

Extern stabilisierte DFB-Laser zur hochauflösenden Dauerstrich-Terahertz-Spektroskopie

Thorsten Göbel, Daniel Schönherr, Peter Meißner, Hans L. Hartnagel, TU Darmstadt, Axel Roggenbuck, Francois-Xavier Laroche, Anselm Deninger, Toptica Photonics AG, Gräfelfing

Manuskripteingang: 25. September 2008; zur Veröffentlichung angenommen: 01. Oktober 2008

Die optische Erzeugung von Dauerstrich-Terahertz Strahlung (engl. *continuous-wave terahertz*, *CW THz*) hat sich in den letzten Jahren zu einer zuverlässigen Technik entwickelt. Geringe Kosten und hohe Auflösung sind die Vorteile gegenüber gepulsten Systemen. Wir stellen ein CW-THz-System vor, das auf Lasern mit verteilter Rückkopplung (engl. *distributed feedback*, *DFB*) basiert und über eine externe Wellenlängenstabilisierung verfügt. Dadurch kann die THz-Frequenz im MHz-Bereich kontrolliert und die Systemimplementierung vereinfacht werden.

Schlagwörter: Photomischung, DFB-Laser, CW-THz-Spektroskopie, Wellenlängenstabilisierung

Externally Stabilized DFB-Lasers for High-resolution Continuous-wave Terahertz Spectroscopy

Optical heterodyning has become a reliable technique for the generation of continuous-wave terahertz (CW THz) radiation within the last years. Low implementation cost and high resolution are key advantages as compared to pulsed approaches. We introduce a distributed feedback (DFB) laser based CW THz system with external stabilization of the laser wavelength. This allows the precise control of the THz frequency on the MHz level and facilitates the system implementation.

Keywords: Photomixing, DFB laser, CW THz spectroscopy, wavelength stabilization

1 Einleitung

Die Forschung im THz-Bereich des elektromagnetischen Spektrums hat in den letzten Jahren beträchtlich an Bedeutung gewonnen. Die Vielfältigkeit der demonstrierten Anwendungen, die von Bildgebung [1] über biochemische Analysen [2] bis zum Nachweis von Sprengstoffen reichen [3], zeigt das enorme Potenzial

dieses Frequenzbereiches. Durch den früheren Mangel an geeigneten Quellen ist dieser Abschnitt, der Frequenzen von 100 GHz bis zu einigen THz umfasst, jedoch weit weniger erforscht als die benachbarten Felder der Mikrowellentechnik und Optik. Der daraus resultierende Bedarf an THz-Systemen sorgt für die kontinuierliche Verbesserung von Techniken zur Erzeugung von THz-Signalen. Exaktere Messverfahren ermöglichen eine

immer vollständige Ausschöpfung der aufgezeigten Einsatzmöglichkeiten. Die zunehmende Kommerzialisierung von THz-Systemen fordert zudem, dass die steigende Genauigkeit nicht zu Lasten der Handhabung geht und die Implementierung von Systemen erschwert.

Die optische Erzeugung von THz-Strahlung hat sich dabei zu einer weit verbreiteten Methode entwickelt [4–6]. Durch das auch Photomischung genannte Verfahren lassen sich THz-Aufbauten mit großer Bandbreite und hohem Signal-Rausch-Verhältnis (engl. *signal-to-noise ratio, SNR*) vergleichsweise einfach realisieren.

Ein entscheidender Faktor für die Qualität von CW-betriebenen Systemen ist die Güte der eingesetzten Laser. Die Verwendung von DFB-Lasern hat den Vorteil, dass deren Wellenlänge elektrisch und/oder thermisch verändert werden kann. Dies ermöglicht das Durchstimmen der Laserfrequenz über einen Bereich von mehreren THz, ohne dass eine mechanische Justierung des Laserresonators erforderlich ist. Die zur Abstimmung notwendige Temperatursensibilität dieses Lasertyps führt jedoch zu Frequenzschwankungen, die bis zu einigen 100 MHz betragen können. Ohne weitere Maßnahmen sind präzise Messungen daher nicht möglich.

Durch den Einsatz einer aktiven, interferometrischen Frequenzkontrolle erreichen wir jedoch eine Frequenzauflösung im Bereich von einem MHz und damit einer Genauigkeitsverbesserung von mehreren Größenordnungen im Vergleich zu nicht stabilisierten DFB-Lasern.

2 Photokonduktive CW-THz-Systeme

Das Konzept der CW-Photomischung basiert auf zwei Lasern mit leicht verstimten Wellenlängen (λ_1, λ_2). Diese erzeugen ein optisches Schwebungssignal, dessen Einhüllende der Differenzfrequenz der beiden Laser (= THz-Frequenz) entspricht. Durch Veränderung einer oder beider Laserwellenlängen kann die Frequenz der Schwebung, also die THz-Frequenz, variiert werden. Mit dem optischen Schwebungssignal wird dann die Leitfähigkeit eines schnellen Halbleiters moduliert. Durch Anlegen einer Vorspannung (engl. *Bias*) wird der Strom im Halbleiter ebenfalls mit der THz-Frequenz moduliert. Dieses Signal wird über eine Antenne abgestrahlt und steht für Messanwendungen zur Verfügung.

