

# Charakterisierung von Impactschäden während und nach der Belastung mit thermografischen Verfahren und mit Ultraschall

Rainer KRANKENHAGEN<sup>1</sup>, Christiane MAIERHOFER<sup>1</sup>, Mathias RÖLLIG<sup>1</sup>,  
Thomas HECKEL<sup>1</sup>, Daniel BRACKROCK<sup>1</sup>, Mate GAAL<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kontakt E-Mail: [christiane.maierhofer@bam.de](mailto:christiane.maierhofer@bam.de)

**Kurzfassung.** Der Umfang der durch Impacts in Faserverbundmaterialien erzeugten Schäden ist abhängig von der Energie des Impacts, von der Zusammensetzung und dem Aufbau der Faserverbundwerkstoffe und von der Geometrie der Bauteile und hier im Wesentlichen von der Dicke des Bauteils. Der zerstörungsfreie Nachweis dieser Schädigungen kann sowohl mit Ultraschallverfahren als auch mit Verfahren der aktiven Thermografie erfolgen. Ein Vergleich der Nachweisempfindlichkeiten dieser Verfahren für die unterschiedlichen Schädigungen wird in diesem Beitrag in Abhängigkeit vom verwendeten Faserverbundwerkstoff (CFK und GFK), der Dicke des Materials und von der Impactenergie durchgeführt. Ergänzt werden die im Anschluss an die Schädigung eingesetzten ZiP-Verfahren mit zeitlich hochaufgelösten Thermografiemessungen, die bereits während des Impacts aufgenommen wurden.

## 1 Einführung

Impacts in Faserverbundwerkstoffen können zu unterschiedlichen Schädigungen führen. Es entstehen Risse und Ablösungen in der Matrix, Faser-Matrix Ablösungen und Faserrisse [1]. Der Umfang der Schädigung ist abhängig von der Energie und Geschwindigkeit des Impacts, von der Geometrie des Fallgewichts, von der Zusammensetzung und dem Aufbau der Faserverbundwerkstoffe und von der Geometrie und hier im Wesentlichen von der Dicke des Bauteils. Je nach Umfang der Schädigung ist diese von der Oberfläche aus sichtbar und hat einen Einfluss auf das Langzeitverhalten des Bauteils.

Für sicherheitsrelevante Bauteile müssen daher insbesondere von der Oberfläche aus nicht sichtbare Schädigungen mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren detektiert und zumindest hinsichtlich ihrer lateralen Ausdehnung charakterisiert werden. Der letzte Aspekt ist auch für sichtbare Schädigungen wichtig, da die Sichtprüfung von der Oberfläche aus keine Aussagen über die laterale Ausdehnung des Schadens im Inneren zulässt. Sowohl die aktive Thermografie als auch Ultraschall sind für die Ortung und Charakterisierung von Impactschäden nach der Schädigung sehr gut geeignet [2, 3, 4]. In Abhängigkeit von den

jeweiligen Anregungstechniken können mit beiden Verfahren unterschiedliche Eindringtiefen und Ortsauflösungen erreicht und Ergebnisse wie die laterale Schadensausdehnung tiefenaufgelöst dargestellt werden.

Um mehr über den Schadensmechanismus zu erfahren, können Impacts unter Laborbedingungen direkt thermografisch beobachtet werden (passive Thermografie) [3, 5]. Die während des Impacts auftretenden Schädigungen gehen mit lokal begrenzter Wärmefreisetzung einher und erlauben daher eine ungefähre Kartierung der Schädigungen.

Im Rahmen des EMRP-Projektes VITCEA wurden verschiedene Faserverbundwerkstoffe mit Glasfasern, Kohlenstofffasern und mit verschiedenen Matrixsystemen systematisch mit Impacts (low velocity impact) mit variierenden Energien geschädigt und während und nach der Schädigung mit den beschriebenen Verfahren untersucht. Im Beitrag werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Anregungstechniken der aktiven Thermografie und des Ultraschalls beschrieben und mit den in-situ Messergebnissen der passiven Thermografie verglichen.

