

# Effekte der Anisotropie in kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen bei der Induktionsthermografie

Udo NETZELMANN<sup>1</sup> und Jianguang GUO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP  
Campus E3 1, 66123 Saarbrücken

<sup>2</sup>Nondestructive Testing Research Center, School of Physical Science and Technology,  
Southwest Jiaotong University, Chengdu, PR China

udo.netzelmann@izfp.fraunhofer.de

**Kurzfassung.** Der Einfluss der elektrischen Anisotropie in kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen (KfK) bei der Induktionsthermografie wurde untersucht. Es wurde Lock-in Induktionsthermografie bei Induktionsfrequenzen um 300 kHz und Modulationsfrequenzen von 0,4 bis 36 Hz durchgeführt. Die Messungen an KfK Platten fanden in Reflexions- und in Transmissionsanordnung statt. Untersucht wurden uniaxiale, biaxiale und mehrlagige Proben mit 0°/90° Orientierung. In uniaxial verstärktem Material konnte in winkelabhängigen Messungen gezeigt werden, dass auch weit von der Induktionsspule eine Erwärmung auftritt. Weiterhin wurde die Ausbildung von Bereichen mit Minima der Erwärmung beobachtet. Dies konnte durch Finite-Elemente Simulationen qualitativ nachvollzogen werden. Untersucht wurde die Abhängigkeit des thermischen Signals von der Modulationsfrequenz. Sie erwies sich als in Übereinstimmung mit dem Verlauf, den man aus dem Volumencharakter der induktiven Erwärmung erwartet. An Proben mit Schlagschäden wurden die Thermografieergebnisse mit Induktionsanregung und mit optischer Anregung durch LED-Array bei gleicher Modulationsfrequenz verglichen. Es zeigte sich, dass die Induktionsthermografie besonders auf Faserbrüche empfindlich ist. Letztere wurden über Röntgen-CT Aufnahmen verifiziert.

## 1. Einführung

Mit Hilfe der Induktionsthermografie können Fehler in elektrisch leitenden Werkstoffen gefunden werden. Nach den Gesetzen der Elektromagnetik induziert eine mit Wechselstrom durchflossene Spule in einem Metall einen dem Strom in der Spule entgegen gerichteten Strom. Fehler wie oberflächennahe Risse zwingen die Materialströme zu Umwegen, wodurch Bereiche veränderter Stromdichte entstehen. Durch Ohmsche Verluste wird Wärme freigesetzt. Dies geschieht quadratisch mit der Stromdichte. Es resultiert eine lokal unterschiedliche Erwärmung um den Riss, die ihn für eine Infrarotkamera sichtbar macht.

Die meisten Anwendungen dieser Prüftechnik wurden an Stählen durchgeführt [1]. Die kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffe (KfK) zeichnen sich durch eine geringe elektrische Leitfähigkeit aus, die es ermöglicht, sie mit induktiv angeregter Thermografie



zu prüfen. Resistive Verluste in den Fasern und an Berührstellen von sich kreuzenden Faserbündeln, aber auch dielektrische Verluste in der Matrix können Beiträge zur Anregung thermischer Signale liefern. Insgesamt unterscheidet sich diese Anregung dadurch deutlich von den bekannten optischen Anregungstechniken.

Frühe Experimente mit der Induktionsthermografie an KfK wurden mit durch einen Linearscanner bewegter Spule und ruhenden KfK-Platten durchgeführt [2]. Delaminationen in KfK wurden mit sowohl mit induktiver Erwärmung als auch mit direkter Stromeinspeisung (Konduktionsthermografie) nachgewiesen [3]. Volumenfehler wurden künstlich hergestellt und in Experimenten mit bewegter Probe detektiert [4]. Neben der Anregung durch Burstpulse wurden auch Untersuchungen mit der Lock-in Technik durchgeführt [5]. Induktionsthermografie an Objekten mit bestimmten Arten von Delaminationsfehlern wurde modelliert und experimentell verifiziert [6]. Viele experimentelle Untersuchungen konzentrierten sich auf Schlagschäden [7] und daraus resultierende Delaminationen in KfK-Laminaten [8,9]. Generell wurde festgestellt, dass mit Induktionsanregung Hohlräume unter der Oberfläche schwieriger zu detektieren sind als bei gepulster optischer Thermografie und dass Delaminationen mit Induktionsanregung schwieriger zu erkennen sind als Schlagschäden.

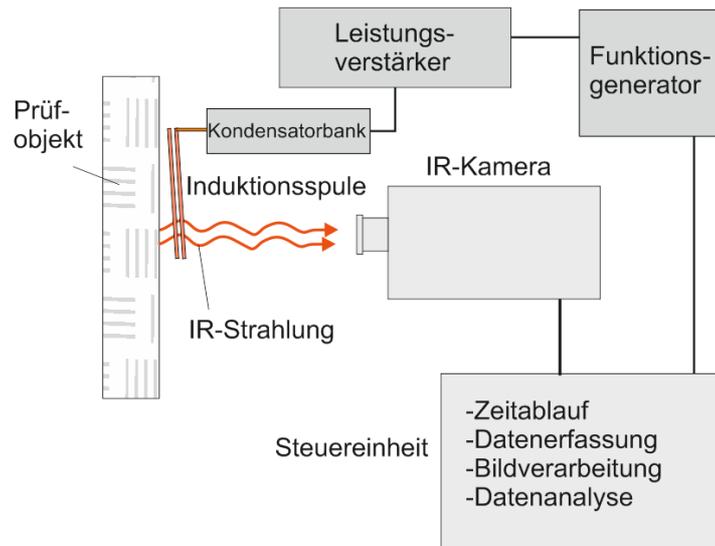
Im Zusammenhang mit der Technik des Induktionsschweißens wurde die Erwärmung von KfK durch Induktion bereits eingehend untersucht [10]. Bei dieser Technik werden die Fügepartner durch ein Hochfrequenzfeld so weit erwärmt, dass die thermoplastische Matrix aufschmilzt und nach Aufbringen eines Drucks eine dauerhafte Verbindung bildet [11]. Zum Induktionsschweißen wurden bereits experimentelle und theoretische Untersuchungen zu den Heizmechanismen durchgeführt [12,13]. Im Ergebnis kann man feststellen, dass sowohl resistive Verluste in den Kohlefasern sowie an Kontaktstellen sich kreuzender Faserbündel als auch dielektrische Verluste in der Matrix zur Erwärmung beitragen. Welche Mechanismen dominant sind, hängt von der Induktionsfrequenz, den Materialparametern und von geometrischen Parametern der KfK-Struktur ab [14].

Mit Wirbelstromtechniken wurden und werden KfK ebenfalls untersucht. Dazu gab es Studien zur Rolle der resistiven und kapazitiven Verluste [15]. Es wurden die Wirbelstromverteilungen in einachsigen und mehrachsigen KfK Materialien ermittelt [16]. Für die industrielle Anwendung wurden abbildende Wirbelstromsysteme mit hoher lateraler Auflösung entwickelt. Diese Systeme verwenden Sensorarrays bei hohen Induktionsfrequenzen bis in den MHz-Bereich [17].

