

# 1 Einleitung

Auf dem Gebiet der THz-Systemtechnik wurde in den vergangenen Jahrzehnten bereits viel geforscht und entwickelt, um die Leistungs- und Funktionsfähigkeit der Technik zu verbessern. Parallel dazu wurden Anstrengungen unternommen, die Anwendungsfelder der Technologie zu erweitern und so die Umsetzung zur industriellen Messtechnik voranzutreiben. Wietzke et al. haben zu Beginn dieser Arbeit in ihrer Veröffentlichung über die „Anwendungen für Terahertz-Systeme: Märkte und Perspektiven einer innovativen Technik“ die Punkte: Messgeschwindigkeit, Robustheit und Kosten der Systeme als notwendige Ansatzpunkte zur Verbesserung und Umsetzung identifiziert [1]. Zwar konnten in der Vergangenheit nicht alle mit der Technik verknüpften Erwartungen erfüllt werden, jedoch zeigen aktuelle Recherchen und Beobachtungen von Hochrein [2], dass weiterhin ein großes Interesse an der THz-Technik besteht. Neben der universitären Forschung rücken industrielle Anwendungen und kommerzielle Interessen in den Vordergrund, so dass eine Verschiebung in der Ausrichtung der Technik, aus dem Labor hin zur industriellen Anwendung, auszumachen ist. Dies untermauert er mit seiner Auswertung von weltweiten Internetsuchanfragen und Patentanmeldungen. In der hohen Zahl der Patentanmeldungen sieht er ein zunehmendes kommerzielles Interesse, was sich mit der zunehmenden Anzahl von THz-Systemanbietern deckt.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Entwicklung und Verbesserung von THz-Systemen für die industrielle Anwendung. Mit verbesserter Systemleistung und fortschreitender Kostenreduzierung der THz-Systeme rückt die THz-Systemtechnik in den Interessenbereich und Fokus der Industrie. Im Verlauf der Arbeit hat sich die THz-Systemtechnik als Werkzeug zur zerstörungsfreien Materialprüfung und -charakterisierung sowie als alternative Messtechnik positioniert - die kommenden Jahre werden zeigen, ob die THz-Technik auch aus Sicht der Industrie eine sinnvolle Ergänzung zu bestehenden Messverfahren darstellt.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in unterschiedliche Themenfelder. Zunächst werden die Grundlagen der THz-Systemtechnik in Kapitel 2 eingeführt. Dazu erfolgt die Vorstellung der wesentlichen Funktionsprinzipien und Begriffe der THz-Systemtechnik, wie sie in dieser Arbeit zu verstehen sind. Die für die Arbeit relevanten Systemkonzepte und -methoden werden vorgestellt und Empfehlungen für weiterführende Literatur gegeben. Bereits zu diesem Zeitpunkt wird das Augenmerk auf die Schlüsselkomponenten der THz-Systeme gelenkt: die Verzögerungstrecken und die Anordnung in Reflexionsgeometrie. Diese stehen im Fokus des anschließenden Kapitels 3. Das Kapitel 2 schließt mit der Beschreibung und Vorstellung der in der Arbeit verwendeten Messsysteme.

Zu den Schlüsselkomponenten der THz-Systeme zählen unter anderem die Verzögerungseinheiten. Diese Komponenten haben einen wesentlichen Einfluss auf die



Genauigkeit und die Messgeschwindigkeit und tragen darüber hinaus wesentlich zu den Systemkosten bei. In Kapitel 3 werden verschiedene Konzepte angewendet und entwickelt. Zunächst wird ein durchgängig fasergekoppeltes und mobiles THz-System auf Basis eines zweistufigen Faserstreckers eingeführt. Das System ist gleichzeitig der Ausgangspunkt für die im späteren Verlauf umgesetzten Reflexionskonfigurationen. Neben einem neuartigen Transceiverkonzept mit lediglich einer THz-Antenne zum Senden und Empfangen der Signale wird eine weitere robuste Reflexionssonde mit zwei THz-Antennen präsentiert. Als Alternative zu bestehenden Verzögerungseinheiten wird das Konzept des Rotators eingeführt. Der Rotator basiert auf einem rotierenden Kunststoffblock, der zur Signalverzögerung im THz-Pfad verwendet wird. Nach der Charakterisierung der Verzögerungseinheit wird mit dem System die schnelle bildgebende Messung zur zerstörungsfreien Untersuchung demonstriert.

