

Kontaktlose, bildgebende Untersuchung historischer Dokumente im Terahertz-Frequenzbereich

Ingrid ULLMANN¹, Jan SCHÜR¹, Konstantin ROOT¹, Martin VOSSIEK¹

¹ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen

Kontakt E-Mail: ingrid.ullmann@fau.de

Kurzfassung

Bei der Untersuchung historischer Schriften ist es häufig nicht möglich oder erwünscht, die empfindlichen Dokumente zu öffnen, da das Risiko einer Beschädigung zu hoch ist. Zur kontaktlosen Inspektion solcher Dokumente kann die Röntgen-Technologie eingesetzt werden, allerdings einhergehend mit hohen Anforderungen an die Betriebssicherheit und einem potentiellen Beschädigungsrisiko für die zu untersuchenden Dokumente. Hier kann die Terahertz-Technologie eine interessante Alternative sein. Aufgrund der nicht-ionisierenden Strahlung und der geringen benötigten Leistungspegel gilt sie als unbedenklich, sowohl für Menschen als auch für historische Dokumente.

Da Terahertz-Wellen die Eigenschaft besitzen, nichtleitfähige Materialien (u.a. Papier) zu durchdringen, besitzen Terahertz-Radarverfahren ein großes Potenzial zur berührungslosen und bildgebenden 3D-Darstellung von historischen Dokumenten. Im Gegensatz zum Seitenmaterial beinhalten historische Tinten häufig leitfähige oder stark verlustbehaftete Partikel, welche einen Bildkontrast zum Seitenmaterial bilden. Aufgrund der kurzen Wellenlängen sind mit Terahertz-Bildgebung Bildauflösungen im Sub-Millimeterbereich möglich. Die Terahertz-Technik wird daher bereits in vielfältigen Anwendungen im Bereich des Kulturerbes eingesetzt, beispielsweise zur Untersuchung historischer Gemälde. Die Untersuchung historischer Schriften mit Terahertz-Technologie ist dagegen noch ein relativ wenig beforschtes Gebiet.

In diesem Beitrag werden verschiedene Mess- und Auswertemethodiken zur kontaktlosen Untersuchung historischer Dokumente mit Terahertz-Bildgebung vorgestellt und diskutiert:

- Reflexions- und Transmissionsmessungen,
- physikalische und synthetische Fokussierung,
- Kurzpuls- und Dauerstrichverfahren.

Der Beitrag zeigt aktuelle Forschungsergebnisse mit den verschiedenen Messmodalitäten. Im Fokus stehen zudem verschiedene Bildrekonstruktionstechniken. Die Eignung der Terahertz-Bildgebung zur Abbildung einlagiger und mehrlagiger Schriften wird diskutiert. Eine weitere Anwendung stellt die Abbildung historischer Schriftrollen dar, welche aufgrund der zylindrischen Objektgeometrie besondere Anforderungen an die Messgeometrie stellt.



Kontaktlose, bildgebende Untersuchung historischer Dokumente im Terahertz-Frequenzbereich

Dr.-Ing. Ingrid Ullmann, Dr.-Ing. Jan Schür, Konstantin Root, M. Sc., Prof. Dr.-Ing. Martin Vossiek

Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

DGZfP-Jahrestagung 2022

Agenda

-
- 1 Motivation
 - 2 Anwendungsszenarien und mögliche Messmodalitäten
 - 3 Bisherige Ergebnisse
 - 4 Fazit

- 1 Motivation
- 2 Anwendungsszenarien und mögliche Messmodalitäten
- 3 Bisherige Ergebnisse
- 4 Fazit

Motivation: Terahertz-Bildgebung

- Bildauflösungen < 1mm möglich
- Viele optisch nicht transparente Materialien durchdringbar
- Geringere Auflösung als Röntgen, aber kein gesundheitliches Risiko für den Menschen
- → Einsatz im Kulturerbe (z.B. Inspektion von Gemälden)



[1], [2]

- Dieser Beitrag: Untersuchung historischer Dokumente (Bücher, Briefe, Schriftrollen) mit THz-Bildgebung

[1] <https://legraziemilano.it/nuovositoprod/wp-content/uploads/2020/01/cenacolo-1.jpg>

[2] M. Bauer et al., "Terahertz FMCW measurements of Leonardo da Vinci's "The Last Supper" and other investigations in the field of cultural heritage," 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2020, pp. 01-02.

