Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 98 (2007)
Heft: 3

Artikel: Die Welt in einem neuen Licht
Autor: Schneider, Arno
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-857410

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Welt in einem neuen Licht

Einblicke mit kurzen Terahertzpulsen

Elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich um ein Terahertz fand bis vor einigen Jahren wenig Beachtung. Durch Fortschritte in der Laser- und Materialforschung wurden in den letzten Jahren ultrakurze Terahertzpulse machbar, die vielseitige Messungen ermöglichen. Ein Beispiel sind abbildende Verfahren, die sowohl Information über die Dicke als auch über die Zusammensetzung einer Probe liefern.

Seit jeher benützt der Mensch Licht, um Informationen über seine Umgebung zu sammeln. Mit den Augen können wir Gegenstände aus der Distanz schnell und berührungsfrei untersuchen. Wo uns die Physiologie Grenzen setzt – sichtbares Licht umfasst nur einen kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums –, haben wir technische Hilfsmittel wie Röntgen-

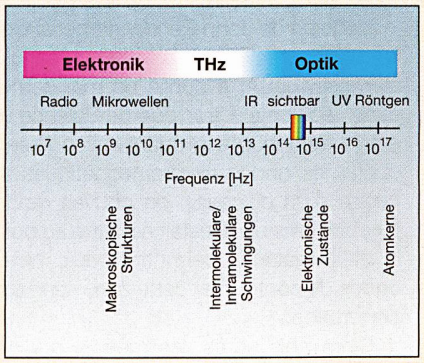
Arno Schneider

apparate oder Infrarotkameras entwickelt, die unseren Gesichtssinn ergänzen.

In den letzten Jahren ist das Interesse an einem weiteren Spektralbereich erwacht, der lange Zeit recht stiefmütterlich behandelt worden war, obwohl er vielfältige Möglichkeiten bietet. Er liegt zwischen Mikrowellen auf der einen und dem fernen Infraroten auf der anderen Seite, mit Frequenzen zwischen 10^{11} und 10^{13} Hertz, weshalb man meistens vom Terahertzbereich spricht (1 THz = 10^{12} Hz = 1000 GHz, siehe Kasten). Ähnlich wie die Röntgenstrahlen erlauben uns die Terahertzstrahlen neuartige Einblicke, weil die Kontraste zwischen durchsichtigen und undurchsichtigen Stoffen sich von den anderen Spektralbereichen unterscheiden (Bild 1).

Im Gegensatz zu den Röntgenstrahlen sind Terahertzstrahlen aber gesundheitlich unbedenklich, da sie nicht ionisierend sind und die verwendeten Intensitäten in der Regel sehr klein.

Ihr volles Potenzial nützt die Terahertztechnologie erst aus, wenn kurze Pulse verwendet werden, die im Extremfall nur eine einzige Schwingung des elektromagnetischen Feldes umfassen. Diese Pulse sind inhärent ultrabreitbandig. Zusammen mit einer kohärenten Messtechnik ermöglichen sie spektroskopische Messungen ohne durchstimmbare Strahlungsquellen.



Das elektromagnetische Spektrum

Die Terahertzstrahlung liegt im Übergangsbereich zwischen elektronischen und optischen Wellen. Die Abgrenzung ist nicht eindeutig; je nach Standpunkt kann sie auch als Hochfrequenzlimit der Millimeterwellen betrachtet werden (eine Wellenlänge von 1 mm entspricht einer Frequenz von 0,3 THz) oder als das langwellige Ende des fernen Infrarot (IR).

Zusätzlich angegeben sind diejenigen Strukturen, die auf die jeweilige Strahlung empfindlich sind. Im Terahertzbereich sind dies typischerweise Schwingungen in der Kristallstruktur von Festkörpern, sogenannte Phononen. Da die Phononfrequenzen materialspezifisch sind, lässt sich mit Terahertzspektroskopie ein chemischer «Fingerabdruck» einer Probe erstellen.

Auch Terahertzwellen werden gebrochen

Wie alle Arten von Licht unterliegt die Terahertzstrahlung den fundamentalen Prozessen Brechung, Absorption und Streuung. Die Lichtbrechung äussert sich in der Reflexion an Grenzflächen sowie in der Ablenkung der Strahlen durch Linsen oder Prismen; mit einer konvexen Linse können Terahertzstrahlen genauso fokussiert werden wie sichtbares Licht. Die mikroskopische Ursache für die Brechung liegt darin, dass die Lichtgeschwindigkeit im Material um einen frequenzabhängigen Faktor n – den Brechungsindex – vermindert ist.

Anstelle von Linsen werden im Terahertzbereich meistens gekrümmte Spiegel (parabol- oder ellipsoidförmig) als optische Elemente verwendet (Bild 2). Dies geschieht aus zwei Gründen. Zum einen wirken sich chromatische Effekte in Linsen stark aus, weil der Brechungsindex über die ganze Terahertzbandbreite deutlich variieren kann (Dispersion) und darum die Brennweiten der Linsen auch von der Frequenz abhängen, was saubere Abbildungen verunmöglicht. Zum andern lassen sich reflektierende Elemente mithilfe von sichtbarem Licht einfach justieren, da die Reflexionsgesetze und damit die Strahlenverläufe in beiden Spektralbereichen identisch und frequenzunabhängig sind.