In dem anschließenden Kapitel 4 steht die Anwendung der THz-Reflexionssonde im Mittelpunkt. Anhand verschiedener Anwendungsfälle wird das Potential aufgezeigt. Am Beispiel der kontakt- und zerstörungsfreien Wandstärkenbestimmung von Kunststoffrohren werden verschiedene Auswertemethoden diskutiert und angewendet. In einer weiteren Anwendung wird der zeitliche Aushärteprozess von 2-Komponentenklebern betrachtet und mit einem vereinfachten Ansatz auf die THz-Materialparameter ausgewertet. Die Kristallisation einer Wasser-Zuckerlösung und die Bestimmung der Doppelbrechung in Reflexion schließen die Anwendungen ab.

Mit der THz-Quasizeitbereichsspektroskopie (QTDS) wird in Kapitel 5 eine Alternative zu den THz-Zeitbereichsspektrometern mit Kurzpulslaser betrachtet. Um die THz-QTDS als industrielle Messtechnik zu etablieren muss der Systempreis weiter gesenkt werden. Damit die THz-QTDS Technik eine zukünftige Lösung darstellt, erfolgt zunächst die Optimierung der THz-QTDS Systeme nach klassischem Ansatz. Anschließend werden mit Hilfe eines neuen Systemkonzepts sowohl die Baugröße deutlich reduziert als auch die Systemkosten gesenkt. Hierzu wird eine neue Messplattform entwickelt und getestet. Das Konzept bietet zukünftig die Möglichkeit, THz-Systeme mit den Abmessungen eines DVD-Laufwerks zu realisieren und mit Hilfe eines kostengünstigen Raspberry Pi zu steuern.

Das vorletzte Kapitel 6 diskutiert verschiedene Systemkonzepte und Ansätze, die im Rahmen der Arbeit nicht umgesetzt werden konnten, jedoch zukünftig einen Beitrag zur Verbesserung der Technologie leisten können. Insbesondere das Messkonzept der Sub-Pulse verfügt in Kombination mit einem THz-ASOPS System über das Potential zur industriellen Anwendung. Auf der unteren Preisskala setzt das THz-QTDS System auf Basis eines DVD Laufwerks an - begrenzte Leistung zu einem äußerst günstigen Preis.

Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einer Zusammenfassung und einem Fazit.



## 2 Grundlagen der Terahertz(THz)-Systemtechnik

Um in den so genannten Terahertz-Bereich (tera,  $10^{12}$ ) vorzudringen, stehen heutzutage verschiedene Generations- und Detektionsmethoden zur Verfügung. Für lange Zeit galt der Bereich zwischen 100 GHz und 10 THz als letzte unerschlossene Bastion im elektromagnetischen Spektrum. Dieser Grenzbereich, zwischen Mikrowellenbereich und dem sichtbaren Licht gelegen, konnte, bedingt durch die mangelnde Verfügbarkeit geeigneter Quellen und Detektoren nur unter großem Aufwand erreicht und nutzbar gemacht werden [3]. Diese Einschätzung liegt mittlerweile viele Jahre zurück - in der letzten Zeit haben weltweite Arbeiten im Bereich der Forschung und Entwicklung dazu geführt, dass der Frequenzbereich weiter erschlossen und heute als nutzbar angesehen werden kann [4–7].

Zu der Erschließung des Frequenzbereichs haben eine Vielzahl von technologisch unterschiedlichen Ansätzen beigetragen. So tasten sich die Quellen aus den angrenzenden Bereichen, sowohl auf elektronischer als auch auf optischer Basis, immer weiter in den Grenzbereich - den THz-Bereich - hinein. Von Seiten der Mikrowellentechnik erreichen z.B. die Gunn-Dioden immer höhere Frequenzen: Yang et al. berichtet von 0,2–0,8 THz [8]. Resonante Tunnel Dioden (RTD) kommen bei Feiginov et al. zum Einsatz und ermöglichen derzeit 1,1 THz [9]. Aber auch die frequenzvervielfachten Dioden stehen als Quelle im THz-Bereich zur Verfügung und erreichen z.B. bei Pearson et al. über 2 THz [10, 11]. Von Seiten der Optik sind vor allem die THz-Quantenkaskadenlaser und die nichtlineare Frequenzkonversion zu nennen [12]. Durch die fortschreitende Entwicklung, hin zu immer tieferen Frequenzen, kann auch eine gleichzeitige Steigerung der Signalleistung beobachtet werden [13]. Aber auch andere Lösungen, wie z.B. bildgebende THz-Sensoren können mittlerweile in kompakter Form bei Raumtemperatur zum Einsatz gebracht werden [14–17]. Es kann davon ausgegangen werden, dass in naher Zukunft durch weitere Verbesserung der Effizienz und der Technologie sowie mit neuen Ansätzen ein weiterer Fortschritt erzielt werden kann [18, 19].

