

Science und Fiktion mit Terahertz-Licht

Erik Bründermann

Neue Quellen zur Erzeugung von elektromagnetischen Wellen im Terahertz-Bereich führen zu ersten Anwendungen der Terahertz-Technik in Spektroskopie, Astronomie, Mikroskopie und Sicherheitstechnik (siehe dazu die Umschau-Meldung in CLB 12/2002, Seiten 465 und 466). Dieser Artikel erläutert verständlich die Grundlagen und stellt erste Anwendungen vor.

Sternzeit: 51781,2 - Die Sensoren des Raumschiffs Voyager detektieren die Resonanzfrequenz des Omega-Moleküls von 1,68 Terahertz. Das Schiff schaltet in den Omega-Modus. Captain Janeway erhält die Omega-Direktive zur Vernichtung des Moleküls, da das im Jahr 2274 erstmals von dem Sternenflotten-Physiker Ketteract synthetisierte Omega-Molekül instabil ist und beim Zerfall den Subraum zerstört.

Szene in der Sickbay - Der außerirdische Wissenschaftler ALLOS im Gespräch mit dem Borg 7-OF-9:

*7-OF-9: Wieviele Moleküle konnten Sie synthetisieren?
ALLOS: etwa 200 Millionen.*

7-OF-9: Welche Iso-Frequenz benutzen Sie für Ihr Kraftfeld?

ALLOS: 1.68 THz - wir benutzten die Resonanz des Moleküls, um das Feld zu berechnen.

7-OF-9: Das hätte ausreichen müssen, um sie zu stabilisieren.

ALLOS: Offenbar nicht.

7-OF-9: Offenbar! - Aber Ihr Ansatz ist innovativ; vielleicht kann ich Ihre Techniken adaptieren und sie verbessern. (StarTrek Voyager, 1998 [1])

Noch ist es Science-Fiction, dass wir mit Hilfe von Terahertz Wellen komplexe, neue Moleküle synthetisieren und diese in einer Kammer in Videoqualität bei der Bildung beobachten können. Innovative Ansätze in den letzten Jahren haben aber dazu geführt, dass Terahertz Technologien die ersten Schritte aus den Laboren in den Alltag machen. Die Forschung im Terahertz Frequenzbereich (10^{12} Hz = THz, siehe Abbildung 2) hat daher seit Kurzem ein großes Medienecho erhalten [2,3] aufgrund möglicher Anwendungen von THz-Licht

Der Autor

Dr. Erik Bründermann ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl von Prof. Martina Havenith, Ruhr-Universität Bochum, Physikalische Chemie II, AG Laserspektroskopie und Biophotonik. Seine Forschungsinteressen sind THz und Infrarotlaser-Mikrospektroskopie und medizinische Bildgebung. Er arbeitet seit 15 Jahren mit THz Technologien, u.a. am MPI für Radioastronomie, DLR, Center for Advanced Materials und Center for Particle Astrophysics (Berkeley). Er patentierte im Jahr 2000 einen THz Halbleiterlaser für die hochauflösende Molekülspektroskopie.



Abbildung 1: Das Omega-Molekül, StarTrek Voyager „Die Omega-Direktive“.

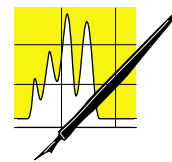
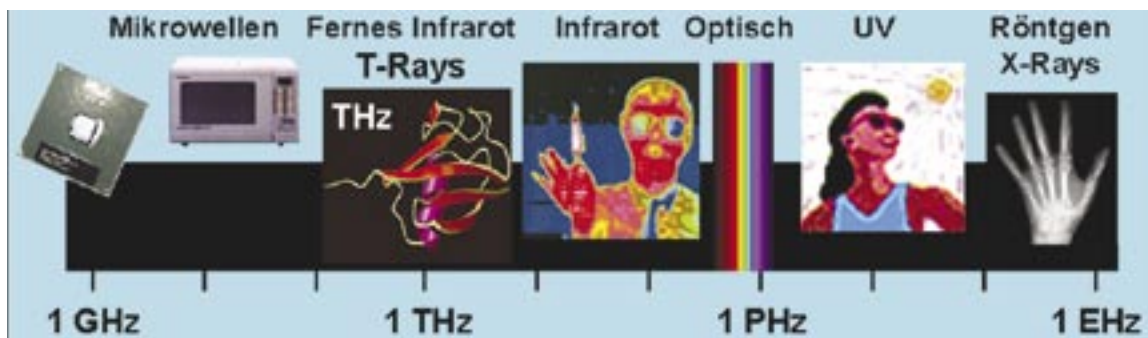
in der Medizin und Flugsicherheit. Computer im Takt von einigen Gigahertz (10^9 Hz = GHz) sind bereits in Supermärkten erhältlich und die Schaltgeschwindigkeit elektronischer Bauelemente nimmt weiter zu. Bereits Ende 2001 stellte Intel einen nanostrukturierten „Terahertz Transistor“ vor [4]. Schaltgeschwindigkeiten von 2,3 THz und mehr wurden bereits erreicht. Firmen wie Intel und AMD prognostizieren die ersten Computerchips mit THz-Transistoren ab 2007. Sprechende Computer kleiner als eine Streichholzschachtel könnten damit Realität werden. Dieser Aufsatz beschäftigt sich insbesondere mit THz-Licht und dessen Anwendungsmöglichkeiten.

