



1 Einleitung

Die ersten belegten Arbeiten zur Optik stammen aus der Antike. Empedocles (ca. 490-430 v.Chr.) und Euklid (ca. 300 v.Chr.) kannten sich schon mit der geradlinigen Ausbreitung, der Brechung und Reflexion von Licht aus. Auch erste optische Komponenten waren damals bekannt wie Brennläser und Spiegel. Optik im klassischen Sinn ist die Lehre vom sichtbaren Licht, also elektromagnetischer (EM) Strahlung mit Wellenlängen von 380 nm bis 780 nm. Da diese Strahlung mit der ältesten bekannten Messapparatur wahrgenommen werden kann, dem menschlichen Auge. Seit der Antike ist das Wissen über die Natur des Lichts enorm gewachsen. Dennoch ist noch lange nicht jedem klar, dass Röntgenstrahlung, das sichtbare Licht, die Energie, die in der Mikrowelle das Essen erwärmt, und die UKW-Frequenzen, die am Radio eingestellt werden, Ausprägungen eines einzigen physikalischen Phänomens sind und sich nur in ihrer Frequenz bzw. Energie unterscheiden. Jeder Frequenz des EM-Spektrums lässt sich in der modernen Welt eine wichtige Funktion zuordnen, mit Ausnahme des Bereichs, der mit Frequenzen von 0,1 bis 10 Terahertz (THz) schwingt. Das liegt vor allem daran, dass erst seit ca. 1990 die entsprechenden Geräte zur Erzeugung und Detektion von THz-Wellen zur Verfügung stehen. Besonders in den letzten Jahren hat es einen rasanten technologischen Fortschritt in diesem Gebiet gegeben und viele Wissenschaftler sind auf der Suche nach der Anwendung (*Killerapplikation*) die den THz-Wellen zum Durchbruch verhilft.

Der stetige Fortschritt bei der Entwicklung neuer kostengünstiger THz-Systeme führt zu sinkenden Systempreisen. Die sinkenden Preise erhöhen den Druck auf die Entwickler quasioptischer Komponenten auch diese möglichst preisgünstig anzubieten. Durch den sehr viel längeren Vorlauf ist das Bauteilsortiment für die klassische Optik bereits gut gefüllt und über die Jahrhunderte perfektioniert worden. Im Gegensatz dazu erforschen Wissenschaftler erst seit ca. 20 Jahren die Möglichkeiten des THz-Frequenzbereiches. Dementsprechend ist das Entwicklungspotenzial in diesem Bereich noch sehr groß. Als ein Beispiel, warum die Konzepte aus der klassischen Optik nicht einfach übernommen werden können und neue Produktionsverfahren entwickelt werden müssen, sei die Transparenz von Fensterglas für die Optik im Vergleich zur Opazität im THz-Frequenzbereich genannt.

Diese Arbeit trägt dazu bei, den Vorsprung, den die klassische Optik hat, zu verringern, indem hier neue für den THz-Frequenzbereich optimierte Komponenten entwickelt und neue Materialien und Herstellungsmethoden für deren Bau untersucht werden. Einige überraschende Materialien und unerwartet einfache Lösungen für den Bau von THz-Komponenten wurden dazu gefunden und erforscht. So eignet sich Kopierpapier zur Herstellung von Wellenplatten und aus Urinbeuteln aus dem Krankenhausbedarf lassen sich Linsen mit variabler Brennweite fertigen. Als ein überaus leistungsfähiges Material

haben sich auch die in dieser Arbeit erstmals vermessenen Mikropulver herausgestellt, die ursprünglich für die Farbenindustrie entwickelt wurden. Diese lassen sich durch Pressen unter hohem Druck zu nahezu transparenten Bauteilen mit komplexer Struktur und hoher Oberflächengüte verarbeiten.

Die physikalischen Grundlagen sind bei der Erforschung quasioptischer Komponenten die gleichen wie in der Optik bis auf eine Ausnahme, die Wellenlänge. Deshalb werden Komponenten, die im THz-Frequenzbereich eingesetzt werden, auch nicht Optiken sondern Quasioptiken genannt. Alle theoretischen Grundlagen der hier beschriebenen Quasioptiken sind Inhalt von Lehrbüchern der Optik. Diese Arbeit orientiert sich in ihrem Aufbau und den verwendeten Begrifflichkeiten am Lehrbuch von Hecht *Optik* aus dem Addison-Wesley Verlag in seiner zweiten Auflage.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in 8 Kapitel. Kapitel 2 führt den Leser in die experimentellen und theoretischen Grundlagen dieser Arbeit ein. Der THz-Frequenzbereich wird in das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung eingeordnet und der Begriff der Quasioptik in Abgrenzung zur Optik definiert. Darauf folgt ein Überblick über die Methoden zur Erzeugung und Empfang der THz-Strahlung. Als die zentrale Messmethode dieser Arbeit wird die THz-Zeitbereichsspektroskopie ausführlich beschrieben und die Besonderheiten und der Aufbau der beiden in dieser Arbeit eingesetzten THz-Spektrometer aufgezeigt.

