

Photonisch integriertes, multispektrales Terahertz-Messsystem zur berührungslosen Schichtdickenmessung

TeraLayerII

BMBF VIP+ 03VP07261

Schlussbericht Teilprojekt Fraunhofer HHI

VERBUNDKOORDINATOREN:

LARS LIEBERMEISTER, BJÖRN GLOBISCH

Fraunhofer Institut für Nachrichtentechnik,
Heinrich-Hertz-Institut (HHI)
Abteilung Photonische Komponenten
Einsteinufer 37
10587 Berlin

Email: lars.liebermeister@hhi.fraunhofer.de

VERBUNDPARTNER:

MARTIN KOCH

AG Experimentelle Halbleiterphysik
Fachbereich Physik
Philipps-Universität Marburg (UMR)
Renthof 5
35032 Marburg

Email: martin.koch@physik.uni-marburg.de

Inhalt

Kurzdarstellung	2
Eingehende Darstellung	2
1. Einleitung.....	2
2. Das TeraLayerII-Messkonzept.....	3
3. Validierung des TeraLayerII-Messkonzepts mittels kommerzieller Laserquellen	5
3.1. Charakterisierung der kommerziellen Laserquelle.....	6
3.2. Charakterisierung des Terahertz-Messsystems basierend auf kommerziellen Laserquellen	7
3.3. Messdatenaufnahme an Validierungsproben	8
3.4. Fazit zur Validierung des TeraLayerII-Meskonzepts	8
4. Photonisch integrierter Laserchip mit diskreten Lasern.....	9
4.1. Erste Iteration des photonisch integrierten Laserchips	9
4.2. Zweite Iteration des photonisch integrierten Laserchips.....	12
4.3. Fazit zu photonisch integrierten Laserchips mit diskreten Lasern.....	13
5. Photonisch integrierter Laserchip mit zwei abstimmbaren Laserquellen.....	13
5.1. Ansteuerung und Umsetzung des TeraLayerII-Messkonzepts.....	14
5.2. Optische Charakterisierung des Laserchips.....	15
5.3. Terahertz-Charakterisierung des TeraLayerII- Messsystems auf Basis des PICs ..	15
5.4. Messdatenaufnahme im TeraLayerII-Messschema mit dem PIC.....	16
5.5. Fazit zu photonisch integriertem Laserchip für das TeraLayerII-Spektrometer ..	16
6. Reflexionsmesskopf	17
7. Photoleiter als optoelektronische Terahertz-Emitter	18
8. Applikationsuntersuchungen mit dem TeraLayerII-Messkonzept	19
8.1. Probensatz für die Validierung.....	19
8.2. Proben aus der Industrie.....	19
9. Zusammenfassung und Ausblick.....	20
9.1. Abgleich der Ergebnisse mit den Projektzielen	20
9.2. Verwertungsabsichten.....	20
Literaturverzeichnis	22

Schlussbericht

Kurzdarstellung

Beschichtungen spielen eine wichtige Rolle bei der Entwicklung innovativer Werkstoffe und Bauteile. Bisher gibt es jedoch keine berührungslose Messtechnik, um die Dicke einzelner Beschichtungen während des Produktionsprozesses zu bestimmen. Ziel des Projektes TeraLayerII ist die Validierung eines neuartigen THz-Messsystems, das die Komplexität reduziert und die Integration in industrielle Produktionsprozesse ermöglicht. Die Kernidee besteht darin, die Anzahl der Frequenzpunkte für eine valide THz-Messung von 1000 auf nur sechs zu reduzieren. Durch den Einsatz photonischer Integration und intelligenter Datenauswertung können so kompakte und schnelle THz-Systeme realisiert werden. Das Projekt konzentriert sich auf die Zuverlässigkeit, Auflösung und Geschwindigkeit der Dickenbestimmung von Mehrschichtsystemen. Das TeraLayerII-Konzept hat das Potenzial, die berührungslose THz-Messtechnik in der industriellen Prozesskontrolle zu etablieren und einen Beitrag zur effizienteren Nutzung von Ressourcen zu leisten.

Das Projekt TeraLayerII ist eine Kooperation zwischen der Arbeitsgruppe von Prof. Martin Koch an der Philipps-Universität Marburg (UMR) und dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut HHI. Das HHI entwickelt das Messsystem, insbesondere die photonische Integration, und bringt seine langjährige Erfahrung in der Entwicklung von THz-Messsystemen und photonisch integrierten Schaltungen ein. Die UMR entwickelt die Algorithmen zur Datenauswertung und profitiert von ihrer Vorreiterrolle auf dem Gebiet der THz-Spektroskopie.

Der Abschlussbericht enthält die Arbeiten und Ergebnisse, die am HHI durchgeführt wurden. Im Projektverlauf wurden drei Realisierungskonzepte des Messschemas evaluiert. Außerdem wurden weitere Aspekte des Gesamtsystems betrachtet, wie die Optimierung der THz-Optik als Reflexionsmesskopf und der Einsatz von Photoleitern als kostengünstigere cw-THz-Emitter. Das Messsystem wurde schließlich an einem industrienahen Probensatz validiert.

Eingehende Darstellung

1. Einleitung

Beschichtungen spielen eine immer größere Rolle bei der Entwicklung und Herstellung innovativer Werkstoffe und Bauelemente. Ein klassisches Beispiel ist die Lackierung von Automobilkarosserien, die aus bis zu vier funktionellen Einzelschichten mit einer Dicke zwischen 10 µm und 200 µm besteht. Aber auch Beschichtungen auf Faserverbundwerkstoffen, wie sie bei Windkraftanlagen und im Leichtbau eingesetzt werden, erfordern ein hohes Maß an Präzision bei der Aufbringung der einzelnen Beschichtungskomponenten. Für die Qualitätskontrolle dieser Multischichtsysteme existiert jedoch bisher keine berührungslose Messtechnik, mit der zerstörungsfrei während des Produktionsprozesses (inline) die Dicke aller Einzelschichten bestimmt werden kann. Aktuell verlässt sich die Industrie auf berührende und damit zerstörende Offlinequalitätskontrolle, Erfahrungswerte oder Messverfahren ohne Einzelschichtauflösung. Mindestdicken werden daher üblicherweise durch Materialüberschuss sichergestellt. Dieser unnötige Materialeinsatz erhöht nicht nur die Produktionskosten, er schadet vor allem auch der Umweltbilanz durch gesteigerten Ressourcenverbrauch und erhöhtes Produktgewicht. Ein geeignetes Verfahren zur berührungslosen Inline-Schichtdickenbestimmung hat daher großes Potential für den industriellen Einsatz. Das Ziel dieses Projekts ist die Validierung eines berührungslosen und vom Substratmaterial unabhängigen Inline-

Schichtdickenmesssystems basierend auf der Dauerstrich-Terahertz-Technologie (cw-THz-Technologie).

Dielektrische Materialien wie Kunststoffe, Keramiken und eine Vielzahl von Beschichtungen sind transparent für Strahlung im THz-Frequenzbereich (0,1 THz – 10 THz). Im elektromagnetischen Spektrum liegt der THz-Bereich zwischen Mikrowellen und Infrarot und bietet somit einen vielversprechenden Kompromiss aus Eindringtiefe und Ortsauflösung. Damit die THz-Technologie zukünftig in einem breiteren industriellen eingesetzt werden kann, müssen die Beschaffungskosten eines THz-Messsystems, die in 2014 noch bei durchschnittlich 134.000 € lagen [3], deutlich reduziert werden. Dieser Schritt lässt sich nicht allein durch die Preisdegression mit höherer Stückzahl realisieren. Vielmehr muss die Komplexität der THz-Messsysteme zukünftig deutlich reduziert werden, um einen breiteren industriellen Markt adressieren zu können. Dies erfordert fundamental neue Ansätze bei der Entwicklung von THz-Systemen.

Das TeraLayerII-Projekt validiert ein neuartiges THz-Messsystem, welches die Komplexität bisheriger Ansätze entscheidend reduziert und gleichzeitig die Messgeschwindigkeit soweit erhöht, sodass eine Integration in industrielle Produktionsprozesse möglich wird. Die Kernidee dieses Ansatzes ist die Reduktion der Frequenzpunkte, die für eine valide THz-Messung erforderlich sind, von aktuell 1000 auf lediglich sechs. Mithilfe der photonischen Integrations-technologie bei der Sensorentwicklung und intelligenter Datenauswertung lassen sich so erstmals kompakte und schnelle THz-Systeme realisieren. Im vorliegenden Validierungsprojekt soll die Praxistauglichkeit und die Kostenperspektive dieses Messsystems validiert werden. Dabei stehen die Zuverlässigkeit der Messergebnisse, das Auflösungsvermögen und die Geschwindigkeit der Dickenbestimmung von Mehrschichtsystemen im Fokus der Validierung. Das TeraLayerII-Konzept hat das Potenzial die kontaktlose THz-Messtechnik in der zerstörungsfreien, industriellen Prozesskontrolle zu etablieren und somit einen entscheidenden Beitrag für den effizienteren Einsatz von Ressourcen zu leisten.

Dieses Projekt kombiniert die Stärken der beiden Partner, der Arbeitsgruppe von Prof. Martin Koch an der Philipps-Universität Marburg (UMR) und des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts HHI. Das Messsystem, insbesondere die photonische Integration, wird vom HHI entwickelt. Dabei greift das HHI auf langjährige Erfahrung in der Entwicklung von THz-Messsystemen und photonisch integrierten Schaltungen zurück. Die Algorithmen zur Datenauswertung werden an der UMR entwickelt und nutzen die jahrzehntelange Vorreiterrolle in der THz-Spektroskopie.

Dieser Abschlussbericht beinhaltet die Arbeiten und Ergebnisse, die am HHI durchgeführt und erzielt wurden. Dazu wird im Folgenden zunächst das Messkonzept von TeraLayerII beschrieben. Anschließend werden die drei im Projektverlauf entwickelten Implementierungskonzepte vorgestellt. Anschließend werden weitere Aspekte des Gesamtsystems wie die THz-Optik als Reflexionsmesskopf betrachtet und welche Optimierungen hier zur Unterstützung des neuen Messschemas vorgenommen werden können. Mit dem Ziel der Kostenoptimierung werden zusätzlich Photoleiter für den Einsatz als cw-THz-Sender optimiert und im Vergleich zu den bisher verbreiteten PIN-Dioden validiert. Abschließend wird der im Projektverlauf für die Validierung zusammengestellte Probensatz vorgestellt.

2. Das TeraLayerII-Messkonzept

In Abbildung 1 ist oben das verwendete Konzept zur kohärenten cw-THz-Spektroskopie mittels Phasen-Modulation dargestellt, das Messkonzept entspricht dem aktuellen Stand der Technik [1]. Der entscheidende Unterschied beim TeralayerII-Konzept liegt darin, dass hier anstatt eines quasi kontinuierlichen Spektrums nur einzelne Frequenzpunkte angefahren

werden. Dazu fährt ein in der Frequenz verstellbarer Laser (abstimmbar) nacheinander vordefinierte Frequenzpunkte an, während ein statischer Laser an einer konstanten Frequenz gehalten wird. Die beiden Laser werden zu einer optischen Schwebung überlagert und im THz-Sender (Tx) optoelektrisch gewandelt und ihre Differenzfrequenz als THz-Welle mittels Antenne abgestrahlt. Am THz-Empfänger (RX) wird die optische Schwebung als Lokaloszillator zur Detektion der einfallenden THz-Welle genutzt. Je nach Phasenverschiebung zwischen THz-Welle und Lokaloszillator kann das gemessene Signal einen beliebigen Bruchteil der Gesamtamplitude annehmen. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine Phasenmodulation durchzuführen, um Amplitude und Phasenlage zuverlässig bestimmen zu können. Dazu wird der statische Laser im Pfad zum THz-TX mittels Phasenmodulator in der Phase moduliert.

