

Entwicklung und Charakterisierung eines  
Roboter-basierten Terahertz-Zeitbereichsspektrometers  
für bildgebende Anwendungen auf dem Gebiet der  
Anthropologie und Kunstrestaurierung

**Dissertation**

zur

Erlangung des Doktorgrades  
der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)

dem

Fachbereich Physik  
der Philipps-Universität Marburg  
vorgelegt von

**Eva-Maria Stübling**

aus

Bad Wildungen-Armsfeld

Marburg, 2018

Vom Fachbereich Physik der Philipps-Universität Marburg  
als Dissertation angenommen am: 07.02.2019

**Erstgutachter:** Prof. Dr. Martin Koch  
**Zweitgutachter:** Prof. Dr. Martin Hofmann

**Tag der mündlichen Prüfung:** 15.02.2019  
**Hochschulkenziffer:** 1180

Es gibt eine innere Welt und die geistige Kraft, sie in voller Klarheit,  
in dem vollendetsten Glanze des regesten Lebens zu schauen,  
aber es ist unser irdisches Erbteil,  
daß eben die Außenwelt, in der wir eingeschachtet,  
als der Hebel wirkt, der jene Kraft in Bewegung setzt.

*E.T.A. Hoffmann (1776 - 1822)*



---

## Vorwort

Die Terahertz-Technologie, nur wenig älter als ich selbst, hat mich in den letzten Jahren stetig begleitet; zeitgleich auch immer die Frage von Bekannten, Verwandten oder anderen fachfremden Menschen, was genau das sein solle, das „Terahertz“. Während wahrscheinlich jeder Mensch in seinem Leben bereits Röntgenstrahlen ausgesetzt war und infolgedessen auch mit dem Begriff Röntgenstrahlung etwas verbindet, führen Erklärungsversuche, wie Terahertzstrahlung seien kurzwelligere Mikrowellen, zumeist zu großen Fragezeichen in den Gesichtern der Gesprächspartner. Nichtsdestotrotz hat sich die THz-Technologie in den letzten Jahren entwickelt und dringt langsam aber sicher auch in die Sphäre der fachfremden und laborfernen Anwendungen vor. Im Rahmen meiner Promotion konnte ich nun einen kleinen Beitrag dazu leisten, die THz-Technologie einen Schritt weiter in die Anwendung zu führen. Erfreulicherweise bot sich mir in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Martin Koch die Möglichkeit, die Terahertz-Strahlung an gesellschaftlich relevanten Kulturgütern zu erproben, einem Gebiet, welchem ich bereits vor Beginn des Studiums nicht abgeneigt war.

Auf meinem Weg haben mich viele Personen für kürzere oder längere Zeit begleitet. An erster Stelle ist Prof. Dr. Martin Koch als Betreuer dieser Dissertation zu nennen, der mir jeder Zeit zur Seite stand, mir gleichzeitig aber auch große Freiheit bei der Ausgestaltung meiner Arbeit gelassen hat. Seine Anleitung hat sehr zu meiner persönlichen Entwicklung beitragen, wofür ich danken möchte. Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr. Martin Hofmann danken, der sich bereit erklärt hat, als Zweitgutachter für diese Arbeit zu agieren. Den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission Prof. Dr. Wolfgang Stolz und Prof. Dr. Florian Gebhard gilt ebenfalls mein Dank, dass sie sich die Zeit nehmen, diese Arbeit zu beurteilen.

Der Zusammenhalt, die vielen konstruktiven Gespräche und die gute Atmosphäre in der Arbeitsgruppe Experimentelle Halbleiterphysik, lassen meine Promotionszeit in positiver Erinnerung bleiben und haben ebenfalls zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Dabei haben insbesondere drei Personen als direkte Betreuer eine wichtige Rolle eingenommen. Zu nennen sind Dr. Stefan Busch, der mich während meiner Bachelorarbeit und während den anschließenden Masterpraktika in die Welt der THz-Technik einführte, Dr. Amin Soltani, der mir während meiner Masterarbeit Einblicke in andere Forschungsdisziplinen ermöglichte und letztendlich Prof. Dr. Jan C. Balzer, der mich während einem Großteil meiner Promotionszeit unterstützte und besonders am Anfang bei der Diskussion möglicher Fragestellungen mitwirkte. Hinsichtlich der Kooperation mit den fachfremden Disziplinen möchte ich Dr. Bernd Fischer danken, der die Verbindung zu medizinischen Arbeitsgruppen in Freiburg und Zürich hergestellt hat und auch mit Diskussionen zu neuen Forschungsansätzen beigetragen hat. Weiterhin möchte ich Jan Ornik für die allzeit gute Zusammenarbeit danken. Wir haben einen Großteil unserer Promotionszeit zusammen zurückgelegt und haben auch in Zeiten personeller Engpässe alle anfallenden

---

Aufgaben gemeinsam bewältigen können. Genauso gilt mein Dank Arno Rehn, den ich bereits am ersten Tag meines Physikstudiums kennen lernen durfte und als Kommilitonen und Kollegen stets sehr geschätzt habe. Insbesondere möchte ich ihm für die Unterstützung bei der Entwicklung der Auswertungssoftware danken. Meinen weiteren teils ehemaligen Kollegen Dr. Stefan Sommer, Dr. Ralf Gente, Jochen Taiber möchte ich für die gemeinsame Projektarbeit danken sowie allen weiteren Mitgliedern der AG Experimentelle Halbleiterphysik für das gute Miteinander. Mein besonderer Dank gilt Rüdiger Rink für die Umsetzung von Aufbauten und Maya Strobel für die Unterstützung bei der Bürokratie. Letztendlich möchte ich auch „meinen“ Studenten danken, die ebenfalls zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Hierbei gilt mein besonderer Dank Yannick Bauckhage, der maßgeblich an der Entwicklung des Roboterbasierten THz-Systems mitgewirkt hat. Tabea Siebrecht, Eric Jelli, Paul Lüttjohann, Rui Guo, Biramma Pureeswaran Sivarajan und Yurii Radiev haben mich außerdem bei der Entwicklung von Auswertungssoftware und bei Messungen im Labor unterstützt.

Neben den vielen Mitgliedern der Arbeitsgruppe haben auch einige externe Wissenschaftler mich auf meinem Weg unterstützt, denen ich danken möchte. Auf der medizinischen Seite sind hier sind Dr. Lena Öhrström und Dr. Patrick Eppenberger aus der Forschungsgruppe um Prof. Dr. Frank Rühli der Universität Zürich zu nennen, die mir Proben zur Verfügung gestellt, CT- Messungen durchgeführt haben und bei medizinischen Fragestellungen zur Seite standen; außerdem Prof. Dr. Michael Bock, Dr. Ute Ludwig, Johannes Fischer und Agazi Tesfai von der Universität in Freiburg, die bei Projekttreffen Anstöße zu neuen Forschungsfragen gegeben und bei der Datenfusion mitgewirkt haben. Bei der Zusammenarbeit mit Kunstrestauratoren gilt mein Dank Kirsti Krügener von der HAWK in Hildesheim für die vielen anregenden Diskussionen, aber auch die Probenbereitstellung. Außerdem gilt mein Dank Naja-Anissa Staats und Prof. Dr. Hans Dietmar Portsteffen der TH Köln für die vielen gemeinsamen Messungen, Denkanstöße sowie Probenbereitstellungen. Ohne die gute Zusammenarbeit wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Zuletzt möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken, die in jeder Lebenslage zu mir gestanden haben. Insbesondere meine Eltern, Christel Müller-Stübling und Olaf Stübling, haben mir den Weg bis hierhin überhaupt erst ermöglicht und haben mich jederzeit unterstützt. Ebenso hat mein Freund Tobias Borschel mir zur Seite gestanden und mich stets aufgemuntert, wenn es im Labor mal wieder nicht so geklappt hat wie geplant. Ohne euch hätte ich diesen Weg nicht beschreiten können. Daher danke ich euch von ganzen Herzen.

Bad Wildungen, im Dezember 2018

Eva-Maria Stübling

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>13</b>
2.1	Etablierte Untersuchungsverfahren . . . . .	13
2.1.1	Anthropologie . . . . .	13
2.1.2	Kunstreaurierung . . . . .	19
2.2	Terahertz-Strahlung . . . . .	22
2.2.1	Transmission, Reflexion und Absorption . . . . .	24
2.2.2	Streuung . . . . .	27
2.2.3	Besonderheiten organischer und kunsthistorischer Proben . . . . .	29
2.3	Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie . . . . .	29
2.3.1	Generation und Detektion . . . . .	30
2.3.2	Integration zum Gesamtsystem . . . . .	32
2.3.3	Datenauswertung . . . . .	36
2.4	Bisher erfolgte Terahertz-Untersuchungen an Kunstobjekten und Mumien . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Spektroskopische Untersuchungen an historischen Menschenfunden und Kunstobjekten</b>	<b>47</b>
3.1	Anthropologie . . . . .	47
3.2	Kunstreaurierung . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Roboter-basiertes Terahertz-Spektrometer</b>	<b>63</b>
4.1	Motivation und Anforderungen an ein Roboter-basiertes THz-Spektrometer . . . . .	63
4.2	Grundkonzept . . . . .	65
4.3	Systemeinheiten . . . . .	66
4.3.1	Basiseinheit . . . . .	66
4.3.2	Positionierungseinheit . . . . .	67
4.3.3	Visualisierung der dreidimensionalen Oberfläche einer Probe . . . . .	76
4.3.4	Berechnung des Messpfades . . . . .	80
4.3.5	Simulation und Kollisionskontrolle . . . . .	84
4.3.6	Terahertz-Spektrometer . . . . .	89
4.4	Integration zu einem Gesamtsystem . . . . .	93
4.4.1	Referenzieren des Roboters mit der Umgebung . . . . .	93
4.4.2	Kalibration des optischen 3D-Scanners . . . . .	96
4.4.3	Referenzieren des Roboterarmes mit dem optischen 3D-Scanner . . . . .	96
4.4.4	Bestimmen der Werkzeugeinstellungen des THz-Sensors . . . . .	98
4.5	Charakterisierung des Systems . . . . .	101
4.5.1	Signal-zu-Rausch-Verhältnis . . . . .	101
4.5.2	Auflösung . . . . .	103

4.5.3	Grenzen der Anwendbarkeit des Systems . . . . .	106
4.6	Demonstrationsmessungen an einfachen Bauteilen . . . . .	109
4.6.1	Metallstufen . . . . .	109
4.6.2	Rohr . . . . .	110
<b>5</b>	<b>Algorithmus zur tomographischen Rekonstruktion</b>	<b>113</b>
5.1	Identifizierung der THz-Pulse und Zuordnung zu Schichten . . . . .	113
5.2	Rekonstruktion dünner Schichten und stark rauschbehafteter Daten . . . . .	115
<b>6</b>	<b>Terahertztomographie an historischen Menschenfunden</b>	<b>119</b>
6.1	Künstlich mumifizierte Hand . . . . .	119
6.1.1	Tomographische Rekonstruktion anhand der THz-Messungen . . . . .	120
6.1.2	Vergleich mit CT-Messungen . . . . .	122
6.2	Weitere historische Menschenfunde . . . . .	126
<b>7</b>	<b>Terahertztomographie an Kunstobjekten</b>	<b>129</b>
7.1	Fraßschäden an Holz . . . . .	129
7.2	Überprüfung der Festigung von fraßgeschädigtem Holz mit THz-Messungen . . . . .	131
7.3	Putto . . . . .	134
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>139</b>
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>143</b>
	<b>Summary</b>	<b>147</b>
	<b>Literatur</b>	<b>162</b>
	<b>Eigene Veröffentlichungen</b>	<b>163</b>
	<b>Wissenschaftlicher Werdegang</b>	<b>165</b>



## 1 Einleitung

Historische Menschenfunde und Kunstobjekte stellen eines der höchsten Kulturgüter unserer heutigen Gesellschaft dar. Sie geben uns Aufschluss über unsere Vorfahren, deren Leben und die äußeren Einflüsse, denen sie ausgesetzt waren. Eines der bekanntesten Beispiele hier in Europa ist sicher *Der Mann aus dem Eis*, auch *Ötzi* genannt. Gefunden 1991 in den Ötztaler Alpen, zeigt uns dieser historische Menschenfund einen Einblick in die Welt vor rund 5300 Jahren [1]. Durch die Vereinigung einer Vielzahl verschiedener Messverfahren, sind heute nicht nur die Todesumstände des Mannes bekannt, sondern auch die damals typische Kleidung, Waffen, Schmuck und sogar die letzte Mahlzeit, die er vor seinem Tod zu sich nahm, konnten ermittelt werden [1]. Im Falle von Ötzi wird von einer natürlichen Mumifikation gesprochen, d.h. durch äußere natürliche Einflüsse wurde sein Leichnam über Jahrtausende konserviert. Im Gegensatz dazu stehen historische Menschenfunde, deren Leichname künstlich durch Einwirkung von anderen Menschen mummifiziert wurden. Als klassisches Beispiel können hier die ägyptischen Pharaonen genannt werden, aber auch im heutigen Peru wurden viele Mumifizierungen durchgeführt. Auch diese künstlich konservierten Menschenfunde geben Aufschluss über damalige Riten oder den Totenkult einer Gesellschaft [2].

Einen ähnlichen Stellenwert nehmen Kunstobjekte ein. Sie zeigen den Geschmack der jeweiligen Epochen, was die Menschen damals bewegt hat und wie sie gelebt haben. Im Gegensatz zu natürlich mumifizierten Menschenfunden zeigen Kunstobjekte dem Betrachter jedoch zunächst nur das, was der Künstler damals beabsichtigt hat. Nicht selten kam es vor, dass im Lauf der Jahrhunderte je nach vorherrschender Mode existierende Malereien übermalt oder angepasst wurden. Mithilfe spezieller Verfahren ist es jedoch möglich, solche Untermalungen teilweise zu rekonstruieren. Aber nicht nur durch die Künstler vergangener Epochen kam es zu einem teilweisen Verlust wertvoller Kunstobjekte. Auch eine fehlerhafte Restaurierung in der neueren Vergangenheit kann zur Zerstörung eines Kunstobjektes beitragen. Bevor mit einer Restaurierung begonnen wird, sollte daher der Ist-Zustand eines Objektes genau bekannt sein.

Es ist daher nicht verwunderlich, dass inzwischen eine Vielzahl diverser Untersuchungsverfahren existiert, die uns den Zugang zu genauen Informationen über historische Menschenfunde oder Kunstobjekte ermöglicht. Ein weiteres Verfahren soll im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden.

Das zu entwickelnde Verfahren soll auf der Terahertz (THz)-Zeitbereichsspektroskopie basieren, einer Spektroskopiemethode, die vor rund 20 Jahren erstmals erforscht wurde [3] und seitdem eine rasante Entwicklung erfahren hat. Sie bedient sich der THz-Strahlung, die je nach Definition im Frequenzbereich zwischen 100 GHz und 10 THz im elektromagnetischen Spektrum beheimatet ist [4]. Mit Energien zwischen 0,4 meV und 40 meV ist diese Strahlungsart nicht-ionisierend und somit unschädlich für den Anwender. Zudem sind viele nicht-polare

---

Materialien in diesem Frequenzbereich transparent und viele organische Strukturen zeigen charakteristische Absorptionseigenschaften bei THz-Frequenzen [5]. Durch eine zeitabhängige Detektion gepulster THz-Strahlung ist zudem eine tomographische Rekonstruktion von Schichtstrukturen möglich [6]. Somit ist die THz-Strahlung auch für Bildgebung interessant, die erstmals 1995 demonstriert wurde [7]. Die Auflösung der Strahlung ist schlechter als die von Infrarotstrahlung bietet jedoch eine höhere Eindringtiefe. Die Wechselwirkung der THz-Strahlung mit Materie basiert dabei auf anderen Mechanismen wie beispielsweise bei Röntgenstrahlung. Eine Untersuchung historischer Menschenfunde oder Kunstobjekte in diesem Frequenzbereich bietet daher neue Einblicke in vermeintlich bekannte Welten.

Seit der ersten Demonstration der THz-Bildgebung sind viele Versuche unternommen worden, das Verfahren weiterzuentwickeln [8]. Einige Forschungsarbeiten zielen darauf ab, die Geschwindigkeit der THz-Bildgebung zu erhöhen. Bei den ersten Versuchen wurde ein Raster-scanverfahren für die Bildgebung verwendet. Durch das punktweise Verfahren des THz-Sensors relativ zur Probe kann das vollständige Vermessen einer Probe je nach Größe und Messgeschwindigkeit des Spektrometers viel Zeit in Anspruch nehmen. Um die Geschwindigkeit der Bildgebung zu erhöhen, können entweder Alternativen zum Raster-scanverfahren gefunden oder die Messgeschwindigkeit des Spektrometers an sich erhöht werden. Inzwischen sind kommerzielle THz-Systeme verfügbar, die Messgeschwindigkeiten von bis zu einigen 100 Hz bieten [9,10]. Der Zeitfaktor bei der THz-Bildgebung spielt insbesondere bei der Untersuchung von Mumien und Kunstobjekten daher nur noch eine untergeordnete Rolle. Problematischer ist nach wie vor das verwendete Raster-scanverfahren, welches in der Regel durch zwei Verfahrenseinheiten realisiert wird. Dadurch ist die THz-Bildgebung bisher auf möglichst flache Objekte beschränkt. Diese Limitierung hat bisher eine Untersuchung von historischen Menschenfunden mit THz-Strahlung nahezu vollständig verhindert, sodass auf diesem Gebiet trotz des hohen Potentials nur wenige Veröffentlichungen existieren [11, 12]. Zudem kommt hinzu, dass ein Großteil der Objekte nur in Reflexionsgeometrie untersucht werden kann, da ein Durchdringen der gesamten Probe aufgrund der Absorption nicht möglich oder aus geometrischen Gründen ein Zugang in Transmission verwehrt ist. Um ein Maximum des reflektierten THz-Signals zu detektieren, sollte daher der THz-Sensor entsprechend des Einfallswinkels zur Probe orientiert sein und sich die Probe im Fokuspunkt des Sensors befinden. Ein Nachführen des Sensors entsprechend der Oberfläche ist zur Untersuchung von Freiformobjekten wie Mumien daher unerlässlich.

Das Nachführen könnte theoretisch durch zusätzliche Translations- und Rotationseinheiten erreicht werden. Die Umsetzung dessen gestaltet sich allerdings schwierig und ist umständlich. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher ein Roboter-basiertes THz-System entwickelt werden, welches den THz-Sensor entsprechend der Oberfläche einer Probe positioniert und somit eine Vermessung historischer Menschenfunde und diverser komplexer Kunstobjekte ermöglicht. In der Vergangenheit gab es bisher nur einen Versuch, einen Roboterarm mit einem THz-System zu kombinieren [13]. In dieser Arbeit wurde jedoch die Probe am Roboterarm befestigt und re-

lativ zum THz-Sensor positioniert; ein Verfahren, welches bei wertvollem Kulturgut undenkbar ist. Die vorliegende Arbeit wählt daher den umgekehrten Ansatz, den THz-Sensor relativ zur Probe zu positionieren [14]. Die Gliederung der schriftlichen Ausarbeitung wird im Folgenden beschrieben.

Da sich das entwickelte Roboter-basierte THz-System an seit langer Zeit etablierten Verfahren messen lassen muss bzw. einen Mehrwert darstellen soll, erfolgt in einem ersten Abschnitt des Kapitels 2 eine Zusammenfassung dieser etablierten Verfahren. Dabei wird zwischen Verfahren in der Anthropologie und Kunsthistorik bzw. Kunstrestaurierung unterschieden, auch wenn die Schnittmenge der Verfahren vergleichsweise groß ist. Im darauffolgenden Abschnitt 2.2 werden zunächst die THz-Strahlung und ihre Eigenschaften bzw. Wechselwirkungen mit Materie im Allgemeinen beschrieben, bevor in Abschnitt 2.3 auf das Verfahren der THz-Zeitbereichsspektroskopie im Speziellen eingegangen wird. Abschnitt 2.4 gibt abschließend einen Überblick über die bereits erfolgten THz-Studien auf den beiden für diese Arbeit relevanten Gebieten. Bevor das entwickelte Roboter-THz-System in Kapitel 4 eingehend erläutert wird, erfolgt in Kapitel 3 eine kurze Darstellung der spektroskopischen Eigenschaften der in dieser Arbeit relevanten Materialien. Um die Wechselwirkung der Strahlung mit einer Probe nachvollziehen zu können, ist es zunächst essentiell sich mit den dielektrischen Eigenschaften der jeweiligen Proben vertraut zu machen. Diese Daten werden später ebenfalls für eine tomographische Rekonstruktion der bildgebenden Messungen benötigt, weshalb sie bereits vorab gezeigt werden sollen.

In Kapitel 4 wird ein umfassender Überblick über das entwickelte Messverfahren gegeben. Beginnend bei der Motivation und den Anforderungen an das System wird das Grundkonzept, die einzelnen Systemkomponenten sowie deren Zusammenspiel in einem Gesamtsystem vorgestellt. Nach der Charakterisierung des Systems hinsichtlich seiner Eigenschaften und Grenzen werden erste einfache Demonstrationsmessungen gezeigt. In Kapitel 5 wird dann beschrieben, wie die mit dem Robotersystem gewonnenen Daten ausgewertet und für eine tomographische Rekonstruktion verwendet werden können.

Kapitel 6 und 7 widmen sich den Messergebnissen, die bei der Vermessung von historischen Menschenfunden und Kunstobjekten erzielt werden konnten. Im Falle der historischen Menschenfunde wird als Hauptobjekt eine menschliche Mumienhand untersucht. Diese bietet den Vorteil, dass sie vor Ort im Labor untersucht werden kann und bereits weitere Messungen mit anderen etablierten Verfahren existieren, die zu Vergleichszwecken herangezogen werden können. Neben der Mumienhand wurden zusätzlich noch eine Schädeldecke und eine kleine Kinderhand aus Peru untersucht. Diese Proben konnten ebenfalls über einen längeren Zeitraum von der Universität Zürich ausgeliehen werden und eigneten sich daher ebenfalls für eine erste Machbarkeitsstudie. Im Kunstbereich stand ein Objekt längerfristig zur Verfügung, sodass sich die weiteren Fragestellungen an diesem Objekt orientiert haben. Das zur Verfügung stehende

---

Objekt ist eine hölzerne Engelsfigur (Putto), die zu der Sammlung der Technischen Hochschule in Köln gehört. Da an diesem Objekt deutliche Fraßschäden durch Insektenbefall zu erkennen sind, wurde ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt auf Fraßschäden an Holz gelegt. Für diese Studie standen zusätzliche Proben der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst in Hildesheim zur Verfügung. Da diese Untersuchungen das Fundament für alle weiteren Fragestellungen bilden, werden die Ergebnisse im ersten Abschnitt des Kapitels 7 dargestellt. Daran schließt sich die Fragestellung an, ob restauratorische Behandlungsschritte zur Festigung eines fraßgeschädigten Holzes ebenfalls mit THz-Strahlung kontrolliert werden können. Hierbei spielt sowohl die Festigung des Holzes als Substrat eine wichtige Rolle als auch die Festigung der darüber liegenden Malschichten. Die Ergebnisse dieser Vorabuntersuchungen unterstützen dann die Analyse der Messungen am Putto in Abschnitt 7.3. Im letzten Kapitel 8 wird abschließend ein Fazit der erreichten Messergebnisse gezogen und mögliche Anwendungen und Verbesserungen in der Zukunft aufgezeigt.

## 2 Grundlagen

Die Grundlagen, auf denen diese Arbeit basiert, setzen sich aus verschiedenen Disziplinen zusammen. Ein Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Terahertztechnik. Da diese Technik jedoch ergänzend bzw. vergleichend zu anderen Untersuchungsverfahren im Bereich der Anthropologie und Kunstrestaurierung angewendet werden soll, ist auch eine Betrachtung der auf diesen Forschungsfeldern bereits etablierten Technologien sinnvoll. Das Grundlagenkapitel gibt daher zunächst einen Überblick über etablierte Untersuchungsverfahren in der Anthropologie und Kunstrestaurierung bevor mit der Beschreibung der Terahertzstrahlung sowie der dazugehörigen Messtechnik und Auswertung begonnen wird.

### 2.1 Etablierte Untersuchungsverfahren

Um die Anforderungen an ein Terahertz-Zeitbereichsspektrometer für bildgebende Messungen auf den Gebieten der Anthropologie und Kunstrestaurierung definieren zu können, ist es essentiell, sich zunächst mit den bestehenden und etablierten Untersuchungsverfahren vertraut zu machen und deren Vor- und Nachteile zu evaluieren. Hierbei wird im Folgenden ein besonderes Augenmerk auf die Technologien gelegt, die in der vorliegenden Arbeit zu Vergleichszwecken herangezogen wurden.

#### 2.1.1 Anthropologie

Der Begriff Anthropologie ist definiert als die Wissenschaft vom Menschen und seiner Entwicklung [15]. Es ist daher nicht verwunderlich, dass wir als Menschen eine Vielzahl diverser Untersuchungsverfahren für dieses Forschungsgebiet entwickelt haben, um mehr über unsere Herkunft und das Leben unserer Vorfahren in Erfahrung bringen zu können. Historische Menschenfunde, ob natürlich oder künstlich mumifiziert, stellen hierbei eine der größten Informationsquellen für vergangene Zeiten dar. Sie geben direkten Aufschluss über Totenkult und Begräbnisriten. Gleichzeitig können auch Rückschlüsse auf damalige Kleidung, Werkzeuge und andere Utensilien sowie Nahrungsmittel gezogen werden. Im Gegensatz zu einfachen Knochenfunden enthalten Mumien zudem noch eine Vielzahl an Weichgewebe, sodass auch Schlussfolgerungen auf Krankheiten, die nicht ausschließlich Knochen betreffen, ermöglicht werden [2]. Insofern stellen historische Menschenfunde und insbesondere Mumien eines der höchsten Kulturgüter dar, die der Menschheit für anthropologische Studien zur Verfügung stehen. Daher ist es naheliegend die menschlichen Überreste durch die Untersuchungsverfahren so wenig wie möglich zu zerstören. Auf dieser Basis haben sich in den letzten Jahrzehnten viele nicht-invasive Untersuchungsverfahren etabliert.

Nichtsdestotrotz führte zunächst der direkte Weg der Informationsgewinnung über die invasive Autopsie. Hierbei können sicherlich die meisten Informationen gewonnen werden. Beispielsweise über zu Lebzeiten bestehende Organschäden, verursacht durch zum Beispiel Lungenentzün-

dungen oder Tuberkulose [16]. Auch auf die damalige Ernährung können Rückschlüsse gezogen werden, wenn Überreste von Nahrung im Magen analysiert werden [17, 18]. Basierend auf diesen invasiven Untersuchungen konnten viele wichtige Erkenntnisse über den Mumifizierungs- und Verwesungsprozess erschlossen werden, die die Interpretation von nicht-invasiven Techniken zum Teil überhaupt erst ermöglichen [2]. Vor dem Hintergrund höchstes Kulturgut zu bewahren und auch hinsichtlich ethisch korrekter Vorgehensweisen, ist diese Methodik jedoch nicht zielführend und wird daher zunehmend durch andere minimal- oder nicht-invasive Methoden abgelöst. Die folgenden Erläuterungen sollen einen Überblick über die eingesetzten Technologien geben. Dazu erfolgt eine Einteilung in bildgebende und spektroskopische Verfahren.

### **Bildgebende Verfahren**

Bildgebende Verfahren ermöglichen einen Einblick in den menschlichen Körper, ohne eine invasive Autopsie durchzuführen. Viele Techniken, die im medizinischen Alltag Anwendung finden, werden auch für die Untersuchung von historischen Menschenfunden eingesetzt.

Ein mögliches minimal-invasives Untersuchungsverfahren stellt die Endoskopie dar [19]. Teilweise weisen historische Menschenfunde kleine Öffnungen auf, über welche ein Endoskop eingeführt werden kann oder ein nur sehr kleiner Schnitt getätigt werden muss. Auf diese Weise kann ein Teil der inneren Organe untersucht werden, ohne dass der Leichnam vollständig geöffnet wird. Allerdings kommt es nicht selten vor, dass die Hohlräume innerhalb der Mumien so stark eingefallen sind, dass das Einführen eines Endoskops nicht mehr möglich ist [16]. Ein weiteres minimal-invasives Verfahren ist die histologische Untersuchung von Gewebe. Dazu wird das Gewebe häufig rehydriert [20]. So können verschiedene Gewebearten und vorhandene Krankheiten wie z.B. Parasitenbefall genauer identifiziert werden [2].

Als erstes vollständig nicht-invasives Untersuchungsverfahren ist die röntgenologische Untersuchung zu nennen. Bereits wenige Monate nach der Entdeckung der Röntgenstrahlung durch Wilhelm Conrad Röntgen im Jahr 1895 [21] wurde die Strahlung erstmalig zur Untersuchung von historischen Menschenfunden eingesetzt [22].

Die Röntgenstrahlung ist eine hochenergetische Strahlung mit Energien zwischen 100 eV und einigen hundert keV. Im elektromagnetischen Spektrum befindet sich diese Strahlung damit zwischen der niederenergetischen UV-Strahlung und der höherenergetischen Gammastrahlung, wobei es an den Grenzen zu Überschneidungen kommt. Der entscheidende Unterschied zwischen Röntgen- und Gammastrahlung stellt jedoch die Herkunft der Strahlung dar. Während Gammastrahlung durch Prozesse im Atomkern emittiert wird, entsteht Röntgenstrahlung durch hochenergetische Elektronenprozesse. Zum einen entsteht Röntgenstrahlung durch die Beschleunigung stark geladener Teilchen z.B. in Form von Abbremsung oder Ablenkung in einem elektrischen Feld, zum anderen durch hochenergetische Übergänge in den Elektronen-

hüllen von Atomen und Molekülen. Ersteres wird als die sogenannte Bremsstrahlung, zweiteres als die charakteristische Röntgenstrahlung bezeichnet. Die Bremsstrahlung weist ein kontinuierliches Spektrum auf, die charakteristische Röntgenstrahlung besteht aus diskreten Linien entsprechend der Übergangsenergien zwischen den Elektronenhüllen. Die in Röntgenröhren letztlich emittierte Röntgenstrahlung stellt eine Überlagerung beider Prozesse dar. Hier werden zunächst Elektronen in einem Glühwendel (Kathode) ausgelöst, anschließend beschleunigt und beim Auftreffen auf die Anode stark abgebremst. Dabei werden zusätzlich Elektronen aus den Schalen des Anodenmaterials ausgeschlagen, die mit Elektronen aus höheren Schalen wieder aufgefüllt werden. Als Anodenmaterial wird heutzutage häufig eine Mischung aus Keramik und Molybdän, Kupfer oder Wolfram genutzt [23].

Aufgrund der hohen Energien wirkt Röntgenstrahlung auf Materie ionisierend, wenn sie sie durchdringt. Die Abschwächung der Röntgenstrahlung durch Materie kann durch das Beer-Lambert-Gesetz exponentiell beschrieben werden.

$$I = I_0 \cdot e^{-\kappa d} \quad (2.1)$$

Die Abschwächung hängt dabei zum einen von der Materialstärke  $d$  und zum anderen von dem materialspezifischen Extinktionskoeffizienten  $\kappa$  ab. Der Extinktionskoeffizient ist im Wesentlichen abhängig von der Ordnungszahl  $Z$  des Materials sowie der jeweiligen Wellenlänge  $\lambda$ , wobei ersteres mit der vierten Potenz eingeht, zweiteres nur mit der dritten Potenz.

$$\kappa \propto Z^4 \lambda^3 \quad (2.2)$$

Bei der Untersuchung von humanen Gewebestrukturen mittels Röntgenstrahlung wird ausgenutzt, dass Knochen, die hauptsächlich aus Calcium mit einer Ordnungszahl von  $Z = 20$  bestehen, die Röntgenstrahlung deutlich stärker absorbieren als das umgebende weiche Gewebe, dessen Hauptbestandteile Wasserstoff ( $Z = 1$ ), Kohlenstoff ( $Z = 6$ ), Stickstoff ( $Z = 7$ ) und Sauerstoff ( $Z = 8$ ) sind, die nur sehr niedrige Ordnungszahlen aufweisen und somit weniger stark absorbiert werden. Damit ergibt sich in Röntgenaufnahmen ein hoher Kontrast zwischen harten und weichen Gewebestrukturen [24].

Die nach dem Passieren des Körpers detektierte Strahlung enthält somit Informationen über dichtere und weniger dichte Regionen im Körper. Vor allem Knochenstrukturen und innere Hohlräume, aber auch Schmuckstücke zwischen den Bandagen können so deutlich aufgelöst werden [25, 26]. Die Bestimmung des Geschlechts und eine Abschätzung des Alters sind ebenfalls auf Basis der röntgenologischen Untersuchung möglich [27]. Der Vorteil der Röntgenstrahlung liegt heutzutage vor allem in der breiten Verfügbarkeit. So sind auch Messungen direkt vor Ort an Ausgrabungsstätten möglich. Der Nachteil der Röntgenstrahlung liegt jedoch in ihrer stark-ionisierenden Wirkung, was die Strahlung besonders für den Anwender gefährlich

macht. Außerdem ist die Auflösung von Weichteilgewebe sehr gering, da die Absorption und der Kontrast dieser Gewebestrukturen im Röntgenbereich sehr gering ist. Die zusätzliche Überlagerung dieser Strukturen in einem zweidimensionalen Bild erschwert eine konkrete Auswertung zusätzlich, da nicht festgestellt werden kann, ob hellere Bereiche in der Röntgenaufnahme auf ein Material mit höherer Absorption oder eine größere Materialstärke zurückzuführen sind.

Eine Weiterentwicklung der Radiographie stellt die Computertomographie (CT) dar [28]. Hierbei werden Röntgenmessungen in verschiedenen Winkeln an einer Probe durchgeführt. Im Gegensatz zu klassischen Röntgenmessungen, in denen zweidimensionale Bilder erzeugt werden, wird bei einer einzelnen CT-Messung nur ein eindimensionales Absorptionsprofil erstellt. Erst das computerbasierte Zusammensetzen einer Vielzahl solcher Absorptionsprofile, gemessen unter verschiedenen Winkeln, ergibt letztlich einen Absorptionskoeffizienten für jeden Volumen-voxel der Probe. Die einzelnen Messungen können dann zur Erzeugung von Schnittbildern oder Volumengrafiken verwendet werden. Auf diese Weise erhält man die Tiefeninformation, die bei konventionellen Röntgenmessungen fehlt. Die Messprozedur kann grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Entweder dreht sich das Emitter-Detektor-System um die Probe, wie es bei klinischen Scannern in der Regel der Fall ist, oder die Probe wird relativ zur Messeinheit rotiert. In heutigen Geräten kommen außerdem häufig mehrere Detektoren zum Einsatz, was den Vorteil hat, dass in kürzerer Zeit mehr Informationen erfasst werden können. Dies hat auch zur Folge, dass Bewegungsartefakte und die Strahlendosis während einer Messung reduziert werden können. Des Weiteren ist es so möglich, den Verlauf von Kontrastmitteln im Körper zu verfolgen [29]. Die Anzahl der Detektoren von solchen sogenannten Mehrzeilencomputertomographen liegt inzwischen im dreistelligen Bereich.

Zu Beginn der Entwicklung von CT-Scannern lag die Auflösung der Schnitte noch bei einigen Millimetern. Inzwischen wird in sogenannten Micro-CT-Scannern eine Auflösung von bis zu  $5 \mu\text{m}$  erreicht [30]. Die bisher existierenden Micro-CT-Scanner haben allerdings den Nachteil einer stark beschränkten Probengröße, da die Auflösung durch deutlich kleinere Emitter- und Detektorsysteme realisiert wird. Nichtsdestotrotz können mithilfe von Micro-CT-Scans Probenaufnahmen erstellt werden, die vergleichbar mit konventionellen Mikroskopieaufnahmen sind.

Die ersten CT-Messungen an Mumien wurden 1977 durchgeführt [31, 32]. Basierend auf den Schnittbildern können auch dreidimensionale Darstellungen der Untersuchungsobjekte rekonstruiert werden, was besonders für Knochenstrukturen interessant ist. Aber auch Veränderungen an Zähnen und dem Zahnhalteapparat können untersucht werden [33]. Ein weiterer sehr bekannter Fall ist die Untersuchung der Gletschermumie „Ötzi“. Hier wurde erst 10 Jahre nach der Entdeckung der Mumie in einer erneuten CT-Messung eine Pfeilspitze in der linken Schulter festgestellt [34]. CT-Untersuchungen können außerdem genutzt werden, um Stellen für Biopsien zu finden [35, 36] oder endoskopische Untersuchungen zu unterstützen [37]. Der



Nachteil, der jedoch auch hier besteht, ist der geringe Kontrast von Weichteilgeweben. Besonders historische Menschenfunde, die sehr stark verwest sind bzw. in denen ein Großteil des Calciums in den Knochen bereits abgebaut wurde, wie beispielsweise im Falle von Moorleichen, zeigen in CT-Aufnahmen nur sehr schwachen Kontrast [2].

Mit Hilfe der sogenannten Magnetresonanztomographie (MRT) besteht eine weitere Möglichkeit ein dreidimensionales Abbild aus einzelnen Schichten zu rekonstruieren. Im Gegensatz zur Röntgenstrahlung, die vor allem von Elementen mit hoher Ordnungszahl absorbiert wird, kommt bei der MRT ein anderes physikalisches Prinzip zum Einsatz. Das Untersuchungsobjekt wird hier einem sehr starken Magnetfeld ausgesetzt, das sich entsprechend einer vorgegebenen Sequenz verändert. Der so angeregte Atomkern emittiert Schwingungen im Radiofrequenzbereich, die gemessen werden können. Diese Wechselwirkungen des Magnetfeldes mit Materie treten vor allem in Wasserstoffbindungen auf, d.h. MRT Bilder repräsentieren den Wassergehalt einer Probe. Damit eignet sich die Magnetresonanztomographie hervorragend zur Untersuchung verschiedener Weichteilgewebestrukturen, die einen unterschiedlichen Wassergehalt aufweisen. Der Kontrast bei harten Gewebestrukturen wie beispielsweise Knochen ist hierbei jedoch wiederum geringer. Für die Untersuchung von über Jahrtausende getrockneten Mumien ist diese Technologie augenscheinlich nicht geeignet, da nicht mehr genügend Wasser im Körper vorhanden ist. Eine Möglichkeit, die Anwendung trotzdem zu ermöglichen, bestünde in der Rehydrierung der Menschenfunde [38]. Diese invasive Methode ist allerdings nicht immer gewünscht oder möglich, sodass neuere Studien sogenannte Ultrakurzzeit-Anregungsspulen für MRT-Scanner erforschen, die eine Anregung der wenigen verbliebenen Wassermoleküle in den Mumien ermöglichen [39].

Als letzte bildgebende Verfahren sollen an dieser Stelle noch die Infrarotreflektographie sowie die Fluoreszenzspektroskopie im Ultravioletten genannt werden. Diese oberflächlich wirkenden Verfahren sind besonders für die Untersuchung der Haut von Interesse. Die Haut der Mumien weist häufig eine sehr dunkle Farbe aufgrund der Austrocknung auf. Infrarotes und ultraviolettes Licht hilft dabei, Strukturen wie beispielsweise Narben, Tätowierungen oder Wunden wieder sichtbar zu machen. Zudem können die Methoden zur Untersuchung der Einbalsamierungsmaterialien eingesetzt werden [2].

### **Spektroskopische Verfahren**

Neben den bildgebenden Verfahren, die sich hauptsächlich mit der Struktur von Proben beschäftigen, sind auch spektroskopische Untersuchungen interessant. Diese können Rückschlüsse auf die Zusammensetzung einer Probe ermöglichen.

Die Magnetresonanztomographie kann zusätzlich für spektroskopische Messungen eingesetzt werden. Bei der sogenannten Magnetresonanzspektroskopie (MRS) werden die Atomkerne in eine Kreisbewegung (Präzession) versetzt. Diese Bewegung findet mit einer charakteristi-

schen Frequenz statt, die entsprechend ausgewertet werden kann. In der Biologie bezieht sich diese Spektroskopietechnik vor allem auf die Isotope  $^1H$ ,  $^{13}C$  und  $^{31}P$  [40]. Biologische Verbindungen, die diese Elemente enthalten, können so untersucht werden [41].

Die Isotopenuntersuchung stellt eine weitere spektroskopische Untersuchungsmethode dar. Hierbei werden überwiegend die stabilen Isotope  $\delta^{13}C$  und  $\delta^{15}N$  in Knochen untersucht, was Rückschlüsse auf Lebensmittelknappheit oder spezielle Ernährungsweisen erlaubt. Auch Haare liefern eine Vielzahl an Informationen besonders hinsichtlich nur kurz andauernder Veränderungen. Diese Informationen können mithilfe biochemischer Analysen gewonnen werden. So kann beispielweise eine Aussage über den Stresspegel, den Alkohol- oder Drogenkonsum der damaligen Menschen getroffen werden [2]. Mit Hilfe der Ramanspektroskopie ist es möglich, die Zusammensetzung und Alterung mumifizierten Gewebes zu untersuchen [42]. Des Weiteren existieren erste Studien zur Auswertung von historischen DNA-Proben [2].

Abbildung 1 zeigt eine Zusammenfassung der bisher etablierten Technologien. Die Untersuchung von historischen Menschenfunden erfordert eine Vielzahl verschiedener invasiver und nicht-invasiver Verfahren, wobei jedes Verfahren Vor- und Nachteile mit sich bringt. Erst die Kombination möglichst vieler unterschiedlicher Untersuchungsverfahren mit unterschiedlichen physikalischen und chemischen Prinzipien ebnet den Weg, historischen Menschenfunden ein Maximum an Informationen zu entlocken.

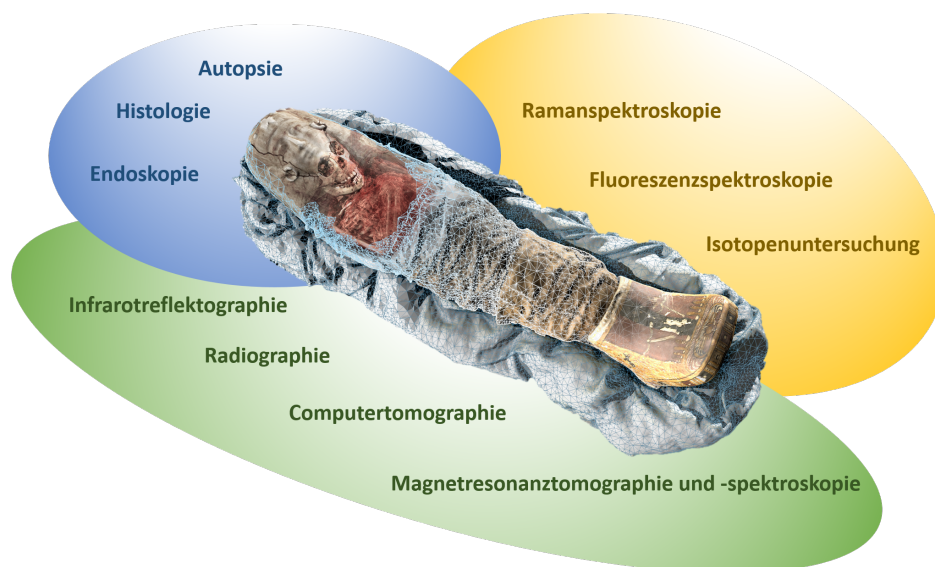


Abbildung 1: Zusammenfassung der hauptsächlich verwendeten Untersuchungsverfahren in der Anthropologie. Unterteilung hinsichtlich (minimal-)invasiver Verfahren (blau), und nicht-invasiver bildgebender (grün) und spektroskopischer (gelb) Verfahren. Zwischen den einzelnen Bereichen kommt es zu Überschneidungen. 3D-Grafik der Mumie entnommen aus [43].

### 2.1.2 Kunstrestaurierung

Ein Großteil der im vorigen Abschnitt beschriebenen Technologien wird auch zur Untersuchung von Kunstobjekten eingesetzt. Sie dienen dem Restaurator zur kunsttechnologischen Untersuchung und zur Evaluierung des Schadenbefundes. Nur wenige Verfahren dienen bisher der Erfolgskontrolle einer durchgeführten Restaurierung. Auch Kunstwerke stellen eines der höchsten Kulturgüter der Menschheit dar. Sie geben Einblicke in die Lebensweisen, Brauchtümer und Religionen vergangener Epochen. Es ist daher von höchstem Interesse, Kunstobjekte so gut wie möglich zu untersuchen und zu bewahren.

In der vorliegenden Arbeit wurde die Anwendbarkeit der Terahertz-Strahlung vor allem im Bezug zu restauratorischen Maßnahmen untersucht, weshalb der Schwerpunkt dieses Kapitels auf Techniken der Kunstrestaurierung liegt. Nichtsdestotrotz gibt es hierbei eine große Schnittmenge zu kunsthistorischen Untersuchungen. Bevor Restauratoren mit ihrer Arbeit beginnen können, ist es essentiell, die vorhandenen Schäden, die verwendeten Materialien und Maltechniken detailliert zu untersuchen, um die anschließende Restaurierung möglichst optimal auf das jeweilige Objekt abstimmen zu können. Dabei soll ebenfalls so minimal-invasiv wie möglich vorgegangen werden.

Kunstobjekte bestehen aus vielen verschiedenen Materialien. Allein im Bereich der Malerei gibt es bereits eine Vielzahl an Untergründen wie textile und hölzerne Bildträger, Metallplatten, Papier oder Glas. Auf diesem Untergrund befindet sich dann häufig zunächst eine Grundierung. Erst darauf folgen diverse Malschichten, auf die in der Regel ein schützender Überzug aufgetragen wurde [44]. Bei Kunstobjekten, insbesondere Gemälden oder bemalten Skulpturen, handelt es sich also um vielschichtige Proben, wobei jede Schicht andere physikalische und chemische Eigenschaften aufweist. Um alle Informationen zugänglich zu machen, ist eine hohe Bandbreite verschiedener Untersuchungsverfahren essentiell. Aufgrund dessen wird auf diesem Gebiet auch von multispektralen Untersuchungen gesprochen [45].

Naheliegende bildgebende Methoden sind die technische Fotografie, Ultraviolettphotographie und Infrarotreflektographie. Umfassende Ausführungen dazu finden sich in [46]. Die Strahlung in diesen Wellenlängenbereichen verfügt jedoch nur über eine sehr geringe Eindringtiefe, sodass lediglich die obersten Schichten eines Gemäldes untersucht werden können. Abbildung 2 zeigt die unterschiedlichen Eindringtiefen in Abhängigkeit von der verwendeten Strahlungsart. UV-Strahlung durchdringt meist nicht den Überzug des Gemäldes und eignet sich daher besonders zur Untersuchung des Überzugszustandes oder anderen oberflächlichen Materialien, die in diesem Wellenlängenbereich fluoreszieren [47]. Alternativ kann auch ein Festigungsmittel mit einem UV-Marker versehen werden und der Erfolg der Festigung anschließend durch Probenentnahme und Betrachtung unter dem Mikroskop untersucht werden [48]. Technische Fotografien können genutzt werden, um die Malschicht an sich zu untersuchen, was beson-

ders für Untersuchungen der Maltechnik von Interesse ist [49]. Eine höhere Eindringtiefe weist die Infrarotstrahlung auf, die bis auf die Grundierung dringen kann und somit erste Anhaltspunkte für nicht offensichtliche Schäden unterhalb der Malschicht geben kann [50]. Mit Hilfe der sogenannten Lock-In-Thermographie können außerdem Hohlräume zwischen den Schichten durch Infrarotstrahlung nicht-invasiv sichtbar gemacht werden [51]. Der Nachteil dieser Technik besteht in der nicht unerheblichen Erwärmung des Kunstobjektes auf bis zu 40°C. Des Weiteren ist die Tiefe einer Fehlstelle lediglich in der Farbintensität der Messergebnisse codiert, was eine exakte Auswertung erschwert. Eine weitere Technik, die ebenfalls Infrarotstrahlung verwendet, ist die aus der Medizin bekannte optische Kohärenztomographie. Mit dieser Technik können vor allem streuende, transparente oder halbtransparente Schichten in bis zu 3 mm Tiefe erfasst werden. Somit ist es beispielsweise möglich, den Festigungsvorgang von Hinterglasmalerei zu untersuchen [52].

Ein großer Anteil der Schäden befindet sich allerdings zwischen Grundierung und Substrat, da es z.B. aufgrund von Feuchtigkeit oder Anobienbefall zu starken Veränderungen am Substrat kommen kann. Daher ist insbesondere für restauratorische Fragestellungen eine größere Eindringtiefe von Nutzen. Eine hohe Eindringtiefe kann aber auch bei kunsthistorischen Untersuchungen Vorteile mit sich bringen. Nicht selten sind frühzeitliche Malereien durch nachträglich aufgebraute Schichten oder erneute Malereien unkenntlich gemacht oder die Aussage abgeändert worden. Durch Technologien mit höherer Eindringtiefe können diese Untermaalungen wieder sichtbar gemacht werden, ohne das Gemälde an sich zerstören zu müssen [53].

Für derartige Untersuchungen findet die Röntgenstrahlung auch im Bereich der Kunsthistorik und Restaurierung seit langer Zeit Anwendung. Mit Röntgenstrahlung ist es möglich, das Gemälde vollständig zu durchdringen (vgl. Abb. 2). Aufgrund von Dichteunterschieden im Holz können damit beispielsweise Fehlstellen quantitativ ausgewertet werden, aber auch die Untersuchung des Erhalts der Malschicht ist möglich. Ebenso ist es möglich auf die eventuell verwendeten Holzarten und das Alter des Holzes Rückschlüsse zu ziehen. Aber auch hier ergibt sich bei einer zwei-dimensionalen Bildgebung der Nachteil, dass alle Schichten übereinander projiziert werden und eine schichtweise Untersuchung somit nicht möglich ist. Durch die Anwendung der Computertomographie kann dieses Problem gelöst werden. Ein allgemeiner Nachteil der Anwendung von Röntgenstrahlung an Kunstobjekten ist jedoch der teilweise niedrige Kontrast der im Kunstobjekt vorhandenen Materialien. Je nach Komposition des Objektes ist es daher nicht immer möglich, alle Elemente detailliert zu untersuchen. Dennoch konnte mit Hilfe der Computertomographie beispielsweise das Eindringverhalten von Festigungsmitteln in von Insekten geschädigten Kunstobjekten untersucht werden [54].

Auch die Mikrowellenstrahlung eignet sich aufgrund ihrer höheren Eindringtiefe zur Untersuchung von tiefer liegenden Schichten. Mit einer Eindringtiefe von etwa 10 mm durch verschiedene Malschichten kann Mikrowellenstrahlung besonders gut zur Untersuchung von Wandmalerei-

en eingesetzt werden. So konnten beispielsweise verborgene Mosaik unter einer Wandmalerei in der Hagia Sofia entdeckt werden [55]. Der Nachteil der Mikro- und Millimeterwellenstrahlung liegt allerdings vor allem in der geringen Auflösung von einigen Millimetern, womit vor allem kleine Haarrisse oder dünnere Schichtstrukturen auf den Wänden nicht eindeutig identifiziert werden können.

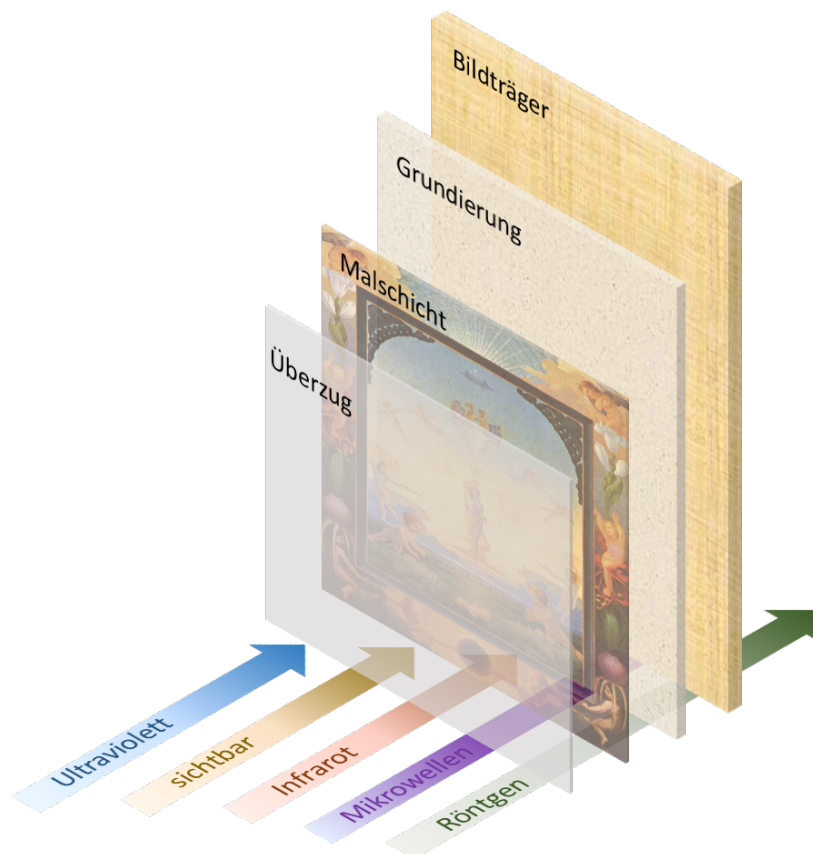


Abbildung 2: Eindringtiefe der verschiedenen Untersuchungsverfahren in Kunstwerke.

Als letzte nicht-invasive Technik soll noch die Kernspinresonanztomographie genannt werden [56]. Diese Technik eignet sich besonders gut zur Bestimmung von Grenzflächen tieferliegender Schichten. Die Nachteile dieser Technik bestehen darin, dass das Untersuchungsobjekt häufig durchfeuchtet werden muss und die Aufnahmezeit für eine eindimensionale Messung mehr als 40 Minuten in Anspruch nehmen kann. Für großflächige bildgebende Messungen ist die Kernspinresonanztomographie daher ungeeignet.

Neben diesen nicht-invasiven Techniken gibt es auch eine Vielzahl invasiver Analysemethoden, wie Reflexionsspektroskopie [57], Ramanspektroskopie [58], Röntgenfluoreszenzspektroskopie [48, 59], Neutronenspektroskopie [60] oder Rasterkraftmikroskopie [61]. Hierzu muss jeweils eine Probe des Kunstobjektes genommen werden, was zu einer Beschädigung des Wer-

kes führt. Um die Schichtstruktur eines Kunstwerkes zu analysieren sind auch Querschliffe möglich, die unter Zuhilfenahme eines Mikroskops untersucht werden.

Alle Techniken werden bisher hauptsächlich dazu eingesetzt, den status-quo eines Kunstwerkes zu bestimmen. Beim letztlichen Restaurierungsprozess spielt häufig vor allem das Feingefühl und die Erfahrung des Restaurators eine große Rolle. Um aber die Nachhaltigkeit der Restaurierung zu gewährleisten, wäre eine Erfolgskontrolle wünschenswert. An diese Erfolgskontrolle werden andere Anforderungen gestellt wie an die Untersuchung des status-quo. Dabei ist besonders die Erfolgskontrolle von Arbeiten an tieferliegenden Schichten von Interesse, da hier eine visuelle Kontrolle nicht möglich ist. Von besonderem Interesse ist beispielsweise die Verteilung des Festigungsmittels in den Hohlräumen zwischen den Schichten. Der Kontrast von Röntgenmessungen reicht jedoch häufig nicht aus, um diesen Effekt im Objekt zu beurteilen. Es lässt sich hier kein Unterschied zwischen Vor- und Nachzustand ausmachen. Das Einbringen eines zusätzlichen Kontrastmittels, wie es in der Medizin häufig getan wird, ist ebenfalls als kritisch anzusehen, da es eventuell das Eindringverhalten des Festigungsmittels beeinflussen kann. Die Auflösung von Mikrowellenmessungen ist zumeist nicht ausreichend und die Eindringtiefe der anderen Technologien zu gering. Der Restaurator muss sich in diesem Fall also bisher überwiegend auf das eigene Feingefühl verlassen.

## 2.2 Terahertz-Strahlung

Terahertz (THz)-Strahlung hat das Potential, diese Lücke bei den Untersuchungsverfahren zu schließen und weitere, neuartige Informationen an die Oberfläche zu bringen. THz-Strahlung kommt in der natürlichen Umgebung nur in sehr geringem Maße vor. Aufgrund der schwierigen Erzeugung und Detektion war dieser Frequenzbereich des elektromagnetischen Spektrums daher lange Zeit unzugänglich. Die Definition des Frequenzbandes wird zudem je nach Quelle unterschiedlich definiert. Eine häufig verwendete Definition, die auch in dieser Arbeit verwendet wird, legt den THz-Bereich zwischen 100 GHz bis 10 THz mit entsprechenden Wellenlängen von 30  $\mu\text{m}$  bis 3 mm fest [4]. Aufgrund der Lage zwischen Mikrowellen und Infrarotstrahlung, stellt der THz-Frequenzbereich eine Schnittstelle beider Strahlungsarten dar, wobei auf Technologien aus beiden Bereichen zurückgegriffen werden muss, um THz-Strahlung zu erzeugen, zu detektieren und zu formen [5].

Aus dem Optischen kommend gibt es die Möglichkeit, THz-Strahlung mit Hilfe photonischer Quellen zu erzeugen. Hierzu zählen zum Beispiel Gas- oder Festkörperlaser, die Strahlung im THz-Bereich emittieren. Der Vorteil besteht in der vergleichsweise hohen Ausgangsleistung bei allerdings nur wenigen diskreten Laserlinien. Für spektroskopische Untersuchungen, die mit einer hohen Bandbreite erfolgen sollen, ist diese Technologie daher nicht zielführend. Auf der anderen Seite ist es möglich, sich dem THz-Bereich auch von der rein elektronischen Seite zu nähern. Hier sind zum einen große Teilchenbeschleuniger, zum anderen aber vor allem

halbleiterbasierte Quellen zu nennen, die inzwischen erfolgreich den unteren THz-Bereich bis zu einigen hundert GHz erschließen können. Zur vollständigen und kontinuierlichen Erschließung des THz-Bereichs finden allerdings hauptsächlich elektrooptische Verfahren Anwendung, die Licht in THz-Strahlung konvertieren. Bei kompakten, fasergekoppelten THz-Systemen, die in dieser Arbeit verwendet wurden, stehen dabei vor allem fotoleitende Antennen im Fokus. Neben der thermischen Detektion von THz-Strahlung mittels Golay-Zellen oder Bolometern finden die fotoleitenden Antennen auch zur Detektion von THz-Strahlung ihre Anwendung. In Kapitel 2.3.1 wird nochmals detaillierter auf die Erzeugung und Detektion mittels fotoleitender Antennen eingegangen.

Nachdem 1989 erstmals die künstliche Erzeugung von THz-Strahlung mit Hilfe fotoleitender Antennen gelang [62], öffnete sich ein neues eigenständiges Forschungsgebiet, das in den letzten Jahren kontinuierlich Zuwachs erfahren hat. Die dabei niedrigen Energien von 0,4 meV bis 40 meV der THz-Strahlung führen zu einer für den Anwender ungefährlichen und nicht-ionisierenden Wirkung der Strahlung. Die Auflösung der THz-Strahlung ist vergleichbar mit der von Infrarotstrahlung bei gleichzeitig höherer Eindringtiefe ähnlich zu der von Mikrowellen.

Bereits vor der Erschließung des THz-Frequenzbereiches wurde vermutet, dass eine Vielzahl von Resonanzen von Festkörpern mit THz-Strahlung angeregt und somit untersucht werden kann [63]. Da die Photonenenergie der THz-Strahlung im meV-Bereich liegt, können alle physikalischen und chemischen Systeme angeregt werden, deren Energie im selben Bereich liegt bzw. deren Lebensdauer auf wenige Pikosekunden beschränkt ist. Hierzu zählen beispielsweise kurzzeitige Dipolwechselwirkungen zwischen Molekülen, Phononen in Kristallstrukturen oder hydratisierte Biomoleküle. Das Zusammenspiel aller im Material wirkenden Kräfte erzeugt ein Absorptionsspektrum im THz-Bereich, das vor allem bei einer Vielzahl organischer Materialien aber auch bei vielen Kunststoffen charakteristische Absorptionslinien aufweist. Aber nicht nur Festkörper können mit THz-Strahlung untersucht werden, auch die Erforschung von Flüssigkeiten wurde seit der Erschließung des Bereiches intensiv betrieben. Dabei kommen in Flüssigkeiten andere Wechselwirkungsmechanismen zum Tragen als in Festkörpern. Während in Festkörpern vor allem die Fernordnung der Moleküle zum Absorptionsspektrum beiträgt, überwiegt bei Flüssigkeiten der Relaxationsprozess von einzelnen Dipolmomenten [5].

Die Erforschung der Wechselwirkung von THz-Strahlung mit Materie jeglicher Art ist ein kontinuierlich fortlaufender Prozess. Um Messergebnisse, auch bei bildgebenden Messungen zu verstehen, ist es sinnvoll, sich zunächst mit den Prozessen vertraut zu machen, die beim Auftreffen von THz-Strahlung auf Materie stattfinden. Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick darüber, insbesondere im Hinblick auf die zu erwartenden Strukturen in historischen Menschenfunden und Kunstobjekten. Zunächst werden die fundamentalen Prozesse der Transmission, Reflexion und Absorption beschrieben sowie die damit verbundene Eindringtiefe der Strahlung. Anschließend wird die Streuung von THz-Strahlung, die zwangsläufig bei jedem Auftreffen

von THz-Strahlung auf Materie auftritt, diskutiert. Abschließend werden die Besonderheiten in organischen Proben näher ausgeführt.

### 2.2.1 Transmission, Reflexion und Absorption

Trifft elektromagnetische Strahlung auf eine Oberfläche, treten grundsätzlich zwei Prozesse auf: ein Anteil der Strahlung wird an der Oberfläche reflektiert, ein anderer Anteil transmittiert durch die Probe und wird dabei absorbiert und an Inhomogenitäten im Material gestreut. Der Streuprozess wird im folgenden Kapitel näher erläutert. Zunächst werden die der Reflexion und Transmission zugrunde liegenden Theorien beschrieben.

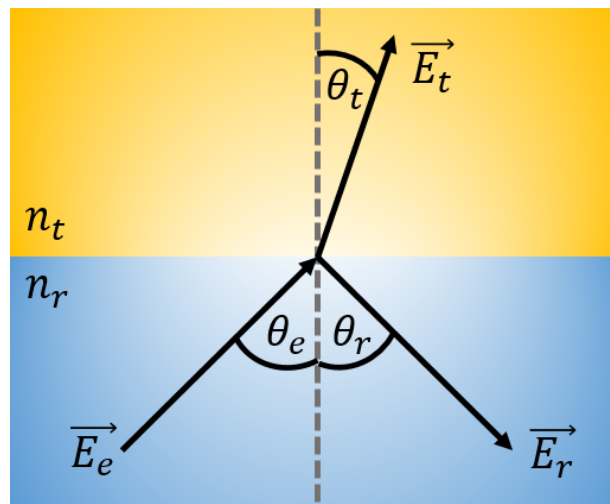


Abbildung 3: Aufspaltung einer ebenen Wellen an einer Grenzfläche.

