

## 3D Bilderfassung im Terahertzbereich basierend auf elektrooptischer Detektion (3DTHz)



Prof. Dr.-Ing  
Peter Haring Bolívar

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)  
und  
Institut für Höchstfrequenztechnik  
und Quantenelektronik

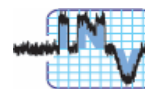
Universität Siegen  
Hölderlinstr. 3  
57068 Siegen



Prof. Dr.  
Hartmut Roskos  
Dr. Torsten Löffler

Physikalisches  
Institut

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



Prof. Dr.-Ing  
Rudolf Schwarte

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)  
und  
Institut für  
Nachrichtenverarbeitung

Universität Siegen  
Hölderlinstr. 3  
57068 Siegen

## Antragspaket *Dynamisches 3D Sehen*

Prof. Dr.-Ing.  
Andreas Kolb

Zentrum für  
Sensorsysteme  
(ZESS)

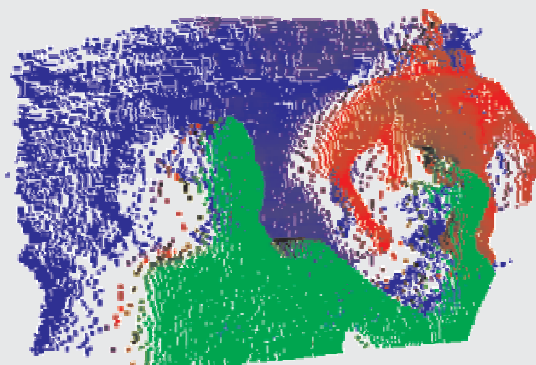
Universität Siegen  
Hölderlinstr. 3  
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing. habil.  
Otmar Loffeld

Zentrum für  
Sensorsysteme  
(ZESS)

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



## INHALTSANGABE

1	Allgemeine Angaben	1
2.	Stand der Forschung, Eigene Vorarbeiten	3
2.1	Stand der Forschung	3
2.2	Eigene Vorarbeiten	6
2.2.1	THz-Bildgebung mit Gepulsten Systemen	6
2.2.2	Bildgebung mit Dauerstrich-THz-Strahlung	7
2.2.3	Elektro-Optische Detektion von cw THz-Strahlung	8
2.2.4	Entwicklung einer 3D-Kamera	10
3.	Ziele und Arbeitsprogramm	12
3.1	Ziele	12
3.1.1	Vernetzung Im Paketantrag	13
3.2.	Arbeitsprogramm	15
3.3	Untersuchungen am Menschen	23
3.4	Tierversuche	23
3.5	Gentechnologische Experimente	23
4.	Beantragte Mittel	24
4.1	Personalkosten	24
4.2	Wissenschaftliche Geräte	25
4.3	Verbrauchsmittel	27
4.4	Reisen	27
4.5	Sonstige Kosten	28
5.	Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens	28
5.1	Zusammensetzung der Arbeitsgruppe	28
5.2.	Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern	29
5.3.	Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern	30
5.4.	Apparative Ausstattung	30
5.5	Laufende Mittel für Sachausgaben	32
5.6	Sonstige Voraussetzungen	32
6.	Erklärungen	33
7.	Unterschriften	33
8.	Verzeichnis der Anlagen	34
	Literatur	34

## 1 Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe  
Neuantrag

### 1.1 Antragsteller

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

Prof. Dr. Hartmut Roskos, Dr. Torsten Löffler,  
Kennziffer: Ro 770, 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](mailto:roskos@physik.uni-frankfurt.de)  
Privatadresse: Altkönigstraße 40, 64176 Kronberg, 06173 / 939555

Prof. Dr. R. Schwarte  
Kennziffer: Schw 630, geb. 8.1.1939  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und  
Institut für Nachrichtenverarbeitung, Universität Siegen,  
Hölderlinstr. 3, 57068 Siegen  
Tel.: (0271) 740-3330, Fax.: (0271) 740 4529  
[rudolf.schwarte@uni-siegen.de](mailto:rudolf.schwarte@uni-siegen.de)  
Privatadresse: Kreuztalerstr. 56, 57250 Netphen

### 1.2 Thema

3D Bilderfassung im Terahertzfrequenzbereich basierend auf elektrooptischer  
Detektion

### 1.3 Kennwort

3DTHz

#### 1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung

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

#### 1.5 Voraussichtliche Gesamtdauer

4 Jahre

#### 1.6 Antragszeitraum

2 Jahre

#### 1.7 Gewünschter Beginn der Förderung

schnellstmöglich

#### 1.8 Zusammenfassung

Gegenstand dieses Projektes ist die Erzeugung von statischen und bewegten Bildern mit elektromagnetischer Strahlung im Terahertz-Frequenzbereich (300GHz – 10THz). Die Forschung der letzten Jahre hat für die THz-Bildgebung ein großes Anwendungspotential nachgewiesen. Die Bildgebung leidet aber darunter, dass die Pixel eines Bildes mangels THz-Strahlleistung und mangels geeigneter Kameratechnologien sequentiell aufgezeichnet werden müssen. Eine Bildaufzeichnung ist damit zu langsam für viele praktische Zwecke. In diesem Kontext wird in diesem Projekt angestrebt das Potenzial der Realisierung:

- eines phasenempfindlichen 2-dimensionalen Detektionsarrays für freilaufende Dauerstrich-THz-Strahlungsquellen und
- einer entsprechenden Technologie für den Einsatz eines solchen Detektionsarrays zur 3D-Bilderfassung

zu untersuchen. Die Stärke des Vorschlags besteht darin, dass weitgehend auf existierende physikalische Prinzipien und Systeme zurückgegriffen wird. In diesem Projekt soll jedoch erstmalig die Kombination der photonic mixing device (PMD) Detektortechnologie mit cw elektrooptischer (EO) THz-Detektion untersucht und optimiert werden. Ein solches kombiniertes EO-PMD-Gesamtkonzept könnte dabei vielfältige neue Perspektiven zur Entwicklung eines bildgebenden Universalsystems für einen breiten Einsatz in unterschiedlichen THz-Anwendungsfeldern eröffnen. Durch die Erforschung dieses Konzepts kann die Entwicklung von real nutzbaren THz-Systemen deutlich unterstützt werden.

## 2. Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

### 2.1 Stand der Forschung

Der Terahertz-Frequenzbereich befindet sich im elektromagnetischen Spektrum zwischen Mikrowellen- und Infrarotstrahlung. Obwohl vergleichsweise schwach entwickelt, zeichnet sich ein breites Anwendungspotenzial für THz-Technologie ab. Durch intensive Forschung in den letzten Jahren konnten eine Vielzahl von Anwendungsgebieten identifiziert und technologische Möglichkeiten für breit einsetzbare THz-Systeme eröffnet werden [1]. Beispielsweise ist in der Sicherheitstechnik ein hohes Potenzial erkannt worden, welches in der bildgebenden chemischen Identifizierung von Materialien oder bei Screening-Anwendungen und Detektion von Drogen, Sprengstoffen, etc liegt. Trotz unbestreitbaren Anwendungsperspektiven findet jedoch eine reale Umsetzung von THz-Technologien bisher nur in ausgesuchten Einzelfällen statt. Als prominentes Beispiel ist hier die NASA zu nennen, die inzwischen Femtosekundenlaser basierte THz-Systeme für Qualitätskontrollen der Verklebung der thermischen Isolierung von Booster-Raketen bei Space Shuttles einsetzt, um die Risiken weiterer Katastrophen zu minimieren.

Während auf der Seite der THz-Quellenentwicklung deutliche Fortschritte gemacht wurden (Quantenkaskadenlaser  $> 1 \text{ mW @ } 2,3 \text{ THz}$  und elektronische Vervielfacher  $> 10 \text{ mW @ } 0,65 \text{ THz}$ ), ist das Haupthindernis für eine breite Umsetzung nach wie vor die relative Unausgereiftheit der Detektortechnologie, insbesondere im Hinblick auf in der Pixelzahl skalierbare Arrays (Kameras). Zwar wurden grundsätzlich einige Konzepte vorgeschlagen, welche das Potenzial für Detektorarrays haben. Allerdings weisen diese Ansätze jeweils konzeptionelle Nachteile auf, welche die Realisierung von großen Pixelarrays auf lange Zeit hin unwahrscheinlich machen. Im Einzelnen sind zu nennen:

#### a) Mikrobolometerarrays

Mit Mikrobolometerarrays sollten sich zwar im Prinzip genügend hohe Empfindlichkeiten im Bereich von  $\text{sub-nW}/\sqrt{\text{Hz}}$  erzielen lassen. Allerdings messen Bolometer prinzipbedingt immer die thermische Hintergrundstrahlung mit. Wegen der damit verbundenen Rauschbelastung ist diese Technologie für aktive Systeme nicht sinnvoll.

#### b) Heterodyndetektoren mit Schottkydioden, hot electron (HEB) oder superconductor insulator superconductor (SIS) Bolometer

Heterodyndetektoren erreichen grundsätzlich enorme Empfindlichkeiten und messen wegen ihrer Schmalbandigkeit im Wesentlichen hintergrundfrei. Allerdings sind zum Betrieb der Detektoren hohe THz-Signalleistungen (ca.  $10 \mu\text{W}$ ) vom Lokaloszillator nötig. Dieses ist bei der Realisierung von Arrays sehr problematisch, da hier die notwendige Lokaloszillatorleistung mit der Pixelzahl skaliert. Im Rahmen eines ESA-Projektes wird zurzeit versucht eine Heterodynkamera mit 16 Pixeln zu realisieren. Ob die Technologie aber in der Pixelzahl frei skalierbar ist, ist fraglich. Hinzu kommt,

dass nur Systeme mit Schottkydioden raumtemperaturtauglich sind, die dann dafür eine signifikant höhere Rauschtemperatur aufweisen.

#### c) Opto-elektronische Systeme

Opto-elektronische Systeme mit elektro-optischer Multi-Pixel-Detektion sind zunächst für Puls-Betrieb [2] und dann im Dauerstrich-Betrieb [3] demonstriert worden. Bemerkenswerterweise wurde in der Dauerstrich-Arbeit zur Detektion der optischen Strahlung hinter dem ZnTe-Mischerkristall eine einfache CCD-Kamera verwendet, weshalb Rauschunterdrückung durch Lock-In-Technik unmöglich ist. Es musste lange (~40 min) integriert werden, um eine ausreichende Rauschunterdrückung im Gesamtbild zu erzielen. An der grundsätzlichen Tauglichkeit der elektro-optischen Detektion kann daher kein Zweifel bestehen. Es geht nun darum, die Elektro-optik hinsichtlich Sensitivität und Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu optimieren. Das Dauerstrichsystem hat dabei eine Empfindlichkeit im Bereich von 30 mV/cm für die THz-Feldamplitude gezeigt. Geht man sinnvollerweise von einer Pixelgröße im Bereich der THz-Wellenlänge (300  $\mu\text{m}$  @ 1THz) aus, so entspricht dies einer Empfindlichkeit im 1-nW-Bereich. Die Autoren verwendeten als THz-Strahlungsquellen Photomischer, die direkt durch die Femtosekunden- bzw. Dauerstrich-Laser zur THz-Emission gebracht wurden. Leider erreichen diese opto-elektronischen Quellen aber nur Leistungen im Bereich von 40  $\mu\text{W}$  (gepulst) [4] und 2  $\mu\text{W}$  (cw bei 1 THz) [5], so dass der dynamische Bereich der opto-elektronischen Systeme voraussichtlich immer sehr eingeschränkt bleiben wird.