Einhergehend mit der Vielfalt der Quellen und Detektoren unterscheiden sich auch die Einsatzgebiete der THz-Systemtechnik [20–24]. Neben der Materialuntersuchung und der zerstörungsfreien Prüfung zählen auch Kommunikations- und Sicherheitsanwendungen sowie die Radioastronomie zu den Einsatzgebieten [1, 25–32]. Je nach Anwendung und den damit verbundenen Anforderungen werden unterschiedliche Quellen und Detektoren eingesetzt [33–36].

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die elektro-optische Erzeugung von THz-Wellen mittels Femtosekundenlasern (fs-Lasern) und Multimode-Laserdioden (*engl.: multi mode laser diode, MMLD*) [37–46]. Dies wird allgemein als THz-Zeitbereichsspektroskopie bezeichnet und zählt zu den kohärenten Detektionsarten. Die kohärente Detektion ermöglicht bereits bei kleinen Signalleistungen ein sehr hohes



Signal-zu-Rausch-Verhältnis (*engl.: signal-to-noise ratio, SNR*) bei gleichzeitiger Amplituden- und Phaseninformation.

Die Entwicklung der THz-Spektroskopie ist eng mit der der Femtosekundenlaser verknüpft [39, 47, 48]. So kann, einhergehend mit der Verbesserung und Optimierung der Laserquellen, auch ein Zugewinn der Leistungsfähigkeit und eine Reduzierung der Größe der THz-Systemen verzeichnet werden [2, 38, 49, 50]. Ein besonders zu beachtender Entwicklungsschritt stellte in der Vergangenheit der Wechsel des Wellenlängenbereichs von 800 nm hin zu 1550 nm dar [51–53].

In diesem Kapitel werden die Grundzüge der Terahertz(THz)-Systemtechnik in einem kurzen Abriss dargestellt. Im Mittelpunkt stehen dabei die für die Arbeit im Wesentlichen verwendeten Technologien der Zeitbereichsspektroskopie (*engl.: time domain spectroscopy, TDS*), der Quasi-Zeitbereichsspektroskopie (QTDS) und der fasergekoppelten Ausführungen der TDS-Systeme. Anschließend werden in Kapitel 2.2 verschiedene Verzögerungsmechanismen für den Einsatz in THz-Systemen betrachtet und der Stand der Technik zu Beginn der Arbeit festgehalten. Im Weiteren wird das Konzept der Reflexionsmessung und des Transceivers vorgestellt, hierzu werden zunächst in Abschnitt 2.3 die Grundlagen gelegt. Das Kapitel schließt in Abschnitt 2.4 mit einer Übersicht der in der Arbeit verwendeten Messsysteme.

## 2.1 THz-Systeme: Funktionsweise

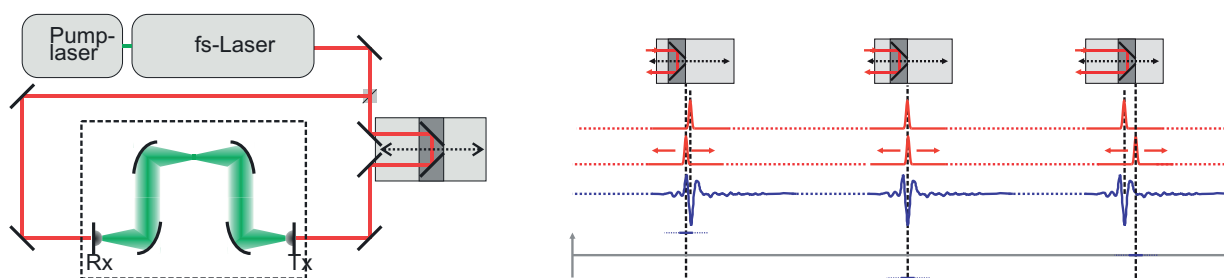
In der vorliegenden Arbeit steht die elektro-optische Generation der THz-Strahlung im Vordergrund, für weitere Generations- und Detektionsmechanismen sei auf die Literatur verwiesen. Einen guten Überblick bieten die Veröffentlichungen von Jepsen, Cooke und Koch [21], Tonouchi [33] sowie Bründerman und Hübers [54].

