

Kapitel 1

Einleitung

Ein jeder Abschnitt des elektromagnetischen Spektrums, der dem Menschen in der Vergangenheit zugänglich geworden ist, hat stets neue Chancen eröffnet und das Verständnis für die Welt die uns umgibt verbessert. Historische Vorbilder hierfür sind die Entdeckung der Röntgenstrahlung [1] oder der Nachweis von Radioaktivität durch *Curie* und *Becquerel* [2]. Doch erst die Verfügbarkeit von künstlichen Quellen lässt das vollständige Potenzial einer jeden Art von Strahlung erkennen und in ganzem Umfang ausschöpfen. Die Erfindung des Lasers durch *Maiman*, die sich jüngst zum fünfzigsten Mal jährte, ist wohl eines der prominentesten Beispiele und aus dem heutigen Zeitalter nicht mehr wegzudenken [3].

Der Mangel an künstlichen Quellen ist auch Ursache dafür, dass der Terahertzbereich deutlich geringer erforscht ist, als die benachbarten Gebiete der Mikrowellentechnik und Optik. Seit wenigen Jahren schließt sich die sogenannte „THz-Lücke“, die Frequenzen von 300 GHz bis 10 THz umfasst, durch den technologischen Fortschritt jedoch stetig und zeigt eine immense Anzahl von Einsatzgebieten für THz-Strahlung auf. Der Stellenwert der sogenannten „T-Strahlen“ lässt sich exemplarisch an der Zeitschrift *Technology Review* des Massachusetts Institute of Technology verdeutlichen. Diese benennt THz-Technologien als eine der 10 Errungenschaften, die unser Leben nachhaltig beeinflussen werden [4].

Zu den extraterrestrischen THz-Anwendungen zählen die Astronomie und die Atmosphärenforschung [5]. Da zahlreiche Moleküle, beispielsweise Wasser, Ozon oder Kohlenmonoxid, Emissionslinien im THz-Bereich aufweisen, lässt sich mit THz-Strahlung die chemische Zusammensetzung der eigenen Atmosphäre bestimmen und auf Änderungen hin überwachen [6]. Aber auch Informationen über die Beschaffenheit interstellarer Himmelskörper können gewonnen werden [7]. Die Vielzahl an neuen Erkenntnissen, die man sich durch die Analyse von Spektrallinien im THz-Bereich erhofft, motiviert auch die Errichtung neuer und äußerst teurer Radioteleskopanlagen. Als Beispiel sei das Atacama Large Millimeter Array (ALMA) in Chile genannt, dessen Aufbau mehrere hundert Millionen Euro kosten dürfte [8].

Terrestrische Einsatzmöglichkeiten finden sich in der Biomedizin beziehungsweise Chemie, wo komplexe DNS¹-Moleküle oder Proteine durch THz-Strahlung auf ihre Struktur

¹Desoxyribonukleinsäure

hin untersucht werden können [9, 10]. Die hohe Transparenz vieler Materialien im THz-Bereich, dazu zählen beispielsweise Papier, Textilien, Keramiken oder Polymere, öffnet den Weg für neue Verfahren zur bildgebenden Qualitätskontrolle von Industrieprodukten und in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung [11, 12]. Die zur Zeit wohl populärste Anwendung dürften jedoch die Durchleuchtungsapparate für Sicherheitskontrollen sein, die in zahlreichen Presseberichten als sogenannte „Nacktschanner“ betitelt worden sind [13]. Aufgrund ihrer niedrigen Energie sind THz-Strahlen nicht ionisierend und daher weit weniger gefährlich für biologisches Gewebe als Röntgenstrahlung. Zusätzlich besitzen diverse Plastiksprengstoffe ein charakteristisches Absorptionsspektrum im Frequenzband zwischen 500 GHz und 3 THz, sodass mit THz-basierten Technologien die Funktionalitäten mehrerer herkömmlicher Sicherheitssysteme in nur einer Anordnung vereint werden können [14].