Im Fall der photokonduktiven Detektion wird das THz-Signal auf einem zweiten Photomischer fokussiert, der als Empfänger arbeitet. Dieser wird ebenfalls vom optischen Schwebungssignal illuminiert, welches dort die Aufgabe eines Lokal-Oszillators übernimmt. Das erzeugte Basisbandsignal ist ein Gleichstrom (I_{det}) der als

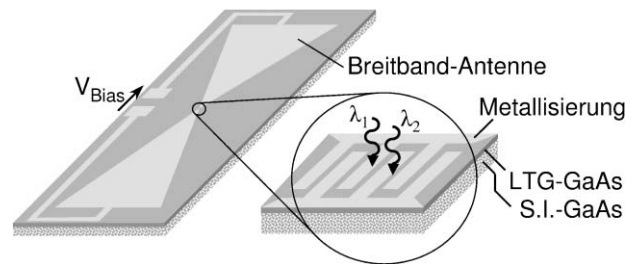


Bild 1: Beispiel einer planaren Breitbandantenne (Bow-Tie) mit integriertem Finger-Photomischer auf GaAs-Basis.

Figure 1: Example of a planar broadband antenna (bow-tie) with an integrated GaAs-based interdigital photomixer.

Messgröße dient. Dieser hängt folgendermaßen mit dem einfallenden THz-Signal zusammen:

$$I_{det} = I_{DC} \sim E_{THz} \cos(\omega_{THz}d/c). \tag{1}$$

Der im Empfänger erzeugte Strom ist also abhängig von der Stärke des einfallenden THz-Feldes (E_{THz}), der THz-Frequenz (ω_{THz}) und dem Weglängenunterschied d der beiden Signalpfade A und B, wobei gilt:

A: Wegstrecke vom Auftrennen des Schwebungssignals über den THz-Teil zum Empfänger,

B: Wegstrecke vom Auftrennen des Schwebungssignals über den rein optischen Teil zum Empfänger.

Die Variable c bezeichnet die Lichtgeschwindigkeit. Um Amplituden- und Phaseninformation des THz-Signals zu erhalten, wird eine Verzögerungsstrecke ver-

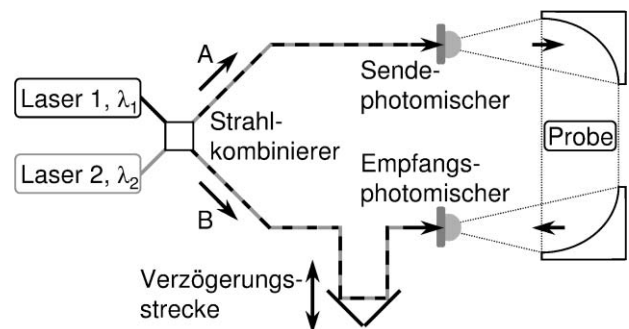


Bild 2: Klassischer Aufbau eines photokonduktiven THz-Systems mit optischer Heterodyn-Detektion.

Figure 2: Classical configuration of a photoconductive THz system with optical heterodyne detection.

wendet, die sich üblicherweise im optischen Teil des Systems befindet (siehe Bild 2). Die Generierung des optischen Schwebungssignals und dessen Trennung ist in Bild 2 durch einen Strahlkombinierer realisiert, wie er in Freistrahlaufbauten eingesetzt wird. An jedem Frequenzpunkt wird die Weglängendifferenz um den Betrag der aktuellen THz-Wellenlänge verändert und mit mehreren Punkten abgetastet. Das am Empfänger detektierte Signal weist über die Weglängenänderung einen sinusförmigen Verlauf auf, aus dem die gesuchten Informationen gewonnen werden können.

Durch Umformung von Gl. (1) lässt sich die Bedeutung frequenzstabiler Laser für ein solches System verdeutlichen. Dazu wird die THz-Frequenz durch einen festen und einen zeitveränderlichen Anteil repräsentiert ($\omega_{THz} + \Delta\omega_{THz}(t)$). Der zeitabhängige Anteil $\Delta\omega_{THz}(t)$ berücksichtigt die Schwankungen der THz-Frequenz als Folge instabiler Laser. Andere Störgrößen seien hierbei vernachlässigt. Es ergibt sich:

$$I_{det}(t) \sim E_{THz} \cos(2\pi(d/\lambda_{THz} + d/\Delta\lambda_{THz}(t))). \quad (2)$$

Die Auswirkung von Frequenzschwankungen auf das detektierte THz-Signal hängt nach Gl. (2) vom Verhältnis des Weglängenunterschiedes d und der Schwankung der THz-Wellenlänge $\Delta\lambda_{THz}(t)$ ab. Für ein stabiles Empfangssignal muss gelten: $d/\Delta\lambda_{THz}(t) \ll 1$. Dies kann durch kurze Weglängenunterschiede oder frequenzstabile Laser (bzw. durch Kombination beider Maßnahmen) erreicht werden. Hochwertige Laser erleichtern jedoch die physikalische Implementierung eines THz-Systems deutlich, da Kompromisse beim Systemaufbau möglich sind. So kann auch mit größeren Weglängendifferenzen gearbeitet werden, ohne dass diese sich störend auf die Stabilität des Systems niederschlagen.