Im Folgenden wird die Technik der kohärenten THz-Spektroskopie vorgestellt. Zunächst werden die Grundlagen der THz-Zeitbereichsspektroskopie (TDS) im Abschnitt 2.1.1, die des Photomischens in 2.1.2 und der Quasi-Zeitbereichsspektroskopie in 2.1.3 vorgestellt. Anschließend werden die fasergekoppelten THz-TDS Systeme beschrieben, die insbesondere an späterer Stelle in den Kapiteln 3 und 4 vertieft behandelt werden.

### 2.1.1 THz-Zeitbereichsspektroskopie (TDS)

Das Grundprinzip der THz-TDS stellt die kohärente Detektion der THz-Wellen dar. Herzstück eines jeden THz-TDS Systems ist neben dem Femtosekundenlaser (fs-Laser) und den THz-Antennen zur Erzeugung und Detektion der THz-Strahlung, die Verzögerungsstrecke, die das zeitliche Verschieben der Spektrometerarme zueinander und somit das Abtasten des Messsignals gewährleistet. Abbildung 2.1 (a)

zeigt den schematischen Aufbau eines THz-TDS-Systems in Transmissionskonfiguration. Ausgangspunkt ist der fs-Laser, welcher zeitlich kurze optische Pulse mit einer konstanten Repetitionsrate erzeugt. Die Pulse weisen typischerweise eine zeitliche Länge von  $\approx 100$  fs und eine Repetitionsrate  $T_{\text{Rep}}$  von z.B. 80 MHz auf. Die optischen Pulse werden mit einem Strahlteiler auf den Sende- und Empfangsweg aufgeteilt, wobei grundsätzlich gilt, dass die Länge des Emitter- und THz-Wegs zusammen der des Detektorpfads entsprechen. Für diesen Fall treffen der optische Abfragepuls und die vom optischen Sendepuls erzeugte THz-Welle gleichzeitig an der Detektorantenne ein.



(a) Vereinfachter Aufbau eines THz-TDS Systems auf Basis eines fs-Lasers.

(b) Schematische Darstellung der zeitlichen Abtastung des THz-Signals zu drei ausgewählten Zeitpunkten. Durch die zeitliche Verschiebung des optischen Emitterpulses trifft der THz-Puls zu unterschiedlichen Zeitpunkten an der Detektorantenne ein. Die Laufzeit des optischen Detektorpulses wird in diesem Fall nicht verändert.

Abbildung 2.1: (a) Prinzipieller Aufbau eines klassischen THz-TDS Systems. (b) Schematische Darstellung der kohärenten Detektion und des optischen Abtastens des THz-Signals.

Die Sendeantenne besteht aus einem für die Laserwellenlänge sensitiven Halbleitermaterial mit einer aufgetragenen metallischen Antennenstruktur. Für Wellenlängen bei 800 nm kommt bei den Sendeantennen Galliumarsenit (GaAs) und für die Detektorantenne LT-GaAs (*engl.: low temperature grown, LT*), die bei niedrigen Temperaturen gewachsene Variante mit erhöhter Störstellenanzahl zur schnelleren Ladungsträgerrekombination, zum Einsatz. Durch die metallisierten Antennenstrukturen kann das Abstrahlverhalten bezüglich Bandbreite und Resonanz beeinflusst werden. Die aufgesetzte Siliziumlinse ermöglicht eine effizientere Auskopplung der THz-Wellen und dient gleichzeitig zur Bündelung der Strahlung [28, 55–57].