Wie sich die Anteile auf Transmission und Reflexion verteilen und unter welchem Winkel die Strahlung reflektiert bzw. gebrochen wird, hängt von den jeweiligen dielektrischen Eigenschaften der beteiligten Grenzflächen ab. Die folgende Herleitung der relevanten Formeln orientiert sich an [64]. Betrachtet man zunächst eine eingehende Welle  $\vec{E}_e$ , die an einer Grenzfläche in einen reflektierten Anteil  $\vec{E}_r$  und einen transmittierten Anteil  $\vec{E}_t$  aufgespalten wird (vgl. Abb. 3), so gilt allgemein

$$\vec{E}_e = E_{0,e} \cdot \cos(\vec{k}_e \vec{r} - \omega_e t) \quad (2.3)$$

$$\vec{E}_r = E_{0,r} \cdot \cos(\vec{k}_r \vec{r} - \omega_r t + \phi_r) \quad (2.4)$$

$$\vec{E}_t = E_{0,t} \cdot \cos(\vec{k}_t \vec{r} - \omega_t t + \phi_t) \quad (2.5)$$

wobei die Variablen der eingehenden Welle als bekannt vorausgesetzt werden. Bildet man das Kreuzprodukt der einfallenden, reflektierten und transmittierten Welle mit jeweils dem Einheitsnormalenvektor  $\vec{e}_n$  der Grenzfläche, so erhält man stets die Tangentialkomponente der



jeweiligen Wellen. Aufgrund der Stetigkeitsbedingung der Tangentialkomponente gilt

$$\vec{e}_n \times \vec{E}_e \times \vec{e}_n + \vec{e}_n \times \vec{E}_r \times \vec{e}_n = \vec{e}_n \times \vec{E}_t \times \vec{e}_n. \quad (2.6)$$

Da diese Gleichung zu allen Zeiten und Orten an der Grenzfläche erfüllt sein muss, folgt

$$\omega_e = \omega_r = \omega_t = \omega \quad (2.7)$$

$$\left( \vec{k}_e - \vec{k}_r \right) \vec{r} = \phi_r \quad (2.8)$$

$$\left( \vec{k}_e - \vec{k}_t \right) \vec{r} = \phi_t \quad (2.9)$$

Betrachtet man zunächst nur den reflektierten Anteil, so folgt aufgrund der Definition des Normalenvektors

$$\vec{e}_n \times \left( \vec{k}_e - \vec{k}_r \right) = 0. \quad (2.10)$$

Betrachtet man die obige Gleichung in Betragsschreibweise, so ergibt sich das Reflexionsgesetz, da die einfallende und reflektierte Welle im selben Medium propagieren und der Betrag ihres Wellenvektors somit identisch ist.

$$k_e \sin(\theta_e) = k_r \sin(\theta_r) \quad \Rightarrow \quad \sin(\theta_e) = \sin(\theta_r) \quad \Rightarrow \quad \theta_e = \theta_r \quad (2.11)$$

Analog kann aus Gleichung 2.9 unter Zuhilfenahme von  $k_i = \frac{\omega_i}{c_i}$ ,  $c_i = \frac{1}{\sqrt{\mu_i \mu_0 \epsilon_i \epsilon_0}}$ , und  $n_i = \sqrt{\epsilon_i \mu_i}$  das Snelliussche Brechungsgesetz hergeleitet werden.

$$k_e \sin(\theta_e) = k_t \sin(\theta_t) \quad \Rightarrow \quad n_e \sin(\theta_e) = n_t \sin(\theta_t) \quad (2.12)$$

Die Fresnelschen Gleichungen quantifizieren die Anteile der reflektierten und transmittierten Strahlung. Um diese herzuleiten, betrachtet man zunächst die Amplituden der drei an der Grenzfläche vorhandenen Wellen unter Anwendung der Stetigkeitsbedingung. Es muss gelten

$$E_{0,e} + E_{0,r} = E_{0,t} \quad \text{und} \quad \vec{k}_e E_{0,e} + \vec{k}_r E_{0,r} = \vec{k}_t E_{0,t}. \quad (2.13)$$

Diese Bedingung wird anschließend in zwei Komponenten zerlegt. Eine Komponente enthält die Anteile der Wellen parallel zur Grenzfläche, die andere Komponente die Anteile, welche senkrecht zur Grenzfläche stehen. Für die parallelen Anteile in betragsschreibweise gilt

$$k_e E_{0,e,p} \sin(\theta_e) + k_r E_{0,r,p} \sin(\theta_r) = k_t E_{0,t,p} \sin(\theta_t) \quad (2.14)$$

Wendet man darauf das Reflexionsgesetz an und vereinfacht die Gleichung mit den gleichen Annahme wie zuvor, erhält man

$$n_e \sin(\theta_e) (E_{0,e,p} + E_{0,r,p}) = n_t E_{0,t,p} \sin(\theta_t) \quad (2.15)$$

Für den Reflexions- bzw. den Transmissionskoeffizienten der parallelen Komponente folgt damit

$$r_p = \frac{E_{0,r,p}}{E_{0,e,p}} = \frac{n_t \cos(\theta_e) - n_e \cos(\theta_t)}{n_t \cos(\theta_e) + n_e \cos(\theta_t)} \quad (2.16)$$

$$t_p = \frac{E_{0,t,p}}{E_{0,e,p}} = \frac{2n_e \cos(\theta_e)}{n_t \cos(\theta_e) + n_e \cos(\theta_t)} \quad (2.17)$$

Analog können die Reflexions- bzw. Transmissionskoeffizienten der senkrechten Komponenten hergeleitet werden.

$$r_s = \frac{E_{0,r,s}}{E_{0,e,s}} = \frac{n_e \cos(\theta_e) - n_t \cos(\theta_t)}{n_e \cos(\theta_e) + n_t \cos(\theta_t)} \quad (2.18)$$

$$t_s = \frac{E_{0,t,s}}{E_{0,e,s}} = \frac{2n_e \cos(\theta_e)}{n_e \cos(\theta_e) + n_t \cos(\theta_t)} \quad (2.19)$$

Hierbei muss bedacht werden, dass der Brechungsindex sowohl von der magnetischen Permeabilität  $\mu_e$  als auch von der elektrischen Permittivität  $\epsilon_e$  abhängt, wobei beide komplex definiert sind. Je nach Anwendungsfall kann häufig davon ausgegangen werden, dass die Materialien die gleiche magnetische Permeabilität aufweisen oder nicht magnetisch sind. In diesem Fall hängt der Brechungsindex nur noch von der Permittivität des Materials ab, wird aber weiterhin komplex definiert

$$n = n_{real} + i\kappa \quad (2.20)$$

wobei  $n_{real}$  den Realteil beschreibt und  $\kappa$  den Imaginärteil, der auch als Extinktionskoeffizient bezeichnet wird. Nur für nicht oder leicht absorbierende Materialien kann der Extinktionskoeffizient vernachlässigt werden.

Für den Reflexions- bzw. Transmissiongrad einer Probe, wird die einfallende, reflektierte bzw. transmittierte Intensität einer Welle betrachtet. Da für die Intensität einer Welle  $I \propto |E|^2$  gilt, gilt für den Reflexions- bzw. Transmissionsgrad analog  $R = |r|^2$  bzw.  $T = |t|^2$  mit  $R + T = 1$ .

Der Anteil der Strahlung, der durch ein Material durchtransmittiert wird zusätzlich noch absorbiert. Der Intensitätsabfall beim Durchtritt durch ein absorbierendes Medium wird durch

das Lambert-Beersche-Gesetz beschrieben

$$I = I_0 \cdot e^{-\kappa d} \quad (2.21)$$

Der Extinktionskoeffizient  $\kappa$  enthält hierbei sowohl Intensitätsverluste aufgrund von Absorption als auch aufgrund von Streuung. Der Kehrwert des Extinktionskoeffizienten wird auch als Eindringtiefe bezeichnet. In der Regel ist es bei Terahertzmessungen nicht möglich, Streuung und Absorption getrennt voneinander zu betrachten. Ist die Struktur der Probe sehr gut bekannt, kann ein Versuch unternommen werden, den Streuquerschnitt einer Probe zu berechnen und die Anteile der Streuung und Absorption zu quantifizieren. Im folgenden Kapitel erfolgen dazu genauere Ausführungen. Generell soll bereits an dieser Stelle jedoch angemerkt werden, dass der in THz-Messungen häufig bestimmte Absorptionskoeffizient ebenfalls Absorption und Streuung kombiniert und nicht mit der reinen Absorption einer Probe gleichzusetzen ist. Eine genauere Definition des Absorptionskoeffizienten in Relation zu dem Extinktionskoeffizienten wird in Kapitel 2.3.3 gegeben.

### 2.2.2 Streuung

Idealerweise werden bei der THz-Spektroskopie Proben untersucht, deren strukturelle Anordnung einige Größenordnungen unter denen der THz-Wellenlängen liegt und die eine glatte Oberfläche aufweisen. Bei der Anwendung von THz-Strahlung an realen, nicht speziell für die Untersuchung hergestellten Probe, ist diese Anforderung allerdings häufig nicht erfüllt. Liegt die Größenordnung der Struktur einer Probe in der der THz-Wellenlänge, treten Streueffekte auf, die spektroskopische Eigenschaften oder tieferliegende Schichtstrukturen der Proben überlagern. Dabei kann die THz-Strahlung sowohl an der Oberfläche der Probe als auch im Inneren gestreut werden. Bei einem Großteil der Proben muss von beiden Streueffekten ausgegangen werden. Eine detaillierte Abhandlung von Streuphänomenen im THz-Bereich und mögliche Lösungsansätze finden sich in [65].

#### Oberflächenstreuung

Oberflächenstreuung dominiert das gemessene THz-Signal vor allem in den Fällen, in denen die Eindringtiefe der THz-Strahlung in das Medium gering ist, d.h. im Falle von für THz-Strahlung opaken Medien. Um den Einfluss der Streuung messtechnisch zu evaluieren, wäre eine Vielzahl an unterschiedlichen Punktmessungen nötig, daher wird mittels theoretischer Berechnungen versucht, den Streuquerschnitt einer Oberfläche zu ermitteln.

Eine raue Oberfläche kann als eine zufällige Höhenverteilung  $\xi$  angesehen werden, wobei jede Höhe mit derselben Wahrscheinlichkeit auftritt. Der quadratische Mittelwert der verschiedenen Höhen  $h$ , auch Mittelrauwert genannt, ist dann gegeben durch

$$h = \sqrt{\langle \xi^2(x, y) \rangle} \quad (2.22)$$

Wie rau eine Oberfläche gegenüber der einfallenden Welle erscheint, hängt maßgeblich von der jeweiligen Wellenlänge ab. Für kleinere Wellenlängen erscheint die Oberfläche einer Probe also rauer als für größere. Im sogenannten Fraunhofer Kriterium wird eine Oberfläche als rau definiert, wenn aufgrund der Rauheit ein Phasenversatz von mindestens  $\pi/8$  im Vergleich zu einer glatten Oberfläche erfolgt [65]. Damit folgt für den Mittelrauwert, dass folgende Bedingung erfüllt sein muss, wenn von einer rauen Oberfläche gesprochen wird

$$h \geq \frac{\lambda}{32 \cos \theta_e} \quad (2.23)$$

wobei  $\theta_e$  den Einfallswinkel der elektromagnetischen Welle beschreibt. Bei einem senkrechten Einfall der Strahlung und einer Wellenlänge von 1 mm kann also eine Oberfläche als rau angenommen werden, deren Mittelrauwert  $h$  größer als  $31 \mu\text{m}$  ist.

### **Volumenstreuung**

Streuungen elektromagnetischer Wellen im Volumen entstehen beispielsweise an Luftblasen oder kleinen Körnchen. Neben der Absorption der Strahlung in diesen Bereichen kommt es auch zu einer Streuung in verschiedene Richtungen. Wie stark die Strahlung in einer Probe gestreut wird, hängt maßgeblich von der Größe der Streuzentren relativ zur Größenordnung der Wellenlänge, deren Konzentration, Form und Orientierung sowie des dielektrischen Kontrastes zur Umgebungsmaterie ab.

Um sich der Streuung im Volumen von der theoretischen Seite zu nähern, geht man zunächst von einem einzelnen Teilchen mit Permittivität  $\epsilon_p$  aus, welches sich von der Permittivität  $\epsilon$  des umgebenden Materials unterscheidet. Betrachtet man das Fernfeld der gestreuten Welle, so ergibt sich eine sphärische Verteilung der Strahlung, die abhängig ist von der Distanz  $r$  zwischen Streuzentrum und Beobachtungspunkt. Das elektrische Feld der gestreuten Strahlung in Richtung  $k_s$  kann dann beschrieben werden durch

$$\vec{E}_s = \vec{e}_s f_s(\vec{k}_s, \vec{k}_i) E_0 \frac{e^{ikr}}{r} \quad (2.24)$$

wobei  $f_s$  die Amplitude der gestreuten Strahlung beschreibt, die aus Richtung  $k_i$  in Richtung  $k_s$  gestreut wurde. Der Streuquerschnitt  $\sigma$  berechnet sich dann aus der Integration der Streuamplitude über alle Winkel

$$\sigma = \int d\Omega \left| f_s(\vec{k}_s, \vec{k}_i) \right|^2 \quad (2.25)$$

Das letztlich gemessene Signal entsteht allerdings nicht nur aufgrund von Streuung, sondern auch aufgrund von Absorption im Material. Die Kombination beider Prozesse wird als Extinktion bezeichnet, sodass für den Extinktionsquerschnitt  $\sigma_e = \sigma_s + \sigma_a$  gilt. Eine analytische Berechnung der einzelnen Bestandteile ist nur möglich, wenn die Streuzentren zum Beispiel kugel- oder zylinderförmig sind, also einer einfachen symmetrischen Struktur folgen. Für komplexere Streuzentren muss versucht werden, eine numerische Lösung des Problems zu finden.

### 2.2.3 Besonderheiten organischer und kunsthistorischer Proben

Die Proben, die in dieser Arbeit untersucht wurden, weisen eine Vielzahl diverser Inhomogenitäten auf. Betrachtet man beispielsweise zunächst nur die ersten Hautschichten eines Menschen, so existiert bereits hier eine große Zahl an Streuzentren wie beispielsweise Blutgefäße, Muskeln, Talgdrüsen, Haarwurzeln oder Schweißporen, deren Größenordnung im Bereich der THz-Wellenlängen liegen. Aber auch die Oberfläche der Haut kann als rau angenommen werden, sodass bereits hier erste Streueffekte auftreten. Dies alles beeinflusst die Eindringtiefe der THz-Strahlung in organische Proben maßgeblich. Im Falle von Kunstobjekten sind je nach verwendetem Material ebenfalls beispielsweise Pigmentkörner oder Sägemehl und Lufteinschlüsse durch Insektenfrass in den einzelnen Schichten zu finden, die Streuung der THz-Strahlung initiieren können. Je nach Zustand des Kunstobjektes kann auch die Oberfläche bereits rau sein bzw. eine darunterliegende Trägerschicht wie beispielsweise Holz durch eventuelle Frassschäden ebenfalls angeraut sein. Die in dieser Arbeit vorgestellten Messungen unterliegen also einem vergleichsweise hohem Streueffekt. Insbesondere die Genauigkeit der spektroskopischen Messungen von organischen oder kunsthistorischen Proben ist daher deutlich geringer als es beispielsweise bei glatten Kunststoffproben der Fall ist. Um dieser Ungenauigkeit zu begegnen wurde für die spektroskopischen Datenbanken eine Vielzahl an Proben eingemessen. Auch bei den bildgebenden Messungen spielt die Streuung eine Rolle. Zum einen entsteht bei der tomographischen Rekonstruktion der Proben eine gewisse Ungenauigkeit aufgrund der fehlerbehafteten spektroskopischen Daten. Zum anderen wird das messbare Signal, welches in Richtung des Detektors zurückreflektiert wird, deutlich durch Streuung geschwächt.

## 2.3 Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie

Die THz-Zeitbereichsspektroskopie (engl.: time-domain spectroscopy (TDS)) ist eine Spektroskopiemethode, die es ermöglicht, Proben amplituden-, phasen- und frequenz aufgelöst zu untersuchen. Mithilfe dieser Methode können zum einen dielektrische Eigenschaften wie die Permittivität einer Probe im THz-Bereich untersucht werden, zum anderen kann THz-TDS aber auch zur Untersuchung von zeitabhängigen Prozessen herangezogen werden [5]. Sind die dielektrischen Eigenschaften einer Probe im THz-Bereich bekannt, können umgekehrt Aussagen über beispielsweise Schichtstrukturen oder Schichtstärken getroffen werden. In diesem Kapitel wird zunächst die Generation und Detektion der THz-Strahlung mit Hilfe von fotoleitenden An-

tennen näher erläutert, bevor der experimentelle Aufbau eines THz-Zeitbereichsspektrometers im Ganzen vorgestellt wird. Im Anschluss werden dann die Möglichkeiten zur Datenauswertung aufgezeigt. Um das Grundlagenkapitel abzuschließen, wird im letzten Unterabschnitt auf den Stand der Terahertztechnik im Bereich der Anthropologie und der Kunsthistorik- bzw. restaurierung eingegangen.

### 2.3.1 Generation und Detektion

Im Rahmen dieser Arbeit sind kommerziell erhältliche THz-Zeitbereichsspektrometer zum Einsatz gekommen, die den Vorteil mit sich bringen, dass die Laserstrahlung in Glasfasern geführt wird und die Systeme somit sehr anwenderfreundlich zu handhaben sind. Sowohl zur Generation und Detektion der THz-Strahlung kommen fotoleitende Antennen zum Einsatz, deren Funktionsweise nun näher erläutert wird [66].

Eine fotoleitende Antenne setzt sich aus zwei wichtigen Komponenten zusammen. Abbildung 4 zeigt eine schematische Übersicht. Das Kernstück einer fotoleitenden Antenne ist das Halbleitersubstrat, welches maßgeblich die Ladungsträgerdynamik beeinflusst. Auf dieses Halbleitersubstrat wird durch Fotolithographie eine metallische Antennenstruktur aufgebracht, die letztlich die Bandbreite und das Abstrahlverhalten der THz-Antenne bestimmt [67]. Um das grundsätzliche Prinzip einer fotoleitenden Antenne zur Erzeugung von THz-Strahlung zu verstehen, soll zunächst eine einfache Dipolstruktur betrachtet werden. Diese Dipolstruktur besteht aus einer länglichen Leiterbahn von beispielsweise  $200\ \mu\text{m}$  Länge, in dessen Mitte sich eine Lücke findet und an dessen Enden jeweils weitere Leiterbahnen angebracht sind, die eine elektrische Kontaktierung ermöglichen.

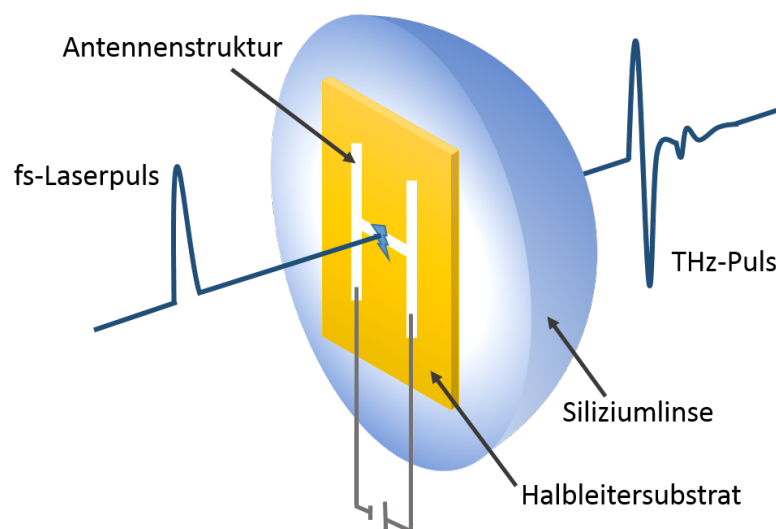


Abbildung 4: Prinzip einer fotoleitenden Antenne

Um THz-Strahlung zu erzeugen wird nun Laserstrahlung auf die Lücke in der Antennenstruktur fokussiert. Dadurch werden im Halbleitersubstrat freie Ladungsträger angeregt und die Antennenstruktur wird für die Dauer des Laserpulses leitend. Im Falle der Generation liegt an den Leiterbahnen eine elektrische Spannung an, die einen Stromfluss erzeugt, wenn freie Ladungsträger zur Verfügung stehen. Als Resultat ergibt sich ein Stromfluss, der mit der Dauer der optischen Laserpulse getaktet ist. Liegt die zeitliche Dauer der anregenden Laserpulse im Femtosekundenbereich, erzeugt die Transiente dieses Stromflusses letztlich die THz-Strahlung, welche zunächst durch das Halbleitermaterial propagiert. Das elektrische Feld  $E_{THz}$  der abgestrahlten THz-Welle kann somit durch folgende Relation beschrieben werden

$$E_{THz}(t) \propto \frac{d}{dt} I_E(t) \propto \frac{d}{dt} \sigma_E(t) \propto \frac{d}{dt} n_E(t, P_{opt}(t)) \quad (2.26)$$

wobei  $I_E$  den Fotostrom an der Emitterantenne,  $\sigma_E$  die Leitfähigkeit der Antenne und  $n_E$  die Anzahl der freien Ladungsträger beschreibt. Die Änderung der Anzahl der freien Ladungsträger ist dabei anhängig von der eingestrahnten Leistung  $P_{opt}$  des Lasers, der Ladungsträgerlebensdauer  $\tau$  und weiteren materialspezifischen Parametern  $\Omega_E$ .

$$\frac{d}{dt} n_E(t, P_{opt}(t)) = \Omega_E P_{opt}(t) - \frac{n_E(t)}{\tau} \quad (2.27)$$

Um die Strahlung aus dem Halbleitermaterial in einer Richtung auszukoppeln und Verluste aufgrund von Totalreflexion an der Grenzfläche zu verhindern, wird eine halbkugelförmige Siliziumlinse direkt auf das Halbleitermaterial aufgebracht.

Für die Detektion von THz-Strahlung wird eine fotoleitende Antenne ohne eine extern anliegende Spannung betrieben. Hierbei folgen die durch den Laserpuls angeregten Ladungsträger dem eingehenden elektrischen Feld der THz-Strahlung. Der so induzierte Stromfluss kann gemessen und als THz-Signal dargestellt werden. Durch eine zeitliche Abstimmung des Anregungs- und Abfragelaserpulses kann so ein THz-Signal Punkt für Punkt im Zeitbereich abgetastet werden. Der am Detektor gemessene Strom wird durch das Faltungsintegral aus eingehendem THz-Feld  $E_{THz}$  und der Antwortfunktion des Detektors  $g(t)$  beschrieben

$$J(\Delta t) \propto \int_{-\infty}^{\infty} E_{THz}(t) g(t - \Delta t) d\Delta t \quad (2.28)$$

Auf die genaue Umsetzung dieser Abtastung wird im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

Für eine optimale Erzeugung und Detektion von THz-Strahlung werden folgende Anforderungen an die materialspezifischen Parameter gestellt [68]:

- Der Dunkelwiderstand des Halbleitermaterials sollte so hoch wie möglich sein, damit während der Abwesenheit des Laserpulses möglichst kein Strom fließt.
- Die Ladungsträger sollten eine hohe Mobilität und eine kurze Lebensdauer aufweisen um dem angelegten bzw. eingehenden elektrischen Feld instantan zu folgen.
- Die Bandlücke des Halbleitersubstrats muss unterhalb der Photonenenergie liegen, um eine Anregung zu ermöglichen.

Je nach Wellenlänge des Anregungslasers kommen für diese Anforderungen verschiedene Materialsysteme in Frage. Für Anregungswellenlängen von 1550 nm, wie sie bei fasergekoppelten Systemen hauptsächlich vorkommen, findet vor allem Indiumgalliumarsenid (InGaAs) Verwendung, welches eine sehr hohe Ladungsträgermobilität aufweist. Aufgrund sich ausbildender Indiumcluster bei den entsprechenden Wachstumstemperaturen ist zudem die Ladungsträgerlebensdauer sehr kurz, da die Indiumcluster als Einfangzentren fungieren [69]. In THz-Antennen der neuesten Generation kommen spezielle Weiterentwicklungen dieser Halbleiterstruktur wie beispielsweise Stapel aus InGaAs- und AlGaAs-Schichten oder eine Mesastrukturierung des Lückenbereiches vor [70].

### 2.3.2 Integration zum Gesamtsystem

Abbildung 5 zeigt eine schematische Gesamtübersicht eines typischen THz-Zeitbereichsspektrometers. Die wichtigsten Komponenten werden im Folgenden erläutert.

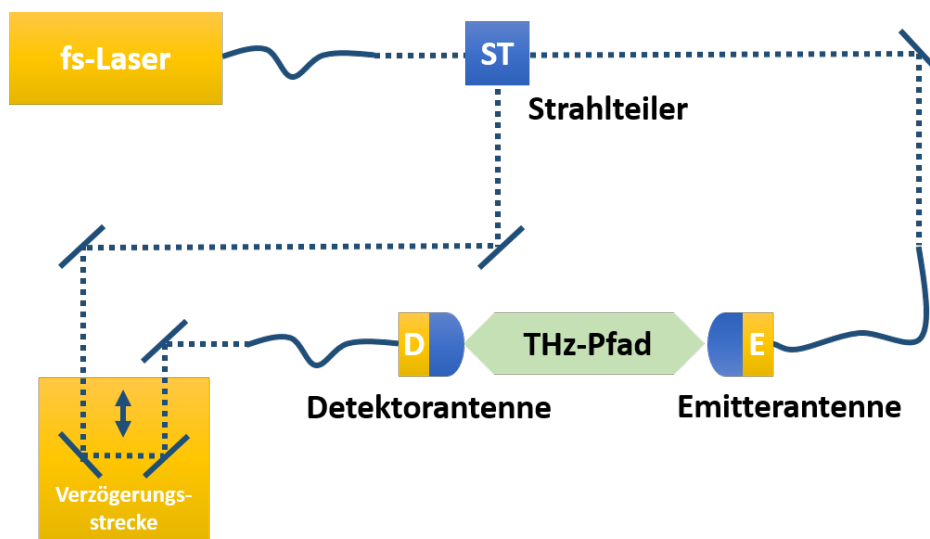


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines THz-Zeitbereichsspektrometers in Transmissionskonfiguration

Bei der Darstellung der Generation und Detektion von THz-Strahlung im vorigen Kapitel wurde bereits die Bedeutung eines gepulsten Lasers benannt. Eine gepulste Laserquelle ist daher



eines der wichtigsten Bestandteile eines THz-Zeitbereichsspektrometers. Je nach Anwendung gibt es verschiedene Möglichkeiten bei der weiteren Ausführung des Systems [71]. Die Laserstrahlung kann bereits innerhalb des Lasers auf zwei Kanäle aufgespalten werden und wird dann über zwei Glasfasern zu den fotoleitenden Antennen geleitet. Bei der Verwendung von Glasfasern hat dies den Nachteil, dass die beiden Glasfasern eventuell unterschiedlichen klimatischen Einflüssen ausgesetzt sind, sodass ein ungewollter Unterschied zwischen dem Anrege- und Abfragepuls entsteht. Hierbei muss sichergestellt sein, dass die Glasfasern auf eine minimale Länge beschränkt werden und möglichst gleichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind. Eine Verwendung ausschließlich von Spiegeln zur Führung der Laserstrahlung hat wiederum den Nachteil, dass die Anwendbarkeit und Mobilität des Systems stark eingeschränkt ist, weshalb in kompakten Systemen häufig auf Glasfasern zurückgegriffen wird.

Um die zeitliche Abtastung des THz-Signals zu realisieren, wird eine Einheit benötigt, die einen Phasenversatz zwischen Anrege- und Abfragepuls initiiert. Auch hierfür gibt es verschiedene Varianten, die Vorteile und Nachteile mit sich bringen. Bei der klassischen Variante wird eine mechanische Verzögerungsstrecke als Freistrahleinheit in den Strahlengang eingebracht. Durch Vor- und Zurückfahren der Verzögerungsstrecke verlängert bzw. verkürzt sich die Pfadlänge des Lasers zum Detektor im Vergleich zu der des Emitters. Diese Variante hat den Vorteil, dass sie sehr phasenstabil arbeitet. Nachteilig wirkt sich hier die vergleichsweise langsame Verfahrensgeschwindigkeit aus, die letztlich zu einer höheren Messdauer führt [5].

Um sehr schnelle THz-Messungen mit Geschwindigkeiten von einigen kHz zu realisieren, gibt es daher andere Ansätze wie beispielsweise ASOPS [9] oder ECOPS [10], wo die Repetitionsrate der Laser entsprechend verändert wird, um einen Phasenversatz zu erzeugen. Da diese Varianten rein elektronisch arbeiten, können deutlich höhere Messgeschwindigkeiten erzielt werden. Aufgrund der schwierigen Synchronisation der Laserpulse ist hier allerdings mit Abstrichen in der Systemstabilität zu rechnen.

Eine weitere Variante der Phasenverzögerung besteht in der Verwendung eines Faserstreckers [5]. In diesem Bauteil sind Glasfasern mit einer Vielzahl an Windungen um einen Piezomotor gewunden, der sich leicht zusammen und auseinander bewegt. Auf diese Weise wird die Länge der Glasfasern minimal verändert, sodass sich hier ebenfalls eine größere optische Weglänge im Detektorpfad ergibt. So ein sogenanntes Faserstreckersystem bietet Messgeschwindigkeiten von einigen Hz, wobei nur ein relativ kurzes Zeitfenster abgetastet werden kann. Inzwischen lösen allerdings mechanische Verzögerungsstrecken mit ebenfalls Scangeschwindigkeiten im Hz-Bereich diese Art von THz-Systemen aufgrund der höheren Stabilität immer mehr ab.

Um die erzeugte THz-Strahlung letztlich zur Probe und wieder zum Detektor zu leiten, stehen zwei verschiedene Möglichkeiten offen. Zum einen können spezielle Kunststofflinsen verwendet werden, die sich durch einen geringen Absorptionskoeffizienten und eine geringe Dispersion des

Brechungsindex im THz-Bereich auszeichnen, zum anderen können Parabolspiegel zum Einsatz kommen. Zweitere haben den Vorteil einer deutlichen weniger verlustbehafteten Strahlführung sowie einer genaueren Abbildung der THz-Strahlung. Sie finden daher vor allem bei sehr hoch-qualitativen spektroskopischen Messungen Anwendung, bei denen eine hohe Bandbreite von Nöten ist. Die Justierung dieser Parabolspiegel ist allerdings deutlich anfälliger, weshalb bei industriellen Anwendungen häufig auch Kunststofflinsen zum Einsatz kommen. Hierbei wird vornehmlich auf hoch dichtes Polyethylen zurückgegriffen, was sich durch die oben genannten Eigenschaften einer geringen Absorption und eines flachen Brechungsindexverlauf im THz-Bereich auszeichnet [72]. Sowohl Linsen als auch Parabolspiegel können für verschiedene Strahlführungszwecke eingesetzt werden. Bei THz-Messungen unterscheidet man vor allem zwischen zwei häufig vorkommenden Strahlführungen: Soll ein möglichst großer Bereich der Probe gleichzeitig vermessen werden, kann man die emittierte THz-Strahlung lediglich durch ein optisches Bauteil kollimieren und anschließend wieder auf den Detektor fokussieren. Soll eine Probe Punkt für Punkt abgerastert oder nur sehr kleine Areale auf der Probe vermessen werden, besteht die Möglichkeit, die Strahlung durch den Einbau von zwei zusätzlichen Linsen oder Parabolspiegeln zu fokussieren.

Des Weiteren kann ein THz-Zeitbereichsspektrometer in zwei verschiedenen Messkonfigurationen verwendet werden. Je nach Anwendungsfall kann man sowohl THz-Strahlung untersuchen, die durch eine Probe transmittiert ist, als auch solche, die an einer Probe reflektiert wurde. Bei stark absorbierenden oder dicken Proben ist eine Messung in Reflexion unumgänglich. Teilweise erfordert auch die Probengeometrie eine Messung in Reflexion. Besonders im industriellen Einsatz ist ein Zugang für Transmissionsmessungen häufig nicht gegeben. Insbesondere für Reflexionsmessungen gibt es daher eine Vielzahl an Messanordnungen, die in Abbildung 6 zusammengefasst sind.

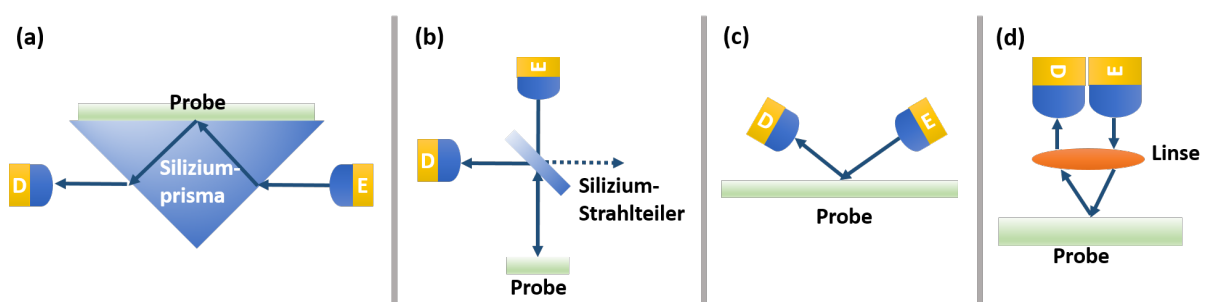


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Möglichkeiten zur Reflexionsmessung mittels THz-Strahlung

Bei der sogenannten abgeschwächten Totalreflexion (engl.: attenuated total reflection (ATR)) wird ein THz-TDS-System in Transmissionsgeometrie verwendet. Anstatt die Probe in den THz-Strahlengang zu platzieren, wird allerdings ein Prisma aus hochohmigem Silizium in den Strahlengang gebracht, das von der Form her so gestaltet ist, dass die THz-Strahlung an des-

sen Oberfläche vollständig reflektiert wird [73] (vgl. Abb. 6(a)). Im Fall dieser Totalreflexion bildet sich eine evaneszente Welle aus, die mit der auf der Oberfläche des Prismas platzierten Probe wechselwirkt. Die so durch die Probe modifizierte THz-Strahlung wird dann detektiert und kann ebenfalls hinsichtlich Brechungsindex und Absorptionskoeffizienten der Probe ausgewertet werden. Diese Technik eignet sich insbesondere um Flüssigkeiten wie beispielsweise Wasser oder Alkohol zu untersuchen [74, 75]. Es ist aber auch möglich Kristallisationsprozesse [76] oder chemische Reaktionen [77] über einen kurzen oder längeren Zeitraum zu verfolgen.

Bei einem Reflexionsaufbau mittels Strahlteilern kommt ebenfalls hochohmiges Silizium zum Einsatz. Hierbei wird der Strahlteiler unter einem  $45^\circ$  Winkel zur Strahlung platziert, wobei die Hälfte der Strahlung durch den Strahlteiler transmittiert und die andere Hälfte reflektiert wird. Der transmittierte Anteil trifft auf die Probenoberfläche, wird dort entsprechend der dielektrischen Eigenschaften der Probe reflektiert und trifft erneut auf den Strahlteiler, wo wiederum die Hälfte der Strahlung zum Detektor reflektiert wird (vgl. Abb. 6(b)). Geht man von einer metallenen Oberfläche aus, die die eingehende Strahlung vollständig reflektiert, dann wird bei dieser Art von Reflexionsaufbau dennoch nur ein Viertel der emittierten THz-Strahlung vom Detektor detektiert. Dieser Aufbau bietet allerdings den Vorteil, dass die Strahlung exakt senkrecht auf die Probenoberfläche trifft, was Streuverluste an der Oberfläche minimiert und die Datenauswertung erleichtert [74].

Alternative Ansätze, bei denen theoretisch bis zu 100 Prozent der ausgesandten Strahlung detektiert werden können, leiten die THz-Strahlung unter einem Winkel auf die Probenoberfläche. Dafür kann man entweder den Detektor unter demselben Winkel wie den Emitter positionieren (vgl. Abb. 6(c)) oder man entwickelt mittels Linsen oder Parabolspiegeln einen Strahlengang, der es erlaubt Emitter- und Detektorantenne direkt nebeneinander zu platzieren [78] (vgl. Abb. 6(d)). Hierbei wird die emittierte Strahlung zunächst durch eine Linse oder einen Parabolspiegel kollimiert und anschließend durch eine weitere Linse oder einen Parabolspiegel unter einem Winkel auf die Probe fokussiert. Die reflektierte Strahlung wird durch dieselbe Linse oder einen weiteren Parabolspiegel wiederum kollimiert und durch ein weiteres optisches Bauteil auf den Detektor fokussiert. Der Winkel, unter dem die Strahlung in diesem Fall auf die Antenne trifft, hängt dabei maßgeblich von den Dimensionen der Antennengehäuse ab.

Um den Auftreffwinkel der Strahlung möglichst gering zu halten, gibt es Versuche die Emitter- und Detektorantenne in einem Gehäuse zu vereinen und die beiden Halbleitersubstrate möglichst nah zu platzieren oder ein gemeinsames Halbleitersubstrat zu verwenden. Dies birgt die Gefahr von gegenseitiger Signalbeeinträchtigung und ist daher nur unter sehr großem technischem Aufwand realisierbar. Nichtsdestotrotz gelang vor kurzem die Demonstration eines solchen THz-Transceivers [79] mit bis zu 4,5 THz Bandbreite. Eine andere Lösung zur Minimierung des Antennengehäuses besteht in der Verwendung nur einer Antenne bei gleichzeitiger

Modulierung der Repetitionsrate des Anregungslasers. So kann eine Antenne sowohl zur Emission als auch zur Detektion der THz-Strahlung verwendet werden [80]. Diese Art von Systemen arbeitet allerdings sehr instabil, weshalb voraussichtlich die zuerst genannte Variante mehr Verbreitung finden wird.

### 2.3.3 Datenauswertung

Aufgrund der Tatsache, dass Terahertz-Zeitbereichsmessungen gleichzeitig eine Vielzahl an Informationen ergeben, gibt es auch ebenso viele Auswertungsmöglichkeiten. Der Abschnitt gliedert sich in die zwei wichtigsten Auswertungsmöglichkeiten, die in dieser Arbeit Anwendung finden. Begonnen wird mit einer spektroskopischen Auswertung der Daten, anschließend werden die Zeitbereichssignale vor dem Hintergrund einer tomographischen Rekonstruktion basierend auf THz-Daten näher betrachtet.

#### Spektroskopische Auswertung

Bei der Zeitbereichsspektroskopie von Proben ist man vor allem an den dielektrischen Eigenschaften der Proben im THz-Bereich interessiert. Hierfür werden häufig basierend auf den Fresnelschen Gleichungen, die in Abschnitt 2.2.1 erläutert wurden, der Brechungsindex und der Absorptionskoeffizient eines Materials ermittelt. Der ermittelte Absorptionskoeffizient sollte hierbei nicht mit der Absorption aufgrund von Energieabgabe an das Medium gleichgesetzt, sondern mehr als Dämpfungskonstante verstanden werden, die auch Energieverluste in Form von Streuprozessen beinhaltet.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis einer exemplarischen THz-Zeitbereichsmessung einer Bienenwachsprobe. Eine Probenmessung, dargestellt als gelbe Linie, wird immer mit einer Referenzmessung (blau) verglichen, bei der keine Probe im THz-Strahlengang enthalten war. Im Zeitbereich kann man zunächst eine Dämpfung der Amplitude und eine Verschiebung in der Zeit im Falle der Probemessung beobachten. Ist die Dicke der Probe bekannt kann anhand dieser Beobachtungen eine zunächst einfache, frequenzunabhängige Auswertung des Absorptionskoeffizienten und des Brechungsindex der Probe erfolgen. Ist man jedoch an der Frequenzabhängigkeit der dielektrischen Eigenschaften einer Probe interessiert, bietet es sich an, die Zeitbereichssignale zunächst mittels einer Fouriertransformation in den Frequenzraum zu transformieren.

Abbildung 8 zeigt schematisch den Strahlungsverlauf bei THz-Messungen in Transmission und Reflexion, anhand dessen sich der mathematischen Beschreibung der Auswertung genähert werden soll.

Der eingehende THz-Puls kann nach der Fouriertransformation der Zeitbereichsdaten durch seine spektrale Amplitude und Phase  $E_0(\omega)$  beschrieben werden. Vernachlässigt man zunächst

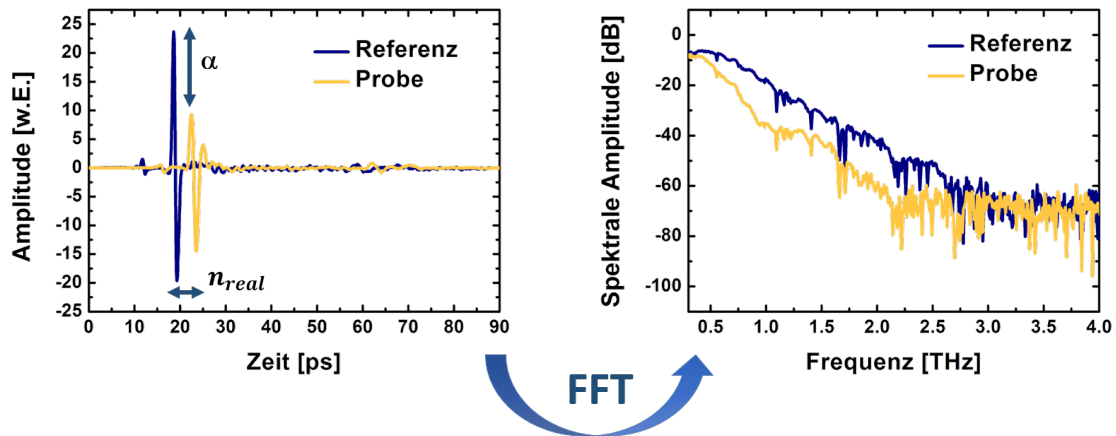


Abbildung 7: Exemplarische THz-Zeitbereichsmessung anhand dessen Parameter wie Absorptionkoeffizient und Brechungsindex der Probe bestimmt werden können. Ein Probenpuls (gelb) wird immer mit einem Referenzpuls (blau) verglichen. Für eine frequenzabhängige Auswertung erfolgt die Transformation in den Frequenzbereich

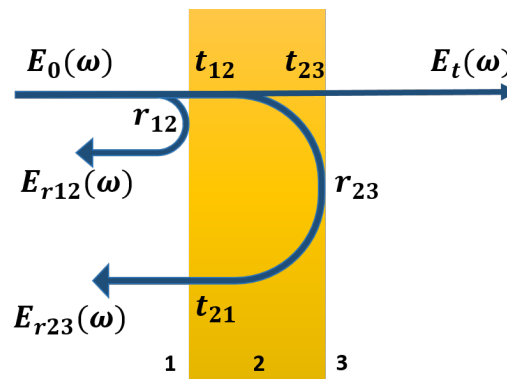


Abbildung 8: Aufteilung der THz-Strahlung an einer Grenzfläche. (Unter Änderungen entnommen aus [5])

Mehrfachreflexionen innerhalb der Probe, können die entsprechend transmittierten und reflektierten Anteile der Strahlung im Frequenzbereich folgendermaßen beschrieben werden [5]

$$\vec{E}_t(\omega) = \vec{E}_0(\omega) t_{12} t_{23} \exp\left(\frac{-\alpha d}{2}\right) \exp\left(\frac{i n \omega d}{c}\right) \quad (2.29)$$

$$\vec{E}_{r12}(\omega) = \vec{E}_0(\omega) r_{12} \quad (2.30)$$

$$\vec{E}_{r23}(\omega) = \vec{E}_0(\omega) t_{12} r_{23} t_{21} \exp\left(\frac{-\alpha d}{2}\right) \exp\left(\frac{i n \omega d}{c}\right) \quad (2.31)$$

wobei  $t_{xy}$  und  $r_{xy}$  die entsprechenden Fresnelkoeffizienten sind, die in Kapitel 2.2.1 hergeleitet wurden. Für den Vergleich aus Referenz- und Probenmessung ergibt sich damit folgendes in

Transmission

$$\frac{E_{sam}(\omega)}{E_{ref}(\omega)} = T(\omega)e^{i\varphi(\omega)} = t_{12}t_{23}\exp\left(\frac{-\alpha d}{2}\right)\exp\left(\frac{i(n-1)\omega d}{c}\right) \quad (2.32)$$

wobei  $T(\omega)$  die Transmissionsfunktion beschreibt. Nimmt man an, dass die Absorption einer Probe gering ist, sodass die Fresnelkoeffizienten als reell-wertig betrachtet werden können, ergibt sich für den Brechungsindex  $n(\omega)$  und den Absorptionskoeffizienten  $\alpha(\omega)$

$$n(\omega) = 1 + \frac{\varphi(\omega)c}{\omega d} \quad (2.33)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2}{d}\ln\left(\frac{(n_{real} + 1)^2}{4n}T(\omega)\right) \quad (2.34)$$

Analog ergeben sich folgende Ergebnisse für den Brechungsindex und Absorptionskoeffizienten in einer Reflexionsmessung unter senkrechtem Einfall

$$n(\omega) = \frac{1 - |r|^2}{1 + |r|^2 - 2|r|\cos(\varphi)} \quad (2.35)$$

$$\alpha(\omega) = -\frac{2\omega}{c}\frac{2|r|\sin(\varphi)}{1 + |r|^2 - 2|r|\cos(\varphi)} \quad (2.36)$$

Die Variable  $|r|$  beschreibt hierbei den Quotienten aus Proben- und Referenzmessung und  $\varphi$  die Phasenverschiebung zwischen Referenz- und Probenmessung. Basierend auf diesen Daten können diverse weitere dielektrische Parameter wie der Extinktionskoeffizient  $\kappa(\omega) = \alpha(\omega)c/2\omega$  oder die Permittivität  $\epsilon = |n|^2 = (n_{real} + i\kappa)^2$  berechnet werden, wobei  $n$  den komplexen Brechungsindex beschreibt. Sollte die Absorption einer Probe nicht vernachlässigbar sein, muss Gleichung 2.32 numerisch gelöst werden.

Sollte die Dicke einer Probe nicht exakt bekannt sein, gibt es Algorithmen, die die Dicke in einem vorgegeben Bereich gleichzeitig mitoptimieren können. Hierzu werden Mehrfachreflexionen, die sogenannten Fabry-Perot-Pulse in einer Probe ebenfalls in die Auswertung mit einbezogen. Die so ausgewerteten Parameter sind zudem exakter als Daten die ohne Berücksichtigung dieser Mehrfachreflexionen ausgewertet wurden. Insbesondere bei sehr dünnen Proben, deren Messsignal eine Vielzahl an Fabry-Perot-Pulsen enthält, ist eine Berücksichtigung der Mehrfachreflexe essentiell für ein qualitativ hochwertiges Ergebnis. Die Transmissionsfunktion kann in diesem Fall durch

$$T(\omega) = \frac{4n}{(n+1)^2}\exp\left(\frac{-\alpha d}{2}\right)\exp\left(\frac{i n \omega d}{c}\right)FP(\omega) \quad (2.37)$$

$$\text{mit } FP(\omega) = \frac{1}{1 - \left(\frac{n-1}{n+1}\right)\exp(-\alpha d)\exp\left(\frac{2in\omega d}{c}\right)} \quad (2.38)$$

beschrieben werden, wobei  $FP(\omega)$  als Fabry-Perot-Faktor bezeichnet wird [81]. Um mit Hilfe dieser Gleichungen den Brechungsindex und den Absorptionskoeffizienten auszuwerten, sind iterative, numerische Verfahren notwendig [82–84]. Das Verfahren, das in dieser Arbeit verwendet wurde, basiert auf einer zusätzlichen Fouriertransformation der bereits in den Frequenzraum transformierten Daten. Auf diese Weise befinden sich die Daten in einem Quasizeitraum, in welchem die periodischen Fabry-Perot-Pulse als diskrete Peaks erscheinen. Der Algorithmus minimiert die Amplitude dieser Peaks im Quasizeitraum durch eine Variation der Probendicke und gibt die entsprechenden Brechungsindizes und Absorptionskoeffizienten für die optimierte Dicke aus [82].

Um die dielektrischen Eigenschaften einer Probe zu bestimmen, werden die Proben in der Regel in Transmission vermessen, da spektroskopische Messungen in Reflexion deutlich fehlerbehafteter sein können. Das Problem besteht hier vor allem in der Durchführung einer Referenzmessung. Der direkte Weg wäre hierbei die Messung der Reflexion an einem Metallspiegel. Um bei der Referenzmessung jedoch exakt dieselbe Phase zu erhalten wie bei der Probenmessung, muss dieser Metallspiegel exakt an der selben Stelle positioniert werden wie die Probe. Dies erweist sich in der Praxis als mitunter sehr schwierig und führt zu einem signifikanten Fehlereintrag bei der Auswertung der dielektrischen Eigenschaften. Um diesen Fehler zu umgehen, gibt es die Möglichkeit, die Probe in direkten Kontakt mit einem Referenzmaterial zu bringen, dessen dielektrische Eigenschaften bekannt sind [5, 85]. So kann der THz-Puls, welcher an der ersten Grenzfläche dieses Materials reflektiert wurde als Referenzpuls verwendet werden. Setzt man diesen so gewonnenen Referenzpuls ins Verhältnis zum Probenpuls, der an der Grenzfläche zwischen Referenzmaterial und Probenmaterial gewonnen wurde, so erhält man folgenden Ausdruck für den Quotienten

$$|r|e^{i\varphi} = \frac{t_{12}r_{23}r_{21}}{r_{12}} \exp\left(\frac{i n \omega d}{c}\right). \quad (2.39)$$

Für eine erfolgreiche Datenauswertung muss in diesem Fall die Dicke des Referenzmaterials sehr exakt bekannt sein, da sich ansonsten auch hier der gleiche Phasenfehler ergibt, wie bei einer Referenzmessung an einem separaten Metallspiegel.

Eine Alternative zu beiden Messverfahren stellt die THz-ATR-Spektroskopie dar, die im vorigen Kapitel bereits kurz vorgestellt wurde. Durch die Platzierung der Probe direkt auf der Oberfläche des Siliziumprismas ergibt sich hier kein störender Phasenversatz. Zudem kann die Oberfläche des Prismas in zwei oder mehr Bereiche unterteilt werden. Durch ein Verfahren des Prismas zwischen diesen Bereichen können Proben- und Referenzmessungen über einen längeren Zeitraum abwechselnd durchgeführt werden. Dieses Verfahren eignet sich besonders für stark absorbierende, meist flüssige Proben, die in Transmission nur unter großem Aufwand vermessen werden könnten.

**Terahertztomographie**

Neben den spektroskopischen Informationen enthält ein THz-Zeitbereichssignal auch Informationen über den Schichtaufbau einer Probe. Besteht die Probe im einfachsten Fall aus einer einzelnen Schicht und sind die dielektrischen Parameter dieser Schicht exakt bekannt, kann mit Hilfe der THz-Messung die Dicke dieser Probe bis auf wenige  $\mu\text{m}$  genau bestimmt werden [9, 86]. In der vorliegenden Arbeit lag der Schwerpunkt auf Mehrschichtsystemen. Vermisst man solche Mehrschichtsysteme mittels THz-Strahlung in Reflexion, so ergibt sich je nach Unterschied der dielektrischen Eigenschaften an den Grenzflächen der Schichten eine mehr oder weniger starke Reflexion der THz-Strahlung. Das letztliche Messsignal besteht aus mehreren THz-Pulsen, wobei jeder Puls individuelle Informationen über die einzelnen Schichten enthält (vgl. Abb. 9). Der zeitliche Abstand zwischen den Pulsen codiert die räumliche Aufteilung dieser Schichten. Auch hier ist es möglich, die zeitlichen Informationen der THz-Messung in eine räumliche Dimension zu transformieren, sofern die Probeneigenschaften bekannt sind. In diesem Fall wird auch von einer Flugzeittomographie mit THz-Strahlung gesprochen [87] und es gilt

$$\Delta t = \frac{d}{c_m} = \frac{dn_{real}}{c_{vakuum}} \quad (2.40)$$

wobei  $n_{real}$  den Brechungsindex der jeweiligen Schicht der Dicke  $d$  beschreibt und  $c_m$  die Lichtgeschwindigkeit im Medium.

Diese Art der Auswertung wurde beispielsweise für die Bestimmung von Lackschichtdicken an Autoteilen demonstriert [86] oder kommt häufig bei der Untersuchung von Gemälden zum Einsatz [44, 88]. Für derart detaillierte Analysen wurden allerdings komplexere Algorithmen verwendet, die die Frequenzabhängigkeit des Brechungsindex berücksichtigen.

Sollen besonders dünne Schichten untersucht werden, kann es dazu kommen, dass die zeitliche Dauer des THz-Pulses länger ist, als die Flugzeit  $\Delta t$  der Strahlung innerhalb einer Schicht. Aufgrund dessen kommt es zu einem Ineinanderlaufen der einzelnen THz-Reflexe. Um diese Überlagerung des Messsignals richtig auszuwerten gibt es spezielle Entfaltungsalgorithmen (engl. Deconvolution).

Die Annahme, die jedem Entfaltungsalgorithmus zugrunde liegt, ist, dass das gemessene reflektierte Signal  $y(t)$  eine Faltung aus dem eingehenden THz-Signal  $h(t)$  und der Impulsantwortfunktion  $f(t)$  des Materials darstellt.

$$y(t) = h(t) \otimes f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t)f(t - \Delta t)d\Delta t \quad (2.41)$$

Die Impulsantwortfunktion ist dabei vollständig abhängig von der Schichtstruktur der Probe.



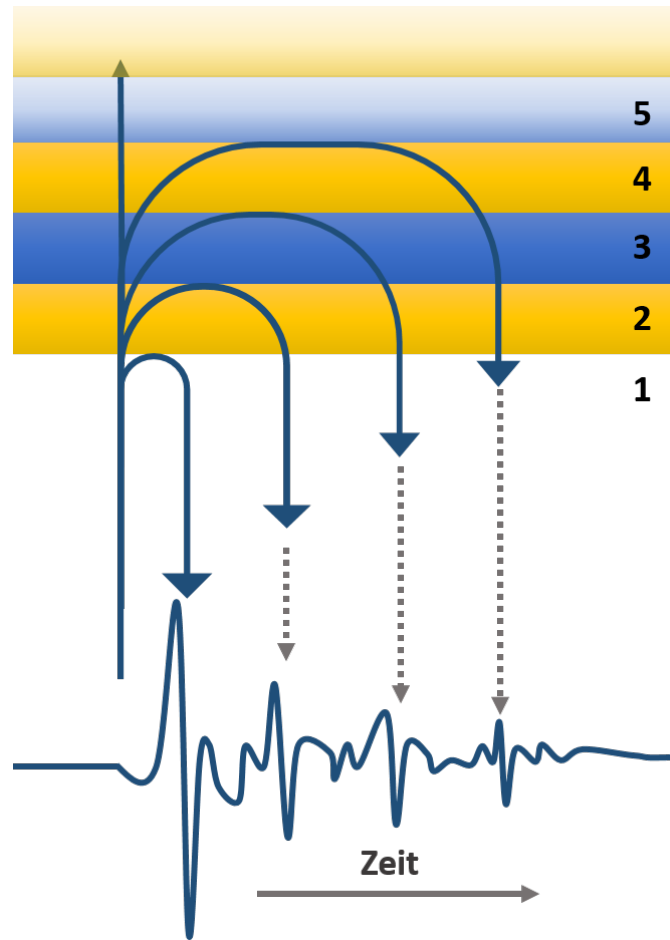


Abbildung 9: Reflektiertes THz-Signal an einem Mehrschichtsystem

Durch das Auswerten der Impulsantwortfunktion erhält man also einen unabhängigen Parameter, der Aufschluss über den Probenaufbau gibt. Um diese Impulsantwortfunktion zu berechnen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ein häufig verwendeter Zugang stellt die Transformation in den Frequenzbereich und die anschließende Rücktransformation in den Zeitbereich mittels einer inversen Fouriertransformation dar [89]. Im Frequenzbereich wird das reflektierte Signal durch das Produkt aus dem eingehenden Signal und der Transferfunktion  $T(\omega)$  beschrieben

$$y(\omega) = h(\omega) \cdot T(\omega) \quad (2.42)$$

woraus die Impulsantwortfunktion im Zeitbereich durch die inverse Fouriertransformation eliminiert werden kann

$$f(t) = iFT \left( \frac{y(\omega)}{h(\omega)} \right) \quad (2.43)$$

Um mithilfe von Gleichung 2.43 die Daten erfolgreich auswerten zu können, müssen jedoch

einige Faktoren beachtet werden. Zum einen muss die Datenaufnahme mit einer ausreichend hohen Dichte der Datenpunkte erfolgt sein, zum anderen sollte das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Daten ausreichend gut sein. Um dies zu realisieren, sollten die Datensätze zunächst durch zusätzliche Punkte aufgefüllt und gefiltert werden. Da zur Berechnung der Impulsantwortfunktion das Frequenzspektrum des reflektierten Signals durch das des eingehenden Signals geteilt wird, kann es dazu kommen, dass zwei sehr kleine Zahlen durcheinander dividiert werden, was zu scharfen Peaks in der Impulsantwortfunktion führen würde. Die Einführung eines Schwellenwertes im Frequenzbereich ist daher unerlässlich.

Trotz der oben beschriebenen Maßnahmen kann es zu einer Instabilität des Algorithmus kommen, wenn die Daten stark verrauscht sind oder die verwendete Referenzmessung zu stark abweicht. Insbesondere die Referenzmessung in Reflexionsgeometrie stellt ein Problem dar, wenn die Phasenlage nicht mit der Probenmessung übereinstimmt. Daher gibt es diverse erweiterte Algorithmen, die versuchen, die Störanfälligkeit des Algorithmus zu minimieren. Dabei wird vor allem versucht, auch aus sehr verrauschten Daten THz-Reflexe zu extrahieren [88,90].

Der in dieser Arbeit verwendete Ansatz verzichtet auf eine Transformation der Daten in den Frequenzbereich, sondern arbeitet mit dünn besetzten Matrizen, um die Impulsantwortfunktion zu extrahieren [91,92]. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Impulsantwortfunktion nur aus wenigen Werten besteht, die ungleich null sind. Durch den Verzicht auf die Transformation in den Frequenzbereich müssen hoch- und niederfrequente Rauschanteile nicht herausgefiltert werden, was zu einer besseren Auflösung der Impulsantwortfunktion führt. Dieser Ansatz wurde bereits in [92] kurz angeschnitten, eine ausführlichere Herleitung und Anwendung des Algorithmus auf ein konkretes Objekt findet sich jedoch in [91], an dem sich auch die folgende Herleitung orientiert. Zunächst wird Gleichung 2.41 in der diskreten Form betrachtet

$$y_n = \sum_{m=0}^{M-1} h_m f_{n-m} + e_n \quad (2.44)$$

wobei  $y_n = y(nT_s)$ ,  $h_m = h(mT_s)$  mit dem Abtastzeitraum  $T_s$  gilt.  $e_n$  beschreibt die Rauschquellen, die im Messsystem und durch das Material entstehen,  $n$  und  $m$  die Indizes der Datenpunkte und  $M$  die Gesamtzahl der Datenpunkte. Definiert man entsprechende Vektoren  $\vec{y}$ ,  $\vec{h}$ ,  $\vec{f}$ ,  $\vec{e}$ , die alle Datenpunkte entsprechend vereinen, kann Gleichung 2.44 folgendermaßen zusammengefasst werden

$$\vec{y} = \mathbf{H}\vec{f} + \vec{e} \quad (2.45)$$

wobei  $\mathbf{H}$  als Faltungsmatrix bezeichnet wird, deren Spalten und Zeilen durch eine zeitlich verzögerte Variante des eingehenden THz-Feldes  $\vec{h}$  bzw. dessen inverser Form beschrieben werden. Ziel des Algorithmus ist es, das gemessene reflektierte Signal  $\vec{y}$  durch  $\mathbf{H}\vec{f}$  zu rekonstruieren.

Unter der Randbedingung der Dünnbesetztheit, hat der entsprechende Vektor  $\vec{f}$  nur wenige Werte ungleich null, der so mithilfe einer Optimierung der  $L_0$ -Norm gelöst werden kann. Das Optimierungsproblem kann folgendermaßen beschrieben werden

$$\min_f = \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\vec{f} - \vec{y}\|_2^2 + \lambda \|\vec{f}\|_0 \quad (2.46)$$

Die  $L_0$ -Norm von  $\vec{f}$  ist definiert als die Anzahl aller Einträge ungleich null. Mithilfe des Optimierungsparameters  $\lambda$  kann die Besetztheit der Impulsantwortfunktion  $\vec{f}$  kontrolliert werden. Bei der Lösung der  $L_0$ -Norm kann es allerdings vorkommen, dass sich kein globales Optimum ausmachen lässt. Daher geht man dazu über anstatt der  $L_0$ -Norm die  $L_1$ -Norm zu verwenden. Da diese Norm konvex ist, ist ein globales Optimum garantiert. Das letztlich zu lösende Optimierungsproblem lautet daher

$$\min_f = \frac{1}{2} \|\mathbf{H}\vec{f} - \vec{y}\|_2^2 + \lambda \|\vec{f}\|_1 \quad (2.47)$$

Dieses Problem kann mit entsprechenden iterativen Schrumpfungsalgorithmen gelöst werden, die an dieser Stelle aber nicht weiter erläutert werden soll. Eine detaillierte Abhandlung findet sich in [91, 93]. Unter Verwendung dieses Algorithmus können nun auch sehr verrauschte Daten von Mehrschichtsystemen mit vielen dünnen Schichten ausgewertet werden. Die Auflösung hängt hauptsächlich von der Abtastrate ab und liegt im Bereich weniger Mikrometer.

Neben der in dieser Arbeit verwendeten Flugzeittomographie gibt es noch weitere Ansätze zur THz-Tomographie, die an dieser Stelle kurz genannt werden sollen. Analog zur Computertomographie mit Röntgenstrahlung kann ein ähnlicher Aufbau für THz-Strahlung verwendet werden, wobei die Probe unter verschiedenen Winkeln aufgenommen wird [94, 95]. Da in diesem Fall die Strahlung vollständig durch die Probe transmittiert muss, ist dieser Ansatz nur für sehr dünne oder wenig absorbierende Proben geeignet. In vielen Forschungsarbeiten kamen auch Mikrowellensysteme zum Einsatz, die auf die niedrigen THz-Frequenzen begrenzt sind, aber eine höhere Eindringtiefe aufweisen. Bei diesen Ansätzen ist weiterhin problematisch, dass die Probe bewegt werden muss, was nicht immer realisiert werden kann. Des Weiteren gibt es noch eine Vielzahl anderer Messkonfigurationen. Ein Überblick darüber findet sich in [87].

## 2.4 Bisher erfolgte Terahertz-Untersuchungen an Kunstobjekten und Mumien

Auf dem Gebiet der Anthropologie existieren bisher nur wenige THz-Studien, die eine mögliche Anwendung auf diesem Gebiet aufzeigen [11, 12]. Eine tiefgehende Machbarkeitsstudie auf diesem Gebiet wurde bisher noch nicht durchgeführt, weil eine Möglichkeit zur Vermessung von Freiformobjekten fehlte und damit die Messergebnisse stark von der Form der Probe beeinflusst werden.

Bei der Untersuchung von Kunstobjekten findet die THz-Strahlung schon seit längerer Zeit Anwendung. Ein Überblick über die Anwendungen findet sich in [96] und in Abbildung 10. Der Vorteil der THz-Strahlung gegenüber den etablierten Methoden besteht zum einen darin, dass im optischen undurchsichtige Materialien für THz-Strahlung nahezu transparent sind, zum anderen reagiert THz-Strahlung sehr sensitiv auf Wasser. Auch die Möglichkeit gleichzeitig nicht-invasiver, spektroskopischer und bildgebender Untersuchungen stellt einen großen Vorteil gegenüber anderen Techniken dar. Zudem ist die Eindringtiefe der THz-Strahlung deutlich höher als die von elektromagnetischen Wellen im infraroten, sichtbaren oder ultravioletten Frequenzbereich. Mit THz-Strahlung ist es beispielsweise möglich, Gemälde bis auf die unterste Schicht zu untersuchen.

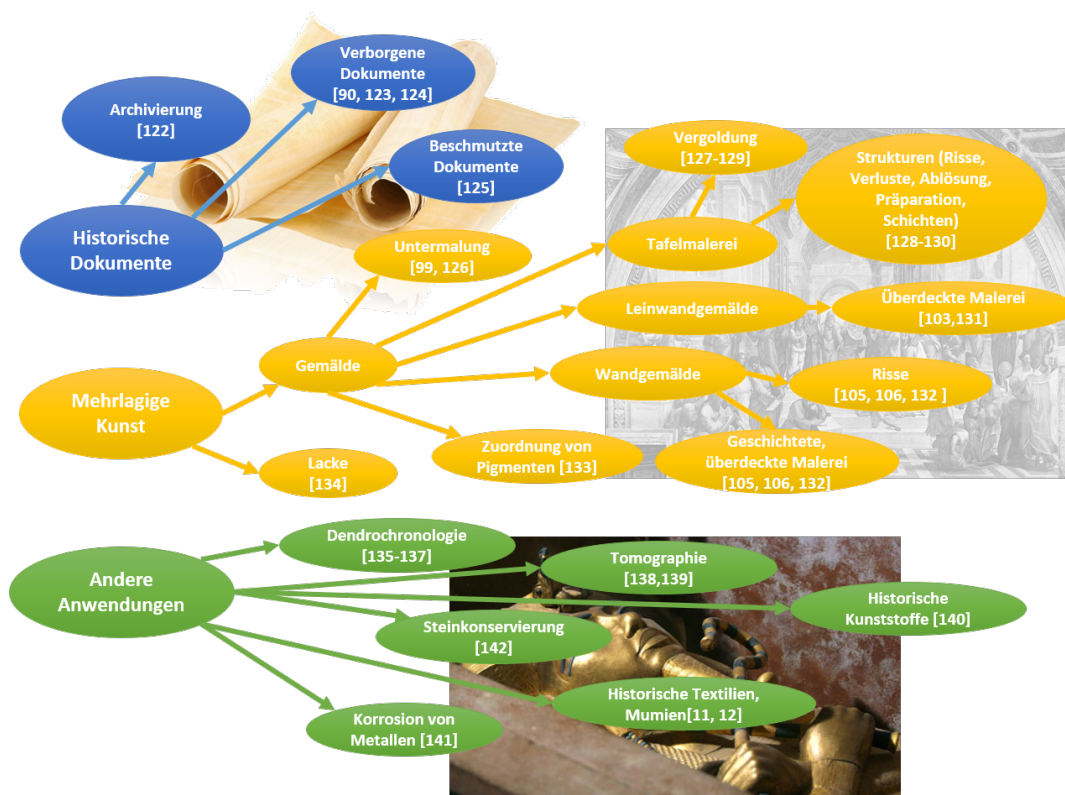


Abbildung 10: Überblick über die Anwendung von THz-Technologie auf dem Gebiet der Kunsthistorik und Paläopathologie (unter Änderungen entnommen aus [96]).

Insofern bietet sich hier eine Fülle von Fragestellungen, die mit THz-Strahlung untersucht werden können. Es wurde beispielsweise vor kurzem demonstriert, dass einzelne Buchstaben von Buchseiten gescannt werden können, ohne das Buch dafür aufschlagen zu müssen [90]. Im Bereich von Gemälden kann die THz-Technologie Informationen über die verwendeten Materialien und Maltechniken liefern [97], was insbesondere im Vorfeld einer Restaurierung von großem Interesse ist. Auch die Anzahl und Art der Schichten eines Gemäldes kann bestimmt werden [98, 99]. Hierbei spielt es keine Rolle, ob es sich um Gemälde auf Holzuntergrün-

den [96, 100, 101] handelt, wie sie häufig im Mittelalter zum Einsatz kamen, oder beispielsweise Leinwände [102, 103] oder Wandgemälde [104–106].

Auch die Wechselwirkung von THz-Strahlung mit Textilien wurde im Bereich von Sicherheitsanwendungen beispielsweise an Flughäfen untersucht [107]. Eine Übertragung der Ergebnisse auf die Kunsthistorik ist durchaus möglich.



### 3 Spektroskopische Untersuchungen an historischen Menschenfunden und Kunstobjekten

Wie im vorigen Kapitel kurz vorgestellt, ist für eine tomographische Rekonstruktion von THz-Flugzeitmessungen die Kenntnis des Brechungsindex des jeweiligen Materials wichtig, um die zeitliche Information in eine räumliche umrechnen zu können. Des Weiteren gibt der Absorptionskoeffizient eines Materials bereits im Vorfeld Aufschluss darüber, welche Eindringtiefe der Strahlung in eine Probe zu erwarten ist. Insofern ist eine separate spektroskopische Untersuchung der relevanten Materialien im Vorfeld sinnvoll, um eine Datenbank der vorkommenden Materialien anzulegen, auf die später zurückgegriffen werden kann.