Agenda

- 1 Motivation
- 2 Anwendungsszenarien und mögliche Messmodalitäten
- 3 Bisherige Ergebnisse
- 4 Fazit

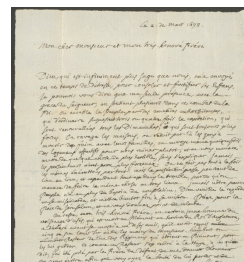
Mögliche Anwendungsszenarien



[3]



[4]



[5]

→ Planare oder zylindrische Messgeometrie; einlagige und mehrlagige Objekte

[3] <https://www.ahlen.de/start/themen/bildung-kultur/nachricht/information/nachricht/aus-ahlen/palaeographie-einstieg-in-das-lesen-historischer-schriften/>

[4] <https://www.ziereis-faksimiles.de/faksimiles/qumran-rollen-schriftrollen-vom-toten-meer>

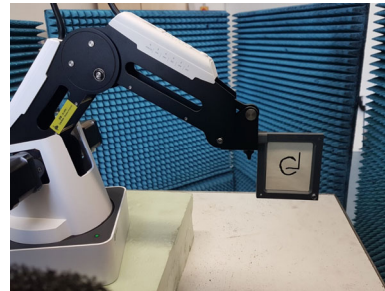
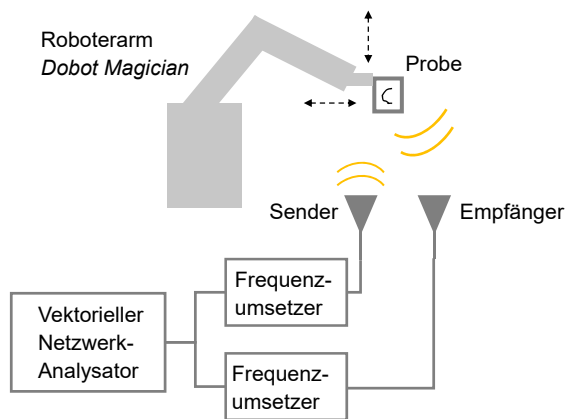
[5] <http://brienne.org/exhibit-4>

- Mögliche Messmodalitäten:
 - Reflexion vs. Transmission
 - Physikalische Fokussierung (optische Linsen) vs. synthetische Fokussierung (Synthetic Aperture Radar)
 - Dauerstrichradar (CW-Radar) vs. Kurzpulstechnik
 - Verschiedene Frequenzbereiche
- Bisher:
 - Dauerstrichradar (Stepped Frequency)
 - Reflexion mit synthetischer Fokussierung (75–110 GHz; 220–325 GHz; 325–500 GHz)
 - Transmission mit physikalischer Fokussierung (220 GHz - 325 GHz)

- 1 Motivation
- 2 Anwendungsszenarien und mögliche Messmodalitäten
- 3 Bisherige Ergebnisse
- 4 Fazit

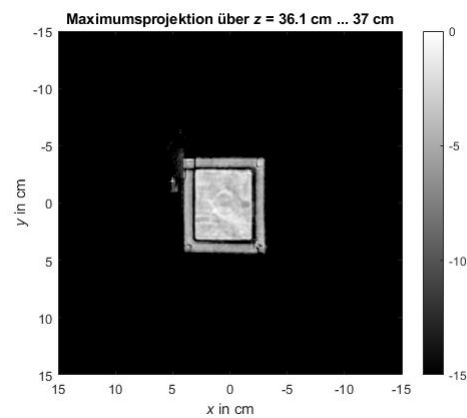
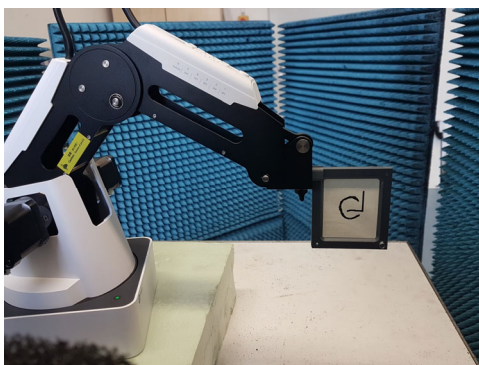
Reflexionsmessung mit synthetischer Fokussierung