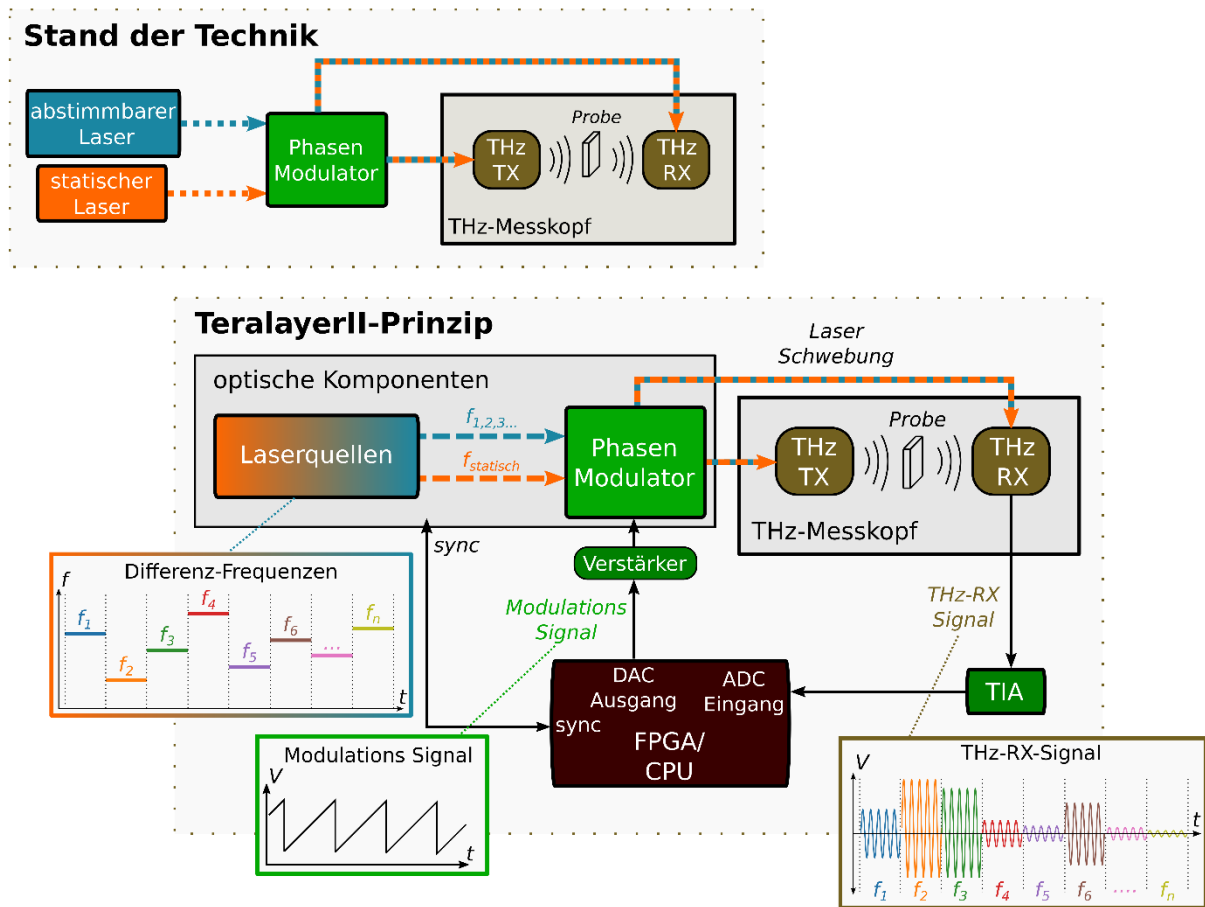


Abbildung 1 (oben) Aktueller Stand der Technik der optoelektronischen, kohärenten Dauerstrich-THz-Spektroskopie mittels zwei Laser, Phasenmodulator und THz-Messkopf. (unten) Messaufbau des TeralayerII-Prinzips mit optischen Komponenten, Elektronik, FPGA und THz-Messkopf. Zusätzlich gezeigt ist der Signalverlauf der Laserquellen, das Modulations-Signal des Phasenmodulators sowie dem schematischen Signalverlauf für das Empfangs-Signal am THz-Empfänger (RX) für das neu entwickelte Messkonzept.

Zur Realisierung dieses Prinzips werden folglich zwei Laser benötigt, welche zyklisch abstimmbar sind. Zusätzlich ist eine Signalquelle benötigt, welche den Phasenmodulator betreibt. Weiter muss eine Möglichkeit zur Detektion des Empfänger-Stroms geschaffen werden. Idealerweise erfolgt die Ansteuerung der Laser, sowie die Ansteuerung des Phasenmodulators synchron zur Detektion des Empfänger-Stroms, da andernfalls die Rekonstruktion der Messdaten deutlich erschwert wird.

In Abbildung 1 ist im unteren Schaubild der entwickelte Messaufbau des TeralayerII-Prinzips vereinfacht dargestellt. Analog zur herkömmlichen kohärenten Dauerstrich-THz-Spektroskopie werden zwei Lasersignale zur Erzeugung der optischen Differenzfrequenz miteinander überlagert und auf einen THz-Sender und -Empfänger geführt. Um Messraten im Kilohertz-

Bereich zu erhalten wird die Anzahl der erzeugten Differenzfrequenzen stark reduziert. Die Laserquellen erzeugen zwei voneinander getrennte Signale, welche mittels Phasenmodulator moduliert und zum THz-Messkopf geführt werden.

Als zentrale Recheneinheit wird ein System-On-Module (SoM) verwendet, welches ein System-On-Chip (SoC) enthält, welcher einen FPGA mit einer Dual-Core CPU auf einem Chip vereint. Zusätzlich ist ein 2-Kanal Analog-Digital-Wandler (ADC) sowie ein 2-Kanal Digital-Analog-Wandler (DAC) auf dem SoM integriert und parallel an den SoC angebunden. Des Weiteren besitzt das SoM Peripherie-Schnittstellen zur Steuerung und Datenübertragung via Ethernet. Die Ansteuerung des Phasenmodulators erfolgt nun mit Hilfe des integrierten DACs auf dem SoM. Die am DAC ausgegebene Spannung wird durch eine Verstärkerschaltung auf den für den Phasenmodulator benötigten Spannungsbereich verstärkt. Mit dem ADC des SoMs erfolgt die Detektion des THz-Empfängerstroms synchron zur Signalerzeugung, da beide Komponenten mit demselben Takt betrieben und vom FPGA aus gesteuert werden. In der Abbildung ist schematisch der Signalverlauf der Laserquellen gezeigt. Die Frequenz-Stufen resultieren aus der Differenz der beiden emittierenden Laser der Laserquelle. Das Modulationssignal des Phasenmodulators hat eine Sägezahnform, sodass die Phase eine lineare Änderung erfährt. Das zu erwartende THz-Signal am Empfänger ist unten rechts im Schaubild für die diskreten Frequenzen schematisch dargestellt.

3. Validierung des TeraLayerII-Messkonzepts mittels kommerzieller Laserquellen

Aufgrund von pandemiebedingten Fertigungsverzögerungen der photonisch integrierten Laserchips für das TeraLayerII-Messkonzept wurde eine initiale Validierung des Konzepts mit kommerziellen Laserquellen und einem fasergekoppelten Phasenmodulator umgesetzt. Diese Komponenten wurden bereits in vorherigen Veröffentlichungen verwendet, wodurch sich eine gute Vergleichbarkeit des TeraLayerII-Messkonzepts zum etablierten Stand der Technik ergibt [1]. Diese Validierung ermöglicht die Abfederung von gleich mehreren Nachteilen welche aufgrund der Fertigungsverzögerung der Laserchips auftreten. So kann z.B. die benötigte Elektronik- und FPGA-Entwicklung für das TeraLayerII-Messkonzept und die Datenerfassung bereits unabhängig von den Laserchips erfolgen und anhand der kommerziellen Laserquellen validiert werden. Gleichzeitig kann bei dem Projektpartner UMR mit den aufgenommenen Messdaten die Entwicklung und eine erste Validierung des Algorithmus zur Schichtdickenbestimmung durchgeführt werden. Des Weiteren bieten diese Validierungsmessungen auch eine Aussagekräftige Vergleichsmöglichkeit für die im weiteren Projektverlauf gefertigten photonisch integrierten Laserchips.

In Abbildung 2 ist ein Zeitdiagramm dargestellt, welches eine Messperiode des TeralayerII-Prinzips mit den kommerziellen Laserquellen zeigt. Einer der Laser (*WaveSource*) kann auf acht vordefinierte Frequenzen eingestellt werden und diese zyklisch mit 100 μ s pro Frequenzpunkt anfahren. Der zweite Laser wird auf eine statische Frequenz eingestellt. Die THz-Frequenzpunkte ergeben sich so aus dem Betrag der Differenzen der beiden Laserfrequenzen. Bei insgesamt acht verschiedenen Frequenzpunkten ergibt sich so Messdauer von 800 μ s und damit eine Messfrequenz von 1,25 kHz.

Die Ansteuerung des Phasenmodulators erfolgt über das FPGA-Board. Eine Look-up Table auf dem FPGA enthält die zuvor bestimmten, optimalen Spannungswerte zur Ansteuerung

des Phasenmodulators mittels Sägezahn für eine möglichst lineare Änderung der Phase. Mit einer Rate von 12,5 MHz werden die Spannungswerte des Look-up Table am DAC ausgegeben. Dies sorgt bei einer Auflösung von 100 Werten in einer Modulationsrampe für eine Modulationsfrequenz von 125 kHz. Über einen Frequenzpunkt hinweg ergeben sich so 12,5 Modulationsperioden pro THz-Frequenzpunkt. Das THz-Signal am Empfänger liegt bei der Frequenz der vorgegebenen Phasen-Modulation, somit erwarten wir eine Sinusschwingung mit einer Frequenz von 125 kHz. Die Auswertung des Empfängersignals erfolgt mit dem ADC auf dem FPGA-Board mit einer Abtastrate von 12,5 MHz. So erhalten wir 100 gemessene Messwerte pro Modulationsperiode, was ausreichend viele Punkte zur anschließenden Schichtdickenbestimmung sind.

Zur Synchronisation mit der Datenerfassung wird ein Synchronisations-Trigger des abstimmbaren Lasers am FPGA-Board über einen zweiten ADC-Kanal eingelesen. Dies ermöglicht später die Zuordnung zwischen des gemessenen Stroms am THz-Empfänger und des THz-Frequenzpunktes.

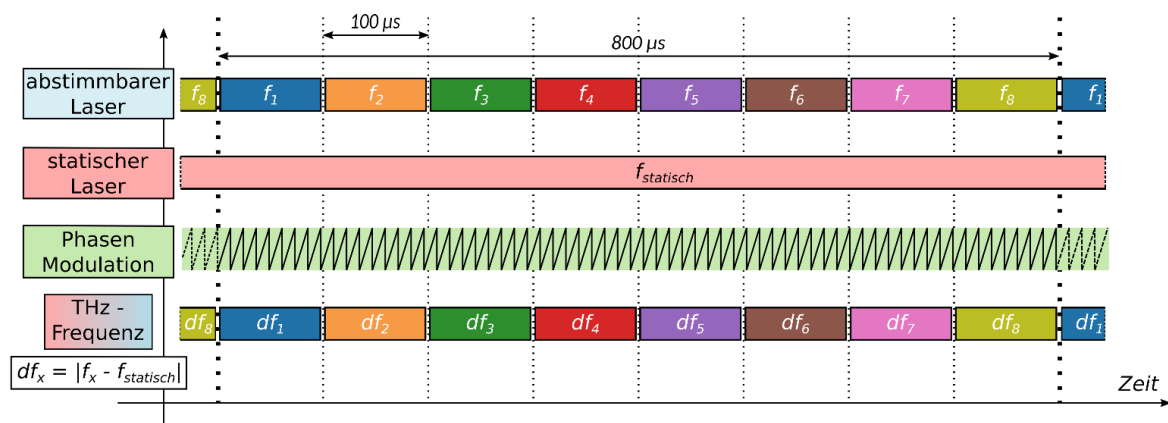


Abbildung 2: Schematisches Zeitdiagramm für das TeraLayerII-Messkonzept anhand des Validierungsschemas mit zwei kommerziellen Laserquellen und einem fasergekoppelten Phasenmodulator. Dargestellt ist eine Messperiode mit acht THz-Frequenzen, festgelegt auf 800 µs (dickgestrichelte Linien). Jede der acht THz-Frequenzen ist über einen Zeitraum von 100 µs aktiv (dünn gestrichelte Bereiche), die THz-Frequenz ergibt sich direkt aus der Differenz zwischen statischem und abstimmbarem Laser (farblich hervorgehoben). Für die Detektion von THz-Amplitude und -Phase muss zusätzlich der Phasenmodulator mit einer Spannungsrampe betrieben werden (Sägezahnförmiges Signal).

