

Kurze Wellen, lange Wellen, Terawellen

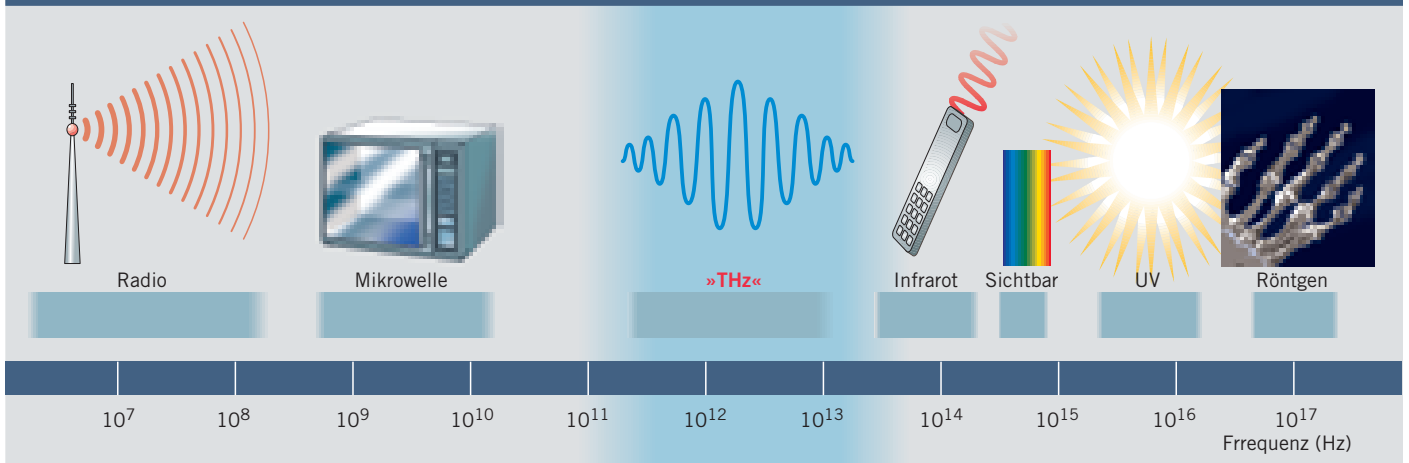
Elektromagnetische Strahlung im Terahertz-Frequenzbereich erobert neue Anwendungsfelder

Als Terahertz-Strahlung bezeichnet man die elektromagnetische Strahlung im Frequenzbereich zwischen den Millimeter- und Mikrowellen einerseits und der Infrarotstrahlung andererseits. Erstere

im Takt der Differenzfrequenz, die im THz-Frequenzbereich liegt, ein- und ausgeschaltet. Wenn man den so erzeugten Laserstrahl auf eine Substanz richtet, die immer dann Strom leitet, wenn sie beleuchtet

Antenne wird, und eine Spannung angelegt werden. Es fließt dann ein THz-Wechselstrom, und die Antenne strahlt eine THz-Welle ab. Obwohl die Strahlung nicht sehr intensiv ist, kann sie – ähnlich wie

Darstellung des elektromagnetischen Spektrums mit dem Terahertz-Frequenzbereich in der Mitte



werden beispielsweise von Radios, Mikrowellen-Öfen und Handys genutzt, letztere von Wärmebildkameras und Wärmestrahlern. Genauer gesagt handelt es sich bei der Terahertz-Strahlung um den Frequenzbereich zwischen 300 Gigahertz (GHz) und zehn Terahertz (THz) **1**. Lange hat man diesen Bereich auch als »Terahertz-Lücke« des Spektrums bezeichnet – Lücke deshalb, weil man hier bis vor wenigen Jahren nur unter großem Aufwand nutzbare Strahlung erzeugen beziehungsweise detektieren konnte. Ein Terahertz (1 THz) entspricht 10^{12} Hertz, also 1 000 000 000 000 (oder eine Million mal eine Million) Schwingungen in der Sekunde.