Spektroskopie

Robert Wilhelm Bunsen, Chemiker und Physiker (1811-1899), und Gustav Kirchhoff, Physiker und Mathematiker (1824-1887), sind wichtige Mitbegründer der modernen Spektroskopie. Darüber hinaus sind sie ein Paradebeispiel für erfolgreiche interdisziplinäre Forschungen – nachzulesen in ihren Arbeiten „Chemische Analyse durch Spectralbeobachtungen“ (1860) und „Abhandlungen über Emission und Absorption“ (1859-1862). Bunsen und Kirchhoff fanden heraus, dass Stoffe wie das chemische Element Natrium in der Flamme einer Bunsen'schen Gaslampe (Bunsen-Brenner) charakteristische Farben emittieren, die mit einem Prisma in zwei scharfe gelbe Linien separiert werden können.

Heute wissen wir, dass die Elektronenstruktur der Atome jedes chemischen Elements charakteristische Linien verursacht. Ein Photon im optischen Spektralbereich wird absorbiert, wenn ein Elektron in einen angeregten Zustand übergeht. Diese Übergänge sind diskret, wie es in der Quantentheorie beschrieben wird. Sie führen zu scharfen Linien. Da das Linienmuster in Anzahl, Form und Intensität für jedes Element charakteristisch ist, hat sich der Begriff des „spektralen Fingerabdrucks“ eingebürgert.

In einem Molekül können die Atomkerne zusätzlich schwingen und rotieren. Moleküle können auch untereinander binden. Diese Wechselwirkung hält Molekü-



AUFSÄTZE

Abbildung 2: Das elektromagnetische Spektrum

le zusammen ohne eigentliche „chemische“ Bindung. Sie wirkt intermolekular – „zwischen“ den Molekülen. Intermolekulare Bindungen bewirken viele Phänomene des Alltags: die Stabilität von Seifenblasen, die Bildung von Wassertropfen [5], dass Geckos an der Decke laufen können [6], die Form von Eiskristallen [7] und vieles mehr. Ein Spezialfall ist die Wasserstoffbrückenbindung. Sie ist stark gerichtet und führt zur Bildung von Strukturen wie Helices in DNA und Proteinen. Die schwächeren intermolekularen Bindungen sind trotzdem bei Zimmertemperatur teilweise stabil und können mit geringem Energieaufwand gelöst werden. Sie sind daher in der Biologie essentiell: Sie garantieren einerseits die Stabilität einer Doppelhelix, ermöglichen aber andererseits die Replikation des genetischen Codes.

Schwingungen und Rotationen sind ebenso charakteristisch für die gebundenen Elemente und die Struktur. Stark vereinfacht können wir eine Molekülschwingung visualisieren, indem wir zwei Körper mit einer bestimmten Masse durch eine Feder verbinden, wobei die Feder die Bindung repräsentiert. Die Frequenz einer Schwingung wird reduziert, wenn die Feder- bzw. Kraftkonstante klein wird. In Analogie entspräche dies einer schwachen intermolekularen Bindung durch Wasserstoffbrücken und van-der-Waals Wechselwirkungen. Die Frequenz einer Schwingung wird auch reduziert, wenn wir die Massen vergrößern.

