



Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe

Masterarbeit

Zerstörungsfreie in-situ-Detektion von
Schädigungsprozessen bei
Ermüdungsbelastung zur Charakterisierung
von Faserverbundwerkstoffen

Clemens Sperling, BSc

Mai 2021



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 30.05.2021

Unterschrift Verfasser/in
Clemens Sperling

DANKSAGUNG

Ich möchte herzlich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Gerald Pinter für die Möglichkeit danken, an dem Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe diese Masterarbeit zu verfassen. Weiterhin möchte ich mich auch für die Begutachtung dieser Arbeit bedanken.

Zusätzlich möchte ich Dipl.-Ing. Christian Schneider und Dipl.-Ing. Johannes Wiener für deren Hilfsbereitschaft und die Expertise danken, welche sie in den Monaten der Betreuung dieser Arbeit eingebracht haben.

Bei Dipl.-Ing. Matthias Drvoderic möchte ich mich für die Zurverfügungstellung der originalen Python-Skripten und die Auswertung der Rissdichte bedanken.

Schlussendlich möchte ich meinen Eltern für den Rückhalt während des Studiums danken, denn ohne sie wäre dies so nicht möglich gewesen.

KURZFASSUNG

Faserverbundwerkstoffe bieten ein hohes Leichtbaupotential aufgrund ihrer hohen Steifigkeiten bzw. Festigkeiten bei geringer Dichte. Um Versagen infolge von Materialermüdung bei schwingenden Belastungen zu verhindern, werden diese Bauteile oft überdimensioniert. Weitere Material- und Kosteneinsparungen können erreicht werden, indem die Materialschädigung während des Betriebes besser eingeschätzt werden kann.

Hier setzt diese wissenschaftliche Arbeit an. Durch Ermüdungsversuche mit zyklischen Zugversuchen an glasfaserverstärkten Epoxidharzen soll der Verlauf der Schädigung in mehreren Laminataufbauten untersucht werden. Dazu werden die Veränderungen der Steifigkeit und der Poissonzahl gemessen. Hierbei werden die Dehnungen über Kolbenwege und zusätzlich über die digitale Bildkorrelation bestimmt. Ergänzend wird die Schädigung durch ein Schallemissionssystem aufgezeichnet.

In den $\pm 45^\circ$ Laminaten konnten keine Matrixrisse durch die Schallemission detektiert werden. Jedoch konnte durch ein Plateau im Steifigkeitsverlauf und durch eine Auswertung der Schallemissionsdaten der Start der Delamination in $\pm 45^\circ$ Laminaten festgestellt werden. Des Weiteren konnte, ebenfalls durch die Schallemission, ein potenzielles Abbruchkriterium für Wöhlerversuche dargestellt werden.

Beim 90° Laminat wurde ein konstanter Abfall des E-Moduls bis zum Bruch gemessen, der auf die zunehmende Rissdichte zurückzuführen ist. Weiters wurden auch hier Schallemissionsdaten generiert, die mit den Auswertungen aus der digitalen Bildkorrelation in Zusammenhang gebracht werden konnten.

Bei Laminaten aus 0° Schichten mit eingebetteten 90° Schichten, konnten keine signifikanten Veränderungen des E-Moduls, sowie der Poissonzahl gemessen werden. Jedoch konnten von Beginn an Signale von Matrixrissen detektieren werden. Durch die gute Leitung von Wellen in den 0° Fasern sind diese Kreuzverbunde, ebenso wie die in der Praxis häufiger verwendeten multiaxialen Gelege, gut für die Nutzung der Schallemission zur Detektion von Schädigung geeignet.

ABSTRACT

Due to the high stiffness and low density of fibre reinforced polymers, they are commonly used in lightweight applications. To avoid fatigue failure during fatigue loading those constructions are often overdimensioned. To progress with the reduction of cost and material, the damage development during the use has to be better understood.

Therefore, in this work fatigue testing with cyclic tensile tests was performed to characterise the damage evolution of multiple laminates, made of glass fibre reinforced epoxy resin. For this purpose, the development of the stiffness and the poisson ratio was evaluated. The used strains were measured with the piston movement of the servo-hydraulic testing machine and additional with digital image correlation. The damage was also recorded through an acoustic emission system.

No matrix cracks could be detected with the acoustic emission system. By a plateau in the elastic modulus curve and an evaluation of the acoustic emission data, the start of the delamination within the $\pm 45^\circ$ laminates could be observed. In addition, also by the acoustic emission system a possible abort criterion for the fatigue test could be detected.

The results of the 90° laminate revealed a constant decrease of the Young's modulus until the specimens broke. This was mainly caused by the increasing number of matrix cracks. Apart from this, the results of the digital image correlation and the acoustic emission were correlated.

For laminates consisting of 90° layers embedded in 0° layers no significant change in the elastic modulus and poisson ratio could be detected. Although, the beginning of damage could be monitored with signals originating from matrix cracks. Due to the low damping of elastic waves in fibre direction those crossply laminates and other commonly used multi-axial laminates suit the usage of detecting any damage, through acoustic emission systems, well.

INHALTSVERZEICHNIS

SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN	1
BILDERVERZEICHNIS	3
1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG	7
2 GRUNDLAGEN	9
2.1 Schädigungen bei Faserverbundwerkstoffen	9
2.1.1 Faser-Matrix Ablösung	9
2.1.2 Matrixriss	10
2.1.3 Delamination	11
2.1.4 Faserbruch	11
2.1.5 Schädigungen durch zyklische Belastungen	12
2.2 Ermüdungsversuche	13
2.2.1 Wöhlerversuch	13
2.2.2 Analyse einzelner Zyklen	15
2.2.3 Poissonzahl als Schadensindikator	16
2.2.4 Vorhersage der Ermüdungslebensdauer	17
2.2.5 Ermüdungsversuche mit zyklischen Zugversuchen	18
2.3 Schallemission	19
2.3.1 Erzeugung und Leitung elastischer Wellen	19
2.3.2 Acoustic emission in der Praxis	22
2.3.3 Interpretation von waveforms	26
2.3.4 Anwendungsfälle von künstlichen neuronalen Netzen	28
3 EXPERIMENTELLES	29
3.1 Material	29
3.2 Prüfkörperherstellung	29
3.3 Prüfkörper	30

3.4	Prüfaufbau	31
3.5	Prüfprozedur.....	32
3.6	Auswertung.....	34
3.6.1	Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten	34
3.6.2	Digitales Bildkorrelationsprogramm	34
3.6.3	Acoustic emission	35
4	ERGEBNISSE	36
4.1	±45-Laminat mit niedrigem Lastniveau	36
4.1.1	Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten	36
4.1.2	DIC.....	38
4.1.3	Acoustic emission	40
4.2	±45-Laminat mit hohem Lastniveau	42
4.2.1	Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten	42
4.2.2	DIC.....	43
4.2.3	Acoustic emission	44
4.3	UD90-Laminat.....	46
4.3.1	Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten	46
4.3.2	DIC.....	48
4.3.3	Acoustic emission	49
4.4	Laminat mit eingebetteten 90° Schichten.....	51
4.4.1	Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten	51
4.4.2	DIC.....	53
4.4.3	Acoustic emission	54
4.5	Vergleich der Laminataufbauten.....	56
5	ZUSAMMENFASSUNG, SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....	58
6	LITERATURVERWEISE	60
	ANHANG	64

SYMBOLE UND ABKÜRZUNGEN

Symbole	Beschreibung	Einheit
$c_{\text{longitudinal}}$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle	[m/s]
$c_{\text{transversal}}$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle	[m/s]
E	E-Modul	[MPa]
E_s	Sekantenmodul / statischer E-Modul	[MPa]
E_{dyn}	dynamischer E-Modul	[MPa]
f	Prüffrequenz	[Hz]
R	Spannungsverhältnis	[-]
ν	Poissonzahl / Querkontraktionszahl	[-]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
ϵ_{max}	maximale Dehnung	[%]
ϵ_{min}	minimale Dehnung	[%]
σ_a	Spannungsamplitude	[MPa]
σ_{max}	Oberspannung	[MPa]
σ_{min}	Unterspannung	[MPa]
σ_{mittel}	Mittelspannung	[MPa]

Abkürzungen	Langform
2s	mittlerer Rissabstand
AE	acoustic emission
A-Mode	antisymmetrischer Lamb-Mode
AST	automatischer Sensortest
bzw.	beziehungsweise
CLD	Haigh-Diagramm
CSZ	charakteristischer Schadenszustand
DIC	digitale Bildkorrelation
FFT	Fast-Fourier-Transformation
HDT	hit definition time
HLT	hit lockout time
KI	künstliche Intelligenz
KNN	künstliche neuronale Netze
N	Lastspielzahl / Zyklen
PDT	peak definition time
SDDM	single dominant damage mechanism
SH	shear horizontal mode
S-Mode	symmetrischer Lamb-Mode
UD	unidirektional
WD	differentielle Breitbandsensoren
ZZV	zyklische Zugversuche

BILDERVERZEICHNIS

Abb. 2.1 a) Faser-Matrix Ablösung aufgrund einer Belastung senkrecht zur Faserrichtung nach (Talreja and Janis, 2015) und b) Debonding an einem freien Ende einer Faser nach (Reifsnider, 1991).	9
Abb. 2.2 a) Darstellung von Matrixrissen anhand eines $[90,0]_s$ Verbundes in regelmäßigen Abständen $2s$ und b) die Auslösung von Faserbrüchen in der benachbarten 0° Schicht (Talreja and Janis, 2015).	11
Abb. 2.3 Darstellung der verschiedenen Schadensarten und des kummulierten Schadens während eines Ermüdungsversuchs im Zugbereich nach (Stinchcomb and Bakis, 1991). .	12
Abb. 2.4 Verschiedene Spannungsverhältnisse bei einem Ermüdungsversuchs mit einer Sinusbelastung nach (ISO 13003:2003).	13
Abb. 2.5 Wöhlerkurve eines Metalls mit drei Bereichen nach (Radaj and Vormwald, 2007).	14
Abb. 2.6 a) Phasenverschiebung der Belastungskurve von der Antwortkurve und b) Spannungs- Dehnungs-Diagramm eines Zyklus mit der dazugehörigen Auswertung (Zahnt, 2003).	15
Abb. 2.7 Abfall des Sekantenmoduls und des dynamischen Moduls über die Zyklenzahl nach (Zahnt, 2003).	16
Abb. 2.8 Verlauf der Poissonzahl in einem Ermüdungsversuch mit einem $[90,0]_{6s}$ Laminat (Akay et al., 2016).	16
Abb. 2.9 a) Steifigkeitsverlust über der Zyklenanzahl nach (Stinchcomb and Bakis, 1991) und b) Haigh-Diagramm nach (Vassilopoulos, 2015).	18
Abb. 2.10 Prüfprozedur der zyklischen Zugversuche nach (Brunbauer et al., 2014).	19
Abb. 2.11 a) Darstellung einer Longitudinalwelle und b) der zwei zueinander senkrecht polarisierten Transversalwellen.	20
Abb. 2.12 Antisymmetrische und Symmetrische Plattenwellen nach (Sause, 2016).	21

Abb. 2.13 Dispersionskurve einer Aluminiumplatte mit den ersten drei antisymmetrischen (A) und symmetrischen (S) Moden, sowie dem erste Mode der horizontal polarisierten Transversalwelle (SH) nach (Armin Huber, 2020).	21
Abb. 2.14 Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Longitudinal- (L) und den beiden zueinander senkrecht stehenden Schwerwellen (S) anhand der Faserrichtung eines UD-Laminats des Materials AS4M3502 (Armin Huber, 2020).	22
Abb. 2.15 a) transientes Signal mit drei Trigger-Parametern und den eingestellten threshold und b) kontinuierliches Signal ohne definierten Anfang und Ende.	23
Abb. 2.16 Kontrolle der Haftung und des Prüfgeräts mit einer Hsu-Nielson Quelle (ÖNORM EN 1330-9:2017 09 01).	25
Abb. 2.17 Ergebnis eines Clustering-Algorithmus und Simulationen eines double cantilever beam tests. Die Grenzen der hier dargestellten partial power 4 sind 450 und 600 kHz (Sause et al., 2012).	26
Abb. 2.18 Prinzip des single dominant damage mechanism bei einem Zugversuch eines Kreuzverbund-Laminats (Brunner, 2018).	27
Abb. 2.19 Vorhersage des Berstdruckes und der einzelnen Belastungen anhand von KNN (Sause et al., 2019).	28
Abb. 3.1 Darstellung eines unidirektionalen Gewebes mit einer großen Anzahl an roten Kettfäden und wenigen stark ondulierten gelben Schussfäden (Firma Tissa Glasweberei AG, 30.04.2021).	29
Abb. 3.2 a) Zuschneiden der Lagen durch einen Textilcutter und b) Tränken der Glasfasermatten mit dem Epoxidharz.	30
Abb. 3.3 a) Prüfaufbau der Ermüdungsversuche und b) Prüfkörper, des Typs 3, mit applizierten WD-Sensoren.	31
Abb. 3.4 Adaptierte Prüfprozedur der zyklischen Zugversuche und die Zeitpunkte der Keyence-, sowie DIC-Bilder.	33
Abb. 4.1 Verlauf der verschiedenen E-Moduln, sowie der dissipierten Energie des Prüfkörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT02$	37