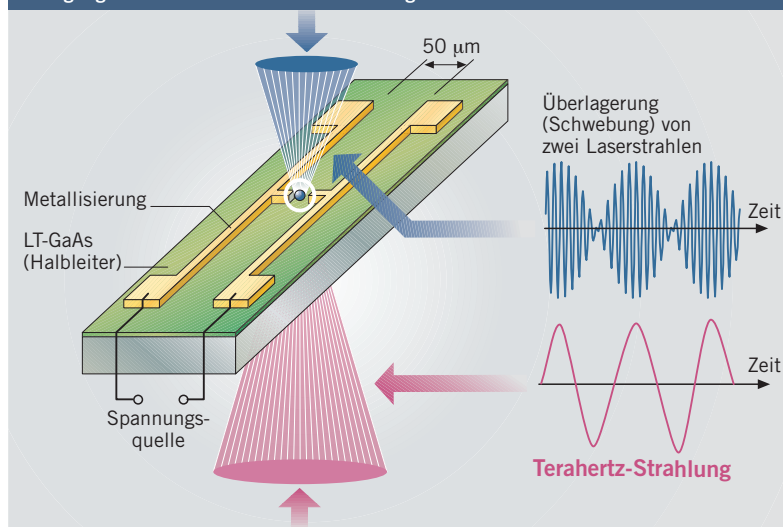
Zur Erzeugung und Detektion von THz-Strahlung verwenden wir in Frankfurt so genannte Fotomischverfahren, bei denen Laser, die im Sichtbaren arbeiten, eine zentrale Rolle spielen. Dies sei am Beispiel von Dauerstrich-Strahlung erläutert, bei der das Konzept der Schwebung verwendet wird **2**. Eine solche entsteht, wenn man zwei Laserstrahlen leicht unterschiedlicher Farbe (Frequenz) überlagert. Das resultierende Laserlicht wird dann

wird, und immer dann isolierend wirkt, wenn sie nicht beleuchtet wird, dann erhält man einen Schalter, der im THz-Takt ein- und ausschaltet. Um damit Strahlung zu erzeugen, muss der Schalter nur noch in eine Mikro-Antenne eingebaut werden, die so zur fotoleitenden

beim Radio – mit Hilfe einer zweiten Antenne detektiert werden. Das Besondere des Fotomischverfahrens liegt in seiner hohen Messempfindlichkeit, die darauf beruht, dass sich Störeffekte mit dieser Methode außerordentlich gut unterdrücken lassen. Andere Methoden der THz-

1 Der sichtbare Spektralbereich befindet sich zwischen 375 THz (entsprechend einer Wellenlänge von 800 nm) und 750 THz (400 nm).

Erzeugung von Dauerstrich-Terahertzstrahlung

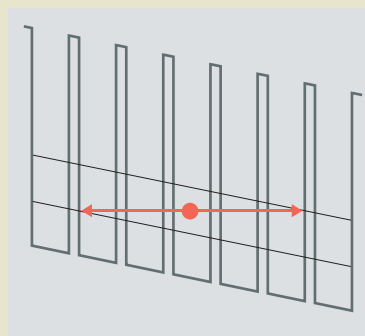


2 Die Dauerstrich-Terahertzstrahlung entsteht durch die Überlagerung von zwei Laserstrahlen verschiedener Farbe in einer Fotomischantenne, die ausgehend von LT-GaAs (bei niedriger Temperatur (englisch Low Temperature) gewachsenes Gallium-Arsenid) hergestellt wird.

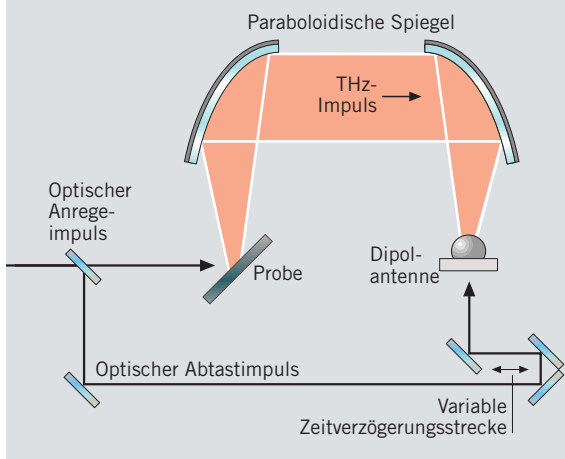
THz-Emissions-Spektroskopie von Elektronen in Halbleiter-Übergittern