Im relativ niederfrequenten THz-Licht gibt der spektrale Fingerabdruck damit Informationen über schwache intermolekulare Wechselwirkungen und andererseits über langsame Schwingungen, Rotationen und Torsionen, insbesondere von Molekülgruppen wie u.a. Gerüstschwingungen in Proteinen. In der DNA werden THz-Signaturen von Torsionen innerhalb von Basenpaaren, Twist-Moden, und Rotationen des ganzen Basenpaars, Propeller-Moden, vorhergesagt [8]. Durch einen iterativen, wechselseitigen Prozess zwischen experimenteller Messung im THz-Bereich und Theorie

erwartet man, dass die Modellierung von intermolekularen Wechselwirkungen für große Moleküle möglich wird. Somit könnten wir mehr über die Eigenschaften und die Dynamik von Proteinen, u.a. über die Proteinfaltung, lernen und versuchen Funktionen zu entschlüsseln. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die beteiligten Energien, Wellenlängen, Zeitskalen und Frequenzen im THz-Frequenzbereich.

100 Jahre THz-Forschung

Auch wenn für viele das THz-Licht neu erscheint ist es für die Physiker, Chemiker und Astronomen, insbesondere für die Molekülspektroskopiker, ein alter Bekannter unter dem Namen „ferninfraroter Spektralbereich“, kurz FIR. Dieser Frequenzbereich hat immer schon eine bedeutende Rolle in der Forschung gespielt. Ein detaillierter Rückblick auf 100 Jahre THz-Forschung sowie zahlreiche historische Referenzen finden sich im Artikel meines früheren Mentors Prof. Maurice Kimmitt: „Restrahlen to T-Rays – 100 Years of Terahertz Radiation“ [9].

Die ersten Arbeiten, von denen wir behaupten können, sie liegen im FIR oder THz-Bereich, erschienen bereits zum Ende des 19. Jahrhunderts in Deutschland. Sie waren instrumental in der Formulierung des Strahlungsgesetzes durch Max Planck. Heinrich Rubens und seine Kollegen erweiterten in Berlin den Messbereich ihres Spektrometers bis $20 \mu\text{m}$ [10]. Die Mitarbeit des amerikanischen Physikers Ernest Fox Nichols führte zu einem weiteren „Quantensprung“, als er die im infraroten – nahezu – metallischen Reflektionseigenschaften der Salze und insbesondere von Quarz entdeckte [11]. Ihr neues Spektrometer nutzte mehrfache Reflektionen an solchen ionischen Reststrahlen-Kristallen, um monochromatisches Licht zu erzeugen. Rubens und Nichols konnten damit bis über $50 \mu\text{m}$ (6 THz) hinaus genaue Datenpunkte zur Strahlungskurve heißer Körper aufnehmen. Noch am gleichen Tag im Jahr 1900

Frequenz ν	1 GHz (10^9 Hz)	1 THz (10^{12} Hz)	1 PHz (10^{15} Hz)	1 EHz (10^{18} Hz)
Wellenlänge λ	0,3 m	0,3 mm	0,3 μm	0,3 nm = 3 Å
Wellenzahl	0,033 cm^{-1}	33 cm^{-1}	33.333 cm^{-1}	33.333.333 cm^{-1}
Periode = 1/Frequenz	1 ns	1 ps	1 fs	1 as
Energie = $h\nu$	0,4 J/mol	0,4 kJ/mol	400 kJ/mol	400 MJ/mol
Energie = $h\nu$	4 μeV	4 meV	4 eV	4 keV

Tabelle 1: Spektralbereiche in verschiedenen Einheiten.

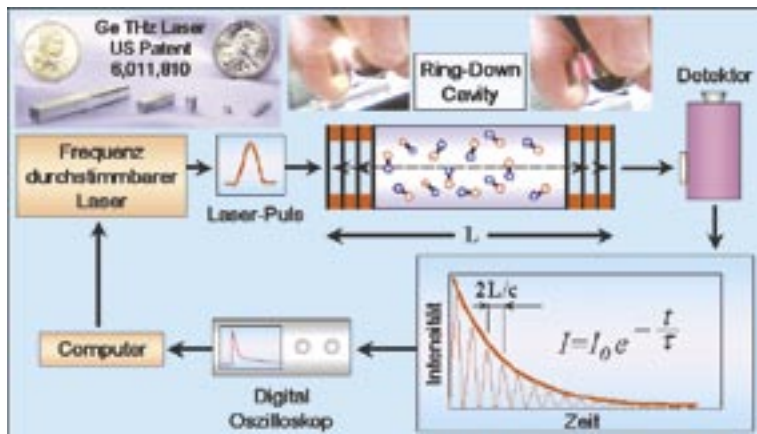


Abbildung 3: Cavity-Ring-Down Spektrometer mit Germanium THz-Laser und THz-Multilagenspiegel aus dünnen, optisch transparenten Siliciumscheiden

gelang es Max Planck, die Gleichung zum Planck'schen Strahlungsgesetz aufzustellen, an dem ihm Rubens seine Messdaten vorlegte [9].