Durch die kurzen optischen Pulse werden im Halbleitermaterial freie Ladungsträger erzeugt, die durch das angelegte elektrische Feld an der Antennenstruktur beschleunigt werden [21]. Die zeitliche Änderung des Stroms strahlt nach den





Maxwell-Gleichungen ein elektrisches Feld ab, somit ist die von der Antenne erzeugte THz-Welle  $E_{\text{THz}}(t)$  proportional zum zeitlich veränderlichen Strom  $j(t)$  in der Antenne:

$$E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{dj(t)}{dt}. \quad (2.1)$$

Die Detektorantenne wird ebenfalls durch die kurzen optischen Pulse angeregt und leitfähig geschaltet. Die in der Antenne erzeugten freien Ladungsträger  $g(t)$  werden in diesem Fall jedoch durch das elektrische Feld der einlaufenden THz-Welle  $E_{\text{THz}}(t)$  beschleunigt und der erzeugte Strom  $J(\tau)$  kann detektiert werden. Das Faltungsintegral beschreibt die Abtastung an der Detektorantenne:

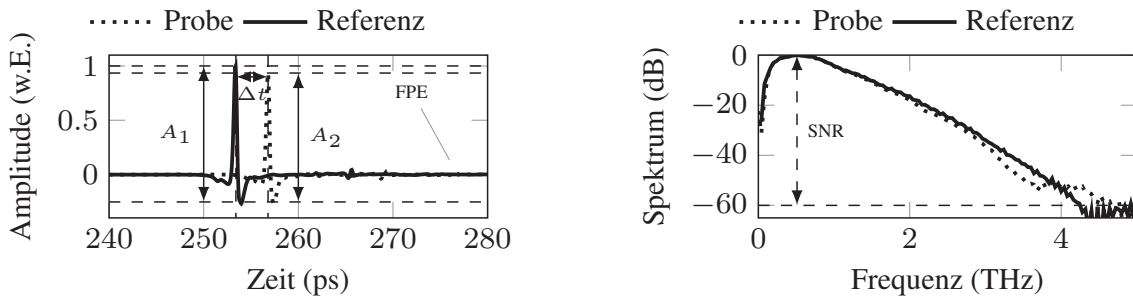
$$J(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{\text{THz}}(t)g(t - \tau)dt. \quad (2.2)$$

Da die optischen Pulse mit 100 fs deutlich kürzer sind als die THz-Pulse und die THz-Antennen eine kurze Ladungsträgerlebenszeit  $\tau_R \ll T_{\text{Rep}}$  aufweisen, kann der THz-Puls durch sukzessives zeitliches Verschieben abgetastet und aufgenommen werden.

Das Abtasten des THz-Signals ist in Abbildung 2.1 (b) schematisch zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten dargestellt. Durch das gezielte Verändern der Laufzeit der optischen Signale in den Spektrometerarmen wird der Zeitpunkt des Zusammentreffens an der Detektorantenne festgelegt. Der klassische Ansatz erfolgt mit Hilfe einer mechanischen Verschiebeeinheit, deren Spiegel durch das Verfahren den optischen Weg verlängert bzw. verkürzt. Das elektrische Feld der THz-Welle kann somit Punkt für Punkt abgetastet werden und bildet anschließend das zeitliche Messsignal.

Anhand einer Probe- und Referenzmessung können anschließend die frequenzabhängigen THz-Materialparameter der Probe ermittelt werden. Abbildung 2.2 (a) zeigt die erfassten Zeitbereichssignale der Probe- und Referenzmessung. Die Probenmessung zeigt zusätzlich die Fabry-Perot-Echos (FPE), die durch Mehrfachreflexionen innerhalb der Probe entstehen. Bereits im Zeitbereich können diese durch ihre Amplitude  $A_{1,2}$  und ihren zeitlichen Versatz  $\Delta t_{1,2}$  charakterisiert und verglichen werden. Mit einer Fourier-Transformation können die Daten in den Frequenzbereich transformiert und ausgewertet werden. Abbildung 2.2 (b) zeigt die normierten Spektren der Messungen. Nicht dargestellt sind die frequenzabhängigen Phasen der Signale, welche ebenfalls bei der Transformation erzeugt werden. Anhand des Spektrums kann die Bandbreite und der SNR bestimmt werden, womit die THz-Pulse qualitativ beschrieben werden können.

Die Auswertung der Frequenzbereichsdaten liefert die frequenzabhängigen Materialparameter der untersuchten Probe. Der Brechungsindex  $n(\omega)$  und der Absorp-



(a) THz-TDS Zeitbereichssignale einer Probe- und Referenzmessung. Deutlich zu erkennen ist der zeitliche Versatz  $\Delta t$  und die Änderung in der Amplitude  $\Delta A = A_1 - A_2$  zueinander.

