



## Zerstörungsfreie Charakterisierung von carbonfaserverstärkten Kompositen mit Hilfe des Wirbelstromverfahrens

Gerhard Mook, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

---

### 1. Einführung

Die elektrische Leitfähigkeit von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ist um zwei bis drei Größenordnungen geringer als die von Metallen. Darüber hinaus tritt eine ausgeprägte Anisotropie auf [1-5]. Zusätzlich wirken kapazitive Kopplungen zwischen den Fasern, die bei hohen Prüffrequenzen zum Tragen kommen. Die geringe Leitfähigkeit hat große Eindringtiefen zur Folge, so dass Volumenprüfungen möglich werden. Der nutzbare Frequenzbereich beginnt bei ca. 500 kHz und wird nach oben durch die in kommerziellen Wirbelstromgeräten realisierten 10-12 MHz begrenzt. Höhere Frequenzen sind wünschenswert aber bislang nur mit Netzwerkanalysatoren erreichbar. Der Beitrag zeigt das Leistungspotenzial des Wirbelstromverfahrens zur Charakterisierung von CFK und CFK-basierten adaptiven Werkstoffsystemen.

### 2. Wirbelstromausbreitung in CFK

Bild 1 zeigt das Ergebnis eines Versuches zur Ermittlung der Wirbelstromausbreitung in unidirektionalem CFK. Eine Sendewicklung unterhalb des Materials induziert im Laminat Ringspannungen, in deren Folge Leitungs- und Verschiebungsströme auftreten können [6]. Die Leitungsströme sind weitgehend an die Kohlefasern und deren Kontakte untereinander gebunden. Die Verschiebungsstromdichte hängt dagegen von der Prüffrequenz, den dielektrischen Eigenschaften der Matrix, dem Faserdurchmesser und dem Faserabstand ab und äußert sich als kapazitive Komponente im Messsignal. Da die Stromdichte in Faserrichtung größer ist als quer dazu, sollten sich verzerrte Wirbelstromfelder im Material einstellen, deren größte Ausdehnung lagenabhängig in Faserrichtung weist.

Im Versuchsaufbau scannt eine kleine Messspule den Wirkbereich des elektromagnetischen Feldes oberhalb der Probe ab. Von der ermittelten Feldverteilung wird die Feldverteilung ohne Probe subtrahiert, so dass nur die durch das Material bewirkten Feldveränderungen dargestellt werden. Links im Bild 1 ist das stark elliptisch verformte Feld zu erkennen, von dem auf die Wirbelstromverteilung geschlossen werden kann. Die Vektordarstellung zeigt die lokale Stromdichte und -richtung eines Probenausschnitts.

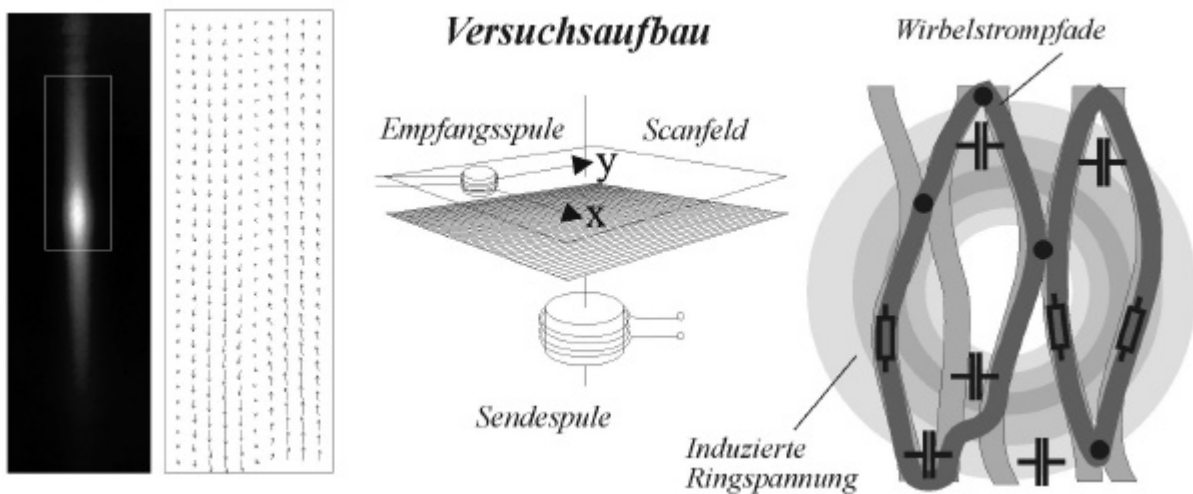


Bild 1: Links: Magnetfeld- und Wirbelstromverteilung in unidirektionalem CFK, Mitte: Versuchsaufbau, rechts: Ursachen für die elektrische Anisotropie des Materials

In einem multidirektionalem Gelege zeigen sich die Feldverzerrungen mit lagenabhängiger Ausrichtung. Die Induktionswerte nehmen mit steigendem Abstand naturgemäß ab. Bild 2 stellt den Versuchsaufbau und das Ergebnis dar.