Abb. 4.2 Vergleich der verschiedenen E-Moduln und der Oberflächentemperatur des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT02$	38
Abb. 4.3 Verlauf des absoluten E-Moduls in Belastungsrichtung, sowie der Poissonzahl, über die Zyklen des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT02$	39
Abb. 4.4 Vergleich der relativen E-Moduln aus der Auswertung der Maschinenrohdaten und der DIC-Messung des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT02$	39
Abb. 4.5 Darstellung der Rissdichte, sowie der kumulierten events und des relativen E-Moduls, zusätzlich dazu Probenbilder von ausgewählten Zyklen der Probe $\pm 45_V2_GEFT_nT02$	41
Abb. 4.6 Verlauf der verschiedenen E-Moduln, sowie der dissipierten Energie der Probe $\pm 45_V2_GEFT_nT03$	42
Abb. 4.7 Verlauf des absoluten E-Moduls in Belastungsrichtung, sowie der Poissonzahl, über die Zyklen des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT03$	43
Abb. 4.8 Vergleich der relativen E-Moduln aus der Auswertung der Maschinenrohdaten und der DIC-Messung des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT03$	44
Abb. 4.9 Darstellung der Rissdichte, sowie die kumulierten events und des relativen E-Moduls, zusätzlich dazu Probenbilder von ausgewählten Zyklen des Prüfkörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT03$	45
Abb. 4.10 Verlauf der verschiedenen E-Moduln, sowie der dissipierten Energie des Prüfkörpers $UD90_V3_GEFT_nT03$	47
Abb. 4.11 Vergleich der verschiedenen E-Moduln und der Oberflächentemperatur des Probekörpers $UD90_V3_GEFT_nT03$	47
Abb. 4.12 Verlauf des absoluten E-Moduls in Belastungsrichtung, sowie der Poissonzahl des Probekörpers $UD90_V3_GEFT_nT03$	48
Abb. 4.13 Verläufe der relativen E-Moduln des Probekörpers $UD90_V3_GEFT_nT03$ aus verschiedenen Auswertemöglichkeiten.	49
Abb. 4.14 Darstellung der kumulierten events und des relativen E-Moduls, zusätzlich dazu Probenbilder von ausgewählten Zyklen des Prüfkörpers $UD90_V3_GEFT_nT03$	50

Abb. 4.15 Verlauf der verschiedenen E-Moduln, der dissipierten Energie, sowie der Oberflächentemperatur des Prüfkörpers EMB90_V2_GEFT_nT07..... 51

Abb. 4.16 Temperaturmessungen von drei verschiedenen Sensoren während eines separaten Versuchs mit der Probe EMB90_V2_GEFT_nT08..... 52

Abb. 4.17 Verlauf des absoluten E-Moduls in Belastungsrichtung, sowie der Poissonzahl, über die Zyklen des Probekörpers EMB90_V2_GEFT_nT07..... 53

Abb. 4.18 Vergleich der relativen E-Moduln des Probekörpers EMB90_V2_GEFT_nT07.. 54

Abb. 4.19 Darstellung der kumulierten events und des relativen E-Moduls, zusätzlich dazu Probenbilder von ausgewählten Zyklen des Prüfkörpers EMB90_V2_GEFT_nT07. 55

1 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Für den Leichtbausektor sind Faserverbundwerkstoffe heutzutage nicht mehr wegzudenken. Sie haben sich aufgrund ihrer hohen Festigkeit, ihrer hohen Steifigkeit und ihrer niedrigen Dichte in vielen Bereichen durchgesetzt. Die relativ hohen Materialkosten rechtfertigen den Einsatz jedoch nur in Bereichen, in denen Mehrkosten verträglich sind. Des Weiteren ist die Anwendung von Verbundwerkstoffen sinnvoll, wenn andere Faktoren wie Kosteneinsparungen durch Reduktion von Treibstoffen oder eine Materialreduktion von umliegenden Bauteilen vorhanden sind. Deswegen werden diese seit Jahren im Bereich der Luft- und Raumfahrt, sowie in Hochleistungsportwagen und Sportgeräten standardmäßig eingesetzt (Chawla, 2019; Schürmann, 2007).

Da bei Werkstoffen allgemein die Ermüdungsbelastungen als kritisch anzusehen sind, gab es in der Vergangenheit schon viele Ansätze, die Lebensdauervorhersage von Faserverbundwerkstoffen zu modellieren. Der Wöhlerversuch, ein aus dem Bereich der Metalle übernommenes Konzept, wird in vielen Berechnungen berücksichtigt. In diesem spannungsbasierten Ansatz existiert für Faserverbundwerkstoffe, anders als bei den Metallen, jedoch kein geeignetes Abbruchkriterium für die Ermüdungsversuche. Deswegen muss bis zum Bruch des Probekörpers geprüft werden (Nijssen, 2020; Stinchcomb and Bakis, 1991).

In dieser Arbeit wird das Ermüdungsverhalten von glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen mit verschiedenen Lagenaufbauten und Belastungsniveaus untersucht. Dabei sollen die einzelnen Schadensmechanismen mit Hilfe der Dehnungsmessung durch Kolbenwege und der digitalen Bildkorrelation erkannt werden. Dazu wird versucht den Verlauf des E-Modul und der Poissonzahl mit der Schädigung zu korrelieren. Des Weiteren wird das Kriechverhalten durch eine Analyse der Hysteresenschleifen und der Zugversuche bestimmt. Ebenfalls kann dadurch die dissipierte Energie jedes Zyklus berechnet werden. Da diese in Wärme umgewandelt wird, kann versucht werden einen Trend im Schädigungsverlauf mit Temperaturdaten durch einen zusätzlichen Infrarot-Temperatursensor in Verbindung zu bringen.

Als weitere Messmethode wird die Schallemission benützt. Hierbei werden Signale aufgezeichnet, welche direkt von wachsenden Schädigungen oder Reibungseffekten

stammen. Anhand der erhöhten Schadensrate und dem damit einhergehenden Anstieg der Schallemissionssignale kurz vor Bruch des Probekörpers wird versucht ein geeignetes Abbruchkriterium zu finden. Durch die unterschiedlichen Lagenaufbauten und deren spezifischen Schädigungsmechanismen ist zu erwarten, dass für jedes Laminat ein eigenes Abbruchkriterium gefunden werden muss, welches für Ermüdungsversuche verwendet werden kann. Durch die neuen Kenntnisse aus den entstehenden Schädigungen können die Bauteile schlussendlich besser ausgelegt werden. Folglich könnte dadurch eine Material- und Kosteneinsparung bewirkt werden.

Um diese Herausforderungen möglichst effizient zu bewältigen, sollen eigens entwickelte Python-Skripte vorgestellt werden. Dazu zählen die Skripte zu den Auswertungen der Bildkorrelationsdaten, den Hysteresedaten, sowie der Rissdichte. Des Weiteren wird eine Transformation von Zeit- in Zykluswerte und die Berechnung von Eigenschaften der Schallemissionssignalen beschrieben. Diese haben die Aufgabe, die Auswertung der Messergebnisse im höchsten Grad automatisch auszuführen.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Schädigungen bei Faserverbundwerkstoffen

In diesem Abschnitt werden die typischen Schädigungen bei Faserverbundwerkstoffen, welche im Zugbereich bei zyklischen Ermüdungsbelastungen, sowie quasi-statischen Belastungen auftreten, näher beschrieben. Diese Schädigungen werden oft als einzelne Ereignisse beschrieben, die eine nicht einheitliche Materialantwort hervorrufen. Auch wenn sie isoliert erscheinen können, ist die allgemeine Meinung, dass die Schädigungen sich gegenseitig beeinflussen oder sogar hervorrufen können. Reifsnider nennt Mikrorissbildung in der Matrix und der Faser, Ablösen der Matrix von der Faser, Delamination und nicht elastische Deformation als die am häufigsten auftretenden Schädigungen (Puck, 1996; Reifsnider, 1991; Talreja and Janis, 2015).

2.1.1 Faser-Matrix Ablösung

Die Faser-Matrix Ablösung (engl.: debonding) ist eine Vorstufe des Matrixrisses, da sich im Normalfall zuerst vereinzelt Ablösungen in Form von Mikrorissen bilden, die sich später zu einem Matrixriss zusammenschließen. Zwei Situationen können maßgeblich für die Entstehung dieser verantwortlich sein: eine Belastung senkrecht zu den Fasern wie in **Abb. 2.1.a**, sowie auch parallel zu den Faserenden wie in **Abb. 2.1.b**. Letzteres wird vor allem bei Ermüdungsbelastungen durch Scherspannungen verursacht (Talreja and Janis, 2015).

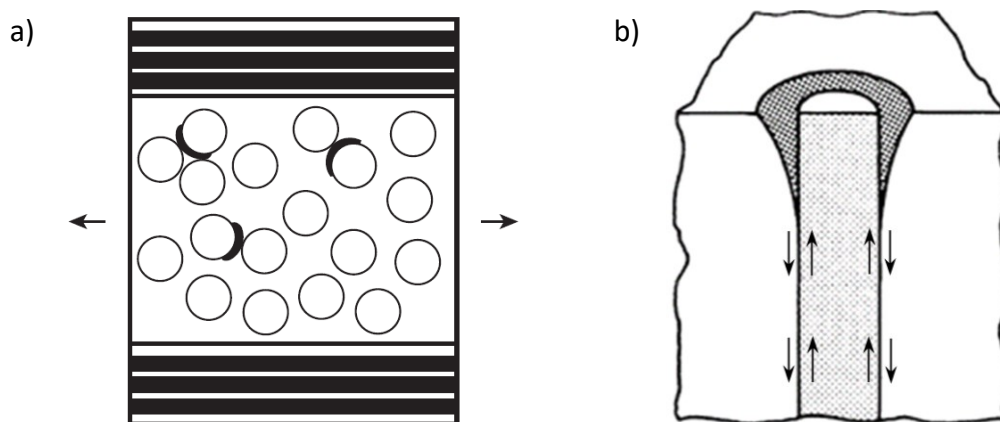


Abb. 2.1 a) Faser-Matrix Ablösung aufgrund einer Belastung senkrecht zur Faserrichtung nach (Talreja and Janis, 2015) und b) Debonding an einem freien Ende einer Faser nach (Reifsnider, 1991).

2.1.2 Matrixriss

Matrixrisse treten gewöhnlich als erste makroskopische Schadensart und auch am häufigsten auf. Diese Risse verlaufen üblicherweise über die gesamte Dicke der Laminatschicht und sind parallel zu den Fasern ausgerichtet. In weiterer Folge formen sich eine Vielzahl an Rissen und es ist unüblich, dass sich ein dominanter Riss ausbildet, weswegen man diesen Prozess Schadensakkumulation nennt. Dies ist beispielhaft in der nachstehenden **Abb. 2.2.a** dargestellt. Die Berechnung der Lasten, bei denen die ersten Risse auftreten, gelingt bereits gut bei quasi-statischen Belastungen mit Hilfe unterschiedlicher Versagenskriterien, wie z.B. das Tsai-Hill oder das Tsai-Wu Kriterium. Für Ermüdungsbelastungen sind diese einfachen und universell einsetzbaren Ansätze bislang nur eine Approximation (Reifsnider, 1991; Sevenois and van Paepegem, 2020).

Die Auswirkungen der Matrixrisse können vielseitig sein, oft kann ein Abfall der mechanischen Eigenschaften stattfinden. Es können aber auch fatale Schädigungen durch lokal höhere Risspitzenspannungen bzw. Lastumlagerungen initiiert werden. Dies ist anhand der **Abb. 2.2.b** durch Faserbrüche in benachbarten 0° Schichten visualisiert (Talreja and Janis, 2015).

Bei fortschreitender Belastung formen sich Matrixrisse in nahezu gleichen Abständen voneinander. Dies wird als mittlerer Rissabstand ($2s$) bezeichnet, welcher den Kehrwert der Rissdichte darstellt. Letzteres ist ein wichtiger Messwert, um zu bestimmen, zu welchem Zeitpunkt der charakteristische Schadenszustand (CSZ) erreicht wird. Bei diesem steigt die Rissdichte nicht mehr an und zusätzlich wird der Prüfkörper ab diesem Zeitpunkt als mit Rissen gesättigt bezeichnet (Talreja and Janis, 2015).

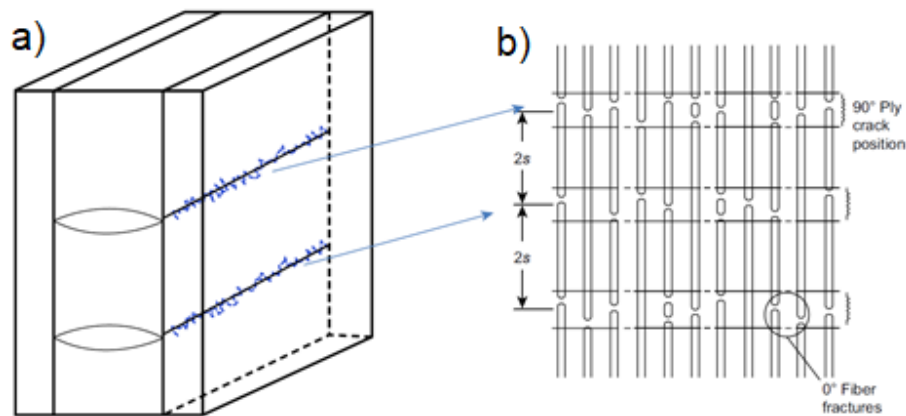


Abb. 2.2 a) Darstellung von Matrixrissen anhand eines $[90,0]_s$ Verbundes in regelmäßigen Abständen $2s$ und b) die Auslösung von Faserbrüchen in der benachbarten 0° Schicht (Talreja and Janis, 2015).

2.1.3 Delamination

Wegen der in Dickenrichtung fehlenden Verstärkung der Lamine sind nur geringe interlaminare Spannungen notwendig, damit sich ein Bruch zwischen zwei Schichten ausbilden kann. Durch Spannungsanalysen ist bekannt, dass bei dünnwandigen Bauteilen nur sehr geringe Spannungen in den Zwischenebenen erzeugt werden. Allein aufgrund dessen kann kein Versagen vermutet werden. In Versuchen treten Delaminationen jedoch häufig auf. Diese können auf zuvor erzeugte Schädigungen, wie Matrixrisse oder Impactschäden, zurückgeführt werden. Da es sich bei dieser Schädigungsart um einen einzelnen Riss handelt, welcher kontinuierlich wächst, kann das Wachsen durch die Methoden der linear elastischen Bruchmechanik beschrieben werden (Puck, 1996).

