

Kompakte Strahlungsquellen erschließen Marktpotenzial:

## Terahertz-Strahlung entgeht nichts

S. Hoffmann  
M. Hofmann



**Die Terahertz-Kamera macht Unsichtbares sichtbar - wie hier das Messer, das der Passagier (Bild links) mit einer Zeitung verdeckt. Die Technik soll nun Flughäfen sicherer machen. Während solche Überwachungssysteme derzeit heftig diskutiert werden, fehlen kleine, kompakte und preiswerte Geräte, etwa für die Krebs- oder Kariesvorsorge, oder um im Supermarkt einfach mal schnell die Haltbarkeit von Lebensmitteln durch die Verpackung hindurch zu prüfen. Dem sind Forscher nun einen entscheidenden Schritt näher gekommen.**

*Dipl.-Phys. Stefan Hoffmann, Prof.  
Dr. Martin Hofmann, Fakultät für  
Elektrotechnik und Informations-  
technik, AG Optoelektronische Bau-  
elemente und Werkstoffe der Elektro-  
technik in Kooperation mit der Fir-  
ma photonIQ  
([www.photonIQ.de](http://www.photonIQ.de))*

Fotografie, Film und Fernsehen verändern unser Bild von der Welt. Ohne bildgebende Verfahren wäre etwa die moderne medizinische Diagnostik nicht vorstellbar. Dabei spielt die Röntgenstrahlung neben Ultraschall und kernmagnetischer Resonanz nach wie vor die wichtigste Rolle. Den technischen Möglichkeiten bei der Abbildung mit Röntgenstrahlen sind kaum Grenzen gesetzt, doch die ionisierende Wirkung dieser hochenergetischen Strahlung stellt ein Gesundheitsrisiko dar. Wünschenswert wären ähnlich leistungsstarke Abbildungsverfahren, die gesundheitlich unbedenklich und möglichst auch noch kostengünstig sind. Alternativen zur Röntgenstrahlung haben Forscher bisher nur in einem kleinen Teil des elektromagnetischen Spektrums gesucht und vor allem den sog. „Terahertz (THz)-Bereich“ zwischen Infrarotstrahlung, wie sie etwa bei einer Fernbedienung zum Einsatz kommt, und den Mikrowellen vernachlässigt (s. Abb. 2). Schwache Anteile von „THz-Strahlung“ enthält auch die Wärmestrahlung des menschlichen Körpers. Um den für technische Anwendungen interessanten Frequenz-Bereich zu nutzen, fehlten jedoch lange Zeit geeignete

Strahlungsquellen. Durch den technologischen Fortschritt des letzten Jahrzehnts rücken nun auch bildgebende THz-Systeme in greifbare Nähe: Anfang der 90er Jahre wurde ein neuer Lasertyp entwickelt, der extrem kurze, nur wenige Femtosekunden dauernde Lichtblitze aussendet. Eine Femtosekunde ist eine unvorstellbar kleine Zeit, die den millionstel Teil einer milliardstel Sekunde beträgt ( $10^{-15}$  s). Im Verhältnis zu einer Sekunde ist eine Femtosekunde wie zwei Minuten im Vergleich zum Alter unseres Sonnensystems (ca. 4 Mia. Jahre). Dass diese Laser mit jedem Lichtblitz die Leistung eines kleinen Windkraftwerks liefern, macht sie besonders interessant. Diese leistungsfähige Lasertechnik hat THz-Anwendungen realisierbar gemacht, die vorher undenkbar waren. Inzwischen liefern Laborexperimente mit dieser Technologie bestechende Abbildungen verschiedenster Objekte. Vielversprechend sind dabei vor allem biologische und medizinische Anwendungen (s. Info 1). Da Wasser die THz-Strahlung sehr stark absorbiert, ist es möglich, mit ihr den Feuchtigkeitshaushalt von Pflanzen oder der menschlichen Haut zu analysieren. Auf der Hand liegt da