## 2 Probekörperpräparation und experimenteller Aufbau

### 2.1 Herstellung der Probekörper und Impactschädigung

Probekörper aus CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff) und GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) mit quasiisotropen Faserorientierungen und Dicken von 2,4 mm bis 5,0 mm wurden im Autoklaven mit dokumentierten Temperatur- und Druckverläufen hergestellt. Für die CFK Probekörper wurden 8 und 16 Lagen unidirektionale Prepregs in Orientierungen von +45°, 0°, -45° und 90° symmetrisch zur Mittelachse verlegt, so dass die äußere Lage immer eine +45° Orientierung hat. Die Aushärtung erfolgte bei einer Temperatur von bis zu 120°C und einem Druck von bis zu 6 bar für einen Zeitraum von 160 min. Die GFK Probekörper wurden mit verschiedenen Faser- und Matrixsystemen hergestellt. Im Folgenden werden nur die Ergebnisse eines GFK Materials bestehend aus einem vieraxialen Gelege und einem Epoxid als Matrix vorgestellt. Hier wurden 5 und 8 Lagen des quasiisotropen Gewebes aufeinandergelegt, wobei die oberste Lage eine 0° und die unterste Lage eine +45° Orientierung hat. Die 0°/90° Orientierungen haben jedoch eine doppelt so hohe lineare Dichte wie die +45°/-45° Orientierungen. Die GFK Probekörper wurden bei 60°C ausgehärtet.

**Tabelle 1.** Beschreibung der untersuchten CFK und GFK Probekörper mit Plattendicke, Impactenergie, Materialsystem, Lagenanordnung und experimentell ermittelter thermischer Diffusivität senkrecht zur Oberfläche.

Probekörper	Dicke in mm	Energie in J	Faser- und Matrix System	Lagenanordnung	Diffusivität in mm <sup>2</sup> /s
AFMF (CFK)	2,4	1,0; 2,0; 4,0; 8,0;	Gurit SE84LV Kohlenstofffaser/Epoxid UD	8 Lagen [+45/0/-45/90] <sub>s</sub>	0,39 ± 0,02
1AFMG (CFK)	4,8	2,0; 4,0; 5,0; 6,0; 6,8; 7,5; 15,0;	Prepregs mit T700 Faser, Dicke einer Lage: 0,3 mm	16 Lagen [+45/0/-45/90] <sub>2s</sub>	
AFPD (GFK)	3,2	1,0; 2,0; 3,0; 5,0; 8,0; 15,0;	GFK Glas 20LV/ vieraxiales Formax Gelege FGE111,	5 Gewebelagen, innerhalb einer Lage 0°/-45°/90°/+45°	0,26 ± 0,02
1AFPC (GFK)	5,0	3,5; 7,5; 13,5; 15,0;	Prime 20LV Epoxid 0°/90°: 600 tex -45°/+45°: 300 tex	8 Gelegelagen, innerhalb einer Lage 0°/-45°/90°/+45°	

Für die Impact-Versuche standen Platten mit Abmessungen von 240x100 mm<sup>2</sup> zur Verfügung. Die Impacts wurden mit einem Fallwerk nach DIN ISO 18352:2017-11 eingebracht, wobei die folgenden Abweichung zur Norm auftraten: Der Durchmesser des Fallgewichts betrug 6 mm (statt 8 mm), die Basisplatte war nicht in einem geschlossenen Rahmen montiert und nur an zwei Punkten (anstatt vier Punkten) fixiert, und die Breite des Rahmens betrug nur 40 mm (anstatt 75 mm). Der Fallturm war nicht instrumentiert, d. h. Fallgeschwindigkeit und Kraft des Fallgewichts wurden nicht experimentell bestimmt, sondern nur aus der Fallhöhe errechnet. Es wurden zwei Fallgewichte mit Massen von 627 g und 1287 g verwendet und Fallhöhen zwischen 16 cm und 130 cm eingestellt. Damit wurden Impactenergien zwischen 1 J und 16 J erreicht. Die Fallgeschwindigkeiten variierten zwischen 1,7 m/s und 5,0 m/s in Abhängigkeit vom verwendeten Fallgewicht und eingestellter Fallhöhe.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der untersuchten Probekörper mit der jeweiligen Bezeichnung des Probekörpers, dessen Dicke, der Impactenergien, dem Material und dem Lagenaufbau. Messungen der Emissivitäten der Probenoberflächen im empfindlichen Wellenlängenbereich der unten beschriebenen Infrarot(IR)-Kamera ergaben Werte von 0,86 für CFK und 0,95 für GFK für die Materialien aus Tabelle 1 [6].

