

BESTIMMUNG DES ZWISCHENFASERBRUCHVERSAGENS IN KOMPLEXEN, TEXTILEN FASERVERBUNDWERKSTOFFEN

V. Trappe, M.P. Hentschel, H. Ivers

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87, 12205 Berlin

1. ÜBERSICHT

Heterogene Polymerwerkstoffe, insbesondere Faserverbundwerkstoffe (FVW) mit Epoxydharz- oder Thermoplastmatrix, finden verstärkt Einsatz in sicherheitskritischen Leichtbaustrukturen insbesondere Flugzeugen. Die guten spezifischen Eigenschaften dieser Werkstoffe, der hohen Festigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht, führen zunehmend zur Verdrängung von Stahl und/oder Aluminiumlegierungen als Konstruktionswerkstoff. Sind Festigkeitshypothesen für isotrope, metallische Werkstoff weitestgehend bekannt und Methoden zur Berechnung von Konstruktionen verfügbar, so steckt hingegen die Entwicklung von realitätsnahen Festigkeitshypothesen für komplexe Textilverbunde mit Polymermatrix noch in den Kinderschuhen.

Nachfolgend wird gezeigt, wie das nichtlineare mechanische Verhalten (Versagensverhalten) von Laminat- / Textilverbunden über die Messung der physikalischen Ursachen verstanden und praxisgerechte „Design-Allowables“ abgeleitet werden können. Versuche an Laminaten aus Leinwandgewebe ergeben, dass das mechanische Verhalten des Werkstoffes gut mit der Zunahme von „online“ gemessenen Mikrorissen korreliert. Die schichtweise Festigkeitsanalyse spiegelt weder qualitativ noch quantitativ diese Versagensprozesse wider.

2. EINLEITUNG

Stand der Technik zur Berechnung von Laminaten aus FVW ist die schichtweise Festigkeitsanalyse (SFA) [1]. Dabei werden die an der Einzelschicht bestimmten Festigkeiten auf den Laminatverbund übertragen. Bei genauer Betrachtung führen aber die Nachbarschichten zu Problemen bei der Berechnung/Vorhersage der Einzelschiffestigkeit, da sich die Einzelschicht im Verbund anders verhält. Zudem geht der Trend beim Einsatz von FVW aus Kostengründen zum Einsatz von mehrdimensional faserverstärkten Textilverbunden wie Gelegen, Geweben und Gesticken. Durch Koppelung von mechanischer Belastung und zerstörungsfreier Röntgenrefraktion kann das Versagen an komplexen Laminaten / mehraxial verstärkten Textilverbunden charakterisiert werden, ohne auf Festigkeitsversuche an der Einzelschicht angewiesen zu sein, da

- die schichtweise Analyse ungenaue, abweichende Ergebnisse liefert

- nicht alle Halbzeuge sinnvoll als Einzelschichtverbund hergestellt werden können.

Moderne Leichtbaustrukturen (Luftfahrt, Eisenbahn, Automotive) aus FVW sind hohen mechanischen und klimatischen Beanspruchungen ausgesetzt. Dabei hängen die Lebensdauer und Funktionssicherheit der FVW-Bauteile mehr von den mikromechanischen Eigenschaften als von der globalen Festigkeit ab. Die Röntgenrefraktionstopographie ist ein Verfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung von inneren Oberflächen in Werkstoffen. Angewendet auf FVW lassen sich Aussagen über die Faserorientierungen, die Fertigungsqualität sowie über Faser-Matrix Ablösungen und Matrixrisse infolge mechanischer Beanspruchung gewinnen. Nachfolgend wird ein neues Verfahren zur Bestimmung des Zwischenfaserbruchversagens am komplexen Laminat vorgestellt. Hierbei wird das Röntgenrefraktionsverfahren „on-line“ bei Zug-Belastung der Probe angewendet.

3. DAS RÖNTGENREFRAKTIONVERFAHREN

Das Verfahren der Röntgenrefraktionstopographie [2] nutzt die Brechungseigenschaften von Röntgenstrahlung an Grenzflächen zwischen Medien unterschiedlicher Dichte („Innere Oberflächen“) und verhält sich ganz ähnlich der Lichtbrechung an Glaslinsen. Somit steht die Intensität des gebrochenen Röntgenstrahls in funktionaler Abhängigkeit zu den inneren Oberflächen im betrachteten Werkstoffvolumen. Durch geeignete Referenzversuche lassen sich somit Faser-Matrix-Grenzflächen, Faser-Matrix-Ablösungen und Matrixrisse in Verbundwerkstoffen zerstörungsfrei bestimmen (s. Bild 1). Dabei ermöglicht die kurze Wellenlänge der Röntgenstrahlung (Mo-K α : $\lambda = 0,07$ nm), dass Fehlstellen ab einer Größe von 70 nm (also 1000 Wellenlängen) sicher refraktive Streuung bewirken.