### Forschungsbedarf

An diesem Punkt setzt der Lösungsgedanke des vorgeschlagen Projektes an. Quelle und Detektion soll aus zwei separaten, miteinander synchronisierten Modulen bestehen. Es sollen so die Vorteile der opto-elektronischen Detektion (hohe Empfindlichkeit, Skalierbarkeit in der Pixelzahl) mit den Vorteilen der freilaufenden Dauerstrichquellen (hohe Ausgangsleistung) kombiniert werden. Diese freilaufenden Quellen wie z.B. THz-Quantenkaskadenlaser oder elektronische Vervielfacherketten erreichen Ausgangsleistungen weit im mW Bereich. Die elektro-optische Detektion erlaubt andererseits Empfindlichkeiten im Bereich von 30 mV/cm je Pixel (was 1 nW bei 1 THz und beugungsbegrenzter Fokussierung entspricht) [6, und Eigene Vorarbeiten]. Bei Kombination mit einer Quelle mit 10 mW Leistung wäre also ein System mit 1000 Pixeln und einem dynamischen Intensitätsbereich von 1:10.000 (= 40 db bzw. 13-bit Auflösung) je Pixel denkbar.

Wesentliche wissenschaftliche und technische Herausforderungen bei der Realisierung eines solchen Systems stellen

- a) die Synchronisierung des für die opto-elektronische Detektion benötigten Zwei-Farben-Diodenlasersystems mit der frei laufenden Quelle, und

b) die Optimierung der anstelle der konventionellen CCD- bzw. CMOS-Kameras einzusetzenden 3D-PMD-Kameras für die Detektion kleinster Intensitätsmodulationen

dar. Diese Herausforderungen sind jedoch im Rahmen eines 4-jährigen koordinierten Projektes zu meistern. Insbesondere stellt die Bereitstellung einer Zweifarbenquelle selbst wegen der vergleichsweise geringen Ausgangsleistungen, die man zum Mischen benötigt, kein Problem dar.

## 2.2 Eigene Vorarbeiten

Für beide Aufgabenstellungen bringt das Konsortium besondere Kompetenzen ein:

Die Antragsteller Prof. Hartmut G. Roskos, Prof. Peter Haring Bolívar und Dr. Torsten Löffler haben eine breite Erfahrung im Bereich THz-Technologie aufzuweisen [E1-E4]. Dabei wurden bereits intensiv Systeme zur THz-Bildgebung erforscht [E5-E9]. Darüber hinaus haben beide Arbeitsgruppen bereits an der Synchronisierung von fs-Lasersystemen mit freilaufenden Hochfrequenzquellen gearbeitet [E10-E12].

Im Einzelnen ist zu erwähnen:

### 2.2.1 THz-Bildgebung mit gepulsten Systemen

Implementierung und Erprobung eines THz-bildgebenden Systems (DFG Projekt Ku 340/37-1 bis -3, START Initiative des Universitätsklinikums Aachen) [AG Haring]

- Rasterndes zeitaufgelöstes THz-Komplettsystem (gepulst) für Durchleuchtung und Tomographie [E3].
- Kontrastverstärkung tomographischer Analytik mittels Einstrahlwinkelvariation und Demonstration der Technik zur Analyse von keramischen Multischichten für Festkörperbrennstoffzellen [E5].
- Tieftemperatur (10K) THz-Bildgebung zur Analyse supraleitenden Schichtsysteme [E6].
- Analysen an menschlicher Schleimhaut (Ösophagus, Oro-/Hypoharynx, Larynx). Nachweis der Differenzierbarkeit von Tumoren auch bei internem Gewebe. Bisherige Untersuchungen waren nur auf Hautpräparate beschränkt (z.B. Basalkarzinom), die eine fundamental andere Struktur als interne Gewebearten haben (z.B. hat die Haut klar differenzierbare Schichten von lebenden und toten Zellen, Schleimhaut ist deutlich unstrukturierter und besitzt keine Schicht toter Zellen). Ex-vivo Analysen von Frischpräparaten innerhalb von 4h nach der Exzision, direkt vor der histopathologischen Fixierung, wiesen einen deutlichen Kontrast zwischen gesundem und Tumorgewebe auf, wobei interessanterweise eine Kontrastumkehr im Vergleich zu Hautpräparaten zu beobachten ist (siehe Fig. 2.2.1.1): Während bei Haut Tumore eine erhöhte THz-Absorption aufweisen, haben Schleimhauttumore eine geringere Absorption [E13].

Entwicklung eines gepulsten THz Bildgebungssystems mit verstärkten Laserpulsquellen [Roskos/Löffler]:

- Terahertz-Dunkelfeld-Bildgebung zur Analyse von Protuberanzen auf planaren Flächen, wie z.B. bei der Charakterisierung von Stahlblech [E14].



- Anwendungsanalyse und Datenverarbeitungsanalyse im Bereich biomedizinischer Bildgebung [E15].

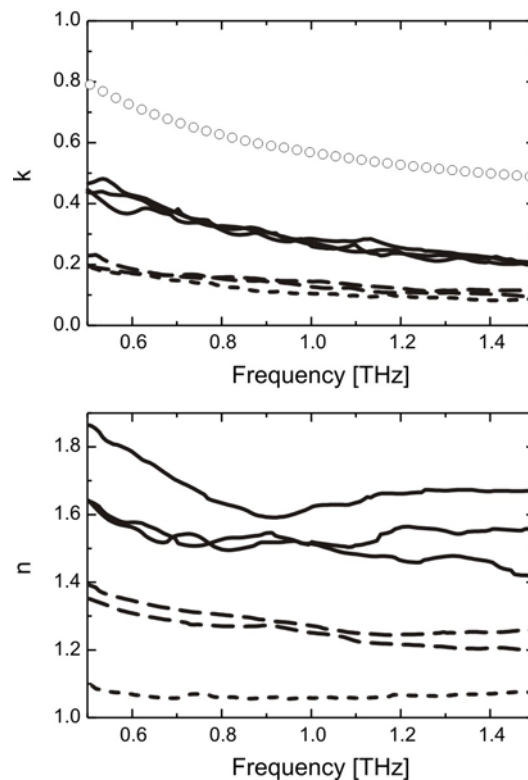


Abb. 2.2.1.1 Ortsgemittelte Absorption ( $k$ ) und Brechungsindex ( $n$ ) als Funktion der Frequenz. Durchgezogene Linien stellen gesunde Schleimhautproben dar; gestrichelte Tumorgewebe. Im oberen Diagramm illustrieren offene Kreise die Wasserabsorption.

## 2.2.2 Bildgebung mit Dauerstrich-THz-Strahlung

Implementierung und Erprobung eines Bildgebungs- und Spektroskopiesystems (gemeinsam mit EU-TERAVISION-Projekt) [AG Roskos/Löffler]

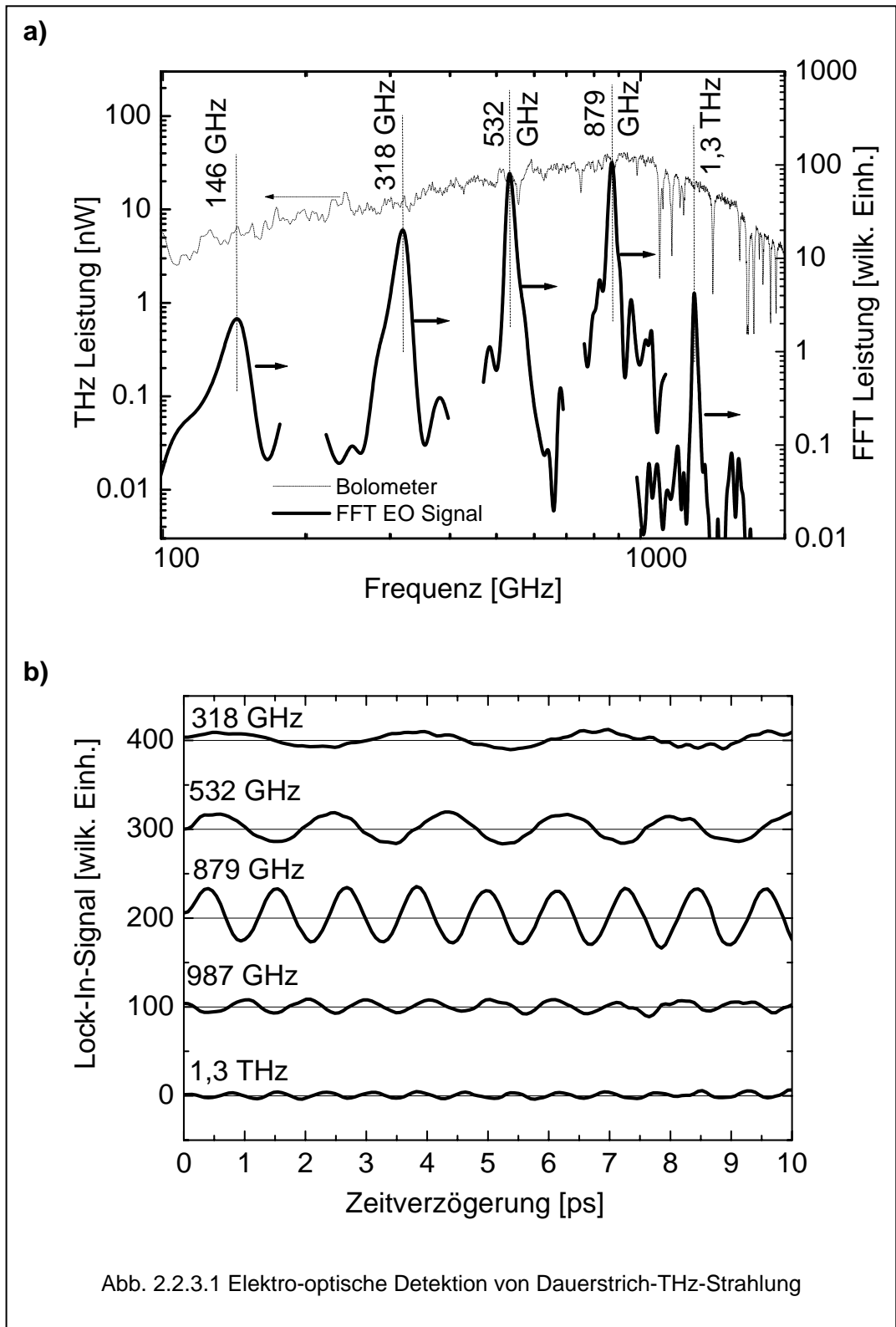
- Komplettsystem mit photoleitender Emitter- und Detektorantenne implementiert und für die THz-Bildgebung v.a. hinsichtlich schneller Datenaufnahme optimiert. Die mit 0.2 s pro Pixel erreichte Datenerfassungszeit ist nur um eine Größenordnung langsamer als bei den besten Femtosekundensystemen, die einen erheblichen Entwicklungsvorsprung haben. Allerdings wurden diese Leistungsdaten nur bei einigen THz-Frequenzen erzielt, wo der Laserbetrieb besonders stabil war [E8, E9].
- Erster Vergleich zwischen unserem Dauerstrich-THz-Mess-System und dem kommerziell angebotenen Pulssystem der Firma TERAVIEW. Unser System – vor der Modifikation des Zweifarben-Lasers – war außer bei bestimmten THz-Frequenzen hinsichtlich der Rauscheigenschaften unterlegen, was die oben angesprochene Notwendigkeit zur Verbesserung der Wellenlängenabstimmbarkeit und Modenstabilität aufzeigte.
- CW-THz-Bildgebung an Beispielen von archivierten biomedizinischen Proben demonstriert [E8, E9].