## info <sup>1</sup>

### Halbleiterlaser für die biomedizinische Bildgebung

In der Arbeitsgruppe Optoelektronische Bauelemente und Werkstoffe stehen Halbleiterlaser im Zentrum der Forschung. Dabei interessieren ebenso materialwissenschaftliche Fragestellungen - etwa die Suche nach neuen Halbleitermaterialien für Laserdioden in der Telekommunikation - wie komplexe physikalische Effekte in Halbleiterlasern oder die Erschließung neuer Anwendungsfelder für diese Laser. Neben der Bildgebung mit THz-Strahlung erforscht die Arbeitsgruppe derzeit hochauflösende dreidimensionale optische Abbildungsverfahren wie die optische Kohärenztomographie (OCT: Optical Coherence Tomography) und die zeitaufgelöste Holographie. Beide Verfahren versprechen vielfältige neue Anwendungen in der biomedizinischen Bildgebung, z.B. bei der Früherkennung und sicheren Diagnose von Hautkrebs.

streichen das enorme Potenzial der THz-Strahlung (engl.: Terahertz-Imaging) als Alternative oder als Ergänzung zur gesundheitsgefährdenden Röntgenstrahlung. Hinzu kommen neben Überwachungs- bzw. Durchleuchtungssystemen für die Passagier-Luftfahrt (s. Abb. 1) weite-

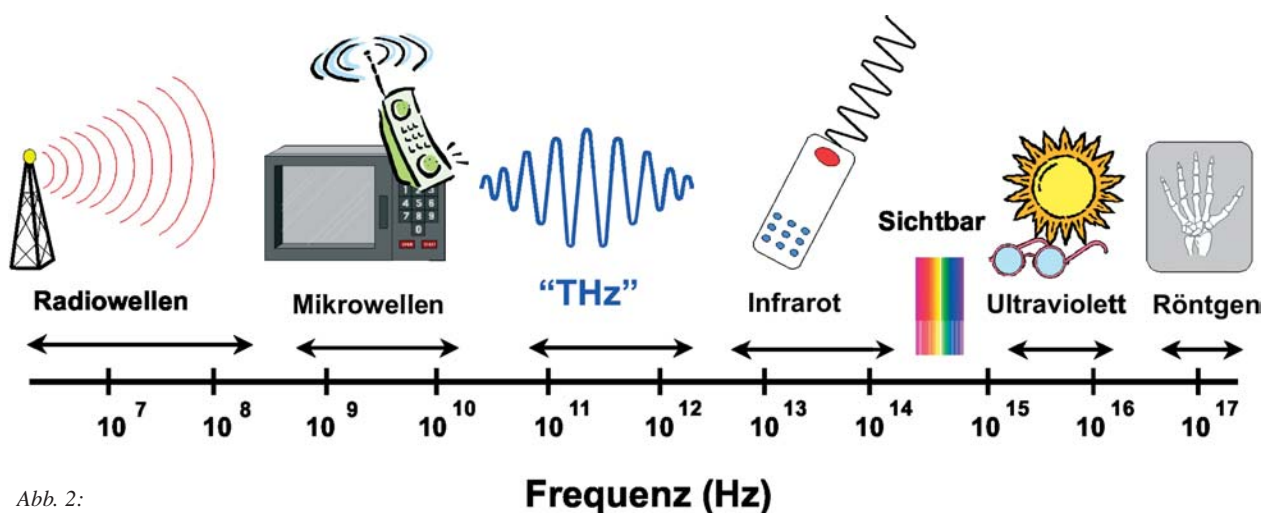


Abb. 2: Terahertz-Strahlung im Mittelfeld des elektromagnetischen Frequenzspektrums: Während es zahlreiche Anwendungen im elektrischen und optischen Spektralbereich gibt, ist der sog. Terahertz-Bereich zwischen 100 Gigahertz ( $10^{11}$  Hz) und 10 Terahertz ( $10^{13}$  Hz) bisher kaum erschlossen.

das Interesse der Kosmetikindustrie an dieser Technologie. Wissenschaftler der Universität Cambridge demonstrierten den Einsatz dieser unschädlichen Strahlung für die Hautkrebs-Diagnose bereits am Patienten. Zahlreiche Studien unter-

re Konzepte der Sicherheitstechnik, wie die Kontrolle von Treibstofftanks auf verborgene Risse – die etwa zum Absturz der Raumfähre Columbia führten. Vielversprechende Anwendungen zeichnen sich für die Messtechnik in Biologie, Chemie und Phy-

sik ab: Denn auch die hochkomplexe Molekül-Dynamik – die sich in Schwingungs- und Rotationsresonanzen zeigt – spielt sich im THz-Frequenzbereich ab. Ein enormes Marktpotential verspricht die Technologie auch für die Produktkontrolle, sind doch Papier und viele Verpackungsmaterialien durchlässig für THz-Strahlen. So ließen sich Produkte durch die verschlossene Verpackung hindurch kontrollieren, etwa die Qualität von Lebensmitteln.

