

Quantitative Bewertung künstlicher und natürlicher Fehler in Faserverbundwerkstoffen mit aktiver Thermografie und Ultraschall

Christiane MAIERHOFER¹, Rainer KRANKENHAGEN¹, Mathias RÖLLIG¹, Seyed M. H. HOSSEINI¹, Thomas HECKEL¹, Mate GAAL¹, Florian SCHADOW¹, Daniel BRACKROCK¹, Michael GOWER², Maria LODEIRO², Graham BAKER²

¹ Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

² National Physical Laboratory (NPL), Teddington, Middlesex, Großbritannien

Kontakt E-Mail: christiane.maierhofer@bam.de

Kurzfassung.

Im EMRP-Projekt VITCEA werden komplementäre ZfP-Verfahren zur Prüfung von Faserverbundwerkstoffen weiterentwickelt und validiert. In diesem Beitrag werden Ergebnisse verschiedener Techniken der aktiven Thermografie und des Ultraschalls vorgestellt. Die Nachweisempfindlichkeiten bezüglich künstlicher und natürlicher Fehler mit unterschiedlichen lateralen Ausdehnungen und in verschiedenen Tiefen werden miteinander verglichen.

1. Einführung

Faserverstärkte Kunststoffe werden immer häufiger zur Verbesserung der Effizienz und Zuverlässigkeit von Anlagen und Komponenten in vielen Industriebereichen der Energieerzeugung (z. B. in Rotorblättern von Windkraftanlagen und Gezeitenkraftwerken, Triebwerksgehäusen, flexiblen Öl- und Gasleitungen) eingesetzt. Weiterentwicklungen in der Materialzusammensetzung und im Herstellungsprozess sowie der Einsatz in neuen Anwendungsbereichen unter wechselnden Umgebungsbedingungen und Belastungen steigern auch den Bedarf an innovativen zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP). Im EMRP (European Metrology Research Programme)-Projekt VITCEA (Validation of inspection technologies for composites in energy applications) werden daher komplementäre ZfP-Verfahren (Scherografie, Mikrowellenverfahren, Ultraschall und aktive Thermografie) weiterentwickelt und validiert [1]. Ziel ist die Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit quantitativer Angaben zu typischen Fehlern und damit die Erhöhung der Akzeptanz von ZfP-Verfahren in der Industrie. In Zusammenarbeit mit den Industriepartnern wurden Testkörper mit künstlichen und natürlichen Fehlstellen geplant und hergestellt. Als Matrixmaterialien wurden Epoxid und Polyamid 12 und zur Verstärkung Kohlenstoff- und Glasfasern eingesetzt. Die Orientierung und Lagenanordnung der Fasern wurde variiert. Hergestellt wurden die Probekörper mittels Prepreg-Technologie und verschiedenen



Vakuuminfusionsverfahren. Natürliche Fehlstellen wurden in quasistatischen Zugversuchen und mittels Impactschädigung erzeugt.

Bisher gibt es nur wenige direkte Vergleiche von aktiven Thermografieverfahren (TT, thermal testing) und Ultraschallverfahren (UT, ultrasonic testing) für die zerstörungsfreie Prüfung von Faserverbundwerkstoffen. Beide Verfahren sind prinzipiell gut für die Detektion und die quantitative Charakterisierung von Impact-Schäden, Delaminationen, Hohlstellen und Poren geeignet. Meola et al [2] haben Impact-Schäden mit Lockin-Thermografie und Ultraschall Phased-Array untersucht. Während mit Ultraschall die Abmessungen der Schäden auch in größeren Tiefen vermessen werden können, liegen die Vorteile der Lockin-Thermografie in der berührungslosen und direkt bildgebenden Messung. Grinzato et al haben qualitative Untersuchungen mit Ultraschall und aktiver Thermografie zur Bestimmung der Porosität in Faserverbundwerkstoffen durchgeführt und gute Übereinstimmungen zwischen den mit Thermografie ermittelten thermischen Diffusivitätsverteilungen und Anzeigen in Ultraschall C-Bildern nachgewiesen [3]. Bisher gibt es keine systematischen Vergleichsuntersuchungen verschiedener aktiver Thermografie- und Ultraschallverfahren an unterschiedlichen Faserverbundwerkstoffen.