3 Experimenteller Versuchsaufbau

Der realisierte THz-Aufbau (siehe Bild 3) basiert auf zwei DFB-Lasern (Toptica DL DFB) mit einer mittleren Wellenlänge von 855 nm. Beide Dioden verfügen über eine maximale Ausgangsleistung von 130 mW und können über Temperatur und Strom in der Wellenlänge verändert werden. Der Bereich der thermischen Abstimmung beträgt etwa 45 K (2,5–3 nm), wobei die Laser über dem gesamten Bereich modensprungfrei sind. Dies ermöglicht mit den verwendeten Laserdioden kontinuierliche Differenzfrequenzen von bis zu 1,2 THz.

Beide Laser werden in monomodale, polarisationserhaltende Fasern eingekoppelt und zu einem integrierten optischen Modul mit vier Faserausgängen geführt. Dieses ist ebenfalls monomodal und polarisationserhaltend

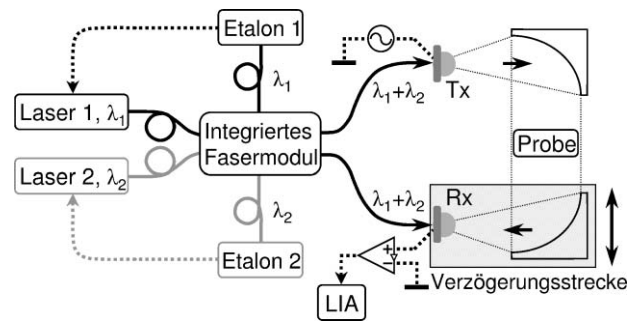


Bild 3: Experimenteller Aufbau. Durchgezogene Linien entsprechen den faseroptischen Verbindungen, gestrichelte Linien bezeichnen elektrische Pfade.

Figure 3: Experimental Setup. Solid lines correspond to optical fibers, dashed lines mark electrical paths.

aufgebaut. Dort wird zunächst etwa 1% der individuellen Wellenlängen abgespalten und an zwei Ausgängen bereitgestellt, die zur Wellenlängenstabilisierung des jeweiligen Lasers verwendet werden. Die anderen beiden Ausgänge enthalten das optische Schwebungssignal.

Die vollständig faserbasierte Realisierung des optischen Teils ermöglicht eine sehr hohe Modulationstiefe des Schwebungssignals. Durch die monomodalen Fasern wird eine nahezu perfekte räumliche Überlappung beider Wellenlängen erreicht. Da die Fasern zudem polarisationserhaltend sind, kann eine identische Polarisation ebenfalls gewährleistet werden. Die gemessene Modulationstiefe über den gesamten Abstimmbereich beträgt 95% für den Sendezweig (Tx) bzw. 90% für den Empfangszweig (Rx). Die Abweichungen von einer 100%igen Modulationstiefe werden durch das integrierte Fasermodul verursacht, welches die optischen Wellenlängen herstellungsbedingt leicht unsymmetrisch aufteilt.

Um das optische Schwebungssignal zu den Photomischern zu leiten, werden monomodale Fasern verwendet, die fest mit den Mischern verklebt sind. Die Photomischer basieren auf niedrigtemperaturgewachsenem (engl. *low-temperature-grown*, *LTG*) GaAs, besitzen sechs interdigitale Finger und sind in einer planaren log-periodischen Antenne integriert (siehe Bild 4). Das verwendete Antennendesign bietet eine hohe Bandbreite und erzeugt einen linear polarisierten THz-Strahl [7]. Das im Sendemischer erzeugte THz-Signal wird durch eine hyper-hemisphärische Siliziumlinse in den Freiraum abgestrahlt und mit zwei Parabolspiegeln auf den Empfangsmischer fokussiert.

Der Durchmesser des kollimierten Strahls zwischen den Spiegeln beträgt bei einer Frequenz von 100 GHz etwa 3 cm. Beide Mischer sind auf parallelen Schienen

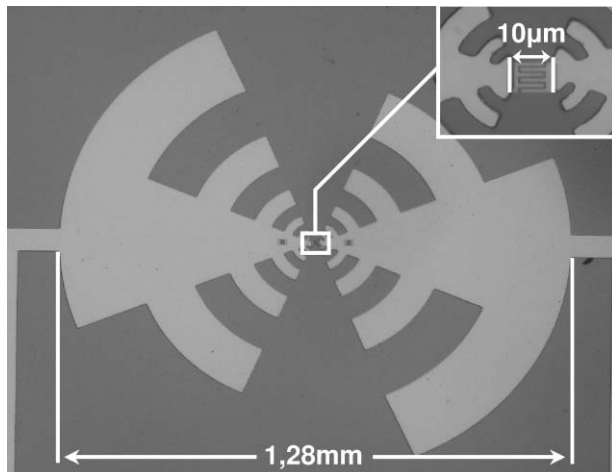


Bild 4: Mikroskopaufnahme der verwendeten planaren log-periodischen Antenne. Die Detailaufnahme zeigt den eigentlichen Photomischer.
Figure 4: Microscope image of the utilized planar log-periodic antenna. The inset shows the actual photomixer.

montiert. Mit einem Schrittmotor kann die Pfadlänge des kollimierten Strahls variiert werden, um Amplitude und Phase des THz-Signals zu bestimmen. Diese Implementierung der Verzögerungsstrecke ermöglicht erst den vollständig faserbasierten Aufbau des optischen Systemteils. Dadurch werden Stabilität und Flexibilität im Vergleich zu Freistrahlsystemen deutlich verbessert.

