

Zerstörungsfreie Detektion von Schädigungsprozessen bei Ermüdungsbelastung von Polymermatrix- Faserverbundwerkstoffen

Christian SCHNEIDER¹, Johannes WIENER¹, Clemens SPERLING¹, Gerald PINTER¹,
Andreas J. BRUNNER²

¹ Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

² Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Science and
Technology, Dübendorf, Schweiz

Kontakt E-Mail: christian.schneider@unileoben.ac.at

Kurzfassung. In den letzten Jahrzehnten wurden Verbundwerkstoffe in fast allen Industriezweigen eingesetzt. Insbesondere die Ermüdungsbeanspruchung beeinflusst die Bruchspannung in Abhängigkeit von der steigenden Anzahl der Zyklen [1, 2]. Wegen der hohen Material- und Herstellungskosten von Verbundwerkstoffen ist es notwendig, einen Mittelweg aus gutem Design und moderaten Kosten bei ausreichender Lebensdauer zu finden.

Der effizienteste Weg, die Lebensdauer eines Bauteils abzuschätzen, ist die Simulation, kombiniert mit der Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von Verbundwerkstoffen. Dafür ist es wichtig, viele grundlegende Informationen über Rissinitiierung und Schadensausbreitung innerhalb des Verbundwerkstoffs zu erhalten. Mit Hilfe des spannungsbasierten Ansatzes mit experimentellen S/N-Kurven (Spannungsamplitude vs. Lastspielzahl) ist eine erste Abschätzung der Lebensdauer von Bauteilen möglich [3-5]. Um Vorhersagen von Versagensprozessen im Detail vergleichen zu können, sind jedoch Methoden zur Schädigungserkennung während der Prüfung erforderlich.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf zerstörungsfreien Prüfmethoden, die während der Strukturprüfung anwendbar sind. Neben der visuellen Detektion sind hierfür vor allem die Methoden der Schallemission (SE), der Infrarot-Thermographie (IR) und der digitalen Bildkorrelation (DIC) relevant, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Stärken in Kombination zur umfassenden Schadensdetektion eingesetzt werden können. Vor allem die SE macht die Kombination aus hoher Empfindlichkeit für die Erkennung des Auftretens mikroskopischer Schäden und der in-situ-Anwendbarkeit zu einer idealen Methode für die zerstörungsfreie Charakterisierung von Schadensakkumulation [6, 7].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden einerseits quasistatische Zugversuche, andererseits Ermüdungsversuche im zugschwellenden Bereich an glasfaserverstärkten Kunststoffen mit diversen Lagenaufbauten durchgeführt. Um Aussagen über die Schädigungsentwicklung mit der Schallemissionsanalyse treffen zu können, wurden neben SE-Sensoren auch ein DIC-System, sowie ein Thermosensor eingesetzt. Damit war es möglich, die Abfolge von Versagensvorgängen für fortschreitende Schädigungen, wie beispielsweise die Entwicklung der Steifigkeit bzw. der Poissonzahl im Ermüdungsversuch, darzustellen. In weiterer Folge wurden die Ergebnisse aus den eingesetzten Messmethoden verglichen und mit Signalen aus der SE korreliert.



Einführung

Faserverbundwerkstoffe (FVW) sind allgegenwärtig. In den letzten Jahrzehnten haben Composites in nahezu jeder Branche Einzug gehalten. Waren Composites anfangs nur in sogenannten Hochleistungsbauteilen eingesetzt, so wurde das Einsatzgebiet mit Erfüllung diverser technischer Anforderungen immer größer. Spätestens mit der Entwicklung der Möglichkeit zur Serienfertigung von Composite-Bauteilen wurden auch die Luftfahrt- und später die Automobilindustrie auf diese Werkstoffe aufmerksam. War der Massenanteil von Verbundwerkstoffen in der Luftfahrtindustrie in den 2000er Jahren noch bei etwa 20 % des Gewichts, beträgt er heute über 50 %.