Aber der alte Bekannte FIR ist in den letzten 15 Jahren noch interessanter geworden, da durch weitreichende technologische Innovationen THz-Techniken nun ihren Weg in den Alltag finden. Im wesentlichen haben dazu beigetragen: a) die Entwicklung von Femtosekunden-Festkörperlasern (Titan:Saphir-Laser) und von Halbleiterlasern. Randbemerkung: 1999 wurde der Chemie-Nobelpreis für die Femtosekundenspektroskopie vergeben, b) die Nanostrukturierung von Halbleitermaterialien, c) Fortschritte bei der Herstellung von hochreinen, bzw. durch den Chemiker kontrollierten Materialien, Festkörperkristalle und Halbleiter, d) die Möglichkeit der computergestützten Steuerung und damit bedienerfreundlichen Nutzung von THz-Spektrometern und bildgebenden Systemen (Imaging).

Es gibt mittlerweile eine große Palette von Systemen zur Erzeugung und Detektion von THz-Licht, die zum Teil auch vermarktet werden [12]. Welches System geeignet ist, entscheidet die geplante Anwendung. Es gibt im wesentlichen vier Kriterien für die Wahl eines Systems: Lichtleistung, Frequenzvariation, Frequenzauflösung, und nicht zuletzt eine einfache Handhabung des Instruments, so dass der Nutzer sich auf die Problematik seiner Probe konzentrieren kann. Je größer die Lichtleistung, um so tiefer kann man u.a. in Gewebeschichten eindringen. Oft verkürzen sich auch die

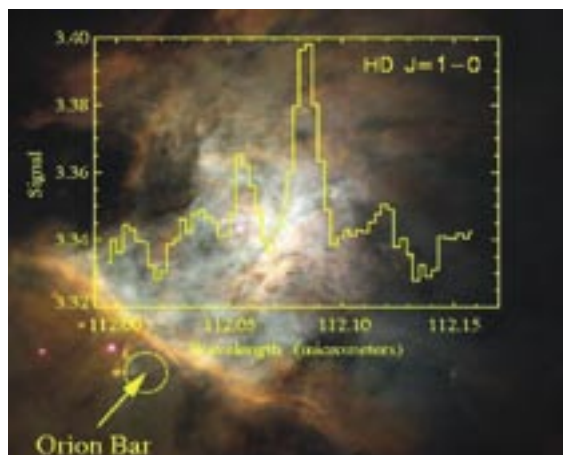


Abbildung 4: HD im Orionnebel bei 2,7 THz = 112 μm , (Quelle Spektrum: ESA/ISO/LWS und E. Dishoek, C. Wright et al., Quelle optisches Bild: NASA/ESA/HST und O'Dell, S.K. Wong - Rice University).

Messzeiten, was gerade bei reagierenden Substanzen wichtig ist, oder wenn die Substanz, wie bei Proteinen, nur in kleinen Mengen zur Verfügung steht. Ein Tuner für die Laserfrequenz ermöglicht es, den gleichen Laser bei verschiedenen Farben zu betreiben. Man erhält bei Variation der Frequenz ein Spektrum, welches insbesondere bei dem Verständnis der Strukturen und der Dynamik von komplexen Biomolekülen wie Proteinen und bei Molekülclustern notwendig ist, aber auch um verschiedene Gewebe in medizinischen Proben anhand ihres spektralen Fingerabdrucks zu unterscheiden.

Die Frequenzauflösung, d.h., wie gut können wir zwei Absorptions- oder Emissionslinien noch unterscheiden, sollte insbesondere für Untersuchungen von Molekülen in der Gasphase sehr hoch sein. Der von uns patentierte Germanium Halbleiterlaser [13] hat einen Durchstimmbereich von 1 bis 4 THz und eine Frequenzauflösung unter 1 MHz [14] bei einer Lichtleistung von bis zu einigen Watt [15]. In Analogie zu einem Radio kann man also damit mehrere Millionen „Molekülsender“ empfangen und unterscheiden bzw. „Molekülempfänger“ aufspüren. Abbildung 3 zeigt ein THz-Cavity-Ring-Down Spektrometer, das wir in unserer Arbeitsgruppe an der Ruhr-Universität Bochum entwickeln.