Absorption

Vielfältig sind die Mechanismen, wie Materie elektromagnetische Strahlung absorbieren kann. Die meisten beruhen darauf, dass mit der Energie eines einzelnen Lichtquants (Photons) ein energiereicherer quantenmechanischer Zustand im Material angeregt wird. Da nun die Energie der Terahertzphotonen rund hundertmal kleiner ist als die von sichtbarem Licht, können keine elektronischen Zustände in Atomen angeregt werden, ebenso wenig wie Bandübergänge in Halbleitern (vgl. Kasten). Im Terahertzbereich hingegen liegen viele Schwin-

gungszustände (Phononen) in Kristallgittern oder grösseren Molekülen. Diese Schwingungsfrequenzen sind empfindlich auf die relative Anordnung der Atome zueinander und lassen deshalb Rückschlüsse auf die Struktur zu. Auf diese Weise können verschiedenste Materialien durch ihr Terahertzabsorptionsspektrum unterschieden werden, zum Beispiel Sprengstoff oder Drogen (Bild 3).

Ein weiterer Absorptionsmechanismus ist die elektrische Leitfähigkeit. Praktisch alle leitenden Materialien wie Metalle oder dotierte Halbleiter absorbieren bzw. reflektieren die ganze Bandbreite der Terahertzstrahlung.

Streuung

Lichtstreuung tritt auf, wenn ein Material inhomogen ist auf einer Längenskala, die ungefähr der Wellenlänge des Lichts entspricht; im Sichtbaren also im Bereich von Bruchteilen eines Mikrometers. Sie ist der Grund dafür, dass uns die meisten Materialien undurchsichtig erscheinen, wie zum Beispiel Kleidung, Papier, Plastik, Holz usw. Der Eindruck von Farbe entsteht dadurch, dass einzelne Wellenlängenbereiche absorbiert und deshalb nicht zurückgestreut werden.

Die erwähnten Inhomogenitäten sind nun aber deutlich kleiner als die Wellenlänge der Terahertzstrahlung, die im Bereich von Zehntelsmillimetern liegt. Deshalb findet für diese Wellen praktisch keine Streuung mehr statt, und all die erwähnten Materialien werden durchsichtig (Bild 1). Dies macht den Terahertzfrequenzbereich so interessant für alle Arten von Anwendungen, in denen nach Objekten oder Strukturen gesucht wird, die sich hinter oder innerhalb einer Verpackung befinden.

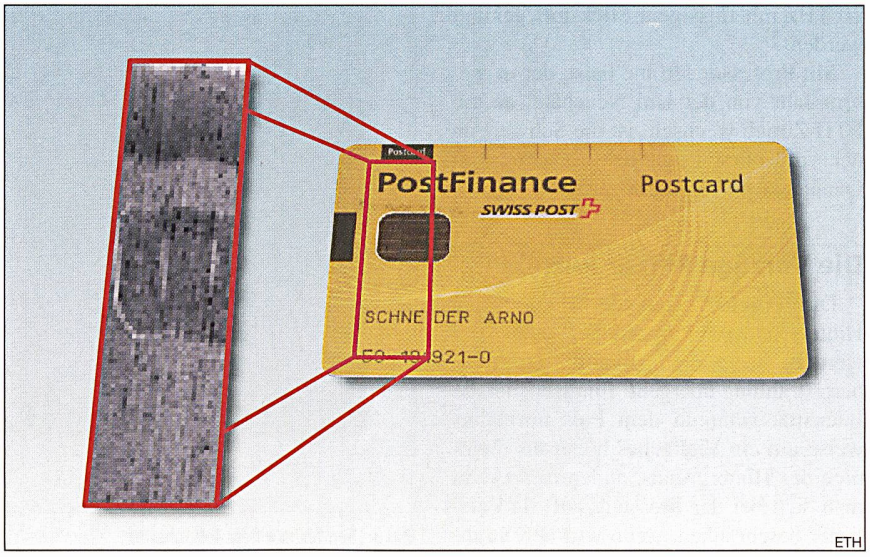


Bild 1 Postcard im Terahertzspektralbereich

Das Terahertzbild wurde von einem Ausschnitt einer Postcard aufgenommen, der auf der Fotografie rot markiert ist. Das Plastik der Karte ist transparent. Deutlich sichtbar ist die Struktur des Smart-Chips oberhalb der Mitte. Der dunkle Streifen oben stammt vom Magnetstreifen auf der Rückseite der Karte (nicht sichtbar auf dem Foto).

Kontinuierliche Strahlung

Nichts ist einfacher als die Erzeugung von kontinuierlicher Terahertzstrahlung: Nach dem Planckschen Strahlungsgesetz wird sie von jedem Körper emittiert, der eine Temperatur hat, die wenigstens ein paar Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt von –273 °C liegt. Somit ist der ganze Raum jederzeit von Terahertzwellen erfüllt.

Genau dies bereitet aber Probleme bei der Messung, da dieser thermische Hintergrund die gesuchten Signale häufig überstrahlt. Deshalb werden viele Detektoren für Terahertzstrahlen mit flüssigem Stickstoff gekühlt, was aber die Anwendbarkeit im Alltag limitiert.