In nahezu allen Einsatzgebieten von Composites wirken mechanische Ermüdungslasten auf die Bauteile ein. Diese üben großen Einfluss auf die Versagensbeanspruchung von Composites, da die Bruchspannung mit steigender Zyklenzahl deutlich reduziert wird [1, 2]. Der effizienteste Weg, die Lebensdauer eines Bauteils abzuschätzen, ist die Simulation, welche mit einer fundierten Materialcharakterisierung des Ermüdungsverhaltens von FVW untermauert sein muss. In diesem Beitrag liegt der Fokus auf der Detektion von Rissinitiierung und Schadensausbreitung im Werkstoff.

1 Überlegungen aus der Betriebsfestigkeit

Eine Möglichkeit zur Beschreibung von definierten Belastungssituationen in Bauteilen ist der spannungsbasierte Ansatz, der auf experimentellen S/N-Kurven basiert (Spannungsamplitude vs. Anzahl der Zyklen). Hierbei werden definierte Probekörper unter zyklischer Belastung mit variierender Belastungshöhe beaufschlagt und entweder bis zum finalen Versagen oder bis zu Anrissbildung belastet. So entstehen die sogenannten Wöhler-Diagramme, die unter Nutzung der Schadensakkumulationstheorie von Miner eine Lebensdauerabschätzung von Bauteilen ermöglichen (siehe Abb.1) [3-5, 8].

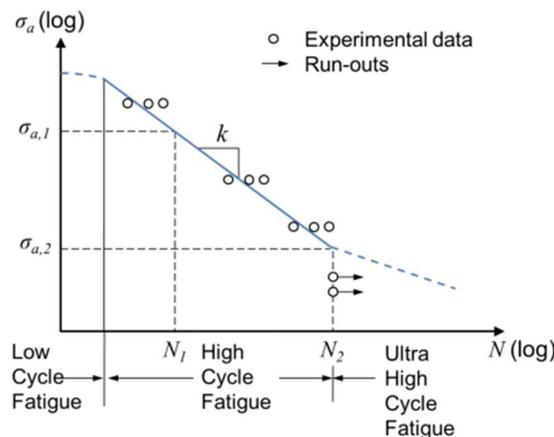


Abb. 1: Schematische Darstellung eines S/N-Diagramms, auch bekannt als Wöhler Diagramm [3].

1.1 Betriebsfestigkeit bei faserverstärkten Kunststoffverbunden

Eigentlich aus dem Bereich der metallischen Werkstoffe kommend, wird dieser Ansatz seit einiger Zeit auch für Composites unter Berücksichtigung der Versagenskriterien nach Puck angewendet. Diverse Versuche haben bereits gezeigt, dass mit dem oben erwähnten Ansatz eine Lebensdauerabschätzung für unidirektional verstärkte Polymere möglich ist. Für einen multiaxialen Lagenaufbau korreliert die Lebensdauer vorhersage jedoch nicht mit den Ergebnissen aus den Tests [9-12].

Bei der Ermüdungsbelastung an Composites kann von der Rissinitiierung, die meist von Matrixrissen entlang der Fasern ausgeht, bis zum Eintreten des endgültigen Versagens noch eine große Anzahl von Lastspielvorgängen möglich sein. Die entstehenden Risse haben zwar einen Abfall der Steifigkeit des Verbundes zur Folge, der sich aber nach einiger Zeit stabilisiert. Dieses Verhalten ist ein Zusammenwirken von Risswachstum, interlaminarer Rissausbreitung und letztendlich resultierend in Delamination im Prüfkörper. Erst mit fortschreitender Delamination und beginnenden Faserbrüchen steigt die Schädigungsgeschwindigkeit wieder an und der Prüfkörper versagt [2, 13]. Abbildung 2 links zeigt schematisch den relativen Abfall der Steifigkeit über die Lebensdauer; rechts sind schematisch die Zunahme der Schädigung sowie die dazugehörigen Mechanismen dargestellt. Diese entstehenden Risse haben zwar einen Abfall der Steifigkeit des Verbundes zur Folge, der sich aber nach einiger Zeit stabilisiert und erst kurz vor dem Versagen des Prüfkörpers wieder abfällt. Dieses Verhalten ist ein Zusammenwirken von Risswachstum interlaminarer Rissausbreitung und beginnender Delamination im Prüfkörper. Erst mit fortschreitender Delamination und beginnenden Faserbrüchen steigt die Versagensgeschwindigkeit wieder an und der Prüfkörper versagt.

