

Einführung in die Terahertzprüftechnik

Joachim JONUSCHEIT¹

¹ Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern

Kontakt E-Mail: joachim.jonuscheit@itwm.fraunhofer.de

Kurzfassung

Die Terahertz-Technologie zeigt mit der Nutzung des elektromagnetischen Frequenzbereichs von etwa 0,1 THz bis 10 THz eine rasant fortschreitende Entwicklung. In den letzten zwei Dekaden konnten hier auf nicht nur auf dem wissenschaftlichem Gebiet erhebliche Fortschritte erzielt werden. Mittlerweile rücken auch vermehrt konkrete Anwendungen in den Fokus, die vermehrt auch von industriellen Unternehmen angegangen werden. Neueste Fortschritte in der Systementwicklung deuten an, dass die Markteinführung dieser zerstörungsfreien und berührungslosen Messtechnik unmittelbar bevor steht.

Einige Anwendungen aus den nachfolgenden Bereichen sind zurzeit im Fokus der angewandten Forschung und befinden sich im Stadium der praktischen Erprobung:

- Zerstörungsfreie Prüfung (z. B. Defekt- und Struktureerkennung)
- Substanz- und Strukturidentifizierung
- Sicherheit
- Medizin
- Kommunikation

Aktuell stehen für den industriellen Einsatz im Wesentlichen zwei Technologien zur Verfügung: Gepulste optische Terahertz-Systeme sowie rein elektronische Terahertz-Systeme. Beide Varianten weisen spezifische Vorteile für bestimmte Einsatzgebiete auf, wodurch sie meistens disjunkt eingesetzt werden und sich dadurch perfekt ergänzen.

Die generierten Terahertz-Wellen können je nach Systemauslegung für Messungen in Transmissions-, Reflexions- oder Streuanordnung genutzt werden. Neben der reinen Materialcharakterisierung eignen sie sich auch für bildgebende und tomographische Verfahren.

Ziel dieses Beitrages ist es, die Grundlagen der beiden Techniken vorzustellen und einen Einblick in die Möglichkeiten und Perspektiven zu geben.

Einführung in die Terahertz-Prüftechnik

Joachim Jonuscheit

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern



© Fraunhofer ITWM / Folie 1

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Inhalt

- Terahertz - Spektralbereich
- Terahertz - Zeitbereichsspektroskopie
 - Mehrschichtanalysefeld
 - Spektroskopie
 - Nahfeld
- Terahertz – Radar-System
 - Defekterkennung
 - Verpackung
- Zusammenfassung



© Fraunhofer ITWM / Folie 2

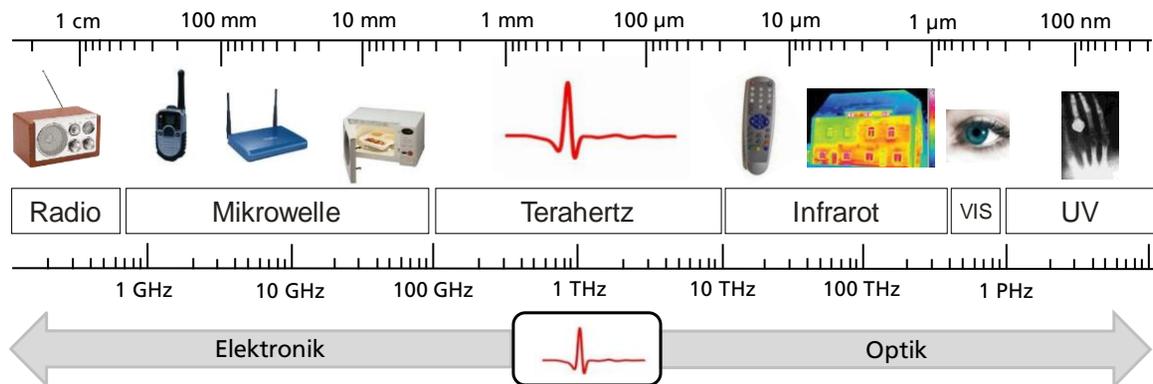
3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Terahertz-Spektralbereich



Terahertz in Zahlen: 0,1 THz – 10 THz
3 mm – 30 μm

© Fraunhofer ITWM / Folie 3

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Terahertz-Spektralbereich

Eigenschaften

Viele Werkstoffe wie Kunststoffe, Papier, Keramik, Halbleiter und Textilien sind **transparent**.

Metalle und andere elektrische Leiter sind **Reflektoren**.

Starke **Absorption** durch polare Flüssigkeiten wie Wasser.

Identifizierung fast aller polarer Moleküle ist möglich.

Terahertz-Wellen sind **gesundheitlich unbedenklich**.

© Fraunhofer ITWM / Folie 4

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Einsatzgebiete der Terahertz-Technologie

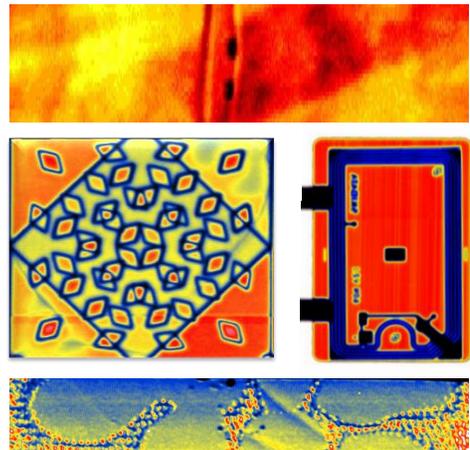
Qualitätskontrolle – Zerstörungsfreie Prüfung

Messungen von

- Schichtdicken
- Feuchte
- Dotierung

Erkennung von

- Fremdkörpern, Lunkern, Blasen
- Verborgenen Strukturen
- Delamination
- Klebeverbindungen
- Inhomogenitäten



© Fraunhofer ITWM / Folie 10

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



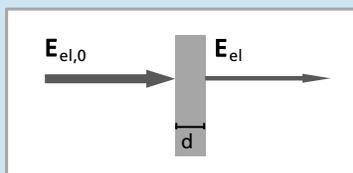
DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Terahertz-Messtechnik

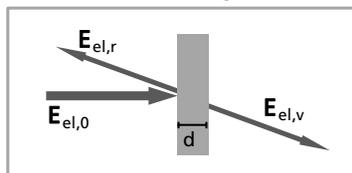
Anordnungen

Transmission



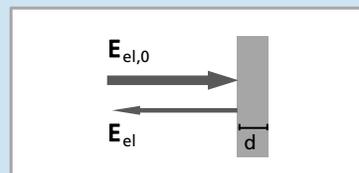
- Spektroskopie
- Bildgebung
- Keine 3D-Information
- Getrennte Module
- Beidseitiger Zugang

Streuung



- Bildgebung
- 3D-Information
- Hintergrundunterdrückung
- Getrennte Module
- Spektroskopie

Reflexion



- Bildgebung
- 3D-Information
- Nur ein Modul
- Einseitiger Zugang
- Spektroskopie