Eine besondere Variante der Anrege-/Abfrage-Spektroskopie mit THz-Impulsen ist die THz-Emissions-Spektroskopie, die insbesondere bei der Untersuchung quantenmechanischer Wellenpakete in der Physik eine Rolle spielt. Wir setzen sie zum Studium von Elektronen in Halbleiter-Quantentrogstrukturen ein. Dies sei am Beispiel eines Halbleiter-Übergitters erläutert **1**. Es besteht aus einer Abfolge dünner Schichten verschiedener Halbleitermaterialien, die mit Hilfe von Molekularstrahlverfahren als perfekte Kristalle gewachsen werden. Wären die Elektronen klassische Teilchen, dann könnten sie zwischen den Barrieren des einen Halbleitermaterials eingesperrt werden. Die Wellennatur der Elektronen erlaubt es ihnen aber nun, durch die Barrieren, sofern diese nur dünn genug sind, hindurch zu treten, zu »tunneln«. Dieses Phänomen, für das es in der klassischen Physik

kein Analogon gibt, ist nun für einige Überraschungen gut. Legt man elektrische Spannung an, um die Elektronen zum positiv geladenen Kontakt zu ziehen, so stehen dem die Regeln der Quantenmechanik entgegen. Diese besagen,



1 Energieschema einer Übergitterstruktur, bestehend aus dünnen Schichten zweier Halbleitermaterialien: Die Neigung der Struktur ist die Folge einer elektrischen Spannung, die von links nach rechts über die Struktur anliegt. Ein Elektron (als roter Punkt gekennzeichnet) ist auf Grund seiner Wellennatur zu einer oszillierenden Bewegung durch die Energiebarrieren hindurch gezwungen (Bloch-Oszillationen).

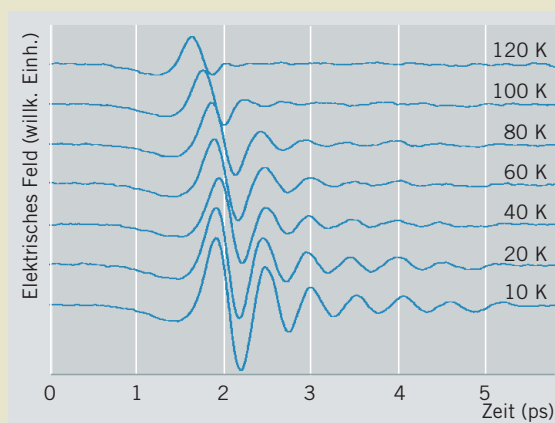


2 Messaufbau der THz-Emissions-Spektroskopie: Ein im Bild von links kommender gepulster Laserstrahl wird auf zwei Pfade aufgeteilt. Ein Teilstrahl dient der Anregung der Probe (des Übergitters), der andere Teilstrahl aktiviert eine fotoleitende Antenne, mit der die rot eingezeichnete THz-Strahlung aus der Probe detektiert wird.

nen nur um ihre Ruhelage herum vor und zurück laufen dürfen. Wir können diese oszillierende Bewegung, als Bloch-Oszillationen bekannt, mit Hilfe der THz-Emissions-Spektroskopie nachweisen **2**. Dabei verwendet man zunächst einen Femtosekunden-Laserimpuls, um Elektronen in das relevante Energieband anzuheben, sie also dort quasi zu »erzeugen«. Im elektrischen Feld beginnen die Elektronen nun ihre Vorwärts- und Rückwärts-Bewegung. Weil sie elektrische Ladung tragen und alle im Takt »tanzen«, strahlen sie elektromagnetische Strahlung ab, die wir mit einer fotoleitenden Antenne empfangen. Die Oszillationen klingen schnell ab, und es braucht tiefe Temperaturen, um sie deutlich sehen zu können **3**. Stöße der Elektronen untereinander und der Einfluss von Schwingungen der Kristallatome lassen die Elektronen außer Takt geraten. Es sind auch solche Störeffekte, die dann doch ermöglichen, dass die Elektronen zum elektrischen Kontakt wandern. Dies ist ein Glück für die Alltagswelt, denn sonst würden wir die Elek-

tronentechnik und Elektronik in der uns vertrauten Form nicht kennen, bestehen doch deren Materialien zumindest teilweise aus kristallinen, also periodisch geordneten Materialien, und mehr als die periodische Ordnung braucht es letztlich nicht für Bloch-Oszillationen. Ohne Stoßprozesse würden die Elektronen nur oszillierende Bewegungen vollführen, aber einen kontinuierlichen Stromfluss gäbe es nicht!

