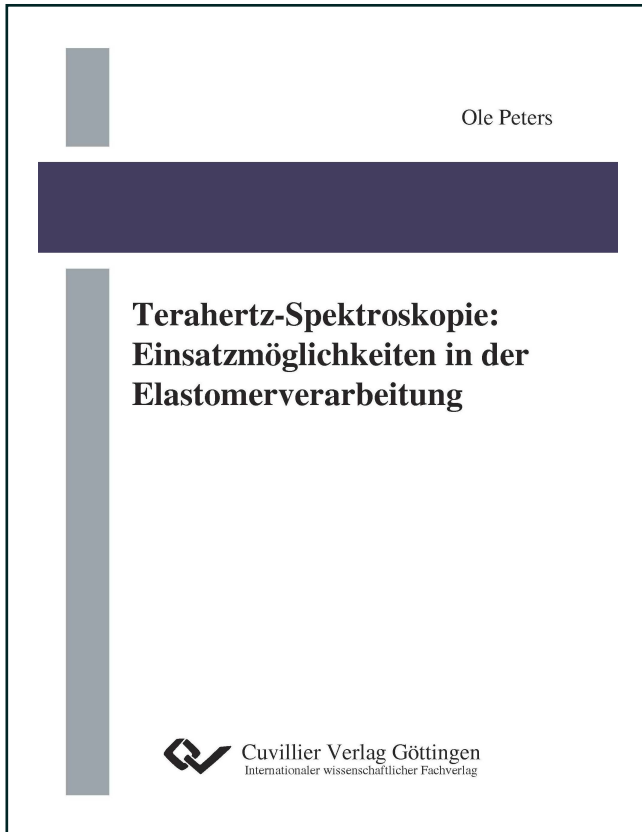




Ole Peters (Autor)

Terahertz-Spektroskopie

Einsatzmöglichkeiten in der Elastomerverarbeitung



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/6455>

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

A ship in a harbor is safe, but that is not what a ship is built for.
Grace Hopper

Die Erzeugung von Terahertzstrahlung mit photoleitenden Antennen ist seit den späten 1980er-Jahren bekannt [1]. Kurz danach begann man, angespornt von erfolgreichen Messungen, eine Vielzahl von Anwendungen in der industriellen und medizinischen Messtechnik zu demonstrieren. An getrockneten Dünnschnitten wurden spektroskopische Unterschiede zwischen gesundem Gewebe und Krebszellen gezeigt [2]. Dünnschnitte von Zähnen wurden untersucht [3] und es wurde gezeigt, dass die Terahertzreflexion von Hautkrebszellen nicht denen von gesunder Haut entspricht [4], [5]. Ähnliche Beispiele für erfolgreiche Studien existieren auch in anderen Gebieten, auch in der Polymertechnik. Alle diese Arbeiten sind wissenschaftlich sauber ausgeführt und waren wichtige Beiträge für die Weiterentwicklung der Technologie. Sie haben mögliche Anwendungsfelder gezeigt und waren für das Verständnis der Möglichkeiten der Terahertzspektroskopie richtungsweisend.

Trotz einer Vielzahl derartiger Demonstrationen und begeisterter Kommentare möglicher Anwender ist die Liste der praktisch genutzten Anwendungen noch sehr kurz. Das mag einerseits an den konservativen Anwendern liegen, die eine neue Technik erst akzeptieren, wenn sie deutlich besser, günstiger oder genauer als die bekannte, etablierte ist. Die vorgestellte Messung benötigt häufig sehr komplexe Probenpräparationen oder eine etablierte Technologie erfüllt alle Anforderungen und macht weitere Verfahren unnötig. Häufig werden für die Demonstrationen idealisierte Proben genutzt, ohne die Umsetzbarkeit in einem realen Umfeld zu beachten. Nicht zuletzt verlangen auch die aktuellen, bedienerfreundlichen Terahertzsysteme ein gewisses Verständnis von der Funktionsweise der Systeme und elektromagnetischer Wellen zur Interpretation der Ergebnisse.

