

Schallemissionsanalyse während der zyklischen Belastung von kontinuierlich faserverstärkten Kunststoffen

Maria GFRERRER¹, Johannes WIENER¹, Andreas J. BRUNNER², Gerald PINTER¹

¹ Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität
Leoben, Leoben, Österreich

² Empa, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, Schweiz (im
Ruhestand)

Kontakt E-Mail: maria.gfrerrer@unileoben.ac.at

Kurzfassung. In kontinuierlich faserverstärkten Kunststoffen treten bei Belastung diverse Schädigungsmechanismen auf, welche die mechanischen Eigenschaften herabsetzen und die Lebensdauer terminieren. In diesem Beitrag wird ein Fokus auf den Mechanismus der Matrixrissbildung gelegt. Die Matrixrissdichte hat einen signifikanten Einfluss auf die Steifigkeit des Materials und kann bei semi-transparenten Laminaten, wie zum Beispiel bei glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK), optisch detektiert werden. Bei nicht transparenten Laminaten, wie zum Beispiel carbonfaserverstärkten Kunststoffen, ist eine alternative zerstörungsfreie Prüfmethode erforderlich.

Zu diesem Zweck wird in diesem Beitrag Schallemission (SE) während der zyklischen Belastung von $\pm 45^\circ$ GFK Laminaten gemeinsam mit einer automatisierten optischen Rissdetektion untersucht. Herausfordernd für die Anwendung der Schallemissionsanalyse (SEA) sind die zahlreichen Störsignale, welche von der servo-hydraulischen Prüfmaschine erzeugt werden. Es wird untersucht, wo der Ursprung der Störsignale liegt und mit welchen Maßnahmen das Verhältnis von Nutz- zu Störsignalen optimiert werden kann. Neben Elastomerwerkstoffen als Dämpfungselementen zwischen Prüfkörper und Einspannung, wird ein Bandpassfrequenzfilter getestet. Letzterer stellt sich als besser geeignet heraus, da mehr Störsignale eliminiert werden.

Aus den Ermüdungsmessungen geht hervor, dass gleichzeitig mit der optisch detektierten Rissinitiierung auch die ersten SE-Ereignisse erfasst werden. Mit zunehmender Rissdichte werden ab einem gewissen Zeitpunkt die SE-Signale mit einer höheren Rate detektiert als die Matrixrissdichte steigt, da auch andere Schädigungsmechanismen oder Reibung von Rissflanken Quellen für Schallemission sein können.



Einführung

Faserverstärkte Kunststoffe haben aufgrund ihrer herausragenden mechanischen Eigenschaften gepaart mit einem geringen Gewicht ein hohes Leichtbaupotential. Daher finden sie Anwendung in höchstbeanspruchten strukturellen Komponenten, wie zum Beispiel in Flugzeugen oder als Rotorblätter von Windenergieanlagen. Bei solchen Anwendungen ist ein sicherer Einsatz über die gesamte Lebensdauer erforderlich, weswegen die Charakterisierung und Modellierung des Ermüdungsverhaltens sehr wichtig ist.

Bei kontinuierlich faserverstärkten Kunststoffen treten sowohl bei quasi-statischer als auch bei Ermüdungsbelastung mehrere Schädigungsmechanismen auf, welche auch miteinander interagieren und zur Degradation der mechanischen Eigenschaften führen. Typischerweise kommt es zunächst zur Bildung von Matrixrissen, wodurch die Steifigkeit maßgeblich reduziert wird, aber noch kein endgültiges Versagen eintritt. Dafür sind meistens Mechanismen wie Delamination und Faserbrüche, die erst später auftreten, ausschlaggebend [1].

Für die Entwicklung progressiver Schädigungsmodelle, welche die Schädigungsentwicklung im Material und den resultierenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften vorhersagen, ist es erforderlich, die einzelnen Mechanismen in Ermüdungsversuchen quantitativ zu charakterisieren. Eine Möglichkeit, um zum Beispiel die Matrixrissdichte in glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) zu bestimmen, ist die automatisierte Auszählung von Bildern, die während der zyklischen Belastung aufgenommen wurden. Da GFK semi-transparent ist, erscheinen Matrixrisse als dunkle Streifen, wenn Licht durch die Probe gestrahlt wird [2–4]. Bei carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) kann diese optische Rissdetektion daher nicht angewendet werden und eine alternative zerstörungsfreie Prüfmethode zur Charakterisierung der Schädigungsakkumulation ist erforderlich. Hier bietet sich die Schallemissionsanalyse (SEA) an, da mit dieser Methode Schädigungsereignisse in-situ detektiert werden können.