Das Verhalten von Elektronen in Halbleiter-Übergittern bietet noch viele Überraschungen. Zur Zeit studieren wir den Einfluss magnetischer Felder, die eigenartige Bewegungsformen der Elektronen hervorrufen. Des Weiteren versuchen wir, einen Übergitter-THz-Laser zu entwickeln; nicht praktischer Zwecke wegen, sondern um herauszufinden, ob die kuriose Vorhersage, dass ein solcher Laser ohne Verstärkung im herkömmlichen Sinne arbeiten könne, stimmt.



3 THz-Strahlung aus der Probe bei verschiedenen Proben-temperaturen: Die Anregung der Probe erfolgt unmittelbar vor dem Auftreten des Signalanstiegs der THz-Strahlung. Die Oszillationen der Strahlung stammen von der periodischen Bewegung der Elektronen im Übergitter. Mit zunehmender Temperatur klingen die Oszillationen immer schneller ab, weil es in der Probe immer mehr Stoßprozesse gibt, die die Elektronen außer Takt bringen.

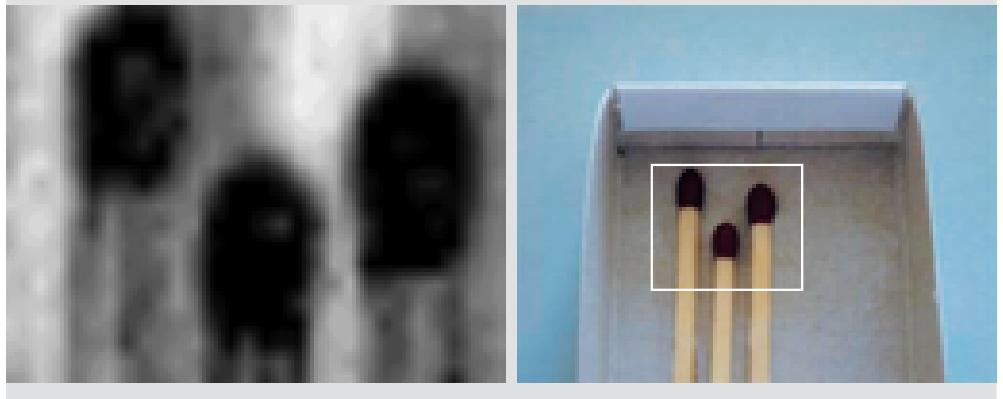
Strahlungserzeugung und -detektion basieren auf intensiven Laserimpulsen. Mit deren Hilfe ist es heute möglich, THz-Impulse mit einer Bandbreite zu erzeugen und zu detektieren, die weit in den infraroten Spektralbereich reicht.

Anwendungsmöglichkeiten der THz-Strahlung

Das Anwendungspotenzial von THz-Strahlung ist groß. In der Grundlagenforschung wird sie insbesondere dazu genutzt, die Eigenschaften von niederenergetischen Anregungen zu vermessen. Bei Molekülen sind dies beispielsweise Gerüstschwingungen und Dreh-schwingungen, bei Festkörpern Gitterschwingungen, Plasmaschwingungen und Supraleiter-Anregungen. In Verbindung mit ultrakurzen Laserimpulsen findet die THz-Spektroskopie Anwendung in der Anrege-/Abtast-Spektroskopie, die es erlaubt, die zeitliche Entwicklung von Anregungen zu untersuchen (siehe »THz-Emissions-Spektroskopie von Elektronen in Halbleiter-Übergittern«, Seite 46). Die Spektroskopie mit THz-Strahlung ist inzwischen in der Physik etabliert. Sie wird nun allmählich auch in anderen Naturwissenschaften, der pharmazeutischen und medizinischen Forschung und in den Ingenieurdisziplinen angewendet. Große Publizität hat die Aussicht auf praktische Anwendungen mit sich gebracht. So sind – außerhalb Deutschlands – die ersten Firmen entstanden, die die Tatsache kommerziell nutzen wollen, dass viele elektrisch nichtleitende Materialien wie Papier, Kunststoffe und Kompositmaterialien für THz-Strahlung durchlässig sind, also durchleuchtet werden können, um beispielsweise die Materialbeschaffenheit oder Grenzflächen zu analysieren. Darüber hinaus ist es möglich, wie mit Röntgenstrahlen auch in geschlossene Behälter und Verpackungen hineinzusehen **3**.

