

Durchblick mit Terahertz

Welche Anwendungspotenziale hat die Terahertz-Technologie?

Andreas Hoffknecht und Dirk Holtmannspötter

Die letzte größere Lücke im elektromagnetischen Spektrum, die noch nicht intensiv technisch genutzt wird, liegt bei Frequenzen im Terahertz-Bereich. Dabei reichen die potenziellen Anwendungen von der Sicherheitstechnik über die industrielle Inspektion bis hin zur Kommunikationstechnik und medizinischen Bildgebung. Allerdings befindet sich diese Lücke aus technologischer Sicht zwischen der Elektronik und der Optik, sodass sich THz-Strahlung bislang nur mit relativ hohem Aufwand erzeugen ließ. Neue Ansätze sollen nun Abhilfe schaffen und die Anwendungspotenziale erschließen.



Terahertz-Strahlung durchdringt Kleidung und Papier und macht eine versteckte Pistolenattrappe sichtbar – die Sicherheitstechnik ist nur eine der denkbaren Anwendungen.

Terahertz-Strahlung ist elektromagnetische Strahlung einer Frequenz zwischen etwa 0,2 und 10 THz (Abb. 1). Die zugehörigen Wellenlängen liegen zwischen 1 mm und 30 μm . Zu niedrigen Frequenzen hin, unterhalb von 100 GHz, schließt sich der Mikrowellenbereich an, der technisch durch die Hochfrequenzelektronik gut erschlossen ist und die Grundlage bildet für Rundfunk- und Kommunikationstechnik. Laser erzeugen hingegen Strahlung mit Frequenzen oberhalb von ca. 30 THz mit den typischen Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung (CO₂-Laser) und der optischen Kommunikationstechnik.

Im Hinblick auf technische Anwendungen ist die THz-Strahlung vor allem aufgrund folgender Eigenschaften interessant:

- Viele Materialien, beispielsweise Textilien, Papier, Karton und zahlreiche Kunststoffe, sind zwar für sichtbares Licht undurchlässig, nicht aber für THz-Strahlung. Diese eignet sich daher zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung; Metalle durchdringt sie allerdings nicht (Abb. 2).

- THz-Strahlung ist mit typischen Photon-Energien von einigen meV nicht ionisierend und gilt daher als unschädlich für den menschlichen Organismus. Dies ist wichtig im Hinblick auf medizinische Anwendungen oder den Einsatz bei Personenkontrollen. Derzeit wird untersucht, ob Proteine möglicherweise empfindlich auf THz-Strahlung reagieren.

- Die Anregungsenergien für Schwingungen und Rotationen von Molekülen, und damit der spezifische spektroskopische „Fingerabdruck“, liegen häufig im meV- und somit THz-Bereich.

- Objekte mit Raumtemperatur emittieren thermische Strahlung auch im THz-Bereich, sodass sie sich mit passiven Bildgebungsverfahren abbilden lassen.

- Wasser und damit auch feuchte Luft absorbieren THz-Strahlung stark. Dies schränkt zwar Anwendungen in normaler Umgebungsluft generell ein, eröffnet aber auch die Möglichkeit für präzise Feuchtigkeitsmessungen. In Luft liegt die typische maximale Reichweite bei einigen 100 Metern, in feuchtem

Gewebe dagegen deutlich unter einem Millimeter.

In der Grundlagenforschung wird THz-Strahlung bereits seit langem untersucht und genutzt. Beispiele dafür sind Plasmadiagnostik, Atmosphärenmesstechnik und Radioastronomie. Seit Anfang 2000 die ersten kommerziellen THz-Spektrometer auf den Markt gekommen sind, hat auch ihre technische Anwendung begonnen. Mittlerweile bieten mehrere Unternehmen THz-Spektrometer an, und zwar „Time Domain Spektrometer“ (THz-TDS, s. u.). Die Entwicklung dieser Technologie der gepulsten THz-Strahlung hat von den Fortschritten bei Kurzpuls-lasern profitiert. Der notwendige Einsatz von Femtosekundenlasern in den Spektrometern macht diese Geräte jedoch recht teuer (Preise im sechsstelligen Euro-Bereich), sodass sie nicht sehr verbreitet sind. Im Gegensatz dazu könnten z. B. Systeme, die auf Dauerstrichquellen beruhen, im Verhältnis wesentlich günstiger sein; allerdings haben diese noch keine kommerzielle Reife erreicht.