© Fraunhofer ITWM / Folie 12

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017

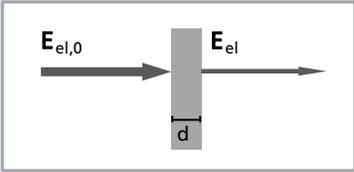
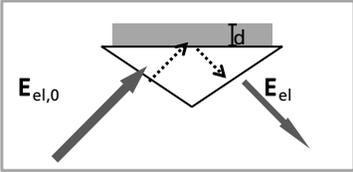
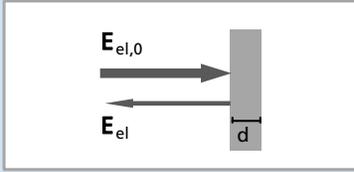


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Terahertz-Messtechnik

Anordnungen

Transmission	ATR	Reflexion
		
<ul style="list-style-type: none"> ■ Spektroskopie ■ Bildgebung ■ Keine 3D-Information ■ Getrennte Module ■ Beidseitiger Zugang 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Spektroskopie an Flüssigkeiten und stark absorbierenden Medien ■ Einseitiger Zugang 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Bildgebung ■ 3D-Information ■ Nur ein Modul ■ Einseitiger Zugang ■ Spektroskopie

© Fraunhofer ITWM / Folie 13
3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



Inhalt

- Terahertz - Spektralbereich
- Terahertz - Zeitbereichsspektroskopie
 - Mehrschichtanalysefeld
 - Spektroskopie
 - Nahfeld
- Terahertz – Radar-System
 - Defekterkennung
 - Verpackung
- Zusammenfassung

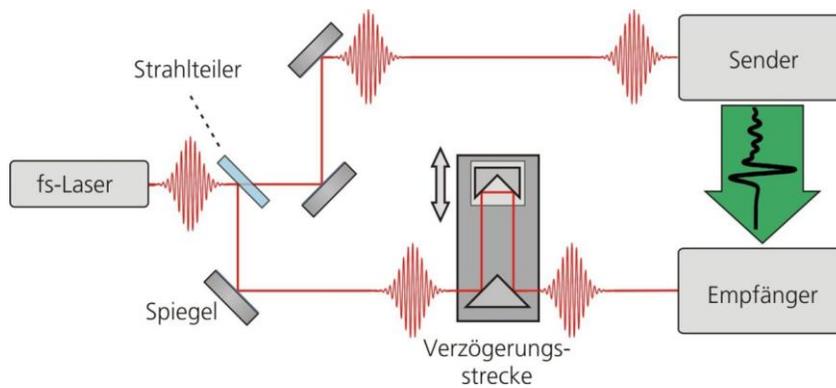


© Fraunhofer ITWM / Folie 14
3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie

Prinzipieller Aufbau



- Aufspalten des Femtosekunden-Laserstrahls zum Schalten von Sender und Empfänger
- Synchronisierung der Lichtpulse durch Verzögerungsstrecke

© Fraunhofer ITWM / Folie 15

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017

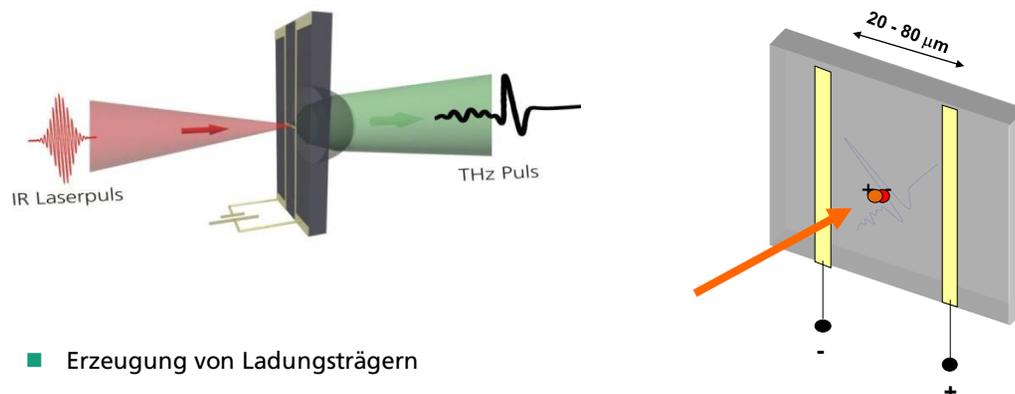


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie

Erzeugung



- Erzeugung von Ladungsträgern

© Fraunhofer ITWM / Folie 16

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017

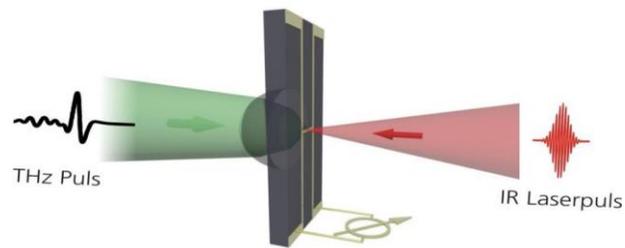


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie

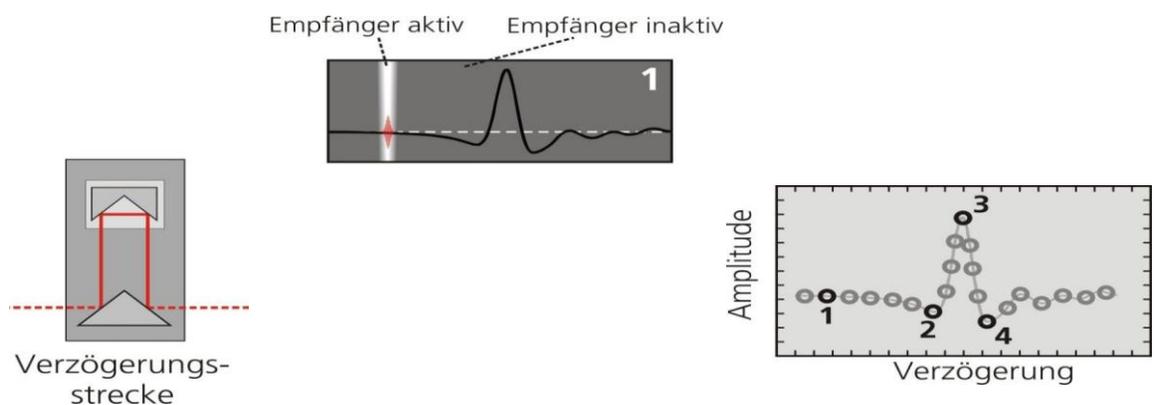
Empfänger



- Sampling-Aufnahme der Terahertz-Pulse durch kontinuierliche Veränderung der Differenz des Eintreffzeitpunktes von IR und Terahertz-Puls auf dem Empfänger
- Empfänger nur für kurze Zeit empfindlich, i.a. $\ll 1$ Pikosekunde

Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie

Empfänger



Terahertz-Kurzpuls-Messsystem Terahertz-Zeitbereichsspektrometer

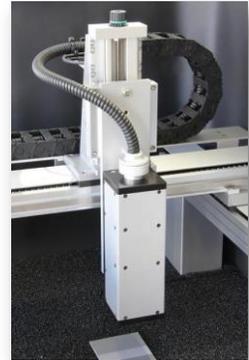


Abmessungen

Messmodul:
75 x 75 x 220 mm
1,3 kg

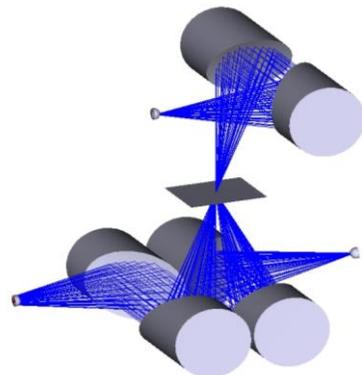
Basiseinheit:
420 x 500 x 265 mm
33,4 kg

Kabel/Faser:
5 – 10 m



Messmodul montiert auf XY-Scanner

Kundenspezifisches Terahertz-Kurzpuls-System



Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie

Messprinzip

Zeitbereich

- Messung des elektrischen Feldes
- Pulsdauer < 1 ps
- Signal-zu-Rausch > 60 dB
- (30 ms Integrationszeit)
- 40 Wellenformen pro Sekunde

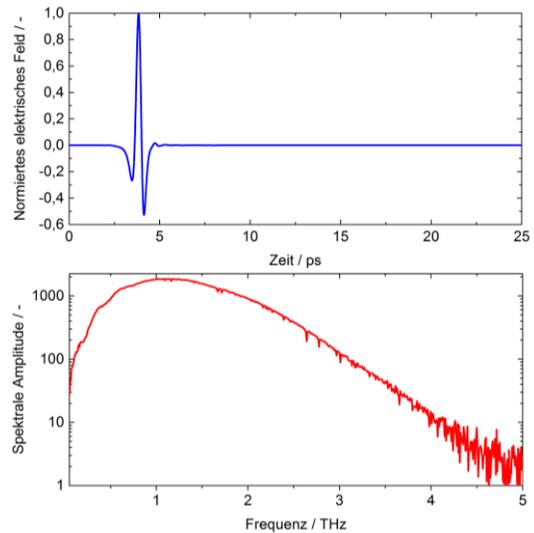


Fourier Transformation



Frequenzbereich

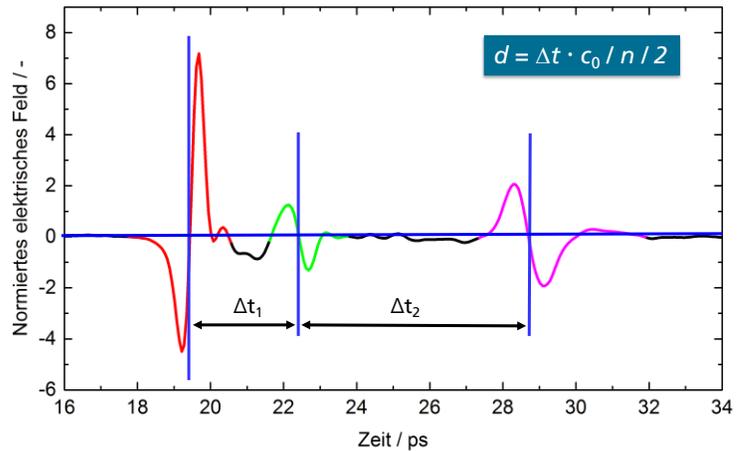
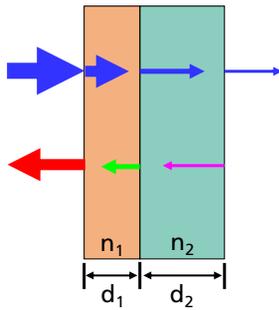
- Spektrale Amplitude
- Phaseninformation
- Nutzbare Bandbreite
- $100 \text{ GHz} < \nu < 4 \text{ THz}$