## 2.2 Passive Thermografie

Während der Impacts wurde die Temperaturentwicklung auf der Oberfläche der Probekörper entweder auf der Seite des Impacts oder auf der Rückseite der Probe mit einer gekühlten IR-Kamera erfasst. Die verwendete IR-Kamera hat einen empfindlichen Wellenlängenbereich von 2 µm bis 5 µm, ein NETD von 30 mK und eine Detektorgröße von 640x512 Pixeln. Um eine hohe Bildwiederholrate und damit eine hohe Zeitauflösung von 800 Hz bzw. 1,25 ms zu erreichen, wurde die IR-Kamera im Teilbildmodus mit einer Bildgröße von 160x128 betrieben. Es wurde ein Messbereich von -10°C bis 60°C eingestellt, der einer Integrationszeit von 1,12 ms entsprach. Die Messungen von beiden Probenseiten aus wurden mit Objektiven unterschiedlicher Öffnungswinkel durchgeführt und die IR-Kamera musste jeweils unter einem Winkel von 50° zur Oberflächennormalen geneigt werden. Dadurch ist die Ortsauflösung der Thermogramme in x- und y-Richtung unterschiedlich und auch unterschiedlich für die beiden Messseiten. In Tabelle 2 sind die Ortsauflösungen der eingesetzten Messverfahren zusammengefasst. Da im Folgenden nur die Ergebnisse der Messungen von der Rückseite vorgestellt werden, sind auch nur diese Daten in der Tabelle 2 enthalten. Ein Vergleich mit den Messungen von der Vorderseite erfolgt demnächst in einer weiteren Veröffentlichung.

## 2.3 Aktive Thermografie

Für die aktive Thermografie wurden zwei verschiedene Anregungstechniken eingesetzt:

- Blitzanregung mit vier synchronisierten Blitzlampen mit einem 2,6 ms langen Blitz und einer umgesetzten Energie von insgesamt 24 kJ. Zur Reduzierung des thermischen Nachleuchtens der Lampen wurden Polymethylmethacrylat (PMMA) Platten zwischen den Blitzlampen und den Probekörpern montiert.
- Impulsanregung mit einem IR-Strahler mit einer Leistung von 2,4 kW. Die Probekörper wurden 15 s lang erwärmt. Während dieser Zeit wurde der IR-Strahler gleichmäßig über die Oberfläche des Probekörpers bewegt.

Sowohl die Anregung als auch die Messung der Temperaturverteilung mit der IR-Kamera erfolgten jeweils von der Rückseite der Probe aus, d. h. von der Seite, die sich gegenüber dem Impact befand. Die Abkühlung wurde mit einer IR-Kamera mit InSb-Detektor mit einer Größe von 1280x1024 Pixeln, einem empfindlichen Wellenlängenbereich

von 2 bis 5  $\mu\text{m}$ , einem NETD von 30 mK, einer Bildwiederholrate von 50 Hz bei der Blitzanregung und von 10 Hz bei der Anregung mit dem IR-Strahler und einer Sequenzlänge von 3000 Bildern erfasst. Beim GFK muss berücksichtigt werden, dass das Material im sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich teiltransparent sind, d. h. im Spektrum der Anregungsquellen. Daher dringt bei den GFK Probekörpern ein Teil der Anregungsstrahlung in den Probekörper ein und wird im Bereich des Defektes direkt absorbiert. Auf eine Beschichtung wurde bei den hier vorgestellten Messungen verzichtet.

#### 2.4 Luftultraschall

Die Luftultraschallmessungen wurden ausschließlich in Transmissionskonfiguration durchgeführt, d. h. Sende- und Empfangskopf befanden sich auf gegenüberliegenden Seiten des Bauteils. Es wurden zwei in der BAM entwickelte Prüfköpfe [4] mit einer Mittenfrequenz von 260 kHz, einer Apertur von 27 mm und einem Krümmungsradius von 50 mm verwendet. Die Prüfköpfe wurde so zueinander ausgerichtet, dass das Empfangssignal maximal war und der Fokus der Prüfköpfe in der Ebene des Prüfkörpers lag. Spur- und Messpunkt Abstand beim automatisierten Scannen betragen jeweils 0,5 mm.