Messaufbau



Reflexionsmessung mit synthetischer Fokussierung

Frequenzbereich 220 GHz - 325 GHz

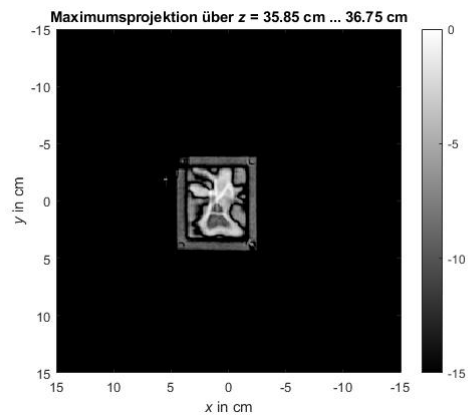
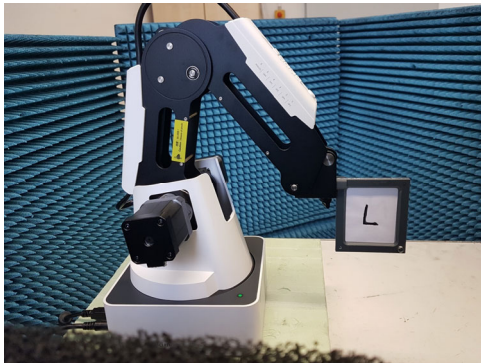


- Schrift nur teilweise erkennbar
- Viel Tinte notwendig für Bildkontrast

Reflexionsmessung mit synthetischer Fokussierung

Frequenzbereich 220 GHz - 325 GHz

Vorder- und Rückseite („L“ und „N“)

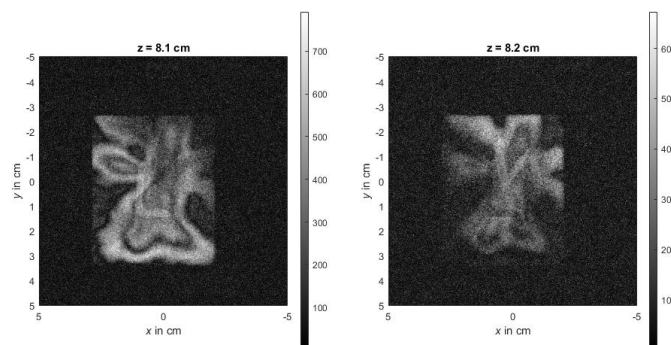
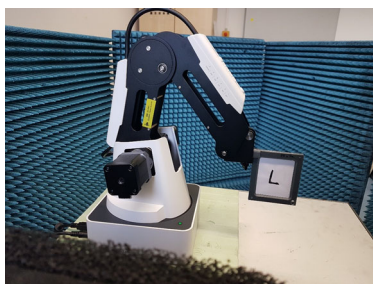


- Messverfahren grundsätzlich geeignet, aber Bildartefakte durch Papierkrümmung

Reflexionsmessung mit synthetischer Fokussierung

Frequenzbereich 325 GHz – 500 GHz

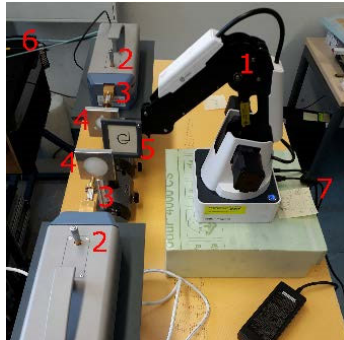
Vorder- und Rückseite („L“ und „N“)



- Messverfahren grundsätzlich geeignet, aber Bildartefakte durch Papierkrümmung
- Viel Tinte notwendig für Bildkontrast

Transmissionsmessung mit physikalischer Fokussierung

Messaufbau



[6]

- 1 Roboterarm
- 2 Frequenzumsetzer
- 3 Antenne
- 4 Linse
- 5 Probe
- 6 Verbindung Netzwerkanalysator
- 7 Verbindung PC

