbeiten jedoch nur im unteren THz-Bereich, und das auch nur mit sehr geringer Leistung. Unter den kontinuierlichen optischen Quellen gibt es dagegen leistungstarke THz-Gas- und Quantenkaskadenlaser. Doch deren praktische Anwendbarkeit ist limitiert, da sich die Frequenz nicht über einen weiten Bereich

ändern lässt. Zudem sind diese unhandlich groß und teuer oder arbeiten nur bei sehr tiefen Temperaturen.

Andere optische THz-Quellen, z. B. basierend auf der Erzeugung von Differenzfrequenzen zweier Laser, sind zwar in der Frequenz über einen weiten Bereich abstimmbare, ihre Leistung ist jedoch bislang für Anwendungen zu gering. Leider ist es zudem immer noch aufwändig, kontinuierliche THz-Strahlung quantitativ und präzise zu detektieren, da das Hintergrundrauschen enorm ist, schließlich strahlen alle Körper bei Raumtemperatur auch im THz-Bereich. Nach dem Strahlungsgesetz von Rayleigh-Jeans empfängt ein 1 mm² großer Detektor bei Raumtemperatur im Bereich von 0 bis 3 THz eine Temperaturstrahlungsleistung von 2,6 μW. Für die meisten THz-Quellen mit einstellbarer Frequenz ist dies immerhin so viel, dass ein ausreichendes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) für die Spektroskopie nicht mehr gegeben ist.

Gepulste THz-Quellen sind von diesem Problem deutlich weniger betroffen, weil die Detektoren nur sehr kurze Zeiten „offen“ sind. In dieser kurzen Zeit nimmt der Detektor zwar die gesamte Energie des THz-Pulses auf, aber nur einen kleinen Teil der ständigen Hintergrundstrahlung. Gepulste THz-Quellen basieren in der Regel auf den Lichtpulsen ultraschneller Femtosekundenlaser. Diese lassen sich mithilfe der elektrooptischen Umwandlung in nichtlinearen Materialien (z. B. in dielektrischen Kristallen) oder auf Halbleiteroberflächen nutzen, um THz-Pulse zu erzeugen oder nachzuweisen. Femtosekundenlaser steuern auch die photoleitenden Antennen an. Diese Elemente leiteten Anfang der 1990er-Jahre die gegenwärtige Blüte der THz-Forschung ein und sind besonders leistungsfähig und präzise. Daher möchten wir uns im Folgenden auf diese Elemente konzentrieren (Infokasten „Photoleitende Antennen“).

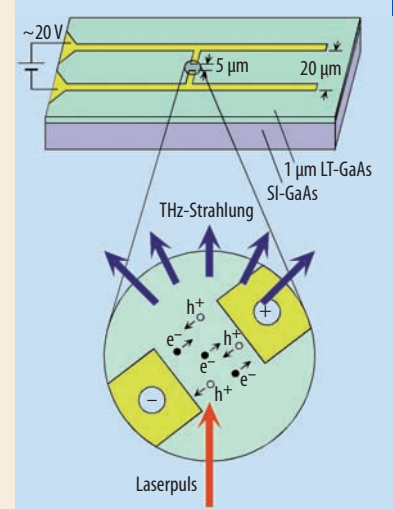
Gepulste THz-Quellen ermöglichen die sog. Zeitbereichs-Spektroskopie (Infokasten „Terahertz-

PHOTOLEITENDE ANTENNEN

Photoleitende Antennen (PL) sind gewissermaßen Transistoren, die statt durch ein elektronisches Gate durch einen Lichtpuls geschaltet werden. Eine PL-Antenne besteht aus einer mikrostrukturierten Leiterbahn auf einem Halbleiter. Eine Lücke im Zentrum teilt die Leiterstruktur in zwei Hälften (Abb.). Beim Einsatz als **Emitter** wirken die beiden Hälften als Elektroden, die elektrisch vorgespannt sind, sodass über der Lücke ein elektrisches Feld von der Größenordnung 10⁶ V/m anliegt. Trotzdem fließt nur ein zu vernachlässigender Strom, da das Halbleitermaterial sehr hochohmig ist. Trifft ein Laserpuls auf die Lücke, erzeugt er Ladungsträger, indem er im Halbleiter Elektronen aus dem Valenz- ins Leitungsband hebt. Dann fließt kurzzeitig während des Lichtpulses ein elektrischer Strom, bis die Ladungsträger rekombiniert sind.