Warum soll man also an der Überwachung von seit Jahren eingefahrenen Prozessen forschen? Die Herstellung von Elastomerbauteilen ist bereits seit Jahrzehnten auf einem sehr hohen Niveau. Es gibt eine Vielzahl von Büchern und Normen zur Qualitätssicherung bei der Elastomerforschung, eine Vielzahl von Technologien werden genutzt, der ganze Prozess scheint ausreichend kontrolliert zu sein. Ein erfahrener Gummimischer wird die Frage, ob er noch ein weiteres Messgerät braucht, verneinen: Er kann die Qualität des Materials



1 Einleitung

an Geruch und Farbe erkennen oder beißt auf die Matte, um die Härte zuverlässig und erstaunlich genau abzuschätzen.

Es gibt jedoch gute Gründe, sich weiterhin mit der Fertigungsüberwachung von Elastomeren zu beschäftigen. Die steigenden Anforderungen an die Materialien spiegeln sich in immer engeren Toleranzen für die Zutaten wider, die Anzahl an Materialvariationen steigt stetig. Nicht zuletzt ist das Gebiss eines Gummimischers nicht ISO9000-zertifizierbar.

Der Trend zum Lean Management, also einer schlanken Fertigungskette, einer hohen Wertschöpfung und einem effizienten Umgang mit den Rohstoffen, verlangt unter anderem die Einsparung von Handarbeit und kurzen Lagerzeiten zwischen den Produktionsschritten. Wurde eine Charge vorgemischten Materials früher vor der Weiterverarbeitung mehrere Tage gelagert, wird heute eine Fertigungskette ohne Lagerzeiten angestrebt, in der das Material ohne Zeitverlust zwischen den Fertigungsschritten transportiert wird oder direkt zwischen den Maschinen wechselt.

Die kürzere Fertigungszeit fordert neben einer ausgeklügelten Logistik schnellere Testverfahren. Durch die kurzen Lagerzeiten ist eine kontinuierliche Prüfung im Labor nicht mehr möglich. Wenn das Ergebnis vorliegt, ist das Material eventuell bereits zwei Fertigungsschritte weiter oder wird für die weitere Verarbeitung ins Ausland verschifft. Abgesehen von der hohen Abfallmenge entstehen durch die weitere Verarbeitung der fehlerhaften Charge unnötige Kosten. Wünschenswert wäre ein mobiles Messgerät, in das man eine Materialprobe gibt und instantan eine leicht zu interpretierende Information, idealerweise eine klare „gut/schlecht“-Aussage erhält.

Auch wenn die Fertigung immer besser wird, muss eine Qualitätsverbesserung immer auch messbar sein. Ein Anbieter kann den höheren Preis des hochwertigen Produktes erst verlangen, wenn er die Qualität durch normierte Messungen nachweisen kann. Die momentan etablierten Prüfverfahren im Elastomerbereich sind größtenteils Labormessungen, die nur mit einem hohen Zeitaufwand an wenigen Proben durchgeführt werden können. Inline-Messungen, die kontinuierlich und automatisiert genutzt werden können, zeigen hier deutliche Vorteile.

Ein weiterer Trend in der Elastomerherstellung ist es, Arbeitsschritte zu verschmelzen. Ein Beispiel hierfür sind Mischextruder, die genutzt werden, um aus einer Reihe Grundrezepten auf Kundenwunsch spezifische Mischungen herzustellen und direkt in einer fertigen Form zu produzieren. Die im Folgenden vorgestellte Extrudersonde ist ein Ansatz, bei dieser Produktion eine finale Bestätigung der Qualität zu bekommen. Eigene Messungen (s. Kapitel 6.3.2) zeigen, dass das bei einem schlecht eingestellten Prozess hergestellte Material alles andere als konstant ist. Bei diesen komplexen Fertigungsschritten kann eine in den Prozess integrierte Sonde für eine Abfallminimierung sorgen, indem fehlerhafte Materialchargen oder Geräteeinstellungen frühzeitig erkannt werden.

Da die Zielgruppe dieser Arbeit sowohl aus der Polymertechnik als auch der Terahertztechnik stammt, bieten die Kapitel 2 und 3 den Lesern einen Überblick über das jeweils andere Fachgebiet, der das Verständnis der folgenden Messungen ermöglichen soll. Für eine weitergehende Beschäftigung sind entsprechende Quellen angegeben.