Bei Variation – tunen – der Frequenz kann über die Abklingzeit t des umlaufenden Laserpulses in der durch hochreflektierende Spiegel resonanten Probenzelle der Länge L ein Spektrum aufgezeichnet werden [16]. Die Abklingzeit verkürzt sich wenn eine Absorptionsfrequenz in der Substanz getroffen wird. Die Umlaufzeit des Pulses $2L/c$ ist gegeben durch die Länge des Probenbehälters und durch die Lichtgeschwindigkeit c . Bis vor kurzem existierten keine geeigneten, hochreflektierenden Spiegel mit Reflektionsgraden deutlich größer als 99,9% im THz-Bereich. Je näher die Reflektion bei 100% liegt, desto größer wird die effektive Länge der Absorptionszelle, da der Laserpuls viele Male im Resonator umläuft. Somit kann eine, wenige Zentimeter lange, resonante Zelle Empfindlichkeiten wie eine, mehrere Kilometer lange, Zelle im Bereich von ppm bis ppb erreichen. In Analogie zu Multilagenspiegel im optischen und infraroten Spektralbereich haben wir vor Kurzem erfolgreich einen Multilagenspiegel entwickelt, der sehr hohe Reflektionsgrade bei THz-Frequenzen hat [17]. Hierzu haben wir vier hochreine Siliciumkristallscheiben auf eine Dicke von 8 μm polieren lassen, um einen THz-Resonatorspiegel zu erhalten. Ein einzelner Wafer ist in der Abbildung 3 zu sehen. Aufgrund ihrer Dünne sind die Siliciumscheiden für rotes Licht transparent, auch lassen sich die Scheiben, obwohl kristallin, biegen ohne zu brechen. Bei erfolgreicher Kombination dieser Spiegel mit unseren Lasern zu einem Cavity-Ring-Down Spektrometer könnte eine hochempfindliche und hochauflösende THz-Spektroskopie insbesondere von Biomolekülen in der Gasphase möglich sein, da deren Dampfdruck sehr niedrig und deren Einbringung in die Gasphase oft sehr schwierig ist. Dieses Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unter HA 2394/8 unterstützt.

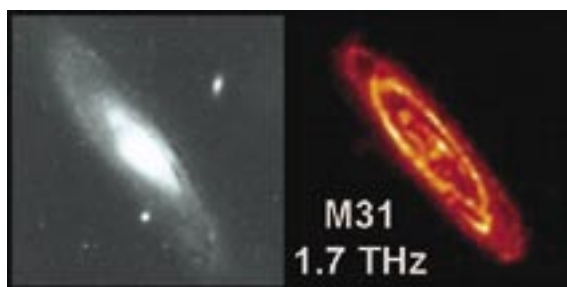


Abbildung 5: Links, optisches Bild von Andromeda M31, rechts THz-Bild (Imaging) des ISO Satelliten bei 1,7 THz = 175 µm, (Quelle: ESA/ISO/ISOPHOT und M. Hass et al.)

Anwendungen in der Astrochemie und der Atmosphärenchemie

THz-Fingerabdrücke existieren für zahlreiche neutrale und ionisierte Atome C^+ ($158 \mu\text{m} = 1,9 \text{ THz}$), O und O^{2+} ($146 \mu\text{m} = 2,1 \text{ THz}$ bzw. $88 \mu\text{m} = 3,4 \text{ THz}$) und N^+ ($122 \mu\text{m} = 2,5 \text{ THz}$ und $205 \mu\text{m} = 1,5 \text{ THz}$) [18]. Kohlenmonoxid ist das häufigste Molekül neben H_2 . Aufgrund seines Dipolmoments hat CO viele Emissionslinien im THz-Bereich. Die Bestimmung mehrerer Übergänge erlaubt den Rückschluss auf die Temperatur eines CO Gases. Durch eine räumliche Kartierung von warmen (heißen) Gebieten im interstellaren Raum können damit die Geburtsstätten von Sternen entdeckt und abgebildet werden [19]. Das HD Molekül ist von großer Bedeutung für die Kosmologie, da die relative Häufigkeit des Deuteriums ein Parameter der Big Bang Theorie, der Nukleosynthese und der Baryonen Dichte im Universum ist. Die Abbildung 4 zeigt die erste Messung von HD des ISO Satelliten bei 2,7 THz ($112 \mu\text{m}$) im Orionnebel im Jahr 1999. Die Forscher schlossen aus dem gemessenen Verhältnis von $H:D = 100\,000:1$, dass nicht genügend „normale“ Materie im Universum existiert, um eine Umkehrung des Big-Bang in den Big-Crunch zu ermöglichen [20].

