

3D Bilderfassung im Terahertz-Frequenzbereich basierend auf elektrooptischer Detektion (3DTHz)

Abschlussbericht



Prof. Dr.-Ing.
Peter Haring Bolívar

Zentrum für
Sensorsysteme (ZESS)

Lehrstuhl für
Höchstfrequenztechnik
und Quantenelektronik

Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing.
Hartmut Roskos

Dr. phil. Torsten Löffler

Physikalisches
Institut

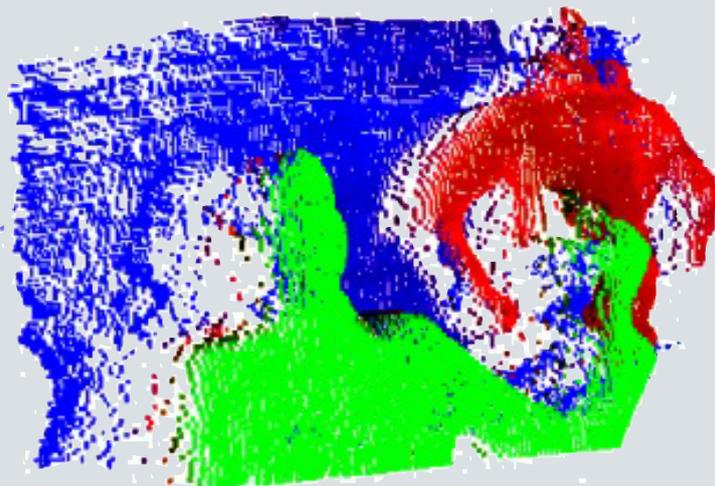
J. W. Goethe-Universität
Max-von-Laue-Str. 1
60438 Frankfurt am Main

Dynamisches 3D Sehen

Prof. Dr.-Ing.
Andreas Kolb

Zentrum für
Sensorsysteme
(ZESS)

Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing. habil.
Otmar Löffeld

Zentrum für
Sensorsysteme
(ZESS)

Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeine Angaben.....	2
1.1	DFG-Geschäftszeichen.....	2
1.2	Antragsteller	2
1.3	Institut/Lehrstuhl.....	2
1.4	DFG-finanzierte wissenschaftliche Mitarbeiter	2
1.5	Berichts- und Förderzeitraum	2
1.6	Fachgebiet, Arbeitsrichtung.....	3
1.7	Verwertungsfelder.....	3
1.8	Am Projekt beteiligte Kooperationspartner (Name, Ort)	3
2	Zusammenfassung.....	3
2.1	Wesentliche Ergebnisse und erzielte Fortschritte	3
2.2	Ausblick	4
3	Arbeits- und Ergebnisbericht	4
3.1	Ausgangslage.....	4
3.2	Beschreibung der durchgeführten Arbeiten.....	6
3.3	Darstellung der erzielten Ergebnisse.....	9
3.4	Ausblick auf zukünftige Arbeiten	13
3.5	Interdisziplinäre Weiterentwicklung	15
3.6	Verwertungspotenzial	15
3.7	Beteiligte Wissenschaftler	16
4	Liste der im Teilprojekt entstandenen Publikationen.....	16
4.1	Begutachtete Publikationen	16
4.1.1	Wissenschaftliche Zeitschriften	16
4.1.2	Fachkonferenzen	17
4.2	Andere Veröffentlichungen	17
4.2.1	Weitere Fachkonferenzen	17
4.2.2	Anwenderzeitschrift	17
4.3	Patente	18
5	Publikationen Dritter	18

1 Allgemeine Angaben

Ergebnisbericht im Rahmen des DFG Forschungspakets PAK-73 „Dynamisches 3D Sehen mit PMD“, Teilprojekt „3D-THz“

1.1 DFG-Geschäftszeichen

HA-3022/5-2

1.2 Antragsteller

Prof. Dr. Ing. Peter Haring Bolívar, Prof. Dr. Hartmut Roskos, Dr. Torsten Löffler

1.3 Institut/Lehrstuhl

Gemeinschaftsantrag von

Prof. Dr. Ing. Peter Haring Bolívar,
Kennziffer: HA 3022 / 5-1, geb. 20.03.1969
Staatsangehörigkeit: deutsch und mexikanisch
Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und
Institut für Höchstfrequenztechnik und Quantenelektronik, Universität Siegen
Hölderlinstrasse 3, 57068 Siegen
Tel. (0271) 740 2157, Fax: (0271) 7402410
peter.haring@uni-siegen.de
Privatadresse: Zum Lindenseifen 1b, 57482 Wenden, 02762 / 985468

Prof. Dr. Hartmut Roskos, Dr. Torsten Löffler,
Kennziffer: RO 770 / 27-1, geb. 14.5.1959
Staatsangehörigkeit: deutsch
Physikalisches Institut, Johann Wolfgang Goethe-Universität
Max-von-Laue-Straße 1, 60438 Frankfurt am Main
Tel. (069) 798-47214, Fax (069) 798-47221
roskos@physik.uni-frankfurt.de
Privatadresse: Altkönigstraße 40, 64176 Kronberg, 06173 / 939555

1.4 DFG-finanzierte wissenschaftliche Mitarbeiter

Die Dissertation von Dipl.-Ing. Gunnar Spickermann wurde vom 01.01.2009 bis zum 31.12.2010 in der Forschungsgruppe von Prof. Peter Haring Bolivar durch dieses Projekt finanziert. Er hat in diesem Zeitraum alle an der Uni Siegen durchgeführten experimentellen Untersuchungen bzgl. dieses Projektes durchgeführt. Die schriftliche Dissertation wird derzeit redaktionell zusammengestellt und wird 2011 abgeschlossen werden.

An der Universität Frankfurt wurden zu verschiedenen Projektphasen Dipl. Phys. Philip Rau, Dr. Alvydas Lisauskas und Dipl. Ing. Fabian Friederich zur Bearbeitung von Teilaufgaben durch dieses Projekt bezahlt. Herr Friederich arbeitete durchgängig an den Inhalten des Projektes, dessen wissenschaftliche Fragestellungen auch Gegenstände seiner gerade in der Erstellung befindlichen Dissertation sind. Thema: „3D Bilderfassung im Terahertzfrequenzbereich basierend auf elektro-optischer Detektion“.

1.5 Berichts- und Förderzeitraum

Förderzeitraum 1.2.2008 – 31.12.2010

1.6 Fachgebiet, Arbeitsrichtung

Photonik, Halbleitertechnik, Terahertz (THz) Technologie, Photonic Mixing Devices, 3D Sehen.

1.7 Verwertungsfelder

- Forschung im Bereich der Mikrowellen-, THz- und Infrarotstrahlung
- Bildgebende THz-Spektroskopiesysteme für Forschung, Industrie und Sicherheitsanwendungen
- THz Mikroskopie / Hochauflösende Profilometrie von optisch streuenden Medien
- Hochparallele breitbandige Detektion mit Multipixelssystemen im Mikrowellen bis Infrarotbereich

1.8 Am Projekt beteiligte Kooperationspartner (Name, Ort)

- Alessandro Tredicucci, Scuola Normale Superiore di Pisa, Italien
- TOPTICA Photonics AG, München, Deutschland
- PMD Technologies GmbH, Siegen, Deutschland

2 Zusammenfassung

THz-Bildgebungssysteme werden zunehmend interessanter für Anwendungen in der Forschung aber auch in der Industrie. Ein großes Potential für bildgebende Systeme haben dabei Photonic Mixing Device (PMD) basierte elektro-optische THz Detektionsansätze, die einen breitbandigen Einsatz und eine durch Multipixelansätze hochparallele Erfassung von dreidimensionalen Bildern ermöglichen [SFRB09]. Die im Vergleich zu optischem Licht relativ große Wellenlänge der THz-Strahlung (30 μ m - 3mm) begrenzt allerdings die laterale Ortsauflösung bei der bildgebenden Analytik. Andererseits wird auf eine Entfernung von einigen cm die kontaktlose Entfernungsmessung im sub-mm-Bereich ermöglicht. In diesem Projekt wurden daher verschiedene THz-Strahlgeometrien simuliert und erprobt, um die laterale Auflösung von THz-Bildgebungssystemen zu optimieren. Für die Detektion der THz-Strahlung sind empfindliche Detektoren notwendig. In diesem Projekt lag der Schwerpunkt auf dem elektro-optischen Ansatz, bei dem die Information aus der THz-Strahlung in eine Intensitätsmodulation optischen Lichts übersetzt wird. Bei der Messung dieser Intensitätsmodulation entfalten sich die Vorteile der PMD-Technologie, da sie die Demodulation mit einer effektiven Hintergrundunterdrückung ermöglicht. In diesem Projekt wurden daher die physikalischen Grenzen der PMD-Technologie an Einzelpixeln und anhand unterschiedlicher Bildaufnahmeverfahren untersucht und optimiert, sowie ein THz-Bildgebungssystem mit der PMD-Kamera als hochaufgelöstes Detektorarray realisiert. Der Nachteil der geringen lateralen Auflösung wurde in einem letzten Schritt umgangen, indem das Nahfeld in der Interaktion der Probe mit der THz-Beleuchtung untersucht wurde. Ein breitbandiges THz-Mikroskopiesystem, welches dies weltweit erstmalig unter einer parallelen elektro-optischen Abfrage mit einem Standard-Laserszillator ermöglicht, wurde in diesem Projekt aufgebaut und untersucht.