In Anlehnung an Röntgenstrahlen (englisch: X-Rays) hat die Terahertzstrahlung im englischen Sprachraum deshalb die Bezeichnung T-Rays (deutsch: Terawellen) gefunden. Es wird berichtet, dass ein Lebensmittelhersteller in den USA derzeit untersucht, ob THz-Strahlung nicht für die Kontrolle der korrekten Abfüllung von Lebensmittelpackungen eingesetzt

Durchleuchtung einer geschlossenen Streichholzschatel mit Terahertz-Strahlung



3 Links: Durch eine geschlossene Streichholzschatel hindurch mit Strahlung bei 0,5 THz aufgenommenes Transmissionsbild. Dunkle Farben bedeuten geringe THz-Durchlässigkeit. Rechts: Fotografie der offenen Streichholzschatel mit Darstellung des Bildausschnitts der THz-Aufnahme. Das THz-Bild wurde erzeugt, indem das Objekt mäanderförmig durch den Brennpunkt eines THz-Strahls bewegt wurde.

werden könne. Wieso wird hier keine Röntgenstrahlung eingesetzt? Der Grund hierfür liegt in der ionisierenden Wirkung und den sich daraus ergebenden möglichen gesundheitlichen Risiken der Röntgenstrahlung. Im Gegensatz zu dieser hat THz-Strahlung eine extrem niedrige Photonenenergie. Es besteht daher nicht die Gefahr, mit Hilfe von THz-Strahlung chemische Bindungen aufzubrechen und damit das untersuchte Material chemisch zu verändern. Da auch die Strahlleistung sehr niedrig ist – sie liegt im Nanowatt-Bereich –, erfolgt auch keine nennenswerte Erwärmung. Damit steht dem prinzipiellen Einsatz im Lebensmittelbereich nichts entgegen.

Noch Zukunftsmusik: Anwendung in der Biomedizin

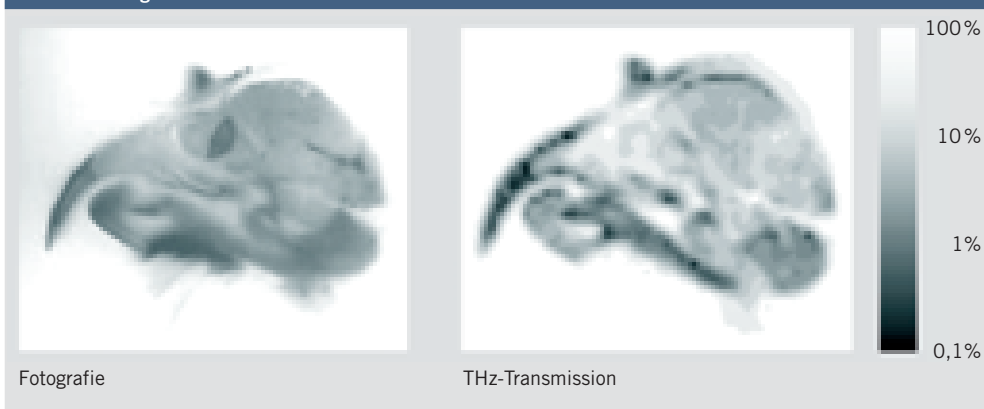
Aus diesen Gründen scheint die THz-Strahlung prädestiniert für Anwendungen im Bereich der Biomedizin zu sein. Leider sind hier aufgrund der starken Absorption durch das Wasser im Gewebe enge Grenzen gesetzt. Das Durchleuchten größerer Strecken von organischem, wasserhaltigem Material ist unmöglich. Allerdings sind Messungen an dünnen Proben ebenso möglich **4** wie Untersuchungen an Oberflächen und oberflächennahen Bereichen von Geweben. So wird zur Zeit in Großbritannien eine erste größere vorklinische Studie zur Diagnose von Hautkrebs durchgeführt. Auch Karies-Frühestadien in Zähnen wird man in Zukunft vielleicht mit Hilfe der THz-Reflektometrie identifizieren können. Spannend sind darüber hinaus Ansätze,

