

Schadensdetektion und Lebensdauerabschätzung an schwingbeanspruchten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen

Prof. Dr. Berthold von Großmann

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
Kompetenzzentrum Analytik- Nano- und Materialtechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Prof. Dr. Thomas Sandner

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
Kompetenzzentrum Analytik- Nano- und Materialtechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Wesentliche Projektziele:

Ziel des Projekts war die Untersuchung des Verhaltens von CFK-Strukturen bei einer Beanspruchung unter einer wechselnden, dynamischen Belastung. Insbesondere soll das Auftreten der wesentlichen Schädigungsmechanismen wie Delamination, Zwischenfaserbruch und Faserbruch und die Auswirkungen auf die Restfestigkeit des Materials untersucht werden. Zur Charakterisierung der Schädigungen wurden die Verfahren Phased-Array-Ultraschall, Computertomographie und Acoustic Emission eingesetzt. Anhand der gewonnenen Daten soll ein Schädigungsmodell abgeleitet werden, dass die Vorausberechnung der Lebensdauer von Faserverbundkonstruktionen in Abhängigkeit von den wirkenden dynamischen Lasten erlaubt.

1. Projektdaten

Fördersumme	29.700 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2015
Fakultät /Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik Kompetenzzentrum Analytik- Nano- und Materialtechnik
Projektleitung	Prof. Dr. Berthold von Großmann
Kontaktdaten	E-Mail: berthold.vongrossmann@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Der heutige Kenntnisstand über das Ermüdungsverhalten von Faserverbundwerkstoffen hat noch nicht zu praxistauglichen und allgemeingültigen Berechnungsverfahren für die Bauteillebensdauer und Betriebsfestigkeit von Leichtbaukonstruktionen aus Faserverbunden geführt, wie man das z.B. bei traditionellen Konstruktionswerkstoffen im Maschinenbau gewohnt ist. Ursache ist der nach wie vor hohe Forschungsbedarf zu den komplexen Versagensmechanismen der Faserverbunde, insbesondere bei dynamischer Beanspruchung. Insbesondere die Kenntnis des Schädigungsverhaltens und des Schädigungsfortschritts ist ein wichtiger Schlüssel zum vertieften Verständnis der Verbundwerkstoffe.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Es sollen Wöhlerlinien- und Restfestigkeitsversuche zu praxisrelevanten Beanspruchungen an Laminataufbauten aus kohlefaserverstärkten Kunststoffen durchgeführt werden. Die dabei auftretenden Schädigungsvorgänge sollen im Versuch durch geeignete Detektionsmethoden sichtbar gemacht und interpretiert werden. Zur Detektion der Fehler sollen verschiedene, sich ergänzende Verfahren der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt werden. Aus den Erkenntnissen zur Restfestigkeit, Lebensdauer und sukzessiver Schädigung soll ein Schädigungsmodell abgeleitet werden, dass die Vorausberechnung der Lebensdauer von Faserverbundkonstruktionen in Abhängigkeit von den wirkenden dynamischen Lasten erlaubt. Das Berechnungsschema soll die Praxistauglichkeit, Robustheit und Zuverlässigkeit aufweisen, wie sie für traditionelle Konstruktionswerkstoffe selbstverständlich sind.

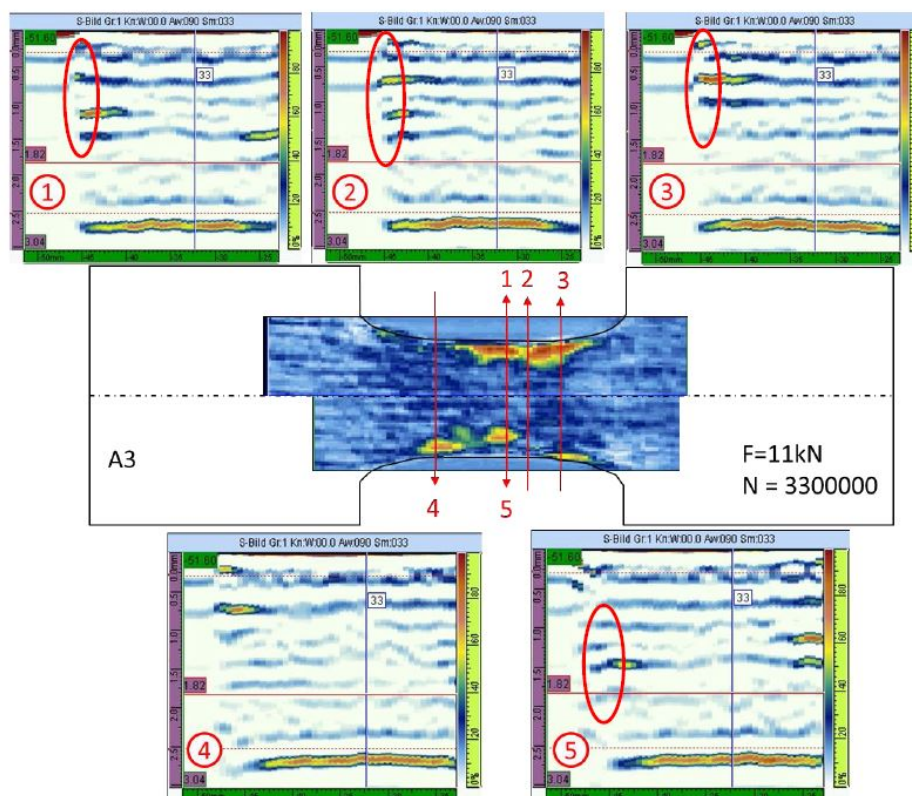
4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Es wurden Versuchsreihen mit dynamisch auf Zug/Druck belasteten Flachproben aus quasiisotropem CFK-Laminat durchgeführt. Das Verhältnis zwischen Zug- und Druckspannungsamplitude (R-Verhältnis) wurde in den Versuchsreihen variiert. Die Versuche lieferten Wöhlerlinien – d.h. Bruchlastspielzahlen N_B in Abhängigkeit von Spannungsamplitude und R-Verhältnis.