2.1.4 Faserbruch

Faserbrüche sind aus der Sicht des Ingenieurs die bevorzugte Schadensart, denn dies zeigt, dass das volle Potential des Werkstoffes ausgenutzt wird. Durch eine begrenzte Kapazität der Grenzfläche Kraft in die Faser zu leiten, tritt diese Art nur bei Lagen in Richtung der Belastung auf. Des Weiteren können benachbarte Lagen durch die hohe Energiefreisetzung beim Bruch eines Faserbündels ebenfalls beschädigt werden. Oft bedeutet deswegen ein Faserbruch in einer Schicht das komplette Versagen des Laminates (Puck, 1996). Nach der Zugfestigkeitsverteilung, oft als Weibullverteilung beschrieben, reißen Fasern vereinzelt bei geringeren Lasten, diese können durch Spannungskonzentration andere Faserbrüche verursachen (Talreja and Janis, 2015).

2.1.5 Schädigungen durch zyklische Belastungen

Zu Beginn ist der Begriff der Materialermüdung zu erläutern, der als die vom Zyklus abhängige Abnahme der internen Integrität definiert wird. Charakteristisch ist hierbei, dass die maximale Belastung niedriger als die Zugfestigkeit des Laminates ist. Wie in **Abb. 2.3** ersichtlich ist, durchläuft ein Laminat während seiner Lebensdauer verschiedene Stadien. Der erste Bereich reicht nur bis circa 10-15 % der gesamten Lebenszeit, jedoch werden hier praktisch alle Matrixrisse erzeugt und vereinzelt werden Faserbrüche beobachtet. Der CSZ markiert das Ende der ersten Phase, danach wachsen die Matrixrisse in die Grenzschicht zweier Lagen, bis die Risse ineinander gewachsen sind. Diese können sich dann in weiterer Folge zu Delaminationen ganzer Schichten entwickeln. In der dritten Phase nimmt die Schadensrate erneut zu, hierbei kann zwischen Zug- und Druckversagen unterschieden werden, wobei Ersteres Faserbrüche und Zweiteres Faserknicken hervorruft (Stinchcomb and Bakis, 1991).

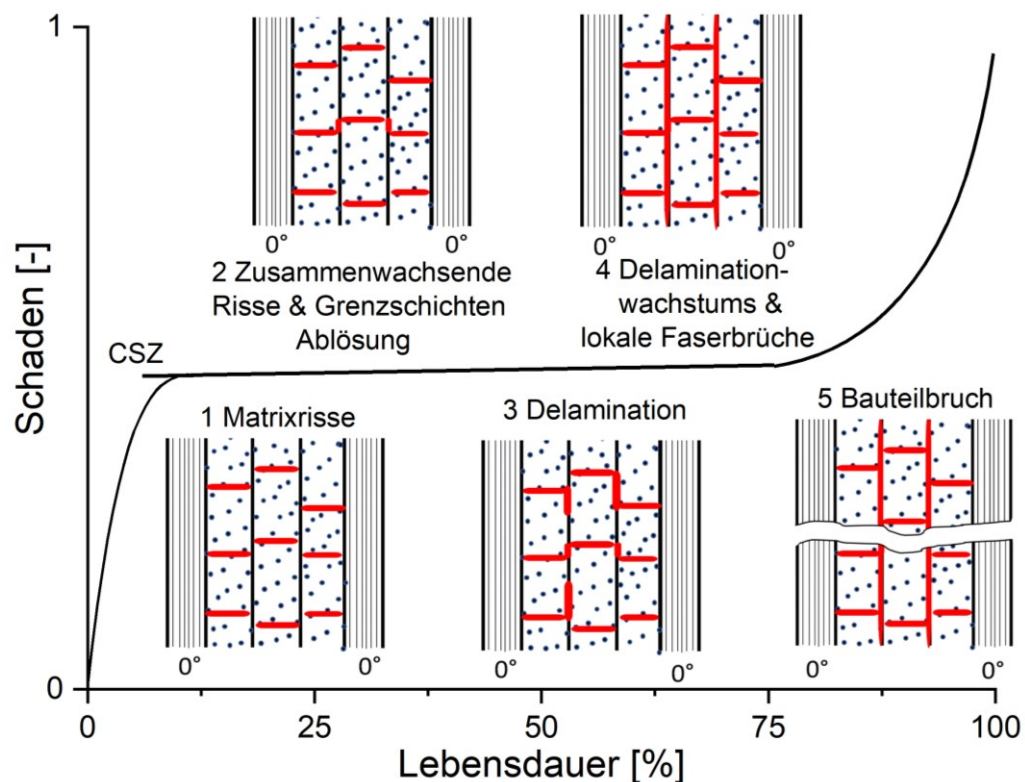


Abb. 2.3 Darstellung der verschiedenen Schadensarten und des kumulierten Schadens während eines Ermüdungsversuchs im Zugbereich nach (Stinchcomb and Bakis, 1991).

2.2 Ermüdungsversuche

2.2.1 Wöhlerversuch

Durch eine Reihe von Achsbrüchen von Eisenbahnwaggons und Kutschen wurde die Ermüdungsprüftechnik ab dem Jahr 1840 entwickelt, um Bauteile mit variablen Lasten besser auszulegen. Die für die Auslegung wichtige Betriebsfestigkeit hängt jedoch von einer Vielzahl von Parametern ab, welche sich gegenseitig beeinflussen können: die Temperatur, die Belastungsart und -höhe, die Belastungsfrequenz und die Probengeometrie sind nur einige der oft untersuchten Einflussgrößen (Radaj and Vormwald, 2007).

In der Praxis sind die Materialcharakterisierungsversuche mit konstanter Beanspruchungsamplitude von bedeutender Rolle. Die Ermüdungsfestigkeit ist definitionsgemäß die Spannungsamplitude, welche ein Versagenskriterium bei einer endlichen oder unendlichen Schwingenzahl erfüllt. Diese Kriterien können prinzipiell frei gewählt werden, jedoch haben sich für Metalle ein vorgegebener Steifigkeitsabfall, der vollständige Bruch oder die Bildung eines Anrisses mit einer bestimmten Größe etabliert. In der untenstehenden **Abb. 2.4** sind die Möglichkeiten der Variation der Ober- (σ_{\max}) und Unterspannung (σ_{\min}), sowie das korrespondierende Spannungsverhältnis (R), welches in Glg. 2.1 beschrieben wird, dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass Ermüdungsversuche in Druckschwell-, Wechsel- und Zugschwellbeanspruchung unterteilt werden können, die einen starken Einfluss auf das Schädigungsverhalten haben (Radaj and Vormwald, 2007).

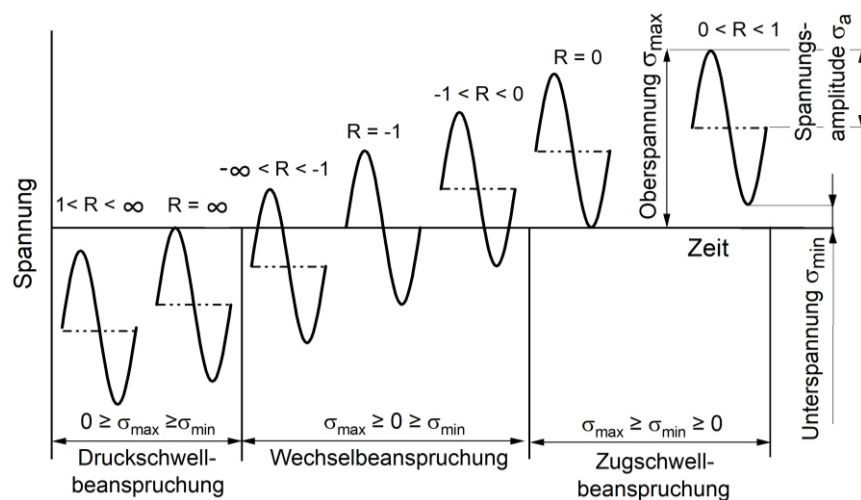


Abb. 2.4 Verschiedene Spannungsverhältnisse bei einem Ermüdungsversuch mit einer Sinusbelastung nach (ISO 13003:2003).

$$R = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \quad (2.1)$$

Im Zuge der Auswertung von Ermüdungsversuchen wird oft eine so genannte Wöhlerkurve oder auch S/N-Kurve erstellt. Diese stellt das Eintreten des Versagenskriteriums bei einer gewissen Spannungsamplitude gegen die erbrachte Lastspielzahl im doppellogarithmischen Maßstab dar. Während einer Versuchsreihe wird die Belastungsfrequenz, sowie das Spannungsverhältnis konstant gehalten. Wie in **Abb. 2.5** erkenntlich ist, kann die Wöhlerkurve eines Metalls in drei Bereiche unterteilt werden. Hierbei ist ersichtlich, dass die Zeitstandfestigkeit durch ein Potenzgesetz approximiert werden kann. Dieses nimmt im doppellogarithmischen Maßstab die Form einer Geraden an. Der letzte Bereich kann sich als horizontale Linie, sowie auch als ein zweiter Knick mit geringerer Steigung ausbilden. Der typische Anwendungsbereich liegt bei der Zeitstandfestigkeit bis hin zur Dauerfestigkeit. Da die Streuung der Ergebnisse im allgemeinen sehr hoch ist, muss die Gerade durch statistische Mittel aus mehreren Messungen mit gleicher Belastungsamplitude erstellt werden (Radaj and Vormwald, 2007).

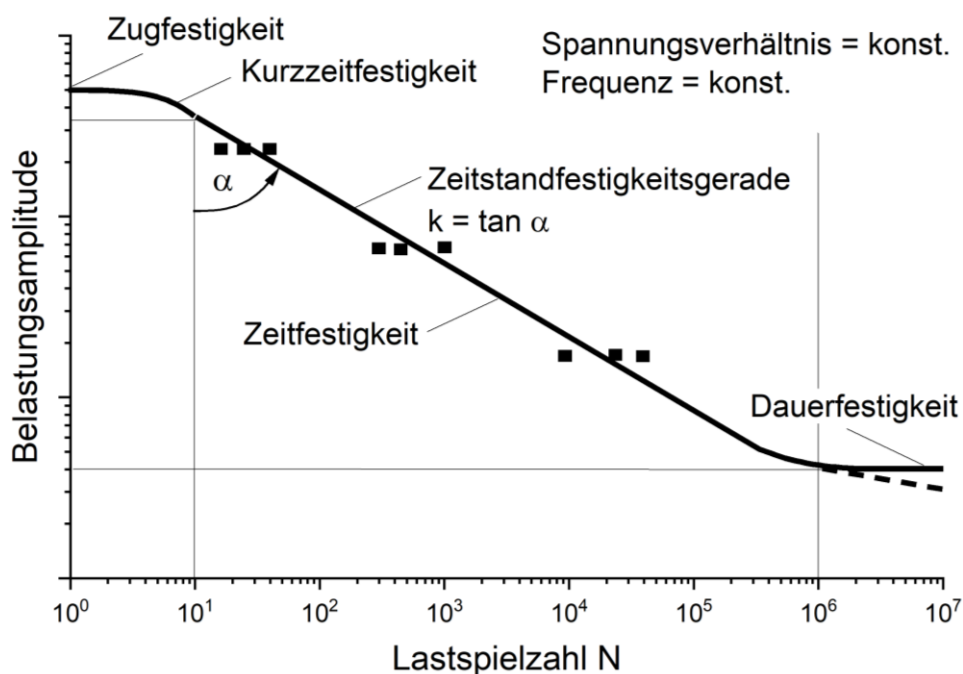


Abb. 2.5 Wöhlerkurve eines Metalls mit drei Bereichen nach (Radaj and Vormwald, 2007).

2.2.2 Analyse einzelner Zyklen

Die Auswertung von einzelnen Zyklen kann ebenfalls zur Aufklärung der Schädigungsmechanismen genutzt werden. Diese beruht auf den viskoelastischen Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe. Dabei wird eine Phasenverschiebung von der Belastungskurve zur Antwortkurve hervorgerufen; was in **Abb. 2.6.a** ersichtlich ist. Durch Auftragen eines Zyklus in ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm kann der Sekantenmodul (E_s) und der dynamische E-Modul (E_{dyn}) ermittelt werden. Eine derartige Auswertung ist in **Abb. 2.6.b** dargestellt. Die eingeschlossene Fläche sowie die Belastungsfrequenz ist der Energie, welche in Wärme umgewandelt wird, proportional. Um diese sogenannte hysteretische Erwärmung auf einem sinnvollen Wert zu halten, darf die Frequenz nicht beliebig erhöht werden (Zahnt, 2003).

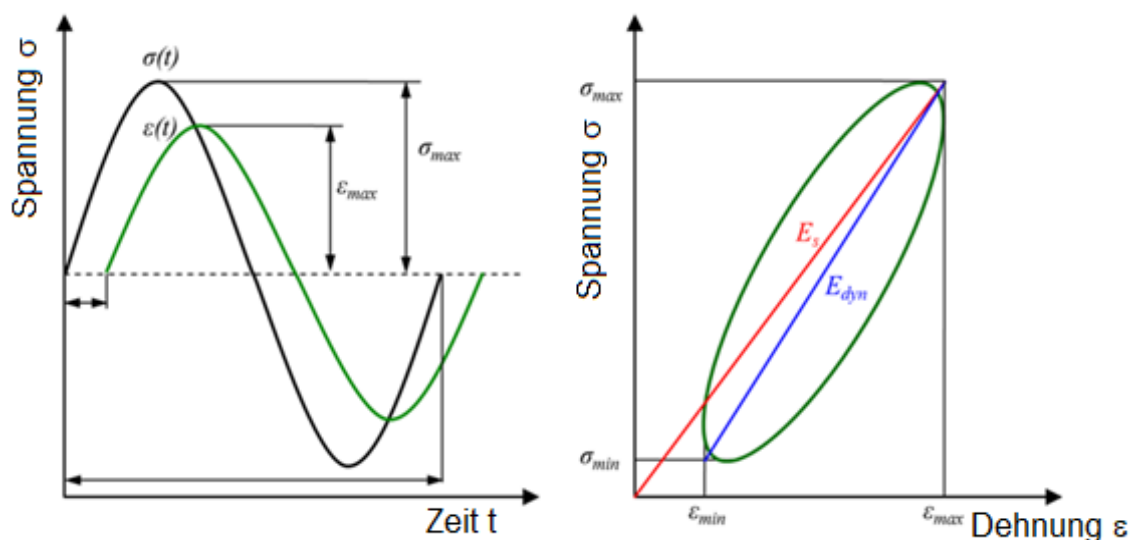


Abb. 2.6 a) Phasenverschiebung der Belastungskurve von der Antwortkurve und b) Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Zyklus mit der dazugehörigen Auswertung (Zahnt, 2003).