Aber nicht nur im Hinblick auf eine sich anschließende tomographische Untersuchung der Proben ist die Anlage einer Datenbank sinnvoll. Neben der Tomographie haben THz-Zeitbereichsmessungen das Potential einer gleichzeitigen spektroskopischen Analyse der jeweils gemessenen Probenbereiche. Im Falle von Untersuchungen an historischen Menschenfunden können somit beispielsweise zeitgleich eventuell verwendete Einbalsamierungsmaterialien oder Gewebestrukturen identifiziert werden. Bei kunsthistorischen oder restauratorischen Untersuchungen besteht ebenfalls ein Interesse daran, verarbeitete Materialien zu identifizieren, um entsprechend angepasste Maßnahmen bei der Restaurierung ergreifen zu können. Nicht zuletzt hilft die Kenntnis verwendeter Stoffe auch bei der zeitlichen Einordnung verschiedener Kunstobjekte. Im Falle von THz-Messungen kann dies nicht-invasiv geschehen.

Dieses Kapitel widmet sich daher den spektroskopischen Eigenschaften typischer Materialien im Bereich der Anthropologie und Kunsthistorik bzw. –restaurierung und evaluiert kurz das Identifikationspotential dieser Materialien anhand von Hauptkomponentenanalysen der vermessenen Spektren. Das Kapitel wird dazu in die beiden Bereiche Anthropologie und Kunstrestaurierung unterteilt, da es nur geringe Schnittmengen bei den verwendeten Materialien gibt.

#### 3.1 Anthropologie

Bei historischen Menschenfunden wird zunächst meist unterschieden, ob es sich um eine künstlich herbeigeführte Mumifizierung, wie beispielsweise häufig im alten Ägypten durchgeführt, handelt oder um eine natürliche Mumifikation, welche zum Beispiel bei der Gletscherleiche „Ötzi“ stattgefunden hat. Je nach Fall sind daher auch unterschiedlichen Materialien zu erwarten. Während natürlich mumifizierte Leichen lediglich organische Gewebebestandteile enthalten, finden sich bei künstlich mumifizierten Leichen noch viele weitere Stoffe, die zur Konservierung verwendet wurden und im Folgenden bezüglich ihrer Funktion kurz beschrieben werden sollen [108].

Um Leichen künstlich zu konservieren, muss zunächst dem Körper Wasser entzogen werden.

Dies geschieht häufig durch das Einlegen in Natron. Dabei unterscheidet sich das heutige reine Natron (Natriumhydrogencarbonat) leicht von der Mischung, die in der Antike zur Konservierung verwendet wurde. Der damalige Hauptbestandteil der Mischung war vor allem Natriumchlorid, gefolgt von Glaubersalz (Natriumsulfat), Soda (Natriumcarbonat) und reinem Natron. Zur Unterscheidung wird die in der antiken Epoche verwendete Mischung im Folgenden als ägyptisches Natron bezeichnet. Neben Natron kamen auch Sägespäne, Moosflechten oder Sand zum Einsatz. Neben der Austrocknung ist auch eine entsprechende Desinfektion bzw. Vorbeugung gegen Schädlinge und Pilze notwendig. Hierzu werden verschiedene Gewürze und Harze wie Zimt, Mastix, Myrrhe, Bitumen, Palmwein, Bienenwachs oder Gummi Arabicum verwendet. Damit die Augenhöhlen nicht einfallen, wurden teilweise Zwiebeln als Augäpfel eingesetzt.

Zur spektroskopischen Charakterisierung wurden alle Proben, wenn nötig, pulverisiert und in Tablettenform gepresst. Die Proben aus Gummi-Arabicum und Zwiebeln wurden zunächst luftgetrocknet, um eine Messung im getrockneten Zustand zu ermöglichen. Die Messung von Palmwein im getrockneten Zustand war nicht möglich, da der Wasseranteil zu hoch war, sodass zu wenig feste Bestandteile nach der Trocknung übrig geblieben sind. Ebenso war eine Messung von Sand aufgrund der hohen Streuung nicht möglich. Abbildung 11 zeigt ein Foto aller vermessener Proben.



Abbildung 11: Vermessene Einbalsamierungsmaterialien

Die Messung der Proben erfolgte fokussiert in Transmission mit Hilfe eines THz-Zeitbereichsspektrometers der Firma Hübner GmbH & Co. KG [109]. Um einen senkrechten Einfall der Strahlung auf die Proben zu gewährleisten, wurde ein externer THz-Pfad mit vier Kunststofflinsen verwendet. Pro Probe wurden dreißig Mittelungen durchgeführt. Des Weiteren wurde der THz-Messpfad mit Stickstoff geflutet, um Wasserabsorptionslinien zu eliminieren.



In den Abbildungen 12,13 und 14 sind die frequenzabhängigen Brechungsindizes und Absorptionskoeffizienten der typischen Einbalsamierungsmaterialien dargestellt. Um den Inhomogenitäten der Proben gerecht zu werden, liegen jedem Material zwanzig einzelne Probenmessungen zugrunde. Dargestellt werden der gewichtete Mittelwert aller zwanzig Einzelmessungen sowie die daraus entstehende Standardabweichung.

Der Brechungsindex der meisten Materialien weist eine ausgeprägte Dispersion auf. Bei den beiden Zimtsorten ist diese Dispersion weniger stark ausgeprägt. Während die meisten Materialien einen relativ moderaten Brechungsindex zwischen 1,5 und 1,8 aufweisen, zeigen die beiden Natronmischungen einen deutlich höheren Brechungsindex von ca. 2,2 bzw. 2,4.

Anhand der Absorptionsspektren lässt sich festhalten, dass fast alle Einbalsamierungsmaterialien bei höheren Frequenzen ab ca. 1 THz stark absorbieren. Charakteristische Absorptionspeaks ergeben sich bei keinem der Materialien im untersuchten Frequenzbereich. Einzig Bienenwachs zeigt einen breitbandigen Absorptionshügel zwischen 800 GHz und 2,3 THz. Eine Identifikation eines Materials ist also nur anhand des jeweiligen frequenzabhängigen Absorptions- bzw. Brechungsindexverlauf möglich.

Die Fehlerbalken bewegen sich bei allen Materialien in einem ähnlichen Bereich. Bei der Bestimmung des Brechungsindex hat die Inhomogenität der Probe einen deutlich größeren Einfluss aufgrund des kleinen Wertebereichs, der durch den Brechungsindex eingenommen werden kann. Fehler entstehen vor allem durch unterschiedliche Strukturen in den Proben. Obwohl bei der Herstellung der Tabletten auf einen gleichmäßigen Anpressdruck und eine homogene Dicke geachtet wurde, kommt es zu unterschiedlichen geometrischen Strukturen in der Probe. Dadurch können Effekte wie Doppelbrechung und Streuung hervorgerufen werden, die abhängig von der Positionierung der Probe unterschiedliche Ergebnisse ergeben können.

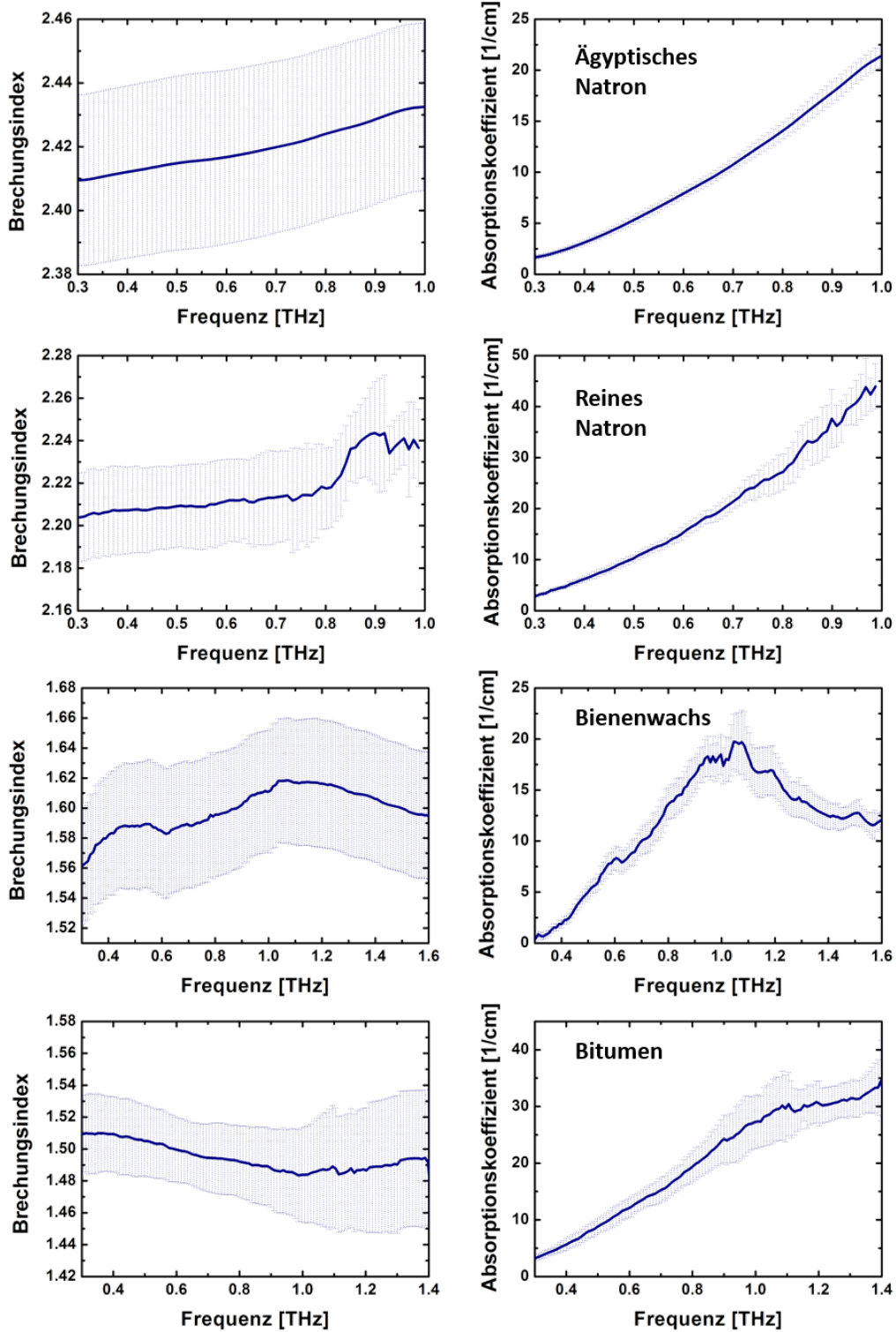


Abbildung 12: Brechungsindex und Absorptionskoeffizient verschiedener Einbalsamierungsmaterialien im THz-Bereich

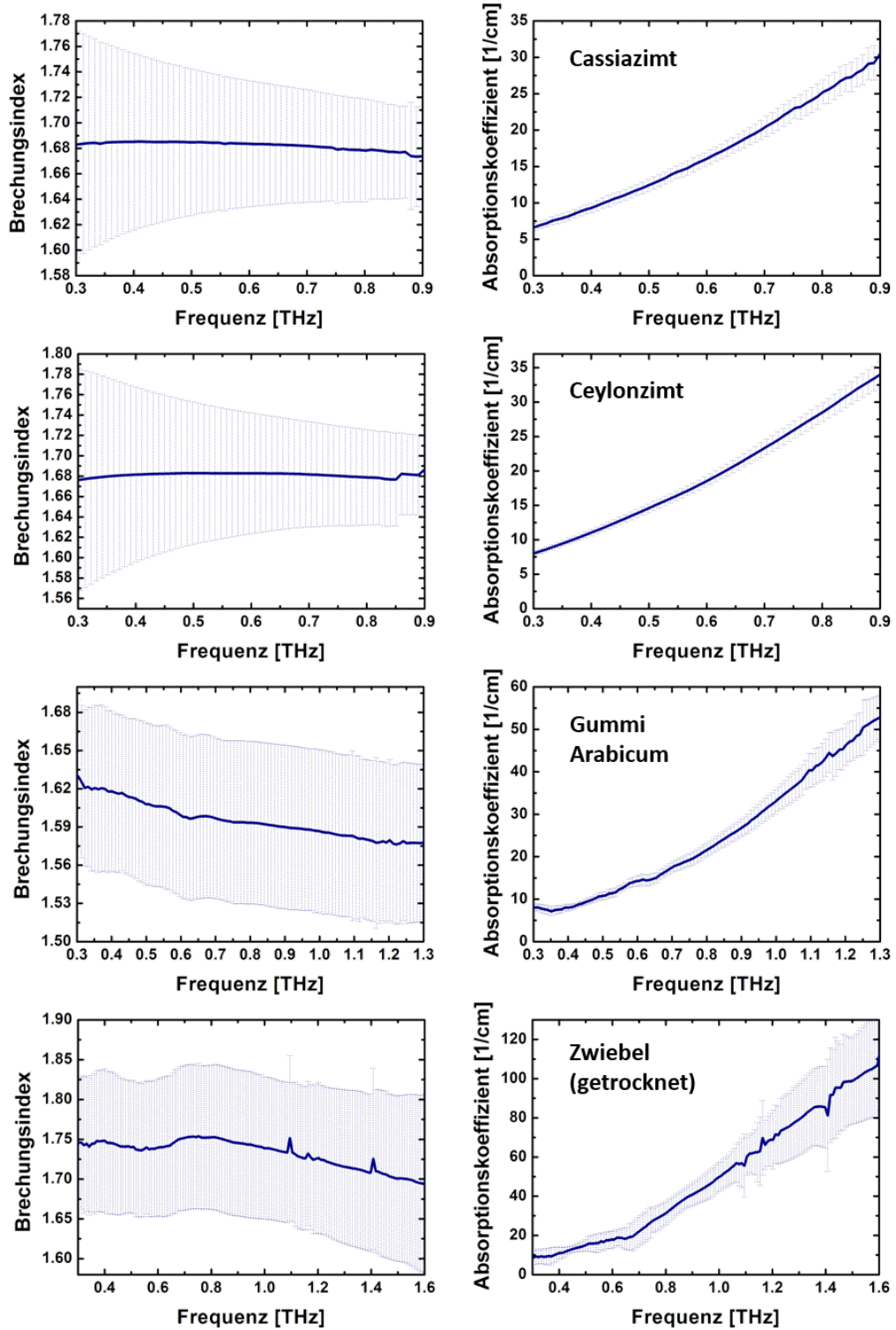


Abbildung 13: Brechungsindex und Absorptionskoeffizient verschiedener Einbalsamierungsmaterialien im THz-Bereich

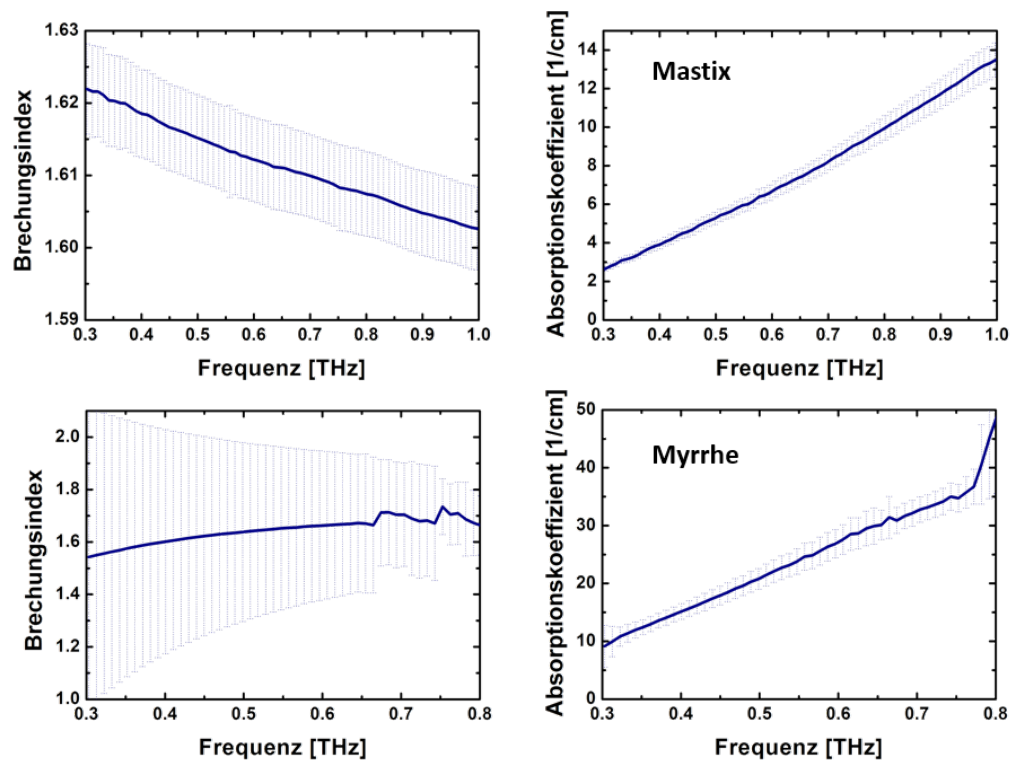


Abbildung 14: Brechungsindex und Absorptionskoeffizient verschiedener Einbalsamierungsmaterialien im THz-Bereich

Um das Identifikationspotential anhand der THz-Messungen abzuschätzen, wurden alle gewonnenen Absorptionsspektren der Einbalsamierungsmaterialien einer Hauptkomponentenanalyse unterzogen. Das Ergebnis dieser ist in Abbildung 15 dargestellt. Man erkennt, dass sich für die meisten Materialien unabhängige Cluster ausbilden. Dabei liegen artverwandte Materialien wie Ceylon- und Cassiazimt sowie reines und ägyptisches Natron nah beieinander. Teilweise kommt es auch zu Überlappungen der Cluster wie beispielsweise bei Bitumen und Natron oder Gummi Arabicum und Cassiazimt. Einzig die Zwiebelproben bilden kein Cluster, was vermutlich an der inhomogenen Struktur der Proben liegt.

Die Vermessung der Gewebeproben stellte sich als deutlich schwieriger heraus, da diese Proben nicht zwangsläufig gerade Strukturen aufweisen und somit eine genaue Ausrichtung und Vermessung erschwert ist. Des Weiteren weisen die Gewebeproben deutlich mehr Inhomogenitäten auf und sind auch nicht immer klar voneinander separiert. So gibt es beispielsweise Hautproben, an denen noch Muskel oder Bandagenanteile vorhanden sind. Insofern können die Ergebnisse hier nur als grobe Richtwerte verwendet werden. Außerdem ist es nicht möglich jede vorkommende Gewebeart genau zu charakterisieren, weshalb sich vor allem auf Haut, Muskeln und Knochen konzentriert wurde. Diese Hauptgewebearten nehmen den größten Anteil in den Proben ein und bestimmen daher maßgeblich die Propagation der THz-Strahlung.

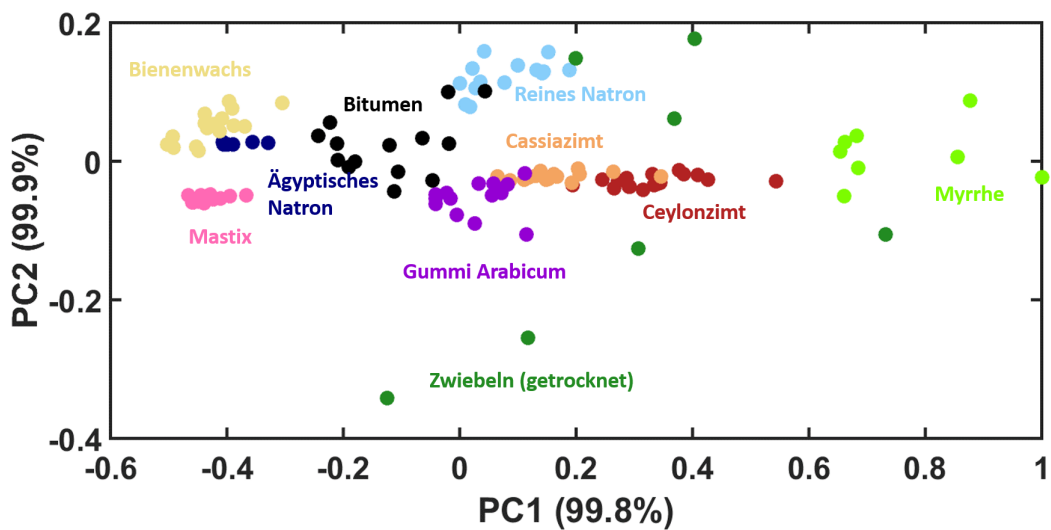


Abbildung 15: Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse aller Absorptionsspektren der Einbalsamierungsmaterialien



Abbildung 16: Vermessene (a) Gewebeproben und (b) antike Bandagen

Die dielektrischen Eigenschaften der untersuchten Gewebeproben (vgl. Abb. 16(a)) sind in Abbildung 17 zusammengefasst. Die beiden reinen Proben (Muskel und Schädelknochen) zeigen einen nahezu dispersionslosen Brechungsindexverlauf. Die Probe, die sowohl Haut- als auch Muskelanteile enthält, zeigt bei ca. 550 GHz einen Abfall im Brechungsindex. Der Verlauf vor und nach diesem Abfall ist wiederum durch eine Dispersionsarmut gekennzeichnet. Die Dispersionsarmut der Gewebeprobe hat für die spätere tomographische Rekonstruktion den entscheidenden Vorteil, dass die Frequenzabhängigkeit des zur Umrechnung in den räumlichen Abstand eingesetzten Brechungsindex vernachlässigt werden kann. Der Brechungsindex kann also durch einen einzelnen über alle Frequenzen gemittelten Wert gut genähert werden. Der Absorptionskoeffizient ist bei allen drei Gewebeatrten im Vergleich zu den Einbalsamierungsmaterialien deutlich erhöht. Dies liegt zum einen in der Struktur der Proben, die auch für den

hohen Fehlereintrag in der Bestimmung der dielektrischen Parameter verantwortlich ist, zum anderen enthalten die Proben nach wie vor gebundenes Wasser, welches die THz-Strahlung stark absorbiert.

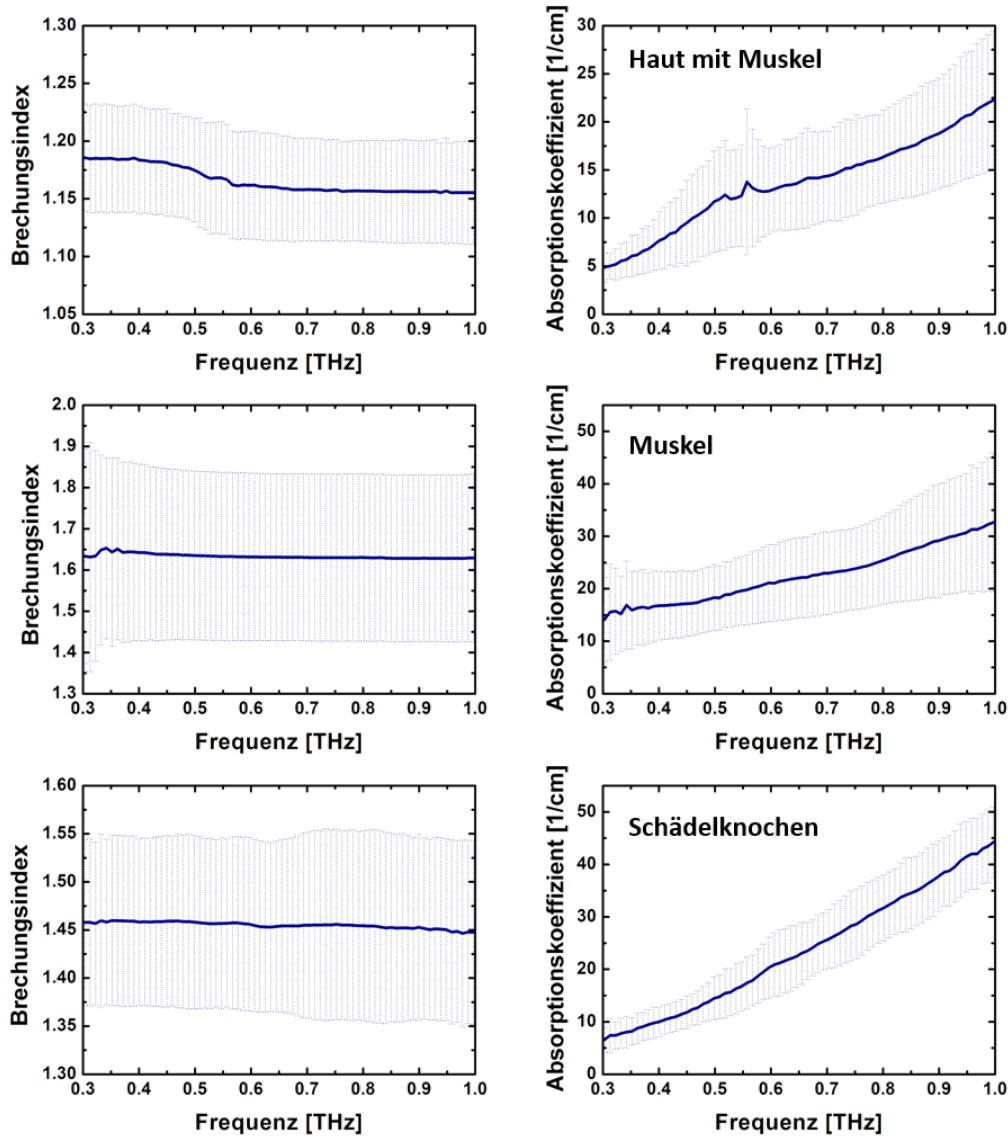


Abbildung 17: Brechungsindex und Absorptionskoeffizient verschiedener antiker Gewebeproben im THz-Bereich

Die Hauptkomponentenanalyse zeigt bei den Gewebeproben ebenfalls eine leichte Clusterung je nach Gewebeart (vgl. Abbildung 18). Dabei kommt es hier zu deutlich größeren Unsicherheiten aufgrund der zuvor beschriebenen Gegebenheiten. Es fällt auf, dass drei der Muskelproben im Hauptachsenkoordinatensystem bei anderen Hautproben mit Muskelanteil verortet werden. Dies könnte daran liegen, dass die Messungen an unterschiedlichen Positionen auf der Probe

durchgeführt wurden, beispielsweise an einer Position, an der eine andere Muskelart überwiegt bzw. der Muskelanteil in den Hautproben überwiegt, sodass sich eine Überlappung ergibt.

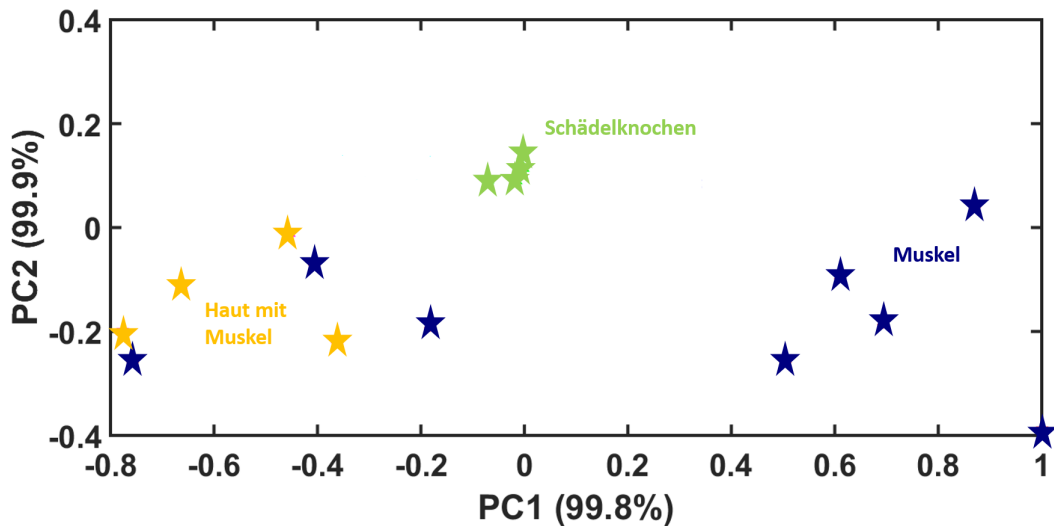


Abbildung 18: Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse aller Absorptionsspektren der Gewebeproben

Analysiert man nun die Hauptkomponenten eines unbekanntes Materials, beispielsweise zweier Bandagen, die mit Einbalsamierungsmaterialien getränkt sein könnten (vgl. Abb 16(b)), und lokalisiert es entsprechend im Hauptachsenkoordinatensystem, so besteht die Möglichkeit, das unbekanntes Material einem Cluster zuzuordnen und somit die Auswahl an infrage kommenden Einbalsamierungsmaterialien zumindest einzugrenzen.

Kombiniert man die Absorptionsspektren der Einbalsamierungsmaterialien, der Gewebeproben und der unbekanntes Bandagen in einer Hauptkomponentenanalyse, dargestellt in Abbildung 19, so ergeben sich Überlappungen der Cluster, was auf mögliche verwendete Einbalsamierungsmaterialien zurückschließen lässt. So sind beispielsweise die Messungen einer Bandage (hellblaue Fünfecke) im Hauptachsenkoordinatensystem an derselben Stelle lokalisiert wie das reine Natron (hellblaue Kreise). Diese Tatsache könnte darauf hindeuten, dass die Bandage große Anteile Natron enthält, die die dielektrischen Eigenschaften der Probe dominieren. Dafür spricht auch, dass die sichtbare Gewebestruktur sehr grob ist und die Hohlräume mit einem unbekanntes Material gefüllt sind (vgl. Abb. 16(b)). Ähnliche Andeutungen zeigen sich bei der zweiten untersuchten Bandage aus Peru (pinke Fünfecke). Hier ergibt sich ein deutlicher Überlapp mit Myrrhe (hellgrüne Kreise).

Insgesamt deutet sich anhand der spektroskopischen Messungen ein Identifikationspotential verschiedener Einbalsamierungsmaterialien durch THz-Messungen an. Um detaillierte Aussagen treffen zu können, wäre eine Untersuchung von deutlich mehr Gewebeproben nötig. Da

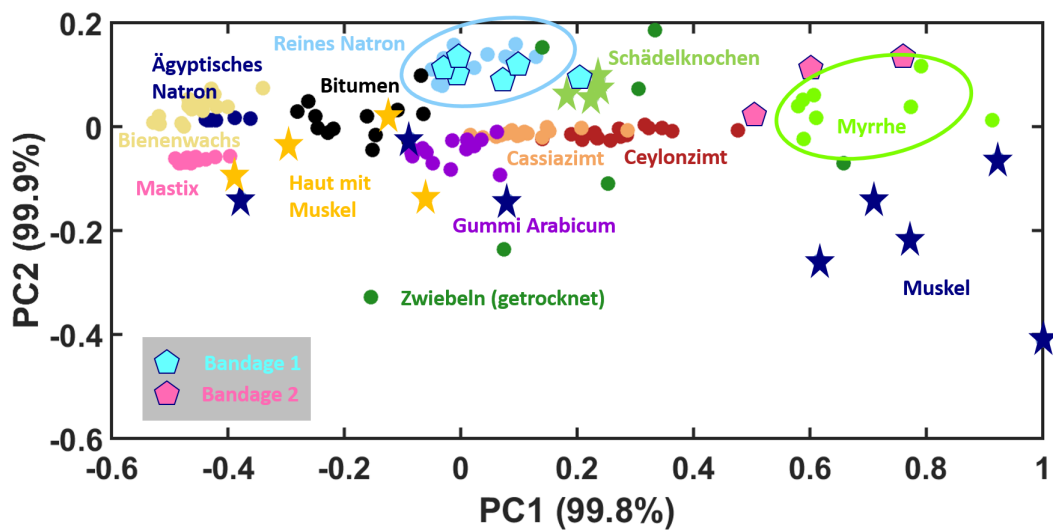


Abbildung 19: Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse aller Absorptionsspektren

die spektroskopische Untersuchung nur einen Seitenstrang dieser Arbeit darstellt, ist diese detailliertere Untersuchung unterblieben. Im Rahmen einer ausgedehnteren Studie wäre denkbar, Proben selbst zu mumifizieren und dabei zu versuchen, die verschiedenen Gewebearten so gut wie möglich voneinander zu separieren. Des Weiteren wäre eine zusätzliche Untersuchung der getrockneten Form der im Körper vorkommenden Flüssigkeiten wie Blut interessant, da diese vermutlich ebenfalls einen nicht unwesentlichen Beitrag bei der Strahlpropagation leisten.

### 3.2 Kunstrestaurierung

Die Aufbereitung der Proben für spektroskopische Untersuchungen in der Kunstrestaurierung gestaltet sich deutlich einfacher als bei historischen Gewebeproben, sodass auf diesem Gebiet eine Vielzahl an Materialien, die in Abbildung 20 zusammengefasst sind, für eine THz-Datenbank eingemessen wurde. Die Messung der trockenen Proben erfolgte hierbei analog zu der Messung der Einbalsamierungsmaterialien. Allerdings wurde hier pro Probe nur ein Punkt vermessen, da jeweils nur eine Probe pro Material zur Verfügung stand und die Fläche der Probe mehrere Punktmessungen häufig nicht zugelassen hat. Die gezeigten Fehlerbalken beziehen sich daher ausschließlich auf die Systemstabilität.

Die Ergebnisse der spektroskopischen Untersuchungen sind in den Abbildung 21,22 und 23 dargestellt. Im Gegensatz zu den Einbalsamierungsmaterialien zeigt sich bei den Brechungsindizes eine vergleichsweise hohe Dispersion. Dies erschwert eine tomographische Rekonstruktion, da der Brechungsindex nur schlecht durch einen einzelnen Wert genähert werden kann. Eine frequenzabhängige Auswertung wäre daher an dieser Stelle sinnvoll. Der Absorptionskoeffizient der meisten Festiger liegt deutlich unterhalb dem der Einbalsamierungs- und Gewebeproben, was eine höhere Eindringtiefe mit sich bringt. Den Ergebnissen für Paraloid kann nur einge-



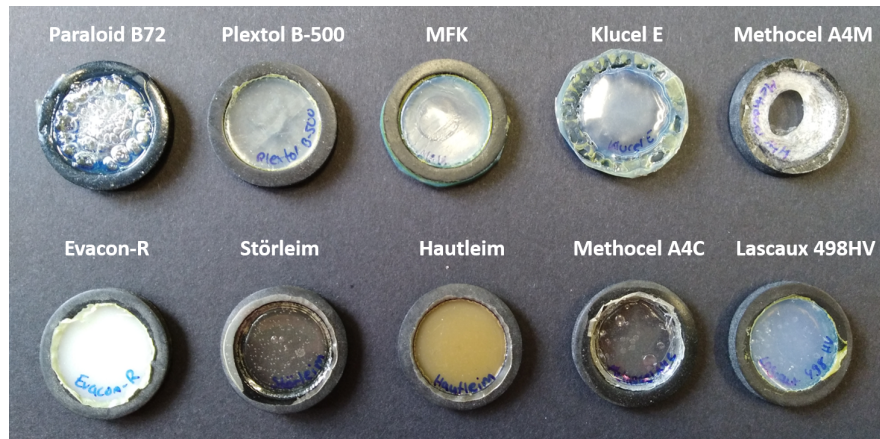


Abbildung 20: Vermessene übliche Festigungsmittel in der Kunstrestaurierung (getrockneter Zustand)

schränkt vertraut werden, da eine blasenfreie Herstellung der Probe nicht möglich war. Insofern ist die untersuchte Probe durch starke Inhomogenitäten und Luftpneinschlüsse gekennzeichnet, welche die Auswertung der dielektrischen Eigenschaften erschweren. Generell kann beobachtet werden, dass die beiden organischen Festiger, Haut- und Störleim, einen deutlich höheren Brechungsindex als andere anorganische Festiger aufweisen. Der Absorptionskoeffizient dieser Proben liegt ebenfalls über dem anderer Proben.

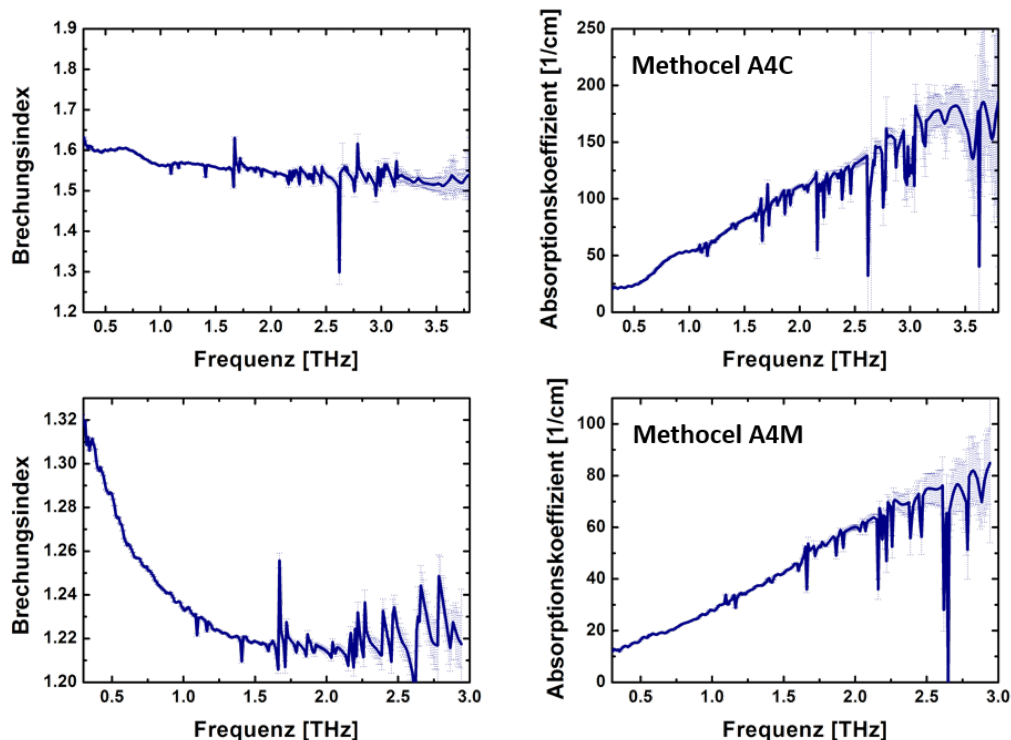


Abbildung 21: Brechungsindex und Absorptionskoeffizient verschiedener Festigungsmittel im THz-Bereich

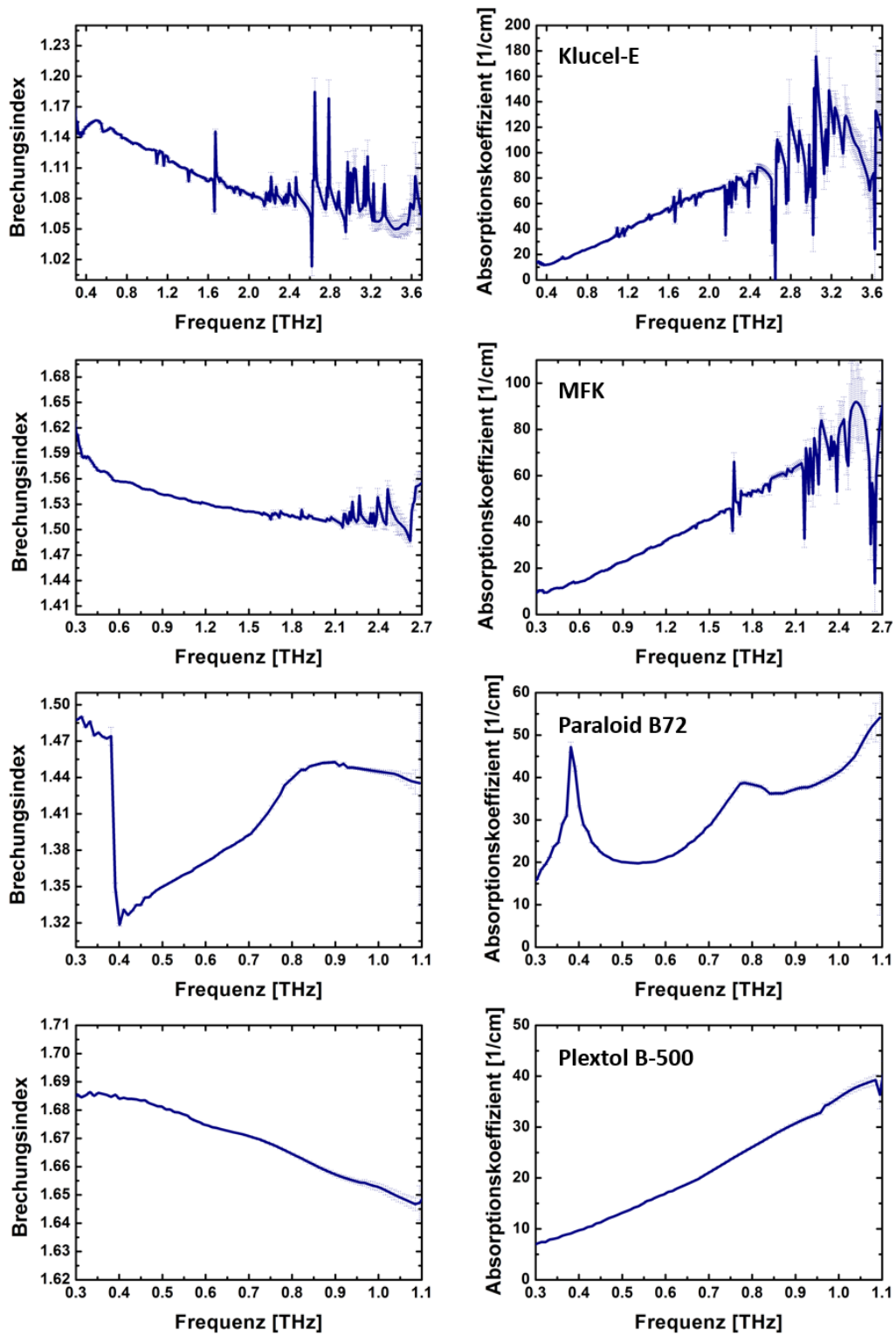


Abbildung 22: Brechungsindex und Absorptionskoeffizient verschiedener Festigungsmittel im THz-Bereich

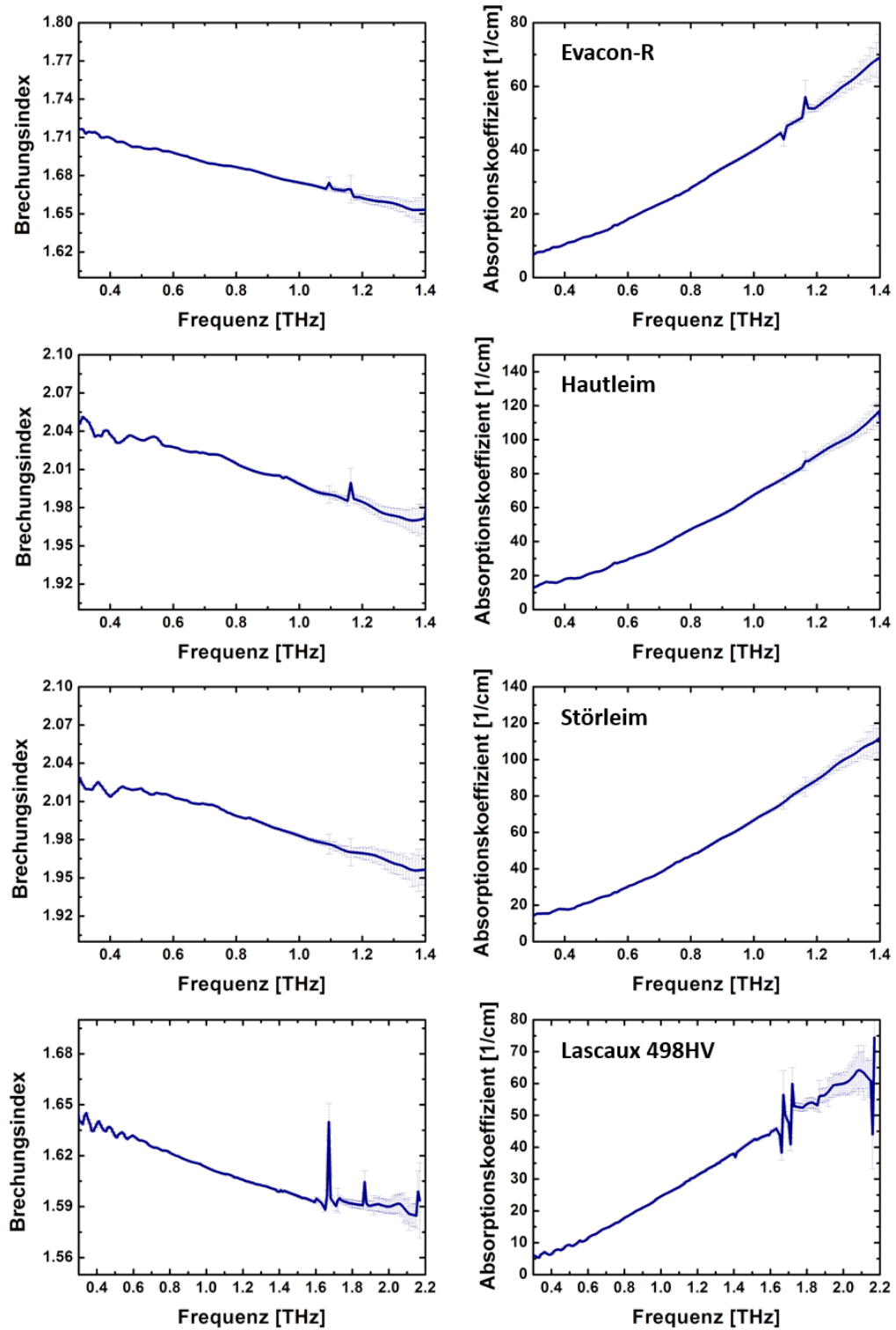


Abbildung 23: Brechungsindex und Absorptionskoeffizient verschiedener Festigungsmittel im THz-Bereich

Betrachtet man das Ergebnis einer Hauptkomponentenanalyse aller Absorptionsspektren, dargestellt in Abbildung 24, so erkennt man ebenfalls eine deutliche Abtrennung der beiden organischen Festigungsmaterialien. Insgesamt deutet sich außerdem eine Trennung zwischen den Polymer-basierten Festigungsmitteln (Lascaux, MFK, Plextol, Evacon und Paraloid) und den Cellulose-basierten Mitteln (Methocel und Klucel) an. Die in diesem Sinne falsche Verortung des Paraloid im Hauptachsenkoordinatensystem ist vermutlich auf die fehlerbehaftete Messung zurückzuführen. Des Weiteren kann eine deutliche Trennung zwischen den beiden Methocel-basierten Festigungsmitteln ausgemacht werden. Methocel A4C weist eine fast doppelt so hohe Absorption wie Methocel A4M auf. Eine mögliche Erklärung dieser Tatsache könnte in der unterschiedlichen Kettenlänge der jeweiligen Materialien begründet sein. Methocel A4C verfügt aufgrund kürzerer Ketten über mehr nicht-substituierte Hydroxylgruppen, weshalb das Material polarer ist und damit die THz-Strahlung stärker absorbiert. Ein anderer möglicher Erklärungsansatz besteht in der unterschiedlichen Restwassermenge, die die beiden Materialien nach der Austrocknung noch gebunden haben.

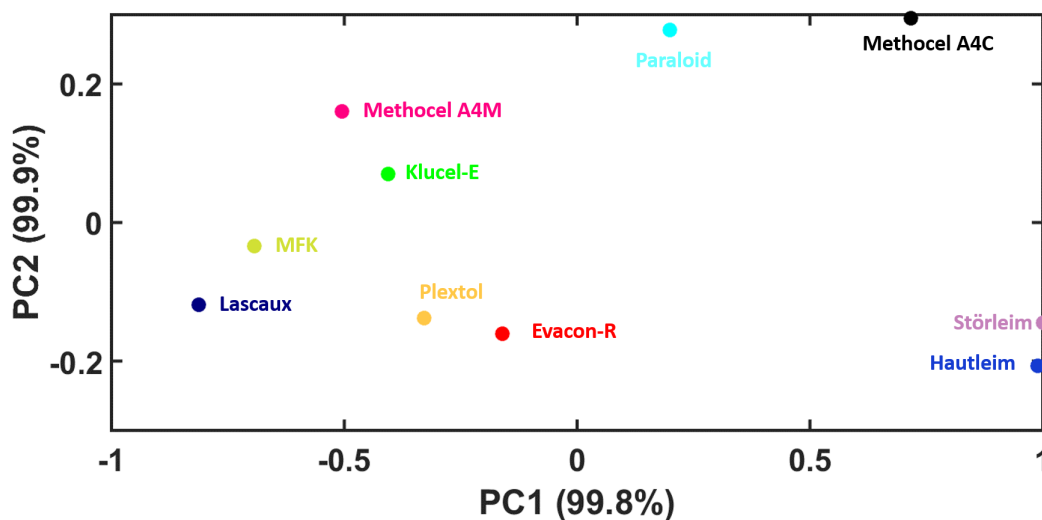


Abbildung 24: Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse aller Absorptionsspektren der trockenen Festiger

Zusätzlich ist es in der Kunstrestaurierung interessant, Proben im feuchten Zustand zu vermessen, da beispielsweise ein Interesse daran besteht, dass Eindringverhalten von Festigern in Kunstobjekte zu verfolgen und ein Großteil der Festigungsmittel als Lösung appliziert wird. Um die dielektrischen Eigenschaften der Festigungslösungen zu untersuchen, wurde eine ATR-Geometrie verwendet, die in Kapitel 2.3.2 beschrieben wurde. Die Festigungsmittel in Lösung zeigen ebenfalls eine sehr starke Frequenzabhängigkeit des Brechungsindex. Mit ansteigender Frequenz nimmt der Brechungsindex deutlich ab. Der Absorptionskoeffizient der Lösungen ist aufgrund des Wasseranteils im Vergleich zur getrockneten Variante stark erhöht (vgl. Abb. 25). Diese Tatsache eröffnet auf der einen Seite aufgrund der hohen Wassersensitivität der

THz-Strahlung ein hohes Potential, das Eindringverhalten der Festigungsmittel zu beobachten, auf der anderen Seite ist die Eindringtiefe der THz-Strahlung wiederum stark begrenzt. Da es bei vielen Konsolidierungsprozessen in der Kunstrestaurierung jedoch vorwiegend darum geht, die obersten Malschichten zu festigen, besteht die Möglichkeit, diese oberflächlichen Benetzungsprozesse mit THz-Strahlung sichtbar zu machen.

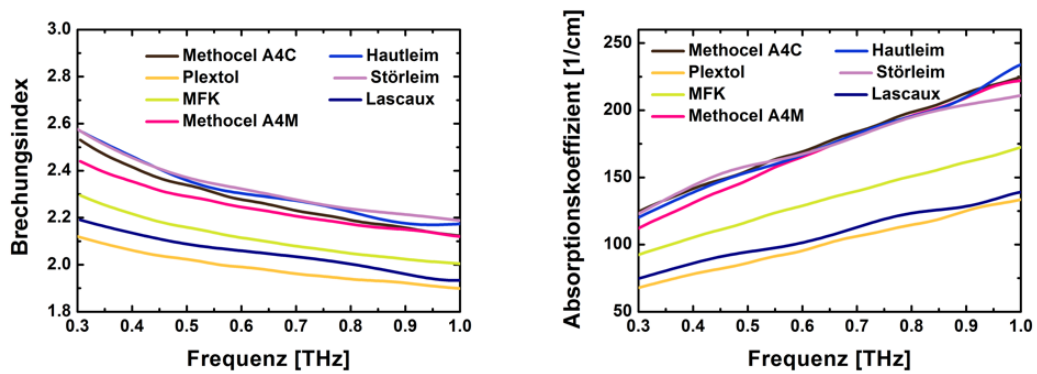


Abbildung 25: Brechungsindex und Absorptionskoeffizient verschiedener flüssiger Festigungsmittel im THz-Bereich

Die beiden Methocel-basierten Festigungsmittel zeigen in wässriger Lösung nur einen minimalen Unterschied im Brechungsindex und Absorptionskoeffizienten. Dies würde auf einen Unterschied in der Restwassermenge im getrockneten Zustand hindeuten und nicht auf einen signifikanten Unterschied in der Polarität.



## 4 Roboter-basiertes Terahertz-Spektrometer

Um historische Menschenfunde und Kunstobjekte zu vermessen, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein neuartiges Roboter-basiertes THz-Spektrometer entwickelt, das es erstmals ermöglicht, Proben mit nicht-planaren, komplexen Oberflächen bildgebend im THz-Bereich zu vermessen.

Im vorliegenden Kapitel sollen die Grundlagen dieses Systems sowie eine erste Anwendbarkeitsstudie vorgestellt werden. Dabei werden in einem ersten Schritt die Anforderungen an ein solches System genauer definiert. Daran schließt sich die Erläuterung des Grundkonzeptes sowie der einzelnen Systemkomponenten und deren Integration zu einem Gesamtsystem an. Im Kapitel 4.5 werden die Systemeigenschaften näher beleuchtet und die Grenzen der Anwendbarkeit des Systems diskutiert. Abschließend werden die Ergebnisse erster Demonstrationmessungen an einfachen Testobjekten gezeigt.

### 4.1 Motivation und Anforderungen an ein Roboter-basiertes THz-Spektrometer

Trotz einer Vielzahl an Versuchen, die THz-Bildgebung effizienter zu gestalten [8], wird nach wie vor am häufigsten ein Rasterverfahren für bildgebende THz-Messungen verwendet. Dabei ist typischerweise ein THz-Sensor oder die Probe auf einer Verfahrereinheit montiert, die es erlaubt, entweder die Probe oder den Sensor relativ zueinander in zwei Dimensionen zu verschieben. Auch eine dritte Verfahrereinheit für eine Anpassung in der Höhe wäre denkbar, wird aber selten eingesetzt, da die Auswahl an Proben auch hier begrenzt ist.

Bei der THz-Bildgebung kommt erschwerend hinzu, dass häufig Proben in Reflexion vermessen werden müssen, da ein Zugang in Transmission aus geometrischen Gründen nicht möglich ist oder das Material der Probe an sich zu stark absorbiert, was ein Durchdringen der Probe unmöglich macht. Bei Messungen in Reflexion muss allerdings immer sichergestellt sein, dass die THz-Strahlung senkrecht auf die Probe fällt bzw. in dem Winkel, in dem auch der Detektor positioniert ist (vgl. Abb. 26 (a)). Ist der Reflexionswinkel der Strahlung nicht identisch mit der Position des Detektors, wird ein Teil des Signals oder das gesamte Signal nicht detektiert (vgl. Abb. 26 (b)). Vermisst man die Probe außerdem mit einem fokussierten THz-Strahl, was bei der Bildgebung sehr häufig der Fall ist, so muss zusätzlich sichergestellt sein, dass der Abstand zwischen THz-Sensor und Probe der Brennweite der Fokusoptyk entspricht. Bei einem fehlerhaften Abstand wird die Strahlung nicht in ihrem Fokuspunkt reflektiert, was zum einem zu Signalverlust führen kann (vgl. Abb. 26 (c)), zum anderen aber auch die Auflösung der bildgebenden Messung verschlechtert. Die Verwendung der beschriebenen Messgeometrie limitiert daher die Anwendbarkeit der bildgebenden THz-Messungen bisher auf flache Proben.

Abbildung 27 zeigt das Ergebnis einer zweidimensionalen bildgebenden THz-Messung an einer Mumienhand, für welche die Differenz der Maximal- und Minimalamplitude des THz-Pulses

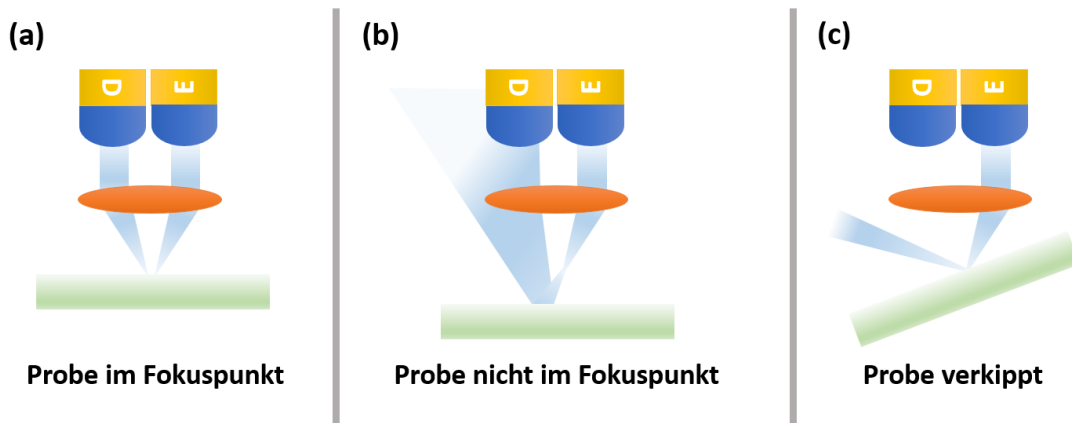


Abbildung 26: Reflexion von THz-Strahlung an unebenen Oberflächen

ausgewertet wurde (sogn. Peak to Peak Amplitude). Für die Messung wurde die Probe auf einer Metallplatte platziert. An den Stellen, an denen diese Platte nicht von der Probe verdeckt wurde, konnte ein reflektiertes Messsignal detektiert werden. In den Bereichen, in denen die Strahlung auf die Probe getroffen ist, wird größtenteils keine reflektierte Strahlung mehr detektiert. Außer den Umrissen der Probe können der Messung somit keine Informationen entnommen werden.

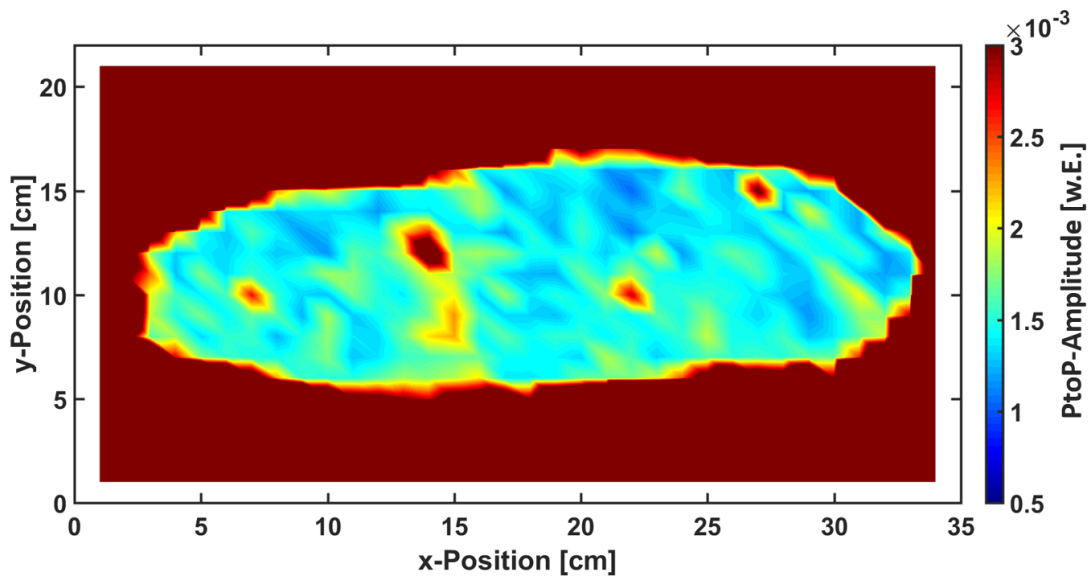


Abbildung 27: 2D-THz-Bild einer Mumienhand basierend auf der Peak-to-Peak-Amplitude der THz-Pulse

Um Proben mit einer komplexen Oberfläche wie beispielsweise historische Menschenfunde oder Kunstobjekte zu vermessen, ist es daher essentiell, ein System zu entwickeln, welches sich der Oberfläche der Probe anpassen kann. Die Verwendung von zusätzlichen Verfah- und



Rotationseinheiten wäre hierfür möglich, würde allerdings zu einem sehr ausladenden, wenig kompaktem Gesamtsystem führen. Ein Roboterarm bietet alle benötigten Freiheitsgrade und vereinfacht die Umsetzung deutlich.

Der Roboterarm könnte auf zwei Arten verwendet werden. Wie zuvor bereits beschrieben, könnte entweder die Probe relativ zum Sensor verfahren werden oder umgekehrt. Ersteres wurde bereits durch Ho et al. im Jahr 2008 bei der bildgebenden Vermessung von Tablettenüberzügen demonstriert [13], ist allerdings im Falle von größeren, wertvollen oder fragilen Gegenständen nicht praktikabel. Insofern wurde im Rahmen dieser Arbeit der Ansatz eines verfahrenbaren THz-Sensors relativ zur Probe gewählt. Diese Art der bildgebenden THz-Messung kann für jede beliebige Art von Proben angewendet werden und eröffnet ein vollkommen neues Anwendungsgebiet der THz-Bildgebung.

Um diesem Anspruch gerecht zu werden, muss das System eine Möglichkeit bieten, die dreidimensionale Oberfläche einer Probe selbstständig zu erfassen, sodass keine bestimmte Probengeometrie vorausgesetzt werden muss. Da außerdem wertvolle und fragile Proben vermessen werden sollen, ist es sinnvoll, wenn das System eine Kontrollroutine bietet, die Kollisionen zwischen Objekt und THz-Sensor verhindert.

Des Weiteren sollte sich die Positioniereinheit durch eine hohe Stabilität und Präzession auszeichnen. Insbesondere bei sehr engmaschigen Messrastern oder Proben mit stark wechselnder Oberflächenkrümmung ist eine exakte Positionierung des THz-Sensors essentiell für eine erfolgreiche Messung. Mögliche Vibrationen der Verfahreinheit sollten dabei so minimal wie möglich sein, um die sensible THz-Messtechnik nicht zu beeinflussen.

## 4.2 Grundkonzept

Das Grundkonzept des Roboter-basierten THz-Spektrometers fußt auf vier Stufen (vgl. Abb. (28)). In einem ersten Schritt wird die dreidimensionale Oberfläche des zu untersuchenden Objektes erfasst. Hierzu wird ein Streifenprojektionsverfahren verwendet, welches in Abschnitt 4.3.3 näher erläutert wird. In einem nächsten Schritt erfolgt die individuelle Definition des Messbereiches inklusive der Auflösung der einzelnen Messpunkte. Wurde der Messbereich durch den Anwender definiert, wird die genaue Position der Messpunkte anhand der zuvor erfassten dreidimensionalen Oberfläche der Probe berechnet. Abschnitt 4.3.4 diskutiert die entsprechenden Algorithmen zu dieser Berechnung. Anschließend muss der genaue Verfahrensweg für den Roboterarm bestimmt werden. Unter Verwendung einer speziellen Roboterprogrammiersprache kann gleichzeitig auch eine Kollisionskontrolle erfolgen (vgl. Abschnitt 4.3.5). Nachdem diese drei Schritte durchlaufen wurden, kann die Roboter-basierte THz-Messung eines dreidimensionalen Objektes beginnen. Das hierzu verwendete THz-Spektrometer sowie die dazugehörigen THz-Sensoren werden in Abschnitt 4.3.6 genauer beschrieben. Das Zusammenspiel aller einzelnen

Systemkomponenten wird durch eine Basis- und Positionierungseinheit geregelt, die zunächst beschrieben werden sollen.

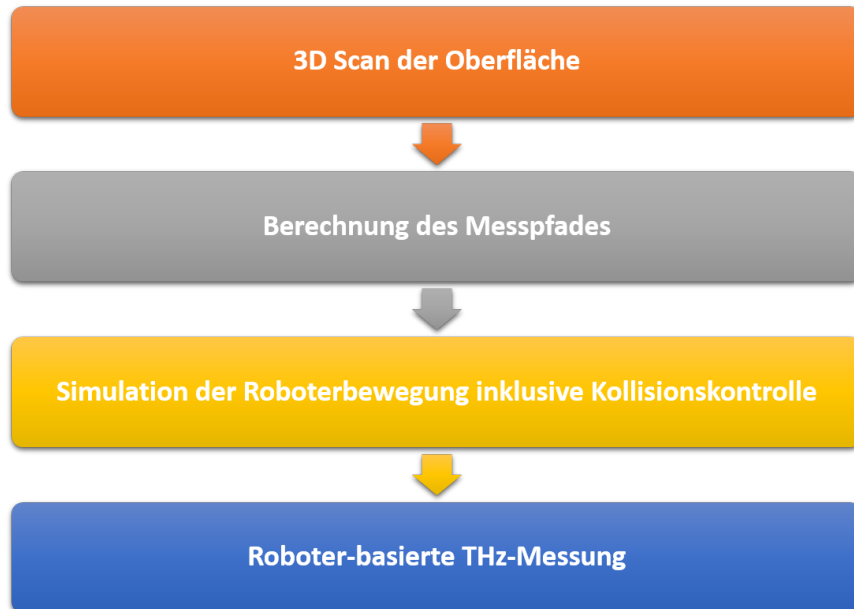


Abbildung 28: Grundkonzept des Roboter-basierten THz-Spektrometers

## 4.3 Systemeinheiten

### 4.3.1 Basiseinheit

Um alle Systemkomponenten anzusteuern, wurde eine sogenannte Basiseinheit entwickelt, die dem Anwender eine grafische Benutzeroberfläche bietet und die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten regelt. In Abbildung 29 ist eine Übersicht über das Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten und die Interaktion mit der Basiseinheit dargestellt.

Da verschiedene Systemtypen mit unterschiedlichen Programmiersprachen angesprochen werden müssen, ist es in diesem Fall nicht möglich, auf eine kommerziell erhältliche Software zurückzugreifen. Es wurde daher eine eigene Basiseinheit entwickelt, die auf alle Anwendungen speziell angepasst werden kann. Als Programmiersprache wurde Python ausgewählt, da hier eine große Auswahl an verschiedenen Bibliotheken für Messaufgaben, grafische Benutzeroberflächen oder Kommunikation bereits existiert. Zusätzlich ist Python frei verfügbar und kompatibel mit diversen Betriebssystemen wie Windows, Linux oder Mac OS X. Bereits existierende Messsoftware für THz-Messungen ist ebenfalls auf Python-Basis vorhanden. Zusätzlich zur Kommunikation mit den einzelnen Systemkomponenten, werden in der Basiseinheit auch alle erforderlichen Berechnungen für den Messpfad durchgeführt.