#### 2.5 Ultraschall mit Matrix-Array

Das für die Messungen in Kontakttechnik verwendete Ultraschall-Matrixarray besteht aus 10x6 Elementen und wird bei einer Mittenfrequenz von 2,25 MHz betrieben (Hersteller: Fa. Sonaxis). Für die Messungen an den Impact-Probekörpern wurde eine Fokustiefe von 2,4 mm eingestellt. Das Matrixarray wurde mit einem automatisierten Manipulator unter Verwendung einer Wasserankopplung über das Bauteil gescannt. Spur- und Messpunkt Abstand betragen jeweils 1 mm. Weitere Informationen zum Versuchsaufbau sind der Referenz [7] zu entnehmen.

**Tabelle 2.** Geometrische Ortsauflösungen der verschiedenen Verfahren.

Verfahren	Ortsauflösung in x-Richtung in mm/Pixel	Ortsauflösung in y-Richtung in mm/Pixel
Passive Thermografie, Messungen von der Rückseite	0,35	0,57
Aktive Thermografie	0,23	0,23
Luftultraschall	0,5	0,5
Ultraschall mit Matrix-Array	1,0	1,0

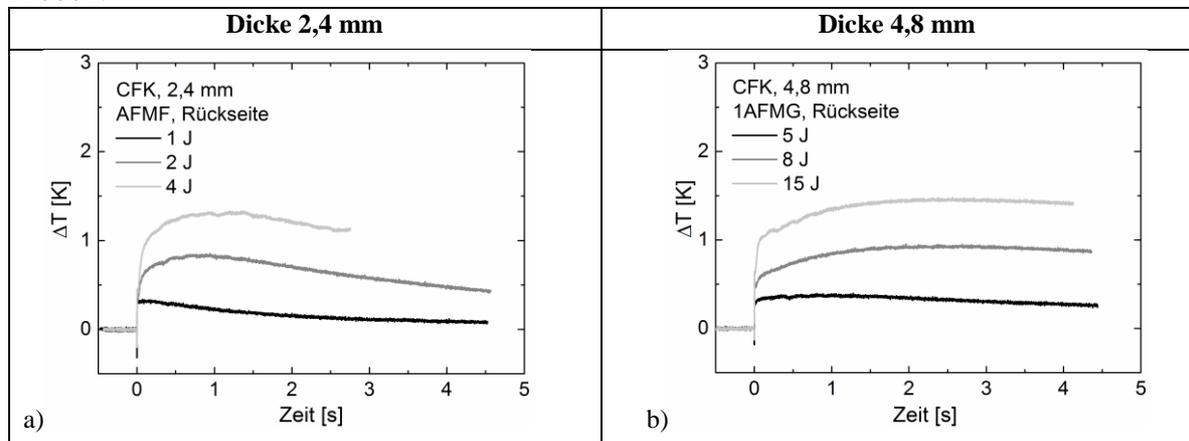
### 3. Ergebnisse und Vergleich der Messverfahren

#### 3.1 Passive Thermografie

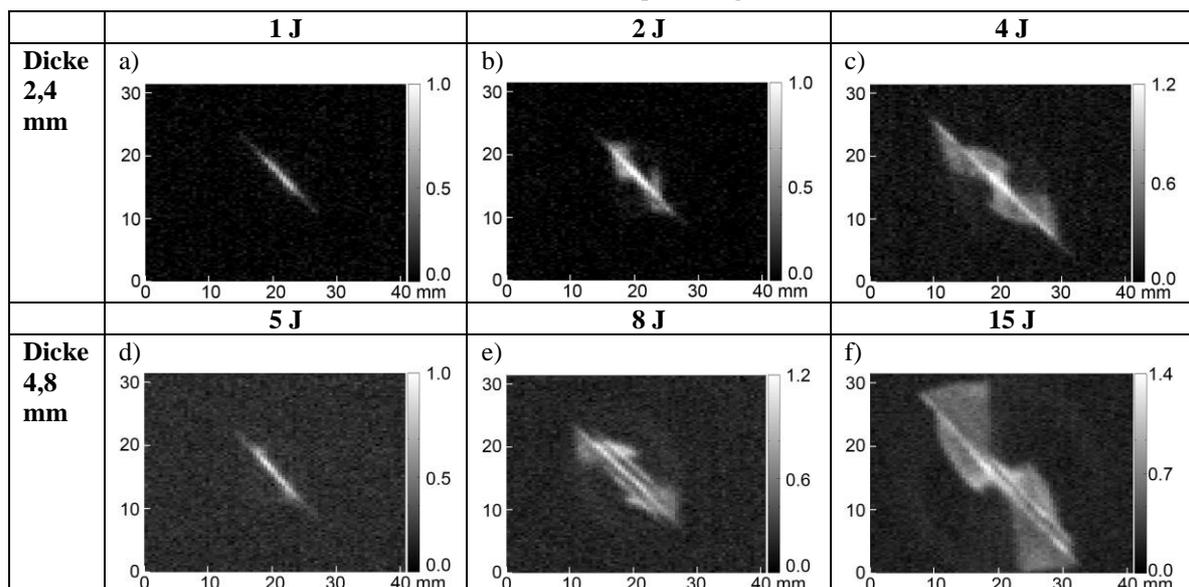
Wie bereits zuvor erwähnt, werden in diesem Beitrag nur die Messungen an der Rückseite der Proben (gegenüberliegende Seite zu den Impacts) ausgewertet.

