

## 9. Untersuchungen mittels Terahertzstrahlen an Wandmalereien

Michael Panzer, Andrea Schmid, Wolfram Köhler

### Einführung

Damit verdeckte Wandmalereien wieder lesbar werden, standen bisher nur mechanische Freilegungsmethoden mit allen Risiken und irreversiblen Ergebnissen zur Verfügung [1]. Jüngere Schichten müssen entfernt werden, die zumeist nicht weniger erhaltenswert sind. Eine Alternative dazu bilden zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden. Seit mehreren Jahren gibt es Versuche, bekannte zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden, wie z.B. die Infrarotreflektografie, aber auch Radarmethoden weiterzuentwickeln. Eine Methode, welche die „diagnostische Lücke“ (Abb. 1) zwischen den Infrarot- und den Radarstrahlen schließen kann und die Vorteile beider Strahlungsarten vereint (hohe Ortsauflösung und genügend große Eindringtiefe), erscheint deshalb für die Untersuchung verborgener Wandmalereien sinnvoll.

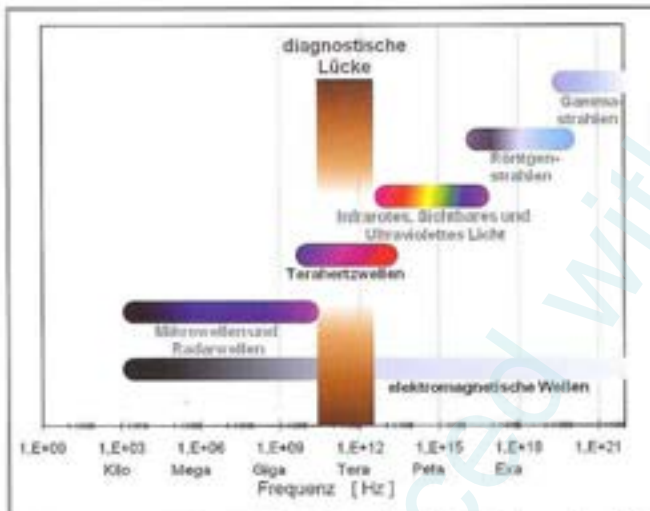


Abb. 1: „Diagnostische Lücke“ (Terahertzbereich) im Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Zwischen den genannten Frequenzbereichen liegen die Terahertzwellen (THz-Wellen), deren künstliche und kontrollierte Erzeugung erst seit wenigen Jahren möglich ist. Erste Überlegungen zur Sichtbarmachung verdeckter Wandmalereien mittels THz-Strahlung stammen aus dem Jahre 2006 [2]. Im Laufe der Jahre haben verschiedene Autoren versucht verborgene Malstrukturen sichtbar zu machen, wobei bisher hauptsächlich an Wandmalereidummies befriedigende Ergebnisse erhalten wurden [3-6]. Unsere bisherigen eigenen Arbeiten konzentrierten sich deshalb darauf, die Grundlagen für eine erfolgreiche Anwendung der Methode an realen verborgenen Wandmalereien zu schaffen [7-11]. Mit der Entwicklung und dem Aufbau eines mobilen THz-Scanners für archäometrische Applikationen wurden nun die Voraussetzungen für zerstörungsfreie und systematische Untersuchungen direkt am Objekt Wandmalerei geschaffen.