2.1 Wesentliche Ergebnisse und erzielte Fortschritte

Durch die Simulation und Erprobung verschiedener THz-Strahlgeometrien wurde während dieses Projektes viel Erfahrung im systematischen Design von THz-Optiken gesammelt, die nun auch in andere Projekte, die THz-Bildgebung behandeln, einfließt. Auf dem Gebiet der demodulierenden Detektoren wurden MSMs als attraktive PMD Pixeldetektoralternative untersucht. Ein rasterndes THz-Bildgebungsverfahren mit entsprechenden Algorithmen zur Rekonstruktion von 3D-Topologien mit sub-Wellenlängen-Auflösung wurde implementiert. Weiterhin wurde das FMCW-Verfahren erfolgreich mit dem elektro-optischen Detektionskonzept kombiniert und dahin adaptiert, dass der Eindeutigkeitsbereich für Tiefenmessungen erweitert wurde, auch wenn die Modulationsbandbreite der THz-Quelle nicht für einen vollständigen Phasenumlauf ausreicht. Es konnte basierend auf dem Prinzip der elektro-optischen Detektion gezeigt werden, dass durch den Einsatz demodulierender Kamerasysteme phasensensitive THz-

Aufnahmen aktiv beleuchteter Objekte realisiert werden können. Allerdings beschränken die verfügbare THz-Leistung und hohe Anforderungen an die Kameraelektronik signifikant die Aufnahmegeschwindigkeit und verhindern folglich die Bildgebung bei Videoraten. Der Einsatz eines Quantenkaskadenlasers als starke THz-Beleuchtung warf große Schwierigkeiten bei der Synchronisierung auf, letztendlich konnte aber ein hochauflösendes THz-Mikroskop mit gepulster THz-Quelle realisiert werden. Dieses THz-Mikroskop nutzt die Vorteile der PMD-Kamera, um damit ein sensitives elektro-optisches THz-Detektorarray zu bilden. Die Ortsauflösung konnte um den Faktor 16 gegenüber dem Stand-der-Technik und dem eines vorherigen Setups mit konventioneller Abbildungsoptik gesteigert werden.

2.2 Ausblick

Die innerhalb des Projektes durchgeführten Arbeiten haben ein großes und vielseitiges Potential elektro-optisch demodulierender Detektorarrays aufgezeigt, für die hochparallelisierte Erfassung von elektro-optischen THz Signalen. Das flexible Detektionskonzept erlaubt die einfache Integration anwendungsspezifischer Verfahren und zeichnet sich insbesondere durch die frequenz-selektive Signalerfassung über einen breiten THz-Spektralbereich aus. Während Optimierungen der Kameraelektronik für das elektro-optische Detektionskonzept und die Entwicklung stärkerer frequenz-stabiler THz-Quellen potentiell Aufnahmen mit Videoraten ermöglichen, könnten bei geeigneter Systemintegration auch spektroskopische THz-Bildgebungssysteme realisiert werden, da die derzeitige Bildaufnahmezeit vornehmlich durch die elektronische Auslese der PMD-Chips begrenzt ist und noch um einen Faktor von etwa 30 gesteigert werden könnte.

3 Arbeits- und Ergebnisbericht

3.1 Ausgangslage

Design und Optimierung des THz-Strahlengangs

Eine wesentliche Besonderheit bei der THz-Bildgebung, im Gegensatz zur optischen Bildgebung, ist die signifikant größere Wellenlängen ($30\mu\text{m} - 3\text{mm}$). Das führt dazu, dass viele Oberflächen THz-Signale spekulär (wie Spiegel) reflektieren, da sie glatt im Vergleich zur Wellenlänge sind und nicht streuen. Dies muss beim Design der Bildgebungsoptik berücksichtigt werden. So begünstigen große numerische Aperturen, die Erfassung spekulär reflektierter Signale in weiten Raumwinkelbereichen und erlauben die beste Auflösung bei beschränkter Größe des EO-Kristalls. Allerdings erzeugen diese auch erhebliche Bildfehler. Ein wichtiges Ziel innerhalb dieses Projektes, ist daher die Optimierung des THz-Strahlengangs im Hinblick auf eine Reduzierung der Bildfehler bei gleichzeitig hohen numerischen Aperturen.

Untersuchung der physikalischen Limitationen des PMD-Detektionsprinzips

Standard PMD-Kamerasysteme sind im Hinblick auf genaue Phasenmessungen optimiert und nicht für die Detektion extrem kleiner Lichtintensitätsmodulationen bei intensivem Hintergrundlicht, wie es für den Einsatz zur THz Detektion notwendig ist. Um die Systemanforderungen, an ein für die elektro-optische THz-Bildgebung optimiertes Kamerasystem zu evaluieren und physikalische Limitierungen dieses Detektorkonzepts aufzuzeigen, wurden in Zusammenarbeit mit dem Projekt „*MultiCam*“ einzelne, von der Kameraelektronik unabhängige, demodulierende Detektoren untersucht. Bei ausreichender Güte der Detektoren sollten diese in das THz-Bildgebungssystem integriert werden, um einen direkten Vergleich zu konventionellen Photodetektoren mit LockIn-Verstärker zu ermöglichen.

Rekonstruktion von 3D-Topographien

Neben der Messung der Amplitude der von einem Objekt reflektierten THz-Strahlung, können die realisierten kohärenten Messsysteme auch die Phasenlage der detektierten THz Strahlung aufnehmen. Diese erlaubt eine Aussage der Oberflächen- oder inneren Struktur von Objekten, wodurch 3D-Messungen

ermöglicht werden. Die Rekonstruktion von 3D-Topographien auf Grundlage von 2D-Phasendaten unterliegt zunächst einer Uneindeutigkeit bei Relieftiefen größer einer halben Wellenlänge (hier um $150\mu\text{m}$!). Relieftiefen, die um vielfache einer halben Wellenlänge differieren, enthalten identische Phasenwerte und können daher nicht direkt voneinander unterschieden werden. Anhand im Raster-Scan-Verfahren aufgenommener THz-Referenzaufnahmen sollten Rekonstruktionsalgorithmen zur Wiederherstellung der 3D-Objektopographie erprobt werden.

Erweiterung des Eindeutigkeitsbereiches durch Modulation des THz-Signales

Die Eindeutigkeit von 3D-Topographien kann bei Reliefhöhenunterschieden zwischen zwei nächstgelegenen benachbarten Messpunkten kleiner einer halben Wellenlänge mittels Algorithmen rekonstruiert werden. Für größere Reliefversätze bedarf es zusätzlicher Verfahren. Hierzu wurden Ansätze untersucht, wie z.B. die Frequenzmodulation der erzeugten Dauerstrich-THz-Strahlung wie beim FMCW-Radar. Die untere Auflösungsgrenze für eine eindeutige Tiefenmessung wird dabei durch den maximalen Frequenzhub limitiert. Zielsetzung war die Implementierung und Charakterisierung dieser Technik in einem elektro-optischen THz-Messaufbau.

THz-Bildgebungssystem mit Abbildung in der Fourier-Ebene

Die Details einer THz-Szenerie sind bei einer verkleinerten Abbildung auf einem elektro-optischen Kristall in Abhängigkeit des zu erfassenden Gesichtsfeldes beschränkt, weil die Größe von elektro-optischen Kristallen typischerweise auf $1''$ beschränkt ist und die Beugungslimitierung der THz Abbildung in dieser Fläche nur ca. 10×10 unabhängige THz Bildpunkte erzeugen kann. Eine Abbildung in der Fourier-Ebene erlaubt hingegen eine deutlich bessere Detaildarstellung und höhere Pixelzahl für die Bildgebung, allerdings mit reduziertem Kontrastverhältnis. Hierbei wird unter Ausnutzung der Phasenempfindlichkeit der Detektoren mittels inverser Fouriertransformation auf das reale Bild zurückgerechnet. Innerhalb dieses Projektes war die Untersuchung dieses alternativen Verfahrens für das THz-Bildgebungssystem vorgesehen.

QCL als THz-Quelle

Quantenkaskadenlaser (QCLs) sind Laserbasierte THz-Quellen mit relativ hoher optischer Ausgangsleistung (bis ca. 200mW) und kurzer Wellenlänge ($100\mu\text{m}$, entsprechend 3THz) und daher für THz-Bildgebung interessant. Die Herausforderung bei ihrer Verwendung in elektro-optischen THz-Bildgebungssystemen besteht darin, die Detektionseinheit phasengenau mit der THz-Quelle zu synchronisieren. In diesem Projekt soll die Verwendbarkeit von QCLs als THz-Quelle untersucht werden.