Die entwickelte Steuerungselektronik kann problemlos erweitert werden und im nächsten Schritt zusammen mit dem photonisch integrierten Chip verwendet werden.

3.1. Charakterisierung der kommerziellen Laserquelle

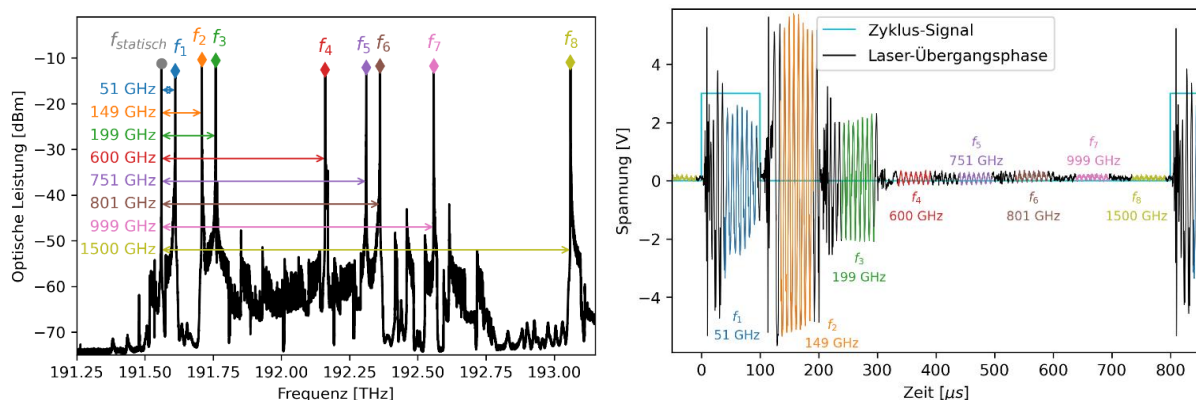


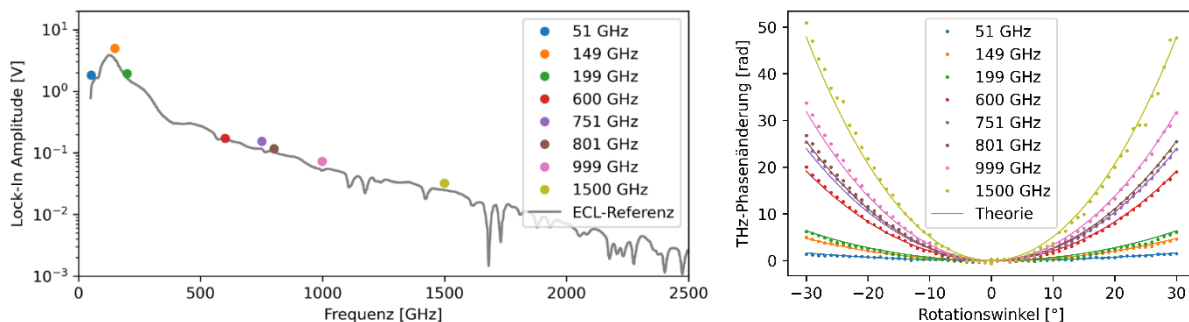
Abbildung 3: (links) Gemessene optische Spektren der kommerziellen Laserquellen während der sprunghaften Ansteuerung von 8 verschiedenen Frequenzen mit der abstimmbaren Laserquelle mit eingezeichneten Differenzfrequenzen (farbig) zur statischen Laserquelle (grau). (rechts) Zeitabhängiges Messsignal bei der Ansteuerung von 8 THz-Frequenzen (farbig) für je

100 μ s. Das Zyklus-Signal markiert die Wiederholungsrate der Messung nach 800 μ s, die schwarzen Signalverläufe zeigen Übergangsphasen der Laser-Frequenzänderung auf.

Zur Validierung des Messschemas mit den kommerziellen Lasern werden zunächst die optischen Spektren der Laserquellen untersucht. In Abbildung 3 (links) sind die gemessenen optischen Spektren der Laserquellen bei einer Wiederholrate der acht Frequenzstufen von 800 μ s gezeigt. Zusätzlich sind auch die resultierenden THz-Frequenzen eingezeichnet, welche sich aus der Differenz der einzelnen Frequenzpunkte f_1 bis f_8 zur Frequenz des statischen Lasers $f_{statisch}$ ergeben. Die Sockel neben den Leistungsmaxima im Spektrum lassen sich mit dem Einschwingvorgang des Lasers erklären. Das verwendete Messgerät zur Aufzeichnung der optischen Spektren misst kontinuierlich und zeichnet so auch den Sprungvorgang des Laser von einem auf den nächsten Frequenzpunkt auf, dies führt zu erhöhten optischen Leistungen auch außerhalb der 9 gewünschten Laser-Emissionslinien. Für jede Emissionslinie liegt das optische Signal-zu-Rausch-Verhältnis (OSNR) auch unter Berücksichtigung der Übergangsphasen bei >30 dB.

3.2. Charakterisierung des Terahertz-Messsystems basierend auf kommerziellen Laserquellen

Im nächsten Schritt wird jetzt das in Abbildung 1 gezeigte Gesamtsystem untersucht. Dazu wird der Strom am THz-Empfänger mittels Transimpedanzverstärker (TIA) in eine Spannung



gewandelt, welche vom ADC synchron zum Betrieb der Phasenmodulation eingelesen wird. Auf dem zweiten Kanal wird das Zyklus Signal des abstimmbaren Lasers zur Synchronisation der Messdaten eingelesen. In Abbildung 3 (rechts) ist das gemessene THz-Signal bei Ansteuerung von 8 THz-Frequenzen über die Zeit aufgetragen. Hier sind die in Abbildung 3 (links) gezeigten Laser-Frequenzen als THz-Signal sichtbar. Das THz-Signal folgt in der Frequenz dem Modulationssignal des Phasenmodulators und so ergibt sich eine Sinusschwingung mit 125 kHz. Der blaue Rechteckpuls deutet den Synchronisationstrigger des abstimmbaren Lasers an und verdeutlicht so die Wiederholungsrate des Laserzyklus von 800 μ s. An den Übergangsphasen des Lasers weicht das gemessene Signal von der erwarteten Sinusschwingung ab. Zur korrekten Auswertung der THz-Amplitude und –Phase werden im Folgenden nur die farblich markierten Bereiche nach Ende des Laser-Einschwingvorgangs betrachtet.

Abbildung 4: (links) Ausgewertete THz-Amplitude des zeitabhängigen Messsignals für die 8 diskreten THz-Frequenzen bei einer Messung über insgesamt 800 μ s. In grau hinterlegt ist ein gemessenes Referenzsignal, aufgenommen mit kontinuierlicher Abstimmung von Lasern mit externer Kavität (engl.: external cavity laser, ECL). (rechts) Detektierte THz-Phasenänderung durch eine in Transmission gemessene 30 mm Polyethylen-Probe mit hoher Dichte (engl.: high density polyethylene, HDPE) bei verschiedenen Rotationswinkeln der Probe relativ zur einfallenden THz-Strahlung zusammen mit der theoretisch erwarteten Phasenänderung. Die gute Übereinstimmung von Theorie und Messung verdeutlicht die Fähigkeit zur Schichtdickenevaluierung von Materialproben mit dem TeraLayerII-Messkonzept.

Zur Bestimmung der THz-Amplitude und –Phase aus den gemessenen Spannungsverläufen wird eine Lock-In Auswertung angewendet. Abbildung 4 (links) zeigt die THz-Amplitude aus einer einzelnen Messung der 8 Frequenzpunkte innerhalb von 800 μ s im Vergleich zu einer

herkömmlich aufgenommenen, kontinuierlichen Amplitude. Bis auf geringfügige Abweichungen bedingt durch die verwendeten verschiedenen Komponenten stimmen die gemessenen Amplituden sehr gut mit der Referenz überein. Dies bestätigt die Funktionalität der entwickelten Signalansteuerung, sowie die korrekte Bestimmung der THz-Amplitude mit dem TeraLayerII-Messkonzept.

Zur Validierung der THz-Phase wird eine Probe mit bekannten Materialparametern (Dicke und Brechungsindex) in den THz-Strahlengang eingefügt und relativ zum einfallenden Signal rotiert. Die Rotation der Probe bedeutet eine Änderung der Laufzeit des THz-Signals, welche sich in einer Phasenänderung in den aufgenommenen Signalen ausdrückt. Abbildung 4 (rechts) zeigt die gemessene Phasenänderung der 8 THz-Frequenzen bei einer Rotation einer 30 mm Polyethylen Probe mit hoher Dichte (engl.: high density polyethylene, HDPE) von -30° bis $+30^\circ$ zusammen mit dem aus den Materialparametern bestimmten theoretischen Verlauf der Phasenänderung. Die Messdauer je Frequenzpunkt beträgt wie zuvor nur 100 μs . Auch hier zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen Signale mit dem erwarteten Verlauf, geringfügige Abweichungen treten durch die manuelle Rotation der Probe auf. Mit dieser Messung ist die Fähigkeit zur Bestimmung einer Materialbedingten Phasenänderung des THz-Signals bei Kilohertz-Messraten mit Hilfe des TeraLayerII-Messkonzepts erfolgreich validiert.

3.3. Messdatenaufnahme an Validierungsproben

Mit diesem Messschema wurden die im Projekt zusammengestellten Probekörper mit dem optimierten Reflexionsmesskopf vermessen. Die Rohdaten wurden am HHI aufgenommen und vorverarbeitet. Anschließend wurden sie zur Schichtdickenauswertung an die UMR geschickt. Die Ergebnisse können dem Projektbericht der UMR entnommen werden.

3.4. Fazit zur Validierung des TeraLayerII-Messkonzepts

Mit diesen Ergebnissen ist die Funktionsweise des TeraLayerII-Messkonzepts anhand von kommerziellen Komponenten bestätigt. Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung im Vergleich mit der Theorie und dem aktuellen Stand der Technik. Gleichzeitig bestätigen die Messergebnisse die erfolgreiche Implementierung der SoM-basierten Datenausgabe und -Erfassung, sowie anschließende Signalverarbeitung und bieten damit eine gute Grundlage für die Implementierung des photonisch integrierten TeraLayerII-Messsystems.

4. Photonisch integrierter Laserchip mit diskreten Lasern

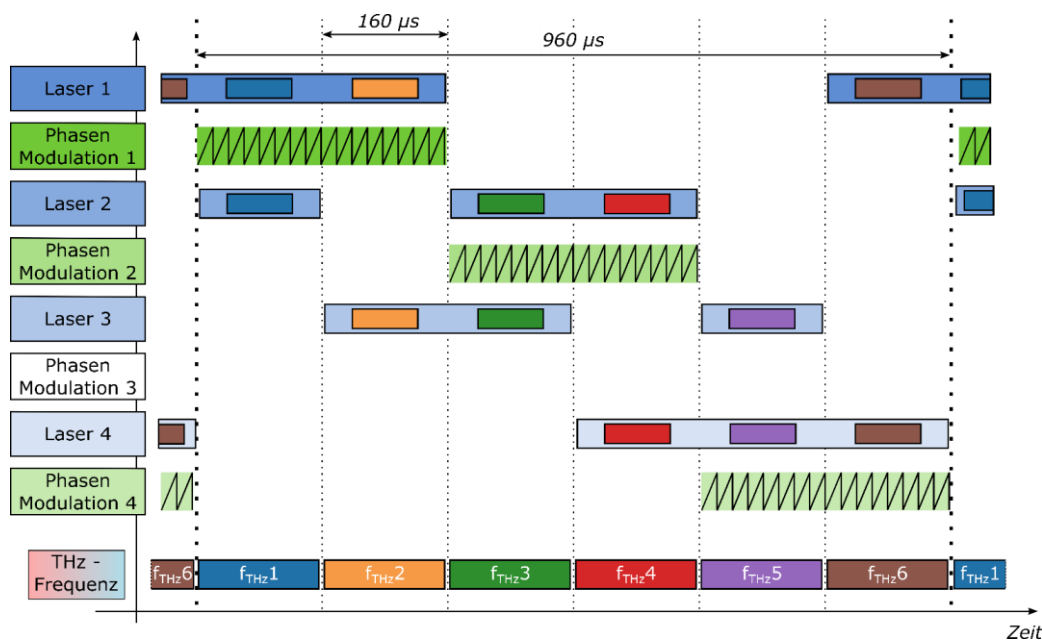


Abbildung 5: Zeitdiagramm für die Umsetzung des TeraLayerII-Messkonzepts anhand des photonisch integrierten Laserchips mit vier DFB-Lasern. Die Periode einer Messung ist auf $960 \mu\text{s}$ festgelegt (dickgestrichelte Linien). Die einzelnen Frequenzen sind für je $160 \mu\text{s}$ aktiv (dünn gestrichelte Bereiche). Für jeden der 6 Frequenzschritte wird eine andere Kombination von zwei der vier DFB-Lasern aktiv-geschaltet (farblich hervorgehoben). Um die THz-Amplitude und -Phase gleichzeitig bestimmen zu können muss zusätzlich je ein Phasenmodulator zugehörig zu einem der aktiven Laser betrieben werden (Sägezahnförmige Signale). Das Zeitdiagramm wurde hinsichtlich einer möglichst geringen Anzahl an Schaltvorgängen optimiert, der Phasenmodulator des dritten Laser wird dadurch nicht benötigt.