Im diesem Beitrag werden daher Untersuchungen an künstlichen und natürlichen Delaminationen in CFK und GFK Testkörpern mit den folgenden Thermografie- und Ultraschallverfahren vorgestellt und verglichen:

- Blitzthermografie
- Impulsthermografie mit Erwärmung durch einen Infrarot (IR)-Strahler
- Ultraschallkontakttechnik mit einem Matrixarray
- Luftultraschall

Vergleichskriterien sind der Nachweis der Fehlstellen, das jeweils gemessene Signal-zu-Rausch- bzw. Signal-zu-Kontrastverhältnis und die Möglichkeiten zur Bestimmung der Tiefenlage und lateralen Ausdehnung der Fehlstellen.

2. Testkörper und Verfahren

2.1 Herstellung der Testkörper

Im EU-Projekt wurden Testkörper mit künstlichen und natürlichen Fehlern aus verschiedenen Faserverbundwerkstoffen mit unterschiedlichen Matrixmaterialien (Epoxid, Polyamid 12) und Fasern (Kohlefasern, Glasfasern) in verschiedenen Verlegearten und Faserorientierungen hergestellt. In diesem Beitrag werden die folgenden vier Materialien untersucht:

- CFK (kohlefaserverstärkter Kunststoff), bestehend aus Gurit SE84LV Prepregs mit Epoxidmatrix. Für die Testkörper mit künstlichen Fehlstellen (RDA, reference defect artefacts) erfolgte die Ausrichtung der Faserorientierung nur in einer Richtung (UD, unidirektional) (RDA 1a), für die Testkörper mit natürlichen Fehlern (NDA, natural defect artefacts) in drei Richtungen (QI, quasi-isotrop).
- GFK-E1 (glasfaserverstärkter Kunststoff) mit Epoxidmatrix (Prime 20LV) mit bidirektionalem Glasfasergewebe (glass quadraxial Formax FGE111), Herstellung durch Harzinfusion im RTM-Verfahren mit quasi-isotroper Faserorientierung. Aus diesem Material wurde der Testkörper RDA 2a gefertigt.
- GFK-E2 (glasfaserverstärkter Kunststoff) als Prepregs mit Epoxidmatrix (HexPly 913), Faserorientierung bi-direktional. Aus diesem Material wurden einige der NDA Testkörper gefertigt.
- GFK-P (glasfaserverstärkter Kunststoff) mit Polyamid 12 Matrix und unidirektionalem Glasfasertape. Aus diesem Material wurde der Testkörper RDA 5 gefertigt.

Die RDA Testkörper haben eine Abmessung von $280 \times 280 \times 5 \text{ mm}^3$ und enthalten als Fehler künstliche Delaminationen mit Durchmessern von 3, 6, 12 und 25 mm, Bohrungen mit Durchmessern von 1, 2 und 3 mm und weitere Fehlstellen, s. Bild 1. Alle Fehlstellen wurden in drei unterschiedlichen Tiefen (mit ca. 0,6 mm, 2,4 mm und 4,2 mm Überdeckung) eingebracht. Eine genauere Beschreibung ist in [4] zu finden.

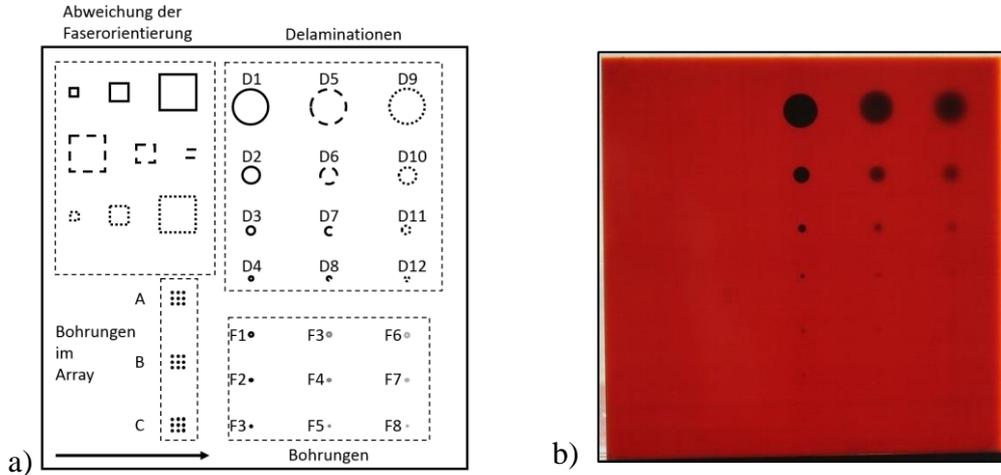


Bild 1. a) Skizze zur Position und Bezeichnung der Fehlstellen in den RDA Testkörpern. Überdeckung der Fehlstellen: Linie: nahe der Oberfläche; gestrichelt: Mitte; gepunktet: nahe der Rückseite. b) Foto des RDA 2a Testkörpers mit sichtbaren Delaminationen.