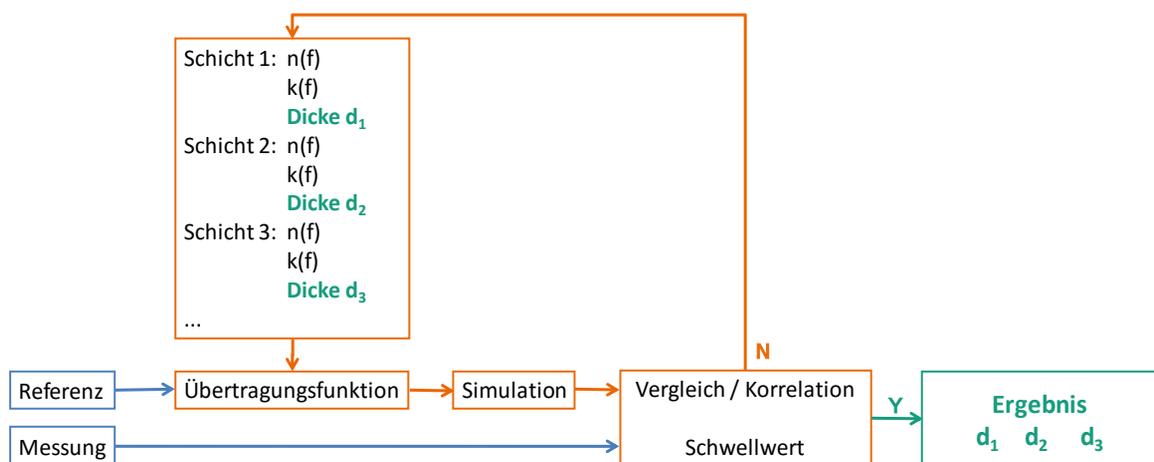
Lackierkontrolle



Schichtdickenbestimmung in Reflexion - Messprinzip

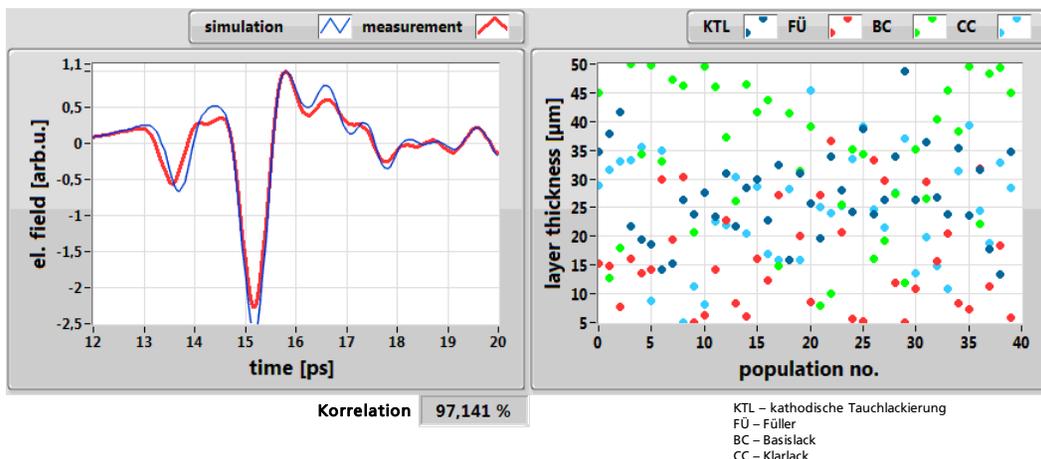


Schichtdickenmessung Flussdiagramm der Auswertung



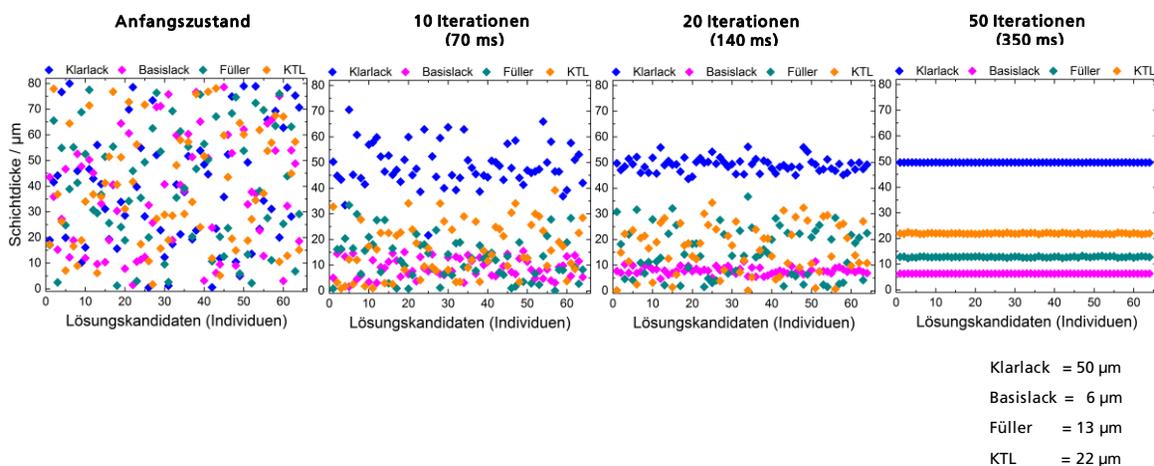
Schichtdickenmessung

Konvergenz der Auswertung



Schichtdickenmessung

Konvergenz der Auswertung

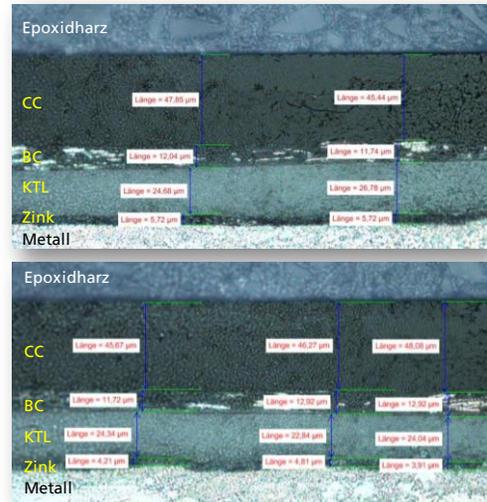


Schichtdickenmessung

Dreischicht-Lacksystem auf Metall

Schicht	Terahertz μm	Querschliff μm
CC	45.2 ± 0.5	45.4 – 48.0
BC	13.5 ± 0.4	11.7 – 12.9
KTL	24.2 ± 0.8	22.8 – 26.7

Vergleich mit »Goldstandard«:
Querschliff und Mikroskop



© Fraunhofer ITWM / Folie 28

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017

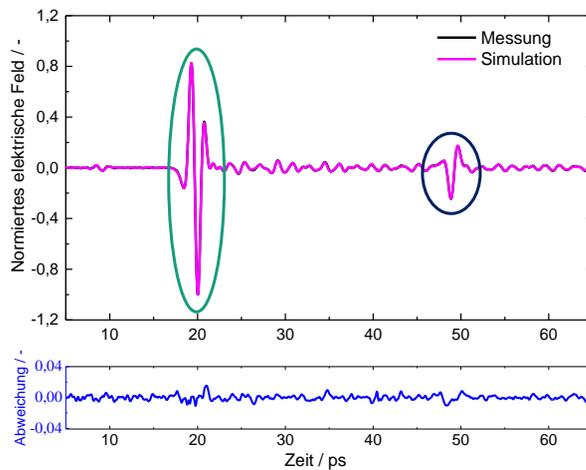


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Schichtdickenmessung

Zweischicht-Lacksystem auf Kunststoff



Schicht	Dicke (μm)	Terahertz	Querschliff
Schicht 1		37 ± 1	38 ± 1
Schicht 2		40 ± 1	40 ± 1
Substrat		2889 ± 2	2893 ± 2

© Fraunhofer ITWM / Folie 29

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017

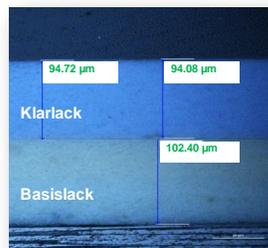
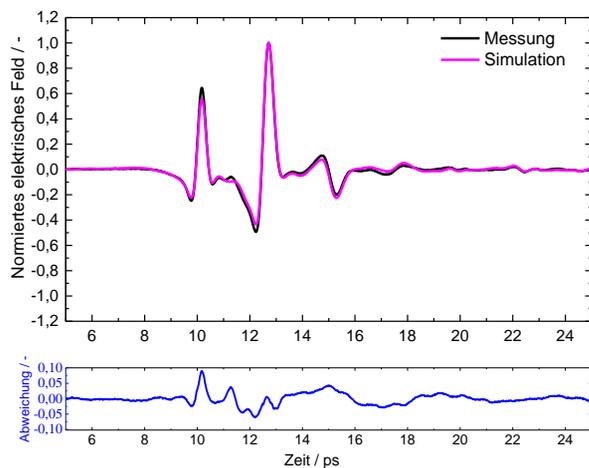


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Schichtdickenmessung

Zweischicht-Lacksystem auf CFK



Schicht	Dicke (µm)	Terahertz	Querschliff
Klarlack		100 ± 1	102 ± 1
Basislack		95 ± 1	94 ± 1

© Fraunhofer ITWM / Folie 30

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Rohre und Schläuche



© Fraunhofer ITWM / Folie 32

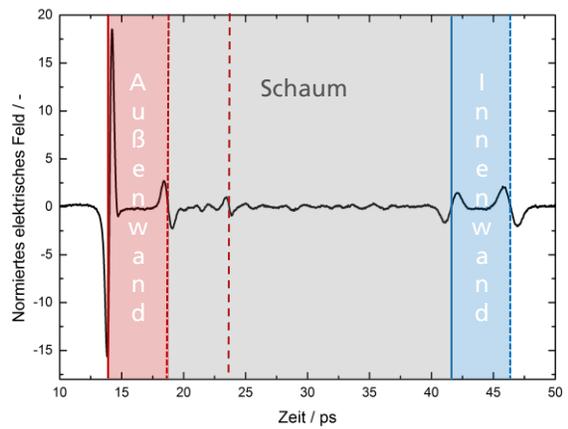
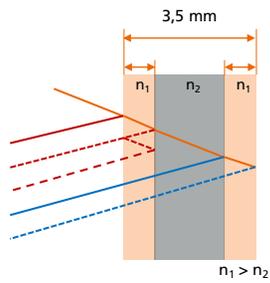
3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Schichtdickenmessung Geschäumtes PVC-Rohr