Dr. Andreas Hoffknecht, Dr. Dirk Holtmannspötter, Zukünftige Technologien Consulting der VDI-Technologiezentrum GmbH, Graf-Recke-Str. 84, 40239 Düsseldorf

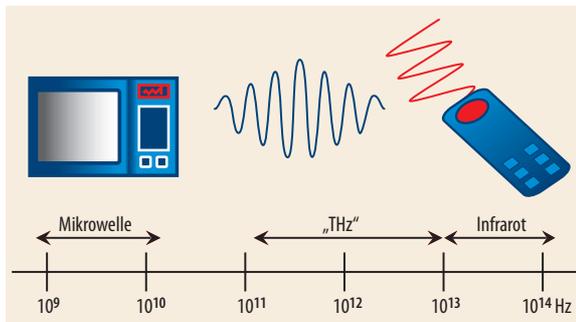


Abb. 1 Der Terahertz-Frequenzbereich liegt zwischen den Mikrowellen und dem Infraroten und ist bisher technologisch kaum erschlossen.

Neben den beiden Aspekten der technischen Reife und der Kosten gibt schließlich die (potenzielle) technische Leistungsfähigkeit des jeweiligen Systems den Ausschlag für einen möglichen Einsatz. Hier stellt sich die Frage, ob ein THz-basiertes System für eine bestimmte Anwendung ein technisches Alleinstellungsmerkmal gegenüber Alternativtechnologien schon jetzt aufweist oder in Zukunft möglicherweise erreichen kann. In dem Spannungsfeld dieser drei Kriterien – jeweils nach dem heutigen Stand und der erwarteten Entwicklungsgeschwindigkeit – entscheidet sich das Anwendungspotenzial der verschiedenen denkbaren THz-Systeme.

Quellen und Detektoren

Die folgende kurze Vorstellung verschiedener Technologien für Quellen und Detektoren sowie grundsätzlicher Systemarchitekturen zeigt die Bandbreite möglicher THz-Systeme. Eine erste Analyse betrachtet anschließend die Sicherheitstechnik und die industrielle Inspektion genauer.

Die technologischen Fortschritte in der Hochfrequenz-Elektronik und der Optik versprechen mittelfristig sinkende Kosten für THz-Quellen und Detektoren. Neben niedrigeren Kosten zielt die gegenwärtige Entwicklung auf einfache

Handhabung (z. B. keine oder eine einfach zu realisierende Kühlung) und kompakte Bauweise ab. Wie bei anderen neuen Technologien ist der Übergang von Labor-Demonstratoren zu einer reproduzierbaren Serienfertigung auch bei der THz-Technologie eine besondere Herausforderung.

THz-Strahlung lässt sich mit den unterschiedlichsten Methoden erzeugen. Allerdings gilt dabei fast immer, dass die Ausgangsleistung der Quellen mit wachsender Frequenz exponentiell sinkt (Abb. 3) – daher wurde in der Vergangenheit von der „THz-Lücke“ gesprochen.

Die Fülle von Terahertz-Strahlquellen lässt sich in gepulste Quellen und Dauerstrichquellen einteilen. Darüber hinaus wird zwischen Quellen unterschieden, die die THz-Strahlung direkt erzeugen und solchen, die auf optoelektronischem Mischen beruhen.

Beispielhaft seien einige THz-Quellen kurz vorgestellt (vgl. [1]):

- Höchstfrequenzdioden (Schottky-Dioden, Gunn-Dioden) sowie transistorbasierte Oszillatoren und Verstärker sind bei hoher Leistung (Wattbereich) bis zu etwa 100 GHz verfügbar. Durch Vervielfacherketten lassen sich Frequenzen von bis zu 1,5 THz erreichen, wobei die Ausgangsleistung mit wachsender Frequenz stark abfällt.