(b) Frequenzbereichssignale der Probe- und Referenzmessung.

Abbildung 2.2: Typische Signale eines THz-TDS Spektrometers mit einer Bandbreite von 4,1 THz und einem SNR von 60 dB.

tionskoeffizient  $\alpha(\omega)$  können mit den Formeln nach Jepsen et al. berechnet werden [21, 58].

$$n(\omega) = 1 + \frac{\Delta\varphi(\omega) \cdot c_0}{\omega \cdot d}, \quad (2.3)$$

liefert den Brechungsindex in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz  $\omega = 2\pi f$  unter Verwendung der Phasendifferenz  $\Delta\varphi$  von Referenz- und Probemessung  $E_{\text{Ref}}(\omega)$  und  $E_{\text{Probe}}(\omega)$  sowie der mechanischen Dicke  $d$  der Probe und der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$ . Mit Hilfe des Brechungsindex kann anschließend die Absorption  $\alpha(\omega)$  ermittelt werden:

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d} \ln \left( \frac{(n(\omega) + 1)^2}{4 \cdot n(\omega)} \cdot \frac{E_{\text{Probe}}(\omega)}{E_{\text{Ref}}(\omega)} \right). \quad (2.4)$$

Der Ansatz von Pupeza et al., Scheller et al. und Jansen et al. ermöglicht durch eine numerische Optimierung der Transferfunktion  $T(\omega) = E_{\text{Probe}}(\omega)/E_{\text{Ref}}(\omega)$  die gleichzeitige Bestimmung von Brechungsindex  $n(\omega)$ , Absorption  $\alpha(\omega)$  und Probendicke  $d$  unter Zuhilfenahme der Fabry-Perot Echos (FPE) in der Probe [59–61]. Diese Methode wird in der kommerziellen Auswertesoftware TeraLyzer eingesetzt [62].

Eine einfachere Auswertung anhand der Zeitbereichsdaten unter Verwendung des Laufzeitunterschieds der Messungen  $\Delta t$  liefert den gemittelten bzw. effektiven Brechungsindex  $n_{\text{eff}} = 1 + c_0 \cdot \Delta t/d$ .

Beispielhaft sind in Abbildung 2.3 (a) der Brechungsindex und in 2.3 (b) die Absorption von PE-HD (*engl.: high density polyethylen, PE-HD*) mit dem TeraLyzer ausgewertet und dargestellt. Die Fehlerbalken für den beidseitigen Vertrauensbe-

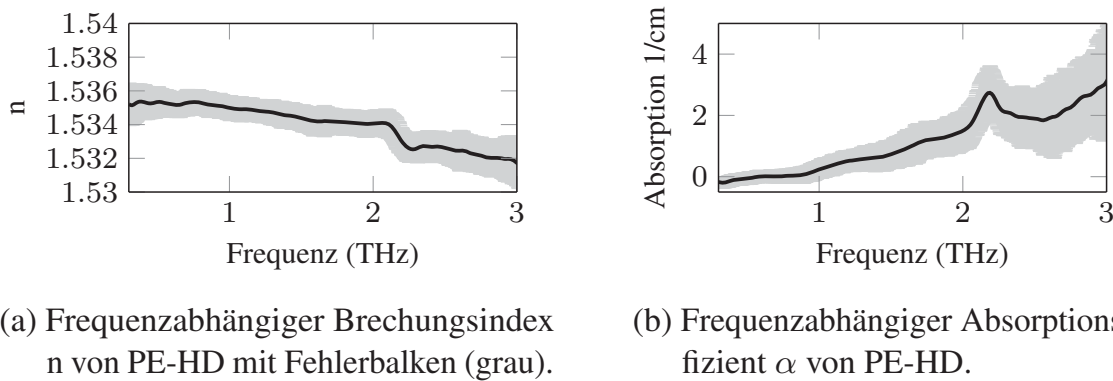


Abbildung 2.3: Ausgewertete Materialparameter von PE-HD über einen Frequenzbereich von 3 THz mit Fehlerbalken (grau).

reich von 95% sind grau eingezeichnet. PE-HD wird häufig für Linsen und optische Elemente im THz-Bereich verwendet, da es im Bereich bis 2 THz einen nahezu konstanten Brechungsindex von  $n_{\text{PE-HD}} \approx 1,534$  und einen niedrigen Absorptionskoeffizienten von  $\alpha_{\text{PE-HD}} \approx 0,5\text{cm}^{-1}$  aufweist.

