UNIVERSITÄT AUGSBURG
Universitätsbibliothek

OPEN ACCESS
OPUS AUGSBURG

Einfluss von Zwischenfaserbrüchen in 0/90-Laminaten auf die elektrische Widerstandsänderung von eingebetteten Carbonfasern

Tobias Müller, Alexander Horoschenkoff, Markus G. R. Sause

Angaben zur Veröffentlichung / Publication details:

Müller, Tobias, Alexander Horoschenkoff, and Markus G. R. Sause. 2010. “Einfluss von Zwischenfaserbrüchen in 0/90-Laminaten auf die elektrische Widerstandsänderung von eingebetteten Carbonfasern.” In *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2010: Ausgewählte Manuskripte*, 309–16. Bonn: DGLR.

Nutzungsbedingungen / Terms of use:

licgercopyright

Dieses Dokument wird unter folgenden Bedingungen zur Verfügung gestellt: / This document is made available under these conditions:
Deutsches Urheberrecht
Weitere Informationen finden Sie unter: / For more information see:
https://www.uni-augsburg.de/de/organisation/bibliothek/publizieren-zitieren-archivieren/publiz/

EINFLUSS VON ZWISCHENFASERBRÜCHEN IN 0/90-LAMINATEN AUF DIE ELEKTRISCHE WIDERSTANDSÄNDERUNG VON EINGEBETTETEN CARBONFASERN

Tobias Müller, Alexander Horoschenkoff
Hochschule München, Dachauer Str.98b, 80335 München

Helmut Rapp
Universität der Bundeswehr München, Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

Markus G. R. Sause, Siegfried Horn
Universität Augsburg, Universitätsstr. 1, 86135 Augsburg

Zusammenfassung

Elektrisch isolierte Carbonfasern können aufgrund ihrer piezoresistiven Eigenschaften als Sensor zur experimentellen Analyse von Spannungs- und Dehnungszuständen in Laminaten aus Faserkunststoffverbunden genutzt werden. Dabei wird durch die lokale Widerstandsänderung die Dehnung integral über die gesamte Länge der Faser erfasst.

Der Einfluss von Zwischenfaserbrüchen auf die elektrische Widerstandsänderung von eingebetteten Carbonfaser-Sensoren wird anhand von Laminaten aus glasfaserverstärkten UD-Prepreg (Hexply-913) mit dem Lagenaufbau [0, 90_5, 0, 90_5, 0] untersucht. Begleitend zur Messung mit den Carbonfaser-Sensoren wird die Entwicklung der Zwischenfaserbrüche auch durch die Aufzeichnung der freigesetzten Schallemissionssignale und begleitender optischer Digitalmikroskopie während der zyklischen und statischen Laststeigerungen verfolgt.

Es zeigt sich, dass im Zugversuch ab einem bestimmten Lastniveau Schallemissionssignale detektiert werden, die auf die Bildung von Zwischenfaserbrüchen zurückzuführen sind. Dies wird durch Schliffbilder bestätigt. Im weiteren Verlauf des Zugversuchs kommt es zu einer Steifigkeitsreduzierung, die mit aus der Literatur bekannten Verfahren ermittelt werden kann. Der Vergleich der Berechnungen mit den Versuchsergebnissen zeigt, dass bis zu einer Rissdichte von 0,7 mm^{-1} die Steifigkeitsreduzierung mit den Messungen der Schallemissionssignale und der Carbonfaser-Sensoren gut korreliert. Anschließend wird ein überproportionaler Anstieg der relativen Widerstandsänderung der Carbonfaser-Sensoren festgestellt. Mittels einer FEM-Analyse kann gezeigt werden, dass ein Zwischenfaserbruch in den 90°-Lagen hohe lokale Dehnungen in den 0°-Lagen mit den eingebetteten Carbonfaser-Sensoren hervorruft. Diese lokalen Dehnungsspitzen können die Ursache für den über die maximale Steifigkeitsreduzierung hinaus überproportionalen Anstieg der elektrischen Widerstandsänderung sein.

1. EINLEITUNG

Die herausragenden mechanischen Eigenschaften der Carbonfaser werden schon seit längerer Zeit erforscht und in der Luft- und Raumfahrt für hochbelastete Bauteile genutzt. Auch die elektrischen Eigenschaften wurden in der Vergangenheit in wissenschaftlichen Arbeiten [1-3] untersucht.

So wurde z.B. die elektrische Widerstandsänderung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe (CFK) verwendet, um die Lastniveaus und die Schadenszustände von Faserverbundbauteilen zu beurteilen [4-9].

Anstatt die elektrische Widerstandsänderung kompletter CFK-Lagen und Bauteile zu beobachten, kann auch mit eingebetteten, elektrisch isolierten Carbonfasern gearbeitet werden. Durch die piezoresistiven Eigenschaften wird die Dehnungsmessung ermöglicht.

So werden in [10] einzelne Carbonfasern oder in [6], [11] und [12] Faserrovings in Strukturen eingebettet und als Sensorelemente betrieben. Bei geeigneten Proben aus glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) werden eingebettete Carbonfaserrovings herangezogen, um den linearen Zusammenhang von elektrischer Widerstandsänderung und anliegender Dehnung zu bestimmen [12]. Des Weiteren wird mit eingebetteten, elektrisch isolierten Carbonfasern in 0/90-Laminaten das Potenzial zur Detektion von Zwischenfaserbrüchen nachgewiesen.

2. PRINZIP DER CARBONFASER-SENSORIK

In [12] wurde mit UD-Laminaten [0_8] aus GFK Hexply-914 mit einer Querdehnzahl $\nu = 0{,}28$ und in der Symmetrieebene eingebetteten Carbonfasern (Toray T300 1k-Roving) eine Dehnungsempfindlichkeit von k = 1,71 ermittelt (Proportionalitätsfaktor zwischen Dehnung und relativer Widerstandsänderung).