Bei der Auswertung der rückseitigen Thermogramme während des Impacts wurde zunächst das Thermogramm zu Beginn der Sequenz, d. h. vor der Schädigung, von der gesamten Sequenz abgezogen. Damit lassen sich störende Einflüsse durch die direkte Reflexion der Kamera, Unterschiede in der Oberflächenemissivität oder eventuell vorhandene kleinere Temperaturgradienten reduzieren. Im Anschluss wurde die Temperatur

in jedem Thermogramm um die Position des Impacts im Bereich von 6x6 Pixeln gemittelt und dieser Wert über der Zeit aufgetragen. Für die beiden CFK Probekörper AFMF und 1AFMG ist dies in Abb. 1 für verschiedene Impactenergien dargestellt. In beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass sich die Probekörper im Einflussbereich des Impacts zunächst kurzzeitig abkühlen, wobei diese Abkühlung bei der dünneren Probe etwas stärker zu sein scheint. Da durch die zeitlich begrenzte Auflösung der IR-Kamera hier aber nur ein bis zwei Messpunkte erfasst werden, ist ein quantitativer Vergleich in Abhängigkeit von der Impactenergie nicht möglich. Diese Abkühlung lässt sich durch den thermoelastischen Effekt erklären. Die Rückseite des Probekörpers wird während des Impacts zunächst elastisch gedehnt, bevor dann die plastische Schädigung erfolgt. Die plastische Schädigung ist durch den deutlichen Temperaturanstieg nach dem Impact erkennbar. Dieser Temperaturanstieg nimmt mit der Verdoppelung der Impactenergie näherungsweise linear zu. Vergleicht man den Temperaturanstieg der dünnen Proben mit dem der dicken Proben, so sind vergleichbare Temperaturanstiege bei den dicken Proben, die doppelt so dick sind wie die dünnen Proben, bei ca. der vierfachen Impactenergie zu beobachten. Im Vergleich fällt weiterhin auf, dass der Temperaturanstieg bei den dünnen Proben schneller wieder abfällt als bei den dicken Proben.



**Abb. 1.** Temperatur-Zeit-Verlauf auf der Rückseite des Probekörpers in der Mitte des Impacts (gemittelt über 6x6 Pixel, 3,4x2,1 mm<sup>2</sup>) während der Schädigung der dünnen (a) und der dicken (b) CFK Probekörper bei unterschiedlichen Impactenergien.