Der zeitlich schnell veränderliche Stromstoß führt zur Abstrahlung eines elektromagnetischen Pulses. Dessen Frequenz ergibt sich aus dem Kehrwert der beteiligten Zeitkonstanten von Laserpuls und Rekombination, die beide im Bereich um 100 fs liegen. Damit ließe sich eine Bandbreite von bis zu 10 THz erreichen, die jedoch durch die Form der Antenne und die Abstrahlcharakteristik begrenzt ist. Typisch ist eine Bandbreite von 3 bis 4 THz. Spezielle Halbleiterschichten, z. B. bei tiefen Temperaturen gewachsenes GaAs (LT-GaAs) oder strahlengeschädigtes Si (RD-SOS), beschleunigen die Ladungsträgerrekombination.

Wird die Antenne als **Detektor** verwendet, so ersetzt ein empfindliches Amperemeter die externe Spannungsquelle. Ein Strom fließt, wenn ein Laserpuls Ladungsträger erzeugt und gleichzeitig ein elektrisches Feld diese auf



eine der Elektroden zubewegt. Das gemessene Signal ist somit proportional zum elektrischen Feld des THz-Pulses.

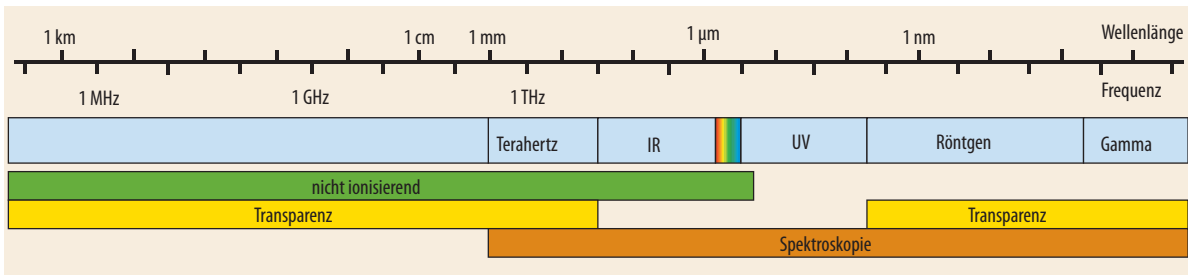


Abb. 1 Im elektromagnetischen Spektrum zeichnet sich die THz-Strahlung dadurch aus, dass sie ungefährlich ist und sowohl tief in Materie eindringen als auch spektroskopische Informationen liefern kann.

Zeitbereichs-Spektroskopie“). Dabei werden sehr kurze THz-Pulse (typisch eine Pikosekunde), die nur aus einem einzelnen Zyklus des elektrischen Feldes bestehen, zeitabhängig abgetastet. Die so erhaltene Wellenform lässt sich mittels Fourier-Transformation in den Frequenzraum übertragen. Dann erhält man ein Spektrum mit derselben Information, die Systeme kontinuierlicher THz-Strahlung auch liefern können, sofern diese über weite Frequenzbereiche abstimmbare sind. Darüber hinaus bieten kurze Pulse mittels Zeitbereichs-Spektroskopie den wichtigen Vorteil, dass die Phase der Strahlung eindeutig und nicht nur bis auf Vielfache von 360° definiert ist. Laufzeitmessungen liefern daher den Brechungsindex von durchstrahlter Materie direkt und eignen sich auch für Längenmessungen. Das eröffnet bei der Bildaufnahme mit THz-Strahlung vielfältige Möglichkeiten.

Kohärent oder inkohärent

Nachweismethoden für THz-Strahlung sind meist entweder inkohärent, d. h. sie messen nur die Leistung der absorbierten Strahlung, oder kohärent, d. h. sie detektieren das elektrische Feld und die zugehörige Phase der THz-Strahlung, was eine hohe Sensitivität ermöglicht.

Die inkohärenten Detektionsmethoden messen, wie sich die Temperatur des Strahlungsabsorbers ändert. Die höchsten Sensitivitäten erzielt man dabei mit Bolometern bei kryogenen Temperaturen. Typische Vertreter sind hier Hot-Electron-, Indiumantimonid- sowie Silizium-Komposit-Bolometer. Doch Bolometer sind nicht nur teuer, sondern zudem nicht frequenzselektiv. Sie kommen nur dann zum Einsatz, wenn es gilt, kleinste Signale nachzuweisen, die andere Detektoren nicht erfassen können, z. B. bei passiven THz-Kameras für die Sicherheitstechnik.