Bei der integralen Dehnungsermittlung mit Carbonfaser-Sensoren (CFS) stellt sich der Zusammenhang der relativen Widerstandsänderung $\Delta R/R_0$, der Dehnungsempfindlichkeit k, der Dehnung ε und der Messlänge L bei konstanter Temperatur für entsprechende Querdehnzahlen ν der Probekörper mit der Längsrichtung x und Querrichtung y folgendermaßen dar:

$$(1) \quad \frac{\Delta R}{R_0} = k \frac{1}{L} \cdot \int_0^L \varepsilon(x) dx$$

Neben der Linearität der relativen Widerstandsänderung zur Dehnungsmessung konnte in [12] das Potential der CFS zur Detektion von Zwischenfaserbrüchen aufgezeigt werden. Mit der Probengeometrie aus BILD 1 und dem Lagenaufbau $[0, 90_5, 0, 90_5, 0]$ (GFK HexPly NVE 913/28%/192/EC9756) im Prüfbereich wurden nachfolgende Versuche des Kapitels 4 durchgeführt.

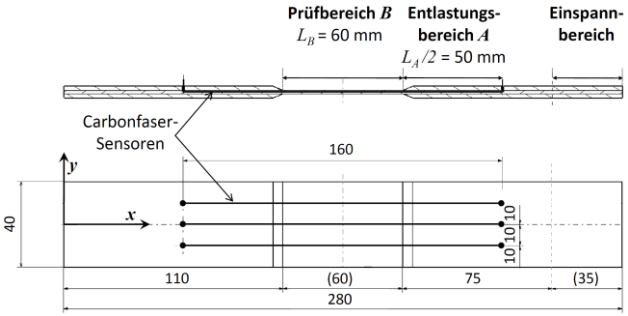

BILD 1. Probengeometrie aus [12]

Die Messlänge L der CFS erstreckt sich über zwei Bereiche, einen Prüfbereich L_B und einen Entlastungsbereich L_A mit den Aufdopplern $[-45, +45, 0, 0]_{sym}$. Die Aufdoppler sind so dimensioniert, dass im Zugversuch niedrigere Dehnungsniveaus im Entlastungsbereich als im Prüfbereich erreicht werden. Schäden treten daher zunächst im Prüfbereich auf.

3. LAMINATTHEORETISCHE ANALYSE

Mit dem Lagenaufbau $[0, 90_5, 0, 90_5, 0]$ werden im Zugversuch Zwischenfaserbrüche in den 90°-Lagen hervorgerufen, die eine Steifigkeitsreduzierung des Laminats im Prüfbereich zur Folge haben.

Die Beschreibung der Steifigkeitsreduzierung wird durch die integrale Erfassung der Dehnung $\varepsilon(x)$ über die Messlänge L der CFS und durch die lokalen Dehnungszunahmen im CFS an den Rissstellen der Zwischenfaserbrüche möglich.

3.1. Steifigkeitsreduzierung aufgrund von Zwischenfaserbrüchen

Bei einem Zwischenfaserbruch in den 90°-Lagen muss die von dieser Schicht übertragene Last an der Rissstelle von den angrenzenden 0°-Lagen zusätzlich aufgenommen werden. Durch diese zusätzliche Lastaufnahme der 0°-Lagen kommt es zu einer lokalen Dehnungszunahme und damit global zu einer Steifigkeitsreduzierung.

Diese zu erwartende Steifigkeitsreduzierung kann bei dem verwendeten Lagenaufbau $[0, 90_5, 0, 90_5, 0]$ mittels der eindimensionalen Spannungsanalyse von Garrett und Bailey [13, 15, 16] und der zweidimensionalen Spannungsanalyse von Hashin [14-16] bestimmt werden.

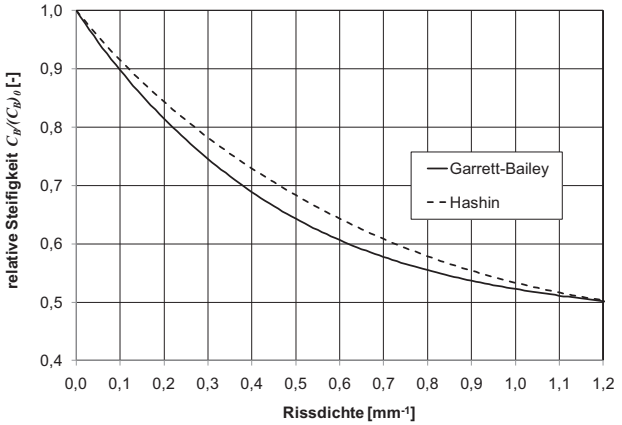

BILD 2. Relative Steifigkeit von GFK-Proben $[0, 90_5, 0, 90_5, 0]$ aus Hexply 913 über die Rissdichte aufgetragen

In BILD 2 sind die relativen Steifigkeiten über die Rissdichte aufgetragen. $(C_B)_0$ entspricht der Steifigkeit der unbeschädigten Probe und C_B der aktuellen Steifigkeit der rissbehafteten Probe. Da sich nur ein geringer Unterschied zwischen den Ergebnissen nach beiden Theorien einstellt, wird bei weiteren Betrachtungen nur noch die Spannungsanalyse von Garrett und Bailey verwendet.