Um das TeraLayerII-Messkonzept mit dem photonisch integrierten Laserchip umzusetzen sollen vier statische Laserquellen verwendet werden. Aus der Kombination von je zwei der vier Laser lassen sich insgesamt 6 verschiedene THz-Frequenzen erzeugen. Um die Kombination aller Laser-Paare bei gleichzeitiger Phasenmodulation am Sender-Ausgang des Laserchips zu ermöglichen benötigt der integrierte Chip an jedem Laser einen Phasenmodulator. Abbildung 5 zeigt das schematische Zeitdiagramm für die Umsetzung des Messkonzepts auf Basis von vier statischen Laserquellen bei einer Messrate $>1 \text{ kHz}$. Zusätzlich zur Erfassung der Messdaten und der Ausgabe der Modulationsrampe muss die Steuerungselektronik nun auch die Ansteuerung der Laserquellen, sowie die Auswahl des aktiven Phasenmodulators übernehmen. Um einen möglichst geringen Einfluss aus Schaltvorgängen zu erhalten wurde die zeitliche Anordnung der aktiven Laser- und Phasenmodulatoren so gewählt, dass die geringstmögliche Anzahl an Schaltvorgängen benötigt wird.

4.1. Erste Iteration des photonisch integrierten Laserchips

Um sich der Komplexität der photonisch integrierten Laserchips für das TeraLayerII-Messkonzept schrittweise anzunähern wurden die Chips der ersten Iteration nur mit den für die Funktionalität notwendigen on-Chip Bauteilen entworfen. Hierbei wurde im ersten Design auf die on-Chip Wellenlängenmonitore und variablen optischen Abschwächer für das selektive Ein- und Ausschalten der Laserquellen verzichtet. Mit Hilfe eines externen Monitorings der Lasersignale und einem direkten Ein- und Ausschalten der Laserquellen ist auch dieses reduzierte Design in vollem Umfang für das TeraLayerII-Messkonzept nutzbar. Gleichzeitig bietet dieses Design eine bessere Möglichkeit die Funktionalität der photonisch integrierten Laserquellen gegenüber dem aktuellen Stand der Technik zu bewerten, bevor in der zweiten Iteration ein Design mit der vollen Komplexität der Chips aufgesetzt wird.

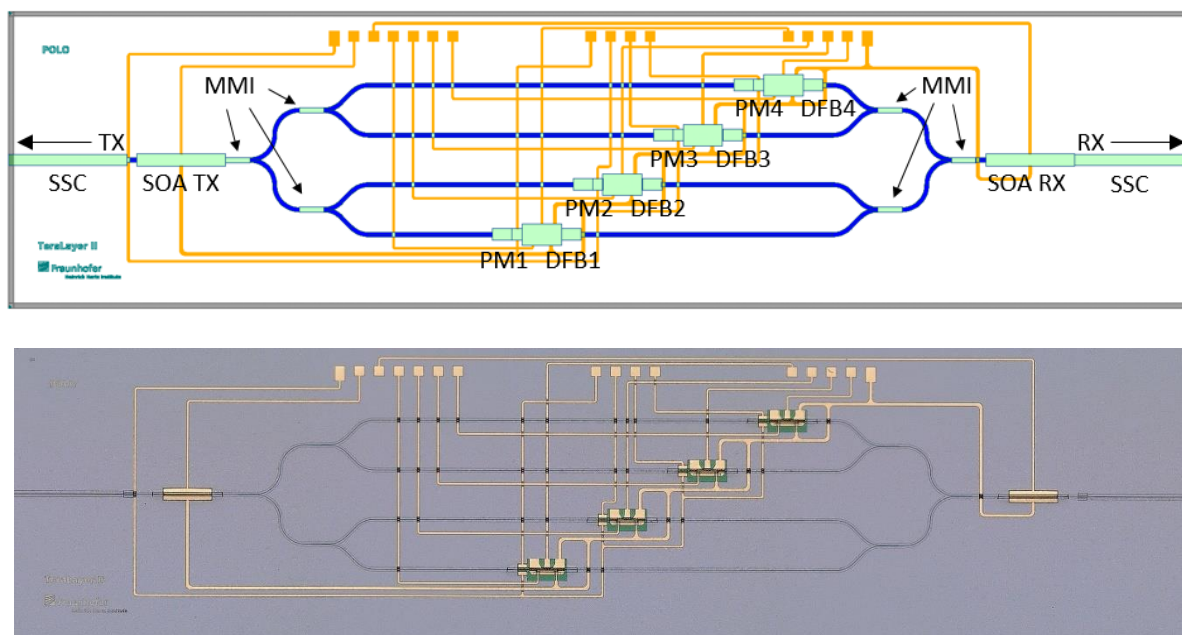


Abbildung 6: (oben) Design des photonisch integrierten Laserchips zur Erzeugung und Modulation der optischen Signale im TeraLayerII-Messkonzept. Vier DFB Laser (DFB1-4) mit jeweils einem optischen Phasenmodulator (PM1-4) werden über optische Wellenleiter (blau) zur linken und rechten Seite des Chips mit Multimoden Interferometern (MMIs) überlagert. Zwei optische Halbleiterverstärker (engl.: semiconductor optical amplifier, SOA) verstärken die optischen Signale bevor sie Richtung THz-Sender (TX) und -Empfänger (RX) aus dem Chip ausgekoppelt werden. Zur Kopplung in eine Glasfaser wird der Durchmesser der optischen Mode an der Chipkante aufgeweitet (engl. spot size converter, SSC). Zur elektrischen Kontaktierung der aktiven Bauelemente dienen Leiterbahnen und Kontaktflächen (orange). (unten) Mikroskop Aufnahme des gefertigten photonisch integrierten Laserchips mit vier DFB-Lasern.

Abbildung 6 (oben) zeigt das Design der ersten Iteration für den photonisch integrierten Laserchip zur Umsetzung des TeraLayerII-Messkonzepts. Den Kern des Chips bilden die vier DFB (engl.: distributed feedback) Laserquellen an welche jeweils ein optischer Phasenmodulator (PM) angeschlossen ist. Dieser Aufbau ermöglicht es das optische Signal für den THz-Senderpfad zur linken Seite des Chips mit einer Phasemodulation zu versehen, während das gleiche optische Signal zur rechten Seite des Chips als Referenz ohne zusätzliche Modulation für den THz-Empfängerpfad genutzt werden kann. Die vier DFB-Laser werden in beiden Signalpfaden durch Multimoden-Interferometer (engl.: multi-mode interferometer, MMI) überlagert und vor der Auskopplung aus dem Chip durch einen optischen Halbleiterverstärker (engl.: semiconductor optical amplifier, SOA) verstärkt. Für die Kopplung der Signale in eine Glasfaser werden die Wellenleiter zum Chip Rand hin verbreitert, wodurch eine Anpassung des Modendurchmessers an die Glasfaser erfolgt (engl.: spot size converter, SSC). Jeder Laser verfügt über einen Heizdraht, mit welchem die emittierende Wellenlänge des Lasers über einen feinen Bereich abgestimmt werden kann. Insgesamt ergeben sich auf diesem Design 14 aktive Komponenten (DFBs, Heizdrähte, PMs und SOAs). Jedes aktive Bauteil benötigt eine Verbindung an die optischen Wellenleiter (engl. butt joint), die Anzahl dieser passiven Übergänge beläuft sich auf 12. Zusammen mit den SSCs und MMIs beläuft sich die Gesamtzahl der passiven Komponenten (abgesehen von den eigentlichen Wellenleitern) in den optischen Signalpfaden auf 20.

Abbildung 6 (unten) zeigt eine Mikroskop Aufnahme des gefertigten Laserchips. Vor dem Aufbau des Chips auf eine Wärmesenke werden alle aktiven Komponenten auf ihre Funktionalität, sowie die generelle Funktionalität des gesamten Designs überprüft. Abbildung 7 (links) zeigt die Strom-Spannungs-Charakteristik der 14 aktiven Bauteile auf dem Chip, alle gemessenen Verläufe entsprechen den Erwartungen: Für die DFBs, PMs und SOAs ist die

erwartete Dioden-Charakteristik erkennbar, für die Heizdrähte ist ein ohmsches Verhalten sichtbar. Im Falle der PMs und DFBs treten Abweichende Ströme an den verschiedenen Bauteilen auf, diese lassen sich mit den längeren elektrischen Zuleitungen auf dem Chip und damit verbundenen größeren ohmschen Verlusten erklären. Für die Heizdrähte ist dieses Verhalten nicht zu erkennen, da hier die Widerstände der Drähte gegenüber dem ohmschen Verhalten der Zuleitungen dominieren.

Für den DFB 1, die Heizdrähte und den PM 1 ist eine ‚Sättigung‘ des Stroms erkennbar, welche jeweils mit der eingestellten Strombegrenzung des Messgerätes übereinstimmt. Die sichtbare Sättigung ist entsprechend ein Messartefakt der Strombegrenzung, welche zur Vermeidung einer Beschädigung der Komponenten gewählt wurde.

Abbildung 7 (rechts) zeigt die mit einem optischen Spektrum Analysator gemessene Leistung im Bereich des optischen C-Bands für den einzelnen Betrieb jedes DFB-Lasers. Die Messungen bestätigen die Funktionalität des Designs und die emittierten Wellenlängen der Laser liegen im gewünschten Bereich für das TeraLayerII-Messkonzept. Die gezeigte optische Leistung jedes Lasers wurde an einem der zwei Chip-Ausgänge gemessen. Im TeraLayerII-Messkonzept sind immer jeweils zwei Laser gleichzeitig aktiv und werden über den Sender- und Empfänger-Pfad ausgekoppelt, in Summe ergibt sich für jede Laser-Kombination die gewünschte optische Ausgangsleistung von 10 dBm (10 mW, M3.1).

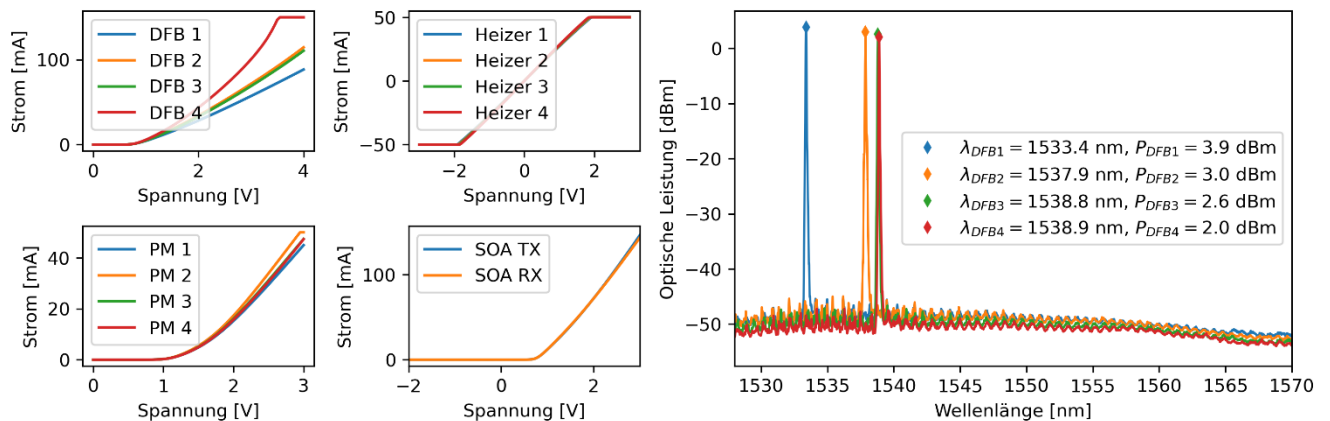


Abbildung 7: (links) Strom-Spannungs-Kennlinien der Komponenten des gefertigten Laserchips. (rechts) Gemessene optische Spektren der vier DFB Laser des gefertigten Laserchips mit jeweils eingezeichneter Emissionswellenlänge und optischer Leistung.