Das Potenzial der THz-Technologie hat auch die Industrie erkannt und in den letzten Jahren verschiedene THz-Spektroskopie-Systeme auf den Markt gebracht. All diese Systeme arbeiten mit breitbandiger THz-Strah-

lung auf der Basis von Femtosekunden-Lasern. Obwohl sie extrem leistungsfähig sind, stehen dem Durchbruch dieser Technologie hin zur Massenanwendung die hohen Herstellungskosten im Wege. Aufgrund der extrem teuren Femtosekundenlaser kostet ein komplettes Spektroskopiesystem derzeit etwa 250.000 Euro.

### **Laserdiode: die preiswerte Alternative**

Erst mit einer ähnlich effizienten, aber wesentlich kostengünstigeren Strahlungsquelle werden sich die vielversprechenden neuen Märkte erschließen lassen. Weltweit beschäf-

tigen sich daher viele Forscher mit alternativen Entwicklungen. Die preiswertesten Laser sind Laserdioden, die als Bauelemente etwa für CD-Spieler in hohen Stückzahlen produziert werden und nur wenige Euro kosten (s. Info 2). Um mit ihnen THz-Strahlung zu erzeugen, wird folgendes Prinzip verwendet (Abb. 3): Es erfordert zwei fast identische Laserdioden, die sich in ihren ausgesendeten Lichtfrequenzen nur geringfügig unterscheiden. Der Frequenzunterschied wird so eingestellt, dass die Differenzfrequenz im THz-Bereich liegt. Indem die beiden Lichtfelder dann überlagert werden, entsteht eine sog. Schwebung (Überlagerung) mit der Differenzfrequenz (s. Abb. 3). THz-

## info <sup>2</sup>

### **Ein Laser so groß wie ein Sandkorn**

Laser sind aus vielen Bereichen der modernen High-Tech-Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Ihre Einsatzgebiete reichen von der Materialbearbeitung, etwa dem Schweißen von Blechen in der Automobilindustrie, über moderne Datenkommunikation via Glasfaser bis hin zu anspruchsvollster Messtechnik, wie sie beim Studium extrem schneller Prozesse mit aufwendigen Titan-Saphir-Lasern eingesetzt wird. Während solche Lasersysteme extrem komplex und teuer sind - ein Titan-

Saphir-Laser kostet etwa 100.000 Euro, besteht aus unzähligen präzise justierten Optikkomponenten und nimmt etwa die Fläche eines Schreibtischs ein - kosten Halbleiter-Laserdioden nur wenige Euro und finden sich heute in fast jedem modernen Haushalt (z.B. in CD-Spielern, DVD-Laufwerken). Halbleiter-Laserdioden sind extrem kompakt - der eigentliche Laser ist so groß wie ein Sandkorn (s. Abb.) - und bestehen aus perfekt auf die jeweilige Anwendung abgestimmten Halbleitereinkristallen. Mithilfe

moderner Herstellungsverfahren wie der Molekularstrahlepitaxie lassen Forscher die Kristalle Atomlage für Atomlagewachsen. Durch gezielte Verunreinigung (Dotierung) der Kristalle erhält man gleichrichtende Halbleiterdioden (p-n-Übergang), die Licht aussenden, wenn eine Spannung in der richtigen Richtung (Durchlassrichtung) angelegt wird. Die gewünschte Wellenlänge des Lichtes bestimmt das Halbleitermaterial, das auf die jeweilige Anwendung genau abgestimmt werden kann. In dieser Flexibilität, in ihrer Kompaktheit und in dem einfachen Betrieb mit einer kleinen Batterie liegt der große Vorteil von Halbleiter-Laserdioden. Daher werden ständig neue Materialien entwickelt und neue Strukturen für weitere Anwendungsfelder entworfen. Besonders interessant sind Halbleiterlaser, die in bislang nicht erschlossenen Spektralbereichen emittieren. So suchen Forscher seit einiger Zeit schon nach grünen Halbleiterlasern, die mit den etablierten blauen und roten Halbleiterlasern neue Anwendungen bis hin zum Laserfernsehen versprechen.