3.2. Spannungsanalyse mittels FEM

An den Stellen der Zwischenfaserbrüche treten in den 0°-Lagen lokal erhöhte Dehnungen auf. Um diese genauer zu untersuchen, wird ein zweidimensionales FE-Modell erzeugt (Werkstoffkennwerte siehe Tabelle 1) und mit MSC-MARC analysiert.

Für die FE-Analyse wird angenommen, dass sich die Risse als Zwischenfaserbrüche über die gesamte Probenbreite und -dicke aller fünf 90°-Lagen bilden. Die Rissfläche breitet sich senkrecht zur Oberfläche in der yz-Ebene aus. Es wird, wie in BILD 3 gezeigt, der Fall untersucht, der die höchsten Dehnungsniveaus erwarten lässt. Hierbei liegen zwei Risse in den beidseitig zur Symmetrieebene angeordneten Paketen mit 90°-Orientierung auf derselben yz-Ebene. Daher wird der Zwischenfaserbruch als Trennstelle in den 90°-Schichten idealisiert. BILD 3 zeigt den betrachteten Bereich der Probe sowie das für die FEM-Analyse unter der Berücksichtigung von Symmetrie- und Randbedingungen verwendete Viertelmodell.

Das Laminat wir durch ein reguläres Rechtecknetz mit dem Element-Typ 75 im Ebenen Spannungszustand (ESZ) idealisiert. In x-Richtung befinden sich 324 Elemente und in z-Richtung 65 Elemente (10 pro UD-Lage).

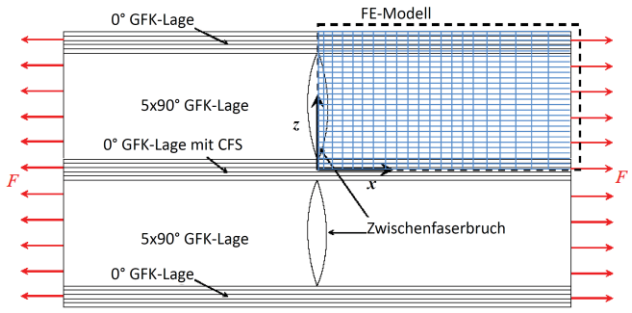

BILD 3. Laminat [0, 90_5, 0, 90_5, 0] mit Zwischenfaserbrüchen in den 90°-Lagen mit gekennzeichnetem Bereich für die FEM-Modellierung

Für die 0°-Lage mit CFS wird ein homogenisierter Steifigkeitskennwert verwendet. Detaillierte Angaben über die Materialkennwerte für die rein elastische Analyse sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Lage	0° GFK	0° GFK mit CFS
E_x [MPa]	43500	44250
E_z [MPa]	16500	14500
G_{xz} [MPa]	4500	4500
G_{yz} [MPa]	3500	3500
ν_{xz}	0,274	0,274
ν_{yz}	0,35	0,35

TAB 1. Materialkennwerte für die FEM-Modellierung

Wie die Versuchsergebnisse in [12] zeigen, haben sich bis zu einer Dehnung von 0,8 % im Prüfbereich Zwischenfaserbrüche gebildet. Um den Einfluss von Zwischenfaserbrüchen auf den CFS zu untersuchen, wird die Kraft F (s. BILD 3) für die FEM-Analyse so festgelegt, dass eine globale Dehnung von 0,8 % im unbeschädigten Laminat erzeugt wird.

BILD 4 zeigt die lokale Dehnung in der Symmetrieebene der Probe in der Umgebung des Zwischenfaserbruchs. Bei einer aufgebrachten globalen Dehnung von 0,8 % ergibt sich an der Rissstelle, aufgrund der Lastumlagerung, eine lokale Maximaldehnung von 1,8 %. Diese Dehnung liegt über der Bruchdehnung der verwendeten Carbonfaser Toray T300, was eine überproportionale Widerstandsänderung der eingebetteten CFS erwarten lässt.

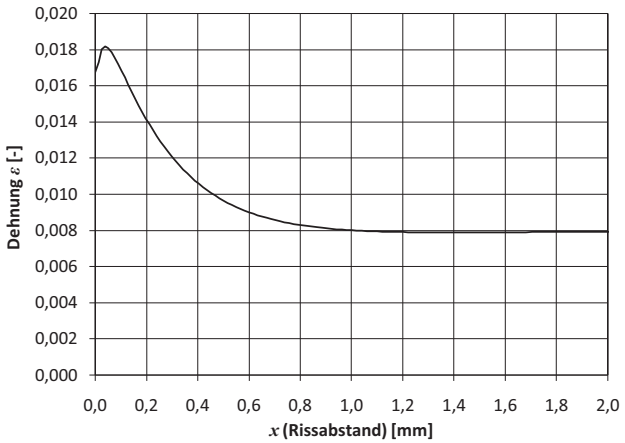

BILD 4. Lokale Dehnung in der 0°-Lage mit CFS in der Symmetrieebene des Laminats [0, 90_5, 0, 90_5, 0] bei vorhandenem Zwischenfaserbruch, aufgetragen über den Rissabstand

4. EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG

Für die experimentellen Untersuchungen werden die in BILD 1 dargestellten Proben mit je drei CFS verwendet. Es kommt glasfaserverstärktes UD-Prepreg (HexPly NVE913/28%/192/EC9756) zur Anwendung. Die CFS werden aus Toray T300 1k-Roving hergestellt, sind an den Enden galvanisiert, mit Messingpins versehen und in die mittlere 0°-Schicht eingebettet.