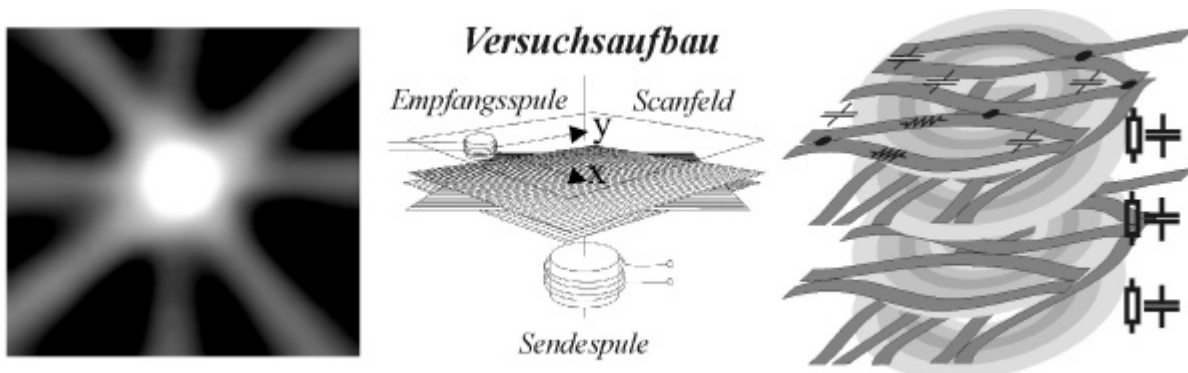
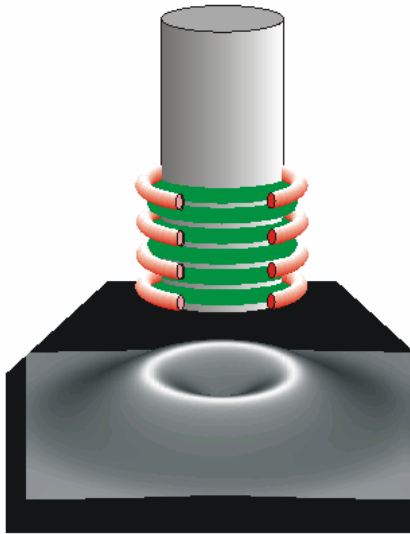


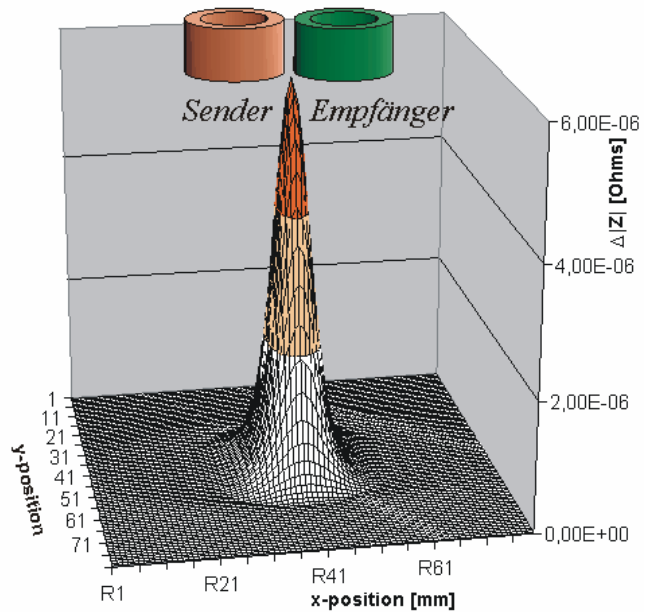
Bild 2: Links: Magnetfeld- und Wirbelstromverteilung in multidirektionalem CFK, Mitte: Versuchsaufbau, rechts: Ohmsche und kapazitive Kopplungen zwischen den Lagen

### 3. Bildgewinnung

Sollen die anisotropen elektrischen Eigenschaften zur Materialcharakterisierung herangezogen werden, müssen Sonden mit richtungsempfindlichen Eigenschaften benutzt werden [7]. Dazu bieten sich azentrische Sende-Empfangssysteme an, die z. B. als Halbtransmissionssonden bekannt geworden sind. Bild 3 vergleicht links eine zentrische Absolutsonde und deren Punktspreizfunktion (PSF) mit einer Halbtransmissionssonde rechts, deren PSF mit Hilfe der Modellierungssoftware VIC-3D [8] bestimmt wurde. Das Fehlen eines blinden Flecks macht diesen Sondentyp auch für Abbildungszwecke interessant [9].