Neben thermischen Quellen gibt es auch gezieltere Methoden zur Erzeugung von Terahertzstrahlung. Von der elektronischen Seite wären beispielsweise Gunn-Dioden oder Rückwärtswellenoszillatoren (Backward Wave Oscillators, BWO) zu erwähnen. Ein interessantes Konzept für kohärente Strahlung stammt von der optischen Seite: Die Quantenkaskadenlaser (QCL), bestehend aus Halbleiter-Heterostrukturen. Im Gegensatz zu üblichen Halbleiterlasern, in denen die Rekombination von Elektronen und Löchern über die Bandlücke hinweg zur Emission von Photonen führt, «fallen» die Elektronen in der Heterostruktur von einem Subband zum nächsten. Durch ein sorgfältiges Design der einzelnen Schichtdicken dieser Struktur kann die Wellenlänge des dabei emittierten Lichts über einen grossen Bereich variiert werden, von ca. 3 bis 200 µm (100–1,5 THz). Allerdings müssen auch QCL für Frequenzen unterhalb

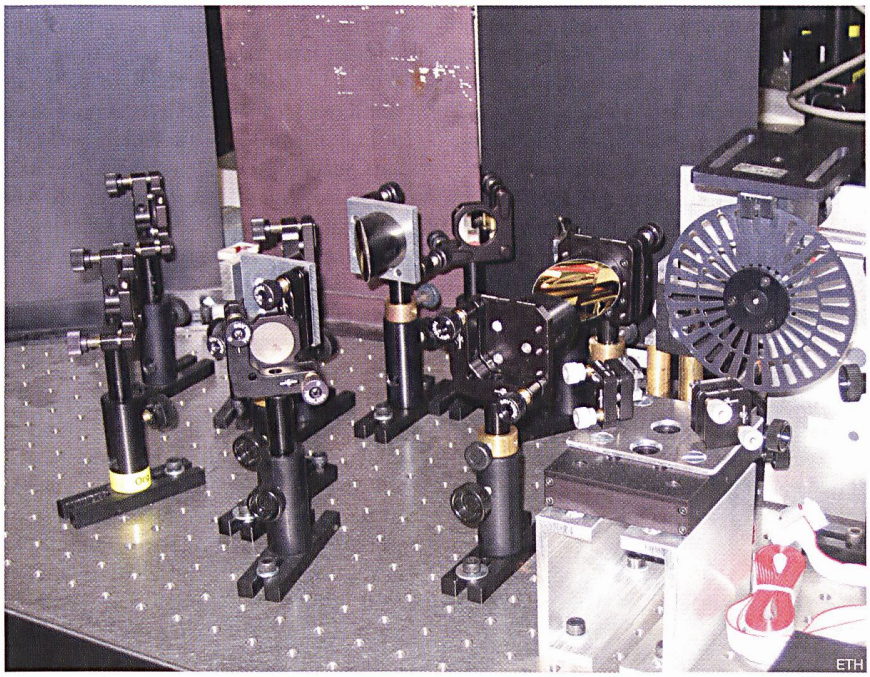


Bild 2 Messapparatur für ultrakurze Terahertzpulse

Zur Erzeugung und Detektion der Pulse werden organische Kristalle verwendet; das System basiert auf einem Laser mit einer Wellenlänge von 1,5 µm (nicht im Bild). Die deutlich erkennbaren goldbeschichteten Spiegel dienen zur Fokussierung der Terahertzstrahlung.

10 THz mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden.

Mit Professor Jérôme Faist, der in diesem Jahr von der Uni Neuchâtel an die ETH Zürich wechselt, ist die Schweiz an der vordersten Front der Forschung an Quantenkaskadenlasern vertreten [1].

Die Vorzüge kurzer Pulse

Die Probleme mit der thermischen Hintergrundstrahlung können umgangen werden, wenn man zu gepulster Terahertzstrahlung übergeht. Einerseits ist die Intensität während dem Puls normalerweise um ein Vielfaches höher als diejenige des Hintergrunds, andererseits kann man sich bei der Messung auf die Pulsdauer beschränken, wenn wirklich Strahlung vorhanden ist.

Auf die Spitze getrieben wird dieses Konzept mit ultrakurzen Terahertzpulsen, die im Idealfall nur noch eine einzige Schwingung des elektromagnetischen Feldes umfassen, und entsprechend eine Pulsdauer in der Grössenordnung einer Picosekunde haben. Solche Pulse können durch unterschiedliche Konversionsprozesse aus Sub-Picosekunden-Laserpulsen erzeugt werden.

Den grössten Vorteil dieser Pulse bietet aber die Möglichkeit der kohärenten Detektion. Dies bedeutet, dass nicht mehr nur die Pulsenergie oder gar nur die mittlere Leistung gemessen wird, sondern dass man direkt das elektrische Feld des Pulses als Funktion der Zeit aufnehmen kann. Dies geschieht, wie schon die Erzeugung, wiederum mit der Hilfe von kurzen Laserpulsen; die Details werden später erläutert. Aus dem zeitlichen Verlauf des elektrischen Feldes des Terahertzpulses erhält man dann durch eine Fouriertransformation dessen komplexes Spektrum (Amplitude und Phase). Wegen der kurzen Dauer des Pulses kann dessen Bandbreite mehrere Oktaven umfassen, typischerweise von rund 0,1 bis 3 THz.

Tritt der Terahertzpuls vor der Detektion durch eine Probe, wird er durch deren Brechungsindex zeitlich verzögert und durch Absorption abgeschwächt. Diese Änderungen äussern sich als eine Phasenverschiebung bzw. Amplitudenänderung des Spektrums, die zusammen auf die Dicke und die Zusammensetzung der Probe schliessen lassen. So lässt sich zum Beispiel die Dicke von Kunststoffen mit einer hohen Genauigkeit messen (Bild 4). Je nach Brechungsindex ist die Dickenauflösung besser als 10 µm.

Diese Möglichkeit der Terahertzspektroskopie im Zeitbereich (Terahertz Timedomain Spectroscopy, TTDS) führte seit Mitte der 90er-Jahre zu dem Aufschwung, der die Terahertztechnologie aus ihrem Mauerblümchendasein herausgeführt hat.