In der vorliegenden Untersuchung wurde die Auswirkung der elektrischen Anisotropie auf den Nachweis von Fehlern in KfK studiert. Dazu wurden Messungen und Simulationen an einer einachsigen orientierten Platte sowie an  $0^\circ/90^\circ$  orientierten Stapeln durchgeführt.

## **2. Experimentelles**

In Abb. 1 wird der experimentelle Aufbau für die durchgeführten Versuche gezeigt. Es wurde die Lock-in Technik verwendet. Ein Funktionsgenerator HP 6116 lieferte Burstpulse, die mit einem breitbandigen ENI 2100L Leistungsverstärker bis auf 200 W Leistung verstärkt werden konnten. Dieser war mit einer Kondensatorbank verbunden, an die verschiedene Induktionsspulen angeschlossen werden können. Es wurden Resonanzfrequenzen im Bereich von 170–350 kHz verwendet.



**Abb. 1.** Experimenteller Aufbau für die durchgeführten Untersuchungen mit Induktionsthermografie

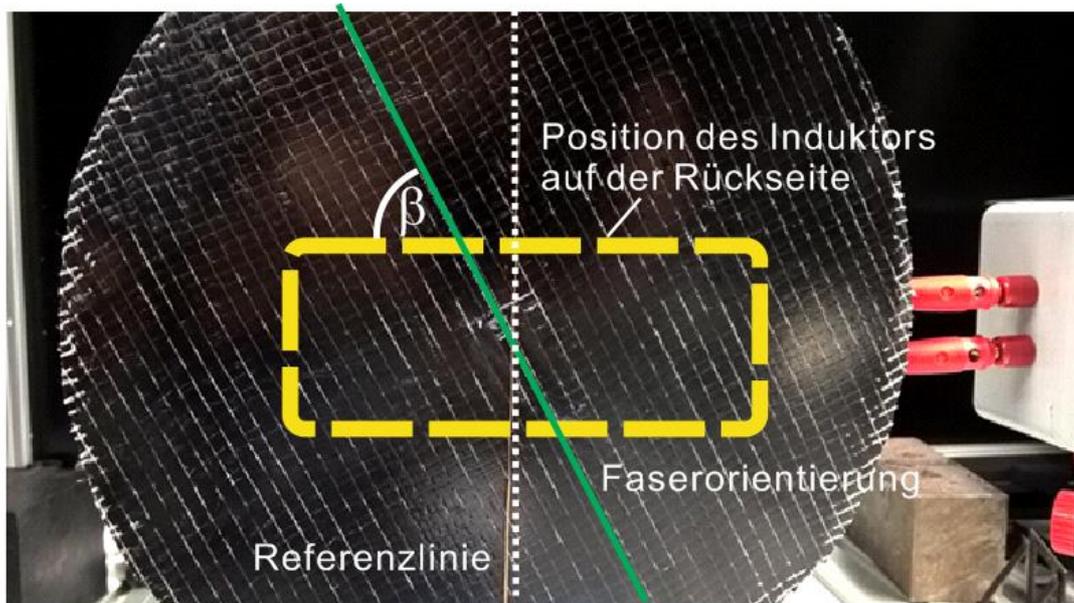
Für die Untersuchungen wurde eine Thermosensorik QWIP 384 Dual-Band Infrarotkamera eingesetzt [18]. Ausgewertet wurden hauptsächlich die Bilder aus dem Band im mittleren Infrarot bei 4,4 bis 5,2  $\mu\text{m}$  Wellenlänge. Bildsequenzen von entweder 1024 oder 2048 Einzelbildern wurden bei einer Bildrate von 145 Bildern/s aufgezeichnet. Die Bildaufzeichnung war dabei mit der in Rechteckform modulierten Burstanregung der Probe synchronisiert. Die Modulationsfrequenzen  $f_M$  lagen im Bereich von 0,4 bis 36 Hz. Aus den aufgezeichneten Bildsequenzen wurden Amplituden- und Phasenbilder errechnet.

Wegen der niedrigen elektrischen Leitfähigkeit von KfK konnten die in dieser Studie verwendeten Proben als elektromagnetisch dünn angenommen werden. Dies bedeutet, dass die elektromagnetische Eindringtiefe (Skintiefe) groß gegen die geometrische Dicke war. Aus Materialparametern der Literatur kann man senkrecht zu den Faserebenen eine Skintiefe von der Größenordnung 5 cm bei einer Induktionsfrequenz von 100 kHz errechnen. Bei allen plattenförmigen Proben wurden daher Messungen in Reflexionsanordnung (der Induktor befindet sich zwischen Probe und Infrarotkamera, wie in Abb. 1) und in Transmissionsanordnung (der Induktor befindet sich auf der der Kamera abgewandten Seite der Probe) durchgeführt. In Abschnitt 3.2 wird der Aspekt der elektromagnetischen Transparenz weiter behandelt.

### 3. Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 KfK-Platte mit einachsiger Anisotropie

Für diese Untersuchung war einachsiger orientiertes KfK mit 1 mm Dicke vorhanden. Das Material bestand aus parallel orientierten flachen Faserbündeln mit jeweils etwa 5 mm Bündelbreite, die in eine Polymermatrix eingebettet waren. Aus dem Rohmaterial wurde eine Scheibe von 200 mm Durchmesser ausgeschnitten. Im Zentrum der Scheibe wurde eine rechteckige Spule mit einer Abmessung von 120 mm x 35 mm positioniert (Abb. 2). Auf der Scheibe befand sich eine Markierung, mit deren Hilfe der Drehwinkel  $\beta$  zwischen der längeren Spulenachse und der Faserrichtung der Probe bestimmt werden konnte.