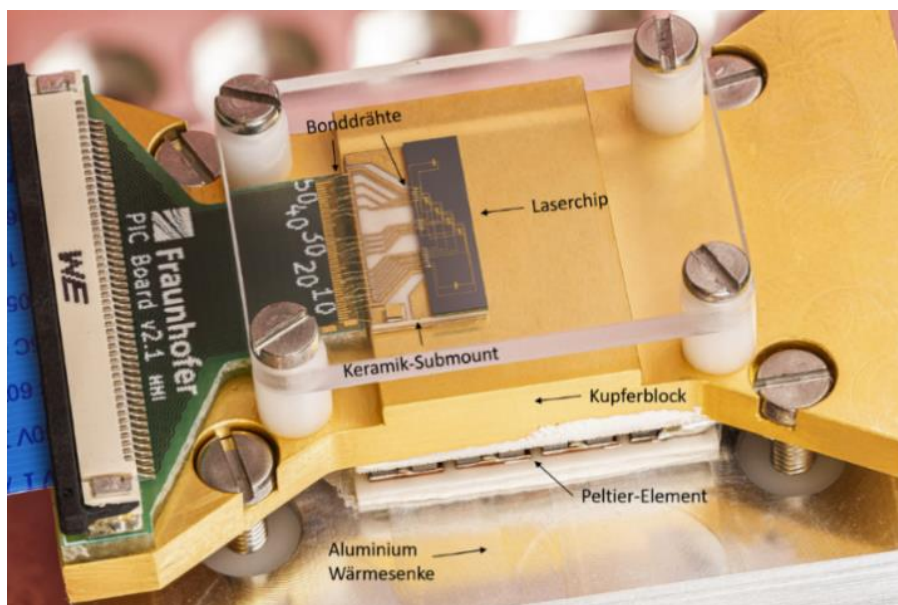


Abbildung 8: Aufbau des Laserchips auf Wärmesenke und Keramik-Submount mit elektrischer Anbindung über Bonddrähte.

Abbildung 8 zeigt ein Foto des Laserchips wie er für den Versand an den Projektpartner UMR über ein Keramik-Submount auf einer Wärmesenke aufgebaut wurde. Dieser Aufbau gewährleistet eine einfache elektronische Kontaktierung der aktiven Bauteile auf dem Chip und ermöglicht gleichzeitig eine präzise Temperaturstabilisierung des gesamten Devices. Außerdem ist der Laserchip robust auf der Wärmesenke fixiert und konnte so leicht an den Projektpartner für die ausführliche Charakterisierung versandt werden.

4.2. Zweite Iteration des photonisch integrierten Laserchips

Für die zweite Iteration des photonisch integrierten Laserchips wurde das Design um die im Projekt geplante integrierte Wellenlängenüberwachung (λ -lock) und variablen optischen Abschwächer (VOAs) zum selektiven Ein- und Ausschalten der Laseremission erweitert. Für die Wellenlängenüberwachung werden Wellenleiter-Interferometer mit Photodioden (PDs) an einen Ausgang der DFB-Laser angeschlossen. Dies bedingt, dass die optischen Signale für den THz-Sender und -Empfänger aus jeweils dem gemeinsamen zweiten Ausgang des Lasers gewonnen werden müssen. Daraus folgt wiederum ein komplexeres Wellenleiternetzwerk mit zusätzlichen Kreuzungen von Wellenleitern verschiedener Signalpfade. Abbildung 9 zeigt ein Foto des gefertigten Designs der zweiten Iteration. Die Gesamtzahl der aktiven Komponenten in diesem Design beläuft sich auf 26 (DFBs, Heizer, VOAs, PMs, SOAs, PDs), die passiven Komponenten, Wellenleiterübergänge und neuen Wellenleiter-Kreuzungen belaufen sich auf insgesamt 59 (SSCs, butt joints, MMIs und Wellenleiter-Kreuzungen).

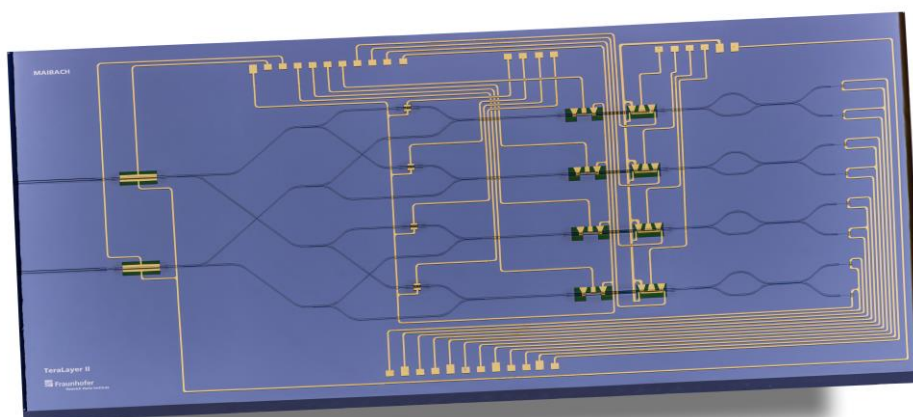


Abbildung 9: Foto des gefertigten Laserchips der zweiten Iteration mit zusätzlichen variablen optischen Abschwächern zum selektiven Ein- und Ausschalten der Laseremission, sowie einer integrierten Wellenlängenüberwachung.

Auch die Laserchips der zweiten Iteration wurden analog zu den Chips der ersten Iteration hinsichtlich der Strom-Spannungs-Charakteristik der aktiven Bauteile, der grundlegenden Funktionsweise des Designs, sowie der integrierten Wellenlängenüberwachung charakterisiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Charakterisierung der Laser-Chips der ersten Iteration bei dem Projektpartner UMR wurde ersichtlich, dass die Komplexität und die hohe Anzahl der aktiven und passiven Komponenten des Chips sich nachteilig auf die Funktionalität im TeraLayerII-Messkonzept auswirkt. Um eine weiter gesteigerte Komplexität und den damit verbundenen enormen Mehraufwand in der ausführlichen Charakterisierung zu vermeiden wurden keine Chips der zweiten Iteration an den Projektpartner UMR verschickt. Stattdessen wurde auf ein alternatives Konzept mit minimaler Anzahl an aktiven und passiven Chip-Komponenten zurückgegriffen. Dieses Konzept basiert auf schnell abstimmbaren Lasern und wird unter 5 (Photonisch integrierter Laserchip mit zwei abstimmbaren Laserquellen) beschrieben. Am HHI wurde unterdessen im Rahmen einer Abschlussarbeit die FPGA-

basierte Ansteuerung und Regelung der in TeraLayerII entwickelten on-Chip Wellenlängenmonitore anhand der Laserchips der zweiten Iteration vorangetrieben.

4.3. Fazit zu photonisch integrierten Laserchips mit diskreten Lasern

Die photonisch integrierten Laserchips für das TeraLayerII-Spektrometer konnten trotz pandemiebedingter Fertigungsverzögerungen erfolgreich umgesetzt und grundlegend getestet werden. Für den Aufbau der Chips auf eine Wärmesenke und den Versand an den Projektpartner UMR konnte auf bestehende Konzepte und Know-How vom HHI zurückgegriffen werden. Die Charakterisierung der Laserchips bei dem Projektpartner UMR zeigte ungewünschte Wechselwirkungen der optischen Signale bedingt durch die hohe Anzahl an verschiedenen Komponenten und dem komplexen Wellenleiternetzwerk auf dem Chip. Die möglichen Fehlerquellen und der Aufwand zur Charakterisierung der Laserchips multiplizieren sich mit der Komplexität, bzw. der Anzahl an aktiven und passiven Bauteilen des Designs. Zur Vermeidung jeglicher unerwünschter Wechselwirkungen auf den Laserchips müssen die Designs in noch kleineren Schritten von sub-Designs bis hin zum gesamten Laserchip iteriert und ausführlich charakterisiert werden. Weil eine solche Vorgehensweise nach der pandemiebedingten Fertigungsverzögerungen und der Charakterisierung der ersten Laserchips im Rahmen des TeraLayerII-Projektes nicht mehr gewährleistet werden konnte wurde auf ein alternatives Konzept mit einem bestehenden Laserchip zurückgegriffen, welches diese kleinschrittigen Iterationen bereits durchlaufen hatte.

5. Photonisch integrierter Laserchip mit zwei abstimmbaren Laserquellen

Um die Anzahl der aktiven und passiven Komponenten des Laserchips auf ein Minimum zu reduzieren wird auf ein Device mit zwei schnell abstimmbaren „Sampled Grating“ (SG) DBR Laserquellen zurückgegriffen [2]. Die Erzeugung von verschiedenen THz-Frequenzen erfolgt analog zu dem Konzept mit den kommerziellen Laserquellen durch das schnelle Umschalten der Frequenz eines der beiden Laser (siehe Kapitel 3). Der zweite Laser kann stabil bei einer statischen Frequenz gehalten werden. Abbildung 10 zeigt ein Foto des Laserchips mit zwei schnell abstimmbaren Laserquellen zur Nutzung im TeraLayerII-Messkonzept. Die zwei abstimmbaren Laserquellen bestehen jeweils aus vier aktiven Sektionen, das Ausgangssignal der Laser wird in gewohnter Weise zu den beiden Signalausgängen hin mit dem jeweils anderen Laser überlagert. Trotz einer erhöhten Komplexität der einzelnen Laser beträgt die Anzahl der aktiven Komponenten hier nur 12 und damit weniger als im Design des Laserchips der ersten Iteration (14) und deutlich weniger als im Design des Laserchips der zweiten Iteration (26). Gleichzeitig sind in diesem Design auch die Anzahl der passiven Komponenten und Übergänge im Signalpfad auf ein absolutes Minimum von nur 16 reduziert. Für die Funktionalität der Wellenlängenüberwachung sind hier zwei zusätzliche Signalausgänge vorhanden, mit welchen die optischen Signale unabhängig von den Signalpfaden für den THz-Sender und –Empfänger beobachtet werden können. Die dazu benötigten zwei weiteren passiven Komponenten (SSCs) liegen nicht im direkten Signalpfad der eigentlichen Messsignale.

Trotz der verringerten Komplexität des PICs bietet diese Umsetzung gleichzeitig auch eine größere Flexibilität im TeraLayerII-Messkonzept. Je nach Bedarf der zu untersuchenden Probe können die gemessenen THz-Frequenzpunkte über einen großen Bereich durch Anpassung der Look-up Table variiert werden. Das heißt für eine Vielzahl an verschiedenen Messproben kann das gleiche System benutzt werden. Aus Herstellungssicht sind keine Design-Anpassungen nötig um verschiedene Proben zu adressieren, dies wirkt sich positiv auf die Kostenperspektive des Messsystems aus.

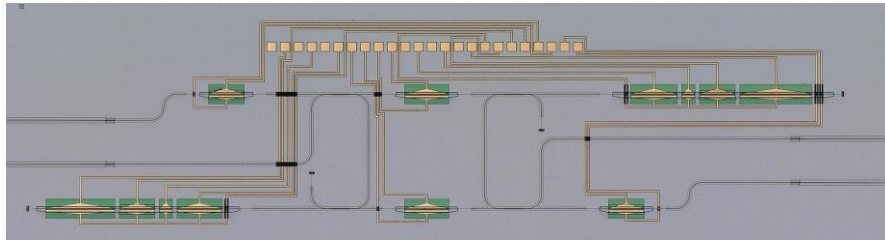


Abbildung 10: Foto des Laserchips mit zwei schnell abstimmbaren Laserquellen, optischem Netzwerk zur Phasenmodulation und Signalverstärkung, sowie zwei zusätzlichen Monitoring-Ausgängen zur Wellenlängenüberwachung.