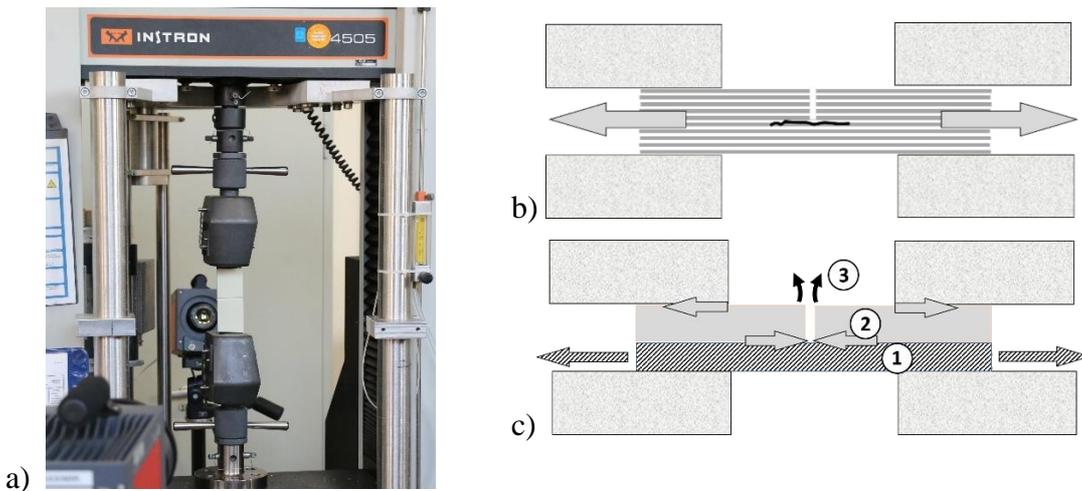


Bild 2. a) Zugprüfmaschine mit eingespannter Probe und beidseitig aufgestellten IR-Kameras zum Monitoring der Temperaturveränderungen während der Belastungen. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in [5] beschrieben. b) Vereinfachte Skizze der Zugversuche, die schwarze Linie markiert die Lage der zu erwartenden Delaminationen. c) Überlagerung verschiedener Kräfte im Bereich der Nut: (1) reine Zugkräfte im Bereich außerhalb der Nut; (2) Scherkräfte im Bereich des Bodens der Nut; (3) Schälkräfte senkrecht zur Zugkraft beidseitig der Nut.

Die NDA Testkörper wurden unter anderem mittels quasi-statischer Zugversuche hergestellt. Dazu wurden in die $240 \times 50 \text{ mm}^2$ großen und 2,4 bis 5 mm dicken Platten zunächst 5 mm breite Nuten mit unterschiedlichen Restwanddicken gefräst. Anschließend wurden diese Platten in eine Zugprüfmaschine eingespannt, die eine maximale Zugkraft von 100 kN zulässt, s. Bild 2.a. Dabei wurde die Zugkraft quasi-statisch mit Belastungsraten von 0,02 bis 0,1 mm/s erzeugt. Es wurde erwartet, dass sich aufgrund der Zugbelastung Delaminationen parallel zur Oberfläche in der Tiefe der Nuten ausbilden würden, s. Bild 2.b. Hierbei muss jedoch aufgrund der Nuten die Überlagerung verschiedener Kraftmomente berücksichtigt werden. Nur aufgrund der Schälbelastung, s. Nr. 3 in Bild 2.c, wird die Delamination erzeugt. In Tabelle 1 sind Probenbezeichnungen,

Materialien, Dicken, Restwanddicken im Bereich der Nut, Belastungsraten und maximale Belastungen beim Versagen der Proben zusammengefasst. Wie erwartet versagen die Testkörper mit größeren Restwandstärken erst bei höheren Lasten. Aufgrund unterschiedlicher Restwanddicken können CFK und GFK Testkörper nicht direkt miteinander verglichen werden, die maximalen Belastungen haben jedoch die gleiche Größenordnung.