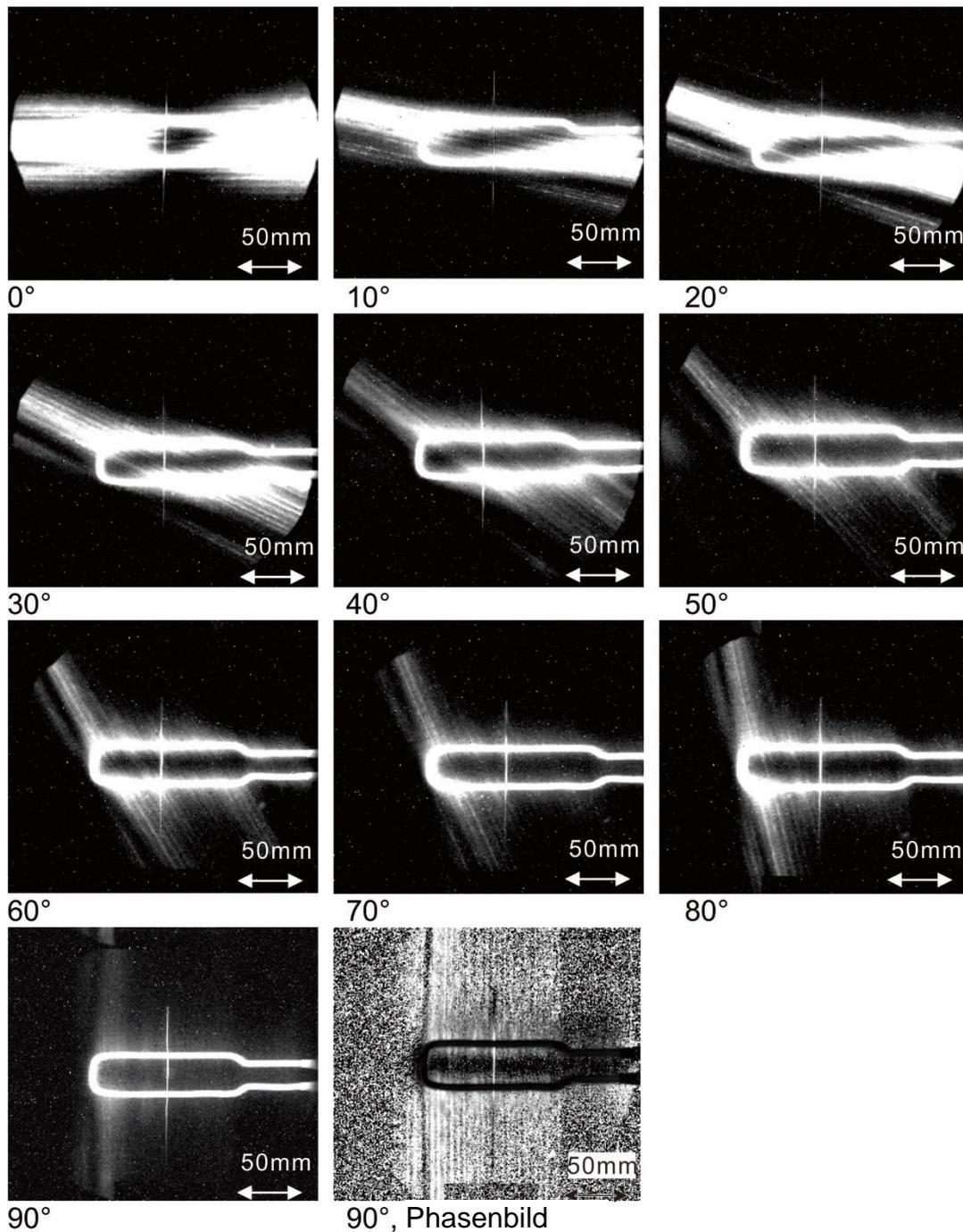
**Abb. 2.** Foto des Aufbaus für die Induktionthermografie (hier: Transmissionanordnung). Der grüne Marker zeigt die Faserrichtung an.

Die in Abb. 3 dargestellten Messungen wurden bei einer Induktionsfrequenz von 329 kHz und einer Lock-in Frequenz  $f_M = 0,57$  Hz durchgeführt. Die Spule war in Reflexionsanordnung positioniert. Die Abbildung zeigt thermografische Amplitudenbilder als Funktion des Drehwinkels  $\beta$ . Helle Graustufen entsprechen hohen Temperaturamplituden, während dunklere Graustufen geringere Temperaturamplituden darstellen.

Die größte Erwärmung trat bei  $\beta = 0^\circ$  auf, wenn die längere Seite der Spule parallel zur Faserrichtung lag. Bei von null verschiedenen Winkeln gab es immer noch einen erheblichen Stromfluss und Erwärmung in den Fasern. Der Stromfluss erstreckt sich dabei in der Regel von der Spule bis zum Rand der Probenscheibe. Dieses Erwärmungsmuster war selbst bei  $\beta = 90^\circ$  in der Nähe der Spule noch sichtbar. Das zugehörige Phasenbild bei  $\beta = 90^\circ$  lässt erkennen, dass auch dann noch Strom weit entfernt von der Spule fließt.

In einer früheren Studie zu Wirbelstrom in einachsigem KfK [16] war ebenfalls ein nennenswerter Stromfluss in größerer Entfernung von der Anregungsspule nachgewiesen worden. Dies und die soeben beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass auch die induktive Erwärmung von einachsigem KfK möglich ist, im Gegensatz zu anderen, in diesem Zusammenhang durchgeführten Untersuchungen [11].

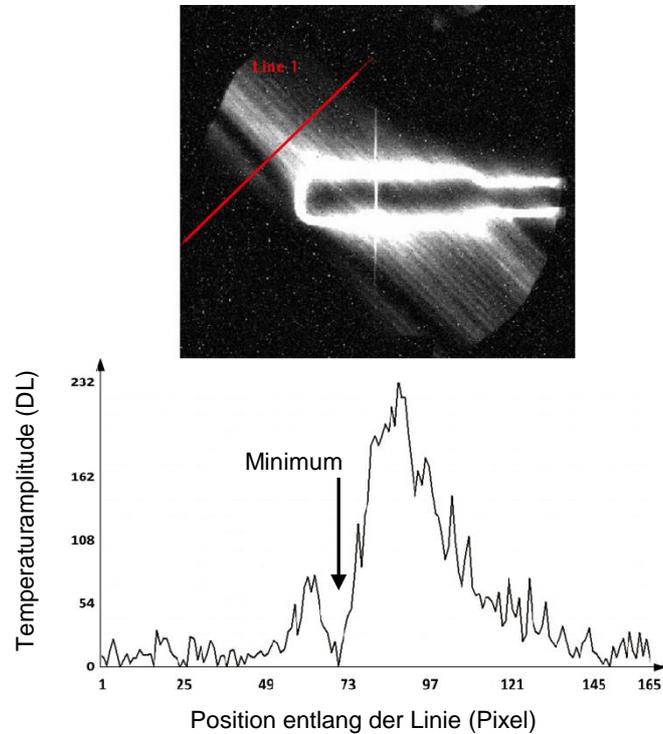
In ähnlicher Weise wie in der beschriebenen Reflexionsanordnung wurden auch Messungen in Transmissionsanordnung durchgeführt. Dabei ergaben sich sehr ähnliche Erwärmungsbilder. In weiteren sowohl in Reflexions- als auch in Transmissionsanordnung durchgeführten Experimenten wurde die Spule um  $90^\circ$  um ihre lange Achse gedreht. Auch dabei sahen die Ergebnisse ähnlich denen in Abb. 3 aus.



**Abb. 3.** Thermografische Amplitudenbilder der einachsigen faserorientierten Probe bei unterschiedlichen Drehwinkeln  $\beta$  (die dünne, vertikale Linie ist ein Kupferdraht als Referenz, der senkrecht auf der langen Spulenachse steht).