Bei Raumtemperatur stehen das klassische, thermische Powermeter, die Golay-Zellen und pyroelektrische Detektoren zur Verfügung. Aufgrund ihres Prinzips sind diese Detektoren ebenfalls nicht frequenzselektiv und träge. Die erreichbaren Messgeschwindigkeiten liegen maximal bei 20 Hz. Um THz-Leistungen im μW -Bereich messen zu können, muss die auftretende THz-Strahlung zudem „gechoppt“ sein. In Kombination mit photoleitenden Schaltern als Emitter lassen sich diese Detektoren wegen der zu geringen Empfindlichkeit und wegen des integralen Verhaltens im Zeit- und Frequenzbereich nicht einsetzen, da wichtige Informationen dadurch verloren gehen.

Ein kohärenter THz-Nachweis ist möglich, wenn das Signal einer lokalen Quelle, die eine Frequenz nahe dem zu detektierenden Signal hat, mit dem nachzuweisenden Signal nichtlinear gemischt wird (Heterodyn-Verfahren). Dann lässt sich das Differenzsignal bei deutlich niedrigerer Frequenz mit einem geeigneten Empfänger empfindlich messen.

Die meisten kohärenten Nachweisverfahren für THz-Wellen basieren jedoch auf optoelektronischen und elektrooptischen Methoden, die gepulste THz-Strahlung verwenden.¹⁾ Der große Vorteil dieser Methoden liegt darin, dass sie trotz der verhältnismäßig geringen THz-Strahlungsleistung eine extrem große Empfindlichkeit bei Raumtemperatur erreichen. Das Signal ist auf einen kurzen Zeitbereich konzentriert und der Detektor auch nur für kurze Zeit offen (Tastverhältnis typisch 1:10 000), sodass der Empfänger einen Großteil des Hintergrundrauschens nicht aufnimmt. Photoleitende Antennen sind hier als Detektoren einsetzbar.

Das elektrooptische Detektionsverfahren nutzt den Pockels-Effekt, also die Abhängigkeit der Doppelbrechung von einem externen elektrischen Feld in einem Kristall. Die Polarisation eines KurzpulsLasers ändert sich beim Passieren eines geeigneten Kristalls, wenn der THz-Puls zeitgleich ankommt. Häufig verwendete

1) Als Faustregel gilt: „Optoelektronisch“ bedeutet fließende Elektronen, „elektrooptisch“ atomar gebundene Elektronen.

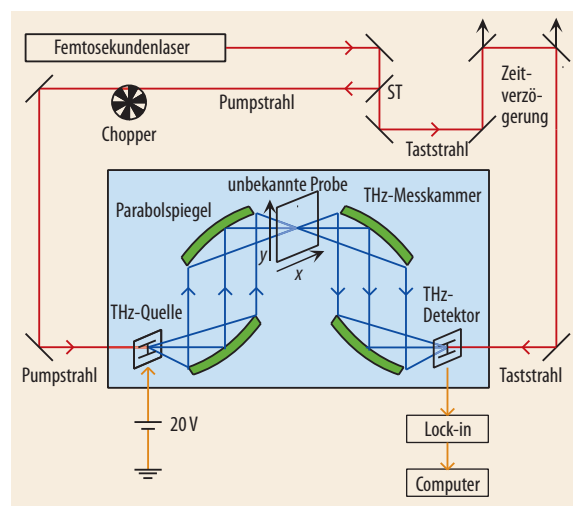


Abb. 2 Ein typischer Versuchsaufbau zur THz-Bildgebung besteht aus Laser, Verzögerungsschleife sowie photoleitenden Antennen als Emitter und Empfänger. Oft wird der Pumpstrahl periodisch unterbrochen, um das Rauschen sowie eine Nullpunktverschiebung durch einen konstanten Hintergrundanteil zu unterdrücken (Lock-in-Messung). Meist fokussieren Parabolspiegel die THz-Strahlung auf den Empfänger. Eine Probe lässt sich im parallelen Teil des Strahlengangs großräumig oder mit hoher räumlicher Auflösung in einem Fokus untersuchen, den das obere Parabolspiegelpaar erzeugt.