Tabelle 1. Parameter der Zugversuche der NDA Testkörper.

Testkörper (Material)	Dicke in mm	Restwanddicke in mm	Belastungsrate in mm/s	Max. Last in kN
AFMF (CFK)	2.4	1.3	0.02	18.3
1AFMG (CFK)	4.8	2.5	0.04	31.1
2AFMG (CFK)	4.8	0.9	0.02	18.3
AFPD (GFK-E2)	3.2	1.7	0.10	20.0
1AFPC (GFK-E2)	5.0	3.5	0.10	45.2
2AFPC (GFK-E2)	5.0	1.6	0.10	19.8

2.2 Aktive Thermografie

Die Messungen mit aktiver Thermografie erfolgten mit zwei verschiedenen Anregungsquellen: Blitzanregung und Impulsanregung mit IR-Strahlern. Für beide Anregungsarten wurden die Messungen in Reflexionskonfiguration durchgeführt, d. h. Anregungsquelle und IR-Kamera befanden sich auf derselben Seite des Bauteils, s. Bild 3.a. Für die Blitzanregung wurden vier Blitzlampen mit einer Energieaufnahme von insgesamt 24 kJ verwendet, die absorbierte Energiedichte betrug 0,50 bis 0,59 J/cm². Für die Impulsanregung wurden die Testkörper mit einem IR-Strahler mit einer Leistung von 2,4 kW 15 s lang erwärmt. Hier betrug die absorbierte Energiedichte 2,9 bis 4,3 J/cm². Die Abkühlung wurde jeweils mit einer IR-Kamera mit InSb-Detektor mit einer Größe von 1280 x 1024 Pixeln, einem empfindlichen Wellenlängenbereich von 2 bis 5 µm, einem NETD von 30 mK, einer Bildwiederholrate von 10 bis 50 Hz und einer Sequenzlänge von 3000 erfasst. Die Testkörper mit Glasfasern wurden sowohl ohne als auch mit schwarzer Beschichtung gemessen. Da diese Materialien im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich teiltransparent sind, sollte mit der Beschichtung eine vollständige Absorption der Strahlung an der Oberfläche gewährleistet werden.

Für die Datenauswertung wurde die Puls-Phasen-Thermografie eingesetzt [6]. Dazu wurden die Frequenzspektren der Temperatur-Zeit-Kurven eines jeden Pixels mittels Fast Fourier Transformation berechnet. Das Ergebnis beinhaltet Sequenzen mit Amplituden- und Phasenbilder bei unterschiedlichen Frequenzen. Im Folgenden werden bei den RDA Testkörpern die Phasenbilder und bei den NDA Testkörpern die Thermogramme betrachtet.

2.3 Ultraschall

2.3.1 Matrixarray

Für die Ultraschallmessungen in Kontakttechnik wurde ein 2,25 MHz Matrixarray der Firma Sonaxis mit (10 x 6) Elementen verwendet. Da die Testkörper Fehlstellen in verschiedenen Tiefenlagen aufweisen, wurden bei der Untersuchung der RDA Testkörper Messungen für drei Fokustiefen durchgeführt, während bei den Messungen an den NDA

Testkörpern eine Fokustiefe von 2,4 mm eingestellt wurde. Das Matrixarray wurde mit Geschwindigkeiten von 8 mm/s über die Testkörper gescannt, der Spur- und Messpunktabstand betrug jeweils 1 mm. Die Ankopplung erfolgte mit Wasser (s. Bild 3.b).

2.3.2 Luftultraschall

Für die Messungen mit Luftultraschall wurden zwei in der BAM entwickelte Prüfköpfe [7] mit einer Frequenz von 260 kHz, einer Apertur von 27 mm und einem Krümmungsradius von 50 mm eingesetzt. Die Messungen erfolgten in Transmissionsanordnung der beiden Prüfköpfe, s. Bild 3.c. Der Abstand der Prüfköpfe zur Bauteiloberfläche wurde so ausgelegt, dass sich der Fokus auf der Bauteiloberfläche befand. Beim Abfahren der Bauteiloberfläche wurden in beiden Fahrtrichtungen (bidirektional) Messdaten aufgenommen. Die durchschnittliche Scangeschwindigkeit betrug $v = 65 \text{ mm/s}$ bei einem Spur- und Messpunktabstand von jeweils 0,5 mm. Die Prüfköpfe wurden so zueinander ausgerichtet, dass das Empfangssignal maximal wurde.

