

Inspektion von glasfaserverstärkten Composite-Materialien: Vergleich der Terahertz-Technik mit klassischen Prüfverfahren

Joachim JONUSCHEIT¹, Carsten MATHEIS¹, Fabian FRIEDERICH¹,
Georg VON FREYMAN¹

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

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

Kurzfassung

In zunehmendem Maße werden Bauteile aus verstärkten Kunststoffen (GFK und CFK) bzw. aus Verbundwerkstoffen, die auf verstärkten Kunststoffen basieren, eingesetzt. Diese Materialien zeichnen sich durch ihr geringes Gewicht und hohe mechanische Belastbarkeit aus, stellen aber auch besondere Herausforderung an die Prüftechniken.

Mit Hilfe der Terahertz-Techniken sind Untersuchungen an verstärkten Kunststoffen und Verbundwerkstoffen möglich und deshalb eignet sich die Methode hervorragend zur berührungslosen und zerstörungsfreien Inspektion dieser Materialien. Mögliche Fehlerbilder, die mit der Terahertz-Technik erkannt werden können, sind Hohlräume und Blasen, Fremdkörper, Strukturfehler sowie fehlerhafte Beschichtungen.

Im Rahmen des EU-Projektes DOTNAC wurden Testobjekte aus GFK und GFK-basierten Verbundwerkstoffen mit diversen relevanten Fehlerbildern hergestellt und mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht. Als in der zerstörungsfreien Prüfung etablierte Verfahren wurden Ultraschall (Pulsecho, Transmission und IWEX), Lock-in Thermographie und Röntgen eingesetzt.

Diese Proben wurden auch mit einem FMCW-Terahertz-Radarsystem untersucht. Da in vielen Anwendungen nur ein einseitiger Zugang zum Prüfkörper möglich ist, werden die Testobjekte in Reflexion untersucht. Auf diese Weise erhält man mit dieser Technik eine 3D-Ansicht des zu untersuchenden Objektes. Für eine automatisierte Defekterkennung wurden 3D-Bildverarbeitungstechniken eingesetzt.

Die Testobjekte wurden im Rahmen eines Ringversuches jeweils mit den unterschiedlichen Prüftechniken untersucht, die gewonnenen Ergebnisse umfassend zusammengestellt und bewertet. Im Mittelpunkt steht dabei der Vergleich der Fehlererkennungsrate der einzelnen Prüfverfahren. Die Kurzfassung des Ergebnisses dieser Studie ist:

- Für GFK-Laminat können interne Defekte mit Ultraschall, Thermographie und Terahertz gleichermaßen erkannt werden. Für Röntgen wurde eine niedrigere Nachweis-wahrscheinlichkeit ermittelt.
- Für GFK-Verbundwerkstoffe mit Waben- und Schaumstrukturen konnte mit Terahertz die höchste Fehlerdetektionsrate erzielt werden. Ultraschall, Thermographie und Röntgen zeigen eine deutliche geringere Fehlerdetektionsrate.



Inspektion von glasfaserverstärkten Composite-Materialien: Vergleich der Terahertz-Technik mit klassischen Prüfverfahren

J. Jonuscheit, C. Matheis, F. Friederich, G. von Freymann

Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM, Kaiserslautern



© Fraunhofer ITWM / Folie 1
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Abwärtungstechnik
Terahertz-Technik

Fraunhofer
ITWM

Inhalt

- Terahertz-Spektralbereich
- Terahertz-FMCW-Radar
- GFK-Composite
 - Messungen und Defekterkennung
 - Vergleich mit klassischen Prüfverfahren
- Zusammenfassung / Ausblick



© Fraunhofer ITWM / Folie 2
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel

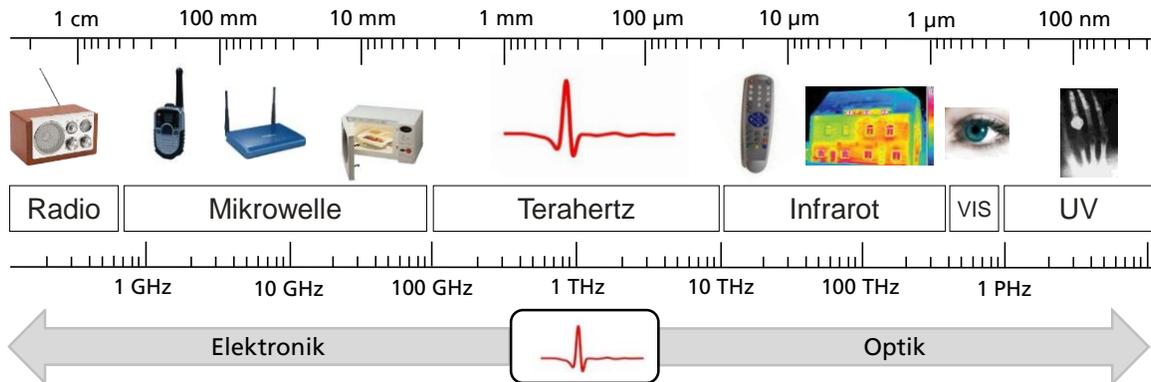


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Abwärtungstechnik
Terahertz-Technik