Kristalle sind ZnTe und GaP. Durch die Kristalldicke lassen sich die Empfindlichkeit und die Nachweisbandbreite anpassen. Einen Aufbau zur Messung mit THz-Strahlung zeigt **Abb. 2**.

Für viele Anwendungen ist es nötig, zweidimensionale Bilder aufzunehmen (THz-Imaging). Dies ist bereits mit dem Aufbau in **Abb. 2** möglich. Die Probe wird dafür zeilenweise senkrecht zum THz-Strahl durch den Fokus bewegt und so Punkt für Punkt abgetastet. Doch dieses Verfahren eignet sich eher für die Forschung als für Anwendungen. Zwar bleibt das Rauschen im Vergleich zum Signal weiterhin niedrig, aber die Rasterung benötigt viel Zeit: Wenn die THz-Messung eines einzelnen Datenpunktes 30 Millisekunden erfordert, dann dauert die Aufnahme einer Wellenform mit 100 Werten auf der Pikosekunden-Zeitskala drei Sekunden, und das Abrastern eines Bildes mit 100×100 Wellenformen kostet rund acht Stunden. Schnelle Zeitschleifen drücken die Messdauer pro Datenpunkt deutlich unter die Millisekundengrenze, industrielle Anwendungen erfordern aber meist die Bildaufnahme in Echtzeit – ein hoffnungsloses Unterfangen mit dem Rasterverfahren.

Abhilfe versprechen ein- oder zweidimensionale Detektoren wie z. B. Arrays von PL-Antennen. Diese erfordern jedoch auch eine Integration der Auswertelektronik, die noch nicht weit entwickelt ist. Schon länger im Einsatz sind handelsübliche CCD-Kameras, kombiniert mit entsprechenden Kristallen zur elektrooptischen Umwandlung von THz-Strahlung in sichtbares Licht. Egal, welches dieser Verfahren zum

Einsatz kommt, das Ergebnis ist in allen drei Fällen eine zweidimensionale Schar von Wellenformen, aus deren geeigneten Charakteristika sich eine Abbildung erstellen lässt. Besonders häufig sind es die Amplitude als Maß für die Absorption oder aber die Position des Hauptmaximums als Maß für den Brechungsindex oder die Probendicke. Daneben kommen aber auch die Pulsbreite, die Eigenschaften von Nebenmaxima, spektrale Kenngrößen oder andere Parameter infrage.

Für die zweidimensionale Signalaufnahme bei inkohärenten Messungen dienen Focal Plane Arrays (FPA), die an Antennen gekoppelt sind, um die Empfindlichkeit zu erhöhen. Die Entwicklung dieser Arrays für THz-Frequenzen steckt noch in den Anfängen, allerdings gibt es bereits viel versprechende Fortschritte bei Multipixel-Detektoren auf der Grundlage von Mikrobolometern und Schottky-Dioden.

Qualität und Sicherheit auf dem THz-Prüfstand

Mit THz-Wellen lassen sich chemische Verbindungen analysieren und Moleküle zu charakteristischen Rotationen und Schwingungen anregen. Die Liste der bereits untersuchten Proben ist umfangreich und umfasst so unterschiedliche Materialklassen wie Halbleiter, Polymere, Biomoleküle, polare Gase, pharmazeutische Wirkstoffe, Drogen und Sprengstoffe.

Intensiv wird derzeit untersucht, welche Möglichkeiten die THz-Strahlung für die zerstörungsfreie Pro-