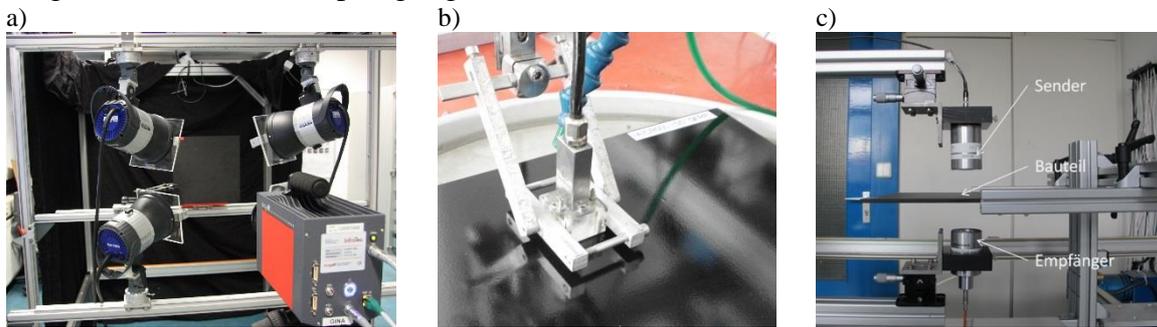


Bild 3. a) Aktive Thermografie mit Blitzanregung. b) Ultraschallmessungen in Kontakttechnik mit Matrixarray mit Wasserankopplung. c) Aufbau zur Messung mit Luftultraschall.

3. Ergebnisse und Vergleich

3.1 RDA Testkörper

Die Ergebnisse der Thermografie- und Ultraschallmessungen an den drei RDA Testkörpern sind in Bild 4 zusammengefasst. Hier wurden jeweils die Darstellungen mit der besten Nachweisbarkeit für alle Fehlstellen ausgewählt. Die größte Anzahl von Defekten kann mit dem UT Matrixarray im RDA 5 nachgewiesen werden und auch mit den anderen Verfahren können im RDA 5 die meisten Fehlstellen detektiert werden. Mit der Thermografie werden mit thermischer Anregung mit dem IR-Strahler wesentlich mehr Fehlstellen als mit Blitzanregung geortet. Im RDA 1a sind mit beiden Ultraschallverfahren neben den künstlichen Fehlstellen viele zusätzliche natürliche Defekte zu erkennen, die auf größere Poren und Lufteinschlüsse hinweisen. Insgesamt können mit allen Verfahren im RDA 1a die wenigsten Fehlstellen nachgewiesen werden.

Einen Vergleich der Signal-zu-Rausch-Verhältnisse der UT Ergebnisse mit dem Matrixarray und der Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse der TT und Luftultraschall-Ergebnisse für die Delaminationen des RDA 1a Testkörpers zeigt Bild 5. Sowohl die Signal-zu-Rausch-Verhältnisse als auch die Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse werden in diesem Diagramm der Einfachheit halber als SNR bezeichnet. Hier ist das SNR in dB in Abhängigkeit vom Durchmesser der Delaminationen für die drei unterschiedlichen Überdeckungen (oben, mitte, unten) in drei Diagrammen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass für fast alle Delaminationen das SNR für Luftultraschall am größten ist. Für die flachen und mittleren Fehlstellen ist das SNR der TT Verfahren höher als das des UT Matrixarrays, für tiefe Fehlstellen ist es umgekehrt.