mit THz-Techniken die DNA-Analytik in der Gentechnologie zu verbessern oder neue Verfahren des Wirkstoff-Screenings in der Pharmazie zu entwickeln.

Vielversprechend: Berührungslose Sensorik und Anwendungen in den Materialwissenschaften

Näher an der praktischen Umsetzung dürften aber Anwendungen sein, die die radarähnlichen Eigenschaften der THz-Strahlung ausnutzen und auf Konzepte der Radartechnologie zurückgreifen können. THz-Strahlung hat eine viel kürzere Wellenlänge als die für Radar genutzte Hochfrequenzstrahlung. Sie ermöglicht damit eine bessere Ortsauflösung um den Preis einer geringeren Reichweite. THz-Strahlung eignet sich somit für die berührungslose hochauflösende Abtastung der Oberfläche von Objekten. Auf dieser Basis befassen wir uns beispielsweise mit der Analyse von Metalloberflächen. In Zusammenarbeit mit einem Wissenschaftler der Firma Nippon Steel, Japan, haben wir vor kurzem eine Methode gefunden, mit der millimetergroße, aber nur einige zehn Mikrometer tiefe beziehungsweise hohe Fabrikationsfehler an der Oberfläche von Walzstahl mit Hilfe von THz-Strahlung mit hoher Empfindlichkeit entdeckt werden können. Diese von Gas- oder Fremdstoffeinschlüssen herrührenden Oberflächendefekte müssen in der Produktion entdeckt werden, weil sie später die Angriffspunkte für Rost sein können. Versuche, Kameras, die mit sichtbarem Licht arbeiten, zu verwenden,

Durchleuchtung eines Gewebedünnschnitts



4 Die Abbildung zeigt die Transmission bei 1,0 THz durch einen drei Millimeter dicken Dünnschnitt eines dehydrierten Kanarienvogelkopfes eingebettet in Parafin-Wachs. Es handelt sich um eine archivierte Probe der Veterinärmedizin, Universität Gießen. Im Bild bedeuten dunkle Farben geringe THz-Durchlässigkeit. Das THz-Bild wurde erzeugt, indem das Objekt mäanderförmig durch den Brennpunkt eines THz-Strahls bewegt wurde.

scheiterten, weil die Stahloberflächen nach dem Walzprozess rau sind und das Licht stark streuen. Im Gegensatz dazu ist die THz-Strahlung blind für die Grundrauigkeit und »sieht« nur die Fabrikationsfehler der Werkstücke.

Eine andere Form der Materialanalyse, für die sich THz-Strahlung hervorragend eignet, ist die Durchleuchtung von Kunststoffen. In diesem Bereich findet sich auch der spektakulärste und kommerziell bisher größte Erfolg der praktischen Anwendung von THz-Strahlung. Er geht auf den Absturz des Space Shuttle Columbia der NASA (National Aeronautics and Space Administration) am 1. Februar 2003 zurück. Die wahrscheinlichste Ursache des Unglücks war Isolierschaum, der sich beim Start von den Booster-Raketen löste und mit hoher Geschwindigkeit auf den Flügel des Shuttles prallte. Dabei wurden offenbar Kacheln des Hitzschildes so stark geschädigt, dass das Shuttle beim Wiedereintritt in die Erdatmosphäre verglühte. In der Folgezeit suchte die NASA nach Methoden, mit denen die Verklebung des

Isolierschaums zuverlässig überprüft werden kann. Es zeigte sich, dass die Durchleuchtung der Isolations-schicht mit THz-Strahlung für die Fehleranalyse besonders gut geeignet ist. Auch in der immer wichtiger werdenden Sicherheitstechnik kann die THz-Forschung Beiträge liefern. So ist Kleidung im Gigahertzbereich und bei niedrigen THz-Frequenzen genügend transparent, um Waffen zu detektieren. Sogar bestimmte Sprengstoffe und Drogen in Briefen und Verpackungen lassen sich mit THz-Spektroskopie identifizieren.