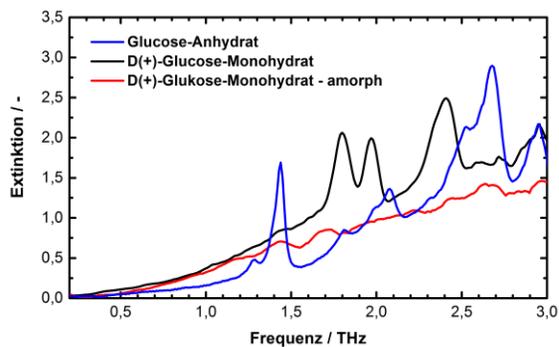
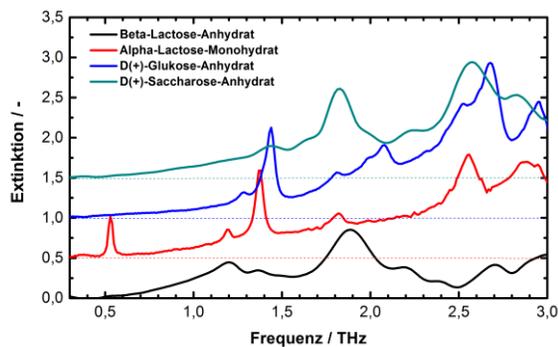


Substanzidentifikation



Substanzidentifizierung

Ausgewählte Zucker



© Fraunhofer ITWM / Folie 35

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



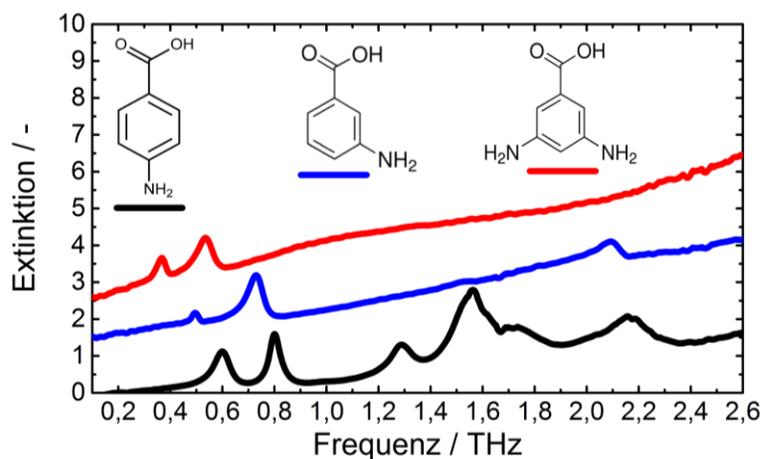
DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Fraunhofer
ITWM

Substanzidentifizierung

Unterscheidung von Isomeren



© Fraunhofer ITWM / Folie 36

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017

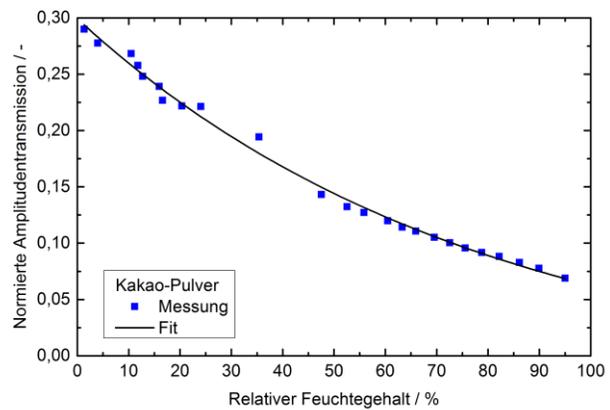


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

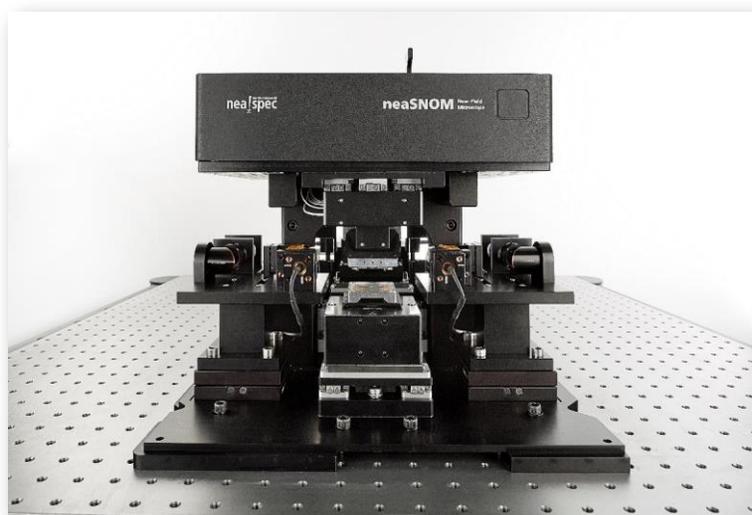


Fraunhofer
ITWM

Feuchtebestimmung Kakao-Pulver



Nahfeld-Untersuchungen



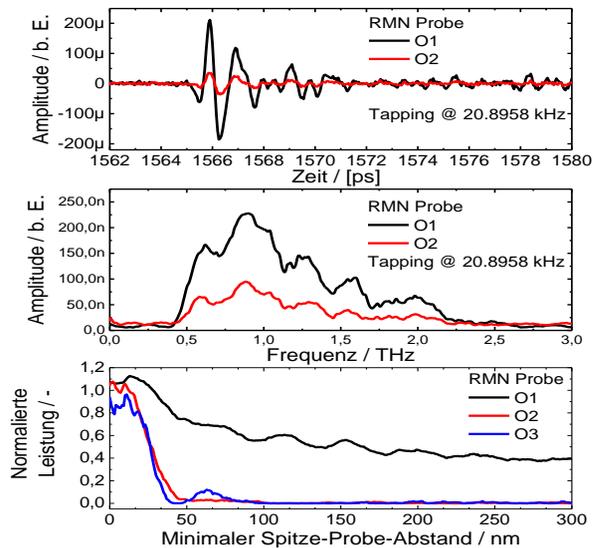
Nanometer-Fokussierung mittels Nahfeldspitze

Proben-Topographie



Wechselwirkung Nahfeldspitze-Probe:

1/e-Abfall innerhalb von 30 nm (ca. $\lambda/10.000$)

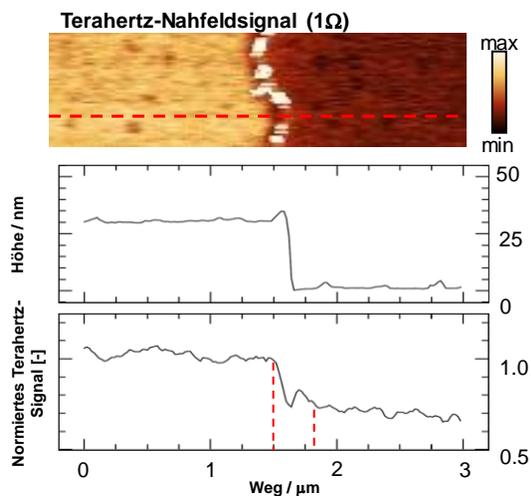


Nanometer-Fokussierung mittels Nahfeldspitze

Proben-Topographie



Linienprofil demonstriert eine räumliche Auflösung von ca. 300 nm ($\lambda/1000$)!