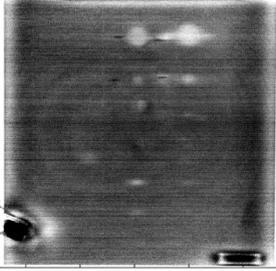
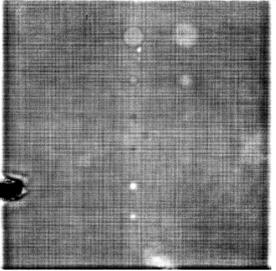
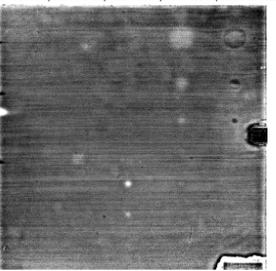
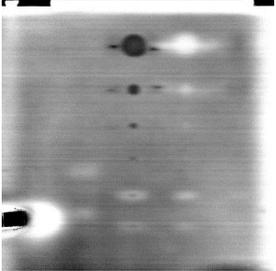
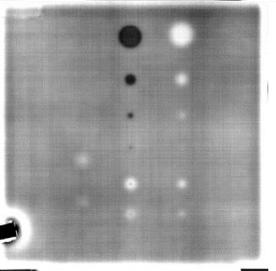
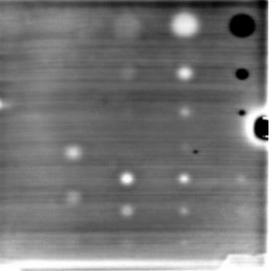
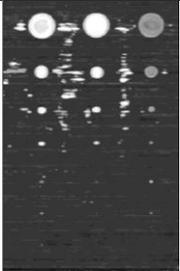
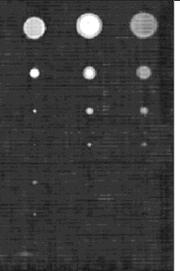
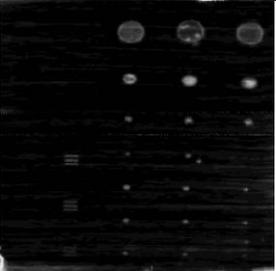
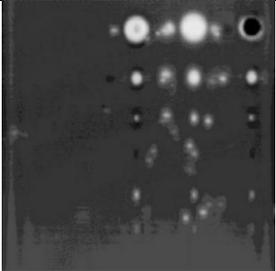
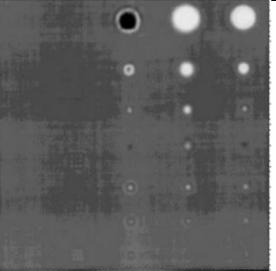
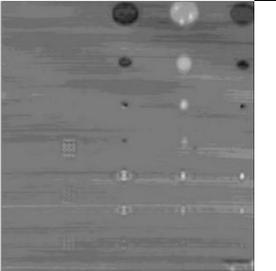
	RDA 1a CFK	RDA 2a GFK-E1	RDA 5a GFK-P
TT, Blitzanregung	 0,49 bis 0,57 rad	 0,61 bis 0,68 rad	 0,64 bis 0,73 rad
TT, IR-Strahler	 0,81 bis 0,90 rad	 0,71 bis 0,78 rad	 0,70 bis 0,77 rad
UT, Matrixarray	 0 bis 90 dB	 0 bis 90 dB	 0 bis 90 dB
UT, Luftultraschall	 0 bis 100 %	 0 bis 100 %	 10 bis 95 %

Bild 4. Vergleich der Ergebnisse an den Testkörpern RDA 1a (links), RDA 2a (mitte) und RDA 5 (rechts) der Messungen mit aktiver Thermografie mit Blitzanregung und mit Anregung durch einen IR-Strahler und mit Ultraschall, aufgenommen mit einem Matrixarray und mit Luftultraschall. Für Thermografie sind ausgewählte Phasenbilder der Abkühlsequenzen, für Ultraschall die C-Bilder dargestellt. Für das Matrixarray sind die Echohöhen in dB und für Luftultraschall in % bezogen auf das direkt transmittierte Signal dargestellt.