Das Hauptproblem, mit dem die Anwendung von THz-Strahlung zu kämpfen hat, ist die geringe Strahlleistung. Die Ausgangsleistungen von kompakten THz-Quellen reichen nicht aus, um Objekte großflächig zu durchleuchten. THz-Bilder werden daher rasternd, Pixel für Pixel, aufgenommen, wenn man nicht auf sehr große, raumfüllende Maschinen zurückgreift.

In den letzten Jahren haben sich die Entwicklungen in der THz-Forschung aber sehr beschleunigt, was nicht zuletzt auf die zunehmende Kooperation über die Fachgrenzen

hinweg zurückzuführen ist. Bisheriger Höhepunkt und zugleich Anstoß für zahlreiche neue Aktivitäten war ein Durchbruch, den ein Forscherteam aus Pisa und Cambridge vor zwei Jahren erzielte: Ihnen gelang unter Verwendungen des so genannten Quantenkaskadenprinzips die Realisierung eines leistungsfähigen und kompakten THz-Halbleiterlasers. Obwohl solche Laser noch auf tiefe Temperaturen gekühlt werden müssen, um funktionstüchtig zu sein, besteht die Hoffnung, bald bei Raumtemperatur arbeiten zu können. Neben dem Quantenkaskadenlaser gibt es noch einige andere interessante Ansätze zur Erzeugung intensiver THz-Strahlung bei Raumtemperatur. Wir selbst verfolgen in enger Kooperation mit Kollegen der TU Darmstadt ein Mischkonzept, bei dem ein Hochleistungs-Halbleiterlaser auf zwei Farben läuft und diese Strahlung im Laser selbst durch Mischprozesse in THz-Strahlung konvertiert wird.

Der Zukunft kann man mit Spannung entgegen sehen. Die THz-Forschung und die daraus entstehenden Anwendungsmöglichkeiten haben heute einen Stand erreicht wie die Laserphysik und -technologie vor etwa 25 Jahren. In diesem Stadium bietet die THz-Forschung stimulierende Möglichkeiten gerade für das universitäre Umfeld, da Grundlagenforschung und anwendungsorientierte Forschung noch Hand in Hand gehen und die Chance besteht, mit Erkenntnisfortschritten Türen zu neuen Anwendungen in den verschiedensten Disziplinen aufzustoßen. Ein englischer Kollege, der vor einigen Jahren neu zur THz-Forschung stieß und heute eine führende Rolle darin spielt, umschrieb diesen Reiz des Arbeitsgebiets mit den Worten: Hier bietet sich die einmalige Gelegenheit, an der Erschließung des letzten brachliegenden Bereichs des elektromagnetischen Spektrums teilzuhaben. ♦

Die Autoren

Prof. Dr. Hartmut Roskos studierte in Karlsruhe und München Physik. Nach der Promotion an der Technischen Universität München und Zwischenstationen bei den AT&T Bell Laboratories, USA, und der RWTH Aachen wurde er 1997 Professor für Physik in Frankfurt. Seine Arbeitsgruppe befasst sich neben der THz-Physik und -Technologie mit der Femtosekunden-Laserspektroskopie von Festkörpern.

Dr. Torsten Löffler studierte von 1990 bis 1996 Physik an der RWTH Aachen und der Universität Liverpool. Nach einer dreijährigen Industrietätigkeit promovierte er an der Universität Frankfurt über die Erzeugung von THz-Strahlung aus lasererzeugten Gasplasmen. Zur Zeit beschäftigt er sich als Post-Doktorand in der Arbeitsgruppe von Hartmut Roskos mit Anwendungen und Systemen der optoelektronischen THz-Technologie.