Zunächst wird in der laufenden Forschungsarbeit mit GFK gearbeitet und Schallemissionssignale (SE-Signale) werden mit optisch bestimmter Rissdichte und Degradation der Steifigkeit korreliert. Basierend auf den Ergebnissen soll diese Prüftechnik auf CFK übertragen werden, wo keine optische Rissdetektion mehr möglich ist.

1. Herausforderungen bei der SEA während Ermüdungsmessungen

Um die wechselnde Beanspruchung bei unterschiedlichen Prüffrequenzen und Amplituden realisieren zu können, werden für Ermüdungsmessungen servo-hydraulische Prüfmaschinen verwendet. Dabei werden über einen Hydraulikzylinder die Kräfte auf den Prüfkörper übertragen. Der Ölfluss im Zylinder wird von einem Servoventil geregelt. Aus vergangenen Versuchen auf servo-hydraulischen Prüfmaschinen mit gleichzeitiger SEA hat sich gezeigt, dass eine große Menge an Störsignalen von der Prüfmaschine auf die Prüfkörper übertragen wird [5–7]. Diese werden genau wie Signale von Materialschädigung vom SE-System erfasst. Störsignale und Schädigungssignale können sich gegenseitig überlagern, was zu verfälschten Werten der SE-Signalparameter (Energien, Amplituden, Frequenzen, ...) oder der Ankunftszeiten führt.

Von der Hydraulik der Prüfmaschinen generierte Störsignale treten meist mit charakteristischen Frequenzen unterhalb von 150 kHz auf. Die Verwendung eines entsprechenden Hochpassfilters oder eine Erhöhung des Schwellwertes gehen mit dem Verlust von niederfrequenten Signalen bzw. Signalen mit einer geringen Intensität einher [7]. Um diesen Kompromiss nicht eingehen zu müssen, kann versucht werden, die Signale bereits vor dem Erreichen des Prüfkörpers zu eliminieren.

Um zunächst den Ursprung der Signale zu finden, wurde eine Stahlprobe eingespannt und mit 10 ± 8 kN bei einer Frequenz von 3 Hz zyklisch belastet. SE-Sensoren (Typ WD) wurden am Prüfkörper und an unterschiedlichen Positionen entlang der Antriebskomponenten der Prüfmaschine positioniert und die Amplituden der an den verschiedenen Positionen detektierten Signale wurden bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Sensorpositionen. Alle Untersuchungen in diesem Beitrag wurden auf einer servo-hydraulische Prüfmaschine von MTS Systems Corporations (Minnesota, USA) durchgeführt. Das verwendete SE-System ist von der MISTRAS Group Inc. (Princeton Junction, USA).

Tabelle 1. Intensität der von der Prüfmaschine erzeugten Signale an verschiedenen Positionen

Position	Amplituden [dB _{AE}]
1 (untere Spannbacke)	< 45
2 (Probe unten)	< 50
3 (Probe oben)	< 50
4 (obere Spannbacke)	48 - 54
5 (Aktuator)	68 - 73
6 (Verteilerblock)	85 - 90
7 (Ventil)	> 95

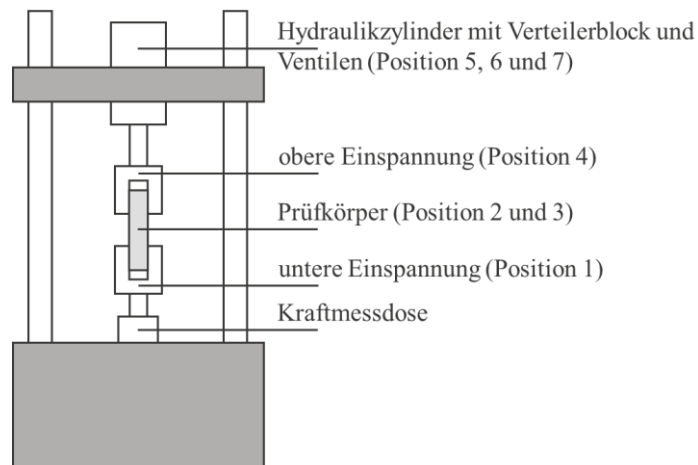


Abbildung 1. Positionen zur Bestimmung der Intensität der von der Prüfmaschine erzeugten Signale

Die Amplituden sind umso höher, je näher die jeweilige Position am Ventil liegt. Der Ursprung der Signale wird daher im Ventil vermutet. Eine mögliche Erklärung für die Geräuschentwicklung ist Kavitation des Öls im Ventil.