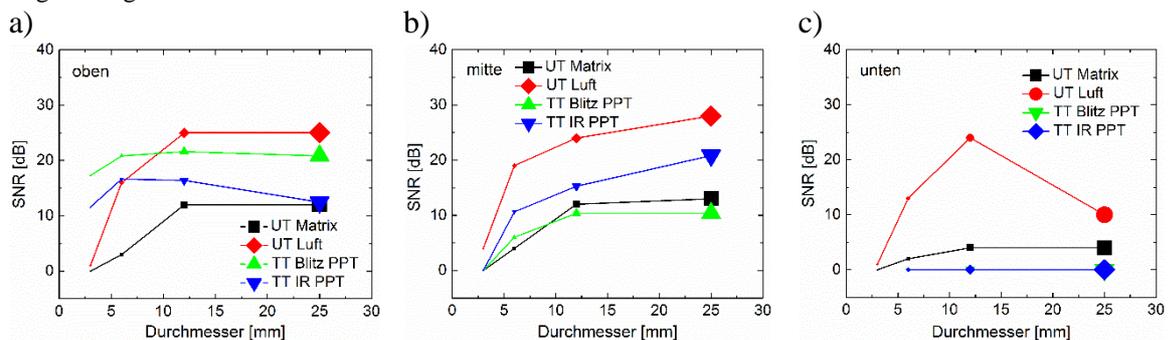


Bild 5. Vergleich der SNR-Werte der beiden UT- und der beiden TT-Verfahren aller Delaminationen des Testkörpers RDA 1a. a) Delaminationen nahe der Oberfläche, b) Delaminationen in der Mitte, c) Delaminationen nahe der Rückseite.

3.2 NDA Testkörper

Die Ergebnisse der Messungen an den CFK NDA Testkörpern nach den Zugversuchen sind in Bild 6 dargestellt. Die obere Reihe zeigt Mikroskopaufnahmen von der Seite der Testkörper im Bereich der Nut. Die einzelnen Prepreglagen mit unterschiedlichen Faserorientierungen sind gut zu unterscheiden. Weiterhin sind für alle Proben etwas tiefer als die Nut Delaminationen deutlich zu erkennen. Teilweise haben sich hier die Testkörper auch verformt. Darunter sind in Bild 6 diese Delaminationen in den Thermogrammen der TT Verfahren und in den C-Bilder der UT Verfahren klar zu erkennen. Insgesamt können mit den UT Verfahren größere Bereiche mit Delaminationen detektiert werden.

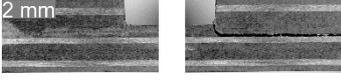
Verfahren	AFMF007 NDA-o-1m3	1AFMG005 NDA-o-1m5	2AFMG003 NDA-o-1b5
Mikroskopaufnahme			
TT Blitz	 1,8 bis 5,3 K	 0,6 bis 1,4	 1,0 bis 4,7 K
TT IR-Strahler	 5 bis 15 K	 2 bis 6 K	 4 bis 13 K
UT Matrix-array	 0 bis 80 dB	 0 bis 90 dB	 0 bis 86 dB
UT Luftultraschall	 -48 bis 0 dB	 -50 bis 0 dB	 -41 bis 0 dB

Bild 6. Vergleich der Messergebnisse der TT- und UT-Verfahren an den drei CFK NDA Testkörpern. In der obersten Reihe sind seitliche Mikroskopaufnahmen der Testkörper im Bereich der Nut dargestellt.

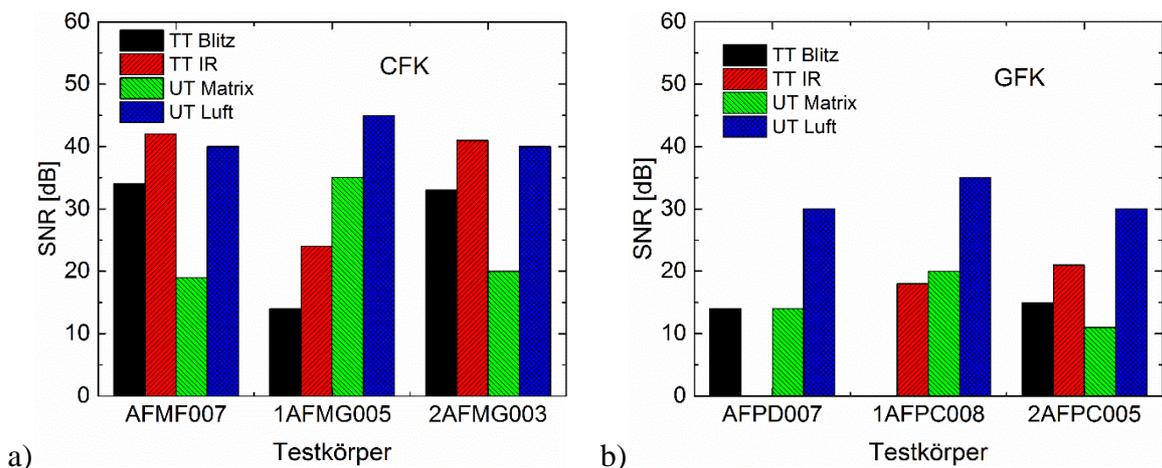


Bild 7. Vergleich der SNR-Werte der verschiedenen TT und UT Verfahren der Delaminationen a) der drei CFK NDA Testkörper und b) der drei GFK NDA Testkörper.