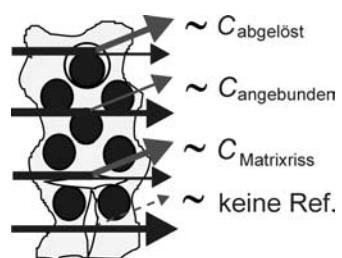


Bild 1: Röntgenrefraktionseffekte

Um gut messbare Refraktionsintensitäten zu detektieren, wird der Röntgenstrahl rechteckförmig auf einen Querschnitt von 2 bis 3 mm mal 0,05 mm kollimiert, was eine hohe Auflösung beim Abtasten der Probenfläche ermöglicht. Der gemessene Refraktionswert stellt folglich einen integralen Mittelwert einer Vielzahl gemessener Einzeldefekte dar. Dies ist kein Nachteil, da die globalen mechanischen Werkstoffeigenschaften mit der mittleren Defektdichte korrelieren [3, 4] und somit die genauere Ortsauflösung des Einzeldefektes entbehrlich ist. Der Refraktionswert C wird nach der Gl. (1)

$$C = \left[\frac{I_R / I_{R0}}{I_A / I_{A0}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{d} \quad (1)$$

berechnet. Die Refraktionsintensität I_R und ihr Nullwert I_{R0} (ohne Probe) werden unter einem festen Winkel Θ direkt mittels eines Detektors gemessen. Hingegen wird die durch Absorption geschwächte Intensität I_A und ihr Nullwert I_{A0} (ohne Probe) indirekt über eine Streufolie bestimmt (s. Bild 2). Für die Absorption nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz gilt:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d} \quad (2)$$

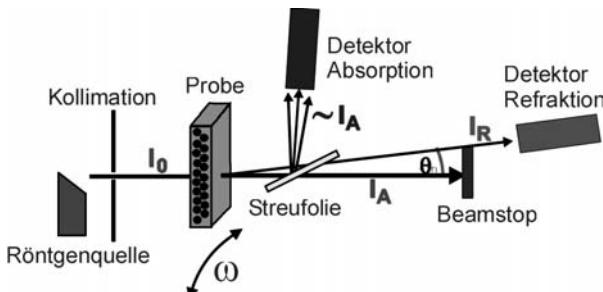


Bild 2: Versuchsaufbau der Röntgenrefraktionsanlage

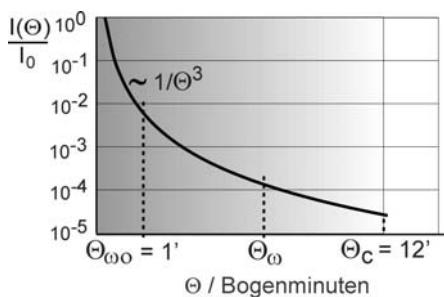


Bild 3: Intensität über dem Refraktionswinkel Θ

Bei FVW stellt jede Einzelfaser eine Zylinderlinse dar, an der die Röntgenstrahlung in der zur Faserlängsachse orthogonalen Ebene gebrochen wird. Die Intensität als Funktion des Brechungswinkels Θ ist gegeben über [2] (s. Bild 3):

$$I_R(\Theta) = \frac{c_1}{\Theta^3} \quad (3)$$

Die Konstante c_1 beinhaltet die Einflussgrößen Filamentanzahl im Strahlquerschnitt sowie dielektrische Eigen-

schaften der Fasersorte, Faserdurchmesser und Absorptionseigenschaften. Der für die Messung des Refraktionsefektes nutzbare Streuwinkelbereich beträgt nur ca. 1 bis 12 Bogenminuten (1 Bogenminute zum Ausblenden des Primärstrahls und bei ca. 12 Bogenminuten Totalreflexion). Daher eignet sich zur Messung der Röntgenrefraktion der Aufbau einer klassischen Kleinwinkelstreuapparatur (Kratky-Kammer - s. Bild 2).