Ein wesentlicher Vorteil der THz-TDS Systeme ist, dass bereits mit einer einzelnen Messung die untersuchte Probe über einen breiten Frequenzbereich ausgewertet werden kann. THz-Dauerstrich- bzw. Photomischsysteme bieten lediglich eine selektive Wahl der THz-Frequenz und weisen durch die periodische Signalform eine  $2\pi$ -Unsicherheit in der Phase auf [63].

### 2.1.2 Photomischen

THz-Dauerstrichsysteme kommen in der vorliegenden Arbeit nur indirekt zur Anwendung. Jedoch legt die Funktionsweise der Photomischsysteme die Grundlagen der im folgenden Abschnitt 2.1.3 vorgestellten THz-QTDS Systeme und wird daher kurz vorgestellt. Für eine ausführlichere Betrachtung sei auf umfassende Abhandlungen in der Literatur verwiesen, zu nennen sind die Arbeiten von S. Verghese et al. und E. R. Brown et al., welche eine gute Einführung und die notwendige Tiefe bieten [34, 64–68]. Neuere Arbeiten von Stanze et al. und Göbel et al. zeigen modifizierte Funktionskonzepte und Umsetzungen [69, 70]. Aber auch die Ergebnisse von Stanze et al., Deniger et al. und Thirunavikkuarasu et al. zeigen deutliche Fortschritte auf dem Gebiet der Photomischsysteme [71–73]. Weiterhin ist bekannt, dass Göbel et al. an einer monolithisch integrierten Lösung arbeiten, welche vielversprechende Funktionen in Aussicht stellt [74, 75].

Grundlage für die THz-Dauerstrichsysteme sind in der Regel zwei DFB-Laser (*engl.: distributed feedback, DFB*) mit leicht unterschiedlichen Wellenlängen  $\Omega_1$



und  $\Omega_2$ . Die emittierten optischen Signale  $E_1$  und  $E_2$  werden mit Hilfe eines Strahlteilers überlagert und jeweils zu den THz-Antennen geführt:

$$E(t) = E_1 \cos(\Omega_1 t) + E_2 \cos(\Omega_2 t). \quad (2.5)$$

Die optische Leistung  $P_{\text{opt,E}}(t)$  kann durch die beinhalteten Mischprodukte der Ausgangssignale ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned} P_{\text{opt,E}}(t) = & \frac{E_1^2}{2} \cos(2\Omega_1 t) + \frac{E_2^2}{2} \cos(2\Omega_2 t) \\ & + \frac{E_1 E_2}{2} \cos((\Omega_1 - \Omega_2)t) + \frac{E_1 E_2}{2} \cos((\Omega_1 + \Omega_2)t). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Neben den Termen, die proportional zur 2. Harmonischen  $2\Omega_1$  und  $2\Omega_2$  sind, weisen die weiteren Terme eine direkte Abhängigkeit zur Summen-  $|\Omega_1 + \Omega_2|$  und zur Differenzfrequenz  $|\Omega_1 - \Omega_2|$  auf. Die zeitliche Änderung der im Halbleitermaterial erzeugten Ladungsträger  $n_A(t)$  ergibt sich aus der Leitfähigkeit  $G(t)$  abzüglich der Ladungsträgerrekombination  $R(t)$  mit der Zeitkonstante  $\tau$ . Die Leitfähigkeit ist abhängig von der einfallenden optischen Leistung  $P_{\text{opt,A}}(t)$  und einem material- und antennenspezifischen Faktor  $\Psi_A$ :

$$\frac{dn_A(t)}{dt} = G(t) - R(t) = \Psi_A P_{\text{opt,A}}(t) - \frac{n_A(t)}{\tau}. \quad (2.7)$$

An der Sendeantenne ist eine Vorspannung angelegt, der entstehende Strom  $I_A(t)$  ist proportional zu den erzeugten freien Ladungsträgern  $n_A(t)$ :

$$I_A(t) \propto n_A(t) \propto \Psi_A \tau \overline{P_{\text{opt,A}}} \left( 1 + \frac{\sin(\omega t)}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \right). \quad (2.8)$$