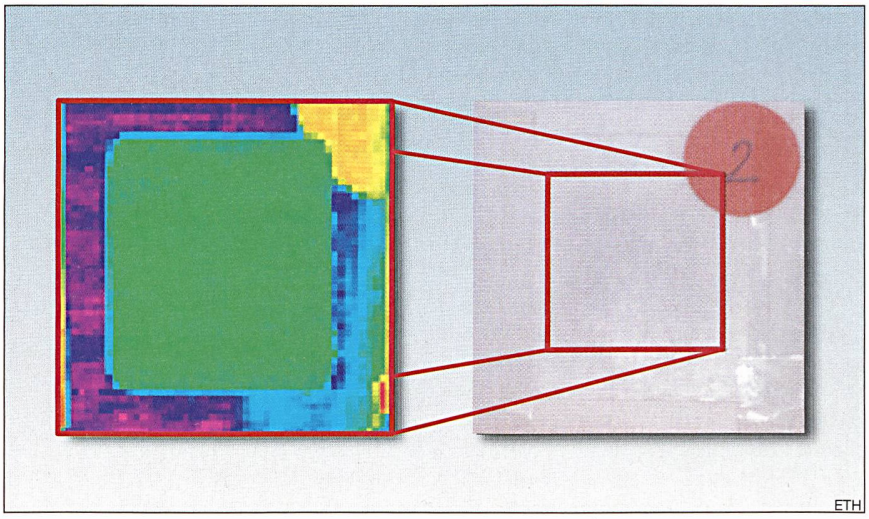


Bild 3 Semtex in einem Teflonhalter

Eine dünne Schicht des Sprengstoffes Semtex (grün) in einer Teflonhalterung lässt sich in der Terahertzabbildung einfach von den Bereichen ohne (blau) unterscheiden. Der gelbe Bereich in der Ecke oben rechts ist gegeben durch den Papierkleber. (Die Probe wurde freundlicherweise durch den wissenschaftlichen Forschungsdienst der Stadtpolizei Zürich zur Verfügung gestellt.)

Photoleitende Schalter

Im Wesentlichen gibt es zwei Methoden für die Erzeugung und die kohärente Detektion kurzer Terahertzpulse: Photoleitende Schalter und nichtlinear optische Effekte.

Im ersten Fall verwendet man Halbleiter, auf die in einem Abstand von einigen Mikrometern Elektroden aufgebracht wurden. Legt man an diese eine Spannung an und bestrahlt die Lücke mit Licht, dessen Photonenenergie über der Bandlücke des Halbleiters liegt, fliesst ein Photostrom. Trifft das Licht in Form eines Sub-Picosekunden-Laserpulses auf, erhält man einen Strompuls, der als Antenne fungiert und eine sekundäre elektromagnetische Welle emittiert: den Terahertzpuls.

Die abgestrahlte Intensität steigt mit der Geschwindigkeit der Stromänderung. Deshalb versucht man, die Lebensdauer der angeregten Ladungsträger so klein wie möglich zu halten, weil so der Strom nicht nur schnell ansteigt, sondern auch schnell wieder abklingt. Aus diesem Grund verwendet man häufig Galliumarsenid, das bei tiefen Temperaturen gezüchtet wurde, weil dort die intrinsischen Defekte die Lebensdauer der Ladungsträger minimieren.

Durch die Umkehrung dieses Prinzips kann man die Terahertzpulse auch wieder detektieren. Wieder werden durch einen Laserpuls (Probepuls) kurzlebige Ladungsträger erzeugt, doch diesmal liegt keine externe Spannung an. Stattdessen führt das momentane Terahertzfeld zu einem Strom, der über die Elektroden gemessen werden kann. Durch eine mechanische Verzögerungslinie kann die zeitliche Beziehung zwischen dem Terahertz- und dem Probepuls gezielt verändert werden. Indem der Elektrodenstrom als Funktion der zeitlichen Verzögerung gemessen wird, kann die ganze Terahertzwellenform abgescannt werden (Bild 5).

Hierbei spielt die Lebensdauer der Ladungsträger eine noch grössere Rolle als bei der Erzeugung. Ist sie länger als ein Zyklus des Terahertzpulses, mittelt sich der Strom zu null aus.

Nichtlineare Optik

Ein ganz anderer Ansatz zur Erzeugung und der kohärenten Detektion kurzer Terahertzpulse beruht auf nichtlinearer Optik. Diese beruht vereinfacht gesagt darauf, dass die Auslenkung der Elektronen (bzw. der molekularen Elektronenorbitale) aus ihrer Ruhelage beim Anlegen eines elektrischen Feldes nicht symmetrisch ist, das heisst, sie ist grösser für positive Felder als für negative. Die «Antwort» der Elektronen auf eine Lichtwelle, bestehend aus einer sinusförmigen Schwingung des elektrischen Feldes, weicht deshalb von der idealen Sinusform ab. Im Fourierspektrum führen diese Abweichungen zu Komponenten mit der doppelten Lichtfrequenz und zu solchen bei der Frequenz null, was einer induzierten Gleichspannung entspricht (optische Gleichrichtung, englisch Optical Rectification, OR). Fallen zwei verschiedene

Lichtwellen ein, finden auch Mischprozesse wie Summen- oder Differenzfrequenzerzeugung statt (Sum/Difference Frequency Generation, SFG/DFG), was in der linearen Optik nicht möglich ist.