In der Nähe der kurzen Kante der Spule konnte ein interessantes Phänomen beobachtet werden (Abb. 4). Entlang einer Linie in Faserrichtung trat ein Minimum der Erwärmung auf. Dieser Effekt trat bei allen Werten von  $\beta$  auf und erinnert an einen Interferenzeffekt. Da die thermische Signalphase in der Nähe der Minimumlinie keine nennenswert Änderung aufweist, kann man annehmen, dass der Effekt elektromagnetischer Natur ist. Die Erklärung für den beobachteten Effekt liegt darin, dass unterschiedliche Teile der Spule Strombeiträge mit entgegengesetztem Vorzeichen im Werkstoff anregen. Durch die Anisotropie wird der Stromfluss in eine feste Richtung gezwungen, so dass es an

bestimmten Positionen zu einer vollständigen Auslöschung des Stroms kommen kann. Im isotropen Werkstoff wird diese vollständige Auslöschung nicht beobachtet, da es normalerweise Stromflusskomponenten in verschiedenen Richtungen gibt, die nicht vollständig ausgelöscht werden.



**Abb. 4.** Oben: Thermografisches Amplitudenbild bei  $\beta = 45^\circ$ . Unten: Linienprofil senkrecht zur Faserrichtung entlang der roten Linie. Bei der Pixelposition 70 wird ein Minimum beobachtet.

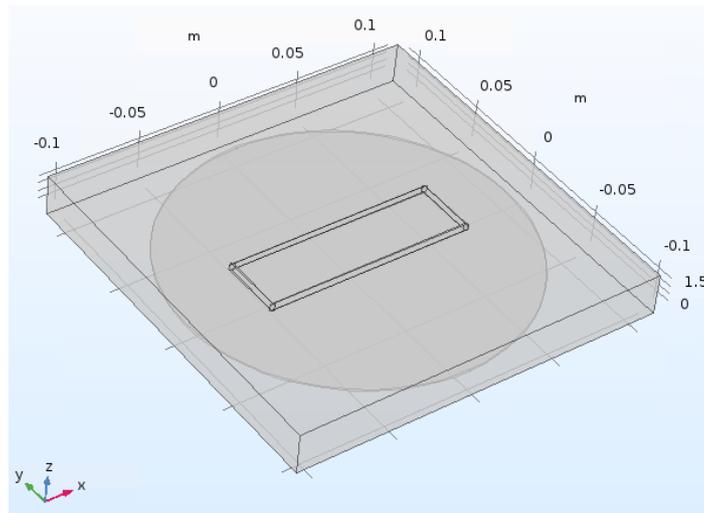
### 3.1.1 Numerische Simulation

Die obigen Ergebnisse wurden mit Finite Elemente Rechnungen simuliert. Eine Rechteckspule wurde über einer einachsigen isotropen KfK-Platte mit Abmessungen wie in Abschnitt 3.1 beschrieben modelliert. Die Probe wurde vereinfachend als homogenes, anisotropes Medium angenommen, wobei die richtungsabhängigen Materialeigenschaften in Tabelle 1 aufgeführt sind. Die Parameter stammen aus der Literatur [6].

**Tabelle 1:** Werkstoffparameter der einachsigen anisotropen KfK-Platte, wie sie für die Simulation verwendet wurden

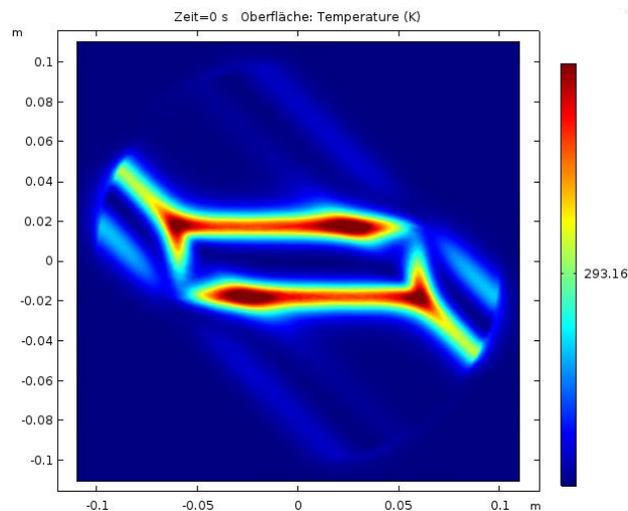
| Parameter  | Dichte in $\text{kg/m}^3$ | Spezifische Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | Elektrische Leitfähigkeit in $\text{S}/\text{m}$ | Rel. Permeabilität | Rel. Dielektrizitätskonstante |
|------------|---------------------------|---|--|--|--------------------|-------------------------------|
| x-Richtung | 1500                      | 1250  | 6  | 20000  | 1                  | 1                             |
| y-Richtung |                           |   | 0,7  | 100  |                    |                               |
| z-Richtung |                           |   | 0,7  | 100  |                    |                               |

Es wurden keine dielektrischen Verluste berücksichtigt, da eine relativ niedrige Induktionsfrequenz (100 kHz) angenommen wurde. Abb. 5 zeigt eine Skizze des modellierten Experiments.



**Abb. 5.** Skizze des modellierten Experiments mit einer Rechteckspule in einer Höhe von 5 mm über einer 1 mm dicken KfK-Platte.

Als Finite-Elemente Software wurde COMSOL Multiphysics 5.3 verwendet. Eine externe Wechselstromdichte bei 100 kHz wurde für die Induktionsspule angenommen. Mit Hilfe der Software wurde die Temperaturverteilung zu einer Zeit 1 s nach Beginn der Anregung berechnet. Abb. 6 zeigt ein Ergebnis.



**Abb. 6.** Simuliertes Erwärmungsmuster einer einachsig anisotropen KfK-Platte mit Faserorientierung unter  $\beta = 45^\circ$  zur x-Achse nach 1 s Induktionserwärmung, zu vergleichen mit Abb. 4

Die Ergebnisse von Simulation und Experiment stimmen recht gut überein. Die Erwärmung bis zum Probenrand und insbesondere das Auftreten von Signalminima wird wiedergegeben. Unterschiede können daraus resultieren, dass im Modell über 1 s konstante Erwärmung angenommen wurde, wohingegen die Anregung im Experiment periodisch war und phasenempfindlich ausgewertet wurde.

### 3.2 KfK-Probe mit gestapelten Gewebelagen 0°/90°

Die zweite untersuchte Probe bestand aus insgesamt sechs Gewebelagen, wobei zwei Lagen in 0°-Richtung, dann zwei Lagen in 90°-Richtung und schließlich zwei Lagen wieder in 0°-Richtung orientiert waren (Abb. 7). Die Abmessungen der Probe waren 100 mm x 100 mm, die Gesamtdicke 1,6 mm.

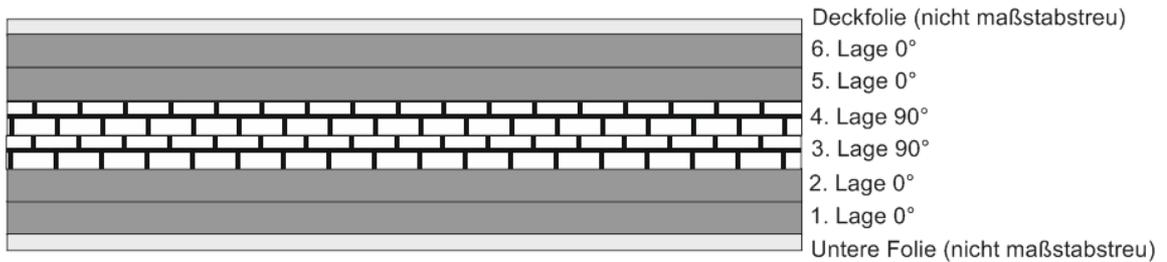


Abb. 7. Lagenstruktur der untersuchten Probe.