Da aber dieser stabilisierte Bereich abhängig vom Lastniveau bis zu 80 % der gesamten Lebensdauer erreichen kann, ist die Verwendung der Rissinitiierung als End-of-Life-Kriterium bei faserverstärkten Kunststoffverbunden nicht weiter zielführend.

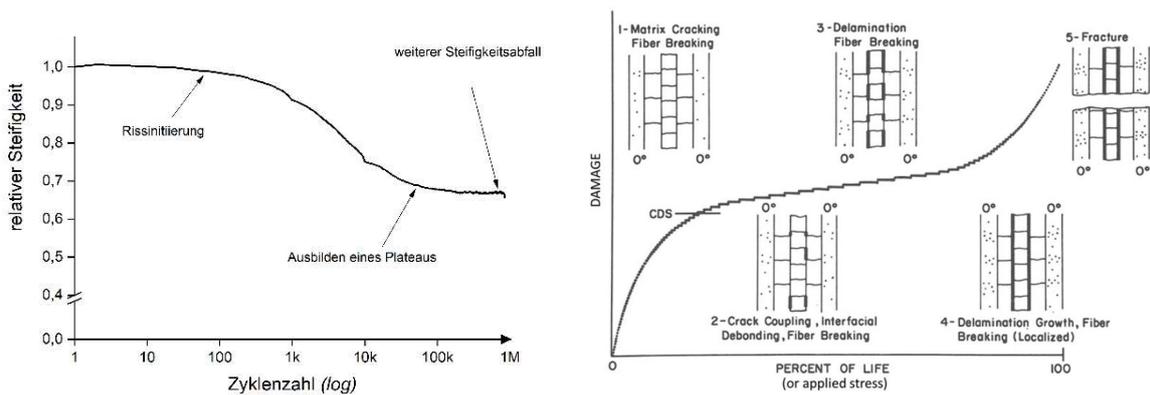


Abb. 2: Links: Schematische Darstellung des Steifigkeitsabfalles an FVW bei Ermüdungsbelastung. Rechts: Schematische Darstellung der Schädigungsentwicklung und Moden im Ermüdungsversuch [2, 13]

2 Einbeziehung zerstörungsfreier Prüfmethode

Eine deutlich bessere Definition für End-of-Life wäre der oben beschriebene Abfall der Steifigkeit vor Versagen des Prüfkörpers. Hierfür ist aber die Identifizierung der Versagensmechanismen und der entsprechenden Wirkungsabfolge unerlässlich. Wenn es gelingt, die im laufenden Versuch auftretenden Versagensmechanismen zu detektieren und zu identifizieren, kann der Steifigkeitsabfall kurz vor dem Versagen des Prüfkörpers genauer beschrieben werden und in weiterer Folge das Versagen vorhergesagt werden. Um jedoch den gesamten Versagensprozess nachweisen zu können, ist es notwendig, die Abfolge der Versagensereignisse und die damit verbundenen Steifigkeitsänderungen während der Prüfung verfolgen zu können. Neben der visuellen Detektion sind hierfür vor allem die Schallemission (SE), die Infrarot-Thermografie und die Digitale Bildkorrelation (DIC) relevant, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Stärken für eine umfassende Schadensdetektion kombiniert werden können.