### 2.2.3 Elektro-optische Detektion von Dauerstrich THz-Strahlung

Im Rahmen des DFG-Projekts RO770/17-3, „Verfahren der Erzeugung und Detektion von Dauerstrich THz-Strahlung“ wurde in der AG Roskos die kohärente Detektion von Dauerstrich-THz-Strahlung demonstriert. Wir zeigen in Abb. 2.2.3.1 experimentelle Daten, die bestätigen, dass Dauerstrich-Strahlung im THz-Bereich elektro-optisch detektiert werden kann und dass hierbei selbst bei kurzer Integrationszeit bei der Lock-In-Verstärkung Empfindlichkeiten im sub-100 pW Bereich erzielt werden.

Der Versuchsaufbau war dabei ähnlich wie in [6]. Allerdings wurde ein Zwei-Farben-Diodenlasersystem mit Nachverstärker der Firma Sacher verwendet. Als THz-Quelle wurde ein Photomischer auf Basis von LT-GaAs (gewachsen an der Uni Wien, AG Prof. Unterrainer und prozessiert an der TU-Darmstadt, AG Pavlidis) eingesetzt. Der Photomischer wurde mit ca. 75 mW Laserleistung beleuchtet. Die THz-Strahlung wurde mittels einer hyperhemisphärischen Linse ausgekoppelt. Die Ausgangsleistung des Emitters wurde mit einem Komposit-Silizium-Bolometer in Abhängigkeit der Differenzfrequenz der zwei Laserlinien vermessen (gestrichelte Linie in Abb. 2.2.3.1a)). Der Emitter erreicht seine maximale Ausgangsleistung von etwa 25 nW bei etwa 900 GHz. Alternativ wurde zur Detektion ein 1 mm dicker ZnTe-Kristall mit Polarisationsoptik und Differenzdetektor verwendet. Die Laserleistung des Zwei-Farben Lasersystems wurde mittels eines 50/50 Faserkopplers in einen Pump-Strahl für den Photomischer und einen Probe-Strahl für den Detektor aufgeteilt. Die Zeitverzögerung zwischen Pump- und Probe-Strahl wurde mittels einer mechanischen Verschiebestrecke variiert.

Das mit einem Lock-In-Verstärker mit einer Zeitkonstante von 100 ms gemessene Signal ist in Abb. 2.2.3.1b) für verschiedenen Laser-Differenzfrequenzen dargestellt. Fourier-Transformierte der jeweiligen Signale sind in Abb. 2.2.3.1a) abgebildet. Man erkennt in beiden Darstellungen ein maximales Signal für die Messung bei 879 GHz. Die durch Fourier-Transformation aus den elektrooptischen Daten gewonnenen Leistungen fallen zu niedrigeren Leistungen hin deutlich stärker ab, als durch die Leistungsabnahme des Emitters zu erklären ist. Dieses liegt daran, dass bei der elektro-optischen Messung die Feldstärke im Zentrum des Emitters gemessen wird. Da die THz-Strahlung aber bei niedrigeren Frequenzen schlechter fokussiert wird, nimmt die Leistungsdichte dort ab. Das elektro-optische Signal bei 1,3 THz ist vergleichsweise zu klein. Dieses liegt vermutlich an einer nicht völlig perfekten Justage des Aufbaus, so dass durch Abbildungsfehler bei dieser hohen Frequenz ein zu großer Fokus und damit eine zu kleine Leistungsdichte im Zentrum des Emitters auftritt.



## 2.2.4 Entwicklung einer 3D-Kamera

Der Antragsteller Prof. R. Schwarte hat ein neuartiges Messverfahren zur 3D-Erfassung über parallele Echolaufzeit, mithin eine 3D-Videokamera, für den sichtbaren und Nahinfrarotbereich entwickelt [E11]. Diese PMD-Kameras basieren auf einer 2D-Matrix von phasensensitiven differentiellen optischen Detektoren die auf Grund ihrer Funktionsweise auf die Detektion kleinster Intensitätsmodulationen optimiert sind, mit zugleich hoher Hintergrundlicht-Unterdrückung von ca. 1:1000. Diese PMD-Kameras, die im Rahmen weiterer Teilprojekte im Paketantrag weiterentwickelt werden sollen, können daher nach einer entsprechenden Anpassung und Modifizierung ideal für das hier vorgeschlagene elektro-optische Detektionssystem eingesetzt werden. Zusätzlich ist jedoch die direkte Teilnahme von Prof. R. Schwarte in diesem Projekt notwendig, um die Anpassung von PMD-Systemen an die Erfordernisse einer synchronisierten elektro-optischen Abfrage von THz-Signalen anzupassen.

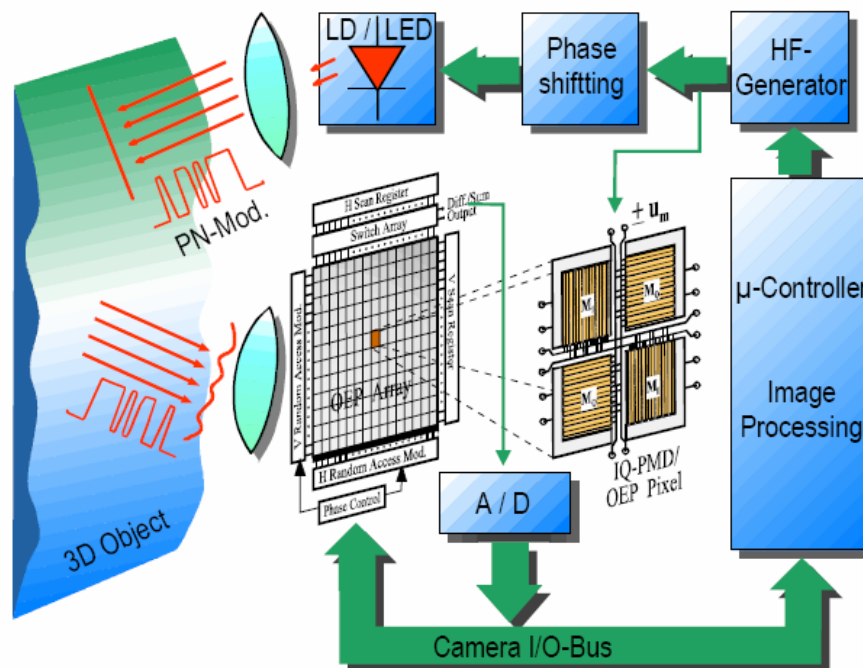


Abb. 2.2.4.1 Prinzipskizze einer optischen 3D-PMD-Kamera

Eigene Veröffentlichungen:

- [E1] T. Löffler, K. J. Siebert, H. Quast, N. Hasegawa, G. Loata, R. Wipf, T. Hahn, M. Thomson, R. Leonhardt, and H. G. Roskos, *All-optoelectronic continuous-wave terahertz systems*, The Royal Society: Philosophical Transactions **362**, 263 (2004).

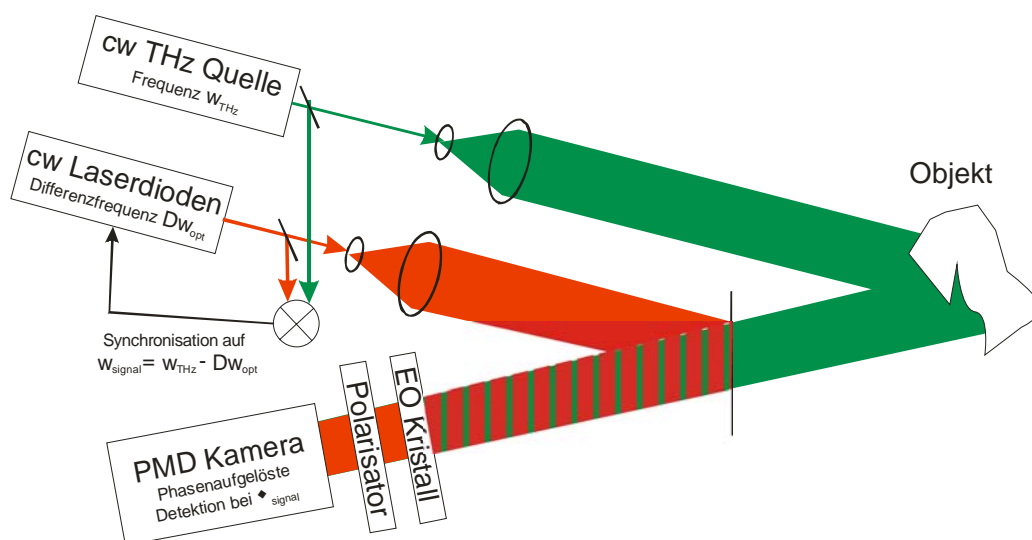
- [E2] C. Waschke, H. G. Roskos, R. Schwedler, K. Leo, H. Kurz, and K. Köhler, Coherent submillimeter-wave emission from Bloch oscillations in a semiconductor superlattice, *Phys. Rev. Letters* **70**, 3319 (1993).
- [E3] P. Haring Bolívar, *Coherent THz spectroscopy*, Semiconductor Quantum Optoelectronics: From Quantum Physics to Smart Devices, ed. A. Miller, et al. (IOP, 1999), pp. 151-192.
- [E4] P. Haring Bolívar, M. Nagel, F. Richter, M. Brucherseifer, H. Kurz, A. Bosserhoff, and R. Büttner, *Label-free THz sensing of genetic sequences: towards 'THz biochips'*, *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **362**, 323 - 335 (2004).
- [E5] M. Brucherseifer, P. Haring Bolívar, H. Klingenberg, und H. Kurz, *Angle dependent THz tomography - Characterization of thin ceramic oxide films for fuel cell applications*, *Appl. Phys. B* **72**, 361 (2001).
- [E6] M. Brucherseifer, A. Meltzow-Altmeier, P. Haring Bolívar, H. Kurz, and P. Seidel, *Low-temperature THz imaging of thin high-temperature superconductor films*, eingereicht bei *Physica C: Superconductivity* **399 (1-2)**, 53-60 (2003).
- [E7] T. Löffler, T. Bauer, K. Siebert, H. Roskos, A. Fitzgerald, and S. Czasch, *Terahertz dark-field imaging of biomedical tissue*, *Optics Express* **9**, 616 (2001).
- [E8] K. J. Siebert, H. Quast, R. Leonhardt, T. Löffler, M. Thomson, T. Bauer, H. G. Roskos, and S. Czasch, *Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging*, *Appl. Phys. Lett.* **80**, 3003 (2002).
- [E9] K. Siebert, T. Löffler, H. Quast, M. Thomson, T. Bauer, R. Leonhardt, S. Czasch, H. G. Roskos, *All-optoelectronic CW THz imaging for biomedical applications*, *Phys. Med. Bio.* **47**, 3743 (2002).
- [E10] T. Löffler, T. Pfeifer, H.G. Roskos, and H. Kurz, *Detection of free-running electric signals up to 75 GHz using a femtosecond-pulse laser*, *IEEE Phot. Techn. Lett.* **7**, 1189 (1995).
- [E11] T. Löffler, T. Pfeifer, H.G. Roskos, H. Kurz, and D.W. van der Weide, *Stable Optoelectronic Detection of Free-Running Microwave Signals of up to 150 GHz*, *Microelectronic Engineering*, **31**, 397 (1999).
- [E12] P. Haring Bolívar, M. Brucherseifer, H.P.M. Pellemans, and H. Kurz, *Time domain THz spectroscopy and sensing*, in *THz Sources and Systems*, ed. by R.E. Miles et al. (Kluwer, 2001), pp. 315-328
- [E12] R. Schwarte, Z. Zhang, and B. Buxbaum, *Neue 3D-Bildsensoren für das Technische 3D-Sehen*, VDE Kongr. „Ambient Intelligence“, Berlin 2004.
- [E13] K. Schramm, C. Janke, D. Surawicz, H. Griefingholt, H. Kurz, M. Westhofen, P. Haring Bolívar, *Terahertz spectroscopy in otorhinolaryngology: investigation of native mucosa tissue samples*, (subm. 2005).
- [E14] N. Hasegawa, T. Löffler, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Remote Identification of protrusions and dents on surfaces by THz reflectometry with spatial beam filtering and out-of-focus detection*, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3996 (2003).
- [E15] T. Löffler, K. Siebert, S. Czasch, T. Bauer, H. G. Roskos, *Visualization and classification in biomedical terahertz pulsed imaging*, *Phys. Med. Bio.* **47**, 3847 (2002).