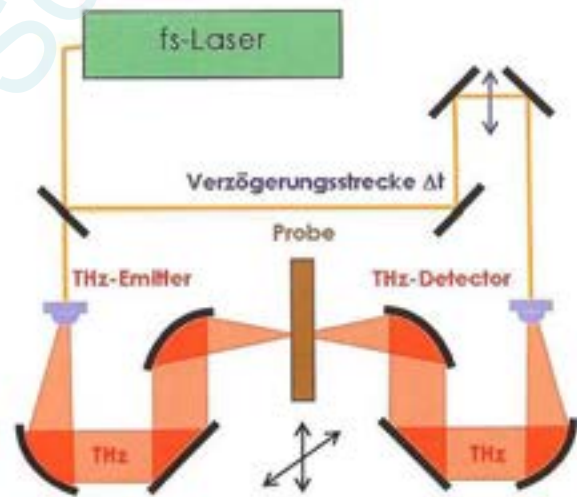


Abb. 2: Schematische Darstellung eines Aufbaus zur THz-TDS

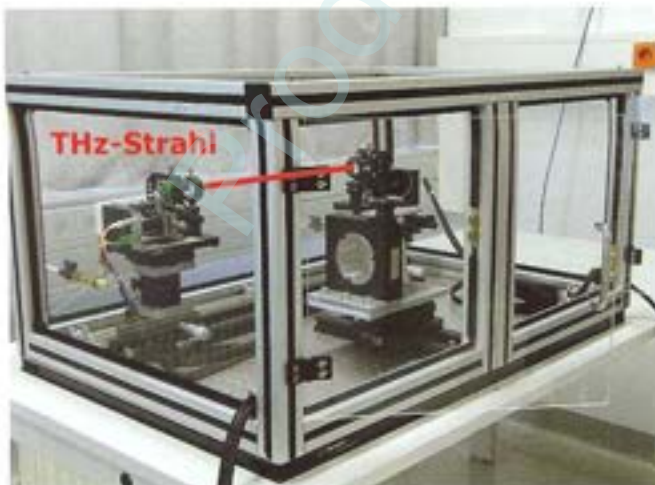
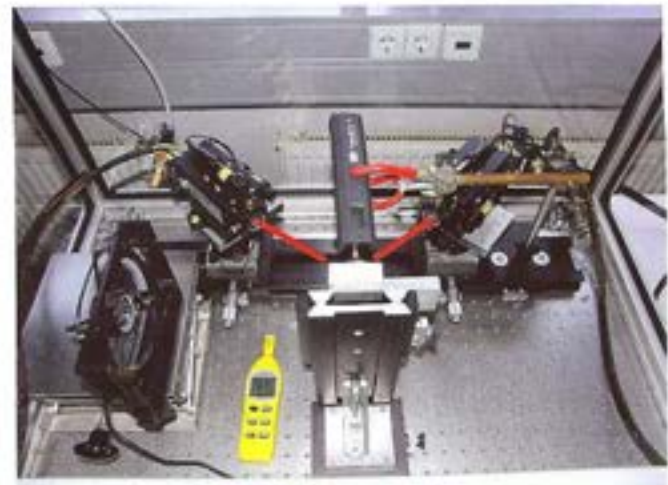


Abb. 3: Laborvariante des THz-System für Grundlagenuntersuchungen an trockener Luft; links: Transmissionsanordnung; rechts: Reflexionsanordnung zur Untersuchung einer Putzprobe mit unterschiedlicher Feuchte