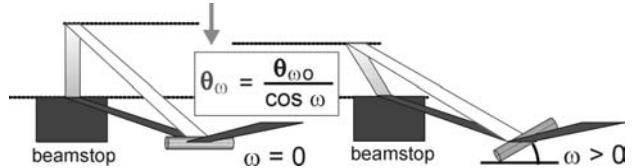


Bild 4: Drehen der Faser aus der Streuebene um ω führt zu einem größeren vom Beamstop abgedeckten Streuwinkel Θ_ω

In Bild 4 ist ein infinitesimaler Faserabschnitt dargestellt. Seine Beleuchtung führt zu einem Streifen gebrochener Röntgenstrahlung gemäß Gl. 3. Die Obergrenze ist durch den Winkel der Totalreflexion Θ_c begrenzt, bei dem die Intensität um drei Größenordnungen fällt und somit zu höheren Streuwinkeln vernachlässigbar ist. Wird der Faserabschnitt um den Winkel ω aus der Ebene herausgedreht, kippt der Streifen der Refraktionsintensität und die Untergrenze des Streuwinkels steigt an:

$$\Theta_\omega = \frac{\Theta_{\omega 0}}{\cos \omega} \quad (4)$$

Die zur Bestimmung des Refraktionswertes C erforderliche Intensität I_R , die von dem Detektor gezählt wird ist gleich dem Integral von Gl. 3 in den Grenzen von Θ_ω und Θ_c :

$$I_R = \int_{\Theta_\omega}^{\Theta_c} \frac{c_1}{\Theta^3} d\Theta$$

und mit Gl. 4 folgt:

$$I_R = \frac{c_1}{2} \left(\frac{\cos^2 \omega}{\Theta_{\omega 0}^2} - \frac{1}{\Theta_c^2} \right) + c_2 \quad (5)$$

Der kritische Refraktionswinkel der Totalreflexion Θ_c ist mindestens um den Faktor 10 größer als $\Theta_{\omega 0}$ und somit sein Beitrag zur gezählten Intensität kleiner einem Hundertstel und somit vernachlässigbar. Mathematisch ist dies gleichbedeutend mit einer Verschiebung der oberen Integrationsgrenze ins Unendliche. Zunächst ist die Konstante c_2 nur ein Ergebnis des mathematischen Formalismus. Aber physikalisch gewinnt diese Bedeutung zur quantitativen Bestimmung und Abspaltung von Untergrund-Streueffekten, die auch bei einer reinen Faserorientierung orthogonal zur Kollimationsebene zu einer geringen Zählrate des Refraktionsdetektors führen. Schließlich ist die relative Änderung ΔC des mittleren Refraktionswertes C_m einer Faserschicht der Dicke d als Funktion des

Drehwinkels ω gegeben mit:

$$\Delta C_m(\omega) = \frac{[C_m(\omega=0) - C_m(\omega)] \cdot d}{C_m(\omega=0) \cdot d} = \frac{c_3[1 - \cos^2 \omega]}{C_m(\omega=0)} \quad (6)$$

In der Konstanten c_3 sind alle bei der Umformung aus Gl. (1), Gl. (3) und Gl. (5) übrig bleibenden Größen zusammengefasst.

4. DICHTE UND INNERE OBERFLÄCHE

Durch Drehen und Kippen der Probe können Vorzugsrichtungen von Mikrodefekten im statistischen Mittel [5] bestimmt werden. Wird wie oben abgeleitet eine unidirektionaler Faserschicht um $\omega = 90^\circ$ gedreht, nimmt in dieser Messanordnung die Refraktionsintensität gemäß Gl. 6 ab. Folglich kann durch Drehen einer FWV-Probe der Beitrag am Refraktionssignal einer bestimmten Faserlage im Bezug auf die gewählte Geometrie von Strahlkollimation und Eintrittsblende ausgeblendet werden. Gleichermaßen liefern in Strahlrichtung orientierte Matrixrisse einen Beitrag zur Refraktionsintensität, während orthogonal zum Strahl orientierte Einzelrisse oder auch großflächige Delaminationen unsichtbar bleiben (s. Bild 1).

Durch laterale Verschiebung der Probe mit Hilfe eines Manipulators in Kartesischen- oder Polarkoordinaten lässt sich mit der durch den Strahlquerschnitt definierten Ortsauflösung ein Topogramm der spezifischen inneren Oberflächen angeben. In Bild 5 sind Absorption und Refraktion einer Messung an CFK aus Fasergflecht dargestellt. Im Absorptionsbild werden nur lokale Dichteunterschiede sichtbar. Die Refraktionstopografie zeigt hingegen die inneren Oberflächen – hier Mittelwerte der Fasergrenzflächen der Stehfäden. Die Flechtfäden bleiben unsichtbar, da diese orthogonal zu den Stehfäden orientiert sind.

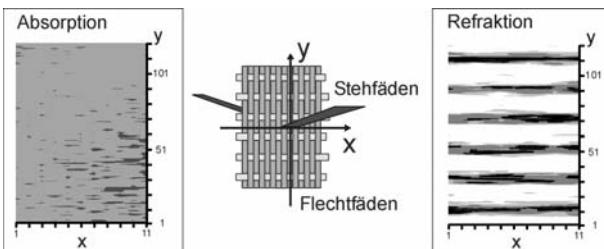


Bild 5: Intensität über dem Refraktionswinkel Θ

Messungen an trockenem Glasfaser-Leinwandgewebe (Interglas 92115, Flächengewicht 280g/m²) mit zunehmender Anzahl von Faserlagen (s. Bild 6) belegen, dass der Refraktionswert gemäß Gl. 1 linear proportional zur Zahl der Faserfilamente im Strahlquerschnitt ist. Gleichermaßen folgt die Absorption dem Lambert-Beer'schen Gesetz (Gl. 2). Zweckmäßig ist es, aus Gl. 1 und Gl. 2 das Verhältnis C/μ zu bilden, da somit eine von der Probedicke unabhängige, aber den inneren Oberflächen proportionale Messgröße entsteht. Diese als spezifische Refraktion bezeichnete Größe ergibt am Beispiel der Messungen an Glasfaser gewebe eine konstante Funktion (s. Bild 6).

Lediglich bei nur einer Faserlage zeigt sich eine größere Abweichung, da die Faserfilamente nicht ganz dicht liegen und die Röntgenstrahlung stellenweise ohne Refraktionseffekt eine einzelne Gewebelage durchdringen kann.

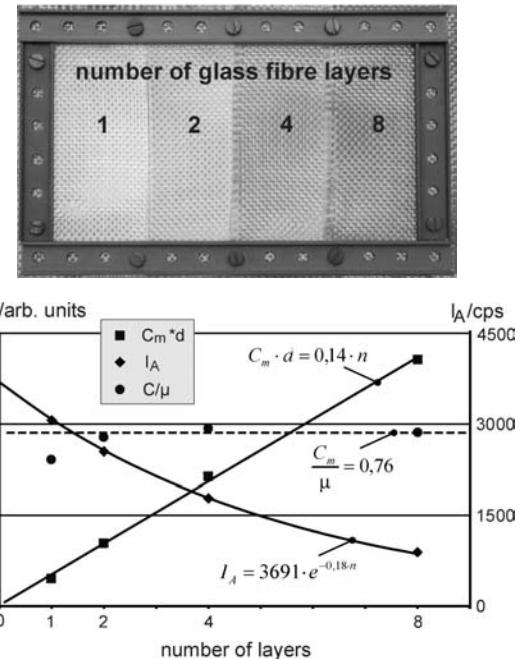


Bild 6: Refraktion und Absorption am trockenen Glasfaser gewebe mit zunehmender Anzahl von Schichten

Bei gleichem Faservolumengehalt und gleicher Probendicke ändert sich die Absorption nicht, wenn sich die Filamentdicke des Faserhalbzeugs ändert. Jedoch nimmt hingegen die innere Oberfläche, also der Refraktionswert zu. Dies wurde erstmals experimentell mittels des Verfahrens der Röntgenrefraktion an Kugeln unterschiedlicher Größe bei gleicher Packungsdichte nachgewiesen [6].

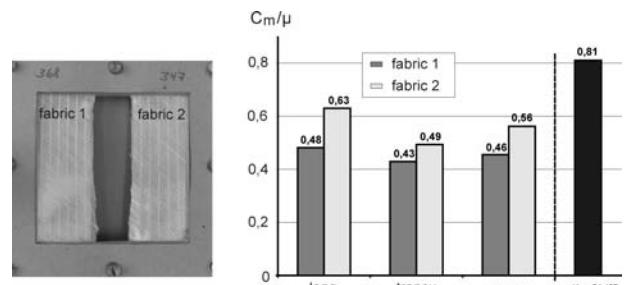


Bild 7: Spezifischer Refraktionswert für Gelegehalbzeuge unterschiedlicher Glasfaserfilamentdicke.