### 3. Ziele und Arbeitsprogramm

#### 3.1 Ziele

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines PMD basierten dreidimensional bildgebenden Messsystems im THz-Frequenzbereich. Wie in Abb. 3.1.1 dargestellt, basiert das zu untersuchende 3D-Bildgebungskonzept im THz-Frequenzbereich auf der Nutzung von PMD-Technologie zur phasenaufgelösten Detektion des optischen Signals eines Zweifarbenlasers. Durch elektro-optische Detektion wird dabei ein mittels einer freilaufenden, aber mit dem Zweifarbenlaser phasengekoppelten THz-Strahlungsquelle generiertes THz-Abbild phasentreu in ein optisches Modulationssignal umgewandelt. Das elektro-optische Abtastsignal muss dabei als kleine Modulation auf einem unmodulierten optischen Hintergrund detektiert werden.

Im anvisierten Konzept soll die Realisierung eines PMD basierten elektro-optischen bildgebenden Systems untersucht werden, welches Bildgebung mit cw THz-Strahlungsquellen erstmals praktikabel machen soll. Hierbei ist die exzellente Hintergrundunterdrückung der PMD-Technologie ausschlaggebend. Darüber hinaus kann die phasenaufgelöste PMD-Detektion direkt in eine Tiefenauflösung des THz-Signals zur 3D-Bildgebung übertragen werden. Im hier dargestellten Projekt soll ein System mit einer Auflösung von 64x32 Pixel anvisiert werden und bei zwei THz Frequenzen betrieben werden: Bei 600GHz, wo elektronische THz Quellen verfügbar sind, und bei etwa 2,5 THz wo Quanten-Kaskaden-Laser zur Verfügung stehen.



**Abb. 3.1.1:** Schema des geplanten 3D-THz-Bildgebungskonzeptes mit freilaufender THz-Quelle, EO-Detektion und PMD-Detektorarray. Mittels eines EO-Kristalls wird dabei ein THz-Abbild phasentreu in ein optisches Signal umgewandelt. Dieses phasenkodierte optische Signal kann dann bei geeigneter Synchronisation mit einer PMD-Kamera detektiert werden und 3D-THz-Bildgebung ermöglichen.

### 3.1.1 Vernetzung im Paketantrag

Im Kontext des Paketantrages ist die Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten wie folgt geplant. Eine schematische Übersicht ist in Abb 3.1.2 dargestellt:

Diese Aktivität beruht auf die Entwicklung von PMD Kameras mit verbesserten Eigenschaften, wie diese im Paketantrag innerhalb des Teilprojektes *Multi-Cam 2D/3D Multisensorentwicklung* (Loffeld, Roth, Schwarte) realisiert werden sollen. Dabei interessiert in diesem Kontext insbesondere eine verbesserte Hintergrundunterdrückung und eine hohe Signalauflösung, um kleine Modulationen auflösen zu können. Besonders profitieren kann dieses Projekt von der Anpassung der internen PMD Kameraparameter (Integrationszeiten, Modulationsfrequenzen, ... ), um ein optimiertes Signal-zu-Rauschverhältnis bei bildgebenden THz-Analysen zu ermöglichen.

Eine Datenaufbereitung, -filterung, und kalibrierte 3D Ortung ist bisher in kaum einem bildgebenden THz-System implementiert worden. Einzige bisherige Ausnahmen sind Arbeiten am Rensselaer Polytechnic Institute in Troy, USA, wo computertomographische Verfahren und digitale Holographie-Konzepte in der THz-Bildgebung untersucht wurden [7, 8]. Der derzeitige Stand der THz-Bilddatenverarbeitung ist extrem rudimentär. Eine intensive Zusammenarbeit mit den Projekten *PMDSim 2D/3D-Sensorsimulation* (Loffeld) und *2D3DProc 2D/3D Datenverarbeitung und -fusion* (Kolb, Loffeld) ist geplant. Hierdurch soll eine deutliche Verbesserung der Datenqualität und Reduktion der notwendigen Integrationszeiten erreicht werden. Darüber hinaus kann damit eine Kalibrierung und Ortung implementiert werden.

Im Hinblick auf eine 3D-Datenerfassung soll insbesondere der Übergang zur Bildgebung mit synthetischer Apertur untersucht werden. Die Grundidee dieser Methode ist, anstatt eines realen Bildes in der Detektorebene eine Detektion in der Fourierebene der Abbildungsoptik zu realisieren. Dieses kann im einfachsten Fall auch durch einen völligen Verzicht auf eine Abbildungsoptik realisiert werden. Mittels geeigneter Algorithmen, die im Wesentlichen auf einer zwei-dimensionalen inversen Fouriertransformation aufbauen, kann dann auf das reale Bild zurückgerechnet werden. Dieses Vorgehen wurde in Ref. [9] für THz-Strahlung untersucht. Mit weitergehenden Algorithmen, wie sie z.B. in der Radar-Technologie verwendet werden, sollte auch eine dreidimensionale Bildrekonstruktion möglich sein. In der letzten Phase dieses Projektes (an dem 3. Jahr) ist daher eine intensive Interaktion mit dem Teilprojekt *2D3DProc 2D/3D Datenverarbeitung und -fusion* (Kolb, Loffeld) geplant.

Ab dem 3. Projektjahr soll die entwickelte THz-Kamera an ausgesuchten Demonstrationsobjekten vorgeführt und getestet werden. In diesem Kontext ist eine enge Anknüpfung an die anderen Teilprojekte geplant. Die THz-Kamera soll daher in die im Paketantrag geplanten Anwendungsfelder Automatisie-





### 3.2. Arbeitsprogramm

Das im Folgenden beschriebene Arbeitsprogramm soll in Frankfurt von einem Doktoranden (Fachrichtung Physik oder Elektrotechnik), der über das Projekt bezahlt wird, unter Leitung von Herrn Dr. Löffler (Bezahlung durch Landesmittel) durchgeführt werden. In Siegen sollen die Arbeiten ebenfalls von einem Doktoranden (Fachrichtung Elektrotechnik oder Physik), der über das Projekt bezahlt wird, unter Leitung von Prof. Peter Haring Bolívar durchgeführt werden. Zusätzlich werden in Siegen die notwendigen Anpassungsarbeiten an der PMD-Kamera innerhalb der Arbeitsgruppe Schwarte durchgeführt. Hierzu ist im Rahmen dieses Projekts nur eine studentische Hilfskraft vorgesehen, da der Aufwand klein sein wird und weitere Personalkosten über den Teilantrag *MultiCam* abgedeckt sind.

Die einzelnen Teilschritte des geplanten Arbeitsprogramms sind in Abb. 3.3.1. tabellarisch nach Arbeitsgruppen und Projektlaufzeit dargestellt. Auf den nächsten Seiten werden die einzelnen Teilschritte näher beschrieben.

Um ein optimiertes Gesamtsystem zu entwickeln, beinhaltet das Arbeitsprogramm im Wesentlichen den konsekutiven Aufbau der folgenden drei verschiedenen Systemausbaustufen:

1. Ein initiales System, basierend auf einem fs-Pulslaser zur Erzeugung von THz-Pulsen und zur Optimierung der multipixel-elektrooptischen Detektion unter Verwendung von PMD-Technologie (H1-H4, AG Haring).
2. Ein System, basierend auf einer Dauerstrich-THz-Quelle und einem synchronisierten fs-Pulslaser zur multipixel-elektrooptischen Detektion zur Untersuchung von Synchronisationskonzepten (H5, H6 AG Haring).
3. Ein Gesamt-Dauerstrichsystem basierend auf einer Dauerstrich-THz-Quelle und einem synchronisierten Zwei-Farben-Diodenlasersystem zur multipixel-elektrooptischen Detektion (R1-R5 AG Roskos/Löffler).

Die Grundidee bei diesem Vorgehen ist, möglichst alle für das Zielsystem (s. 3. o.) wichtigen Schlüsselkomponenten weitgehend parallel zu entwickeln und die Arbeit sinnvoll auf die Arbeitsgruppen Haring und Roskos/Löffler zu verteilen. Dieses betrifft im Wesentlichen:

a) Die Entwicklung des multi-pixel elektrooptischen Sensors der zunächst auf Basis der etablierten opto-elektronischen Pulstechnik mit fs-Lasern in der AG Haring entwickelt werden soll

und

b) die Entwicklung des elektro-optischen Referenzdetektors und des Synchronisationskonzeptes für Dauerstrichquelle und Zweifarben-Diodenlaser.