2. Reduktion der Störsignale

Im Rahmen der Untersuchung sollen Laminat mit diversen Lagenaufbauten aus demselben Materialsystem (Glasfaser mit Epoxidmatrixsystem) bei zyklischer Belastung geprüft werden. Bei dem Materialsystem handelt es sich um ein HexPly® M79-LT/25%/UD1200/G Prepreg der Firma Hexcel Corporation (Stamford, USA).

Man kann davon ausgehen, dass bei Laminaten, die in Faserrichtung geprüft werden ($UD0^\circ$), die Störsignale am wenigsten gedämpft werden. Maßnahmen um Störsignale zu

reduzieren, werden daher an UD0° Prüfkörpern erprobt, da diese dann auf alle anderen Laminate übertragen werden können.

2.1 Signale bei zyklischer Belastung

Die Störsignale, die von der Prüfmaschine auf den Prüfkörper übertragen werden, wurden einmal im unbelasteten und einmal im belasteten Zustand, bei einer zyklischen Last von 5 ± 4 kN bei 3 Hz charakterisiert (siehe Abbildung 2). Dazu wurden 2 WD-Sensoren am Prüfkörper angebracht. Bereits im unbelasteten Zustand, werden Störsignale mit Amplituden bis ungefähr $45 \text{ dB}_{\text{AE}}$ gemessen. Bei zyklischer Belastung des Prüfkörpers treten Störsignale mit einer höheren Intensität, von bis zu $50 \text{ dB}_{\text{AE}}$ auf. Die meisten Störsignale, sowohl im unbewegten und bewegten Zustand des Kolbens, treten mit Frequenzen von 40 und 100 kHz auf. In beiden Fällen werden mehr Signale am Sensor 2, welcher näher dem bewegten Kolben ist, detektiert.

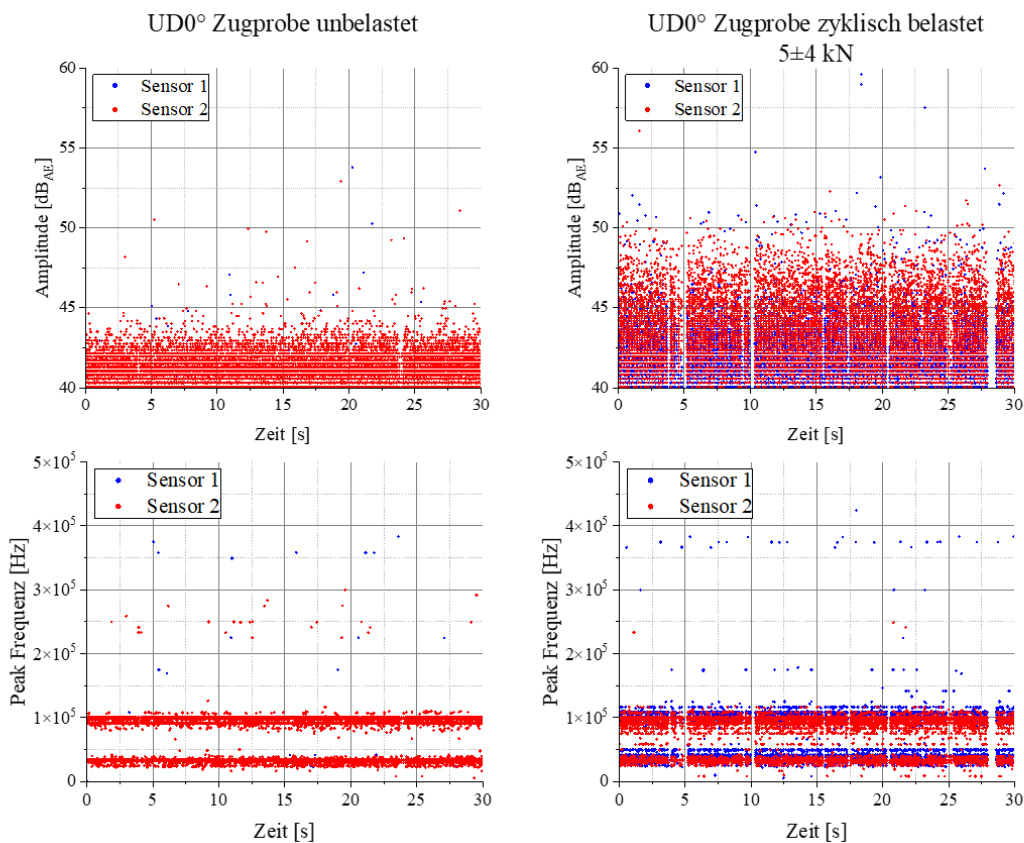


Abbildung 2. Intensität und Frequenzen der Störsignale gemessen am Prüfkörper bei stillstehendem (links) und bewegtem (rechts) Kolben