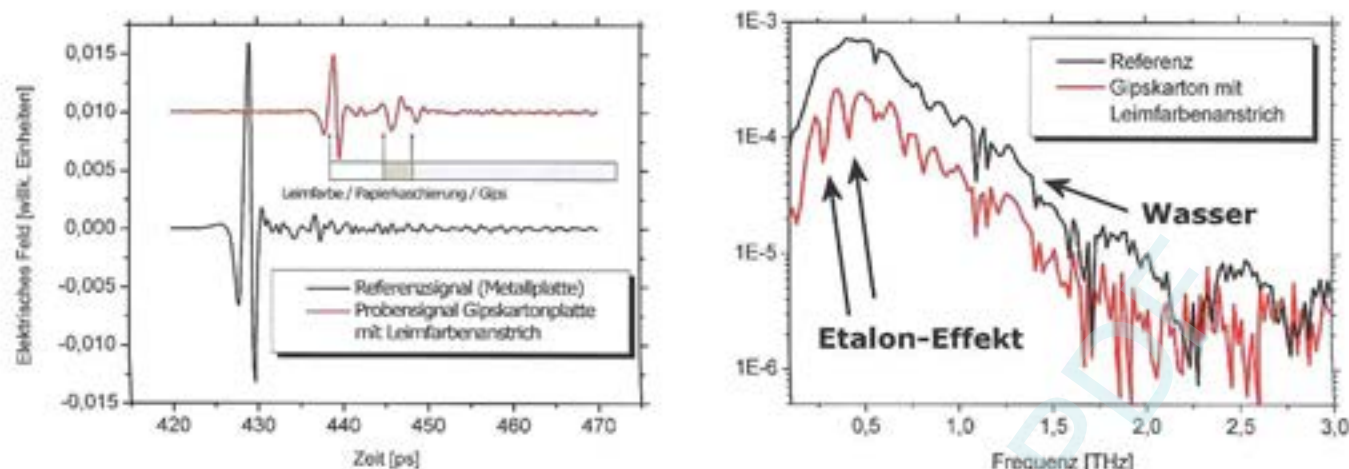


Abb. 4: links: Elektromagnetische Pulse des THz-TDS Scanners, aufgenommen in Reflexion: Referenzpulse an einer Metallplatte (Schwarz), Reflexion an einer Gipskartonplatte mit Farbanstrich (rot); rechts: Frequenzspektrum beider Pulse nach Fast-Fourier-Formation. Beide Spektren enthalten Linien des Wasserdampfes in der Laboluft. In der Zeitdomäne treten zusätzliche Pulsechos von den einzelnen Grenzflächen auf, die sich im Spektrum dann als zusätzliche Minima darstellen (Etalonneffekt).

Die hier vorgestellte Untersuchungsmethode wird im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Forschungsprojektes „TeraART“ entwickelt und erprobt. In diesem Verbundprojekt zwischen Fraunhofer IWS Dresden, FIDA e.V. Potsdam, TU Dresden und HfBK Dresden sollen Untersuchungsergebnisse an überdeckten Wandmalereien Aufschlüsse zum Umgang mit Wandmalereien in der Reformationszeit geben.

#### Verwendetes System und Gerätschaft

Zur Untersuchung der Wandmalereien wird die Methode der THz-Zeitdomänenspektroskopie (THz-TDS) genutzt [12]. Sie basiert auf der Verwendung extrem kurzer elektromagnetischer Pulse (1 bis 2 Pikosekunden). Durch Laufzeitmessungen dieser Pulse können so tomographische Untersuchungen durchgeführt werden. Das Spektrum der Pulse kann über Fouriertransformation errechnet werden. Die Auswertung des Spektrums solcher Pulse nach Durchlaufen von Materialien liefert zusätzlich Informationen, die in vielen Fällen eine Materialidentifi-

kation erlaubt (Abb. 4). Die Abbildung 2 zeigt den typischen Aufbau eines Systems zur THz-Zeitdomänenspektroskopie. Bei dem von uns verwendeten System (Abb. 5) handelt es sich um ein faserbasiertes System [13]. Das heißt, der die THz-Strahlung erzeugende Femtosekundenlaserstrahl läuft nicht wie in Abbildung 2 frei, sondern wird in Fasern geführt. Das erlaubt den Aufbau eines robusten Systems mit frei im Raum beweglichen Messköpfen. Messungen können dabei sowohl in Reflexion als auch in Transmission erfolgen. Die Transmission oder Reflexion dieses THz-Strahles bewirkt eine charakteristische Änderung der Pulsformen durch den Untersuchungsgegenstand. Bei Reflexionsmessungen enthält das empfangene Signal beispielsweise Informationen der einzelnen Tiefenschichten, die passiert wurden und eröffnet somit den Zugang zur Tiefenlage der einzelnen Grenzflächen (Abb. 4).