Während SFG und optische Frequenzverdopplung schon seit Längerem technische Anwendungen finden, zum Beispiel zur Konversion von infrarotem in sichtbares Licht oder von sichtbarem in ultraviolettes Laserlicht, stiess die optische Gleichrichtung lange Zeit auf kaum mehr als akademisches Interesse. Erst seit gut einem Jahrzehnt wird sie zur Erzeugung von Terahertzpulsen verwendet.

Betrachtet man nämlich die OR, die von einem Laserpuls erzeugt wird, handelt es sich streng genommen nicht mehr um eine Gleichspannung, sondern um eine zeitabhängige Ladungsverschiebung, die der Laserpulsform folgt. Diese Ladungsverschiebung bildet aber wiederum einen zeitabhängigen Strom, der eine Sekundärwelle abstrahlt.

Das Spektrum dieser Sekundärwelle wird durch verschiedene Grössen beeinflusst. An erster Stelle steht die Länge des ursprünglichen Laserpulses, die für Terahertzemission in der Grössenordnung von hundert Femtosekunden (10^{-13} s) liegen muss. Eine zentrale Rolle spielen auch die Laufgeschwindigkeiten bzw. die Geschwindigkeitsdifferenz von anregendem Laserpuls und Terahertzpuls. Für eine optimale Konversionseffizienz und eine maximale Bandbreite soll diese Differenz so klein wie möglich sein (Geschwindigkeitsanpassung, Velocity-Matching); andernfalls führen die Unterschiede zu einer zeitlichen «Verschmierung» des emittierten Terahertzpulses, die besonders ausgeprägt ist für lange Kristalle.

Die wichtigste Voraussetzung für eine effiziente Erzeugung von Terahertzpulsen ist jedoch ein grosser nichtlinear optischer Koeffizient des Kristalls. Die Asymmetrie der Elektronenantwort soll also möglichst gross sein. Die höchsten Werte werden hier erzielt in organischen Kristallen. Diese bestehen aus Molekülen, in denen die Elektronen aufgrund der sogenannt konjugierten Bindungen eine grosse Beweglichkeit besitzen. Die Asymmetrie kommt dadurch zustande, dass die Enden dieser konjugierten Bindungen mit unterschiedlichen Atomgruppen abgeschlossen sind, auf der einen Seite mit einem Elektrondonor, auf der andern mit einem Elektronakzeptor.

Die organische Chemie bietet eine fast unendliche Vielfalt an nichtlinear optischen Molekülen, die sich jeweils im Donor, im Akzeptor und in der genauen Anordnung der konjugierten Bindungen unterscheiden. Nur wenige davon behalten jedoch ihre Nichtlinearität in der kristallinen Form. Da die Moleküle in der Regel stark polar sind, lagern sie sich häufig antiparallel zu Dimeren zusammen, in denen sich die molekularen Asymmetrien paarweise aufheben. Ein Konzept, um dies zu verhindern, ist, zwei verschiedene Moleküle zu kombinieren: ein Chromophor, das für die Nichtlinearität verantwortlich ist, und ein Gegenmolekül, das durch seine geometrische Form die Chromophoren dazu bringt, sich im Kristall parallel auszurichten.

Nach diesem Prinzip funktioniert auch DAST, ein organisches Salz mit vollem Namen 4-N,N-Dimethylamino-4'-N'-Methylstilbazolium Tosylat, dessen nichtlinear optischer Koeffizient zu den höchsten bisher bekannten zählt. DAST wurde in den letzten Jahren am Labor für nichtlineare Optik der ETH Zürich eingehend auf verschiedenste Anwendungen hin untersucht, mit einem Schwerpunkt auf der Erzeugung von Terahertzpulsen [2]. Die besten Resultate wurden aufgrund der Geschwindigkeitsanpassung erreicht bei einer Wellenlänge des primären Laserpulses von rund 1,5 µm (Bild 6). Dies ist gerade derjenige Bereich, in dem sich die Datenübertragung in Glasfaserkabeln abspielt, weil die Absorption des verwendeten Quarzglases dort minimal ist. Die Bedürfnisse der Telekommunikationsindustrie sind deshalb eine starke Triebfeder für die Entwicklung von immer kompakteren und leistungsstärkeren 1,5-µm-Lasern, die quasi als Nebenprodukt auch für Terahertzsysteme verwendet werden können (mit DAST als Quellenmaterial). Ein Prototyp eines solchen Systems ist an der ETH gerade im Aufbau (Bild 2).

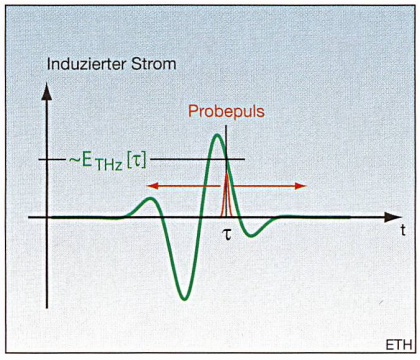


Bild 5 Kohärente Messungen des Terahertzfeldes mit photoleitenden Schaltern

Der Probepuls erzeugt freie Ladungsträger, die durch das elektrische Feld des Terahertzpulses beschleunigt werden; dieser Strom wird gemessen und ist ein Mass für die momentane Feldstärke $E_{THz}(\tau)$. Wenn durch eine mechanische Verzögerungslinie die Zeit τ gezielt verändert wird, kann die gesamte Wellenform des Terahertzpulses kohärent gemessen werden.