2.2 Maßnahmen gegen Störsignale

Zur Reduktion der Störsignale wurden zwei Ansätze getestet. Zum einen wurde ein Frontend-Frequenzfilter von 100 – 1,000 kHz verwendet. Dieser hat den Nachteil, dass auch niederfrequente Signale von Materialschädigung gefiltert werden.

Eine Möglichkeit um diesen Effekt zu verhindern, ist es die Störsignale schon vor der Übertragung auf den Prüfkörper zu dämpfen. Dies wurde durch das Zwischenlegen von 1 mm dicken Elastomerlagen zwischen Einspannung und Aufleimern am Prüfkörper versucht. Drei verschiedene Elastomerwerkstoffe, welche im Bereich der auftretenden Frequenzen eine erhöhte Dämpfung aufweisen, wurden getestet:

- NR/BR gefüllt mit Ruß (NR...Natural Rubber, BR...Butadien Rubber)
- NBR gefüllt mit Ruß (NBR...Nitrile Butadien Rubber)
- NBR ungefüllt

Beide Ansätze wurden an einer eingespannten UD0° Probe im unbelasteten Zustand getestet. Tabelle 2 enthält die jeweils in 30 s detektierte Anzahl der Signale bei Prüfung der einzelnen Ansätze und deren Kombinationen.

Tabelle 2. Resultat verschiedener Ansätze zur Reduktion von Störsignalen

Elastomer	Frequenzfilter	Signale / 30 s
-	-	32,628
-	analog: 100 – 1,000 kHz digital: 100 – 1,000 kHz	125
NR/BR gefüllt	-	18,342
NR/BR gefüllt	analog: 100 – 1,000 kHz digital: 100 – 1,000 kHz	1
NBR gefüllt	-	24,599
NBR gefüllt	analog: 100 – 1,000 kHz digital: 100 – 1,000 kHz	1
NBR ungefüllt	-	16,122
NBR ungefüllt	analog: 100 – 1,000 kHz digital: 100 – 1,000 kHz	2

Durch die Verwendung von Elastomerwerkstoffen als Dämpfungselemente zwischen Einspannung und Prüfkörper können die Störsignale auf 50 - 75 %, je nach Typ, reduziert werden. Dieser Ansatz bringt zwar einen gewissen Erfolg, ist aber weniger geeignet, da die Proben bei zyklischer Belastung bei höheren Lastniveaus zu rutschen beginnen. Die Kombination aus digitalem und analogem Bandpassfilter, jeweils von 100 – 1,000 kHz, reduziert die Störsignale maßgeblich auf unter 1 %.

Zusätzlich kann ein Δt -Filter auf die Signale angewendet. Mit einem Δt -Filter können Signale aufgrund der erwarteten Differenz ihrer Ankunftszeiten, wenn deren Ursprung in einem bestimmten Bereich liegt, gefiltert werden. Tritt ein Schädigungssignal als Überlagerung eines Störsignals auf, wird es vom Δt -Filter aussortiert, weswegen dieser hier erst nach der Frequenzfilterung verwendet wird. Von den oben angeführten 125 Signalen bleiben so nur noch 8 über.

Für die im folgenden Abschnitt präsentierten Ermüdungsmessungen wird, basierend auf den Ergebnissen der Vorversuche zur Reduktion der Störsignale, eine Kombination aus digitalem und analogem Frequenzfilters von 100 – 1,000 kHz während der SE-Datenaufzeichnung verwendet.

3. Ermüdungsmessung

Die hier präsentierten Ermüdungsmessungen wurden an einem $\pm 45^\circ$ GFK Laminat ([+45, -45]_s) aus dem HexPly® M79-LT/25%/UD1200/G Prepreg hergestellt. Die Proben haben Abmessungen von 250 x 25 x 3 mm³ und sind mit GFK-Aufleimern versehen, sodass sich eine Messlänge von 150 mm ergibt.