*Winzig klein ist die Laserdiode, die den Infrarotstrahl aussendet. Sie wurde hier in ein serienmäßiges Modul eingebaut, wie es etwa in CD-Playern zum Einsatz kommt (Größenvergleich: Reiskorn, rechts)*

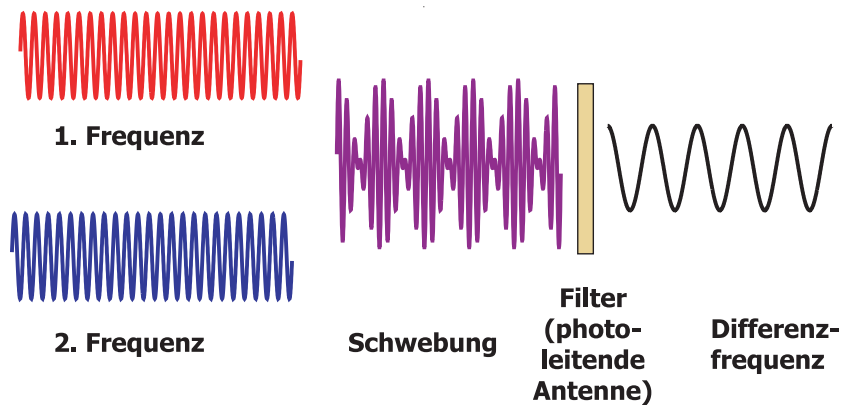


Abb. 3: Photomischung - das Prinzip: Zwei Laserdioden unterscheiden sich in ihren ausgesendeten Lichtfrequenzen nur geringfügig voneinander. Die beiden Lichtfelder werden überlagert und es entsteht eine sog. Schwebung mit der Differenzfrequenz. Das Schwebungssignal wird auf eine photoleitende Antenne gelenkt, wo dann THz-Strahlung entsteht.

Strahlung entsteht aber erst, wenn das schnell schwingende Lichtfeld in Abb. 3 (violett) entfernt und nur die Schwebungsfrequenz (einhüllende Kurve) abgestrahlt wird. Dazu leitet man das Schwebungssignal auf eine so genannte photoleitende Antenne (s. Info 3). Das als Photomischung bezeichnete Konzept ist deutlich einfacher und kostengünstiger als das auf Basis von Femtosekundenlasern. Doch damit beide Laserdioden die gewünschte Differenzfrequenz auch exakt einhalten, ist immer noch ein hoher Aufwand nötig. Zudem ist es schwierig, die beiden Laserstrahlen so genau zu überlagern, dass sie auf einen winzigen Punkt auf der Antenne fokussiert werden können. Die hierzu notwendigen optischen Komponenten machen das System komplexer und erhöhen die Kosten beträchtlich.

### Zwei-Farben-Diodenlaser: „Zwei in Einem“

Mit zwei anderen Ansätzen wollen wir stark vereinfachte, kostengünstige Strahlungsquellen entwickeln, mit denen sich das Marktpotenzial der THz-Technologie erschließen lässt. Beide Ansätze basieren auf Laserdioden, wobei das eine Konzept anstelle von zwei aufwendig aufeinander stabilisierten Laserdioden auf einem von uns entwickelten Zwei-Farben-Diodenlaser beruht. Der zweite Ansatz reicht noch weiter: Auf die photoleitende Antenne zur Erzeugung der THz-Strahlung wurde ganz verzichtet, um unser System noch

mehr zu vereinfachen. Konzept 1: Der Vorteil unseres Zwei-Farben-Diodenlaser besteht darin, dass er gleichzeitig zwei perfekt räumlich überlagerte Wellenlängen aussendet. Das System wird auf diese Weise kompakter, wesentlich einfacher und preisgünstiger als Lichtquellen, die auf zwei separaten Lasern beruhen. Wir betreiben eine herkömmliche Laserdiode in einem externen Resonator (s. Abb. 4 u. 5), der das von der Laserdiode ausgestrahlte (emittierte) Licht kontrolliert. Er ist so eingerichtet, dass die Laserdiode