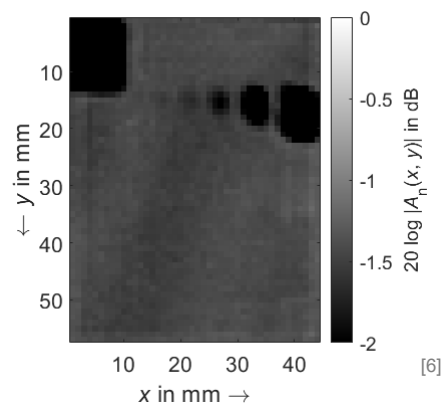
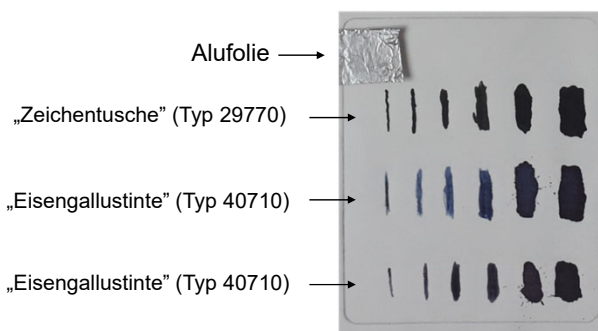
[6] I. Ullmann, K. Root, J. Schür, L. Scheuble, M. Vossiek: „Contactless Inspection of Handwritten Documents with Terahertz Imaging“ in Proceedings of the 18th European Radar Conference 2021, London, April 2022.

13

Transmissionsmessung mit physikalischer Fokussierung

Voruntersuchung Tinten

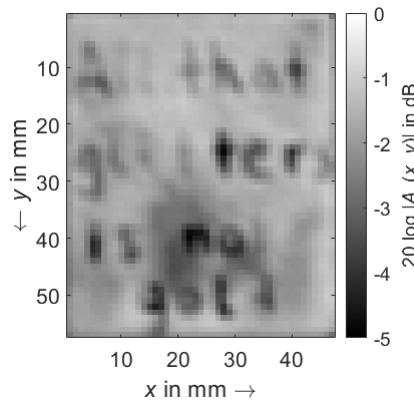
- 3 Tinten (Fa. Rohrer & Klingner)



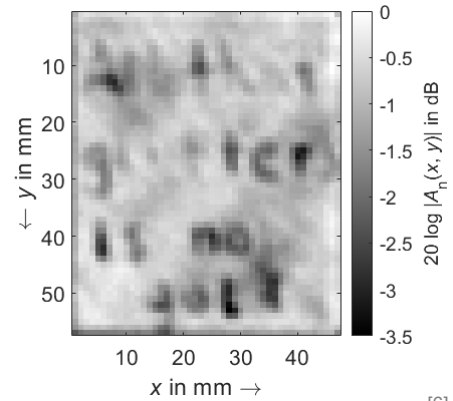
- Nur Zeichentusche sichtbar

Transmissionsmessung mit physikalischer Fokussierung

Frequenzbereich 220 GHz – 325 GHz



In Luft



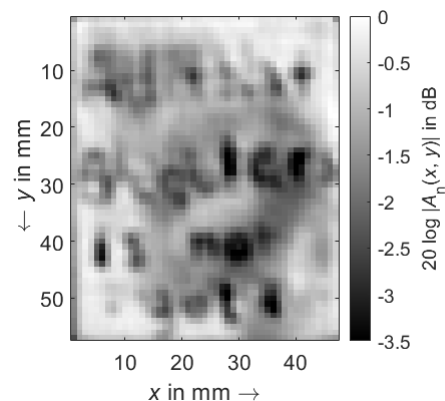
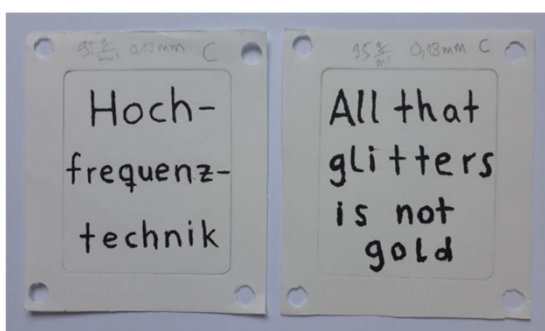
In Papier (einseitig beschriebener Brief)

