

Terahertz-Physik im Nichtgleichgewicht, Teil 1

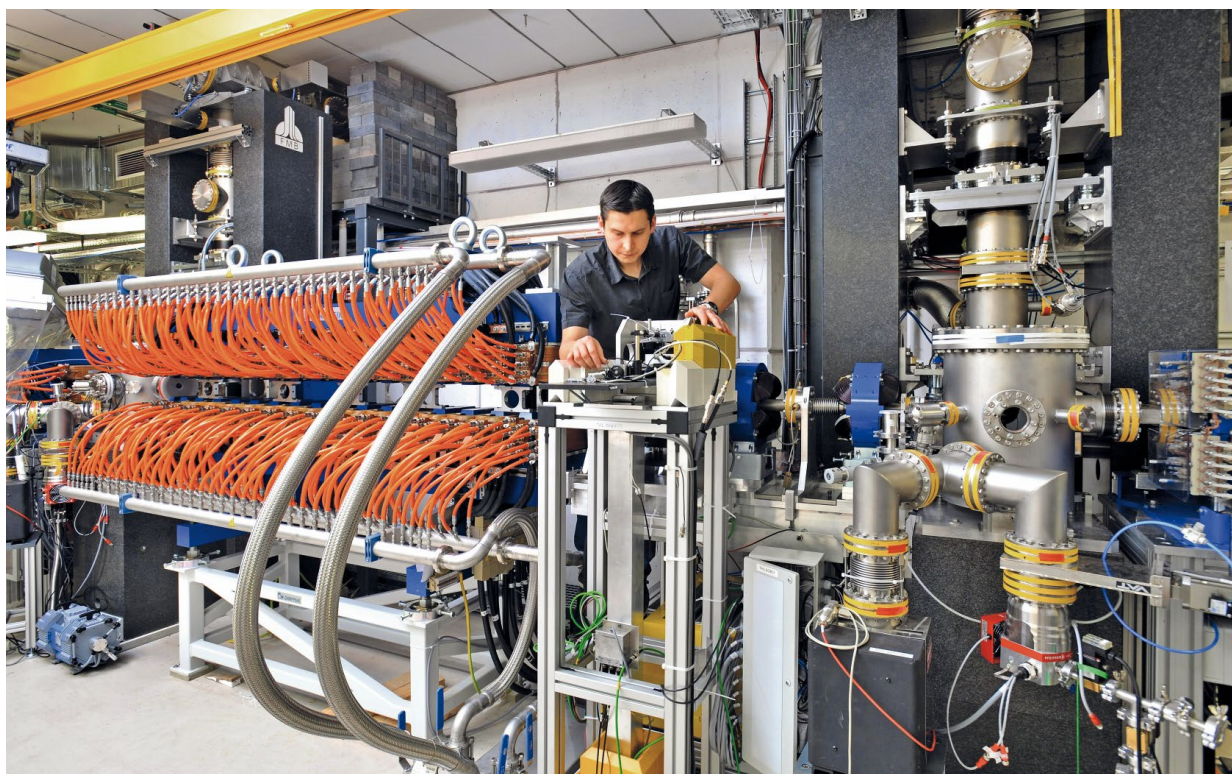
Vorstoß in die Terahertz-Lücke

JAN-CHRISTOPH DEINERT | SERGEY KOVALEV | MICHAEL GENSCH

Der Terahertz-Frequenzbereich umfasst ein technisch wenig erschlossenes Grenzgebiet im elektromagnetischen Spektrum. Er ist aber besonders interessant, weil er viele Eigenfrequenzen verschiedener, komplexer Quantenphänomene enthält. Dafür stehen neuerdings intensive Terahertz-Pulse aus spezialisierten Elektronenbeschleunigerquellen zur Verfügung. Sie bieten nun eine einzigartige Möglichkeit, solch fundamentale Quantenprozesse im Nichtgleichgewicht zu untersuchen.

Mitten im elektromagnetischen Spektrum prangt eine Lücke: Der Terahertz-Bereich zwischen 0,3 THz und 3 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ s}^{-1}$), was Wellenlängen zwischen 1 mm und $100 \mu\text{m}$ entspricht, ist ein technisch schwer zugängliches, spektrales Grenzgebiet. Doch er bietet enorme Möglichkeiten zur Erforschung elementarer Prozesse in der Quantenwelt. Diese sogenannte Terahertz-Lücke sitzt zwischen dem Radio- und dem Infrarotspektrum (Abbildung 1). Wir befinden uns also an der Grenze zwischen den technischen Regimen der Elektronik und der Optik.