5.1. Ansteuerung und Umsetzung des TeraLayerII-Messkonzepts

Die Ansteuerung dieses Chips für die Nutzung im TeraLayerII-Messkonzept ergibt sich in Analogie zu der in Kapitel 3 (Validierung des TeraLayerII-Messkonzepts mittels kommerzieller Laserquellen) gezeigten Vorgehensweise. Anstatt des kommerziellen, abstimmbaren Laser wird nun einer der auf dem PIC integrierten SG-DBR Laser zyklisch abgestimmt während der zweite SG-DBR Laser bei einer konstanten Frequenz betrieben wird.

Zum Abstimmen des SG-DBR Lasers müssen zwei Laser-Sektionen mit Spannungen betrieben werden. Dazu wird der in Abbildung 1 gezeigte Messaufbau um einen externen DAC erweitert, welcher über einer serielle Schnittstelle an das SoM (FPGA-Board) angeschlossen ist. Auf dem FPGA werden zwei Look-up Tables angelegt, welche die benötigten sechs Spannungspaare zum Anfahren der sechs vordefinierten Frequenzpunkte ermöglicht. Die Spannungswerte werden zuvor mittels Charakterisierungsmessungen bestimmt und können bei Bedarf zusätzlich während des Messbetriebs verändert werden. Der Phasenmodulator des zweiten SG-DBR wird wie zuvor durch den auf dem SoM integrierten DAC angesteuert. Da nun das Abstimmen des Lasers, die Ansteuerung des Phasenmodulators und das Auslesen des THz-Signals durch den ADC gemeinsam auf dem FPGA implementiert ist, entfällt die Notwendigkeit eines externen Synchronisationssignals.

In Abbildung 11 ist das schematische Zeitdiagramm des TeraLayerII-Messkonzepts an Hand des SG-DBR-PICs gezeigt. Im Vergleich zum Ansteuerungsschema des Laserchips der ersten Generation ist die Komplexität deutlich reduziert. Der Phasenmodulator kann dauerhaft betrieben werden, was die Stabilität des Systems auf Grund der nicht mehr benötigten Ein- und Ausschaltvorgängen deutlich verbessert. Außerdem sind nun beide Laser konstant aktiv und nur einer der beiden Laser wird zyklisch abgestimmt.

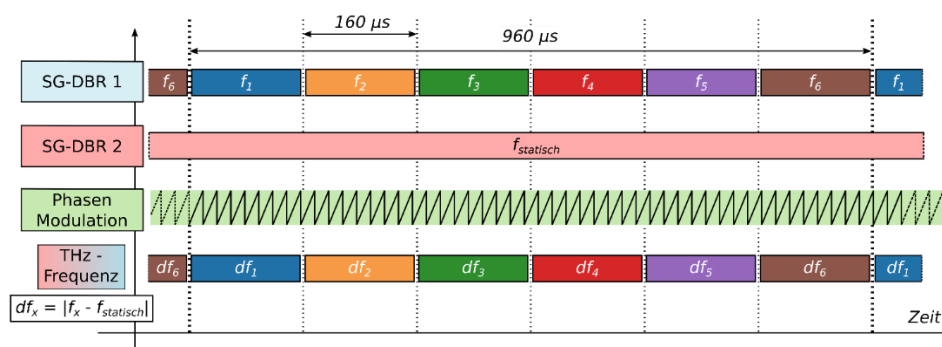


Abbildung 11 Schematisches Zeitdiagramm für das TeraLayerII-Messkonzept anhand des SG-DBR-PICs mit zwei auf dem Chip integrierten Lasern mit je einem Phasenmodulator. Dargestellt ist ein Messperiode mit sechs THz-Frequenzen, festgelegt auf $960 \mu\text{s}$ (dickgestrichelte Linien). Jede der sechs THz-Frequenzen ist über einen Zeitraum von $160 \mu\text{s}$ aktiv (dünngestrichelte Bereiche), die THz-Frequenz ergibt sich direkt aus der Differenz zwischen statischem (SG-DBR 2) und abstimmbarem Laser (SG-DBR 1) (farblich hervorgehoben). Für die Detektion von THz-Amplitude und -Phase muss zusätzlich einer der beiden Phasenmodulatoren mit einer Spannungsrampe betrieben werden (Sägezahnförmiges Signal).

5.2. Optische Charakterisierung des Laserchips

Zur Validierung des Messschemas mit den photonisch integrierten Laserquellen werden die gleichen Schritte wie in Kapitel 3 (Validierung des TeraLayerII-Messkonzepts mittels kommerzieller Laserquellen) durchgeführt. Abbildung 12 (links) zeigt die gemessenen optischen Spektren bei Ansteuerung der 6 THz-Frequenzen mit einer Wiederholungsrate von >1 kHz. In der Darstellung sind ebenfalls die relevanten Differenzfrequenzen für die THz-Erzeugung eingezeichnet. Im Vergleich zu dem optischen Spektrum der kommerziellen Laserquellen (siehe Abbildung 3) ist die optische Leistung abseits der gewünschten Emissionslinien mit den photonisch integrierten Laserquellen deutlich geringer ausgeprägt. Dies spricht für ein besseres und schnelleres Übergangsverhalten der photonisch integrierten Laserquellen und bestätigt die erfolgreiche Umsetzung der Laser-Ansteuerung über den FPGA.

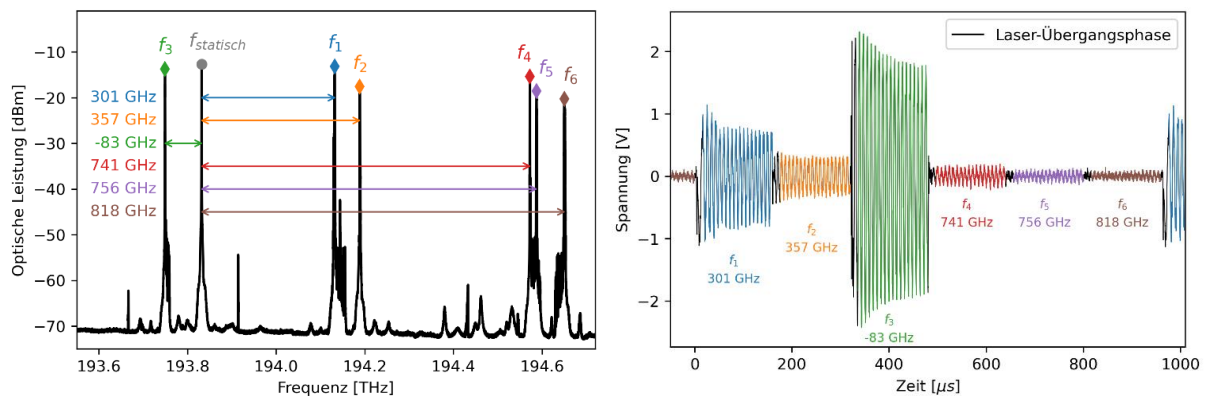


Abbildung 12: (links) Gemessene optische Spektren der photonisch integrierten Laserquellen während der sprunghaften Ansteuerung von 6 verschiedenen Frequenzen bei einer Wiederholungsrate >1 kHz mit eingezeichneten Differenzfrequenzen zur THz-Erzeugung. (rechts) Zeitabhängiges Messsignal bei der Ansteuerung von 6 THz-Frequenzen (farbig) für je $160 \mu\text{s}$. Die schwarzen Signalverläufe zeigen Übergangsphasen der Laser-Abstimmung auf.

5.3. Terahertz-Charakterisierung des TeraLayerII- Messsystems auf Basis des PICs

Abbildung 12 (rechts) zeigt das zeitabhängige Messsignal des THz-Empfängers bei Ansteuerung der 6 Frequenzen für je $160 \mu\text{s}$. Wie bereits zuvor aus dem gemessenen optischen Spektrum abgeleitet sind die Übergangsphasen der Laser-Frequenzänderung im Vergleich zu den kommerziellen Laserquellen (Abbildung 3) hier deutlich geringer ausgeprägt. Durch die gemeinsame Umsetzung der Lasersteuerung und Datenerfassung auf dem FPGA wird mit den photonisch integrierten Laserquellen kein zusätzliches Zyklus Signal benötigt, das System läuft inhärent synchron.

Die Ergebnisse der Validierung der THz-Amplitude und -Phase in Abbildung 13 (links) und Abbildung 14 (links) zeigen wieder eine gute Übereinstimmung der Messdaten mit den Referenzdaten und aus der Theorie erwarteten Verläufen. Für drei THz-Frequenzen (357 GHz, 756 GHz und 818 GHz) sieht man in Abbildung 13 (links) eine etwas größere Abweichung der gemessenen Amplitude im Vergleich zum Referenzsignal. Bei diesen Frequenzen wurde auch im optischen Spektrum eine geringere Leistung gemessen (siehe Abbildung 12 links), damit lässt sich die geringere Amplitude direkt auf den Arbeitspunkt des abstimmbaren Lasers zurückführen. Die Arbeitspunkte des Lasers werden über das Zusammenspiel der vier Laser-Sektionen eingestellt und können über eine entsprechende Anpassung der Look-up Table des FPGAs hinsichtlich der Amplitudenschwankung optimiert werden.

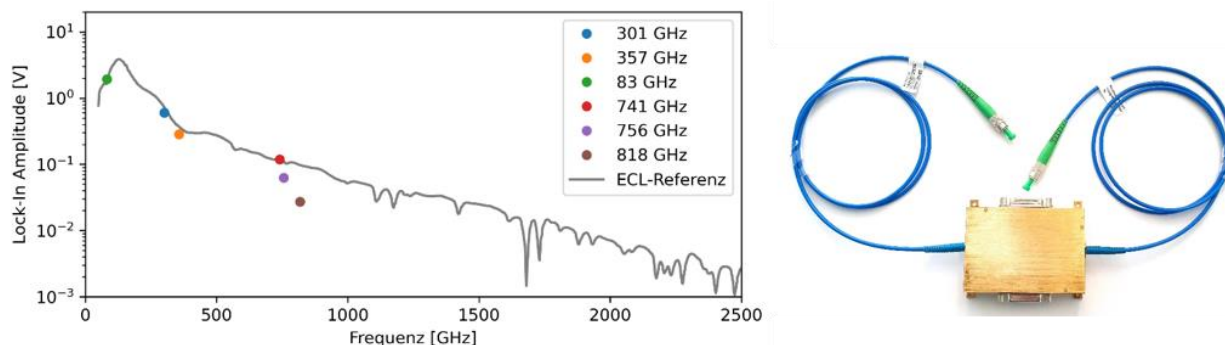


Abbildung 13: (links) Ausgewertete THz-Amplitude des zeitabhängigen Messsignals für die 6 diskreten THz-Frequenzen bei einer Messdauer von insgesamt 960 μ s. In grau hinterlegt ist ein gemessenes Referenzsignal, aufgenommen mit kontinuierlicher Abstimmung von Lasern mit externer Kavität (engl.: external cavity laser, ECL). (rechts) Foto des fasergekoppelten photonisch integrierten Laserchips im Package (M3.2).