TERAHERTZ-ZEITBEREICH-SPEKTROSKOPIE

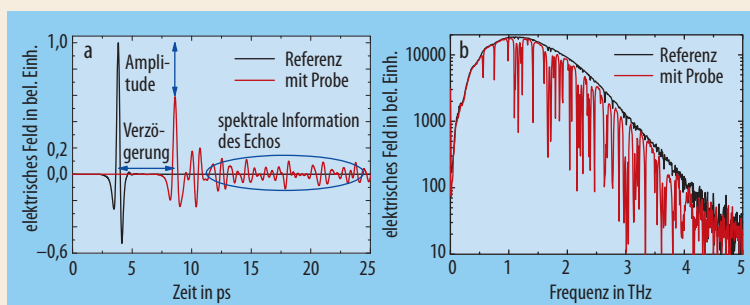
Die **THz-Zeitbereichs-Spektroskopie** (engl.: terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) zeichnet sich dadurch aus, dass man im Zeitbereich misst und mit Fourier-Transformation Information über den Frequenzbereich erhält. Der Strahl eines Femtosekunden-Pulslasers wird dafür zunächst in zwei Teile, den Pump- und den Taststrahl (engl.: probe beam) aufgeteilt. Trifft ein Puls aus dem Pumpstrahl auf den Emitter, erzeugt er dort einen THz-Puls. Der korrespondierende Laserpuls aus dem Taststrahl trifft auf den Detektor und öffnet dort das Zeitfenster für die THz-Detektion. Ein Signal wird also genau dann erzeugt, wenn der Laser-Tastpuls und der THz-Puls gleichzeitig am Detektor eintreffen. Letzterer ist (wegen der Abstrahlcharakteristik des Senders und evtl. Streueffekten in der Probe) meist länger als die Dauer des Zeitfensters. Somit ist im Empfänger derjenige Teil des THz-Pulses zu sehen, der eintrifft, solange der Tastpuls das Zeitfenster geöffnet hält.

Das Zeitfenster lässt sich im Pikosekundenbereich verschieben, indem man einen Spiegel bewegt und so den Lichtweg des Tastpulses im Millimeterbereich verlängert oder verkürzt. So wird Stück für Stück das zeitabhängige elektrische Feld auf der ps-Skala abge-

tastet (**Abb.**) und eine Zeitauflösung besser als 10 fs erreicht. Dafür muss die Verzögerungsschleife auf ca. 1 μm genau positioniert sein. Der von der Verzögerungsschleife abgefahrte Weg kann mehr als 10 cm betragen, womit man eine hohe Frequenzauflösung unter 1 GHz erreicht.

Da die Amplitude und die Phase des THz-Pulses erfasst werden, handelt es

sich um eine kohärente Messung. Die gemessene, zeitabhängige „Wellenform“ lässt sich durch eine Fourier-Analyse in den Frequenzraum transformieren, was spektrale Aussagen über die untersuchte Probe ermöglicht. Durch den kohärenten Nachweis wird trotz der geringen THz-Leistung standardmäßig ein hohes Signal-Rausch-Verhältnis von 1000:1 und besser erreicht.



In der THz-Zeitbereichs-Spektroskopie wird meist der erzeugte THz-Puls nach Reflexion bzw. Transmission durch die Probe gemessen und mit dem Eingangspuls verglichen. Die geänderte Amplitude gibt Auskunft über die Probenbeschaffenheit (a). Die optische Dicke der Probe (Brechungsindex \times geometrische Dicke) verzögert den THz-Puls beim Durchgang durch die Probe. Durch

Mehrfachreflexionen innerhalb der Probe können mehrere Pulse auftreten, die sich je nach Probendicke mehr oder weniger überlagern. Die Feldoszillationen im Anschluss an den Hauptpuls beinhalten die spektralen Informationen der Probe, die durch Fourier-Transformation der zeitlichen Wellenform zugänglich ist, bei der hier Absorptionslinien von Wasserdampf in der Luft zu sehen sind (b).