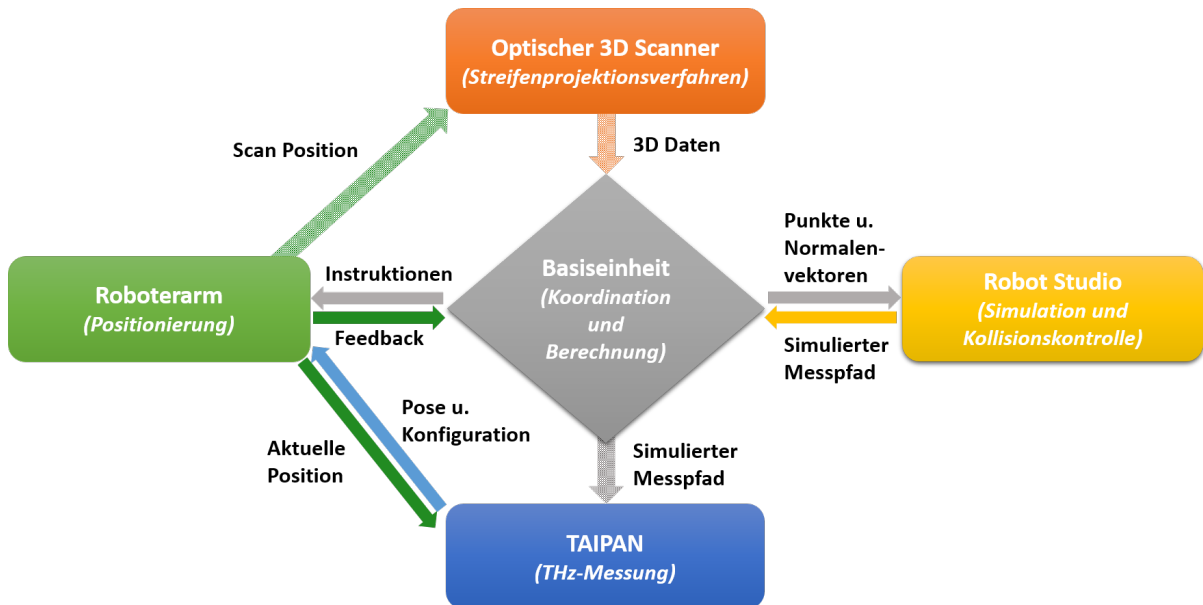


Abbildung 29: Übersicht und Zusammenspiel der einzelnen Komponenten des Roboter-basierten THz-Spektrometers

#### 4.3.2 Positionierungseinheit

Neben der Basiseinheit ist die Positionierungseinheit die zweitwichtigste Komponente des Roboter-basierten THz-Spektrometers. Mithilfe der Positionierungseinheit soll sichergestellt werden, dass der THz-Sensor immer senkrecht und in einem definierten Abstand zum Messpunkt steht. Zunächst wird der verwendete Roboterarm vorgestellt, bevor eine kurze Abhandlung über die Grundlagen der Robotertechnik und die entwickelte Programmroutine zur Ansteuerung des Roboters erfolgt.

##### Verwendeter Roboterarm

Bei Robotern wird zwischen parallelen und seriellen Varianten unterschieden. Beide Varianten bieten typischerweise bis zu sechs Freiheitsgrade. Parallel verknüpfte Roboter bieten eine hohe Positioniergenauigkeit bis in den Nanometerbereich. Im Gegensatz zu seriellen Robotern können die Glieder jedoch nicht einzeln angesteuert werden. Bei den seriell verknüpften Robotern ist jedes Glied einzeln mit der Basiseinheit verknüpft, wodurch eine höhere Bewegungsfreiheit erreicht werden kann. Die Positioniergenauigkeit liegt allerdings nur bei etwa  $10 \mu\text{m}$ .

Für den vorliegenden Anwendungsfall ist die Positioniergenauigkeit eines seriellen Roboters ausreichend und eine höhere Bewegungsfreiheit sowie ein größerer Arbeitsbereich sind sinnvoller. Letztlich wurde daher ein Roboterarm der Firma ABB verwendet, der direkt eine Simulationsumgebung, genannt RobotStudio, mit sich bringt, in der die Roboterbewegungen simuliert und Kollisionen kontrolliert werden können.

Der Roboterarm IRB 120 von ABB, dargestellt in Abbildung 30, ist einer der kleinsten verfügbaren Industrieroboter. Er verfügt über sechs Achsen, kann ein Gewicht von bis zu 3 kg handhaben und sein Arbeitsbereich deckt einen Radius von 58 cm ab. Mit einem Gewicht von 25 kg und einer Schutzklasse von IP 30 (Schutz gegen das Eindringen von festen Fremdkörpern mit einem Durchmesser  $> 2,5$  mm) ist dieser Roboterarm daher auch für den mobilen Einsatz, beispielsweise an Ausgrabungsstätten oder in Museen, geeignet. Dem steht auch die breitbandige Betriebstemperatur von  $5^{\circ}\text{C}$  bis  $45^{\circ}\text{C}$  nicht im Wege. Ein weiterer entscheidender Vorteil dieses Roboterarmes liegt in der Steuerbarkeit durch externe Programme. Während viele andere Anbieter vollständig geschlossene Systeme anbieten, kann der ABB Roboter durch eine Netzwerkschnittstelle angesprochen werden.

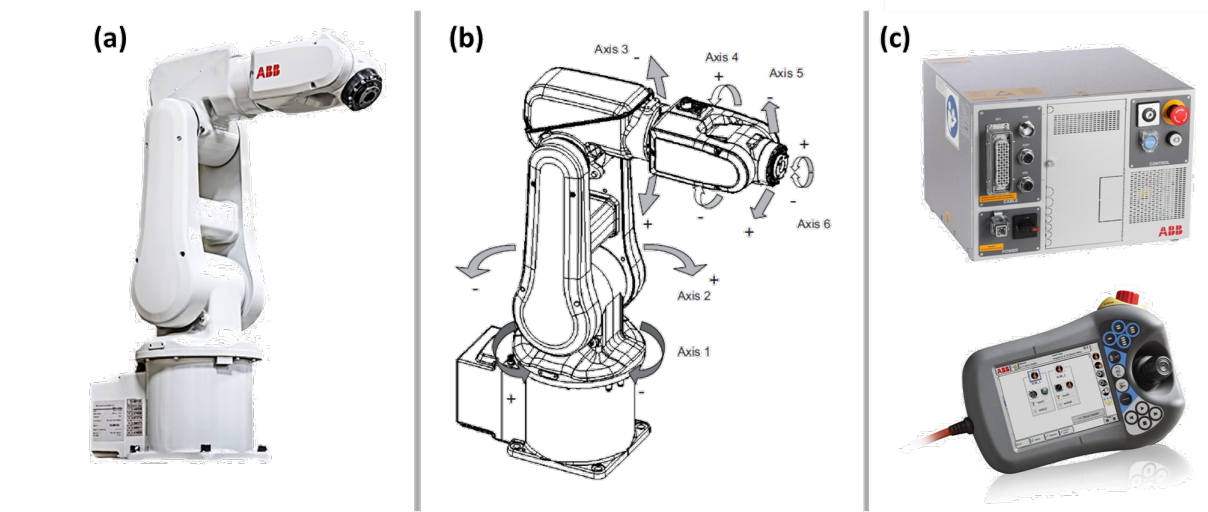


Abbildung 30: Foto und technische Zeichnung des verwendeten Roboterarmes IRB 120 und der dazugehörigen Kompaktsteuerung IRC 5 mit Handgerät [110]

Gesteuert wird der IRB 120 von einer IRC 5 Kompaktsteuerung der Firma ABB. Mit dieser Steuerung kann sowohl der Roboter an sich gesteuert werden, aber auch eine Steuerung von weiteren externen Verfahreinheiten oder anderen Komponenten wie Druckluftversorgung etc. ist möglich. Die Steuerung kann beispielsweise über eine Netzwerkverbindung mit einem PC verbunden werden. Auf diese Weise kann der Roboter durch zusätzliche externe Programme gesteuert werden. Die Steuerung an sich wird in der robotereigenen Sprache RAPID programmiert.

Zur direkten Ansteuerung des Roboterarmes verfügt die Kompaktsteuerung über ein Handgerät, welches fest mit der Steuerung verbunden ist. Dieses Handgerät kann entweder zur manuellen Steuerung des Roboterarmes als Joystick verwendet werden oder entsprechende Programmroutinen, die vom Anwender definiert wurden, können im Automatikmodus gestartet werden.

**Grundlagen der Robotertechnik** Um die sich anschließende Abhandlung über die Programmierung des Roboters nachvollziehen zu können, sollen zunächst kurz die Grundlagen und wichtigsten Begriffe der Robotertechnik zusammengefasst werden. Detailliertere Informationen finden sich in [111].

**Koordinatensysteme, Arbeitsobjekte und Werkzeuge** Um genaue Positionen des Roboters zu definieren, werden verschiedene Koordinatensysteme, Arbeitsobjekte (engl. *work objects*) und Werkzeuge (engl. *tools*) verwendet. In Abbildung 31 sind verschiedene Koordinatensysteme im Bezug zum Roboterarm dargestellt. Das Koordinatensystem, welches allen anderen übergeordnet ist, wird als das sogenannte Weltkoordinatensystem bezeichnet (W). Wenn nur ein einzelner Roboterarm verwendet wird, ist dieses Koordinatensystem identisch mit dem sogenannten Base-Koordinatensystem (B), welches sich im Zentrum der Grundfläche des Roboterarmes befindet. Zusätzlich können noch weitere benutzerdefinierte Koordinatensysteme (U) erstellt werden, deren Nullpunkt sich durch Translation und Rotation in das Weltkoordinatensystem überführen lässt und umgekehrt. Um beispielsweise eine Messung zu vereinfachen, bietet es sich an, im Zentrum der Probe ein neues Koordinatensystem zu generieren, sodass die Definition des Messpfades dann direkt in diesem Koordinatensystem stattfinden kann. In der Programmiersprache RAPID, die für die Programmierung des Roboterarmes verwendet werden muss, werden diese Koordinatensysteme als *work objects* (WO) bezeichnet und in der Form  $[[\text{Position}], [\text{Quaternion}]]$  relativ zum Weltkoordinatensystem übergeben.

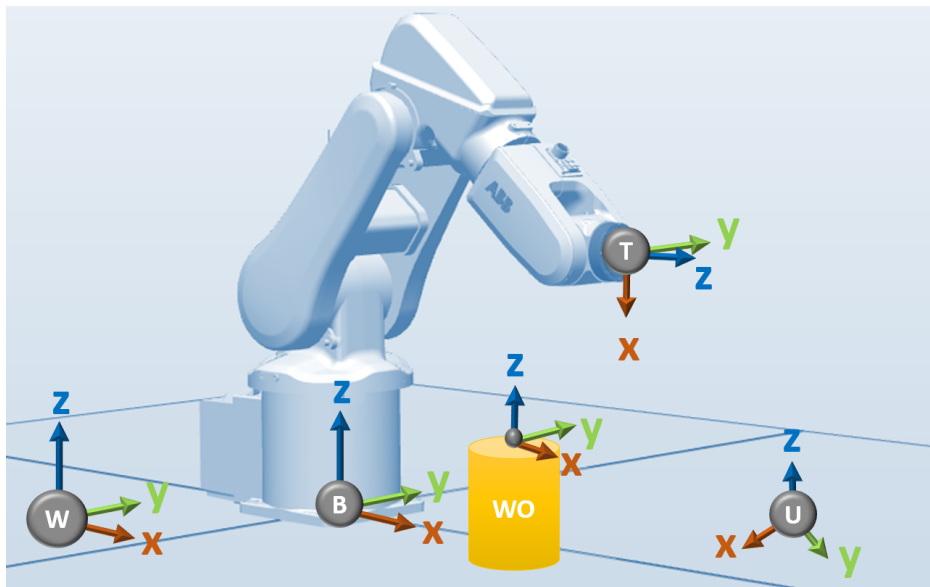


Abbildung 31: Verschiedene Koordinatensysteme eines Roboters

Die Kombination aus Position und Quaternion wird auch als *Pose* bezeichnet und stellt einen speziellen Datentyp in RAPID dar. Ein weiteres wichtiges Koordinatensystem ist das sogenannt-

te Werkzeugkoordinatensystem (T). Dieses definiert die Messposition des montierten Werkzeuges (engl.: tool center point = TCP) relativ zur zentralen Position des Roboterflansch. Dieses spezielle Koordinatensystem wird allerdings nicht als *work object*, sondern als *tool* bezeichnet. Zusätzlich zu der *Pose* können bei diesem Datentyp noch weitere Informationen mit übergeben werden wie beispielsweise der Schwerpunkt oder das Gewicht des Werkzeuges.

**Quaternionen** Der Begriff Quaternion ist ebenfalls eine Besonderheit, die in der Robotertechnik verwendet wird. Anstatt die Rotation eines Objektes durch eine Matrix oder Eulerwinkel zu beschreiben, wird ein sogenanntes Quaternion verwendet. Dies hat den Vorteil, dass es kompakter ist. Die Vektoren  $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$  und  $\vec{z}$ , die die Orientierung eines neuen Koordinatensystems beschreiben, können durch Vektoren des Weltkoordinatensystems ausgedrückt werden.

$$\vec{x} = (x_1, x_2, x_3) \quad (4.1)$$

$$\vec{y} = (y_1, y_2, y_3) \quad (4.2)$$

$$\vec{z} = (z_1, z_2, z_3) \quad (4.3)$$

Diese Vektoren lassen sich in der Rotationsmatrix  $R$  zusammenfassen

$$R = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Um diese Rotationsmatrix in ein Quaternion  $q = [q_1, q_2, q_3, q_4]$  zu überführen, kommen folgende Relationen zum Einsatz

$$q_1 = \frac{\sqrt{x_1 + y_2 + z_3 + 1}}{2} \quad (4.5)$$

$$q_2 = \frac{\sqrt{x_1 - y_2 - z_3 + 1}}{2} \quad (4.6)$$

$$q_3 = \frac{\sqrt{y_2 - x_1 - z_3 + 1}}{2} \quad (4.7)$$

$$q_4 = \frac{\sqrt{z_3 - x_1 - y_2 + 1}}{2} \quad (4.8)$$

$$(4.9)$$

Ein Quaternion, welches der Orientierung des Weltkoordinatensystems entspricht, hat beispielsweise die Gestalt  $[1,0,0,0]$ . In RAPID werden diese Quaternionen als Variablentyp *orient* bezeichnet.

**Targets und Bewegungstypen** Als *Targets* werden in der Robotertechnik die anzufahrenden Punkte bezeichnet. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten, ein *Target* anzugeben. Entweder man gibt den Winkel für jede Achse einzeln an (sogenanntes *jointtarget*), wobei sich alle Achsen unabhängig voneinander bewegen (*absolute joint movement*) oder man definiert die Position

und Orientierung relativ zum verwendeten Werkzeug und Koordinatensystem (sogenanntes *robtaret*). Für weiteres muss dem Roboter sowohl eine *Pose* als auch eine Konfiguration übergeben werden. Außerdem stehen dem Anwender hier drei unterschiedliche Bewegungstypen zur Verfügung:

- *Joint movement*: Bei diesem Bewegungstyp bewegen sich alle Achsen gleichzeitig, allerdings werden sie so gesteuert, dass sie ihre Bewegung gleichzeitig beenden. In diesem Fall vollführt das Werkzeug meist eine Schwingbewegung zwischen zwei Anfahrpunkten.
- *Linear movement*: Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Typ bewegt sich hier die Werkzeugspitze linear zwischen den Anfahrpunkten.
- *Circular movement*: Kreisbewegungen können durch die Verwendung mehrerer *robtarets* definiert werden, sodass der Roboterarm eine Kreisbewegung zwischen diesen Punkten vollführt.

**Konfiguration und Singularität** Des Weiteren findet der Begriff der sogenannten Roboterkonfiguration häufig Verwendung. In manchen Fällen kommt es vor, dass ein angegebener Punkt durch unterschiedliche Konfigurationen, also Achsstellungen, des Roboterarmes erreicht werden kann. Da die Ansteuerung des Roboterarmes eindeutig sein muss, muss zusätzlich zum anzufahrenden Punkt noch eine Konfiguration mit übergeben werden, um vorzugeben, welche Achsen benutzt werden sollen, um den Punkt zu erreichen. Die Achskonfiguration wird durch die Einteilung jeder Achse in vier Quadranten zu je  $90^\circ$  definiert. Für eine eindeutige Zuweisung ist es nicht nötig, jede Achse zu konfigurieren. Im Falle eines Roboters mit sechs Achsen ist die Angabe von vier Achskonfigurationen ausreichend. Der zu verwendete Quadrant wird durch ganzzahlige Werte zwischen -4 ( $-270^\circ$  bis  $-360^\circ$ ) und 3 ( $270^\circ$  bis  $360^\circ$ ) angegeben. Der Konfigurationsvektor, der in RAPID übergeben wird hat daher die Gestalt [Achse1, Achse 4, Achse 6, Achse 5]. Wird keine eindeutige Roboterkonfiguration übergeben, kann es zu Singularitäten kommen.

#### **Programmroutine zur Positionierung**

Alle Programmroutinen, die den Roboterarm direkt steuern, werden in der robotereigenen Programmiersprache RAPID verfasst. Um den Roboterarm durch ein externes Programm in einer anderen Programmiersprache anzusprechen, muss daher zunächst ein Programm in RAPID erstellt werden, welches über eine Netzwerkverbindung mit anderen Komponenten kommunizieren kann. Das in RAPID erstellte Programm wird direkt in der Steuerungseinheit des Roboters ausgeführt und kann nur über das Handgerät gestartet oder gestoppt werden.

In der THz-Messsoftware soll der Roboterarm wie eine konventionelle Verfahreinheit implementiert werden, bei welcher man eine bestimmte Distanz für eine bestimmte Achse angeben kann. Erst nachdem dieser Punkt erreicht wurde, soll eine THz-Messung gestartet werden.

Nach Abschluss der THz-Messung an diesem Punkt, soll der Sensor dann zum nächsten Messpunkt verfahren werden. Da der Roboterarm allerdings nicht direkt von außen angesteuert werden kann und nicht nur für diese Art der Anwendung konzipiert wurde, muss eine entsprechende Programmroutine in RAPID selbst geschrieben werden, die die oben beschriebene Ansteuerung als passive Verfahrereinheit ermöglicht. Passiv bedeutet in diesem Fall, dass im RAPID-Programm an sich keine Aktionen ausgeführt werden, sondern das Programm nur auf externe Befehle reagiert, die über eine Netzwerkschnittstelle empfangen werden.

Im einfachsten Fall besteht ein solches RAPID-Programm nur aus einer Aufgabe, der sogenannten *Movement task*. Während diese ausgeführt wird, können parallel keine weiteren Befehle in derselben Aufgabe ausgeführt werden wie beispielsweise das Senden und Empfangen weiterer Befehle. Um die Kommunikation mit der Basiseinheit auch während der Bewegung des Roboterarmes sicherzustellen, wird daher eine weitere sogenannte *Communication task* benötigt, die parallel zur *movement task* ablaufen kann. Zusätzlich zu diesen beiden Aufgaben wurde noch eine dritte *Control task* eingerichtet. Diese Aufgabe ist nicht zwangsläufig notwendig, gibt allerdings kontinuierlich ein Feedback auf dem Handgerät der Robotersteuerung, um dem Nutzer anzuzeigen, welche Befehle zurzeit ausgeführt werden. Wird das RAPID-Programm erstmalig auf der Robotersteuerung ausgeführt, wird zunächst eine Initialisierung durchlaufen, in der die nötigen Startwerte für alle Variablen gesetzt werden. Anschließend laufen alle drei Aufgaben in einer Schleife und warten auf weitere Befehle seitens der externen Basiseinheit (vgl. Abb. 32). Im Folgenden wird die Struktur der einzelnen Aufgaben vorgestellt.

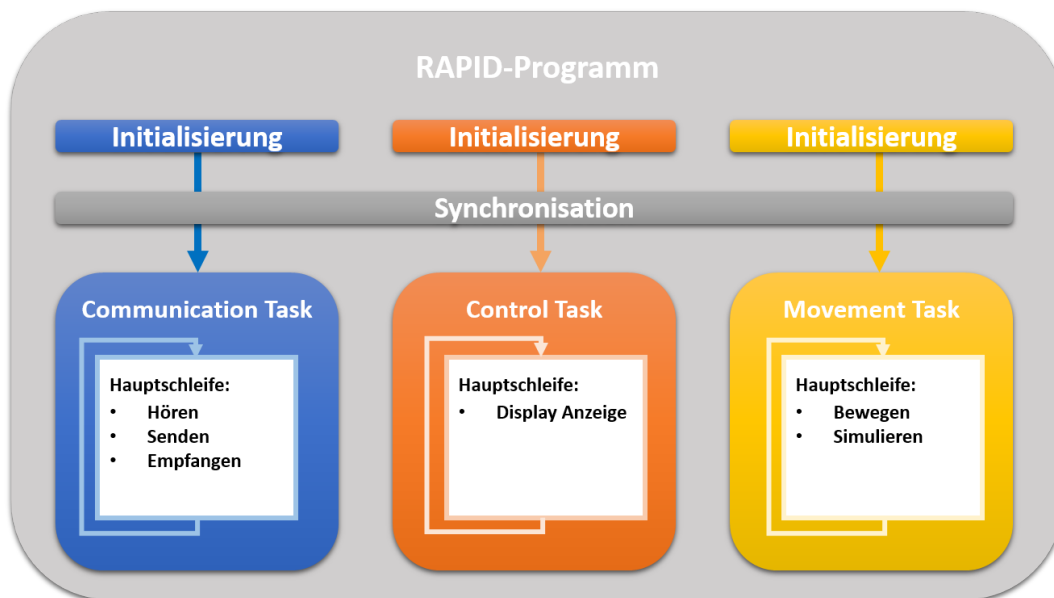


Abbildung 32: Übersicht über die Aufgaben des RAPID-Programms



**Communication Task** Die Kommunikation stellt eine der wichtigsten Aufgaben des RAPID-Programms dar. In dieser Task kann die Netzwerkverbindung zwischen der Robotersteuerung und der Basiseinheit, welche auf einem externen PC ausgeführt wird, geschlossen werden, bis das RAPID-Programm auf dem Handgerät der Robotersteuerung beendet wird. Die Hauptschleife, die zu diesem Zweck durchlaufen wird, nennt sich *Com main loop0* und ist im linken Teil von Abbildung 33 dargestellt. Zu Beginn eines jeden Durchlaufes wird ein Clientsocket erstellt. Darüber kann sich ein externes Programm verbinden, Befehle senden oder empfangen. Das Programm wartet zunächst 5 s, ob ein externes Programm versucht, eine Netzwerkverbindung zu etablieren. Ist dies nicht der Fall, springt das Programm an das Ende der Schleife, wo der Socket bereinigt und geschlossen wird, bevor bei einem erneuten Durchlaufen der Schleife ein neuer Socket erstellt wird. Diese Zeitüberschreitung stellt sicher, dass ein neuer Socket erstellt wird, sollte es zu einer Fehlfunktion des bisherigen Sockets kommen. Wird eine Verbindung zwischen dem externen Programm und dem Clientsocket erfolgreich geschlossen, wechselt das RAPID-Programm in eine neue Schleife *Com main loop1*. In dieser Kommunikationsschleife erfolgt die gesamte Kommunikation mit dem Hostsocket. Erst, wenn die Verbindung unterbrochen oder beendet wird, wechselt das Programm wieder in die übergeordnete Hauptschleife und wartet auf einen erneuten Verbindungsversuch.

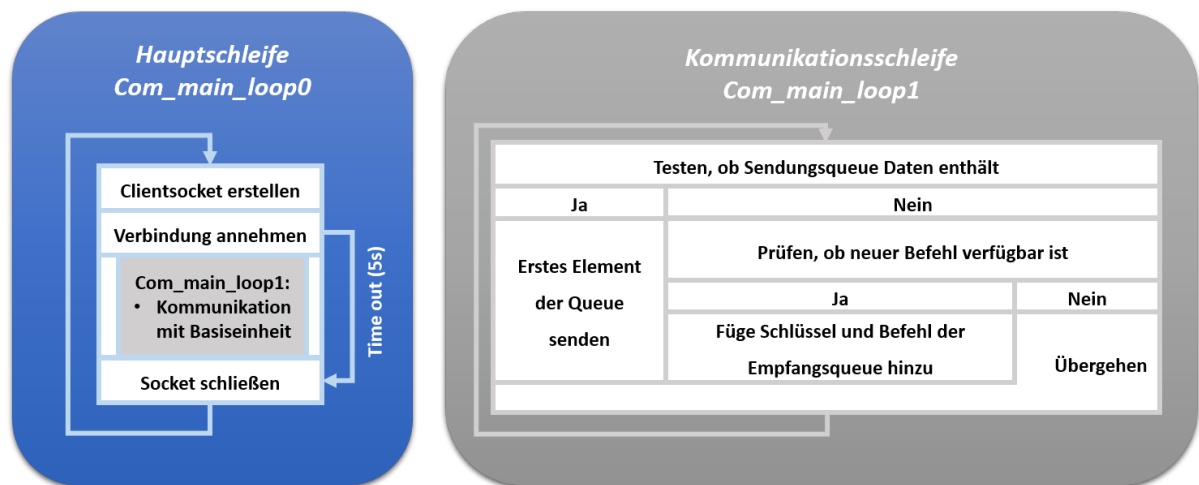


Abbildung 33: Hauptschleife der Communication Task

Die Kommunikationsschleife prüft permanent, ob sich ein Element in der Sendungsqueue befindet. Ist dies der Fall, wird die Nachricht gesendet und aus der Queue gelöscht. Nur wenn sich keine Nachricht mehr in der Sendungsqueue befindet, wird überprüft, ob eine neue Nachricht empfangen wurde (vgl. Abb. 33, rechter Teil). Auf diese Weise wird sichergestellt, dass das Senden einer Nachricht eine höhere Priorität hat als das Empfangen, sodass beispielsweise Fehlermeldungen sofort übertragen werden können.

Die Kommunikation zwischen Client und Host an sich folgt festgelegten Regeln. Jede gesendete

Nachricht besteht aus einem Schlüssel und einem Befehl. Der Schlüssel enthält Informationen darüber, welche Aktion ausgeführt werden soll. Im Befehl können weitere Parameter übergeben werden, die zum Ausführen des Befehls notwendig sind. Um sicherzustellen, dass jede Nachricht vollständig gelesen wird, sind Schlüssel und Befehl in einer vorgegebenen Struktur codiert. Die ersten vier Zeichen einer Nachricht stehen für den Schlüssel und die Gesamtlänge der Nachricht. Der Empfängersocket liest zunächst nur diese vier Zeichen, entschlüsselt die Gesamtlänge der Nachricht und liest dementsprechend den Rest der Nachricht, d.h. den Befehl, aus. Die empfangene Nachricht wird dann bis zur Weiterverarbeitung in eine Empfangsqueue geleitet. In der Sendungsqueue sind ebenfalls alle Schlüssel und Befehle enthalten, die als Reaktion auf eine Nachricht an den Host zurückgesendet werden können. Beide Queues sind so angelegt, dass sie bis zu 100 Schlüssel und Befehle zwischenspeichern können.

**Movement Task** Die *Movement Task* läuft nach erfolgter Initialisierung und Synchronisierung ebenfalls in einer Dauerschleife. Diese Dauerschleife wird als *Rob main loop0* bezeichnet und wird erst gestoppt, wenn das gesamte Programm beendet wird. Die *Movement Task* arbeitet die in der *Communication Task* empfangenen Befehle nacheinander ab. Nachdem ein Befehl ausgeführt wurde, wird eine entsprechende Antwort in die Sendungsqueue gegeben und der nächste Befehl, der in der Empfangsqueue vorliegt, abgearbeitet. Im Folgenden werden alle Schlüssel sowie die dazugehörige Funktion aufgeführt, die bei der Programmierung des Roboter-basierten THz-Systems definiert wurden. Generell setzt sich ein Schlüssel aus Nummern zwischen 00 und 99 zusammen. Schlüssel, die nicht belegt sind, werden von der Software ignoriert.

- 00: Initialisierung der Kommunikation. Der gesendete Befehl lautet *command requested*, der dazugehörige Antwortbefehl ist *control granted*.
- 01: Beenden der Kommunikation. Dieser Befehl stellt sicher, dass der Roboter zunächst alle bisher nicht ausgeführten Befehle der Empfangsqueue beenden kann, bevor die Verbindung zum Host gestoppt wird. Der gesendete Befehl besagt *terminate control*, als Antwort wird *control terminated* zurückgesendet.
- 04: Gibt die aktuelle Roboterposition in Form eines Jointtargets zurück.
- 05: Gibt die aktuelle Roboterposition in Form eines Robtargets zurück.
- 06: Gibt die aktuelle Orientierung zurück.
- 07: Gibt die aktuelle Orientierung in Eulerwinkeln zurück.
- 08: Gibt die aktuelle Achskonfiguration zurück.
- 09: Bestimmt ein neues Werkzeug.
- 10: Bestimmt ein neues Werkobjekt.

- 12: Bewegt den Roboter zur Scanposition.
- 20/ 21: Aktualisiert die Werkzeugdaten. Die neue Pose ist im Befehl enthalten. Die Nachricht ist auf zwei Schlüssel aufgeteilt, da die maximale Nachrichtenlänge von 80 Zeichen sonst überschritten würde.
- 22: Aktualisiert das Werkobjekt.
- 23: Aktualisiert die Geschwindigkeit des Roboterarmes.
- 24: Aktualisiert die Positionsdaten für ein Robtarget.
- 25: Aktualisiert die Orientierung für ein Robtarget.
- 26: Aktualisiert die Konfiguration für ein Robtarget.
- 27: Aktualisiert die Daten für ein Jointtarget.
- 28: Aktualisiert die Grenzen der einzelnen Achsen.
- 29: Aktualisiert die Grenzwinkel.
- 40: Bewegungsbefehl für Jointbewegung bei gegebener Roboterkonfiguration.
- 41: Bewegungsbefehl für lineare Bewegung bei gegebener Roboterkonfiguration.
- 42: Bewegungsbefehl für Jointbewegung ohne vorgegebene Roboterkonfiguration. Der Roboter nutzt die bestmögliche Konfiguration.
- 43: Bewegungsbefehl für lineare Bewegung ohne vorgegebene Roboterkonfiguration.
- 44: Bewegungsbefehl für eine absolute Jointbewegung.
- 50-54: Aktualisierung der Simulationseinstellungen.
- 55: Startbefehl für die Simulation

Die Bedeutung der einzelnen Schlüssel und deren Einordnung in den Gesamtkontext der Robotersoftware werden später nochmals aufgegriffen. Daher unterbleibt an dieser Stelle eine detailliertere Erläuterung.

**Control Task** Die *Control Task* läuft in einer Dauerschleife, um das Display des Handgerätes der Robotersteuerung ständig zu aktualisieren. Neben der Startzeit des RAPID-Programms und der aktuellen Zeit wird dem Nutzer angezeigt, ob zurzeit eine externe Netzwerkverbindung besteht und welche beiden Schlüssel und Befehle zuletzt ausgelesen bzw. ausgeführt wurden (vgl. Abb. 30(c)).

##### 4.3.3 Visualisierung der dreidimensionalen Oberfläche einer Probe

Um den Roboterarm entsprechend der Probenoberfläche zu bewegen, muss zunächst die dreidimensionale Gestalt der Oberfläche vermessen werden. In einem ersten Abschnitt werden zunächst die verschiedenen Möglichkeiten zur Erfassung einer dreidimensionalen Oberfläche beschrieben, bevor eine Beschreibung der theoretischen Grundlagen und des verwendeten Scansystems folgt.

##### **Möglichkeiten zur dreidimensionalen Vermessung**

An die 3D-Scaneinheit werden viele Anforderungen gestellt. Zunächst soll das System mit verschiedenen Probengrößen arbeiten können. Außerdem muss die Auflösung hoch genug sein, um die Positionsdaten für den Messpfad adäquat berechnen zu können. Geht man von einer ungefähren Fokuspunktgröße des THz-Strahls von 1 mm aus, so sollten in diesem Messpunkt mindestens 10 Punkte des Oberflächenscans zur Positionsberechnung beitragen. Die Auflösung des 3D-Scanners sollte daher mindestens bei 100  $\mu\text{m}$  liegen.

Des Weiteren sollte die 3D-Scaneinheit die Dimensionen der Probe in Absolutwerten und einem festgelegten Koordinatensystem, relativ zum Weltkoordinatensystem, bestimmen, sodass eine Umrechnung zwischen den Koordinatensystemen möglich ist. Dies könnte entweder durch eine bestimmte Position des 3D-Scanners oder durch spezielle Marker, deren Position im Vorfeld bekannt ist, erfolgen.

Außerdem muss die Einheit mit den unterschiedlichen Probeneigenschaften umgehen können. Da es geplant ist, mit dem System historische Menschenfunde oder Kunstobjekte zu untersuchen, die teilweise sehr dunkle und matte Oberflächen aufweisen, muss das System entsprechend anpassbar sein. Die Visualisierung der Oberfläche muss zudem vollständig kontaktlos erfolgen, da die wertvollen Proben nicht beschädigt werden dürfen.

Weitere Randbedingungen, die zusätzlich zu einem effizienten, sicheren und schnellen Messablauf beitragen, sind eine hohe Aufnahmegeschwindigkeit und die Ausgabe der Daten in einem Format, welches von den folgenden Programmen direkt weiterverarbeitet werden kann. Die Verwendung optischer Technologien liegt daher nahe, da diese schnell arbeiten und keine zusätzlichen Sicherheitsmaßnahmen wie Laserschutz erfordern.

Im Bereich der optischen Technologien gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten zur dreidimensionalen Visualisierung von Proben [112]. Technologien, die lediglich einzelne Punkte oder Linien aufnehmen, wären jedoch zu langsam für die geplante Anwendung. Insofern stehen noch zwei Technologien zur Auswahl, die die Anforderungen erfüllen könnten. Eine dieser Technologien ist die sogenannte Photogrammetrie [113]. Bei dieser Technik werden Fotos von der Probe aus verschiedenen Winkeln aufgenommen. Aufgrund gemeinsamer Eigenschaften der Fotos kann

dann eine dreidimensionale Oberfläche der Probe rekonstruiert werden. Der Vorteil besteht hier darin, dass lediglich eine Kamera und eine entsprechende Software nötig sind. Die geplanten Proben könnten allerdings zu Problemen führen, da sie eventuell nicht ausreichend markante Eigenschaften für eine Rekonstruktion anhand von Fotos aufweisen. Eine zusätzliche Anbringung von Markern ist aufgrund der fragilen und wertvollen Untersuchungsobjekte ebenfalls ausgeschlossen. Daher wurde sich für eine andere Technologie entschieden. Bei der sogenannten Streifenprojektion werden variierende Streifenmuster auf die Probe projiziert und durch eine Kamera aufgenommen [114]. Bei dieser Technik kann auf zusätzliche Marker verzichtet werden, da die Position des Projektors und der Kamera zu jeder Zeit bekannt sind.

#### Theorie der Streifenprojektion zur Bestimmung dreidimensionaler Oberflächen

Das Streifenprojektionsverfahren basiert auf dem Triangulationsprinzip [112]. Dieses besagt, dass es in einem Dreieck möglich ist, die Position einer Ecke zu bestimmen, wenn die Position der beiden anderen Ecken und die dazugehörigen Winkel bekannt sind. Im einfachsten Falle eines optischen 3D-Scans wird ein Laserpunkt auf die Probenoberfläche projiziert und das dort gestreute Licht mit einer Kamera detektiert. Die Positionen des Lasers und der Kamera relativ zueinander sind bekannt. Diese bilden damit die Triangulationsbasis. Je nach Position des Laserpunktes auf der Probe wird eine andere Stelle im Kamerachip beleuchtet, sodass die Position auf der Probenoberfläche genau berechnet werden kann (vgl. Abb. 34). So könnte man die gesamte Probe Punkt für Punkt scannen. Um das Verfahren zu beschleunigen, kann auch eine Linie auf die Probe projiziert werden, sodass mehrere Punkte gleichzeitig erfasst werden können.

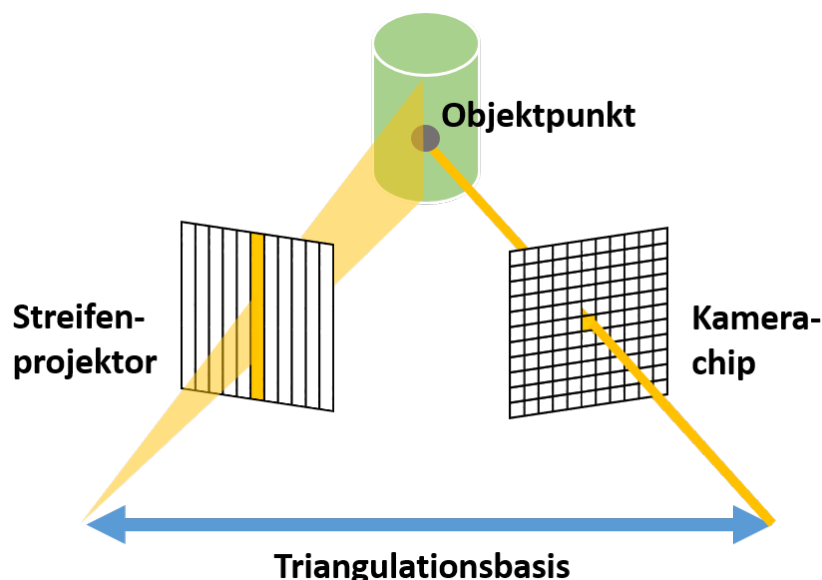
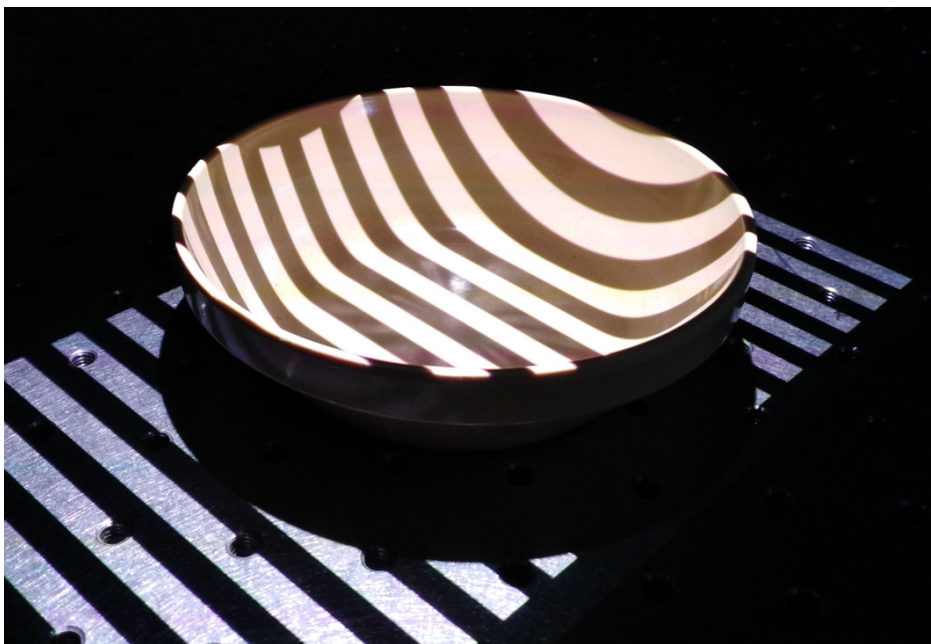


Abbildung 34: Prinzip des Streifenprojektionsverfahrens (in Anlehnung an [112])

Bei einem Streifenprojektionsverfahren wird die Probe gleichzeitig durch eine Vielzahl an Linien beleuchtet, sodass sich ein Streifenmuster aus hellen und dunklen Bereichen ergibt (vgl. Abb. 35). Die Verzerrung dieses Streifenmusters wird von der Kamera detektiert, wodurch eine dreidimensionale Rekonstruktion der Oberfläche ermöglicht wird. Um die Streifenmuster den passenden detektierten Bildpunkten zuzuordnen, ist eine Verknüpfung zwischen diesen nötig. Eine Möglichkeit, eine solche Verknüpfung herzustellen, besteht in der Veränderung der Streifengröße. Das erste projizierte Bild besteht zunächst aus nur einem hellem und einem dunklem Streifen. In den darauffolgenden Bildern wird die Anzahl der Streifen jeweils verdoppelt. So kann die Position jedes Streifens einer Position im Kamerachip zugeordnet werden.



*Abbildung 35: Projiziertes Streifenmuster*

Die maximal mögliche Auflösung eines Streifenprojektionsverfahrens zur Erfassung einer dreidimensionalen Oberfläche hängt hauptsächlich von der Qualität des projizierten Streifenmusters ab. Die Auflösung des Projektors limitiert die minimale Breite der Streifen. Des Weiteren spielt auch die Auflösung der Kamera und die verwendete Abbildungsoptik eine Rolle. Zusätzlich zu diesen drei Haupteinflüssen ist zudem eine große Tiefenschärfe gewünscht, die von der Triangulationsbasis abhängt.

Neben diesen technischen Anforderungen an das Messsystem, besteht eine ebenfalls große Limitierung des Messerfolges in der Probenbeschaffenheit. Stark reflektierende Proben können nicht vermessen werden, da das Streifenmuster nicht korrekt detektiert werden kann. Je nach Probengeometrie kann es auch zu Abschattungen verschiedener Bereiche kommen, sodass die dreidimensionale Oberfläche nicht vollständig rekonstruiert werden kann. Um dies zu ermögli-

chen, muss die Probe aus verschiedenen Positionen gescannt werden und die einzelnen Scans anschließend zusammengesetzt werden.

### Verwendetes System

Ein System, welches allen Anforderungen in diesem Anwendungsfall gerecht wird, ist das kommerziell erhältliche David SLS-2-System, dargestellt in Abbildung 36 und welches inzwischen von HP vertrieben wird. Das System besteht aus einem LED-Projektor in Kombination mit einer monochromatischen Kamera. Der Vorteil einer monochromatischen Kamera besteht darin, dass jeder Pixel zur Bildgebung beiträgt, während die Pixel bei chromatischen Kameras den verschiedenen Farben zugeordnet sind.

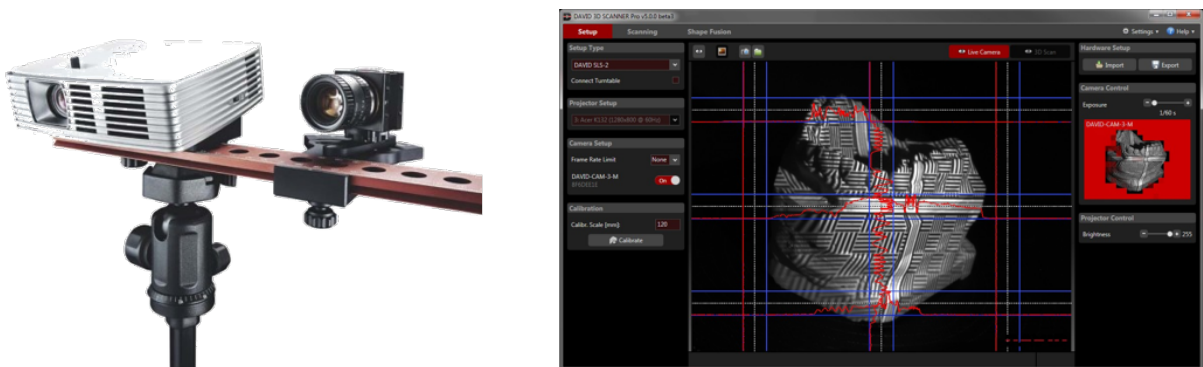


Abbildung 36: David SLS-2 Streifenprojektionsscanner und dazugehörige Software [115]

Die Kamera und der Projektor können auf einer gemeinsamen Verfahrereinheit montiert werden, sodass der Abstand je nach Probengröße variiert werden kann. Gleichzeitig ist es aber auch möglich, die Komponenten an einer eigenen Einheit zu montieren. Die mögliche Scangröße des Systems reicht von 60 mm bis 500 mm mit einer Auflösung von bis zu  $60 \mu\text{m}$  (1% der Scangröße). Die Auflösung dieses Systems ist somit ausreichend für die geplante Anwendung. Die Scans können aus bis zu 1,2 Millionen Eckpunkten zusammengesetzt werden. Zusätzlich zur topographischen Information kann gleichzeitig auch die Textur der Probe aufgenommen werden.

Das System verfügt außerdem über eine entsprechende Messsoftware, die es erlaubt, Scans aus verschiedenen Positionen zu einem vollständigen 3D-Modell zusammenzufügen und die Daten in verschiedenen Formaten wie *.obj*, *.stl* oder *.ply* zu exportieren.

Die Kalibration des Systems erfolgt ebenfalls über diese Messsoftware. Hierzu enthält das System eine Kalibrationsplatte, auf welcher Punktmuster verschiedener Größen angeordnet sind (vgl. Abb. 37). Je nach Bildgröße, die von dem Projektor abgedeckt wird, kann ein entsprechendes Muster ausgewählt werden. Dieses Muster wird mit der Kamera eingescannt. Da das Muster der Messsoftware bekannt ist, kann die Triangulationsbasis für weitere Scans entspre-

chend kalibriert werden. Ist dies erfolgt, projiziert der Projektor ein den Punkten entsprechendes Schachbrettmuster. So ist es möglich, Dimensionen im 3D-Scan quantitativ auszuwerten.

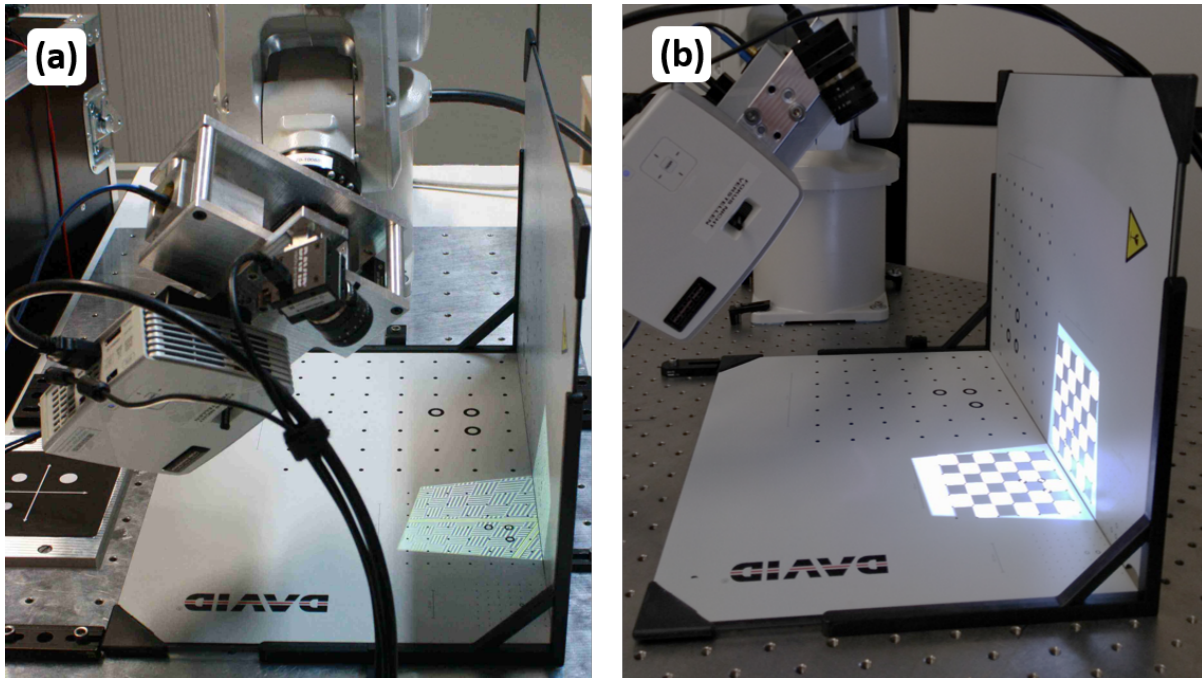


Abbildung 37: (a) Kalibration des Streifenprojektionssystems mit einer Kalibrationsplatte und (b) berechnetes und projiziertes Schachbrettmuster nach erfolgreicher Kalibration

#### 4.3.4 Berechnung des Messpfades

Nachdem die dreidimensionale Oberfläche des Messobjektes erfolgreich aufgenommen wurde, muss in einem nächsten Schritt der Messpfad anhand der Oberflächendaten berechnet werden. Hierzu müssen zum einen die Koordinaten des Messpunktes bestimmt werden und zum anderen der dazugehörige Normalenvektor, um den THz-Sensor senkrecht zum jeweiligen Messpunkt ausrichten zu können.

Der Anwender definiert zunächst den Messbereich in der  $xy$ -Ebene. Hierzu wird die Anzahl der Linien in der  $x$ - und  $y$ -Richtung und deren Abstand definiert. Der Messbereich wird zunächst immer als Rechteck generiert. Der Anwender kann zusätzlich noch entscheiden, ob der Ursprung des Pfades in der Mitte des Messbereichs liegen soll oder an einer der Ecken. Hinsichtlich des Fahrmodus des Roboterarmes kann außerdem noch zwischen einem mäanderförmigen Scan und einem Z-Scan entschieden werden. Bei ersterem werden die definierten Linien wechselweise in unterschiedlichen Richtungen abgefahren (vgl. Abb. 38(a)). Im Gegensatz dazu werden bei einem Z-Scan die Linien immer in der gleichen Richtung befahren (vgl. Abb. 38(b)).



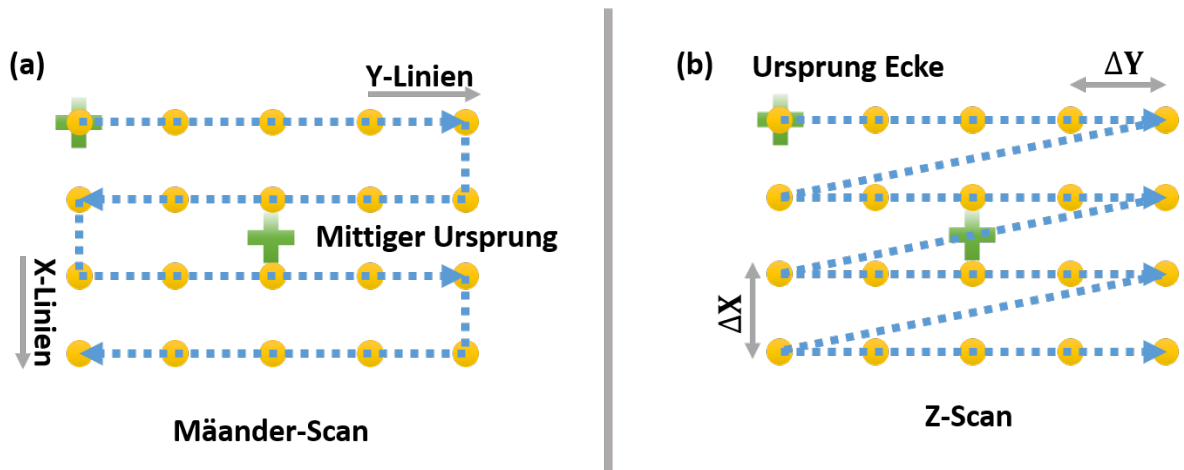


Abbildung 38: Verschiedene Verfahrmodi für den Roboterarm. (a) Mäanderförmiger Scan, (b) Z-Scan

Nachdem der Messbereich in der  $xy$ -Ebene durch den Anwender definiert wurde, werden die dazugehörigen  $z$ -Koordinaten anhand des Oberflächenmodells ermittelt. Dazu wird der jeweilige Messpunkt so lange in negativer  $z$ -Richtung verlängert, bis sich ein Schnitt mit der Oberfläche des Modells ergibt. Dieser Schnittpunkt entspricht dann der zum Messpunkt gehörenden  $z$ -Koordinate.

Für die Berechnung des Normalenvektors wurden zwei verschiedenen Verfahren entwickelt. In einem ersten Versuch wurde der Normalenvektor eines Punktes durch die Einführung zusätzlicher Hilfspunkte  $S_1$  und  $S_2$  in  $x$ - und  $y$ -Richtung berechnet. In Abbildung 39 (a) ist diese Methode in einem Schnitt in  $x$ -Richtung, in Abbildung 39 (b) als dreidimensionale Darstellung gezeigt.

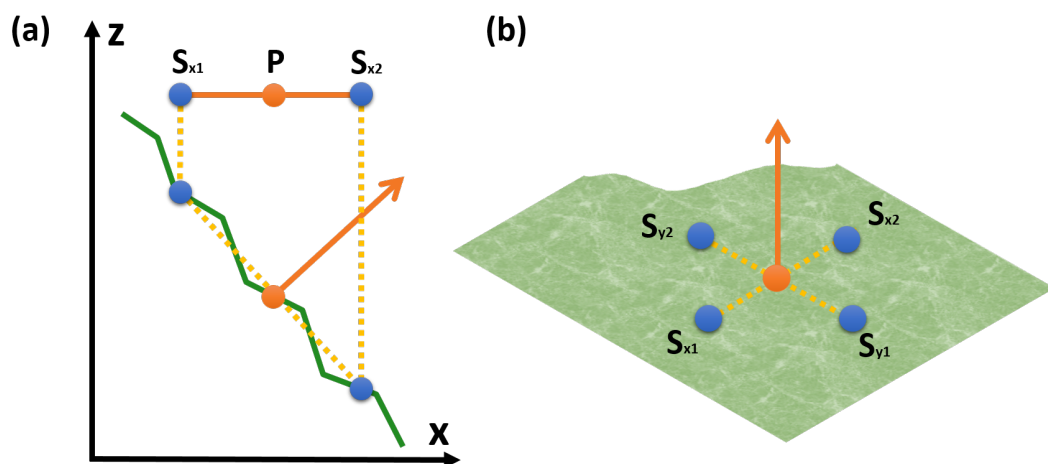


Abbildung 39: Erstes Verfahren zur Berechnung des Normalenvektors anhand von vier Hilfspunkten

Der Abstand dieser Hilfspunkte zum eigentlichen Messpunkt wird durch den Anwender definiert. Diese Punkte werden dann analog zum Messpunkt auf das Oberflächenmodell projiziert. Die Vektoren, die diese vier Punkte in x- und y-Richtung verbinden, spannen eine Ebene auf, die die Oberfläche am Messpunkt annähert. Der zur Ebene gehörende Normalenvektor kann dann als Kreuzprodukt der beiden Hilfsvektoren berechnet werden. Die Genauigkeit dieser Methode hängt maßgeblich von der Wahl des Abstandes zwischen Messpunkt und Hilfspunkten ab. Je kleiner dieser Abstand ist, desto genauer ist die Methode. Allerdings nimmt dann auch der Einfluss des Rauschens im Oberflächenmodell zu, welches durch den optischen Scan immer in Form kleiner Rillen vorhanden ist. Vergrößert man den Abstand zwischen Messpunkt und Hilfspunkten, so wird der Einfluss des Rauschens reduziert, allerdings kann es dann vorkommen, dass sehr feine Strukturen der Probe nicht akkurat reproduziert werden. Der Anwender muss also einen Abstandswert finden, der ein Optimum zwischen Auflösung und Rauscheinfluss darstellt. Hierzu kann sich an der Fokuspunktgröße des THz-Sensors orientiert werden, da Strukturen, die kleiner als die Fokuspunktgröße des THz-Sensors sind, in der späteren Messung nicht aufgelöst werden.

Das Verfahren zeichnet sich durch eine geringe Rechenzeit aus. Die Ergebnisse der Normalenberechnung sind in Abbildung 40(a) für eine einfache Rohrgeometrie gezeigt. Da die Messpunkte auf Linien liegen, sollten die dazugehörigen Normalenvektoren ebenfalls parallel zueinander sein. Dies kann allerdings unter Verwendung dieses Verfahrens nur annähernd erreicht werden. Das Problem dieses Verfahrens besteht darin, dass das Oberflächenmodell lediglich in zwei Richtungen zur Berechnung des Normalenvektors herangezogen wird. Die kleinen Rillen im Oberflächenmodell führen in diesem Fall zu Fehlern, die sich schnell aufsummieren können, wenn beispielsweise die z-Koordinate des einen Hilfspunktes vom Vorzeichen in eine andere Richtung abweicht, als die z-Koordinate des korrespondierenden Hilfspunktes.

Um dieses Problem zu minimieren, wurde ein zweites Verfahren entwickelt, welches weniger anfällig für Rauscheinträge durch den optischen Scan ist. Durch die Verwendung einer Vielzahl an Hilfspunkten anstatt lediglich vier, kann der Normalenvektor exakter berechnet werden. Die kleinstmögliche Einheit, in der die Oberfläche aufgelöst werden kann, sind die Dreiecke, durch welche das Oberflächenmodell in einer stl-Datei beschrieben wird. Nach der Projektion des Messpunktes auf das Oberflächenmodell können die Normalenvektoren aller Dreiecke, die in diesem Messpunkt liegen, gemittelt werden. Auf diese Weise erhält man einen Normalenvektor für jeden Messpunkt, der die Situation am Messpunkt deutlich genauer widerspiegelt als bei der vorherigen Methode. Je nach Neigung des Oberflächenmodells an der Stelle des Messpunktes kommt es zu einer mehr oder weniger starken Verzerrung des Messpunktes bei einer senkrechten Projektion. Auf diese Weise werden mehr Dreiecke in die Berechnung des Normalenvektors miteinbezogen als eigentlich gewünscht. Die Projektion des Messpunktes ist daher ein iterativer Prozess, dargestellt in Abbildung 41. Nach einer ersten Projektion des Messpunktes in z-Richtung, wird ein erster gemittelter Normalenvektor berechnet. Das Oberflächenmodell wird

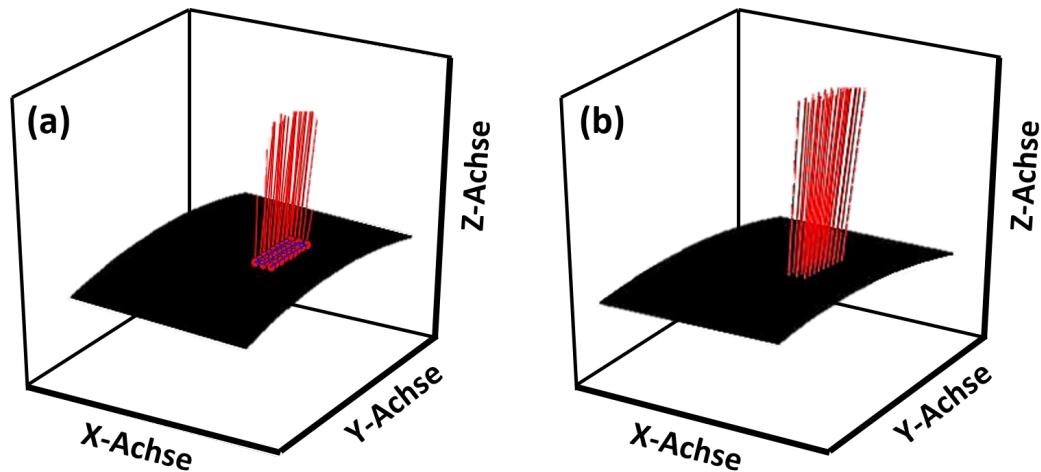


Abbildung 40: Ergebnis der Normalenberechnung anhand von vier Hilfspunkten (a) oder den Dreiecken des Oberflächenmodells (b)

dann so gedreht, dass dieser gemittelte Normalenvektor anschließend in z-Richtung zeigt. Bei einer erneuten Projektion des Messpunktes auf das gedrehte Oberflächenmodell wird ein neuer Normalenvektor berechnet und das Modell erneut entsprechend gedreht. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis die Abweichung zwischen dem vorherigen und dem neuen Normalenvektor einen Schwellenwert von einem Grad unterschreitet. In den meisten Fällen wird dieser Schwellenwert bereits nach zwei Iterationsprozessen erreicht.

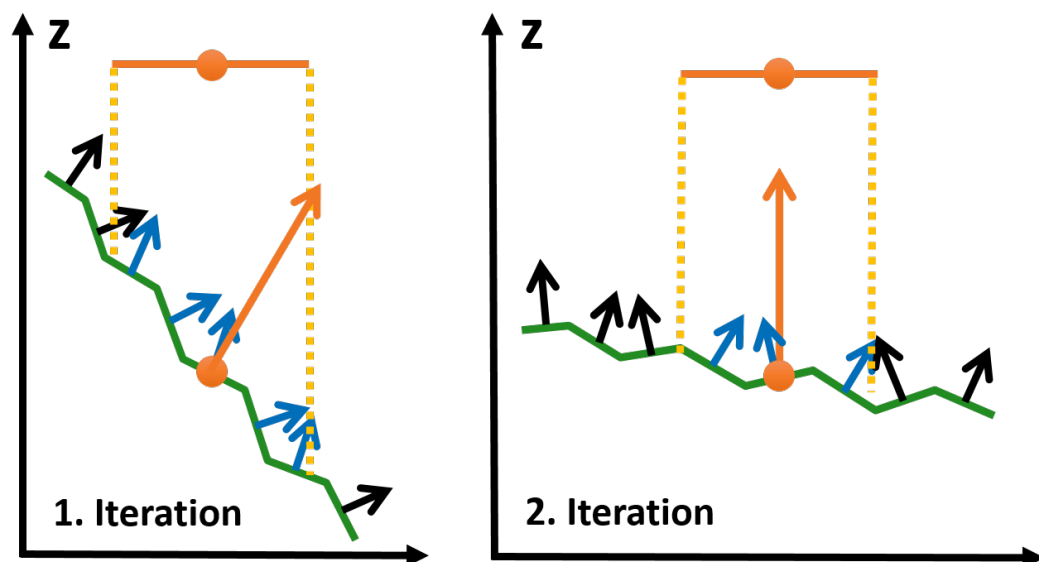


Abbildung 41: Zweites Verfahren zur Berechnung des Normalenvektors anhand der Dreiecke des Oberflächenmodells

Das Ergebnis dieser Methode ist in Abbildung 40 (b) dargestellt und zeigt eine deutliche Verbesserung im Vergleich zum vorherigen Verfahren. Ein kleiner Fehlereintrag existiert weiterhin durch die Vernachlässigung von Dreiecken, die nicht vollständig im Messpunkt liegen. Eine Voraussetzung für die Anwendung dieses Verfahrens ist daher eine möglichst hohe Dreiecksdichte des Oberflächenmodells, die bei der verwendeten Messkonfiguration jedoch gegeben ist.

Das Programm bietet zusätzlich die Möglichkeit, dass ein konstanter Normalenvektor durch den Anwender vorgegeben wird. So wird beispielsweise nur der Abstand zur Probe durch den Roboterarm nachjustiert. Dieser Modus ist für Proben mit flachen Oberflächen, aber unterschiedlichen Höhen geeignet. Außerdem ist es möglich, den Messpfad ohne das Oberflächenmodell zu berechnen, sodass auch eine Möglichkeit für einen konventionellen 2D-Scan besteht. In diesem Fall kann der Abstand zum Objekt manuell durch den Anwender eingegeben werden.

#### 4.3.5 Simulation und Kollisionskontrolle

Bevor mit der eigentlichen THz-Messung begonnen werden kann, müssen zunächst noch die Roboterbewegungen zum Befahren des berechneten Messpfades bestimmt werden. Für jeden berechneten Messpunkt und den dazugehörigen Normalenvektor wird ein *Robtarget* (siehe Kapitel 4.3.2 - Grundlagen der Robotertechnik) berechnet und die Bewegung des Roboterarmes simuliert. Diese Prozedur läuft in einer zum Roboter gehörenden Software, genannt *RobotStudio*, ab, die zusätzlich noch die Möglichkeit einer Kollisionskontrolle bietet. Die Software wird extern durch die Basiseinheit angesteuert. Der Anwender kann entscheiden, ob eine Kollisionskontrolle durchgeführt werden soll oder ob lediglich die Roboterbewegung berechnet und simuliert wird. Letzteres ist weniger zeitintensiv und kann bei Messobjekten verwendet werden, bei denen mögliche Kollisionen im Vorfeld ausgeschlossen werden können.

Des Weiteren bietet sich dem Anwender noch die Möglichkeit, zusätzliche Punkte zum berechneten Messpfad einzuführen. Durch Aktivieren dieser Funktion generiert die Software zusätzliche Punkte oberhalb der Messpunkte, zu denen der Roboterarm nach jeder Messung zurückfährt. So kann sichergestellt werden, dass großräumige Bewegungen des Roboterarmes weiter entfernt von der Probe stattfinden. Dies macht vor allem bei Proben mit sehr komplexen und unebenen Oberflächen Sinn. Außerdem kann der Anwender einen maximalen Winkel für den Roboterarm einstellen. Diese Funktion ist sinnvoll, wenn der Messbereich an einer Kante des Objektes liegt, an welcher der Roboterarm unter Umständen Drehungen von mehr als  $90^\circ$  vollführen würde, um Messpunkte zu erreichen. Durch das Vorgeben eines maximalen Winkels werden alle Messpunkte, deren Normalenvektor um mehr als diesen Schwellenwert von der z-Achse abweicht, automatisch übersprungen.

Der Ablauf der Kommunikation zwischen Basiseinheit und RobotStudio ist in Abbildung 42(a) dargestellt. Um die Netzwerkkommunikation zwischen den beiden Einheiten zu minimieren, wird der Messpfad in eine Textdatei exportiert und ein Befehl zum Einlesen dieser Datei an

RobotStudio gesendet, der den Pfad und Namen der Datei enthält. Hierbei ist darauf zu achten, dass dieser nicht länger als 80 Zeichen ist, da sonst die maximal zulässige Zeichenlänge in RAPID überschritten werden würde. Zusätzlich zu dieser Textdatei werden noch weitere Einstellungen wie das aktive Werkobjekt, das aktive Werkzeug, die Geschwindigkeit, eventuelle Grenzwinkel und die Startposition an *RobotStudio* übertragen. Erst nachdem sichergestellt ist, dass *RobotStudio* alle notwendigen Informationen für die Simulation des Messpfades erhalten hat, wird ein Befehl zum Starten der Simulation gesendet. Die sich anschließende Simulation erfolgt vollständig in *RobotStudio*. Der Ablauf ist in Abbildung 42 (b) gezeigt.