4.1. Versuchsbeschreibung

Die Proben werden in statischen und zyklischen Zugversuchen in einer Universalprüfmaschine Zwick 1464 mit einem Keil-Schraub-Spannzeug und einer 20 kN-Kraftmessdose geprüft. Für die Bestimmung der lokalen Dehnungen werden Dehnungsmessstreifen (DMS) (HBM 1-LY41-6/350) im Prüfbereich der Proben G5 und G6 in x-Richtung appliziert. Zur Temperaturkompensation wird neben den zu prüfenden Proben eine identische Probe positioniert. Alle CFS und DMS werden mit einem Messverstärker (HBM Spider 8-30) als Halbbrücken mit einer Brückenspeisespannung von 2,5 V, der Trägerfrequenz 600 Hz und einer Messrate von 5 Hz gemessen.

Die Rissdichte wird in einem 20 mm x 20 mm großen Ausschnitt der Probe mit einem optischen Digitalmikroskop in einem Intervall von 15 s erfasst.

Für die Aufzeichnung der Schallemission werden vier breitbandige SE-Sensoren mit einem Bandpassbereich von 20 kHz bis 1 MHz und einer Aufzeichnungsrate von 10 MS/s bei einer Vorverstärkung von 20 bzw. 40 dB verwendet. Die Triggerung der Signale erfolgt schwellwertbasierend.

Die Proben G1, G2 und G6 werden einem statischen Zugversuch mit einer maximalen Spannung von 215 MPa und einer Prüfgeschwindigkeit von 0,6 mm/min unterzogen.
Die Proben G3, G4, G5 und G7 werden im zyklischen

Zugversuch unter zehn Laststufen bis zu einer maximalen Spannung von 215 MPa und einer Prüfgeschwindigkeit von 7 mm/min geprüft. Jede Laststufe wird nach der Entlastung fünfmal angefahren.

In der Tabelle 2 sind die Probenkonfigurationen aufgelistet.

Nr.	**Lagenaufbau Probe** Prüfbereich	**Lagenaufbau Aufdoppler** Entlastungs-bereich	**Sensoren**
G1 (s) G2 (s) G3 (z) G4 (z)	[0, 90_5, 0, 90_5, 0] GFK Hexply 913	$[+45, -45, 0, 0]_{sym}$ CFK Hexply T800-913	SE
G5 (z) G6 (s)	[0, 90_5, 0, 90_5, 0] GFK Hexply 913	$[+45, -45, 0, 0]_{sym}$ GFK Hexply 913	SE DMS CFS
G7 (z)	[0, 90_5, 0, 90_5, 0] GFK Hexply 913	keine Aufdoppler	DMS CFS

TAB 2. Probenkonfigurationen G1 bis G7, (s): statischer Zugversuch, (z): zyklischer Zugversuch

4.2. Schallemissionsanalyse

Zur Analyse der aufgezeichneten Schallemissionssignale wird ein parameterbasiertes Mustererkennungsverfahren angewandt. Hierzu werden als Gütekriterium nur die gemessenen Signale ausgewertet, die mit einem hyperbolischen Ortungsverfahren innerhalb des Prüfbereichs lokalisiert werden können. Die Auswahl der Signalparameter konzentriert sich dabei auf charakteristische Frequenzkriterien, die eine Korrelation der Signale mit Faserbrüchen, Matrixrissen und Versagen der Faser-Matrix-Grenzfläche erlauben [17-20]. Die hierzu verwendeten Frequenzparameter der Fourier-transformierten $\hat{U}(f)$ sind in Tabelle 3 dargestellt.

Parameter	**Definition**
Durch-schnittliche Frequenz [Hz]	$\langle f \rangle = N/T$ N: Schwellwertüberschreitungen T: Zeitdauer des Signals
Gewichtetes Frequenz-maximum [Hz]	$\langle f_{\max} \rangle = \sqrt{f_{\max} \cdot \int f \cdot \hat{U}(f) df \Big/ \int \hat{U}(f) df}$ f_{max} : Position des Frequenzmaximums
Frequenzanteile 1-3 [%]	$\int_{f_1}^{f_2} \hat{U}^2(f) df \Big/ \int_{0kHz}^{1200kHz} \hat{U}^2(f) df$ Frequenzanteil 1: f_1 = 0kHz; f_2=200kHz Frequenzanteil 2: f_1 = 200kHz; f_2=350kHz Frequenzanteil 3: f_1 = 350kHz; f_2=1200kHz

TAB 3. Parameter für Mustererkennungsverfahren

Die Signalparameter werden bezüglich ihrer Varianz normalisiert, es wird eine Hauptachsentransformation durchgeführt und eine Einteilung mit dem k-means Algorithmus vorgenommen. Die numerische Validierung der getroffenen Klassifizierung erfolgt anhand statistischer Indizes. Die Vorgehensweise hierzu ist in [17,21] im Detail beschrieben.

BILD 5 zeigt stellvertretend für die prinzipiell gleichen Verläufe die zeitliche Entwicklung der akkumulierten Schallemissionsenergie der drei resultierenden Schadensklassen zusammen mit der Spannung für zwei Proben. Im oberen Bild sind für den statischen Zugversuch die Ergebnisse der Probe G6 mit CFS und im unteren Bild die der baugleichen Vergleichsprobe G1 ohne CFS dargestellt.