2.1 Warum Schallemission?

Die hohe Empfindlichkeit für die Erkennung von mikroskopischen Schädigungen im laufenden Versuch macht die SE zu einer idealen Methode für die zerstörungsfreie Prüfung von Schadensakkumulationen in vielen Materialien [6]. Die wohl größten Nachteile der SE bei der Verwendung in faserverstärkten Kunststoffen sind einerseits die mäßige Genauigkeit bei der Lokalisierung von AE-Signalquellen und die vergleichsweise hohe Dämpfung von Signalen. Darüber hinaus war die eindeutige Identifikation spezifischer Schädigungsmechanismen in FVW anhand der SE-Signalparameter lange Zeit schwierig [14]. Dank der Entwicklung einer Methodik kann mittels einer neuen Art von Mustererkennung unter Einbeziehung von künstlicher Intelligenz [7] eine Zuteilung von SE-Signalen in diverse Klassen erreicht werden. Mit Hilfe von zusätzlichen Informationen aus anderen zerstörungsfreien Prüfmethoden oder aus Finite-Elemente-Simulationen können diese Klassen in weiterer Folge bestimmten Mechanismen zugeordnet werden.

2.2 Warum Digitale Bildkorrelation?

Die beschriebene Zuteilung der Klassen für sich alleine, kann noch keine Zuordnung zu verschiedenen Schädigungsmechanismen gewährleisten. Dafür sind zusätzliche Informationen notwendig. Eine Möglichkeit hierfür ist die Ermittlung von Längs- und Querdehnungsverteilungen über die Lebensdauer, die ebenfalls Aussagen über das Auftreten von Schädigungen und deren Wachstum liefern können. Durch Korrelation dieser Verteilungen mit den akustischen Signalen wird die Erkennung und Zuordnung von Schädigungen über den Ermüdungsversuch möglich.

3 Experimentelles

Im Folgenden wird neben der Beschreibung des verwendeten Materials auch kurz auf die Herstellung der Prüfkörper eingegangen. In weiterer Folge werden auch der Prüfaufbau, sowie die Prüfprozedur näher beschrieben.

3.1 Material

Für die experimentellen Versuche wurde ein glasfaserverstärkter Kunststoff verwendet. Als Matrixwerkstoff wurde ein Epoxidharz der Marke EPIKOTE™ MGS® LR160 Harz mit einem EPIKURE™ MGS® LH160 Härter der Fa. Lange + Ritter GmbH (Gerlingen, Deutschland) gewählt. Die Faserverstärkung wurde mit einem unidirektionalen Gewebe UD 92145 der Fa. Porcher Industries Germany GmbH (Erbach, Deutschland), das ein Flächengewicht von 220 g/m² aufweist, realisiert.

3.2 Prüfkörper

Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Lagenaufbau von +/- 45° gewählt. Insgesamt wurden 12 Lagen verwendet und symmetrisch um die Mittelebene angeordnet, sodass der Lagenaufbau [(+45)₃/(-45)₃/symm.] entstand. Die Aushärtung erfolgte in einer hydraulischen Presse bei einer Temperatur von 80 °C und einer Flächenpressung von 1 MPa für 3 Stunden. Im Anschluss an die Aushärtung wurde eine Nachhärtung im Wärmeofen für 15 Stunden bei 80 °C eingehalten. Die so hergestellten Platten wurden mit angeschrägten Aufleimern aus Aluminium beklebt. Anschließend wurden rechteckige Prüfkörper mit den Abmessungen L x B x H = 200 x 20 x 2 mm aus den Platten geschnitten.

3.3 Prüfaufbau

Für die Durchführung der Ermüdungsversuche wurde eine servo-hydraulische Zug/Druck-Universalprüfmaschine mit einem 250 kN Lastrahmen, hydraulischen Klemmbacken und einer dazu passenden Kraftmessdose der Fa. MTS Systems Corporations (Minnesota, USA), benützt. Um Aussagen über Dehnungsverteilung treffen zu können wurde zusätzlich ein DIC System mit einer hochauflösenden Kamera der Fa. Sobriety Mercury d.o.o. (Blanenská, Tschechien) aufgebaut. Die Temperaturverteilung über die Versuchsdauer wurde mittels berührungslosem Infrarotsensor gemessen. Alle Versuche wurden unter Normklima durchgeführt, in dem auch die Prüfkörper vorab mindestens 24 Stunden gelagert wurden.