Durch den Verlauf des Sekantenmoduls und des dynamischen Moduls können die Auswirkungen der Schädigungen von Kriecheffekten unterschieden werden. Da der Sekantenmodul bzw. statischer E-Modul nur mit der maximalen Dehnung und Spannung im Zyklus berechnet wird, beinhaltet dieser Effekte von Schädigung und Kriechen. Der dynamische E-Modul bezieht sich nur auf den jeweiligen Zyklus und wird deswegen nur von Schädigungen beeinträchtigt. Dadurch ist der statische E-Modul niedriger als der dynamische E-Modul, wie in **Abb. 2.7** ersichtlich ist. Hier sind die E-Moduln auf den jeweilig ersten gemessenen Wert normiert, diese bilden die relativen Moduln (Zahnt, 2003).

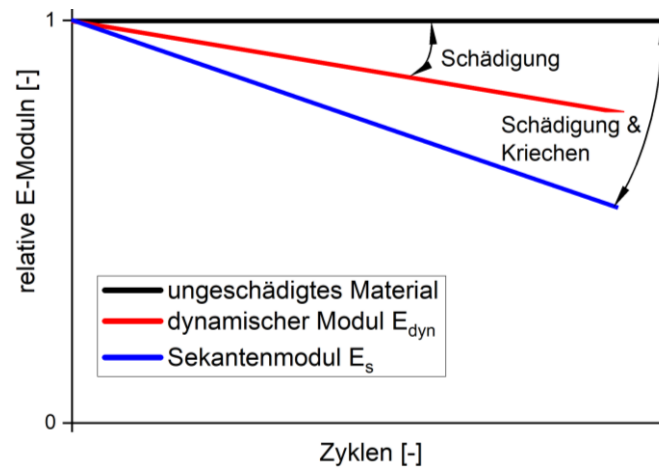


Abb. 2.7 Abfall des Sekantenmoduls und des dynamischen Moduls über die Zyklenzahl nach (Zahnt, 2003).

2.2.3 Poissonzahl als Schadensindikator

Ähnlich wie die Reduktion des E-Moduls kann auch der Verlauf der Poissonzahl als Schadensindikator fungieren. Einige Arbeiten zeigten, dass in manchen Fällen dieser sogar sensibler auf Schädigungen reagiert als die Moduln. Dies ist möglich, weil die Poissonzahl die Dehnung parallel und quer zur Belastungsrichtung und somit Informationen aus zwei Richtungen beinhaltet. Weiters zeigt die Literatur, dass eine Abnahme der Poissonzahl durch eine Zunahme von Matrixrissen in 90° Schichten erklärt werden kann. In **Abb. 2.8** ist ein Verlauf der Poissonzahl eines Kreuzverbundes dargestellt, es sind deutlich drei Bereiche aufgrund der Schädigungen erkennbar (Akay et al., 2016; van Paepegem et al., 2010).

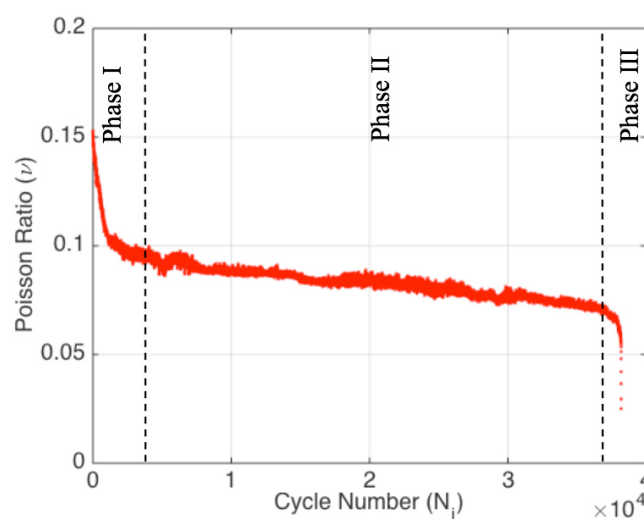


Abb. 2.8 Verlauf der Poissonzahl in einem Ermüdungsversuch mit einem $[90,0]_{6S}$ Laminate (Akay et al., 2016).

2.2.4 Vorhersage der Ermüdungslebensdauer

Trotz Jahrzehnten an Entwicklungen wurde noch kein zufriedenstellendes Modell zur Vorhersage der Lebensdauer von ermüdungsbelasteten Faserverbundwerkstoffen, aufgrund ihrer anisotropen Schädigung, entwickelt (Vassilopoulos, 2020). Die Kriterien für ein derartiges ideales Modell wurden erstmals von (Sendekj, 1991) beschrieben. Die Anforderungen an dieses lauten:

- akkurate Abbildung der Wirklichkeit
- basierend auf einer Schadensmatrix
- Berücksichtigung einer großen Anzahl an Material-, Test-, Belastungs- und Umweltvariablen
- Vorhersage bei verschiedenen Laminataufbauten anhand von Ermüdungsdaten der einzelnen unidirektionaler (UD) Schichten
- Akzeptanz von Datenstreuung

In dem folgenden Absatz werden trotzdem einige Modelle vorgestellt, welche in begrenzten Szenarios zum Erfolg geführt haben. Einer der einfachsten Ansätze baut auf der Reduktion der Steifigkeit auf. Das Abbruchkriterium kann hierbei ein frei wählbarer Steifigkeitsverlust sein, wie in **Abb. 2.9.a** ersichtlich (Stinchcomb and Bakis, 1991). Das Haigh-Diagramm (CLD) bietet die Möglichkeit anhand von einzelnen Materialtests auf andere Lastzustände zu extrapolieren. Hierbei ist die Spannungsamplitude über die Mittelspannung aufgetragen, des Weiteren werden S/N Diagramme mit verschiedenen R-Verhältnissen auf radial nach außen gerichteten Strahlen aufgetragen. Schlussendlich werden Punkte mit gleicher Zykluszahl miteinander verbunden. Diese „constant life lines“ geben die Lebensdauer für jeden Belastungszustand an. Ein derartiges Diagramm ist in **Abb. 2.9.b** dargestellt (Vassilopoulos, 2015). Seit dem Jahr 2000 werden eine Vielzahl von Artikeln mit neuen Theorien veröffentlicht, welche durch Simulationen und künstlicher Intelligenz versuchen, Modelle durch fitten von willkürlichen mathematischen Ausdrücken möglichst nahe an die Realität zu bringen. Jedoch werden die begrenzte Möglichkeit zur Extrapolation und auch das Fehlen von analytischen Formeln zur Nachvollziehbarkeit, als deren größten Nachteile gesehen (Vassilopoulos, 2020).

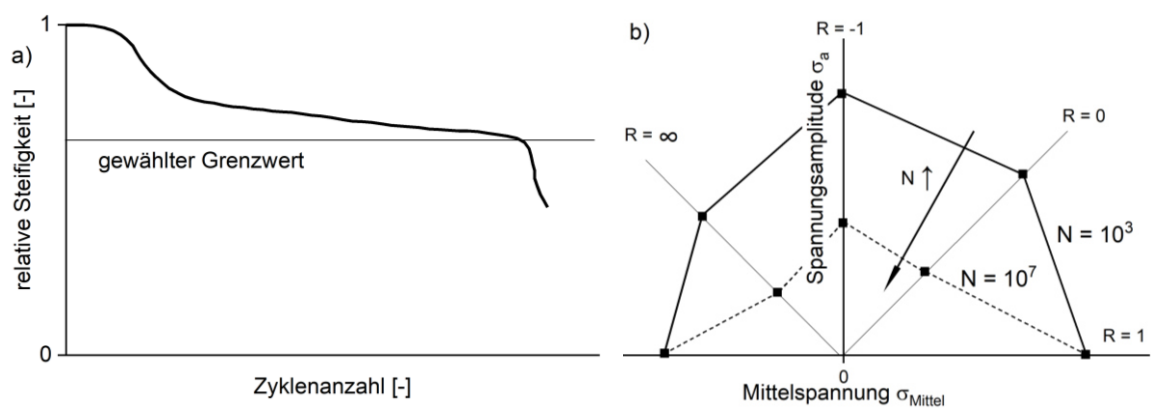


Abb. 2.9 a) Steifigkeitsverlust über der Zyklusanzahl nach (Stinchcomb and Bakis, 1991) und b) Haigh-Diagramm nach (Vassilopoulos, 2015).

2.2.5 Ermüdungsversuche mit zyklischen Zugversuchen

In der Vergangenheit wurde eine Prüfprozedur entwickelt, welche die typischen Ermüdungsversuche mit klassischen Zugversuchen verbindet. Dabei wird, nach einem kraftgesteuerten Ermüdungsbereich mit einer definierten Anzahl an Zyklen, die Kraft auf null reduziert und ein weggeregelter quasi-statischer Zugversuch bis zur Mittelspannung gefahren. Danach wird der Ermüdungsversuch wieder fortgesetzt, eine Veranschaulichung der Prüfprozedur ist in **Abb. 2.10** dargestellt. Der Zweck dieses Verfahrens ist die Charakterisierung der Schädigungen anhand von Steifigkeitsänderungen. Hierbei ist die Vergleichbarkeit der zyklischen Zugversuche (ZZV) mit konventionellen quasi-statischen Zugversuchen gegeben. Des Weiteren können während der ZZV mittels digitaler Bildkorrelation (DIC) die Dehnungen nicht nur in Belastungsrichtung, sondern in beliebiger Richtung gemessen werden. Dies kann genutzt werden um die Steifigkeitsmatrix eines anisotropen Werkstoffes zu charakterisieren (Brunbauer et al., 2014).

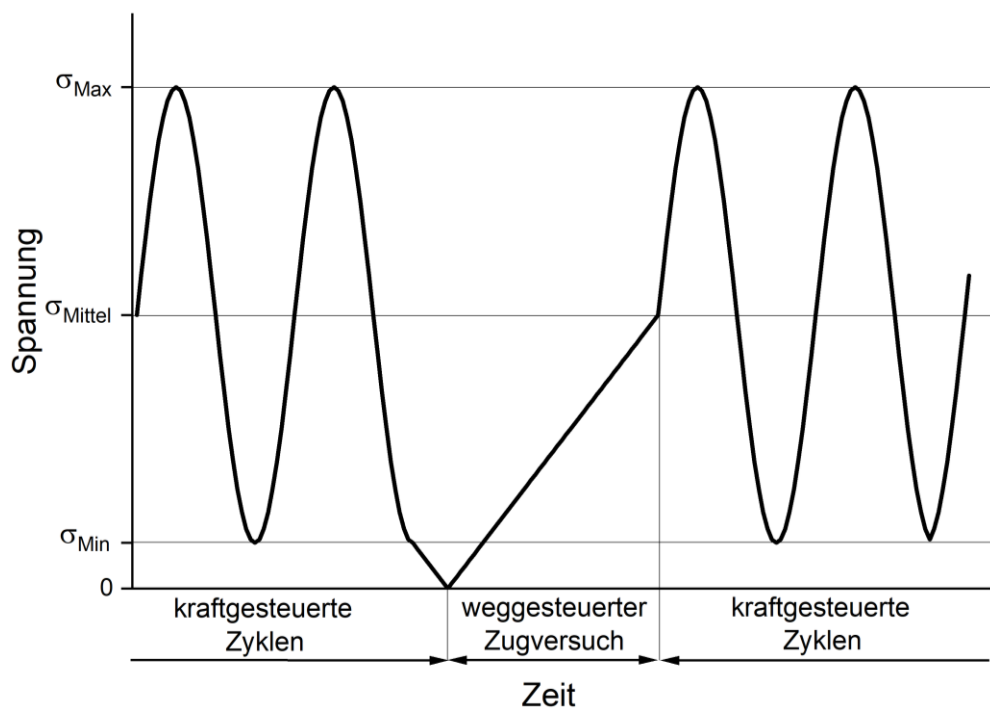


Abb. 2.10 Prüfprozedur der zyklischen Zugversuche nach (Brunbauer et al., 2014).

2.3 Schallemission

2.3.1 Erzeugung und Leitung elastischer Wellen

Schallemissionen (engl.: acoustic emission (AE)) sind "Phänomene, durch die transiente elastische Wellen erzeugt werden, z.B. durch plastische Verformung, Rissausbreitung, Erosion, Korrosion, Stöße, Leckage" (ÖNORM EN 1330-9:2017 09 01). Diese elastischen Wellen treten als zwei Grundformen auf: Bei den Longitudinalwellen schwingen die Teilchen, aufgrund von Zug- und Druckkräften, in die Ausbreitungsrichtung. Bei den Transversalwellen, oder auch Scherwellen genannt, schwingen die Teilchen durch Scherkräfte senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, weswegen sie nur in Festkörpern auftreten können (Trofimowa, 1997).