Abb. 8 zeigt die thermografischen Amplituden- und Phasenbilder, die in Reflexions- und Transmissionsmodus bei einer Modulationsfrequenz von  $f_M = 0,57$  Hz gewonnen wurden. Die Spule war dieselbe wie in Abschnitt 3.1 beschrieben.

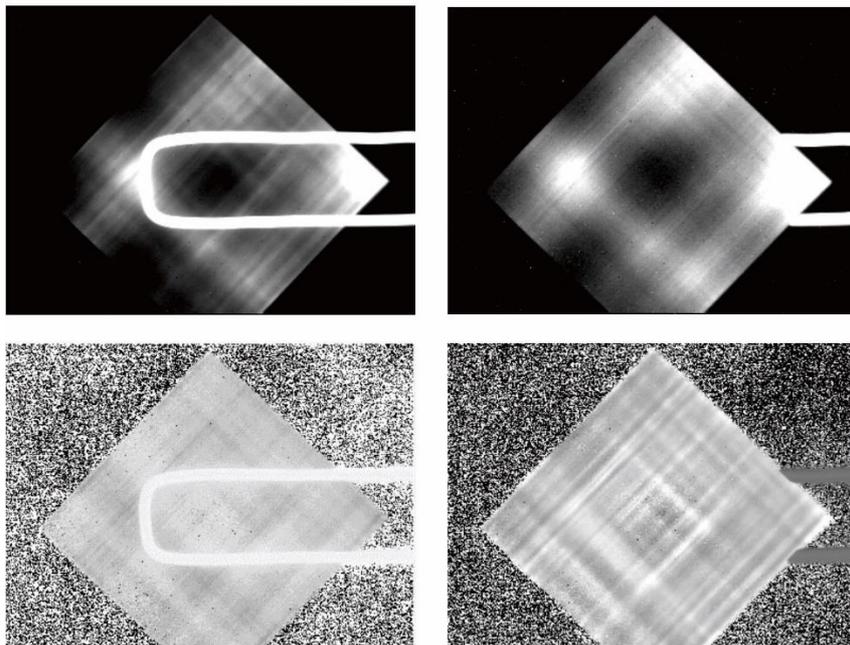
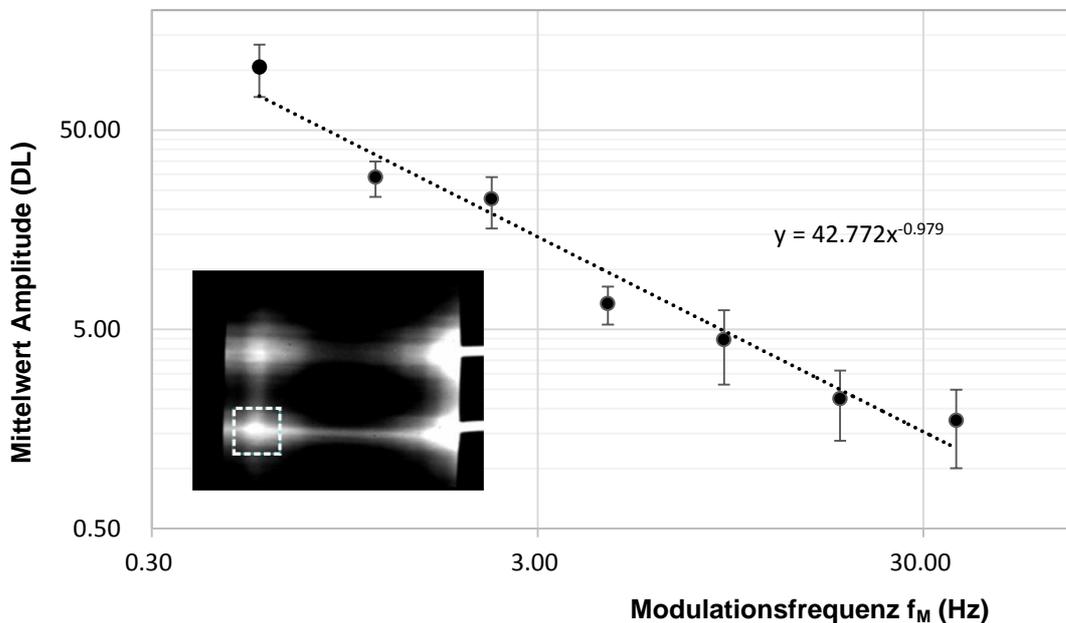


Abb. 8. Thermografische Amplituden- (obere Reihe) und Phasenbilder (untere Reihe) der 0°/90°-orientierten Probe in Reflexions- (linke Spalte) und Transmissionsanordnung (rechte Spalte). Die Faserrichtung der Probe war bezogen auf die lange Spulennachse um  $\beta = 45^\circ$  gedreht.

Die Erwärmungsmuster geben die Faserstruktur sowohl in der 0° als auch in der 90° Orientierung wieder. Die Erwärmung reicht auch bei dieser Probe bis an den äußeren Rand. Die Proben waren transparent für die elektromagnetische Anregung, was man an den ähnlichen Kontrasten in Transmissions- und Reflexionsanordnung erkennt.

Auch aus dem thermischen Signal lassen sich Hinweise auf die Transparenz gewinnen. Dazu wurde das Lock-in Amplitudensignal auf einer Auswertefläche am linken Ende der Anregungsspule (Abb. 9, kleines Bild) im Transmissionsmodus als Funktion der Modulationsfrequenz  $f_M$  ausgewertet. Die Probenkante war parallel zur längeren Seite des Spule. Unter Verwendung der thermischen Diffusivität in der Dickenrichtung der Probe (berechnet aus den Daten in Tabelle 1) schätzt man den Bereich der thermischen Diffusionslängen in dem durchgeführten Experiment zu 60  $\mu\text{m}$  bis 0,5 mm ab.