Fraunhofer
ITWM

Terahertz-Spektralbereich



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

© Fraunhofer ITWM / Folie 3
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Abmessungstechnik
Terahertz-Technik

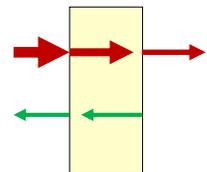
Fraunhofer
ITWM

Terahertz-Spektralbereich

Eigenschaften

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

- Erkennen interner Strukturen und Fremdkörper
- Inspektion verpackter Produkte



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
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Abmessungstechnik
Terahertz-Technik

Fraunhofer
ITWM

Terahertz-Spektralbereich

Eigenschaften

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

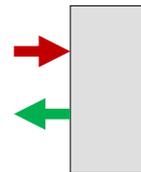
Metalle und andere elektrische Leiter sind **Reflektoren**.

- Kein Blick ins Bauteilinnere
- Untersuchung der Oberfläche und Beschichtung

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

Identifizierung fast aller polarer Moleküle ist möglich.

Terahertz-Wellen sind **gesundheitslich unbedenklich**.



Terahertz-Spektralbereich

Eigenschaften

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

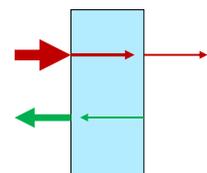
Metalle und andere elektrische Leiter sind **Reflektoren**.

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

- Geringe Eindringtiefe in wasserhaltige Objekten
- Quantitative Bestimmung des Wassergehaltes

Identifizierung fast aller polarer Moleküle ist möglich.

Terahertz-Wellen sind **gesundheitslich unbedenklich**.



Terahertz-Spektralbereich

Eigenschaften

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

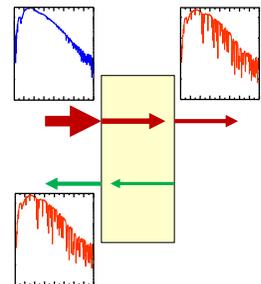
Metalle und andere elektrische Leiter sind **Reflektoren**.

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

Identifizierung fast aller polarer Moleküle ist möglich.

- Identifikation von Wirkstoffen und Drogen
- Erkennen von Strukturänderungen wie Polymorphismus

Terahertz-Wellen sind **gesundheitlich unbedenklich**.



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**.

- Keine Veränderungen organischer Substanzen
- Keine besonderen Strahlenschutzmaßnahmen notwendig



Inhalt

- Terahertz-Spektralbereich
- Terahertz-FMCW-Radar
- GFK-Composite
 - Messungen und Defekterkennung
 - Vergleich mit klassischen Prüfverfahren
- Zusammenfassung / Ausblick



© Fraunhofer ITWM / Folie 9
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel

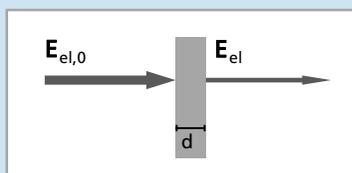


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



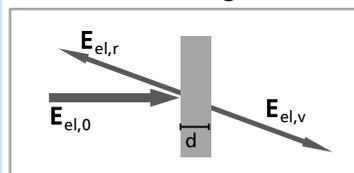
Terahertz-Messtechnik Anordnungen

Transmission



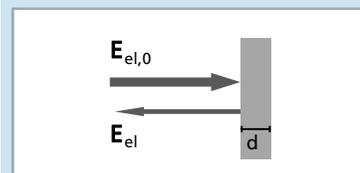
- Spektroskopie
- Bildgebung
- Keine 3D-Information
- Getrennte Module
- Beidseitiger Zugang

Streuung



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

Reflexion



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

© Fraunhofer ITWM / Folie 12
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel

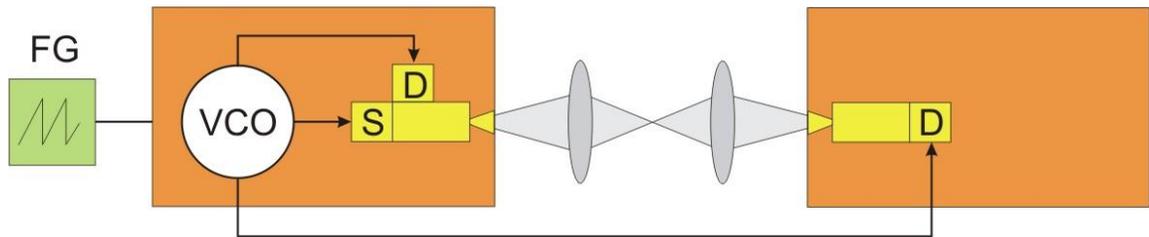


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Terahertz-FMCW-Radar

FMCW: Frequency modulated continuous wave

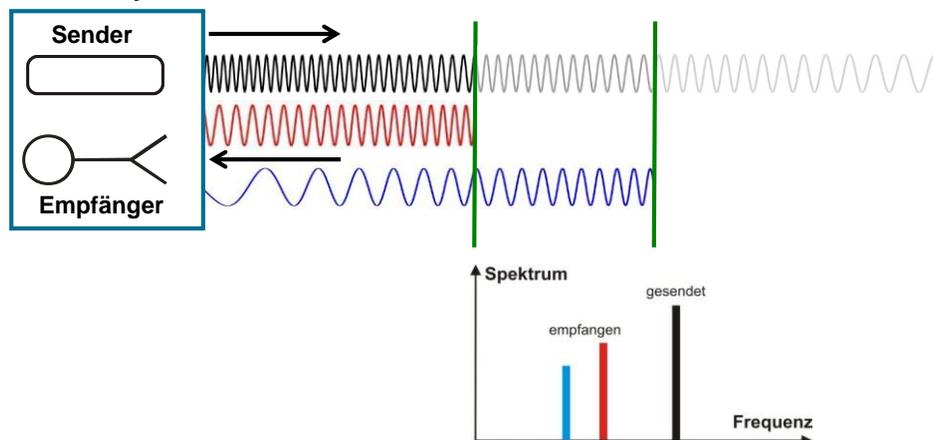


- VCO** Spannungskontrollierter Mikrowellenoszillator
- FG** Funktionsgenerator zur Frequenzsteuerung des VCO
- S, D** Sende- und Empfangseinheiten mit entsprechenden Frequenzvervielfacher und Verstärker
- THz Optik** Abhängig von Anwendung

Terahertz-Radar-Messtechnik

mit kontinuierlichen Wellen variabler Frequenz (FMCW-Radar)

THz Messsystem



Terahertz-Radar-Messtechnik

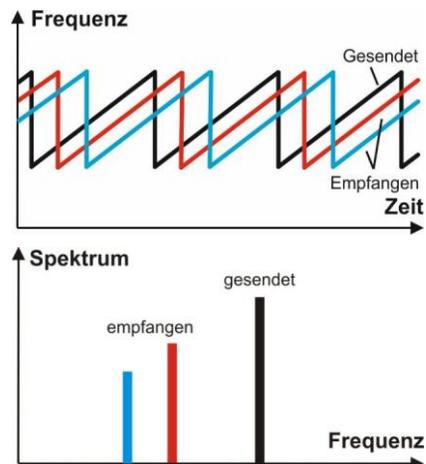
mit kontinuierlichen Wellen variabler Frequenz (FMCW-Radar)

Frequenzdifferenz

- Abstand
- Dicke
- Tiefeninformation

Amplitudenänderung

- Absorption / Streuung
- Dicke
- Inhomogenitäten
- Fehlstellen



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		

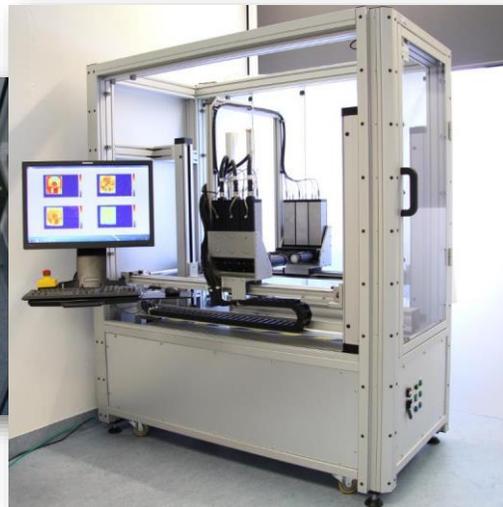
Vorteile:

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

Terahertz-FMCW-Radartechnik Bildgebendes System

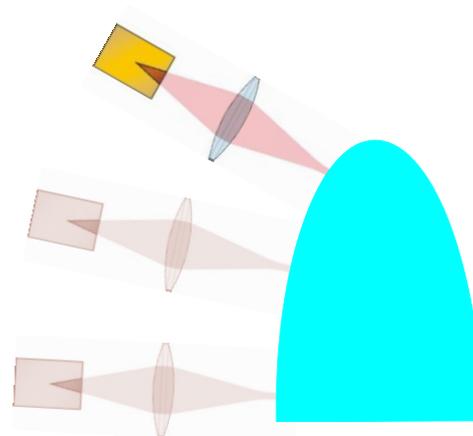


Reflexions- und Transmissionsmessungen
an ebenen Objekten



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



Inhalt

- Terahertz-Spektralbereich
- Terahertz-FMCW-Radar
- GFK-Composite
 - Messungen und Defekterkennung
 - Vergleich mit klassischen Prüfverfahren
- Zusammenfassung / Ausblick



© Fraunhofer ITWM / Folie 23
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel



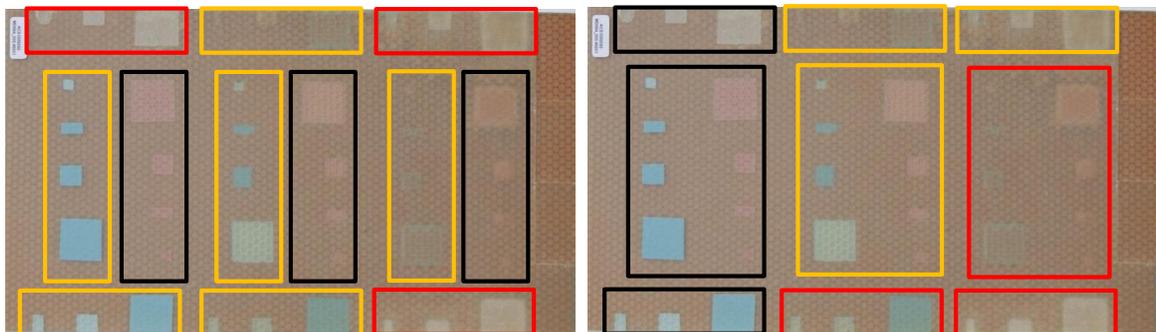
DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Abwärtsgewinkelte
Terahertz-Wellen

Fraunhofer
ITWM

Kalibrierproben mit künstlichen Defekten

Struktur



Probengröße: 340 x 200

Teflon PE-Folie Luftspalt

Gruppe 1 Gruppe 2 Gruppe 3

© Fraunhofer ITWM / Folie 24
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

TeraTec
Abwärtsgewinkelte
Terahertz-Wellen

Fraunhofer
ITWM

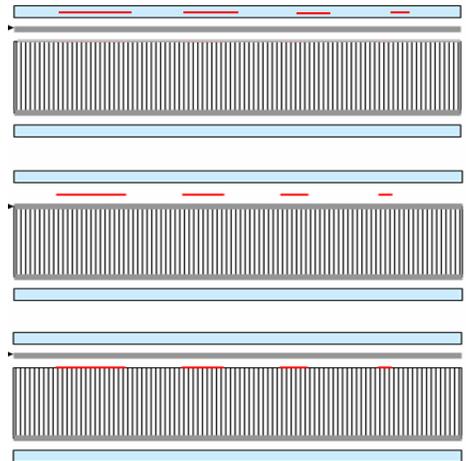
Kalibrierproben mit künstlichen Defekten

Struktur



Probengröße: 340 x 200 mm

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



© Fraunhofer ITWM / Folie 25
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. - 22. März 2017, Kassel

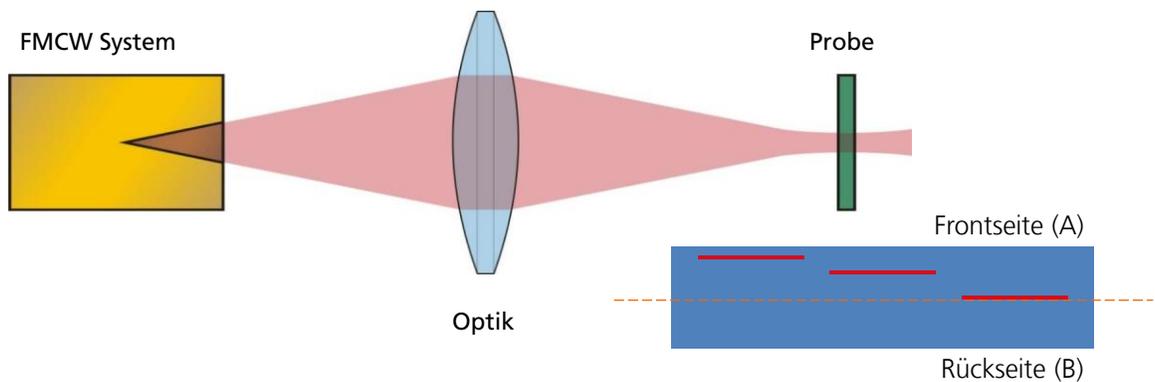


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Probenorientierung

Messungen in Reflexion



- Seite A: Oberfläche mit Defekten zeigt zum Sensor
- Seite B: Oberfläche mit Defekten liegt auf der gegenüberliegenden Seite

© Fraunhofer ITWM / Folie 27
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. - 22. März 2017, Kassel