Elektrooptische Detektion

Mit der nichtlinearen Optik eng verknüpft ist der elektrooptische Effekt. Hier bewirkt ein elektrisches Feld, das an einen entsprechenden Kristall angelegt wird, eine Änderung von dessen Brechungsindex. Obwohl diese nur sehr klein ist, typischerweise im Bereich von 10^{-5} bis 10^{-4}, findet der elektrooptische Effekt verschiedene Anwendungen, beispielsweise in Lichtmodulatoren, die als Schnittstelle zwischen elektronischen und optischen Signalübertragungssystemen dienen.

Auch das elektrische Feld eines Terahertzpulses, der einen elektrooptischen Kristall durchquert, modifiziert lokal und zeitlich variabel dessen Brechungsindex. In einer geeigneten Anordnung führt dies dazu, dass der Polarisationszustand eines auf der gleichen Achse laufenden kurzen

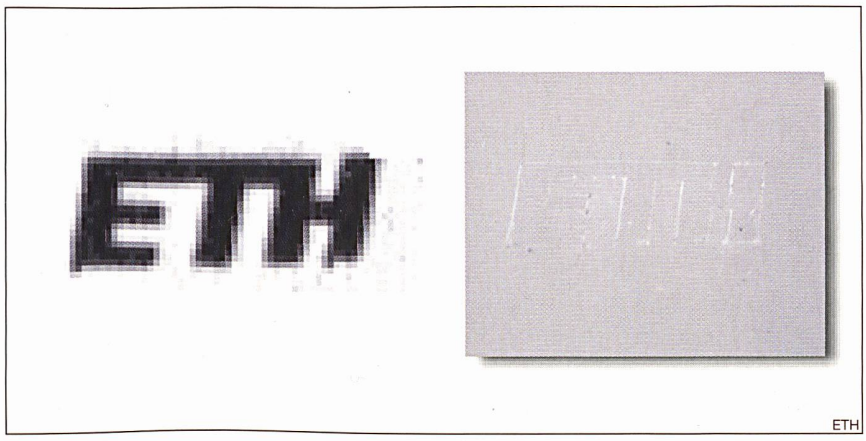


Bild 4 Foliendicke messen

Terahertzabbildung einer durchsichtigen Probe, bestehend aus zwei Hellraumprojektorfolien, die auch für Terahertzstrahlung transparent sind. Aus der einen wurde das ETH-Logo ausgeschnitten. Die entstehende Dickenänderung von 100 µm führt über die veränderte Durchlaufzeit des Pulses zu einem starken Kontrast.

Laserpulses (Probepuls) verändert wird, beispielsweise von linearer zu elliptischer Polarisation. Die Polarisationsänderung kann mit optischen Instrumenten ausgelesen werden, und daraus kann auf das momentane Feld des Terahertzpulses zurückgeschlossen werden. Wie bei den photoleitenden Schaltern wird nun der Probepuls relativ zum Terahertzpuls verzögert und so dessen gesamte Wellenform abgescannt.

Genau wie bei der Erzeugung durch optische Gleichrichtung ist auch bei dieser elektrooptischen Detektionsmethode die Geschwindigkeitsanpassung zwischen den beiden Pulsen wichtig, wie sie mit DAST erreicht werden kann. Allerdings führt die starke Doppelbrechung von DAST dazu, dass die Polarisation des Probepulses schon nach einem Bruchteil eines Millimeters nicht mehr eindeutig definiert ist und dass deshalb die terahertz-induzierte Änderung auch nicht mehr gemessen werden kann. Um dieses Problem zu umgehen, wurde an der ETH eine Variation der elektrooptischen Detektion entwickelt, die auch mit beliebig stark doppelbrechenden Kristallen funktioniert [3]. Sie beruht darauf, dass die Brechungsindexänderung genau wie das Terahertzfeld in der Strahlmitte am grössten ist und gegen den Rand hin abfällt. Ein solches Indexprofil entspricht dem einer Linse, und entsprechend wird der Probestrahl abhängig von der Terahertzfeldstärke fokussiert oder aufgeweitet, was wiederum mit klassischen optischen Mitteln gemessen werden kann (Bild 7). Obwohl die maximale Brechungsindexänderung sogar in DAST nur rund 10^{-3} beträgt, kann die Fokussierung so stark sein, dass der Strahlquerschnitt halbiert wird, was ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis ermöglicht.

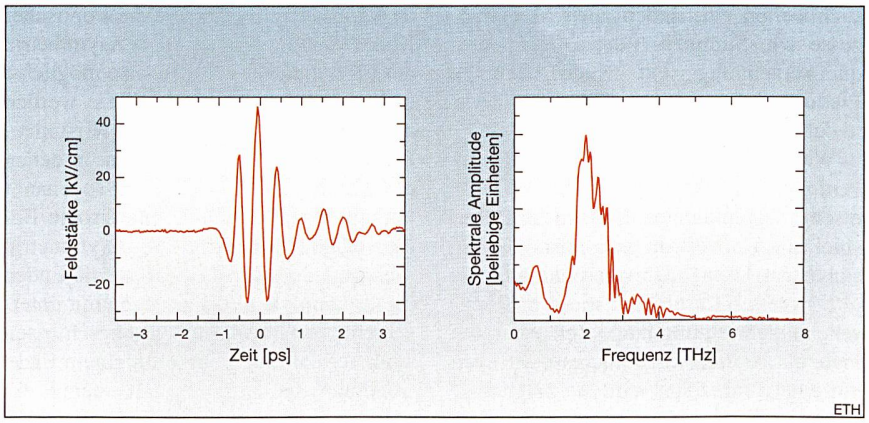


Bild 6 Wellenform und Spektrum eines ultrakurzen Terahertzpulses

Ein Terahertzpuls, der durch nichtlineare Konversion in DAST aus einem Laserpuls mit einer Wellenlänge von 1,5 µm und einer Pulsdauer von 0,15 ps (1 ps = 10^{-12} s) erzeugt wurde, elektrooptisch detektiert in einem zweiten DAST-Kristall.