Das OH -Radikal ($84 \mu\text{m}$, $85 \mu\text{m}$, $119 \mu\text{m}$, $120 \mu\text{m}$ bzw. $3,551 \text{ THz}$, $3,544 \text{ THz}$, $2,514 \text{ THz}$, $2,510 \text{ THz}$) ist keineswegs nur in der Astronomie wichtig, sondern auch in der Atmosphärenchemie beim Abbau des Ozons. Im THz-Bereich wurde es von einem Flugzeug aus mit einem Gaslaser Spektrometer in unserer Atmosphäre nachgewiesen [21]. Viele astronomische THz-Missionen müssen von Flugzeugen und Satelliten oberhalb der Troposphäre durchgeführt werden, da Wasser ein starker THz-Absorber ist und jede empfindliche Messung bei mehr als 1 THz am Boden verhindert. Ende 2004 soll dazu SOFIA, eine Boeing 747 mit Teleskop, in Betrieb gehen [22]. Abbildung 5 zeigt ein Bild des nahen Andromedanebels bei 1,7 THz. Es sind Ringe deutlich erkennbar, die im sichtbaren Bild nicht erscheinen. Auch wenn diese Frequenz nahe bei der StarTrek Voyager Frequenz des „Omega-Moleküls“ liegt, müssen wir uns wohl noch keine Sorgen machen.

THz-Bildgebung: Anwendungen in der Medizin

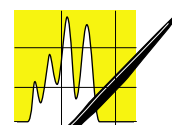
Um THz-Bilder zu erzeugen, können natürlich beliebige THz-Quellen verwendet werden. Bereits im Jahr 1972 haben Dean Hodges und seine Kollegen THz-Bilder von Metallobjekten in verschiedenen Verpackungen hergestellt. Als Quelle nutzten sie einen HCN Laser bei einer Wellenlänge von $337 \mu\text{m}$ (1 THz) mit einem sehr einfachen Bildscanner. Sie haben darüber hinaus die Transmission verschiedener Materialien untersucht wie Gaze, Baumwollbandagen, usw. im Bereich von 0,3 bis 1 THz [23]. Fritz Keilmann berichtete im Jahr 1995 [24] von den ersten mikroskopischen Aufnahmen im THz-Bereich mit Gaslasern unter Nutzung von Konzepten der Nahfeldmikroskopie, um die Beugungslimitierung der großen Wellenlänge zu umgehen [25].

Die auf Femtosekundenlasern basierenden THz-Time-Domain-Spektrometer oder THz-TDS sind die heutigen Vorreiter bei der medizinischen THz-Bildgebung. Diese Pulse werden oft auch als T-Rays in Analogie zu Röntgenstrahlung (X-Rays) bezeichnet, da THz-Licht Materialien wie Kunststoffe, Papier (Abbildung 6) und Kleidung durchdringen, dabei Metalle und andere Stoffe wie Chemikalien aufspüren kann. Auch sind T-Rays sehr niederenergetisch (Tab. 1, Abb. 2) im Gegensatz zu der energiereichen und zellschädigen Röntgenstrahlung. Abbildung 7 zeigt eine THz-Aufnahme von Tumorgewebe aufgenommen mit einem Zwei-Farben-Laser, der von unseren Kooperationspartnern Stefan Hoffmann und Prof. Martin Hofmann im Universitätszentrum Medizintechnik der Ruhr-Universität Bochum (RUB) entwickelt wurde. Das Bild bei 0,23 THz zeigt Strukturen, die im optischen Bild nicht erkennbar sind. Für den potentiell preiswerten weil relativ einfachen technischen Aufbau ihres Spektrometers in der Größe eines Schuhkartons, erhielten sie den Kaiser-Friedrich-Forschungspreis 2003 [26].

Die Zukunft

Generell werden spektrale THz-Fingerabdrücke weitreichende Auswirkungen in unserem Verständnis von intermolekularen Wechselwirkungen haben [27]. Untersuchungsgegenstände werden und sind bereits neben Nanopartikeln, Molekülen an Oberflächen auch Molekülcluster in der Gasphase. Proteine in der Gasphase und in Flüssigkeiten sind vielleicht die Highlights. Auch wenn die Technologie nun nicht mehr kompliziert erscheint, wird die Interpretation von Protein-Spektren aufgrund der Komplexität der Moleküle nicht trivial aber sehr interessant sein.