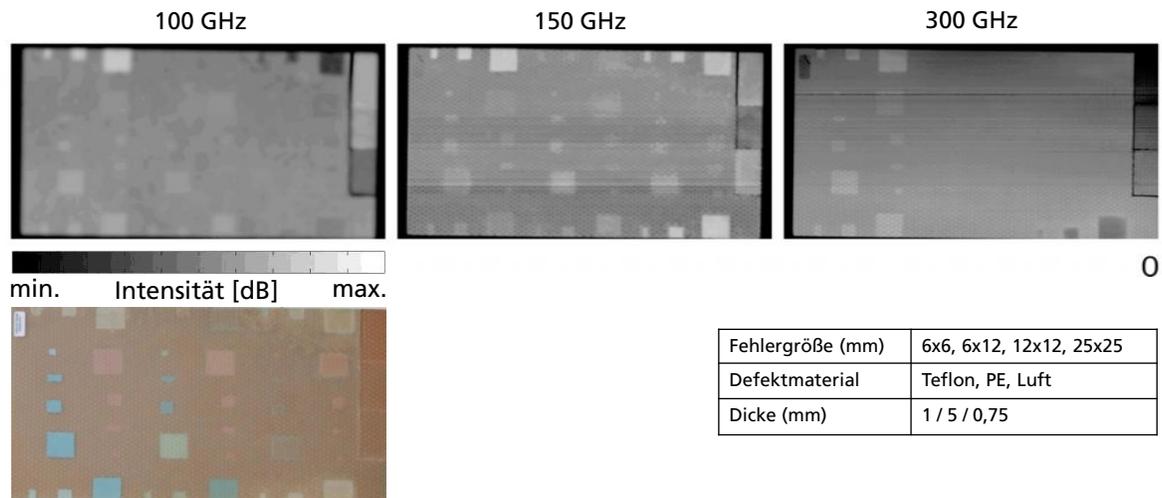


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Volumeninspektion von Bauteilen aus GFK-Verbundmaterial

Reflexionsaufnahmen bei unterschiedlichen Frequenzen



© Fraunhofer ITWM / Folie 28
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel



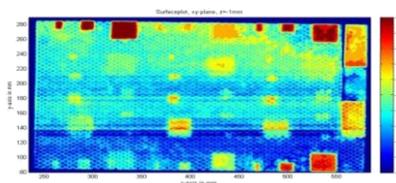
DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



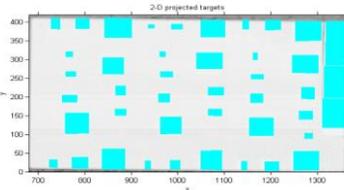
Volumeninspektion von Bauteilen aus GFK-Verbundmaterial

Ergebnisdarstellung der Bildverarbeitung

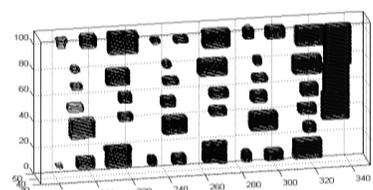
Seite A: 150 GHz



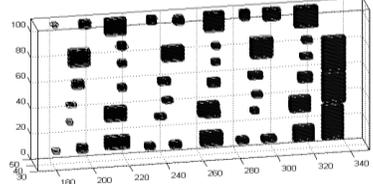
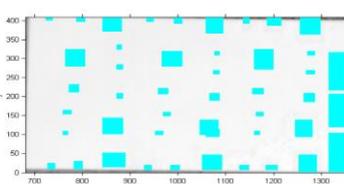
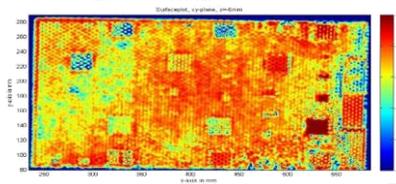
2D Projektion



3D Visualisierung



Seite B: 150 GHz



© Fraunhofer ITWM / Folie 29
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel



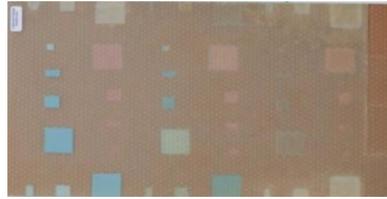
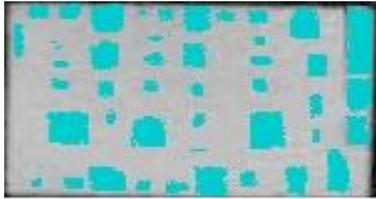
DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



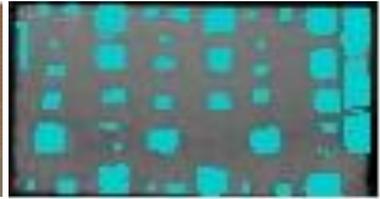
Volumeninspektion von Bauteilen aus GFK-Verbundmaterial

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 30
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. - 22. März 2017, Kassel



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Volumeninspektion von Bauteilen aus GFK-Verbundmaterial

Defekterkennung – Seite A

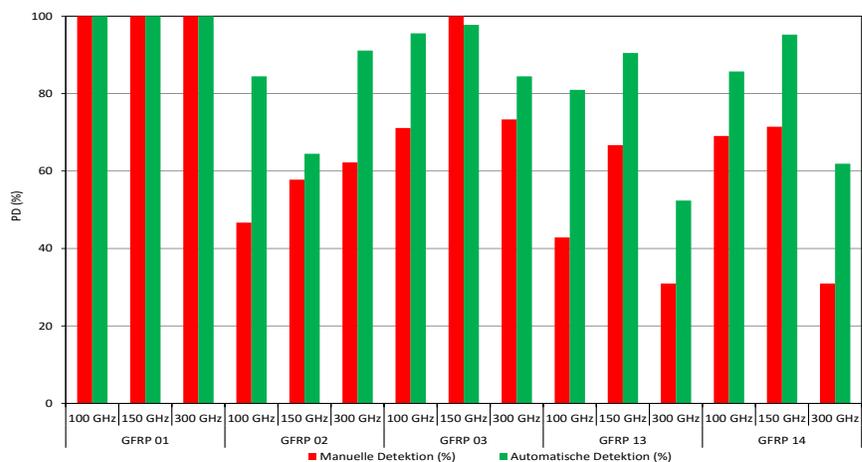
GFRP 01:
Laminat

GFRP 02:
A-Sandwich mit Schaum

GFRP 03:
A-Sandwich mit Wabe

GFRP 13:
C-Sandwich mit Schaum

GFRP 14:
C-Sandwich mit Wabe



© Fraunhofer ITWM / Folie 31
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. - 22. März 2017, Kassel