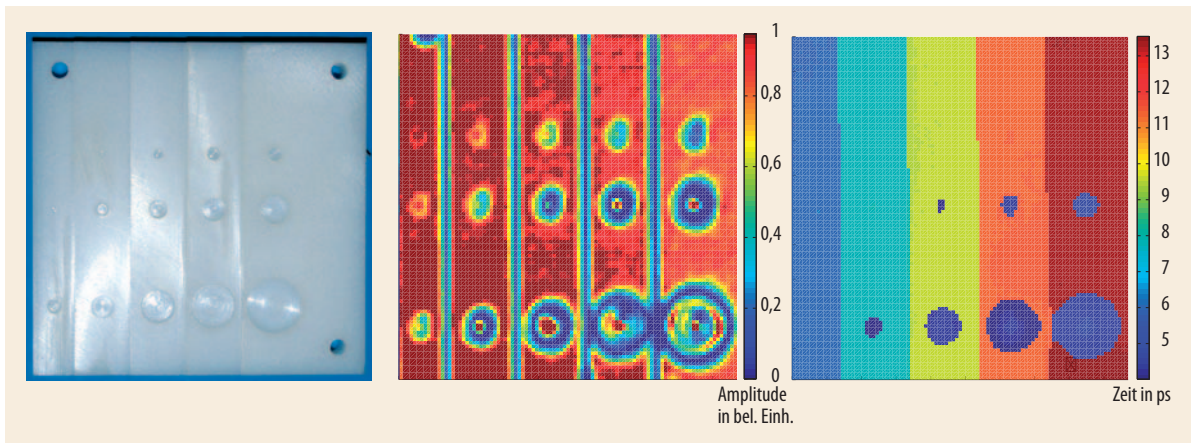


Abb. 3 Bei einer Kunststoffplatte (links) ist im THz-Amplitudenbild (Mitte) gut zu sehen, dass selbst die kleinste Bohrung von 1 mm Durchmesser noch aufgelöst wird. An den Kanten kommt es zu Interferenzen zwischen Strahlen, die unter-

schiedliche Materialdicken durchqueren. Sie führen zu Wellenformen mit einer geringerer Amplitude (blau). Da die Absorption für THz-Strahlung bei diesem Material nur geringfügig vom Volumen abhängt, ist die Amplitude nach Durch-

querung von verschieden dickem Material nahezu gleich groß. Im Laufzeitbild (rechts) dagegen heben sich die unterschiedlich dicken Teile der Probe deutlich voneinander ab.

zess- und Qualitätskontrolle bietet – ein Feld, das alle Industriebranchen umfasst. So ist die spektroskopische Identifizierung von Substanzen besonders für die chemische und pharmazeutische Industrie von Interesse, z. B. um Tabletteninhaltsstoffe oder unterschiedlich hydratisierte Substanzen zu erkennen.

Ebenso interessant ist es, ins Innere von Proben zu schauen, die für THz-Wellen transparent sind, z. B. um unerwünschte Fremdbestandteile in Lebensmitteln zu detektieren. Während empfindliche Metalldetektoren bereits existieren, steht für nichtmetallische Körper derzeit nur die Röntgentechnik zur Verfügung, mit der bekannten Strahlenschutzproblematik. Daher versucht man, diese durch die THz-Technik zu ersetzen. Verschiedene Fremdkörper aus Metall, Glas, Keramik, Holz und Zucker ließen sich bereits in Schokolade und Pulvern wie Mehl nachweisen. Keramiken und Kunststoffe sind meist für THz-Strahlung sehr gut transparent und eignen sich daher für THz-Inspektionen, die Risse, Einschlüsse oder Inhomogenitäten von Beimischungen (z. B. Füllstoffe oder Flammschutzmittel) aufspüren können.

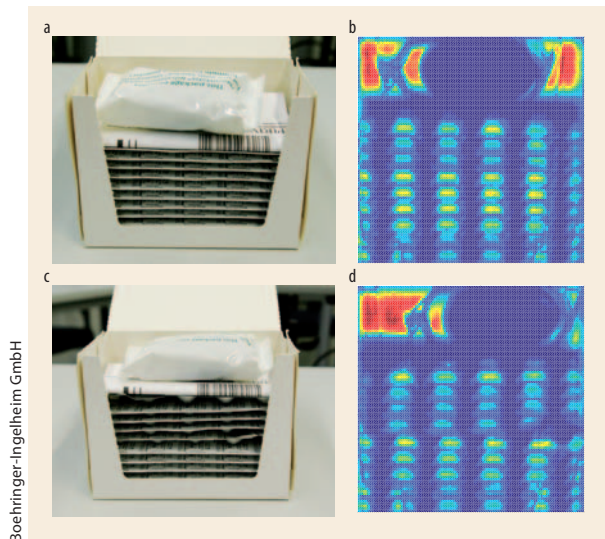
Zahlreiche andere Untersuchungen zeigen die vielen Anwendungsmöglichkeiten der THz-Wellen:

- Bei faserverstärkten Kunststoffen, so z. B. die Außenhülle eines Radardoms, ließen sich die Ablösung der unterschiedlichen Schichten und mögliche Wassereinlagerungen nachweisen.
- Funktionelle oder Schutzbeschichtungen, wie sie in vielen Produkten von Tabletten bis zu Flugzeugoberflächen eingesetzt werden, lassen sich in Bezug auf Fehlstellen und Dicke kontrollieren. Bei der Tablettenfertigung liefert die Spektroskopie zusätzlich Informationen zur Inhaltsstoffverteilung.
- Dickenmessungen mit THz-Strahlung bieten sich für optisch nicht transparente Materialien ebenso an wie für gebogene Werkstücke, die für mechanische Messfühler unzugänglich oder zu empfindlich sind. An beschichtetem Papier hat sich gezeigt, dass selbst kleine Abmessungen mit THz-Strahlung messbar sind.