Das Kapitel 2 soll Elastomertechnikern einen kurzen Überblick über die Möglichkeiten, Problemstellungen und Technologien der Terahertzspektroskopie geben und ein Leitfaden über die wichtigen Fragen des Systembaus sein. Neben einem Überblick über die verschiedenen technologischen Ansätze zur Erzeugung und Detektion von Terahertzstrahlung wird die im weiteren genutzte Zeitbereichsspektroskopie im Detail erklärt. Im Anschluss soll ein kurzer Überblick über die Anwendungsfelder der Terahertzspektroskopie ein Gefühl für die Möglichkeiten und Besonderheiten der Technologie geben. Ein kurzer Blick über den Tellerrand der Zeitbereichsspektroskopie soll alternative Technologien präsentieren, insbesondere solche, die für den industriellen Einsatz genutzt werden oder vielversprechend erscheinen.

Im anschließenden Kapitel werden die Grundlagen der Elastomertechnik besprochen. Neben der Prozesstechnik, also einer kurzen Beschreibung des Vorganges zur Herstellung eines Gummibauteils von der Ernte des Naturkautschuks zur finalen Vulkanisierung, werden die momentan genutzten Techniken zur Fertigungsüberwachung und Qualitätskontrolle vorgestellt. Ebenfalls wird ein kurzer Überblick über die verbreitetsten Additive und ihre Aufgaben gegeben. Die Materialien und Materialfamilien, die bei den folgenden Messungen genutzt werden, werden mit ihrer chemischen Zusammensetzung, ihren typischen Eigenschaften und Einsatzgebieten kurz vorgestellt (Kapitel 3.3).

In Kapitel 4 werden einige Aspekte der Entwicklung industrietauglicher Terahertzsysteme diskutiert. In den vergangenen Jahren wurden Terahertzsysteme durch den technischen Fortschritt und die zunehmende Nutzung von Faserkomponenten stabiler und deutlich störfester. Die üblichen Ansätze für stabile und flexible Systeme werden im Bezug auf die konkrete Anwendung, die Extrudermessung, diskutiert. Dabei wird auch tiefer auf die Frage der Temperaturstabilität der genutzten Antennen eingegangen. Das entwickelte System wird in Details vorgestellt und ein kurzer Überblick über die sonstigen, im Verlauf der Arbeit genutzten Systeme gegeben.

Im Kapitel 5 werden verschiedene Voruntersuchungen aus dem Terahertzlabor gezeigt. Neben Voruntersuchungen zur Beschaffenheit von marktüblichen Elastomeren wird erstmals untersucht, wie sich Änderungen in der Materialzusammensetzung mit einem THz-Spektrometer überwachen lassen.

Es hat sich in den Untersuchungen an Elastomeren sehr schnell gezeigt, dass die Zusatzstoffe nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch die Terahertzeigenschaften eines Materials deutlich dominieren. Entsprechend wurde mehr Gewicht auf die Untersuchung der Zusatzstoffkonzentration und -verteilung gelegt als auf die chemischen Eigenschaften der Rohmaterialien, auch wenn sich hier einige sehr interessante Fragestellungen ergeben haben.

Im Rahmen der Laboruntersuchungen wurden auch verschiedene Messungen zur Bestimmung der Rußdispergierung im Material vorgenommen. Neben spektroskopischen Messungen werden bildgebende Messungen der Konzentrationsschwankung sowie Nahfelduntersuchungen von Agglomerationen gezeigt.

Für die Überwachung der Elastomerproduktion wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ContiTech und Menlo Systems eine Extrudersonde entwickelt, die es erlaubt,



1 Einleitung

das aus dem Extruder strömende Material in Echtzeit zu vermessen. Somit ist es möglich, auch kleine Änderungen in der Materialbeschaffenheit in Echtzeit zu detektieren. Die Konstruktion dieser Sonde und Probemessungen sind in Kapitel 6 vorgestellt. Die Möglichkeit, die Materialzusammensetzung inline im Extrusionsprozess zu überwachen ist beim momentanen Stand der etablierten Technik nicht möglich. Insbesondere angesichts der aktuellen Trends zu kürzeren, hoch automatisierten Fertigungsverfahren bietet die Terahertzmesstechnik somit ein hohes Innovationspotential.

Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse sowie einer Diskussion möglicher weiterer Schritte. Auch wenn einige Schritte zur industriellen Anwendung getan sind und auch von anderen Stellen getan wurden, ist der Weg zur Anwendung zwar begonnen, aber noch lange nicht beendet.

2 Grundlagen der Terahertzspektroskopie

Die häufig beschworene Terahertzlücke zwischen der Mikrowellenstrahlung (bis ca. 70 GHz) und dem Infrarotbereich, der je nach Definition bei ca. 20 THz beginnt, wurde in den frühen 1990er Jahren durch die Einführung von Terahertz-Zeitbereichs-Spektroskopiesystemen geschlossen [1]. Doch die gepulste Anregung von Antennen mit Kurzpulslasern ist nur eine von vielen Möglichkeiten, Terahertzstrahlung zu erzeugen und zu messen.

Aktuell sind die im englischen Sprachraum nach ihrem Erfinder *Auston Switch* genannten photoleitenden Antennen die am weitesten fortgeschrittene Technologie, um Signale im Terahertzbereich zu erzeugen. Dennoch ist bei Betrachtungen für die industrielle Messtechnik ein Blick über den Tellerrand der elektro-optischen Erzeugung notwendig. Im Bereich der elektronischen Erzeugung gab es in den letzten Jahren Fortschritte, so dass bereits Dioden mit einer Frequenz von über 1,5 THz demonstriert wurden [6]. Vor allem im Bereich kostengünstiger, wartungsarmer Systeme für eine fest definierte Aufgabe könnten elektronische Quellen in Zukunft die Oberhand gewinnen. In keinem Fall werden sie in absehbarer Zeit das „klassische“ Terahertz-TDS-System bei breitbandigen Laboruntersuchungen ablösen.

Die Position zwischen Mikrowellen und Optik lässt erahnen, dass die Technologien zur Erzeugung und Detektion von THz-Strahlung aus beiden Richtungen kommen können. Man kann also entweder elektronische Quellen für höhere Frequenzen entwickelt, bis sie in den THz-Bereich reinragen oder die Wellenlänge von optischen Quellen bis in den Bereich von 300 μm , also 1 THz, verlängern. Die elektro-optische Erzeugung und Detektion wird in Kapitel 4 noch genauer beleuchtet, weswegen an dieser Stelle nur der prinzipielle Aufbau eines Zeitbereichs-Spektrometers dargestellt wird. Ein eigenes Unterkapitel wird den Quasioptiken, also Parabolspiegeln und Linsen zur Kollimation und Fokussierung, gewidmet.

Häufig treten THz-Quelle und -Detektor im Paar auf. Ein physikalisches Phänomen kann von der einen Seite angegriffen zur Erzeugung von Strahlung genutzt werden, von der anderen aus zur Detektion. Entsprechend werden Emittter und Detektoren jeweils in einem gemeinsamen Kapitel abgehandelt. Selbstverständlich sind nicht alle Effekte gleich gut als Erzeugungs- und Detektionsmechanismus einsetzbar, einigen Bauteilen (thermischen Detektoren oder Gaslasern) fehlt das Äquivalent oder es ist zu ineffizient, um genutzt zu werden. Thermische THz-Strahlung ist Teil der Hintergrundstrahlung und ist insbesondere für die Astronomie von großer Bedeutung [7], [8], eine thermische Quelle für spektroskopische Anwendungen ist jedoch, im Gegensatz zum thermischen Detektor, wenig sinnvoll.

Auch wenn die Komponenten hier paarweise behandelt werden, ist selbstverständlich auch die Kombination verschiedener Technologien möglich (z.B. elektro-optische Erzeugung und bolometrische Detektion [9]).

2.1 Elektronische Quellen und Detektoren

Man kann eine elektronische Strahlungsquelle in zwei Komponenten aufteilen: einen Schwingungserzeuger und eine Antenne zur Abstrahlung. Ein $\lambda/2$ -Dipol für 1 THz in Luft ist 150 μm lang, eine Länge, die mittels Photolithographie problemlos herstellbar ist. Hornantennen in der gegebenen Größenordnung lassen sich ebenfalls herstellen [10]. Wellenleiter haben zwar das Problem einer starken Dispersion [11], sind ansonsten, gerade für cw-Anwendungen, aber technisch nutzbar.

