

---

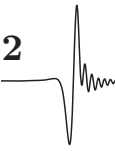
# 1 Einleitung

Circa 500 Jahre vor Christi Geburt subsumierte Heraklit seine Beobachtungen der Natur mit den Worten: „Alles fließt! - Panta Rhei“. Stände Heraklits Forschergeist heute erneut vor einer solchen Aussage, wäre es denkbar, dass er stattdessen die Worte „Alles streut!“ wählen würde. Schließlich ist das Konzept der Streuung aus der heutigen Physik nicht mehr wegzudenken, erklärt es doch zahlreiche Phänomene der Natur. Dank des heutigen Verständnisses von Streuprozessen können wir nicht nur erklären, warum der Himmel blau ist [1], und beweisen, dass Atome einen schweren Kern haben müssen [2]. Wir sind auch in der Lage, komplexe Radarsysteme zu entwickeln, die sowohl im Straßen- als auch im Luftverkehr für Sicherheit sorgen, und können Kommunikationssysteme dank präziser Kanalausbreitungsmodelle so auslegen, dass stets ein zuverlässiger Empfang gewährleistet ist. Kurzum - Streuprozesse sind sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus technischer Sicht von herausragender Bedeutung.

Während das Streuverhalten von elektromagnetischen Wellen in den meisten spektralen Bereichen bereits ausgiebig untersucht wurde, existieren bisher nur wenige Studien, die sich mit Streuung von Terahertz (THz)-Wellen, das heißt der Streuung von Strahlung mit Frequenzen zwischen 0,1 bis 10 THz, beschäftigen. Begründet liegt dieser Mangel an Untersuchungen keineswegs im geringen wissenschaftlichen Interesse, sondern in der Tatsache, dass THz-Quellen und -Detektoren erst seit wenigen Jahren technisch nutzbar sind. Die vorliegende Dissertation soll zum Verständnis des Streuverhaltens von THz-Wellen beitragen und Anwendungspotentiale für dieses Wissen aufzeigen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein sehr breites Themenspektrum betrachtet, so dass von der klassischen Gliederung in Theorie und Ergebnisteil abgewichen und statt dessen eine themenbezogene Struktur gewählt wurde. Dieses Vorgehen ermöglicht trotz der Vielzahl an dargelegten Aspekten eine übersichtliche Präsentation der Ergebnisse und sorgt für einen kontinuierlichen Lesefluss.

Kapitel 2 führt den Leser in die Grundlagen der THz-Systemtechnik ein. Neben Emissions- und Detektionsverfahren für THz-Wellen wird die THz-Zeitbereichsspektroskopie als zentrale Messmethode dieser Arbeit und ihre Anwendungen im wissenschaftlichen und technischen Umfeld besprochen. Eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen für diese Arbeit verwendeten THz-Spektrometer folgt in Kapitel 3. Aufbauend auf diesen messtechnischen Grund-



lagen wendet sich die Arbeit ihrem zentralen Thema zu: dem Streuverhalten von THz-Wellen.

Zunächst werden in Kapitel 4 die dielektrischen Eigenschaften heterogener Materialien diskutiert, die durch Effektive-Medien-Theorien beschrieben werden können. Teil der Betrachtungen ist eine neuentwickelte Erweiterung des häufig verwendeten Bruggeman-Ansatzes [3], die sich besonders flexibel für die Modellierung heterogener Materialien bei THz-Frequenzen einsetzen lässt wie an verschiedenen Messreihen aufgezeigt wird.

Kapitel 5 geht von der Beschreibung eines Vielteilchensystems über zur Betrachtung isolierter Streukörper. Hier wird das Potential der THz-Zeitbereichsspektroskopie für Radarquerschnittsmessungen aufgezeigt, wobei zunächst einfache Streukörper wie Kugel, Zylinder und Platte als Referenzobjekte dienen und im Anschluss skalierte Flugzeugmodelle mit komplexer Geometrie betrachtet werden.

Kapitel 6 widmet sich der diffusen Streuung an rauen Oberflächen, insbesondere im Hinblick auf deren Bedeutung für hochbitratige THz-Kommunikationssysteme. Im Zentrum der Betrachtung steht die Frage, inwieweit sich die Kirchhoff-Streutheorie für Kanalmodelle nutzen lässt, die für die Propagationsmodellierung in THz-Kommunikationssystemen benötigt werden [4].

