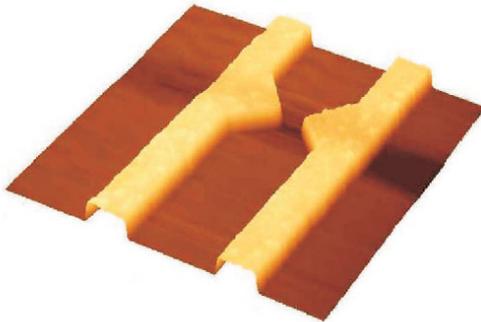




Pascal Knobloch (Autor)
Bildgebende Spektroskopie mit gepulster und kontinuierlicher THz-Strahlung

Pascal Knobloch

**Bildgebende Spektroskopie mit
gepulster und kontinuierlicher THz-Strahlung**



Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/3423>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

Dem Frequenzbereich von wenigen hundert GHz bis hin zu einigen THz, der zwischen den klassischen Gebieten der Hochfrequenz-Elektronik und der Optik liegt und der bisher noch weitgehend unerschlossen war, ist erst in letzter Zeit einiges an Aufmerksamkeit geschenkt worden. Der Grund für diese späte Wertschätzung begründet sich im lange vorherrschenden Mangel an effizienten, kompakten und kostengünstigen Strahlungsquellen und Detektoren. Aufgrund des Fehlens solcher Bauelemente war die Spektroskopie in diesem Frequenzfenster traditionell ein aufwändiges und schwieriges Unterfangen. An eine Materialuntersuchung im großen Maßstab, beispielsweise zur Kontrolle von industriellen Prozessen, war daher bislang nicht zu denken.

Seit einiger Zeit gibt es eine elegante Methode kohärente THz-Strahlung zu erzeugen und zu detektieren. Dabei kommen photoleitende Dipolantennen zum Einsatz, die von ultrakurz- en Laserimpulsen mit Dauern im Femtosekundenbereich geschaltet werden. Dadurch werden in dem Halbleitermaterial kurze Stromimpulse induziert, was die Abstrahlung elektromagnetischer Impulse zur Folge hat. Aufgrund der kurzen zeitlichen Dauer der THz-Impulse überdeckt ihr Spektrum einen weiten Frequenzbereich von etwa 100 GHz bis zu einigen THz, was einer Vakuumwellenlänge von 3 mm bis unter 100 μm entspricht.

In der Literatur wird dieses Verfahren zur Erzeugung extrem kurzer elektromagnetischer Impulse und die damit verbundene Abstrahlung erstmals 1984 von D. H. Auston beschrieben [1]. Das erste praktikable Terahertz-Spektrometer wurde in der Gruppe von Dan Grischkowsky (IBM Watson Research Center) im Jahre 1989 realisiert [2]. Seitdem sind zahlreiche Materialeigenschaften einfacher Dielektrika [3], die Drude-Leitfähigkeit von dotierten Halbleitern [4], die komplexe Leitfähigkeit verschiedener Supraleiter [5, 6], aber auch die Rotationsspektren einiger Moleküle in der Gasphase [7] in diesem Frequenzbereich untersucht worden. Die Vorzüge der THz-Spektroskopie liegen hier hauptsächlich in dem vergleichsweise kompakten Aufbau, der gleichzeitigen Messung von Real- und Imaginärteil der dielektrischen Konstanten und dem sehr guten Signal/Rauschverhältnis.

Eine Erweiterung des entwickelten THz-Spektrometers zu einem bildgebenden System wurde 1995 von B. B. Hu und M. C. Nuss in den Bell Laboratorien demonstriert [8]. Durch die Verwendung eines Zwischenfokusses im Strahlengang, in dem die Probe platziert wird, und einer schnellen digitalen Datenerfassung war es möglich, Proben unterschiedlichster Größe in dem neuen Frequenzbereich rasterförmig abzutasten. Seitdem wurde eine Vielzahl von Anwendungen für die zweidimensionale Spektroskopie vorgestellt. So macht z.B. die Transparenz gewöhnlicher Verpackungsmaterialien wie Papier oder Kunststoff gegenüber THz-Strahlung eine orts aufgelöste Qualitätskontrolle von verpackten Gegenständen möglich [9].

Auch im Bereich der Biologie und medizinischen Diagnostik eröffnet dieses bildgebende Verfahren neue Möglichkeiten. Noch ist dieses Forschungsfeld in einem frühen Stadium. Derzeit beschränkt man sich darauf herauszufinden, ob bzw. welche Gewebesorten mittels THz-

Spektroskopie voneinander unterschieden, bzw. identifiziert werden können. Beispielsweise ist es Forschern der Cavendish Labs in Cambridge, England gelungen, mit großer Zuverlässigkeit Basalzellenkarzinome zu identifizieren; ein sehr vielversprechender Befund. Ein limitierender Faktor, insbesondere für die Eindringtiefe, ist jedoch die hohe THz-Absorption von polaren Medien wie z.B. Wasser. Daher können nur sehr dünne oder dehydrierte Bio-Materialien durchstrahlt werden, oder es muss eine Reflexionsanordnung gewählt werden. Bei der Untersuchung des Wasserhaushaltes in Pflanzen mittels THz-Strahlung ist die starke Absorption des Wassers jedoch sehr vorteilhaft, da so schon geringfügige Änderungen der Wasserkonzentration in den vergleichsweise dünnen Blättern nachgewiesen werden können.