- Halbleiterlaser (p-Germanium-Laser, THz-Quantenkaskaden-Laser usw.) stehen bei höheren Frequenzen bis etwa 5 THz zur Verfügung, benötigen aber tiefe Temperaturen und sind nur eingeschränkt zum Dauerstrichbetrieb fähig. Quantenkaskadenlaser weisen sehr hohe Ausgangsleistungen auf und gelten daher als aussichtsreiche Kandidaten für kommerzielle THz-Quellen.

- Gaslaser nutzen die Rotationsübergänge von Molekülen als Laserübergänge. Als Pumpquelle dienen üblicherweise CO₂-Laser. Sie arbeiten bei Raumtemperatur und stellen eine Vielzahl diskreter Frequenzen über einen großen Bereich des THz-Spektrums zur Verfügung.

- Großes Potenzial wird auch der THz-Vakuumelektronik eingeräumt, die bei Raumtemperatur arbeitet. Hier ist z. B. der wellenlängenabstimmbare und recht kompakte Rückwärtswellen-Oszillator (BWO: Backward-Wave Oscillator) zu nennen.

THz-Strahlung lässt sich direkt sowie mittels der Zeitfenster-Detektion („time-gated detection“) und der heterodynen Detektion nachweisen. Beim direkten Nachweis werden eintreffende Photonen unmittelbar absorbiert, ohne zusätzliche, qualitätsverbessernde Techniken vor dem Nachweis. Die Detektion mit einem Zeitfenster nutzt die Laufzeit des Photons, um zusätzliche Informationen zu extrahieren. Dazu wird entweder eine Verzögerung eingeführt oder die Messung bei unterschiedlichen Entfernungen bzw. unter verschiedenen Winkeln durchgeführt. Bei der heterodynen Detektion wird das Signal mit demjenigen einer lokalen Quelle, die eine ähnliche Frequenz hat, gemischt. Die dadurch entstehende Interferenz führt zu einer Signalverstärkung.

Ein Maß für die Empfindlichkeit von THz-Detektoren ist die rauschäquivalente Leistung (Noise Equivalent Power, NEP), d. h. die erforderliche optische Leistung, um ein Signal-zu-Rausch-Verhältnis von 1 in einer Bandbreite von 1 Hz zu erhalten. Kryogene THz-Detektoren, wie das HEB (Hot Electron Bolometer) oder SIS-Mischer (Supraleiter-Isolator-Supraleiter), erreichen typische Empfindlichkeiten von 10⁻¹² bis 10⁻¹⁴ W/Hz^{1/2}, erfordern dafür aber eine aufwändige Kühlung. Einfacher zu handhaben sind Detektoren, die bei Raumtemperatur arbeiten, wie pyroelektrische Detektoren, Golay-Zellen oder Schottky-Dioden, die jedoch geringere typische Empfindlichkeiten um 10⁻¹⁰ W/Hz^{1/2} erreichen.

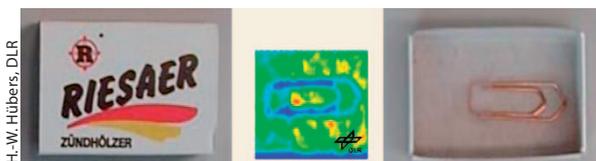


Abb. 2 Eine Transmissionsmessung bei 1,6 THz mit Gaslaser und Golay-Detektor weist eine Büroklammer in einer geschlossenen Streichholzschachtel nach.

H.-W. Hübers, DLR

Terahertz-Spektroskopie

In fast allen derzeit diskutierten, potenziellen Anwendungen werden spektroskopische und bildgebende THz-Systeme in Betracht gezogen, deren grundsätzlicher Aufbau und Eigenschaften im Folgenden kurz skizziert werden.

Ein THz-Time Domain Spektrometer ist im Prinzip ein System zur kohärenten Erzeugung und Detektion einzelner THz-Pulse mit einer Wiederholrate bis nahe 100 MHz (Abb. 4). Als Signal wird das elektrische Feld gemessen, aus dem sich durch Fourier-Transformation Amplituden und Phasen in einem weiten Spektralbereich ergeben. Die mittlerweile kommerziell angebotenen gepulsten Systeme erlauben es, breite spektrale Information durch einen einzelnen Puls von Pikosekundenlänge zu gewinnen. Indem man die Verzögerung variiert, lässt sich in Reflexion Tiefeninformation über die Probe ermitteln. Dauerstrichsysteme haben hingegen den Vorteil einer jeweils höheren spektralen THz-Leistung auf der Probe und einer entsprechend höheren Frequenzauflösung, sodass sie sich gut für die Messung

von schmalbandigen Eigenschaften in einem Spektrum eignen.