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Alternative NDT Techniken

Überblick

- Thermographie
 - Lock-in-Thermographie mit Blitzlampen
- Ultraschall
 - 2 Puls-Echo-Systeme
 - IWEX – 2D Inverse Wave Field Extrapolation
 - Transmissionssystem mit Wasserstrahlkopplung
- X-Ray
 - 2D-Bildgebung in Transmission

Alle Messungen wurden von Experten durchgeführt und ausgewertet.

© Fraunhofer ITWM / Folie 32
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel

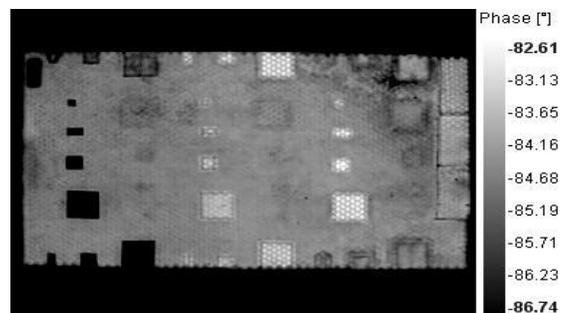


Alternative NDT Techniken

Lock-in Thermographie



FLIR SC5500



GFRP_03

© Fraunhofer ITWM / Folie 33
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. – 22. März 2017, Kassel



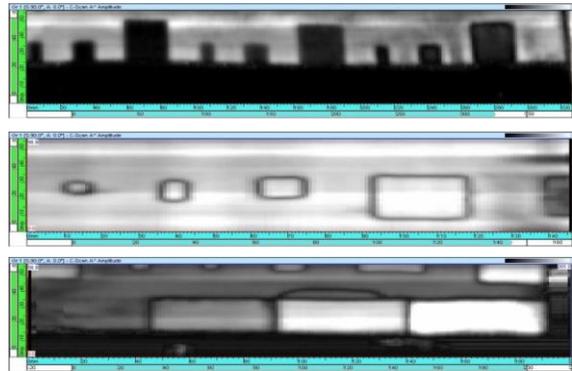
Alternative NDT Techniken Puls-Echo-Ultraschall



OLYMPUS OMNISCAN
MX2



OLYMPUS PHASED ARRAY
5L64-NW1



GFRP_01



© Fraunhofer ITWM / Folie 34
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. - 22. März 2017, Kassel



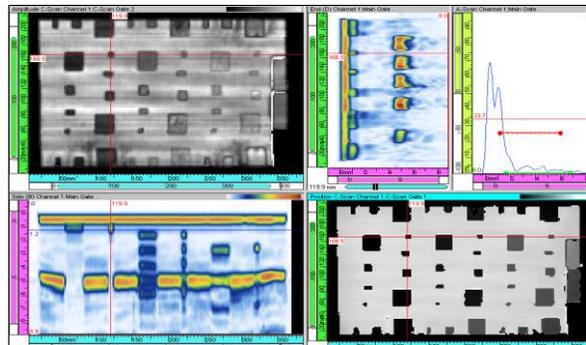
DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Alternative NDT Techniken Puls-Echo-Ultraschall



SCANMASTER
DS200 ultrasound scanner



GFRP_01



© Fraunhofer ITWM / Folie 35
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. - 22. März 2017, Kassel

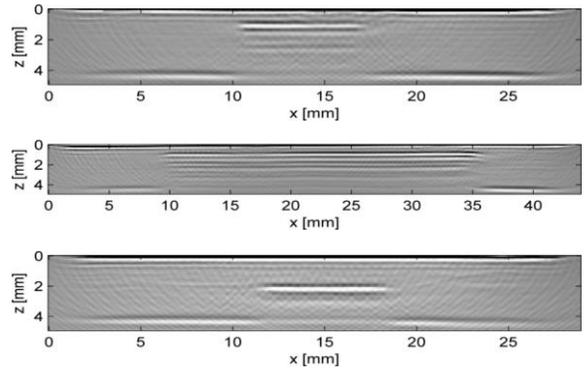


DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Alternative NDT Techniken Puls-Echo-Ultraschall - IWEX

2D Inverse Wave Field Extrapolation (IWEX)



Applus+

GFRP_01

© Fraunhofer ITWM / Folie 36
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. - 22. März 2017, Kassel



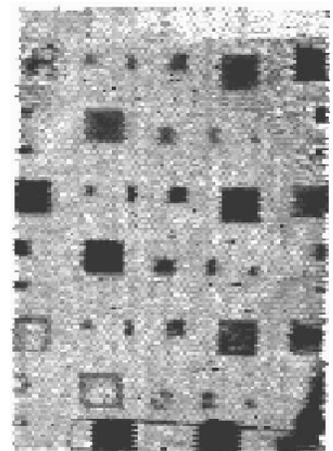
DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.