Die besonderen physikalischen Gegebenheiten dieses Übergangsbereichs sind der Hauptgrund, warum es bisher so schwierig ist, effiziente, kompakte und vor allem leistungsfähige Quellen und Detektoren für Terahertz-Strahlung zu entwickeln. Beim Herantasten vom Regime der



Terahertz-Anlage TELBE am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf während des Aufbaus. Sie ist der Prototyp einer neuen Klasse von Hochfeld-Terahertzquellen. Die Elektronenpakete werden von den Elektromagneten im Undulator – gut sichtbar sind die orangefarbenen Kühlwasserleitungen für die Magneten – senkrecht zu ihrer Flugrichtung beschleunigt und emittieren dadurch intensive Terahertz-Pulse. Diese werden im ein Stockwerk höher liegenden Labor auf die Probe fokussiert und ermöglichen einen neuen Zugang zu fundamentalen Quantenphänomenen im Nichtgleichgewicht (Foto: HZDR/F. Bierstedt).

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Elektronik her liegen die Taktraten der schnellsten verfügbaren elektronischen Schaltkreise momentan im Gigahertz-Bereich – und auch mit der aktuellen Einführung des 5G-Funkstandards liegt der Terahertz-Bereich immer noch um mindestens eine Größenordnung entfernt.

Optische Laserlichtquellen tun sich ähnlich schwer, von der höherfrequenten Seite in den Terahertz-Bereich vorzudringen. Das ist auch darin begründet, dass die für die stimulierte Emission von Laserlicht nötige Populationsinversion im Terahertz-Bereich prinzipiell sehr niedrige Temperaturen erfordert: Eine Photonenenergie von $h\nu = 1$ THz entspricht über $h\nu = k_B T$, mit der Boltzmann-Konstante k_B , einer Temperatur von nur etwa 50 K. Mit speziellen Konzepten wie Quantenkaskadenlasern oder Frequenzkonversion von intensiven sichtbaren ultrakurzen Laserpulsen ist die Erzeugung von Terahertz-Strahlung aber mittlerweile routinemäßig möglich. Allerdings sind die erreichbaren Terahertz-Intensitäten entweder sehr gering oder erfordern vergleichsweise große, teure Versuchsaufbauten, die oft nur in Laborumgebungen funktionieren.

Terahertz-„Licht“ und Materie

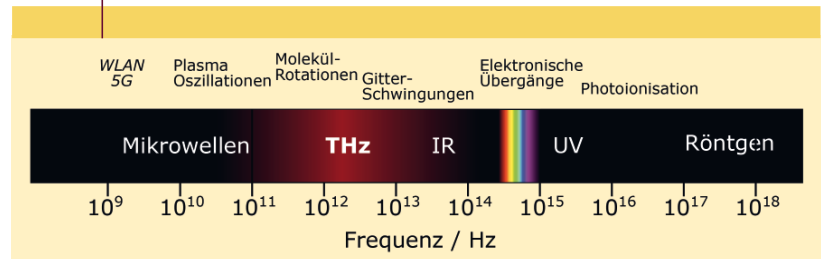
Die physikalischen Prozesse, die sich innerhalb der Terahertz-Lücke abspielen, sind aber so interessant, dass immer mehr Forschungsgruppen mit ihren Experimenten zu ihnen vordringen. Damit entstehen zunehmend leistungsfähige Konzepte zur Erzeugung und Detektion von Terahertz-Strahlung. Um zu verstehen, wodurch dieses Interesse begründet ist, werfen wir einen Blick auf die elementaren Wechselwirkungen von elektromagnetischer Strahlung mit Materie in den verschiedenen Wellenlängenbereichen.

Für Radio- und Mikrowellen mit Wellenlängen von mehreren Millimetern und darüber sind dielektrische, also elektrisch nichtleitende, Materialien praktisch transparent. Kurzwelligeres „Licht“, mit Wellenlängen der Größenordnung von Mikrometern und darunter, regt hingegen verschiedenste Freiheitsgrade in Materie an. Das verursacht tatsächlich Veränderungen des Materials auf der Quantenebene. Im optischen Bereich sind dies insbesondere die Sprünge von Elektronen in höhere Energiezustände.

Im Terahertz-Bereich hingegen sitzt man wieder zwischen den Stühlen: Terahertz-Strahlung durchdringt wie Radiowellen viele Materialien, kann aber auch über ihre schnell variierenden elektrischen und magnetischen Feldkomponenten an elementare niederenergetische Freiheitsgrade in Materie koppeln, wie in Abbildung 2 dargestellt. Dazu zählen molekulare Rotationen und Schwingungen, die Präzession und Nutation von Elektronenspins, Spinwellen, die Beschleunigung quasifreier Ladungsträger oder auch komplexe kollektive Anregungen wie Higgs-Moden in Supraleitern [1].