Nach Erhalt des Startbefehls wird zunächst die Datei mit den Messpfaddaten geöffnet. Anschließend wird eine neue Textdatei erzeugt, in welcher der berechnete Fahrweg für den Roboterarm abgespeichert wird. Die Kopfzeile dieser Datei enthält zusätzlich alle relevanten Einstellungen, die für die Simulation vorgegeben wurden, sodass diese später durch den realen Roboter übernommen werden können. In der Simulationsdatei werden alle Punkte mit einem Schlüssel zwischen eins und drei versehen. Eins steht für alle Messpunkte, zwei für Dummypunkte, die angefahren werden, aber an welchen keine THz-Messung stattfindet und drei für Punkte, die weder angefahren noch vermessen werden. Der zuerst abgespeicherte Punkt in der Simulationsdatei ist der Startpunkt, der durch die Basiseinheit übermittelt wurde. Dieser Startpunkt dient auch gleichzeitig als Endpunkt für jede Messung. Als zweiter Punkt wird ein Punkt berechnet, der jeweils 100 mm über dem ersten Messpunkt liegt. Dieser Zwischenpunkt sorgt dafür, dass es auf dem Weg zwischen Startpunkt und erstem Messpunkt nicht zu Kollisionen mit der Probe kommt (vgl. Abb. 42(c)). Nachdem diese Punkte berechnet und simuliert wurden, beginnt das Simulationsprogramm mit einer Schleife, die nach und nach alle Messpunkte simuliert, unter Umständen eine Kollisionskontrolle durchführt und die Ergebnisse direkt in der Textdatei abspeichert, sodass der interne Speicher von RobotStudio nicht überlastet wird. Nachdem der letzte Messpunkt simuliert wurde, wird analog zum Beginn ein weiterer Zwischenpunkt zwischen letztem Messpunkt und Endpunkt generiert. Nach Abschluss der Simulation wird die Datei von *RobotStudio* exportiert und wieder durch die Basiseinheit eingelesen.

Der genaue Ablauf der Simulationsroutine ist in Abbildung 43 dargestellt und wird im Folgenden näher erläutert. Nachdem der erste Messpunkt geladen wurde, wird zunächst überprüft, ob sich der Normalenvektor innerhalb der vorgegeben Winkelgrenze befindet. Ist dies nicht der Fall, wird der Punkt automatisch gelöscht und ein neuer Punkt geladen. Befindet sich der Punkt innerhalb der Grenzen, wird ein temporäres Robtarget mit einem dazugehörigen Quaternion und der Konfiguration gebildet. Das Programm testet nun, ob dieser Punkt mit den Einstellungen erreicht werden kann. Ist dies nicht der Fall, d.h. die Konfiguration nicht eindeutig, wird das Quaternion solange rotiert, bis eine valide Konfiguration gefunden werden konnte. Dabei kann es auch vorkommen, dass keine Konfiguration gefunden werden kann, sodass der Messpunkt ebenfalls gelöscht wird. Der genaue Findungsprozess der Konfiguration

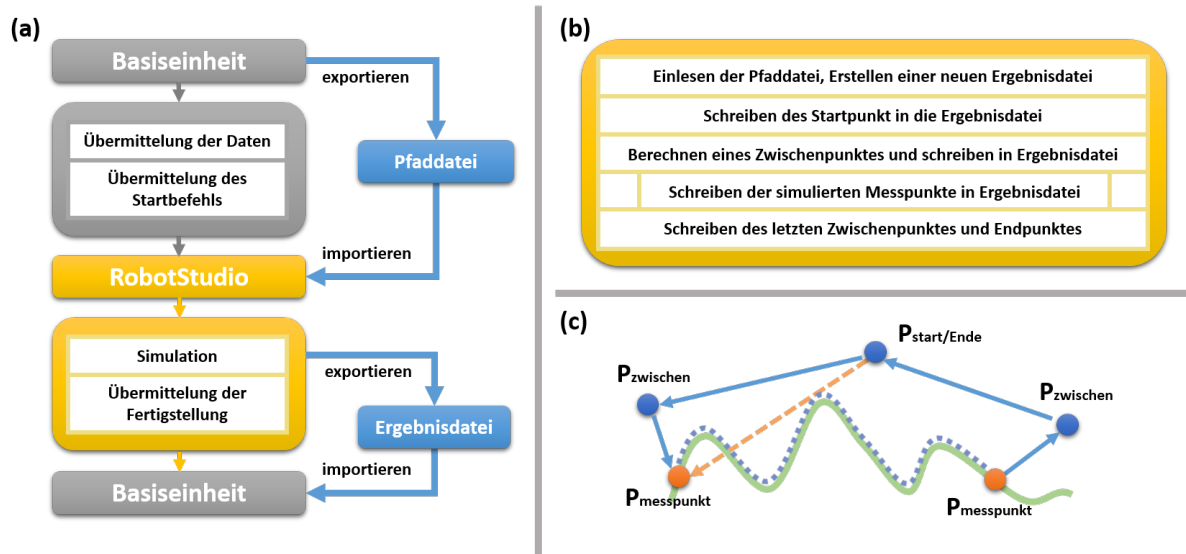


Abbildung 42: Simulation des Messpfades: (a) Kommunikation mit der Basiseinheit, (b) Ablauf der Simulation in RobotStudio, (c) Prinzip von zusätzlichen Pfadpunkten

wird im nächsten Abschnitt näher beschrieben. Geht man zunächst davon aus, dass eine passende Konfiguration gefunden werden konnte, wird anschließend die Bewegung des Roboters simuliert. Ist die Kollisionskontrolle aktiviert, wird dabei zunächst überprüft, ob es am Endpunkt zu einer Kollision zwischen Roboter und Messobjekt oder Messumgebung kommt. Ist dies der Fall wird der Messpunkt gelöscht. Kommt es zu keiner Kollision am Endpunkt, wird überprüft, ob es zu einer Kollision auf dem Fahrweg zum angegebenen Punkt kommt. Ist dies der Fall, wird versucht, einen anderen Fahrweg zu finden, der kollisionsfrei stattfinden kann. Ist dies nicht möglich, wird der Punkt ebenfalls gelöscht. Der genaue Ablauf der Kollisionskontrolle wird im übernächsten Abschnitt näher beschrieben. Bei erfolgreichem Durchlaufen der Simulationsschleife wird die entsprechende Pose und Konfiguration für den Messpunkt unter dem Schlüssel eins abgespeichert und anschließend der nächste Messpunkt geladen. Alle gelöschten Messpunkte werden unter dem Schlüssel drei abgespeichert, sodass der Anwender im Nachgang kontrollieren kann, wie viele Punkte nicht angefahren werden können.

### Berechnen der Roboterkonfiguration

Theoretisch ist es möglich, den Roboterarm auch ohne gültige Konfiguration zum angegebenen Messpunkt zu bewegen. In diesem Fall wird der Roboterarm die Konfiguration wählen, welche der aktuellen Konfiguration am ähnlichsten ist. Dies kann jedoch dazu führen, dass eine Achse des Roboters immer mehr verdreht wird, solange bis keine weitere Bewegung mehr möglich ist. Um aus dieser Position den nächsten Punkt zu erreichen, ist eine zeitintensive Rückwärtsdrehung nötig. Um das Abfahren des Messpfades daher möglichst effizient zu gestalten, ist die Vorgabe einer Konfiguration sinnvoll. Die Berechnung der Konfiguration orientiert sich dabei immer an einer vorgegebenen Startkonfiguration, in welcher die Roboterachsen möglichst wenig

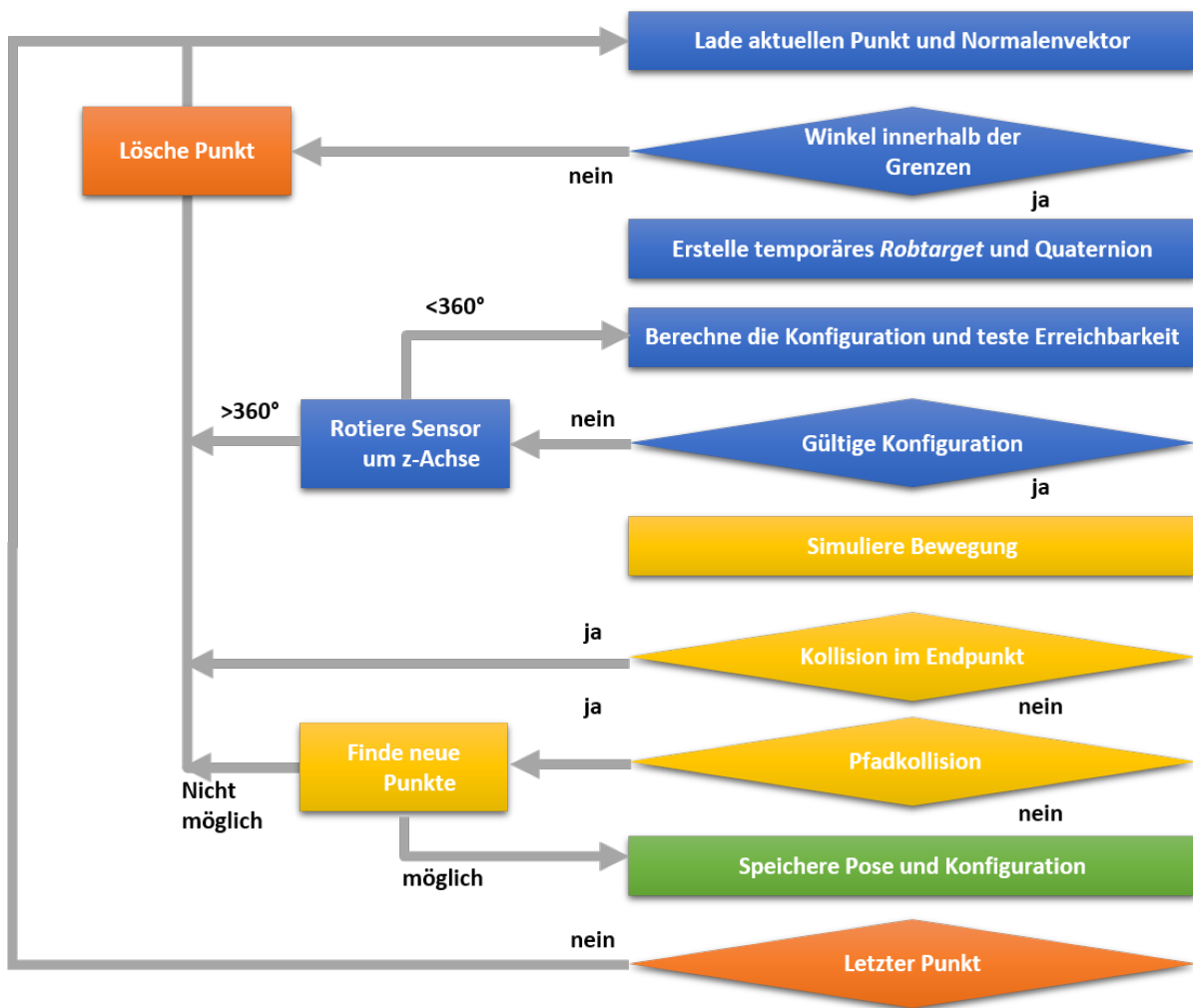


Abbildung 43: Simulationsschleife

verdreht sind, beispielsweise  $[0, 0, -1, 1]$ . In dieser Konfiguration befindet sich der THz-Sensor exakt waagrecht über dem optischen Tisch.

Um eine gültige Konfiguration zu finden, müssen alle möglichen Konfigurationen ausprobiert werden. Da die Konfiguration aus Werten von vier Achsen besteht und jeder in 8 Quadranten unterteilt wird, ergeben sich theoretisch 4096 Möglichkeiten. Um die Berechnung zeitlich effizient zu gestalten, ist ein Durchlaufen aller Konfigurationen nicht möglich. Daher wurden zunächst alle Konfigurationen von der Berechnung ausgeschlossen, die mit dem Aufbau des Systems nicht vereinbar sind. Achse 1 kann noch zwei mögliche Werte annehmen, Achse 4 vier Werte, und die Achsen 6 und 5 auch jeweils zwei Werte. Dadurch verbleiben noch 32 mögliche Konfigurationen, die in Tabelle 1 zusammengefasst sind und während der Simulation der Messpunkte ausprobiert werden.

Achse	Mögliche Werte	Entsprechende Winkel	Jointlimits
1	-1 bis 0	-90° bis 90°	-165° bis 165°
4	-2 bis 1	-180° bis 180°	-120° bis 120°
6	-1 bis 0	-90° bis 90°	-70° bis 70°
5	-1 bis 0	-90° bis 90°	-95° bis 30°

Tabelle 1: Mögliche Konfigurationen für die Roboterachsen

### Kollisionskontrolle

Soll eine Kollisionskontrolle mit dem Messobjekt durchgeführt werden, muss das Oberflächenmodell des Messobjektes manuell durch den Anwender in *RobotStudio* importiert und dem entsprechenden Kollisionssatz hinzugefügt werden. In der Simulationssoftware wurden zwei Kollisionssätze angelegt, deren gegenseitige Kollisionen überprüft werden. In einem Kollisionssatz befinden sich die vordersten Achsen des Roboterarmes und der THz-Sensor mit Streifenprojektor, in dem anderen Kollisionssatz die Messumgebung wie der optische Tisch, das Messobjekt und die Basisachsen des Roboters (vgl. Abb. 44(a),(b)).

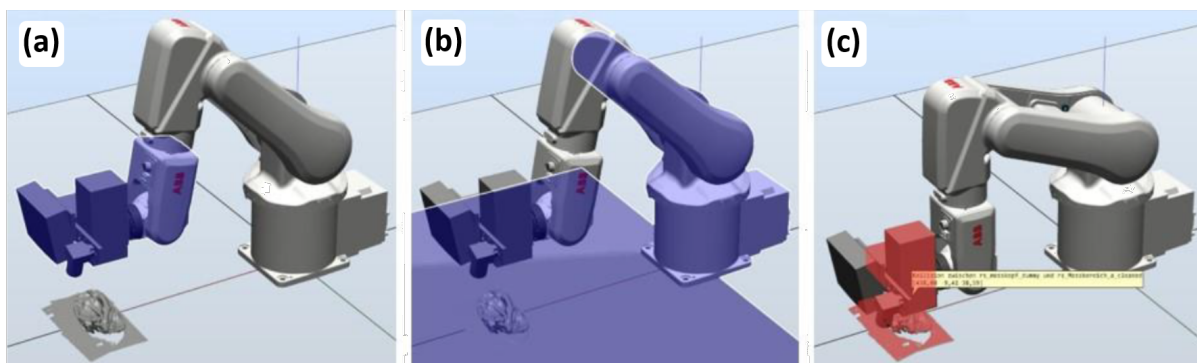


Abbildung 44: Prinzip der Kollisionskontrolle: (a) Kollisionssatz 1, (b) Kollisionssatz 2, (c) Grafisches Feedback in *RobotStudio* bei der Detektion einer Kollision.

Die Kollisionssätze sind in der Software mit einem digitalen I/O-Signal verknüpft. Solange keine Kollision zwischen den beiden Sätzen vorliegt, hat das Signal den Wert 0. Kommt es zu einer Kollision wird solange das Signal 1 ausgegeben, bis die Kollision beendet ist. Zeitgleich wird dem Anwender ein grafisches Feedback gegeben, indem die betroffenen Systemkomponenten rot markiert werden (vgl. Abb. 44(c)).

Um die Kollisionsmeldungen im Programm entsprechend weiterverarbeiten zu können, wird eine sogenannte *trap Routine* benötigt. Diese *trap Routine* kann mit einem Event, beispielsweise dem Kollisionssignal verbunden werden. Wird eine Kollision gemeldet, wird das aktuell ablaufende Programm unterbrochen und ein in der *trap Routine* definierter Prozess in Gang gesetzt. Dieser Prozess hält alle Kollisionen für die spätere Weiterverarbeitung fest, bevor die Simulationsroutine fortgesetzt wird. An den zuvor beschriebenen Stellen in der Simulations-



schleife wird diese *trap Routine* dann ausgelesen, entsprechend weiterverarbeitet und anschließend wieder auf null gesetzt.

Während der Kollisionskontrolle mit *RobotStudio* kann ein Fehler *Unhandled Exception* auftreten. Tritt dieser Fehler auf, werden Kollisionen zwar detektiert, aber die Weiterleitung über das digitale I/O-Signal ist gestört. Der simulierte Messpfad kann also aktive Messpunkte enthalten, die eigentlich hätten gelöscht werden müssen. Der Programmfehler konnte leider durch den ABB Support nicht vollständig behoben werden. Es wird vermutet, dass unzureichende Hardwarekomponenten dafür verantwortlich sind. *RobotStudio* verwendet für die Simulation der Roboterbewegung hauptsächlich die Grafikkarte. Während der Simulation konnte beobachtet werden, dass der Arbeitsspeicher der Grafikkarte zunehmend mehr belastet wird, sodass ein Speicherfehler in der Software vermutet wird. Um die Problematik zu minimieren, wurde eine Routine eingebaut, die zusätzliche Dummypunkte zwischen den Messpunkten generiert. So kann sichergestellt werden, dass großräumige Bewegungen des Roboterarmes weit entfernt von der Probe stattfinden und keine Kollisionen zu erwarten sind.

#### 4.3.6 Terahertz-Spektrometer

Das entwickelte Robotersystem kann theoretisch mit jedem fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer betrieben werden. Da die Probe jedoch punktwise vermessen wird, ist ein System mit einer schnellen Messzeit von Vorteil. Das System sollte gleichzeitig möglichst kompakt und stabil sein, um bei möglichen Feldversuchen außerhalb des Labors verwendet werden zu können. Je nach zu untersuchender Probe ist weiterhin ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis wichtig. Nur so können beispielsweise historische Menschenfunde oder andere stark streuende Proben mit komplexen Schichtsystemen untersucht werden. Wird hingegen eine wenig absorbierende und streuende Probe, wie zum Beispiel ein Kunststoffrohr, untersucht, ist ein geringeres Signal-zu-Rausch-Verhältnis ausreichend.

Aufgrund der geplanten Anwendung an historischen Menschenfunden und Kunstobjekten wurde sich für ein kompaktes, fasergekoppeltes THz-Spektrometer mit einer hohen Bandbreite und einem gutem Signal-zu-Rausch-Verhältnis entschieden. Dieses System wurde am Heinrich-Hertz-Institut (HHI) entwickelt und wird in [116] beschrieben. Trotz der Verwendung einer mechanischen Verzögerungsstrecke, die eine hohe Stabilität garantiert, bietet das System Messgeschwindigkeiten von bis zu 60 Hz. Das Signal-zu-Rauschverhältnis einer 50 ps langen THz-Zeitspur, aufgenommen in 44 ms, beträgt 60 dB. Das Signal-zu-Rauschverhältnis kann auf bis zu 90 dB bei 1000 Mittelungen gesteigert werden.

Das System arbeitet mit einem Faserlaser der Anregungswellenlänge 1550 nm. Diese in der Telekommunikation sehr verbreitete Wellenlänge hat den Vorteil, dass viele kostengünstige Komponenten wie Strahlteiler etc. zur Verfügung stehen, die auch im Terahertzspektrometer verwendet werden können. Eine Übersicht des Systems ist in Abbildung 45 dargestellt. Der Laser-

strahl wird innerhalb des Systems zunächst mittels eines 50/50-Strahlteilers in einen Emitter- und einen Detektorpfad aufgeteilt. Im Gegensatz zu üblichen THz-Zeitbereichsspektrometern verfügen beide Laserpfade über Verzögerungsstrecken. Im Emitterpfad ist eine Verzögerungsstrecke verbaut, die kurze Distanzen innerhalb kürzester Zeit scannen kann. Im Detektorpfad ist hingegen eine langsame Verzögerungsstrecke verbaut, die eine längere Distanz zurücklegen kann. Beide Verzögerungsstrecken arbeiten hochpräzise und sind fasergekoppelt, sodass der Freistrahلبereich des Laserstrahls minimal gehalten wird.

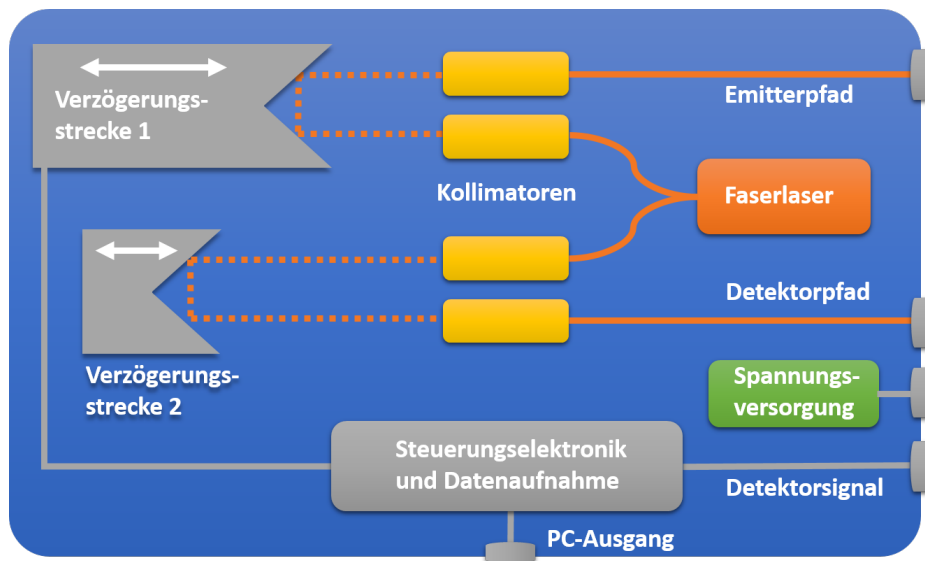


Abbildung 45: Aufbau des THz-Spektrometers des Heinrich-Hertz-Instituts. Unter Änderungen entnommen aus [116].

Die Laserstrahlung wird über Glasfasern zu Anschlussstellen im Gehäuse des Systems geleitet, an welchen fasergekoppelte THz-Antennen, wie sie in Kapitel 2.3.1 beschrieben wurden, angeschlossen werden können. Innerhalb des Gehäuses befinden sich neben dem Anregungslaser und den Verzögerungsstrecken alle anderen relevanten Komponenten wie entsprechende Ansteuerungs- und Datenaufnahmeelektronik. Auch die Spannungsversorgung für die Emitterantenne wird im Gehäuse bereitgestellt. Die gewonnenen Daten können über eine Netzwerkschnittstelle ausgelesen werden.

Für den THz-Sensor, welcher den THz-Strahlengang enthält und entsprechend am Roboterarm montiert wird, wurden zwei Varianten entwickelt und getestet. Die erste Variante leitet die THz-Strahlung über einen Siliziumstrahlteiler (vgl. Abb. 46(a)) und HDPE-Linsen auf die Probe. Die Linsen, welche zur Kollimation der THz-Strahlung bzw. zur Fokussierung auf die Antenne eingesetzt werden, haben eine Brennweite von 30 mm und sind in einem gemeinsamen Halter mit den Antennen verbaut. Diese Halter bestanden bei einer ersten Version dieses Sensors aus Metall. Es zeigte sich jedoch, dass dadurch Rauschsignale aus der Umgebung

verstärkt werden. In einer zweiten Version wurden daher Halter aus Kunststoff verwendet, die zudem durch Kunststoffschrauben elektrisch von der Sensorgrundplatte getrennt wurden. Die Linse, welche die Strahlung in diesem Sensortyp auf die Probe leitet, hat eine Brennweite von 50 mm. Die Brennweite wurde so gewählt, dass ein sicherer Arbeitsabstand zur Probe besteht bei gleichzeitig möglichst kleiner Fokuspunktgröße. Die Verwendung von Kunststofflinsen ist im Vergleich zu Parabolspiegeln deutlich robuster gegenüber kleineren Vibrationen. Auch hinsichtlich eines möglichen Transportes sind Kunststofflinsen voraussichtlich weniger anfällig gegenüber Dejustierungen. Der allgemeine Vorteil einer Strahlteilergeometrie besteht in der kleineren Fokuspunktgröße des Sensors, da die Strahlen senkrecht auf die quasioptischen Bauteile einfallen. Die über alle Frequenzen gemittelte volle Halbwertsbreite des Fokuspunktes wurde für den entwickelten Sensor mittels einer Rasierklingenmessung auf 1,06 mm bestimmt. Das Verfahren wird in Kapitel 4.5.2 näher erläutert.

Bei der zweiten Variante, die am Heinrich-Hertz-Institut entwickelt wurde, sind die Antennengehäuse parallel zueinander angeordnet und die Strahlung wird über Parabolspiegel unter einem kleinen Winkel von ca.  $6^\circ$  auf die Probe geleitet (vgl. Abb. 46(b)). Die Parabolspiegel, die die Strahlung auf die Probe fokussieren bzw. wieder kollimieren, haben eine Brennweite von 120 mm. Damit besteht ein größerer Arbeitsabstand als bei der ersten Variante. Aufgrund dessen und aufgrund der größeren Kompaktheit dieses Sensors, können komplexere Strukturen vermessen werden, da es zu weniger Kollisionen mit der Probe kommt. Die Abweichung des Strahlverlaufs von einem senkrechten Einfall kann zudem ebenfalls vernachlässigt werden. Des Weiteren werden in diesem Fall 100% der emittierten THz-Strahlung auf die Probe geleitet, was zu einer Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses führt. Aufgrund des nicht exakt senkrechten Einfalls der Strahlung auf die Probe und der damit einhergehenden Verwendung von Randstrahlen bei den Abbildungsoptiken, entsteht bei dieser Art Sensor ein größerer Fokuspunkt, dessen volle Halbwertsbreite mit 1,59 mm über der der ersten Variante des Sensors liegt.

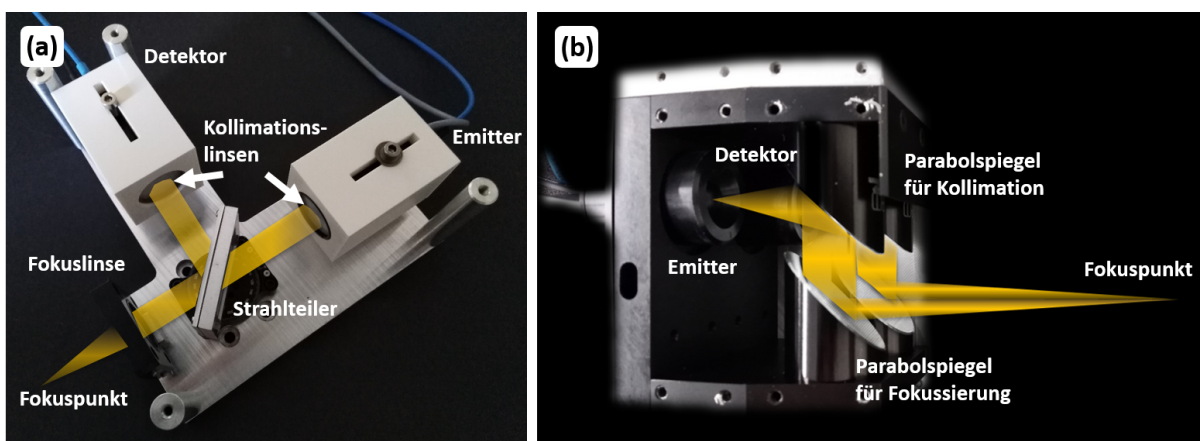


Abbildung 46: (a) Erste Variante des THz-Sensors mit einem Siliziumstrahlteiler und Kunststofflinsen, (b) Zweite Variante des THz-Sensors mit parallelen Antennen und Parabolspiegeln

Je nach Anwendungsfall muss abgewogen werden, welche der beiden Sensorvarianten in Frage kommt. Beide THz-Sensoren verwenden einen InGaAs/InAlAs-basierten THz-Emitter, der eine hohe Ladungsträgermobilität aufweist und mit 120 V Gleichspannung betrieben wird [117, 118]. Als Antennengeometrie wurde eine Streifenleitung mit 100  $\mu\text{m}$ -Lücke gewählt. Der THz-Detektor basiert auf einer Beryllium-dotierten InAlAs/InGaAs-Schichtstruktur, die sich durch eine kurze Ladungsträgerlebensdauer auszeichnet [119, 120]. Hier kommt eine Dipolgeometrie mit einer Lücke von 10  $\mu\text{m}$  zum Einsatz. Beide Antennen haben außerdem eine Mesastrukturierung im Bereich der Lücke [70].

Für das Auslesen der Daten steht eine Python-basierte Software zur Verfügung, die in der AG Koch der Philipps-Universität Marburg entwickelt wurde. Die Software, die als *Taipan* bezeichnet wird, liest die Messdaten aus dem System aus, stellt diese grafisch dar und speichert jede Messung in einer Textdatei ab. In dieser Software werden alle für die Messung relevanten Einstellungen wie Messbereich oder Anzahl der Mittelungen getroffen. Des Weiteren wird in dieser Software der Roboterarm als einfacher Manipulator verknüpft. Vor Beginn einer Messung wird die Ergebnisdatei der Simulation manuell durch den Anwender geladen. Der weitere Messablauf der Roboter-basierten THz-Messung ist in Abbildung 47 dargestellt. *Taipan* liest die Punkte nacheinander aus und sendet entsprechende Befehle an die Robotersteuerung, um die Punkte anzufahren. Nachdem ein Feedback zurückgesendet wurde, dass der Punkt erreicht wurde, wird eine Messung gestartet, sofern die Abweichung zwischen Soll- und Ist-Position einen gewissen Schwellenwert unterschreitet. Weicht die Positionierung des Roboterarmes um mehr als 20  $\mu\text{m}$  von der vorgegeben Position ab, wird ein neuer Positionierungsversuch gestartet, solange bis die Abweichung unter dem genannten Schwellenwert liegt. Ist die Messung an einem Punkt abgeschlossen, wird ein neuer Befehl zum Anfahren des nächsten Messpunktes gesendet bis alle Messpunkte abgefahren wurden.

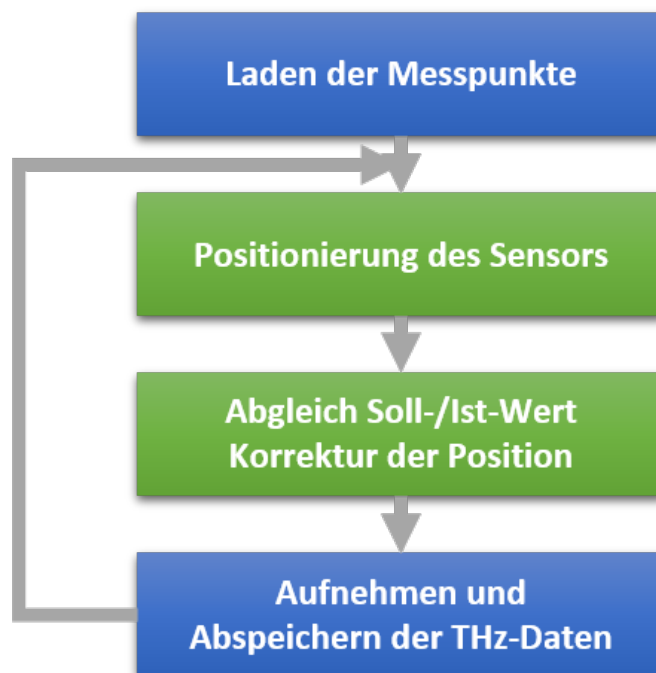


Abbildung 47: Messablauf des Roboter-basierten THz-Scans

#### 4.4 Integration zu einem Gesamtsystem

Nachdem im vorigen Kapitel alle Systemkomponenten einzeln vorgestellt wurden, soll nun zusammengefasst werden, wie diese Einheiten in einem Gesamtsystem integriert werden. Dabei werden die einzelnen Schritte zum Aufbau des Systems in einer chronologischen Reihenfolge aufgeführt. Ein Teil der Schritte dient lediglich einer ersten Kalibrierung des Systems. Diese sind in der späteren Roboter-basierten THz-Messung nicht mehr notwendig. Der Ablauf zum Aufbau des Systems ist in Abbildung 48 dargestellt. Insbesondere das Zusammenspiel von Roboterarm und optischen Scanner muss referenziert werden, sodass die unterschiedlichen Koordinatensysteme ineinander überführt werden können.

##### 4.4.1 Referenzieren des Roboters mit der Umgebung

Grundsätzlich können alle Positionen im Welt- bzw. im Basekoordinatensystem des Roboters ausgedrückt werden. Um Positionen jedoch exakt einmessen zu können, bietet es sich an, ein spezielles Referenzierungswerkzeug zu verwenden. Dieses Werkzeug besteht aus einer sehr scharfen Spitze mit einer definierten Länge und wird zentral am Roboterflansch montiert (vgl. Abb. 49(a)). Seine Länge wird als Werkzeugposition eingegeben und anschließend können verschiedene wichtige Positionen im Messbereich angefahren werden. Sollte der einzumessende Punkt nicht deutlich erkennbar sein, wie es beispielsweise bei dem optischen Tisch, auf welchem das System platziert ist, der Fall ist, so kann ein weiteres Gegenstück zum Einsatz

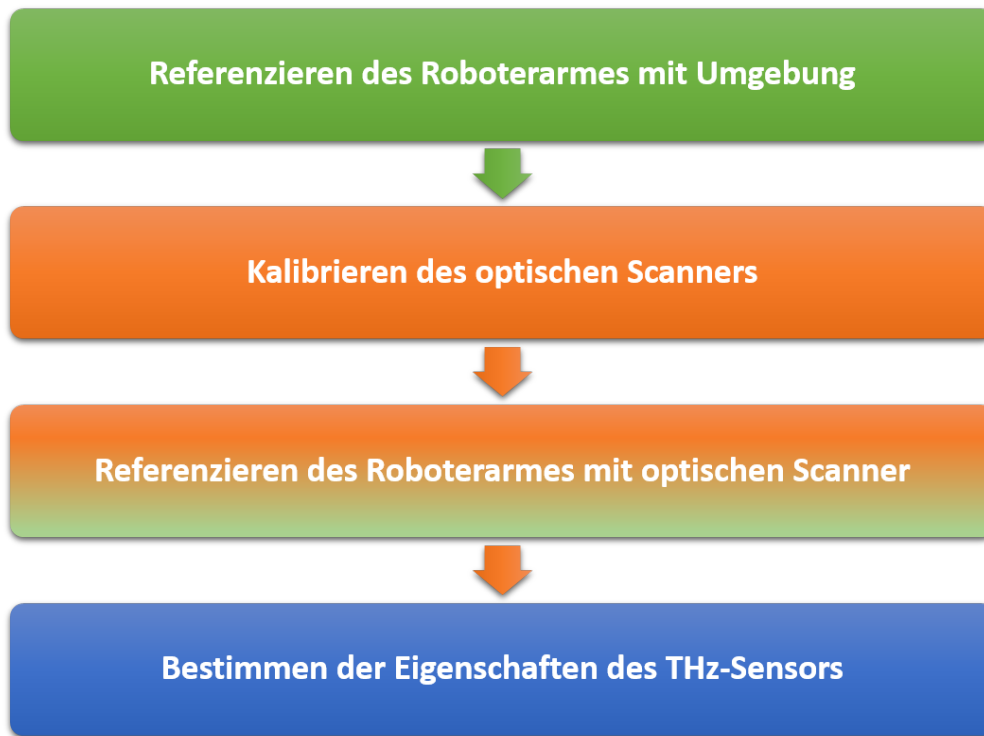


Abbildung 48: Ablauf zur Integration der Einheiten zu einem Gesamtsystem

kommen. Dieses Gegenstück besteht ebenfalls aus einer sehr scharfen Spitze und verfügt am anderen Ende über ein Gewinde, sodass es an beliebigen Stellen mit dem optischen Tisch verschraubt werden kann (vgl. Abb. 49(b)). Wie in Abbildung 49 (c) und (d) dargestellt können auf diese Weise verschiedene Löcher des optischen Tisches, die beispielsweise den Messbereich markieren, genau eingemessen werden.

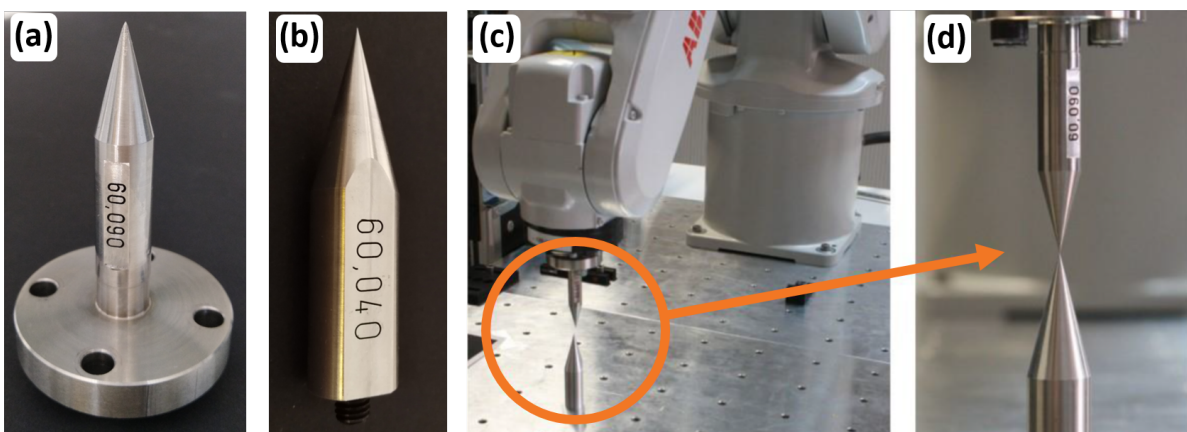


Abbildung 49: (a) Referenzierungswerkzeug für den Roboter. (b) Gegenstück zum Referenzierungswerkzeug (c), (d) Einmessen eines Punktes mit dem Referenzierungswerkzeug und seinem Gegenstück

Das Referenzierungswerkzeug wird auch dazu verwendet, die Referenzposition für den optischen 3D-Scanner einzumessen. Als Referenz für den 3D-Scanner wird ein spezielles Muster verwendet, welches sich am Rand des Messtisches befindet. Dieses Muster kann auch gleichzeitig zur Bestimmung der Werkzeugeinstellungen des 3D-Scanners genutzt werden. Es ist in Abbildung 50(a) dargestellt und besteht aus drei verschiedenen großen Punkten sowie zwei Pfeilen auf schwarzem Hintergrund.

Um nun die exakte Position und Orientierung dieses Muster im Roboterkoordinatensystem zu bestimmen, wird das Referenzierungswerkzeug in der Mitte und an den jeweiligen Enden der Pfeile positioniert (vgl. Abb. 50(b)). Durch das Auslesen der Roboterkoordinaten an jeder Position kann die Orientierung des Musters berechnet werden. Zweckmäßigerweise wird die Position und Orientierung des Musters als Werkobjekt in der Basiseinheit gespeichert, sodass das Einmessen lediglich einmalig durchgeführt werden muss. Sollte das Referenzmuster oder der Roboterarm allerdings verschoben werden, ist ein erneutes Einmessen erforderlich.

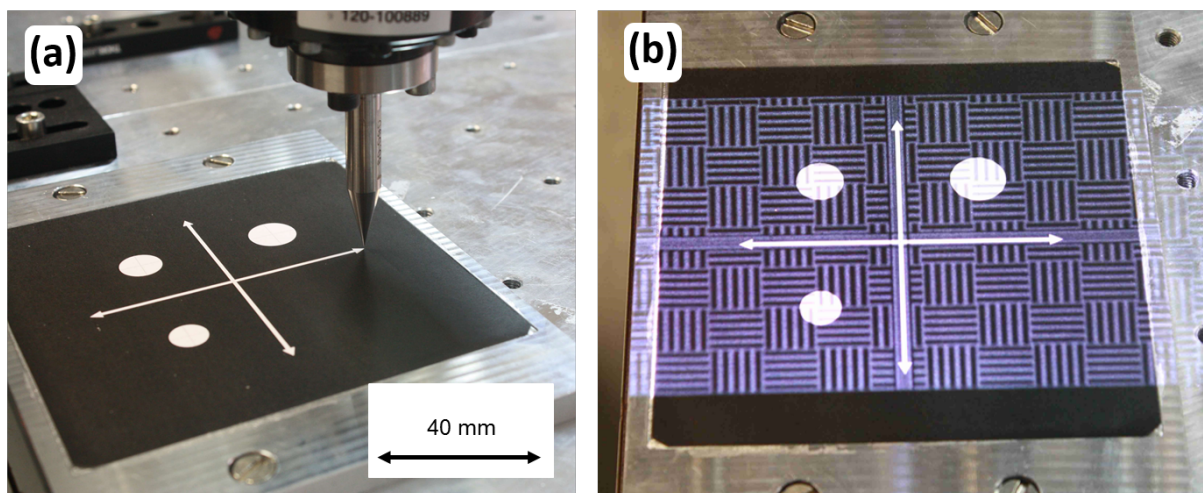


Abbildung 50: (a) Einmessen des Referenzmuster im Roboterkoordinatensystem (b) Bestimmen der Werkzeugeinstellungen für den optischen Scanner.

Das 3D-Scanner kann nun mit Hilfe des Roboterarmes zentral über dem Referenzmuster positioniert werden. Um die Werkzeugeigenschaften des Scanners zu bestimmen, muss dieser so ausgerichtet sein, dass das Zentrum des projizierten Streifenmusters exakt mit dem Zentrum des Referenzmusters übereinstimmt. Außerdem muss die optische Achse des Projektors der z-Achse des Roboterkoordinatensystems entsprechen. Dies kann überprüft werden, indem der Roboterarm den 3D-Scanner in der Höhe verfährt. Verschiebt sich die Position des Streifenmusters gegenüber der des Referenzmusters nicht, ist die Werkzeugorientierung korrekt. Kommt es zu einer Verschiebung, muss die Orientierung des 3D-Scanners angepasst werden. Durch die Veränderung der Orientierung kommt es zusätzlich zu einer Verschiebung der zentralen Position, die daraufhin ebenfalls nachjustiert werden muss. Das Finden der korrekten

Werkzeugeinstellungen für den 3D-Scanner ist daher ein iterativer Prozess. In diesem Prozess kann gleichzeitig der Fokuspunkt des Projektors ermittelt werden, sodass künftige Messobjekte exakt im Fokus des Systems vermessen werden können.

##### 4.4.2 Kalibration des optischen 3D-Scanners

Zur Kalibration des optischen 3D-Scanners wird die in Kapitel 4.3.3 beschriebene Platte verwendet. Um die Kalibration des Systems möglichst effizient zu gestalten, existiert auf dem Messtisch eine feste Position für diese Kalibrationsplatte. Nachdem die Scanposition für diese Platte einmalig als Werkobjekt festgelegt wurde, kann diese immer wieder angefahren werden, solange die Scangröße nicht verändert werden soll. Während einer THz-Messung wird die Platte vom Messtisch entfernt. Aufgrund entsprechender Halter, wird die Position auf dem Tisch jedoch markiert, sodass die Platte bei Bedarf wieder eingesetzt werden kann.

Der weitere Kalibrationsprozess wird durch den Anwender in der dazugehörigen David-Software gestartet und läuft anschließend automatisiert ab. Die Kalibrationsdatei, die die Triangulationsbasis für alle weiteren Messungen enthält, wird daher automatisch in einem Systemordner abgespeichert. Die vorherige Datei wird dabei überschrieben. Wird an den Einstellungen oder der Position des 3D-Scanner keine Änderung mehr vorgenommen, muss die Kalibration des Systems bei weiteren Messungen nicht erneut durchgeführt werden.

##### 4.4.3 Referenzieren des Roboterarmes mit dem optischen 3D-Scanner

In einem letzten Schritt müssen die Koordinatensysteme des Roboterarmes und des 3D-Scanners miteinander verknüpft werden. Dazu wird der optische 3D-Scanner wieder über dem Referenzmuster platziert. Der 3D-Scanner scannt nun das Referenzmuster ein. Für die Berechnung der Transformationsmatrix zwischen den beiden Koordinatensystemen sind lediglich die unterschiedlichen ausgedehnten weißen Punkte relevant. Die Pfeile werden daher mit Hilfe der David Software aus dem optischen 3D-Scan entfernt.

Die Position und Orientierung des Punktmusters können durch ein Koordinatensystem des optischen 3D-Scanners beschrieben werden. Die x-Richtung wird durch den Vektor beschrieben, der zwischen P2 (mittelgroßer Punkt, 12 mm) und P1 (kleiner Punkt, 10 mm) aufgespannt wird. Die y-Richtung wird entsprechend durch den Vektor zwischen P2 und P3 (größter Punkt, 14 mm) beschrieben (vgl. Abb. 51).

Die Position, Orientierung und die Maße dieses Referenzmusters sind auch im Roboterkoordinatensystem bekannt. Da der Scanner zentral über dem Referenzmuster platziert ist, können die entsprechenden Werkzeugorientierungen übernommen werden. Für das Referenzmuster im Roboterkoordinatensystem gilt daher



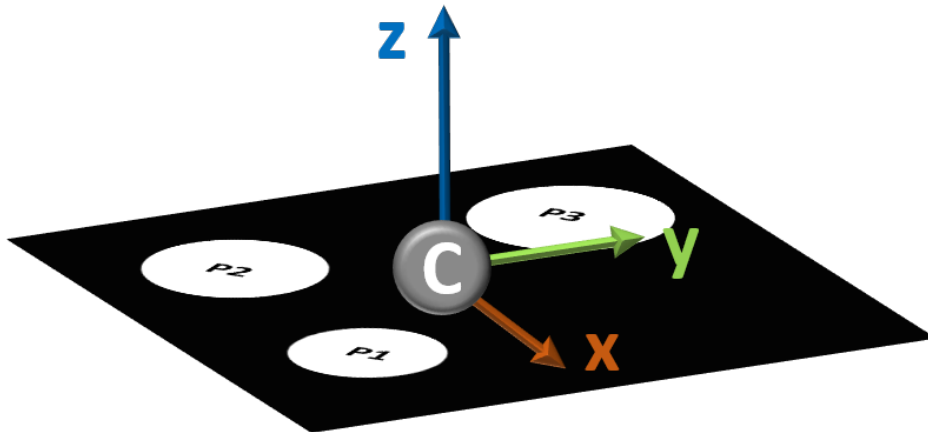


Abbildung 51: Koordinatensystem des Referenzmusters

$$C_{Roboter} = [0, 0, 0] \quad (4.10)$$

$$x_{Roboter} = [1, 0, 0]$$

$$y_{Roboter} = [0, 1, 0]$$

$$z_{Roboter} = [0, 0, 1]$$

Das Koordinatensystem des 3D-Scanners orientiert sich an der Kalibrationsposition. Hierfür kann folgende allgemeine Relation festgehalten werden

$$C_{3DScanner} = [c_1, c_2, c_3] \quad (4.11)$$

$$x_{3DScanner} = [x_1, x_2, x_3]$$

$$y_{3DScanner} = [y_1, y_2, y_3]$$

$$z_{3DScanner} = [z_1, z_2, z_3]$$

Um das Koordinatensystem des 3D-Scanner in das des Roboters zu überführen, muss sowohl eine Translation als auch eine Rotation durchgeführt werden. Für die Translation  $T$  können die Ursprünge der Koordinatensystem verwendet werden, sodass gilt

$$T = C_{Roboter} - C_{3DScanner} \quad (4.12)$$

Die Rotation kann durch eine entsprechende Matrix  $R$  beschrieben werden, für die folgende Relation gilt

$$M_{3DScanner} \cdot R = M_{Roboter} \quad (4.13)$$

$$\text{mit } M_{3DScanner} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\text{und } M_{Roboter} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Die so gefundenen Matrizen T und R können auf jedes nachfolgend gescannte Messobjekt angewendet werden. Der Referenzierungsprozess zwischen 3D-Scanner und Roboterarm ist daher nur einmalig notwendig. Abbildung 52 zeigt das Ergebnis der Transformation.

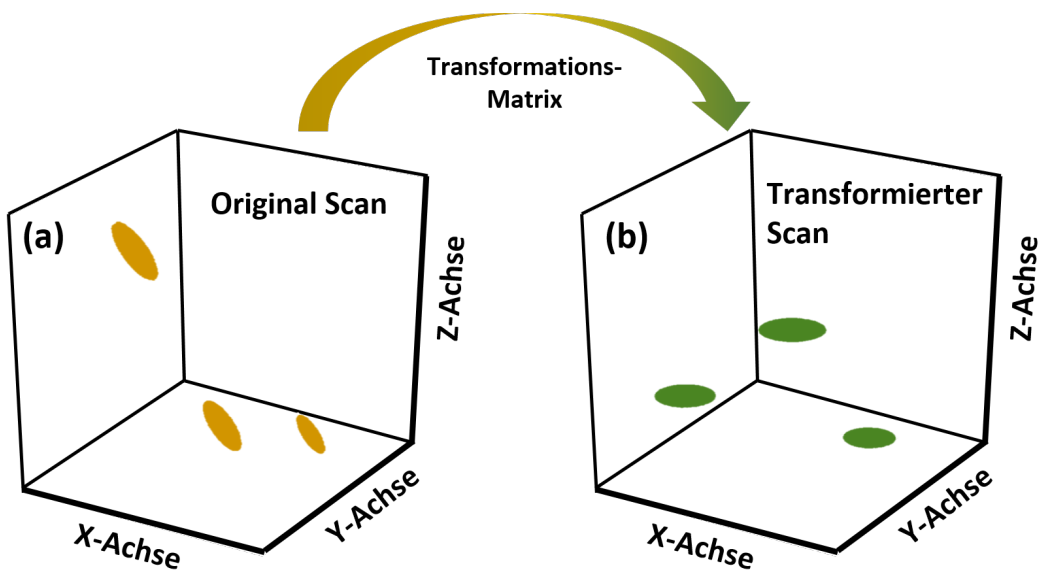


Abbildung 52: Transformation zwischen Koordinatensystemen des 3D-Scanners und dem Roboter

#### 4.4.4 Bestimmen der Werkzeugeinstellungen des THz-Sensors

Bevor mit der Vermessung eines Objektes begonnen werden kann, müssen analog zu den Werkzeugeinstellungen des 3D-Scanners, auch die des THz-Sensors gefunden werden. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Probe unter senkrechtem Einfall und im richtigen Abstand vermessen wird.

Um die z-Komponenten des THz-Sensors zu bestimmen, kann ein einfacher Linienscan in z-Richtung erfolgen. Dazu wird der THz-Sensor mit Hilfe des Roboterarmes in der Höhe verschoben. An einer Metallplatte wird das THz-Signal jeweils reflektiert. Trägt man die Peak-to-Peak-Amplitude des THz-Signals gegen die z-Position auf, so ergibt sich bei einer bestimmten Position ein Maximum (vgl. Abb. 53). Bei diesem Wert befindet sich die Metallplatte exakt im Fokuspunkt des THz-Sensors. Wurde die z-Komponenten in den Werkzeugeinstellungen des THz-Sensors bereits anhand der Brennweite der Fokusoptik korrekt abgeschätzt, so befindet sich dieses Maximum bei  $z = 0$ . Ist das Maximum zu negativen oder positiven z-Werten verschoben, muss die Einstellung entsprechend korrigiert werden. Diese Routine ist sinnvoll, da das alleinige Abschätzen der Brennweite zu große Unsicherheiten aufweist. Je nach Justage des Strahls, kann es vorkommen, dass die Fokusoptik nicht von einem exakt kollimierten Strahl getroffen wird. Dadurch kommt es beispielsweise zu geringen Abweichungen in der Brennweite.

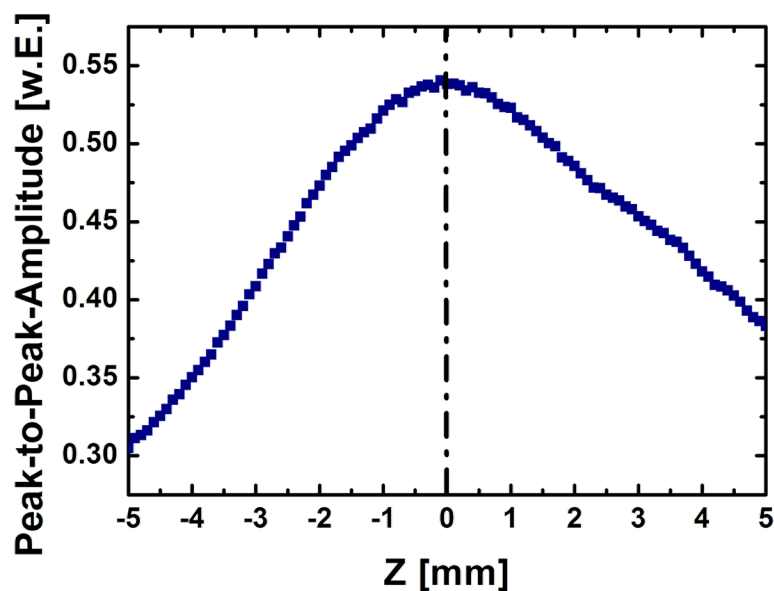


Abbildung 53: Bestimmung der z-Komponente des THz-Sensors durch einen Linienscan in z-Richtung

Um die x- und y-Komponenten des THz-Sensors festzustellen, wird ein ähnliches Verfahren verwendet. Hierzu wird ein Linienscan in x- bzw. y-Richtung über einen Metallstreifen ausgeführt. Für die THz-Messungen wird das Zeitfenster so gewählt, dass lediglich Reflexionen an diesem Metallstreifen detektiert werden und nicht solche, welche von dem optischen Tisch stammen. Die Auswertung der Daten ist analog zum vorigen Vorgehen. Durch die Auftragung der Peak-to-Peak-Amplitude gegenüber der x- bzw. y-Richtung, erkennt der Anwender, ob das Zentrum der Werkzeugeinstellung mit dem Zentrum des Messbereichs übereinstimmt oder ob noch ein Versatz vorliegt, der korrigiert werden muss (vgl. Abb. 54).

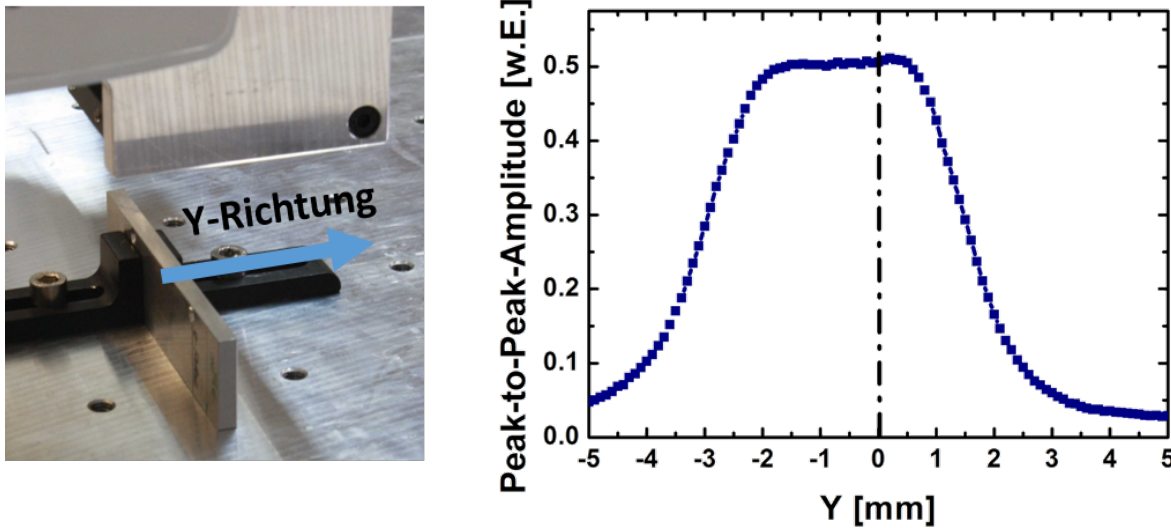


Abbildung 54: Bestimmung der x- und y-Komponente des THz-Sensors durch einen Linienscan in x bzw. y-Richtung

Neben den Koordinaten muss auch die Orientierung des THz-Sensors bestimmt bzw. überprüft werden. Dies geschieht durch die Einführung zwei zusätzlicher Messroutinen, in denen der THz-Sensor in verschiedenen Winkeln um die x- und y-Achse rotiert wird. Da die Orientierung des Sensors ebenfalls Einfluss auf die Zentrumskordinaten des Sensors hat, müssen die Justageprozesse iterativ erfolgen. Wurde die Orientierung des Sensors angepasst, muss eine erneute Überprüfung der Koordinaten erfolgen; wurden die Koordinaten angepasst, muss die Orientierung erneut überprüft werden. Die Prozesse erfolgen so lange iterativ, bis die optimalen Einstellungen für den THz-Sensor gefunden wurden. Sind die optimalen Einstellungen für den THz-Sensor gefunden, können diese für alle weiteren Messungen verwendet werden. Erst Veränderungen oder ein Austauschen des Sensors erfordern eine erneute Einmessung.

Nachdem alle Systemeinheiten miteinander kombiniert und alle erforderlichen Einstellungen gesetzt wurden, kann die Roboter-basierte THz-Messung nach dem Ablauf, der in Abbildung 28 dargestellt ist, erfolgen. Abbildung 55 zeigt eine Übersicht über das Gesamtsystem mit allen relevanten Einheiten.

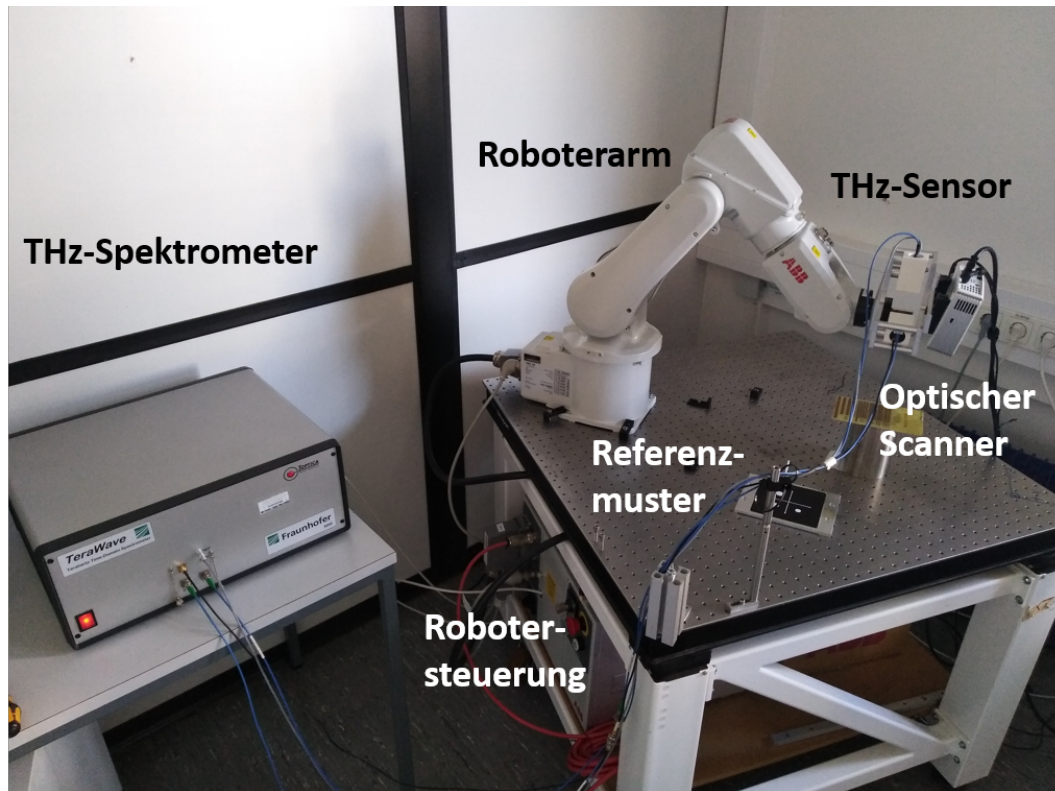


Abbildung 55: Gesamtübersicht über das Roboter-basierte THz-System

## 4.5 Charakterisierung des Systems

Die genauen Eigenschaften und Grenzen eines Systems zu kennen, ist für potentielle Anwendungen von höchster Wichtigkeit. Je nach Anwendungsgebiet sind neben der Messgeschwindigkeit, die primär von der Datenaufnahmegeschwindigkeit des THz-Zeitbereichsspektrometers abhängt, vor allem das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und die Auflösung wichtige Parameter. Insbesondere bei der Untersuchung von historischen Menschenfunden und Kunstobjekten spielt weniger die Messgeschwindigkeit eine Rolle als die kleinstmöglichen Strukturen, die aufgelöst werden können. In den folgenden Abschnitten liegt daher der Schwerpunkt auf der Untersuchung der Auflösung und den Grenzen des Systems. Hierbei spielt auch die Geometrie der Schichtstrukturen eine wichtige Rolle. Sind beispielsweise zwei untereinanderliegende Schichten nicht exakt parallel in ihren Grenzflächen, wird die Strahlung an einer der Grenzflächen unter einem anderen Winkel zurückreflektiert und damit unter Umständen nicht mehr detektiert. Die Frage, die geklärt werden soll, ist, unter welcher Winkelabweichung zweier Grenzschichten eine Detektion des THz-Signals noch möglich ist.

### 4.5.1 Signal-zu-Rausch-Verhältnis

Das Signal- zu- Rauschverhältnis bestimmt maßgeblich, wie tief Strukturen innerhalb einer Probe noch aufgelöst werden können. In Abbildung 56 (a) und (b) ist daher ein Vergleich der

Zeitbereichs- und fouriertransformierten Signale der beiden verwendeten Sensoren gezeigt. Wie erwartet ergibt sich bei dem parallelen Sensor eine deutlich höhere Peak-to-Peak-Amplitude, da keine Verluste am Strahlteiler entstehen. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist ebenfalls deutlich erhöht und liegt etwa 20 dB über dem des Strahlteilersensors. Die Bandbreite beider Sensoren ist bei 100 Mittelungen in etwa ähnlich und liegt bei ca. 3 THz. In Abbildung 56 (c) und (d) ist zusätzlich ein Vergleich bei keiner und 100 Mittelungen für die jeweiligen Sensoren dargestellt. Es zeigt sich, dass die Bandbreite bei dem parallelen Sensor bereits bei keiner Mittelung 2,5 THz beträgt, wohingegen bei dem Strahlteilersensor bei keiner Mittelung lediglich 2 THz erreicht werden können. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist bei dem Strahlteilersensor bei keiner Mittelung ebenfalls deutlich geringer als bei 100 Mittelungen. Bei dem parallelen Sensor ist ebenfalls ein Unterschied erkennbar, allerdings weniger ausgeprägt. Hinsichtlich des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses ist daher der parallele Sensor zu bevorzugen.

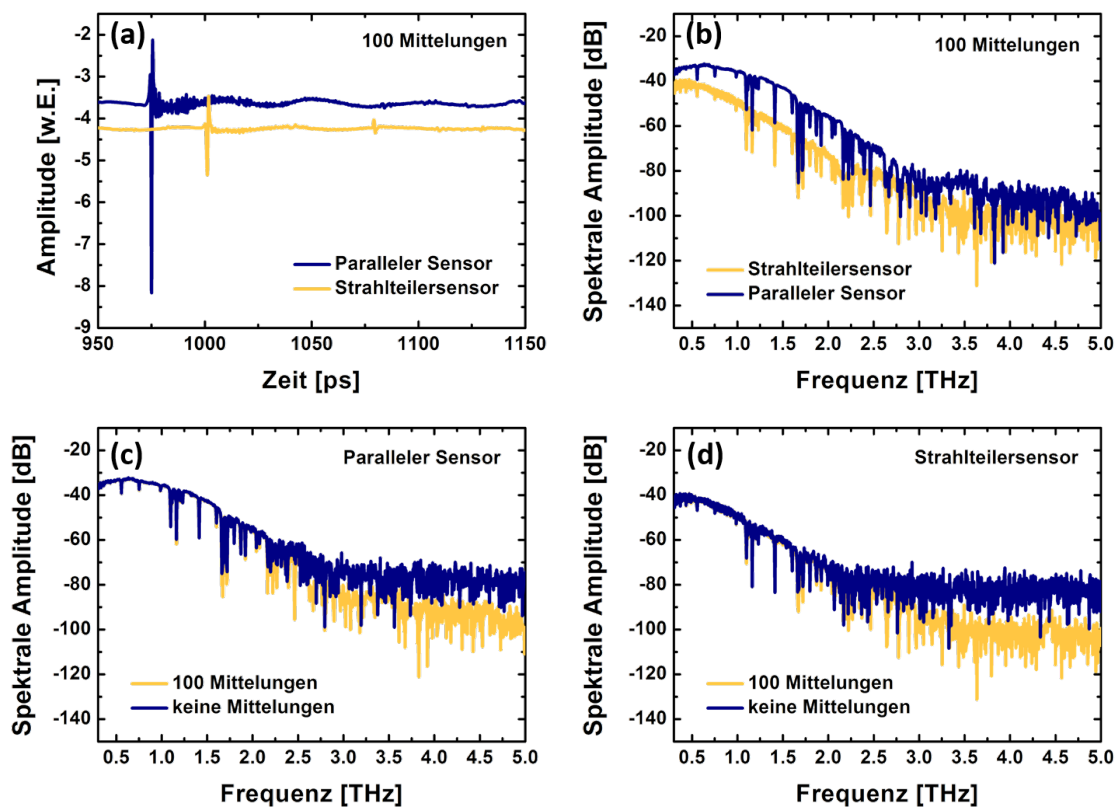


Abbildung 56: (a) Zeitbereichssignale der beiden Sensoren und (b) fouriertransformiertes Signal für jeweils 100 Mittelungen; (c) und (d) Vergleich der fouriertransformierten Signale bei keiner und 100 Mittelungen für jeweils beide Sensoren.

## 4.5.2 Auflösung

Eine erste grobe Abschätzung der Auflösung erfolgte in Kapitel 4.3.6 anhand der Größe des Fokuspunktes der THz-Sensoren, welche mittels Rasierklingenmessungen bestimmt wurden. Bei einer Rasierklingenmessung in Reflexionsgeometrie wird die Metallplatte, an der die Strahlung reflektiert wird, stückweise aus dem Strahlengang entfernt, sodass die Amplitude der reflektierten THz-Strahlung schrittweise abnimmt [121]. Man erhält dadurch einen über die Position der Rasierklinge integrierten Intensitätsverlauf der THz-Strahlung. Bildet man die Ableitung der so gewonnen Daten, ergibt sich ein Intensitätsprofil, welches durch eine Gaußkurve genähert werden kann. In Abbildung 57 sind Ergebnisse einer solchen Messung für den THz-Sensor mit Strahlteiler dargestellt, in Abbildung 58 die entsprechenden Ergebnisse für den THz-Sensor mit Parabolspiegeln und paralleler Antennenanordnung.