Vergleich der Methoden

Der Hauptvorteil von photoleitenden Schaltern gegenüber nichtlinear optischen Methoden liegt darin, dass das erzeugte bzw. gemessene Spektrum glatt ist und keine Lücken aufweist, während Gitterschwingungen in Kristallen häufig zu Lücken führen. Dem stehen einige Nachteile gegenüber. Zum einen ist dies die Bandbreite, die bei den photoleitenden Schaltern durch die Lebensdauer der Ladungsträger meistens auf 3 bis 4 THz begrenzt ist, während durch optische Gleichrichtung in geeigneten Materialien und mit genügend kurzen Pumppulsen schon Frequenzen von mehreren zehn Terahertz erzeugt wurden. Solche Pulse sprengen den eigentlichen Terahertzbereich und können bereits dem mittleren Infrarot zugerechnet werden. Ein weiterer Nachteil der photoleitenden Schalter ist, dass die Energie nicht beliebig gesteigert werden kann, weil der Halbleiter die Pumppulse absorbiert und durch die entstehende Wärme beschädigt werden kann. In den nichtlinear optischen Kristallen hingegen wird keine Strahlung absorbiert, sodass mit hohen Pulsenergien gearbeitet werden kann.

Ein weiterer Vorteil der nichtlinearen Optik kommt hauptsächlich zum Tragen, wenn Terahertzsysteme im Alltag angewandt werden sollen. Die verwendete Wellenlänge von 1,5 µm wird von Wasser absorbiert; die Gefahr eines Netzhautschadens ist deshalb gering, wenn ein solcher Strahl ins Auge fällt, weil ein Grossteil der Energie schon im Augenvolumen absorbiert wird. Photoleitende Schalter werden hingegen meistens mit Titan-Saphir-Lasern mit einer Wellenlänge von rund 800 nm betrieben (gerade am Rand des sichtbaren Spektralbereichs), wo das Auge transparent ist und deshalb die Gefahr eines permanenten Augenschadens wesentlich grösser.

Anwendungen kurzer Terahertzpulse

Durchlichtabbildungen wie in Bild 1, die die Absorption einer Probe darstellen, sind mit kurzen Terahertzpulsen natürlich möglich, nützen aber bei Weitem deren Potenzial nicht aus. Da die Durchlaufzeit des Pulses durch die Probe sehr genau gemessen werden kann, lässt sich deren Dicke je nach Brechnungsindex auf 10 µm oder genauer bestimmen (Bild 4).

Noch weiter gehen spektroskopische Abbildungen. Dazu wird für jedes einzelne Pixel ein vollständiges Spektrum aufgenommen. Dadurch erhält man räumlich aufgelöste Information über die Dicke und Zusammensetzung der Probe, also eine Art «Super-Farb-Bild» im Gegensatz zum puren Schwarz-Weiss der Absorptionsabbildung in Bild 1. Der Preis dafür ist eine lange Aufnahmezeit, da für jedes Pixel bisher einige Sekunden benötigt werden; auch ist es nicht trivial, die gesuchte Information aus der Datenflut herauszufiltern. Ein Kompromiss sind sogenannte parametrische Abbildungen, wo nicht mehr das ganze Spektrum, sondern nur noch einige Eckdaten aufgezeichnet werden, z.B. Position und Stärke von Amplitudenmaxima.

Auf eine ganz andere Art werden die kurzen Pulse in sogenannten Pump-Probe-Messungen verwendet. Dabei nützt man aus, dass die Leitfähigkeit eines Ma-

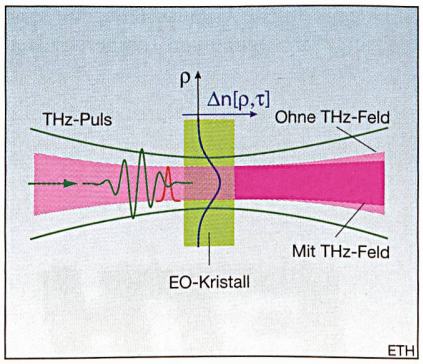


Bild 7 Prinzip der elektrooptischen Messung der Terahertzfeldstärke

Ein kurzer Laserprobepuls fällt zusammen mit dem Terahertzpuls von links auf einen elektrooptischen (EO) Kristall. Das Terahertzfeld führt wegen des EO-Effekts zu einer Änderung Δn des Brechungsindexes im Kristall, die neben der Zeitverzögerung τ auch – wie das Terahertzstrahlprofil – von der radialen Koordinate ρ abhängt. Dieses Indexprofil hat die Wirkung einer Linse auf den Probepuls; die entsprechende Fokussierung wird gemessen und lässt auf das ursprüngliche Terahertzfeld schliessen.

terials die Absorption von Terahertzstrahlung erhöht. Wird in einem Halbleiter diese Leitfähigkeit durch einen kurzen Laserpuls erzeugt, der Elektronen ins Leitungsband anregt, können dynamische Prozesse wie die Bildung von Quasiteilchen oder das Zurückfallen dieser Elektronen ins Valenzband mit extrem hoher Zeitauflösung (besser als 100 fs) beobachtet werden [4]. Dies geschieht ähnlich wie die kohärente Detektion der Terahertzpulse, indem der Zeitabstand zwischen dem anregenden Pumppuls und dem Terahertzpuls variiert wird. Die Kenntnis über solche Prozesse ist wichtig für das Verständnis und die Weiterentwicklung von Produkten wie Solarzellen oder Leuchtdioden, in denen Licht mit Elektronen wechselwirkt. Neben der hohen Zeitauflösung ist ein weiterer Vorteil, dass für die Leitfähigkeitsmessung via Terahertzspektroskopie im Gegensatz zu den klassischen Methoden keine Elektroden nötig sind, die das gesuchte Signal ungewollt beeinflussen.