Die angegebenen Lastniveaus beziehen sich auf das Verhältnis von maximaler Spannung während der zyklischen Belastung zu Zugfestigkeit des Laminats. Die Versuche wurden bei einer Prüffrequenz von 3 Hz und einem R-Verhältnis von 0.1 durchgeführt. Aus den mechanischen Daten wurden sowohl der Sekantenmodul E_s als auch der dynamische Modul E_{dyn} berechnet:

$$E_s = \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}}$$

$$E_{dyn} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}}$$

$\sigma_{max/min}$ maximale/ minimale Spannung während eines Lastzyklus [MPa]
 $\varepsilon_{max/min}$ maximale/ minimale Dehnung während eines Lastzyklus [-]

Zusätzlich wurde die Rissdichte mithilfe der open-source Software CrackDect ausgewertet [8]. Als Input werden Fotos des Prüfkörpers verwendet, welche mit einem CV-X420A Kamerasystem von Keyence Corporation (Osaka, Japan) aufgenommen wurden. Das Kamerasystem wurde während der zyklischen Belastung in definierten Intervallen getriggert:

- bis 1,000 Zyklen: alle 25 Zyklen
- 1,000 – 10,000 Zyklen: alle 100 Zyklen
- ab 10,000 Zyklen: alle 1,000 Zyklen

Die Rissdichte ρ ist definiert als:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{A}$$

l_i Länge des i-ten Risses [mm]
 A betrachteter Ausschnitt des Prüfkörpers [mm²]

Die SE-Signale wurden mit zwei im Abstand von 100 mm angebrachten WD-Sensoren erfasst. Es wurden 2/4/6-Vorverstärker mit einer Verstärkung von 40 dB und ein PCI-2 System verwendet. Für Peak Definition, Hit Definition und Hit Lockout Time wurden 10, 80 und 300 μ s eingestellt. Der Schwellwert wurde mit 40 dB_{AE} festgelegt und zur Reduktion der Störsignale wurde ein Frequenzbereich von 100 – 1,000 kHz durch die Kombination von digitalem und analogem Filter gewählt. Die Abtastrate wurde auf 5 MHz gesetzt. Als Maß für die SE-Aktivität wurden nur die Hits gewertet, welche innerhalb einer gewissen Zeit bei beiden Sensoren detektiert wurden (SE-Ereignisse). Die Zeitintervalle hierfür wurden im automated sensor test (AST), bei welchem ein Sensor als Sender und einer als Empfänger fungiert, bestimmt. So können Signale, welche ihren Ursprung außerhalb der Sensoren haben größtenteils eliminiert werden.

Des Weiteren wurde die Oberflächentemperatur des Prüfkörpers mit einem Infrarotsensor gemessen um sicherzustellen, dass sich der Prüfkörper nicht zu stark erwärmt, um so einen maßgeblichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften zu vermeiden.

Abbildung 3 zeigt Sekantenmodul, dynamischen Modul, Rissdichte, Temperatur und kumulative SE-Ereignisse über die Zyklenzahl, welche bei einem Lastniveau von 70 % gemessen wurden. Die Steifigkeit nimmt erwartungsgemäß über die Lebensdauer ab. Der Sekantenmodul zeigt einen stärkeren Abfall, da er neben Materialschädigung und hysteretischer Erwärmung, welche sich auch im dynamischen Modul widerspiegeln, auch

zyklisches Kriechen abbildet. Ab ungefähr 300 Zyklen weisen beide Modulverläufe einen stärkeren Abfall bis zum Versagen auf. Zeitgleich werden auch die ersten Risse und SE-Ereignisse detektiert. Sowohl der Kurvenverlauf der Rissdichte als auch der kumulativen SE-Ereignisse steigen bis zum Ende der Lebensdauer exponentiell an. Die Temperatur beginnt bei ungefähr 100 Zyklen zu steigen. Die maximal erreichte Temperatur von 40 °C liegt weit unter dem Glasübergang (95 ± 5 °C) des Harzes und ist daher nicht kritisch. Der Temperaturverlauf kann auch als Maß für die Laminatschädigung gesehen werden, da entstandene Rissflanken bei zyklischer Belastung aneinander reiben und somit zu einer Erwärmung des Prüfkörpers führen. Eine Temperaturzunahme ist bereits ersichtlich bevor Risse optisch detektiert werden oder SE-Ereignisse auftreten, da auch innere Reibung im Material zu Dissipation von Energie in Form von Wärme führen kann.