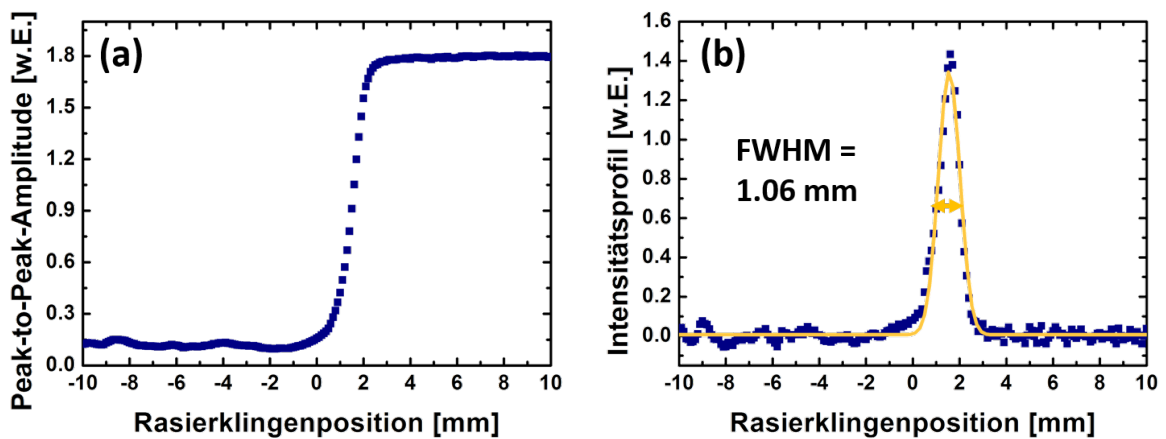


Abbildung 57: (a) Integriertes Intensitätsprofil und (b) Intensitätsprofil des THz-Sensors mit Strahlteiler

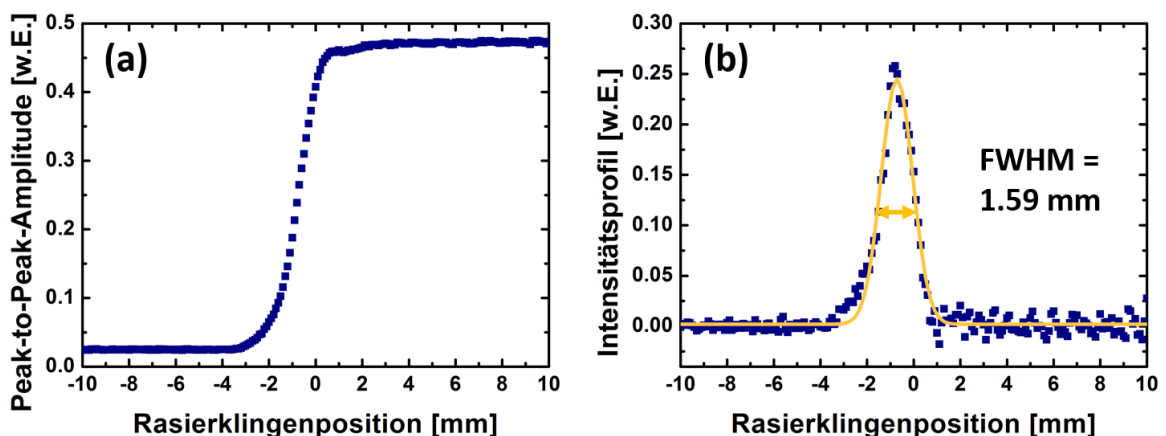


Abbildung 58: (a) Integriertes Intensitätsprofil und (b) Intensitätsprofil des THz-Sensors mit Parabolspiegeln und paralleler Anordnung der Antennen

Durch das Auftragen der Peak-to-Peak-Amplitude erfolgt eine Mittelung über alle im Signal enthaltenen Frequenzen. Es besteht allerdings auch die Möglichkeit nur bestimmte Frequenzbereiche zu betrachten. Dies ist bei einer anderen Art der Auflösungscharakterisierung des Systems erfolgt. Dazu wurde ein Testbild, welches aus verschiedenen großen Metallstreifen in unterschiedlichen Abständen auf einer Kunststoffplatte bestand (vgl. Abb. 59 links), bildgebend vermessen. Bei der Mittelung über alle Frequenzen können im Falle des Strahlteilersensors noch Streifen mit einer Breite von 0,625 mm noch aufgelöst werden (vgl. Abb. 59 Mitte), im Falle des parallelen Sensors Streifen mit einer Breite von 1,25 mm (vgl. Abb. 59 rechts).

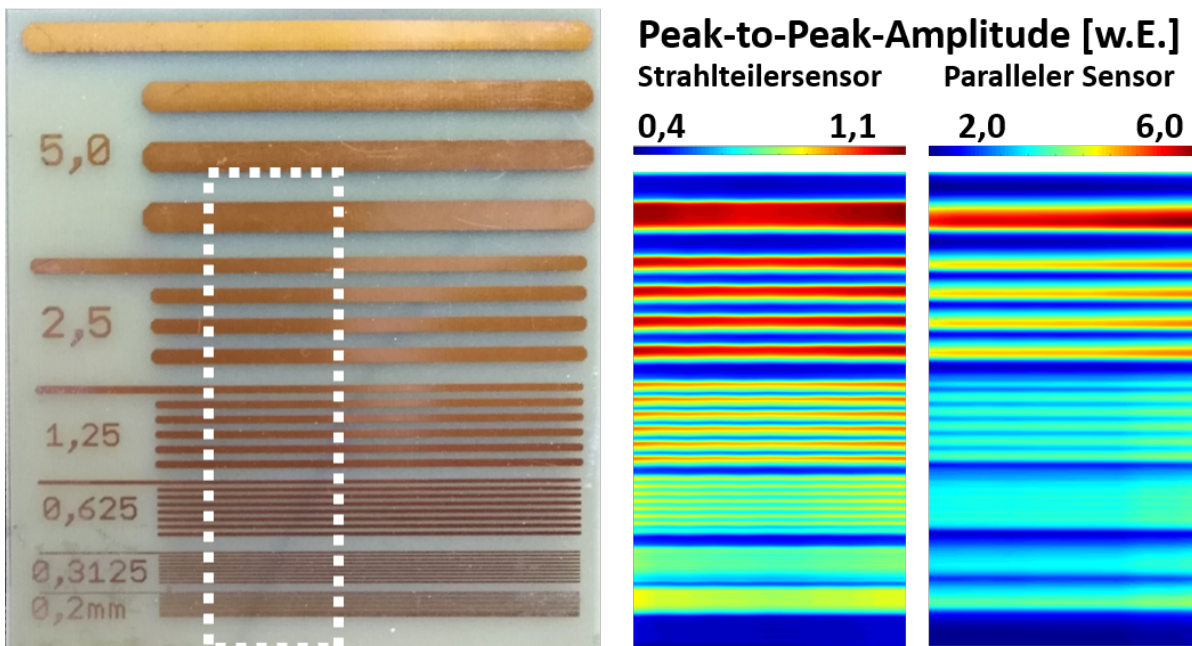


Abbildung 59: Links: Foto des vermessenen Testbildes mit markiertem Messbereich, Mitte: THz-Bild des Strahlteilersensors, Rechts: THz-Bild des parallelen Sensors.

Für die Betrachtung der Auflösung bei unterschiedlichen Frequenzen wurden drei Bereiche festgelegt. Der erste Bereich erstreckt sich von 300 GHz bis 800 GHz, der zweite Bereich von 800 GHz bis 1,4 THz, der dritte Bereich von 1,4 THz bis 2 THz. Die Ergebnisse der frequenzabhängigen Auswertung sind in Tabelle 2 und den Abbildungen 60 und 61 zusammengefasst.

Frequenzbereich	Wellenlänge [mm]	Strahlteilersensor [mm]	Paralleler Sensor [mm]
300 GHz bis 800 GHz	1 - 0,4	1,25 - 0,625	2,5 - 1,25
800 GHz bis 1,4 THz	0,4 - 0,2	0,625	1,25
1,4 THz bis 2 THz	0,2 - 0,15	0,2	0,625

Tabelle 2: Frequenzabhängige Auflösung der beiden verwendeten THz-Sensoren



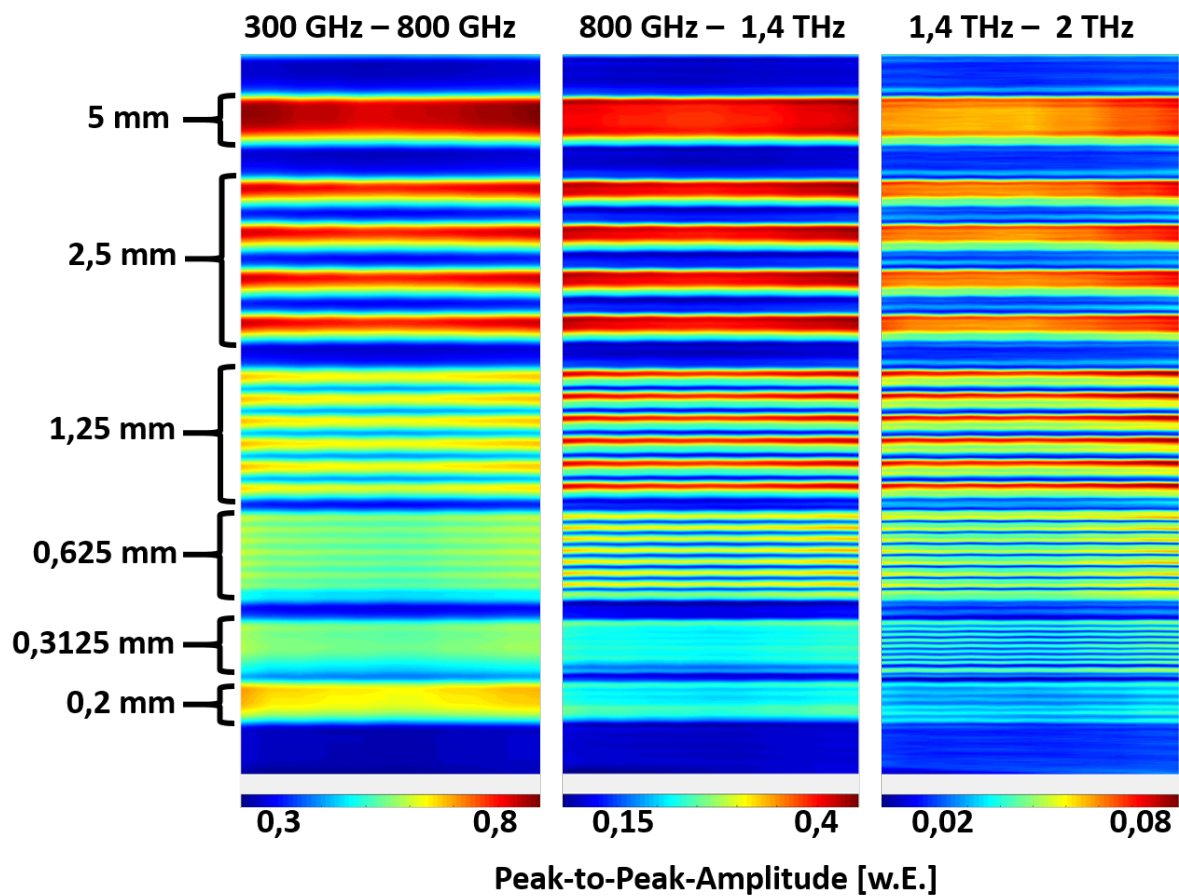


Abbildung 60: Frequenzabhängige Auswertung der Auflösung des Strahlteilersensors.

Der THz-Sensor mit der parallelen Antennenanordnung und den Parabolspiegeln zeigt insgesamt eine minimal schlechtere Auflösung als der Sensor mit Strahlteiler bei einem gleichzeitig deutlich höherem Signal-zu-Rausch-Verhältnis auch bei höheren Frequenzen.

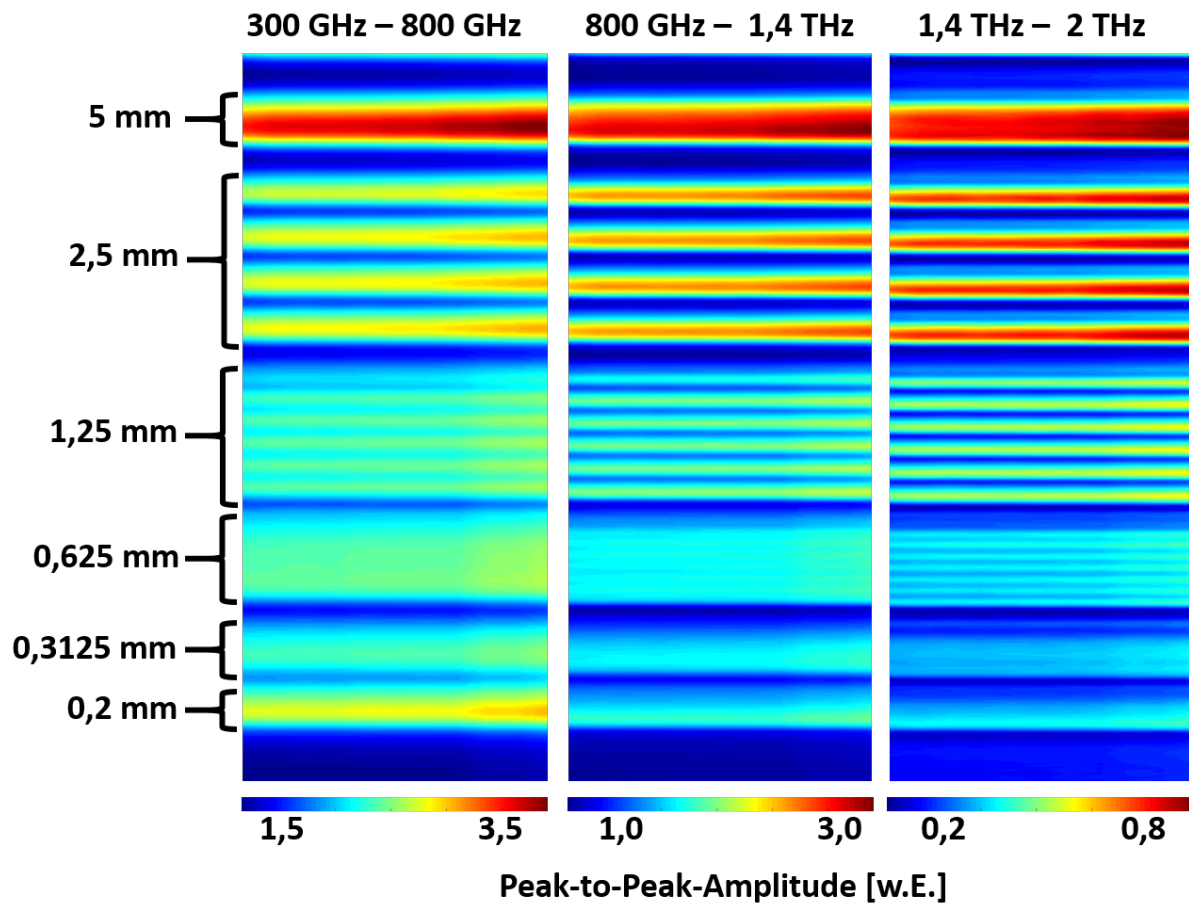


Abbildung 61: Frequenzabhängige Auswertung der Auflösung des parallelen Sensors.

#### 4.5.3 Grenzen der Anwendbarkeit des Systems

Die Anwendung des Systems besteht primär in der tomographischen Untersuchung von Objekten, d.h. insbesondere Schichtstrukturen sind hierbei von Interesse. Vor allem bei historischen Menschenfunden und Kunstobjekten sind diese Schichtstrukturen allerdings nicht immer parallel zueinander angeordnet. Die Verläufe zweier Schichten können deutliche Unterschiede aufweisen. Da der THz-Sensor nur an dem Verlauf der äußeren Grenzfläche orientiert wird, kann es passieren, dass THz-Reflexe aus tieferen Schichten nicht nur anhand ihrer zu schwachen Amplitude nicht mehr detektiert werden, sondern auch, weil sie in einem Winkel reflektiert werden, der stark von der Position des Detektors abweicht (vgl. Abb. 62).

Aus diesem Grund wurden Testkörper konzipiert, die eine Winkelabweichung zwischen unterschiedlichen Schichten simulieren, um einen Grenzwinkel der THz-Sensoren zu evaluieren, ab welchem ein signifikant hoher Anteil der Strahlung nicht mehr detektiert werden kann. Die Testkörper sind in Abbildung 63 gezeigt. Sie wurden mit einem CAD-Programm designet und anschließend mit einem 3D-Drucker aus PLA hergestellt. Der Winkel der dritten Grenzschicht

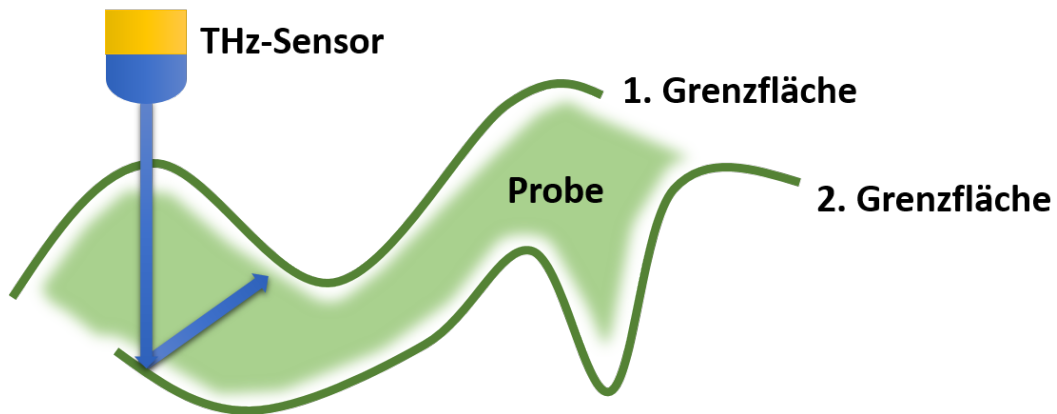


Abbildung 62: Strahlungsverlauf an einem Mehrschichtsystem mit nicht-parallelen Grenzflächen

ändert sich bei den Testkörpern in  $1^\circ$ -Schritten. Insgesamt wurde daher ein Bereich zwischen  $0^\circ$  und  $32^\circ$  untersucht. Bei höheren Abweichungen ist eine Detektion des an der dritten Grenzflächen reflektierten Signals nicht mehr zu erwarten. Die einzelnen Bereiche sind durch Aluminiumstreifen voneinander getrennt, sodass bei der späteren Auswertung die Zuordnung der Daten erleichtert wird.

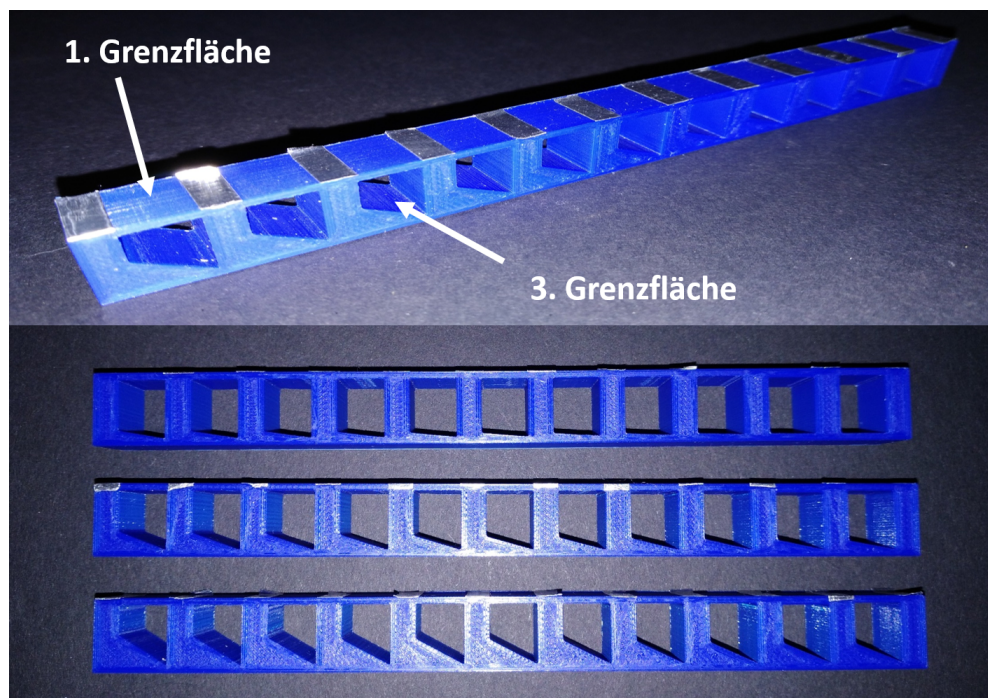


Abbildung 63: 3D- gedruckte Testkörper zur Evaluierung eines Grenzwinkels bei der Detektion von Mehrschichtsystemen

Für die Auswertung wurde die Peak-to-Peak-Amplitude des dritten reflektierten THz-Pulses gegen die Winkel aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 64 dargestellt. Die Daten wur-

den jeweils auf den dritten Reflex der  $0^\circ$ -Messung normiert, sodass ein direkter Vergleich der beiden Sensoren möglich ist. Das Rauschlevel der Daten wurde zudem abgezogen, sodass der Wert 0 die Grenze markiert, an welcher sich die Daten nicht mehr vom Rauschen abgrenzen lassen. Es zeigt sich, dass beide THz-Sensoren eine ähnliche Toleranz für Winkelabweichungen aufweisen. Der Grenzwinkel kann auf etwa  $14^\circ$  bestimmt werden.

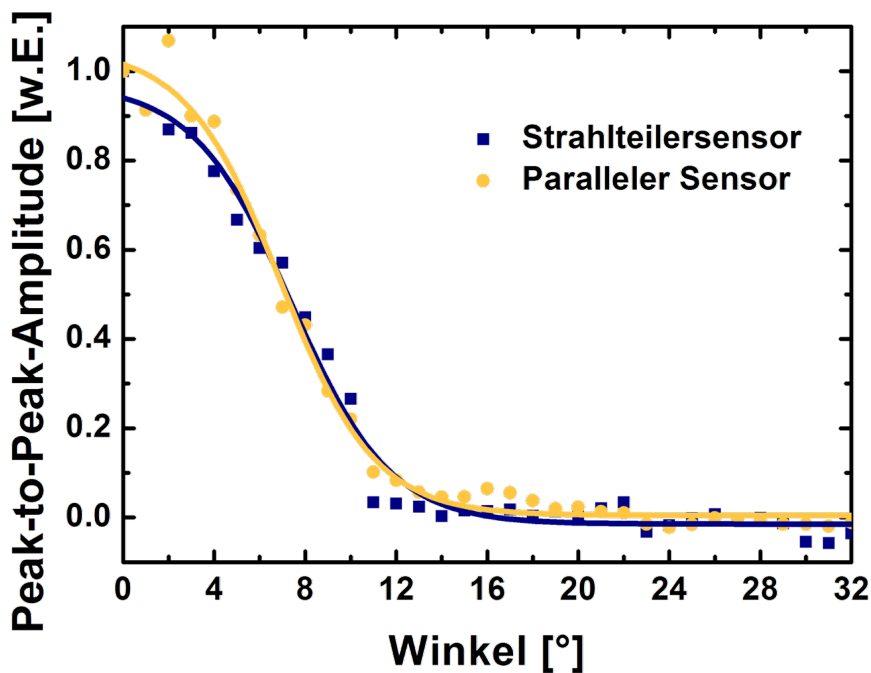


Abbildung 64: Ergebnisse der Winkelevaluierung

Neben den unterschiedlichen Geometrien in Mehrschichtsystemen ist die Anwendbarkeit des Systems auch durch die Absorption und Streuung des jeweiligen Materials begrenzt. So können keine Materialien vermessen werden, die Metallschichten in der obersten Schicht enthalten. Aber auch Materialien, die sehr porös oder grobkörnig sind oder eine raue Oberfläche aufweisen, sind weniger für eine Untersuchung geeignet. Nichtsdestotrotz kann manchmal der Versuch einer Messung sinnvoll sein, da gerade bei Mumien oder Kunstobjekten im Vorfeld nicht bekannt ist, wie genau die Probe aufgebaut ist. Die Erfolgsaussichten des Systems lassen sich daher bei solchen Objekten vorab nicht genau definieren. Erst eine Vielzahl an Untersuchungen an solchen Objekten, lässt genauere Schlüsse über mögliche Anwendungsgrenzen und -potentiale zu.

## 4.6 Demonstrationsmessungen an einfachen Bauteilen

Um die Funktion des Systems zu testen, wurden zunächst einfache Bauteile wie Metallstufen und ein Rohr in unterschiedlichen Ausführungen vermessen. Die Ergebnisse dieser einfachen Demonstrationsmessungen werden in diesem Kapitel zunächst ohne tomographische Rekonstruktion der inneren Strukturen vorgestellt. Dafür erfolgt ein Vergleich mit konventionellen 2D-Scans, die den Mehrwert der Roboter-basierten Messungen verdeutlichen sollen. Für diese ersten Demonstrationsmessungen wurde der THz-Sensor mit Strahlteiler verwendet, da dieser als erstes entwickelt wurde.

### 4.6.1 Metallstufen

Die Metallstufen wurden aus stufenförmig zusammengesetzten Metallplatten hergestellt. Ein Foto der Probe ist in Abbildung 65 dargestellt. Die zu vermessende Fläche war senkrecht zum THz-Sensor ausgerichtet, sodass der Winkel des Sensors während der Messung nicht angepasst werden musste. Im Gegensatz zu einer 2D-Verfahrenheit wird hier zusätzlich nur der Abstand des Sensors zur Probe angepasst, sodass sich der Fokuspunkt zu jeder Zeit auf der Probe befindet.

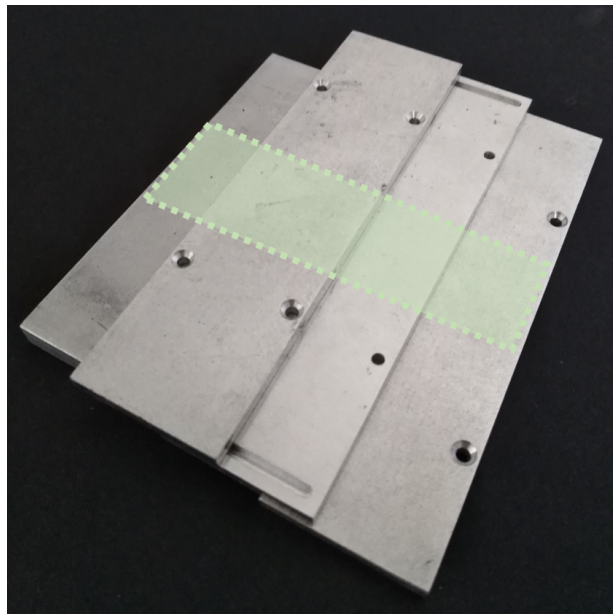


Abbildung 65: Vermessene Metallstufen aus Aluminium, Messbereich grün markiert.

In Abbildung 66(a) und (b) ist das Ergebnis des konventionellen zweidimensionalen Scans gezeigt. Für die bildgebende Auswertung wurde jeweils die Peak-to-Peak-Amplitude des reflektierten THz-Signals an der jeweiligen Messposition ausgetragen. Im Falle des 2D-Scans erkennt man je nach Stufe deutliche Unterschiede in der Amplitude der reflektierten Strahlung. Dies ist darin begründet, dass sich die Probe wie oben beschrieben, nicht zu jeder Zeit

im Fokuspunkt befindet. So werden Anteile der reflektierten Strahlung nicht immer vollständig detektiert. Der unterschiedliche Abstand zwischen THz-Sensor und Probe zeigt sich auch in der zeitlichen Position des THz-Pulses in den einzelnen Zeitbereichsspuren, von denen zwei exemplarisch in Abbildung 66(b) dargestellt sind. Betrachtet man die äquivalente Auswertung für den Roboter-basierten THz-Scan, dargestellt in Abbildung 66(c) und (d), so erkennt man, dass die Amplitudenwerte weitgehend gleich verteilt sind und sich die THz-Pulse zeitlich gesehen an der gleichen Position im Signal befinden. Lediglich an den Kanten der einzelnen Stufen kommt es zu einer Veränderung der Amplituden, da sich hier aufgrund der Größe des Fokuspunktes der THz-Puls auf zwei Bereiche aufteilt, der Abstand aber nur an einen Bereich angepasst ist. Das Anpassen des Abstandes zwischen Sensor und Probe funktioniert demnach wie geplant.

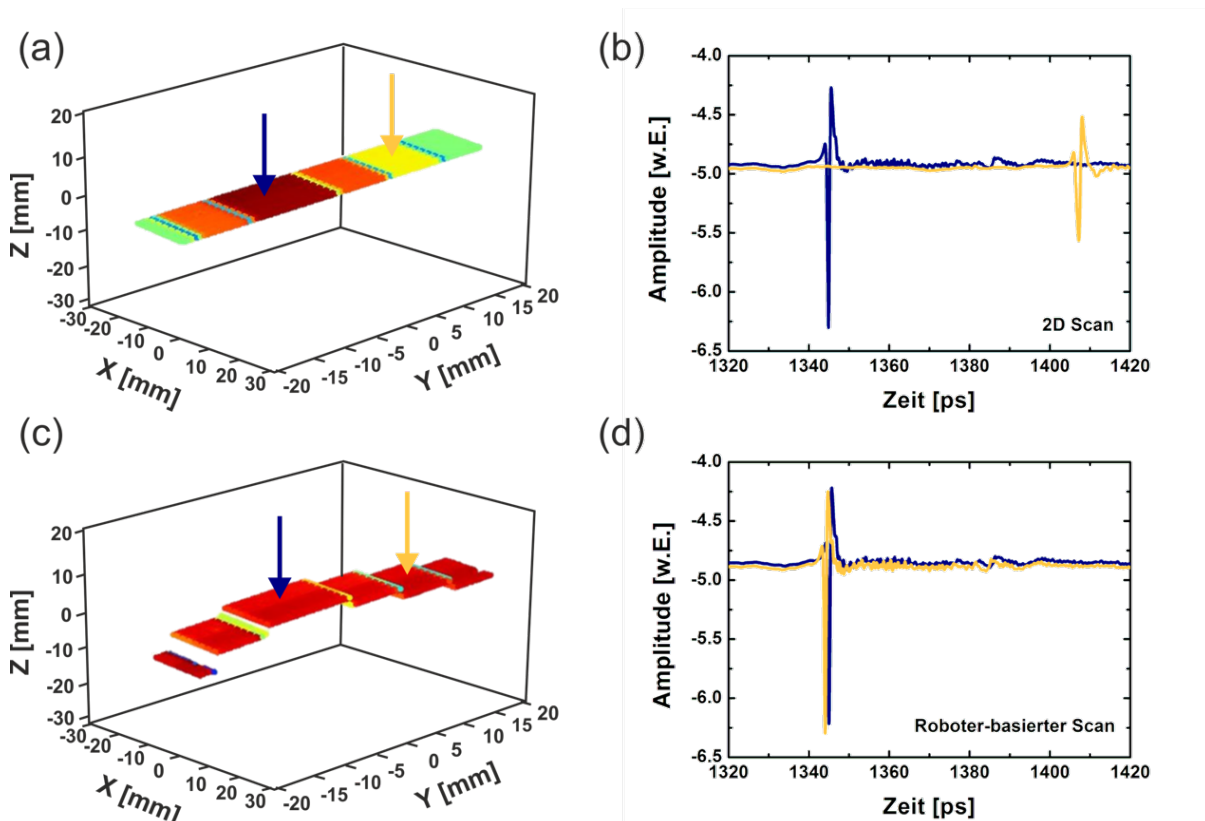


Abbildung 66: Messergebnis der Metalstufen: (a) Peak-to-Peak-Amplitude der reflektierten THz-Pulse bei einem 2D-Scan und exemplarische THz-Zeitbereichsspuren (b);(c) und (d) entsprechendes Ergebnis eines Roboter-basierten Scans.

#### 4.6.2 Rohr

Das alleinige Anpassen des Abstandes zwischen Sensor und Probe könnte auch durch eine einfache dritte Verfahrenseinheit realisiert werden. Der entscheidende Vorteil des Roboter-basierten

THz-Systems liegt vor allem in der gleichzeitigen Anpassung des Winkels. Um diese Funktion zu überprüfen, wurde ein Kunststoffrohr, beklebt mit Aluminiumstreifen, vermessen (vgl. Abb. 67). Da die meisten Kunststoffe sehr transparent für THz-Strahlung sind, bietet sich hierbei auch direkt eine Vermessung der zweiten Grenzfläche mit an. In den Bereichen, an denen das Rohr nicht mit Aluminium beklebt ist, kann die THz-Strahlung den Kunststoff durchdringen und wird zusätzlich an der zweiten Grenzfläche reflektiert.

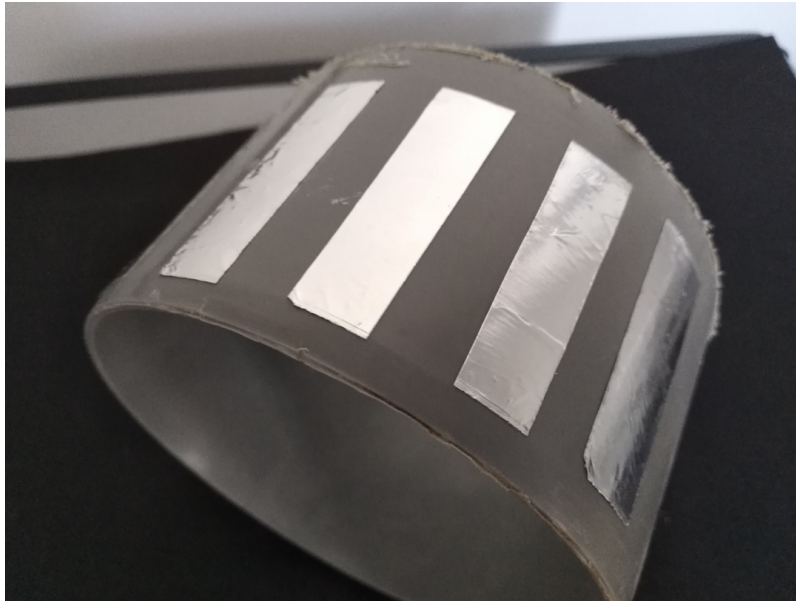


Abbildung 67: Vermessenes Rohr, teilweise mit Aluminiumstreifen beklebt

In Abbildung 68 ist erneut ein Vergleich mit einer zweidimensionalen Messung gezeigt. In dieser kann lediglich der zentrale, senkrecht zum Sensor stehende Metallstreifen detektiert werden. Bei der Roboter-basierten Messung hingegen können alle Streifen detektiert werden. Des Weiteren ist die Amplitude hier wieder gleichmäßig verteilt. Schaut man sich zwei exemplarische Zeitbereichsspuren im Roboter-basierten THz-Scan an (vgl. Abb. 68(c),(d)), so lässt sich an den Stellen, an denen kein Aluminium die Oberfläche des Rohres bedeckt, ein zweiter THz-Pulse ausmachen. Zudem zeigt sich ein Phasensprung in den THz-Signalen, der an der Reflektion an einem optisch dichteren Medium entstanden ist.

Neben der Betrachtung der ersten Grenzfläche ist aber auch eine Auswertung der nachfolgenden Grenzflächen beispielsweise hinsichtlich deren Peak-to-Peak-Amplitude von Interesse. Um diese Auswertung zu automatisieren, sind spezielle Algorithmen erforderlich, die im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

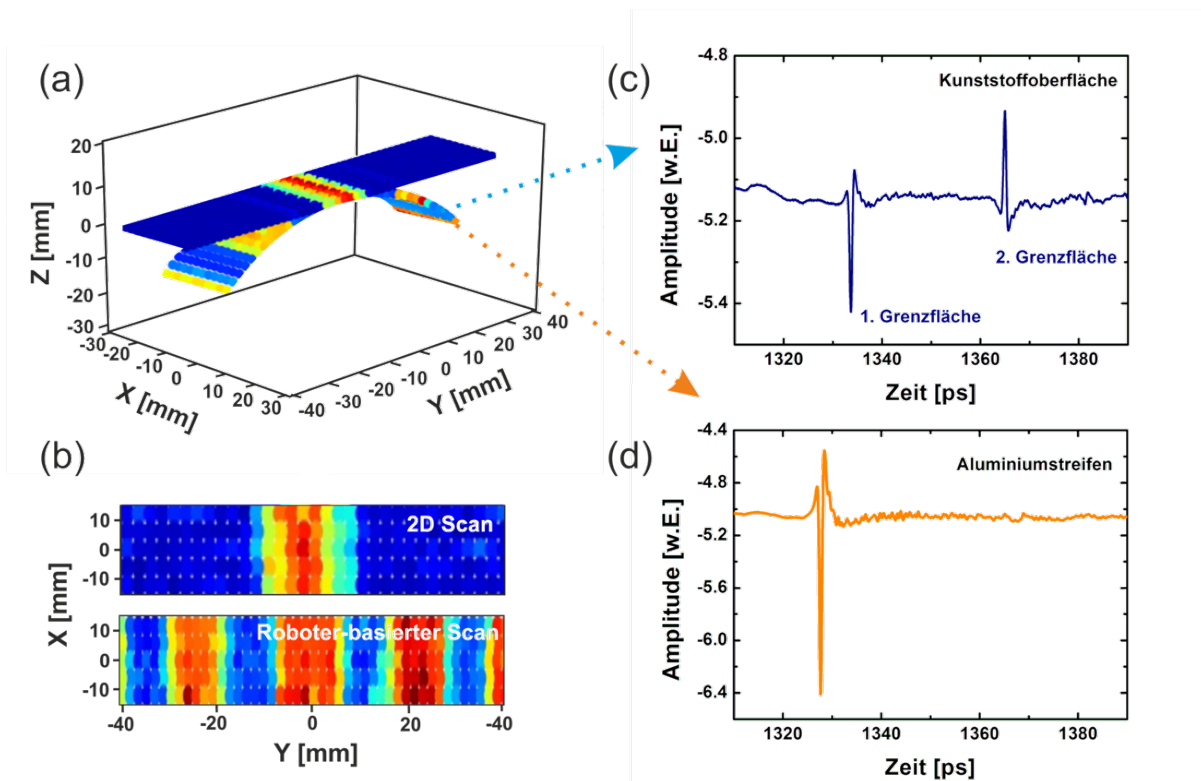


Abbildung 68: Messergebnis des Rohres: (a), (b) Peak-to-Peak-Amplitude der reflektierten THz-Pulse bei einem 2D- bzw. Roboter-basierten Scan und exemplarische THz-Zeitbereichspuren an unterschiedlichen Bereichen des Roboter-basierten Scans (c),(d).



## 5 Algorithmus zur tomographischen Rekonstruktion

In Kapitel 2.3.3 wurden bereits allgemein die Möglichkeiten einer tomographischen Rekonstruktion anhand von THz-Daten vorgestellt. In diesem Kapitel soll die genaue Umsetzung im vorliegenden Fall kurz beschrieben werden.

In dieser Arbeit soll die Flugzeittomographie zur Anwendung kommen, um Schichtsysteme bezüglich ihres Aufbaus zu untersuchen. An einen Algorithmus, der die Roboter-basierten THz-Daten auswertet, werden hauptsächlich zwei Anforderungen gestellt. Zum einen müssen die THz-Pulse eindeutig identifiziert und deren zeitliche Position zielsicher bestimmt werden. D.h. es dürfen keine Pulse übergangen werden, es dürfen aber auch keine Rauschsignale als THz-Puls fehlinterpretiert werden. Zum anderen müssen eventuell ineinandergelaufene Pulse von sehr dünnen Schichten klar voneinander getrennt werden. Da beide Anforderungen nicht bei allen Proben erfüllt sein müssen, wurde der Algorithmus in einem zweistufigen Verfahren entwickelt. Bei der ersten Stufe geht es primär um die Identifizierung und die Bestimmung der zeitlichen Position der Pulse. Bei der zweiten Stufe wird ein Deconvolution-Algorithmus implementiert, der zeitlich ineinandergelaufene Pulse separieren kann.

### 5.1 Identifizierung der THz-Pulse und Zuordnung zu Schichten

Für den Fall, dass die optische Dicke von Probenschichten ausreichend groß ist, um die reflektierten THz-Pulse deutlich voneinander zu separieren, ist eine tomographische Rekonstruktion der Schichtstrukturen anhand eines einfachen Peakfinding-Algorithmus möglich. Eine weitere Voraussetzung dafür ist, dass die THz-Reflexe deutlich vom Rauschlevel des Messsignals abzugrenzen sind.

Der Ablauf der tomographischen Rekonstruktion ist in Abbildung 69 dargestellt. Nachdem die Daten eingelesen wurden, werden in einem ersten Schritt eventuell vorhandene Störsignale mit Frequenzen außerhalb des THz-Bereichs herausgefiltert. Um die THz-Pulse im gefilterten Signal zu detektieren, wird die zeitliche Ableitung der Daten gebildet. Durch die Bestimmung der Nullpunkte in der zeitlichen Ableitung werden zusätzlich Peaks im Rauschen detektiert. Um diese Punkte von den Punkten der THz-Pulse zu separieren, wird ein Schwellenwert eingeführt, ab welchem die Amplitude eines Maximums als THz-Puls gewertet wird. Zur Definition dieses Schwellenwertes wird ein Vielfaches  $N$  der Standardabweichung aller detektierten lokalen Maxima verwendet. Dieser Schwellenwert kann vom Anwender entsprechend der Daten angepasst werden.

Zusätzlich kann es zu einer weiteren Fehldetektion kommen, indem für einen THz-Puls mehrere Maxima detektiert werden (vgl. Abb. 69(c)). Da für die Anwendung dieses Algorithmus als Voraussetzung gilt, dass die THz-Pulse deutlich voneinander getrennt sind, kann dieses Problem durch die Einführung eines zeitlichen Mindestabstandes zwischen zwei Pulsen gelöst werden.

Dabei ist allerdings nicht eindeutig, welches der Maxima verwendet werden soll. Um dieses Problem zu umgehen, wird der Betrag des Signals gebildet. In diesem Fall ergibt sich für jeden THz-Puls ein eindeutiges Maximum. Anschließend müssen die je nach THz-Sensor vorhandenen Strahlteilerreflexe eliminiert werden, die beim mehrmaligen Durchlaufen des Strahlteilers entstehen. Dies kann durch die Wahl eines geeigneten Zeitfenster geschehen oder dem Ausschließen eines bestimmten Zeitbereiches, da die Position dieser Pulse exakt bekannt ist.

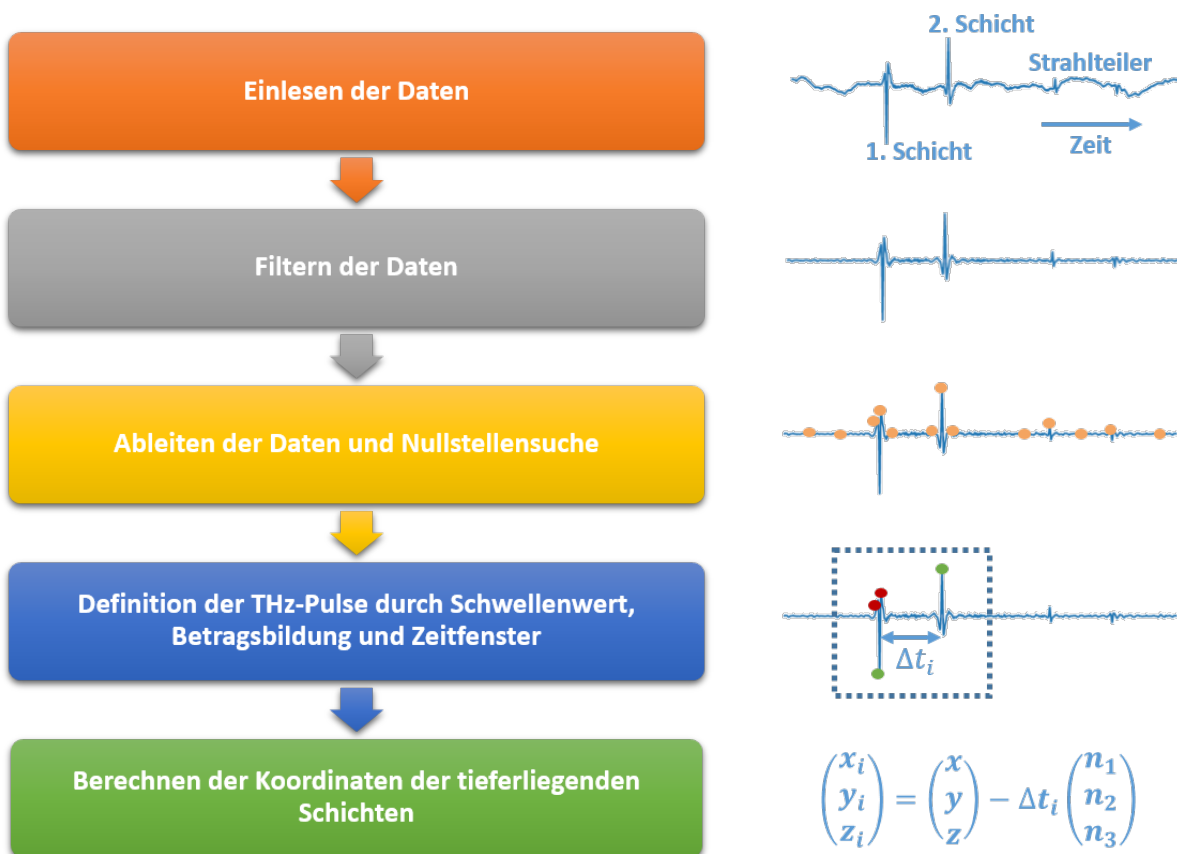


Abbildung 69: Ablauf des Rekonstruktionsalgorithmus für optisch dicke Schichtsysteme

Nachdem die zeitlichen Positionen der einzelnen THz-Pulse bestimmt wurden, muss eine entsprechende Berechnung der Koordinaten erfolgen. Anhand der Messung ist zunächst nur die Koordinate des jeweiligen Messpunktes an der Oberfläche bekannt. Die Koordinaten tieferliegender Schichten müssen anhand der gewonnenen Daten berechnet werden. Dies geschieht durch die Translation des Koordinatenvektors um den Betrag der zeitlichen Differenz zwischen Oberflächenreflex und tieferliegendem Reflex in Richtung des jeweiligen Normalenvektors. In diesem Fall wird lediglich die zeitliche Differenz verwendet und die rekonstruierte Schichtstruktur entspricht keiner räumlichen Dimension.

Verfügt man zusätzlich über die optischen Parameter der jeweiligen Schichten, kann auch

eine Umrechnung in eine räumliche Dimension erfolgen (siehe Gleichung 2.40). Im Falle einer Messung in Reflexion muss entsprechend ein Faktor von zwei beachtet werden, da die Strahlung jeden Weg hin und zurück durchläuft.

Die Funktionsweise des Algorithmus wurde an einer einfachen Rohrgeometrie überprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 70 dargestellt. Um beispielsweise die Wandstärke des Rohres zu bestimmen, bietet es sich an, Schnitte durch die dreidimensionale Darstellung anzufertigen (vgl. Abb. 70(b)). Anhand der Schnitte können zum Beispiel vorhandene Schäden detektiert oder eine Qualitätskontrolle durchgeführt werden, um Rohrbrüche an ausgedünnten Stellen zu vermeiden.

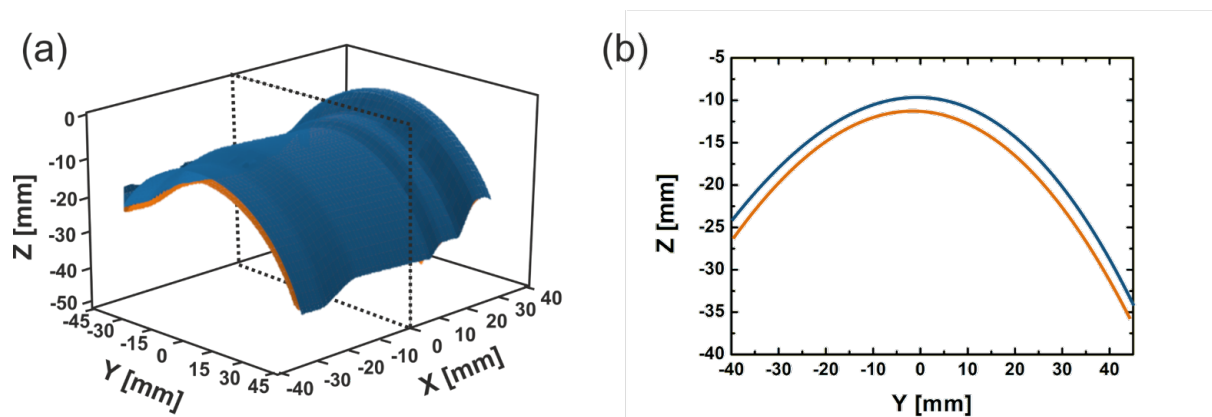


Abbildung 70: Ergebnis des Rekonstruktionsalgorithmus bei einer Rohrmessung: (a) Dreidimensionale Darstellung der Rekonstruktion und (b) Schnitt bei  $X = 0$ .

## 5.2 Rekonstruktion dünner Schichten und stark rauschbehafteter Daten

Mumien oder Kunstobjekte bestehen häufig aus sehr dünnen Schichten, die nur weniger Mikrometer dick sind. Zudem ist das detektierte Signal stark durch Rauschen überlagert, sodass die THz-Pulse nicht immer eindeutig zu erkennen sind. Diese Objekte können mit dem zuvor beschriebenen Algorithmus daher nicht rekonstruiert werden. Um dies zu ermöglichen, muss ein Deconvolution-Algorithmus zur Anwendung kommen, der in Kapitel 2.3.3 beschrieben wurde [91].

Der Ablauf der Rekonstruktion ist analog zum obigen Verfahren, nur dass sich nach dem Einlesen und Filtern der Daten eine Entfaltung anschließt bevor mit dem Definieren der THz-Pulse fortgefahren wird. Bezüglich der Leistungsstärke der Deconvolution-Algorithmen gibt es deutliche Unterschiede. Es wurden daher verschiedene Algorithmen ausprobiert. Wie bereits in Kapitel 2.3.3 dargestellt, ist ein sogenannter *Sparse deconvolution*-Algorithmus sehr leis-

tungsstark, wenn es darum geht, Pulse in stark verrauschten Daten zu detektieren. Auch im vorliegenden Fall ergaben sich mit diesem Algorithmus die besten Ergebnisse.

Anstatt der direkten Zeitbereichsdaten werden hier nun die Peaks in der Impulsantwortfunktion detektiert. In Abbildung 71 ist ein gemessenes THz-Signal mit seiner dazugehörigen Impulsantwortfunktion bei verschiedenen Besetztheitsgraden gezeigt. In der Impulsantwortfunktion sind die Peaks deutlich klarer zu erkennen aufgrund der Annahme der Dünnbesetztheit. Je nach Ausschlag der Peaks in positiver oder negativer Richtung kann zudem die Amplitude und Phase der reflektierten THz-Pulse evaluiert werden.

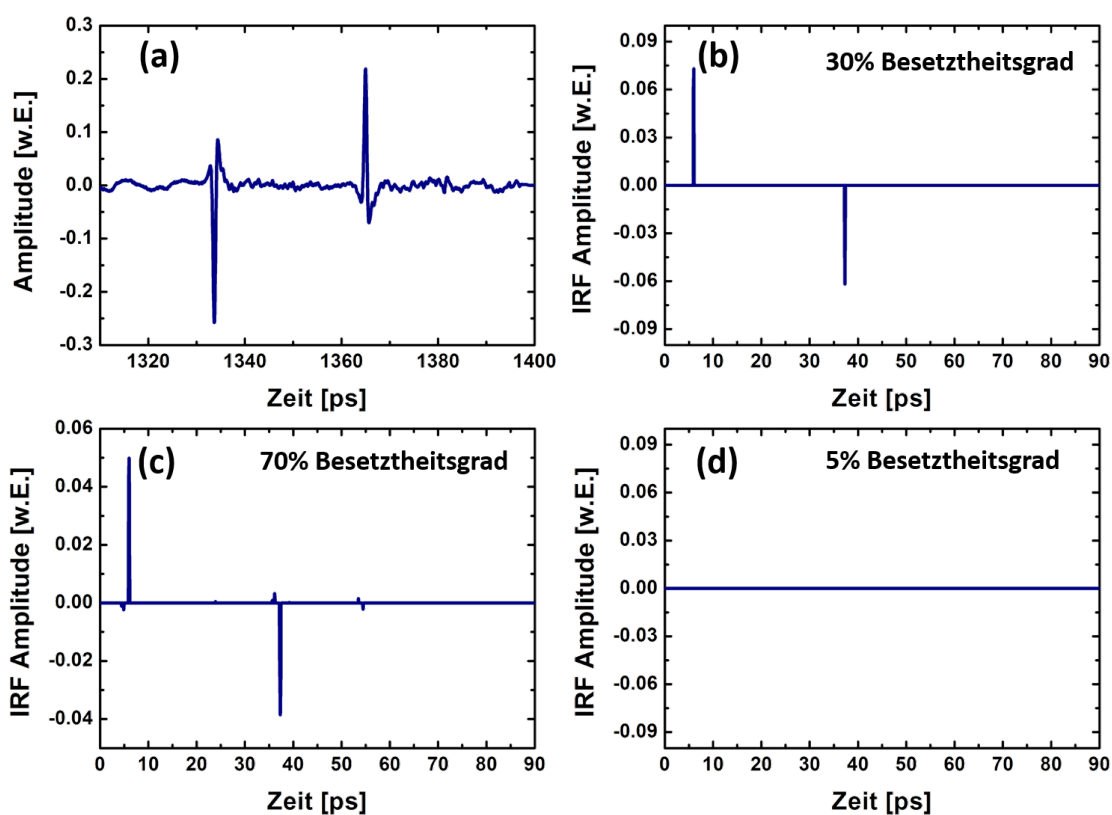


Abbildung 71: Beispielhaftes Ergebnis des Sparse-Deconvolution-Algorithmus: (a) THz-Signal im Zeitbereich und (b) dazugehörige Impulsantwortfunktion nach Anwendung des Algorithmus.

Ein Nachteil, der auch hier besteht, ist die Fehl- bzw. Mehrfachdetektion von Pulsen. Dies ist vor allem von der Wahl des Besetztheitsgrades abhängig. Wird der Besetztheitsgrad zu niedrig gewählt, so werden unter Umständen gar keine THz-Pulse mehr erkannt (vgl. Abb. 71(d)). Je nach Einstellung des Besetztheitsgrades werden aber auch Pulse erkannt, die eigentlich keine darstellen oder THz-Pulse werden als mehrere Peaks in der Impulsantwortfunktion wiedergegeben (vgl. Abb. 71(c)). Bei der Mehrfachdetektion liegen Pulse häufig sehr nah beieinander. Betrachtet man die Schnitte durch die so rekonstruierten Daten, fällt auf, dass in diesem

Fall jeweils zwei oder drei Linien sehr nah beieinander liegen. Durch eine geeignete Wahl des Besetztheitsgrades kann dieses Problem teilweise gelöst werden. Es ist jedoch nicht immer möglich, eine Mehrfachdetektion zu verhindern. Meistens kann allerdings anhand der Amplitude erkannt werden, ob es sich um den Hauptpuls handelt oder kleine Nebenmaxima. Aufgrund dessen bietet die entwickelte Auswertungssoftware mehrere Möglichkeiten der Darstellung, die in Abbildung 72 gezeigt sind. Neben einer dreidimensionalen Darstellung aller Schichten sind Schnitte in allen Ebenen möglich. In diesen Schnitten werden zum einen die Amplitudewerte der Peaks durch farblich codierte Pixel an der jeweiligen Position dargestellt, zum anderen werden die Kontourlinien aller rekonstruierten Schichten an der jeweiligen Position gezeigt. Bei diesen Linien kann es vorkommen, dass mehr Schichten angezeigt werden, als eigentlich existieren bzw. es dadurch auch zu einer Fehlzuordnung und einer damit einhergehenden Fehlrekonstruktion der Schichten kommt. Ein Vergleich dieser Daten mit den Amplitudenpixeln ist daher bisher unerlässlich.

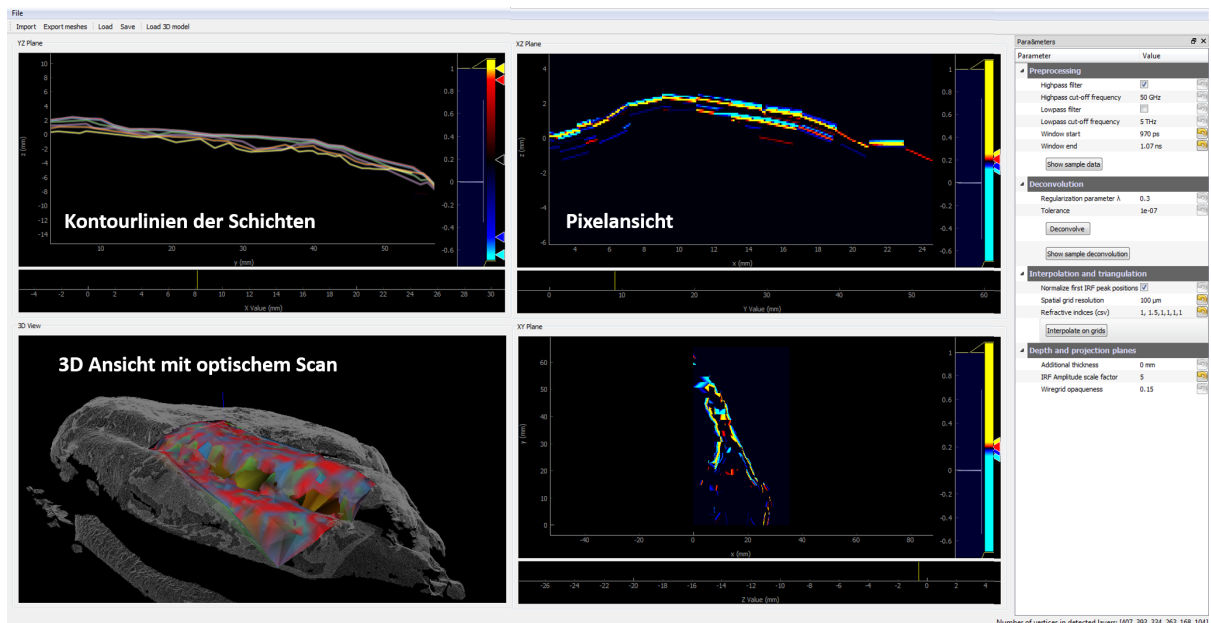


Abbildung 72: Erweiterte Auswertungssoftware für die tomographische Rekonstruktion von THz-Daten.

Ein weiterer Vorteil dieses erweiterten Algorithmus zur tomographischen Rekonstruktion besteht darin, dass alle Arten von Objekten rekonstruiert werden können. So ist es auch möglich, Objekte mit dickeren Schichten zu rekonstruieren. Der im vorigen Abschnitt beschriebene Algorithmus kann daher durch den erweiterten Algorithmus ersetzt und alle weiteren Messdaten damit ausgewertet werden.



## 6 Terahertztomographie an historischen Menschenfunden

Mit Hilfe des entwickelten Roboter-basierten THz-Systems ist es erstmals möglich, Proben mit THz-Strahlung zu untersuchen, deren Oberfläche nicht eben ist. Zu dieser Klasse von Proben gehören natürlich vorkommende Objekte wie historische Menschenfunde aber auch ein Großteil industriell hergestellter Proben. Die Motivation dieser Arbeit besteht vordergründig in der Untersuchung von historischen Menschenfunden. Ein Vorteil der Mumien gegenüber anderen Objekten besteht vor allem in deren Wasserarmut, der die Messungen mit THz-Strahlung ermöglicht. Zudem spielt der Zeitfaktor bei dieser Anwendung beispielsweise im Vergleich zu Industrieanwendungen oder Untersuchungen an lebenden Objekten eine eher untergeordnete Rolle.

Durch die Untersuchung der Objekte in einem von anderen etablierten Methoden verschiedenem Frequenzbereich mit anderen Wechselwirkungsmechanismen erhofft man sich einen Erkenntnisgewinn. Da es bisher allerdings keinerlei Erfahrungswerte in der Interpretation von THz-Bildern an Mumien gibt, steht neben der praktischen Durchführung der Messungen auch die Analyse der Daten im Vordergrund. Ein Vergleich mit etablierten Verfahren wie computertomographischen Messungen mit Röntgenstrahlung ist unerlässlich. Hierbei ergeben sich teilweise Überschneidungen, es kann aber aufgrund der unterschiedlichen Wechselwirkungsmechanismen auch zu Unterschieden in der Darstellung kommen.

Für eine erste Studie von THz-Messungen an historischen Menschenfunden wurde sich auf eine kleine Auswahl an Objekten konzentriert. Im Vordergrund stand eine künstlich mumifizierte, menschliche Hand, die bereits vielfach mit anderen Methoden untersucht wurde. So ist es möglich, die neuen THz-Daten mit anderen Methoden zu vergleichen und Vor- und Nachteile zu evaluieren. Neben der Hand wurden noch zwei weitere kleinere Objekte untersucht, um die Anwendung zu demonstrieren. Hierzu zählen eine Kinderhand aus Peru und ein Schädelknochen.

### 6.1 Künstlich mumifizierte Hand

Bei der Hand handelt es sich um eine künstlich mumifizierte, linke, menschliche Hand aus der Zeit 1500-1100 v. Chr. [11]. Die Hand ist in Abbildung 73 dargestellt. Sie gehört zu einer Sammlung des Musee d'Orbe in der Schweiz. Mit einer Länge von ca. 15 cm ist die Probe vergleichsweise kompakt und bietet den Vorteil, dass eine Messung im Labor möglich ist. Somit konnte das System zunächst in einer Laborumgebung an einer realen Probe getestet werden.

An der Hand wurden mehrere THz-Messungen in unterschiedlichen Bereichen durchgeführt. Die Bereiche erstreckten sich über einen Bereich von ca. 20 x 60 mm auf dem Handrücken der Probe. Der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten wurde auf 2 mm festgesetzt. Von den theoretisch 646 vorhandenen Messpunkten, konnten 548 angefahren und vermessen



Abbildung 73: Untersuchte Mumienhand mit markiertem Messbereich (Fotos von C. Steiner, Institut für Evolutionärmedizin, Universität Zürich)

werden. Die restlichen Punkte mussten aufgrund möglicher Kollisionen von der Messung ausgeschlossen werden. Für jede Punktmessung wurden 100 THz-Pulse gemittelt. Nachfolgend werden die Ergebnisse exemplarisch für einen Bereich vorgestellt, der in Abbildung 73 markiert ist, da sich bei den unterschiedlichen Messbereichen jeweils ein gleiches Schichtsystem abgezeichnet hat. Anschließend erfolgt ein Vergleich zu konventionellen CT-Messungen und Micro-CT-Messungen.

### 6.1.1 Tomographische Rekonstruktion anhand der THz-Messungen

Die gewonnenen Ergebnisse können auf viele verschiedene Arten dargestellt werden. Um das Prinzip der tomographischen Rekonstruktion anhand von THz-Daten nochmals zu verdeutlichen, soll zunächst die Darstellung der Daten in Form eines Linienscans, d.h. für einen konstanten  $x$ - oder  $y$ -Wert erfolgen. Für diesen Linienscan ist die THz-Zeitbereichsspur gegenüber der Linieneinposition aufgetragen (vgl. Abb. 74(a)). Diese zweidimensionale Art der Darstellung kann mit einem Ultraschallbild in der Medizin verglichen werden und zeigt indirekt die Schichtstruktur der Probe an einer bestimmten Schnittposition. Auf der gesamten Länge des Linienscans lässt sich eine deutliche zweite Schicht ausmachen. Zwischen 0 und 10 mm bildet sich zusätzlich noch eine weitere dritte Schicht aus. An dieser Stelle könnte beispielsweise ein Hohlraum vorliegen. Betrachtet man zusätzlich eine einzelne THz-Zeitbereichsspur an einer festen  $x$ - und  $y$ -Position, so kann man neben dem an der Oberfläche reflektierten THz-Puls noch weitere Reflexe tiefer liegender Schichten erkennen (vgl. Abb. 74(b)).