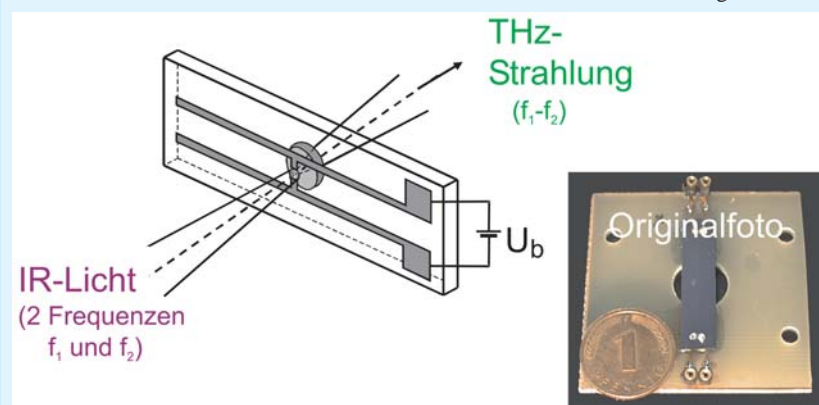
nur zwei vorbestimmte Lichtfrequenzen emittieren kann. Den Abstand dieser Frequenzen – die Differenzfrequenz – können wir mechanisch zwischen 0,08 und 10 THz verstellen. In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Martin Koch und Mitarbeitern von der TU Braunschweig haben wir die Zwei-Farben-Laserdiode als THz-Strahlungsquelle eingesetzt und das weltweit erste Bildgebungssystem mit THz-Strahlung einer einzigen Frequenz realisiert (s. Abb. 6). Diese kontinuierliche Strahlung ist besser handhabbar als die Lichtblitze des

## info<sup>3</sup> für insider

### Photomischung mit photoleitender Antenne

Eine photoleitende Antenne, die kontinuierlich THz-Strahlung erzeugt, besteht aus einem Halbleitermaterial, auf das zwei Goldleitungsbahnen aufgebracht werden. An einer genau definierten Stelle sind beide Bahnen nur wenige Mikrometer voneinander entfernt (s. Abb.). Auf diese Stelle wird infrarotes Licht mit zwei, leicht gegeneinander verstimmt Frequenzen fokussiert, es entsteht ein Schwebungssignal im THz-Bereich. Im Halbleitersubstrat werden durch die Strahlung freie Ladungsträger erzeugt, die sehr schnell wie-

der eingefangen werden. Die Ladungsträgerdichte ist stets proportional zur Lichtintensität. Zwischen den Elektroden wird ein elektrisches Feld angelegt, das die Ladungsträger zu den Elektroden hin beschleunigt. Es entsteht ein Ladungsträgerstrom zwischen den Elektroden. Da die Lichtintensität durch das Schwebungssignal im THz-Bereich moduliert wird, entsteht auch ein Wechselstrom mit THz-Frequenzen. Durch diesen Wechselstrom wird ein elektromagnetisches Feld im THz-Bereich, das heißt THz-Strahlung emittiert.



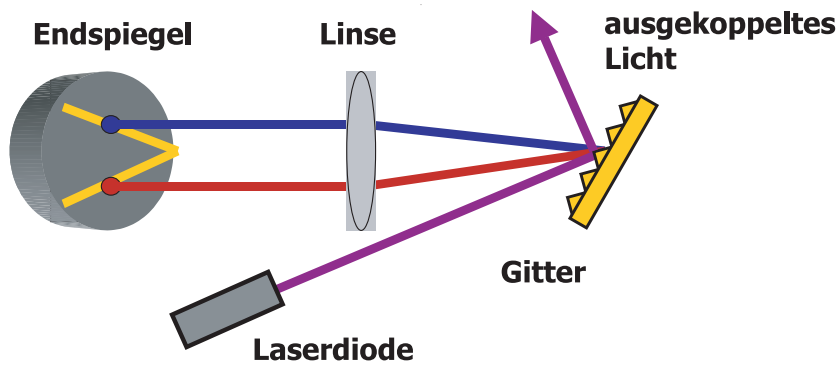


Abb. 4:  
Zwei-Farben-Diodenlaser - das Prinzip: Das von der Laserdiode kommende Licht setzt sich aus vielen Frequenzen zusammen, die durch ein Beugungsgitter in unterschiedliche Raumrichtungen gelenkt werden. Eine Linse fokussiert zunächst das gesamte abgebeugte Licht auf den Endspiegel, der so strukturiert ist (s. Abb. 5), dass er nur zwei Wellenlängen (blaue und rote Linie) in die Laserdiode zurück reflektiert. Dort werden sie verstärkt und am Gitter aus dem Resonator ausgekoppelt. Die violette Linie stellt die beiden überlagerten Wellenlängen dar.