Multipixel THz-Bildgebung

Eine Möglichkeit THz-Detektorarrays zu großen Pixelzahlen ($\gg 100$) zu skalieren besteht darin ein klassisches THz-Time-Domain-Setup (wie z.B. in [ZSVP02]) mit einer CCD- oder CMOS-Kamera statt einem einzelnen differentiellen Photodiodenpaar auszustatten [WHZ96]. Um eine brauchbare Dynamik zu erreichen, waren diese Setups bisher auf die Verwendung von großen, teuren und wartungsintensiven Verstärker-Kurzpulslasern angewiesen. In dem Anwendungsbereich, für den die PMD-Kamera entwickelt wurde, muss die durch eine aktive Beleuchtung hervorgerufene Intensitätsmodulation effektiv von einem konstanten Hintergrund (in diesem Fall Fremdlicht) trennen, um ihre Messaufgabe auch bei den wesentlich geringeren Pulsenergien von normalen Laseroszillatoren sensitiv erfüllen zu können. Diese Eigenschaft, auf modulierte Licht spezialisiert zu sein, unterscheidet sie erheblich von gewöhnlichen CCD oder CMOS-Kameras, ermöglicht es aber, die Sensitivität von elektro-optischen THz-Detektorarrays erheblich zu steigern [SFRB09]. Das erste CCD basierte Setup wurde 2006 von Crawley et al. vorgestellt, war aber nicht in der Lage ein Bild einer Probe aufzunehmen sondern konnte nur ein Bild der THz-Beleuchtung aufnehmen [CWO06]. Die Kombination der skalierbaren elektro-optischen THz-Detektion mit der PMD-Kamera ermöglicht ein THz-Detektorarray ohne die Notwendigkeit von Verstärkerlasern zu realisieren. Solche Multipixel THz-Bildgebungssysteme sollen in diesem Projekt untersucht und optimiert werden.

THz-Mikroskopie

Klassische THz Bildgebungssysteme funktionieren im Fernfeld, was in Anbetracht der signifikanten Wellenlänge (30µm – 3mm) und der typischen Größe elektro-optischer Kristalle zu einer limitierten Auflösung und effektiven Pixelanzahl führt. Im Verlauf des Projektes hat sich daher herausgestellt, dass es jenseits der Bildgebung im Fernfeld, aufgrund der Beugungs- und Leitungslimitierung der PMD Detektion das Potential für Nahfeldmikroskopische THz Aufnahmen mit PMD-basierter THz Bildgebung besonders attraktiv wäre, was dann auch intensiver als ursprünglich geplant untersucht wurde.

3.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

Design und Optimierung des THz-Strahlengangs

Es wurden verschiedene Spiegeloptiken für die THz-Abbildung simuliert und erprobt. Dabei gibt es drei Ausführungsvarianten: Erstens einfache leichte und kostengünstige tiefgezogene Spiegel als Katalogware mit relativ matter Oberfläche. Zweitens in der Institutswerkstatt CNC-gedrehte asphärische Spiegel mit einem Durchmesser bis 23 cm, deren Oberfläche eine Justage mit sichtbarem Licht nur bedingt erlaubt und drittens von Spezialfirmen diamantgedrehte Spiegel mit optischer Qualität und auch größeren Durchmessern. Die Designs beinhalten mindestens einen Spiegel, der idealerweise asphärisch ist. Dadurch, dass die Strahlen relativ achsnah sind, bleibt die Verzeichnung hierbei in akzeptablen Grenzen. Eine Bildfeldwölbung ist häufig vorhanden, aber durch die recht hohen Rayleigh-Längen auch nicht problematisch. Die Designs sind -im Gegensatz zu den meisten Teleskopdesigns- für relativ kleine Objektabstände ausgelegt, wie sie z.B. im Labor vorliegen. Damit basieren sie typischerweise auf elliptischen Spiegeln. Das einfachste Design bildet ein Objekt, das sich in einem Brennpunkt der Ellipse befindet auf einen Detektor, der in dem anderen Brennpunkt platziert ist, ab. Der Nachteil ist eine fehlende Fokussiermöglichkeit auf verschiedene Objektabstände. Dieses Design lässt sich erweitern, indem ein sphärischer Sekundärspiegel hinzugefügt wird, durch dessen Verschiebung auf diverse Objektabstände eingestellt werden kann. Eine Optimierung der Formen der Spiegelflächen auf Basis der einfachen Grundformen erlaubt eine beugungsbegrenzte Abbildung für einen erweiterten Bereich der Objektabstände. Ein drittes Design verwendet einen großen, günstigen tiefgezogenen Spiegel als Hauptspiegel, dessen Abbildungsfehler durch einen kleinen asphärischen Sekundärspiegel, der in der Institutswerkstatt gefertigt werden konnte, kompensiert werden. Die vierte Designvariante verwendet Kunststofflinsen, um die geringe numerische Apertur eines Teleskopsystems, das für die Abbildung auf ein relativ großes Hornantennenarray durch einen Primär- und Sekundärspiegel optimiert wurde, auf die hohe numerische Apertur konvertiert, die für die elektro-optische Detektion vorzuziehen ist.

Untersuchung der physikalischen Limitationen des PMD-Detektionsprinzips

Im Rahmen des Vorhabens wurden einzelne MSM (Metal-Semiconductor-Metal)-PMDs [Zha03] der koreanischen Firma „gigaPASS INC.“ auf die prinzipielle Messgrenze bei der Detektion kleinster Modulationstiefen untersucht. Die Struktur der verwendeten MSM-PMDs besteht aus zwei interdigitalen Schottky-Kontakten, welche auf einem gemeinsamen GaAs-Substrat realisiert sind. Die demodulierende Detektion optischer Strahlung mittels solcher Empfänger kann bereits durch die Verwendung einer einfachen Ansteuerungs- und Ausleseelektronik realisiert werden und unterdrückt konzeptbedingt inhärent unkorrelierte Strahlung um höhere optische Kontrastverhältnisse und eine höhere THz Empfindlichkeit zu ermöglichen. Zur kontrollierten Erzeugung kleiner Modulationstiefen wurde die Strahlung eines modulierten mit einem unmodulierten Diodenlaser überlagert und anschließend mit dem Einzelpixel-Detektor erfasst. Durch variieren der Leistung der jeweiligen Laser können somit unterschiedliche Intensitätsmodulationen erzielt werden. Die Signalerfassung modulierter optischer Strahlung erfolgte dabei mittels eines kommerziellen Low-Noise-Transimpedanzverstärkers, welcher auch das Anlegen eines variablen Bias Strom ermöglicht.

Rekonstruktion von 3D-Topographien

Zur Messung der 3D-Topologie eines Objektes mit Hilfe von THz-Strahlung wurde ein Messsystem mit Reflektionsgeometrie konzipiert und aufgebaut. Das in Abbildung 1 dargestellte THz-Bildgebungssystem auf Basis des Raster-Scan-Verfahrens, ermöglicht die Erfassung von Amplituden- und Phasendaten des

abgetasteten Objektes. Dabei wird ein Teil der emittierten THz-Strahlung über einen Strahlteiler in den Referenzarm gelenkt und dort mittels eines elektro-optischen Detektors (siehe „Referenzdetektor“ Fortsetzungsantrag) als Lock-In-Referenzsignal erfasst. Der andere THz-Strahl wird auf das abzutastende Objekt fokussiert und die davon zurückreflektierte Strahlung über einen weiteren Strahlteiler in den Detektionsarm geleitet in dem das Signal elektro-optisch detektiert und an den Signaleingang des Lock-In-Verstärkers gegeben wird. Durch das Verfahren des Objektes in der Fokusebene erhält man für jeden erfassten Bildpunkt die jeweilige Amplituden und Phaseninformation.

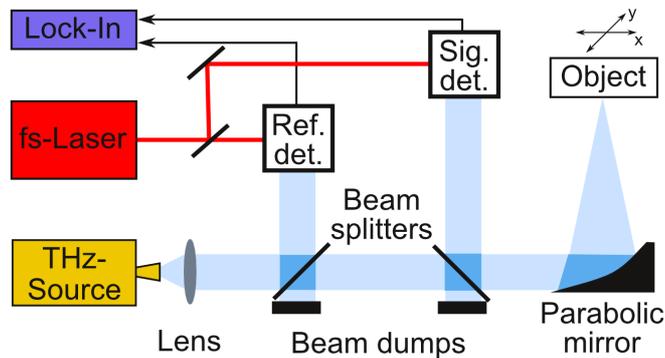


Abbildung 1: Raster-Scan THz-Bildgebungssystem

Erweiterung des Eindeutigkeitsbereiches durch Modulation des THz-Signales

Durch die besondere Eigenschaft der THz-Strahlung bestimmte Materialien zu durchdringen, ermöglicht das FMCW-Verfahren auch prinzipiell tomographische Aufnahmen und kann folglich auch anhand von Dickenmessungen THz-transparenter Materialien demonstriert werden. Hierfür wurde die Dicke einer HDPE-Platte innerhalb eines Transmissionsaufbaus vermessen. Dabei wurde ein ähnlicher Aufbau wie in Abbildung 1 verwendet, wobei anstelle des Strahlteilers des Signalarms die THz-Strahlung direkt zum Signaldetektor gelenkt und die HDPE-Platte in den Strahlengang des Signalarms gestellt wurde.

THz-Bildgebungssystem mit Abbildung in der Fourier-Ebene

Es wurden intensive Computersimulationen vorgenommen, welche zeigen, dass die Rekonstruktion von Abbildungen in der Fourier-Ebene ein extrem hohes Kontrastverhältnis voraussetzt. Die Realisierbarkeit dieser Methode wurde daher zunächst von den Resultaten reeller Objektabbildungen abhängig gemacht.

QCL als THz-Quelle

Bevor der Bildgebungsteil für das THz-Setup mit Quantenkaskadenlaser realisiert wurde, ist zuerst der Referenzpfad aufgebaut worden, mit dem ein Referenzsignal zur Synchronisierung der Detektoreinheit (in diesem Falle die PMD-Kamera) erzeugt werden soll.