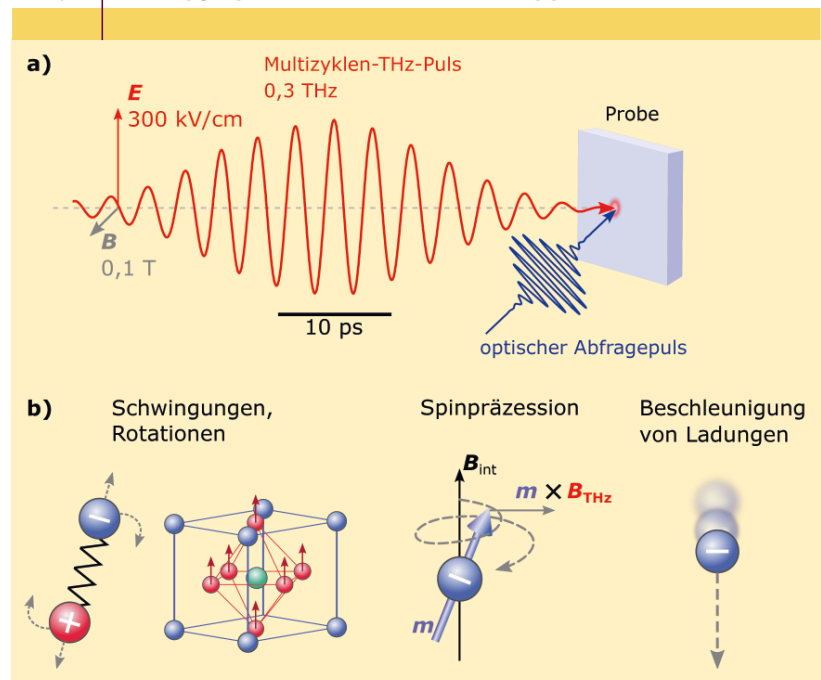
Diese Wechselwirkungen von Licht mit Materie geben der Forschung das mächtige Werkzeug der Spektroskopie in die Hand. Durchleuchtet man beispielsweise eine Probe mit Terahertz-Strahlung, die einen breiten Spektralbereich

ABB. 1 | TERAHERTZ-BEREICH



Der Terahertz-(THz)-Frequenzbereich liegt in der Lücke zwischen Mikrowellen und Infrarotlicht. Er ist außerdem gekennzeichnet durch die Anregung erster niederenergetischer quantenmechanischer Freiheitsgrade in Materie.

ABB. 2 | ANREGUNG ELEMENTARER FREIHEITSGRADE



Anregung elementarer Freiheitsgrade mittels intensiver schmalbandiger Terahertz-Pulse. a) Schematische Darstellung eines zeit aufgelösten Experiments mit Terahertz-Anregung, gefolgt von einer optischen Abfrage. Der im Undulator (siehe Abbildung 4) erzeugte Terahertz-Puls mit typischer elektrischer Feldstärke von 300 kV/cm kann direkt an eine Vielzahl von Freiheitsgraden in der Probe koppeln, siehe b). Die Änderungen der Materialeigenschaften lassen sich mit einem nachfolgenden, typischerweise optischen Abfragepuls mit Femtosekunden-Zeitauflösung messen.

abdeckt, so „schluckt“ sie bestimmte Frequenzanteile, weil die Energie dieser Strahlung hier effizient von einem der Freiheitsgrade absorbiert wird. Da viele Materialien im Terahertz-Bereich einen eindeutigen spektralen Fingerabdruck besitzen, lässt sich Terahertz-Spektroskopie zur zerstörungsfreien Durchleuchtung komplexer Proben einsetzen. Dies ermöglicht beispielsweise die chemische Analyse unbekannter Substanzen oder die Untersuchung von kulturellen Objekten, etwa verschiedenen Farbschichten von Gemälden. Zudem ist Terahertz-Strahlung offensichtlich auch für Sicherheitstechnologien wie sogenannte Körperscanner an Flughäfen interessant.