Ausblick

Die hier beschriebenen Anwendungen sind das Resultat der letzten rund zehn Jahre – und die Entwicklung ist längst nicht abgeschlossen. Der nächste grosse Schritt wird der Übergang von den Forschungslabors in die Praxis sein. Das grösste unmittelbare Potenzial scheinen Geräte im Sicherheitsbereich zu haben, zum Beispiel zum Durchleuchten von Briefen oder Paketen im Hinblick auf kritische Materialien wie Sprengstoffe oder Drogen (Bild 3).

Für den Einsatz im Alltag muss die Aufnahmegeschwindigkeit noch verbessert werden, was mit Terahertzsystemen der nächsten Generation, die auf optimierten Materialien wie DAST und darauf angepassten Lasern beruhen, möglich sein wird. Längerfristig können sich Terahertzpulse auch in weiteren Bereichen wie Medizin oder Produktionskontrolle als nützlich erweisen, sodass deren Verwendung schon bald so selbstverständlich sein wird wie heute der Einsatz von Röntgenstrahlen.

Referenzen

[1] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchinson, A. Y. Cho: Quantum Cascade Laser, Science 264, 553 (1994).

[2] A. Schneider, M. Stillhart, P. Günter: High efficiency generation and detection of terahertz pulses using laser pulses at telecommunication wavelengths, Optics Express 14, 5376 (2006).

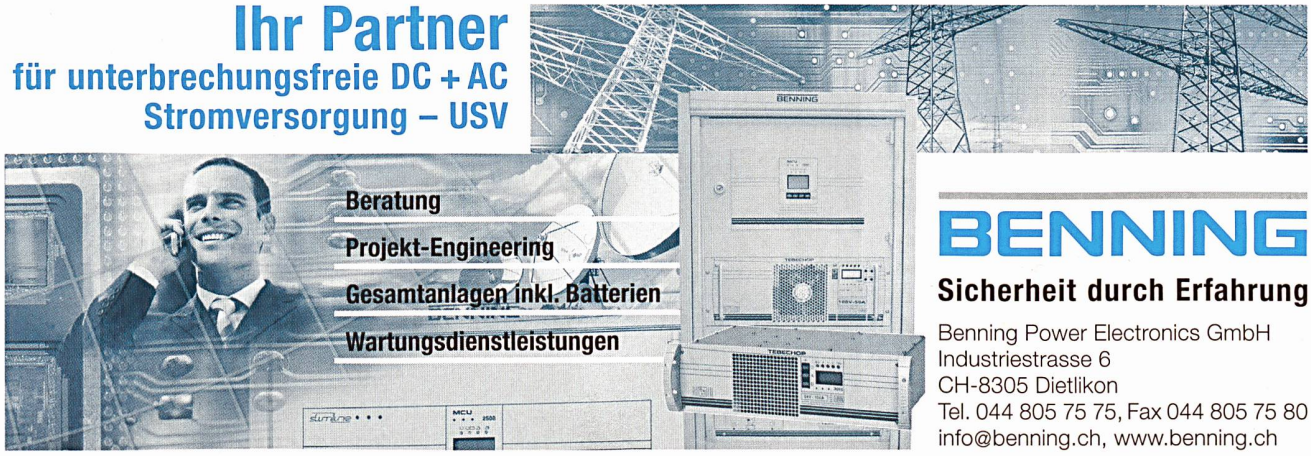
[3] A. Schneider, I. Biaggio, P. Günter: Terahertz induced lensing and its use for the detection of terahertz pulses in a birefringent crystal, Appl. Phys. Lett. 84, 2229 (2004).

[4] R. Huber, F. Tauser, A. Brodschelm, M. Bichler, G. Abstreiter, A. Leitenstorfer: How many-particle interactions develop after ultrafast excitation of an electron-hole plasma, Nature 414, 286 (2001).

Angaben zum Autor

Dr. ***Arno Schneider*** promovierte 2005 über die Erzeugung und Detektion von Terahertzpulsen in organischen Kristallen und ist seither im selben Gebiet als Projektleiter am Labor für nichtlineare Optik der ETH Zürich tätig.
ETH Zürich, Institut für Quantenelektronik, 8093 Zürich, www.nlo.ethz.ch, arno@phys.ethz.ch

Résumé

Le monde sous un jour nouveau

Coups d'œil en térahertz. Le rayonnement électromagnétique à une fréquence de l'ordre d'un térahertz n'intéressait guère personne il y a encore quelques années. Les progrès réalisés dans la recherche sur le laser et les matériaux ont permis ces dernières années d'obtenir des impulsions ultracourtes d'un térahertz permettant de multiples mesures. Un exemple en sont les procédés d'image qui livrent des informations tant sur l'épaisseur que sur la composition d'un échantillon.