*Zentrische Absolutsonde*

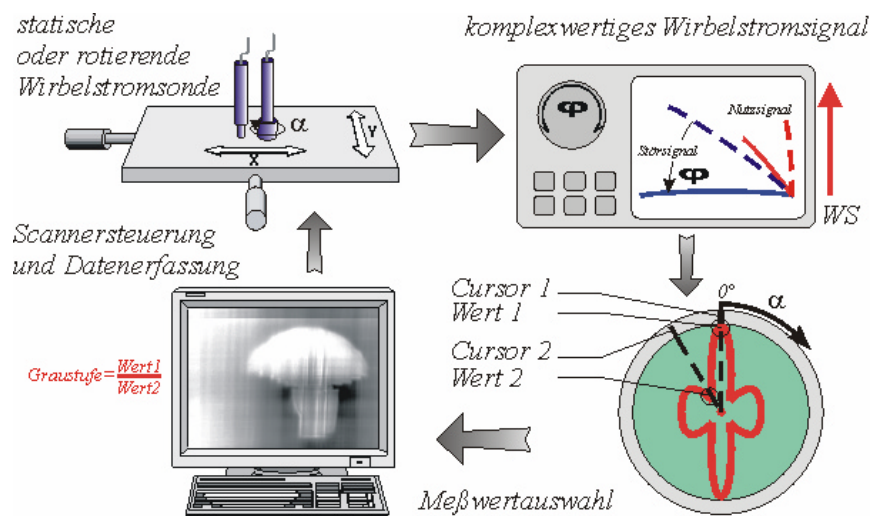


*Halbtransmissionssonde*

*Bild 3: Wirbelstromsonden und ihre Punktpreisfunktionen*

Wird eine solche Sonde über dem Laminat gedreht, zeigt sich die elektrische Anisotropie sehr deutlich im Messsignal. Eine Zuordnung zu den lokalen Eigenschaften des Laminates gelingt am besten über ein Polardiagramm.

Das in Bild 4 dargestellte Scansystem erlaubt den Einsatz statischer und rotierender Wirbelstromsonden [10]. Diese werden mäanderförmig über den interessierenden Bauteilbereich bewegt. Das Messsignal wird in einem herkömmlichen Wirbelstromgerät aufbereitet. Eine Komponente der Punktbewegung kann in einem Polarkoordinatensystem dargestellt werden. Zwei Cursor legen die Winkelpositionen der Sonde fest, an der die Messsignale extrahiert, verrechnet und ortsgetreu aufgezeichnet werden sollen.

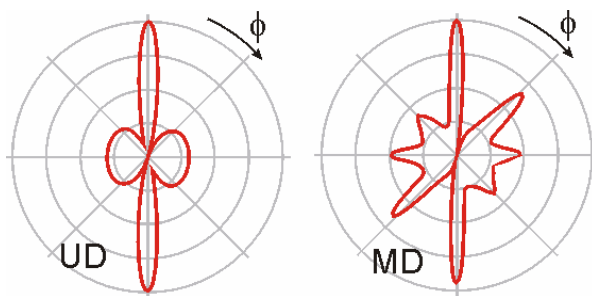


*Bild 4: Wirbelstromsystem zur Charakterisierung von CFK*

## 4. Eigenschaftsbestimmungen

### Faserorientierung

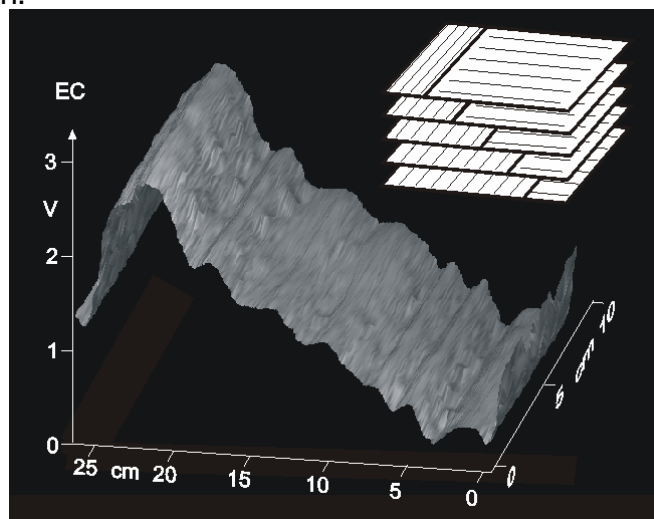
Bereits mit ortsfester Rotiersonde kann die Orientierung der im Laminat vorhandenen Fasern bestimmt werden [11,12]. Bild 5 zeigt die Wirbelstromsignale auf unidirektionalem (links) und multidirektionalem (rechts) Material. Die Maxima der Signalschleifen korrelieren mit der Richtung der größten elektrischen Leitfähigkeit. Mit Hilfe spezieller Sonden kann die Faserorientierung bis auf  $0,5^\circ$  genau bestimmt werden.