Für das SE Setup wurden zwei Physical Acoustics wideband differential (WD) Sensoren der Fa. MISTRAS Group Inc. (New Jersey, USA) auf die Prüfkörper nahe der Aufleimer platziert. Als dritter Sensor wurde ein Nano30 Sensor, welcher als Guard-Sensor fungierte, auf die bewegte Klemmbacke positioniert. Die Sensoren wurden mit handelsüblichem Gewebeklebeband auf dem Prüfkörper fixiert, wobei silikonfreies Schliiffett als Koppelmittel diente (siehe Abb. 3).



Abb. 3: Prüfkörper inkl. befestigter WD Sensoren

Alle Signale wurden mit 40 dB vorverstärkt und mit einer Aufzeichnungsrate von 5 MSPS aufgezeichnet. In der Software AEwin der Fa. MISTRAS Group Inc. (New Jersey, USA) wurde ein Schwellenwert von 40 dB_{AE} eingestellt, um etwaige Hintergrundgeräusche von den zyklischen Bewegungen der servo-hydraulischen Prüfmaschine zu eliminieren. Weiter wurde eine Peak Definition Time von 50 μ s, eine Hit Definition Time von 100 μ s und eine Hit Lockout Time von 300 μ s eingestellt. Die Event Definition Time wurde so gewählt, dass nur Events innerhalb der freien Klemmlänge detektiert werden, die bei allen Versuchen bei ungefähr 97 mm lag.

3.4 Prüfprozedur

Die in dieser Arbeit verwendete Prüfprozedur, ist eine Abwandlung der ursprünglich in [15] beschriebenen Ermüdungsprüfung mit zyklischen Zugversuchen (siehe Abb. 4). Hierbei wird vor Beginn der zyklischen Belastung ein weggeregelter quasistatischer Zugversuch bis etwa σ_{mean} gefahren (Bereich 1). Anschließend wird eine kraftgeregelte zyklische Belastung mit einem R-Verhältnis ($\sigma_{\text{min}}/\sigma_{\text{max}}$) von 0,1 und einer Prüffrequenz von 3 Hz aufgebracht (Bereich 2). Nach Ende des zyklischen Intervalls wird weggeregelt entlastet und abermals ein quasistatischer Zugversuch gefahren (Bereich 3), bevor wieder eine zyklische Belastung aufgebracht wird (Bereich 4). Die Punkte im den Bereichen 1 und 3 stellen schematisch die Aufnahme von Bildern mit dem DIC-System dar.

Da gerade im Anfangsbereich der Ermüdungsversuche ein relativ großer Steifigkeitsabfall im Prüfkörper stattfindet, wurden für die zyklischen Bereiche drei unterschiedliche Intervalle gewählt. So wurde bis zu einer Lastspielzahl von 1'000 Zyklen für den Bereich 2 bzw. 4 eine Intervallgröße von 25 Zyklen zwischen den einzelnen quasistatischen Zugversuchen gewählt. Für die Lastspielzahlen zwischen 1'000 und 10'000 Zyklen wurde eine Intervallgröße von 100 Zyklen und für Lastspielzahlen über 10'000

Zyklen wurde eine Intervallgröße von 1'000 Zyklen zwischen den zyklischen Zugversuchen eingestellt.