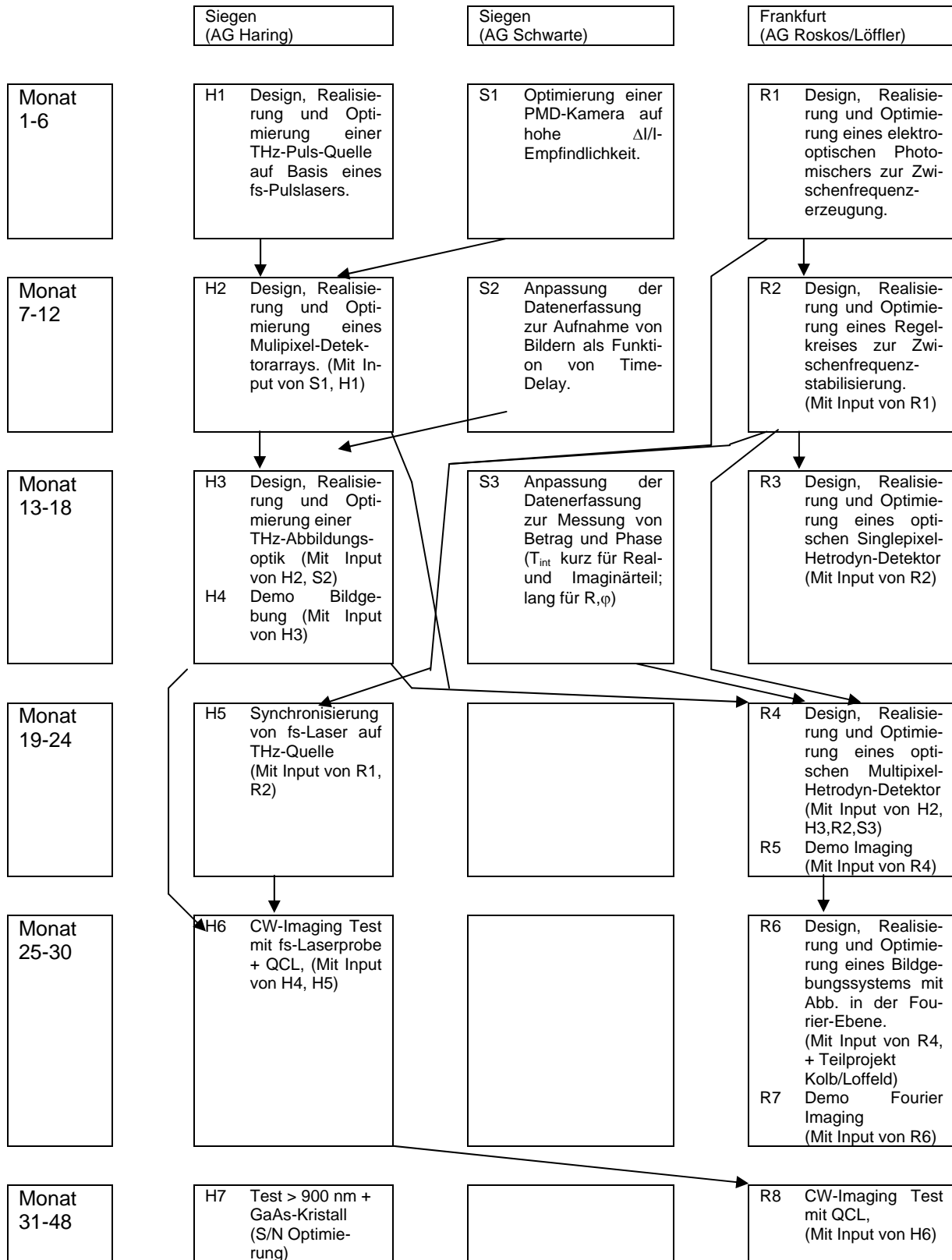


Abb. 3.3.1.: Tabellarische Darstellung des Arbeitsprogramms

### Teilschritt H1

#### Design, Realisierung und Optimierung einer THz-Pulse Quelle auf Basis eines fs-Pulslasers.

Zur Entwicklung des Multi-Pixel-Detektors und zum Test mittels eines fs-Pulslasersystems wird eine möglichst leistungsstarke THz-Pulsquelle benötigt. Daher soll in diesem Teilschritt die von P. Planken [4] entwickelte Emittertechnologie reproduziert und ggf. weiter optimiert werden. Diese Emittertechnologie basiert auf der Verwendung von hochohmigem GaAs und einem vergleichsweise großen Elektrodenabstand von einigen 100  $\mu\text{m}$ . Für diesen Emitter wurde eine mittlere Ausgangsleistungen von 40  $\mu\text{W}$  bei Vorspannungen von 800 V demonstriert. Dieses entspricht einer Pulsspitzenleistung für den THz-Puls von ca. 400 mW.

### Teilschritt H2

#### Design, Realisierung und Optimierung eines elektrooptischen Multipixel-Detektorarrays. (Mit Input von S1, H1)

Als Detektor soll ein großflächiger elektro-optischer Kristall zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren mit nachgeschalteter PMD-Kamera verwendet werden. Um eine bestmögliche Empfindlichkeit zu erreichen, muss die elektro-optische Detektionsanordnung möglichst optimal auf die Kamera abgestimmt werden. Hierzu muss die Auslöschung durch die gekreuzten Polarisatoren, die effektive Größe der Pixel auf dem elektro-optischen Kristall und die Ausleuchtung der 64x32 Pixel auf der PMD-Kamera optimiert werden. Zur Optimierung der Auslöschung ist der verwendete Kristalltyp von entscheidender Bedeutung. Für die durch die vorhandenen Lasersysteme vorgegebenen Wellenlängen von ca. 800 nm (fs-laser) bis 850 nm (Zwei-Farben-Laser) ist die Verwendung von ZnTe als elektro-optischem Kristall üblich. U. U. lassen sich aber mit alternativen Kristalltypen wie  $\text{LiTa}_2\text{O}_3$  deutlich bessere Auslöschungen und damit evtl. höhere Empfindlichkeiten erzielen.

### Teilschritt H3

#### Design, Realisierung und Optimierung einer THz-Abbildungsoptik (Mit Input von H2, S2)

Die effiziente Abbildung der THz-Strahlung mittels quasioptischer Elemente (Spiegel oder Kunststofflinsen) auf den Detektorkristall muss optimiert werden. Dabei muss eine Pixelgröße in der Größenordnung der THz-Wellenlänge angestrebt werden. Damit kann die Empfindlichkeit optimiert werden, ohne an Auflösungsvermögen zu verlieren.

Teilschritte H4,R5,H6Experimentelle Verifizierung der neuen 3-dimensionalen Terahertz-Kameratechnologie an ausgewählten Objekten.

Die entwickelte THz-Kameratechnologie soll in ihren verschiedenen Entwicklungsstufen (Pulssystem (H4); CW-System(R5, H6)) intensiv getestet und erprobt werden. Hierzu ist die Beobachtung von geeigneten Teststrukturen geplant. Aufgrund der hohen Tiefenauflösung (wg. der Wellenlänge der THz-Strahlung im sub-mm Bereich), ist beispielsweise die Beobachtung von Oberflächen mit Strukturdefekten im sub-mm Bereich interessant. Die Eignung von THz-Strahlung für solche Untersuchungen ist vom Antragsteller Roskos / Löffler bereits erfolgreich gezeigt worden [10].

Bei der Erprobung der Kamera wird eine intensive Kollaboration mit den Projekten *PMDSlam* und *MultiCam* im Paketantrag angestrebt. Dabei sollen geeignete Untersuchungsobjekte mit konventioneller 3D-PMD-Technologie und mit der 3D-THz-Technologie vermessen werden. Im Vergleich sollen spezifische Vor- bzw. Nachteile der jeweiligen Technik herausgearbeitet werden.

Teilschritt H5:Synchronisieren von fs-Laser auf elektronische THz-Quelle (Mit Input von R1, R2)

In diesem Teilschritt soll eine Synchronisierung des fs-Pulslasers in der AG Haring mit der freilaufenden THz-Quelle erreicht werden. Diese Maßnahme dient zu Vorbereitung von Teilschritt H6 (Synchronisieren von fs-Laser auf QCL-THz). Dieses ist so zu verstehen, dass das Synchronisationskonzept für den fs-Laser zunächst mit einer stabilen Quelle getestet werden soll.

Teilschritt H6 (Jahr 3):CW-Imaging Test mit fs-Laserprobe + QCL, (Mit Input von H4, H5)

In diesem zukunftsweisenden Teilschritt soll alternativ zu der elektronischen Quelle bei 650 GHz ein THz-QCL Laser im cw-Modus bei etwa 2,5 THz verwendet werden. Dieser Schritt soll zeigen, dass das hier vorgeschlagene Kamerakzept prinzipiell auch für deutlich höhere THz-Frequenzen geeignet ist. Somit sollten bessere Tiefen- und Ortsauflösungen zu erreichen sein. Die besondere Herausforderung bei diesem Teilschritt liegt darin, dass einerseits der Betrieb des QCLs bei tiefen Temperaturen erfolgen muss, und dass andererseits, wegen der höheren Betriebsfrequenz des QCLs, auch höhere Anforderungen an die Synchronisation und an die relative Frequenzstabilität des QCLs gestellt werden müssen. Evtl. ist auch eine aktive Nachführung der QCL-Frequenz (welche über eine Strom-/Temperaturänderung erfolgen kann) notwendig.

Teilschritt H7 (Jahr 3)Verwendung einer Laserwellenlänge > 900 nm + GaAs-Kristall zur S/N Optimierung)

In diesem Teilschritt soll untersucht werden, inwieweit mit anderen Kristallen und Laserwellenlängen erhöhte Empfindlichkeiten erreicht werden können. Hier bietet sich insbesondere die Verwendung von GaAs bei einer Laserwellenlänge von etwa 1  $\mu\text{m}$  an. Die elektro-optischen Eigenschaften von GaAs sind vergleichbar gut wie die von ZnTe. Allerdings ist GaAs in deutlich besserer Kristallqualität erhältlich als ZnTe. Somit sollten bessere Auslöschungen und damit auch bessere Empfindlichkeiten zu erreichen sein.

Teilschritt S1Optimierung einer PMD-Kamera auf hohe  $\Delta I/I$ -Empfindlichkeit.

Die verwendete Nahinfrarot-Kamera muss für die Detektion kleinster Intensitätsmodulationen bei großem konstanten Hintergrund optimiert werden. Hierzu sollen systematische Untersuchungen von der AG Schwarte durchgeführt werden.

Teilschritt S2Anpassung Datenerfassung zur Aufnahme von Bildern als Funktion von Time-Delay.

Zur Erprobung des Multipixel-Detektors mit der THz-Pulsquelle muss die Datenerfassungssoftware der PMD-Kamera so modifiziert werden, dass eine Bilderfassung einzelner Bilder als Funktion der THz-Pulslaufzeit ermöglicht wird. Die so gewonnenen Daten sollen dann als 3D-Bilder dargestellt werden.

Teilschritt S3Anpassung Datenerfassung zur Messung von Betrag und Phase

In diesem Teilschritt soll die Datenerfassung der PMD-Kamera so optimiert werden, dass eine Mittelung über Real- und Imaginär-Anteil des Signals mit einer möglichst kurzen Zeitkonstante im sub-ms Bereich erfolgt. Eine Mittelung über den aus Real - und Imaginär -Anteil berechneten Betrag kann dann mit einer deutlich längeren Zeitkonstante erfolgen. Diese Art der Mittelung ist zur Erfassung von bewegten Objekten von besonderer Bedeutung.

Teilschritt R1:Design, Realisierung und Optimierung eines elektro-optischen Photomischers zur Zwischenfrequenzerzeugung.

Wichtigste Anforderung an den hier zu entwickelnden Photomischer ist die Erzeugung von Zwischenfrequenzen von bis zu 20 MHz (= max.

Betriebsfrequenz der PMD-Kamera). Da photoleitende Mischer (z.B. auf LT-GaAs Basis) wegen der hohen Stromverstärkung auf Zwischenfrequenzen von einigen 10 bis max. 100 kHz begrenzt sind, soll hier ein elektro-optischer Detektor verwendet werden. In diesem Teilschritt sollen im Einzelnen der Kristalltyp (verm. ZnTe, evtl. LiTa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), die Detektionsgeometrie (Differenzdetektor vs. gekreuzte Polarisatoren) und die Einkopplung der THz-Strahlung (Silizium-Linse auf Kristall + Strahlführungsoptik) optimiert werden. Der Testbetrieb des elektro-optischen Photomischers soll zunächst mit auch in Frankfurt verfügbaren THz-Pulsen und später mit der beantragten elektronischen 650 GHz Dauerstrich-THz-Quelle und dem vorhandenen Zwei-Farbenlaser erfolgen. Für den zweiten Schritt muss die Differenzfrequenz des Zwei-Farbenlasers gleich der Frequenz der CW-THz-Quelle plus/minus der gewählten Zwischenfrequenz (5-20 MHz) eingestellt werden. Aufgrund der Leistungsreserven der THz-Quelle (in mW-Bereich) und der Empfindlichkeit der elektro-optischen Detektionsmethode im sub-nW-Bereich (s. Vorarbeiten) ist sichergestellt, dass ein Zwischenfrequenzsignal mit extrem gutem (Amplituden-) Signal-zu-Rausch-Verhältnis erzeugt werden kann. Dieses Signal bietet dann optimale Voraussetzungen für die aktive Stabilisierung der Zwischenfrequenz im Teilschritt R2.