Durch die zunehmende Verbreitung von THz-Spektrometern und in Erwartung preiswerter Halbleitersysteme werden Materialwissenschaften, Pharmazie und Medizin



AUFSÄTZE

Abbildung 6: Geldschein Hologramm und Papier als Bild bei 2,4 THz aufgenommen mit dem THz Germanium Laser (EB, RUB).



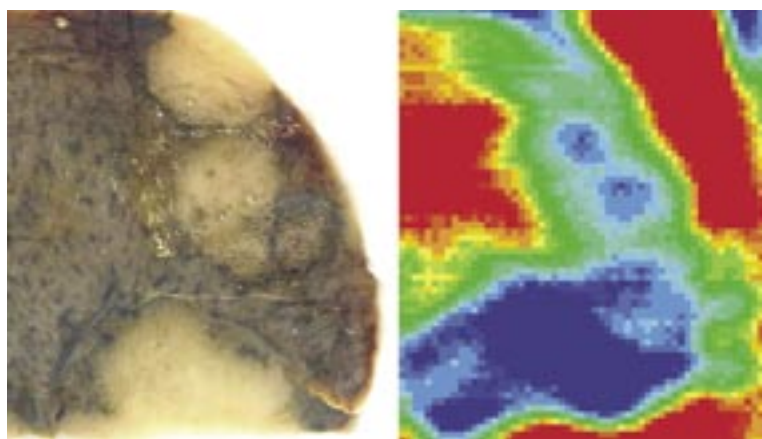


Abbildung 7: Links, histologisch präpariertes Präparat einer menschlichen Leber (Abmessungen 40 mm x 50 mm). Dunkle Flächen = gesundes Gewebe, helle Flächen = Tumore. Rechts, THz-Transmissionsbild bei 0,23 THz (blau = Tumore) zeigt zusätzliche Strukturen, die im optischen Bild nicht erkennbar sind. (Abbildung: S. Hoffmann, M. Hofmann, RUB).

künftig die Möglichkeit haben ihre Welt im THz-Licht zu sehen. Für medizinische Anwendungen stehen bildgebende THz-Systeme im Vordergrund. Es gibt hier erste Ansätze einer Katalogisierung von THz-Signaturen an Geweben [28], allerdings sind bisher nur wenige, fast abzählbar viele, Daten vorhanden. In Zukunft ist jedoch zu erwarten, dass der große Informationsgehalt in THz-Spektren bei der Analyse von Geweben, insbesondere beim Auffinden von Tumoren, einem Arzt eindeutige, frühzeitige und schnelle Diagnosen erlaubt, die zurzeit mit anderen Methoden nicht möglich sind.

Weiterführende Informationen

Zum Abschluss seien hier einige ausgewählte Bücher und Artikel aufgezählt. Klassische Methoden finden sich im Buch von M.F. Kimmitt, *Far-Infrared Techniques*, Pion Limited, London, 1970 und neuere Methoden, insbesondere THz-TDS Systeme, im Buch von D.M. Mittleman (Herausgeber): *Sensing with Terahertz Radiation*, Springer, Berlin (2002). Im Bereich der THz-Medizin geben die Proceedings folgender Konferenzen einen guten aktuellen Überblick: „The First International Conference On Biomedical Imaging And Sensing Applications of THz Technology“, *Physics in Medicine and Biology* Volume 47(21), 3667-3892 (2002) und THz-Bridge Workshop „Tera-Hertz radiation in Biological Research, Investigation on Diagnostics and study of potential Genotoxic Effects“, *J. of Biological Physics* 29, 77–338 (2003).

Literatur

- [1] "The Omega Directive", *StarTrek Voyager Sequenz #88* – Episode 189, Erstsending USA 15. April 1998.
- [2] H. Schmundt, Splitternackt auf dem Monitor, *Der Spiegel* 47/2002, Ausgabe: 18. November 2002
- [3] R. Kickuth, Terahertz-Wellen mit ungeahnten Anwendungen - Spektroskopie, *Astronomie, Mikroskopie, Sicherheit, CLB* 12/2002, 465-466.
- [4] Intel: <http://www.intel.com/research/>
- [5] K. Liu et al., Water Clusters, *Science* 271, 929-933 (1996) und M.G. Brown et al., Quantitative characterization of the water trimer torsional manifold by terahertz laser spectroscopy and theoretical analysis. II. (H₂O)₃, *J. Chem. Phys.* 111(17), 7789 (1999).