*Bild 5: Polardiagramme der Leitfähigkeit auf unidirektionalem (UD) und multidirektionalem (MD) CFK*

### Orientierungswechsel

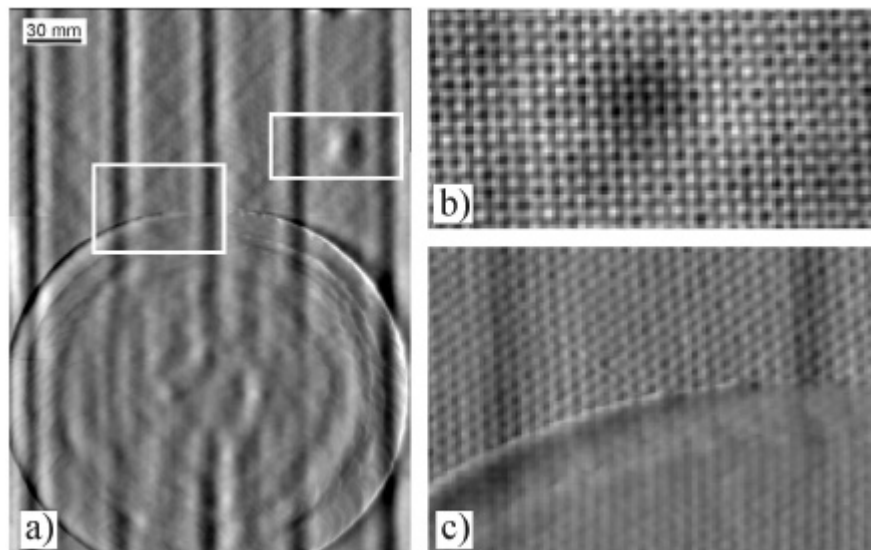
Mit Hilfe der scannenden Rotiersonde wurde eine Probe mit treppenförmigem Faserrichtungswechsel untersucht [13]. Bild 6 zeigt das Ergebnis. Neben den Kantensignalen an den Probenenden sind die einzelnen Faserrichtungswechsel sehr deutlich zu erkennen.



*Bild 6: Wirbelstrombild eines treppenförmigen Faserrichtungswechsels*

### Struktur und lokale Inhomogenitäten

Eine verrippte CFK-Platte (Leihgabe des IKP-Stuttgart) aus CFK-Gewebe wurde mit Hilfe statischer Sonden unterschiedlicher Auflösung untersucht [14].



*Bild 7: a) Wirbelstrombild einer CFK-Stringerplatte mit Reparaturpatch, b) rechter Ausschnitt mit nachträglicher Phasenrotation zur Unterdrückung der Stringersignale und c) Ausschnitt aus dem Randbereich des Patches*

Das Wirbelstrombild 7a) gibt einen Gesamtüberblick über das Bauteil und lässt einen Reparaturpatch erkennen. Die dunklen senkrecht verlaufenden Linien widerspiegeln die an der Rückseite angeordneten Stringer. Im Patchbereich sind die Stringer aufgrund der höheren Materialdicke schlechter zu erkennen. Die Teilbilder b) und c) zeigen höheraufgelöste Absolutsondenbilder der gekennzeichneten Ausschnitte. In beiden ist die Gewebestruktur des CFK-Materials erkennbar. In Teilbild b) wurde durch nachträgliche Phasenrotation das Stringersignal unterdrückt, so dass die kreisrunde Inhomogenität als Schädigung charakterisiert wird (Harzkonzentration).

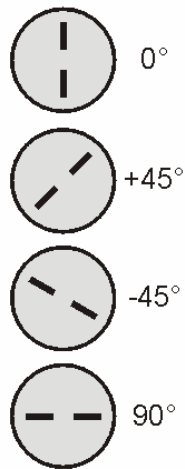
## **5. Detektion und Charakterisierung von Fehlstellen**

### Interlaminare Wirbelströme als Grundlage der Detektion von Delaminationen

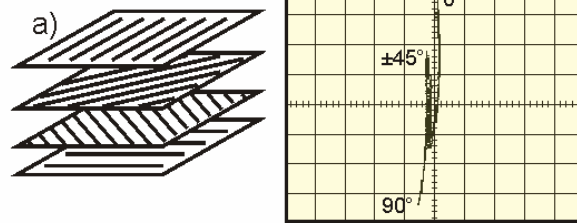
Die Existenz und Nachweisbarkeit interlaminarer Wirbelströme sollte mit Hilfe folgenden Experiments untersucht werden. Zwei Proben gleicher Stapelfolge wurden einmal aus separat ausgehärteten Einzellagen zusammengelegt und zum anderen als kompaktes Laminat im Autoklav gefertigt. Nur bei der kompakten Probe können interlaminare Wirbelströme auftreten. Beide Proben wurden mit einer rotierenden Halbtransmissionssonde untersucht.