■ Im modernen Gerätebau ersetzen Kunststoffteile zunehmend die Metallteile. Dafür sind entsprechend neue Messgeräte nötig. Dass THz-Strahlen dieser Aufgabe gewachsen sind, demonstriert die Aufnahme eines bearbeiteten Kunststoff-Werkstücks, das zur Bestimmung der Auflösung verwendet wurde (Abb. 3). Alle Darstellungen sind dabei ohne zusätzliche Bildbearbeitung direkt aus den Messdaten entstanden.

■ THz-Messungen lassen sich bei geschlossener Verpackung und zerstörungsfrei durchführen und somit für die Endkontrolle einsetzen, z. B. bei einer Kartonaage mit metallischen Blistern für Tabletten (Abb. 4).

Aufgrund ihres Potenzials, Verdecktes ans Tageslicht zu fördern, ist die THz-Messtechnik für den Sicherheitsbereich sehr interessant. Es lassen sich sowohl metallische als auch keramische Gegenstände und Sprengstoffe unter Kleidung oder in nichtmetallischen Behältern nachweisen. Für die Personenkontrolle werden dabei zwei unterschiedliche Ansätze parallel verfolgt: passive und aktive THz-Technologie. Diese unterscheiden sich darin, ob die natürliche THz-Strahlung oder eine künstliche THz-Quelle zum Einsatz kommt. Beim passiven Verfahren wird die vom Körper ausgesendete oder reflektierte Plancksche Strahlung mithilfe sehr empfindlicher Detektoren, meist auf Basis von Mikrobolometern, nachgewiesen. In diesem Fall sind keine spektroskopischen Aussagen möglich, d. h. man erhält keine Informationen über das Material der versteckten Objekte. Dem Vorteil, auf künstliche Beleuchtung und den damit verbundenen Strahlenschutz verzichten zu können, steht der Nachteil der sehr geringen Signalstärke gegenüber. Bei den aktiven Verfahren wird die zu untersuchende Person mit künstlich erzeugten THz-Wellen beleuchtet, und das reflektierte THz-Licht wird aufgefangen. Hier sind die detektierten Signale deutlich größer, aber direkte Reflexionen stören das resultierende Bild so stark, dass zur genauen Bildbewertung eine extrem hohe Dynamik notwendig ist, da sehr starke Signale neben sehr schwachen Signalen abzubilden sind (ähnlich einem



Boehringer-Ingelheim GmbH

Abb. 4 Eine Medikamentenverpackung (a) aus Blister, Beipackzettel und eingeschweißtem Inhalator: Im THz-Amplitudenbild erscheinen die Tabletten und Blister dunkelblau. Die leeren Stellen dazwischen lassen sich anhand der erhöhten Transmission (wachsend hellblau über gelb bis rot) erkennen. In einer gezielt gestörten Verpackung (c) werden der Knick in einem Blister und eine Verschiebung des Inhalators sichtbar (d): An den Knickstellen des Blisters ändert sich die Periodizität der Lagen. Dadurch tritt die Transmission nicht an den erwarteten Stellen auf.

herkömmlichen Foto mit einem Blitzlichtreflex an einer Glasscheibe). Aus der wellenlängenabhängigen Änderung der Amplitude der zur Beleuchtung eingesetzten THz-Strahlung kann man prinzipiell spektroskopische Informationen erhalten, um z. B. versteckte Sprengstoffe oder Drogen zu erkennen.

Von Ideen zu Lösungen

Die rasanten Fortschritte bei den elektronischen und photonischen THz-Systemen lassen erwarten, dass diese nicht nur für die Forschung, sondern in wirtschaftlicher Hinsicht auch für industrielle Anwender interessant werden. Hier geht die Entwicklung in Richtung kompakter, zuverlässiger und modularer Systeme, mit denen sich in Echtzeit spektroskopische und abbildende Messverfahren realisieren lassen. Elektronische Quellen und Quantenkaskadenlaser werden in zunehmendem Maße industrielle Anwendungen finden.