Aus den Bewegungsgleichungen für isotrope elastische Medien können die Phasengeschwindigkeiten der beiden Wellenformen berechnet werden, diese sind in Glg.2.2 und Glg.2.3 beschrieben. Erkenntlich ist, dass sich die Longitudinalwellen schneller als die Transversalwellen fortbewegen. Für das weitere Verständnis kann jede Kombination

von Wellen als Superposition von einer Longitudinalwelle und zweier senkrecht zueinander linear polarisierten transversal Schwingungen aufgeteilt werden; in **Abb. 2.11** sind die drei Schwingungen dargestellt. Durch Brechungen und Reflexion an einer Trennebene können Longitudinalwellen und senkrecht zur Trennebene polarisierte Transversalwellen ineinander umgewandelt werden (Landau and Lifšic, 1991).

$$c_{longitudinal} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.2)$$

$$c_{transversal} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (2.3)$$

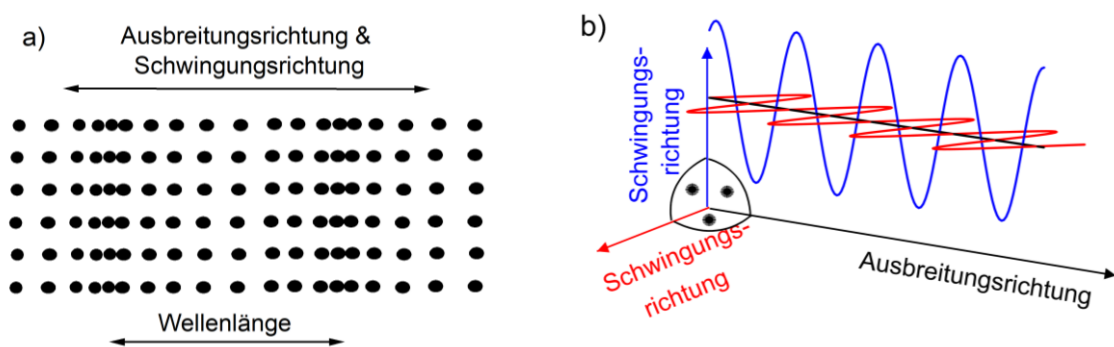


Abb. 2.11 a) Darstellung einer Longitudinalwelle und b) der zwei zueinander senkrecht polarisierten Transversalwellen.

Für Strukturen mit unendlicher Ausdehnung in zwei Richtungen und zwei parallelen freien Oberflächen, wurden spezielle Wellenformen beschrieben. Diese sind die dominierende Art an Schwingungen in den eben definierten Platten und werden deswegen oft Plattenwellen bzw. Lambwellen genannt. Diese werden in symmetrische (S) und antisymmetrische (A) Moden unterschieden; zwei Beispiele sind in **Abb. 2.12** dargestellt. Angeregt werden diese durch die konstruktive Interferenz von Wellen, welche den passenden Reflexionswinkel sowie Wellenlänge für die jeweilige Plattendicke voraussetzt. Dadurch können unendliche viele Moden vorkommen, jedoch treten Moden höherer Ordnung erst bei dickeren Platten auf. Des Weiteren ist es üblich die Phasengeschwindigkeit dieser Moden zusammen mit dem ersten Mode der horizontal

polarisierten Transversalwelle (engl.: shear horizontal mode (SH)) über das Produkt der Frequenz und der Plattendicke aufzutragen; beispielhaft ist eine Dispersionskurve in **Abb. 2.13** dargestellt. Des Weiteren werden die einzelnen Moden durch eine Superposition von unterschiedlichen Dämpfungseffekten (Materialdämpfung, geometrische Ausbreitung und Streuung an Imperfektionen) verschieden beeinflusst. So wird beispielsweise die A_0 -Mode weniger gedämpft als die S_0 -Mode (Sause, 2016).

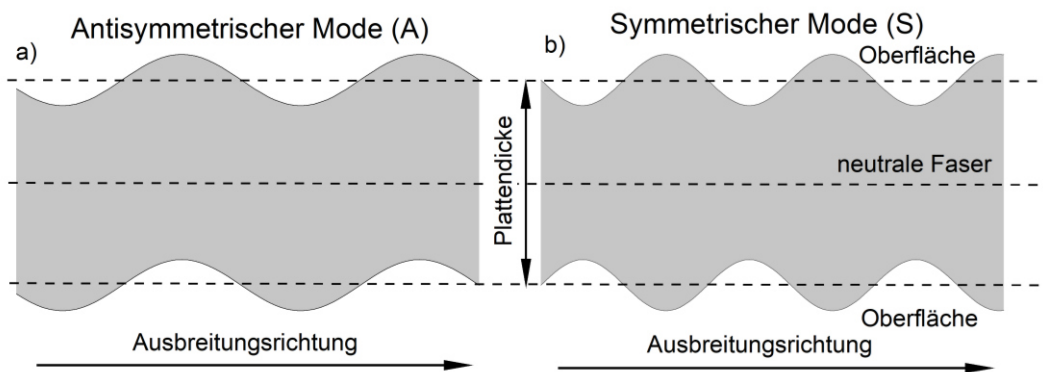


Abb. 2.12 Antisymmetrische und Symmetrische Plattenwellen nach (Sause, 2016).

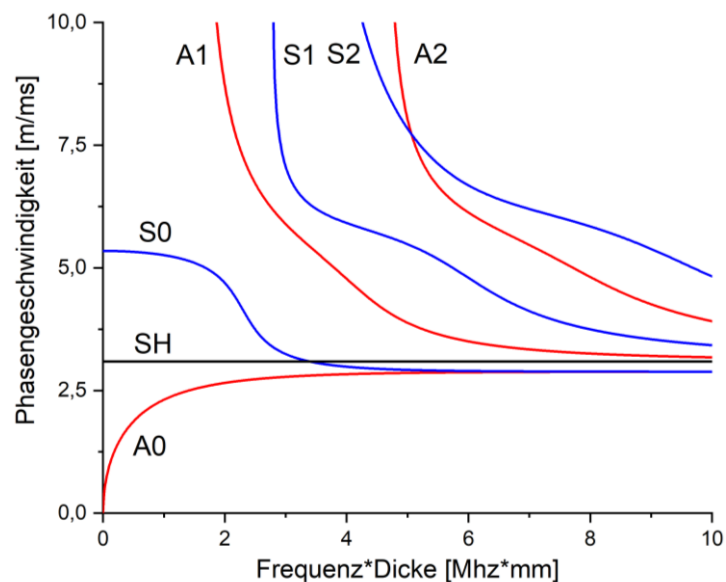


Abb. 2.13 Dispersionskurve einer Aluminiumplatte mit den ersten drei antisymmetrischen (A) und symmetrischen (S) Moden, sowie dem erste Mode der horizontal polarisierten Transversalwelle (SH) nach (Armin Huber, 2020).

Bei Faserverbundwerkstoffen werden elastische Wellen durch Rissbildung in der Matrix, Debonding, Auszug von Fasern aus der Matrix, Faserbruch oder Delaminationen erzeugt. Die Eigenschaften dieser Wellen hängen sehr stark von der Art der Quelle, dem Laminataufbau und der Umgebungstemperatur ab. Durch die anisotropen Materialeigenschaften wird die Leitung richtungsabhängig beeinflusst. Der Einfluss der Faserorientierung ist in **Abb. 2.14** anhand der Geschwindigkeit in Abhängigkeit des Verdrehwinkels eines UD-Laminates dargestellt. Im Allgemeinen werden Wellen in Faserrichtung viel schwächer gedämpft als in Querrichtung (ÖNORM EN 15857:2010 03 01).

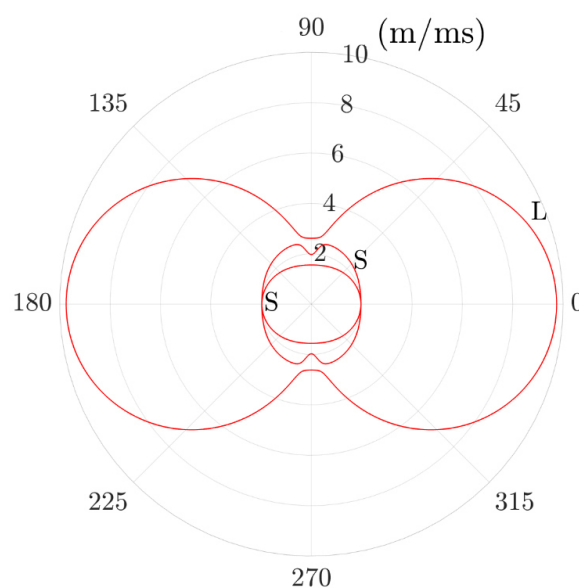


Abb. 2.14 Abhängigkeit der Geschwindigkeit für die Longitudinal- (L) und den beiden zueinander senkrecht stehenden Schwerwellen (S) anhand der Faserrichtung eines UD-Laminats des Materials AS4M3502 (Armin Huber, 2020).

2.3.2 Acoustic emission in der Praxis

In der Praxis wird versucht möglichst viele Informationen aus den Wellen, welche mittels Piezoelektrischen Sensoren digitalisiert und mittels Vorverstärker verstärkt werden, zu extrahieren. Dies beruht auf der Tatsache, dass der erzeugende Schadensmechanismus die Welle stark beeinflussen kann. So fällt im Fall eines Risswachstums die Spannung an einer neu erschaffenen Rissoberfläche schlagartig auf null. Dadurch beginnt diese innerhalb einer charakteristischen Zeit um die neue Gleichgewichtslage zu oszillieren, dieser Vorgang hängt stark von den äußeren Umgebungsbedingungen ab. Hierbei kann versucht werden den Schadensmechanismus bzw. die Signale anhand ihrer Ähnlichkeit zu klassifizieren. Weitere

Möglichkeiten zur Charakterisierung sind die Zählung der einzelnen Wellen oder auch „hits“ genannt, sowie die Lokalisierung beziehungsweise Ortung der Signale. Letzteres gelingt durch die Detektion desselben Signals durch mindestens zwei Sensoren, welches ab diesem Zeitpunkt ein event darstellt. Mittels der Zeitdifferenz zwischen den Ankunftszeiten des Signals an den Sensoren und der Geschwindigkeit der Welle kann der Ort der entstandenen Schädigung berechnet werden (Sause, 2016).

Für eine Auswertung wird ein Signal benötigt, welches einen definierten Anfang und Ende besitzt und durch einen Schwellwert (engl.: threshold) in dB_{AE} ermittelt wird. Hierzu ist in **Abb. 2.15** ein transientes und ein kontinuierliches Signal dargestellt. Der Umrechnungsfaktor der Spannung in die Dezibelskala wird in Glg. 2.4 gezeigt. In der folgenden Tabelle 2.1 wird eine Auswahl der in der Literatur benutzten Eigenschaften von Signalen bzw. waveforms beschrieben (Sause, 2016).

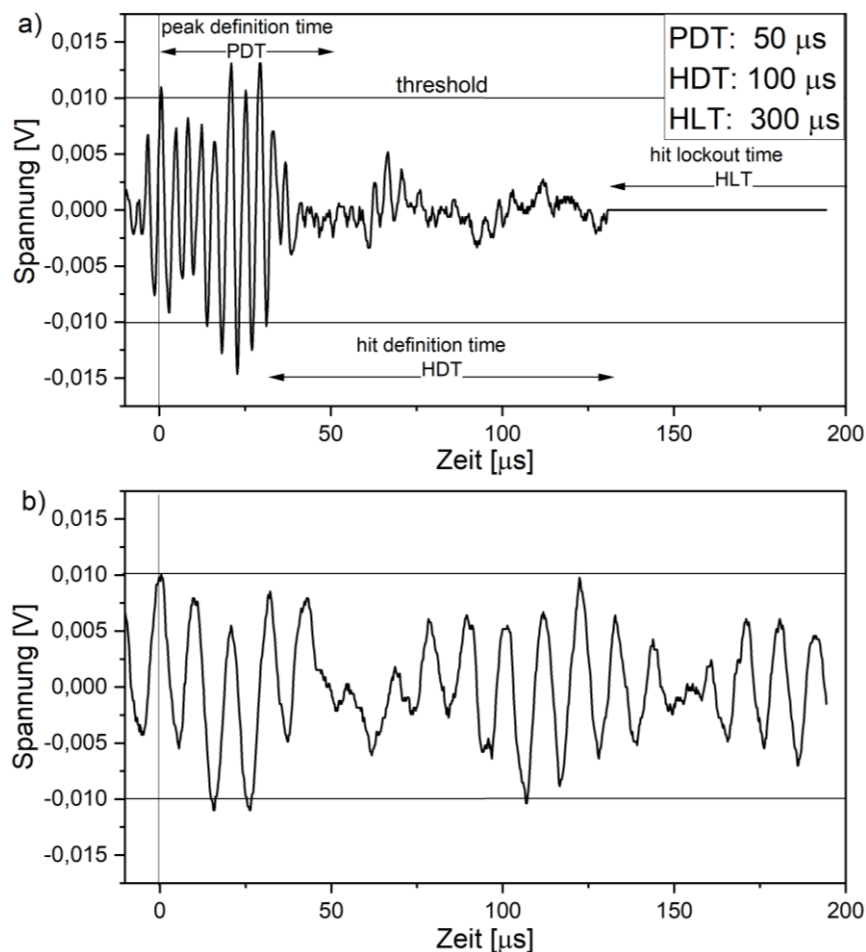


Abb. 2.15 a) transientes Signal mit drei Trigger-Parametern und den eingestellten threshold und b) kontinuierliches Signal ohne definierten Anfang und Ende.

$$dB_{AE} = 20 \log\left(\frac{U}{1 \mu V}\right) - dB_{Vorverstärker} \quad (2.4)$$

Tabelle 2.1 Auswahl von Eigenschaften einer waveform und eine kurzen Beschreibung nach (Sause, 2016).