Die Wissenschaft interessiert sich aber auch für Fragestellungen, die weit über spektrale Fingerabdrücke hinausreichen. Wenn es so viele dynamische Quantenprozesse gibt, die durch Terahertz-Strahlung in Materie angeregt werden, lässt sich diese Strahlung dazu einsetzen, die makroskopischen Eigenschaften von Materialien aller Art gezielt zu steuern? Präziser formuliert: Wie lassen sich bestimmte quantenmechanische Freiheitsgrade gezielt treiben, sodass sich die elektronische und/oder strukturelle Konfiguration des Materials drastisch ändert? Und das am besten auf eine Weise, die technisch auch noch relevant und nutzbar ist?

Zur Beantwortung dieser Fragen lohnt sich ein näherer Blick auf die genaue Wechselwirkung zwischen dem Terahertz-Feld und Materie. Wie in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums lässt sich auch Terahertz-Strahlung als Kombination von elektrischem und magnetischem Feld beschreiben. Die oszillierende elektrische Feldkomponente wirkt nun, sobald sie auf Materie trifft, über die Coulomb-Kraft $F = q \cdot E$ auf Ionen und Elektronen mit den jeweiligen Ladungen q und e . In der Probe kommt es damit zu einer zeitlich variierenden Polarisation P und in der Folge zur frequenzabhängigen elektrischen Stromdichte

dP/dt . Also fängt in der Probe auf atomarer Ebene einiges zu wackeln an.

Richtig interessant wird es, wenn die Feldstärken eines „anregenden“ Lichtpulses eine Größenordnung annehmen, die den interatomaren elektrischen Feldstärken in Materie nahekommen. Diese liegen bei etwa 10 V/nm (1 GV/m). Solche gewaltigen Feldstärken lassen sich nur in sehr kurzen Pulsen handhaben, deren Dauer im Bereich von Femto- bis Pikosekunden liegt, wobei zwischen den Pulsen eine Pause von einer Mikrosekunde oder mehr liegt. Ein kontinuierlicher Strahl würde nicht nur die Probe zerstören, sondern auch ein komplettes Elektrizitätskraftwerk zum Betrieb benötigen.

So starke elektrische Felder können nun die Bindungen zwischen einzelnen Atomen instantan und beispielsweise einen elektrischen Isolator kurzzeitig in ein Metall verwandeln. Mit intensiven *optischen* Laserpulsen allerdings sind solche Feldstärken bereits erreichbar. Aufwendige Experimente können so das Umschalten der Materialeigenschaften auf ultrakurzen Zeitskalen innerhalb einer Periode des optischen Feldes, also von etwa einer Femtosekunde, sichtbar machen [2]. Das führt zu der Frage: Wenn bereits leistungsfähige optische Laser zur Verfügung stehen, wozu

SUPERRADIANTE HOCHLEISTUNGS-TERAHERTZ-QUELLEN

Beschleunigte elektrische Ladungen, also auch einzelne Elektronen, strahlen in ihrem Ruhesystem elektromagnetische Wellen ab. Deren Leistung (P) beschreibt die Larmor-Formel. Für relativistische Ladungen lässt sich diese Formel vereinfacht als

$$P = \frac{2e^2 a^2}{3c^3} \gamma^4$$

schreiben [6]. Das heißt, dass sowohl die elektrische Ladung e als auch die Beschleunigung a quadratisch zur abgestrahlten Leistung beitragen und der Lorentz-Faktor

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

sogar in vierter Potenz eingeht. Die Erzeugung relativistischer Elektronenpakete erfolgt routinemäßig in Beschleunigeranlagen, wie ELBE in Dresden, wo auf einer Länge von etwa 10 m kinetische Energien von etwa 26 MeV erreicht werden.

Diese relativistischen Elektronenpakete werden nun durch eine periodische Anordnung von antiparallelen magnetischen Dipolen – dem Undulator – mittels Lorentz-Kraft auf eine sinusförmige Bahn gezwungen (Abbildung 4a). In jeder Kurve wird gemäß der Larmor-Formel elektromagnetische Strahlung ausgesendet, die aufgrund relativistischer Effekte und konstruktiver Interferenz einem gerichteten, kollimierten Laserstrahl gleicht. Die Frequenz ν der so erzeugten Synchrotronstrahlung lässt sich aus der Undulator-Formel

$$\nu = \frac{c}{\lambda_u} \left(\frac{2\gamma^2}{1 + \frac{1}{2}K^2} \right)$$

berechnen, wobei λ_u die Periodenlänge des Undulators ist; K ist der Undulatorparameter, der im Wesentlichen durch die Feldstärke der magnetischen Dipole bestimmt wird. Das Besondere an dieser Synchrotronstrahlung bei *superradianten* Quellen wie TELBE ist die Tatsache, dass das Elektronenpaket hier räumlich kürzer ist als die Wellenlänge der emittierten Strahlung (Abbildung 4b). Dazu ist eine starke Kompression des Elektronenpaketes nötig, die in elektromagnetischen Schikanen [7] erreicht werden kann. Unter dieser Voraussetzung senden praktisch alle Elektronen kohärent, also im Gleichtakt, gebündelte elektromagnetische Pulse aus. Die Intensität der so erzeugten Strahlung skaliert in diesem superradianten Regime mit

$$P \sim N^2,$$

wobei N die Anzahl der Elektronen im Paket ist. Die superradiante Verstärkung bei einer Ladung von 250 pC im Elektronenpaket beträgt damit mehr als ein Faktor von 10^9 !