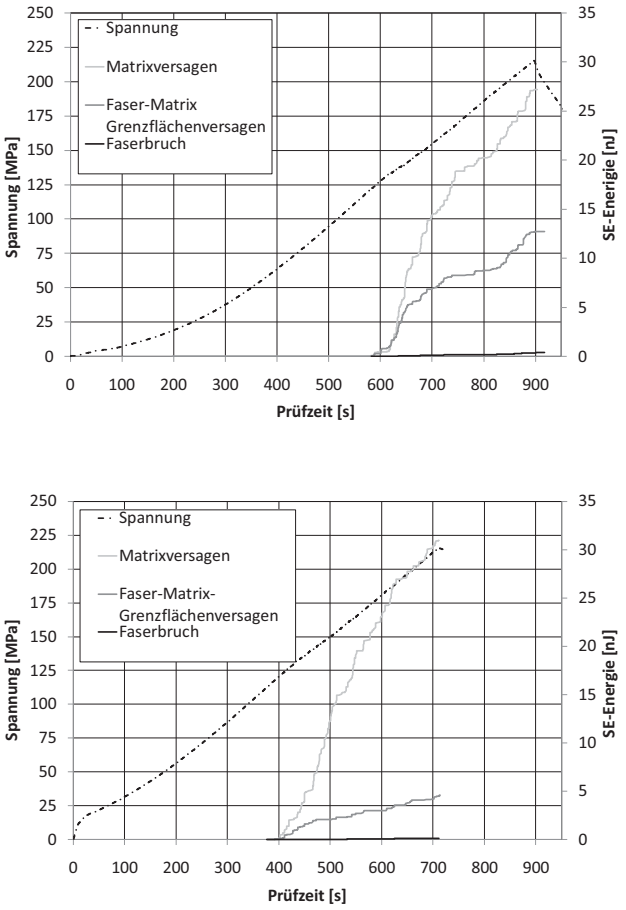

BILD 5. Zeitliche Entwicklung der akkumulierten Schallemissionsenergie der verschiedenen Schadensmechanismen beim statischen Zugversuch mit CFS (oben) und ohne CFS (unten)

Das erste Auftreten von Schallemissionen findet bei Proben mit und ohne eingebetteten CFS beim gleichen Lastniveau statt. Dies deutet darauf hin, dass eingebettete CFS die mechanischen Eigenschaften des Laminats nicht verändern, wenn die Kontaktierungsstellen der CFS, wie im vorliegenden Fall, weitestgehend spannungsfrei angeordnet sind.

In der Tabelle 4 sind die Lastniveaus und die relativen Anteile der Schadensklassen an der Gesamtenergie der Proben mit und ohne eingebetteten CFS aufgelistet.

Versuch	stat. Zugversuch			zykl. Zugversuch		
Proben	**G1**	**G2**	**G6**	**G3**	**G4**	**G5**
Anzahl CFS	0	0	3	0	0	3
SE-Ersteinsatz bei Spannung [MPa]	122	123	123	120	122	125
Energieanteil Matrix-versagen [%]	86,8	94,1	67,5	80,5	89,3	82,7
Energieanteil Faser-Matrix-Grenzflächen-versagen [%]	12,9	5,1	31,6	19,3	10,5	16,7
Energieanteil Faserbruch [%]	0,3	0,0	0,9	0,2	0,2	0,6

TAB 4. Ergebnisse der Mustererkennungsverfahren

Die Teilbeiträge der jeweiligen Schadensmechanismen zeigen einen dominierender Beitrag von Matrixversagen, was durch mikroskopische Aufnahmen von Querschnitten in Form von Zwischenfaserbrüchen bestätigt wird (s. BILD 6). Ein ebenfalls hoher energetischer Beitrag entfällt auf Schallemissionssignale, die auf Ablösungen zwischen Faser und Matrix hindeuten. Im vorliegenden Belastungsfall sind diese mit dem Auftreten von makroskopischen Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen in der xy-Ebene gleichzusetzen. Der Anteil dieser Signale ist bei den Proben mit eingebetteten CFS im statischen Zugversuch ausgeprägter als bei den Vergleichsproben. Im zyklischen Zugversuch dagegen ergeben sich vergleichbare Energiebeteiligungen.
Ein deutlich geringerer energetischer Beitrag entfällt auf Schallemissionssignale, die mit vereinzelten Faser- bzw. Filamentbrüchen in 0°-Richtung korrelieren.

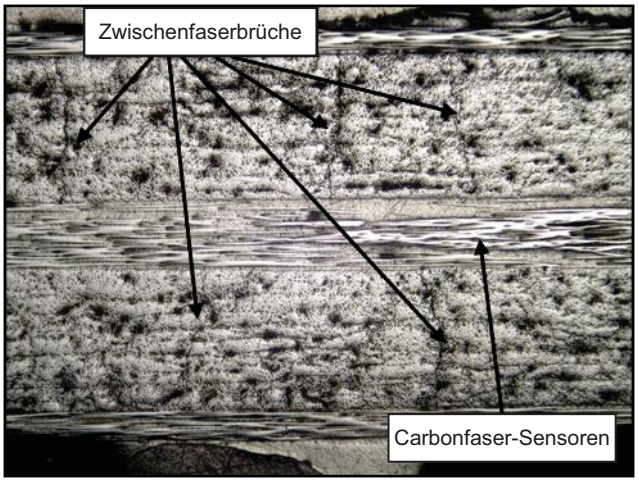

BILD 6. Schliffbild von GFK [0, 90_5, 0, 90_5, 0] aus Hexply 913 mit integriertem Carbonfaser-Sensor und Zwischenfaserbrüchen in den 90°-Lagen nach einer Zugbelastung mit einer Spannung von 215 MPa

4.3. Dehnungs- und Widerstandsmessung

In die Proben G5 und G6 sind je drei CFS eingebettet (s. BILD 1). Beim Zugversuch werden sowohl die Dehnungssignale der DMS als auch die Widerstandsänderungen der CFS aufgezeichnet. Die Ergebnisse der drei CFS der Probe G6 in BILD 7 unterscheiden sich kaum, woraufhin nur noch der CFS 2 in der mittleren Position für die weiteren Betrachtungen herangezogen wird.
Die Signale der CFS und DMS zeigen erste Unregelmäßigkeiten bei einer Prüfzeit t von 582 s und Sprünge bei t = 588 s. Zeitgleich treten erste SE-Signale mit signifikanten Energiebeiträgen auf. Die ansteigende Rissdichte und deren Einfluss auf die Signale der DMS und CFS sind ab t = 600 s zu erkennen.