Duration [μ s]	Die Zeit zwischen der ersten und der letzten Überschreitung des thresholds
Counts [1]	Anzahl der threshold Überschreitungen
Amplitude [dB_{AE}]	Maximaler gemessener Spannungswert in der Dezibelskala
Absolute Energie [J]	Integral der quadrierten Spannung
Partial power [%]	Das Flächenintegral zwischen zwei Grenzen eines Fast-Fourier-Transformation (FFT) Spektrums bezogen auf die gesamte Fläche
Peak frequency [Hz]	Frequenz mit dem höchsten Beitrag im FFT-Spektrum
Frequency centroid [Hz]	X-Komponente des Flächenschwerpunkt des FFT-Spektrums
Weighted peak frequency [Hz]	Geometrisches Mittel der peak frequency und der frequency centroid

Für die Auslösung der Hitspeicherung oder auch Triggerung genannt, ist die Höhe des thresholds entscheidend. Ist diese zu niedrig angesetzt, werden vermehrt Umgebungsgeräusche, welche im Allgemeinen eine niedrigere Amplitude besitzen als die Signale aufgrund von Schädigungen, aufgezeichnet. Bei einer zu hohen Grenze besteht die Gefahr, dass die gewünschten Signale nicht mehr aufgezeichnet werden (Sause, 2016). Des Weiteren sind in **Abb. 2.15.a** drei Parameter dargestellt, welche für die Speicherung wichtig sind. Die peak definition time (PDT) definiert die maximale Zeit, welche zwischen der Triggerung und der Zeit mit der maximalen Amplitude vergehen darf. Die hit definition time (HDT) beginnt nach der letzten threshold Überschreitung und nachdem diese abgelaufen ist, wird die Aufzeichnung des Signales gestoppt. Schlussendlich definiert die hit lockout

time (HLT) jene Zeit, welche nach einem hit vergehen muss, damit ein zweiter hit gespeichert wird. Ist diese zu niedrig können Echos registriert werden. Bei einer zu hohen HLT könnte die nächste waveform nicht mehr aufgezeichnet werden (Unnorsson, 2013).

Schlussendlich muss, bevor ein Test durchgeführt werden kann, überprüft werden, ob die Haftung der Sensoren an dem Probekörper ausreichend und das Prüfgerät einsatzbereit ist. Die korrekte Leitung der Wellen wird durch Koppelmittel wie Hochvakuumfette hergestellt und die mechanische Anbringung der Sensoren erfolgt durch Klebestreifen, elastische Gummibänder oder Klammern. Für die Überprüfung wird ein automatischer Sensortest (AST) oder eine Hsu-Nielson Quelle benützt. Bei Ersterem senden die Sensoren der Reihe nach Impulse aus, welche die anderen Sensoren aufzeichnen und auswerten. Bei dem zweiten Test wird eine Bleistiftmine mit definierten Eigenschaften an der Prüfkörperoberfläche, wie in **Abb. 2.16** dargestellt, zerbrochen, die Abweichungen der Amplituden darf einen Grenzwert nicht übersteigen (ÖNORM EN 15857:2010 03 01).

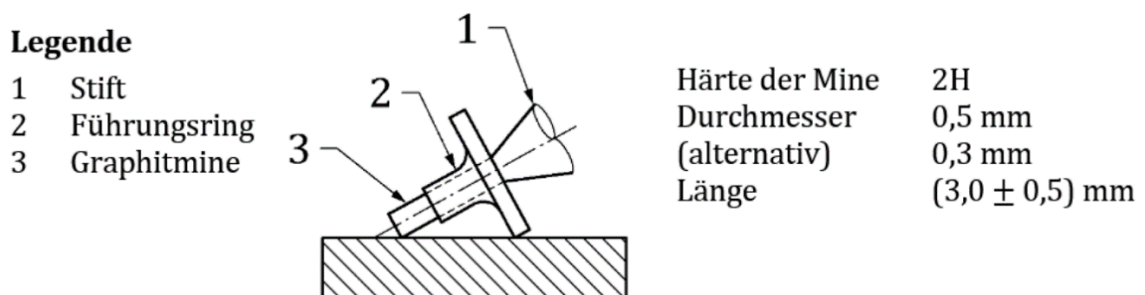


Abb. 2.16 Kontrolle der Haftung und des Prüfgeräts mit einer Hsu-Nielson Quelle (ÖNORM EN 1330-9:2017 09 01).

2.3.3 Interpretation von waveforms

Ein in der Praxis geläufiger Ansatz zu Auswertung der Signale ist Clusteranalyse (engl.: clustering), man spricht hier auch vom unsupervised pattern recognition. Hierbei werden durch Algorithmen die Signale durch Kombinationen von deren Eigenschaften, in diesem Zusammenhang oft feature genannt, zu Gruppen (engl.: cluster) gegliedert. Die Anzahl an diesen Gruppen, sowie die Anzahl der feature-Kombinationen können variiert werden. Durch eine Reihe von Kennzahlen, welche die cluster bewerten, kann die beste Kombination und die Grenzen der cluster ermittelt werden. Dazu ist in **Abb. 2.17** das Ergebnis eines double cantilever beam test an einem Carbonfaser Laminat dargestellt. Dabei wurden drei cluster mit den features: peak frequency, weighted peak frequency, partial power 1-4 entdeckt. Zwei Features mit einer guten optischen Trennung sind hierbei dargestellt. Des Weiteren wurden FEM-Simulationen mit Rissen an verschiedenen Stellen des Probekörpers für drei Schadensmechanismen durchgeführt. Dadurch war es möglich die so gefundenen cluster visuell den Schädigungen zuzuordnen (Sause et al., 2012).

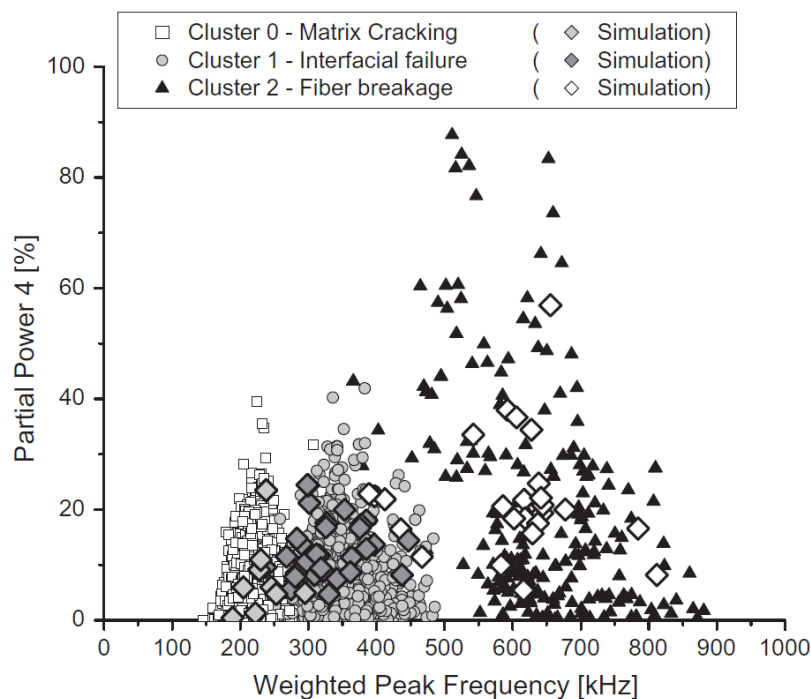


Abb. 2.17 Ergebnis eines clustering-Algorithmus und Simulationen eines double cantilever beam tests. Die Grenzen der hier dargestellten partial power 4 sind 450 und 600 kHz (Sause et al., 2012).

Das clustering kann die einzelnen Signale prinzipiell unterscheiden, sie jedoch nicht zu einem Schadensmechanismus zuordnen und somit auch nicht das Maß an Schädigung beurteilen. Das Prinzip der single dominant damage mechanism (SDDM) besagt jedoch, dass in einigen Szenarien einzelne Schadensmechanismen zeitlich getrennt voneinander auftreten, wodurch diese identifiziert werden können. Hierzu ist in **Abb. 2.18** die Anzahl der hits pro Sekunde, beziehungsweise hitrate und die Belastung über die Zeit bei einem Zugversuch eines Kreuzverbund-Laminates dargestellt. Es konnte durch Simulationen und Beobachtungen nachgewiesen werden, dass am Anfang des Versuches nur Matrixrisse in den 90°-Schichten entstanden und beim zweiten Anstieg der hitrate Faser-Matrix Ablösungen und Faserbrüche gemessen wurden (Brunner, 2018).

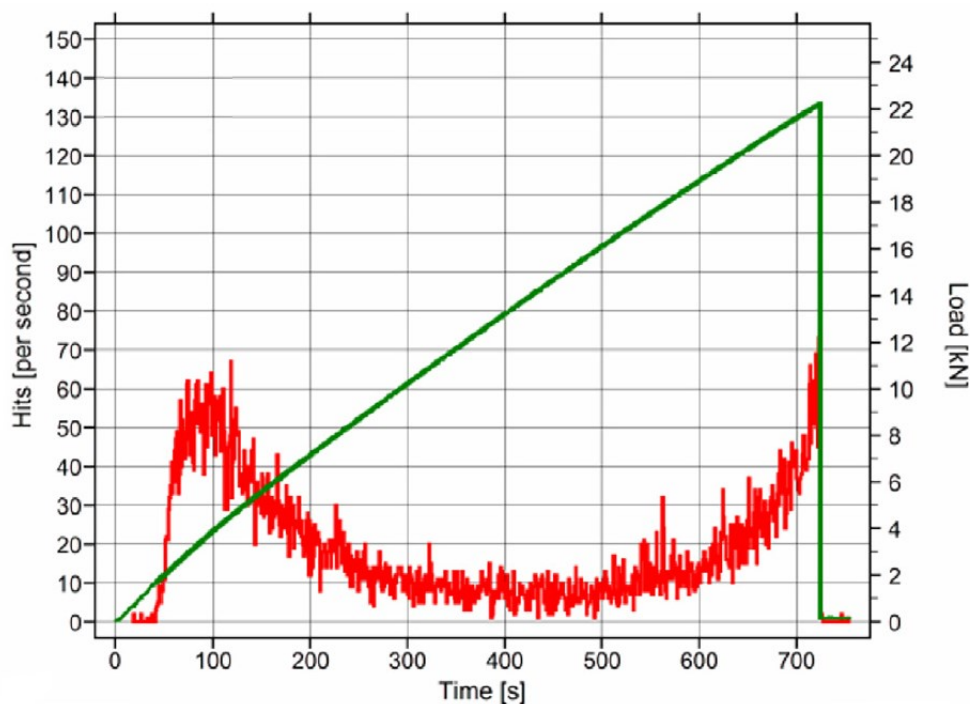


Abb. 2.18 Prinzip des single dominant damage mechanism bei einem Zugversuch eines Kreuzverbund-Laminats (Brunner, 2018).

2.3.4 Anwendungsfälle von künstlichen neuronalen Netzen

Künstliche neuronale Netze (KNN) werden in vielen technischen Bereichen benützt, diese sind eine Untergruppe der künstlichen Intelligenz (KI). Den Anfang hatten diese in der Lokalisierung von Signalen, im Besonderen bei komplexen Geometrien und anisotropen Materialien (Chlada et al., 2010). Eine weitere Anwendungsmöglichkeit ist die Erkennung von Umgebungsgeräuschen und unerwünschten Signalen, was einen Fortschritt des clustering darstellt und in (Sause, 2016) beschrieben ist. Eine vielversprechende Anwendung ist die Identifikation der Bruchlast, wie in diesem Beispiel an faserverstärkten Druckbehältern gezeigt wird. Dabei werden diese mit Innendruck und mit einer steigenden maximalen Belastung zyklisch be- und entlastet. Es konnte, wie in **Abb. 2.19** dargestellt, gezeigt werden, dass durch die Anwendung von KNN die Belastungshöhen korrekt erkannt wurden und sogar eine Extrapolation auf den Berstdruck möglich war (Sause et al., 2019).

Alle Anwendungen der KNN haben die Tatsache gemeinsam, dass dabei Trainingsdaten vorgegeben werden müssen. Anhand dieser kann ein Algorithmus eine beliebig aufgebaute Funktion so manipulieren, dass die Fehlersumme minimiert wird. Wird jedoch eine Variable in dem Testaufbau geändert, so muss ein erneuter Trainingsschritt durchgeführt werden (Sause, 2016).

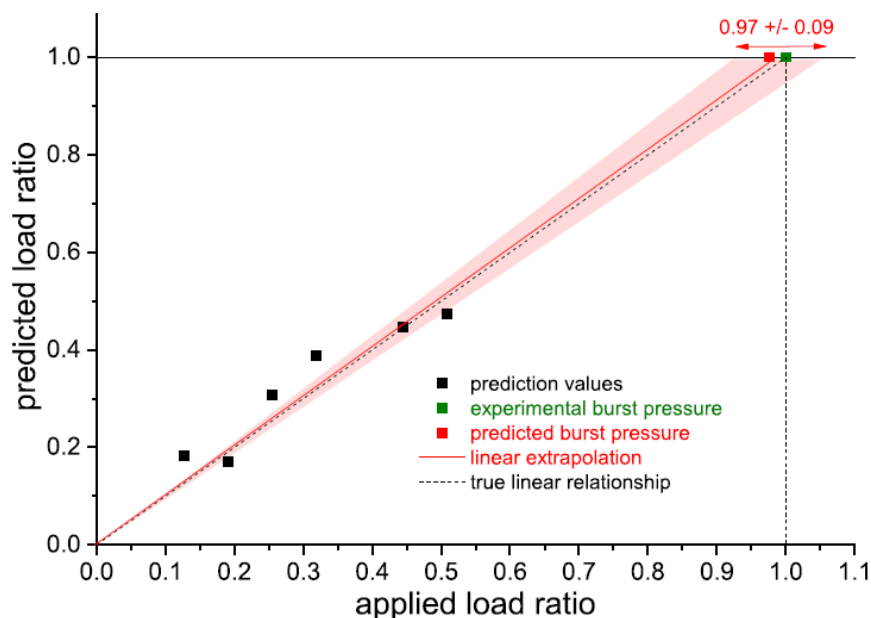


Abb. 2.19 Vorhersage des Berstdruckes und der einzelnen Belastungen anhand von KNN (Sause et al., 2019).

3 EXPERIMENTELLES

3.1 Material

Für die Experimente wurden faserverstärkte Kunststoffe aus einem Epoxidharz der Marke EPIKOTE™ MGS® LR160 Harz mit einem EPIKURE™ MGS® LH160 Härter der Fa. Lange + Ritter GmbH (Gerlingen, Deutschland) hergestellt. Dieser Matrixwerkstoff besitzt eine Onset-Temperatur des Glasübergangsbereichs von 50-55 °C. Als Verstärkungstoff wurde ein unidirektionales Gewebe des Typs UD 92145 der Fa. Porcher Industries Germany GmbH (Erbach, Deutschland), wie in **Abb. 3.1** dargestellt, gewählt. Dieses besitzt ein Flächengewicht von 220 g/m² und einen Faseranteil an Schussfäden von 10 %. Schlussendlich wurde ein Faservolumengehalt von rund 40 % erreicht.

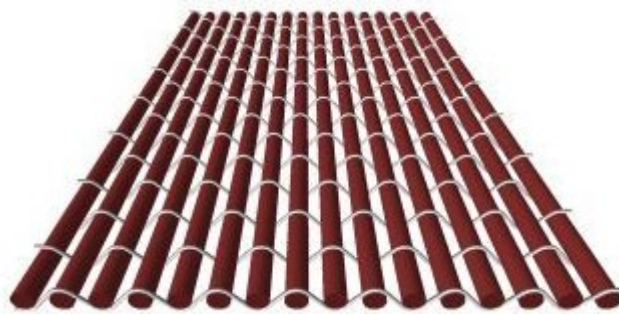


Abb. 3.1 Darstellung eines unidirektionalen Gewebes mit einer großen Anzahl an roten Kettfäden und wenigen stark ondulierten gelben Schussfäden (Firma Tissa Glasweberei AG, 30.04.2021).

3.2 Prüfkörperherstellung

Für die Prüfkörper wurden Quadrate mit 500 x 500 mm aus Gewebebändern mittels eines Textilcutters zugeschnitten (**Abb. 3.2.a**). Es wurden verschiedene Lagenaufbauten mit jeweils 12 Lagen symmetrisch um die Mittelebene zurechtgelegt. Das Harz wurde laut Herstellerangaben und durch mehrmalige Entgasungsschritte vorbereitet. Die eigentlichen Platten wurden durch einen Pressvorgang auf einer hydraulischen Oberkolbenpresse hergestellt. Dazu wurde diese auf 40°C vorgewärmt und die Lagen wurden in mehreren Schritten von der Mitte ausgehend mit dem Harz getränkt, dieser Vorgang ist in **Abb. 3.2.b** dargestellt. Im Anschluss wurden diese für 3 h mit einer Flächenpressung von 1 MPa bei

80°C unter Vakuum ausgehärtet. Eine Nachhärtung wurde für 15 h bei 80°C in einem Wärmeofen durchgeführt. Zum Schluss wurden geschäftete Aluminiumaufleimer aufgeklebt, gepresst und die Prüfkörper ausgeschnitten.

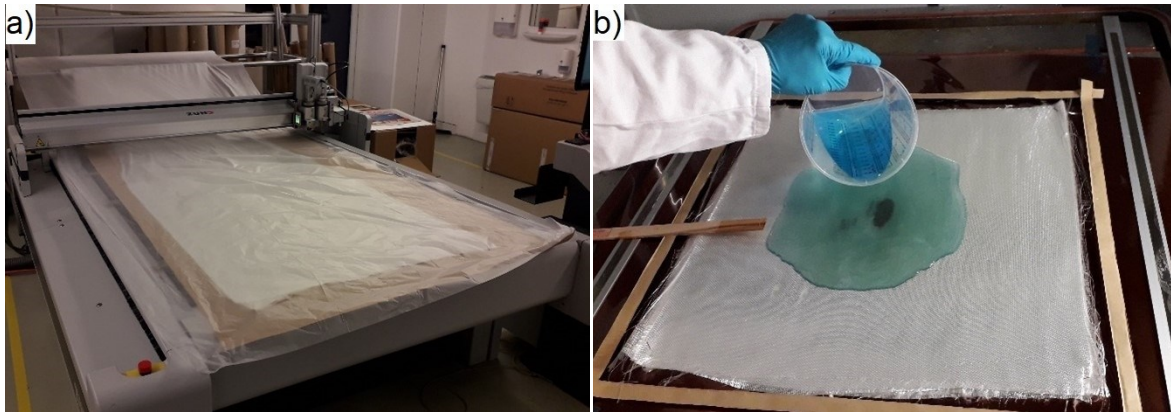


Abb. 3.2 a) Zuschneiden der Lagen durch einen Textilcutter und b) Tränken der Glasfasermatten mit dem Epoxidharz.

3.3 Prüfkörper

Als Proben werden verschiedene Lamine und Probekörpergeometrien benützt, die folgenden Typen und deren wichtigsten Schädigungsarten sind hierbei aufgelistet:

- $\pm 45^\circ$ Lamine, welche laut Simulationen Delaminationen als charakteristisches Schadensbild besitzen
- UD90 Lamine, deren Schadensbild aus reinen Matrixrissen besteht
- EMB90 Proben, wobei 90° Schichten in 0° Schichten eingebettet sind (engl.: embedded (EMB)), hierbei können die steifen 0° Fasern die Dehnung in den 90° Schichten behindern und so vor einer Schädigung schützen. Der Schädigungsverlauf dieser Kreuzverbunde besteht aus anfänglichen Matrixrissen und abschließenden Faserbrüchen bis zum Bruch der gesamten Probe

Als Probengeometrien für die $\pm 45^\circ$ - und EMB90-Proben wurden Rechteckgeometrien in Anlehnung an den Typ 3 nach (ÖNORM EN ISO 527-4:1997 09 01) gewählt. Wegen der Spannungskonzentration bei der Einspannung wurde für die UD90-Probe ein adaptierter Schulterstab nach (Drvoderic, 2011) benützt.

3.4 Prüfaufbau

Die Ermüdungsversuche wurden auf einer servo-hydraulischen Zug/Druck-Universalprüfmaschine mit einem 250 kN Lastrahmen der Fa. MTS Systems Corporations (Minnesota, USA), hydraulischen Klemmböcken und einer 250 kN Kraftmessdose durchgeführt. Für das DIC-System wurde eine hochauflösende Kamera und die Software MercuryRT der Fa. Sobriety Mercury s.r.o. (Blanenská, Tschechien) verwendet. Des Weiteren wurde, um Probenbilder zu machen, sowie die Rissdichte zu beurteilen, das Kamerasystem CV-X420A der Fa. Keyence Corporation (Osaka, Japan) aufgebaut. Die Oberflächentemperatur des Prüfkörpers wurde durch einen berührungslosen Infrarotsensor aufgezeichnet; der ganze Prüfaufbau ist in **Abb. 3.3.a** abgebildet. Das Schallemissionssystem wurde von der Fa. MISTRAS Group Inc. (New Jersey, USA) erworben. Dieses bestand aus zwei differentiellen Breitbandsensoren (WD), welche hierbei exemplarisch am Prüfkörper des Typs 3; wie in **Abb. 3.3.b** dargestellt; mittels silikonfreiem Vakuumschliffett und Gewebepapier befestigt waren.

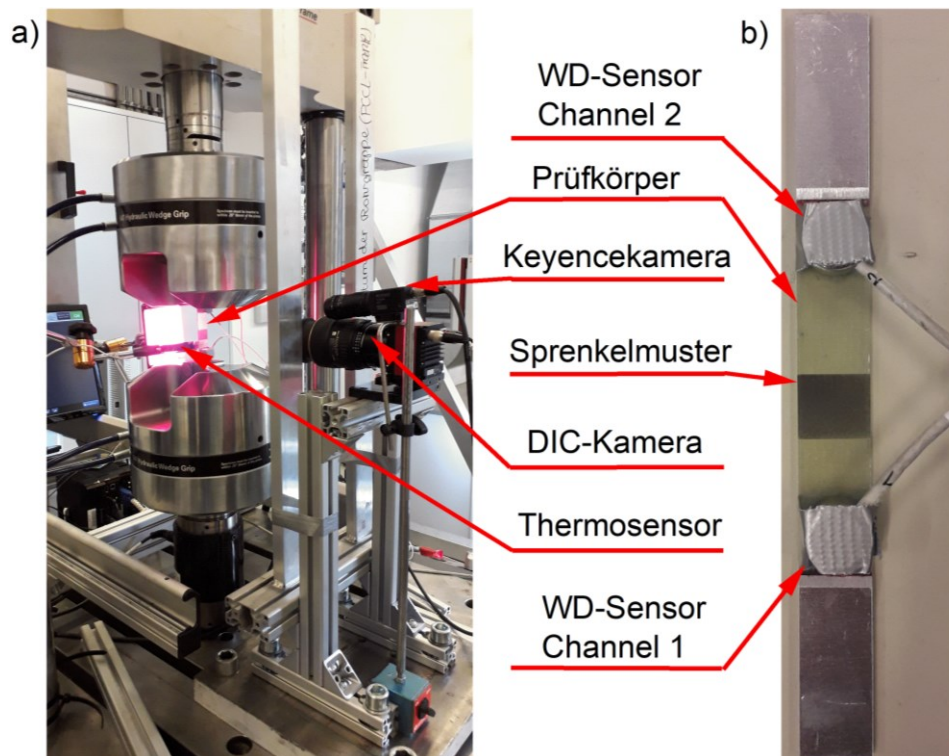


Abb. 3.3 a) Prüfaufbau der Ermüdungsversuche und b) Prüfkörper, des Typs 3, mit applizierten WD-Sensoren.

Ein dritter Sensor des Typs Nano30 wurde auf einer der oberen Klemmbacken befestigt und wirkte als guardsensor. Dieser hat die Funktion, dass falls ein hit bei diesem zuerst gemessen wird, für die hitlockout time keine events gespeichert werden. Drei 2/4/6-Vorverstärker mit 40 dB Verstärkung und mit einem 20-1200 kHz Filter, wurden zwischen den Sensoren und dem Aufnahmegerät geschaltet. Die zwei WD-Sensoren hatten eine Aufzeichnungsrate von 5 MHz und der guardsensor eine von 1 MHz. Ein Schwellwert von 40 dB_{AE}, sowie eine PDT von 50 µs, eine HDT von 100 µs und eine HLT von 300 µs wurde eingestellt. Die event definition time, die maximale Differenz der Ankunftszeiten von zwei Sensoren damit ein event registriert wird, wurde so gewählt, dass nur events in der freien Klemmlänge registriert werden können. Diese liegt in den Versuchen zwischen 97-198 mm. Die genauen Werte für jeden Versuch sind im Anhang ersichtlich. Des Weiteren wurde für den guardsensor eine lockout time von 1000 µs gewählt.

3.5 Prüfprozedur

Die Prüfprozedur ist eine adaptierte Version der Arbeit (Brunbauer et al., 2014). Dies wurde grundsätzlich im Abschnitt 2.2.5 beschrieben und wird hier nicht genauer ausgeführt. Die Änderungen betreffen einerseits die unterschiedlich langen Bereiche der Zyklen: Im Bereich 1 werden jeweils 25 Zyklen zwischen den Zugversuchen gefahren. Dieser reicht bis 1000 Zyklen, wobei die ersten 25 Zyklen mit einer Prüffrequenz von 1 Hz gefahren wurden. Dies dient zur genaueren Abbildung der ersten auftretenden Schädigungen. Im Bereich 2 werden Intervalle von 100 Zyklen bis zu einer Lastspielzahl von 10000 geprüft, danach wird die Intervallgröße auf 1000 Zyklen erhöht. Des Weiteren wurde eine Haltezeit von 5 s kurz vor dem Zugversuch eingeführt. Das maximale Lastniveau der Zugversuche wurde ebenfalls an die maximale Belastung und die Steifigkeit der Lamine angepasst. Die ZZV wurden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,5 mm/min gefahren. Der adaptierte Prüfablauf, sowie die Zeitpunkte der Auslösung der Keyence- und der Mercurybilder, ist in **Abb. 3.4** dargestellt.

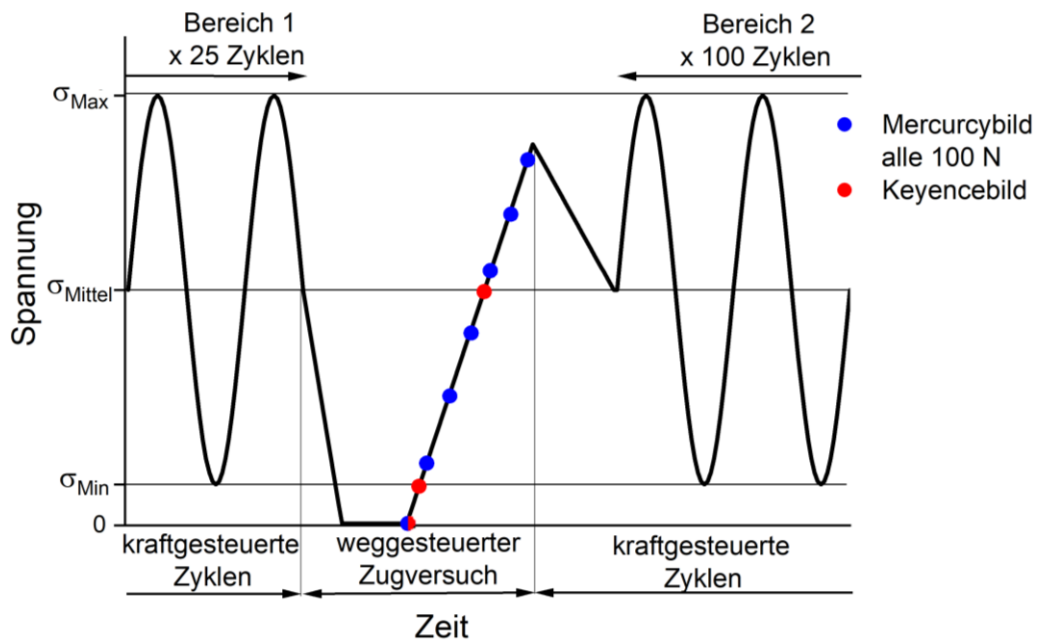


Abb. 3.4 Adaptierte Prüfprozedur der zyklischen Zugversuche und die Zeitpunkte der Keyence-, sowie DIC-Bilder.