Bei TELBE werden Dauern von weniger als 250 fs erreicht, was bei annähernder Lichtgeschwindigkeit einer räumlichen Ausdehnung von weniger als 75 μm entspricht. Daraus wird auch ersichtlich, dass superradiante Quellen im kurzwelligen Infrarot- oder sogar sichtbaren Bereich, mit Wellenlängen von wenigen Mikrometern und darunter, technisch kaum umsetzbar sind. Die abstoßenden Coulomb-Kräfte zwischen den einzelnen Elektronen machen die entsprechende Kompression hochgeladener Elektronenpakete praktisch unmöglich.

braucht es dann noch spezielle Terahertz-Quellen zur Manipulation von Materialeigenschaften?

Wie oben erwähnt, bewirkt eine Anregung im optischen Bereich eben nicht nur das „gezielte Wackeln“ an beispielsweise Ladungsverteilungen. Die Gesetze der Quantenmechanik erlauben die direkte Aufnahme der Energie der „optischen“ Photonen, typischerweise in der Größenordnung von 1 eV und mehr, durch Elektronen in der Probe, die auf ihrer Energieleiter einen Quantensprung nach oben machen.

Was harmlos klingt, bedeutet im Experiment auf atomarer Skala aber eine äußerst rabiote Störung des Gleichgewichtszustandes: Ändert sich die Verteilung der Elektronen, ändern sich die interatomaren Bindungsstärken, Kristallgitter fangen in verschiedensten Moden zu schwingen an, Spins präzedieren wild durcheinander, und die Energie der ursprünglichen optischen Anregung verteilt sich über viele Zeitskalen, von Atto- bis Mikrosekunden, auf ein großes Reservoir verschiedenster Freiheitsgrade. Wenn also zu viele und vor allem hochenergetische Freiheitsgrade – wie elektronische Übergänge – angeregt werden, entsteht oft ein gewisses Chaos, das erst einmal wieder entwirrt und vor allem verstanden werden muss.

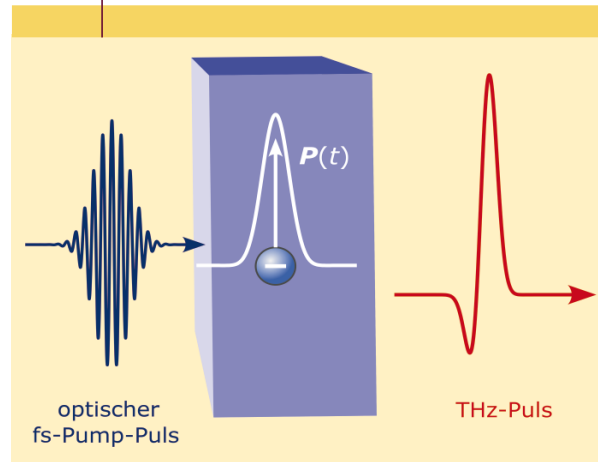
Vorteile der Terahertz-Pulse

Und hier schlägt die Stunde der Terahertz-Pulse: Das vergleichsweise langsame und gezielte „Wackeln“ des Feldes an der Probe – Photonen mit 1 THz haben eine Energie von nur 0,0041 eV – kann eben genau auf den Freiheitsgrad abgestimmt werden, der für das Experiment von Interesse ist. Werden hier Resonanzen, beispielsweise von Gitterschwingungen, getroffen, dann ist damit ein Umschalten der elektronischen und optischen Eigenschaften der Probe möglich [5]. Solch eine resonante Anregung bedeutet, dass die Energie des Terahertz-Feldes phasenkohärent über viele Schwingungsperioden in der Probe deponiert wird.