Bild 8 zeigt links die Sondenpositionen, die in den Signalbildern markiert sind. Bei der Gelegeprobe sind annähernd lineare Signalmuster zu erkennen, die auf Schwankungen der richtungsabhängigen elektrischen Leitfähigkeit zurückzuführen sind. Die Kompaktprobe zeigt ein deutlich abweichendes Signalbild, das auf andere Ausbreitungsbedingungen der Wirbelströme schließen lässt. Diese führen wir auf interlaminare Kopplungen zurück. Somit sollten Delaminationen dann detektierbar sein, wenn sie die Ausbreitungsbedingungen für interlaminare Wirbelströme verändern. Das ist dann der Fall, wenn Delaminationen zwischen Lagen unterschiedlicher Orientierung auftreten [15].

### Sondenposition



### Gelege ohne interlaminare Wirbelströme



### Laminat mit interlaminaren Wirbelströmen

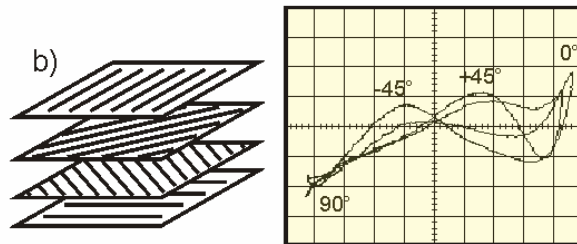


Bild 8: Messsignale in der komplexen Ebene a) auf multidirektionalem Gelege aus separat ausgehärteten Prepregs und b) auf multidirektionalem Laminat

### Nachweis von Impactschäden

Das Nachweisvermögen von Impactschäden entscheidet oftmals über die Eignung eines zerstörungsfreien Verfahrens zur Prüfung von CFK. Diese Schäden entstehen durch Steinschlag, Karambolagen u.ä. Sie stellen eine Kombination aus massiven Faser- und Matrixbrüchen und Delaminationen dar, wodurch sowohl die Wirbelströme innerhalb der einzelnen Lagen als auch die interlaminaren Wirbelströme gestört werden.

Bild 9 zeigt ein Laminat, das zusätzlich zu den CFK-Lagen Isolationsvliese aus Polyester zur Aufnahme von Funktionskomponenten enthält. Dieser Verbund wurde von unten schlagartig beansprucht (low speed impact) und danach von der Oberseite aus mit Ultraschall- und Wirbelstrom untersucht. Beide Ergebnisbilder zeigen eine pilzförmige Inhomogenität, die sich nach dem Schneiden entlang der dargestellten Linie als Delamination zwischen einer 0°- und 90°-Lage entpuppte.

Neben der allgemeinen Übereinstimmung des US- und WS-Bildes zeigen sich jedoch auch Unterschiede, die den komplementären Charakter beider Verfahren verdeutlichen.

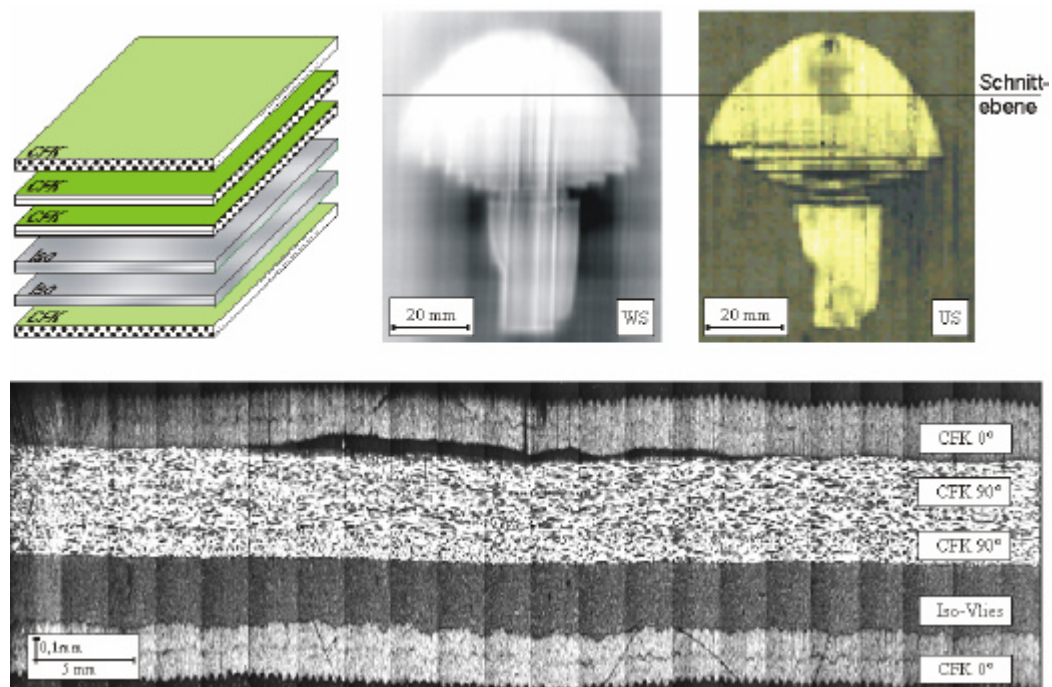


Bild 9: Impactgeschädigtes Laminat, oben links: Aufbau, Mitte: Wirbelstrombild, rechts: Ultraschall-C-Bild, unten: Schliffbild mit Impact zwischen der 0- und 90°-Lage

#### Kurzschlüsse in adaptiven Werkstoffsystemen

Im Rahmen des DFG-Innovationskollegs „Adaptive Mechanische Systeme (ADAMES)“ wurden CFK-Proben mit integrierten piezokeramischen Plättchen (Dicke 0,2 mm) untersucht [16-21]. Zur Kontaktierung dieser Plättchen wurden auf einer Seite Öffnungen in das Isolationsvlies geschnitten, so dass die vollflächige Metallisierung Kontakt zu einer CFK-Lage erhält. Der andere Kontakt wurde über Faserbündel (Rovings) hergestellt, die eine separate Ansteuerung jedes Piezos ermöglichen. Bild 10 zeigt den Aufbau schematisch. Die Anschlussrovings für andere Plättchen werden in hinreichendem Abstand an den Piezos vorbeigeführt, so dass Kurzschlüsse vermieden werden. Die Herstellung beginnt mit der Fertigung der aktiven Lage aus den Polyestervliesen, den Rovings und den Keramikplättchen. Danach werden die CFK-Lagen hinzugefügt.

Bei der Funktionsprüfung fiel eine Probe dadurch auf, dass bei der Ansteuerung einer einzelnen Keramik mehrere ansprachen. Bei Erhöhung der Ansteuerspannung kam es zu deutlich wahrnehmbaren elektrischen Überschlüssen im Material. Die zerstörungsfreie Prüfung mittels Ultraschall brachte zunächst die Deformation der Piezokeramik zum Vorschein, die bei der Herstellung durch das Hineinbiegen in das Kontaktfenster entsteht. Darüber hinaus waren kreisförmig geschädigte Bereiche am Rand der Piezokeramik zu erkennen, die sich bei der zerstörenden Untersuchung als Delaminationen durch Brand herausstellten. In einer anderen Materialtiefe traten im US-C-Bild nadelartige Anzeigen hervor, die auch im Wirbelstrombild zu erkennen waren. Ihre Ursachen waren Fasergruppen, die auf dem Isolationsvlies lagen. Das lichtmikroskopische Bild zeigt ein Beispiel [21].

Die aktive Schicht wurde also bei der Herstellung mit Kohlefasern kontaminiert, die zu Kurzschlüssen und elektrischen Überschlügen führten. Daraus ergeben sich klare Forderungen hinsichtlich der Reinhaltung der Umgebung bei der Arbeit an isolierenden Komponenten.

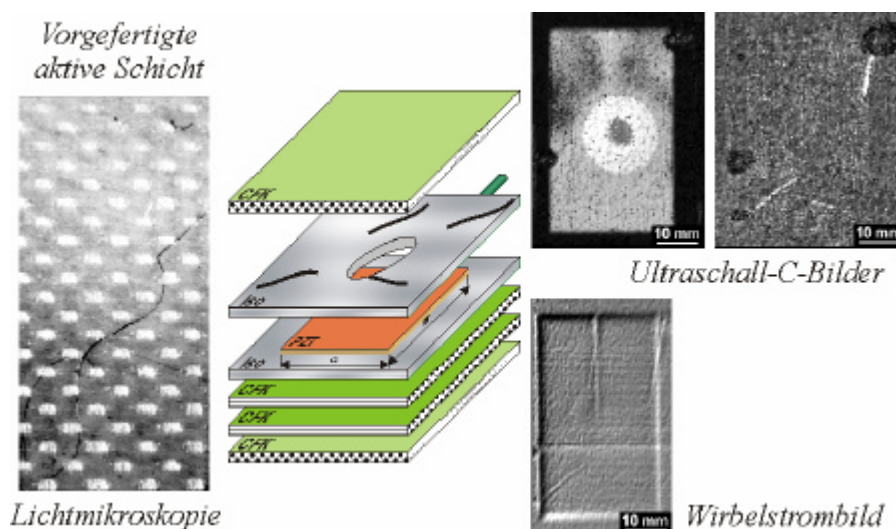


Bild 10: Kurzschlüsse durch Fasergruppen in der aktiven Schicht. Links: Einzelfaser auf dem Polyestervlies, Mitte: Aufbau des adaptiven Werkstoffsystems, rechts: Ergebnisbilder der Ultraschall- und Wirbelstromprüfung

## 6. Magnetfeldaufzeichnung

Zur zerstörungsfreien Charakterisierung des adaptiven Werkstoffsystems im aktiven Zustand wurde ein Verfahren entwickelt, das Rückschlüsse auf die Funktionstüchtigkeit der elektrischen Komponenten wie Zuleitungen und Piezoplättchen zulässt. Dazu wird die Verteilung des von den stromdurchflossenen Komponenten ausgehenden Magnetfeldes aufgezeichnet. Bild 11 zeigt links den schematischen Aufbau der Versuchsanordnung zur Ermittlung des nutzbaren Frequenzbereiches. Die Probe wurde an den Sender eines Netzwerkanalysators angeschlossen und im Frequenzbereich von 1 kHz bis 30 MHz angesteuert. Eine offene Spule (Wirbelstromsonde) diente als Empfänger der Normalkomponente des magnetischen Feldes. Der Versuch ergab die Existenz eines Fensters um ca. 2,3 MHz, in dem hinreichende Übertragungsbedingungen vorliegen (Bild 11 rechts oben).

Bei dieser Frequenz wurde die Probe mit dem Sendesignal eines kommerziellen Wirbelstromgerätes angesteuert und die empfangende Wirbelstromsonde berührungsfrei zeilenweise über die Probe geführt (Bild 11 links unten). Das Ergebnis in der Bildmitte zeigt zwei Linien mit krassem Hell-Dunkel-Übergang, der die stromführenden Anschlussrovings kennzeichnet (Normalkomponente des Magnetfeldes wechselt das Vorzeichen). Im Bereich des Piezoplättchens ist nur am Rand der Metallisierung mit einer von Null abweichenden Normalkomponente des Magnetfeldes zu rechnen. Das Ergebnisbild zeigt den linken Rand der Metallisierung und zusätzlich Risse, die durch die Rovings im Herstellungsprozess hervorgerufen wurden. Das Röntgenbild rechts unten bestätigt diese Aussage.



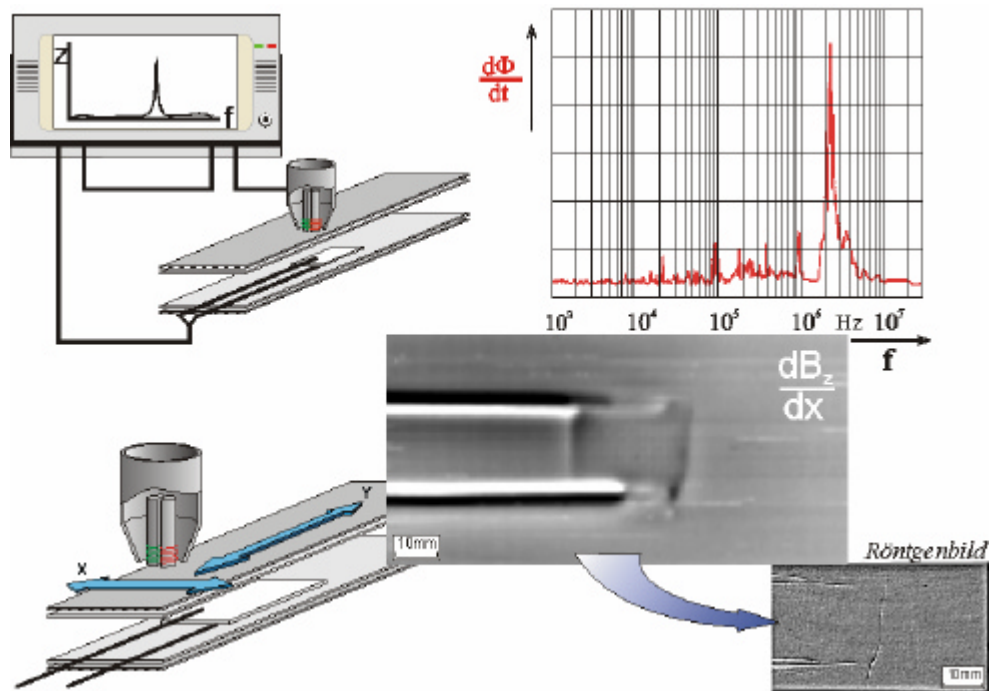


Bild 11: Magnetfeldaufzeichnung eines aktiven Piezoelementes im adaptiven Laminat. Oben: Versuchsaufbau und Ermittlung des nutzbaren Frequenzbereiches, unten: Bildgewinnung und Ergebnisbild im Vergleich zur Röntgenaufnahme.

## Zusammenfassung

Das Wirbelstromverfahren eignet sich zur Bestimmung der lokalen Faserorientierung, zur Ermittlung lokaler Schwankungen des Fasergehaltes, zur Lokalisierung massenhafter Faserbrüche, wie sie infolge von Impactereignissen auftreten, und zur Charakterisierung von Delaminationen, wenn diese zwischen Lagen unterschiedlicher Faserorientierung auftreten. In adaptiven Werkstoffsystemen auf der Basis von CFK und piezoelektrischen Funktionselementen kann außerdem die Integrität der Metallisierung überwacht werden.

Zu den zerstörungsfreien Verfahren mit aktivem Prüfobjekt gehört die Aufzeichnung der lokalen Magnetfeldverteilung mit Hilfe eines Wirbelstromgerätes. Dieses Verfahren gestattet Rückschlüsse auf die Stromverteilung in der Probe und somit Aussagen über die Integrität elektrischer Zuleitungen und Funktionseinheiten.