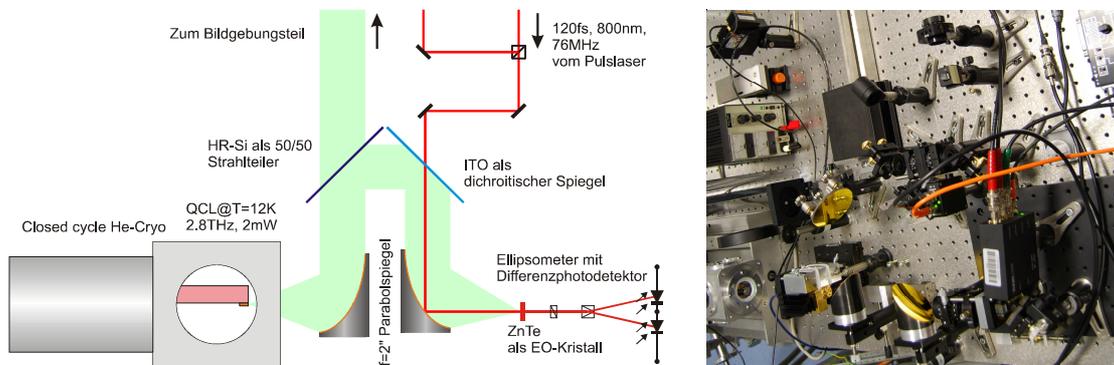


Abbildung 2: Referenzpfad für die THz-Bildgebung mit Quantenkaskadenlaser als Beleuchtung

Abbildung 2 zeigt links eine Skizze des Referenzdetektoraufbaus und rechts ein Photo des realisierten Aufbaus. Für die Untersuchungen während dieses Projektes wurde der Strahlteiler gegen einen Goldspiegel ausgetauscht, damit die gesamte THz-Leistung des QCLs auf dem Referenzdetektorkristall konzentriert werden kann. Die elektrisch messbare Zwischenfrequenz $f_z = f_{\text{thz}} - n \cdot f_{\text{rep}}$ kann abhängig von der genauen Frequenz der THz-Quelle irgendwo im gesamten Band von 0..76 MHz liegen. Da die Messungen mit dem QCL stark durch die Vibrationen des Kryostaten gestört wurden, wurde zunächst mit einer W-Band-Quelle (1mW bei 100GHz) statt des QCLs als THz-Quelle gearbeitet, da zum einen die Störungen durch den Kryostaten wegfallen und die Frequenz der THz-Quelle genau vorgegeben werden, wodurch die Lage der Zwischenfrequenz vorhergesagt und gefunden werden kann.

Multipixel THz-Bildgebung

Zuerst wurde wie im Projekt geplant, ein Multipixel-THz-Bildgebungssystem realisiert, bei dem das THz-Beleuchtete Objekt mittels einer Linse auf den Detektorkristall abgebildet wird. Der Detektorkristall wird dann mittels eines Probepulses abgefragt, wodurch sich das THz-Bild auf den optischen Strahl überträgt und mit der PMD-Kamera sichtbar gemacht werden kann.

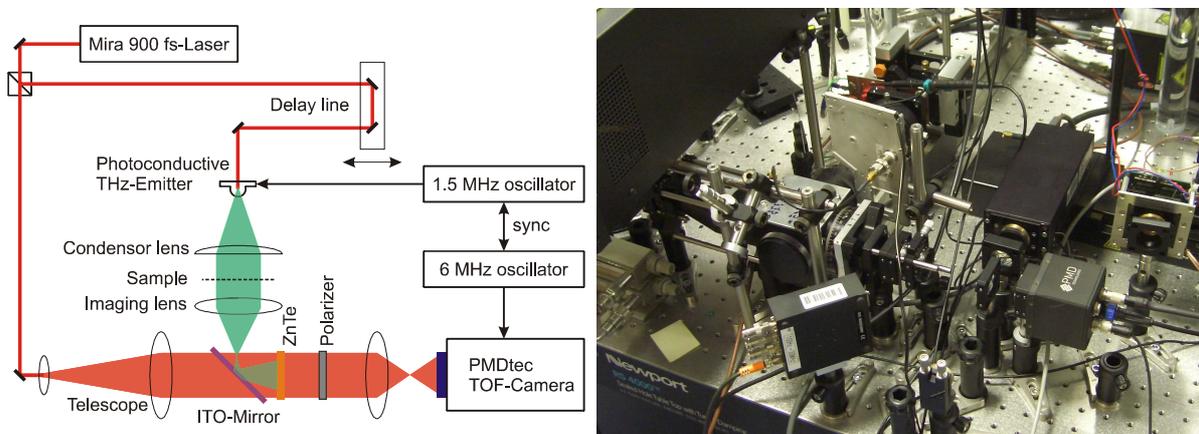


Abbildung 3: Skizze (links) und Photo (rechts) des Versuchsaufbaus zur Multipixel THz-Bildgebung mit PMD-Kamera

Abbildung 3 zeigt das realisierte Konzept als Skizze und in einem Photo. Das System wurde eingehend charakterisiert und es wurden THz-Bilder unterschiedlicher Proben erzeugt.

THz-Mikroskop sowie Untersuchung alternativer Detektorkristalle

Das im vorherigen Abschnitt vorgestellte THz-Imaging-System mit abbildender Linse bietet zwar eine brauchbare Dynamik, hat aber eine geringe laterale Bildauflösung (siehe Kapitel 3.3, sowie [SFRB09]). Daher wurde anschließend versucht, diese Limitierung mit einer neuen Strahlgeometrie und Probenanordnung zu umgehen. Hier wird nun die Probe in direkten Kontakt mit dem Detektorkristall im THz Nahfeld gebracht (siehe Abbildung 4).

Für THz-Setups, die mit einem Ti:Saphir-Kurzpuls laser arbeiten, eignet sich ZnTe besonders als EO-Detektorkristall, da es wegen seiner großen Kohärenzlänge und geringen THz Absorption die Nutzung dicker (1-3mm) Kristalle erlaubt, wodurch sich wegen der größeren gemessenen Signalstärke die Dynamik des Setups verbessert. Alternativ sollte hier GaAs als Alternative untersucht werden, da es in besserer Kristallqualität als ZnTe erworben werden kann. Durch die Bandlücke des Materials wird GaAs allerdings erst ab >900nm Wellenlänge für den Abfragestrahl transparent und bietet erst ab ca. 1000nm eine ausreichende Kohärenzlänge um praktisch eingesetzt werden zu können. In diesem Bereich beträgt die Quanteneffizienz der PMD-Kamera nur noch <5%, wodurch die Sensitivität der Kamera entsprechend abnimmt [Alb07]. Der größte Nachteil beider Kristalle besteht allerdings in der großen Dicke, die wegen des vergleichsweise geringen elektro-optischen Koeffizienten beider Materialien ($r = 3.9\text{pm/V}$ bzw. 1.2pm/V [PRS05, KB186]) verwendet werden muss. An den Kanten der abzubildenden Probe tritt

Beugung auf. Die gebeugten THz-Wellen breiten sich in dem Kristallvolumen aus und deren Bild wird von dem Abfragestrahl über die Kristalllänge gemittelt. Im Endeffekt verringert daher eine große Kristalllänge die laterale Auflösung von THz-Bildern. Daher wurde hier als Alternative zu ZnTe statt GaAs LiTaO₃ ($r = 30.5\text{pm/V}$ [WuZ96]) untersucht, welches als 50 μm dickes Kristallstück mit optimierenden Beschichtungen angeschafft wurde. Der höhere elektro-optische Koeffizient kann so zum Teil die um den Faktor 20 geringere Interaktionslänge des Abfragestrahls mit dem THz-Bild ausgleichen.

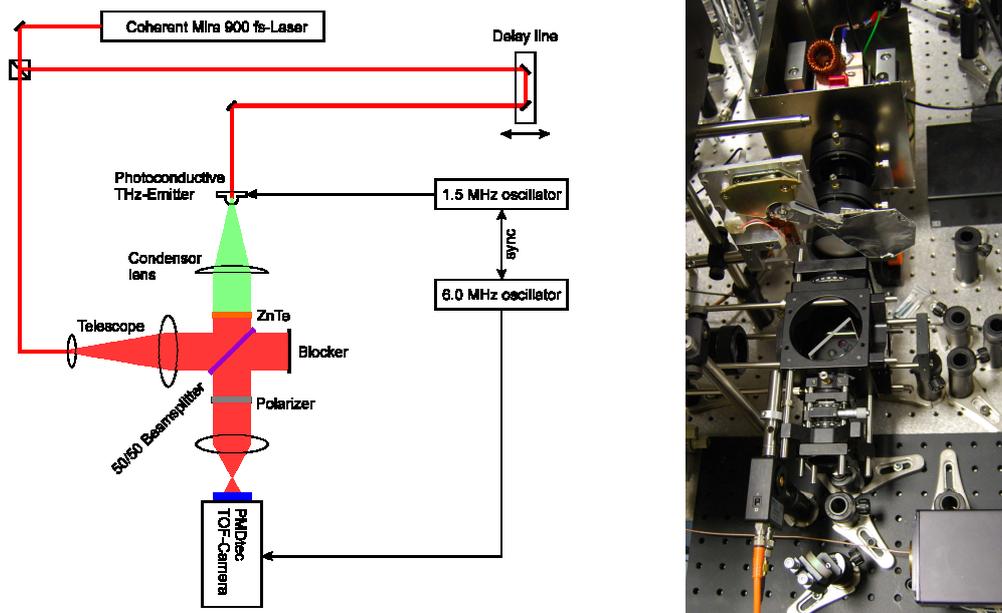


Abbildung 4: Die linke Seite zeigt schematisch den Aufbau des THz-Mikroskopes, die rechte Seite zeigt ein Photo mit dem Emittor am oberen Rand, dem EO-Mischer in der Mitte und der PMD-Kamera unten rechts.