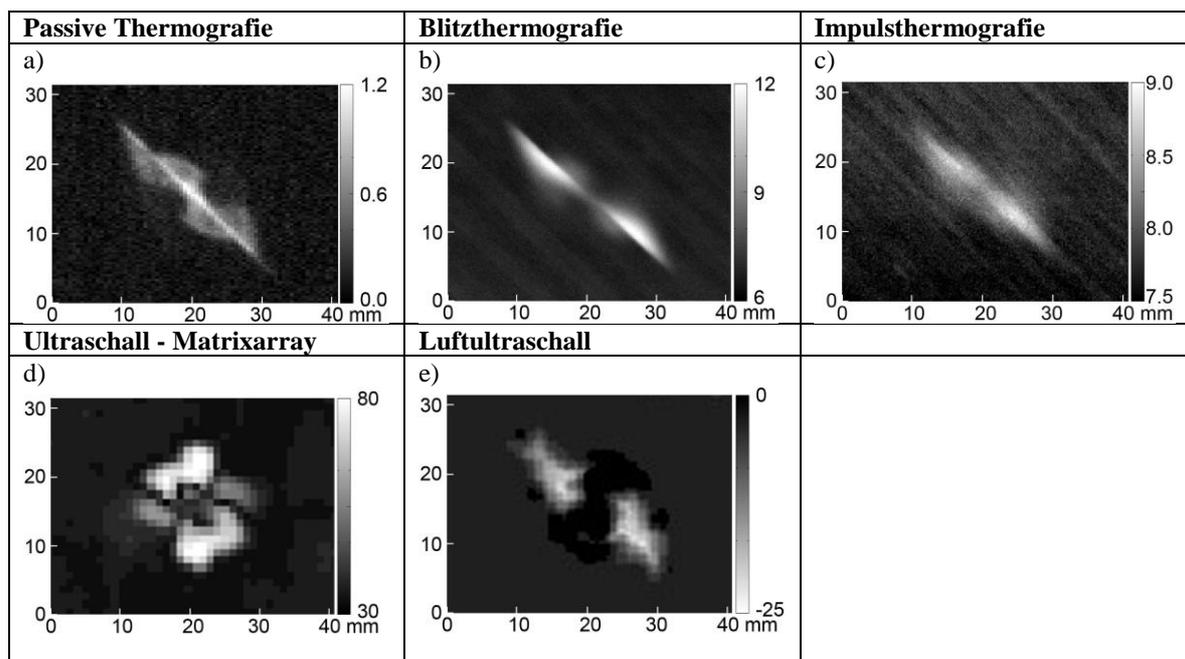


**Abb. 2.** Thermogramme (jeweils 56 ms nach dem Impact) auf der Rückseite der dünnen (oben) und der dicken (unten) CFK Probekörper für verschiedene Impactenergien. Einheiten der Grauwertskala: K.

Kontrastreiche Thermogramme von der Unterseite der Probekörper erscheinen jeweils ca. 56 ms nach dem Impact. Diese sind in Abb. 2 für die dünnen und dicken CFK Probekörper bei verschiedenen Impactenergien dargestellt. Für jeweils eine Probendicke ist gut zu erkennen, wie die Ausdehnung der Schädigung mit zunehmender Impactenergie zunimmt. Dabei ist die Schädigung länglich ausgedehnt und verläuft parallel zur 45° Orientierung der untersten Prepreg-Lage. Die warme mittlere Linie lässt sich mit einem an der Oberfläche sichtbaren Matrixriss korrelieren. Die etwas weniger warmen Bereiche neben diesem Matrixriss können wahrscheinlich Ablösungen zwischen den Prepreg-Lagen zugeordnet werden. Diese scheinen durch 0° und 90° Orientierungen begrenzt zu sein. Bei Impactenergien mit vergleichbarem Temperaturanstieg sind die Schädigungen bei den dickeren Proben großflächiger. Hier sind bei den höheren Impactenergien auch mehrere parallel verlaufende Matrixrisse zu erkennen.

### 3.2 Verfahrensvergleich

In Abb. 3 und 4 werden die Ergebnisse der verschiedenen Verfahren am 4 J Impact des dünnen CFK Probekörpers und am 13,5 J Impact des dicken GFK Probekörpers miteinander verglichen. Dazu wurden die unter den Abbildungen beschriebenen Darstellungen ausgewählt.