Abbildung 4 zeigt die mithilfe von CrackDect gefundenen Risse bei einem Winkel von -45° . Für den in Abbildung 3 gezeigten Verlauf der Rissdichte wurden die Ergebnisse der Rissdetektion in $+45^\circ$ - und -45° -Richtung addiert.

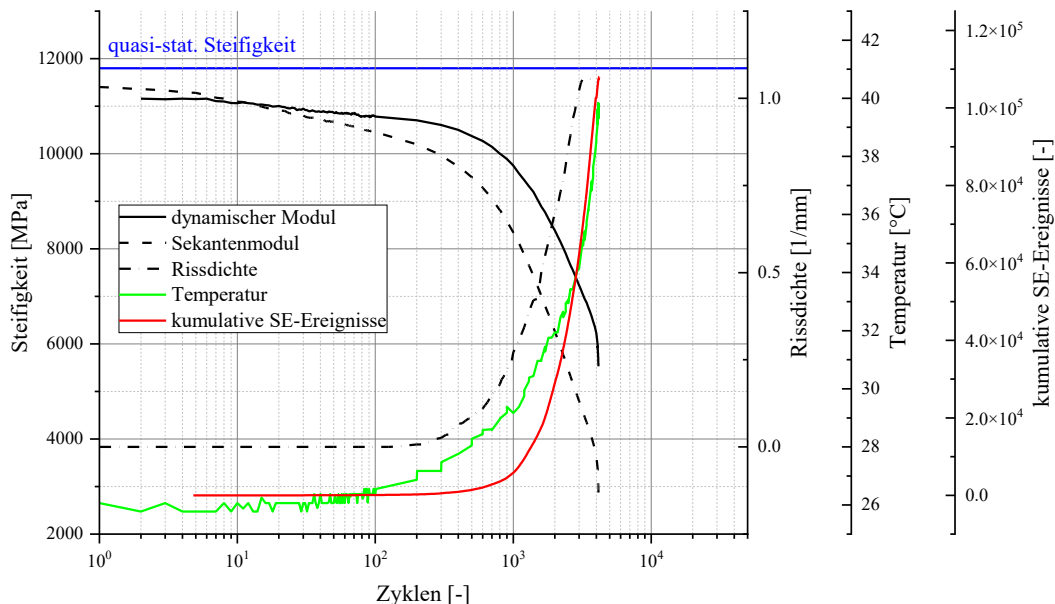


Abbildung 3. Steifigkeit, Rissdichte, Temperatur und kumulative SE-Ereignisse über Zyklenzahl gemessen an einem $\pm 45^\circ$ GFK Laminat bei einem Lastniveau von 70 % (Prüffrequenz = 3 Hz, R = 0.1)

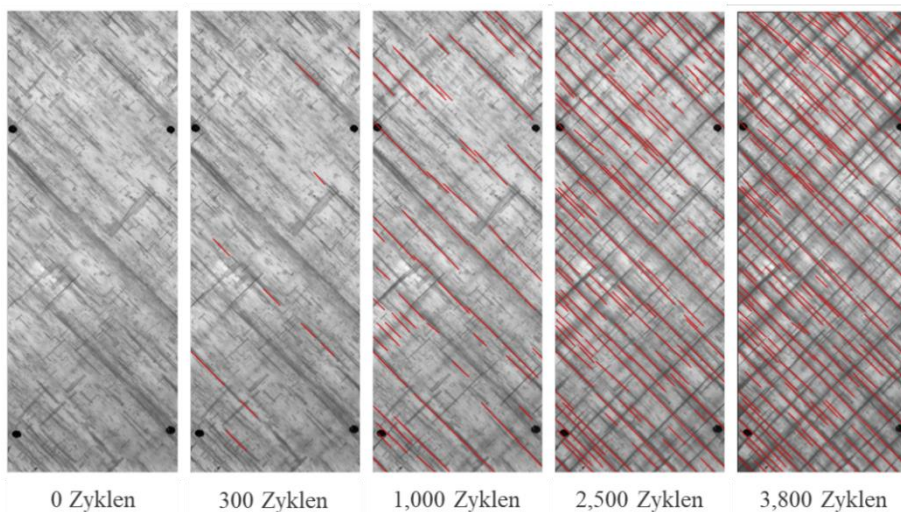


Abbildung 4. Detektierte -45° Risse bei ausgewählten Zyklenzahlen des Versuches aus Abbildung 3