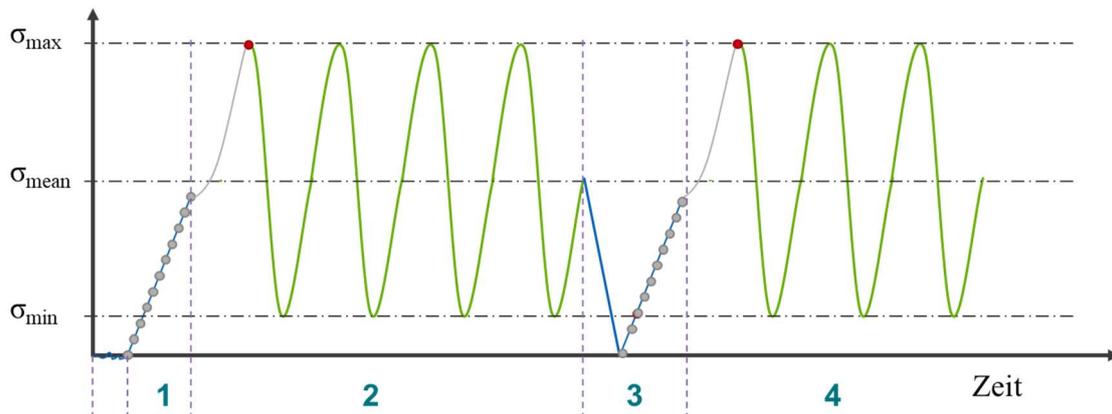


Abb. 4: Schematische Darstellung der Prüfprozedur.

4 Ergebnisse

Insgesamt wurde eine Reihe von Prüfkörpern mit einer Variation der maximalen Spannung im Rahmen dieser Arbeit geprüft. Beispielgebend wurden für die Diskussion der Ergebnisse zwei Versuche gewählt, die sich einerseits am unteren Ende der Belastung und somit einer großen Lastspielzahl befinden. Andererseits wurde ein Prüfkörper am oberen Ende der Belastung gewählt, der eine niedrige Lastspielzahl aufweist.

4.1 Ermüdungsversuch am unteren Lastniveau

In Abb. 5 sind die Entwicklungen von relativer Steifigkeit und Oberflächentemperatur dargestellt und mit der Zunahme der kumulativen Events (also der von beiden WD-Sensoren gemeinsam detektierten Hits) am Prüfkörper mit niedrigem Lastniveau verglichen. Es ist gut zu erkennen, dass die relative Steifigkeit bereits von Beginn an stark abfällt und nach etwa 50'000 Zyklen in ein Plateau mündet. Betrachtet man die Temperaturentwicklung genauer, so erkennt man einen leichten Anstieg über die fortschreitende Lastspielzahl. Dieser Anstieg kann mit der größeren hysteretischen Erwärmung in Folge von Rissöffnungsvorgängen und dem Auftreten von Reibung bei längeren Intervallen erklärt werden. Allerdings tritt hier eine Temperaturerhöhung von max. 10 °C auf, was erfahrungsgemäß keinen signifikanten Einfluss auf das Schädigungsverhalten hat.

Ein Blick auf die Entwicklung der Events zeigt vor allem am Beginn des Versuches kaum Detektionen von Ereignissen. Da aber ein Steifigkeitsabfall auf Grund von Matrixrissen erkennbar ist, scheint die Sensitivität der SE mit den gewählten Parametern nicht ausreichend zu sein. Erst mit Ausbildung des Plateaus beim relativen Steifigkeitsverlauf steigt die Anzahl der Ereignisse deutlich an und weist kurz vor dem Versagen des Prüfkörpers einen Wendepunkt auf, um in weiterer Folge nahezu ein Plateau auszubilden. Dieser Wendepunkt kann mit steigender Anzahl von Rissen, zunehmender Delamination, ersten Faserbrüchen und einer damit verbundenen Dämpfung der Ausbreitung von Schallereignissen im Prüfkörper zwischen den beiden Sensoren erklärt werden.