3.3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Design und Optimierung des THz-Strahlengangs

Generell ist eine große numerische Apertur erstrebenswert. Nur wenn kleine Objekte aus geringer Entfernung abgebildet werden, sind kleine Kunststofflinsen eine geeignete Alternative zu z.B. Off-Axis Paraboloiden, die deutliche Verzerrungen des Bildbereiches mit sich bringen. Ab einem Linsendurchmesser von 10-15cm kommen die Nachteile durch die Dicke der Kunststofflinse zum Tragen: Materialaufwand, Gewicht und vor allem Absorptionsverluste machen sich bemerkbar. Mit steigender THz-Frequenz werden viele Kunststoffe durch erhöhte Absorption ungeeignet, was nur zum Teil durch Fresnel-Stufenlinsen kompensiert werden könnte. So transmittiert schon eine typische kleine 2"-Teflonlinse mit einigen Millimeter Dicke weniger als 10% der THz-Leistung des QCLs bei 2.8THz. Spiegeloptiken sind über einen weiten Frequenzbereich verlustarm, darüber hinaus achromatisch und lassen sich mit sichtbarem Licht vorjustieren. Letzteres ist mit Linsen nur durch Verwendung von speziellen Kunststoffen, die für THz-Strahlung und optisches Licht ähnliche Eigenschaften haben, möglich. Diese Spiegeloptiken bringen allerdings erheblich höhere Kosten mit sich. Die Abbildungsleistungen der im Projekt als Optimalkompromiss realisierten beugungsbegrenzten Teleskopoptiken erfüllen die aus den Simulationsergebnissen folgenden Erwartungen. So können Abbildungen mit deutlich geringeren Verzeichnungen als bei den zuvor auf off-axis Paraboloiden basierenden Systemen erzielt werden. Dabei wurden unterschiedlichste Systeme konzipiert, berechnet und optimiert, um vom Nahfeld bis zur Bildgebung in mehreren Metern Abstand Systeme realisieren zu können.

Untersuchung der physikalischen Limitationen des PMD-Detektionsprinzips

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das Detektionsprinzip bei geringer optischer Leistung erwartungsgemäß durch das Dunkelstromrauschen des Systems limitiert ist. Allerdings ist auch ein von der optischen Leistung abhängiger Offset, aufgrund geringfügiger Asymmetrien der Schottkykontakte zu beobachten, welcher die Trennung der Ladungsträger bei der Demodulierung beeinträchtigt [Kra07]. Während dies bei optischen Leistungen von nur einigen μW eine untergeordnete Rolle spielt, können bei höheren optischen Leistungen starke Amplitudenschwankungen in Abhängigkeit der Phase des zu demodulierenden Signals beobachtet werden. Das Offset lässt sich zwar bis zu einem gewissen Grad über das Anlegen eines Bias-Stroms kompensieren, allerdings lässt sich das bei zunehmender Bestrahlungsstärke immer schlechter realisieren, da der Bias-Strom von der Beleuchtungsstärke selbst abhängt. Darüber hinaus sind schwankende Asymmetrien des modulierten Steuersignals, bei kleineren Modulationstiefen zunehmend von Bedeutung, so dass im Rahmen der Untersuchungen die kleinste detektierbare Modulationstiefe in der Größenordnung von 10^{-4} bei einer Integrationszeit von 80ms liegt. Dies ist signifikant grösser als die intrinsische Performance von Standard PMD Pixel, aber ähnlich zur Performance die durch aktiven PMD Pixel mit SBI Schaltung (subtraction of background illumination) ermöglicht wird, was ein interessantes Potential zur Realisierung kompakterer PMD und elektro-optischer THz Bildgebungssysteme aufzeigt.

Rekonstruktion von 3D-Topographien

Der im Rahmen dieses Arbeitspakets entwickelte 3D Rekonstruktionsalgorithmus wird in Abbildung 5 an Hand einer aufgenommenen 2 Euro Münze demonstriert. Obwohl die Prägungstiefe der Münze kleiner als die halbe Wellenlänge von $500 \mu\text{m}$ ist, sind in dem Phasenbild der Rohdaten (2. von links) aufgrund der nicht orthogonal zur optischen Achse orientierten Münze, Phasensprünge klar zu erkennen. Durch Anwendung des entwickelten Rekonstruktionsalgorithmus lässt sich die orthogonal abweichende Orientierung der Münze problemlos korrigieren (3. von links).

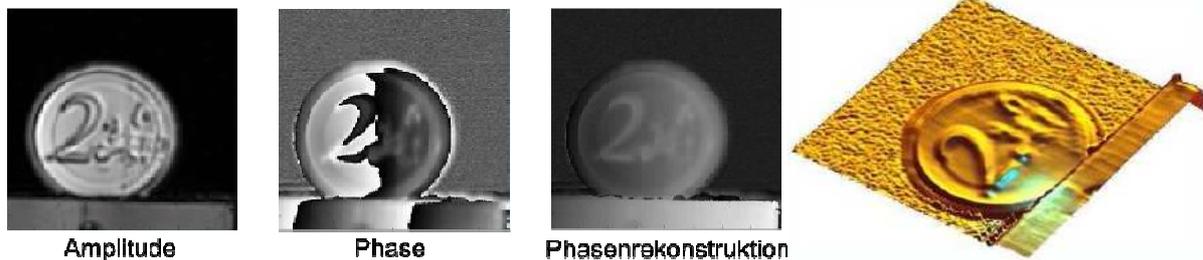


Abbildung 5: THz Amplitude- und Phasenbilder einer 2-Euro-Münze, sowie eine 3D-Darstellung der berechneten Topographie

Dabei wird zunächst der Messpunkt mit dem höchsten Amplitudenwert als Startpunkt gewählt und anschließend überprüft welcher der in den vier Raumrichtungen, benachbarten Punkte unter Berücksichtigung der Modulo Arithmetik und der zuvor definierten Signalausgangsgrenze die geringste Phasendifferenz aufweist. Unter Einbezug von diesem Punkt wird diese Überprüfung fortgesetzt, so dass alle zu berücksichtigenden Messpunkte flächig abgearbeitet werden, wobei im Falle eines Phasensprungs eine halbe Wellenlänge auf den betreffenden Messwert hinzu addiert wird. Die korrigierten Phaseninformationen erlauben schließlich, wie in Abbildung 5 rechts zu sehen, eine digitale 3D-Rekonstruktion von Objekten.

Erweiterung des Eindeutigkeitsbereiches durch Modulation des THz-Signales

Bei dem FMCW-Verfahren definiert die Frequenzdifferenz, die benötigt wird um eine vollständige Phasenumdrehung (also eine Phasenverschiebung um 360°) des Signals zu erhalten, die zurückgelegte optische Weglänge dieses Signals und folglich die benötigte Frequenzmodulationsbandbreite.

Da für die Materialdickenmessung der optische Weglängenunterschied zur Luft aus einer vorangegangenen Referenzmessung berücksichtigt werden muss, beträgt der benötigte Frequenzhub für die eindeutige

Messung der Plattentiefe von etwa 26,7 mm, ungefähr 21,2 GHz. Die innerhalb des Projektes verwendete THz-Quelle besitzt mit 9 GHz nicht die notwendige Modulationsbandbreite, um die Eindeutigkeit direkt oberhalb einer Wellenlänge zu erweitern. Dennoch zeigt die gemessene Dicke der HDPE-Platte von 26,6 mm bei einem wahren Wert von 26,7 mm (Abbildung 6), dass die Schichtdicke in diesem Fall mittels der linearen Regression, abhängig von der Anzahl der Messpunkte, sehr gut ermittelt werden kann. Bei der üblichen Anwendung des FMCW-Verfahrens ist die Auflösung durch das Phasenrauschen der Messung definiert.

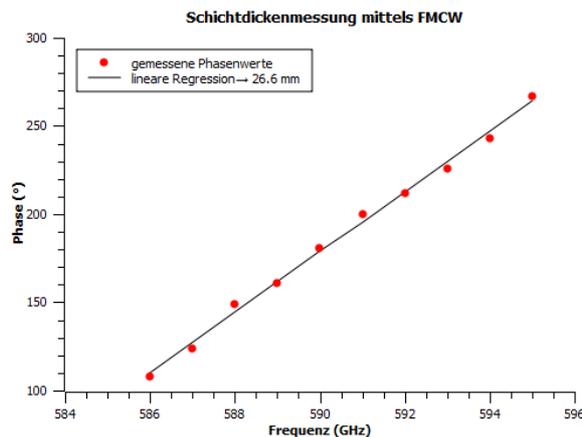


Abbildung 6: Erweiterung des Eindeutigkeitsbereiches bei Tiefenmessungen mittels THz-Strahlung

THz-Bildgebungssystem mit Abbildung in der Fourier-Ebene

Die realisierten Bildgebungssysteme wiesen bereits bei Aufnahmen mit einer realen Abbildung in der Bildebene (konventionelles Abbildungsverfahren) ein für die sinnvolle Anwendung eines Fourier basierten bildgebungsverfahrens nicht hinreichendes Kontrastverhältnis auf, weshalb eine experimentelle Realisierung dieses Konzeptes jenseits der durchgeführten Simulationen nicht erfolgte.