Der aufgebaute THz-Scanner zur Untersuchung von Wandmalereien (Abb. 5) besteht aus einem mechanischen Scanner der eine xyz-Bewegung der THz-Messköpfe durch die flexible Faserkopplung zum Versorgungsgerät erlaubt. Die komplexe Software ermöglicht das Abscannen von Wandbereichen in einem Modus der schnelle Überblicksinformationen lie-



Abb. 5: THz-TDS-Wandscannersystem bei Vorort-Messungen an Wandmalereikopien



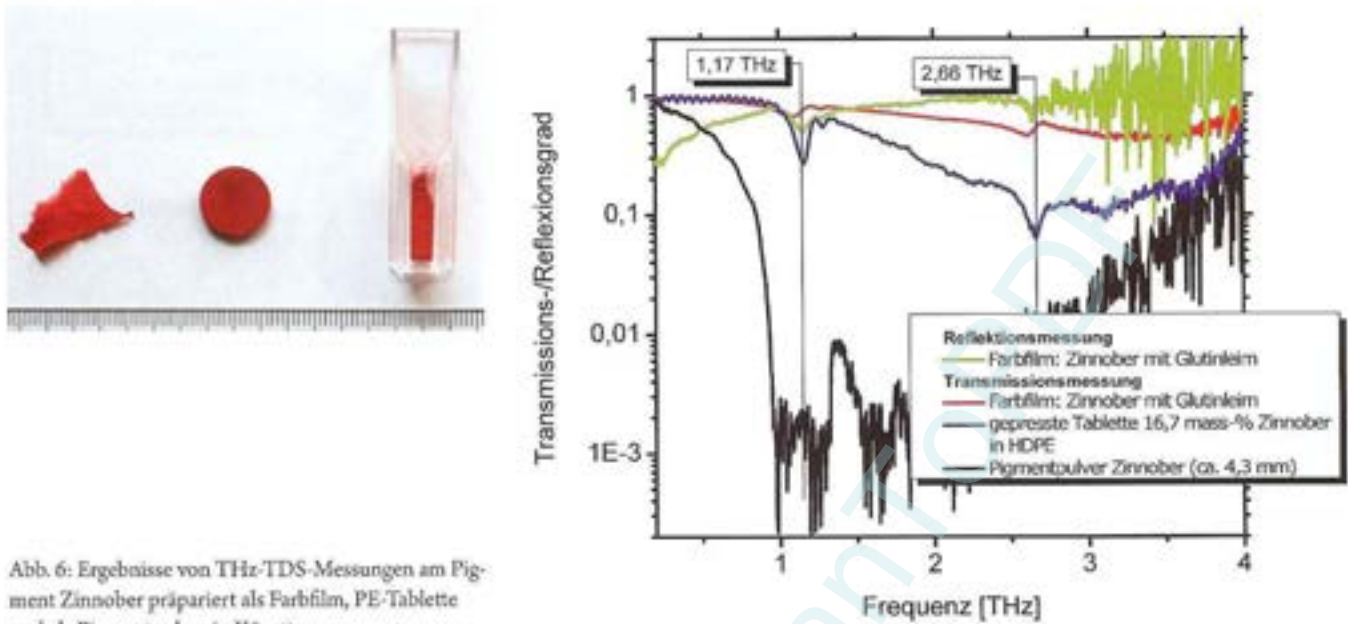


Abb. 6: Ergebnisse von THz-TDS-Messungen am Pigment Zinnober präpariert als Farbfilm, PE-Tablette und als Pigmentpulver in Követte

fert („Online“) und in einem weiteren Modus, der die Signale jedes Messpunktes mit maximal möglicher Präzision aufnimmt („Lock-In“). Die umfangreichen Datenmengen werden im Steuergerät gesammelt und im Anschluss spezieller Auswertesoftware zugeführt, die bildliche Informationen berechnet.