Abbildung 5 zeigt zusätzlich zu dynamischem Modul, Rissdichte und kumulative SE-Ereignisse, welche bei einem Lastniveau von 70 % gemessen wurden, die Ergebnisse eines Ermüdungsversuches bei einem Lastniveau von 60 %. Steifigkeitsabfall, Rissinitiierung und Auftreten von SE-Ereignissen werden, wie erwartet, bei dem geringeren Lastniveau zu höheren Zyklenzahlen verschoben. Der Verlauf der kumulativen SE-Ereignisse weist bei beiden Lastniveaus nach einer gewissen Zeit einen steileren Anstieg als die Rissdichte auf, da bei der SEA auch andere Phänomene als Matrixrissbildung oder -wachstum zur Detektion von SE-Ereignissen führen können. Es können zum Beispiel andere Schädigungsmechanismen, aber auch Reibungsgeräusche zwischen Rissflanken auftreten, die ebenfalls akustische Aktivität hervorrufen.

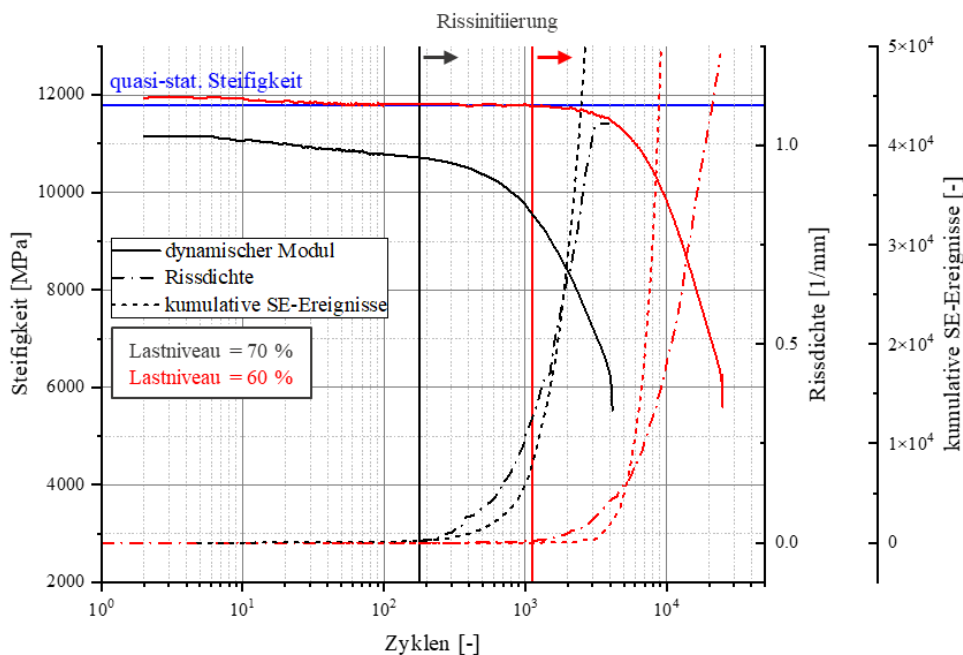


Abbildung 5. Steifigkeit, Rissdichte und kumulative SE-Ereignisse über Zyklenzahl gemessen an $\pm 45^\circ$ GFK Laminaten bei zwei verschiedenen Lastniveaus (Prüffrequenz = 3 Hz, R = 0.1)

4. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die SEA als alternative zerstörungsfreie Prüfmethode zur optischen Matrixrissdetektion während Ermüdungsmessungen von $\pm 45^\circ$ GFK Laminaten untersucht. Da eine optische Rissdetektion nur bei semi-transparenten Laminaten möglich ist, wird ein Weg gesucht Matrixrisse auch bei nicht-transparenten (z.B. CFK) Laminaten zu quantifizieren.

Um die SEA während den Ermüdungsmessungen sinnvoll anzuwenden, musste zunächst die Menge an Störsignalen reduziert werden. Als gut geeignete Methode erwies sich die Verwendung eines Bandpassfilters von 100 – 1,000 kHz, da die meisten Störsignale unterhalb von 100 kHz auftreten. Durch diese Maßnahme gehen zwar auch niederfrequente Nutzsignale verloren, jedoch ist sie der beste Kompromiss um einfach ein möglichst hohes Verhältnis zwischen Nutz- zu Störsignalen zu erzielen. Der Ursprung der Signale wird im Ventil vermutet, da an dieser Positionen Signale mit den höchsten Intensitäten detektiert wurden. Eine mögliche Erklärung für die Geräuschentwicklung ist Kavitation.