Die technische Herausforderung liegt also vielmehr in der Schwingungserzeugung. Üblicherweise werden Frequenzen im technisch erschlossenen hohen Megahertz-Bereich erzeugt und dann mit einer Kaskade von Mischelementen in den Terahertzbereich hochgemischt. Quellen bis weit über 1,5 THz wurden bereits demonstriert [6], Messköpfe für 850 GHz sind kommerziell verfügbar [12]. Eine Frequenzmodulation (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) sorgt für eine exakte Auswertbarkeit der Signallaufzeit und damit für die Bestimmung der Dicke oder des Brechungsindex einer Probe [13].

Als Mischer bieten sich z.B. Schottky-Dioden aus GaAs an, die für Frequenzen bis einige hundert GHz erhältlich sind. Üblicherweise wird das Signal in mehreren (meist drei) Stufen hochgemischt [14]. Vergleichbare Mischer bieten sich auch für die Detektion an, hier wird das Signal aus dem Terahertzbereich in den Kilohertzbereich runtergemischt, um dann digital weiterverarbeitet zu werden [15]–[17].

Eine Eigenschaft dieser Art von Quellen ist, dass die Komponenten resonant aufgebaut sind und nur in einem relativ schmalen Frequenzband wirklich effektiv arbeiten. Im Gegenzug sind sie hochgradig fehlerunanfällig und wartungsarm. Eine gewisse Anfälligkeit für elektrostatische Entladungen kann durch geeignete Maßnahmen minimiert werden.

Die erreichbare Ausgangsleistung fällt prinzipbedingt mit $1/f^3$ ab. Entsprechend ist es schwierig, bei Frequenzen jenseits von 1 THz Leistungen im Mikrowatt-Bereich zu erreichen. Eine Kühlung der Komponenten erhöht die erreichbare Ausgangsleistung, schränkt jedoch aufgrund des höheren technischen Aufwandes auch die Anwendungsbereiche der Technologie ein. Ein Betrieb bei Temperaturen, die mit elektrischer Kühlung erreichbar sind (Peltier-Elemente können bis ca. 180 K kühlen) oder besser noch bei Zimmertemperatur (ca. 300 K) ist Bedingung für die wirtschaftliche Nutzung der Komponenten.

2.2 Optische Quellen und Detektoren

Der Weg von den optischen Quellen in den Terahertzbereich gestaltet sich relativ schwierig. Ein Photon bei 1 THz hat eine Photonenenergie von 4,1 meV. Zum Vergleich: die Band-

lücke von GaAs beträgt 1,43 eV. Eine Terahertz-Leuchtdiode würde am fehlenden Material und vor allem der viel zu kleinen Bandlücke scheitern. Dennoch werden für einige Verfahren, z.B. für den Quantenkaskadenlaser, Ansätze gewählt, deren physikalisches Verhalten an einen Halbleiter mit einer derartig schmalen Bandlücke erinnert.

2.2.1 Erzeugung mittels nichtlinearer Mischung

Die Erzeugung von Terahertzstrahlung bei hohen Leistungen >10 mW ist bis heute eine Herausforderung. Zwar existieren Ansätze, die meisten Quellen dieser Größenordnung sind jedoch sehr groß und haben einen nicht nennenswerten Wirkungsgrad.

Ein Oberflächenemitter (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser, VECSEL) im Zweifarbbetrieb [18] erzeugt sehr hohe intrakavitäre Leistungen. Gleichzeitig ist die Kavität dieses Lasertyps groß und zugänglich genug, um einen Kristall zum nichtlinearen Mischen einzubauen [19]. Mit einem geeigneten Kristall, der kontinuierliche Phasen Anpassung garantiert, können Leistungen von bis zu 50 mW bei Raumtemperatur erreicht werden. Mit einem gepulsten VECSEL könnte dieselbe Technik auch zu einer gepulsten THz-Quelle mit hoher Ausgangsleistung führen.