Femtosekundenlasers (gepulste Strahlung). Der Zwei-Farben-Laser fokussiert die beiden überlagerten Lichtfrequenzen auf eine photoleitende Antenne, wo aus dem Schwingungssignal die THz-Strahlung erzeugt wird. Parabolspiegel fangen die Strahlung auf und leiten sie auf die zu untersuchende Probe. Die durch die Probe hindurchgelassene Strahlung (Transmission) detektiert ein so genanntes Bolometer. Durch Abrastern der Probe entsteht schließlich ein Terahertz-Transmissionsbild (s. Abb. 7, rechts).

Mit dem neuen bildgebenden System haben wir eine mit Metastasen durchsetzte, menschliche Leberprobe untersucht, die zuvor nach dem Standardverfahren präpariert wurde: Die Probe (Proteinstruktur) wurde in Formalinlösung fixiert, in Alkohol und Xylol dehydriert und schließlich in Paraffin eingegossen. Ein daraus geschnittener Block von 50 x 40 x 4 mm Größe diente als Probe, die im Imaging-System abgerastert (Abtastschrittweite: 0,5 mm) das THz-Bild ergab. Darin heben sich die Tumore als dunkelblaue Flecken reduzierter Transmission deutlich vom normalen Gewebe ab. Das Transmissionsbild zeigt aber auch Strukturen, die im herkömmlichen mikroskopischen Schnittbild (links) nicht zu erkennen sind. THz-Imaging liefert demzufolge zusätzliche Informationen, die der weiteren Klärung insbesondere in Kooperation mit der Medizin bedürfen. Unser Modellsystem soll zunächst die Funktionsfähigkeit dieses einfachen THz-Systems für biomedizinische Anwendungen demonst-

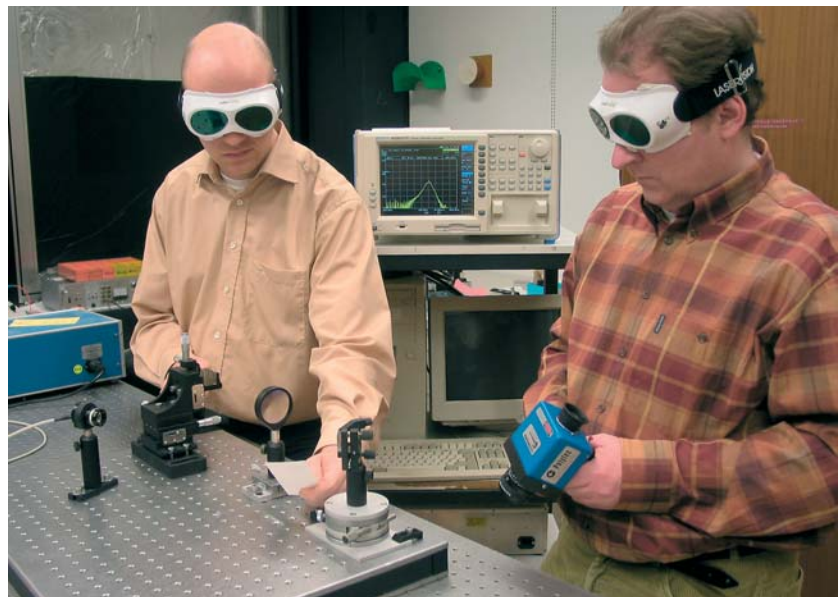
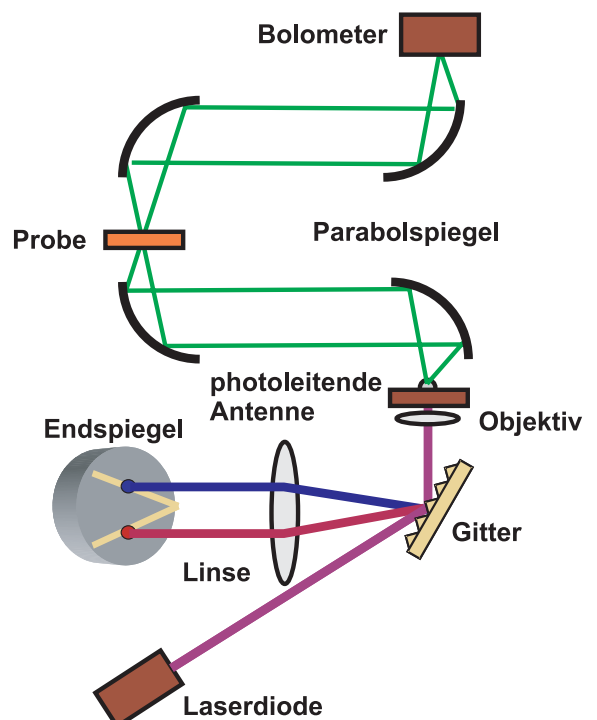