Sind die Terahertz-Feldstärken ausreichend hoch, das heißt im Bereich von mehreren 10 kV/cm und deutlich darüber, kann die oben beschriebene Beziehung zwischen dem elektrischen Feld E des Terahertz-Pulses und der Polarisation P in der Probe extrem nichtlinear werden. Auf eine Verdoppelung der Anregungsfeldstärke folgt dann eine vierfach stärkere Reaktion der Probe. Erst in diesem nichtlinearen Regime lassen sich die gewünschten kollektiven nichtlinearen Effekte, wie elektronische oder strukturelle Phasenübergänge, gezielt hervorrufen und kontrollieren.

Es existiert aber noch ein anderer nichtlinearer Anregungsmechanismus, der sich die relativ langsame Schwingungsperiode des Terahertz-Feldes zunutze macht: Die direkte Beschleunigung quasifreier – also nur schwach gebundener und räumlich delokalisierte – Elektronen in Materie durch das elektrische Feld. Denn selbst der kurze Zeitraum während eines halben Schwingungszyklus, in dem der Feldvektor seine Richtung nicht wechselt, kann bei hohen Feldstärken ausreichen, um Elektronen zu Ener-

ABB. 3 | OPTISCHE ERZEUGUNG



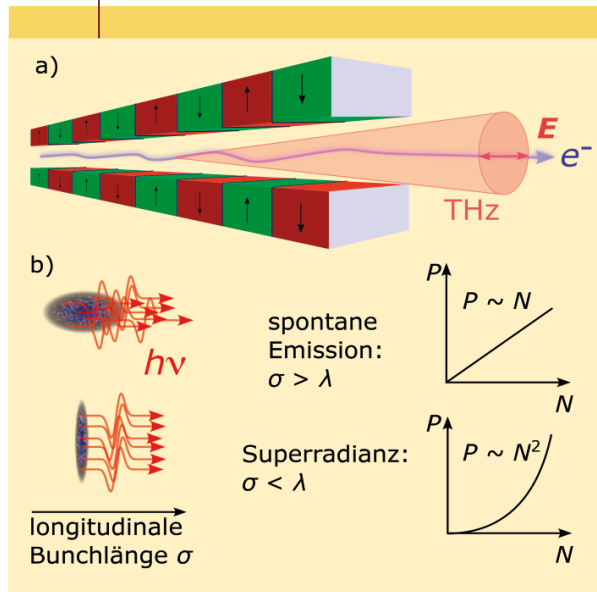
Erzeugung von intensiver THz-Strahlung in einem transparenten Material mit gebrochener Inversionssymmetrie. Der eintreffende optische Pumpimpuls erzeugt eine Verschiebung der Ladungsverteilung $P(t)$ im Material, die zur Emission eines spektral breitbandigen THz-Pulses führt.

gien zu beschleunigen, die weit über der Photonenenergie im Terahertz-Bereich liegen. Zum einen wird dadurch ultraschnelle Feldionisation zugänglich, zum anderen ermöglicht dies neuartige und potenziell extrem kompakte Elektronenbeschleuniger.

Intensive Terahertz-Lichtquellen

Solche Konzepte und Ideen zu nichtlinearer, durch Terahertz-Pulse getriebener Dynamik bilden heutzutage ein sehr aktives Feld innerhalb der Laser- und Festkörperforschung, das allmählich auch in die Chemie und Biologie ausstrahlt. Die intensiven Terahertz-Lichtquellen, die dafür benötigt werden, basieren in der Regel auf großen und komplexen optischen Lasersystemen in Universitäten und Forschungszentren. Aber wie lassen sich aus optischen Pulsen mit Wellenlängen von typischerweise 800 bis 1000 nm neue Pulse mit Wellenlängen von etwas unter einem Millimeter erzeugen?

Dazu gibt es verschiedene Wege, die alle vergleichbar ineffizient sind, aber auf derselben Idee beruhen. Da elektromagnetische Wellen immer eine direkte Folge von beschleunigten Ladungen sind, benötigt man als Lichtquelle einen elektrischen Strom, der auf der Subpikosekunden-Zeitskala ausreichend kräftig variiert. Es gibt eine Reihe von kristallinen Materialien, wie Lithiumniobat oder Zinktellurid, in denen solch ein sogenannter optischer „Rektifizierungsprozess“ bei Beschuss mit intensiven optischen Laserpulsen stattfindet. Die Polarisation $P(t)$ folgt hier nicht der Schwingung des elektrischen Feldes, sondern der Einhüllenden des typischerweise etwa 100 fs dauernden optischen Pulses, wie schematisch in Abbildung 3 dargestellt. Die damit verbundene, immer noch unglaublich schnelle Verschiebung von Elektronen – und teilweise auch Ionen – im Kristall ist genau der gewünschte „Stromstoß“.