In beiden Zweigen steht an den Mischern eine optische Gesamtleistung von 40 mW (20 mW je Wellenlänge) zur Verfügung. Um das Empfängerrauschen zu minimieren, wird der Bias des transmittierenden Photomischers moduliert. Die Amplitude der Modulation beträgt ± 10 V. Der im Empfänger erzeugte Photostrom wird mit einem Lock-In-Verstärker (engl. lock-in amplifier, LIA) detektiert, der über einen Transimpedanz-Verstärker mit dem Empfangsmischer verbunden ist. Die Zeitkonstante des Lock-In-Verstärkers beträgt 100 ms.

3.1 Interferometrische Frequenzkontrolle

Zur Kontrolle der optischen Wellenlängen wird für jeden Laser ein fasergekoppeltes Quadratur-Interferometer verwendet [8]. Diese temperaturstabilisierten Fabry-Pérot-Etalons weisen einen freien Spektralbereich (engl. *Free spectral range, FSR*) von 7,7 GHz auf und generieren jeweils zwei Signale, die um $\pi/2$ in der Phase verschoben sind. Durch Überlagerung wird ein Quadratursignal erzeugt, dessen Phase eine lineare Funktion der optischen Frequenz ist. Dies erlaubt die präzise

Messung der Laserwellenlänge. Zur Regelung wird die Momentanphase des Quadratursignals mit dem Sollwert verglichen. Das resultierende Fehlersignal wird an die Laser zurückgeführt, wo Laserstrom und Lasertemperatur durch einen PID-Regler kontrolliert werden. Die Auflösung dieser Frequenzregelung beträgt etwa 0,1% des freien FSR der Etalons, was gleichbedeutend mit einer Genauigkeit von 1 MHz ist. Der Vorteil dieser interferometrischen Stabilisierung ist, dass eine kontinuierliche Kontrolle der Frequenz über beliebige Vielfache der FSR der Fabry-Pérot-Etalons möglich ist. So kann jede gewünschte THz-Frequenz mit der gleichen Genauigkeit eingestellt werden. Dadurch ist die Wiederholbarkeit von Messungen bei dem hier vorgestellten System wesentlich größer als bei Standardaufbauten.

Die verwendeten Etalons erfüllen daher zwei Aufgaben: die Einstellung einer gewünschten THz-Frequenz und deren Stabilisierung. Zur Durchführung einer Messung wird zunächst die Differenzfrequenz der verwendeten Laser mit einer schnellen Photodiode gemessen und auf null gesetzt. Alle weiteren Schritte eines Frequenzscans sind vollständig computergesteuert. Die Einstellung von Start- und Stoppfrequenz sowie des Frequenzschrittes werden durch die Etalons übernommen, welche die Laserwellenlänge entsprechend überwachen.

Die vorgestellte externe Frequenzstabilisierung der Laser erleichtert daher die Implementierung eines CW-THz-Systems. Die elektronische Messwerterfassung bzw. die vollständig computergestützte Durchführung einer Messung wird so deutlich vereinfacht.

4 Ergebnisse und Diskussion

Vor dem Aufbau des vollständigen photokonduktiven Systems wird nachfolgend zunächst der Effekt der externen Frequenzkontrolle untersucht.

4.1 Frequenzstabilisierung

Um die Wirkungsweise der Laserstabilisierung zu demonstrieren, wurde die Differenzfrequenz der beiden Laser auf null gesetzt. Zur elektrischen Wandlung der optischen Schwebung wurde eine schnelle Photodiode verwendet. Mit einem Spektrumanalysator wurde die Frequenz der Schwebung gemessen. Über einen Zeitraum von 24 h wurden 2000 Messpunkte erfasst, deren Verlauf in Bild 5 gezeigt ist. Da der Spektrumanalysator nur den Betrag der Differenzfrequenz ausgibt, enthält Bild 5 nur positive Abweichungen vom Sollwert.

Ohne Stabilisierung schwankt die THz-Frequenz ständig um einige 100 MHz, was präzise Messungen nicht erlaubt. Mit Frequenzstabilisierung wird die ständige Oszillation der THz-Frequenz um den Sollwert

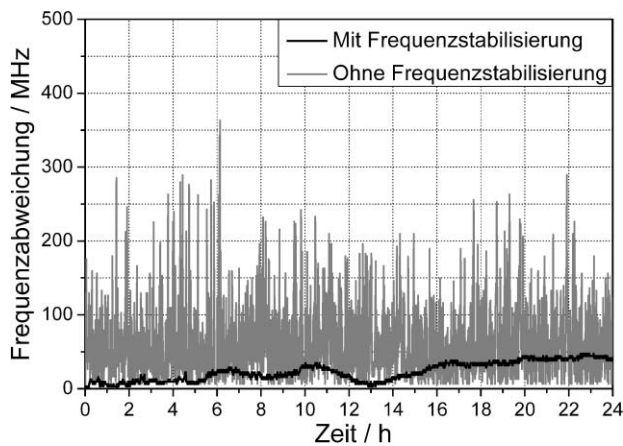


Bild 5: Abweichung der THz-Frequenz vom eingestellten Sollwert mit und ohne externe Frequenzstabilisierung.
Figure 5: Deviation of the THz frequency from the set-point with and without external frequency stabilization.

deutlich kleiner. Die Frequenz des Schwebungssignals weicht innerhalb von 24 h nur um 40 MHz vom Sollwert ab. Die erneute Annäherung an den Sollwert nach einer Messzeit von 13 h lässt sich durch den Tag-Nacht-Rhythmus erklären, der die Umgebungstemperatur auf langsamer Zeitbasis beeinflusst.