Moderne THz-Quellen und -Detektoren besitzen nicht nur für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung oder Sicherheitstechnik ein großes Potenzial. Derzeit werden auch die Einsatzmöglichkeiten in anderen Gebieten ausgelotet, z. B. in der drahtlosen Kommunikation, bei der eine höhere Trägerfrequenz eine höhere Informationsübertragungsrate erlaubt. Bis jetzt ist diese Technik nur dann einsetzbar, wenn zwischen Sender und Empfänger freie Sicht besteht. Bislang waren Übertragungen bei 300 GHz über mehrere Meter und bei 94 GHz über einen Kilometer möglich.

Bei der Krebsdiagnose können THz-Untersuchungen zwischen gesundem und bösartigem Zellgewebe unterscheiden. Hier ist bis jetzt noch nicht eindeu-

tig geklärt, ob der unterschiedliche Wassergehalt der beiden Zellarten oder andere tumorspezifische Eigenschaften diesen beobachteten Unterschied im THz-Bild verursachen. THz-Strahlen könnten auch der Schlüssel zu Verfahren sein, die in der Lage sind, Biomoleküle und ihre Veränderungen zuverlässig und einfach zu identifizieren, ohne dass eine aufwändige und komplizierte Markierung nötig ist.

Aus all den Ansätzen werden jedoch nur dann Produkte, wenn sich die guten Ideen zu Lösungen konkreter Aufgabenstellungen weiterentwickeln lassen. Für einen Grundlagenforscher sind die dafür zu beachtenden Rahmenbedingungen, wie z. B. die apparativen Kosten, gewünschte Messgeschwindigkeit, Präzision, die Bedienbarkeit der Apparatur oder konkurrierende Verfahren, unmöglich im Voraus abzuschätzen. Auch müssen nicht alle Anwendungen auf der Hand liegen. Die Industrie ist dagegen zunächst mit den Möglichkeiten der neuen Technik nicht vertraut. Daher ist es nicht zu unterschätzen, wie wichtig der Informationsfluss zwischen Forschung und Industrie für den kommerziellen Erfolg einer neuen Technik ist.

Weiterführende Literatur

- D. Mittleman (Hrsg.), *Sensing With Terahertz Radiation*, Springer, Heidelberg (2003)
- K. Sakai (Hrsg.), *Terahertz Optoelectronics*, Springer, Heidelberg (2005)
- R. E. Miles, X.-C. Zhang, H. Eisele und A. Krotkus (Hrsg.), *Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects*, Springer, Heidelberg (2007)
- R. Beigang und E. Wagner (Hrsg.), *Terahertz-Messtechnik für industrielle Anwendungen*, *Technisches Messen* 75, 1 (2008)
- IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. 14, 2 (2008)

DIE AUTOREN

Joachim Jonuscheit (FV Quantenoptik und Photonik) arbeitete nach der Promotion bei verschiedenen Laserherstellern in Entwicklung und Produktion. Seit 2006 ist er stellvertretender Leiter der Abteilung „THz-Messtechnik und Systeme“ am Fraunhofer-Institut für physikalische Messtechnik. Sein Arbeitsgebiet ist der industrielle Einsatz der THz-Technik.



Michael Herrmann (FV Quantenoptik und Photonik) beschäftigt sich seit 1998 mit THz-Strahlung, zunächst am Kansai Advanced Research Center in Kobe sowie an der Universität Osaka. Seit 2005 arbeitet er als Projektleiter am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik in Kaiserslautern, vor allem zu Sicherheitstechnik und Bildgebung.



René Beigang (FV Quantenoptik und Photonik) hat nach seiner Habilitation an der FU Berlin als Heisenberg-Stipendiat drei Jahre am IBM T. J. Watson Research Center in Yorktown Heights (USA) geforscht. Zurzeit ist er Professor für Experimentalphysik an der TU Kaiserslautern und Leiter der AG „Ultraschnelle Photonik und THz-Physik“. Gleichzeitig leitet er die Abteilung „THz-Messtechnik und Systeme“ am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik.