Bildgebende Verfahren

Beim einfachsten bildgebenden Verfahren mit THz-Strahlung wird die Probe Punkt für Punkt mit einem Quelle-Detektor-Paar abgefahren und an jedem Messpunkt Amplitude und Phase aufgezeichnet. Auf diesem Wege lassen sich Bilder makroskopischer Objekte erhalten.

Zwei elaboriertere Verfahren sind die Bildgebung mit einem „Focal Plane Array“ (FPA) und die interferometrische Bildgebung. Der FPA-Ansatz ist vergleichbar mit einer normalen optischen CCD-Kamera, bei der jeder einzelne Detektor einem Bildpunkt (Pixel) entspricht. Aufgrund der Kosten von THz-Detektoren und ihrer begrenzten Packungsdichte werden derzeit noch keine dichten Gitter aus THz-Detektoren aufgebaut. Stattdessen verwendet man z. B. eine Linienkamera, die wie bei einem Flachbett-Scanner die aufzunehmende Fläche abfährt. Die interferometrische Bildgebung

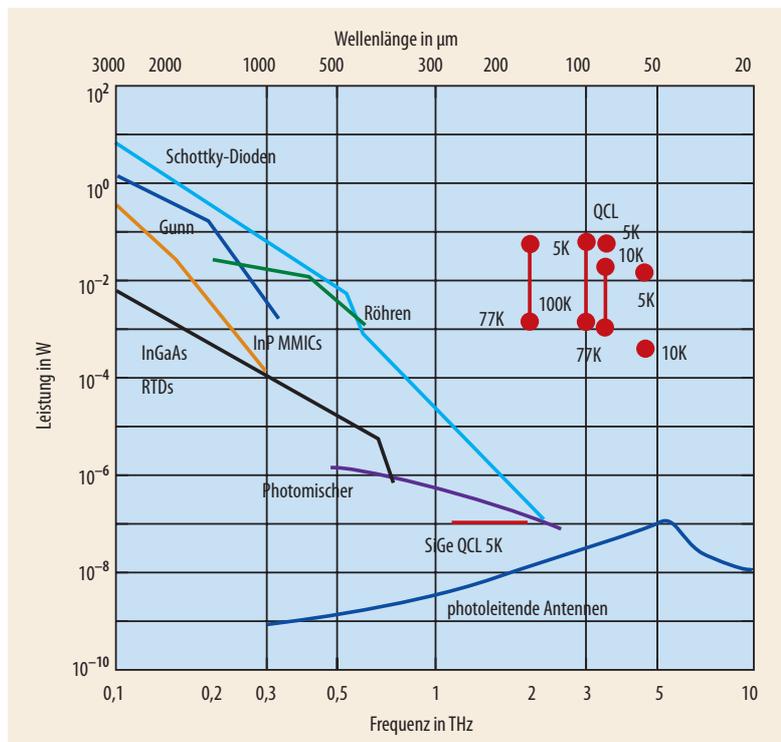


Abb. 3 Typische Ausgangsleistungen und abgedeckter Frequenzbereich für einige im Text erwähnte THz-Quellen (QCL: quantum cascade laser, RTD: resonant tunneling diode, MMIC: monolithic microwave IC) [6].

benutzt im Unterschied dazu die Intensitäts- und Phaseninformation zwischen Paaren von Detektoren. Bei einer Anzahl von N Detektoren gibt es $N \cdot (N-1)/2$ Paare und dementsprechend so viele Pixel im rekonstruierten Bild.

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen beiden Ansätzen besteht darin, dass die interferometrische Methode das gesamte Bild auf einmal aufnimmt, während der FPA das Objekt abscannen muss und daher langsamer ist. Andererseits benötigt die interferometrische Methode die Korrelationen zwischen den Detektorpaaren, was eine aufwändigere Bildprozessierung erfordert.