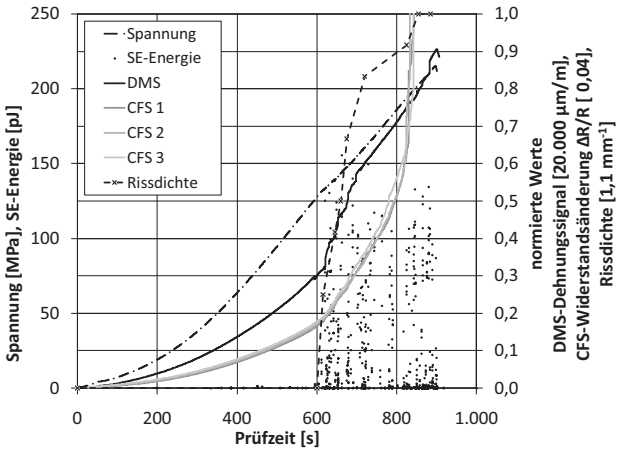

BILD 7. Messergebnisse der Probe G6 im statischen Zugversuch bis zur maximalen Spannung von 215 MPa

Im zyklischen Zugversuch bei der Probe G5 ergibt sich das gleiche Bild mit einem SE-Ersteinsatz bei 125 MPa bei der Laststufe mit einer maximalen Spannung von 154 MPa (s. BILD 8). Der Steifigkeitsabfall wird durch die DMS, die CFS und den Anstieg der Rissdichte registriert.

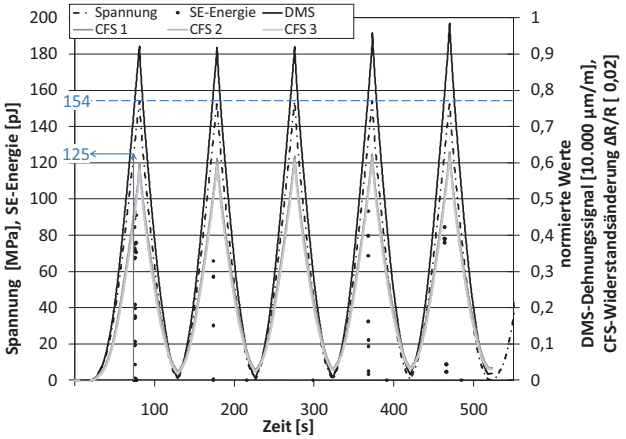

BILD 8. Messergebnisse der Probe G5 im zyklischen Zugversuch für die Laststufe mit einer maximalen Spannung von 154 MPa über die Prüfzeit aufgetragen

4.4. Vergleich der Ergebnisse

Die sich aufgrund der zunehmenden Rissdichte ergebende Steifigkeitsreduzierung nach Kapitel 3.1 gibt Aufschluss über die zu erwartenden Dehnungen im Prüfbereich. Die Carbonfaser-Sensoren erstrecken sich jedoch über die Länge des Prüfbereichs L_B hinaus in den Entlastungsbereich. In dem Entlastungsbereich ist durch die Aufdoppler beim einaxialen Zugversuch keine Schadensbildung und folglich auch keine Steifigkeitsänderung zu erwarten. Obwohl sich die Untersuchungen auf den Prüfbereich und die durch die Bildung von Zwischenfaserbrüchen auftretende Steifigkeitsreduzierung konzentrieren, muss der Einfluss des Entlastungsbereichs auf die relative Widerstandsänderung der CFS berücksichtigt werden.
Die relative Widerstandsänderung des Carbonfaser-Sensors über die gesamte Länge L ergibt sich aus der Summe der Widerstandsänderungen in den einzelnen Abschnitten:

$$(2)\quad \frac{\Delta R}{R_0} = \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{L_A} + \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{L_B}$$

Für den Prüfbereich L_B wird mit der Probe G7 ohne Aufdoppler aber mit identischem Lagenaufbau wie bei den Proben G5 und G6 für die eingebetteten CFS eine Dehnungsempfindlichkeit k_B = 1,72 ermittelt. Der Carbonfaser-Sensor erfasst im Prüfbereich die Dehnung in x-Richtung integral nach:

$$(3)\quad \varepsilon_{L_B} = \frac{1}{L_B} \cdot \int_0^{L_B} \varepsilon(x)dx\,.$$

ε_{L_B} ist hierbei das mittlere Dehnungsniveau im Prüfkörper. Setzt man die sich entsprechend der Rissdichte ändernde Steifigkeit C_B, die Kraft F, die Probenbreite b und die Dicke d_B ein, ergibt sich:

$$(4)\quad \varepsilon_{L_B} = \frac{F}{b \cdot d_B \cdot C_B}$$

Die im eigentlichen Prüfbereich entstehende relative Widerstandsänderung beträgt nach (1) und (4)

$$(5)\quad \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{L_B} = k_B \cdot \frac{F}{b \cdot d_B \cdot C_B} \cdot \frac{L_B}{L}$$

Der Anteil der relativen Widerstandsänderung, der im Entlastungsbereich entsteht, lautet:

$$(6)\quad \left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_{L_A} = K \cdot F \qquad \text{mit } K = \text{konstant.}$$

Nach Addition der beiden Beiträge ergibt sich die zu erwartende relative Widerstandsänderung der Carbonfaser-Sensoren zu

$$(7)\quad \frac{\Delta R}{R_0} = F \cdot \left(K + \frac{k_B \cdot L_B}{b \cdot d_B \cdot C_B \cdot L}\right).$$

Die Steifigkeit C_B wird wie in Kapitel 3.1 mit der eindimensionalen Spannungsanalyse von Garrett und Bailey [13, 15, 16] anhand der Rissdichte ermittelt.

In BILD 9 und BILD 10 sind die normierten Werte der Spannungen im Prüfbereich, der Rissdichte und der akkumulierten SE-Energie über der relativen Widerstandsänderung des mittleren Carbonfaser-Sensors aufgetragen.

Die Messsignale im zyklischen Zugversuch der Probe G5 sind am Ende der jeweiligen Laststufe bestimmt worden und werden in BILD 9 linear verbunden. Bis zur Spannung von 0,61 (entsprechend 123 MPa) in BILD 9 ergeben sich nur geringe Abweichungen von der Linearität, was mit der zeitlichen Entwicklung der wenigen aufgezeichneten SE-Signale übereinstimmt. Bei der nächsten Laststufe von 0,77 (entsprechend 154 MPa) erhöht sich die Rissdichte auf 0,7 mm^{-1}, was eine deutliche Steifigkeitsreduzierung zur Folge hat. Diese Steifigkeitsreduzierung spiegelt sich in guter Näherung auch in den Kurvenverläufen der Spannungen nach Garrett und Bailey und den Messwerten der CFS wieder.

Weitere Laststeigerungen resultieren in der maximal erreichbaren Steifigkeitsreduzierung nach Garrett und Bailey. Die relative Widerstandsänderung des CFS erfährt einen überproportionalen Anstieg, der nun nicht mehr mit der Steifigkeitsreduzierung erklärbar ist.

In BILD 10 sind die Ergebnisse der Probe G6 analog zu BILD 9 dargestellt. Auch hier ergibt sich ab einer Rissdichte von 0,7 mm^{-1} ein überproportionaler Anstieg der relativen Widerstandsänderungen des Carbonfaser-Sensors.

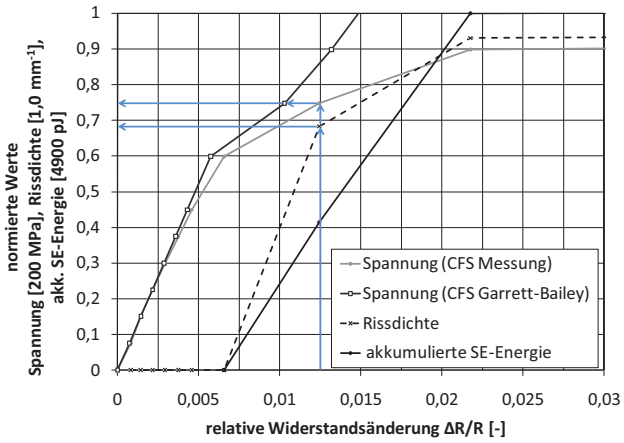

BILD 9. Versuchs- und Berechnungsergebnisse des zyklischen Zugversuchs der Probe G5

Die Ergebnisse der FEM-Modellierung zeigen Dehnungen bis 1,8 % in der 0°-Lage mit den eingebetteten Carbonfaser-Sensoren bei einer global aufgebrachten Dehnung von 0,8 % (s. BILD 4). Diese hohen lokalen Dehnungen, die über der Bruchdehnung von 1,5 % der verwendeten Carbonfasern (Toray T300B) liegen, können das Versagen einzelner Filamente des CFS einleiten und damit Ursache für die überproportionalen Widerstandsänderungen sein.

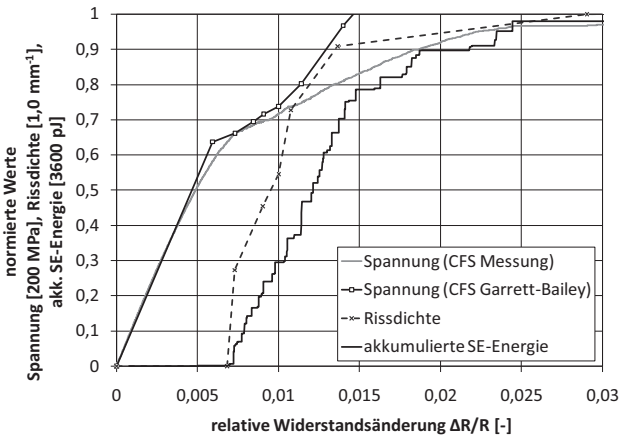

BILD 10. Versuchs- und Berechnungsergebnisse des statischen Zugversuchs der Probe G6

5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es konnte gezeigt werden, dass die Detektion von Zwischenfaserbrüchen in 0/90-Laminaten durch eingebettete, elektrisch isolierte Carbonfaser-Sensoren (CFS) möglich ist. Die Ergebnisse aus Zugversuchen mit CFS korrelieren sehr gut mit den Ergebnissen von Schallemissionsanalysen. Bei einem Spannungsniveau von 123 MPa und einer Dehnung von 0,6 % werden bei GFK-Laminaten [0, 90_5, 0, 90_5, 0] aus Hexply 913 sowohl Schallemissionssignale mit signifikantem Energiebeitrag, als auch Abweichungen der Carbonfaser-Sensorsignale vom linearen Signalverlauf aufgezeichnet. Die Klassifizierung der SE-Signale und die Auswertung von Mikroschliffbildern zeigen, dass es sich bei den entstandenen Schäden vorherrschend um Zwischenfaserbrüche in den 90°-Lagen handelt.