Neben der Langzeitstabilisierung der Laser wird auch die Linienbreite des Schwebungssignals verbessert. Mit Stabilisierung wurde auf einer Zeitbasis von 80 ms eine Linienbreite bei voller Breite und halber Höhe (engl. *full width half beam, FWHB*) von 1 MHz gemessen, während die Linienbreite ohne Stabilisierung 3 MHz beträgt.

4.2 Frequenzsteuerung

Die Präzision der Frequenzstabilisierung geht jedoch nicht zu Lasten der Abstimmgeschwindigkeit der THz-Frequenz, wie die nächste Messung zeigt. Die maximal zulässige Geschwindigkeit der Frequenzänderung beträgt 30 GHz/s und ist durch den Regelkreis der Etalons limitiert.

Statt mit einer Photodiode ist der Ausgang des Fasermoduls jetzt mit einem Photomischer beschaltet. Der zweite Ausgang mit dem optischen Schwebungssignal bleibt zunächst ungenutzt; als Empfänger dient eine schnelle Schottky-Diode [9]. Dadurch steht hier, ähnlich wie bei kryogenen Empfängern, keine Phaseninformation zur Verfügung. Dies ist zur Demonstration der schnellen Frequenzabstimmung aber bewusst gewählt. Bei phasensensitivem Heterodyn-Empfang müsste, wie unter Punkt 3 diskutiert, das THz-Signal bei jeder Fre-

quenz abgetastet werden. Der Anwender könnte so nicht von der schnellen Frequenzdurchstimmung profitieren. Neuste Veröffentlichungen zeigen jedoch, dass mit modifizierten Systemaufbauten auch eine direkte Phasenmessung möglich ist [10; 11]. Dadurch kann die Frequenzabstimmung mit der hier demonstrierten Geschwindigkeit erfolgen, ohne auf die Phaseninformation zu verzichten.

Die THz-Frequenz wurde von 0 bis 1 THz durchgestimmt, was aufgrund der erwähnten Reglerbegrenzung etwa 33 s dauert. Um die Daten schnell genug zu erfassen, wurde ein Mehrkanal-16-bit-A/D-Wandler verwendet. Dieser zeichnet parallel beide Komponenten des Quadratursignals und den Schottky-Strom im Emp-

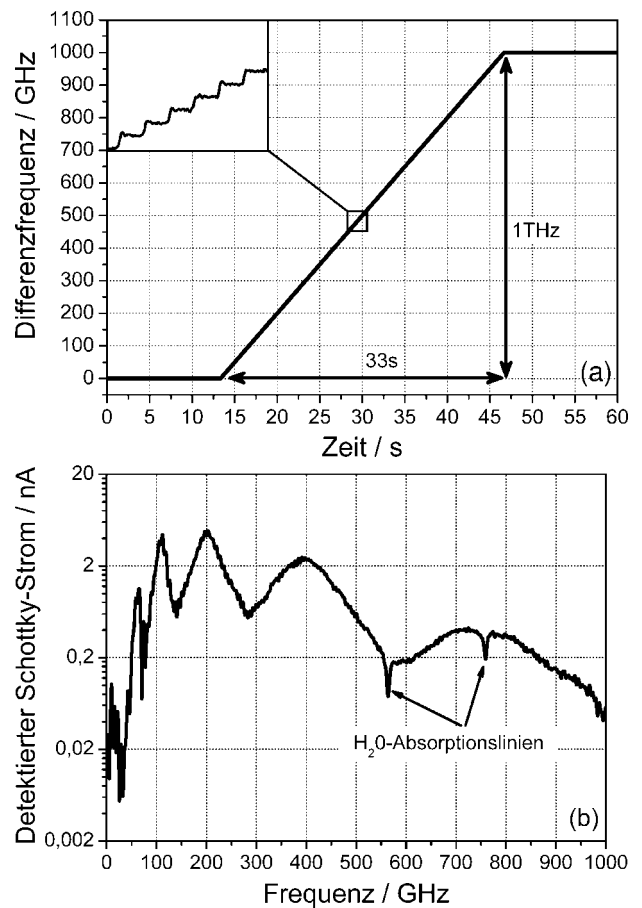


Bild 6: Gemessene THz-Frequenz (a) und synchron detektiertes THz-Signal (b). Die Detailaufnahme in Bild 6a zeigt die stufenförmige Änderung der THz-Frequenz durch die begrenzte Abstimmgeschwindigkeit.

Figure 6: Measured THz frequency (a) and synchronously detected THz signal (b). The inset in Figure 6a shows the stepwise change of the THz frequency due to the limited tuning speed.

fänger auf. Da hier nur ein Laser zum Abstimmen der THz-Frequenz verwendet worden ist, reicht die Aufzeichnung des zugehörigen Quadratursignals aus. Da Startfrequenz (≈ 0 Hz) und Periodizität des Quadratursignals (= FSR der Fabry-Pérot-Etalons) bekannt sind, kann die THz-Frequenz direkt aus dem Quadratursignal extrahiert werden. Dieses Verfahren ermöglicht eine bedeutend schnellere Frequenzmessung als beispielsweise die Verwendung eines Spektrumanalysators. Ein vierter Kanal zeichnet das Modulationssignal des transmittierenden Photomischers auf, dessen Bias mit einer Frequenz von 1 kHz moduliert wurde. Dadurch kann die Operationsweise eines Lock-In-Verstärkers nachgebildet werden, indem das gemessene THz-Signal mit dem Modulationssignal multipliziert wird und anschließend eine Tiefpassfilterung durchläuft. Eine direkte Verwendung eines Lock-In-Verstärkers ist auch möglich, doch der vorhandene Lock-In-Verstärker arbeitet nicht schnell genug, um die hohe Abstimmgeschwindigkeit auszunutzen.