In Kapitel 3 werden die dielektrischen Parameter einiger Materialien genauer betrachtet, die sich zum Bau von Quasioptiken eignen. Erst werden die altbekannten Kunststoffe, Halbleiter und Gläser zusammengefasst und anschließend einige in dieser Arbeit erstmals untersuchte Materialien gezeigt. Dabei handelt es sich um Mikropulver, die durch ihre guten Verarbeitungseigenschaften und ihre niedrige Absorption ideal für den Bau quasioptischer Komponenten geeignet sind. Ergänzt wird dieses Kapitel durch Messungen an Mikropulvern, die mit hochbrechenden Additiven gefüllt sind, um Materialien mit hohem Brechungsindex zu erhalten.

Nachdem in den ersten Kapiteln die experimentellen Grundlagen und die nötigen Materialien zum Bau von quasioptischen Komponenten besprochen wurden, folgen in den nächsten Kapiteln die verschiedenen quasioptischen Komponenten für den THz-Frequenzbereich. Diese sind aufgeteilt nach den Grundlegenden optischen Eigenschaften. Für die geometrische Optik stehen die strahlformenden Quasioptiken, es gibt ein Kapitel zur Polarisation und eines zur Beugung. Das aktive Bauelement, das in dieser Arbeit beschrieben wird, erhält ein eigenes Kapitel. Die Kapitel zu den Komponenten sind jeweils so aufgeteilt, dass erst ein Überblick über die Komponenten gegeben wird, die derzeit dem Stand der Technik im THz-Frequenzbereich zur Manipulation des jeweiligen Effekts (Strahlausbreitung, Polarisation usw.) entsprechen. Daran anschließend werden die im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten

quasioptischen Komponenten ausführlich vorgestellt und jeweils abschließend in einem Ausblick weitere Entwicklungsmöglichkeiten des jeweiligen Bauteils beschrieben.

Kapitel 4 hat die strahlformenden Quasioptiken zum Thema. Nach dem Überblick werden aus den zuvor charakterisierten Mikropulvern durch Pressen hergestellte Linsen untersucht, die aufgrund der verschiedenen Brechungsindices der Mikropulver unterschiedliche Brennweiten aufweisen, obwohl sie mit dem gleichen Presswerkzeug hergestellt werden. Daran anschließend wird die erste Linse mit variabler Brennweite für den THz-Frequenzbereich beschrieben.

Kapitel 5 widmet sich der Polarisation der THz-Strahlung. Im Überblick über den Stand der Technik wird der Drahtgitterpolarisator besonders ausführlich behandelt, da dieser in einigen Experimenten dieser Arbeit eingesetzt wird. In diesem Kapitel werden zwei neue Komponenten beschrieben. Die erste Komponente ist eine Wellenplatte, die aus Kopierpapier gebaut ist und sich die Formdoppelbrechung eines eindimensionalen photonischen Kristalls zunutze macht, um die Polarisation zu drehen. Im Ausblick wird theoretisch gezeigt, dass sich ganz ähnliche Papierstrukturen für den Bau weiterer quasioptischer Komponenten eignen. Die zweite Komponente ist ein Fresnel Rhomboid, der zwar für optische Frequenzen schon lange als achromatische Wellenplatte geschätzt wird, aber im THz-Frequenzbereich noch keine Beachtung gefunden hat.

Kapitel 6 beschreibt nach einem Überblick der Komponenten, die sich Beugungseffekte zunutze machen, ein aus Mikropulver gepresstes Transmissionsbeugungsgitter. Es zeigt darüber hinaus, dass sich diese Herstellungsmethode ebenso zur Herstellung von Reflexionsgittern eignet.

Schließlich wird in Kapitel 7 ein elektronisches Bauteil vorgestellt, das einen THz-Strahl mithilfe eines Flüssigkristalls räumlich steuert. Mit diesem Bauteil ist das Umschalten des Strahls zwischen zwei Winkeln möglich und es erreicht einen Ablenkungswinkel von $6,3^\circ$.

Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse.