

# Induktions- und Blitzlichtthermographie - Modellierung und Simulation-

Christian KARCH\*, Wilhelm WULBRAND\*, Rainer STÖSSEL\*  
\* EADS Deutschland GmbH, Innovation Works, 81663 München

**Kurzfassung.** Die vorliegende Untersuchung betrifft schwerpunktmäßig die Modellierung und Simulation der Detektion von verdeckten Defekten in anisotropen Faserverbundwerkstoffen mit den Mitteln der Induktionsthermographie. Bei diesem Verfahren werden mit Hilfe einer Spule kontaktlos Wirbelströme im zu prüfenden Bauteil induziert. Die Anregung durch Blitzlicht, bei der die Energie nur an der Oberfläche des Prüflings absorbiert wird, stellt eine Alternative dar. Die Modellierung und Simulation dient dazu, ein grundlegendes Verständnis der Erzeugung und Ausbreitung der Wärme in Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen zu gewinnen. Die so erzielten Erkenntnisse werden genutzt, um die thermographischen Prüftechniken für Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen weiter zu entwickeln. Es werden verschiedene mathematische Algorithmen zur Analyse der resultierenden Temperaturverteilung an der Oberfläche Proben aus Faserverbundwerkstoffen untersucht und mit dem Ziel weiterentwickelt, den Kontrast der Bilder zu steigern.

## Einführung

Die aktive Thermographie ermöglicht eine schnelle und zuverlässige Detektion von verdeckten Defekten in Bauteilen. Im Gegensatz zur passiven wird bei der aktiven Thermographie Energie in die zu untersuchenden Bauteile eingebracht.

Bei der Induktionsthermographie werden im Volumen der Probe elektrische Wirbelströme induziert. Auf dieser Weise wird in der Regel im Volumen der Probe kontaktlos Energie eingebracht [1]. Durch die Joule'schen Verluste wird die Probe aufgeheizt. Die vorhandenen Defekte beeinflussen den elektrischen Stromfluss und führen dadurch zu einer lokalen Änderung der Erwärmung der Probe. Des Weiteren beeinflussen die Defekte den thermischen Wärmefluss und bewirken somit eine Änderung des zeitlichen Verhaltens der Erwärmung der Probenoberflächen. Anhand der zeitlichen Verläufe der Temperatur an der Bauteiloberfläche wird auf die im Volumen des Prüflings verdeckten Defekte und Störstellen geschlossen.

Die Erwärmung einer Probe durch elektrische Wirbelströme ist eine Alternative zur berührungslosen Blitzlichtanregung, bei der das einfallende Licht an der Bauteiloberfläche absorbiert wird. Für eine effektive Energieaufnahme des einfallenden Lichts sind Oberflächen mit hohen Emissivitäten notwendig. In vielen Fällen müssen die Oberflächen beschichtet werden, um eine hohe Oberflächenabsorption der Photonen zu erzielen. Die Energieeinspeisung bei der Induktionsthermographie ist dagegen unabhängig von den (optischen) Eigenschaften der Oberflächen. Des Weiteren wird bei induktiver Erwärmung in der Regel das Volumen und nicht nur die Oberfläche der untersuchten Probe angeregt.

## 1. Modellierung und Simulation

### 1.1 Spezifikation der Schadenstypen in Faserverbundwerkstoffen

Bereits während des Herstellungsprozesses von Bauteilen aus Kohlefaserverbundwerkstoffen (CFK) kann es zu Unregelmäßigkeiten im Aufbau und zu Abweichungen von idealen geometrischen Verhältnissen der CFK-Lagen kommen. Zu den typischen Fehlstellen, die bei den Herstellungsverfahren, die immer noch einen relativ hohen manuellen Anteil aufweisen, auftreten können, zählen u. a. Harzansammlungen, deformierte und fehlorientierte Fasern, Fremdeinschlüsse sowie Porosität. Weitere mögliche Defekte sind Delaminationen, Faserbrüche und Risse, die während der Produktion aber auch später durch unsachgemäße mechanische oder thermische Belastungen der Bauteile entstehen können.

Die Detektierbarkeit von Fehlstellen wird im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel von drei relevanten Schadenstypen in planaren CFK-Bauteilen analysiert:

- Schadenstyp Nr. 1: Fremdeinschluss / Teflon-Trennfolie (40 mm x 40 mm und 110 µm dick).
- Schadenstyp Nr. 2: Delamination (20 mm x 20 mm und 20 µm dick).
- Schadenstyp Nr. 3: Faserbruch (20 mm lang, in einer Faserlage und einer Spaltbreite von 30 µm).

Die für die experimentellen Untersuchungen hergestellten CFK-Platten bestehen jeweils aus 16 CFK-Einzellagen der Dicke 0.125 mm. Die CFK-Platten sind jeweils 400 mm x 400 mm groß, wobei ein symmetrischer Aufbau der Einzellagen ( $0^\circ / 90^\circ$ )<sub>8s</sub> verwendet wird. Um den Einfluss von metallischen Blitzschutzschichten auf die Detektierbarkeit von Fehlstellen zu untersuchen, werden auch CFK-Platten betrachtet, die mit einer expandierten Kupfer-Folie (Dexmet 2CU6-100A) beschichtet sind. In den CFK-Proben befinden sich jeweils 2 Fehlstellen: zwischen der 2. und 3. und der 10. und 11. CFK-Einzellage. Sie sind jeweils 150 mm von seitlichen bzw. oberen oder unteren Rand der Platte entfernt. In der Abb. 1 wird die Vorderseite einer CFK-Platte mit und ohne Blitzschutzschicht gezeigt. Ein Teil der Ergebnisse zur experimentellen Detektion dieser Fehlstellen ist im Ergebnisbericht des BMBF Projektes *InfraSpek* veröffentlicht [2].



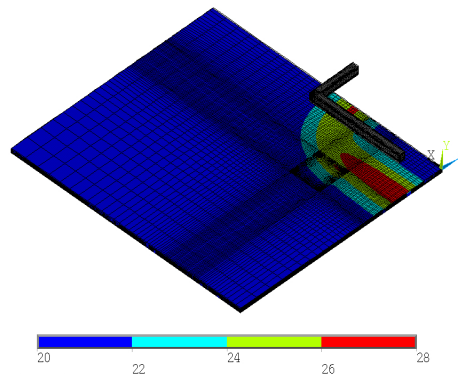
**Abb. 1.** Gefertigte CFK-Platten mit und ohne eine metallische Blitzschutzschicht.

### 1.2 Physikalische Modellierung und Grundlagen der Simulation

Bei der numerischen Simulation der Induktionsthermographie muss die instationäre Wärmeleitungsgleichung gekoppelt mit den Maxwell'schen Gleichungen gelöst werden. Die numerische Lösung ist wegen der nichtlinearen Kopplung der Differentialgleichungen und der Nichtlinearitäten der thermischen und elektrischen Kennwerte eine anspruchsvolle Aufgabe. Bei der Blitzlichtthermographie wird nicht das Volumen, sondern nur die Oberfläche der Probe direkt durch die Absorption des einfallenden Lichtes erwärmt. Dies stellt einerseits eine Vereinfachung der numerischen Simulation dar, weil nur die partiellen Differentialgleichungen der Wärmeleitung numerisch gelöst werden müssen und die Kopplung mit den Maxwell'schen Differentialgleichungen entfällt. Andererseits müssen

bei thermischer Anregung der Oberfläche sowohl der zeitliche Verlauf des inhomogenen Wärmeflusses als auch die Beschaffenheit und das Emissionsvermögen der Oberfläche des Prüfobjekts bekannt und entsprechend physikalisch modelliert werden. Die numerische Lösung der partiellen Differentialgleichungen basiert auf der FE-Methode und wird mit Hilfe der kommerziellen Software ANSYS MULTIPHYSICS durchgeführt [3].

Bei der Induktionsthermographie erfolgt die Anregung der CFK-Proben mit einer Rechteckspule, die mit einem Wechselstrom der Amplitude 1 kA und der Anregungsfrequenz 150 kHz über eine Dauer von 50 ms gespeist wird. Die CFK-Probe wird durch die induzierten Wirbelströme weitgehend lokal im Volumen unterhalb der Spule erwärmt (vgl. Abb. 2). Im weiteren Zeitverlauf breitet sich die Wärme im Volumen der Probe aus. Dabei können die Wärmeverluste durch freie Konvektion und durch thermische Strahlung in dem betrachteten Zeitbereich vollständig vernachlässigt werden [4].



**Abb. 2.** Darstellung der Vernetzung der CFK-Probe mit der darüber liegenden Rechteckspule. Die Temperatur der erwärmten Probenoberfläche wird farblich kodiert dargestellt.

Bei der Blitzlichtthermographie wird die Oberfläche homogen mit einem Wärmestromfluss von  $1.5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  über einen Zeitraum von 50 ms aufgeheizt. Bedingt durch die geometrisch und physikalisch vorgegebenen Randbedingungen werden ca. 1.6 bis 2 Millionen finite Elemente in einem  $\frac{1}{4}$ -Modell benötigt. Weitere Details der numerischen Simulation sind in Ref. [4] zu finden.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Spezifikation der mathematischen Algorithmen der Bildanalyse

Die Detektierbarkeit von Defekten in CFK-Bauteilen wird am Beispiel einer Delamination zwischen der 2. und 3. CFK-Einzellage analysiert. Eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse aller untersuchten Fehlstellen ist in Ref. [4] zu finden.

Die Auswertung erfolgt anhand:

- 1) Der Temperaturdifferenzen an der Probenoberfläche mit und ohne Fehlstellen zu gleichen Zeitpunkten.
- 2) Der Temperaturdifferenzen an der Probenoberfläche mit Fehlstellen zu unterschiedlichen Zeitpunkten:

$$\Delta T(t) = T(t) - fac \times \frac{T_{\max}(t)}{T_{\max}(t_{ref})} T_{ref}(t).$$

Dabei kennzeichnet  $T_{ref}$  die Referenztemperatur zum Zeitpunkt  $t_{ref}$ . Bei der Auswertung wird die Referenztemperatur mit dem (zeitlich veränderlichen) Faktor  $T_{\max} / T_{\max}^{ref}$  und einem zusätzlichen konstanten Faktor,  $0.95 < fac < 1.05$ , skaliert.

- 3) Der exponentiellen Abklingkonstanten der Temperatur an der Probenoberfläche:

$$T(t) = T_0 \exp(-\alpha(t) \times t).$$

- 4) Der Phasen und Amplituden der Fouriertransformierten der Oberflächen-temperaturen der Proben:

$$T(t) \leftrightarrow \tilde{T}(f) \equiv FT[T(t)].$$

- a) Mit analytischer Fortsetzung des Zeitsignals

$$T(t) \rightarrow \begin{cases} T(t) & \text{für } 0 \leq t \leq t_{\max} \\ f(t) & \text{für } t_{\max} \leq t \leq \infty; \quad f(t \rightarrow \infty) \rightarrow 0 \end{cases}.$$

Dabei wird  $f(t)$  so gewählt, dass  $T(t)$  fourierintegrierbar ist und die Oszillationen der Stufe bei  $t=t_{\max}$  unterdrückt werden.

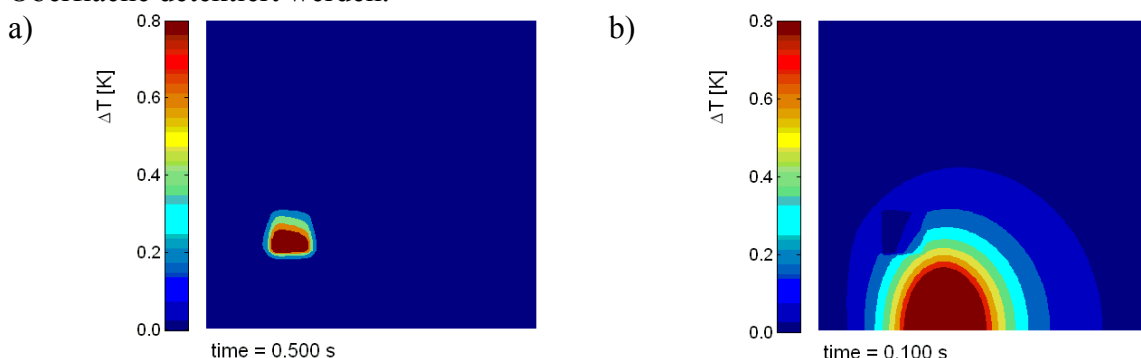
- b) Mit Anwendung eines Zeit-Fensters auf das Ausgangstemperatursignal

$$T(t) \rightarrow \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq t < t_A \\ T(t + t_A) - T(t_{\max}) & \text{für } t \geq t_A \end{cases}.$$

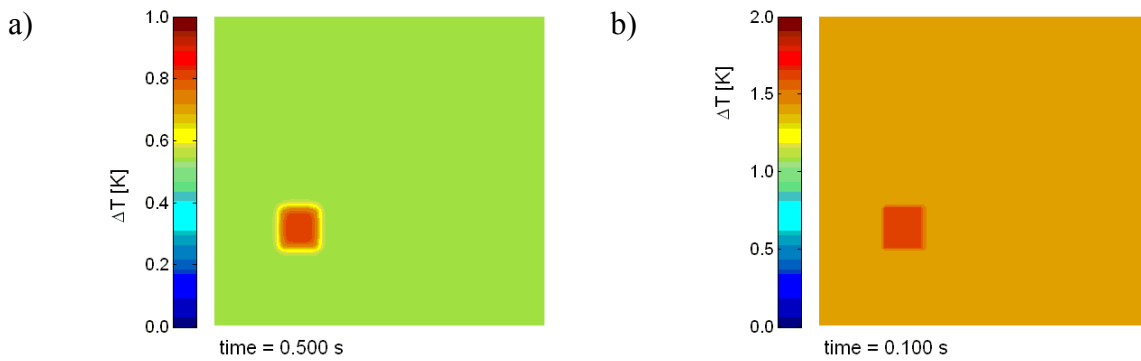
Dabei bezeichnet  $t_A$  das Ende der Anregungs-/Aufheizphase. Die Anwendung eines Zeitfensters eliminiert die Knickstelle am Ende der Aufheizphase und die Stufe am Ende der Simulations- bzw. Messphase.

Die Detektion des Schadens mit dem Verfahren Nr. 1 führt in allen Fällen zu den besten Ergebnissen, hat aber den Nachteil, dass die numerische Simulation doppelt durchgeführt werden muss (mit und ohne Schaden). Für die experimentelle Auswertung ist dieses Verfahren nur dann anwendbar, wenn eine identische Probe ohne Fehlstellen vorhanden ist und als Referenz dienen kann. Daher werden im Folgenden nur die Ergebnisse der Verfahren Nr. 2, 3 und 4 dargestellt und ausgewertet.

Die Ergebnisse für die Delamination zwischen der 2. und 3. CFK-Lage, mit und ohne Blitzschutz, sind für das Auswertungsverfahren Nr. 2 in den Abb. 3 und 4 dargestellt. Mit diesem Verfahren ist es bei der induktiven Anregung der Probe nicht immer möglich, das Abbild der Spule vollständig zu unterdrücken und nur die Antwort der verdeckten Fehlstelle aufzulösen (siehe Abb. 3b). Bei der Anregung der Probe mit einer Blitzlichtquelle wird die Oberfläche der Probe homogen erwärmt und die Fehlstelle kann auch direkt durch die Messung des zeitlichen Verlaufs der Temperaturverteilung der Oberfläche detektiert werden.

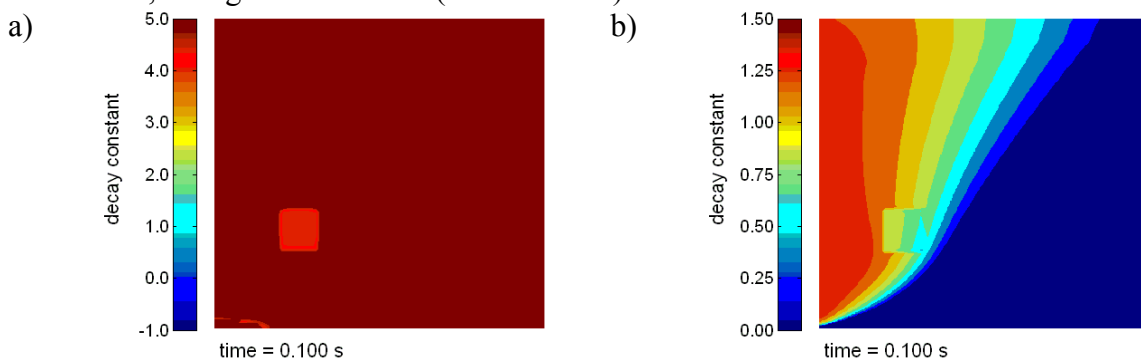


**Abb. 3.** Induktionsthermographie an einer Probe mit Delamination: Differenz der Temperaturen der Probenoberfläche. Die Temperatur zum Zeitpunkt  $t=50$  ms dient als Referenztemperatur. CFK-Probe mit (a), ohne (b) Blitzschutzschicht.

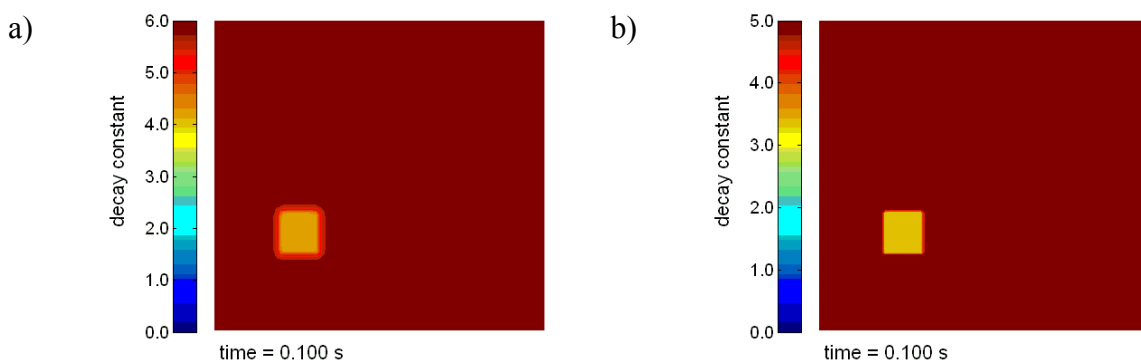


**Abb. 4.** Blitzlichtthermographie an einer Probe mit Delamination: Differenz der Oberflächentemperaturen. Die Temperatur zum Zeitpunkt  $t=50$  ms dient als Referenztemperatur. CFK-Probe mit (a), ohne (b) Blitzschutzschicht.

Beim Auswertungsverfahren Nr. 3 wird angenommen, dass die Temperatur der Probe nach Ende der Anregung/Erwärmung exponentiell abnimmt, wobei sich die exponentielle Abklingkonstante zeitlich ändern darf. Der Nachteil dieses Verfahren besteht darin, dass die Abklingkonstanten aus den berechneten bzw. gemessenen Werten numerisch bestimmt werden müssen. Dies erfordert bei verrauschten Daten eine Glättung bzw. Anpassung des Messsignals an eine analytische Funktion. Die verdeckten Fehlstellen sind aber mit diesem Verfahren, sowohl bei der Induktions- als auch bei der Blitzlichtanregung der Proben, sehr gut detektierbar (Abb. 5 und 6).

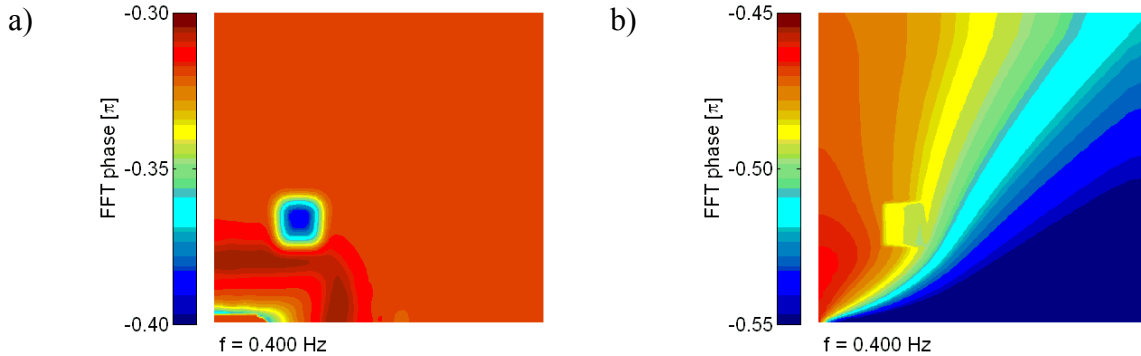


**Abb. 5.** Induktionthermographie an einer Probe mit Delamination: Exponentielle Abklingkonstante der Temperatur an der Oberfläche. CFK-Probe mit (a), ohne (b) Blitzschutzschicht

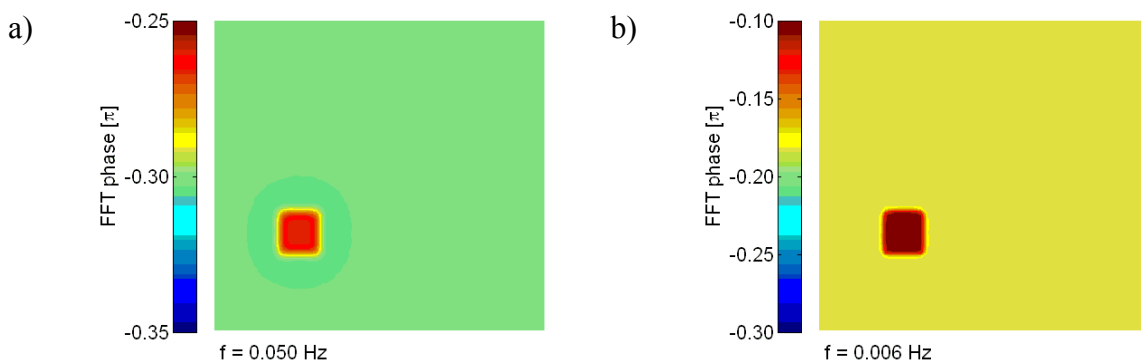


**Abb. 6.** Blitzlichtthermographie an einer Probe mit Delamination: Exponentielle Abklingkonstante der Temperatur an der Oberfläche. CFK-Probe mit (a), ohne (b) Blitzschutzschicht.

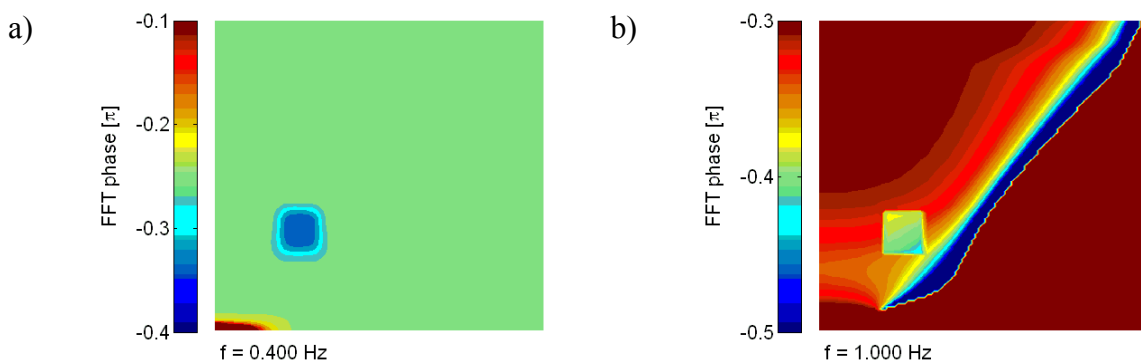
Die Auswertung der Thermographiebilder wird oft im Frequenzbereich durchgeführt. Die direkte Fourier-Transformation des Zeitsignals liefert aber ein stark oszillierendes Fourier-Signal, weil das Zeitsignal eine Knickstelle am Ende der Erwärmungsphase und eine Stufe am Ende der Auswertung bzw. Messung besitzt. Eine Stärkung des Kontrastes des Fourier-Signals der Fehlstellen kann entweder durch eine analytische Fortsetzung des Ausgangssignals (Abb. 7 und 8) oder durch Anwendung eines geeigneten Zeitfensters auf das Ausgangstemperatursignal (Abb. 9 und 10) erreicht werden.