- [6] K. Autumn et al., Adhesive force of a single gecko foot-hair, *Nature* 405, 681 - 685 (2000).
- [7] K. Libbrecht, *The Snowflake: Winter's Secret Beauty*, Voyageur Press, 112 Seiten (2003) <http://www.snowcrystals.com>.
- [8] L.Young et al., Prediction of modes with dominant base roll and propeller twist in b-DNA poly(dA)-poly(dT), *Phys. Rev. A* 41, 7020-7023 (1990).
- [9] M.F. Kimmitt, Reststrahlen to T-Rays – 100 Years of Terahertz Radiation, *J. of Biological Physics* 29, 77–85, 2003.
- [10] H.Rubens, B.W.Snow, On the Refraction of Rays of Great Wavelength in Rock Salt, Sylvine, and Fluorite, *Phil. Mag.* 35, 35–45 (1893).
- [11] E.F. Nichols, A Method for Energy Measurements in the Infrared Spectrum and the Properties of the Ordinary Ray in Quartz for Waves of Great Wavelength, *Phys. Rev.* 4, 297–313 (1897).
- [12] Linkliste zu Arbeitsgruppen und Firmen, u.a. Bruker/TeraView über TeraVision Link, im Gebiet der THz-TDS unter <http://www.ece.rice.edu/~daniel/groups.html>.
- [13] E.E. Haller, Erik Bründermann, Doping of germanium and silicon crystals with non-hydrogenic acceptors for far infrared lasers, U.S. Patent 6,011,810, Date: 4 January 2000.
- [14] E. Bründermann et al., Mode fine structure of the FIR p-Ge intervalenceband laser measured by heterodyne mixing spectroscopy with an optically pumped ring gas laser, *Infrared Phys. Technol.* 36(1), 59 (1995).
- [15] E. Bründermann, Widely Tunable Far Infrared Hot Hole Semiconductor Lasers, in „Long-Wavelength Infrared Semiconductor Lasers“, Editor H. Choi, John Wiley and Sons, Kapitel 6, 90 Seiten (ISBN: 0-471-39200-6 (März 2004)).
- [16] A. O'Keefe und D.A.G. Deacon, Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, *Rev. Sci. Instrum.*, 59(12), 2544 (1988).
- [17] R. Schiwon, G. Schwaab, E. Bründermann, M. Havenith, Far-infrared multilayer mirrors, *Appl. Phys. Lett.* 83, 4119 (2003).
- [18] G. Winnewisser, Instellar and laboratory spectroscopy in the terahertz region, *Journal of Molecular Structure* 408/409, 1-10 (1997).
- [19] H. P. Röser, Heterodyne spectroscopy for submillimeter and far-infrared wavelengths from 100 μm to 500 μm, *Infrared Phys.* 32, 385-407 (1991).
- [20] <http://www.iso.vilspa.esa.es/science/>
- [21] R. Titz et al., Observation of stratospheric OH at 2.5 THz with an airborne heterodyne system, *Infrared Phys. Technol.* 36, 883-891 (1995).
- [22] A. Krabbe et al., SOFIA oder: Warum Astronomen in die Luft gehen, *Sterne und Weltraum* 12, 1052-1063 (1999) und aktuell: <http://www.dlr.de/SOFIA> und <http://sofia.arc.nasa.gov>.
- [23] D.H. Barker, D.T. Hodges und T.S. Hartwick, Far Infrared Imagery, *Proc. SPIE* 67 (1975), 27–34.
- [24] F. Keilmann, FIR Microscopy, *Infrared Phys. Technol.* 36(1), 217-224 (1995).
- [25] F. Keilmann, Status of THz-to-Visible Nanospectroscopy Development, *J. of Biological Physics* 29, 195–199 (2003).
- [26] CLB 05/2003, 166.
- [27] Lehrstuhl Prof. M. Havenith, Physikalische Chemie II, Ruhr-Universität Bochum, <http://www.rub.de/pc2>.
- [28] A.J. Fitzgerald et al., Catalogue of Human Tissue Optical Properties at Terahertz Frequencies, *J. of Biological Physics* 129, 123–128, (2003).