Schließlich werden in den Kapiteln 7 und 8 zwei Themenfelder betrachtet, die sich Streuung im erweiterten Sinne zu Nutze machen: Zum einen wird ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes bildgebendes Verfahren erläutert, das auf dem Einsatz periodisch rauer Oberflächen in Form von Blazegittern aufbaut. Dem Verfahren liegt die Idee zu Grunde, die Frequenzbandbreite von THz-Zeitbereichsspektrometern in orts aufgelöste Information über das Absorptionsverhalten einer Probe zu transformieren [5]. Dadurch kann eine Bildlinie um mehrere Größenordnungen schneller erfasst werden, als dies mit konventionellen Techniken möglich ist.

Zum anderen werden zwei neuartige Konzepte für THz-Metamaterialien vorgestellt [6, 7], die aufgrund ihrer Sub-Wellenlängen-Ausmaße oft auch als streuende Metapartikel interpretiert werden. Diese Strukturen weisen extrem scharfe Resonanzen auf und eignen sich daher besonders gut für den Einsatz in hochsensitiven Dünnschichtsensoren oder schmalbandigen Kerbfiltern.

Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Experimente.

---

## 2 Grundlagen der THz-Systemtechnik

Die THz-Forschung hat in den letzten Jahrzehnten die Aufmerksamkeit zahlreicher Wissenschaftler auf sich gezogen und ist dank rasanter technologischer Fortschritte aus ihren Kinderschuhen herausgewachsen. Doch worin liegt der Reiz dieses Frequenzbereichs? Welche Anwendungsgebiete gibt es? Welche THz-Quellen und -Detektoren stehen heute zur Verfügung? Was versteht man unter THz-Zeitbereichsspektroskopie? Und wie kann die vorliegende Arbeit zur technischen Nutzbarkeit der THz-Technologie beitragen? Der Beantwortung dieser Fragen widmet sich das folgende Kapitel, um so die Motivation für die vorliegende Arbeit aufzuzeigen und den Leser in die Welt der THz-Technologie einzuführen.

Der THz-Frequenzbereich liegt eingebettet zwischen den Mikrowellen und der Infrarotstrahlung. Er übernimmt somit eine Brückenfunktion zwischen den Domänen der Elektronik und der Optik. Trotz des beträchtlichen wissenschaftlichen Interesses hat sich dieses spektrale Fenster zwischen 0,1 THz und 10 THz als einer der unzugänglichsten Teile des elektromagnetischen Spektrums erwiesen. Bis vor wenigen Jahren wurde der THz-Bereich daher auch als „THz-Lücke“ bezeichnet, da nur wenige, meist sehr kostspielige Quellen, wie z.B. Backward-Wave-Oszillatoren oder Freie-Elektronen-Laser, beschränkte Einblicke in diese hochinteressante, aber nur schwer erfassbare, spektrale Domäne erlaubten [8]. Die akademische Nischenexistenz der THz-Forschung endete mit der Erfindung des Femtosekunden(fs)-Titan-Saphir(Ti:Sa)-Lasers in den späten 1980ern [9], der seither als Basis für eine Reihe von damit verbundenen THz-Zeitbereichsspektroskopie-Verfahren dient [10–12]. Darüber hinaus wurden Mitte der 1990er Jahre kostengünstige Alternativen in Form von Dauerstrichspektrometern entwickelt, die auf der Photomischung zweier leicht gegeneinander verstimmtener Diodenlaser beruhen, deren Schwebungsfrequenz im THz-Bereich liegt [13–15]. Des Weiteren haben mikrowellenbasierte Quellen begonnen, zu THz-Frequenzen vorzustoßen [16–19]. Heutzutage steht eine Vielzahl zuverlässiger THz-Quellen und Detektoren zur Verfügung, die das enorme Anwendungspotential der THz-Technologie erschließen und den breiten, sowohl industriellen als auch wissenschaftlichen, Einsatz dieser innovativen Messtechnik ermöglichen.