### Ergebnisse

Die Strahlcharakteristik des Systems sowie die Geräteparameter für spätere Applikationen wurden in umfangreichen Laborexperimenten ermittelt. Für die Interpretation der Messergebnisse an überdeckten mittelalterlichen Wandmalereien wurden im Labor Grundlagenuntersuchungen an relevanten Materialien durchgeführt. Die Probenpräparation der Einzelmaterialien erfolgt in Anlehnung an Methoden der Fourier-Transform-Inf-

rarot-Spektroskopie. So konnte beispielsweise das Pigment Zinnober durch THz-Reflexion an einem Farbfilm (Abb. 6) nachgewiesen werden.

Großen Einfluss auf THz-Messprozesse hat Wasser. Flüssiges Wasser blockiert THz-Strahlung. Im gasförmigen Zustand erscheinen charakteristische Linien des Rotationspektrums der Wassermoleküle (siehe auch Abb. 4). Für die Untersuchung von Wandmalereien ist vor allem der Feuchteinfluss der Wand auf die Messergebnisse von immenser Bedeutung. In Voruntersuchungen (Abb. 7) konnte beispielsweise gezeigt werden, dass bei sehr feuchten Oberflächen kaum noch Informationen aus tiefer liegenden Schichten erhalten werden können.

Zur Untersuchung verdeckter Strukturen erfolgte die Fertigung von Probekörpern mit einfachen Malstrukturen. Es ist gelungen, an solchen Modellputzplatten verborgene Wandmalereien sichtbar zu machen. Die Abbildungen 8 und 9 zeigen

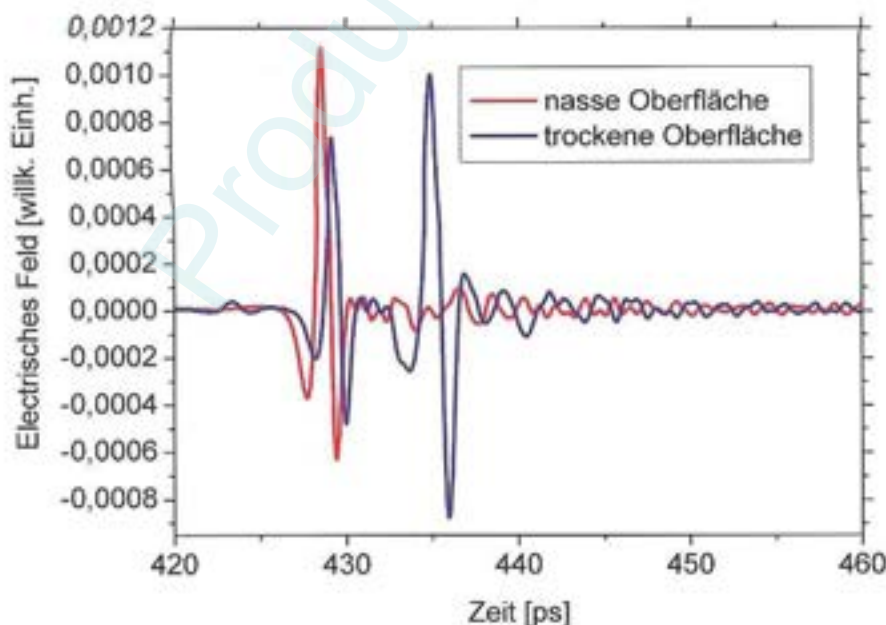


Abb. 7: THz-TDS-Reflektogramm am Dummy einer durch Kreideleimfarbe überdeckten Blattvergoldung. Blau: Trockene Oberfläche → Kurve mit Reflexen von der Tünche (bei 430 ps) und der Goldoberfläche (bei 435 ps). Rot: Messung im nassen Zustand, der vom Gold kommende Reflex ist nahezu vollständig unterdrückt.