ABB. 4 | BESCHLEUNIGERBASIERTE ERZEUGUNG

Vereinfachte Darstellung der beschleunigerbasierten THz-Erzeugung in einem Undulator. a) Die vom periodisch wechselnden Magnetfeld hervorgerufene Beschleunigung des relativistischen Elektronenpaketes führt zur gerichteten Emission horizontal linear polarisierter THz-Pulse. b) Ist die longitudinale Ausdehnung des Elektronenpaketes σ kürzer als die Wellenlänge λ der emittierten Strahlung, so skaliert die abgestrahlte Leistung P mit dem Quadrat der Zahl der Elektronen N . Dies ist das sogenannte superradiante Regime, welches die Erzeugung sehr intensiver THz-Pulse ermöglicht.

Als Konsequenz wird typischerweise etwa ein Tausendstel der optischen Leistung als halbe Sinusschwingung in Form eines breitbandigen, also quasi „weißen“, Terahertz-Pulses abgestrahlt. Diese Umwandlung ist in der Tat nicht besonders effizient. Zugleich ist so ein spektral breitbandiger Terahertz-Puls mit nur einer halben Schwingungsperiode nicht ideal, um Prozesse resonant zu treiben, – sprich, möglichst viel Energie gezielt in einen der Freiheitsgrade zu pumpen. Gibt es also noch bessere Wege, um intensive Terahertz-Pulse zu erzeugen? Idealerweise sollten sie mehrere Schwingungsperioden besitzen und bei Bedarf mit hohen Wiederholraten erzeugbar sein. Oder bildlich gesprochen: Wie bekommt man eine möglichst hohe und räumlich sehr konzentrierte Ladungsverteilung effektiv auf Subpikosekunden-Zeitskalen geschüttelt?

Die Lösung: Man nutzt einen Elektronenbeschleuniger, der Pakete aus vielen Elektronen erzeugen kann und schießt diese durch Bereiche mit beispielsweise räumlich variierenden Magnetfeldern. Die Lorentz-Kraft sorgt dann für eine oszillierende Bahn des Elektronenpaketes. Die Lichtquelle besteht also aus freien Elektronen im Vakuum. Was einfach klingt, ist aus mehreren Gründen sehr kompliziert. Elektronenbeschleuniger sind große, komplexe und teure Anlagen, die unpraktischerweise im Betrieb auch hochenergetische radioaktive Strahlung produzieren. Zusätzlich ist es gar nicht so einfach, sehr viele Elektronen auf

kleinstem Raum zu komprimieren, denn wenn Elektronen eine Sache gut können, dann ist es sich gegenseitig abzu stoßen. Praktischerweise funktioniert dies aber für den Terahertz-Bereich deutlich besser als im kurzwelligeren optischen oder Röntgen-Bereich. Und auch relativistische Effekte helfen den auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigten Elektronenpaketen, wirklich kohärent und gerichtet Terahertz-Strahlung abzugeben.

Die superradiante Terahertz-Quelle TELBE

Solche „superradianten“ Terahertz-Quellen (Funktionsprinzip siehe „Superradiante Hochleistungs-Terahertz-Quellen“ auf S. 14) sind momentan noch selten. Sie haben aber schon heute das Potenzial, die Erforschung nichtlinearer Prozesse, die von Terahertz-Pulsen getrieben sind, entscheidend voranzubringen. Die ersten intensiven, superradianten Terahertz-Quellen entstanden in den letzten Jahrzehnten an verschiedenen Beschleunigern, unter anderem beim Deutschen Elektronen-Synchrotron in Hamburg.

Eine weitere Terahertz-Quelle, die auf die Anforderungen der Erforschung Terahertz-getriebener Phänomene in Materie besonders gut abgestimmt ist, ist TELBE (Terahertz Facility at ELBE) am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf bei Dresden [4]. Ihr supraleitender Linearbeschleuniger schießt Pakete von bis zu etwa 1,5 Milliarden Elektronen mit einer Gesamtladung von 250 pC und Wiederholraten von mehreren 100 kHz durch einen Undulator. Dessen Abfolge von acht starken Magnetpaaren zwingen dem Elektronenpaket eine Wellenbewegung auf. Die Leistung und Frequenz der dadurch emittierten elektromagnetischen Strahlung lässt sich direkt über die sogenannte Larmor- beziehungsweise Undulator-Formel berechnen (s. „Superradiante Hochleistungs-Terahertz-Quellen“).