Die Reichhaltigkeit der hier nur exemplarisch aufgezeigten Anwendungen und die vergleichsweise kurze Historie der THz-Messtechnik hat in jüngerer Vergangenheit intensive Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der THz-Quellen und THz-Detektoren motiviert [15]. Im Bereich der kohärenten Quellen konkurrieren rein elektronische Ansätze wie Frequenzvervielfacher [16], Gunn-Dioden [17] oder Quantenkaskadenlaser [18], mit optoelektronischen Verfahren. Bei Letztgenannten wird zwischen gepulsten THz-Systemen und Dauerstrich-THz-Systemen unterschieden. Die Attraktivität optoelektronischer Lösungen liegt vor allem in ihrer Breitbandigkeit und in der vergleichsweise einfachen Handhabung. Dies ist auch Ursache dafür, dass anfänglich fast ausschließlich optoelektronische Kurzpulssysteme zur THz-Erzeugung verwendet worden sind [19–21]. Auch die ersten kommerziell erhältlichen THz-Systeme basierten ausnahmslos auf der Kurzpulstechnik [22, 23]. Erst in den letzten Jahren sind Dauerstrich-THz-Systeme durch die gestiegenen Anforderungen und dem Wunsch nach höherer Frequenzauflösung verstärkt nachgefragt worden. Zur Generation von Dauerstrich-THz-Signalen hat sich die sogenannte Photomischung, eine heterodyne Differenzfrequenzerzeugung in schnellen Photohalbleitern, als besonders geeignet herauskristallisiert. Vor allem durch den technologischen Fortschritt im Bereich der ultraschnellen III/V-Verbindungshalbleiter ist dieses, vor gut 35 Jahren erstmals vorgeschlagene, Prinzip [24, 25] zum bislang effektivsten Verfahren zur Realisierung extrem breitbandiger Dauerstrich-THz-Quellen herangereift [26].

Das zweite Arbeitsgebiet der THz-Forschung geht über die reine Erzeugung von THz-Signalen hinaus. Hier gilt es **Systeme, Verfahren und Komponenten** für die THz-Messtechnik zu entwickeln und für die genannten Anwendungen zu optimieren. Zwar erfordern nicht alle Einsatzgebiete die gleichen Leistungsmerkmale, im Allgemeinen können die Anforderungen an heutige THz-Systeme jedoch wie folgt zusammengefasst werden:

- ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis,
- kohärente Detektion,
- eine große Messbandbreite (\propto THz),
- eine präzise Frequenzauflösung (\propto MHz)
- und eine kurze Messdauer (\propto s).

Alleine anhand der geforderten Messbandbreite ist bereits erkennbar, dass rein elektronische Verfahren nur mit deutlichen Abstrichen zur THz-Spektroskopie einsetzbar sind, da Frequenzen im THz-Bereich gar nicht oder nur mit mehrstufigen Konzepten abgedeckt werden können. Mit Quantenkaskadenlasern sind zwar große Abstimmbereiche erzielt worden (680 GHz - 3,33 THz), allerdings nur bei kryogenen Temperaturen und in Anwesenheit starker Magnetfelder [27]. Mit photokonduktiven optoelektronischen Ansätzen lassen sich die gestellten Anforderungen in Bezug auf die Messbandbreite hingegen einfach erfüllen. Im Dauerstrichbetrieb gelang es *Brown* den Frequenzbereich von 100 GHz bis 3,8 THz² mit nur einem Photomischer kontinuierlich abzudecken [28], mit gepulsten Konzepten sind sogar Bandbreiten von über 10 THz demonstriert worden [29]. Hinsichtlich der Messauflösung sind Dauerstrich-THz-Systeme gegenüber Kurzpuls-THz-Systemen jedoch signifikant im Vorteil, Frequenzauflösungen von deutlich unter einem Gigahertz konnten bislang nur im Dauerstrichbetrieb realisiert werden. Zudem sind Kurzpulssysteme aufgrund des benötigten Femtosekundenlasers erheblich teurer als Dauerstrichkonfigurationen. Die Kombination aus großer Bandbreite und hoher Frequenzauflösung, den relativ geringen Kosten und der, im Vergleich zu elektronischen Quellen, einfachen Handhabung machen photokonduktive Dauerstrich-THz-Systeme zum idealen Kandidaten für spektroskopische Anwendungen.

1.1 Zielsetzung

Das Ziel der vorliegenden Dissertation lässt sich dreigeteilt formulieren. Die erste Aufgabe besteht in der Entwicklung photokonduktiver Dauerstrich-THz-Systeme zur breitbandigen THz-Spektroskopie. Durch den Einsatz neuer Verfahren sollen Genauigkeit, Langzeitstabilität und Wiederholbarkeit kohärenter THz-Messungen verbessert werden. Auch Lösungen, welche eine deutliche Reduzierung der Messdauer erlauben, sollen erarbeitet werden. Hier sind (bei gleicher Frequenzauflösung) gepulste Systeme bislang deutlich im Vorteil und die Messgeschwindigkeit ist einer der Hauptkritikpunkte an der Dauerstrichmesstechnik. Weiterhin gilt es die Zuverlässigkeit photokonduktiver Dauerstrich-THz-Systeme zu steigern und somit den Grundstein für eine erfolgreiche Kommerzialisierung zu legen.