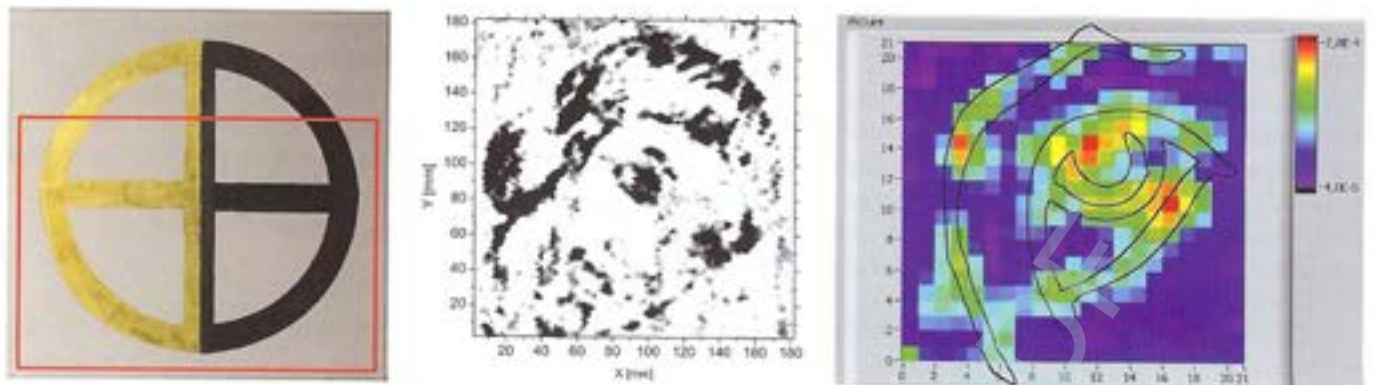


Abb. 8: Ergebnisse eines THz-TDS-Scans an einer unter Kreideleimfarbe verborgenen Zeichnung auf Mörteluntergrund. a) Holzkohlepinselzeichnung vor dem Auftrag der Überdeckung; b) THz-Bild, aufgenommen in Reflexionsanordnung; c) Scan des Auges mit erhöhter Auflösung

die Ergebnisse in Form eines Bildes der verborgenen Struktur und als Radargramm, das topographische Informationen zur Schichtstruktur liefert.

Die Tauglichkeit des Gerätes für Einsätze außerhalb des Labors konnte bei ersten Messungen an verdeckten Wandmalereien in einer Kirche nachgewiesen werden. Durch die in dieser Kirche vorhandenen Unebenheiten der Putzoberfläche werden bei den noch laufenden Auswertungen erhöhte Anforderungen an die anzuwendenden Strategien bei der Berechnung von Bildern aus den Messdaten gestellt.

## Zusammenfassung

Anders als mit Georadar oder Infrarotreflektografie gelingt es, mit der THz-Methode, Informationen aus Tiefen bis zu einigen Millimetern mit einer Tiefenauflösung im Submillimeterbereich bei lateralen Auflösungen unter 1 cm zu erhalten. Dies stellt genau den Dimensionsbereich verborgener Wandmalereien dar. Mit den „in situ“-Messungen wurde demonstriert, dass die THz-TDS-Technologie mobil, unter Baustellenbedingungen vor Ort eingesetzt werden kann. An Dummies wurden Malstrukturen auf der Grundlage verschiedener Pigmente nachgewiesen. Damit erschließen sich neue Möglichkeiten in der archäometrischen Diagnostik. Ohne mechanische Eingriffe wieder sichtbar gemachte Wandbilder können grundsätzlich neue Erkenntnisse über die Bildprogramme von Wandmalereien und deren Werktechniken liefern.