## Danksagung

Der Autor bedankt sich bei Herrn Dr. Pohl für die Ultraschallbilder. Die Arbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft finanziell gefördert.

## Literatur

1. Prakash, R.; Owston, C.N.: Eddy-current method for the determination of lay-up order in cross-plyed CFRP laminates, Composites, 7, (1976), S. 88-92

2. Vernon, S.N.: A Single-Sided Eddy Current Method to Measure Electrical Resistivity, *Mat. Eval.*, 46, (1988) S. 1581-1587
3. Valleau, A.R.: Eddy Current Nondestructive Testing of Graphite Composite Materials, *Mat. Eval.*, 48, (1990), S. 230-239
4. de Goeje, M.P.; Wapenaar, K.E.D.: Non-Destructive Inspection of Carbon Fibre-Reinforced Plastics Using Eddy Current Methods, *Composites*, 23, (1992) S. 147-157
5. Khandetskii, V.: Eddy Current Evaluation of Lamination Parameters in Carbon Fibres Composites, *World Conf. on NDT, Sao Paulo, 1992*, pp. 295-299
6. Köser, O.; Mook, G.: Simulation und Rekonstruktion von Wirbelstrombildern auf der Basis eines Stromschleifenmodells. *Wissenschaftliches Kolloquium Grundlagen der Zerstörungsfreien Prüfung, Dortmund, 13.11.1996, Berichtsband S. 39-50*
7. Vernon, S.N.; John, M.L.: Eddy Current Probe Design for Anisotropic Composites, *Mat. Eval.* 50, (1992), S. 36-41
8. Mook, G; Bauke, H.; Uchanin, V: Wirbelstromprüfung mit hohen Eindringtiefen – Theorie und Praxis, *DACH-Tagung der DGZfP, ÖGfZP und SGZP, 2000, Innsbruck, BB 73 Band1, S. 145-154*
9. Thomas, H.-M.; Weigelt, G.: Anwendung von Wirbelstromverfahren zur quantitativen Bestimmung der Tiefenausdehnung von Korrosionsschäden an Aluminiumstrukturen, *DECHEMA-Abschlussbericht 11L08-4, Mai 1991*
10. Mook, G.; Pohl, J.: Non-Destructive Inspection of CFRP Based Composites, *4<sup>th</sup> Int. Conf. on Comp. Eng. (ICCE), Hawaii, 1997, S. 681-682*
11. Lange, R. and Mook, G.: Structural Analysis of CFRP using Eddy-current Methods, *NDT&E int.*, 27 (1994), S. 241-248
12. Mook, G.; Lange, R.: Wirbelstromprüfung von Kohlefaser-Kompositen. *Materialprüfung* 36(1994)9, S. 345-349
13. Mook, G.; Koeser, O.; Lange, R.: Non-Destructive Evaluation of Carbon Fibre-Reinforced Structures using High Frequency Eddy Current Methods, In Shiota, I.; Miyamoto, Y.: *4<sup>th</sup> Int. Symp. on Functionally Graded Materials 1996, Tsukuba, 1996, S. 433-438*
14. Mook, G.; Lange, R.; Koeser O.: Non-destructive characterisation of carbon-fibre-reinforced plastics by means of eddy-currents, *Composites Science and Technology* 61 (6) (2001) S. 865-873
15. Lange, R.: Zur Wirbelstromprüfung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen. *Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg, 1997*
16. Mook, G.; Pohl, J.; Hilbig, A.: Wirbelstromprüfung adaptiver Werkstoffsysteme. *DGZfP-Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung, Dresden, 5.-7.5.1997, Berichtsband 59.2, S. 871-878*
17. Mook, G.; Pohl, J.; and Veit, P.: Non-Destructive Evaluation of Adaptive Material Systems, *7<sup>th</sup> European Conf. on NDT, Copenhagen, 1998, S. 267-274*
18. Mook, G.; Pohl, J.; Hilbig, A.; and Veit, P.: Damage Evaluation in Adaptive Materials using Non-Destructive Methods, In Gabbert, U.: *Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures, VDI-Fortschritt-Berichte, Reihe 11, Nr. 268, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998, S. 69-78*
19. Mook, G.; Pohl, J.; Michel, F.; Benziger, Th.: Damage Evaluation of Smart CFRP-Piezoceramic-Materials using Non-Destructive Methods, *ICCM 12 Conference Paris July 99<sup>th</sup>, paper 199, ISBN 2-9514526-2-4*

20. Blumenauer, H.; Dehne, G.; Michel, F.; Mook, G.; Pohl, J.: Non-destructive damage evaluation of adaptive materials. In: Int. J. of Materials and Product Technology (Geneva) 14 (1999), Nr. 2/3/4, S. 291-303
21. Mook, G.; Pohl, J.; Michel, F.; Benziger, Th.: Non-Destructive Inspection of Smart Materials, 15th World Conference on Non-Destructive Testing, Rome, October 15-21, 2000; The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics, ISSN: 1435-4934