Eine weitere mögliche Anwendung der THz-Strahlung liegt in der drahtlosen Breitband-Datenübertragung. Für die Realisierung neuartiger THz-Kommunikationssysteme sind hochfrequente Trägerwellen notwendig. THz-Quellen, die auf der Anregung gepulster Lasersysteme basieren, sind hierfür nicht geeignet. Neben den Hochfrequenzbauteilen aus der Halbleitertechnik gibt es seit kurzer Zeit opto-elektronische Strahlungsquellen, die das Prinzip der Photomischung nutzen und kontinuierliche THz-Leistung abstrahlen. Auch wenn diese aufgrund einer geringen Ausgangsleistung vermutlich letztlich keinen Einsatz in Kommunikationssystemen finden werden, so eignen sie sich doch für spektroskopische Zwecke und um grundlegende Fragestellungen auf dem Weg zu Höchstfrequenzübertragungssystemen anzugehen. Neben aktiven Bauelementen wie Sender und Empfänger werden aber für die Etablierung einer THz-Technologie auch passive quasi-optische Komponenten wie Spiegel und Filter benötigt.

In dieser Arbeit werden zum einen dielektrische THz-Spiegel vorgestellt, die als Wandverkleidung in zukünftigen picozellularen THz-Funkzellen dienen können, zum anderen werden erste Anwendungen der bildgebenden THz-Spektroskopie im bio-medizinischen Bereich diskutiert. Des Weiteren wird das erste bildgebende THz-System demonstriert, welches mit cw-THz-Strahlung arbeitet. Schließlich fließen alle diese Themenschwerpunkte in einem neuen Verfahren zur orts aufgelösten Untersuchung dünner, flächiger Proben zusammen. Werden solche Proben als Ersatz für eine Schicht in den oben erwähnten THz-Spiegeln eingebettet, so variiert insbesondere an den Flanken der Stopbänder die Reflexion des Gesamtsystems sehr sensitiv mit dem Brechungsindex. Wird nun eine schmalbandige cw-THz-Quelle verwendet, welche genau auf diese Frequenz eingestellt ist, können räumliche Fluktuationen sehr sensitiv sichtbar gemacht werden.

Für die vorliegende Arbeit ergibt sich folgende Gliederung:

In Kapitel 2 werden die theoretischen Hintergründe und grundlegenden Komponenten für den Aufbau eines THz-Spektrometers vorgestellt. Quellen und Detektoren für gepulste und kontinuierliche THz-Strahlung werden behandelt. Des Weiteren wird auf das eigentliche Messprinzip eingegangen, das zur Extraktion der Materialparameter der Probe notwendig ist.

Kapitel 3 beschreibt die neuartige Entwicklung dielektrischer Spiegel für den sub-mm-Wellenbereich. Dabei wird den Messergebnissen eine ausführliche theoretische Beschreibung der dielektrischen Vielschichtstrukturen vorangestellt.

Die Ergebnisse der bildgebenden THz-Spektroskopie mit gepulster Strahlung sind in Kapitel 4 dargestellt. Dabei wird vorerst die Auswertung der Messdaten beschrieben, die zu den THz-Bildern einfacher Teststrukturen sowie komplexer bio-medizinischer Proben führt. Es werden

zum einen Messungen an Pflanzen vorgestellt, die Aufschluss über den zeitlichen Verlauf der Rehydration nach vorhergegangenem Trockenstress liefern. Zum anderen zeigen zweidimensionale Untersuchungen an histo-pathologisch präparierten Proben das Potenzial dieser Technik in der medizinischen Diagnostik.

Es wird weiterhin gezeigt, dass der nachträgliche Einsatz bekannter Algorithmen zur Bildbearbeitung verbesserte Kontraste und höhere Kantenschärfe liefert. Abschließend wird das Potenzial der orts aufgelösten Untersuchungen im Vergleich zu etablierten Verfahren erörtert.

In Kapitel 5 sind die Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen mit kontinuierlicher THz-Strahlung zusammengefasst. Zunächst wird dabei das verwendete System inklusive der Laserquelle charakterisiert. Erstmals wurde diese Art von THz-Strahlung für die Aufnahme von zweidimensionalen Bildern verwendet, die in diesem Kapitel gezeigt werden.

Kapitel 6 stellt eine neuartige Analyseverfahren für sehr dünne Probenmaterialien vor. Mit Hilfe der Erfahrungen aus der Entwicklung der dielektrischen Spiegel für den THz-Bereich wurde ein theoretisches Modell erstellt, das die sensitive orts aufgelöste Untersuchung von dünnen Proben beschreibt. Ein erstes experimentelles Ergebnis bestätigt die theoretischen Überlegungen.

Die Ergebnisse der Dissertation werden in Kapitel 7 zusammenfassend dargestellt.