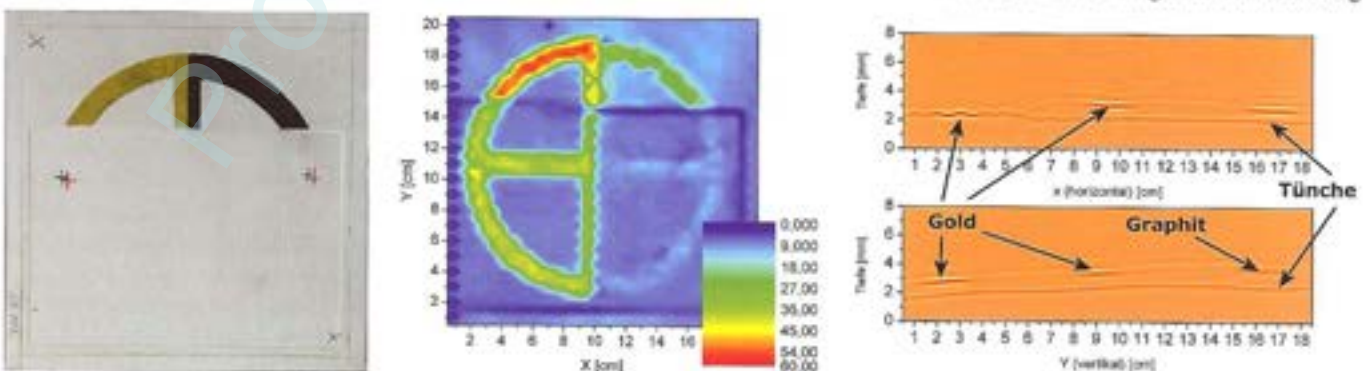


Abb. 9: Ergebnisse von THz-Reflexions-Scans an einem teilweise übertünchten Weibekreuz, aus Blattgold (links) und Graphitleimfarbe (rechts) auf Gipskarton. a) Bild der Probe vor der Überdeckung (rote Markierung); b) „online“-Scan des Gesamtbildes; c) Lock in-Messung Radargramme horizontal und vertikal durch den in b) rot markierten Punkt.

Die durchgeführten Arbeiten haben auch weit über die Charakterisierung verborgener Wandmalerei hinausgehende Bedeutung. Durch die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Lokalisierung und Identifikation verschiedener Materialien ergibt sich eine große Bandbreite an wissenschaftlichen und auch kommerziellen Anwendungen. Mit dem aufgebauten Geräteprototyp können so zukünftig weitere Fragestellungen untersucht werden, wie beispielsweise die Detektion von Ablösungen und Lockerungen sowie möglicherweise auch die Bestimmung der Zusammensetzung und Verteilung von bauschädlichen Salzen oder Konservierungsmaterialien im oberflächennahen Bereich von Bauwerken.

## Danksagung

Das Forschungsprojekt TeraART - „Erforschung der Hintergründe unterschiedlicher Zerstörungsgrade von Wandmalereien innerhalb reformatorischer Bewegungen durch Untersuchungen mittels THz-Strahlung“ wird im BMBF-Förderschwerpunkt „Wechselwirkung zwischen Natur und Geisteswissenschaften“ gefördert. Wir möchten uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Projektträger bei der Deutschen Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt für ihre Unterstützung bedanken. Ohne die geisteswissenschaftliche Mitwirkung des vierten Projektpartners, dem Institut für Kunst- und Musikwissenschaft der TU Dresden, wäre der enge historische Bezug

dieses Forschungsthemas nicht möglich gewesen, wofür wir uns herzlich bedanken.

Gleichzeitig gilt unser Dank der Arbeitsgruppe TERATEC beim Fraunhoferinstitut für Physikalische Messmethoden in Kaiserslautern für die nach unseren Vorstellungen realisierte Entwicklung und den Bau der anwendungsspezifischen Terahertz-Messanordnung, der Firma GEOTRON-ELEKTRONIK aus Pirna für den Bau des mobilen Scanners und Herrn Dr. Emil

Schnell für seine unverzichtbare Unterstützung bei der Programmierung der komplexen Mess- und Steuerungssoftware.