Jede Punktmessung an der Mumienhand zeigt einen ähnlichen Verlauf. Ohne die Anwendung eines Deconvolution-Algorithmus könnten daher zunächst mindestens drei einzelne Schichten rekonstruiert werden. Die langgezogene und unregelmäßige Form der THz-Pulse lässt aller-



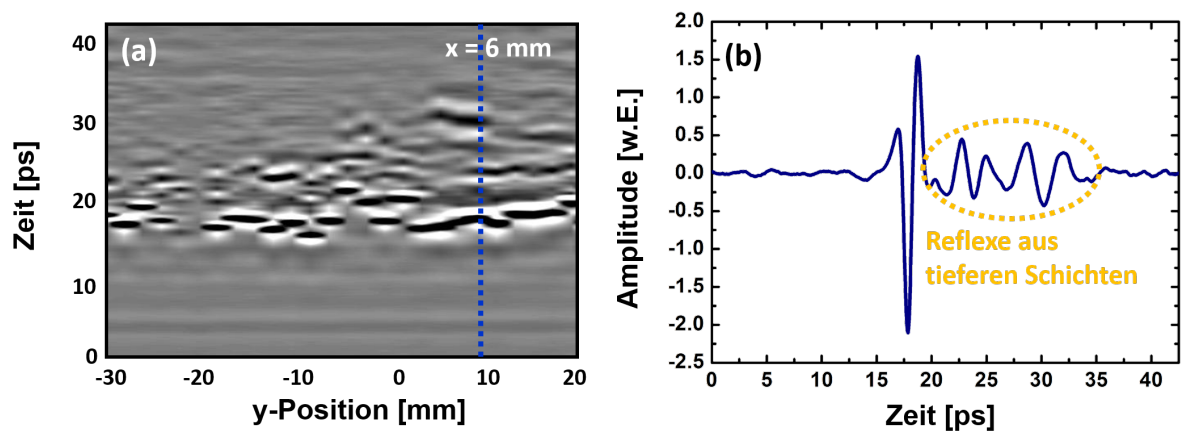


Abbildung 74: (a) Linienscan für einen konstanten  $x$ -Wert von  $x = 6$  mm, (b) exemplarische THz-Zeitbereichsspur bei  $x = 6$  mm und  $y = 10$  mm.

dings darauf schließen, dass möglicherweise mehrere Pulse ineinandergelaufen sind und somit mehr Schichten existieren als zunächst erkennbar sind. Durch die Entfaltung des Signals ist es möglich, weitere Schichten zu rekonstruieren. Abbildung 75 (a) zeigt eine dreidimensionale Darstellung der tomographischen Rekonstruktion der sechs obersten Schichten sowie zwei Schnitte in Längs- und Querrichtung (b), (c). Zur Umrechnung der Zeitachse in eine räumliche Dimension wurde zunächst ein Brechungsindex von 1,2 angenommen (vgl. Kapitel 3.1), da die Strahlung überwiegend in den obersten Hautschichten propagiert.

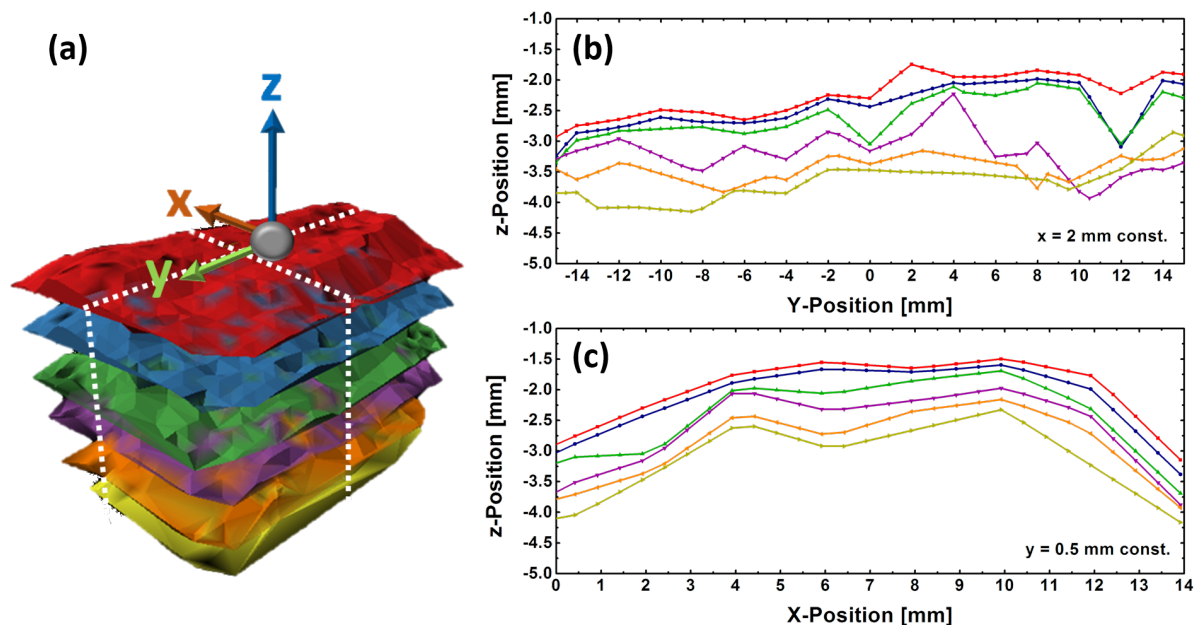


Abbildung 75: Tomographische Rekonstruktion der Mumienhand anhand der THz-Daten: (a) Dreidimensionale Ansicht der rekonstruierten Schichten, die weißen gestrichelten Linien markieren die Schnittpositionen, (b) Schnitt parallel zum Mittelhandknochen und (c) Schnitt quer zum Mittelhandknochen.

In den Schnitten lässt sich erkennen, dass jeweils zwei Schichten in großen Bereichen überlappen. Dies könnte darauf hindeuten, dass bei der Entfaltung ein THz-Puls durch mehrere Peaks in der Impulsantwortfunktion rekonstruiert wurde. Teilweise ergibt sich aber auch eine signifikante Abweichung des Verlaufes, was wiederum auf eventuelle Hohlräume schließen lässt. Die Kontourlinien sollten daher im Gesamtkontext und nicht für sich genommen interpretiert werden. Erst die Gesamtheit aller Kontourlinien gibt Aufschluss über die Schichtstruktur.

### 6.1.2 Vergleich mit CT-Messungen

Um die extrahierte Schichtstruktur medizinisch interpretieren zu können, ist ein Vergleich mit anderen bildgebenden Methoden sinnvoll. Auch die Anfertigung eines Querschliffs nach einer Probenentnahme würde bei der Interpretation helfen. Dies würde allerdings eine teilweise Zerstörung des wertvollen historischen Fundes bedeuten. In einem ersten Schritt wurde daher zunächst ein Vergleich mit einem konventionellen Computertomographiescan durchgeführt.

Die CT-Scans wurden in der Universitätsklinik Balgrist in Zürich mit einem Mehrschicht-CT (Brilliance 40, Philips Medical Systems, Amsterdam, Niederlande) durchgeführt. Die Probe wurde in axialer Richtung mit der Handflächenseite nach unten im Scanner positioniert. Die Schichtauflösung beträgt 2 mm, jedes Bild besteht aus 512x512 Pixeln.

Für den Vergleich mit den CT-Daten wurde zunächst die Pixeldarstellung für die THz-Daten gewählt, da hier noch keine Zuordnung zu einer Schicht vorgenommen wurde wie im Falle der Kontourlinien und so die Daten besser miteinander verglichen werden können. Die Auflösung der Pixel wurde auf 100  $\mu\text{m}$  festgelegt. Abbildung 76 zeigt das Ergebnis der Datenüberlagerung für einen exemplarischen Schnitt parallel zum Mittelhandknochen. Zunächst kann festgestellt werden, dass der Oberflächenverlauf der THz-Daten identisch ist mit dem der CT-Daten, d.h. das Erfassen der Oberfläche und entsprechende Nachverfahren des THz-Sensors funktioniert problemlos. Des Weiteren ist erkennbar, dass sich die THz-Daten auf einen ca. 2 mm starken Bereich begrenzen, der im konventionellen CT-Bild lediglich durch einen weißlichen Bereich gekennzeichnet ist, aber keinen höheren Kontrast zwischen den einzelnen Schichten bietet, die sich in den THz-Daten andeuten.

Anhand des Datenvergleichs kann die These bestätigt werden, dass die THz-Strahlung lediglich in den Hautschichten der historischen Menschenfunde propagiert und nicht tiefer als wenige mm, in diesem Fall 2 mm, in das Gewebe eindringt bzw. die Strahlung, die noch tiefer eindringt, aufgrund von Absorption, Streuung und Brechung nicht mehr detektiert werden kann. Die Auflösung des konventionellen CT-Scans reicht allerdings nicht aus, um Aussagen über die Schichtstruktur dieses Hautgewebes zu treffen. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Micro-CT-Scans angefertigt, welche eine Auflösung von 20  $\mu\text{m}$  bieten. Die Micro-CT-Scans wurden bei der Scanco medical AG in Brüttsellen in der Schweiz an einer Xtreme CT-Einheit durchgeführt. Die Positionierung der Hand erfolgte analog zu der im konventionellen CT-Scan.

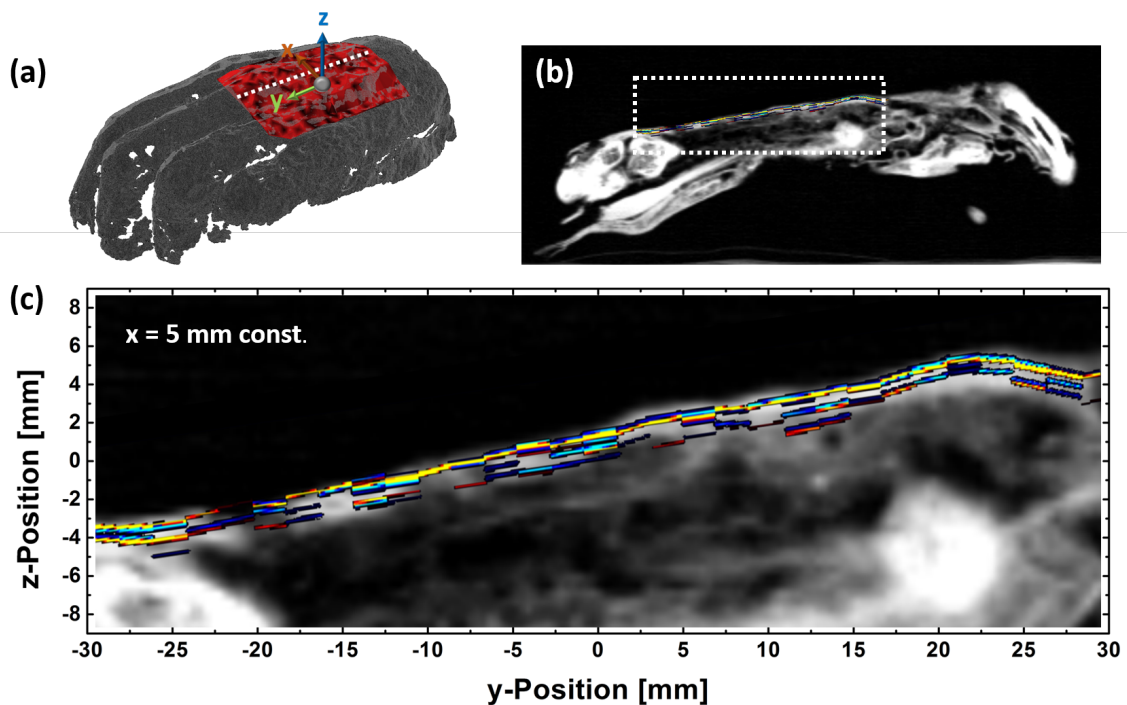


Abbildung 76: Vergleich der anhand der THz-Daten rekonstruierten Schichten mit einem konventionellen CT-Scan: (a) 3D-Oberflächenscan mit Hand, der Messbereich ist rot markiert, die weiße gestrichelte Linie markiert die Schnittposition, (b) Gesamtübersicht des CT-Schnittes mit markiertem THz-Messbereich und (c) Vergrößerung des THz-Messbereichs.

Der Vergleich mit den THz-Daten ist in Abbildung 77 dargestellt. In diesem Fall wurden die THz-Daten an zwei Schnittpositionen quer zum Mittelhandknochen verglichen, da eine Umrechnung der Micro-CT-Schnitte in die andere Ebene zu rechenaufwendig war. Auch hier zeigt sich eine hohe Überlappung im Oberflächenverlauf. Zudem deuten sich Überschneidungen in den tieferliegenden Schichten an, die im Micro-CT-Scan aufgelöst werden können. Um dies genauer zu überprüfen, ist eine andere Art der Darstellung notwendig, da die Pixel, die CT-Daten zu stark verdecken. Außerdem stellt jeder Pixel genau genommen lediglich eine Grenze zwischen zwei Schichten dar und sollte somit keine räumliche Ausdehnung besitzen. Für einen genaueren Vergleich mit den Micro-CT-Daten wäre daher eine Darstellung wünschenswert, die die einzelnen Schichten farblich codiert und nicht die Grenzbereiche. Eine solche Darstellung ist in Abbildung 78(a) gezeigt.

Bei der alternativen Form der Darstellung wurde jeweils der Bereich zwischen zwei Konturlinien gefüllt. Anhand der Pixelfarbe konnte festgelegt werden, ob ein Phasensprung stattgefunden hat oder nicht. Das Vorzeichen der Peaks in der Impulsantwortfunktion wird hier durch die beiden Farben rot und grün codiert. Der genaue Amplitudenwert der Peaks wird bei dieser Darstellung außer Acht gelassen, da vordergründig die Schichtgeometrie von Interesse ist.

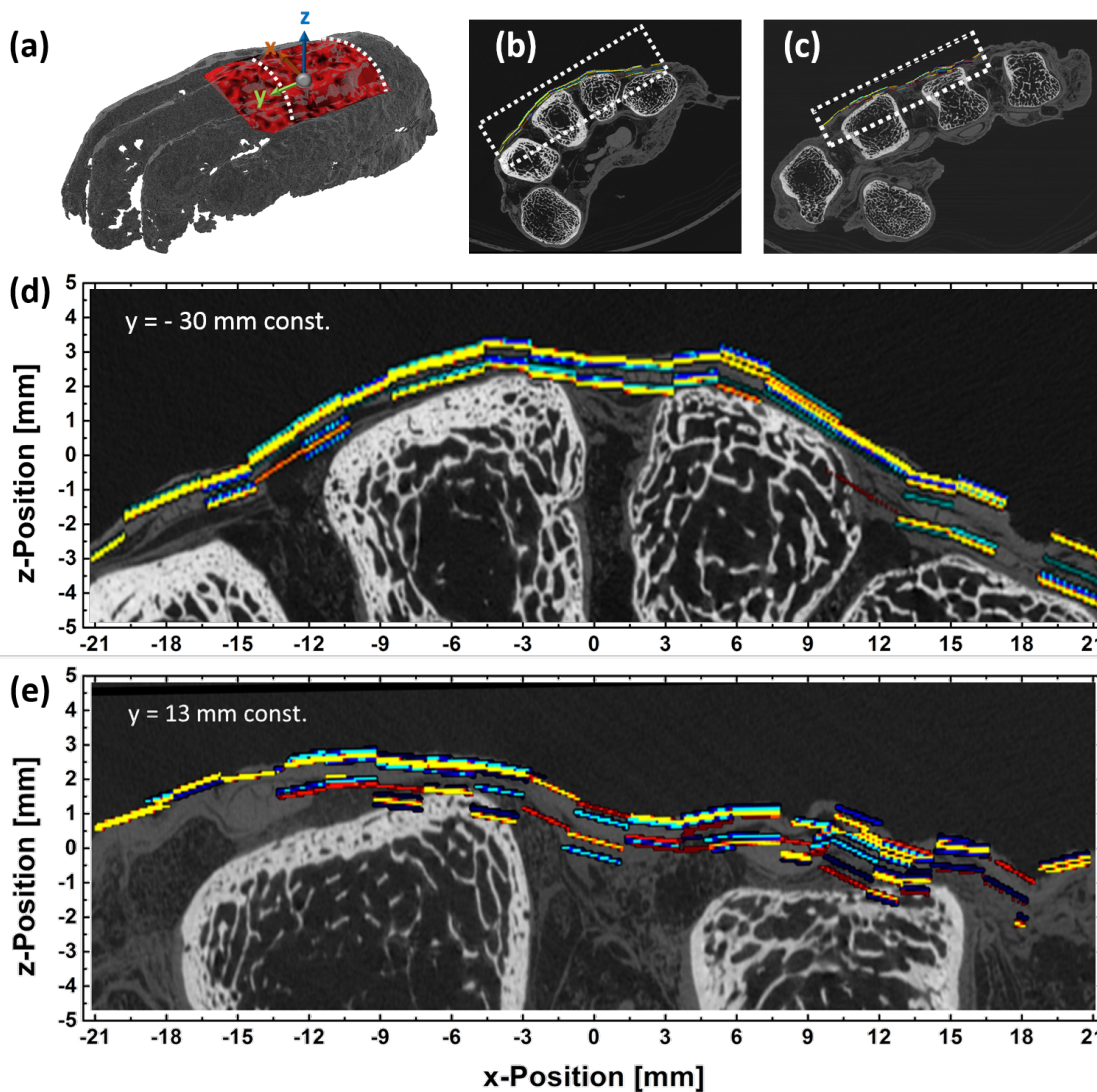


Abbildung 77: Vergleich der anhand der THz-Daten rekonstruierten Schichten mit einem Micro-CT-Scan: (a) 3D-Oberflächenscan mit Hand, der Messbereich ist rot markiert, die weißen gestrichelten Linien markieren die Schnittpositionen, (b), (c) Gesamtübersicht der CT-Schnitte mit markiertem THz-Messbereich und (d), (e) Vergrößerung des THz-Messbereichs.

In dem Bereich rechts neben dem gelben Pfeil zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den durch die THz-Messung bestimmten Schichten und dem realen Schichtaufbau. Betrachtet man den Micro-CT-Scan ohne THz-Daten (vgl. Abb. 78(b)), so lassen sich deutlich drei Schichten erkennen, die den drei Hautschichten Epidermis, Dermis und Subcutis entsprechen. Diese Schichten können durch die THz-Daten reproduziert werden. In dem Bereich zwischen Mittel- und Ringfingerknochen befindet sich unter diesen Hautschichten eine sehr inhomogene Struktur, die durch die THz-Strahlung nicht weiter aufgelöst werden kann. In den Bereichen links neben dem gelben Pfeil ergibt sich ebenfalls ein deutlicher Überlapp zwischen

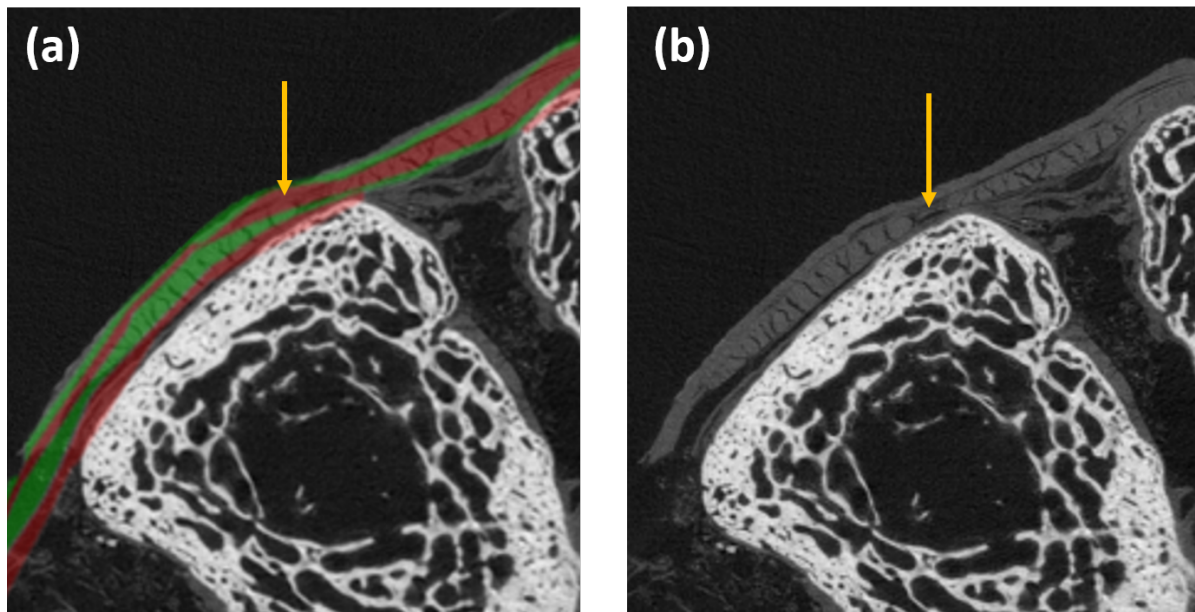


Abbildung 78: (a) Alternative Darstellung der THz-Daten zum Vergleich mit einem Micro-CT-Scan, (b) Micro-CT-Scan, der gelbe Pfeil deutet auf eine Ausdünnung in der Dermis.

THz- und CT-Daten, allerdings wird hier noch eine zusätzliche Schicht durch den Algorithmus rekonstruiert. Dies könnte beispielsweise ein kleiner Luftporenschluss zwischen Epidermis und Dermis sein. Die automatische Zuordnung zu den Schichten führt in diesem Fall jedoch dazu, dass die Dermis links des Pfeils durch einen grünen Bereich der THz-Daten überlagert wird und rechts des Pfeils von einem roten Bereich, obwohl es sich hierbei um dieselbe Gewebeschicht handelt. Durch den Vergleich mit den CT-Daten ist jedoch ersichtlich, welche Schichten von der THz-Messung rekonstruiert wurden.

Der Vergleich hat insgesamt gezeigt, dass mit Hilfe des Roboter-basierten THz-Systems die Schichtgeometrie der obersten Gewebeschichten gut wiedergegeben werden kann. Für die alleinige Auswertung von THz-Daten sollte nach wie vor die Pixeldarstellung den anderen Darstellungsformen vorgezogen werden. In Kombination mit anderen Untersuchungsmethoden bieten auch die anderen Darstellungsformen eine sinnvolle Ergänzung für die konventionellen Methoden. Die Tiefenauflösung der THz-Tomographie ist dabei vergleichbar mit der Auflösung eines Micro-CT-Scanners. Der Vorteil des Roboter-basierten THz-Systems gegenüber dem Micro-CT besteht vor allem in der Untersuchung von größeren Objekten. Das Messvolumen eines Micro-CT-Scanners ist zurzeit noch auf wenige 10 cm begrenzt, während mit dem THz-Scanner beliebige Bereiche an größeren Objekten untersucht werden können. Ein weiterer Vorteil besteht in der geringeren Datenmenge, die leichter weiterverarbeitet werden kann. Der große Vorteil des Micro-CT-Scanners, die hohe Auflösung, ist demnach auch gleichzeitig ein Nachteil, da die sehr großen Datenmengen mit den meisten handelsüblichen Computern nicht effizient weiterverarbeitet werden können. Aufgrund der stark limitierten Eindringtiefe stellt das

THz-Tomographiesystem keinen vollwertigen Ersatz für bildgebende Messungen dar, es bietet allerdings für bestimmte Anwendungen eine sinnvolle Ergänzung zu bestehenden Methoden.

## 6.2 Weitere historische Menschenfunde

Durch die Vermessung weiterer Proben im Bereich der historischen Menschenfunde, kann die Interpretation von THz-Tomographie-Daten deutlich verbessert werden. Um das Propagationsverhalten der Strahlung besser nachvollziehen zu können, wurde zunächst ein menschlicher Schädelknochen vermessen, der im Inneren eine Ausdünnung der Schädeldecke aufweist (vgl. Abb 79). Diese Ausdünnung ist von außen nicht sichtbar und hat eine Ausdehnung von ca. 15 x 20 mm. Der Mehrwert einer THz-Messung bestünde daher darin, die Ausdünnung sichtbar zu machen, auch wenn ein optischer Zugang zum Schädelinneren nicht möglich wäre.

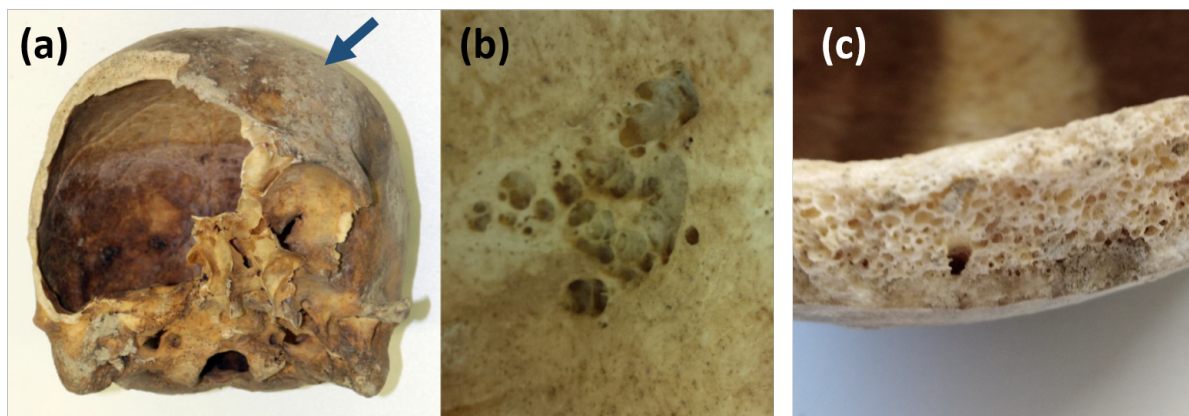


Abbildung 79: (a) Vermessener Schädelknochen mit Ausdünnung in der Schädeldecke, (b) Vergrößerung des ausgedünnten Bereichs, (c) Nahaufnahme der Schädelknochenstruktur.

In Abbildung 80 sind die Ergebnisse der THz-Messung gezeigt. Eine tomographische Rekonstruktion der Schädeldecke anhand der Daten konnte nicht erfolgen, da außer dem an der Oberfläche reflektiertem THz-Puls keine weiteren Reflexe gemessen werden konnten. Dafür können maßgeblich zwei Ursachen in Frage kommen. Zum einen scheint die Schädeldecke die THz-Strahlung sehr stark zu reflektieren, zum anderen ist die Streuung der Strahlung, die in die Schädeldecke eindringt, aufgrund der schwammartigen Strukturen im Inneren des Schädelknochens sehr hoch (vgl. Abb. 79 (c)). Ein Signal aus tieferliegenden Knochenschichten kann nur in seltenen Fällen detektiert werden. Eine quantitative Auswertung der Dicke des Schädelknochens ist daher nicht möglich. Ähnliche Ergebnisse haben sich auch bei Messungen an Affenschädeln gezeigt, deren Ergebnisse hier nicht dargestellt sind. Knochengewebe kann somit kaum von THz-Strahlung durchdrungen werden und stellt eine Limitierung für die THz-Tomographie dar. Nichtsdestotrotz fällt auf, dass in dem Bereich des Schädels, in dem die Ausdünnung lokalisiert ist, der Reflexionsgrad der Oberfläche deutlich erhöht ist (vgl. Abb. 80 (b)). Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass bei der Ausdünnung keine schwam-

martigen Strukturen des Schädelknochens existieren. Nach der homogenen oberen Schicht des Knochens schließt sich direkt Luft an. Durch äußere Gewalteinwirkungen könnte sich die Knochenstruktur an der Stelle der Ausdünnung zudem verdichtet haben. Aufgrund dessen ist der Reflexionsgrad im Vergleich zu intakten Knochenregionen, in denen zunächst eine Schicht mit porösem Knochenmaterial folgt, erhöht. Insofern ist ein indirekter Nachweis der Fehlstelle dennoch möglich.

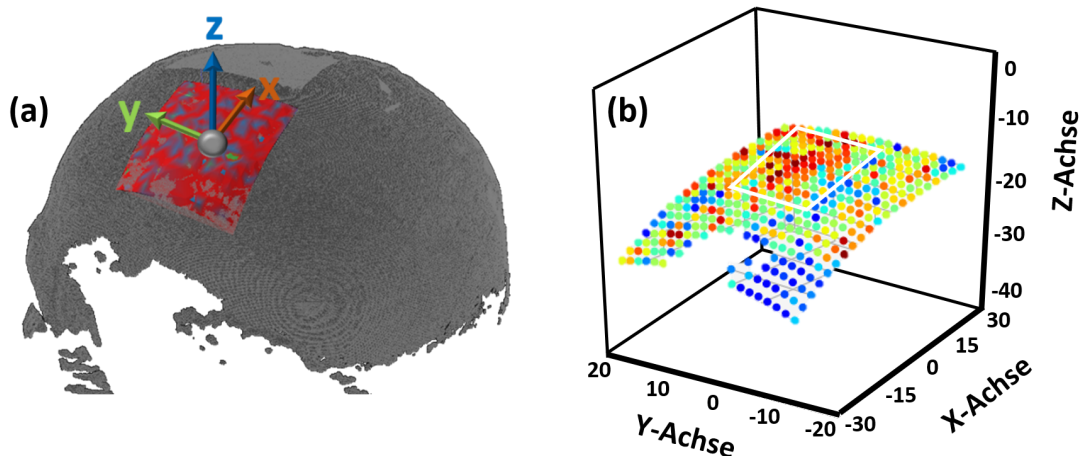


Abbildung 80: (a) Oberflächenscan mit Messbereich, (b) Dreidimensionale Auswertung der Peak-to-Peak-Amplitude des an der Oberfläche reflektierten THz-Pulses.

Neben den verschiedenen Gewebestrukturen ist ebenfalls die Propagation von THz-Strahlung in Bandagen von Interesse. Viele Mumien wurden zusätzlich zur Einbalsamierung noch bandagiert. Eine bandagierte Probe, die für Messungen zur Verfügung stand, besteht aus Teilen einer Hand einer peruanischen Kindermumie (vgl. Abb. 81). Die Messungen ergeben hier eine Vielzahl an Schichten, die auf die Bandagen hindeuten. Es zeichnen sich aber auch Hohlräume zwischen den einzelnen Lagen ab, die aufgrund der Alterung entstanden sein können.

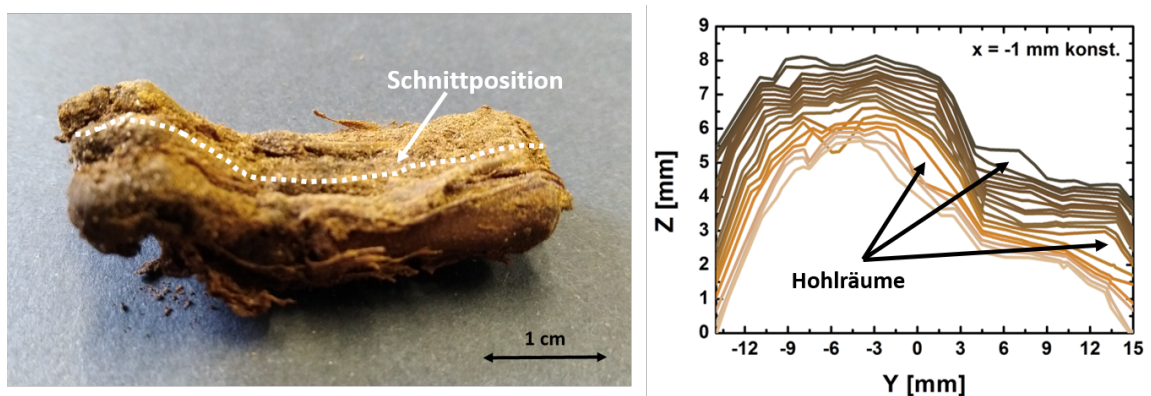


Abbildung 81: (a) Foto der vermessenen Kinderhand, (b) Oberflächenscan mit Messbereich und (c) Querschnitt bei  $x = 0$  mm.

Als Fazit kann festgehalten werden, dass Hautschichten oder Bandagen von THz-Strahlung durchdrungen werden können und eine tomographische Rekonstruktion mit Hilfe der Roboterbasierten THz-Daten möglich ist. Tieferliegende, sehr inhomogene oder poröse Strukturen wie Knochengewebe können hingegen nicht aufgelöst werden.



## 7 Terahertztomographie an Kunstobjekten

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit ist die Anwendung des Roboter-THz-Systems an Kunstobjekten. Auch hier ist die Schichtgeometrie von Interesse, um beispielsweise kunsttechnische Rückschlüsse ziehen zu können oder dem Restaurator bei der Wiederherstellung eines Kunstwerkes zu unterstützen. Das vorliegende Kapitel soll einen kurzen Überblick über die exemplarische Anwendung des entwickelten Robotersystems an Kunst- und artverwandten Objekten geben.

### 7.1 Fraßschäden an Holz

Kunstobjekte können sich aus vielen verschiedenen Materialien zusammensetzen. Allein bei den Trägerschichten existieren viele verschiedene Varianten wie bereits in Kapitel 2.1.2 beschrieben wurde. Bei den Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, wurde ein hölzerner Bildträger verwendet. In einer ersten Untersuchung wurde sich daher mit einer rein hölzernen Probe befasst, an welcher Fraßschäden festgestellt werden sollten. Diese Thematik ist nicht nur in der Kunstrestaurierung von Interesse, sondern auch in der Forstwirtschaft. Die untersuchten Proben stammen daher aus einem forstwirtschaftlichen Projekt (Fairlog2020 - Gepulste THz-Strahlung zur ressourcenschonenden Untersuchung von Qualitätsmerkmalen des Stammholzes), in welchem mit Hilfe von THz-Strahlung Fraßschäden unterhalb der Baumrinde untersucht werden sollen. Hierbei geht es primär darum, herauszufinden, ob ein Baum befallen ist oder nicht. Obwohl die Proben vergleichsweise wenig gekrümmte Oberflächen aufweisen, zeigte sich im Rahmen dieses Projektes, dass mit der konventionellen zweidimensionalen THz-Bildgebung keine Erfolge erzielt werden können, da das am Holz reflektierte Signal zu gering ausfällt, um es unter einem leicht falschen Winkel zu detektieren. Eine Nachführung des THz-Sensors entsprechend der Oberfläche konnte bei verschiedenen Proben das Problem lösen.

Die untersuchten Proben sind in Abbildung 82 dargestellt. Bei den Proben, die für das Projekt ursprünglich angedacht waren, handelt es sich um Fichten, wobei eine Probe von Borkenkäfern befallen ist (vgl. Abb. 82 (a)) und die andere Probe nicht (vgl. Abb. 82 (b)). Zwischen dem Fällen der Bäume und der Vermessung lagen 11 Monate, wodurch sich der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes zum Zeitpunkt der Messung deutlich reduziert hatte, es allerdings noch nicht zu einer Ablösung der Rinde gekommen ist, da die Proben zwischenzeitlich eingefroren wurden. Äußerlich lassen sich nur sehr kleine Ausfluglöcher der Insekten an der Oberfläche erkennen.

Anhand der tomographischen Auswertung der THz-Daten, dargestellt in Abbildung 83, kann auch der Zustand unterhalb der Oberfläche beurteilt werden. In diesem Fall bietet die Ansicht der Kontourlinien der Schichten die optimale Darstellung der THz-Daten (vgl. Abb. 83(c), (d)). Aufgrund der vielschichtigen Natur des Holzes ergibt sich bei den THz-Messungen eine Vielzahl an Reflexen. Um die Daten zu verifizieren, wurden am Bernhardt Krankenhaus in Hildesheim CT-Aufnahmen der Proben angefertigt (vgl. Abb.83(e), (f)). Die Auflösung des CTs (Philips

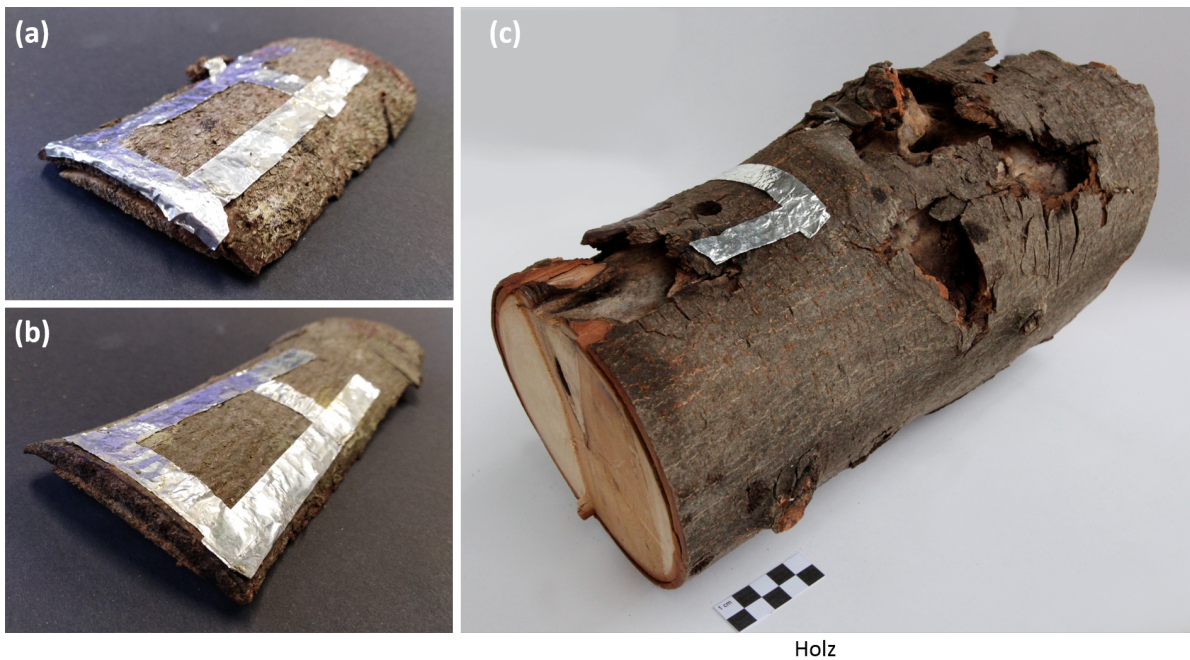


Abbildung 82: Fotos der untersuchten Holzproben: (a) Fichte mit Insektenbefall , (b) Fichte ohne Insektenbefall und (c) Buche mit Insektenbefall (Foto: Kirsti Krügener).

multidetector spiral CT type Brilliance 64) liegt deutlich unter der der THz-Daten. Dennoch kann eine Übereinstimmung in der grundlegenden Holzstruktur ausgemacht werden, sodass von der Korrektheit der THz-Rekonstruktion ausgegangen werden kann. Vergleicht man die Ergebnisse der befallenen und unbefallenen Probe miteinander, so kann in der CT-Aufnahme kein Unterschied ausgemacht werden. Betrachtet man hingegen die THz-Daten, so ist erkennbar, dass im Falle der unbefallenen Probe, die Schichten deutlich homogener verlaufen, wohingegen sich bei der befallenen Probe deutlich mehr Hohlräume zwischen den Schichten ausgebildet haben. Anhand der THz-Messungen scheint daher eine Unterscheidung zwischen befallenen und nicht befallenen Holzproben möglich zu sein.

Um die These genauer zu untersuchen und eventuelle Grenzen des Systems auszuloten, wurde eine weitere Holzprobe mit anderen Fraßschäden untersucht (vgl. Abb. 82 (c)). Hierbei handelt es sich um einen Roskastanienstamm, der von einem asiatischen Laubholzbockkäfer befallen wurde, der besonders große Fraßgänge mit Durchmessern von bis zu 2 cm erzeugt. Diese Fraßgänge liegen nicht zwangsläufig direkt unterhalb der Oberfläche. Zudem kommt es nicht zu einer kleinteiligen Zerstörung der Holzstruktur wie bei den zuvor untersuchten Proben. Die THz-Messungen, dargestellt in Abbildung 84, lassen in diesem Fall nur eine oberflächliche Detektion der Schäden zu, die sich nahe den Ausfluglöchern befinden. Tiefere Fraßgänge können durch die THz-Messung nicht erfasst werden.

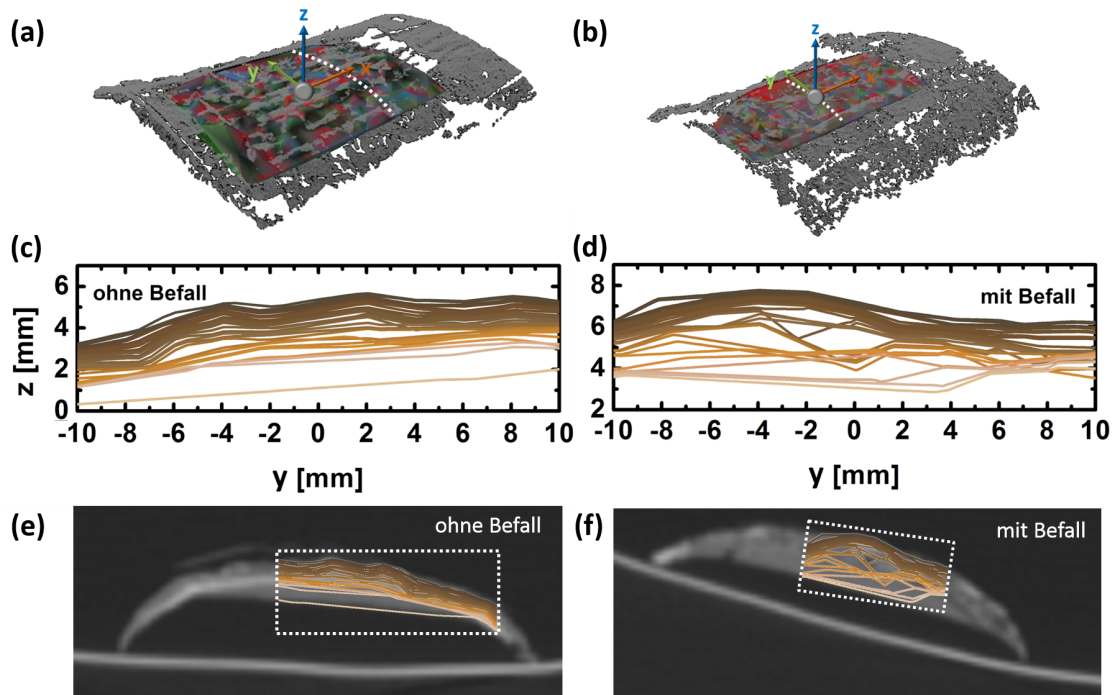


Abbildung 83: (a), (b) Oberflächenscans der Fichtenproben mit gekennzeichneten Messbereich und Schnittposition (weiße gestrichelte Linie) | (c), (d) Konturlinien der anhand der THz-Daten ausgewerteten Schichten und (e), (f) Vergleich der THz-Daten mit CT-Aufnahmen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Roboter-basierte THz-System für die Untersuchung von Fraßschäden, die sich direkt unterhalb der Rinde befinden, geeignet ist. Tieferliegende Schäden können jedoch nicht erfasst werden. Für die meisten Anwendungen an Kunstobjekten ist die vorhandene Eindringtiefe jedoch ausreichend. So hängt beispielsweise die Stabilität einer Malschicht maßgeblich von der Oberflächenstruktur des zugrunde liegenden Trägermaterials ab. Kann dieses untersucht werden, stehen dem Restaurator wertvolle Informationen für folgende Behandlungsschritte zur Verfügung.

## 7.2 Überprüfung der Festigung von fraßgeschädigtem Holz mit THz-Messungen

Neben der Feststellung des Ist-Zustandes eines Objektes durch THz-Tomographie, wurde in dieser Arbeit auch die Anwendung der THz-Technik bei den darauffolgenden Behandlungsschritten untersucht.

Für diesen Zweck wurden spezielle Testkörper an der Technischen Hochschule in Köln hergestellt, die typische Schäden an Kunstobjekten simulieren. Die Testkörper haben den Vorteil, dass verschiedene Festigungsmethoden überprüft und auch bewusst falsche Behandlungsschritte durchgeführt werden können, um den Einfluss in THz-Messungen zu untersuchen. Der Auf-

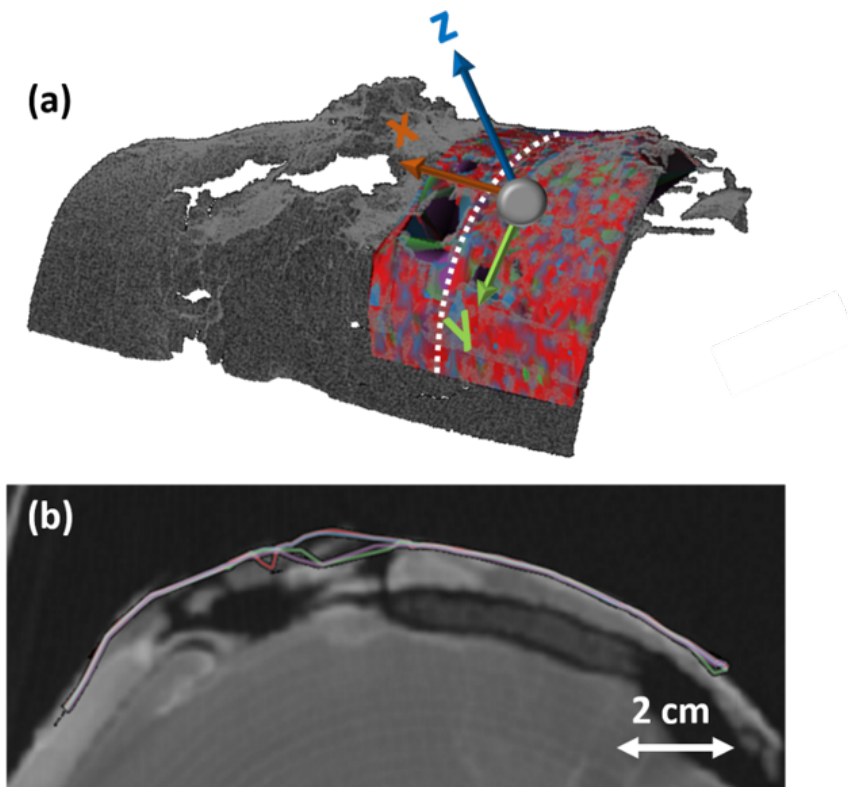


Abbildung 84: (a) Oberflächenscan des Buchenstamms mit gekennzeichneten Messbereich und Schnittposition (weiße gestrichelte Linie), (b) Kontourlinien der anhand der THz-Daten ausgewerteten Schichten im Vergleich zu CT-Aufnahmen.

bau der Testkörper, dargestellt in Abbildung 85, folgt einem festen Schema, sodass Vergleiche zwischen den verschiedenen Messungen und Festigungsmethoden möglich sind. Als Substrat wurde ein Kiefernholzbrett verwendet, in welches mit einer Säge künstlich Fraßgang-ähnliche Strukturen eingebracht wurden. Die Gänge folgen der Wuchsrichtung des Holzes, wie es auch bei natürlichem Insektenbefall vorkommt, und haben eine Breite von ca. 1,5 mm. Auf diesem Substrat wurde zunächst eine Grundierung aufgebracht, wobei bewusst Lufteinschlüsse zwischen Substrat und Grundierung erzeugt wurden. Auf der Grundierung befindet sich eine Malschicht aus verschiedenen Pigmenten, um den Reflexionsgrad der THz-Strahlung bei unterschiedlichen Farbtönen mit einzubeziehen. In der Malschicht wurden zudem künstlich Sprünge erzeugt. In Abbildung 86 (a) und (d) sind Fotos eines Testkörpers vor bzw. nach der Festigung gezeigt.

Die THz-Messungen an den Testkörpern erfolgten in Reflexion. Da die Proben eine überwiegend glatte Oberfläche aufwiesen, wurde in diesem Fall eine zweidimensionale Bildgebung verwendet. Um den Effekt der Festigung im Nachhinein beurteilen zu können, wurden sowohl Messungen vor als auch nach der Festigung durchgeführt. Anhand des äußerlichen Erscheinungsbildes lässt sich kein Unterschied zwischen dem Vor- und Nachzustand ausmachen. Auch

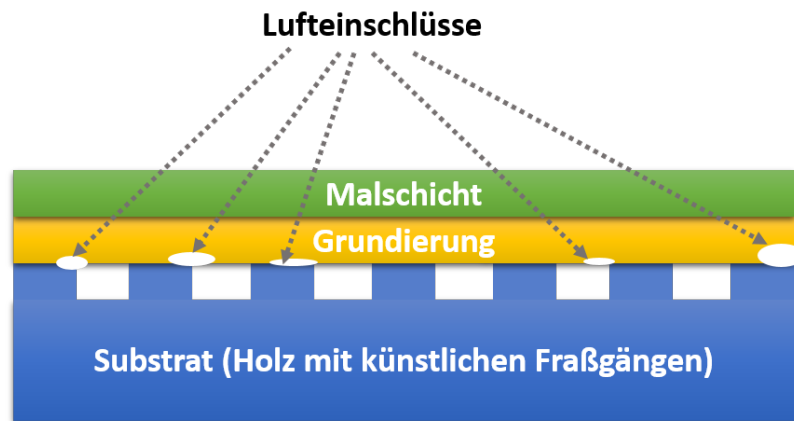


Abbildung 85: Schematischer Schichtaufbau der untersuchten Testkörper.

Röntgenaufnahmen der Proben, welche zu Vergleichszwecken angefertigt wurden, zeigen keine Unterschiede (vgl. Abb. 86 (b), (e)). Die THz-Bilder (vgl. Abb. 86 (c), (f)), in welchen die Peak-to-Peak-Amplitude des an der Oberfläche reflektierten Pulses aufgetragen ist, zeigen hingegen einen deutlichen Unterschied. Während im Vorzustand die Fraßgänge noch deutlich erkennbar sind, können im Nachzustand keine Fraßgänge mehr ausgemacht werden. Zudem hat sich aufgrund der ebenfalls erfolgten Malschichtfestigung der Reflexionsgrad der Probe an manchen Stellen verändert.

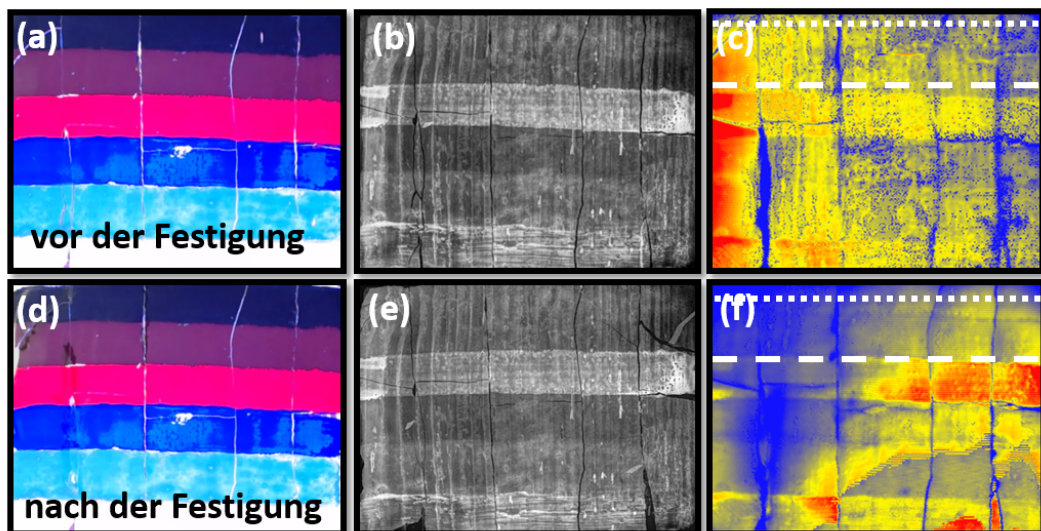


Abbildung 86: (a)-(c): Von links nach rechts: Foto, Röntgenaufnahme und THz-Peak-to-Peak-Image vor der Festigung, (d)-(f) nach der Festigung.

Einen genaueren Einblick erhält man durch die Analyse der Querschnitte der THz-Daten, dargestellt in Abbildung 87 (a) und (b). In der rechten Hälfte von Abbildung 87 (a) ist erkennbar, dass sich der Hohlraum um den dort vorhandenen Fraßgang durch die Festigung noch vergrößert.

bert hat. Äußerlich ist diese Schädigung durch die Festigung nicht zu erkennen. In Abbildung 87 (b) hingegen ist ein Erfolg der Festigung auszumachen. Die im rechten Teil der Abbildung gezeigten Hohlräume konnten hier durch die Festigung verkleinert werden.

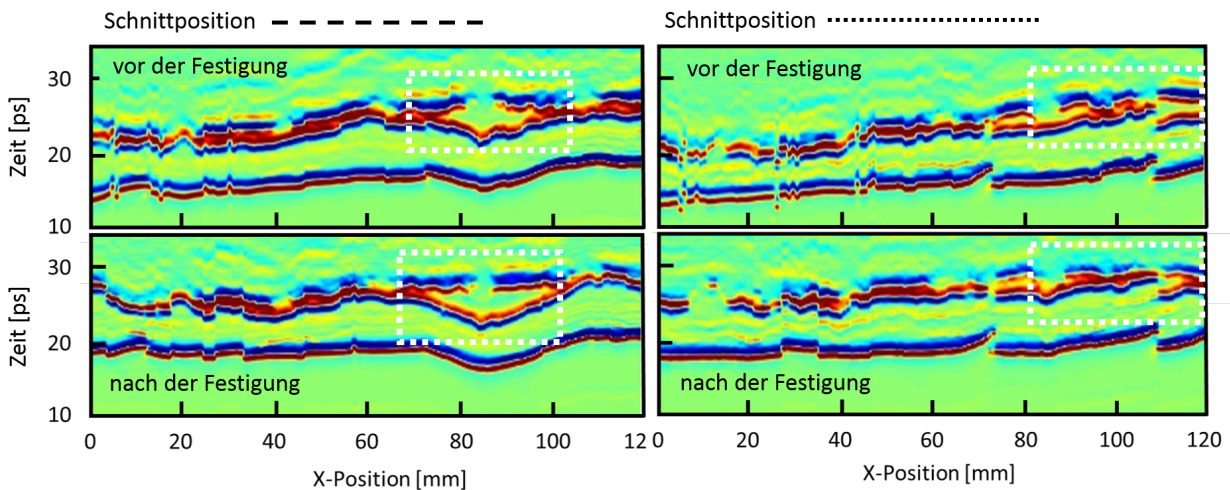


Abbildung 87: Querschnitte der THz-Daten an den in Abbildung 86(c) und (c) markierten Positionen.

Insgesamt wurden 12 Testkörper untersucht. Die hier gezeigten Ergebnisse stehen nur für die exemplarische Auswertung der Daten. Die Analyse aller untersuchten Testkörper zeigte jedoch ein einheitliches Bild. Der Einfluss der Festigung konnte bei allen erprobten Behandlungsschritten sicher durch die THz-Messung nachgewiesen werden [143].

### 7.3 Putto

Nachdem in den letzten zwei Kapiteln das Potential der THz-Messungen bei kunstrestauratorischen Fragestellungen aufgezeigt wurde, soll in einem abschließenden Schritt ein reales Kunstobjekt hinsichtlich des Schichtaufbaus und möglicher Fraßschäden untersucht werden. Um die Vorteile des Robotersystems gewinnbringend einsetzen zu können, wurde eine Probe mit einer komplexen Oberfläche ausgewählt. Bei der Probe handelt es sich um einen Putto, eine Skulptur in Kindergestalt. Die Probe wurde durch das Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft der Technischen Hochschule in Köln zur Verfügung gestellt. Der Putto besteht aus Holz und verfügt über eine Vielzahl an weiteren Schichten, die teilweise deutliche Schäden und auch Ausfluglöcher von Insekten aufweisen (vgl. Abb. 88).

Der Putto wurde im Gesichtsbereich untersucht, da hier sowohl augenscheinlich intakte Bereiche als auch deutlich geschädigte Stellen vorhanden sind (vgl. Abb. 89 (a), (b)). Der Messbereich erstreckt sich insgesamt über 50 x 50 mm und setzt sich aus 492 Punkten zusammen. Der Abstand der Punkte beträgt 2 mm. Von den ursprünglich 625 erstellten Messpunkten konnten mit Hilfe des parallelen Messkopfes und aufgrund der Probengeometrie 79 % vermessen



Abbildung 88: Foto des untersuchten Putto.

werden. Vorangegangene Messungen mit dem Strahlteilersensor führten zu einer geringeren Messpunktdichte. Nachfolgend sind daher die Ergebnisse für die Messung mit dem parallelen THz-Sensor dargestellt. In Abbildung 89 (c) bis (f) sind Querschnitte für konstante  $y$ -Werte gezeigt. Die Schnittpositionen wurden so gewählt, dass augenscheinlich interessante Bereiche näher untersucht wurden. So befinden sich drei der vier Schnitte in der Nähe von äußerlich sichtbaren Ausflüglöchern der Insekten, um die tiefer liegenden Strukturen zu untersuchen. Die Position der Ausflüglöcher an der Oberfläche wird durch die Pfeile in Abbildung 89 markiert. Da der Abstand der Messpunkte bei 2 mm liegt, ist es nicht möglich die Einflüglöcher konkret aufzulösen. Die Strukturen unterhalb dieser Ausflüglöcher können jedoch analysiert werden.

In Abbildung 89 (c) und (d) sind die Schnitte bei zwei Ausflüglöchern im Bereich der Nase des Putto gezeigt ( $y = -17$  mm und  $y = -12$  mm). An der Position des Einflüglöches zeigt sich bereits unterhalb der ersten Schicht eine deutliche Hohlraumbildung innerhalb der Mal- und Grundierungsschichten. Die Hohlraumbildung ist zunächst im Bereich des Einflüglöches deutlich erhöht. Betrachtet man die zugrundeliegende Holzschicht, ist jedoch auch eine deutliche Ausbreitung der Fraßschäden unterhalb der anderen vergleichsweise intakten Malschichten zu erkennen. In Abbildung 89 (e) ist ein Querschnitt ( $y = 4$  mm) in einem vermeintlich intakten Bereich der Stirn des Putto gezeigt. Die THz-Daten zeigen, dass sich innerhalb der Mal- und Grundierungsschichten in der Tat nur wenige sehr kleine Hohlräume ausgebildet haben. In

dem Bereich zwischen  $x = -25$  mm und  $x = -15$  mm ist zudem die Holzschicht ebenfalls nicht geschädigt. Zwischen  $x = -15$  mm und  $x = 20$  mm zeigen sich jedoch deutliche Schäden an der Holzschicht, die vermutlich ebenfalls auf den Insektenbefall zurückzuführen sind.

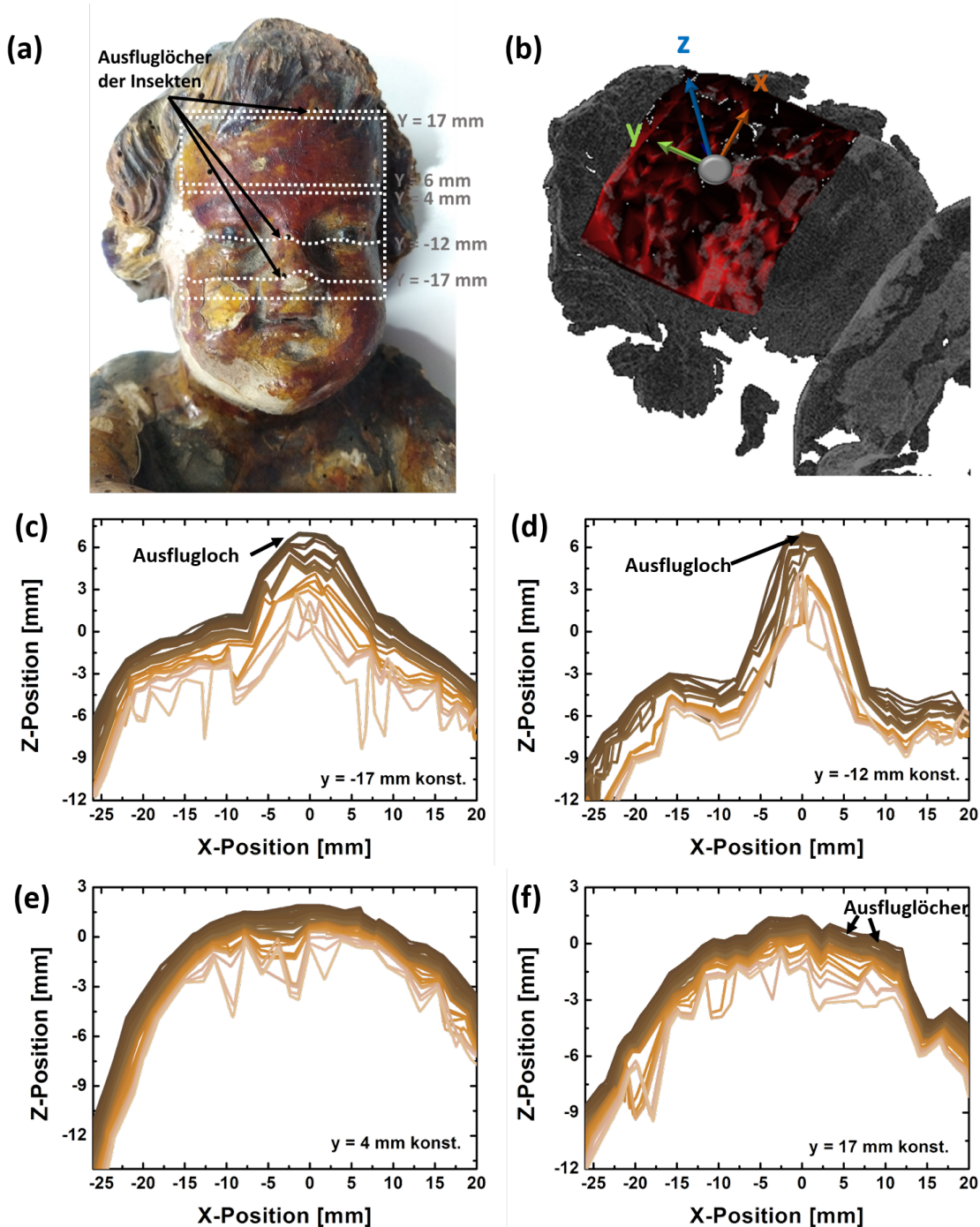


Abbildung 89: (a) Nahaufnahme des Messbereich mit gekennzeichneten Schnittpositionen, (b) 3D-Scan des Puttos mit markiertem Messbereich und der Probenorientierung, (c)-(f) Querschnitte anhand der THz-Zeitbereichsdaten.



In Abbildung 89 (f) ist wiederum ein Schnitt in der Nähe von zwei Ausfluglöchern im Bereich des Haaransatzes des Puttos gezeigt. Auch hier befinden sich Hohlräume innerhalb der obersten Schichten nahe der Ausfluglöcher und die tief liegende Holzschicht offenbart ebenfalls deutliche strukturelle Schäden in der gesamten Ausdehnung des Messbereiches. Die Mal- und Grundierungsschichten fernab der Ausfluglöcher erscheinen jedoch intakt.

Um sich neben den Fraßschäden am Holz auch einen Überblick über den Schichtaufbau der Mal- und Grundierungsschichten zu verschaffen, wurde ein zusätzlicher Schnitt bei  $y = 6$  mm durchgeführt. Dieser befindet sich in einem Bereich, der äußerlich keine Schäden in den obersten Schichten vermuten lässt. Beschränkt man die Auswertung des Querschnittes auf nur einen Millimeter unterhalb der Oberfläche, so können drei Schichten ausgemacht werden (vgl. Abb. 90 (a)). Um diese Schichten zu verifizieren, wurde an der TH Köln eine Probe des Putto in der Nähe des Querschnitts genommen und ein Querschliff angefertigt, der mit einem Auflichtmikroskop untersucht wurde. Der Querschliff zeigt ebenfalls drei Schichten in diesem Bereich, wobei die oberste Schicht sehr dünn ist und die dritte Schicht den größten Anteil ausmacht (vgl. Abb. 90 (b)). Der Querschnitt der THz-Daten zeigt ähnliche Anteile der drei Schichten. Der Schichtverlauf kann an dieser Stelle nicht verglichen werden, da die Probe nur punktuell entnommen wurde, um das Kunstobjekt nicht weiter zu schädigen.

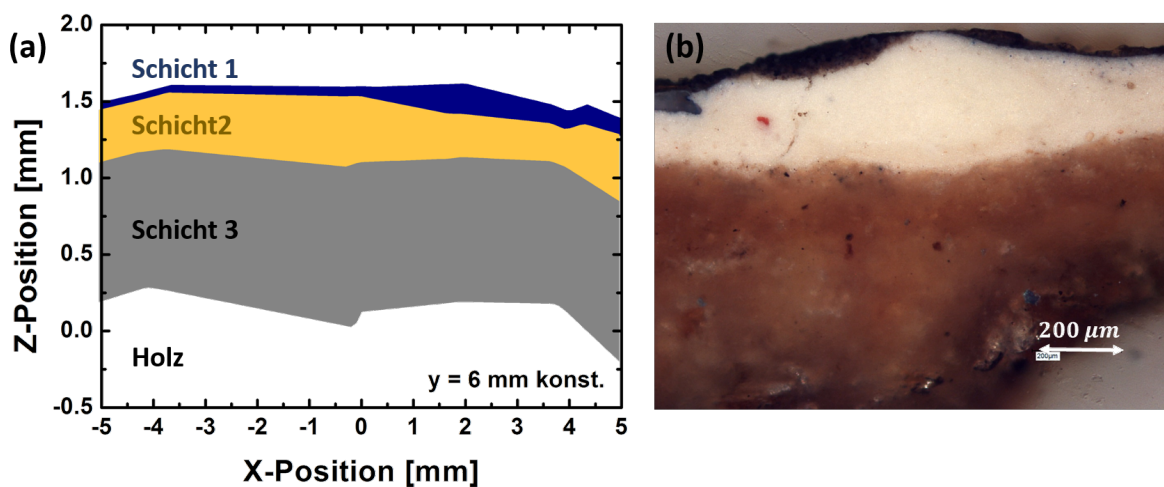


Abbildung 90: Schichtaufbau der obersten Mal- und Grundierungsschichten des Putto: (a) Querschnitt anhand der THz-Daten, (b) Querschliff unter Auflichtmikroskop nach Probenentnahme

Anhand des untersuchten Puttos kann das Potential der Roboter-basierten THz-Tomographie zusammengefasst werden. Es ist möglich, sowohl den obersten Schichtaufbau der Mal- und Grundierungsschichten zu analysieren als auch Fraßschäden an der zugrundeliegenden Holzschicht. Beide Bereiche geben dem Restaurator wichtige Hinweise für folgende Restaurierungsschritte, die ebenfalls mit THz-Messungen überwacht werden können.