#### Teilschritt R2:

##### Design, Realisierung und Optimierung eines Regelkreises zur Zwischenfrequenz-Stabilisierung. (Mit Input von R1)

Nach der Erzeugung des Zwischenfrequenzsignals in Teilschritt R1, soll in diesem Teilschritt die Stabilisierung der Zwischenfrequenz im MHz-Bereich (vorzugsweise bei der Betriebsfrequenz der PMD-Kamera) realisiert werden. Hierzu muss die Zwischenfrequenz mit dem von einem elektronischen Referenzoszillator vorgegebenen Wert verglichen werden. Mittels des so gewonnenen Fehlersignals soll dann eine Linie des Zwei-Farbenlasers nachgeführt werden. Der entsprechende Regelkreis ist in Abb. 3.3.1 dargestellt. Das entsprechend gewonnene und stabilisierte Differenzfrequenzsignal dient dann im Weiteren als Referenzfrequenz für einen Detektions-Lock-In-Verstärker oder das PMD-Detektorarray.

Eine wichtige Voraussetzung für die Stabilisierung der Zwischenfrequenz ist, dass die Linienbreiten von THz-Quelle und vom Zwei-Farben-Laser kleiner sind als die angestrebte Zwischenfrequenz. Dieses ist hier der Fall, da die Linienbreite des Zwei-Farbenlasers bei etwa 1 MHz liegt. (lt. Herstellspezifikation und lt. Messung eines Schwebungssignals der zwei Laserlinien in Frankfurt.) Die Linienbreite der beantragten THz-Quelle liegt nach Herstellangaben ebenfalls deutlich unter 1 MHz. Die angestrebte Zwischenfrequenz von ca. 20 MHz sollte also problemlos erreichbar sein.

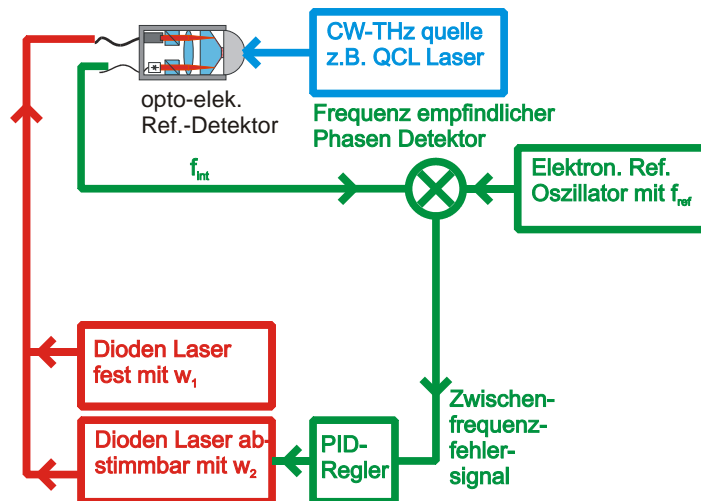


Abb. 3.3.1 Darstellung des geplanten Regelkreises zur Stabilisierung der Zwischenfrequenz.

### Teilschritt R3.

#### Integration eines zweiten opto-elektronischen Detektors als Messdetektor.

Zur Verwendung der entwickelten Detektionsmethode in einem Mess- oder Bildgebungssystem, muss ein zweiter opto-elektronischer Detektor als Messdetektor verwendet werden. Die Vorgehensweise gestaltet sich derart, dass ein kleinerer Teil der von der Quelle bereitgestellten Leistung direkt auf den ersten Referenzdetektor geleitet wird. Das vom Referenzdetektor erzeugte Zwischenfrequenzsignal wird dann wie unter Teilziel R2 beschrieben zur Stabilisierung der Zwischenfrequenz und zur Regelung der Differenzfrequenz des Zwei-Farbenlasersystems verwendet. Der Hauptteil der zu Verfügung stehenden Leistung wird dann dem eigentlichen Mess- oder Bildgebungssystem zugeführt und nach der Transmission durch, bzw. nach der Reflexion von einer Probe mit dem zweiten opto-elektronischen Messdetektor erfasst. Das Zwischenfrequenzsignal dieses zweiten Messdetektors wird dann mit einem Lock-In-Verstärker ausgewertet, welcher mit dem Zwischenfrequenzsignal des ersten Referenzdetektors als Referenzsignal versorgt wird. Somit ist eine empfindliche Ermittlung von Amplitude und Phase des Messsignals möglich. Das entsprechende System ist in Abb. 3.3.2. dargestellt. Dieser Teilschritt ist zur grundsätzlichen Erprobung der Messmethode nötig und dient vor allem der Ermittlung des mit dem System erzielbaren dynamischen Bereiches. In einem späteren Schritt wird dann der Messdetektor durch ein Detektorarray (siehe Teilziele H2,H3,R4) ersetzt.

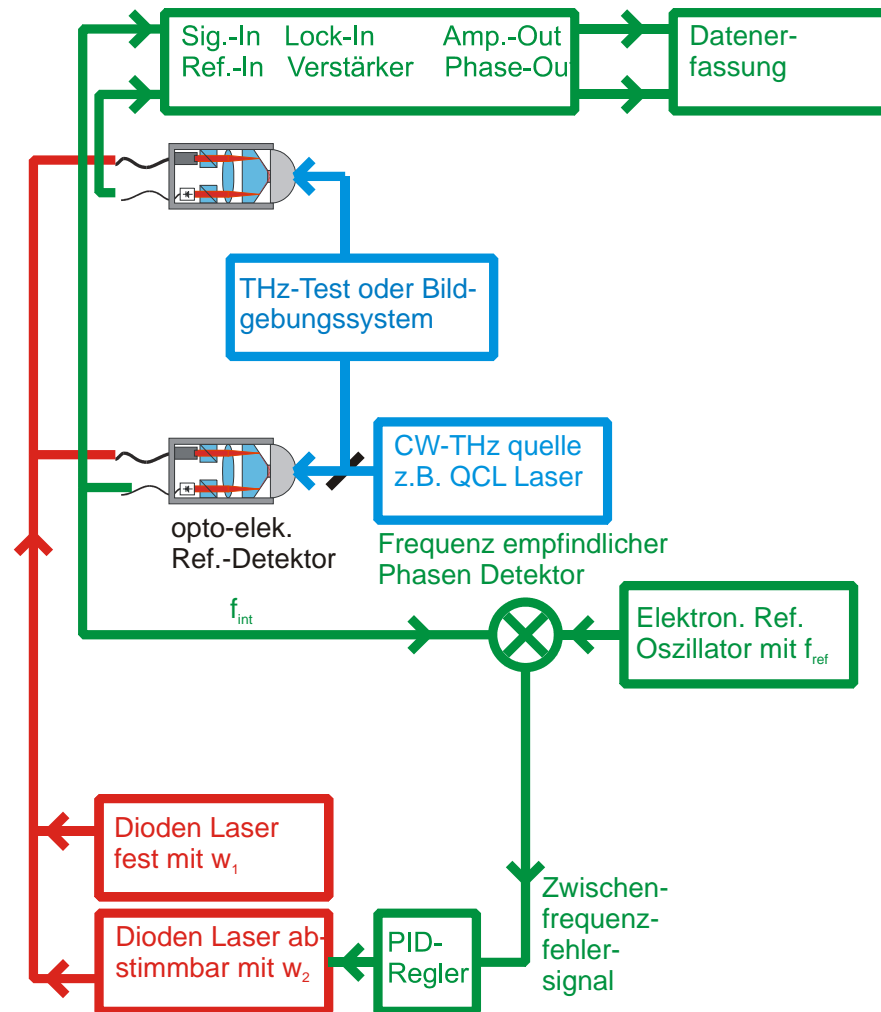


Abb. 3.3.2. Darstellung des geplanten Detektionsschemas

#### Teilschritt R4

##### Design, Realisierung und Optimierung eines optischen Multipixel-Hetrodyn-Detektors (Mit Input von H2, H3,R2,S3)

In diesem Teilschritt sollen die vorab entwickelten Teilkomponenten zu einem Gesamtsystem vereinigt werden. Dieses bezieht sich vor allem auf die Kombination des elektro-optischen Multipixel-Detektors (H2,H3) mit dem synchronisierten System aus Zweifarben-Laser und elektronischer 650 GHz Quelle. Eine schematische Abbildung des geplanten Gesamtsystems ist bereits im Einleitungsteil in Abb. 3.3.1 dargestellt.

#### Teilschritt R5

Beschreibung oben unter H4

#### Teilschritt R6 (Jahr 3)

##### Design, Realisierung und Optimierung eines Bildgebungssystems mit Abb. in der Fourier-Ebene. (Mit Input von R4, + Teilprojekt Kolb/Loffeld)



Alternativ soll statt einer realen Abbildung auf den Detektor eine Abbildung in der Fourier-Ebene untersucht werden. In diesem Fall kann unter Ausnutzung der Phasenempfindlichkeit des Detektors mittels inverser Fouriertransformation auf das reale Bild zurückgerechnet werden. Dabei ist die rechnerisch mögliche Bildpunkteanzahl im errechneten Bild deutlich größer als die Anzahl der realen Detektorpixel. Dieses sollte wie in [9] dargestellt zu einer deutlichen Verbesserung der Bildqualität führen. Dieser Projektteil soll in enger Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt PMDSim der AG Loffeld erfolgen.

#### Teilschritt R7

Demonstration der Bildgebung mit dem unter R6 beschriebenen System

#### Teilschritt R8

In Abhängigkeit von den Ergebnissen aus H6 ist geplant, ein System basierend auf einer THz-QCL Quelle und einem Zweifarben-Lasersystem aufzubauen. Ein solches System wäre insofern besonders zukunftsweisend, als sowohl QCL-Laser als auch Dioden-Laser das Potenzial besitzen, um auch in Low-Cost- bzw. in Massenanwendungen eingesetzt zu werden.

### 3.3 Untersuchungen am Menschen

Es werden keine Untersuchungen am Menschen durchgeführt.

### 3.4 Tierversuche

Es werden keine Experimente an Tieren durchgeführt.

### 3.5 Gentechnologische Experimente

Es werden keine gentechnologischen Experimente durchgeführt.

## 4. Beantragte Mittel

### 4.1 Personalkosten

1 wissenschaftlicher Mitarbeiter, BAT IIa, für 3 Jahre (AG Haring Bolívar)

Dieser Mitarbeiter soll die Experimente durchführen und die wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse leisten. Neben den umfangreichen Arbeiten am optischen Aufbau sind wesentliche Arbeiten zur Messwerterfassung und -auswertung notwendig. Wegen der komplexen Anforderungen an den Mitarbeiter (gleichzeitig Kenntnisse in der Optoelektronik, THz-Spektroskopie und Bildgebung, Elektronik etc.) ist diese Stelle nur auf Basis einer vollen Stelle durch einen geeigneten Kandidaten zu besetzen.