2.2.2 Gaslaser

Wie andere Lasertypen auch, arbeiten Gaslaser mit angeregten Zuständen von einem aktiven Medium. Um eine Emission im THz-Bereich zu erreichen werden Übergänge zwischen Rotationszuständen von Gasmolekülen ausgenutzt. Viele dieser Zustände befinden sich im ferninfraroten Bereich und reichen runter in den Bereich um 1 THz [20].

Für einen Gaslaser wird eine Glasröhre mit dem entsprechenden Gas bei einem niedrigen Druck gefüllt. Die transparenten Endflächen der Glasröhre und entsprechende Spiegel bilden die Kavität. Als Anregungsquelle werden CO_2 -Laser oder Hochspannungsentladungen genutzt.

Die Emissionsfrequenz eines Gaslasers ist von dem enthaltenen Gas abhängig, wodurch ein Gaslaser einen breiten Frequenzbereich abdecken kann. Tabelle 2.1 zeigt einige Beispiele für mögliche Wellenlängen, eine ausführliche Übersicht bietet [21].

Tabelle 2.1: Emissionsfrequenzen und -wellenlängen eines Gaslasers nach [21]

Gas	Frequenz / THz	Wellenlänge / μm
CH_2F_2	1,27	236
	1,81	165
	2,46	12
CH_3Cl	0,81	370

Die Ausgangsleistung von Gaslasern liegt im Bereich von einigen 10 mW. Nachteilig sind die große Bauform und der hohe Wartungsaufwand, der mit dieser Laserbauform verbunden ist.

2.2.3 Quantenkaskadenlaser

Das Bauteil, das einem Terahertz-Diodenlaser am nächsten kommt, ist der Quantenkaskadenlaser (QCL) [22]. Im Gegensatz zum konventionellen Halbleiterlaser entsteht die Strahlung nicht durch den Übergang zwischen Leitungs- und Valenzband sondern zwischen Subbändern im Valenzband, die durch eine GaAs/InGaAs-Übergitterstruktur entstehen. Wurden die ersten QCLs für den Terahertzbetrieb noch mit flüssigem Helium gekühlt, stehen inzwischen Module mit einer elektrischen Temperierung zur Verfügung [23], was einen Einsatz im Forschungs- und Industriebereich ermöglicht. Die Emissionswellenlänge von QCLs ist durch die Dicke der Quantenfilme vorgegeben und lässt sich nur sehr begrenzt durchstimmen. Terahertz-QCLs werden insbesondere als Lokaloszillatoren in der Radioastronomie eingesetzt [24].

2.3 Thermische Detektoren

Die beiden gebräuchlichsten thermischen Detektoren für den Terahertzbereich sind Bolometer und Golay-Zellen. Beide Sensoren zeichnen sich durch einen sehr flachen Frequenzgang aus, bei einer Detektion ist eine vorhergehende Filterung durch ein geeignetes Fenster und eine Lock-In-Detektion unumgänglich. Beide Sensoren zeichnen sich durch eine hohe Empfindlichkeit aus, sie sind jedoch nur für sehr kleine Leistungen geeignet und sind relativ träge.

2.3.1 Golay-Zellen

Die Golayzelle basiert auf einem geschlossenen Raum, der mit einem bekannten Gas gefüllt ist. Ein Teil der Außenwand ist als Membran ausgelegt und auf der Außenseite reflektierend beschichtet. Bei Erwärmung dehnt sich das Gas aus, was zu einer Ausbeulung der Membran führt. Diese wird optisch abgetastet und in ein Messsignal umgesetzt.

2.3.2 Bolometer

Das Bolometer misst eine einfallende Leistung durch die hochgenaue Messung des Leitwertes eines geeigneten Leiters oder Halbleiters. Bei Einfall von elektromagnetischer Strahlung erwärmt sich das Material, was sich im Leitwert niederschlägt. Klassische Bolometer sind Helium-gekühlt und gehören zu den sensitivsten Sensoren für elektromagnetische Strahlung.

Inzwischen wurden Mikrobolometer-Arrays entwickelt, die auch im höheren Terahertzbereich sensitiv sind. Die Technik ist von Infrarotkameras bekannt und ermöglicht bei ausreichend hoher Terahertzleistung bildgebende Messungen in Echtzeit. Mikrobolometer basieren auf Halbleiterstrukturen und kommen ohne eine aufwendige Helium-Kühlung aus.