Das zweite Ziel liegt im Entwurf von Komponenten zur THz-Spektroskopie. Äquivalent zu dem einleitend ausgeführten Nachholbedarf in Bezug auf THz-Quellen und THz-Detektoren, besteht auch ein Mangel an Komponenten. Polarisationsfilter, Strahlteiler oder kalibrierte Dämpfungsglieder sind bislang nur rudimentär erhältlich, sodass hier ein signifikanter Forschungsbedarf besteht. Im Zuge dessen sollen in der Arbeit neuartige Resonatoren auf ihre grundsätzliche Eignung als THz-Sensor geprüft werden. Neben grundlegenden Untersuchungen zur Optimierung der Sensitivität gilt es auch die Kombinierbarkeit der Resonatoren mit den vorangehend entwickelten THz-Systemen zu bewerten und beim Entwurf zu berücksichtigen.

Ein dritter Schwerpunkt hat die Entwicklung von integrierten Dauerstrich-THz-Spektrometern zum Ziel, die zur Untersuchung kleinster Proben verwendet werden können. Hier

²Mit einem für sehr hohe THz-Frequenzen optimierten Mischer konnten auch 5 THz erreicht werden.

sind photokonduktiver THz-Emitter, Sensoreinheit und THz-Detektor auf einem Halbleitersubstrat vereint. Die, im Vergleich zu diskreten THz-Systemen, deutlich reduzierten Abmessungen erfordern den Einsatz neuartiger Messverfahren, die in dieser Arbeit implementiert werden sollen. Auch hier gilt es weiterführende Erhebungen durchzuführen, um Sensitivität und nutzbare Bandbreite der integrierten Strukturen zu verbessern.

1.2 Kapitelübersicht

Die vorliegende Arbeit ist wie folgt gegliedert: Kapitel 2 stellt das Prinzip der Photomischung zur Erzeugung von Dauerstrich-THz-Strahlung vor und führt grundlegende Entwurfskriterien für Photomischer ein. Anschließend werden verschiedene Konfigurationen leistungssensitiver THz-Systeme auf ihre Effizienz untersucht. Dabei wird insbesondere auf die Lebensdauer photokonduktiver THz-Emitter eingegangen, um die Zuverlässigkeit optoelektronischer Dauerstrich-THz-Systeme zu verbessern.

Kohärente Dauerstrich-THz-Systeme werden in Kapitel 3 behandelt, welches mit der Erörterung des Photomischer als THz-Detektor beginnt. Zur Verbesserung phasensensitiver THz-Messungen hinsichtlich Signalstabilität, Wiederholbarkeit und Messgeschwindigkeit werden einerseits klassische Messverfahren und Aufbauten optimiert, andererseits kommen neue Systemkonfigurationen und Messtechniken zum Einsatz. Diese bieten einzigartige Möglichkeiten zur Realisierung kompakter und schneller THz-Systeme.

Kapitel 4 konzentriert sich auf die Entwicklung von Komponenten zur THz-Spektroskopie. Resonante Subwellenlängen-Gitter werden auf ihre grundlegende Eignung als THz-Sensor geprüft. Um eine schnelle computergestützte Synthese der Subwellenlängen-Sensoren zu ermöglichen wird ein analytisches Modell entwickelt, dessen Gültigkeit mittels numerischer Simulationen verifiziert wird. Der Einfluss von Geometrie und Material auf die resonanten Eigenschaften der Subwellenlängen-Gitter wird dabei ebenso eingehend untersucht, wie die Kombinierbarkeit mit den vorangehend entworfenen THz-Systemen.

Kapitel 5 befasst sich mit dem Design integrierter THz-Sensorsysteme. Zunächst werden die prinzipiellen Anforderungen an solche Systeme vorgestellt und diskutiert, bevor die spezifischen Problematiken bei der Realisierung integrierter THz-Systeme erläutert werden. Ein entwickeltes semianalytisches Modell dient auch hier zur rechnergestützten Konzeptionierung der integrierten THz-Sensoren. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird ein integriertes THz-Spektrometer implementiert, dessen Funktionalität mit verschiedenen Messverfahren demonstriert wird.

Die Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und der Ausblick auf zukünftige Arbeiten beschließen diese Arbeit in Kapitel 6.