1 wissenschaftlicher Mitarbeiter, BAT IIa, für 3 Jahre (AG Roskos/Löffler)

Dieser Mitarbeiter soll die Experimente zur Synchronisierung von Zweifarben Laser und THz-Quelle durchführen und die wissenschaftliche Interpretation der Ergebnisse leisten. Hierbei steht neben den umfangreichen Arbeiten am optischen Aufbau auch die Realisierung der zur Synchronisierung notwendigen Elektronik im Vordergrund. Ein Kandidat mit entsprechenden Kenntnissen (Optik und Elektronik) kann vermutlich nur über eine deutschlandweite Ausschreibung bei entsprechender Dotierung der Stelle (1 ganze BAT IIa) gefunden werden, da an der Universität Frankfurt keine bzw. wenig Lehrveranstaltungen im Bereich Optik / Elektronik angeboten werden.

1 studentische Hilfskraft, 19h pro Woche, für 2 Jahre (AG Schwarte)

Diese Hilfskraft soll Parameteranpassungen der PMD-Kamera zur Anwendung als Komponente eines elektro-optischen THz-Detektors durchführen. Diese sind unabdingbar für den Betrieb und die Optimierung der THz-Kamera.

## 4.2 Wissenschaftliche Geräte

Geräte über 10.000,- EUR inkl. MwSt. und Nebenkosten für AG Roskos/Löffler	
<p>650 GHz, 10 mW Quelle (Vervielfacher) Preis lt. Angebot der Firma SEMIC RF 59.670,00 € zzgl MWSt</p> <p>Begründung: Als freilaufende Hochfrequenzquelle soll zum einen ein elektronischer Oszillator mit Vervielfacher und einer Zielfrequenz von 650 GHz und einer Ausgangsleistung von 10 mW eingesetzt werden. Ein solches System hat den großen Vorteil, dass es einerseits eine hohe Ausgangsleistung liefert und andererseits eine genügend hohe Frequenzstabilität aufweist. Die beantragte Quelle ist zur Durchführung des Projektes <u>unbedingt erforderlich</u>. Eine Verwendung von THz-QCL in einer frühen Projektphase würde <u>enorme Risiken</u> bzgl. der Verfügbarkeit (nicht-kommerziell sondern nur über Kooperationen und persönliche Kontakte erhältlich) und technischen Realisierbarkeit des Gesamtsystems (da Frequenzstabilität der QCLs bei hohen Ausgangsleistungen noch ungenügend untersucht ist) bedeuten.</p> <p>Zusage der Weiternutzung und der weiteren Abdeckung des Systems durch den DFG-Reparaturfond für das Zweifarben-Diodenlasersystems der Firma Sacher welches der AG Roskos von der DFG im Rahmen des Projektes (RO-770/24-1) als Dauerleihgabe zu Verfügung gestellt wurde für die Laufzeit des hier beantragten Projektes.</p> <p>Begründung: Das Lasersystem ist für das hier beantragte Projekt von zentraler Bedeutung. Ein Ausfall des Systems würde eine Fortsetzung des Projektes unmöglich machen.</p>	<p>69.217,20 €</p> <p>keine direkten Kosten.</p>
Summe:	<u>69.217,20 €</u>

<b>Geräte unter 10.000,- EUR inkl. MwSt. (AG Haring)</b>	
1 PMD Kamerasystem PMD[vision]® 3k-S, 64 x 48 Pixel laut beigefügtem Angebot € 5.990,-- + MwSt.	6.948,40 €
1 Keithley Sourcemeter zur THz Pulsquellenansteuerung laut Preisinformation von Fma. T.O.P. Elektronik	3.944,00 €
4 Parabolspiegel zur THz-Strahlführung lt. Angebot Fa. MellesGriot	1.574,04 €
4 Optikhalter P100-T zur Montage und verlässlichen Justage der Parabolspiegel lt. Angebot Fa. Newport	329,44 €
4 Miniaturverschiebetische M-MT-XY zur Positionierung der Parabolspiegel lt. Angebot Fa. Newport	705,28 €
2 Goldspiegel, Durchmesser 50.8mm, zur THz-Strahlführung lt. Angebot Fa. Newport	610,16 €
2 THz-Polyethylenlinsen zur Ein- und Auskopplung bzw. Fokussierung auf die Probe lt. Angebot Fa. Microtech Instruments	1.120,69 €
Summe:	<u>15.232,01 €</u>

<b>Geräte unter 10.000,- EUR inkl. MwSt. (AG Roskos)</b>	
Nachrüstung der Elektronik für Stabilisierung des Zweifarben-Diodenlasersystems (Pos. 1,3,4 des beiliegenden Angebots der Firma Sacher) € 3.750,- zzgl. MwSt	4.350,00 €
PMD Kamerasystem PMD[vision]® 3k-S, 64 x 48 Pixel laut beigefügtem Angebot € 5.990,-- + MwSt.	6.948,40 €
Summe:	<u>11.298,40 €</u>

## 4.3 Verbrauchsmaterial für 2 Jahre (Preise inkl. MWSt)

<b>Verbrauchsmaterial für 2 Jahre (AG Haring)</b>	
10 silberbeschichtete optische Spiegel (LayerTec), Stückpreis 95,--	1.102,00 €
Optische achromatische Verzögerungsplatten (2 x $\lambda/2$ , 1 x $\lambda/4$ ) Preis lt. Hersteller, Fa. Newport	3.720,00 €
ZnTe elektro-optische Kristalle	2.000,00 €
Optische Kleinteile (5 Halterungen, 3 Verschiebetische, 10 Pedestals) Preis lt. Hersteller, Fa. Newport	1.682,00 €
Anteilige Kosten für Verbrauchsmaterial im optischen Labor (Reinigungsmittel für Optiken, Neubeschichtungen von Optiken und Linsen etc.)	1.000,00 €
Summe:	<u>9.504,00 €</u>

<b>Verbrauchsmaterial für 2 Jahre (AG Roskos)</b>	
6 Siliziumlinsen in drei verschiedenen Designs (100,-- €/Stück)	600,00 €
Achromatische Verzögerungsplatten (2 x $\lambda/2$ , 1 x $\lambda/4$ ) Preis lt. Hersteller, Fa. Newport	3.720,00 €
ZnTe elektro-optische Kristalle	2.000,00 €
Verbrauchsmaterial für opt. Labor	2.000,00 €
Faseroptik für Laserstrahlführung zum Kamera-Aufbau	1.000,00 €
Summe:	<u>9.320,00 €</u>

## 4.4 Reisen

Zum Erfahrungsaustausch und zur Erörterung wissenschaftlicher Fragen sind Besuche anderer Arbeitsgruppen innerhalb Europas notwendig. In diesem Projekt ist dies essentiell um einen direkten Austausch mit den Quantenkaskadenlaser-Arbeitsgruppen (Scuola Normale, Pisa) erhalten zu können.

Interner Projektaustausch, nationaler und europäischer Austausch mit anderen Wissenschaftlern Pro Jahr	2.000,00 €
Ein internationaler Konferenzbesuch pro AG und Jahr	4.000,00 €
Summe 4.4 pro Jahr:	6.000,00 €
Summe 4.4 für 2 Jahre:	<u>12.000,00 €</u>

#### 4.5 Sonstige Kosten

Inanspruchnahme von Dokumentationsdiensten (INSPEC)	1.500,00 €
Publikationskosten	1.500,00 €
Summe 4.5:	<u>3.000,00 €</u>

### 5. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

#### 5.1.a Zusammensetzung der Arbeitsgruppe (AG Haring)

Mitarbeiter an der Antragsthematik:

- Prof. Dr. P. Haring Bolívar,
- Dr. V. Warnkross, Akademischer Oberrat, Beschäftigt sich mit der Generation und Propagation von Höchsthfrequenzfeldern.
- Dipl. phys. D. Surawicz, beschäftigt sich mit zeitaufgelöster THz Technologie und dessen Nutzung für biomedizinische Anwendungen. Er wird dieses Projekt technologisch unterstützen und an Anwendungsuntersuchungen im biomedizinischen Bereich teilnehmen.
- C. Debus ist studentische Hilfskraft am Lehrstuhl und beschäftigt sich mit der elektromagnetischen Simulation von THz Komponenten. Er soll notwendige Simulationsarbeiten durchführen.
- Klaus Peter Dickel, technischer Mitarbeiter, soll die elektronischen Arbeiten zu Synchronisationsschaltungen durchführen.
- Herr Armin Kütke, technischer Mitarbeiter, soll die optischen Aufbauarbeiten im Labor unterstützen.
- N.N. Ein Diplom-Physiker oder Diplom-Ingenieur (Elektrotechnik) soll über das Projekt bezahlt werden, und das Projekt unter Anleitung von Prof. P. Haring Bolívar durchführen.

#### 5.1.b Zusammensetzung der Arbeitsgruppe (AG Roskos)

Mitarbeiter an der Antragsthematik:

- Prof. Dr. H. Roskos,
- Dr. Torsten Löffler, Co-Projektleiter, seit Feb. 2000 in der Arbeitsgruppe, ist mit der Untersuchung von THz-Systemen und Anwendungen beschäftigt. Herr Löffler hat seine Dissertation zum Thema „*Erzeugung intensiver Pulse im Terahertzfrequenzbereich mittels laser-generierter Plasmen*“ in

Dezember 2003 abgeschlossen und hat nun als Post-Doc die operative Leitung der THz-Aktivitäten in der Arbeitsgruppe übernommen.

- Dipl. Phys. Markus Kreß, seit Oktober 2002 in der Arbeitsgruppe, hat den Aufbau zur elektro-optischen Detektion von CW-THz Strahlung realisiert. Sein Know-How wird entscheidend in das Projekt einfließen.
- M. Sc. Gabriel Loata, seit Mai 2002 in der Arbeitsgruppe, untersucht im Rahmen des DFG Projektes RO770-17/3 die Erzeugung von CW-THz Strahlung mit LT-GaAs Photomischern. Außerdem betreut Herr Loata das Zwei-Farben-Diodenlasersystem. Herr Loata wird das Projekt insbesondere im Hinblick auf die Nutzung des Zwei-Farben-Diodenlasersystems unterstützen.
- N.N. Ein Diplom-Pysiker oder Diplom-Ingenieur (Elektrotechnik) soll über das Projekt bezahlt werden, und das Projekt unter Anleitung von Dr. Torsten Löffler und Prof. H. Roskos bearbeiten.
- Andere Diplomanden und Doktoranden der Gruppe tragen bei Teilaufgaben bei, so Mark Thomson bei der Theorie der elektrooptischen Detektion.

### 5.1.c Zusammensetzung der Arbeitsgruppe (AG Schwarte)

Mitarbeiter an der Antragsthematik:

- Prof. Dr. Schwarte,
- N.N. Eine studentische Hilfskraft soll über das Projekt bezahlt werden und das Projekt unter Anleitung von Prof. R. Schwarte bearbeiten.

### 5.2.a Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern (AG Haring)

Die Arbeitsgruppe ist in mehreren nationalen und internationalen THz Kooperationen eingebunden. Insbesondere steht Sie als Themenkoordinator im europäischen Integrierten Projekt „Teranova“ vor bei dem 16 internationale Arbeitsgruppen beteiligt sind und ist Teilnehmer am europäischen Netzwerk „Metamorphose“ an dem über 20 Gruppen mitarbeiten. Darüber hinaus koordiniert die AG Haring den Aufbau einer neuen Fokus Gruppe „THz Technology“ der „European Optical Society“.