QCL als THz-Quelle

Die Messungen am Referenzzweig zur Phasensynchronisation von THz Beleuchtung und Abfrage konnten bisher nur mit elektronischen Quellen (W-Band-Quelle, 600 GHz Quelle, ...) durchgeführt werden. Die mit den mechanischen Vibrationen des closed-cycle basierten Kryostaten, der für den Betrieb der Quantenkaskadenlaser notwendig ist einhergehende Störung des für die Abtastung notwendigen Laserbetriebes war so groß (siehe auch Abb. 9 in Abschnitt 3.4), dass kein über längere Zeiten ausreichend stabiles Referenzsignal erzeugt werden konnte, um Bildgebung demonstrieren zu können. Diese enttäuschende Problematik kann nur behoben werden, sobald Quantenkaskadenlaser mit höherer Betriebstemperatur verfügbar werden, oder durch die Anschaffung von Hochleistungs – Verdampferkryostaten (Kühlleistung > 7W!) die keine mechanischen Vibrationen haben.

Multipixel THz-Bildgebung und THz-Mikroskop

Der in Abbildung 4 gezeigte Versuchsaufbau konnte erstmalig eine Multipixel THz Nahfelddetektion demonstrieren. Hierzu war bei vielen Aufgabenstellungen die mit der PMD Kamera zu tun haben, die unmittelbare Interaktion mit dem Projekt „MultiCam“ hilfreich. Es konnte unter Verwendung von 1mm dickem ZnTe Kristallen eine Dynamik von ca. 18dB/sqrt(Hz) bezogen auf die Integrationszeit der PMD-Kamera erreicht werden. Wird das wesentlich dünnere LiTaO3 als elektro-optischer Detektorkristall eingesetzt, verringert sich die Dynamik auf knapp 12dB/sqrt(Hz).

Um die Auflösungserhöhung zu demonstrieren zeigt das rechte Teilbild der Abbildung 7 zeigt ein THz-Bild aufgenommen mittels einer abbildenden Linse im Fernfeld. Das Auflösungslimit dieses Standard-Ansatzes liegt bei ca. 2520µm; im Bild erkennt man, dass sich der Hell-Dunkel-Gradient über mehrere PMD-Pixel erstreckt. Im linken Teilbild werden mikroskopische Nahfeldaufnahmen demonstriert mit

einem USAF Target. Die Elemente 4 und 5 der Gruppe 1 entsprechen einer Auflösung von $353.4\mu\text{m}$ bzw. $315.4\mu\text{m}$ und die Elemente 2 bis 5 der Gruppe 2 einer Auflösung von $222.8\mu\text{m}$ bis hinunter zu $157.5\mu\text{m}$. Das einzige weitere System was weltweit derzeit eine Multipixel THz Nahfeldanalytik nachgewiesen hat ist in Wang et al. dargestellt [WCH+09]. Hierbei konnte nur durch die Verwendung von Verstärkerlasern zur THz Erzeugung und Detektion (d.h. ca. 3 Größenordnungen stärkere Laserimpulse) eine parallelisierte Nahfelddetektion (Auflösung $280\mu\text{m}$) nachgewiesen werden. Das in diesem Projekt entwickelte System [SHB11] hat eine höhere Ortsauflösung und wesentlich höhere Sensitivität (ca. 3 Größenordnungen ... ein präziserer Vergleich ist leider aufgrund fehlender Spezifikationen des Verstärkerbasierten Ansatzes in [WCH+09] nicht möglich).

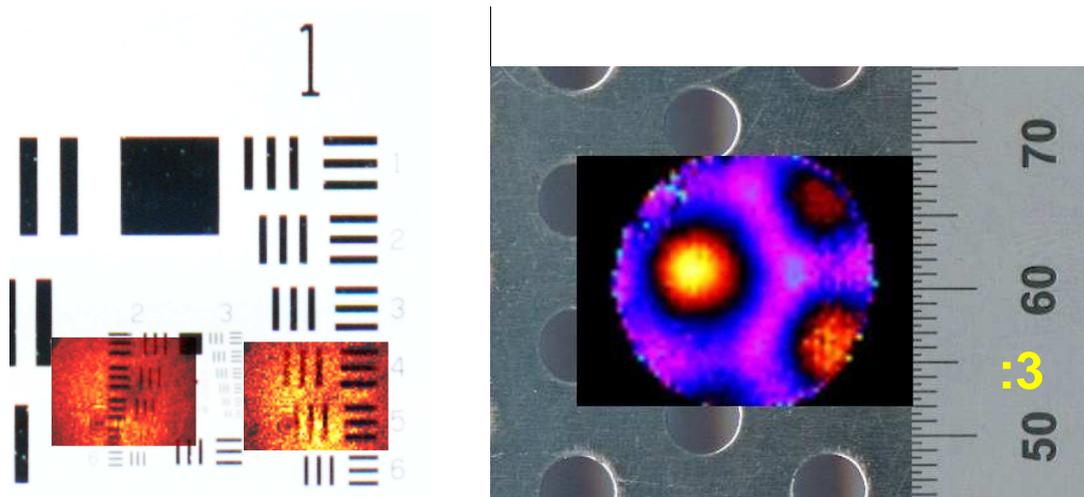


Abbildung 7: Vergleich der verschiedenen Abbildungsvarianten: THz-Nahfeldaufnahmen eines USAF-Targets wurden an zwei verschiedenen Stellen aufgenommen und auf ein optisches Bild des gleichen Targets montiert (links). Um den Faktor 3 verkleinertes (relativ zum linken Teilbild) THz-Fernfeldbild eines Lochrasters in einem Stahlblech (rechts).



Abbildung 8: Darstellung der lateralen Auflösungslimits der beiden Ansätze auf den Verwendeten USAF-Targets die hier maßstabgetreu zusammen mit einem Lineal aufeinander montiert wurden

Abbildung 8 zeigt den Vergleich der lateralen Auflösung des ursprünglich im Projekt geplanten Ansatzes mit der Abbildung durch Linsen mit dem Platzieren der Probe direkt auf dem Detektorkristall um Nahfeldeffekte ausnutzen zu können. Statt in Gruppe -2 des USAF-Targets wurde hier das Auflösungslimit erst bei vergleichbaren Elementen der Gruppe 2 erreicht, also ein Fortschritt um 4 Gruppen, entsprechend einer Verbesserung der Auflösung um den Faktor $2^4=16$.

3.4 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Untersuchung der physikalischen Limitationen des PMD-Detektionsprinzips

Die untersuchten MSM-Strukturen sind für den Einsatz als Demodulatoren in THz-Messsystemen attraktiv; insbesondere, da sie zu höher integrierbaren Detektorarrays skalierbar sind. Die gegenwärtige Detektionsgrenze ist mit einer kleinsten detektierbaren Modulationstiefe von etwa 10^{-4} aber noch nicht ausreichend. Für ihren THz Einsatz bei der Erfassung der anfallenden, äußerst geringen elektro-optischen Modulationstiefen von $10^{-4} \dots 10^{-6}$, ist nur durch: i) eine hochgradige Optimierung der Ansteuer- und Ausleseelektronik möglich, die wiederum aktive Pixel erfordern würde, die die höhere Integrationsdichte und die Attraktivität des MSM Ansatzes verringern würde, oder ii) durch signifikante Verbesserung der Fertigungstoleranzen von MSM Detektoren.

Demo Fourier-Imaging

Für die Realisierung dieses Verfahrens muss die Dynamik der THz-Bildgebungssysteme weiter gesteigert werden. Steht die benötigte Dynamik zur Verfügung, sollte dieses Bildgebungsverfahren experimentell untersucht werden, um damit das Gesichtsfeld bei THz Bildgebung im Fernfeld vergrößern zu können oder um Detaildarstellungen zu verbessern.

QCL als THz-Quelle

Quantenkaskadenlaser sind durch ihre hohe THz-Leistung attraktiv für THz-Bildgebung. Derzeit verfügbare QCLs im interessanten, niedrigen THz-Frequenzbereich benötigen allerdings Heliumkühlung, da sie nur bei ca. 10-20K ihre große Ausgangsleistung entfalten. Die Schwierigkeit besteht darin, ein Referenzsignal aus der Mischung der THz-Strahlung mit dem Abtastlaser zu erzeugen, ohne durch die Kühlung behindert zu werden. Dies kann nur durch eine verbesserte Kryostattechnik oder durch eine geringere Kühlleistungsanforderung von QCLs ermöglicht werden.