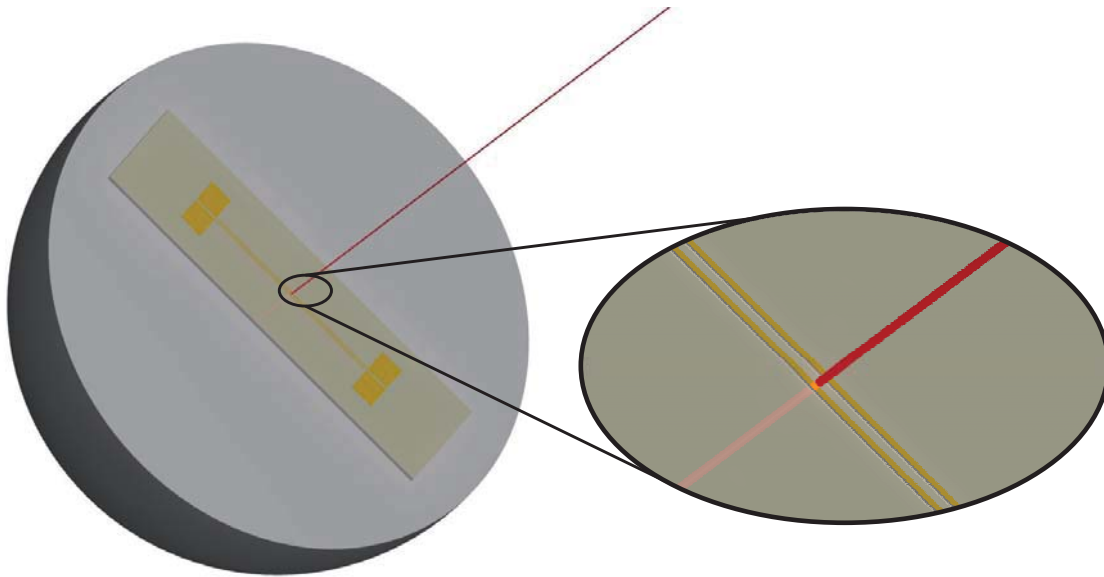


Abbildung 2.1: Eine Terahertzantenne auf der vorkollimierenden Si-Linse. Der Laserstrahl (rot) schaltet die Antenne, die großen Pads werden zur Kontaktierung genutzt.

2.4 Elektro-optische Quellen

Die sogenannten elektro-optischen Quellen sind genau betrachtet elektronische Quellen, wie sie in Kapitel 2.1 beschrieben werden. Die Auskopplung geschieht durch eine Antennenstruktur, die auf ein metallisches Halbleitermaterial mit kurzen Ladungsträgerlebensdauern aufgebracht ist (Abb. 2.1). Die Schwingungserzeugung findet allerdings nicht, wie bei anderen Quellen üblich, in einem gesonderten Bauteil, sondern in einer Unterbrechung der Antennenstruktur statt. Dabei entsteht direkt die benötigte Terahertzfrequenz und das Signal muss nicht weiter gemischt werden. Die Anzahl der freien Ladungsträger und damit die Leitfähigkeit der Antenne wird durch die Beleuchtung mit einem Laser kontrolliert. Bei Beleuchtung ist das Material leitfähig, ohne Beleuchtung fließt nur ein sehr geringer Dunkelstrom. Wird nun zur Beleuchtung ein kurzer, aber energiereicher Femtosekundenpuls genutzt, ermöglicht dieser bei angelegter Vorspannung für eine kurze Zeit einen Stromfluss, der entsprechend den Maxwell'schen Gesetzen eine elektromagnetische Welle erzeugt [25].

Die verschiedenen Arten der elektro-optischen Erzeugung unterscheiden sich nach der Art des genutzten Lasers. Neben der in den folgenden Experimenten genutzte Zeitbereichsspektroskopie (engl. Time Domain Spectroscopy, TDS) werden ähnliche Techniken, die sich vor allem durch den genutzten Laser von der TDS unterscheiden, diskutiert.