Abb. 5: Im Labor testen Dipl.-Phys. Stefan Hoffmann (links) und Prof. Dr. Martin Hofmann (rechts) ihren Zwei-Farben-Diodenlaser.

Abb. 6:  
Das weltweit erste Bildgebungssystem mit THz-Strahlung einer einzigen Frequenz (kontinuierliche Strahlung). Im Imaging-Aufbau werden die beiden überlagerten Lichtfrequenzen auf eine photoleitende Antenne fokussiert, wo aus dem Schwingungssignal die Terahertz-Strahlung entsteht. Parabolspiegel fangen die Strahlung auf und leiten sie auf die zu untersuchende Probe.



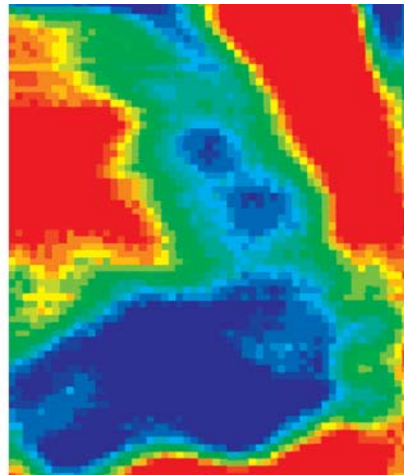
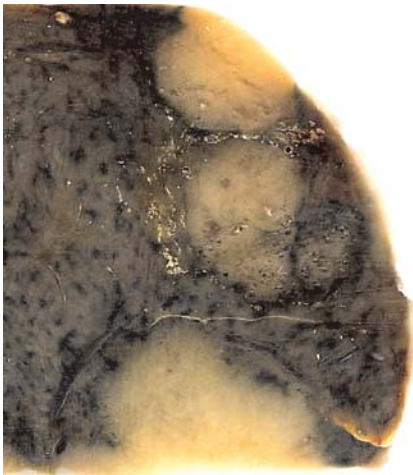


Abb. 7:  
Eine mit Metastasen durchsetzte menschliche Leberprobe (rechts) untersucht mit dem Imaging-System: Die Tumore heben sich als dunkelblaue Flecken deutlich vom normalen Gewebe ab. Das Transmissionsbild liefert zusätzliche Informationen - Strukturen, die im herkömmlichen mikroskopischen Schnittbild (links) nicht zu erkennen sind.

rieren und spätere in-vivo Messungen vorbereiten. Die komplette THz-Lichtquelle mit dem Zwei-Farben-Diodenlaser findet in zwei Schuhkartons Platz und kann schon mit etwa 25.000 Euro realisiert werden. Die Kosten ließen sich bei Optimierung des Systems etwa durch mikrooptische Integration von Zweifarbenlaser und THz-Antenne auf deutlich unter 10.000 Euro reduzieren. Damit wird die THz-Messtechnik für industrielle und medizinische Aufgabenstellungen interessant, die bisher mit anderen Verfahren wie Videokameras, Röntgenstrahlung und mechanischen Instrumenten gelöst wurden.

## Terahertz-Strahlung direkt aus der Laserdiode

Es ist sogar noch eine weitere Kostenreduktion möglich. Wir haben festgestellt, dass in der Laserdiode selbst Prozesse stattfinden, aufgrund derer THz-Strahlung direkt aus der Laserdiode ausgesendet wird. Auf dieser Entdeckung beruht unser zweites Konzept, an dem wir derzeit intensiv arbeiten. Noch ist die Strahlungsintensität nicht so stark wie bei Verwendung einer photoleitenden Antenne. Der Laser selbst absorbiert den größten Teil der Strahlung wieder. Weitere Entwicklungsschritte sind nötig, um auf die Antenne letztlich ganz zu verzichten. Unsere THz-Strahlungsquelle ist derzeit die kompakteste, die auf einer einzigen THz-Frequenz und bei

Raumtemperatur arbeitet. Im internationalen Wettbewerb konkurriert sie mit verschiedenen anderen Konzepten: Forscher an den Bell Laboratorien in New Jersey USA haben vor Jahren einen neuen Halbleiterlaser, den Quantenkaskadenlaser, entwickelt. Darauf aufbauend demonstrierte inzwischen eine Forschergruppe in Pisa einen Quantenkaskadenlaser, der Strahlung im THz-Bereich erzeugt. Allerdings muss dieser Laser mit aufwendigen und teuren Kryostaten extrem stark gekühlt werden, da er nicht bei Raumtemperatur betrieben werden kann.

Das gilt auch für ein weiteres Alternativ-Konzept, den Germanium-La-

ser. Dieser Halbleiterlaser sendet deutlich intensivere THz-Strahlung als unser System aus, muss aber ebenfalls mit einem Kryostaten gekühlt werden. Der p-Germanium-Laser wurde von Dr. Bründermann aus dem Team von Prof. Dr. Martina Havenith-Newen (Lehrstuhl für Physikalische Chemie) mitentwickelt und ist damit für uns auch eine lokale Herausforderung. Der konstruktive Wettbewerb und das wachsende Interesse weiterer Forschergruppen unserer Universität (s. Info 4) machen uns sicher: Die Ära der THz-Technologie hat in Bochum gerade erst begonnen.

## info 4

### Kooperationen: THz-Technologie verbindet

Die nun realisierbaren THz-Strahlungsquellen eröffnen zahlreiche neue Kooperationsmöglichkeiten. Allein an der Ruhr-Universität gibt es inzwischen Forschungskontakte und Kooperationen zu einer Reihe anderer Fakultäten: Die engste Kooperation besteht zwischen der Arbeitsgruppe Optoelektronische Bauelemente und Werkstoffe und dem Lehrstuhl Physikalische Chemie II (Prof. Dr. Martina Havenith-Newen, Dr. Erik Bründermann). Hier interessieren neben dem Vergleich der THz-Systeme beider Gruppen vor allem spektroskopische Untersuchungen an Molekülen und Halbleitern. Auch für die Plasmaforschung (Lehrstuhl Anwendungsorientierte Plasmaphysik, Prof. Dr. Jörg Winter) könnte THz-Strahlung interessant sein, etwa um Mikropartikel in Plasmen zu vermessen oder um mit Plasmen sterilisierte Oberflächen zu charakte-

risieren (Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik und Plasmatechnik, Prof. Dr.-Ing. Peter Awakowicz). Das große Potenzial des THz-Imaging für biomedizinische Bildgebung stellt die Verbindung zur Medizintechnik her: Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik (Prof. Dr.-Ing. Helmut Ermert), Lehrstuhl für Medizintechnik (Prof. Dr. Georg Schmitz), Kompetenzzentrum Medizintechnik Ruhr (KMR), Universitätszentrum Medizintechnik. Die Herstellung von Halbleiterstrukturen für THz-Strahlungsquellen ist eine große Herausforderung, der sich Dr. Dirk Reuter am Lehrstuhl für Angewandte Festkörperphysik (Prof. Dr. Andreas Wieck) stellt. Auch in der Astrophysik (Lehrstuhl für Astrophysik, Astronomisches Institut, Prof. Dr. Rolf Chini) spielt die THz-Strahlung eine wichtige Rolle beim Verständnis der Vorgänge im Weltall.