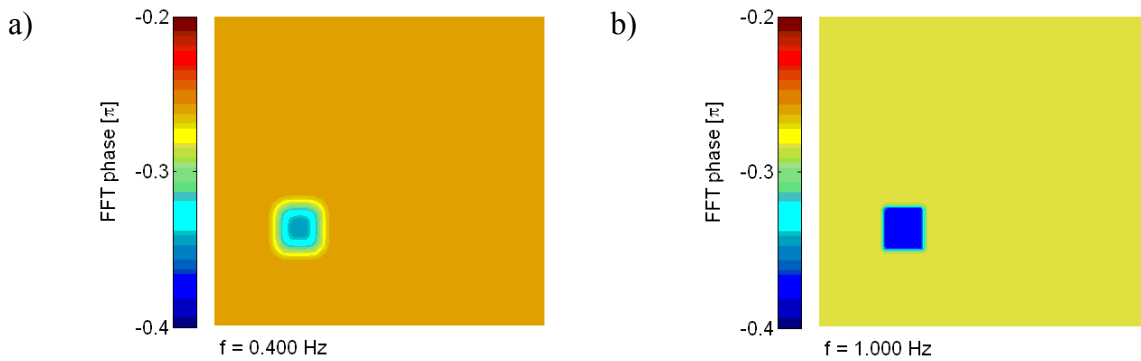
**Abb. 7.** Induktionsthermographie an einer Probe mit Delamination: Phase des Fourierkoeffizienten (analytische Fortsetzung) der Temperatur an der Oberfläche. CFK-Probe mit (a), ohne (b) Blitzschutzschicht



**Abb. 8.** Blitzlichtthermographie an einer Probe mit Delamination: Phase des Fourierkoeffizienten (analytische Fortsetzung) der Temperatur an der Oberfläche. CFK-Probe mit (a), ohne (b) Blitzschutzschicht.



**Abb. 9.** Induktionsthermographie an einer Probe mit Delamination: Phase des Fourierkoeffizienten (Zeitfenster) der Temperatur an der Oberfläche. CFK-Probe mit (a), ohne (b) Blitzschutzschicht.



**Abb. 10.** Blitzlichtthermographie an einer Probe mit Delamination: Phase des Fourierkoeffizienten (Zeitfenster) der Temperatur an der Oberfläche. CFK-Probe mit (a), ohne (b) Blitzschutzschicht.

Die Fehlstellen sind mit beiden Verfahren im Frequenzbereich sowohl für CFK-Proben mit als auch ohne Blitzschutzschicht sehr gut detektierbar, insbesondere bei der Phasen-Auswertung des Fouriersignals. Die direkte Amplitudenauswertung des Zeitsignals liefert keine so deutliche Erkennung der Fehlstellen. Die Amplitudenauswertung kann aber bei der induktiven Anregung der CFK-Proben benutzt werden, um scheinbare Fehlstellen zu eliminieren, insbesondere in Bereichen, in denen es auf Grund des schwachen Signal / Rausch – Verhältnisses zu einer starken Streuung der Phasenwerte kommt.

#### 4. Zusammenfassung

Der Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung liegt in der Modellierung und Simulation der Induktions- und Blitzlichtthermographie zur Detektion von verdeckten Defekten in anisotropen Faserverbundwerkstoffen. Dabei wird sowohl dem Einfluss der Anisotropie der thermischen und elektrischen Eigenschaften des CFK-Materials als auch der Wirkung des Blitzschutzsystems auf die Detektierbarkeit unterschiedlicher Defekttypen Rechnung getragen. Für die Simulation wird das kommerzielle FE-Programm ANSYS Multiphysics eingesetzt, mit dem sich die transienten, gekoppelten elektro-thermischen Differentialgleichungen für anisotrope, temperaturabhängige Materialkennwerte numerisch lösen lassen. Die Detektierbarkeit von Defekten in CFK-Bauteilen wird am Beispiel von drei relevanten Schadenstypen Delamination, Fremdeinschluss / Trennfolie und Faserbruch in planaren CFK-Proben, bestehend aus 16 CFK-Einzellagen und einer optionalen metallischen Blitzschutzschicht, untersucht. In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse ausschließlich und exemplarisch am Beispiel der Delamination diskutiert.