Sicherheitstechnik

Die folgenden beiden Abschnitte fassen die Ergebnisse einer ersten Analyse der Anwendungspotenziale von THz-Systemen am Beispiel der Sicherheitstechnik und der industriellen Inspektion zusammen. Daneben sind weitere Anwendungen, z. B. in Kommunikationstechnik, medizinischer Bildgebung, Biosensorik und Nahfeldüberwachung in der Diskussion (siehe hierzu [2]).

Die eingangs beschriebenen Eigenschaften prädestinieren die THz-Technologie für zahlreiche sicherheitstechnische Anwendungen u. a. in der Personen-, Gepäck- und Frachtgutkontrolle. Nach einer OECD-Studie von 2004 hat der gesamte Markt sicherheitstechnischer Produkte und Dienstleistungen weltweit ein Volumen von ca. 100 bis 120 Milliarden Dollar [3]. Das amerikanische Marktforschungsunternehmen Civitas hat in einer im Juni 2004 veröffentlichten Studie den globalen „Homeland Security“-Markt für 2005 mit 42,2

Milliarden Dollar beziffert [4].

In der industriellen Inspektion hatte nach einer Studie von Frost & Sullivan allein der Markt für zerstörungsfreie Prüfsysteme 2003 ein Volumen von ca. 770 Millionen Dollar weltweit [5].

Aus technischer Sicht unterscheidet man einerseits zwischen aktiven und passiven Systemen und andererseits zwischen solchen, die in Transmission bzw. Reflexion arbeiten. Personen und Objekte senden bei Raumtemperatur thermische THz-Strahlung aus. Unter freiem Himmel kommt die Reflexion von THz-Strahlung aus dem Hintergrund hinzu. Da nicht-polare und nicht-metallische Materialien (Kleidung, Plastik, Glas, Papier) bei Frequenzen bis zu etwa 1 THz eine sehr niedrige Absorption aufweisen, ist es möglich, versteckte Objekte durch solche Materialien hindurch passiv abzubilden. Bei diesen passiven Verfahren wird also nur die natürlich emittierte THz-Strahlung detektiert. Bei aktiven Systemen kommt dagegen eine künstliche THz-Quelle zur „THz-Beleuchtung“ zum Einsatz.

Je geringer die Entfernung zwischen dem untersuchten Objekt und Quelle bzw. Detektor ist, desto weniger fallen Absorption und Streuung in der Atmosphäre ins Gewicht. Dies ist beispielsweise bei der Überprüfung von Gepäck und Postsendungen der Fall, für die sowohl Aufbauten in Transmission (Quelle und Detektor gegenüberliegend, Objekt dazwischen wird durchleuchtet) als auch in Reflexion (Quelle und Detektor auf der gleichen Seite des Objektes) möglich sind.

Bei Anwendungen, in denen sich das zu untersuchende Objekt in einiger Entfernung (> 10 m) befindet – wie etwa beim Nach-

weis biologischer und chemischer Agentien in der Luft, aber auch bei der Überprüfung von Personen, die sich auf einen Kontrollpunkt zu bewegen –, spielen dagegen Absorption und Streuung in der Atmosphäre eine große Rolle und begrenzen die maximal erreichbare Entfernung. Außerdem sind Aufbauten nur in Reflexion möglich. Bei solchen Anwendungen sind breitbandige Pulse problematisch, da diese aufgrund ihrer spektralen Breite nicht vollständig in einem der Transmissionsfenster liegen, sodass es zu verstärkter Absorption und einer Verlängerung des Pulses kommt.

Bei allen möglichen Anwendungen steht die THz-Technologie in Konkurrenz zu anderen Technologien. Gegenwärtig werden für die Personenkontrolle Metalldetektoren mit Bedienpersonal eingesetzt. Als Alternativen konkurrieren neben der THz-Technologie die Röntgenrückstreutechnik und die Spurenanalytik. Die Hauptfaktoren für den Markterfolg sind hohe Sicherheit für die kontrollierten Personen und das Bedienpersonal, eine gute und bequeme Handhabung sowie die Wahrung der Privatsphäre der kontrollierten Personen.