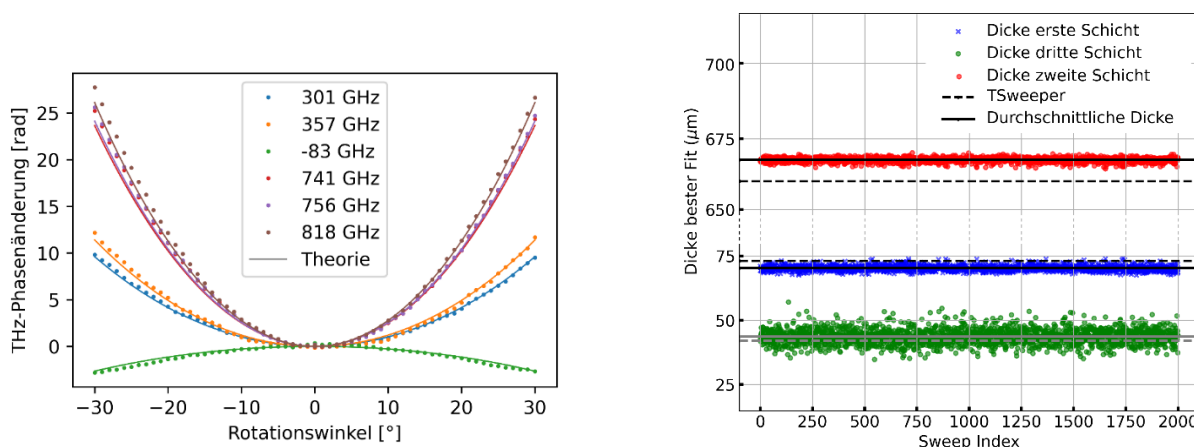


Abbildung 14: (links) Detektierte THz-Phasenänderung durch eine in Transmission gemessene 30 mm Polyethylen Probe mit hoher Dichte (engl.: high density polyethylene, HDPE) bei verschiedenen Rotationswinkeln der Probe relativ zur einfallenden THz-Strahlung zusammen mit der theoretisch erwarteten Phasenänderung. (rechts) Schichtdickenauswertung eine 3-Schichtprobe wie sie die UMR basierend auf 2000 Einzelmessungen (Sweeps) mit dem PIC durchgeführt hat. Es sind die dicken der drei Einzelschichten sowie als Referenz die Messung mit einem FMCW-Terahertz-System TSweeper gezeigt.

In einem letzten Schritt der Validierung wird wie zuvor in Abschnitt 3 eine Probe mit bekannten Materialparametern (Dicke und Brechungsindex) in den THz-Strahlengang eingefügt und relativ zum einfallenden Signal rotiert. Abbildung 14 (links) zeigt die gemessene Phasenänderung der sechs THz-Frequenzen bei einer Rotation der in Kapitel 3 verwendeten Probe. Die Messdauer je Messpunkt beträgt hier 160 μ s. Es zeigt sich auch hier eine gute Übereinstimmung der gemessenen Signale mit dem erwarteten Verlauf, geringfügige Abweichungen treten durch die manuelle Rotation der Probe auf.

Mit dieser Messung ist die Fähigkeit zur Bestimmung einer Materialbedingten Phasenänderung des THz-Signals bei Kilohertz-Messraten mit Hilfe des TeraLayerII-Messkonzepts und photonisch integrierten Laserquellen erfolgreich validiert.

5.4. Messdatenaufnahme im TeraLayerII-Messschema mit dem PIC

Mit diesem Messschema wurden die im Projekt zusammengestellten Probekörper mit dem optimierten Reflexionsmesskopf vermessen. Die Rohdaten wurden am HHI aufgenommen und vorverarbeitet. Anschließend wurden sie zur Schichtdickenauswertung an die UMR geschickt. Die Ergebnisse können dem Projektbericht der UMR entnommen werden. Exemplarisch zeigt Abbildung 14 (rechts) die Auswertung der Schichtdicke an einer Dreischichtprobe.

5.5. Fazit zu photonisch integriertem Laserchip für das TeraLayerII-Spektrometer

Die Ansteuerung und Umsetzung des TeraLayerII-Messkonzepts konnte erfolgreich für die Ansteuerung des photonisch integrierten Laserchips mit zwei abstimmbaren Laserquellen angepasst werden. Die Ergebnisse der optischen und THz-Charakterisierung bestätigen die gute Performance der Laserquellen, sowie die erfolgreiche Umsetzung der Laser-Ansteuerung via SoM mit FPGA und Look-up Table. Im Vergleich werden hier sogar teils bessere Ergebnisse als mit den kommerziell erhältlichen Laserquellen aus Abschnitt 3 (Validierung des TeraLayerII-Messkonzepts mittels kommerzieller Laserquellen) erreicht. Die Ergebnisse der Schichtdickenauswertungen bei Rekord-Messraten >1 kHz zeigen das enorme Potential der TeraLayerII-Technologie.

6. Reflexionsmesskopf

Ein entscheidender Faktor für die Qualität der Messdaten ist die Messgeometrie und damit verbunden der Messkopf (AP4.3). Er beinhaltet die THz-Sender und Empfangsmodule sowie optische Elemente wie Parabolspiegel, die den THz-Strahlengang bilden.

Es wurden verschiedene Geometrien von Stahldurchführungen und deren Einfluss auf die THz-Messung, insbesondere bei niedrigen Frequenzen, untersucht. Zu diesem Zweck wurden kollimierter Probeneinfall, schwache Fokussierung auf der Probe und Fokussierung mit mittlerer Strahldichte gewählt.

Dazu wurde ein Aufbau realisiert, bei dem die Fokussieroptiken leicht austauschbar sind. Da die Messung immer unter einem Winkel erfolgen muss, um den Sende- und Empfangsstrahlengang sauber zu trennen, muss bei Änderung der Fokusslänge auch der Messwinkel geändert werden. Zu diesem Zweck wurden die objektseitigen Spiegel drehbar gelagert. Der Vergleich der verschiedenen Strahlengangeometrien ergab, dass die fokussierte Geometrie die beste Signalstärke ermöglichte und die geringsten unerwünschten Seitenreflexionen an Bauteilkanten und Struktur verursachte. Dies bedeutet auch, dass die Stehwellen am geringsten sind. Dies ist für die Breitbandspektroskopie weniger problematisch, aber bei wenigen Frequenzen sind die Stehwelleneffekte nur schwer von den Probeneigenschaften zu unterscheiden und müssen daher minimiert werden. Aus diesem Grund wurden alle weiteren Messungen in der Reflexionsgeometrie mit einem probenseitigen Zwischenfokus durchgeführt.

Ein weiterer Einfluss wurde durch die THz-Absorption durch Wasserdampf in der Umgebungsluft festgestellt. Dabei handelt es sich um eine Vielzahl schmaler Absorptionslinien. In der konventionellen THz-Spektroskopie für die zerstörungsfreie Prüfung wird ein quasikontinuierliches Spektrum aufgenommen, so dass die Wasserdampfabsorptionslinien oft gut kompensiert werden. Bei dem hier entwickelten Schema mit wenigen Messfrequenzen muss darauf geachtet werden, dass keine der gewählten Frequenzen zu nahe an einer Absorptionslinie liegt. Dies kann in der späteren Anwendung entsprechend gewählt werden. Für die Entwicklung in diesem Projekt wäre dies jedoch eine zusätzliche Herausforderung und Fehlerquelle. Aus diesem Grund wurde der Messkopf kompakt konzipiert, so dass er komplett gekapselt werden kann. Dadurch ist es möglich, den gesamten THz-Strahlengang mit trockener Luft zu spülen. Dadurch können die Wasserdampfabsorptionslinien entfernt und als Störquelle eliminiert werden.

Bei den Versuchen mit wenigen Frequenzen wurde schnell deutlich, dass der Abstand der Probe zum Messkopf im Vergleich zur Referenzmessung die Datenauswertung stark beeinflusst. Die Datenauswertung der Phasenlage muss in der Lage sein, die Anzahl der 2-Pi-Phasendurchgänge zwischen den einzelnen Frequenzpunkten zu bestimmen. Wenn die Messpositionen von Referenz- und Probenmessung zu weit auseinander liegen, wird diese Bestimmung erheblich erschwert. Um sicherzustellen, dass Referenz- und Probenmessung zuverlässig an der gleichen Position erfolgen, wurde der Messkopf vertikal aufgebaut, so dass die Probe auf einem Tisch platziert werden kann. Die THz-Messung erfolgt dann von unten durch ein Loch im Tisch. Auf diese Weise kann jede Messung im gleichen Abstand und in

der gleichen Winkellage durchgeführt werden (M4.4). Es hat sich gezeigt, dass diese Messung eine entscheidende Hilfe bei der Auswertung der Daten darstellt.

7. Photoleiter als optoelektronische Terahertz-Emitter

In diesem Projekt wurden außerdem Photoleiterschichten entwickelt und evaluiert, welche eine Alternative zu die etablierten, aber deutlich aufwändigeren PIN-Dioden als dauerstrich-THz-Sender darstellen könnten. Durch ihren deutlich simpleren Aufbau sind Photoleiter potenziell einfacher und damit kostengünstiger herzustellen. Ihr Einsatz als THz-Sender könnte so zur Kostenreduktion der THz-Spektrometer beitragen.

Zunächst wurden photoleitende THz-Sender auf Basis von eisen-dotiertem InGaAs hergestellt. Die Photoleiter wurden in der HHI-MBE gewachsen und anschließend charakterisiert. Aus Serien der Wachstumsparameter wie der Dotierstoffkonzentration und der anschließenden Charakterisierung mittels Röntgenspektroskopie, Hall-Messung und der Bestimmung der zeitaufgelösten Ladungsträgerdynamik konnten das Material für die Verwendung als CW-THz-Sender optimiert werden. Anschließend werden die Schichten per Halbleitertechnologie zu photoleitenden Antennen weiterverarbeitet. Hierbei wurden unterschiedliche Kontakt- und Antennenstrukturen gefertigt, sodass aus dem Abgleich mit dem Modell eine für cw-Sender optimale Geometrie abgeleitet werden konnte (M4.2).

Diese derart optimierten Sender zeigen bereits in Chip-Messungen erwartungsgemäß eine verbesserte Ausgangsleistung im Vergleich zum Stand der Technik (tieftemperaturgewachsene InGaAs-Photoleiterschichten). Anschließend wurden die Chips in Module mit angepasster Versorgung- und Schutzelektronik gepackaged und erneut charakterisiert (M4.1). Dabei hat sich gezeigt, dass die Module mit Fe-dotiertem InGaAs als Photoleiter eine höhere Ausgangsleistung liefert als das herkömmliche Material aus Tieftemperatur-gewachsenem (LT-)InGaAs. Dennoch bleibt es immer noch hinter der Leistung der PIN-Dioden zurück.

Aus den Entwicklungen der Photoleiter für gepulste THz-Erzeugung ist Rhodium (Rh) als ein alternatives, vielversprechendes Material bekannt. Entsprechend soll auch dieser Dotierstoff evaluiert werden. Die HHI-MBE hat die nötige Ausstattung um dieses Material ebenfalls zu wachsen, und konnte es in früheren Test-Runs auch erfolgreich für die THz-Pulserzeugung herstellen. Auf gleiche Weise wie zuvor bei den Fe-dotierten Photoleitern wurden auch Rh-dotierte Photoleiterchips für den cw-Betrieb entwickelt. Diese Chips wurden entsprechend charakterisiert und in fasergekoppelte Module eingebaut und getestet. Anschließend werden die Betriebsparameter und Zerstörquellen für den Einsatz als Sender optimiert.

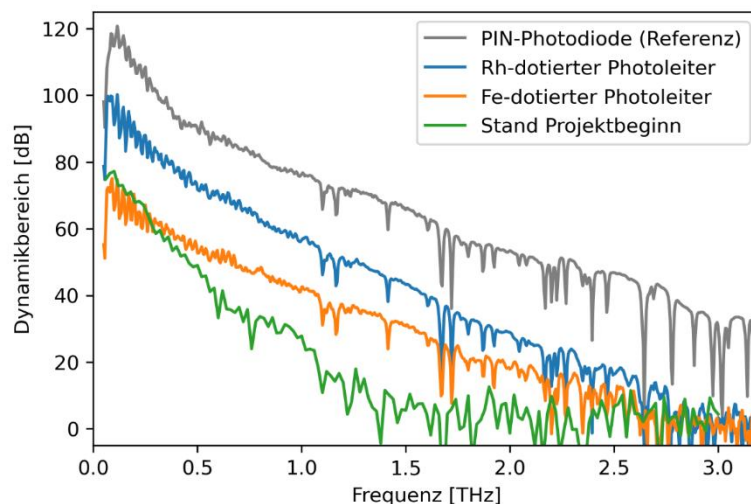


Abbildung 15: Vergleich des gemessenen Dynamikbereichs im THz-Signal bei Verwendung eines photoleitenden THz-Senders vor Beginn des TeraLayerII-Projektes (blau), mit den im Projekt entwickelten photoleitenden THz-Sendern mit Eisen-

(Fe) und Rhodium- (Rh) Dotierung (orange und grün) sowie einem state-of-the-art THz-Sender basierend auf einer ultraschnellen PIN-Photodiode (grau).