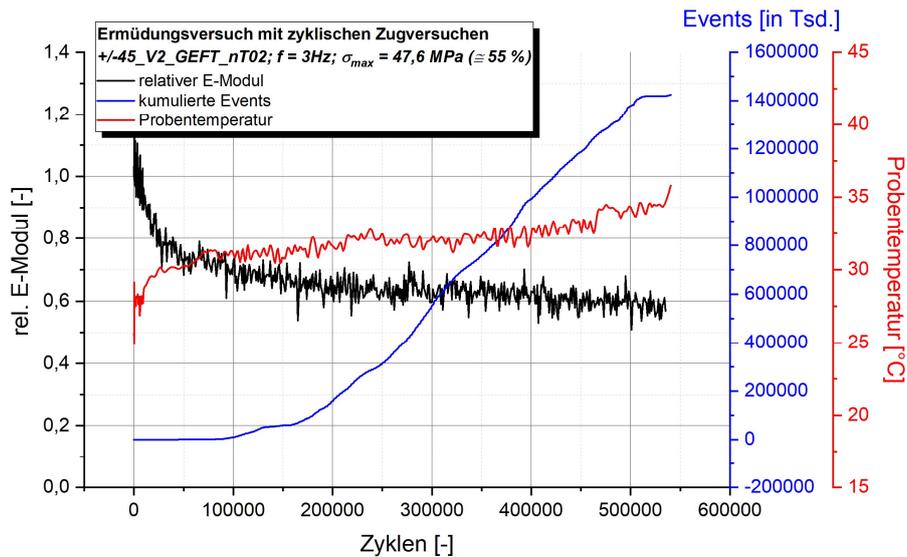


Abb. 5: Vergleich der relativen Steifigkeit sowie der Temperaturentwicklung mit akustischen Signalen an einem Ermüdungsversuch am unteren Lastniveau

4.2 Ermüdungsversuch am oberen Lastniveau

In Abb. 6 ist der Vergleich zwischen relativer Steifigkeit und kumulativer Events am Prüfkörper im oberen Lastniveau dargestellt. Auch hier ist der Abfall der relativen Steifigkeit gut zu erkennen, der allerdings bereits deutlich früher, nämlich bei etwa 10'000 Zyklen, in ein Plateau mündet. Die im Vergleich dazu aufgetragenen kumulativen Events beginnen auch bei diesem Lastniveau erst bei Ausbildung dieses Plateaus zu steigen. Interessant ist, dass auch bei diesem Versuch, im höheren Lastspielbereich ein Wendepunkt in der Darstellung der Events entsteht.

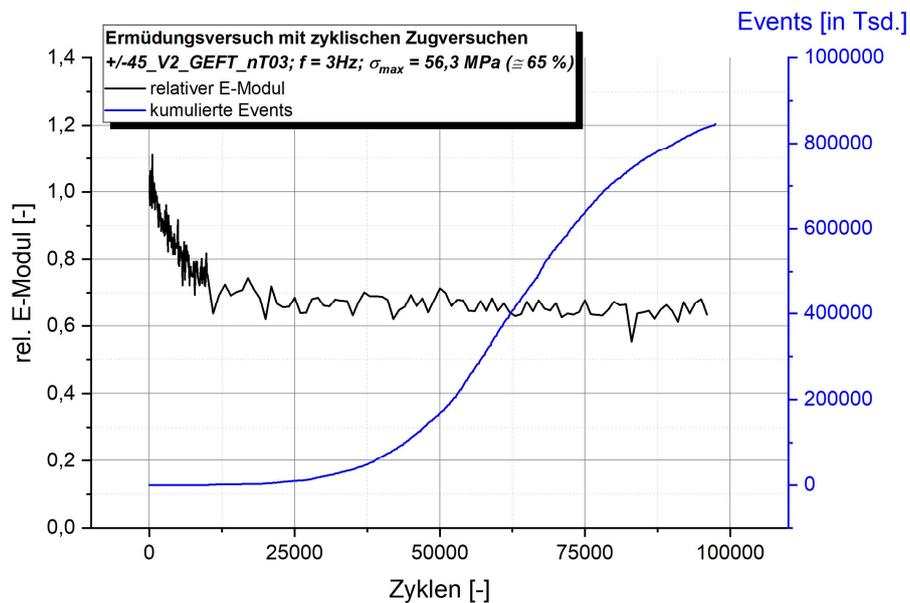


Abb. 6: Vergleich der relativen Steifigkeit mit akustischen Signalen an einem Ermüdungsversuch am oberen Lastniveau