### 5.2.b Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern (AG Roskos)

Die Arbeitsgruppe ist in zahlreiche nationale und internationale THz-Kooperationen eingebunden. Insbesondere steht sie einem ESA-Konsortium (Projekt beendet / Nachfolge beantragt) und einem NATO Science-for-Peace-Projekt als Koordinator vor. Über die DFG Projekte RO 770/17-3 und RO 770/24-2 besehen gute Kontakte zu Wissenschaftlern der TU-Darmstadt und der Uni-Erlangen.

### 5.2.c Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern (AG Schwarte)

Die Arbeitsgruppe Schwarte ist eine der führenden Arbeitsgruppen im Bereich 3D Bildgebung und ist in vielfältige Kooperationen und Projekte eingebunden (z.B. bmb+f: *3D-SIAM* und *PMDIRAC*). In Bezug auf dieses Projekt ist die Anbindung an die Firma PMD Technologies als professioneller Hersteller von PMD Kameras interessant, sowie die enge Anbindung an die Firma ifm electronic GmbH als professioneller Anwender von PMD Kamerasystemen.

### 5.3.a Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern (AG Haring)

Der Einsatz von Quantenkaskadenlasern als cw-Quelle für die 3D THz Bildgebung ist in diesem Projekt vorgesehen. Dazu ist bereits eine Kooperationszusage von der Arbeitsgruppe von Prof. A. Tredicucci (Scuola Normale Superiore, Pisa, I) bestätigt worden und die Bereitstellung von THz Quantenkaskadenlasern garantiert.

### 5.4.a Apparative Ausstattung (AG Haring)

- Naßchemische Probenpräparation
- Elektroniklabor zur Herstellung einfacher Schaltungen
- 2 klimatisierte optische Labore.
- Titan-Saphir-Laser (Coherent, Typ MIRA), Impulsdauer: ca. 100 fs, Repetitions-rate: ca 76 MHz, Wellenlängenbereich: 700 - 1000 nm. Das System wird für wissenschaftlichen Projekte (DFG, EU) eingesetzt und soll diesem Projekt für geulste THz Analysen zur verfügung gestellt werden.
- Cavity Dumper (APE) zur variablen Femtosekunden Pulsgeneration im bereich 0 .. 1MHz. Ist nützlich um den Eindeutigkeitsbereich der bildgebenden THz Analysen variieren zu können.
- Closed-Cycle Kryostat (Cryophysics), Temperaturen bis 8 K, mit Kühlleistung von 10W zum Betrieb der QuantenKaskaden Laser.

### 5.4.b Apparative Ausstattung (AG Roskos)

Reinraum für die Probenpräparation:

- Optische Lithographie
- Naßchemische Probenpräparation
- Aufdampfanlagen



Vorhandene Lasersysteme:

- Titan-Saphir-Laser (Spectra Physics, Typ Tsunami), Impulsdauer: ca. 100 fs, Repetitions-rate: ca 80 MHz, Wellenlängenbereich: 700 - 1000 nm. Das System wird sowohl für wissenschaftlichen Projekte im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms *Ultraschnelle Magnetisierungsprozesse* und für DFG-Projekte zum Thema Quantenkohärenz eingesetzt.
- Titan-Saphir-Laserverstärkersystem (Clark-MXR, CDP-2001), Impulsdauer 150 fs, Wiederholrate: 1 kHz, durch Nutzung eines OPA (Clark-MXR, NOPA) ist ein Wellenlängenbereich von 200 –1500 nm zugänglich. Dieses System wird primär für die Femtosekundenspektroskopie (v.a im Rahmen der Forschergruppe *Spin- und Ladungskorrelationen in niedrigdimensionalen metall-organischen Festkörpern*) und für THz-Untersuchungen (z.B. plasmaphysikalischer Art) eingesetzt.
- Zwei-Farben Diodenlasersystem der Firma Sacher mit 500 mW Ausgangsleistung bei 850 nm.

Vorhandene Kryostat-Systeme:

- Optischer Magnetkryostat (Oxford, Spectromag), Magnetfelder bis 9T bei Temperaturen bis zu 2.4 K.
- Kleinstkryostat (Oxford, Microstat), Temperaturen bis 4 K. Er wird für kurzzeitige Messungen und zur Probencharakterisierung genutzt.
- Closed-Cycle (Cryophysics), Temperaturen bis 8 K.
- Ein weiterer optischer Magnetkryostat (Cryovac, KONTI IT - Spekro 5) wurde mit Mitteln der Forschergruppe *Spin- und Ladungskorrelationen in niedrigdimensionalen metall-organischen Festkörpern* angeschafft.

Die Arbeitsgruppe nutzt die komplette apparative und personelle Infrastruktur des Gesamtinstitutes (3 Arbeitsgruppen), insbesondere mit Hinblick auf die Materialcharakterisierung (Mikroskopie, Elektronenmikroskopie, etc.) und die Aufdampftechnologie.

#### 5.4.c Apparative Ausstattung (AG Schwarte)

Am Institut für Nachrichtenverarbeitung:

- Mikroprozessorlabor, Labor für analoge und digitale Schaltungstechnik, Optoelektronik, Schnelle Impulstechnik mit Spektrumanalysator bis 2 GHz, Netzwerkanalysator bis 3 GHz, Oszilloskope bis 1 GHz, Pulsgeneratoren bis 500 ps, Logikanalysator.
- Optolabor mit neuester Einrichtung und Meßtechnik zur opt. Leistungsmessung, Strahlprofilanalyse von Laserstrahlen, Mikroskop zur Analyse von Halbleiterbauelementen.

- 15 PC mit Windows XP, LAN mit Novell Netware, Software: Microsoft Office XP, Matlab, PSpice, Protel DXP Agilent VEE, etc.
- Sun Workstation Cluster, Software für Layout und Simulation von Halbleiterbauelementen (Medici, Davinci, Raphael, Mentor Graphics, Cadence).

Im ZESS:

- Photoniklabor: Spektralmeßplatz (200 nm bis 15  $\mu\text{m}$ ), Reflexions-, Transmissions-, und Leistungsmessung, CW- und Pulsmeßtechnik.
- Glasfaserbearbeitung, Mikropositioniersysteme, Interferometriemeßplatz.
- Elektroniklabor: CAD-Systeme (PCB-Layout, Analog-, Digital- und Mixed-Signal-Simulation), Breitbandmeßplätze für Messungen im Frequenz- und Zeitbereich (DC-10GHz) Entwicklungswerkzeuge für verschiedene programmierbare Bausteine, Mikroprozessortechnik/Simulationstechnik, EMV-Meßplatz, Hard- und Softwarewerkzeuge für verschiedene Mikro- und Signalprozessoren (4, 8, 16, 32 bit) sowie für Feldbussysteme. Workstations und PC im heterogenen Netzwerk.
- Sensorsysteme/Multisensorsysteme: Verschiedene Bildverarbeitungssysteme (PC und VMEbus, monochrom u. Farbe, Laserabstandsmeßsysteme).
- 2D-, 3D-Scannersysteme, Lichtschnittsysteme, induktive und kapazitive Abstandsmeßsysteme, Posistioniereinrichtungen

## 5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben

Bei der Kalkulation der Sachmittel wurde berücksichtigt, dass ein Teil der Verbrauchskosten bereits aus den Mitteln der beteiligten Institute für Forschung und Lehre beglichen werden.

## 5.6 Sonstige Voraussetzungen

keine

## 6. Erklärungen


Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn wir einen solchen Antrag stellen, was bisher nicht geplant ist, werden wir die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.

Der Vertrauensdozent der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Siegen, Univ.-Prof. em. Dr. Ulf Dirlmeier, wurde von dieser Antragstellung unterrichtet.

Der Vertrauensdozent der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Frankfurt, Herr Prof. Dr. Christian Ohrloff, Theodor-Stern-Kai 7, 60596 Frankfurt (M), wurde von der Antragstellung unterrichtet.

## 7. Unterschriften

Siegen, den 5/9/05



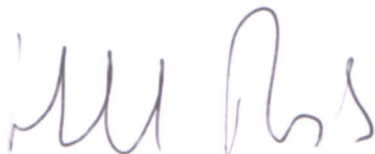
28/08/05

Prof. Dr. P. Haring Bolívar



Prof. Dr. R. Schwarte

Frankfurt a.M., den



Prof. Dr. H.G. Roskos

23. 8. 2005 Santa Barbara



Dr. T. Löffler

## 8. Verzeichnis der Anlagen

Angebote:

- Angebot Fa. SEMIC RF vom 11.08.2005
- Angebot Fa. Sacher vom 27.05.2005
- Angebot Fa. PMDTec von 08.08.2005

Tabellarischer Lebenslauf der Antragsteller mit Schriftenverzeichnis

Übersichtsartikel zu Dauerstrich THz Technologie [E1]:

T. Löffler, K. J. Siebert, H. Quast, N. Hasegawa, G. Loata, R. Wipf, T. Hahn, M. Thomson, R. Leonhardt, and H. G. Roskos, *All-optoelectronic continuous-wave terahertz systems*, The Royal Society: Philosophical Transactions **362**, 263 (2004).

Kurzprofil des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Siegen

IPP-Broschüre des DAAD

## Literatur:

- [1] Special edition “*Photonic Terahertz Technology*” of Semiconductor Science and Technology **20** (7), July 2005, guest editors: A. Li-sauskas, T. Löffler and H. G. Roskos.
- [2] Q. Wu, T. D. Hewitt, and X.-C. Zhang, *Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams*, Appl. Phys. Lett. **69**, 1026 (1996).
- [3] A. Nahata, J. T. Yardley, and T. F. Heinz, *Two-dimensional imaging of continuous-wave terahertz radiation using electro-optic detection*, Appl. Phys. Lett. **81**, 963 (2002).
- [4] G. Zhao, R. N. Schouten, N. van der Valk, W. Th. Wenckebach, and P. C. M. Planken, *Design and performance of a THz emission and detection setup based on a semi-insulating GaAs emitter*, Rev. Sci. Instrum. **73**, 1715 (2002).
- [5] S. M. Duffy, S. Verghese, A. McIntosh, A. Jackson, A. C. Gossard, S. Matsuura, *Accurate modeling of dual dipole and slot elements used with photomixers for coherent terahertz output power*, IEEE Trans. Microwave Theory and Tech., **49**, 1032 (2001).

- [6] A. Nahata, J.T. Yardley, T. F. Heinz, *Free-space electro-optic detection of continuous-wave terahertz radiation*, Appl. Phys. Lett. **75**, 2524 (1999).
- [7] S Wang and X-C Zhang *Pulsed terahertz tomography*, J. Phys. D: Appl. Phys. **37** (2004) R1–R36
- [8] B. Ferguson, S. H. Wang, D. Gray, D. Abbott, and X.-C. Zhang, *T-ray computed tomography*, Opt. Lett. **27**, 1312 (2002).
- [9] J.F. Federici, D. Gary, B. Schulkin, F. Huang, H. Altan, R Barat, and D. Zimdars, *Terahertz imaging using an interferometric array*, Appl. Phys. Lett. **83**, 2477 (2003).
- [10] N. Hasegawa, T. Löffler, M. Thomson, and H. G. Roskos, *Remote Identification of protrusions and dents on surfaces by THz reflectometry with spatial beam filtering and out-of-focus detection*, Appl. Phys. Lett. **83**, 3996 (2003).