Der Carbonfaser-Sensor erfasst die Dehnung entlang seiner Mess- bzw. Faserlänge integral und bildet damit die globale Steifigkeit sowie bei Bildung von Zwischenfaserbrüchen auch die Steifigkeitsreduzierung ab. Die relative Widerstandsänderung der Carbonfaser-Sensoren nimmt ab einer Spannung von 160 MPa überproportional zu. Dies lässt sich mit den hohen lokalen Dehnungen an den Orten der Zwischenfaserbrüche erklären, die sich auf die eingebetteten Carbonfaser-Sensoren übertragen.
Mit einer zweidimensionalen FEM-Berechnung wird an den Stellen der Zwischenfaserbrüche eine Dehnung von 1,8 % bei einer global aufgebrachten Dehnung von 0,8 % ermittelt. Diese Dehnungsspitze liegt deutlich über der Bruchdehnung der für die Carbonfaser-Sensoren verwendeten Carbonfasern Toray T300B von 1,5 %. Dies kann das Versagen der einzelnen Filamente des CFS einleiten.

Um eine bessere Beurteilung der Spannungs- und Dehnungszustände in 0/90-Laminaten mit Zwischenfaserbrüchen und deren Einfluss auf eingebettete Carbonfaser-Sensoren zu untersuchen, ist eine Weiterentwicklung der FEM-Modellierung erforderlich. So sollte das Modell auf eine dreidimensionale Modellierung erweitert und ein elasto-plastisches Materialgesetz für die 90°-Lagen verwendet werden.

Die Carbonfaser-Sensoren weisen durch ihre elektrischen Eigenschaften Möglichkeiten zur Ermittlung von Dehnungen und Schadenszuständen bei Faserverbundbauteilen auf. Sie tragen auf diese Weise zur Realisierung des funktionalen Leichtbaus mit Faserverbundwerkstoffen bei.

REFERENZEN

[1] P. C. Conor, C. N. Owston, Electrical resistance of single carbon fibres. *Nature.* 223:1146–1147, 1969

[2] I. L. Spain. Electronic transport properties of graphite, carbons and related materials. *Chemistry and Physics of Carbon*, 16:119-304, 1981.

[3] M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, K. Sugihara, I.L. Spain, H. A. Goldberg. Graphite Fibres and Filaments. *Springer Verlag*, 1988.

[4] K. Schulte, Ch. Baron. Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements. *Composites Science and Technology*. 36:63-76, 1989.

[5] X. Wang, D. D. L. Chung. Continuous carbon fibre epoxy-matrix composites as a sensor of its own strain. *Smart Materials and Structures.* 5:796-800, 1996.

[6] N. Muto, Y. Arai, S. G. Shin, H. Matsubara, H. Yanagida, M. Sugita, T. Nakatsuji. Hybrid composites with self-diagnosing function for preventing fatal fracture. *Composite Science and Technology.* 61:875-883, 2001.

[7] L. Hou, S.A. Hayes. A resistance-based damage location sensor for carbon-fibre composites. *Smart Materials and Structures*. 11:966-969, 2002.

[8] D. Wang, D. D. L. Chung, Comparative evaluation of the electrical configurations for the two-dimensional electric potential method of damage monitoring in carbon-fiber polymer-matrix composites. *Smart Materials and Structures*.15:1332-1344, 2006.

[9] Z. S. Wu, C. Q. Yang, Y. H. Tobe, L. P. Ye, T. Harada. Electrical and mechanical characterization of hybrid CFRP sheets. *Journal of Composite Materials.* 40:227-244, 2006.

[10] X. Wang, D. D. L. Chung. Piezoresistive behaviour of carbon fiber in epoxy. *Carbon*, 35:1649-1679, 1997.

[11] A. Horoschenkoff. Die Kohlenstofffaser als Sensor zur Messung von Dehnungen in Faserverbundwerkstoffen. *Materialica Congress München*. 2006.

[12] A. Horoschenkoff, T. Mueller, A. Kroell. On the characterization of the piezoresistivity of embedded carbon fibres. *ICCM 17th -2009 Edinburgh*, 2009.

[13] K.W. Garrett, J. E. Bailey. Multiple transverse fracture in 90° cross-ply laminates of a glass fibre-reinforced polyester. *Journal of Materials Science*, 12:157-168, 1977.

[14] Z. Hashin. Analysis of cracked laminates - A variational approach. *Mechanics of Materials*, 4:121-136, 1985.

[15] J. A. Nairn, S. Hu. Matrix microcracking. *Damage Mechanics of Composite Materials,* 9:187-243, 1994.

[16] J. A. Nairn. The strain energy release rate of composite microcracking: a variational approach. *Journal of Composite Materials, 23:*1106-1129, 1989.

[17] M. G. R. Sause, M. Klug, J. Scholler und S. Horn. Anwendung von Mustererkennungsverfahren zur Schadensanalyse in faserverstärkten Kunststoffen. *DGZfP-BB*. 118:9-17, 2009.

[18] C. R. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, T.H. Gan, P. Purnell, M. Pharaoh. Identification of

failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission event *Composites Science and Technology.* 64:1819-1827, 2004.

[19] W. Haselbach, B. Lauke. Acoustic emission of debonding between fibre and matrix to evaluate local adhesion. *Composites Science and Technology.* 63:2155-2162, 2003.

[20] A. Marec, J.-H. Thomas, R. Guerjouma. Damage characterization of polymer-based composite materials: Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 22:1441-1464, 2008.

[21] M. G. R. Sause, F. Haider, S. Horn. Quantification of metallic coating failure on carbon fiber reinforced plastics using acoustic emission. *Surface and Coatings Technology*. 204:300-308, 2009.