Einen Gesamtvergleich der SNR-Werte der Delaminationen in den CFK und GFK NDA Testkörpern aller Verfahren zeigt Bild 7. Zunächst ist hier zu erkennen, dass die SNR-Werte in GFK deutlich niedriger sind als in CFK, was u. a. mit einer weniger starken

Delamination mit noch teilweise verbleibendem Haftverbund im GFK erklärt werden kann. Weiterhin ist zu beobachten, dass in fast allen Testkörpern die Delaminationen mit Luftultraschall mit dem größten SNR nachgewiesen werden.

4. Schlussfolgerung

Die vergleichenden Untersuchungen mit den UT und TT Verfahren an den RDA und NDA Testkörpern lassen die folgenden Schlussfolgerungen zu:

- Luftultraschall zeigt in fast allen gezeigten Beispielen das größte SNR, nachteilig ist jedoch die für die Messungen erforderliche zweiseitige Zugänglichkeit des Testkörpers. Außerdem sind keine Aussagen zur Überdeckung der Fehlstellen möglich.
- Mit dem UT Matrixarray können tiefere Fehlstellen mit höherem SNR detektiert werden als mit Thermografie. Für die hier nachgewiesenen Fehler kann aus der Laufzeit prinzipiell die Überdeckung bestimmt werden (nicht gezeigt).
- Mit den TT Verfahren werden die oberflächennahen Fehlstellen mit höherem SNR als mit dem UT Matrixarray angezeigt. Hierbei werden mit dem IR-Strahler höhere SNR-Werte als mit Blitzlichterwärmung erreicht. Aus den angezeigten Frequenzen in den Phasenbildern kann prinzipiell die Überdeckung bestimmt werden (nicht gezeigt).
- Mit UT und TT können die meisten künstlichen Fehler im Testkörper RDA 5a (Glasfaser mit Polymermatrix) nachgewiesen werden, die wenigsten im RDA 1a (CFK). Im RDA 1a werden viele weitere natürliche (und unbeabsichtigte) Fehler geortet.
- In den GFK NDA Testkörpern zeigen die Delaminationen ein kleineres SNR als in den CFK NDA Testkörpern, da die Delaminationen in GFK nicht so stark ausgeprägt sind wie in CFK.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse sind im von EURAMET geförderten ENG57 EMRP (European Metrology Programme)-Projekt VITCEA *Validated Inspection Technologies for Composites in Energy Applications* entstanden. Die Zugversuche erfolgten mit Unterstützung von B. Rehmer und K. Matzak von BAM FB 5.2.

Referenzen

- [1] <http://projects.npl.co.uk/vitcea/>
- [2] Meola C. et al., *Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics*, Composite Structures 134 (2015) 845–853
- [3] Grinzato E. G., Marinetti S. and Bison P. G., *NDE of porosity in CFRP by multiple thermographic techniques*, Proc. SPIE 4710, Thermosense XXIV, pp. 588-598, 2002
- [4] Gower M. et al.: Design and Manufacture of Reference and Natural Defect Artefacts for the Evaluation of NDE Techniques for Fibre Reinforced Plastic (FRP) Composites in Energy Applications. Conf. Proc. 19th World Conf. on NDT, Munich, 2016, <http://www.ndt.net/article/wcndt2016/papers/we1e4.pdf>
- [5] Maierhofer C. et al., Characterisation of artificial defects in CFRP and GFRP sheets designed for energy applications using active thermography. Conf. Proc. 14th QIRT Conference Gdansk, Poland, 2016, <http://www.ndt.net/article/qirt2016/papers/076.pdf>
- [6] Maldague X., *Advances in pulsed phase thermography*. Infrared Physics & Technology, 43(3-5), 2002, 175–181
- [7] Gaal M. et al, Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers applied to testing of fiber-reinforced polymers. 2nd International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Portorož, Slovenia, 2013, <http://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2013/papers/43.pdf>