Im Folgenden werden zunächst verschiedene Verfahren zur Emission und Detektion von THz-Wellen vorgestellt. Insbesondere photoleitende Antennen finden ausführlich Betrachtung, da sie für die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente als Emitter und Detektor dienen. Im Anschluss führt ein Abschnitt in die Grundlagen der THz-Zeitbereichsspektroskopie ein, wobei eine detaillierte Beschreibung der verschiedenen verwendeten THz-Spektrometer erst in Kapitel 3 folgt. Im letzten Abschnitt werden einige Anwendungsgebiete der THz-Systemtechnik betrachtet und der Bezug zu den im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Inhalten geknüpft, um die weiteren Ausführungen anschaulich zu motivieren.

## 2.1 Verfahren zur Emission von THz-Strahlung

Dank der rasanten technischen Entwicklung der letzten Jahre, steht heute eine Vielzahl von Generations- und Detektionsverfahren für THz-Wellen zur Verfügung. THz-Quellen können dabei zum einen in elektronische und optische Verfahren und zum anderen in gepulste und Dauerstrich-Systeme unterteilt werden. Während gepulste Systeme mit meist optisch erzeugten Pikosekunden(ps)-Pulsen arbeiten, die Frequenzkomponenten von wenigen zehn Gigahertz bis hin zu etlichen Terahertz beinhalten, kommt bei Dauerstrichquellen nur Strahlung einer einzigen Frequenz zum Einsatz. In Tab. 2.1 sind einige häufig genutzte Verfahren zur Erzeugung von THz-Strahlung zusammengefasst und kategorisiert. In diesem Abschnitt soll eine Übersicht über diese ausgewählten Verfahren gegeben werden, wobei auf detaillierte Ausführungen verzichtet und stattdessen auf Literaturquellen verwiesen wird. Eine Ausnahme stellen photoleitende Antennen dar, die in Abschnitt 2.3 gesondert behandelt werden, da sie für alle in dieser Arbeit durchgeführten Messungen Verwendung fanden.

### 2.1.1 Elektronische THz-Quellen

Wenn Dauerstrichquellen mit hoher Ausgangsleistung im Milliwattbereich benötigt werden, kommen häufig auf Röhrentechnik beruhende Backward-Wave-Oszillatoren zum Einsatz [20]. Allerdings sind röhrenbasierte Quellen oftmals auf eine Lebensdauer von wenigen tausend Betriebsstunden begrenzt und die starken elektrischen und magnetischen Felder, die für den Betrieb benötigt werden, limitieren ihr Einsatzgebiet meist auf Forschungslaboratorien.

Deutlich einfacher in der Handhabung sind verschiedene Hochfrequenzdioden [19, 21, 22], wie beispielsweise resonante Tunneldioden, die mittlerweile auch in den THz-Frequenzbereich vorgestoßen sind, auch wenn die

| Elektronik   | Optik  |   |
|--|--|---|
|  | Dauerstrich  | Gepulst   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Backward-Wave-Oszillatoren</li> <li>• Resonante Tunnelioden</li> <li>• IMPATT- oder Gunn-Dioden kombiniert mit Schottky Frequenzvervielfachern</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• p-Germanium-Laser</li> <li>• Quantenkaskadenlaser</li> <li>• Gaslaser</li> <li>• Photomischung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Optische Gleichrichtung</li> <li>• Oberflächenemitter</li> <li>• Photoleitende Antennen</li> </ul> |

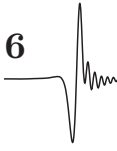
**Tabelle 2.1:** Übersicht THz-Emitter

erreichbaren Ausgangsleistungen deutlich hinter denen der röhrenbasierten Techniken zurückbleiben [16–18]. Interessant ist in diesem Zusammenhang auch die in den vergangenen Jahren häufig genutzte Möglichkeit, eine bei einigen zehn Gigahertz arbeitende Gunn- oder Lawinen-Laufzeit-Diode (engl.: Impact Ionization Avalanche Transit, IMPATT) in Kombination mit Schottky-Frequenzvervielfachern zu verwenden. Auf diese Weise konnten THz-Wellen mit mehreren zehn Mikrowatt Ausgangsleistung erzeugt werden [23, 24].