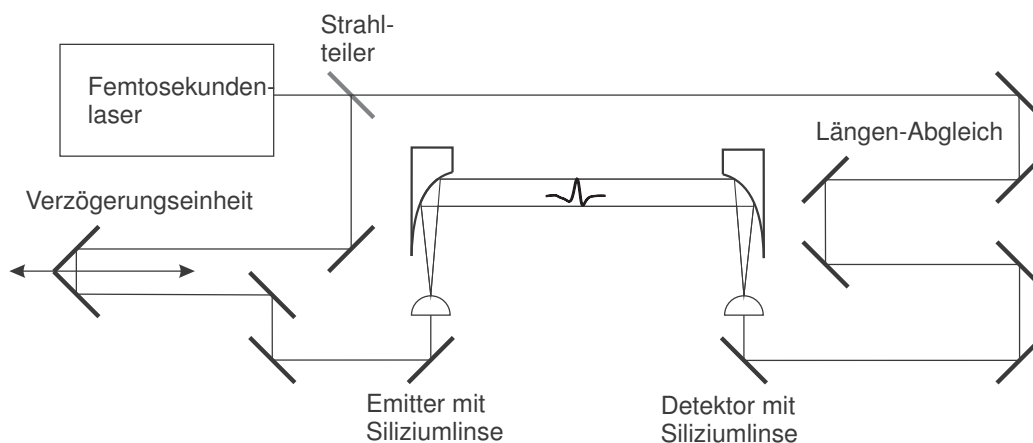


Abbildung 2.2: Schemazeichnung eines Terahertz-TDS. Weitere Möglichkeiten zur Strahlführung werden in Kapitel 2.5.2 vorgestellt.

2.4.1 Zeitbereichsspektroskopie

Die Terahertzzeitbereichsspektroskopie ist über 20 Jahre nach ihrer Entdeckung das Mittel der Wahl für Messungen im Frequenzbereich zwischen 200 GHz und 4 THz. Abbildung 2.2 zeigt den klassischen Aufbau eines gepulsten Terahertz-TDS mit Freistrahllaserpfaden. Die für diese Studie genutzten Systeme werden in Kapitel 4 ab Seite 45 ausführlich beschrieben.

Die Erzeugung von Terahertzstrahlung erfolgt durch die optische Schaltung einer elektrisch vorgespannten Antennenstruktur. Ein Femtosekundenpuls erzeugt kurzzeitig Ladungsträger in einem Halbleiter mit kurzen Ladungsträgerlebensdauern (z.B. LT-GaAs für die Erzeugung um 800 nm Anregungswellenlänge). Den Aufbau der Antenne zeigt Abbildung 2.1. Durch die Vorspannung werden die Elektronen zur Anode hin bewegt und erzeugen so einen elektromagnetischen Puls im Terahertzbereich. Aufgrund ihrer geringen Beweglichkeit spielen Löcher praktisch keine Rolle in diesem Prozess. Eine erste Modellierung dieser Vorgänge wurde von Jepsen et al. vorgestellt [26]. Die Möglichkeiten, diese Welle zu führen werden im Kapitel 2.5.2 beschrieben.

Nach dem Durchlaufen des Terahertzpades und ggf. einer Probe wird das Signal wieder abgetastet. Da eine rein elektronische Detektion im Terahertzbereich nicht möglich ist, wird das Signal stückweise abgetastet. Hier wird ausgenutzt, dass der Laserpuls zeitlich deutlich kürzer ist als der von ihm erzeugte Terahertzpuls. Als Detektor kann eine optisch schaltbare Antenne genutzt werden, auf der die eintreffenden Terahertzpulse abgetastet werden, s. Abb. 2.3. Die Wiederholrate von gepulsten Lasern liegt üblicherweise im Bereich von 80 bis 100 MHz. Somit kann man davon ausgehen, dass das Signal durch den trägen nachgeschalteten Verstärker zu einem Gleichsignal verschmiert wird.

Der Strom, der durch den einfallenden Puls in der Antenne erzeugt wird, ist proportional zum elektrischen Feld. Da er im Pico- bis Nanoamperebereich liegt, empfiehlt sich die Filterung und Verstärkung mit einem Lock-In-Verstärker, bevor das Signal über einen