

Dauerfestigkeitsgrenze von CFK charakterisiert mit der Röntgenrefraktionstopographie in situ mechanischer Beanspruchung

Volker TRAPPE¹, Andreas KUPSCH¹, Bernd R. MÜLLER¹, Stefan HICKMANN¹
¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Kurzfassung

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) werden mit Carbon-Faser-Verstärkung (CFK) oder Glas-Faser-Verstärkung (GFK) seit geraumer Zeit im Flugzeugbau eingesetzt. Rotorblätter von Windkraftanlagen werden heute ausschließlich aus FKV hergestellt. Zudem werden FKV auch zunehmend im Automobilbau verwendet. Das geringe Gewicht, gepaart mit hohen Festigkeiten, macht diese Werkstoffklasse für moderne Leichtbauanwendungen sehr attraktiv.

Ganz allgemein sind FKV im Leichtbau von zunehmendem Interesse für Strukturbauteile, deren Versagen die Gebrauchsfähigkeit ganz oder teilweise beeinträchtigen und ggf. auch die Betriebssicherheit gefährden. Folglich ist die Kenntnis des Versagensverhaltens unter statischer und schwingender Beanspruchung von großem Interesse, um die Betriebsfestigkeit abschätzen und die Leistungsfähigkeit verschiedener Werkstoffe vergleichen zu können.

Idealerweise wird die Schädigungsentwicklung unter Betriebsbeanspruchung mit zerstörungsfreien Prüfverfahren parallel zum mechanischen Belastungsprozess „in-situ“ bestimmt. Zur Charakterisierung des Schädigungszustandes wird an der BAM schon seit geraumer Zeit mit Erfolg das Röntgenrefraktionsverfahren eingesetzt, mit dem Mikrorisse und die Faser-Matrix-Endhaftung an Faser-Kunststoff-Verbunden zerstörungsfrei bestimmt werden können. Im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes wird an CFK in-situ mechanischer Last die Mikroriss-Entwicklung unter statischer und schwingender Beanspruchung untersucht. Hierzu wurde eine kompakte Servohydraulische-Prüfmaschine aufgebaut und in den Röntgenrefraktionsscanner integriert. Die Hypothese besteht darin, dass auf Lastniveaus, bei denen keine Mikrorisse (Zwischenfaserbrüche) unter Ermüdungsbeanspruchung entstehen, der Werkstoff dauerhaft ist. Die Kenntnis der Dauerfestigkeitsgrenze ist für den Konstrukteur von großem Interesse.

Im Vortrag wird ein Überblick über den Stand des Vorhabens gegeben. In Kooperation mit BAM-8.5 wurden zudem vergleichende Messungen am Synchrotron (BESSY II) durchgeführt, bei der ebenfalls eine mechanische Prüfmaschine in den Strahl integriert wurde und mit hoher Ortsauflösung die Zwischenfaserbruchentwicklung aufgezeichnet werden konnte. Es bestätigten sich in sehr guter Weise die Laborergebnisse der konventionellen Röntgentechnik.



Dauerfestigkeitsgrenze von CFK

charakterisiert mit der Röntgenrefraktionstopographie in situ mechanischer Beanspruchung

V. Trappe, A.Kupsch, B.R. Müller, S. Hickmann

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Schädigungsbeginn und Lebensdauer

- Schädigungsbeginn weit vor Versagen frühzeitig zerstörungsfrei nachweisbar

Ziel: Vorhersage für VHCF aus der Messung der Schädigungsentwicklung bei HCF

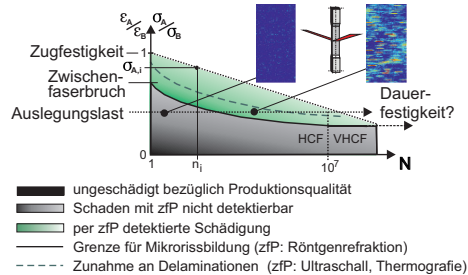


Abb. 1: Lebensdauer und nachweisbare Schädigung

Aufgebaute Messtechnik

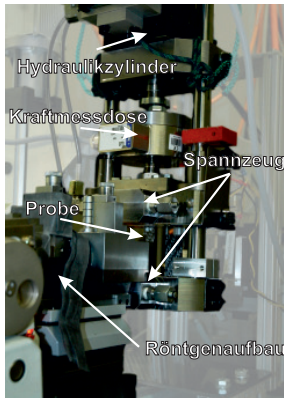


Abb. 2: Prüfrahen In-situ SAXS

- Aufbau zweier servohydraulischer Prüfmaschinen für (V)HCF und In-situ-Röntgenmessungen
- +/- 9kN Prüfkraft schwingend kraft- oder weggeregelt
- Prüffrequenzen: 50Hz im Röntgenrefraktionsaufbau und 100 Hz im externen Prüfrahmen erprobt
- Probenerwärmung bei VHCF-Lastniveau vernachlässigbar – auch für +/- 45°-Laminat
- bessere Rissdetektion unter Vorlast
- Messung in situ - kein Aus- und Einspannen der Probe

Schädigungsentwicklung bei kleinen, mittleren und hohen Lastspielzahlen

- zerstörungsfreie Schädigungsdetektion mittels Röntgenrefraktionsmessung
- Schwingversuche bei R = 0.1 bis N > 10⁸ für Proben aus 0/90°-Gewebe und Gelege sowie +/- 45°-Gewebe
- 1. Ergebnis - wenn sich keine Mikrorisse bis 10⁶ (HCF) einstellen, zeigt sich kein Probenversagen bis 10⁸ (VHCF)
- 2. Ergebnis - für LY556/CF gilt: Lastniveau unter ~50 % ZFB-Lastniveau → keine Mikrorisse messbar → VHCF dauerfest

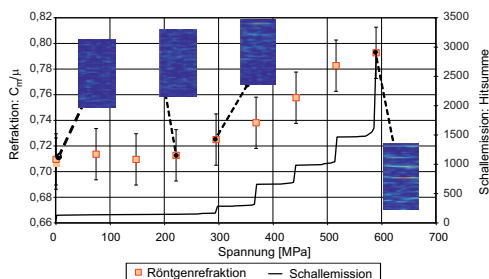


Abb. 3: In-situ SAXS im Zugversuch mit Schallemissionsmessung

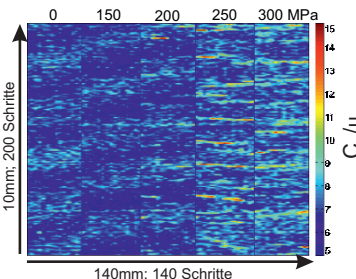


Abb. 4: SAXS nach N = 10⁶, (R = 0,1)

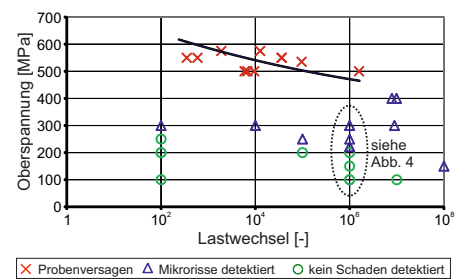


Abb. 5: S-N - Diagramm für 0/90° Gewebe-Laminat

Vergleich der Laborergebnisse im SAXS-Aufbau mit Messungen am Berliner Elektronenspeicherring „BESSY“

Am BESSY wurde Synchrotronstrahlung im Energiebereich der Röntgenstrahlung (25 keV) genutzt, um Mikroschädigung und Zwischenfaserbrüche in FVK hochaufgelöst und in situ in Zugversuchen zu ermitteln.

- Erzeugung des Refraktionskontrastes am BESSY über einen Analysekestrahl im Parallelstrahl (s. Abb. 6 u. 7)
- Über den Kristall misst das Gesichtsfeld 6,5 mm x 14 mm, die Probe kann damit in voller Breite in situ im Zugversuch betrachtet werden (s. Abb. 7).
- Eine CFK-Probe mit hoher Mikrorissdichte (vorheriger Schwingversuch) wurde mit 5 Einzelaufnahmen über 23,1 mm quasi flächendeckend am BESSY untersucht. Pixelgröße (7,2 μm)²
- Vergleichend zeigt der SAXS-Laboraufbau mit 67 x 40 Pixel, Pixelgröße 50 μm x 1000 μm qualitativ den gleichen Befund (s. Abb. 8).
- Die Risse folgen den Faserfilamenten und laufen nicht exakt horizontal.
- Mit dieser Erkenntnis wurden die Labormessung bezüglich Rasterauflösung und Messzeit optimiert.

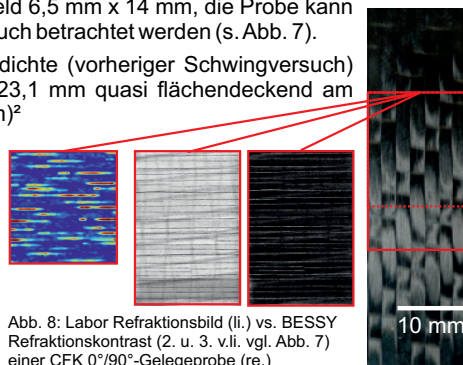


Abb. 8: Labor Refraktionsbild (li.) vs. BESSY Refraktionskontrast (2. u. 3. v.li. vgl. Abb. 7) einer CFK 0°/90°-Gelegeprobe (re.)

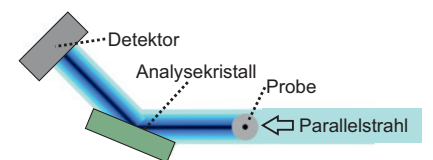


Abb. 6: Schematischer Versuchsaufbau am Synchrotron

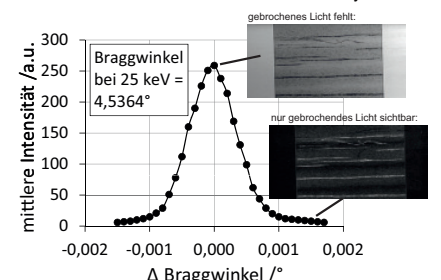


Abb. 7: Aufnahmeänderung entlang der Rocking Curve

Finanziell unterstützt im Rahmen des SPP-1466 durch