Wie in Bild 6a gezeigt, kann mit der vorgestellten Methode der lineare Frequenzverlauf extrahiert werden. Die in der Detailaufnahme sichtbaren Stufen entstehen durch die Begrenzung der Abstimmgeschwindigkeit. Das parallel gemessene Amplitudenspektrum (siehe Bild 6b) weist die bekannten Wasserabsorptionslinien bei 560 GHz und 780 GHz auf [12]. Unterhalb von etwa 60 GHz konnte aufgrund der verwendeten Antenne kein Signal gemessen werden. Die Maxima bei z. B. 200 GHz und 400 GHz entstehen durch das log-periodische Antennendesign.

4.3 Photokonduktive Messungen

Nachfolgend ist die verwendete Schottky-Diode durch einen zweiten Photomischer ersetzt worden, welcher ebenfalls mit dem faseroptischen Modul verbunden ist. Der Systemaufbau entspricht nun der in Bild 3 gezeigten Anordnung.

Zur Bestimmung des SNR, der entscheidenden Kenngröße photokonduktiver Systeme, wurde der Frequenzbereich von 100 GHz bis 1,1 THz in Schritten von 10 GHz durchlaufen. Der Bias des transmittierenden Mischers wurde mit einer Frequenz von 220 Hz moduliert, alle anderen Parameter entsprechen den unter Punkt 3 angegebenen Werten.

Die in Bild 7 gezeigten Werte reichen von 72 dB bei 100 GHz bis zu 30 dB bei einer Frequenz von einem THz. Das Rauschniveau beträgt 29 pA und ist unabhängig von der THz-Frequenz. Wieder ist die Charakteristik der log-periodischen Antenne zu sehen. Zum Vergleich ist die mit CST Microwave Studio simulierte Antennenimpedanz dargestellt. Die bereits bekannte Wasserabsorptionslinie bei 560 GHz findet sich ebenfalls in der

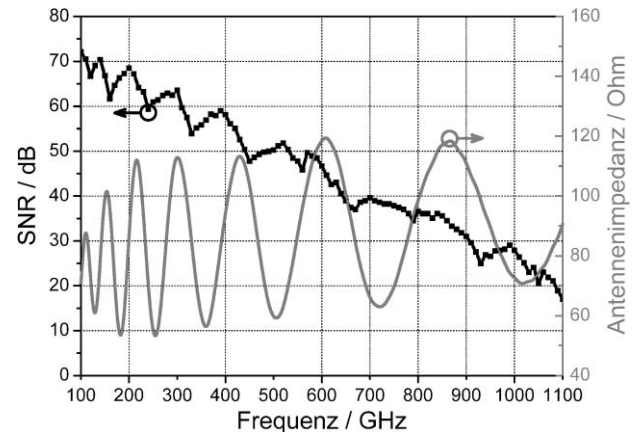


Bild 7: SNR des implementierten Systems mit photokonduktiver Detektion und simulierte Antennenimpedanz.

Figure 7: SNR of the implemented system in case of photoconductive detection and simulated antenna impedance.

Messung wieder. Die gemessene THz-Leistung beträgt etwa 50 nW bei einer Frequenz von 500 GHz. Um die Funktionalität des implementierten Systems zu demonstrieren, sind nachfolgend zwei Anwendungsbeispiele gezeigt, die sowohl Amplituden- als auch Phasenmessungen beinhalten.

4.3.1 Amplitudenspektrum eines MgO-Etalons

Als Beispiel für eine Probe mit charakteristischem Transmissionsspektrum im THz-Bereich wurde ein Magnesiumoxid-(MgO)-Plättchen mit einer Dicke von $h = 0,472$ mm vermessen. Ein solches Plättchen stellt einen einfachen Resonator mit einem freien Spektralbereich von $\Delta f = c/2nh$ dar. Der Brechungsindex von MgO für THz-Frequenzen ist etwa $n = 3,1$ [13]. Die optische Dicke der Probe beträgt daher $n \cdot h \approx 1,47$ mm, was Transmissionsmaxima im Abstand von etwa 106 GHz erwarten lässt. Wie in Bild 8 gezeigt, entspricht das beobachtete Transmissionsspektrum genau dem erwarteten Verlauf.