Bei induktiver Erwärmung der Proben wird die Detektierbarkeit prinzipiell sowohl durch die inhomogene Erwärmung der Struktur als auch durch die Überlagerung des schwach ausgeprägten Schadensbildes mit dem kontrastreichen Abbild der Erregerspule erschwert. Bei den Proben mit Blitzschutz wird die Wärme trotz induktiver Anregung fast ausschließlich in der dünnen Metallschicht erzeugt. Daher besteht bei der induktiven Anregung geschützter CFK-Proben ein enger Zusammenhang zur Blitzlichtthermographie, bei der ebenfalls nur die Oberfläche der Probe pulsartig erwärmt wird.

Die Delamination kann trotzdem sowohl bei der Induktions- als auch der Blitzlicht-Anregung sowohl für CFK-Proben mit als auch ohne Blitzschutzschicht sehr gut detektiert werden. Bei der induktiven Anregung werden insbesondere bei der Auswertung der exponentiellen Abklingkonstanten der Temperatur der Oberfläche, aber auch bei der Auswertung der Phasen des fouriertransformierten Zeitsignals, bessere Ergebnisse (deutlicher Kontrast der Fehlstellen) erzielt als bei der direkten Auswertung der Temperaturdifferenzen im Zeitbereich. Da bei der Blitzlichtanregung die gesamte Oberfläche der Probe homogen beleuchtet wird und es zu keiner Überlagerung des



Schadensbildes mit dem Abbild der Anregungsquelle kommt, können die Defekte leichter als bei der induktiven Anregung detektiert werden. Die homogene Beleuchtung der Probenoberfläche stellt allerdings eine Idealisierung der tatsächlichen Situation dar. Eine abschließende Beurteilung der Vergleichbarkeit der Detektion zwischen induktiver und Blitzlichtanregung der CFK-Proben kann erst dann gegeben werden, wenn eine realistischere Simulation der Blitzlichtanregung, und zwar unter Berücksichtigung der Inhomogenitäten der Erwärmung der Oberfläche bei der Blitzlichtanregung, durchgeführt wird. Die Inhomogenitäten bei der Oberflächenerwärmung durch eine Blitzlichtquelle kommen durch die Unterschiede bei der Absorption des Lichtes an der Oberfläche (Unterschiede der Emissivitätsgrade) und durch die räumliche Variation der Leistung der Quelle (aufgrund der unterschiedlichen Abstände der Oberfläche der Probe zu der Quelle) zustande.

Die Modellierung und Simulation der Detektion von Fehlstellen ist notwendig, um ein grundlegendes Verständnis der Wärmegeneration und der Wärmeausbreitung in anisotropen Faserverbundwerkstoffen, insbesondere bei der induktiven Anregung, zu gewinnen. Dieses Wissen kann genutzt werden, um die Entwicklung von Techniken zur Mustererkennung und Charakterisierung von verdeckten Defekten in anisotropen Verbundwerkstoffen zu unterstützen. Darüber hinaus wird in dieser Arbeit aufgezeigt, wie die Detektion verdeckter Fehlstellen mit Hilfe mathematischer Algorithmen bei der Auswertung sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich unterstützt und, mit dem Ziel, den Kontrast der Ergebnisse zu erhöhen, weiterentwickelt werden kann.

## Referenzen

- [1] S. S. Udpa and P. P. Moore, *Nondestructive Testing Handbook*, Electromagnetic Testing Vol. 5, American Society for Nondestructive Testing, 2004.
- [2] C. Karch, H. Mooshofer, G. Walle, *Induktiv- und Blitzangeregte Thermographie an CFK*, in M. Rothenfusser und U. Netzelmann (Hrsg), *Optische Mess- und Prüftechniken im infraroten Spektralbereich für den Einsatz in der Produktentwicklung, der Produktion und im Service* Ergebnisbericht des BMBF Projektes *InfraSpek* 2011.
- [3] ANSYS Multiphysics, ANSYS, Inc., Southpointe 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.
- [4] C. Karch, W. Wulbrand, und R. Stöbel, *Induktionsthermographie - Modellierung und Simulation*, Technischer Bericht CTO/IW-SE-2010-98, EADS IW, 2010.