Für Gepäckkontrollen gelten heute Röntgengeräte als der Stand der Technik. Neue Ansätze, mit denen etwaige THz-Systeme in Konkurrenz treten würden, sind dreidimensionale Röntgenverfahren, Spurensensorik und Gamma-Kameras. Da Metalle THz-Strahlung vollständig absorbieren, erscheint nur eine Kombination mit einem Röntgengerät sinnvoll. In jedem Fall müssen für die Gepäckkontrolle ein ausreichender Durchsatz, eine geringe Fehlalarmquote sowie der sichere Nachweis von Sprengstoffen, Kampfstoffen sowie Nuklearmaterial gewährleistet sein.

Für die Kontrolle von Frachtgut an Flughäfen, Seehäfen und Güterbahnhöfen kommen heute neben Röntgengeräten auch Gamma-Detektoren zum Einsatz. Wie bei der Gepäckkontrolle sind dreidimensionale Röntgenverfahren ein neuer Ansatz. Vor dem Hinter-

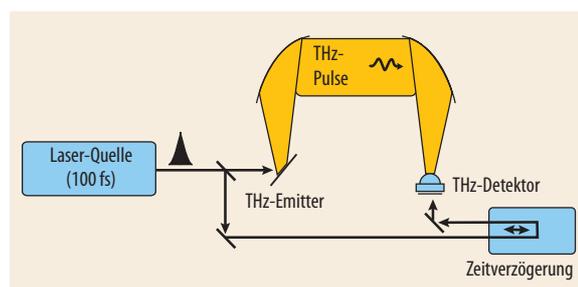


Abb. 4 Prinzip eines THz-Time Domain Spectrometers.

grund der großen Bedeutung von metallischen Containern erscheint es fragwürdig, ob THz-basierte Systeme auf diesem Gebiet Vorteile bieten können.

Die THz-Technologie konkurriert auch mit Scannern auf Basis von Millimeter-Wellen. Diese werden seit mehr als zehn Jahren für Sicherheitsanwendungen entwickelt. Bei der Wahl zwischen Millimeter-Wellen und THz-Strahlung muss eine Balance gefunden werden zwischen der Reichweite, die mit der Wellenlänge wächst und der Auflösung, die mit der Wellenlänge sinkt.

Die vorgestellten möglichen Anwendungen für THz-Strahlung in der Sicherheitstechnik befinden sich im Entwicklungs- bzw. Erprobungsstadium und müssen sowohl ihre prinzipielle Umsetzbarkeit als auch eine etwaige Überlegenheit gegenüber alternativen Verfahren erst noch nachweisen. Kritische Aspekte sind beispielsweise:

- Aufnahmezeiten in Video-geschwindigkeit,
- Abschirmung durch Schweiß, Regen, feuchte Kleidung,
- Maskierung gesuchter Substanzen durch Mischung mit unverdächtigen Substanzen zur Abschwächung der spektroskopischen Signatur,
- fehlende oder schwache spektroskopische Signatur bei einzelnen Substanzen, die insbesondere in improvisierten Sprengsätzen verwendet werden – wie etwa Ammoniumnitrat,
- lückenhafte Referenzdaten in Reflexion,
- Einfluss der Rückstreuung von Kleidung bei Messungen in Reflexion,
- Nachweisgrenzen für Substanzen sind noch unbekannt.

Eine zielgerichtete Entwicklung muss außerdem über die reine Technologie hinausgehen und das gesamte Sicherheitsumfeld und den Bedarf der Endnutzer im Blick haben. Beim Vergleich der Konkurrenztechnologien kommt es wesentlich auf folgende Kriterien an: Empfindlichkeit, Geschwindigkeit, Auflösung, Kosten, Akzeptanz. Eine umfassendere Analyse der

Anwendungspotenziale von THz-Systemen in der Sicherheitstechnologie für die Luftfahrt ist kürzlich erschienen [7].