## 8 Fazit und Ausblick

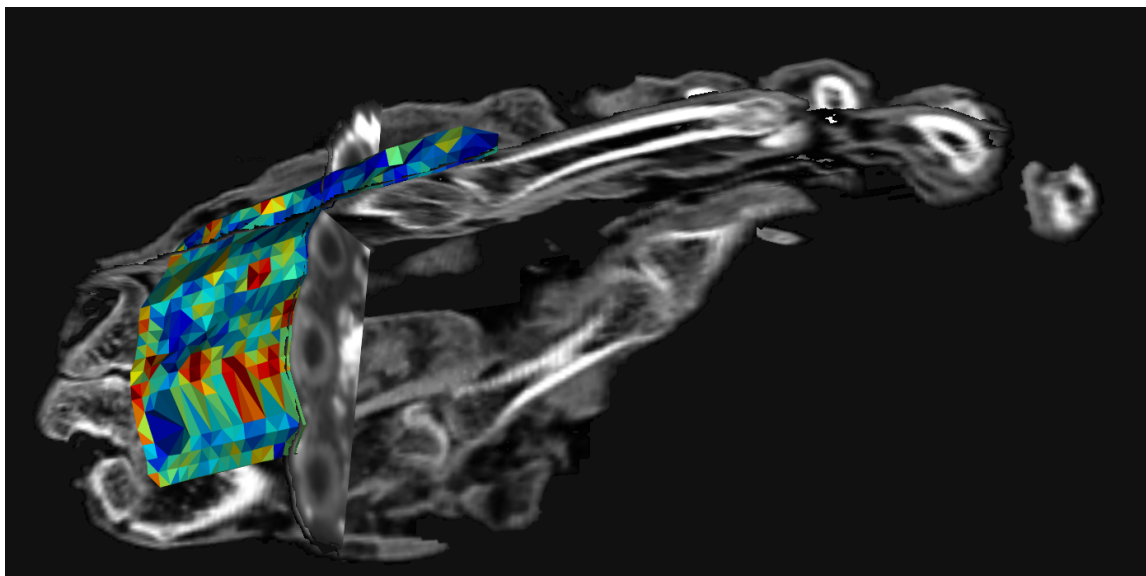
Der Einsatz der THz-Strahlung zur nicht-invasiven bildgebenden Untersuchung von Objekten war bisher, trotz des großen Potentials dieses Frequenzbereichs, auf planare Objekte begrenzt. Die in dieser Arbeit erfolgte Nachführung des THz-Sensors mit Hilfe eines Roboterarmes bei bildgebenden Messungen in Reflexionsgeometrie stellt somit eine große Erweiterung der Anwendungsgebiete der THz-Strahlung dar. Sowohl in der Industrie als auch im nicht-industriellen Umfeld ergeben sich bei der Untersuchung oder Qualitätskontrolle von Objekten viele Fragestellungen, zu dessen Beantwortung THz-Zeitbereichsmessungen wertvolle Informationen beitragen können.

Die Anwendungsschwerpunkte in dieser Arbeit lagen auf der Untersuchung von historischen Menschenfunden und Kunstobjekten. Insbesondere die Untersuchung von historischen Menschenfunden war in der Vergangenheit mit konventionellen zweidimensionalen Verfahrenseinheiten nur schwer möglich. Der Großteil wichtiger Informationen konnte auf diesem Weg nicht ermittelt werden. Dabei bieten historische Menschenfunde aufgrund ihrer vielschichtigen Struktur und ihrer gleichzeitigen Wasserarmut ein hervorragendes Anwendungsgebiet für THz-Untersuchungen. Durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Messverfahren wurden erstmals detaillierte THz-Studien an historischen Menschenfunden ermöglicht. Hierbei stellte sich heraus, dass die tomographische Rekonstruktion anhand der THz-Daten die obersten Schichten einer Probe korrekt wiedergibt. Die Tiefenauflösung ist dabei höher als die eines gewöhnlichen Computertomographen wie er heutzutage im klinischen Alltag eingesetzt wird. Während bei einer konventionellen CT-Aufnahme die obersten Haut- und Muskelschichten lediglich als ein kontrastarmer weißer Bereich erscheinen, können anhand der THz-Daten deutliche Schichten identifiziert werden. Die Auflösung ist vergleichbar mit der eines Mikro-CT-Scanners. Diese vergleichsweise neuen Geräte sind allerdings deutlich in ihrer maximalen Probengröße beschränkt. Die Vermessung einzelner Gliedmaßen wie beispielsweise eine Hand oder ein Fuß sind in diesem Rahmen möglich, größere Proben oder gar vollständige historische Menschenfunde können allerdings zurzeit noch nicht mit einem Mikro-CT-Gerät untersucht werden. Hinzu kommen bei Röntgen-basierten Verfahren die arbeitsschutztechnischen Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, um den Forscher entsprechend zu schützen. THz-Strahlung ist aufgrund der geringen Energien in diesem Frequenzbereich nicht ionisierend, sodass keine zusätzlichen Arbeitsschutzmaßnahmen notwendig sind. Der benötigte Laser und die von ihm ausgehende Strahlung zur Anregung der photoleitenden Antennen in einem THz-Zeitbereichsspektrometer kann heutzutage sicher in einem Gehäuse verbaut bzw. in Glasfasern zu den Antennen geführt werden. Die modernen THz-Systeme sind zudem sehr kompakt gehalten und sind gegenüber Temperaturschwankungen im Vergleich zu älteren Systemen sehr stabil. Der verwendete Roboterarm sowie die entwickelten THz-Sensoren sind ebenfalls kompakt gehalten und können bei Bedarf an die Anforderungen bestimmter Schutzklassen wie Staub oder Wassereinwirkung angepasst werden. Das Roboter-basierte THz-System kann daher auch bei Feldversuchen außerhalb des

---

Labors, etwa an Ausgrabungsstätten oder in Museen, eingesetzt werden. Dies erspart einen oft komplizierten oder nicht möglichen Transport der wertvollen Menschenfunde. Röntgenbasierte Geräte können hingegen bisher nur sehr begrenzt in Feldversuchen eingesetzt werden. Es existieren transportable Röntgenscanner, deren Auflösung allerdings deutlich hinter der eines konventionellen Röntgengerätes liegt [2].

Die Untersuchungen in dieser Arbeit haben allerdings auch gezeigt, dass die THz-Messungen keinen vollwertigen Ersatz für die bisher etablierten Untersuchungsverfahren bieten. Die Eindringtiefe der THz-Strahlung in verschiedene Gewebearten ist stark begrenzt. Insbesondere das Durchdringen von Knochengewebe hat sich als nahezu unmöglich erwiesen. Insofern bringt die Kombination aller zur Verfügung stehenden Messverfahren den maximal möglichen Erkenntnisgewinn. In Abbildung 91 ist ein Beispiel für so eine mögliche Kombination aus CT- (transversale Ebene), MRT (sagittale und coronale Ebene)- und THz-Aufnahmen gezeigt. In diesem Fall ist nur die Peak-to-Peak-Amplitude des THz-Reflexes der Oberfläche mit den anderen Daten kombiniert. Es wäre aber auch eine Kombination der Schichten denkbar, wie sie in Kapitel 6 vorgestellt wurde. Dennoch ist bereits hier erkenntlich, dass z.B. an den Stellen, an denen unterhalb der Haut direkt Knochengewebe folgt, die Reflexion der THz-Strahlung deutlich erhöht ist. Die THz-Untersuchungen bieten somit einen zusätzlichen Mehrwert, der bisher nicht zur Verfügung stand. Inwiefern dieser Mehrwert zu einem Erkenntnisgewinn in der Anthropologie beitragen kann, muss in weiteren Studien noch genauer analysiert werden.



*Abbildung 91: Kombination von CT-, MRT- und THz-Aufnahmen der in Kapitel 6 untersuchten Mumi-ehand. Die CT-Daten sind in der transversalen Ebene gezeigt, die MRT-Daten in der sagittalen und coronalen Ebene, die THz-Daten farbig codiert auf der Oberfläche. Die MRT-Aufnahmen und die Fusion aller Datensätze erfolgte an der Universität Freiburg.*

Für die Interpretation dieser neuartigen Daten bedarf es in Zukunft in jedem Fall weiterer verbesserter Algorithmen, die beispielsweise automatisiert eine korrekte Schichtzuordnung vornehmen. Anhand der in dieser Arbeit angelegten Datenbank von Einbalsamierungsmaterialien und Gewebearten wäre auch eine gleichzeitige, spektroskopische Analyse der Messdaten in Zukunft denkbar, um Aussagen über die in der Probe vorkommenden Materialien treffen zu können. Eine Erweiterung der Datenbank insbesondere hinsichtlich der im Menschen vorkommenden Gewebearten ist hierfür allerdings unerlässlich. In der Hauptkomponentenanalyse der untersuchten Einbalsamierungsmaterialien und Gewebearten deutet sich jedoch bereits jetzt schon ein großes Identifikationspotential an.

Auf dem Gebiet der Kunsthistorik wurden bereits im Vorfeld dieser Arbeit viele THz-Studien an diversen Gemälden durchgeführt. In dieser Arbeit wurde jedoch erstmals ein dreidimensionales Kunstobjekt hinsichtlich seines Schichtaufbaus charakterisiert. Dabei zeigte sich, dass die Mal- und Grundierungsschichten korrekt rekonstruiert werden können. Zusätzliche Untersuchungen zeigten, dass zudem der Zustand des Holzsubstrates analysiert werden kann. So können von außen nicht sichtbare Fraßschäden am Holz detektiert und eine entsprechende Festigung des Substrates eingeleitet werden. Dieser Festigungsprozess und auch andere restauratorische Behandlungsschritte können mit THz-Messungen kontrolliert werden. Aufgrund der Wassersensitivität der THz-Strahlung ist auch eine Live-Überwachung des Eindringens des Festigers in Zukunft denkbar. Der Roboterarm bietet die Möglichkeit, innerhalb kürzester Zeit mehrere vom Benutzer definierte Messpunkte anzufahren, um zu überprüfen, ob das Festigungsmittel bereits bis zu diesen Punkten vorgedrungen ist. So kann der Festigungsprozess genau auf das jeweilige Objekt abgestimmt werden und damit so minimal invasiv wie möglich vorgegangen werden. Gleichzeitig kann aber auch sichergestellt werden, dass nicht zu wenig gefestigt wird und es infolgedessen zu einem Voranschreiten der Schäden am Objekt kommt. Zukünftig kann das entwickelte Messverfahren somit auch Restauratoren in ihrer Arbeit unterstützen, sei es hinsichtlich einer Untersuchung des Ist-Zustandes oder einer Unterstützung bei der Restaurierung. Dabei sind der Form der Objekte nur wenige Grenzen gesetzt. Diese Grenzen könnten durch eine weitere Minimierung des THz-Sensors aufgebrochen werden. So könnte beispielsweise in Zukunft der Roboterarm mit dem am Heinrich-Hertz-Institut in Berlin entwickelten THz-Transceiver kombiniert werden [79]. In diesem Fall wäre nur noch ein Antennengehäuse sowie entsprechende Kollimierungs- und Fokussierungsoptik vorhanden. Die Optiken zur THz-Strahlführung können jedoch deutlich minimalistischer gestaltet werden, da die Strahlung denselben Weg zur Probe hin und zurück nimmt.

Die Messergebnisse hinsichtlich des Insektenbefalls an Holz können auch bei forstwirtschaftlichen Fragestellungen zur Klärung dieser beitragen. In der Holzwirtschaft ist es zurzeit üblich, größere Bereiche eines Waldes zu roden, wenn entsprechende Insekten in diesem Waldgebiet gefunden wurden. Eine genaue Analyse, welcher Baum in welchem Maße betroffen ist, ist heutzutage noch nicht möglich. Ein Messverfahren, welches diesen Insektenbefall zunächst

---

nicht-invasiv für jeden Baum ermitteln könnte, würde daher zur ressourcenschonenden Waldbewirtschaftung und damit zu einer positiven Entwicklung des Klimas beitragen. Insbesondere die durch die Klimaveränderungen und Globalisierung herbeigeführten Insektenwanderungen stellen neue Herausforderungen für die Bäume dar, die sich in Zukunft voraussichtlich zuspitzen werden und daher neuartige Messverfahren erfordern.

Das entwickelte Messverfahren könnte aber auch in einer industriellen Umgebung, beispielsweise bei der Qualitätssicherung, eingesetzt werden. So gibt es zum Beispiel erste Studien, in denen die Lackschichtdicken von Autos mit THz-Strahlung untersucht werden [86]. Die Möglichkeit einer Nachführung des THz-Sensors entsprechend der Autoform würde das Potential dieser Arbeiten deutlich steigern. Generell kann das System überall dort eingesetzt werden, wo Freiformobjekte, insbesondere aus Kunststoff, einer Untersuchung bedürfen. Die Entwicklung neuer und schnellerer THz-Messverfahren wie beispielsweise ECOPS oder ASOPS wird zudem in Zukunft die für diese Untersuchungen benötigten Geschwindigkeiten bieten. Ein Austauschen des im Roboter-basierten Systems verwendeten THz-Spektrometers ist dabei problemlos möglich. Der Ablauf des entwickelten Messverfahrens müsste allerdings unter Umständen angepasst werden. So würde vermutlich die Aufnahme der Oberfläche durch einen 3D-Scanner und die sich anschließende Umrechnung zu viel Zeit erfordern. In der Industrie soll jedoch häufig nur eine bestimmte Form immer wieder durch den gleichen Sensor vermessen werden. Man könnte dem System also einen festen Pfad vorgeben. Aber auch für die instantane Nachführung des Sensors bei beliebigen Objekten können Lösungen gefunden werden. Beispielsweise wäre eine Nachführung direkt anhand der THz-Daten denkbar. Da die Position des ersten THz-Reflexes nicht variieren soll, könnte mit Hilfe dieses Parameters eine Nachführung des THz-Sensors erfolgen.

Das entwickelte Roboter-basierte THz-Zeitbereichsspektrometer bietet insgesamt ein hohes Potential, die THz-Technik neuen Anwendungsgebieten zugänglich zu machen. Durch die Weiterentwicklung der Positionierung und der Auswertung der Daten kann das System in Zukunft in vielen Bereichen gewinnbringend eingesetzt werden.

## 9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Roboter-basiertes THz-System entwickelt, welches einen THz-Sensor relativ zu einer beliebig geformten Probe verfährt. THz-Messungen können in Transmission oder Reflexion ausgeführt werden. Häufig ist jedoch die Absorption einer Probe zu hoch, um sie vollständig zu durchdringen oder eine Transmissionsanordnung ist aus geometrischen Gründen nicht möglich. Das entwickelte System arbeitet daher mit einem THz-Sensor in Reflexionsgeometrie.

Um das System möglichst individuell einsetzen zu können, gliedert sich das entwickelte Messverfahren in vier Schritte. In einem ersten Schritt wird die Oberfläche der zu vermessenden Probe mit einem Streifenprojektionsverfahren erfasst. Dies ist für den nächsten Schritt, die Berechnung des Messpfades, anhand dessen der THz-Sensor positioniert werden soll, essentiell. Für die Berechnung des Messpfades wird ein spezieller Algorithmus verwendet, in dem ein durch den Benutzer definiertes Netz aus Messpunkten auf die dreidimensionale Oberfläche der Probe projiziert wird. Auf diese Weise wird zunächst die z-Koordinate für den jeweiligen Messpunkt ermittelt. Neben den x-, y- und z-Koordinaten ist jedoch auch die Neigung der Oberfläche relevant. Um den Neigungswinkel des THz-Sensors so zu bestimmen, dass dieser senkrecht zum Messpunkt ausgerichtet werden kann, verwendet der Algorithmus ein iteratives Verfahren, in welchem die Normalenvektoren der am Messpunkt beteiligten Oberflächenelemente gemittelt werden. Konnten für alle Messpunkte die Koordinaten und Neigungswinkel bestimmt werden, kann theoretisch mit der Vermessung des Objektes begonnen werden. Um den Fahrweg des Roboterarmes jedoch so effizient wie möglich zu gestalten, sollte dieser vorab simuliert werden. Während der Simulation der Messung erfolgt gleichzeitig eine Kollisionskontrolle. Dazu wird das Oberflächenmodell der Probe ebenfalls in die Simulationsumgebung implementiert. Anschließend wird für jeden Messpunkt überprüft, ob es direkt im Punkt oder auf dem Weg zu diesem Punkt zu einer Kollision zwischen Roboterarm, THz-Sensor und Objekt kommt. Ist dies der Fall wird entweder versucht, einen alternativen Anfahrweg zu finden oder der Punkt wird aus der Messung entfernt. So kann sichergestellt werden, dass am Objekt keine Schäden entstehen. Der simulierte Messpfad wird anschließend im letzten Schritt an eine THz-Messsoftware weitergereicht, sodass die Probe Punkt für Punkt untersucht werden kann.

Für das System werden zwei verschiedene THz-Sensorkonzepte verwendet, die beide Vor- und Nachteile bieten. Bei einem Konzept sind die THz-Antennenmodule in einem 90°-Winkel zueinander angeordnet. Die emittierte THz-Strahlung wird über einen Strahlteiler zur Probe und anschließend zum Detektor geleitet. Diese Anordnung hat den Vorteil, dass die Strahlung exakt senkrecht auf die Probe trifft. Allerdings werden aufgrund des Strahlteilers nur 25 % der ursprünglich emittierten Strahlung detektiert, nimmt man an, dass an der Probe 100 % reflektiert werden. Bei dem zweiten Konzept wird kein Strahlteiler verwendet, sondern die Antennenmodule parallel zueinander angeordnet und die Strahlung über vier Parabolspiegel unter

---

einem kleinen Winkel auf die Probe geleitet. Dies führt dazu, dass der Strahldurchmesser und somit die Auflösung des Sensors unter der des Strahlteilersensors liegt. Die Auflösung des hier verwendeten Strahlteilersensors kann mit 0,625 mm bei einer Mittelung über alle Frequenzen angegeben werden. Die Auflösung des parallelen Sensors liegt bei 1,25 mm, ebenfalls gemittelt für alle Frequenzen. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis des parallelen Sensors ist jedoch deutlich erhöht und liegt ca. 20 dB über dem des Strahlteilersensors. Da das Roboter-basierte THz-System für die Analyse von Schichtstrukturen herangezogen werden soll, ist es außerdem von Interesse herauszufinden, ab welcher Winkeldifferenz zwischen zwei Schichten kein Signal mehr detektiert werden kann. Dieser Grenzwinkel ist für beide Sensorkonzepte nahezu identisch und liegt bei 14°.

Die geplante Anwendung des Roboter-basierten THz-Systems liegt in der Untersuchung von historischen Menschenfunden und Kunstobjekten. Bevor mit der tomographischen Untersuchung der eigentlichen Objekte begonnen werden kann, ist jedoch zunächst die Anlage einer Materialdatenbank sinnvoll. Kapitel 3 dieser Arbeit zeigt daher eine Übersicht über die dielektrischen Eigenschaften aller in diesen Gebieten relevanten Materialien. Es zeigt sich, dass im Falle der Einbalsamierungsmaterialien der historischen Menschenfunde, ein hohes Identifikationspotential anhand von THz-Messungen besteht.

Da bei der THz-Zeitbereichsspektroskopie jedoch jeweils nur zeitabhängige Signale erfasst werden, werden die dielektrischen Parameter, insbesondere der Brechungsindex eines Materials, auch für die tomographische Rekonstruktion benötigt, da nur so eine Umrechnung der zeitlichen Information in eine räumliche möglich ist. Um die mit dem Roboter-basierten System erfassten Daten tomographisch auszuwerten, steht ein spezieller Algorithmus zur Verfügung, der die THz-Pulse in den Daten automatisch detektiert und entsprechenden Schichten zuordnet. Innerhalb dieses Algorithmus wurde ein weiterer sogenannter *Sparse deconvolution*-Algorithmus implementiert. Damit ist es möglich auch Pulse von sehr dünnen Schichten zu extrahieren, die sich im zeitlichen Messsignal überlagert haben.

Das entwickelte System wird an verschiedenen Objekten, die beispielhaft für die Gebiete der Anthropologie und Kunstrestaurierung stehen, getestet. Im Bereich der historischen Menschenfunde erfolgt eine detaillierte Analyse einer menschlichen Mumienhand. Hierbei können anhand der THz-Messungen bis zu vier Schichten unterhalb der Haut rekonstruiert werden, die eine hohe Übereinstimmung mit Micro-CT-Aufnahmen zeigen. Der Vergleich der THz-Daten mit konventionellen CT-Aufnahmen zeigt hingegen, dass die Auflösung der THz-Messungen die des CTs deutlich übersteigt. Gegenüber dem Micro-CT-Scanner hat das THz-System zudem den Vorteil, dass auch größere Objekte untersucht werden können. Messungen an einer Schädeldecke und einer kleinen Kinderhand zeigen jedoch, dass die Eindringtiefe der THz-Strahlung deutlich begrenzt ist. Insbesondere Knochengewebe reflektiert die THz-Strahlung sehr stark und der Anteil, der in das Gewebe eindringt, wird aufgrund der porösen Knochenstruktur zu



stark gestreut, um anschließend noch detektiert werden zu können. Für Untersuchungen der obersten Weichteilgewebestrukturen ist die THz-Technologie daher sehr gut geeignet und bietet in Kombination mit CT- oder MRT-Aufnahmen einen deutlichen Erkenntnisgewinn. Zudem besteht ein weiterer Vorteil in der Mobilität des Systems. Mobile Röntgengeräte weisen eine sehr schlechte Auflösung auf, sodass THz-Systeme in Zukunft eine sinnvolle Ergänzung bei der direkten Arbeit an Ausgrabungsstätten sein könnten. Außerdem sind hier die Anforderungen an den Arbeitsschutz deutlich geringer als bei Röntgengeräten.

Auf dem Gebiet der Kunstrestaurierung wird das System an einer Holzskulptur (Putto) getestet. Diese Holzskulptur weist deutliche Schäden sowohl in der Holzstruktur als auch in den darüber liegenden Mal- und Grundierungsschichten auf. In einer ersten Vorabuntersuchung wird daher das Potential der THz-Technologie zur Evaluierung von Fraßschäden an Holz untersucht. Hierbei zeigt sich, dass oberflächennahe Schäden, wie sie beispielsweise durch den weit verbreiteten Borkenkäfer entstehen, sehr gut detektiert werden können. Tiefer liegende Fraßgänge, wie zum Beispiel ein asiatischer Laubholzbockkäfer hinterlassen würde, können hingegen nicht erfasst werden. In einem zweiten Schritt wird die THz-Technologie hinsichtlich ihres Unterstützungspotentials bei der Festigung von fraßgeschädigtem Holz und der Malschichtfestigung untersucht. Hier ergibt sich anhand der THz-Messungen ein deutlicher Unterschied zwischen dem Zustand vor und nach der Festigung, der beispielsweise in Röntgenaufnahmen nicht ausgemacht werden konnte. Die abschließende Vermessung des Puttos fasst zusammen, was in den beiden Vorabmessungen erzielt werden konnte. Unterhalb der Mal- und Grundierungsschichten kann der Zustand des Holzes anhand der THz-Daten evaluiert werden. Auch der Schichtaufbau der Mal- und Grundierungsschichten an sich kann korrekt rekonstruiert werden, wie ein Vergleich mit einem Querschliff zeigt.

Das entwickelte Roboter-basierte THz-System bietet neben den beiden in der Arbeit untersuchten Anwendungsgebieten viele weitere Möglichkeiten der Anwendung. So könnten die erzielten Ergebnisse bei der Holzuntersuchung auch in der Forstwirtschaft eingesetzt werden. Bisher werden dort große Waldgebiete gerodet, wenn ein Insektenbefall festgestellt wurde, ohne genaue Kenntnis darüber zu haben, welcher Baum befallen ist und welcher nicht. Ein entsprechend angepasstes Roboter-basiertes THz-System könnte vorab zur Analyse des Insektenbefalls beitragen und somit zum ressourcenschonenden Umgang mit lebenswichtiger Natur. Auch andere industrielle Anwendungen wären denkbar, etwa in der Autoindustrie zur Lackschichtdickenüberprüfung oder in der Medizin zur Untersuchung von Hautkrebs, wo in beiden Fällen erste Forschungsarbeiten vielversprechende Anwendungsmöglichkeiten aufzeigen. Das entwickelte Messverfahren trägt in jedem Fall dazu bei, eine Vielzahl neuer Anwendungsgebiete für die THz-Technologie zu erschließen.

---

## Summary

In this work, a robotic-based THz system is developed, which moves a THz sensor relatively to a sample of any shape. THz measurements can be carried out either in transmission or reflection geometry. Frequently, however, the absorption of a sample is too high to penetrate it completely or a transmission arrangement is not possible for geometrical reasons. Therefore, the developed system works with a THz sensor in reflection geometry.

In order to be able to use the system as individually as possible, the developed measurement method is divided into four steps. In a first step, the surface of the sample to be measured is detected by a fringe projection method. This is essential for the next step, the calculation of the measuring path by means of which the THz sensor is to be positioned. For the calculation of the measurement path, a special algorithm is used, in which a mesh of measuring points defined by the user is projected onto the three-dimensional surface of the sample. In this way, the z coordinate for the respective measurement point is determined. In addition to the x, y and z coordinates, however, the inclination of the surface is also relevant. In order to determine the angle of inclination of the THz sensor, the algorithm uses an iterative method in which the normal vectors of the surface elements, involved in the measurement point, are averaged. If the coordinates and angles of inclination could be determined for all measurement points, theoretically the measurement of the object can be started. However, to make the travel of the robotic arm as efficient as possible, it should be simulated in advance. During the simulation of the measurement, a collision control also takes place simultaneously. For this purpose, the surface model of the sample is also implemented in the simulation environment. Subsequently, it is checked for each measurement point whether there is a collision between the robotic arm, the THz sensor and the measurement object directly at the measurement point or on the way to this point. If this is the case, either an attempt is made to find an alternative path to reach this point or, if this is not possible, the point is removed from the measurement. This ensures that the object is not damaged. The simulated measurement path is subsequently passed on to a THz measurement software in the last step so that the sample can be examined point by point.

For the system two different THz sensor concepts are used which offer both advantages and disadvantages. In one concept, the THz antenna modules are arranged in a  $90^\circ$  angle to each other. The emitted THz radiation passes through a beam splitter, with the transmitted portion hitting the sample. There, it is reflected, hits again the beam splitter, whereby now the reflected portion is directed to the detector. This arrangement has the advantage that the radiation hits the sample exactly perpendicular. However, due to the beam splitter, only 25 % of the originally emitted radiation is detected, if it is assumed that 100 % are reflected on the sample. In the second concept, therefore, no beam splitter is used, but the antenna modules are arranged parallel to each other. Then the radiation is passed through four parabolic mirrors under a small angle to the sample. This means that the beam diameter and thus the resolution of the

sensor is not as good as in the first concept. The resolution of the beam splitter sensor used here can be specified with 0.625 mm by averaging over all frequencies. The resolution of the parallel sensor is only half as high and is 1.25 mm, also averaged for all frequencies. However, the signal-to-noise ratio of the parallel sensor is significantly increased and is approximately 20 dB above that of the beam splitter sensor. Since the robotic-based THz system is to be used for the analysis of layer structures, it is also of interest to find out at which angular difference between two layers no signal can be detected anymore. This critical angle is almost identical for both sensor concepts and is around 14°.

The proposed application of the robotic-based THz system is the investigation of mummies and art objects. Before the tomographic examination of the actual objects can be started, it is necessary to establish a material database. Chapter 3 of this thesis therefore presents an overview of the dielectric properties of all relevant materials in these fields. It turns out that in the case of the embalming materials of the historical human finds, there is a high identification potential based on THz measurements.

However, since only time-dependent signals are detected in the THz time-domain spectroscopy, the dielectric parameters, in particular the refractive index of a material, are also required for the tomographic reconstruction, since only in this way is it possible to convert the temporal information into a spatial one. To evaluate the data, acquired with the robotic-based system, for a tomographic reconstruction a special algorithm is available, which automatically detects the THz pulses in the data and assigns them to the corresponding layers. Within this algorithm, another so-called *sparse deconvolution* algorithm has been implemented. With this algorithm it is possible to extract pulses from very thin layers which are fused together in the temporal measurement signal.

The developed system is tested on various objects that are exemplary for the fields of anthropology and art restoration. In the field of mummies, a detailed analysis of a human mummy hand takes place. Here, the THz measurements can be used to reconstruct up to four layers below the skin, which are in a good agreement with micro CT images. By contrast, the comparison of the THz data with conventional CT images shows that the resolution of the THz measurements clearly exceeds that of the CT. Compared to the micro CT scanner, the THz system also has the advantage that even larger objects can be examined. However, measurements on a skulp and a small child's hand show that the penetration depth of the THz radiation is clearly limited. In particular, bone tissue reflects the THz radiation very strongly. The proportion which penetrates into the tissue is too strongly scattered due to the porous bone structure in order to be detected subsequently. THz technology is therefore very well suited for examinations of the uppermost soft tissue structures and, in combination with CT or MRI scans, offers a significant gain in knowledge. In addition, there is another advantage in the mobility of the system. Mobile X-ray scanners have a very poor resolution, so that THz

systems could be a useful addition to the direct work on archaeological sites in the future. In addition, the requirements for occupational safety are significantly lower than for X-rays.

In the field of art restoration, the system is tested on a wooden sculpture (putto). This wooden sculpture has significant damages in the wood structure as well as in the overlying painting and priming layers. In a first preliminary study, the potential of the THz technology for the evaluation of damages on wood made by insects will be investigated. It turns out that near-surface damage, such as that caused by the widespread bark beetle, can be detected very well. On the other hand, lower lying bore holes, such as made by an Asian longhorn beetle, could not be detected. In a second step, the THz technology will be examined for its potential for support in the consolidation of these damages and the consolidation of the paint layer. Here, based on the THz measurements, there is a clear difference between the state before and after consolidation, which could not be identified, for example, in X-ray images. The final measurement of the putto summarizes what could be achieved in the two preliminary measurements. Below the painting and priming layers, the condition of the wood can be evaluated on the basis of the THz data. Also, the layer structure of the paint and primer layers can be reconstructed correctly as a comparison with a invasive cross section shows.

The developed robotic-based THz system offers many other application possibilities in addition to the two areas of application studied in this work. Thus, the results obtained in the wood study could also be used in forestry. So far, large forest areas are cleared there when an insect infestation has been detected, without knowing exactly which tree is infested and which is not. A suitably adapted robotic-based THz system could contribute in advance to the analysis of insect infestation and thus to the resource-conserving handling of vital nature. Other industrial applications would also be conceivable, for example in the automotive industry for the determination of coating layer thickness or in medicine for the investigation of skin cancer. In both cases initial research works show promising potential applications. In any case, the developed measurement method contributes to the development of a multitude of new application fields for the THz technology.



---

## Literatur

- [1] A. Fleckinger. *Ötzi, der Mann aus dem Eis*. Folio Verlag, Bozen, 5th edition, 2009.
- [2] N. Lynnerup. Methods in mummy research. *Anthropologischer Anzeiger*, 67(4):357–384, 2009.
- [3] M. C. Nuss and J. Orenstein. *Terahertz time-domain spectroscopy*, pages 7–50. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [4] K. E. Peiponen, J. A. Zeitler, and M. Kuwata-Gonokami. *Terahertz Spectroscopy and Imaging*, volume 171 of *Springer Series in Optical Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1st edition, 2013.
- [5] P. U. Jepsen, D. G. Cooke, and M. Koch. Terahertz spectroscopy and imaging - Modern techniques and applications. *Laser and Photonics Reviews*, 5(1):124–166, 2011.
- [6] D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin, and M. C. Nuss. T-ray tomography. *Optics Letters*, 22(12):904–906, 1997.
- [7] B. B. Hu and M. C. Nuss. Imaging with terahertz waves. *Opt. Lett.*, 20(16):1716–1718, 1995.
- [8] D. M. Mittleman. Twenty years of terahertz imaging [Invited]. *Optics Express*, 26(8):9417, 2018.
- [9] T. Yasui, T. Yasuda, K. Sawanaka, and T. Araki. Terahertz paintmeter for noncontact monitoring of thickness and drying progress in paint film. *Applied Optics*, 44(32):6849–6856, 2005.
- [10] Y. Kim and D.-S. Yee. High-speed terahertz time-domain spectroscopy based on electronically controlled optical sampling. *Optics Letters*, 35(22):3715, 2010.
- [11] L. Öhrström, B. M. Fischer, A. Bitzer, J. Wallauer, M. Walther, and F. J. Rühli. Terahertz Imaging Modalities of Ancient Egyptian Mummified Objects and of a Naturally Mummified Rat. *Anatomical Record*, 298(6):1135–1143, 2015.
- [12] K. Fukunaga, E. Cortes, A. Cosentino, I. Stünkel, M. Leona, I. N. Duling, and D. T. Mininberg. Investigating the use of Terahertz pulsed time domain reflection imaging for the study of fabric layers of an egyptian mummy. *Journal of the European Optical Society - Rapid publications*, 6, 2011.
- [13] L. Ho, R. Müller, K. C. Gordon, P. Kleinebudde, M. Pepper, T. Rades, Y. Shen, P. F. Taday, and J. A. Zeitler. Applications of terahertz pulsed imaging to sustained-release tablet film coating quality assessment and dissolution performance. *Journal of Controlled Release*, 127(1):79–87, 2008.

- [14] E. Stübling, Y. Bauckhage, E. Jelli, B. Fischer, B. Globisch, M. Schell, A. Heinrich, J. C. Balzer, and M. Koch. A THz Tomography System for Arbitrarily Shaped Samples. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 38(10):1179–1182, 2017.
- [15] “Anthropologie,” Duden online. [Online]. Available: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Anthropologie>. [Accessed: 24-Jul-2018].
- [16] A. C. Aufderheide. *The Scientific Study of Mummies*. Cambridge University Press, 2003.
- [17] T.A. Reyman, H. Nielsen, I. Thuesen, D. Notman, K.J. Reinhard, E. Tapp, and T. Waldron. New investigative techniques. In A. Cockburn, E. Cockburn, and T.A. Reyman, editors, *Mummies, Disease and Ancient Cultures*, pages 353–394. Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [18] J.A. Harild, D.E. Robinson, and J. Hudlebusch. New Analyses of Grauballe Man’s Gut Contents. In P. Asingh and N. Lynnerup, editors, *Grauballe Man. An Iron Age Bog Body Revisited*. Jutland Archaeological Society Publications, Aarhus, Denmark, 2007.
- [19] O. Gaber, K.H. Künzel, and S. Poisel. The Ice Man. Preservation and Endoscopy. In N. Lynnerup, C. Andreasen, and J. Berglund, editors, *Mummies in a new millennium. Proceedings of the 4th World congress on Mummy Studies*, pages 146–149. Danish Polar Center, Copenhagen, Denmark, 2003.
- [20] M.A. Ruffer. Pathological notes on the royal mummies of the Cairo museum. In R.L. Moodie, editor, *Studies in the Paleopathology of Egypt*, pages 166–178. University of Chicago Press, Chicago, 1921.
- [21] W. C. Röntgen. Über eine neue Art von Strahlen. *Sitzungsberichte der physikalisch-medizinischen Gesellschaft Würzburg*, 9:132–141, 1895.
- [22] W. König. Vierzehn Photographien mit Röntgen-Strahlen: aufgenommen im Physikalischen Verein zu Frankfurt a. M. *Bath Leipzig*, 1896.
- [23] W. Demtröder. *Experimentalphysik 3 - Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer Spektrum, Berlin, 4th edition, 2005.
- [24] G. Gordon Steel. *Basic Clinical Radiobiology*. Arnold, London, 2nd edition, 1997.
- [25] R.L. Moodie. Roentgenologic Studies of Egyptian and Peruvian Mummies. *Publication of the Field Museum of Chicago*, 1931.
- [26] O.E. Christensen. Un examen radiologique des momies égyptienne des musées Danois. *La Semaine des Hôpitaux*, 45:1990–1998, 1969.
- [27] R.A. Fawcitt, H. Jarvis, and I. Isherwood. X-raying the Manchester Mummies. In R. David and E. Tapp, editors, *Evidence Embalmed. Modern Medicine and the Mummies of Ancient Egypt*. Manchester University Press, Manchester, 1984.



- 
- [28] N. Hounsfield. Historical notes on computerized axial tomography. *J. Can. Assoc. Radiol.*, 27:135–142, 1976.
- [29] R. Brüning, A. Küttner, and T. Flohr. *Mehrschicht-CT. Ein Leitfaden*. Springer, Heidelberg, 2008.
- [30] E. L. Ritman. Micro-Computed Tomography—Current Status and Developments. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 6(1):185–208, 2004.
- [31] P.K. Lewin and D.C. Harwood-Nash. Computerized axial tomography in medical archaeology. *Paleopathol. Newsletter*, 17:8–9, 1977.
- [32] D.C. Harwood-Nash. Computed tomography of ancient Egyptian mummies. *J. Computer Assisted Tomogr.*, 3:768–773, 1979.
- [33] A.H. Melcher, S. Holowka, M. Pharoah, and P. K. Lewin. Non invasive computed tomography and three dimensional reconstruction of the dentition of a 2,800 year old Egyptian mummy exhibiting extensive dental disease. *American Journal of Physical Anthropology*, 103(3):329–340, 1997.
- [34] P. Gostner. INSIGHT : Report of Radiological-Forensic Findings on the. *J. Archaeol. Sci.*, 29:323–326, 2002.
- [35] D.N. Notman, J. Tashjian, A. C. Aufderheide, O. W. Cass, O. C. Shane, T.H. Bergquist, J. E. Gray, and E. Gedgaudas. Modern Imaging and Endoscopic Biopsy Techniques in Egyptian Mummies. *Am. J. Roetgenol.*, 146:93–96, 1983.
- [36] D. Brothwell, D. Liversage, and B. Gottlieb. Radiographic and forensic aspects of the female Huldremose body. *J. Danish Archaeol.*, 9:157–178, 1990.
- [37] F. J. Rühli and T. Böni. CT-Guided Biopsy : A New Diagnostic Method for Paleopathological. *Am. J. Phys. Antroph.*, 117:272–275, 2002.
- [38] H. Piepenbrink, J. Frahm, A. Haase, and D. Matthaei. Nuclear magnetic resonance imaging of mummified corpses. *Am. J. Phys. Antroph.*, 70:27–28, 1986.
- [39] F. J. Rühli, H. von Waldburg, and S. Nielles-Vallespin. Clinical Magnetic Resonance Imaging of Ancient Dry Human Mummies Without Rehydration. *JAMA*, 298(22):2618–2620, 2007.
- [40] H. Stodkilde-Jorgensen, A.G. Jurik, M. Dalstra, Niels Lynnerup, M. Gregersen, L.W. Boel, D.A. Bindslev, C.B. Pedersen, A. Kruse, E.S. Hansen, C.S. Jorgensen, N.O. Jacobsen, and P. Asingh. The Grauballe Man. Medical Examinations of a conserved moss man's corpse. *Ugeskrift for Laeger*, 163(51):7226–7229, 2001.
- [41] S.J. Karlik, R. Bartha, K. Kennedy, and R. Chhem. MRI and multinuclear NMR spectroscopy of a 3200 year old Egyptian Mummy Brain. In *Abstract for the VI World Congress of Mummy Studies*, Teguiise, Lanzarote, 2007.
-

- [42] H. G. M. Edwards and T. Munshi. Diagnostic Raman spectroscopy for the forensic detection of biomaterials and the preservation of cultural heritage. *Anal. Bioanal. Chem.*, 283:1398–1406, 2005.
- [43] "Neue Technik gibt Mumie ihre Farbe zurück," Volume Graphics, 2017. [Online]. Available: <https://www.volumegraphics.com/de/news/mumie-in-farbe.html>. [Accessed: 09-Oct-2017], 2017.
- [44] K. Fukunaga. *THz Technology Applied to Cultural Heritage in Practice*. Cultural Heritage Science. Springer Japan, Tokyo, 2016.
- [45] A. Cosentino. Panoramic , Macro and Micro Multispectral Imaging : An Affordable System for Mapping Pigments on Artworks. *J. Conserv. Mus. Stud.*, 13(1):1–17, 2015.
- [46] F. Mairinger. *Strahlenuntersuchung an Kunstwerken*. Urania, Freiburg, 2003.
- [47] A. Cosentino. Practical notes on ultraviolet technical photography for art examination. *Conserv. Patrim.*, 21:53–62, 2015.
- [48] K. Soppa, T. Laaser, and C. Krekel. Lokalisierung von Konsolidierungsmitteln in Gemälden durch Fluoreszenzmarkierung. *Kunsttechnologie und Konservierung*, 2:195–217, 2013.
- [49] A. Cosentino, M. Gil, M. Ribeiro, and R. Di Mauro. Technical photography for mural paintings : the newly discovered frescoes in Aci Sant ' Antonio ( Sicily , Italy ). *Conserv. Patrim.*, 20:23–33, 2014.
- [50] A. Cosentino. Panoramic infrared reflectography. Technical recommendations. *International Journal of Conservation Science*, 5(1):51–60, 2014.
- [51] C. Palmbach. *Lock-In-Thermographie - Anwendungsmöglichkeiten eines berührunglosen, bildgebenden Untersuchungsverfahrens in der Gemäldekonservierung*. PhD thesis, Hochschule der bildenden Künste Bern, 2012.
- [52] M. Iwanicka, E. A. Kwiatkowska, M. Sylwestrzak, and P. Targowski. Application of optical coherence tomography ( OCT ) for real time monitoring of consolidation of the paint layer in Hinterglasmalerei objects. *Proceedings of SPIEE*, 8084:1–7, 2011.
- [53] S. Legrand, F. Vanmeert, G. van der Snickt, M. Alfeld, W. de Nolf, and J. Dik. Examination of historical paintings by state-of-the-art hyperspectral imaging methods : from scanning infra-red spectroscopy to computed X-ray laminography. *Heritage Science Journal*, 2(13):1–11, 2014.
- [54] E. Krieger. Die Überprüfung des Eindringverhaltens ausgewählter Kunstharze bei insektengeschädigtem Holz mit Hilfe der Computertomographie. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 2:265–275, 2003.

- 
- [55] H. Takanezawa and K. Hidaka. Consideration of the plaster-covered mosaic on the south wall of east bay in the south gallery of Hagia Sophia in Istanbul. In *Proceedings of the Architectural Institute of Japan Annual Convention*, pages 797–798, 2014.
- [56] F. Casanova, J. Perlo, F. Presciutti, C. Anselmi, and B. Doherty. Noninvasive Testing of Art and Cultural Heritage by Mobile NMR. *Accounts of chemical research*, 43(6):761–770, 2010.
- [57] A. Cosentino. FORS spectral database of historical pigments in different binders. *E-conservation journal*, 2:52–65, 2014.
- [58] G. Burrafato, M. Calabrese, A. Cosentino, A. M. Gueli, S. O. Troja, and A. Zuccarello. ColoRaman project : Raman and fluorescence spectroscopy of oil , tempera and fresco paint pigments. *Journal of Raman spectroscopy*, 35:879–886, 2004.
- [59] A. Cosentino. Innovative imaging techniques for examination and documentation of mural paintings and historical graffiti in the catacombs of san giovanni, Syracuse. *International Journal of Conservation Science*, 6(1):23–24, 2015.
- [60] A. V. Kuznetsov, I. Y. Gorshkov, A. V. Evsenin, O. I. Osetrov, D. N. Vakhtin, A. Cosentino, and M. Seracini. Nanosecond Neutron Analysis for the search of the lost Leonardo ' s masterpiece , the Battle of Anghiari. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, B*, 267(23-24):3694–3697, 2009.
- [61] E. Kampasakali, B. Ormsby, A. Cosentino, and C. Miliani. A Preliminary Evaluation of the Surfaces of Acrylic Emulsion Paint Films and the Effects of Wet- Cleaning Treatment by Atomic Force Microscopy A Preliminary Evaluation of the Surfaces of Acrylic Emulsion Paint Films and the Effects of Wet-Cleaning Treatme. *Studies in Conservation*, 56(3):216–230, 2011.
- [62] C. Fattinger and D. Grischkowsky. Terahertz beams. *Applied Physics Letters*, 54(6):490, 1989.
- [63] K.D.M. Möller and W. G. Rothschild. *Far-infrared spectroscopy*. Wiley Interscience, New York, 1971.
- [64] B. E.A. Saleh and M. C. Teich. *Fundamentals of Photonics*. John Wiley and Sons. Inc, 1991.
- [65] L. M. Zurk and S. Schecklman. Terahertz Scattering. In K. E. Peiponen, J. A. Zeitler, and M. Kuwata-Gonokami, editors, *Terahertz Spectroscopy and Imaging*, pages 95–115. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [66] N. M. Burford and M. O. El-Shenawee. Review of terahertz photoconductive antenna technology. *Optical Engineering*, 56(1):010901, 2017.
-

- [67] N. Vieweg, M. Mikulics, M. Scheller, K. Ezdi, R. Wilk, H. Hübers, and M. Koch. Impact of the contact metallization on the performance of photoconductive THz antennas. *Optics Express*, 16(24):19695–19705, 2008.
- [68] P. U. Jepsen, R. H. Jacobsen, and S. R. Keiding. Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas. *Journal of the Optical Society of America B*, 13:2424, 1996.
- [69] N. Krumbholz, C. Jansen, M. Scheller, T Müller-Wirts, S. Lübbecke, and R. Holzwarth. Handheld Terahertz Spectrometer for the Detection of Liquid Explosives. *Proceedings of SPIEE*, 7485:1–12, 2009.
- [70] H. Roehle, R. J. B. Dietz, H. J. Hensel, J. Böttcher, H. Künzel, D. Stanze, M. Schell, and B. Sartorius. Next generation 1 . 5 micronm terahertz antennas : mesa-structuring of InGaAs / InAlAs photoconductive layers. *Optics Express*, 18(3):2296–2301, 2010.
- [71] A. Soltani, T. Probst, S. F. Busch, M. Schwerdtfeger, E. Castro-Camus, and M. Koch. Error from delay drift in terahertz attenuated total reflection spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35:468–477, 2014.
- [72] R. Piesiewicz, Christian Jansen, S. Wietzke, D. Mittleman, M. Koch, and T. Kürner. Properties of building and plastic materials in the THz range. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 28(5):363–371, 2007.
- [73] H. Hirori, K. Yamashita, M. Nagai, and K. Tanaka. Attenuated Total Reflection Spectroscopy in Time Domain Using Terahertz Coherent Pulses. *Japanese Journal of Applied Physics*, 43(No. 10A):L1287–L1289, 2004.
- [74] U. Moller, D. G. Cooke, K. Tanaka, and P. U. Jepsen. Terahertz reflection spectroscopy of Debye relaxation in polar liquids [Invited]. *Journal of the Optical Society of America B*, 26(9):A113, 2009.
- [75] A. Soltani, S. F. Busch, P. Plew, J. C. Balzer, and M. Koch. THz ATR Spectroscopy for Inline Monitoring of Highly Absorbing Liquids. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 37(10):1001–1006, 2016.
- [76] A. Soltani, D. Gebauer, L. Duschek, B. M. Fischer, H. Cölfen, and M. Koch. Crystallization Caught in the Act with Terahertz Spectroscopy: Non-Classical Pathway for l-(+)-Tartaric Acid. *Chemistry - A European Journal*, 23(57):14128–14132, 2017.
- [77] V. Conti Nibali and M. Havenith. New insights into the role of water in biological function: Studying solvated biomolecules using terahertz absorption spectroscopy in conjunction with molecular dynamics simulations. *Journal of the American Chemical Society*, 136(37):12800–12807, 2014.

- 
- [78] T. Probst, S. Sommer, A. Soltani, E. Kraus, B. Baudrit, G. E. Town, and M. Koch. Monitoring the Polymerization of Two-Component Epoxy Adhesives Using a Terahertz Time Domain Reflection System. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36(6):569–577, 2015.
- [79] B. Globisch, R. J. B. Dietz, R. B. Kohlhaas, S. Nellen, M. Kleinert, T. Göbel, and M. Schell. Fiber-coupled transceiver for terahertz reflection measurements with a 45 THz bandwidth. *Optics Letters*, 41(22):5262, 2016.
- [80] S. Busch, T. Probst, M. Schwerdtfeger, R.J.B. Dietz, J. Palací, and M. Koch. Terahertz transceiver concept. *Optics Express*, 22(14):16841, 2014.
- [81] L. Duvillearet, F. Garet, and J.-L. L. Coutaz. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2(3):739–746, 1996.
- [82] M. Scheller, C. Jansen, and M. Koch. Analyzing sub-100- $\mu\text{m}$  samples with transmission terahertz time domain spectroscopy. *Optics Communications*, 282(7):1304–1306, 2009.
- [83] M. Scheller. Data extraction from terahertz time domain spectroscopy measurements. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(8):638–648, 2014.
- [84] M. Krüger, S. Funkner, E. Bründermann, and M. Havenith. Uncertainty and ambiguity in terahertz parameter extraction and data analysis. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32(5):699–715, 2011.
- [85] P. U. Jepsen, U. Møller, and H. Merbold. Investigation of aqueous alcohol and sugar solutions with reflection terahertz time-domain spectroscopy. *Optics Express*, 15(22):14717, 2007.
- [86] S. Krimi, J. Klier, J. Jonuscheit, G. Von Freymann, R. Urbansky, and R. Beigang. Highly accurate thickness measurement of multi-layered automotive paints using terahertz technology. *Applied Physics Letters*, 109(2), 2016.
- [87] J. P. Guillet, B. Recur, L. Frederique, B. Bousquet, L. Canioni, I. Manek-Hönninger, P. Desbarats, and P. Mounaix. Review of terahertz tomography techniques. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(4):382–411, 2014.
- [88] J. Dong, J. B. Jackson, M. Melis, D. Giovanacci, G. C. Walker, A. Locquet, J. W. Bowen, and D. S. Citrin. Terahertz frequency-wavelet domain deconvolution for stratigraphic and subsurface investigation of art painting. *Optics Express*, 24(23):26972, 2016.
- [89] G. C. Walker, J. W. Bowen, J. Labaune, J. B. Jackson, S. Hadjiloucas, J. Roberts, G. Mourou, and M. Menu. Terahertz deconvolution. *Optics Express*, 20(25):27230, 2012.
-

- [90] A. Redo-Sanchez, B. Heshmat, A. Aghasi, S. Naqvi, M. Zhang, J. Romberg, and R. Rasakar. Terahertz time-gated spectral imaging for content extraction through layered structures. *Nature Communications*, 7:1–7, 2016.
- [91] J. Dong, X. Wu, A. Locquet, and D. S. Citrin. Terahertz Superresolution Stratigraphic Characterization of Multilayered Structures Using Sparse Deconvolution. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 7(3):260–267, 2017.
- [92] E. P. J. Parrott, S. M. Y. Sy, T. Blu, V. P. Wallace, and E. Pickwell-MacPherson. Terahertz pulsed imaging in vivo: measurements and processing methods. *Journal of Biomedical Optics*, 16(10):106010, 2011.
- [93] M. Elad, B. Matalon, J. Shtok, and M. Zibulevsky. A wide-angle view at iterated shrinkage algorithms. *Proceedings of SPIE*, 6701:670102, 2007.
- [94] M. Bessou, B. Chassagne, J.-P. Caumes, C. Pradère, P. Maire, M. Tondusson, and E. Abraham. Three-dimensional terahertz computed tomography of human bones. *Applied Optics*, 51(28):6738, 2012.
- [95] J.-P. Caumes, A. Younus, S. Salort, B. Chassagne, A. Ziéglé, A. Dautant, E. Abraham, and B. Recur. Terahertz tomographic imaging of XVIIIth Dynasty Egyptian sealed pottery. *Applied Optics*, 50:3604–3608, 2011.
- [96] A. Cosentino. Terahertz and Cultural Heritage Science: Examination of Art and Archaeology. *Technologies*, 4(1):6, 2016.
- [97] K. Fukunaga and M. Picollo. Terahertz spectroscopy applied to the analysis of artists' materials. *Applied Physics A*, 100(3):591–597, 2010.
- [98] E. Abraham, A. Younus, J. C. Delagnes, and P. Mounaix. Non-invasive investigation of art paintings by terahertz imaging. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 100(3):585–590, 2010.
- [99] A. J. L. Adam, P. C. M. Planken, S. Meloni, and J. Dik. TeraHertz imaging of hidden paintlayers on canvas. *Optics Express*, 17(5):3407–3416, 2009.
- [100] C. L. Koch Dandolo, M. Picollo, C. Cucci, and P. U. Jepsen. Fra Angelico's painting technique revealed by terahertz time-domain imaging (THz-TDI). *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 122(10):1–8, 2016.
- [101] M. Picollo, K. Fukunaga, and J. Labaune. Obtaining noninvasive stratigraphic details of panel paintings using terahertz time domain spectroscopy imaging system. *Journal of Cultural Heritage*, 16(1):73–80, 2015.
- [102] W. Köhler, M. Panzer, U. Klotzsch, and S. Winnerl. Non-destructive investigation of paintings with THz-radiation. *9th ECNDT, Berlin, . . .*, pages 1–7, 2006.

- 
- [103] J. B. Jackson, M. Mourou, J. F. Whitaker, I. N. Duling, S. L. Williamson, M. Menu, and G. Mourou. Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings. *Optics Communications*, 281(4):527–532, 2008.
- [104] G. C. Walker, J. W. Bowen, W. Matthews, S. Roychowdhury, J. Labaune, G. Mourou, M. Menu, I. Hodder, and J. B. Jackson. Sub-surface terahertz imaging through uneven surfaces: visualizing Neolithic wall paintings in Çatalhöyük. *Optics Express*, 21(7):8126–8134, 2013.
- [105] C. L. Koch-Dandolo and P. U. Jepsen. Wall Painting Investigation by Means of Non-invasive Terahertz Time-Domain Imaging (THz-TDI): Inspection of Subsurface Structures Buried in Historical Plasters. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 37(2):198–208, 2016.
- [106] K. Fukunaga and Y. Kohdzuma. THz Pulsed Time Domain Imaging Applied to Museum Objects and its Comparison with other Frequency Regions. *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, pages 2–9, 2016.
- [107] T. Kurabayashi, N. Kikuchi, T. Tanno, and M. Watanabe. Significance of terahertz spectrometry for textile article of wool. *34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, IRMMW-THz 2009*, pages 7–8, 2009.
- [108] T. A. Cockburn, E. Cockburn, and T. A. Reyman. *Mummies, Disease and Ancient Cultures*. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edition, 1998.
- [109] D. Nüßler, S. Heinen, T. Sprenger, D. Hübsch, and T. Würschmidt. T-SENSE a millimeter wave scanner for letters. *Proceedings of SPIE*, page 89000M, 2013.
- [110] ABB. *Product manual IRB 1200*. Västerås, 2013.
- [111] H. Maier. *Grundlagen der Robotik*. VDE Verlag, 2016.
- [112] M. Schuth and W. Buerakov. *Handbuch Optische Messtechnik*. Hanser, 2017.
- [113] K. Kraus. *Photogrammetrie Band 1, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. De Gruyter, Berlin, 7th edition, 2004.
- [114] C. Rocchini, P. Cignoni, C. Montani, P. Pingi, and R. Scopigno. A low cost 3D scanner based on structured light. *Computer Graphics Forum*, 20(3):C299–+, 2001.
- [115] David Vision Systems GmbH. *David 4 Manual*. 2014.
- [116] N. Vieweg, F. Rettich, A. Deninger, H. Roehle, R. Dietz, T. Göbel, and M. Schell. Terahertz-time domain spectrometer with 90 dB peak dynamic range. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(10):823–832, 2014.

- [117] R. J. B. Dietz, M. Gerhard, D. Stanze, M. Koch, B. Sartorius, and M. Schell. THz generation at 1.55  $\mu\text{m}$  excitation: six-fold increase in THz conversion efficiency by separated photoconductive and trapping regions. *Optics Express*, 19(27):25911, 2011.
- [118] R. J.B. Dietz, B. Globisch, M. Gerhard, A. Velauthapillai, D. Stanze, H. Roehle, M. Koch, T. Göbel, and M. Schell. 64  $\mu\text{W}$  pulsed terahertz emission from growth optimized InGaAs/InAlAs heterostructures with separated photoconductive and trapping regions. *Applied Physics Letters*, 103(6):1–5, 2013.
- [119] R. J. B. Dietz, B. Globisch, H. Roehle, D. Stanze, T. Göbel, and M. Schell. Influence and adjustment of carrier lifetimes in InGaAs/InAlAs photoconductive pulsed terahertz detectors : 6 THz bandwidth and 90dB dynamic range. *Optics letters*, 22(16):19411–19422, 2014.
- [120] B. Globisch, R. J B Dietz, D. Stanze, T. Göbel, and M. Schell. Carrier dynamics in Beryllium doped low-temperature-grown InGaAs/InAlAs. *Applied Physics Letters*, 104(17):1–5, 2014.
- [121] J. M. Khosrofian and B. A. Garetz. Measurement of a Gaussian laser beam diameter through the direct inversion of knife-edge data. *Applied Optics*, 22(21):3406, 1983.
- [122] T. Bardon, R. K. May, P. F. Taday, and M. Strlič. Systematic study of terahertz time-domain spectra of historically informed black inks. *The Analyst*, 138(17):4859, 2013.
- [123] N. Sunaguchi, Y. Sasaki, N. Maikusa, M. Kawai, T. Yuasa, and C. Otani. Depth-resolving THz imaging with tomosynthesis. *Optics Express*, 17(12):9558–9570, 2009.
- [124] J. Labaune, J. B. Jackson, S. Pagès-Camagna, I. N. Duling, M. Menu, and G. A. Mourou. Papyrus imaging with terahertz time domain spectroscopy. *Applied Physics A*, 100(3):607–612, 2010.
- [125] K. Fukunaga, Y. Ogawa, S. Hayashi, and I. Hosako. Application of terahertz spectroscopy for character recognition in a medieval manuscript. *IEICE Electronics Express*, 5(7):223–228, 2008.
- [126] E. Abraham, A. Younus, A. El Fatimy, J.C. Delagnes, E. Nguéma, and P. Mounaix. Broadband terahertz imaging of documents written with lead pencils. *Optics Communications*, 282(15):3104–3107, 2009.
- [127] Y.H. Sonawane, O.U. Joshi, and M.P. Wagh. Terahertz technology: A boon to tablet analysis. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 71(3):235, 2009.
- [128] C. L. Koch Dandolo, A. Cosentino, and P. U. Jepsen. Inspection of panel paintings beneath gilded finishes using terahertz time-domain imaging. *Studies in Conservation*, 60(sup1):S159–S166, 2015.



- 
- [129] A. Cosentino, C. L. Koch-Dandolo, A. Cristaudo, and P. U. Jepsen. Diagnostics pre and post Conservation on a 14th Century Gilded Icon from Taormina , Sicily. *E-Conservation Journal*, 3:1–7, 2015.
- [130] M. Picollo, K. Fukunaga, and J. Labaune. Obtaining noninvasive stratigraphic details of panel paintings using terahertz time domain spectroscopy imaging system. *Journal of Cultural Heritage*, 16(1):73–80, 2015.
- [131] J. B. Jackson, J. Bowen, G. Walker, J. Labaune, G. Mourou, M. Menu, and K. Fukunaga. A Survey of Terahertz Applications in Cultural Heritage Conservation Science. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(1):220–231, 2011.
- [132] D. Giovannacci, V. Detalle, D. Martos-Levif, J. Ogien, E. Bernikola, V. Tornari, K. Hatzi-  
giannakis, K. Mouhoubi, J.-L. Bodnar, G.-C. Walker, D. Brissaud, B. Trichereau, B. Jack-  
son, and J. Bowen. Case study of Sainte-Marie Chapel, Fontaine Chaalis (France):  
complementarity of different optical techniques. page 95270L, 2015.
- [133] K. Fukunaga, I. Hosako, Y. Kohdzuma, T. Koezuka, M.-J. Kim, T. Ikari, and X. Du. Terahertz analysis of an East Asian historical mural painting. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 5:10024, 2010.
- [134] C. L. Koch Dandolo, V. Cattersel, and P. U. Jepsen. Terahertz time-domain imaging of a 17th century lacquered cabinet: A contribution to European lacquerwares characterization. In *2015 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz)*, pages 1–2. IEEE, 2015.
- [135] M. Koch, S. Hunsche, P. Schumacher, M. C. Nuss, J. Feldmann, and J. Fromm. THz-imaging: a new method for density mapping of wood. *Wood Science and Technology*, 32(6):421–427, 1998.
- [136] R.M. Groves, B. Pradarutti, E. Kouloumpi, W. Osten, and G. Notni. 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging. *NDT & E International*, 42(6):543–549, 2009.
- [137] J. B. Jackson, M. Mourou, J. Labaune, J. F. Whitaker, I. N. Duling, S. L. Williamson, C. Lavier, M. Menu, and G. A. Mourou. Terahertz pulse imaging for tree-ring analysis: a preliminary study for dendrochronology applications. *Measurement Science and Technology*, 20(7):075502, 2009.
- [138] J. Labaune, J. B. Jackson, K. Fukunaga, J. White, L. D'Alessandro, A. Whyte, M. Menu, and G. Mourou. Investigation of Terra Cotta artefacts with terahertz. *Applied Physics A*, 105(1):5, 2011.
- [139] E. Abraham, M. Bessou, A. Ziégélé, M. C. Hervé, L. Szentmiklósi, Z. S. Kasztovszky, Z. Kis, and M. Menu. Terahertz, X-ray and neutron computed tomography of an

- Eighteenth Dynasty Egyptian sealed pottery. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 117(3):963–972, 2014.
- [140] G. Pastorelli, T. Trafela, P. F. Taday, A. Portieri, D. Lowe, K. Fukunaga, and M. Strlič. Characterisation of historic plastics using terahertz time-domain spectroscopy and pulsed imaging. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 403(5):1405–1414, 2012.
- [141] I. Cacciari, J. Agresti, and S. Siano. Combined THz and LIPS analysis of corroded archaeological bronzes. *Microchemical Journal*, 126:76–82, 2016.
- [142] K. Krügener, M. Schwerdtfeger, S. F. Busch, A. Soltani, E. Castro-Camus, M. Koch, and W. Viöl. Terahertz meets sculptural and architectural art: Evaluation and conservation of stone objects with T-ray technology. *Scientific Reports*, 5(1):14842, 2015.
- [143] N.-A. Staats. Untersuchungen der Terahertzstrahlung als Kontrollmöglichkeit von Malerschichtkonsolidierung. Master's thesis, Technische Hochschule Köln, 2018.

## Eigene Veröffentlichungen

### Beiträge in Fachzeitschriften

- Rui Guo, Eva-Maria Stübling, Felipe Beltran-Mejia, David Ulm, Thomas Kleine-Ostmann, Frank Ehrig, and Martin Koch, "3D printed Terahertz rectangular waveguides of polystyrene and TOPAS: a comparison," *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, (2018), online first <https://doi.org/10.1007/s10762-018-0552-9>.
- Ralf Gente, Arno Rehn, Thorsten Probst, Eva-Maria Stübling, Enrique Castro-Camus, Alejandra A. Covarrubias, Jan C. Balzer, and Martin Koch; "Outdoor Measurements of Leaf Water Content Using THz Quasi Time-Domain Spectroscopy," *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* 39 (10), 943-948, (2018).
- Eva-Maria Stübling, Leonie Gomell, Stefan Sommer, Andreas Winkel, Martin Kahlmeyer, Stefan Böhm, and Martin Koch, "THz properties of adhesives," *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* 39 (6), 586–593, (2018).
- Eva-Maria Stübling, Yannick Bauckhage, Eric Jelli, Bernd Fischer, Björn Globisch, Martin Schell, Jan C. Balzer, and Martin Koch, „A THz tomography system for arbitrarily shaped samples," *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* 38 (10), 1179-1182, (2017).
- Eva-Maria Stübling, Stefan Busch, Jan C. Balzer, and Martin Koch, "Development of a multi-channel time-to-space terahertz spectrometer," *Opt. Express* 24 (20), 23146-23153 (2016).
- Ralf Gente, Stefan F. Busch, Eva-Maria Stübling, Lorenz Maximilian Schneider, Christian B. Hirschmann, Jan C. Balzer, and Martin Koch, "Quality control of sugar beet seeds with THz time-domain spectroscopy," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 6 (5), 754-756 (2016).

### Konferenzbeiträge

- Eva-Maria Stübling, Naja-Anissa Staats, Hans Dietmar Portsteffen, and Martin Koch, "THz tomography for the sub-surface analysis of a wooden putto," *OTST - Optical THz science and technology*, (2019).
- Hakan Alaboz, Maximilian Schneider, Jan Ornik, Eva-Maria Stübling, David Jahn, and Martin Koch, "A laser cut THz metal mesh bandpass filter with high transmission," *EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology*, (2018).
- Eva-Maria Stübling, Naja-Anissa Staats, Hans Dietmar Portsteffen, and Martin Koch, "Monitoring the consolidation of wooden substrates and painting layers in art restoration," *EOS Topical Meeting on Terahertz Science and Technology*, (2018).
- Eva-Maria Stübling, Yannick Bauckhage, Eric Jelli, Jan C. Balzer, and Martin Koch, „A robotic-based THz imaging system for freeform surfaces," *IRMMW-THz Cancun*, (2017).

- Eva-Maria Stübling, Stefan Busch, Jan C. Balzer, and Martin Koch, "Development of a multi-channel time-to-space terahertz spectrometer," *CLEO*, (2016).
- Amin Soltani, Eva-Maria Stübling, and Martin Koch, "Monitoring the Crystallization of NaCl and NaI with THz ATR spectroscopy," *IRMMW-THz Hongkong*, (2015).
- Eva-Maria Stübling, Amin Soltani, and Martin Koch, "Crystallization Monitoring of Magnesium Chloride with THz ATR spectroscopy," *Women in Optics - The Castle Meeting*, (2015).
- Eva-Maria Stübling, Amin Soltani, and Martin Koch, "Crystallization Monitoring of Magnesium Chloride with THz ATR spectroscopy," *German THz Conference Dresden*, (2015).
- Eva-Maria Stübling, Amin Soltani, and Martin Koch, "Monitoring the Crystallization of Sodium Iodide with THz ATR spectroscopy," *8th THz Days Areches-Beaufort*, (2015).

### Patentanmeldungen

- Eva-Maria Stübling, Stefan Busch, Ralf Gente, Thorsten Probst, "Verfahren und Vorrichtung für die THz-Zeitbereichsspektroskopie," *Europäische Patentanmeldung EP 15 00 2578*, Europäisches Patentamt, (2015).

## Wissenschaftlicher Werdegang

Eva-Maria Stübling, geboren am 15. April 1991 in Bad Wildungen

**08.2001 - 06.2010**

Gustav-Stresemann-Gymnasium, Bad Wildungen

**10.2010 - 08.2013**

Bachelorstudium Allgemeine Physik an der Philipps-Universität Marburg

**10.2013 - 07.2015**

Masterstudium Allgemeine Physik an der Philipps-Universität Marburg

**11.2015 - 03.2019**

Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin in der AG Experimentelle Halbleiterphysik des Fachbereichs Physik der Philipps-Universität Marburg