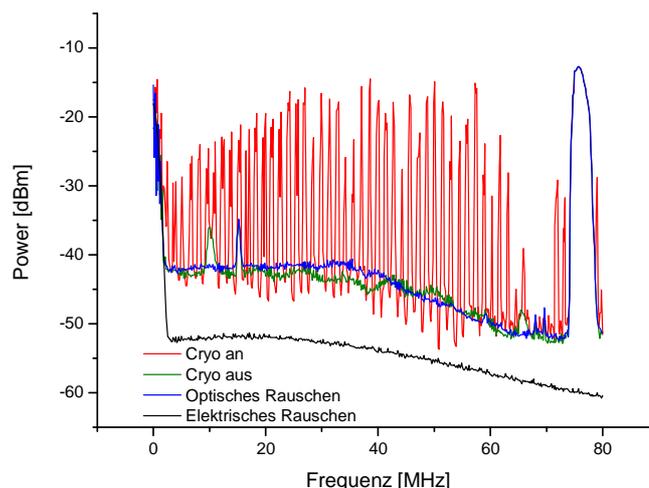


Abbildung 9: Spektren des elektrischen Signals am Differenzphotodetektor. Rot: mit eingeschaltetem Kryostaten, grün: Kryostat abgeschaltet, blau: quelle abgeschaltet, schwarz: laser geblockt

Der störende Einfluss des Kryostaten wird durch die Messdaten in Abbildung 9 deutlich. Hierbei wurde ein Synchronisationsexperiment mit einer W-Band-Quelle durchgeführt die ohne Kühlung auskommt. Der für die QCL Kühlung eingesetzte Kryostat am Messaufbau wurde eingeschaltet, um seinen Einfluss experimentell nachweisen und dokumentieren zu können. Bei geringen Frequenzen ist das intrinsische $1/f$ Laserrauschen zu beobachten bei der Grundfrequenz und bei der 76 MHz Laserrepetitionsrate (schwarze Kurve). Durch Anpassung der W-Band-Quelle wurde hier das Referenzsignal auf die erstrebten 10MHz eingestellt und in der grünen Kurve ist daher das Referenzsignal als Peak bei 10 MHz klar von dem Untergrund zu differenzieren (Messung mit abgeschaltetem Kryostaten). Die rote Kurve zeigt Peaks, die mehr als 20dB über dem Referenzsignal liegen, und aufgrund der mechanischen Beeinflussung des Lasersystems entstehen, wodurch eine stabile Synchronisation unmöglich wird. Hier besteht noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf, wie ein elektro-optisches bildgebendes Detektionsverfahren mit einem Quantenkaskadenlaser synchronisiert werden kann.

Multipixel Echtzeit-THz-Bildgebung

Die verfügbare THz-Leistung reicht für den **direkten** Einsatz kommerzieller PMD-Kameras zur elektro-optischen Echtzeit-THz-Bildgebung noch nicht aus. Die im Rahmen des Projektes durchgeführten Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass Echtzeit-THz-Bildgebung mittels angepasster Kamerasoftware in Kombination mit Referenzabgleichungen von Dunkelbild-Aufnahmen (geblockte THz-Strahlung bei konstanter optischer Beleuchtung) mittels einer triggernden mechanischen Blende realisiert werden kann. Ein hochgradig für diese Anwendung optimiertes Detektorarray mit angepasster Ansteuer- und Ausleseelektronik bietet in Kombination mit einer leistungsfähigeren THz-Quelle, dass Potential, schnellere THz-Aufnahmen mit höherer Bilddynamik zu erhalten.

THz-Mikroskop

Die im Projekt nachgewiesene Multipixel THz Mikroskopie bereitet sehr großen Raum für weitere Forschungsaktivitäten. Neben den evidenten Zielen, können auch alternative neue Ansätze verfolgt werden: Allen elektro-optischen THz-Detektoren ist gemeinsam, dass man ein sehr kleines (moduliertes) Signal von einem großen Hintergrund trennen muss. Traditionell geschieht dies mit differentiellen Photodetektoren, bei denen die einzelnen Photodioden derart verschaltet sind, dass nur der detektierte Intensitätsunterschied als Differenzstrom weiterverarbeitet wird [WuZ96, ZSVP02]. Dieser Ansatz lässt sich aber nur schwer zu großen Pixelzahlen skalieren, weshalb man bei den Kamerabasierten Ansätzen einen Großteil des Hintergrundes mit gekreuzten Polarisatoren eliminiert [CWO06, WHZ96].

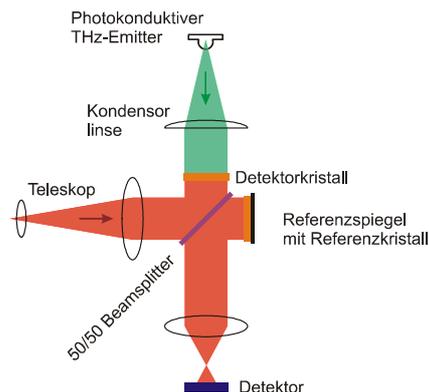


Abbildung 10: Interferometrischer THz-Detektor für die Nahfeld-Mikroskopie

Der in diesem Projekt realisierte, kreuzförmige Aufbau des Detektors (Abbildung 10, siehe auch Abbildung 4, links) erinnert an ein Interferometer. Damit ließe sich auch ein elektro-optischer THz-Detektor herstellen, ähnlich zu dem in [LKKK10] vorgestellten Aufbau für einen Single-Pixel-Fasertastkopf. Ein Interferogramm gibt eine von einem Detektor gemessene Lichtintensität über die Strecke, um die sich die Länge einer Referenzstrecke (zwischen Beamsplitter und Referenzspiegel in

Abbildung 10) gegenüber der Messstrecke (zwischen Beamsplitter und Detektorkristall) geändert hat, an. In einem elektro-optischen THz-Detektions-Interferometer könnte man die Länge der Mess- und Referenzstrecke derart anpassen, dass destruktive Interferenz vorliegt. Die nötige Längenänderung würde dann im Messpfad geschehen, da sich die optische Weglänge aufgrund der elektro-optischen Eigenschaft des Kristalls in Abhängigkeit von der (THz-)Feldstärke ändert. Folglich würde sich am Detektor gemessene Lichtintensität in Abhängigkeit von der am Detektorkristall anliegenden elektrischen (THz-)Feldstärke ändern. Die übliche Maßnahme zur Erhöhung der Sensitivität, nämlich die THz-Quelle zu modulieren, um somit Lock-In-Detektion (z.B. auch mit der PMD-Kamera) zu ermöglichen, ist weiterhin anwendbar.

3.5 Interdisziplinäre Weiterentwicklung

Es sind vielfältige Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der PMD-basierten THz Messtechnik und ihrer Anwendung möglich. Aufbauend auf einer Erhöhung der Bilddynamik bieten sich für die interdisziplinäre Nutzung in vielfältigen Forschungsfeldern neue Möglichkeiten an, z.B.:

- Die Kombination von einer vollspektroskopischen Untersuchung in jedem Pixel eines 3D Volumens bietet im Bereich der chemischen Analytik vielfältige Möglichkeiten an, um Stoffe und deren lokal induzierten Umwandlungsprozesse (Zusammensetzung, Phasenzustand, Kristallinität, ...) zu untersuchen.
- Im Bereich der medizinischen Diagnostik sind THz mikroskopische Untersuchungen interessant, um Frühdiagnostik (z.B. Hautkarzinome), Hauterkrankungen, oder die systematische Evaluation der Wirkung von Medikamenten in situ verfolgen zu können.
- Im Bereich der Materialanalytik gibt es vielfältige Möglichkeiten, um moderne Materialien berührungslos untersuchen und charakterisieren zu können.
- Die im Rahmen des Projektes entwickelte elektrooptische PMD Messtechnik kann leicht auch auf andere Spektralbereiche transferiert werden, um beispielsweise im mittleren Infrarot Bildgebung ermöglichen zu können.
- Die im Rahmen der 3D Algorithmik und Fourierbildsynthese erlangten Kenntnisse können auch auf andere moderne Bildgebungsverfahren exportiert werden, wie z.B. im Bereich der Synthetische Apertur Bildgebung, der digitalen Holographie oder der Computertomographie.

Um eine breite interdisziplinäre Nutzung der im Projekt entwickelten Ideen wurden vielfältige Präsentationen auf größeren Konferenzen getätigt, die den traditionellen Rahmen der eigenen Disziplin verlassen, beispielsweise auf den CLEO Konferenzen, wo das 5000 Personen starke Auditorium aus allen Disziplinen die optische Analyseverfahren nutzen stammt.

3.6 Verwertungspotenzial

Es besteht ein signifikantes Interesse der Hersteller von PMD-Kameras an deren Verwendung für die THz-Detektion, da sich so für die Firma ein komplett neues Marktfeld auftun könnte. Für die Anwendung für die allgemeine Fernfeldbildgebung, beispielsweise in der Sicherheitstechnik, muss jedoch dazu die Performance der PMD Ansätze im Hinblick auf Hintergrundunterdrückung noch signifikant verstärkt werden. Dazu muss dedizierte Optimierung auf der Chip-Ebene erfolgen, die sehr kostenintensiv sind. Wenn dies jedoch erfolgt und die Hintergrundunterdrückung um 2-3 Größenordnungen erhöht werden könnte, eröffnet sich ein riesiges Anwendungspotential, startend von Anwendungen in der Sicherheitstechnik (Körperscanner), über den medizinisch-diagnostischen Bereich (Krebsfrüherkennung, THz Biochips, ...), über die Qualitätskontrolle (berührungslose Materialanalytik oder Lebensmittelkontrolle), bis hin zu Anwendungen in der Umwelttechnik (Kontaminationsanalytik).

Da das Risiko und der Aufwand für eine unmittelbare Umsetzung in der THz Fernfeldanalytik groß sind, erscheint eine Weiterentwicklung im Bereich der THz Mikroskopie derzeit vernünftiger. Eine solche

Geräteentwicklung ist in Anbetracht der Hintergrundlichtunterdrückungslimitierung derzeitiger PMD Ansätze leichter technologisch realisiert werden zu können. Es wird dabei auch ein signifikanter Markt adressiert, der aber vornehmlich die Anwendung in spezialisierten Laboren ermöglicht. Beispielsweise könnten biomolekulare Chips mit solchen Ansätzen schnell ausgelesen werden, was zwar eine Anwendung in spezialisierten Laboren bedeutet, aber wegen der zunehmenden Bedeutung biomolekularer medizinischer Diagnoseverfahren ein sehr signifikanter Markt sein kann.