Dieser Zusammenhang kann auch als zweidimensionales Problem an Glasfaser gelegen mit unterschiedlichen Faserfilamentdurchmessern gezeigt werden. Im ersten Schritt wurden die spezifischen Refraktionswerte an den beiden ungetränkten Glasfaser gelegen (SAINT-GOBAIN Biax +/-45°, 810g/m² und SEARTEX Bidiagonal +/-45°, 808g/m²) bestimmt (s. Bild 7). Wie oben abgeleitet hat der tatsächliche Faserwinkel der Filamente einen ent-

scheidenden Einfluss auf die Höhe des Refraktionswertes. Eine exakte Ausrichtung aller Fasern in beiden Halbzeugen auf $+/ - 45^\circ$ ist schwer realisierbar. Um den Orientierungseinfluss auszuschließen, wurde jeweils der Mittelwert aus zwei orthogonalen Messungen gebildet. Wie aus Gl. 6 unter Zuhilfenahme der Additionstheoreme ableitbar, gelingt es so einen bezüglich des tatsächlichen Faserwinkels invarianten Wert zu ermitteln. Im Ergebnis zeigt sich, dass das Halbzeug 2 eine um ca. 25% größere innere Oberfläche aufweist, also die Faserfilamente im Mittel einen um ca. 20% geringeren Durchmesser haben.

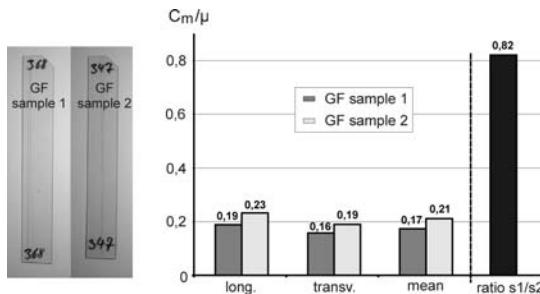


Bild 8: Spezifischer Refraktionswert für GFK-Proben aus Glasfaserfilamenten unterschiedlicher Dicke.

Im zweiten Schritt wurden die spezifischen Refraktionswerte an den mit Epoxidharz getränkten oben genannten Glasfasergelegen (GFK-Proben) durchgeführt (s. Bild 8). Der Absolutwert der spezifischen Refraktionswerte nahm um ca. 60% ab, da der Dichteunterschied zwischen EP-Matrix und der Faser deutlich geringer ist als zwischen der Faser und Luft im ungetränkten Zustand. Dieses Potential an Messeffekt wird bei der nachfolgend diskutierten Analyse von Mikrorissen infolge mechanischer Beanspruchung ausgenutzt.

Hingegen blieb das Verhältnis der ermittelten spezifischen Refraktionswerte im Rahmen der Messgenauigkeit unverändert bei ca. 0,8 (s. Bild 8). Wie erwartet war die innere Oberfläche der Fasern zur EP-Matrix der GFK-Probe aus Gelege-Halbzeug 2 gleichermaßen um 25% größer als die der GFK-Probe aus Halbzeug 1. Um einen unabhängigen physikalischen Beleg für die unterschiedlichen Filamentdurchmesser der jeweiligen Faserhalbzeuge zu geben, wurden mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) Aufnahmen angefertigt (s. Bild 9) und je 10 Faserfilamente im Durchmesser vermessen. Der Filamentdurchmesser des Halbzeugs 1 ist im Mittel um ca. 33% größer als der des Halbzeugs 2. Die inneren Oberflächen verhalten sich umgekehrt proportional, so dass dem o.g. Verhältnis der Refraktionsmessungen der Wert 0,75 entspricht. Unter Berücksichtigung der großen Streuung bei den Durchmessern der einzelnen Faserfilamente, insbesondere bei Halbzeug 1, decken sich im Rahmen der Messauflösung die REM-Untersuchungen mit den Ergebnissen aus den Refraktionsmessungen, die auf Mittelwerten aus Millionen von Faserfilamentdurchmessern beruhen.

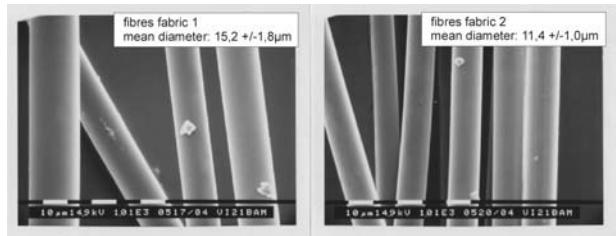


Bild 9: REM-Aufnahmen der Faserfilamente beider Gelegehalbzeuge.