Alternative NDT Techniken Transmission-Ultraschall



OLYMPUS PHASED ARRAY
3.5L64-I



Olympus FOCUS-LT montiert auf
IAI Eigenbau-Wasserscanner.

GFRP_03

IAI ENGINEERING DIVISION
Engineering & Development Group
ISRAEL AEROSPACE INDUSTRIES LTD

© Fraunhofer ITWM / Folie 37
5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
21. - 22. März 2017, Kassel



DEUTSCHE
GESELLSCHAFT FÜR
ZERSTÖRUNGSFREIE
PRÜFUNG E.V.

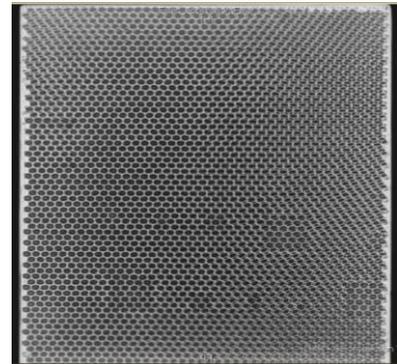


Alternative NDT Techniken

Digitale Röntgen-Bildgebung



Model DXR500L von GE.



GFRP_03



© Fraunhofer ITWM / Folie 38
 5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
 21. - 22. März 2017, Kassel



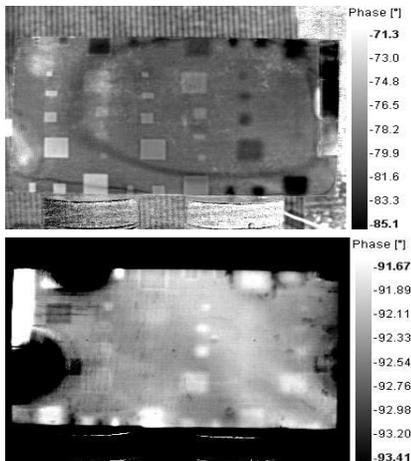
DEUTSCHE
 GESELLSCHAFT FÜR
 ZERSTÖRUNGSFREIE
 PRÜFUNG E.V.



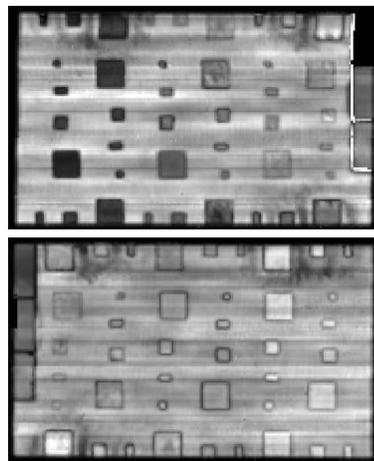
Ergebnisüberblick der alternativen NDT Techniken

Laminat

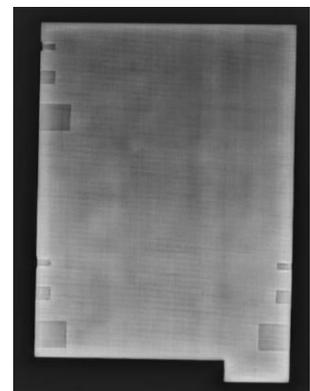
Thermographie



Ultraschall



Röntgen



© Fraunhofer ITWM / Folie 39
 5. Fachseminar: Optische Prüf- und Messverfahren
 21. - 22. März 2017, Kassel



DEUTSCHE
 GESELLSCHAFT FÜR
 ZERSTÖRUNGSFREIE
 PRÜFUNG E.V.