Unter Berücksichtigung der begrenzten Ladungsträgerbeweglichkeit und den in Gleichung 2.6 erzeugten Mischprodukten, kann der zweite Term innerhalb der Klammer als Tiefpass angesehen werden. Für den Mischprozess an der Antenne ist die Differenzfrequenz  $\omega$  maßgeblich, daher kann die Gleichung für das abgestrahlte elektrische Feld  $E_{\text{THz}}$ , vereinfacht als

$$E_{\text{THz}}(t) \propto -\frac{dI_A(t)}{dt} = -\omega \Psi_A \tau \overline{P_{\text{opt,A}}} \left( \frac{\cos(\omega t)}{\sqrt{1 + (\omega\tau)^2}} \right), \quad (2.9)$$

dargestellt werden. Die abgestrahlte THz-Frequenz kann über den Abstand der Differenzfrequenz  $\omega$  der Laser eingestellt werden. Die Detektion wird mit Hilfe des Faltungsintegrals für  $I_D$  beschrieben (siehe Gleichung 2.10) und beinhaltet die durch das einfallende optische Intensitätssignal modulierte Leitfähigkeit  $G_D$  der Antenne. Die freien Ladungsträger in der Antenne werden durch das einlaufende elektrische Feld  $E_{\text{THz}}(t)$  moduliert und der entstehende Strom  $I_D$  kann detektiert



werden. Durch ein schrittweises Verändern der Signallaufzeiten um  $\Delta t$ , kann die THz-Welle abgetastet werden:

$$I_D(\Delta t) = \int_{-\infty}^{\infty} G_D(t) E_{\text{THz}}(\Delta t - t) dt. \quad (2.10)$$

Der Strom an der Detektorantenne ist direkt mit der Verzögerungsposition und der THz-Welle verknüpft:

$$I_D(\Delta t) = \omega A_{\text{sys}}(\omega) \overline{P_{\text{opt,A}}} \cos(\omega \Delta t) \quad (2.11)$$

Neben der klassischen Methode des Ab tastens mit Hilfe einer mechanischen Verzögerungsstrecke existieren auch weitere Ansätze, die auf einer kompakten und integrierten Bauform basieren und durch einen optischen Phasenschieber die Phasenlage an den Antennen verändern [69, 70].

### 2.1.3 THz-Quasi-Zeitbereichsspektroskopie (QTDS)

Bei der sowohl unter den Begriffen THz-Quasi-Zeitbereichsspektroskopie als auch THz-Cross-correlation-Spektroskopie bekannten Methode handelt es sich um eine Sonderform eines CW-THz-Spektrometers (*engl.: continuous wave, CW*) oder Photomischsystems. Durch die parallele Erzeugung mit mehreren äquidistanten Wellenlängen kann ein THz-TDS ähnliches Signal detektiert werden. In dieser Arbeit wird im Weiteren ausschließlich der Begriff THz-QTDS verwendet. Analog zu den in Abschnitt 2.1.2 beschriebenen Grundlagen des Photomischens wird ebenfalls die Erzeugung von THz-Wellen durch die Differenzfrequenzbildung zur Modulation der Antennen angenommen. Zunächst wird der Prozess der Signalerzeugung anhand von drei Lasermoden  $E_i$  betrachtet und anschließend für  $M$  Moden bzw. Frequenzen erweitert.

Im Folgenden sei beispielhaft der Fall des Photomischens für drei Ausgangswellenlängen analog zu den in Abschnitt 2.1.2 dargestellten Prozessen beschrieben. Die auf die Antenne treffende optische Leistung  $P_{\text{opt,E}}(t)$  kann durch:

$$P_{\text{opt,E}}(t) \propto (E_1 \sin(\Omega_1 t + \Phi_1) + E_2 \sin(\Omega_2 t + \Phi_2) + E_3 \sin(\Omega_3 t + \Phi_3))^2, \quad (2.12)$$

beschrieben werden. Dabei sind die Amplituden  $E_i$  mit den Frequenzen  $\Omega_i$  und der zeitlich veränderlichen Phasen  $\Phi_i$  berücksichtigt. Bedingt durch die quadratische Abhängigkeit der Leistung vom elektrischen Feld entstehen an der Antenne mehrere Mischprodukte, wovon auf Grund der Tiefpasscharakteristik der THz-Antenne lediglich die Differenzfrequenz für die folgenden Schritte berücksichtigt