[6]

Transmissionsmessung mit physikalischer Fokussierung

Frequenzbereich 220 GHz – 325 GHz

Zwei Blätter



- Messverfahren grundsätzlich geeignet, aber abhängig von Tinte
- Schrifterkennung bei mehrlagigen Objekten schwierig

[6]

Abbildung von Schriftrollen

Reflexion, synthetische Fokussierung; 75 GHz – 110 GHz

Messaufbau

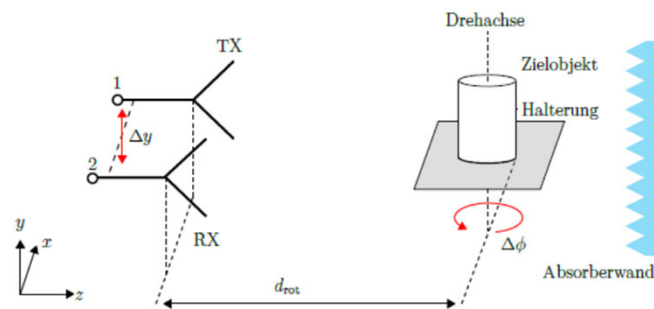
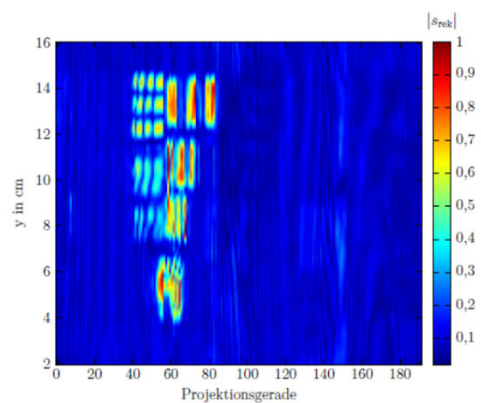
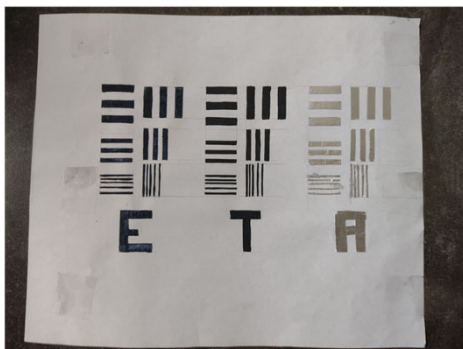


Bild-Credit: Fedor Hrunski

Abbildung von Schriftrollen

Reflexion, synthetische Fokussierung; 75 GHz – 110 GHz



- Nur Alufolie sichtbar

Bild-Credit: Fedor Hrunski

- 1 Motivation
- 2 Anwendungsszenarien und mögliche Messmodalitäten
- 3 Bisherige Ergebnisse
- 4 Fazit

- Bisherige Messkampagne:
 - Reflexion: Abbildung möglich aber starke Bildartefakte durch Unebenheiten
 - Transmission: Guter Bildkontrast bei verlustbehafteter Tinte
 - Physikalische Fokussierung (Linsen): Auflösung durch Optik beschränkt, hohe Messdynamik
 - Synthetische Fokussierung (numerisch): Auflösung durch Arraylänge beschränkt (tendenziell höher als bei Linsen), aber geringere Messdynamik
 - Abbildung von Schriftrollen (Reflexion, synthetische Fokussierung) bisher nicht erfolgreich

- Abbildung historischer Schriften im Terahertz-Frequenzbereich
 - Auflösung schlechter als Röntgen, aber gesundheitlich unbedenklich (nicht-ionisierende Strahlung)
 - Geeignete Anwendungen: Briefe, evtl. Schriftrollen; Bücher ungeeignet
 - Abbildung möglich, aber hohe Abhängigkeit von der verwendeten Tinte
- Weitere Untersuchungen ausstehend (u.a. Kurzpulsmesstechnik)

**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit!**