Darüber hinaus möchten wir den Landesdenkmalämtern in Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Thüringen und Baden-Württemberg, sowie der Dombauhütte in Basel und zahlreichen Restauratoren für fruchtbare Diskussionen und ihre Unterstützung bei der Suche nach geeigneten Untersuchungsobjekten danken.

## Literatur

- [1] PURSCHE, J.: Freilegen oder Verdecken? Erfahrungen aus Jahrzehnten. In: Möhlenkamp A., Kuder U., Albrecht U. (Hrsg.): Geschichte in Schichten. Wand und Deckenmalerei im städtischen Wohnbau des Mittelalters und der frühen Neuzeit. Int. Symposium 200 in Lübeck, Lübeck 2002, S. 204-219
- [2] KÖHLER, W., PANZNER, M., WINNERL, ST., HELM, M., RUTZ, F., JÖRDENS, CH., KOCH, M., LEITNER, H., KLOTZBACH, U., BEYER, E.: Non destructive Investigation of Paintings with THz-Radiation. ECNDT Berlin 2006, Proc. 9th Int. Conference on NDT, Berlin, 25-29 September 2006
- [3] ABRAHAM, E.: Broadband terahertz imaging of documents written with lead pencils. Optics Communications 282 (2009) 3104-3107
- [4] ADAM, A.J.L. et al.: TeraHertz imaging of hidden paint layers on canvas. OPTICS EXPRESS 17 (2009) 3414
- [5] FUKANAGA, K.: Innovative Terahertz Spectroscopy and Imaging Technique for Art Conservation Science. e-conservation the online magazine, No. 10, June 2010
- [6] JACKSON J.B. et. al.: Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings. Optics Communications 281 (2008) 527-532
- [7] PANZNER, M., GROSSE, T., LIESE, S., THEUER, M., KÖHLER, W., LEITNER, H., KLOTZBACH, U., BEYER, E.: Potential of THz-Time Domain Spectroscopy in object inspection for restoration. LACONA VII, Madrid, Spanien, September 2007
- [8] PANZNER, M., THEUER, M., BEIGANG, R., KÖHLER, W., SCHMID, A., LEITNER, H., KLOTZBACH, U., BEYER, E.: Application of THz-Technology for the Investigation of Art Objects. 3rd Workshop on Terahertz Technology, Kaiserslautern, Germany, 2 - 3 March 2008
- [9] PANZNER, M., THEUER, M., PRADARUTTI, B., MORGENTHAU, L., KLOTZBACH, U., BEYER, E.: Investigation of hidden Structures in Art and Technology by THz-Time-Domain Imaging. 22ND International Conference on Surface Modification Technologies, Trollhättan, 22-24 September 2008
- [10] PANZNER, M., TOROSYAN, G., SCHMID, A., KÖHLER, W., KLOTZBACH, U., BEYER, E.: THz Time-Domain Spectroscopy progress towards imaging of hidden paints. LACONA VIII, Sibiu, Rumänien, September 2009
- [11] PANZNER, M., KURASCH, K., ROSOWSKI, A., TOROSYAN, G., KÖHLER, W., SCHMID, A., KLOTZBACH, U., BEYER, E.: Investigations of Art Work Materials by a Fiber-Coupled THz TDS. 4th Workshop on Terahertz Technology, Kaiserslautern, Germany, 4 - 5 March 2010
- [12] THEUER, M.: Terahertz Time-Domain Spectroscopy Systems for Fundamental and Industrial Applications. Dissertation, TU Kaiserslautern, 2009, Cuvillier Verlag, Göttingen 2009, ISBN 978-3-86955-059-6
- [13] ELLRICH, F. et al.: Fasergekoppeltes Terahertz-Spektroskopiesystem. Technisches Messen 75 (1): (2008), 14 - 22