5 Zusammenfassung

Verschiedene zerstörungsfreie Prüfmethoden wurden angewandt, um das Schädigungsverhalten von FVW während Ermüdungsversuchen mit zyklischen Zugversuchen zu charakterisieren. Dabei war es das Ziel, ein sinnvolles Abbruchkriterium noch vor der vollständigen Zerstörung der Probe festzulegen. Der Verlauf des E-Moduls mit steigender Zyklenzahl konnte dabei nur bedingt genutzt werden, da der größte Abfall gleich zu Beginn des Versuchs stattfand, während sich bis zum Versuchsende ein konstantes Plateau ausbildete. Durch die Messung der Proben temperatur konnte die hysteretische Erwärmung während des Versuches veranschaulicht werden. Obwohl dadurch Erwärmungseffekte als Fehlerquelle ausgeschlossen werden können, eignet sich die Temperaturmessung im betrachteten Fall auch nicht als Abbruchkriterium. Der beste Indikator für ein bevorstehendes Versuchsende konnte durch Schallemissions-Messungen gefunden werden. Durch die fortschreitende Schädigung des Materials (Delaminationen, Mikrorisse etc.) werden die Signale zunehmend gedämpft. Dies führte im Endstadium des Versuches zu einem Plateau der aufgezeichneten Events. Durch die Detektion eines solchen Plateaus in Ermüdungsversuchen kann das Ende der Lebenszeit also frühzeitig erkannt werden.

References

- [1] N.E. Dowling: Mechanical behavior of materials, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ (1999)
- [2] K.L. Reifsnider: Fatigue of composite materials, Elsevier, Amsterdam, New York (1991)
- [3] E. Haibach: Betriebsfestigkeit, Springer, Berlin (2006)
- [4] D. Radaj: Ermüdungsfestigkeit, Springer, Berlin (2003)
- [5] J.M. Hodgkinson: Mechanical testing of advanced fibre composites, CRC Press, Boca Raton, FL, Cambridge, England (2000)
- [6] H.A. Kishawy, H. Hegab, U. Umer, A. Mohany: *Int J Adv Manuf Technol* 98 (2018) 1391. DOI:10.1007/s00170-018-2341-y
- [7] M.G.R. Sause, T. Müller, A. Horoschenkoff, S. Horn: *Composites Science and Technology* 72 (2012) 167. DOI:10.1016/j.compscitech.2011.10.013
- [8] H. Schürmann: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg (2005)
- [9] J. Brunbauer, C. Gaier, G. Pinter: *Composites Part B: Engineering* 80 (2015) 269. DOI:10.1016/j.compositesb.2015.06.002
- [10] J. Brunbauer, G. Pinter: *Composites Part B: Engineering* 70 (2015) 167. DOI:10.1016/j.compositesb.2014.11.015
- [11] A. Puck: Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten: Modelle für die Praxis, Hanser, München (1996)
- [12] J. Brunbauer: Fatigue of continuously fibre reinforced composites, Leoben (2015)
- [13] R. Talreja, in: H. Altenbach, W. Becker (Eds.), *Modern Trends in Composite Laminates Mechanics*, Springer Vienna, Vienna, s.l. (2003), 281. DOI:10.1007/978-3-7091-2544-1_6
- [14] N. Godin, G. Fantozzi, P. Reynaud: Acoustic emission and durability of composite materials, Wiley; ISTE Ltd, Hoboken, NJ, London, UK (2018)
- [15] J. Brunbauer, F. Arbeiter, S. Stelzer, G. Pinter: *AMR* 891-892 (2014) 166. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.166