5. ZUGVERSUCHE UND „ON-LINE“-REFRAKTIONSMESSUNG

Im experimentellen Aufbau wurde eine MINIMAT-Kleinzugprüfmaschine in den Röntgenrefraktionsscanner integriert. Auf die in der Zugprüfmaschine eingespannte Probe wird in Stufen zunehmend Last aufgebracht, während in jeder Laststufe über das Refraktionsmessverfahren neu entstandene innere Oberflächen ermittelt werden (s. Bild 10).

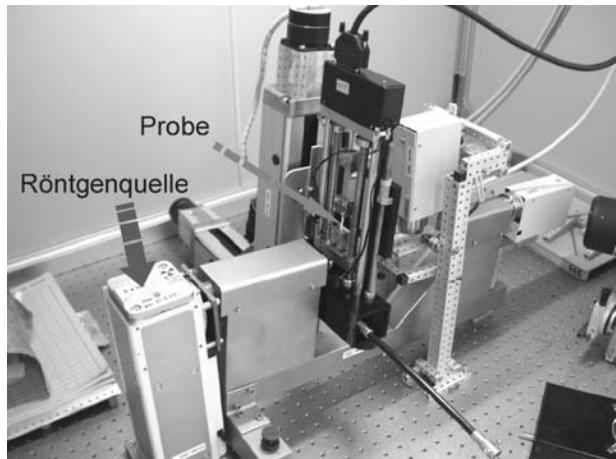


Bild 10: Refraktionsanlage mit integrierter Zugprüfmaschine

Als komplexes Laminat wurden $+/ - 45^\circ$ - und $0^\circ/90^\circ$ -GFK-Proben aus dem oben genannten Leinwandgewebe mit Epoxidharzmatrix hergestellt. Im Zugversuch an diesen Laminaten werden hohe Zwischenfaserbruchbelastungen (intralaminare Schub- und Querzugbeanspruchung) aufgebracht. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt [3, 4, 7], dass insbesondere bei dieser intralaminaren Beanspruchung Mikrorisse entstehen. Dies wird in Experimenten an beiden GFK-Laminaten bestätigt (s. Bild 11 und 12). Bei den $+/ - 45^\circ$ -GFK-Proben beträgt die Dehnung bis zum Probenbruch ca. 18%. Unter Berücksichtigung der gemessenen Querkontraktion von 0,5 ergibt dies mit Hilfe nachfolgender Formel,

$$\omega = \text{inv} \tan \frac{1 + \varepsilon_x}{1 - \varepsilon_y} \quad (7)$$

dass beim letzten gemessenen Refraktionswert bei ca. $\varepsilon = 14\%$ die Faserwinkel von 45° auf über 50° ansteigen,

was zu einer Abnahme des Refraktionswert um ca. 17% führt. Somit wurde die Änderung des Ausgangs-Refraktionswertes infolge der Verdrehung aller Faserfilamente mit Hilfe von Gl. (6) und (7) korrigiert, um die relative Änderung ΔC , resultierend aus der Bildung von neuen inneren Oberflächen infolge Mikrorissbildung, separieren zu können (s. Bild 11). Je nachdem, ob die entstandenen Mikrorisse als quasi isotrop oder der Faserorientierung folgend zu betrachten sind, müsste der Beitrag zum Refraktionswert ebenfalls einer Korrekturrechnung unterzogen werden. Wie in Bild 11 dargestellt, wäre der Unterschied im Ergebnis jedoch nur gering.

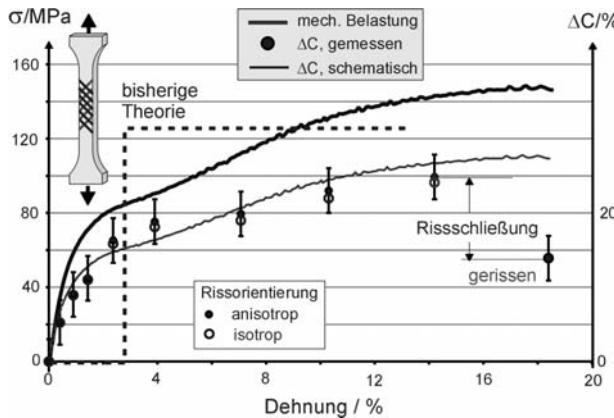


Bild 11: Zugversuch an einer $+/45^\circ$ -GFK-Probe (Leinengewebe) und „online“ Refraktionsmessung – Faserwinkel-Änderung berücksichtigt