Industrielle Inspektion

Die Literatur führt eine Vielzahl von Anwendungen der THz-Strahlung in der industriellen Inspektion auf. Dies umfasst sowohl die Qualitätsprüfung fertiger Produkte als auch die Überwachung von Prozessen. Gemessen werden Kontraste durch Streuung oder Absorption von THz-Strahlung. Möglich sind Analysen von Grenzschichten, Dichteänderungen, Konzentrationsänderungen, Fremdkörpern, Hohlräumen oder auch von Gasen. Die Anwendungen lassen sich dabei in spektroskopische und bildgebende Verfahren unterteilen.

Mithilfe der THz-TDS lassen sich die komplexe Dielektrizitätskonstante und der komplexe Brechungsindex bestimmen. Breitbandige THz-Spektroskopie eignet sich z. B., um die Zusammensetzung eines Gases mit nur einem Gerät vollständig zu ermitteln. Diskutiert werden die Überwachung von Verbrennungsprozessen, die Plasma-diagnostik sowie der Nachweis flüchtiger Komponenten beim Ausdampfen, Trocknen, Aushärten.

Die Fähigkeit zur Durchdringung von Papier und Kunststoffen könnte auch in der Spektroskopie neue Möglichkeiten eröffnen, beispielsweise zur Kontrolle der chemischen Zusammensetzung von bereits verpackten Medikamenten in der Pharmazie.

Anwendungen in der Lebensmitteltechnik werden teilweise kontrovers diskutiert. So ließe sich der Wassergehalt von Lebensmitteln durch die Verpackung hindurch messen, um zu prüfen, wie frisch diese sind. Für andere Anwendungen – beispielsweise die Detektion von Fremdkörpern in Lebensmitteln – ist deren Wassergehalt allerdings ein Hemmnis, denn selbst bei nur wenigen Prozent Wassergehalt ist eine Produktkontrolle in der Regel nicht mehr möglich. Lebensmittel, die in Metallfolien

oder metallisierten Kunststofffolien verpackt sind, lassen sich ebenfalls nicht analysieren.

Besondere Stärken der THz-basierten Bildgebung werden im Zusammenhang mit Pulvern gesehen, deren Korngrößen oft in der gleichen Größenordnung liegen wie die Wellenlänge der THz-Strahlung. Dies betrifft die Eigenschaften der Pulver selbst sowie Prozesse in Pulvern – wie die Ausbreitung und Verteilung von Feuchtigkeit.

THz-Strahlung ermöglicht es, optisch undurchsichtige Kunststoffe im Volumen zu untersuchen, während alternative Verfahren keinen ausreichenden Kontrast geben (Abb. 5). Anwendungen könnten der Nachweis von Hohlräumen in Kunststoffverkleidungen, die Prüfung der Größenverteilung von Poren in Kunststoffschäumen, die Untersuchung von Kunststoffkompositen zum Nachweis von Defekten sowie die Überprüfung der Gleichverteilung von Additiven in Kunststoffkompositen sein.

Ergänzend zu den bereits für Anwendungen in der Sicherheitstechnik beschriebenen kritischen Aspekten besteht weiterer Forschungsbedarf auf folgenden Gebieten:

- Kombination mit anderen Verfahren (THz als „zusätzlicher Blick ins Innere“).
- Systemintegration (Industrielle Anforderungen wie Zuverlässigkeit, Genauigkeit und Geschwindigkeit

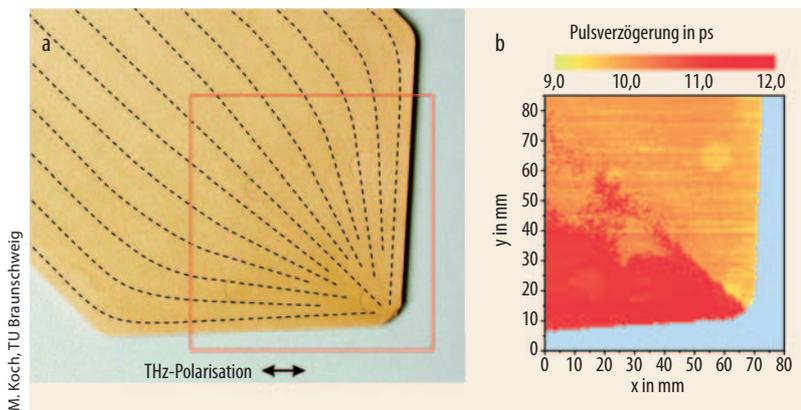


Abb. 5 Eine Probe eines glasfaserverstärkten flüssigkristallinen Polymers lässt sich zerstörungsfrei prüfen. Die schwarzen Linien im Lichtbild (a) deuten die erwartete Ausrichtung des Schmelzeflusses an. Die Messung (b) gibt die Verzögerung der THz-Pulse wieder. Das