Außerdem wurden Restfestigkeitsversuche durchgeführt, die die für eine vorgegebene Lastspielzahl $N < N_B$ und Spannungsamplitude verbleibende Zugfestigkeit ergeben. In ausgewählten Versuchsreihen wurden versuchsbegleitend Schallsignale mit der Acoustic Emission Methode aufgezeichnet. Damit konnte die fortschreitende Schädigung des Materials während des Versuchs beobachtet werden. Außerdem wurden an teilgeschädigten Proben US-Untersuchungen vorgenommen und Probenschliffe lichtmikroskopisch ausgewertet. Die Auswertung der Versuche ergab:

- Die Abhängigkeit der Bruchlastspielzahlen von der Höhe der Spannungsamplituden und dem R-Verhältnis zeigt eine deutliche Systematik, die sich mathematisch beschreiben lässt.
- Auch der Kurvenverlauf der Restfestigkeit über der Lastspielzahl lässt sich mathematisch beschreiben und zeigt eine systematische Abhängigkeit vom R-Verhältnis. Da die Restfestigkeit umgekehrt proportional zur Laminatschädigung ist, lässt sich aus den Ergebnissen folgern, dass der zeitliche Ablauf der Schädigung sehr stark vom R-Verhältnis abhängt.

- Durch den Einsatz unterschiedlicher, sich ergänzender Methoden der Schadensdetektion wie Computertomographie, Acoustic Emission und Ultraschallprüfung konnte eine fortschreitende Schädigung der Faserstrukturen, die bereits nach wenigen Lastwechseln einsetzt, nachgewiesen werden, siehe Abbildung. Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Detektionsmethoden konnten auch mit einer materialographischen Untersuchung der belasteten Proben mit Hilfe der Lichtmikroskopie bestätigt werden.
- Der Zusammenhang zwischen Restfestigkeit und fortschreitender Schädigung konnte mit der Acoustic Emission Methode zwar detektiert werden, eine Quantifizierung des Zusammenhangs erweist sich allerdings als schwierig. Die US-Untersuchungen ließen die fortschreitende Schädigung der Matrix erkennen, nicht aber den eigentlichen Restfestigkeitsverlust durch Faserrisse.
- Mit den Versuchsergebnissen konnte ein existierendes, eigenentwickeltes Programm zur schichtweisen Berechnung der statischen Beanspruchung und Festigkeit von Laminaten so erweitert werden, dass es auch die schichtweise Lebensdauerberechnung für dynamische Beanspruchung eines Laminats erlaubt. Das Berechnungskonzept des Programms ist so flexibel und offen gewählt, dass die nun vorhandene Programmbasis in ihrer Aussagegenauigkeit jederzeit mit Hilfe weiterer, eigener Versuche sowie in der Literatur oder Datenbanken dokumentierten Versuchsergebnissen verbessert werden kann.



Detektion der Schädigung mit einer zerstörungsfreien Phased-Array-Ultraschallprüfung an einer CFK-Probe bei einer Spannungsamplitude von 145 MPa nach $3,3 \cdot 10^6$ Lastwechseln. Die genaue Lage und Größe der Schädigung kann anhand der Scans ermittelt werden.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die in dem Vorlaufforschungsprojekt gewonnenen Ergebnisse ermöglichten es, ein tragfähiges Konzept für die Lebensdauerberechnung von CFK-Laminaten zu entwickeln und in ein entsprechendes Berechnungsprogramm umzusetzen. Die für die Lebensdauer eines Laminats wesentlichen Einflussgrößen wurden konsequent im Programm berücksichtigt. Zudem konnten im Rahmen des Projekts die zerstörungsfreie Prüfmethode der Phased-Array-Ultraschalltechnik weiter optimiert und die Methode der Acoustic Emission erstmalig an der TH Nürnberg für CFK-Strukturen eingesetzt werden. In Kooperation mit dem Fraunhofer Entwicklungszentrum für Röntgentechnik konnte zudem die Computertomographie für die Schadensdetektion eingesetzt werden.

Als nächster Schritt soll die Datenbasis durch eine größere Anzahl an Dauerschwingversuchen (bei unterschiedlichen R-Verhältnissen) ausgebaut werden und damit die Verlässlichkeit und die Aussagefähigkeit des Modells weiter optimiert werden. Zudem ist es auch möglich die Aussagekraft des Modells durch das Einpflegen von Versuchsergebnissen aus der Literatur oder aus Datenbanken in das Modell weiter zu verbessern. Bei einer ausreichenden Validierung des Modells sollen die Ergebnisse in einer wissenschaftlichen Zeitschrift publiziert werden.

Letztendlich ist es das Ziel das ermittelte Lebensdauermodell auch auf reale, mehrachsige Bauteile anwenden zu können. Mit dem vorliegenden Projekt ist das Ziel etwas näher gerückt.