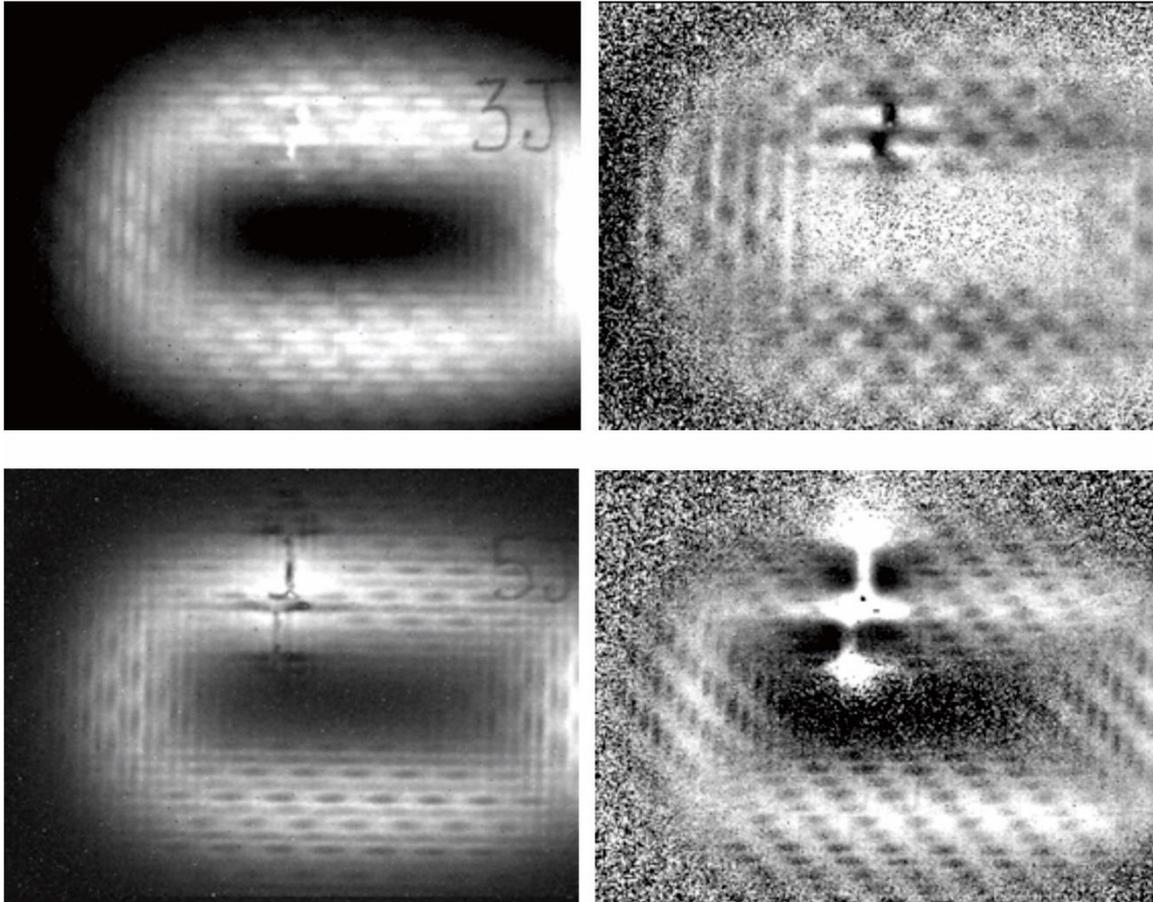
Das Ergebnis ist in Abb. 9 dargestellt. In der doppeltlogarithmischen Darstellung kann man erkennen, dass die Signalamplitude entlang einer geraden Linie mit der Modulationsfrequenz  $f_M$  abnimmt. Die Steigung der an die Messdaten angefitzten Gerade zeigt, dass sich die Amplitude proportional zu  $f_M^{-0,98}$  verhält. Da sich das Signal bei einer homogenen Volumenerwärmung umgekehrt proportional zur Frequenz verhalten sollte, unterstützt dieser Befund die Annahme einer Volumenheizung, zumindest innerhalb einer Entfernung von 0,5 mm von der Oberfläche.



**Abb. 9.** Signalamplitude (in Einheiten von digital levels DL) als Funktion der Modulationsfrequenz  $f_M$ . Im kleinen Bild ist die Messposition, über die jeweils die Signalamplitude gemittelt wurde, durch ein gestricheltes Quadrat markiert.

### 3.3 Nachweis von Schlagschäden in einem mehrlagigen KfK-Gewebe

Weitere untersuchte Proben bestanden aus 19 Lagen aus gewebten  $0^\circ/90^\circ$ -Fasern, die in eine Polypropylendisulfid-Matrix bei einem Faservolumengehalt von 52% eingebettet waren. Die Probenabmessungen betragen 150 mm x 100 mm x 4 mm. Diese Proben waren durch Schlagversuche bei unterschiedlichen Energien von 1 bis 10 J geschädigt worden. In diesem Fall lag die Induktionsfrequenz bei 329 kHz, die Modulationsfrequenz betrug 1,13 Hz. In Abb. 10 sind die in Transmissionsanordnung erhaltenen Amplituden- und Phasenbilder von der Aufprallseite bei Energien von 3 und 5 J dargestellt.