Als Nutzer der TELBE-Anlage erhält man also intensive Terahertz-Pulse mit einer einstellbaren Frequenz im Bereich von 0,1 bis 2,5 THz und hohen Wiederholraten – ideal zur Erforschung nichtlinearer Prozesse im Terahertz-Bereich. Aber welche Art von Prozessen sollte man sich damit zuerst anschauen? Wo liegt ein hohes technologisches Potenzial? Mit diesen Fragen, mit der Suche nach neuen Terahertz-Materialien, werden wir uns im zweiten Teil im kommenden Heft beschäftigen.

Zusammenfassung

Der Terahertz-Frequenzbereich umfasst ein technisch wenig erschlossenes Grenzgebiet im elektromagnetischen Spektrum. Es ist aber besonders interessant, weil es im niederenergetischen Bereich viele Eigenfrequenzen verschiedener, komplexer Quantenphänomene enthält. Dafür stehen neuerdings intensive Terahertz-Pulse aus spezialisierten Elektronenbeschleunigern zur Verfügung. Solche superradianten Hochleistungs-Terahertz-Quellen sind wichtige Großgeräte zur Erforschung der nichtlinearen Dynamik niederenergetischer Freiheitsgrade in Materie. Teil 2 im nächsten Heft wird zeigen, wie damit neue Materialien wie topologische Isolatoren erforscht werden können.

Stichwörter

Terahertz-Lücke, superradiante Hochleistungs-Terahertz-Quelle, Molekülschwingungen, Gitterschwingungen, Elektronenspins, Beschleunigung quasifreier Ladungsträger.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

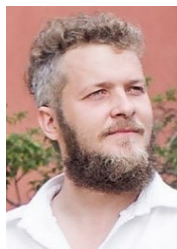
Literatur

- [1] L. Schwarz et al., Physik in unserer Zeit **2021**, 52, 80.
- [2] M. Schultze et al., Nature **2013**, 493, 75.
- [3] T. Kampfrath et al., Nature Photon. **2013**, 7, 680.
- [4] B. Green et al., Sci. Rep. **2016**, 6, 1.
- [5] R. Mankowsky, Physik in unserer Zeit **2015**, 46, 238.
- [6] G. P. Williams, Philos. Trans., Math. Phys. Eng. Sci. **2003**, 362, 403.
- [7] W. Decking, H. Weise, I. Flegel, Physik in unserer Zeit **2018**, 49(1), 38.

Die Autoren



Jan-Christoph Deinert promovierte 2016 an der Technischen Universität Berlin. Anschließend kam er zur Gruppe „Hochfeld Terahertz-getriebene Phänomene“ um Michael Gensch. Seitdem forscht er experimentell an Terahertz-induzierter Änderung der elektronischen Struktur in Festkörpern. Er ist, zusammen mit Sergey Kovalev, Co-Leiter des TELBE-Teams und seit 2020 Nachwuchsgruppenleiter am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR).



Sergey Kovalev promovierte 2012 an der Staatlichen Universität Moskau. Danach wurde er wissenschaftlicher Mitarbeiter an der beschleunigerbasierten TELBE-THz-Quelle und ab 2015 in der Gruppe „Hochfeld Terahertz-getriebene Phänomene“ um Michael Gensch. Dort war er für die Entwicklung von Experimenten zu ultraschneller kohärenter Spektroskopie mitverantwortlich. Seit 2017 ist er verantwortlicher Beamline-Scientist an der TELBE-Anlage und seit 2019 Co-Leiter des TELBE-Teams.



Michael Gensch promovierte 2004 an der Technischen Universität Berlin. Nach Zwischenstationen wurde er 2010 am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf Projektleiter für die Entwicklung der superradianten Terahertzanlage TELBE. Ab 2015 leitete er dort die Gruppe „Hochfeld Terahertz-getriebene Phänomene“. 2019 wurde er als Professor für Terahertz- und Laserspektroskopie an die TU Berlin berufen und ist seitdem zugleich Abteilungsleiter am Berliner DLR-Institut für Optische Sensorsysteme.

Anschriften

Dr. Jan-Christoph Deinert, Institut für Strahlenphysik, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden.
J.Deinert@hzdr.de

Dr. Sergey Kovalev, Institut für Strahlenphysik, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, Bautzner Landstraße 400, 01328 Dresden.
S.Kovalev@hzdr.de

Prof. Dr. Michael Gensch, Institut für Optik und Atomare Physik, TU Berlin, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin; DLR Institut für Optische Sensorsysteme, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin.
Michael.Gensch@dlr.de

ENTSCHEIDEST DU KÜNFTIG NOCH SELBST?

Herrschaft der künstlichen Intelligenz – Science oder Fiction?


TECHNOSEUM

www.technoseum.de