4.3.2 Feuchtigkeitsgehalt von Papier

Frequenzen im THz-Bereich sind ideal, um den Wassergehalt von Papier zu bestimmen, da THz-Strahlung von Papier nur wenig, von Wasser aber stark gedämpft wird [14]. Dieses wird hier exemplarisch demonstriert, indem Transmission und Phase eines Papiertuches bei einer Frequenz von 200 GHz gemessen werden. Das Tuch wurde zunächst mit Hilfe einer Sprühflasche befeuchtet. Während des anschließenden Trock-

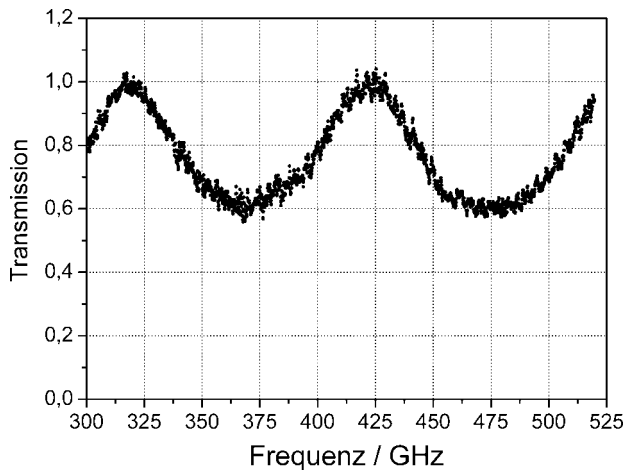


Bild 8: Transmissionsspektrum des MgO-Etalons.
Figure 8: Transmission spectrum of the MgO Etalon.

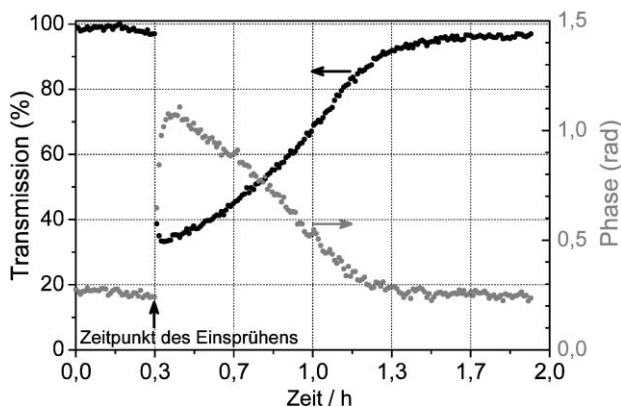


Bild 9: Trocknungskurve eines befeuchteten Papiertaschentuchs.
Figure 9: Drying curve of a moistened tissue.

nens wurden Transmission sowie Phase weiterverfolgt (siehe Bild 9).

Durch das Befeuchten ($t = 20$ min) nimmt die Transmission durch das Tuch erwartungsgemäß stark ab. Ebenso beobachtet man einen Sprung in der Phase. Anschließend konvergieren beide Parameter zurück gegen ihre ursprünglichen Werte, bis das Papiertuch nach mehr als einer Stunde vollständig getrocknet ist. Die Messung der Phase ist in dieser Präzision nur durch die sehr hohe Frequenzgenauigkeit und Frequenzstabilität unseres THz-Spektrometers möglich.

5 Zusammenfassung

Die optische Erzeugung von THz-Strahlung hat sich in den letzten Jahren etabliert. Die Qualität von photokonduktiven CW-THz-Systemen hängt dabei wesentlich von der Güte der verwendeten Laser ab. Der Einsatz von DFB-Lasern erleichtert zwar das Abstimmen der THz-Frequenz, erlaubt aber keine präzisen Messungen aufgrund der typischen Frequenzschwankungen. Die vorgestellte externe, interferometrische Wellenlängenstabilisierung löst dieses Problem und verbessert die Qualität konventioneller Systeme in mehrfacher Hinsicht.

Durch die Frequenzstabilisierung der Laser verringert sich zum einen die Linienbreite des THz-Signals, zum anderen steigt die Langzeitstabilität des Systems. So sind Messungen über mehrere Stunden mit Frequenzabweichungen von nur wenigen MHz möglich. Da die externe Frequenzkontrolle nicht nur zur Stabilisierung, sondern für die gesamte Frequenzsteuerung verwendet wird, kann jede beliebige THz-Frequenz mit der gleichen Genauigkeit eingestellt werden. Dadurch ist, im Vergleich zu nicht stabilisierten CW-THz-Systemen, eine wesentlich bessere Wiederholbarkeit der Messungen möglich. Dies erhöht die Qualität der Ergebnisse deutlich.

Literatur

- [1] W. L. Chan, M. L. Moravec, R. G. Baranuik und D. M. Mittleman: Terahertz imaging with compressed sensing and phase retrieval. In: *Optics Lett.* **33**(9), 974 (2008).
- [2] S. M. Kim et al.: Biochemical terahertz imaging with a quantum cascade laser. In: *Appl. Phys. Lett.* **88**, 153903 (2006).
- [3] H. Liu, H. Zhong, N. Karpowicz, Y. Cheng und X. Zhang: Terahertz Spectroscopy and Imaging for Defense and Security Applications. In: *Proceedings of the IEEE* **95**(8), 1514 (2007).
- [4] I. S. Gregory et al.: Continuous-wave terahertz system with a 60 db dynamic range. In: *Appl. Phys. Lett.* **86**, 204104 (2005).
- [5] G. Mouret et al.: Anomalous dispersion measurement in terahertz frequency region by photomixing. In: *Appl. Phys. Lett.* **88**, 181105 (2006).
- [6] R. Mendis et al.: Coherent generation and detection of continuous terahertz waves using two photomixers driven by laser diodes. In: *Int. J. Infrared Millim. Waves* **26**(2), 201 (2005).
- [7] R. H. DuHamel und D. E. Isbell: Broadband logarithmically periodic antenna structures. In: *IRE Nat. Convent Record* **5**, 119 (1957).
- [8] T. Müller-Wirts, U. S. Patent Nr. 6, 178, 002 (23 Jan. 2001).
- [9] Advanced Compound Semiconductor Technologies (ACST) www.acst.de.

- [10] T. Göbel, D. Schönherr, C. Sydlo, M. Feiginov, P. Meißner und H. L. Hartnagel: Continuous-wave terahertz system with electro-optical terahertz phase control. In: *Electron. Lett.* **44**(14), (2008).
- [11] A. M. Sinyukov et al.: Rapid-phase modulation of terahertz radiation for high-speed terahertz imaging and spectroscopy. In: *Optics Lett.* **33**(14), 1593 (2008).
- [12] High-resolution transmission molecular absorption database (HITRAN); <http://cfa-www.harvard.edu/HITRAN>.
- [13] J. Mazierska, D. Ledenyov, M. V. Jacob und J. Krupka: Precise microwave characterization of MgO substrates for HTS circuits with superconducting post dielectric resonator. In: *Supercond. Sci. Technol.* **18**, 18 (2005).
- [14] D. Banerjee, W. von Spiegel, M. D. Thomson, S. Schabel und H. G. Roskos: Diagnosing water content in paper by terahertz radiation. In: *Opt. Express* **16**(12), 9060 (2008).

Dipl.-Ing. Thorsten Göbel studierte von 1999–2003 Elektrotechnik an der Hochschule Darmstadt. Das Ingenieurdiplom der TU Darmstadt erhielt er 2005. Seit April 2006 ist er Doktorand in der Gruppe von Prof. Meißner und arbeitet im Rahmen seiner Dissertation an System und Komponenten zur CW-THz-Spektroskopie.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Optische Nachrichtentechnik, Merckstraße 25, 64283 Darmstadt, E-Mail: goebel@ont.tu-darmstadt.de

Dipl.-Ing. Daniel Schönherr studierte Elektrotechnik und Informationstechnik an der TU Darmstadt. Seit November 2005 ist er Doktorand in der Gruppe von Prof. Hartnagel und arbeitet im Rahmen seiner Dissertation an der Entwicklung von CW-THz-Systemen, die auf einer optischen Wellenlänge von 1,5 µm basieren.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Mikrowellenelektronik, Merckstr. 25, 64283 Darmstadt, E-Mail: schoenherr@mwe.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. Peter Meißner studierte Elektrotechnik an der TU Berlin. Nach seiner Promotion war er von 1971–1994 am Heinrich-Hertz-Institut im Bereich der optischen Übertragungssysteme beschäftigt. Seit 1995 ist er Professor für Optische Nachrichtentechnik an der TU Darmstadt mit den Forschungsfeldern PMD-Kompensation, optische THz-Erzeugung und abtimmbare Komponenten für WDM-Systeme.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Optische Nachrichtentechnik, Merckstr. 25, 64283 Darmstadt, E-Mail: meissner@ont.tu-darmstadt.de

Prof. em. Dr. Eng. Dr.h.c. mult. Hans L. Hartnagel (F. IEEE; F. InstP) studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen, wo er 1960 sein Diplom erhielt. Nach seiner Promotion 1971 an der Universität von Sheffield, England, erhielt er 1978 einen Ruf an die TU Darmstadt. Zusammen mit Prof. Hasegawa (Universität von Hokkaido) erhielt er 1991 den Max-Planck-Preis für die gemeinsame Arbeit auf dem Gebiet der Verbindungshalbleiter. Seit 2002 ist er emeritierter Professor an der TU Darmstadt. Seine Forschungsgebiete umfassen III-V-Halbleiter-basierte Komponenten für Anwendungen im THz- und Millimeterwellenbereich.

Adresse: Technische Universität Darmstadt, Mikrowellenelektronik, Merckstraße 25, 64283 Darmstadt, E-Mail: hartnagel@mwe.tu-darmstadt.de

Dipl.-Phys. Axel Roggenbuck studierte von 2000–2006 Physik an der Universität Siegen. Seit April 2006 ist er Entwickler bei TOPTICA Photonics und Doktorand bei Prof. Haring-Bolivar, Uni Siegen. Er beschäftigt sich mit der Regelung von Diodenlasern sowie der Erzeugung und Detektion von CW-THz-Strahlung.

Adresse: TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, 82166 München/Gräfelfing, E-Mail: axel.roggenbuck@toptica.com

M.Sc. Francois-Xavier Laroche studierte Photonik und Optoelektronik an den Universitäten St-Andrews und Heriot-Watt (Edinburgh). Von Juni bis August 2008 absolvierte er bei TOPTICA Photonics seine Masterarbeit über CW-THz-Spektroskopie.

Adresse: TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, 82166 München/Gräfelfing

Dr. Anselm Deninger studierte Physik an der Universität Mainz und promovierte in der Arbeitsgruppe von Prof. Otten. Von April bis August 2001 arbeitete Dr. Deninger als Gastwissenschaftler bei Nycomed Innovation in Malmö, Schweden. Seit September 2001 ist er bei TOPTICA Photonics beschäftigt. Als Produktmanager für den Bereich „Abstimmbare Industriediodenlaser“ ist er u. a. für Lasersysteme zur Erzeugung von CW-THz-Strahlung verantwortlich.

Adresse: TOPTICA Photonics AG, Lochhamer Schlag 19, 82166 München/Gräfelfing, E-Mail: anselm.deninger@toptica.com