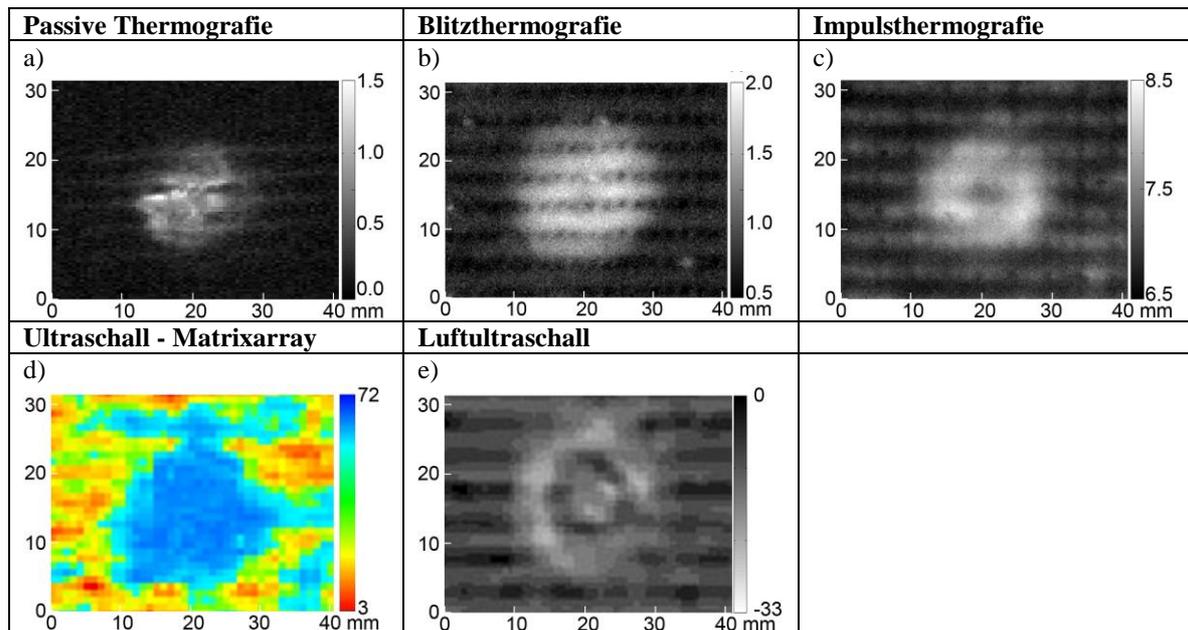


**Abb. 3.** Verfahrensvergleich am AFMF CFK Probekörper mit einer Dicke von 2,4 mm und einer Schädigung mit einer Impactenergie von 4 J. a) Thermogramm 56 ms nach dem Impact. b) Thermogramm ca. 100 ms nach dem Blitz. c) Thermogramm nach 15 s Erwärmung mit einem IR-Strahler. d) B-Bild des Ultraschall-Matrix-Arrays in der Ebene mittig im Probekörper. e) Transmission des Ultraschalls beim Luftultraschall. Einheiten der Grauwertskala bei den Thermogrammen: K. Einheiten der Grauwertskalen bei den Ultraschallbildern: dB.

Ein Vergleich der Ergebnisse der thermografischen Verfahren untereinander zeigt zunächst, dass die meisten Informationen über die Schädigung den Messungen während des Impacts entnommen werden können. Hier können Matrixrisse und wahrscheinliche Delaminationen zwischen den Lagen klar voneinander unterschieden werden. Während dann beim dünnen CFK Probekörper (Abb. 3) ein klareres Bild vom Impactschaden nach der Blitzanregung zu beobachten ist (Riss und Delaminationen), können im GFK Probekörper (Abb. 4) mehr Details mit der Impulsanregung erkannt werden (kühlerer Bereich im Inneren des Defektes).

Das B-Bild des Ultraschall-Matrixarrays am dünnen CFK Probekörper (Abb. 3) zeigt eine vollständig andere Struktur des Impactschadens als die thermografischen Verfahren und auch als der Luftultraschall. Während die Mitte des Defektes kaum Reflexionen erzeugt, erscheinen längliche Bereiche mit höheren Reflexionsintensitäten insbesondere parallel zu den  $+45^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $0^\circ$  Faserorientierungen. Das Transmissionsbild des Luftultraschalls zeigt insbesondere parallel zur  $+45^\circ$  Orientierung eine starke Dämpfung des Signals und ähnelt damit den Thermogrammen.

Die Ergebnisse der beiden Ultraschallverfahren am dicken GFK Probekörper (Abb. 4) zeigen eine vergleichbare äußere Geometrie des Impactschadens (wie auch die Thermogramme), im Transmissionsbild des Luftultraschalls sind im Inneren des Defektes jedoch mehr Details zu erkennen. Hier ist eine ringförmige Struktur mit höherer Transmission sichtbar.