Bei den $0^\circ/90^\circ$ -GFK-Proben tritt eine Faserwinkeländerung infolge mechanischer Belastung nicht auf. Bei beiden Experimenten korreliert die Bildung von Mikrorissen gemessen über die relative Änderung des Refraktionswertes gut mit den mechanischen Eigenschaften. Die SFA [1] gibt weder qualitativ noch quantitativ das Zwischenfaserbruchversagen wieder. Zwischenfaserbrüche treten schon weit unter der nach der herkömmlichen SFA berechneten kritischen Last auf. Zudem ist das Wesen des Versagensverhaltens kein Einzelereignis, sondern ein statistischer Prozess, wie es aus der Feinstruktur (um einen Mittelwert von Orientierungen und Abständen streuende Faseranordnung) des Werkstoffs auch zu erwarten ist. Während bei der $+/45^\circ$ -GFK-Probe unter Zug gekoppelt intralaminare Querzug- und Schubbeanspruchung auftreten, liegt bei der $0^\circ/90^\circ$ -Probe eine reine Querzugbeanspruchung vor und das statistische Auftreten von Zwischenfaserbrüchen kann mit einer Weibull-Verteilung approximiert werden (s. Bild 13):

$$F = 1 - e^{(-\sigma/\beta)^\alpha} \quad \text{und} \quad f = \frac{dF}{d\sigma} ; \alpha, \beta \text{ Parameter} \quad (8)$$

Bei der $0^\circ/90^\circ$ -GFK-Probe erreicht bei einer Dehnung von ca. 0,7% die Bildung von Querzugrissen und somit die Änderung des Refraktionswertes eine Sättigung (s. Bild 12). Bis zum Probenbruch tragen ab hier nur noch die 0° -Fasern, und das Werkstoffverhalten ist linear-elastisch. Das gemessene $\Delta C_{100\%}$, also der Sättigungszu-

stand mit Zwischenfaserbruchereignissen, wird multiplikativ mit der Verteilungsfunktion verknüpft. Als charakteristischer Zwischenfaserbruch-Kennwert kann nun ein bestimmter Schädigungsgrad gewählt werden. Zum Beispiel entspricht die Anwendung der bisherigen SFA einem Schädigungsgrad von 85% (s. Bild 13). Im Hinblick auf schwingende Beanspruchungen sollte möglichst ein kleiner Schädigungsgrad und bei einer Dimensionierung gegen selten auftretende hohe Lasten ein größerer gewählt werden. Es bleibt zu prüfen, in wieweit die Mikrorissbildung bei statischer Last mit der Schwingfestigkeit des FVW korreliert. Dabei muss die beobachtete Risschließung berücksichtigt werden. In weiteren Untersuchungen ist geplant, die Mikrorissbildung bei reiner intralaminaren Schubbeanspruchung zu messen und Rechenverfahren zur Behandlung kombinierter Querzug-Schub-Beanspruchungen zu entwickeln.

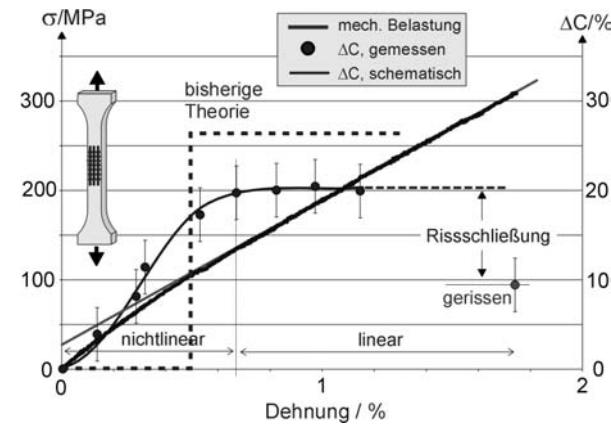


Bild 12: Zugversuch an einer $0^\circ/90^\circ$ -GFK-Probe (Leinengewebe) und „online“ Refraktionsmessung