Die industriellen Verwertungsperspektiven werden derzeit durch eine erste Patentanmeldung geschützt. Im Rahmen von Industriekooperationen mit verschiedenen Firmen (PMDTec, Philips, Toptica, ...) werden derzeit weitere Transfermöglichkeiten und Nachfolgeprojekte eruiert.

3.7 Beteiligte Wissenschaftler

- Prof. Dr. Peter Haring Bolívar als Antragsteller und Gruppenleiter im Institut für Höchstfrequenztechnik und Quantenelektronik der Universität Siegen
- Prof. Dr. Hartmut Roskos als Gruppenleiter des Physikalischen Instituts der Universität Frankfurt
- Dipl.-Ing. Gunnar Spickermann hat sich während der gesamten Projektlaufzeit in der Gruppe von Prof. Haring Bolívar mit den gepulsten PMD basierten THz-Bildgebungssystemen sowie mit dem Synchronisieren des QCLs beschäftigt.
- Dipl.-Ing. Fabian Friederich hat sich, unterstützt von Philip Rau und Dr. Alvydas Lisauskas, in der Gruppe von Prof. Roskos mit der Optimierung der THz-Optiken und den Algorithmen zur 3D-Rekonstruktion und der Erweiterung des Eindeutigkeitsbereiches beschäftigt. Weiterhin hat er die Simulationen zur Fourier-Bildgebung und die PMD-Einzelpixeluntersuchungen durchgeführt.

4 Liste der im Teilprojekt entstandenen Publikationen

4.1 Begutachtete Publikationen

4.1.1 Wissenschaftliche Zeitschriften

- [FSM+11] Friederich F., von Spiegel W., Meng F., Boppel S., Lisauskas A., Krozer V., Löffler T., Henneberger R., Huhn A. K., Spickermann G., Haring Bolívar P., Roskos H.G.: Towards active THz-imaging systems with real-time imaging capabilities, Inaugural issue of IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, submitted ([invited paper](#)).
- [FSR+10] Friederich F., Spickermann G., Roggenbuck A., Deninger A., am Weg C., von Spiegel W., Lison F., Haring Bolívar P., Roskos H.G.: Hybrid Continuous-Wave Demodulating Multipixel Terahertz Imaging Systems, IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 58, pp. 2022-2026 (2010).
- [FSD+10] Friederich F., Schuricht G., Deninger A., Lison F., Spickermann G., Haring Bolívar P., Roskos H.G.: Phase-locking of the beat signal of two distributed-feedback diode lasers to oscillators working in the MHz to THz range., Opt. Exp., Vol. 18, pp. 8621-8629 (2010).
- [SFRB09] Spickermann G., Friederich F., Roskos. H.G., Haring Bolívar P.: High signal-to-noise-ratio electro-optical terahertz imaging system based on an optical demodulating detector array, Opt. Lett., Vol. 34, pp. 3424-3426 (2009).
- [HSLR08] Hils B., von Spiegel W., Loeffler T., Roskos H.G.: Contactless testing of the surface of materials, Tech. Mess., Vol. 75(1), pp. 45-50 (2008).

4.1.2 Begutachtete Fachkonferenzen

- [FLD+09] Friederich F., Löffler T., Deninger A., Roggenbuck A., Lison F., Henneberger R., Zimmermann R., Spickermann G., Haring Bolívar P., Roskos H.G.: Coherent terahertz imaging with synchronized distributed-feedback diode lasers, 34rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 2009 Busan, Korea (2009) invited.
- [WSH+09] am Weg C., von Spiegel W., Henneberger R., Zimmermann R., Löffler T., Roskos H.G.: Quasioptical system design, Photonics West Proceedings Vol. 7215, pp. 72150R (2009).
- [FSB+09] Friederich F., Spickermann G., Bolivar P.H., Löffler T., Roskos H.G.: Multi-pixel continuous-wave THz-imaging by electro-optic sampling using a photonic-mixer-device camera, CLEO Europe 2009, München (2009).
- [SHB09] Spickermann G., Haring Bolívar, P.: New approach for an electrooptic THz-detector array using photonic mixing device camera, CLEO/QELS 2009, Baltimore MD (2009).
- [SHB11] Spickermann G., Haring Bolívar, P.: Towards a real-time electro-optical THz microscope using a demodulating optical detector array, CLEO/QELS 2011, Baltimore MD (2011).
- [FML+08] Friederich F., Meng F., Löffler T., Dickel K.P., Spickermann G., Deninger A., Roggenbuck A., Lison F., Henneberger R., Zimmermann R., Haring Bolívar, P., Roskos H.G.: Development of a hybrid THz camera using synchronized two-color laser radiation, 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 2008 Pasadena CA, Vols. 1+2 (2008).
- [WSH+08] am Weg C., von Spiegel W., Hils B., Löffler T., Henneberger R., Zimmermann R., Roskos H.G.: Fast active THz camera with range detection by frequency modulation, 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 2008 Pasadena CA, Vols. 1+2, pp. 99-101 (2008).

4.2 Andere Veröffentlichungen

4.2.1 Weitere Fachkonferenzen

- [Ros11] Roskos H.G.: Terahertz Imaging I + II, 6th Optoelectronics and Photonics Winter School – Physics and Applications of T-Rays, Fai della Paganella, Trento, 20.-27. Febr. 2011.
- [SWF+10] von Spiegel W., am Weg C., Friederich F., Meng F., Lissauskas A., Roskos H.G.: Techniques and developments in THz standoff imaging, NATO, Sensors & Electronics Technology Panel Specialists' Meeting, Vilnius, Litaun (2010).
- [SWH+09] von Spiegel W., am Weg C., Hils B., Henneberger R., Zimmermann R., Löffler T., Roskos H.G.: Active terahertz imaging with high acquisition rates and its application for moisture sensing, DGaO-proceedings 110-b2 (2009).
- [FML+08] Friederich F., Meng F., Löffler T., Dickel K.P., Spickermann G., Deninger A., Roggenbuck A., Lison F., Henneberger R., Zimmermann R., Haring Bolívar, P., Roskos H.G.: Towards a hybrid THz camera using synchronized two-color laser radiation, EOS Annual Meeting, TOM 2, Paris (2008).

4.2.2 Anwenderzeitschrift

- [Spi10] Spickermann G.: TERAHERTZ IMAGING: Terahertz imaging uses a demodulating detector array, Onlineausgabe „Laser Focus World“, März 2010, <http://bit.ly/dnWaEY>.

4.3 Patente

Patent eingereicht am 25. Februar 2009: Gunnar Spickermann, Peter Haring Bolivar, Hartmut G. Roskos, Fabian Friederich, "Elektro-optische Kamera mit demodulierendem Detektorarray".

Veröffentlicht am 2. September 2010 unter DE102009001159 (A1), Angemeldet als internationale PCT Anmeldung.

5 Publikationen Dritter

- [Alb07] Albrecht M.: Untersuchung von Photogate-PMD-Sensoren hinsichtlich qualifizierender Charakterisierungsparameter und –methoden, Dissertation, Universität Siegen (2007)
- [PRS05] Planken P. C. M., von Rijmenam C. E. W. M, and Schouten R. N.: Opto-electronic pulsed THz systems, *Semicond. Sci. Technol*, Vol. 20, pp S121 (2005)
- [KB186] Kolner B. H. and Bloom D. M.: Electrooptic Sampling in GaAs Integrated Circuits, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol QE22, No 1, pp 79 (1986)
- [WuZ96] Wu Q., Zhang X.-C.: Ultrafast electro-optic field sensors, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, No. 12, pp 1604 (1996)
- [CWO06] Crawley D., Withington S., and Obradovic J.: Area-Scan camera for terahertz holography, *Rev. Sci. Instrum*, Vol. 77, 053106 (2006)
- [ZSV+02] Zhao G., Schouten R. N., van der Valk N., Wenkebach W. T., and Planken P. C. M.: Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 73, No. 4, pp 1715 (2002)
- [WHZ96] Wu Q., Hewitt T. D., Zhang X.-C.: Two-Dimensional electro-optic imaging of THz beams, *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 69, No. 8, pp. 1026 (1996)
- [WCH+09] Wang X., Cui Y., Hu D., Sun W., Ye J., and Zhang Y.: Terahertz quasi-near-field real-time imaging, *Opt. Comm.*, Vol. 282, pp. 4683 (2009)
- [LKKK10] Lee D.-J., Kang N.-W., Kwon J.-Y., and Kang T.-W.: Field-calibrated electro-optic probe using interferometric modulations, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 27, No. 2, pp. 318 (2010)
- [Kra07] Kraft, H.: Untersuchung und Entwicklung integrierbarer Photomischdetektor (PMD)-Konzepte, Dissertation, Universität Siegen (2007)
- [Fly96] Flynn, T.J.: Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map, *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '96*, Vol.4, pp.2057-2059, (1996)
- [Zha03] Zhang, Z.: Untersuchung und Charakterisierung von PMD (Photomischdetektor)-Strukturen und ihren Grundschaltungen, Dissertation, Universität Siegen (2003)