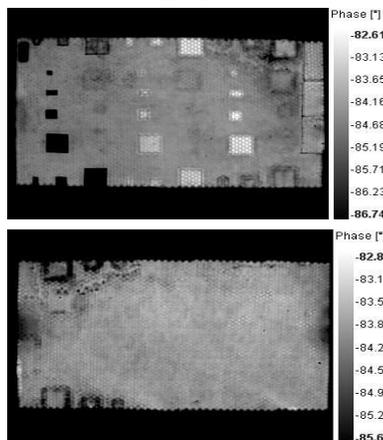


Ergebnisüberblick der alternativen NDT Techniken Laminat

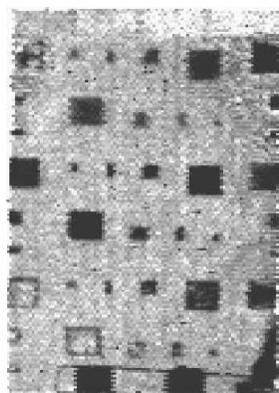


Ergebnisüberblick der alternativen NDT Techniken A-Sandwich mit Wabe

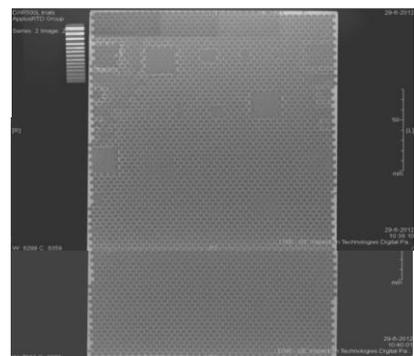
Thermographie



Ultraschall in Transmission

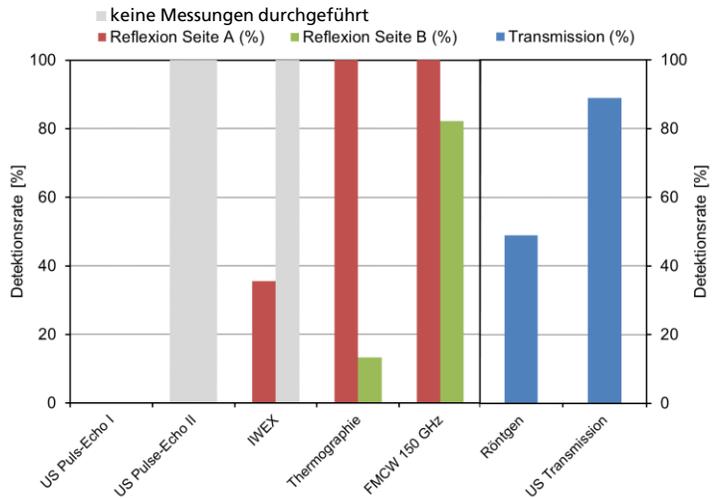


Röntgen



Ergebnisüberblick der alternativen NDT Techniken

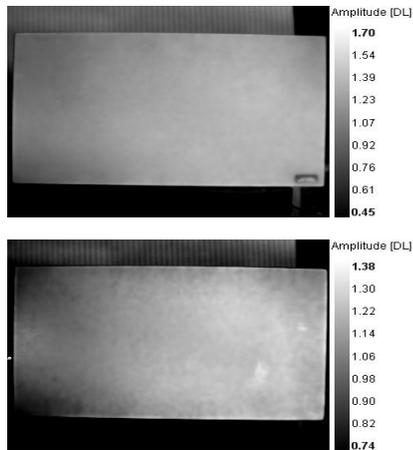
A-Sandwich mit Wabe



Ergebnisüberblick der alternativen NDT Techniken

C-Sandwich mit Schaum

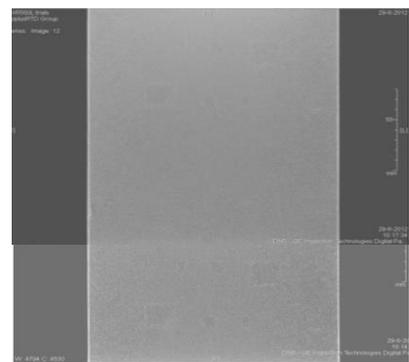
Thermographie



Ultraschall in Transmission

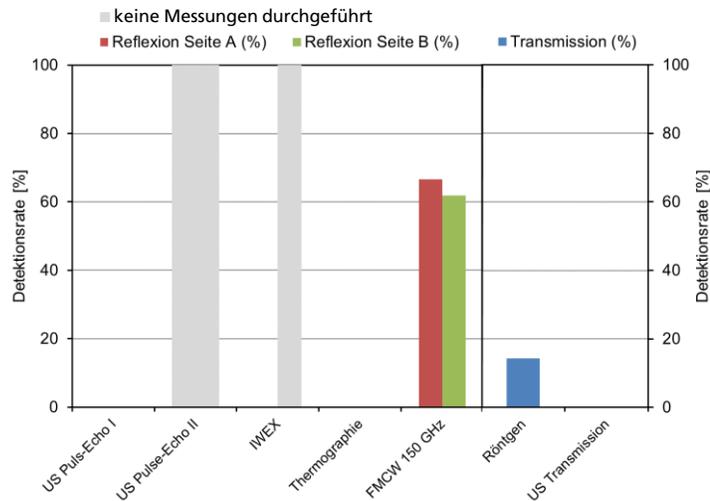


Röntgen



Ergebnisüberblick der alternativen NDT Techniken

C-Sandwich mit Schaum



Zusammenfassung / Ausblick

- Terahertz-Messtechnik ist geeignet zur zerstörungsfreien Prüfung von
 - glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK)
 - Verbundwerkstoffen mit GFK und Wabenstruktur / Schaum
- Verbesserte Defekterkennung durch automatisierte Bildverarbeitung
- Vergleich mit etablierten ZfP-Methoden offenbart Vorteile der Terahertz-Technik bei bestimmten Anwendungen:

Inspektion von Verbundwerkstoffen mit GFK und Waben- oder Schaumstruktur!



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

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