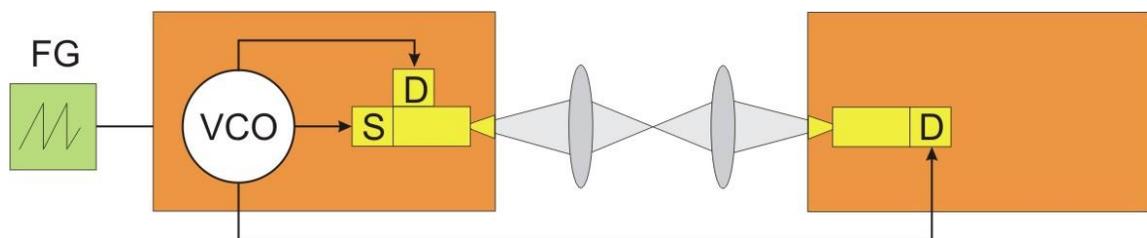
Inhalt

- Terahertz - Spektralbereich
- Terahertz - Zeitbereichsspektroskopie
 - Mehrschichtanalysefeld
 - Spektroskopie
 - Nahfeld
- Terahertz – Radar-System
 - Defekterkennung
 - Verpackung
- Zusammenfassung



Terahertz-FMCW-Radar

FMCW: Frequency modulated continuous wave



VCO Spannungskontrollierter Mikrowellenoszillator

FG Funktionsgenerator zur Frequenzsteuerung des VCO

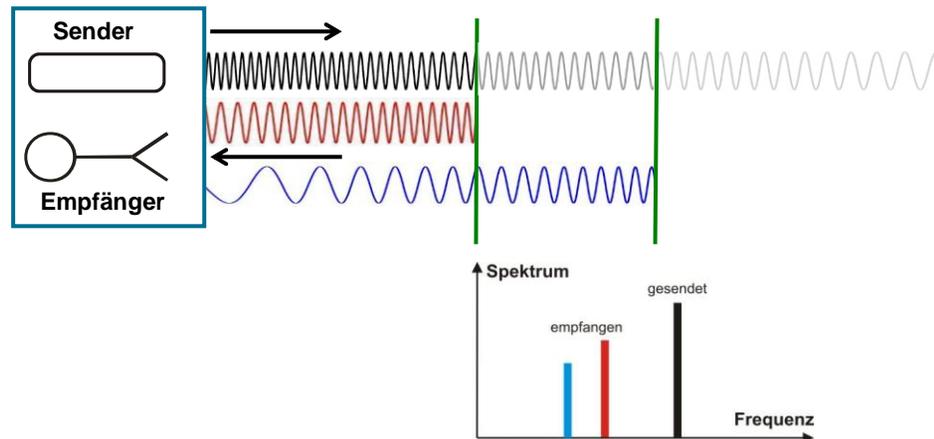
S, D Sende- und Empfangseinheiten mit entsprechenden Frequenzvervielfacher und Verstärker

THz Optik Abhängig von Anwendung

Terahertz-Radar-Messtechnik

mit kontinuierlichen Wellen variabler Frequenz (FMCW-Radar)

THz Messsystem



© Fraunhofer ITWM / Folie 45

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Terahertz-Radar-Messtechnik

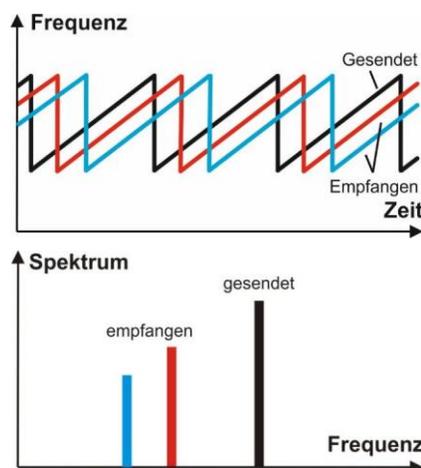
mit kontinuierlichen Wellen variabler Frequenz (FMCW-Radar)

Frequenzdifferenz

- Abstand
- Dicke
- Tiefeninformation

Amplitudenänderung

- Absorption / Streuung
- Dicke
- Inhomogenitäten
- Fehlstellen



© Fraunhofer ITWM / Folie 46

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



FMCW-Terahertz-System

Spezifikation

Technologie	Vollelektronisch		
Messzeit pro Pixel	250 μ s		
Dynamikbereich	> 50 dB und 1:300 (< 1 s)		
Arbeitsfrequenz	100 GHz	150 GHz	300 GHz
Frequenzbereich	60 -110 GHz	110 – 170 GHz	230 - 320 GHz
Laterale Auflösung für Linsenbrennweite 50 mm	3 mm	2 mm	1 mm
Tiefenauflösung für Brechungsindex $n = 1$	3,8 mm	3,2 mm	1,7 mm
Eindringtiefe	Einige cm, materialabhängig		

Vorteile:

- Zerstörungsfrei und berührungslos
→ kein Einsatz eines Kopplungsmedium
- Messung in Reflexion → einseitiger Probenzugang ausreichend
- kein Strahlenschutz notwendig

© Fraunhofer ITWM / Folie 47

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



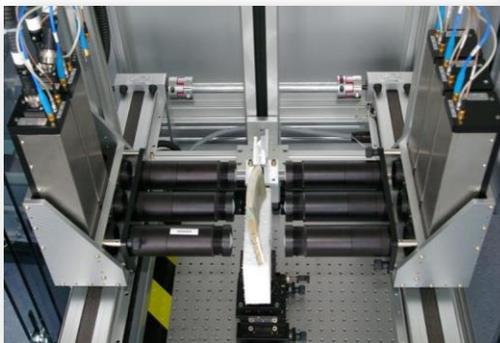
DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Anwendungszentrum
Terahertz-Systeme

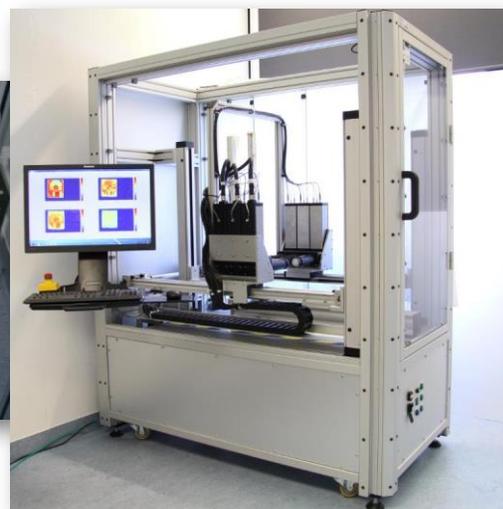
Fraunhofer
ITWM

Terahertz-FMCW-Radartechnik

Bildgebendes System



Reflexions- und Transmissionsmessungen
an ebenen Objekten



© Fraunhofer ITWM / Folie 48

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Anwendungszentrum
Terahertz-Systeme