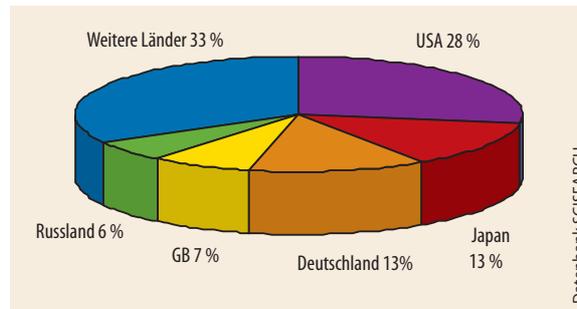


Abb. 6 Länderverteilung der Publikationen zu Terahertz-Strahlung im Zeitraum 1991 bis 2005.

der Messverfahren sind zu berücksichtigen.)

- Die Eigenschaften vieler Materialien im THz-Bereich sind noch unbekannt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Terahertz-Technologie hat das Potenzial zu vielfältigen Anwendungen. In vielen Fällen sind allerdings noch sehr grundlegende Fragen ungeklärt, sodass der Zeitraum bis zu marktreifen Produkten offen ist. Generell gilt die Forderung nach kompakten, leistungsstarken und vor allem preisgünstigen Quellen sowie kompakten und preisgünstigen Detektoren. Chancen bestehen in der Sicherheitstechnik. Da diese im Vergleich zu anderen Anwendungen weniger kostensensitiv ist, könnte sie zu einem „Türöffner“ für die THz-Technologie werden.

Erste Anwendungen in der Produktkontrolle (Raumfahrt) gibt es bereits. Die Qualitätskontrolle in

der Pharmaindustrie wird als aussichtsreich angesehen. Der breitere Einsatz wird dann kommen, wenn die THz-Technologie für bestimmte Einsatzfelder in der industriellen Produktion Alleinstellungsmerkmale nachweisen kann.

Die Anwendungsperspektiven in der Kommunikationstechnik, medizinischen Bildgebung, der Biosensorik und in der Nahfeldüberwachung werden derzeit kontrovers diskutiert. Sollten sich THz-Quellen und -Detektoren billig in Massenproduktion herstellen lassen, wären neben den hier skizzierten Einsatzgebieten zahlreiche andere möglich (z. B. in der Gasmestechnik).

Weltweit wird an der Entwicklung technischer Anwendungen der THz-Technologie intensiv gearbeitet. Wie u. a. die Ergebnisse einer Literaturanalyse belegen (Abb. 6), ist Deutschland auf der Forschungsseite gut positioniert. Ob Deutschland bei der industriellen Umsetzung führend sein wird, ist für viele Anwendungsbereiche noch offen.

- [1] T. Löffler und H. G. Roskos in [2]
- [2] A. Hoffknecht, D. Holtmannspötter und A. Zweck, Die Terahertz-Technologie und ihre möglichen Anwendungen, Zukünftige Technologien Bd. 64, ISSN 1436-5928 (2006)
- [3] The Security Economy, ISBN 92-64-10772-X, OECD (2004)
- [4] The Homeland Security Market, Civitas Group LLC (2004)
- [5] World Nondestructive Test Equipment Markets, Frost & Sullivan (2004)
- [6] D. J. Paul, Picturing people: Non-Intrusive Imaging (2003), www.foresight.gov.uk
- [7] Assessment of Millimeter-Wave and Terahertz Technology for Detection and Identification of Concealed Explosives and Weapons, Committee on Assessment of Security Technologies for Transportation, National Research Council, ISBN 0-309-66927-8 (2007); www.nap.edu/catalog/11826.html