**Abb. 4.** Verfahrensvergleich am 1AFPC GFK Probekörper mit einer Dicke von 5,0 mm und einer Schädigung mit einer Impactenergie von 13,5 J. a) Thermogramm 56 ms nach dem Impact. b) Thermogramm ca. 100 ms nach dem Blitz. c) Thermogramm nach 15 s Erwärmung mit einem IR-Strahler. d) B-Bild des Ultraschall-Matrix-Arrays in der Ebene mittig im Probekörper. e) Transmission des Ultraschalls beim Luftultraschall.

Einheiten der Grauwertskaala bei den Thermogrammen: K. Einheiten der Grauwertskaalen bei den Ultraschallbildern: dB.

#### 4. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Thermogramme, die während der Impacts aufgenommen wurden, liefern die meisten Informationen zu den Schädigungen. Auf der Rückseite der Probekörper ist zunächst eine kurzzeitige Abkühlung mit einer sich schnell anschließenden Erwärmung der Probekörper im Zentrum des Defektes zu beobachten. Matrixrisse und Ablösungen können gut unterschieden werden. Die maximale Temperatur der Erwärmung steigt ungefähr linear an bei Verdoppelung der Impactenergie. Mit zunehmender Impactenergie vergrößert sich auch die Ausdehnung der Schädigung. Dieses Verfahren kann jedoch nur in geplanten Versuchen während der Schädigung eingesetzt werden.

Die Ergebnisse der Messungen mit den Ultraschallverfahren sind vergleichbar mit den Messungen der aktiven Thermografie nach dem Impact. Eine Ausnahme sind die Messergebnisse mit dem Ultraschall Matrix-Array am dünnen CFK Probekörper: hier können deutliche Reflektoren entlang von drei Faserorientierungen beobachtet werden, die

mit den anderen Verfahren nicht nachgewiesen werden konnten. Da die Verfahren der aktiven Thermografie berührungslos und direkt bildgebend eingesetzt werden können, sind sie für diese Anwendungen zu bevorzugen. Die Eindringtiefe der aktiven Thermografieverfahren ist jedoch begrenzt.

Weitere Verfahrensvergleiche an anderen Materialsystemen und bei unterschiedlichen Impactenergien werden zu einem späteren Zeitpunkt veröffentlicht. Da die Prüfung in der Regel nur von einer Seite des Bauteils durchgeführt werden können und bei Impactschädigungen daher auch nur von der Seite des Impacts aus, werden diese Messungen der Thermografie ebenfalls weiter untersucht.

## 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 CFK und GFK Probekörper wurden beim Projektkoordinator NPL (National Physical Laboratory, Teddington, GB) mit Unterstützung von M. Lodeiro, M. Gower und G. Baker hergestellt. Die Impactschädigungen erfolgten bei der Fa. Block Materialprüfung GmbH mit Unterstützung von F. Hohlstein.

## Referenzen

- [1] Abrate, S. Impact Engineering of Composite Structures. CISM Courses and Lectures, vol. 526. Springer, Wien, New York, 2011
- [2] Maierhofer, C., Myrach, P., Reischel, M., Steinfurth, H., Röllig, M., Kunert, M., Characterizing damage in CFRP structures using flash thermography in reflection and transmission configurations. *Composites Part B* 57 (2014), 35-45.
- [3] Meola C. et al., *Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics*, *Composite Structures* 134 (2015) 845–853
- [4] Gaal M. et al, Air-coupled ferroelectret ultrasonic transducers applied to testing of fiber-reinforced polymers. 2<sup>nd</sup> International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing, Portorož, Slovenia, 2013, <http://www.ndt.net/article/ndt-slovenia2013/papers/43.pdf>
- [5] Meola, C., Boccardi, S., Carlomagno, G.M., Boffa, N.D., Ricci, F., Simeoli, G., Russo, P. Impact damaging of composites through online monitoring and non-destructive evaluation with infrared thermography. *NDT&E International* 85 (2017) 34–42.
- [6] Maierhofer, C., Krankenhagen, R., Röllig, M., Rehmer, B., Gower, M., Baker, G. Defect characterisation of tensile loaded CFRP and GFRP laminates used in energy applications by means of infrared thermography. *QIRT Journal* 15(1), 2018, <https://doi.org/10.1080/17686733.2017.1334312>