Fraunhofer
ITWM

SynViewCompact

mobiles SynViewCompact

bei Becker Photonik

Eine mobile Scaneinheit (je nach Ausführung 20 kg - 30 kg Gewicht) kann beliebig im Raum orientiert werden (horizontal, vertikal, auf dem Kopf)

Ein Rechner enthält alle notwendigen Steuerungen



SynViewCompact,
Becker Photonik GmbH, Porta Westfalica

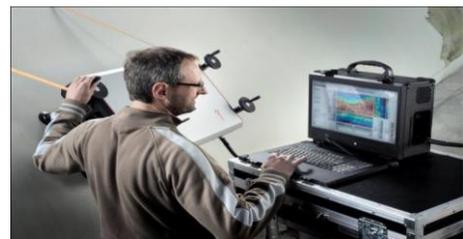
SynViewCompact

mobiles SynViewCompact

bei Becker Photonik

Eine mobile Scaneinheit (je nach Ausführung 20 kg - 30 kg Gewicht) kann beliebig im Raum orientiert werden (horizontal, vertikal, auf dem Kopf)

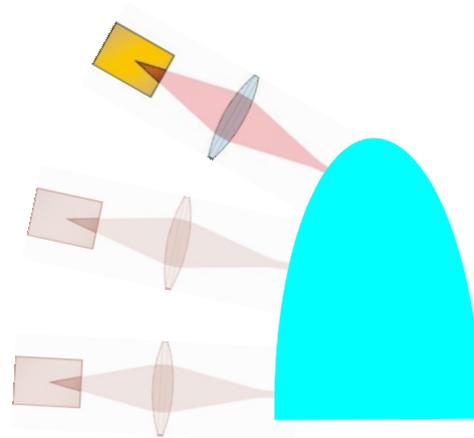
Ein Rechner enthält alle notwendigen Steuerungen



Terahertz-FMCW-Radartechnik

Prüfung einer gekrümmten Oberfläche

- Messung in Reflexion
→ nur einseitiger Zugang notwendig
- Sensor muss senkrecht zur Oberfläche stehen:
→ Roboter
oder
→ berührende Messung
(Aufsetzen des Sensors)
- Messgeschwindigkeit etwa 1 m/s und
Messfleck etwa \varnothing 2 mm

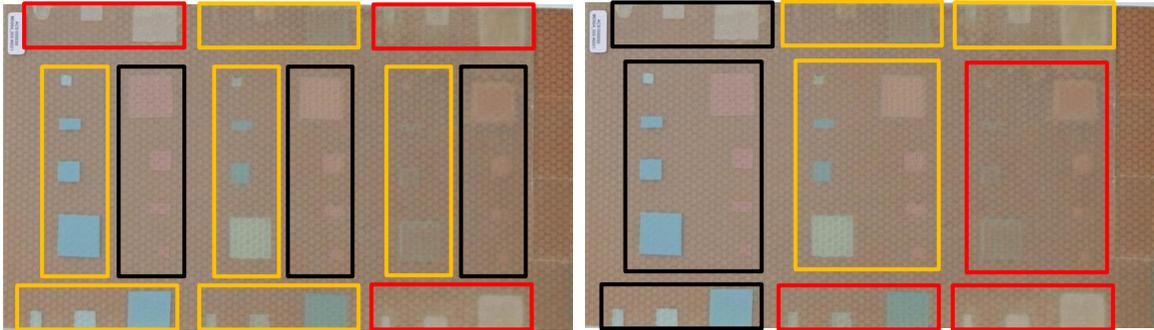


Defekterkennung



Kalibrierproben mit künstlichen Defekten

Struktur



Probengröße: 340 x 200

Teflon PE-Folie Luftspalt

Gruppe 1 Gruppe 2 Gruppe 3

© Fraunhofer ITWM / Folie 55

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017

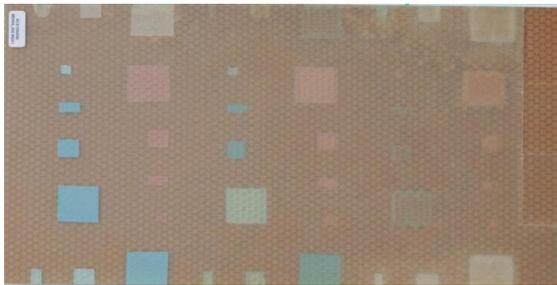


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



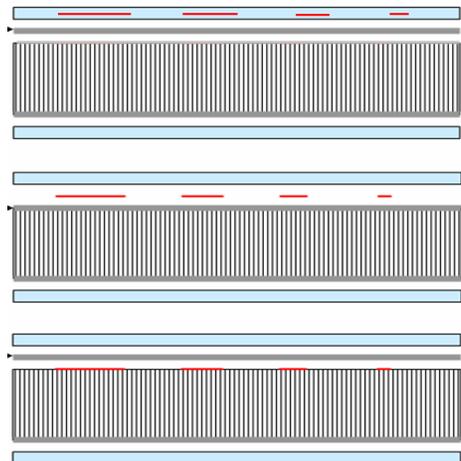
Kalibrierproben mit künstlichen Defekten

Struktur



Probengröße: 340 x 200 mm

Defektgröße (mm)	6x6, 6x12, 12x12, 25x25
Defektmaterial	Teflon, PE, Luft
Dicke (mm)	1 / 5 / 1



© Fraunhofer ITWM / Folie 56

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



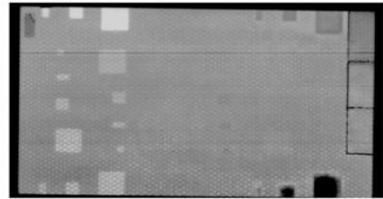
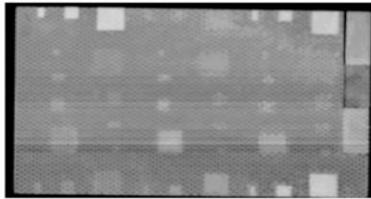
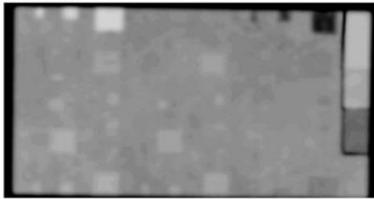
Volumeninspektion von Bauteilen aus GFK-Verbundmaterial

Reflexionsaufnahmen bei unterschiedlichen Frequenzen

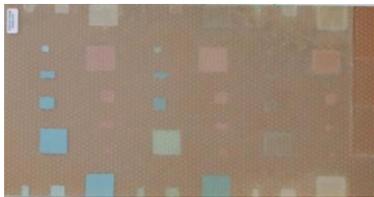
100 GHz

150 GHz

300 GHz



min. Intensität [dB] max.