### 2.1.2 Optische Dauerstrichemitter

Da Halbleiterlaser für Frequenzen unterhalb des mittleren Infrarotbereichs nicht mehr zur Verfügung stehen, müssen im THz-Frequenzbereich andere Generationskonzepte genutzt werden [25]. Neben eher exotischen Ansätzen wie dem p-Germanium-Laser [26, 27], der Intrabandübergänge im Valenzband zwischen Leichtloch- und Schwerlochzuständen ausnutzt, werden vor allem Gaslaser oder Quantenkaskadenlaser (engl.: Quantum Cascade Laser, QCL) eingesetzt. Erstere nutzen Rotationsübergänge von Gasmolekülen bei THz-Frequenzen zum Lasen aus. Eine häufig verwendete Konfiguration stellt der beispielsweise bei 2522 GHz arbeitende Methanollaser [28] dar, wie er 2004 von der NASA im Satelliten AURA verbaut wurde, um dort für ein Messinstrument zur Bestimmung des OH-Gehalts in der Strato- und Mesosphäre als Lokaloszillator zu dienen [29].

Als Alternative zu Gaslasern sind in den letzten Jahren THz-Quantenkaskadenlaser immer stärker in den Fokus des wissenschaftlichen und technischen Interesses gerückt [30–34]. Ein QCL besteht aus epitaktisch gewachsenen Hetero-



quantenfilmen, z.B. Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) und Galliumarsenid (GaAs), die eine quantenmechanische Beschränkung (engl.: Quantum Confinement) der Elektronen im Leitungsband entlang der Wachstumsachse und somit eine komplexe Subbandstruktur mit diskreten Energieniveaus hervorrufen [35]. Elektronenübergänge zwischen diesen künstlich geschaffenen Energiezuständen führen zur Emission eines Photons, dessen Frequenz durch die Energiedifferenz der am strahlenden Übergang beteiligten Energieniveaus bestimmt ist. Durch Anlegen einer Spannung können die Bänder verkippt werden, so dass eine stufenähnliche Bandstruktur entsteht. Da das am strahlenden Übergang beteiligte Elektron nicht mit einem Loch rekombiniert, sondern auch nach dem Übergang im Leitungsband zur Verfügung steht, kann es an weiteren strahlenden Übergängen teilhaben und dabei Stück für Stück über die Potentialkaskade relaxieren. Die QCL-Struktur bietet aufgrund ihrer künstlich erschaffenen Subbänder die Möglichkeit, die Emissionswellenlänge in weiten Bereichen vom Infrarot bis hin zu THz-Frequenzen einzustellen, wobei zu tiefen Frequenzen unterhalb einiger 10 THz eine aufwendige Kühlung notwendig wird und auch die Wellenführung in den dünnen epitaktischen Schichten zu langen Wellenlängen zunehmend kompliziert wird.

Eine weitere Möglichkeit, Dauerstrich-THz-Strahlung zu generieren, stellt die Photomischung dar [13–15]. Zwei in ihrer Frequenz leicht gegeneinander verstimmte Laserstrahlen werden auf eine photoleitende Antenne fokussiert. Die Intensität in der photoleitenden Lücke errechnet sich dabei als Quadrat der summierten elektrischen Felder beider einfallender Laserstrahlen. Somit enthält sie auch einen Differenzfrequenzterm  $\Delta\omega = |\omega_1 - \omega_2|$ , wobei  $\omega_1$  und  $\omega_2$  die Frequenzen der beiden Laserstrahlen bezeichnen. Durch geeignete Wahl der Differenzfrequenz kann auf diese Weise eine THz-Welle abgestrahlt werden. Für die Photomischung wurden in der Literatur zahlreiche Elektrodengeometrien vorgeschlagen, da durch die geschickte Wahl der Antennenstruktur sowohl die Auskopplungseffizienz als auch das Strahlprofil optimiert werden können [36].

### 2.1.3 Optische Breitbandemitter

Für die Erzeugung breitbandiger THz-Pulse kommen vorrangig drei Verfahren zum Einsatz: Optische Gleichrichtung, Oberflächenemitter und photoleitende Antennen.

Optische Gleichrichtung wurde erstmals in Potassium-Dideuterium-Phosphat ( $\text{KD}_2\text{PO}_4$  - DKDP) im Jahre 1962 von Bass et al. beobachtet [37]. Materialien, deren Suszeptibilität  $\chi$  ein nicht-lineares Element  $\chi_2$  beinhaltet, so dass sich eine zeitabhängige Polarisierung gemäß