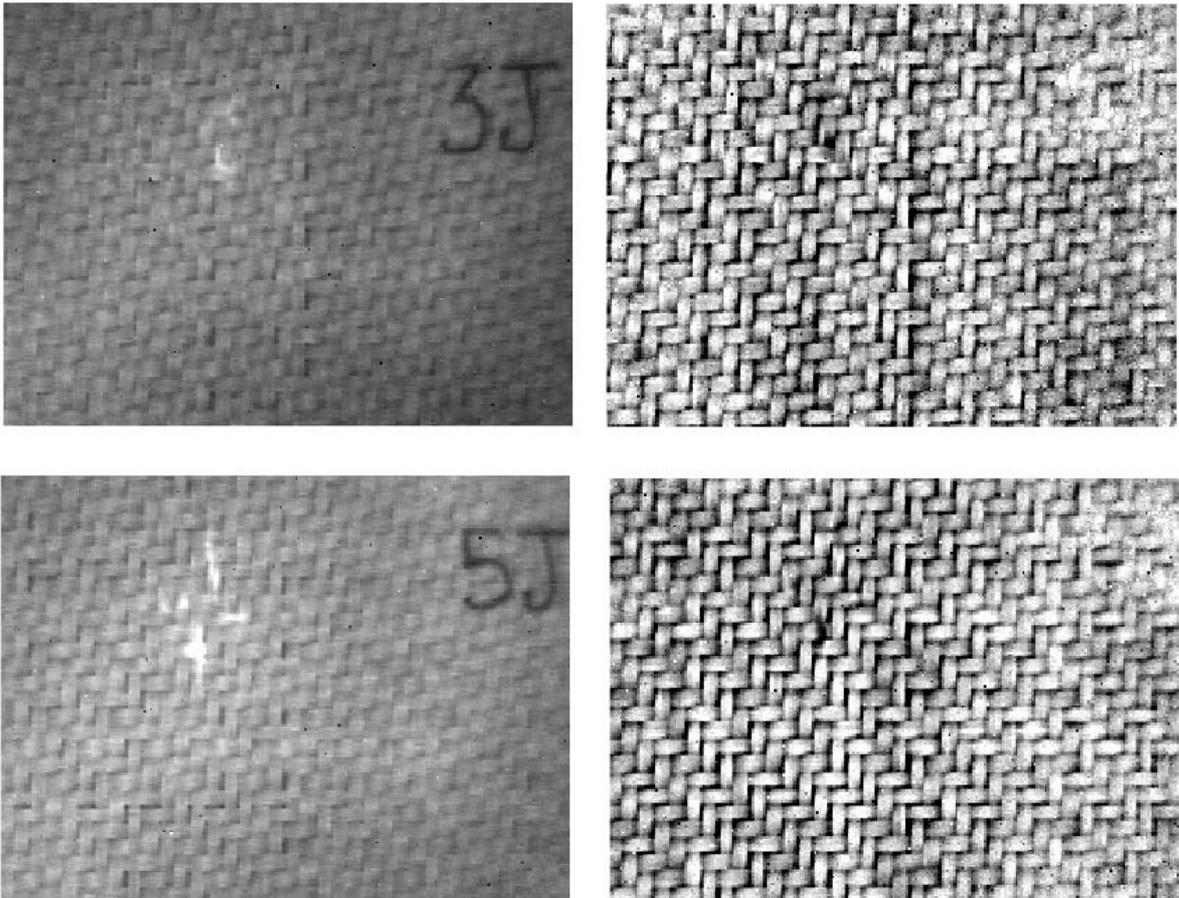


**Abb. 10.** Thermografische induktiv angeregte Amplituden- (linke Spalte) und Phasenbilder (rechte Spalte) von KfK-Proben mit Schlagschädigung durch 3 J (obere Reihe) und 5 J (untere Reihe).

Der Fehler mit 3 J Einschlagenergie war in den Thermografiebildern sichtbar, wohingegen die durch niedrigere Einschlagenergie hervorgerufenen Schädigungen nicht sichtbar waren. Wie zu erwarten, erschien der 5 J Fehler mit noch größerem Kontrast. Generell war festzustellen, dass der Kontrast des Phasenbilds wesentlich höher war als der des Amplitudenbilds.

Die Ergebnisse mit induktiver Anregung an diesen Proben wurden mit Messungen verglichen, die stattdessen mit optischer Anregung erzielt wurden. Dazu wurden zwei LED-Arrays bei 940 nm Wellenlänge eingesetzt, die je eine optische Ausgangsleistung von 20 W lieferten. Verglichen mit Halogenstrahlern haben diese LED-Arrays den Vorteil, nur in einem engen Spektralbereich ausstrahlen, ohne Überlappung mit dem Spektralbereich der Infrarotkamera. Restliche thermische Strahlung durch die elektrischen Verluste im Array wurde durch transparente Polymerfilter blockiert, die vor den Arrays montiert waren. Dadurch wird die Reflexion der thermischen Strahlung an der Probenoberfläche sehr klein.

Ein weiterer Vorteil der LED-Arrays liegt darin, dass sie auch höhere Modulationsfrequenzen erlauben, die mit Halogenstrahlern nicht möglich sind. Zum Vergleich mit den induktionsthermografischen Messungen wurde bewusst dieselbe Modulationsfrequenz von 1,13 Hz gewählt. Ergebnisse sind in Abb. 11 zu sehen.



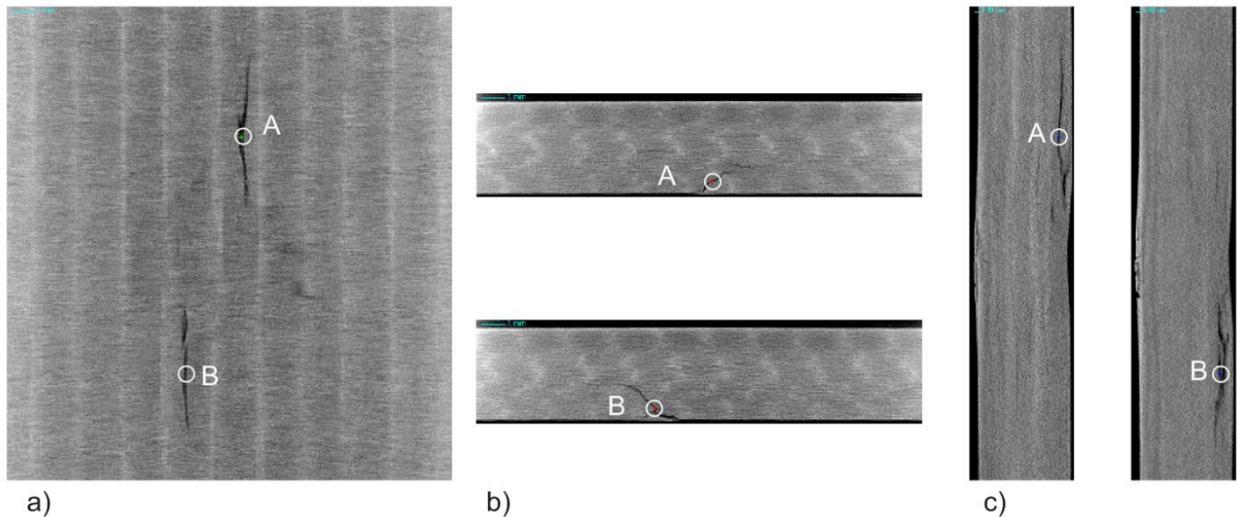
**Abb. 11.** Thermografische optisch angeregte Amplituden- (linke Spalte) und Phasenbilder (rechte Spalte) von KfK-Proben mit Schlagschädigung durch 3 J (obere Reihe) und 5 J (untere Reihe).

Die Amplitudenbilder, die mit optischer Anregung erhalten wurden, zeigen die Oberflächenrisse mit einem Kontrast gleich oder etwas geringer als der Kontrast, der mit induktiver Anregung im Amplitudenbild erhalten wurde. Die Phasenbilder weisen dagegen kaum einen Kontrast von den Schlagschäden auf, oder wenn, dann ist er von dem Hintergrund der Webstruktur überlagert.

Die Ergebnisse mit Induktionsthermografie (Abb. 10) legen nahe, dass zumindest teilweise gebrochene Faserbündel entstanden sind. Dies würde die Stromdichte um den Faserbruch verändern. Die Muster im Phasenbild erinnern an typische Muster, wie man sie von Oberflächenrissen in Metallen kennt. Dieser Mechanismus existiert bei der optischen Anregung nicht.

Um die Art der beim Schlagversuch aufgetretenen Schäden genauer zu untersuchen, wurden zusätzlich 3D-Röntgen CT Aufnahmen an den Proben durchgeführt. Bei einer Energie von 200 keV wurde ein Volumendatensatz mit einer Voxelauflösung von 24,5 µm rekonstruiert. Die Ergebnisse, die an der Probe mit 5 J Schlagenergie gewonnen wurden, werden in Abb. 12 gezeigt.

In Abb. 12a kann man erkennen, dass Rissbildung mit Unterbrechung der Kohlefasern in x-Richtung vorlag. Abb. 12b zeigt, dass sich die Risse von der Einschlagseite her (der Unterseite in den Querschnitten) bis in eine Tiefe von 1 oder 2 mm reichen. In der Tat konnten Schädigungsspuren sogar über die gesamte Dicke der Probe bis zur Rückseite verfolgt werden.