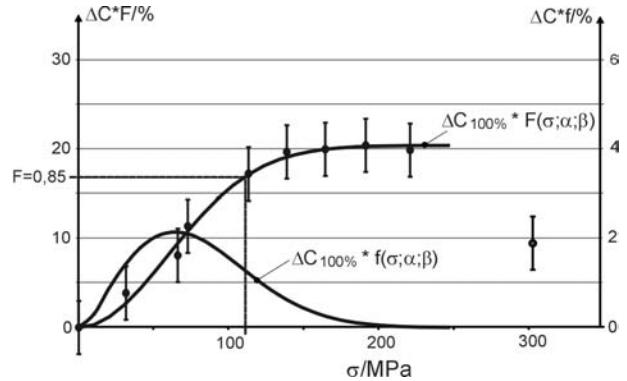


Bild 13: Approximation der Mikrorissentwicklung mit einer WEIBULL-Verteilung

6. ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe der Röntgenrefraktionstechnik lassen sich zerstörungsfrei innere Oberflächen in Faserverbundwerkstoffen quantitativ bestimmen. Somit eignet sich das Verfahren zur Qualitätskontrolle von Fertigungsverfahren und zur Charakterisierung der Mikrorissbildung (intralaminare Schädigung) in Faserverbundwerkstoffen infolge mechanischer Beanspruchung.

Es wurde eine neue Methode entwickelt, mit der das Zwischenfaserbruchversagen in komplexen Laminaten ermittelt werden kann. Hierzu wurde die Methode der Röntgenrefraktionstopographie mit einer gleichzeitigen mechanischen Belastung von FVW-Proben gekoppelt. Erste Ergebnisse zeigen, dass die Einzelschicht im Schichtverbund nicht lokal als einzelner Sprödbruch versagt, sondern der Zwischenfaserbruch einen statistischen Prozess der Bildung von Mikrorissen darstellt. Dieser gemessene Prozess kann für Querzugbeanspruchung mit einer Weibull-Verteilung approximiert und ein Schädigungsgrad definiert werden. Als Zwischenfaserbruchkennwert (design-allowable) ist es zweckmäßig, einen Schädigungsgrad festzulegen, der sich an der voraussichtlichen Betriebsbeanspruchung des FVW orientiert.

7. SCHRIFTTUM

- [1] Puck, A.: „Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten“; Hanser, München 1996
- [2] Hentschel, M.P., Harbich, K.-W., Lange, A.: „Non-destructive evaluation of single fiber debonding in composites by X-ray refraction“, NDT&E International, Vol. 27, 5 (1994) 275
- [3] Trappe, V.: „Beschreibung des intralaminaren Ermüdungsverhaltens von CFK mit Hilfe innerer Zustandsvariablen“, Reihe 5, Nr. 646, VDI-Verlag, Düsseldorf 2002
- [4] Trappe, V., Harbich, K.-W., Ernst, H.: „Damage State of CFRP characterized non-destructively by X-Ray-Refraction-Topography and Ultrasound“; 48th International SAMPE Symposium, Long Beach, USA 2003, Proceedings Vol. 48-1 S. 1228-1239
- [5] HARBICH, K.-W., HENTSCHEL, M.P., IVERS, H., RUDOLPH, H.-V., TRAPPE, V., NIEBERGALL, U.: „Mikroriss-Charakterisierung mittels Röntgen-Refractions-Topographie“, DGZfP-Jahrestagung: ZfP in Anwendung, Entwicklung und Forschung; Weimar, 06. – 08.Mai 2002
- [6] FENSCH-KLEEMANN, F.E., HARBICH, K.-W., HENTSCHEL, M.P.: „Microstructural Characterization of Porous Ceramics by X-Ray Refraction Topography“, cfi/Ber. DKG 79 (2002) No. 11, p. E1
- [7] Trappe, V., Harbich, K.-W.: „Intralaminar Fatigue Behavior of Fiber Reinforced Plastics (FRP)“, ICFC 3, Kyoto, Japan 2004, to be published in Int. Journal of Fatigue

8. FORMELZEICHEN		INDIZES
C	Refraktionswert	A Absorption
I	Intensität	0 Primärstrahlintensität
μ	Absorptionskoeffizient	R Refraktion
ΔC	rel. Änderung Ref.	A0 Nullwert Absorption
d	Probendicke	R0 Nullwert Refraktion
Θ	Refraktionswinkel	m Mittelwert
ω	Drehwinkel	ω Drehwinkel
ε	Dehnung	ω_0 0°-Drehwinkel
σ	Spannung	1,2,3 Nummerierung
c	Konstante	x X-Richtung
F	Verteilungsfunktion	y Y-Richtung
f	Verteilungs-Dichte	
α, β	Verteilungsparameter	