Ergebnisse erster Ermüdungsmessungen bei zwei verschiedenen Lastniveaus haben gezeigt, dass der Zeitpunkt der optisch detektierten Rissinitiierung mit dem Auftreten erster SE-Ereignisse zusammenfällt. Die Verläufe von Rissdichte und SE-Ereignissen

unterscheiden sich im weiteren Verlauf der Ermüdungslebensdauer durch einen unterschiedlich ausgeprägten Anstieg. Die kumulativen SE-Ereignisse werden gegen Ende der Lebensdauer mit einer höheren Rate detektiert, da auch andere Schädigungsmechanismen oder Reibung zwischen Rissflanken Auslöser für SE-Ereignisse sein können.

Durch die Betrachtung der SE-Ereignisse kann demnach der Zeitpunkt der Rissinitiierung detektiert werden, jedoch sind sie kein direktes Maß für die Rissdichte im weiteren Verlauf. Dazu müsste bei den detektierten SE-Signalen zwischen verschiedenen Quellen unterschieden werden können. Bei quasi-statischen Messungen konnte durch die Betrachtung diverser Frequenz-Features bereits zwischen Schädigungsmechanismen in faserverstärkten Kunststoffen differenziert werden [9]. In [10] wurden, ebenfalls durch Betrachtung von Frequenz-Features, für zyklisch belastete Holzverklebungen mehr Cluster als bei quasi-statischer Belastung gefunden. Dabei wurde eines der Cluster, basierend auf der Ortung der darin enthaltenen Signale, mit Reibgeräuschen assoziiert.

Eine Analyse der SE-Signalparameter kann Aufschluss darüber geben, ob detektierte Signale in bestimmten Clustern auftreten, die verschiedenen SE-Quellen zugeordnet werden können.

Referenzen

- [1] Reifsnider KL, Hrsg. *Fatigue of Composite Materials*. Amsterdam: Elsevier Science; 1991. (Composite materials series; Bd. 4). Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/bookseries/09270108/4>.
- [2] Adden S, Horst P. Stiffness degradation under fatigue in multiaxially loaded non-crimped-fabrics. *International Journal of Fatigue* 2010; 32(1):108–22. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112309000334>.
- [3] Drvoderic M, Gfrerrer M, Wiener J, Pinter G, Pletz M, Schuecker C. Comparing crack density and dissipated energy as measures for off-axis damage in composite laminates. *International Journal of Fatigue* 2023; 169:107486. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112322007368>.
- [4] Tong J, Guild FJ, Ogin SL, Smith PA. Off-axis fatigue crack growth and the associated energy release rate in composite laminates. *Appl Compos Mater* 1997; 4(6):349–59. doi: 10.1007/BF02481399.
- [5] Krummenacker J, Hausmann J. Determination of Fatigue Damage Initiation in Short Fiber-Reinforced Thermoplastic through Acoustic Emission Analysis. *J. Compos. Sci.* 2021; 5(8):221. doi: 10.3390/jcs5080221.
- [6] Jüngert A, Dugan S, Udoh A. Acoustic Emission Testing under Difficult Conditions. 32nd European Conference on Acoustic Emission Testing, Prag, Tschechien, September 2016. *e-Journal of Nondestructive Testing*; 21(11):239–46. Verfügbar unter: <https://www.ndt.net/?id=20334>.
- [7] Gfrerrer M, Wiener J, Brunner AJ, Pinter G. Investigation of background noise affecting ae data acquisition during tensile loading of frps. EWGAE35 & ICAE10 Conference on Acoustic Emission Testing, Ljubljana, Slowenien, September 2022. *e-Journal of Nondestructive Testing* 2023; 28(1). Verfügbar unter: <https://doi.org/10.58286/27631>.
- [8] Drvoderic M, Bender JJ, Pletz M, Schuecker C. Version 0.2 - CrackDect: Detecting crack densities in images of fiber-reinforced polymers. *SoftwareX* 2022; 19:101198. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711022001182>.
- [9] Sause M, Müller T, Horoschenkoff A, Horn S. Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis. *Composites Science and Technology* 2012; 72(2):167–74. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353811003794>.
- [10] Clerc G, Sause MGR, Brunner AJ, Niemz P, van de Kuilen J-W. Unsupervised Pattern Recognition of Acoustic Emission Signals of Adhesively Bonded Wood, 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Freiburg, Deutschland, Oktober 2019:619–26. Verfügbar unter: <https://www.researchgate.net/publication/336891244>.