**Abb. 12.** Querschnitte der Probe mit 5 J Schlagenergie aus einer Röntgen-CT Aufnahme. a) xy-Ebene in einer Tiefe von 515  $\mu\text{m}$  parallel zur Einschlagoberfläche. Der Querschnitt entspricht der Ansicht aus den Abbildungen 10 und 11. Zwei Referenzpunkte A und B sind eingezeichnet. b) xz-Ebenen ( $z$  = Tiefenkoordinate) durch die Referenzpunkte A und B. c) yz-Ebenen durch die Referenzpunkte A und B.

Abb. 12c zeigt, dass auch innere Delaminationen weitgehend parallel zur Einschlagseite (rechte Seite im Querschnitt) aufgetreten sind. Bei einer Modulationsfrequenz, wie sie in den Messungen mit beiden thermografischen Varianten verwendet wurde, ist die abgeschätzte thermische Diffusionslänge nur etwa 0,34 mm und damit zu klein, um einen ausreichenden Kontrast in Amplitude und Phase zu erzeugen. Zusätzlich durchgeführte Experimente mit Blitzlichtanregung konnten Kontraste durch die Delaminationen nach längeren Beobachtungszeiten nachweisen.

In den Proben mit 3 J Schlagenergie waren die Rissöffnungen sehr gering, und die mit Röntgen-CT nachweisbare Schädigung reichte nicht tiefer als 1,2 mm.

Wegen der Volumenheizung kann man nicht unbedingt erwarten, dass die inneren Delaminationen einen besonders hohen Kontrast erzeugen. Andererseits haben andere Arbeiten gezeigt, dass sie mit Induktionsthermografie nachweisbar sind [9]. Jedenfalls können sie in KfK leichter mit blitzlichtangeregter Thermografie als mit Induktionsthermografie nachgewiesen werden.

#### 4. Zusammenfassung

Bei der Prüfung von einachsig orientiertem KfK kann man erwarten, dass Induktionsströme auch weit entfernt vom Induktor fließen, bis sie den äußeren Rand des Prüfobjekts erreichen. Dies tritt bei allen Winkeln zwischen Faserrichtung und der Achse einer Rechteckspule auf. In der Nähe der Ecken einer Rechteckspule und auch in bestimmten Zonen um eine kreisförmige Spule wurden Minima der Erwärmung gefunden. Diese wurden durch die Auslöschung unterschiedlicher, entgegengesetzter Strombeiträge erklärt. Sie konnten auch in Finite-Elemente Simulationen bestätigt werden. Solche Minima der Erwärmung könnten zu toten Zonen bei der thermografischen zFP führen.

Auch an einer zweiachsig orientierten KfK-Probe konnte die Erwärmung weit von der Anregungsspule beobachtet werden, dagegen nicht die Minima der Erwärmung entlang von Linien. Erstmals an KfK wurde eine Auswertung der Abhängigkeit des induktiv angeregten thermischen Signals von der Modulationsfrequenz durchgeführt. Diese unterstützt die Annahme einer Volumenheizung bei plattenförmigem Material.

Die Messungen an schlaggeschädigten KfK-Proben zeigen, dass Induktionsthermografie eine empfindliche Erkennung von Faserbrüchen erlaubt. Dieser Kontrast ist komplementär zu dem bekannten Kontrast durch innere Delaminationen, wie er durch die blitzlichtangeregte Thermografie zugänglich ist.

## Referenzen

- [1] U. Netzelmann, G. Walle, S. Lugin, A. Ehlen, S. Bessert and B. Valeske, 'Induction thermography: principle, applications and first steps towards standardization', QIRT journal (2016), DOI 10.1080/17686733.2016.1145842
- [2] R. Lehtiniemi and J. Hartikainen, 'An application of induction heating for fast thermal nondestructive evaluation', Rev. Sci. Instrum. 65 (1994) 2099-2101
- [3] Sakagami T, Ogura K, Thermographic NDT based on transient temperature field under Joule effect heating. SPIE 1994; 2245:120-130.
- [4] Shepard S M, Iyota J R, Ahmed T. Development of NDE Technique with Induction Heating on Conductive Composite Material. USAF Report Number AFRL-SR-TR-05-0043 (2004)
- [5] G. Riegert, T. Zweschper and G. Busse, 'Eddy-current lockin-thermography: Method and its potential', J. Phys. IV France 125 (2005) 587-591
- [6] C. Karch, W. Wulbrand, R. Stössel, 'Induktions- und Blitzlichtthermographie -Modellierung und Simulation-', Thermographie Kolloquium 2011, 29.-30.9.2011, Stuttgart, DGZfP Berichtsband BB 130-CD, V21 (2011)
- [7] Y. He, G. Tian, M. Pan and D. Chen, 'Impact evaluation in carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates using eddy current thermography', Composite Structures 109 (2014) 1-7
- [8] M. Ishikawa, Y. Shiya, Y. Kogo, H. Hatta, Y. Habuka, R. Fukui, S. Utsonomiya, 'Inspection of CFRP laminates using phase-transformed induction heating thermography', Proc. 11th ECNDT, Prague, Oct. 6-10 (2014)
- [9] H. Bui, G. Wasselynck, D. Trichet, and G. Berthiau, 'Study on flaw detectability of NDT induction thermography technique for laminated CFRP composites', The European Physical Journal Applied Physics 73, (2015)
- [10] T. Ahmed, D. Stavrov, H. Bersee, A. Beukers, 'Induction welding of thermoplastic composites – an overview', Composites: Part A 37 (2006) 1638-1651
- [11] R. Rudolf, P. Mitschang, M. Neitzel, 'Induction heating of continuous carbon-fibre-reinforced thermoplastics', Composites: Part A 31 (2000) 1191-1202
- [12] A. Miller, C. Chang, A. Payne, M. Gur, E. Menzel, and A. Peled, 'The nature of induction heating in graphite-fiber, polymer-matrix composite materials', SAMPE Journal 26 (1990) 37-54
- [13] B. Fink, R. McCulloch, and J. Gillespie, 'A local theory of heating in cross-ply carbon fiber thermoplastic composites by magnetic induction', Polymer Eng. and Science 32 (1992) 357-369
- [14] S. Yarlagadda, H. Kim, J. Gillespie, N. Shevchenko, and B. Fink, 'A study of the induction heating of conductive fiber reinforced composites', J. of Composite Materials 36 (2002) 401-421
- [15] R. Prakash and C. Owston, 'Eddy-current method for the determination of lay-up order in cross-ply crfp laminates', Composites (1976) 88-92
- [16] G. Mook, R. Lange, O. Koeser, 'Non-destructive characterization of carbon fibre reinforced plastics by means of eddy-currents', Composites Science and Technology 61 (2001) 865-873
- [17] H. Heuer, M. Schulze, and N. Meyendorf, 'Non-destructive evaluation (NDE) of composites: eddy current techniques', in: "Non-destructive evaluation (NDE) of polymer matrix composites: Techniques and applications", V. M. Karbhari (ed.) (Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2013) 33–55.
- [18] M. Abuhamad and U. Netzelmann, 'Dual-band active thermography on infrared transparent materials', Proc. 10th Int. Conf. on Quantitative Infrared Thermography (QIRT), 26.-30.7.2010, Quebec City, Canada, p. 868-875