Durch umfangreiche Tests der Zerstörschwellen der Rh-dotierten Photoleiter konnte sichergestellt werden, dass sowohl die sichersten Betriebsparameter als auch die Parameter für kurzzeitige Spitzenleistungen gezielt angefahren werden können. Auf diese Weise konnten die im Modul gepackten Chips umfassend charakterisiert werden. Aus zeitbereichsspektroskopischen Messungen wurde erwartet, dass die Ausgangsleistung der Rh-dotierten Photoleiter um bis zu 10 dB höher sein kann als die der Fe-dotierten. Im Experiment bei optimierten Betriebsparametern konnte die Spitzenleistung sogar um 20 dB gesteigert werden (siehe Abbildung 15). Darüber hinaus ist ein deutlicher Anstieg der Ausgangsleistung über das gesamte Spektrum zu beobachten. Der Meilenstein M4.3 sieht vor mit den Photoleitern als cw-THz-Sender die Leistungswerte heutiger Photodioden zu erreichen. Trotz der deutlichen Verbesserung der Photoleiter und ihrer Ausgangsleistung konnte dieses Ziel nicht erreicht werden. Daher wurden die Validierungsmessungen im Projekt mit Photodioden durchgeführt.

Fazit: Die mit Übergangsmetallen dotierten Photoleiter Fe:InGaAs und Rh:InGaAs konnten erwartungsgemäß eine deutlich höhere spektrale Ausgangsleistung erreichen als die vor Projektbeginn üblichen tieftemperaturgewachsenen Photoleiter. Dennoch bleibt ihre Ausgangsleistung weiterhin hinter der von Photodioden zurück. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Empfänger führt auch die reduzierte Ausgangsleistung noch zu hohen Dynamikbereichen, die eine zufriedenstellende Messung ermöglichen können. In stark preisgetriebenen Szenarien, in denen ein reduzierter THz-Dynamikbereich akzeptabel ist, können diese Photoleiter erfolgreich als Sender eingesetzt werden und dazu beitragen, den Marktzugang zu sichern.

8. Applikationsuntersuchungen mit dem TeraLayerII-Messkonzept

8.1. Probensatz für die Validierung

Zur Validierung des TeraLayerII-Messkonzepts wurde ein umfangreicher Probensatz zusammengestellt, der typische Materialien und Dicken aus dem industriellen Umfeld berücksichtigt. Dabei wurden sowohl einschichtige Proben wie Platten aus unterschiedlichen Kunststoffen und Dicken als auch Mehrschichtsysteme aus Substraten mit typischen Beschichtungen zusammengestellt. Der komplette Probensatz wurde mittels THz-Zeitbereichsspektroskopie umfassend charakterisiert, um die dielektrischen Eigenschaften wie den Brechungsindex der Materialien im THz-Frequenzbereich zu bestimmen. Zusätzlich wurden die Proben mit dem aktuellen FMCW-THz-System untersucht. Dabei wurden die gleichen Sender und Empfänger sowie die gleiche THz-Optik wie bei den Validierungsmessungen verwendet. Durch diesen direkten Vergleich kann die Validierung besonders genau durchgeführt werden. Die Validierungsmessungen wurden mit den oben beschriebenen Konzepten durchgeführt. Die Rohdaten wurden wie oben beschrieben vorverarbeitet, so dass für jede Probe ein Amplituden- und Phasenwert für den Satz der Messfrequenzen ermittelt wurde. Die so aufbereiteten Messdaten wurden anschließend dem Projektpartner UMR zur Verfügung gestellt, anhand derer der Auswertalgorithmus getestet und validiert wurde. Die Ergebnisse können dem Projektbericht des Partners entnommen werden.

8.2. Proben aus der Industrie

Im Rahmen des Projekts konnte der Innovationsmentor ein KMU ausfindig machen, das eine dielektrische Beschichtung für die Herstellung von hochwertigen Medizinprodukten einsetzt.

Dabei handelt es sich um ein Zweischichtsystem mit Schichtdicken um 100 μm . Die Einhaltung der Schichtdicke ist dabei von entscheidender Bedeutung. Bisher werden die Bauteile in einem manuellen Prozess mittels Wirbelstrommessung geprüft, wobei nur die Gesamtdicke bestimmt werden kann.

Im Rahmen des Projektes hatten wir die Möglichkeit, Proben dieser Beschichtung zu untersuchen. In der konventionellen THz-Zeitbereichsspektroskopie zeigen die Proben deutliche Reflexe der äußeren Grenzflächen der Beschichtung, wobei die gemessene Signallaufzeit zwischen den Reflexen der Schichtdicke entspricht. Zusätzlich konnte eine schwache Signatur der Grenzfläche zwischen den beiden Randschichten identifiziert werden. Mit Hilfe von Mikroskopschnitten konnte die tatsächliche Schichtdicke mit der gemessenen Signallaufzeit korreliert werden, um den Brechungsindex der Materialien zu bestimmen. Dabei zeigte sich, dass sich die dielektrischen Eigenschaften der beiden Einzelschichten nur geringfügig unterscheiden. Dies erklärt das sehr schwache Signal von der Grenzfläche zwischen den beiden Schichten.

Anschließend wurde das TeraLayerII-Messschema an den Probekörpern validiert. Dazu wurden umfangreiche Messungen durchgeführt und die Messdaten zur Auswertung an den Projektpartner UMR geschickt. Details zur Auswertung können dem Bericht des Partners entnommen werden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden: Die Gesamtschichtdicke konnte mit der TeraLayerII-Methode gut und mit geringer Streuung bestimmt werden. Die Grenzfläche zwischen den beiden Einzelschichten konnte jedoch nicht eindeutig identifiziert werden. Dies ist wenig überraschend, da sie auch mit der hochoptimierten Zeitbereichsspektroskopie nur sehr schwach nachweisbar war. Für das KMU bedeutet dieses Ergebnis, dass das TeraLayerII-Schema eine interessante Möglichkeit darstellt, die Qualitätssicherung in der Produktion zukünftig von einem manuellen, berührenden Prozess auf einen vollautomatisierten, berührungslos messenden Prozess umzustellen. Das Unternehmen zeigte großes Interesse an den Projektergebnissen.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass das TeraLayerII Messschema ein vielversprechender Ansatz für kompakte und kostengünstige Schichtdickenmesssysteme ist. Trotz großer Herausforderungen durch die Komplexität des PIC und pandemiebedingten Verzögerungen konnte das TeraLayerII-Messschema auf dem PIC umgesetzt und in enger Zusammenarbeit mit der UMR validiert werden.

9.1. Abgleich der Ergebnisse mit den Projektzielen

Im Antrag wurden drei konkrete Projektziele definiert. Die angestrebte Messrate von 1 kHz wurde sowohl mit dem kommerziellen Laser als auch mit dem PIC für den kompletten Durchlauf aller Frequenzschritte nachgewiesen. Die avisierte Genauigkeit der Schichtdickenbestimmung $< 10 \mu\text{m}$ konnte ebenfalls gezeigt werden. Die angestrebte Reduktion des Gesamtsystempreises auf unter 27 k€ für Produktionslose von ca. 200 Stück ist ebenfalls realistisch. Damit wurden die Projektziele vollumfänglich erreicht.

9.2. Verwertungsabsichten

Die Projektpartner haben zu Projektbeginn eine gemeinsame Strategie zur wirtschaftlichen Verwertung der Projektergebnisse vorgelegt. Konkurrenzprodukte mit vergleichbarer Leistungsfähigkeit sind nicht bekannt. Eine Anpassung des Verwertungskonzeptes war daher während der Projektlaufzeit nicht erforderlich und wird wie geplant fortgeführt.

9.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Zu Projektbeginn gab es kein kommerzielles THz-Messsystem, das schnell genug für Inline-Messungen in der Produktion war. Einzelne Ansätze aus der Forschung, die hohe Messraten ermöglichen, hatten keine Aussicht auf Realisierung in einem akzeptablen Preissegment. Die photonische Integration in Kombination mit einem speziellen Messschema ist ein vielversprechender Ansatz, um diese Lücke zu schließen. Gleichzeitig ist die Entwicklung der dafür notwendigen PICs sehr aufwändig und komplex. Daher waren mehrere Iterationen von Design, Fertigung, Charakterisierung und Test notwendig, um ein funktionsfähiges System zu demonstrieren und die Projektziele zu erreichen. Der Aufwand und die Projektarbeit waren daher angemessen und notwendig.

9.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Projektergebnisse zeigen deutlich das große Potenzial der photonischen Integration für die Terahertz-Sensorik. In einem ersten Schritt werden die Projektergebnisse wissenschaftlich ausgewertet. Daraus werden konkrete weitere Schritte abgeleitet, die notwendig sind, um eine kommerzielle Verwertung zu ermöglichen. Es sind konkrete Aktivitäten geplant, die die Entwicklung von Terahertz-Systemen auf Basis der photonischen Integration vorantreiben. Parallel dazu werden die Konzepte zur Messung bei niedrigen Frequenzen potenziellen Kunden vorgestellt. Aus diesen direkten Gesprächen soll ermittelt werden, welche weiteren Schritte bis zur Produktreife notwendig sind. Gleichzeitig soll das Interesse der Industrie abgefragt und Kooperationen in Richtung einer gemeinsamen Produktentwicklung angeregt werden.

9.5. Während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Der Bedarf an schnellen und kostengünstigen THz-Messsystemen für das industrielle Umfeld wurde auch von anderen Stellen erkannt. Dies zeigt sich zum einen in einem gestiegenen Interesse potenzieller Kunden an dieser Technologie, zum anderen konnten auch andere Hersteller ihre Systeme verbessern, so dass auch dort höhere Messraten erreicht werden. Diese anderen Systeme basieren jedoch ausschließlich auf gepulster THz-Strahlung, die prinzipiell als nicht integrierbar gilt und daher nicht von der Kostenskalierung der photonischen Integration profitieren kann. Dies spiegelt sich auch in den Systempreisen wider, die nicht den in TeraLayerII angestrebten Preisbereich erreichen können. Damit gibt es nach wie vor kein Konzept, das bei diesen potenziellen Systemkosten eine vergleichbare Leistungsfähigkeit bietet.

9.6. Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses durch Mitarbeiter des Fraunhofer HHI

- **SPIE Europe in Strasbourg (F)**, eingeladener Vortrag, Lars Liebermeister, 09.04.2024, „*Advances in cw Terahertz Spectroscopy*“
- **OTST in Marburg (D)**, Vortrag, Lauri Schwenson, 11.04.2024, „*Frequency-Selective Continuous Wave Terahertz Spectroscopy at Kilohertz Measurement Rates*“

- **TransMIT workshop on „Modern Spectroscopic Techniques“ auf Elba (I)**, eingeladenener Vortrag, Lars Liebermeister, 03.06.2024, „*Photonic Integrated Circuits for Terahertz Sensing*“
- **Optica Sensors in Toulouse (F)**, eingeladenener Vortrag, Lars Liebermeister, 17.06.2024, „*Photonic integrated circuits for THz-Spectroscopy*“

Geplante Präsentationen:

- **IRMMW-THz 2024 in Perth (Aus)**, Konstantin Wenzel, September 2024, „*Sparse cw-THz Spectroscopy at 1 kHz Measurement Rate*“

Geplante Veröffentlichungen in Fachzeitschriften:

Zu den unmittelbaren Projektergebnissen sind drei Veröffentlichungen in Fachzeitschriften geplant.

Literaturverzeichnis

- [1] L. Liebermeister, S. Nellen, R. Kohlhaas, S. Breuer, M. Schell, and B. Globisch, “Ultra-fast, High-Bandwidth Coherent cw THz Spectrometer for Non-destructive Testing,” *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, vol. 40, no. 3, pp. 288–296, 2019, doi: 10.1007/s10762-018-0563-6.
- [2] M.-H. Lee *et al.*, “Photonic integrated circuit with sampled grating lasers fabricated on a generic foundry platform for broadband terahertz generation,” *Opt. Express*, vol. 30, no. 12, p. 20149, 2022, doi: 10.1364/oe.454296.