1

Fehlergröße (mm)	6x6, 6x12, 12x12, 25x25
Defektmaterial	Teflon, PE, Luft
Dicke (mm)	1 / 5 / 0,75

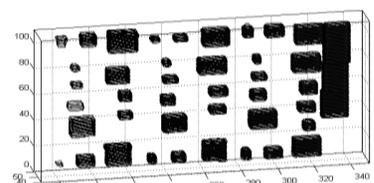
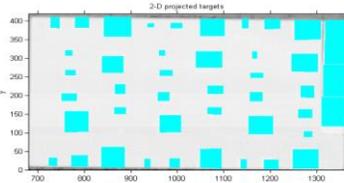
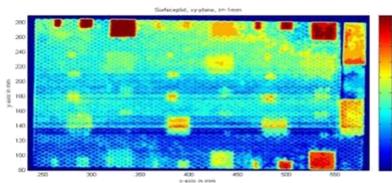
Volumeninspektion von Bauteilen aus GFK-Verbundmaterial

Ergebnisdarstellung der Bildverarbeitung

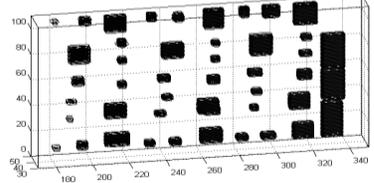
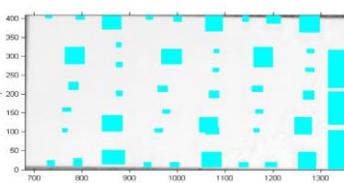
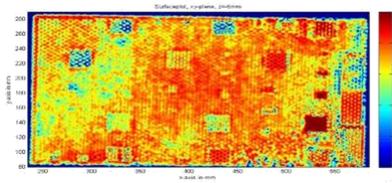
Seite A: 150 GHz

2D Projektion

3D Visualisierung



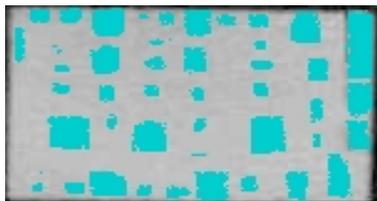
Seite B: 150 GHz



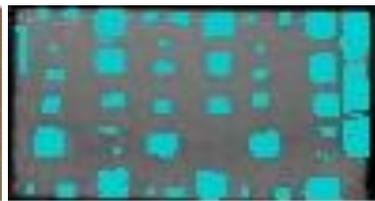
Volumeninspektion von Bauteilen aus GFK-Verbundmaterial

Reflexionsaufnahmen bei unterschiedlichen Frequenzen

100 GHz



300 GHz



Positive Detektionsrate (PD) und Falschalarmrate (FA) für Probe mit 45 künstlich eingebrachten Fehler

Method	PD (#)	PD (%)	FA (#)
Reflexion 100 GHz	41 / 43	91 / 95	- / -
Reflexion 150 GHz	43 / 45	95 / 100	- / -
Reflexion 300 GHz	42 / 34	93 / 75	- / -

© Fraunhofer ITWM / Folie 59

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Anwendungszentrum
Terahertz-Technik

Fraunhofer
ITWM

Verpackungskontrolle



© Fraunhofer ITWM / Folie 60

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017

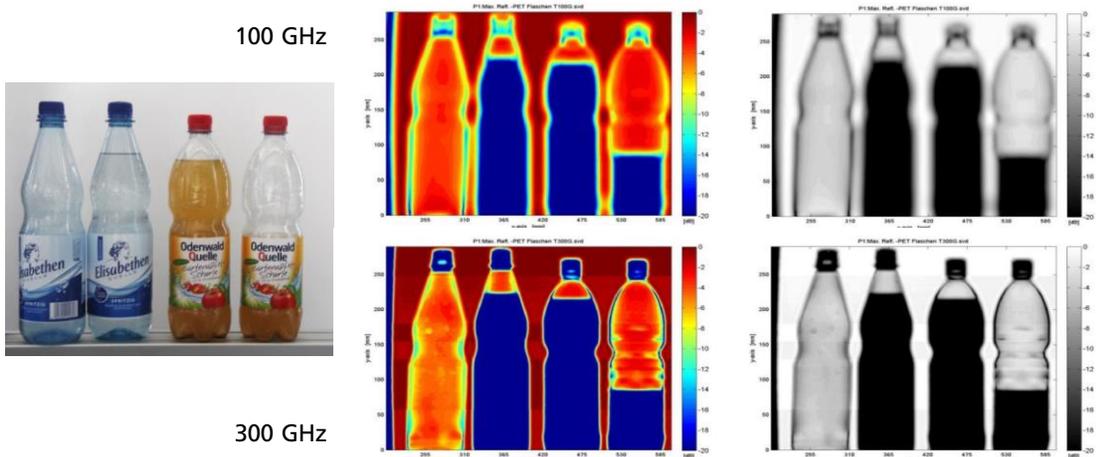


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Anwendungszentrum
Terahertz-Technik

Fraunhofer
ITWM

Messergebnis für PET-Flaschen



© Fraunhofer ITWM / Folie 61

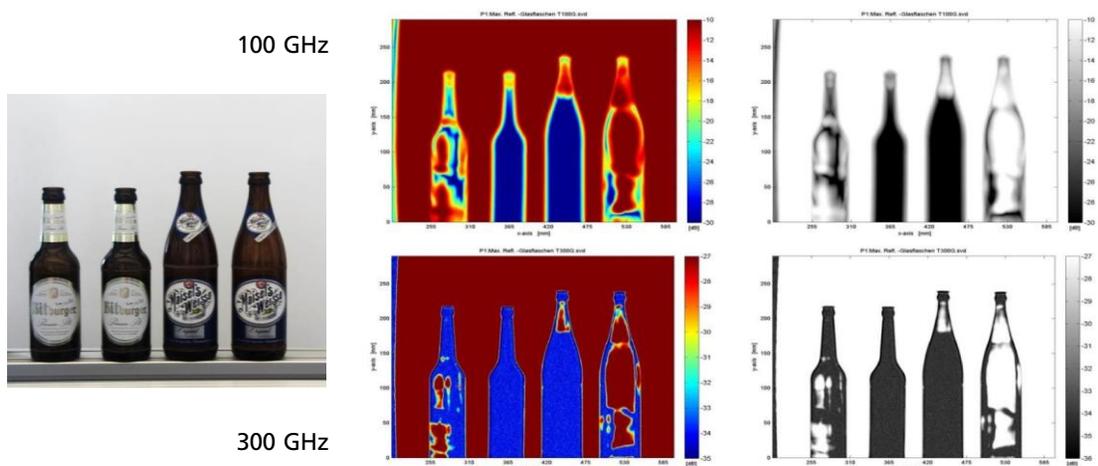
3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Messergebnis für Glas-Flaschen



© Fraunhofer ITWM / Folie 62

3. Fachseminar: Mikrowellen- und Terahertz-Prüftechnik in der Praxis, Würzburg, 04. April 2017



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Zusammenfassung / Ausblick

Im Vergleich zu etablierten Messmethoden offenbart die Terahertz-Prüftechnik Alleinstellungsmerkmale :

Zeitbereichsspektroskopie

- Berührungslose Mehrschichtanalyse
- Identifikation von verdeckten Substanzen

FMCW-Radartechnik

- Defekterkennung in Verbundwerkstoffen mit GFK und Wabenstruktur / Schaum



Dr. Joachim Jonuscheit
Fraunhofer ITWM
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern

Tel. + 49 631 31600-4911
Email: joachim.jonuscheit@itwm.fraunhofer.de