In **Tabelle 3.1** ist eine Beschreibung jedes einzelnen Prüfkörpers, welcher in dieser Arbeit vorgestellt wird, mit den wichtigsten Prüfparametern dargestellt. Die Versuche wurden unter Normklima durchgeführt. Das eingestellte Ermüdungslastniveau bezieht sich auf die Bruchfestigkeit, die in quasi-statischen Zugversuchen ermittelt wurde. Bei der EMB90-Probe wird diese jedoch auf die Bruchfestigkeit der eingebetteten 90° Schichten bezogen.

Tabelle 3.1 Beschreibung der wichtigsten Versuchsparameter jedes hierbei besprochenen Versuchs.

Versuch	Lagenaufbau	R-Verhältnis [-]	Lastniveau [%]	Aufgebrachte Spannung [MPa]	Prüffrequenz [Hz]
$\pm 45_nT02$	$[(-45^\circ)_3, (+45^\circ)_3]_s$	0,1	55	47,6	3
$\pm 45_nT03$	$[(-45^\circ)_3, (+45^\circ)_3]_s$	0,1	65	56,3	3
UD90_nT03	$[(90^\circ)_{12}]$	0,1	65	24,4	5
EMB90_nT07	$[(0^\circ)_2, (90^\circ)_4]_s$	0,1	55	37,7	5

3.6 Auswertung

3.6.1 Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten

Für die Auswertung der Rohdaten wurde ein Python-Skript benützt. Dazu werden die Messdaten durch Ordnen zu einzelnen Zyklen bzw. Zugversuchen zusammengefasst. In der Zugversuch-Auswertung wird das jeweilige Spannungs-Dehnungsdiagramm nach (ÖNORM EN ISO 527-4:1997 09 01) ausgewertet. Hierfür wird die Steigung einer Sekante berechnet, welche durch die Kurve bei den Dehnungswerten von 0,05 % und 0,25 % gelegt wird. Für die Hysteresenauswertung werden die Spannungs-Dehnungsdiagramme, wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, ausgewertet. Anschließend werden Ein- und Ausschwingzyklen, sowie Zyklen bei denen Kraftgrenzen nicht überschritten werden, aus der Auswertung entfernt. Um die große Streuung der Messwerte zu reduzieren, wurde eine Glättung mittels eines gleitenden Durchschnitts und eines Savitzky-Golay Filters für die dissipierte Energie benützt. Eine Auswertung der Oberflächentemperatur wurde implementiert, diese erfasst die erste und letzte Temperatur während eines Zugversuchs. Zusätzlich wird die letzte Temperaturmessung im vorigen Zyklenblock hinzugefügt, falls diese größer als die Anfangstemperatur des Zugversuchs ist. Die minimalen und maximalen Verschiebungen der Zugversuche und der Hystereseschleifen wurden ebenfalls für weitere Auswertungen, erfasst. Die Originalskripte, sowie die modifizierten Versionen sind im Anhang ersichtlich.

3.6.2 Digitales Bildkorrelationsprogramm

Die Auswertung der DIC-Bilder wurde durch die Software MercuryRT ausgeführt. Hierbei wurden die Längen zweier auf das Punktmuster projizierten Verschiebungslinien, welche senkrecht beziehungsweise parallel auf die Probenkörperkante standen, gemessen. Die weitere Auswertung des E-Moduls und der Poissonzahl wurde mit einem Python-Skript nach (ÖNORM EN ISO 527-4:1997 09 01) durchgeführt. Dabei wurden anhand der Verschiebungen und der Kräfte Spannungs-Dehnungsdiagramme erstellt. Nach Entfernen von Ausreißern wurden Sekanten durch die Kurven bei den Dehnungswerten von 0,05 % und 0,25 % gelegt. Die Poissonzahl wurde ebenfalls in diesem Dehnungsbereich anhand der Quer- und Längsdehnung berechnet. Hierbei sind ebenfalls das Originalskript sowie die adaptierten Versionen im Anhang hinterlegt. Die Auswertung der Rissdichte wurde in

(Drvoderic et al., to be published) genauestens beschrieben und wird deswegen nicht weiter beschrieben.

3.6.3 Acoustic emission

Die grundlegende Auswertung wurde mittels der Software AEwin von der Mistras Group durchgeführt. Des Weiteren wurde zusätzlich die Berechnung von beliebigen features, wie z.B. die Frequenzfeatures anhand eines power-Spektrums statt eines FFT-Spektrums, in Python implementiert. Als Eingangsdaten wurden die waveforms, wie in **Abb. 2.15.a** dargestellt ist, benützt. Zusätzlich wurde eine Transformation von Zeitwerten in Zykluszahlen implementiert. Dazu wurden ausgehend von den Anfangs- und Endzeiten der Zugversuche eine Datenbank mit Zykluszahlen und korrespondierenden Zeiten erstellt. Danach werden vorgegebene Zeitwerte in der Datenbank mit den Zyklen korreliert. Auch hierbei sind die beschriebenen Daten im Anhang ersichtlich.

4 ERGEBNISSE

In dem folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Ermüdungsversuche mit zyklischen Zugversuchen vorgestellt. Hierbei sind vier Versuche ausgewählt worden, welche einen guten Überblick über die Versuchsreihen zeigen.

4.1 ± 45 -Laminat mit niedrigem Lastniveau

Der Probekörper $\pm 45_V2_GEFT_nT02$ wurde für das ± 45 -Laminat mit niedrigem Lastniveau beispielhaft ausgewählt. Einige der folgenden Ergebnissen dieses Versuchs wurden in (Schneider et al., 2021) veröffentlicht und die Interpretationen wurden durch die zusätzlichen Erkenntnisse erweitert.

4.1.1 Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten

Durch das in Abschnitt 3.6.1 beschriebene Auswerteskript konnten die Daten in **Abb. 4.1**, sowie in **Abb. 4.2**, berechnet werden. In der ersten Abbildung ist in den Kurven der E-Moduln ein starker Abfall und in der dissipierten Energie ist ein starker Anstieg bis circa 100.000 Zyklen erkenntlich. Die Änderung der Steigung deutete auf einen veränderten Schadensmechanismus hin. Tatsächlich konnte in dem Bereich von rund 110.000 Zyklen die erste Delaminationen mittels Probenbilder beobachtet werden. Dadurch konnte schlussgefolgert werden, dass bis zu diesem Zeitpunkt die Rissättigung nahezu vollständig erreicht wurde. Danach konnten sich nur noch Delaminationen ausbreiten, welche einen linearen Verlauf der Kurven verursacht haben. Auch die Degradation der E-Moduln ist mit der Literatur konform, da der statische E-Modul stärker abfiel als der Dynamische. Das unterschiedliche Plateau des E-Moduls aus den zyklischen Zugversuchen (ZZV), im Vergleich zu denen aus der Hysteresenauswertung, konnte durch die anderen Auswertegrenzen, sowie einer niedrigeren Prüfgeschwindigkeit erklärt werden.

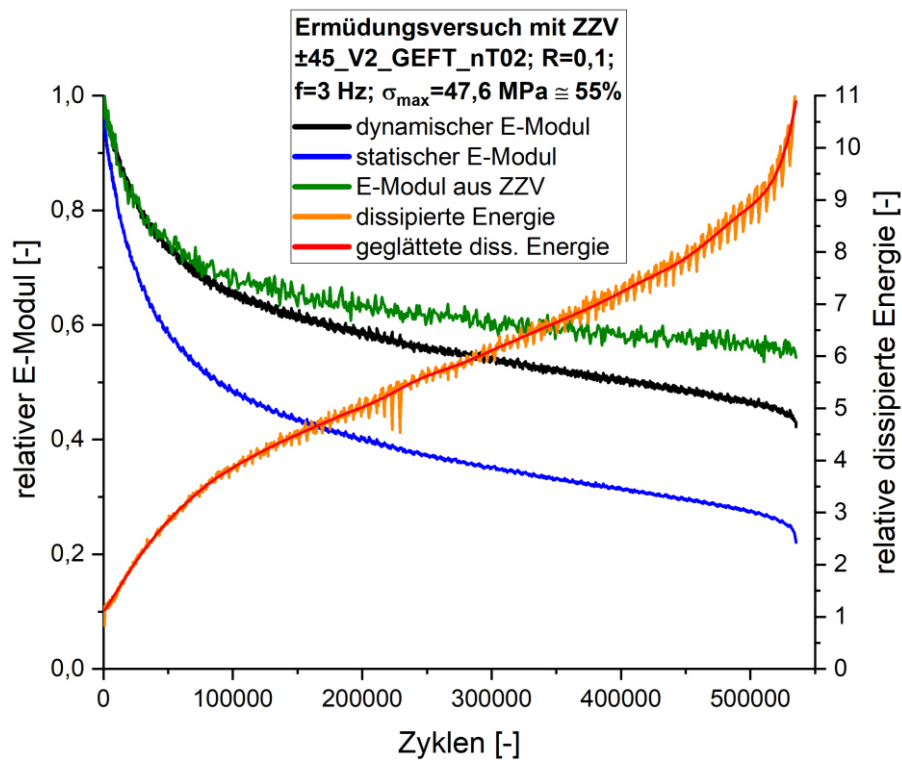


Abb. 4.1 Verlauf der verschiedenen E-Moduln, sowie der dissipierten Energie des Prüfkörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT02$.

Zur Validierung ist in **Abb. 4.2** die Oberflächentemperatur des Prüfkörpers zusammen mit den E-Moduln aufgetragen. Hierbei ist die steigende Temperaturdifferenz zwischen den Bereichen der zyklischen Lastaufbringung und dem letzten Punkt der Zugversuche ersichtlich. Diese stieg aufgrund der immer stärker werdenden Reibung zwischen den einzelnen Schichten. Die E-Moduln zeigten keinen Einfluss der regelmäßig auftretenden Spitzentemperaturen. Des Weiteren kann vermutet werden, dass mit der maximalen gemessenen Oberflächentemperatur von 43 °C der Onset des Glasübergangs im Inneren des Probekörpers erreicht wurde. Jedoch sollte dieser Versuch vergleichbar mit anderen sein, da nicht anzunehmen ist, dass ein anderer Schadensmechanismus unter diesen Bedingungen vorherrschend ist. Trotzdem sollte für weitere Versuche in Betracht gezogen werden, die Prüffrequenz zu reduzieren.

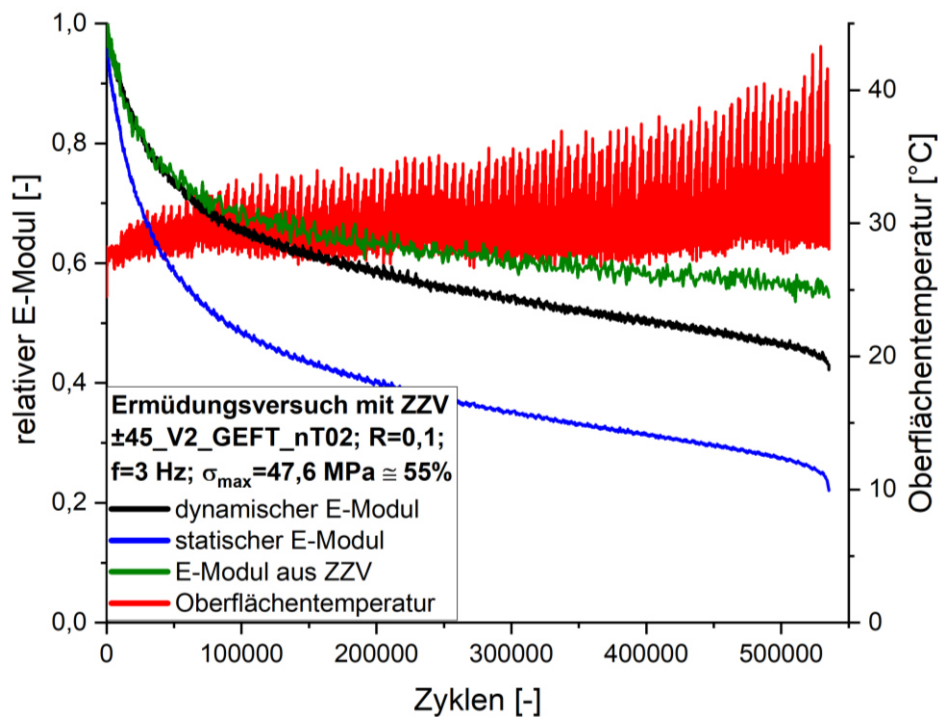


Abb. 4.2 Vergleich der verschiedenen E-Moduln und der Oberflächentemperatur des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT02$.

4.1.2 DIC

Anhand des Mercury-Systems konnten der absolute E-Modul und die absolute Poissonzahl über den Schadensverlauf berechnet werden; wie in **Abb. 4.3** dargestellt. Auch hier ist ein Knick und ein anschließender linearer Verlauf des E-Moduls, sowie ein Plateau in der Kurve der Poissonzahl bei circa 100.000 Zyklen ersichtlich, zur besseren Sichtbarkeit wurden jeweils strichlierte Linien hinzugefügt. Die Anfangshöhe des E-Moduls wurde für dieses Laminat mit 13.000 MPa berechnet. Es ist klar erkenntlich, dass die Berechnung relativ gut mit dem theoretischen Wert korreliert. Für den absoluten Wert der Poissonzahl wurde ein Wert von 0,44 nach der klassischen Laminattheorie berechnet, in diesem Versuch wurde jedoch ein Startwert von ca. 0,6 gemessen. Dies geht jedoch mit vorhergegangenen Arbeiten mit demselben Material einher, bei denen ebenfalls eine Poissonzahl zwischen 0,57 und 0,59 gemessen wurde. Die **Abb. 4.4** zeigt den Vergleich der berechneten relativen E-Moduln. Hierbei ist erwartungsgemäß der E-Modul aus den ZZV und der Modul aus der DIC-Auswertung sehr ähnlich. Ebenfalls war zu erwarten, dass letzterer höher ist, da dieser nicht von der Steifigkeit der Universalprüfmaschine beeinflusst wird.

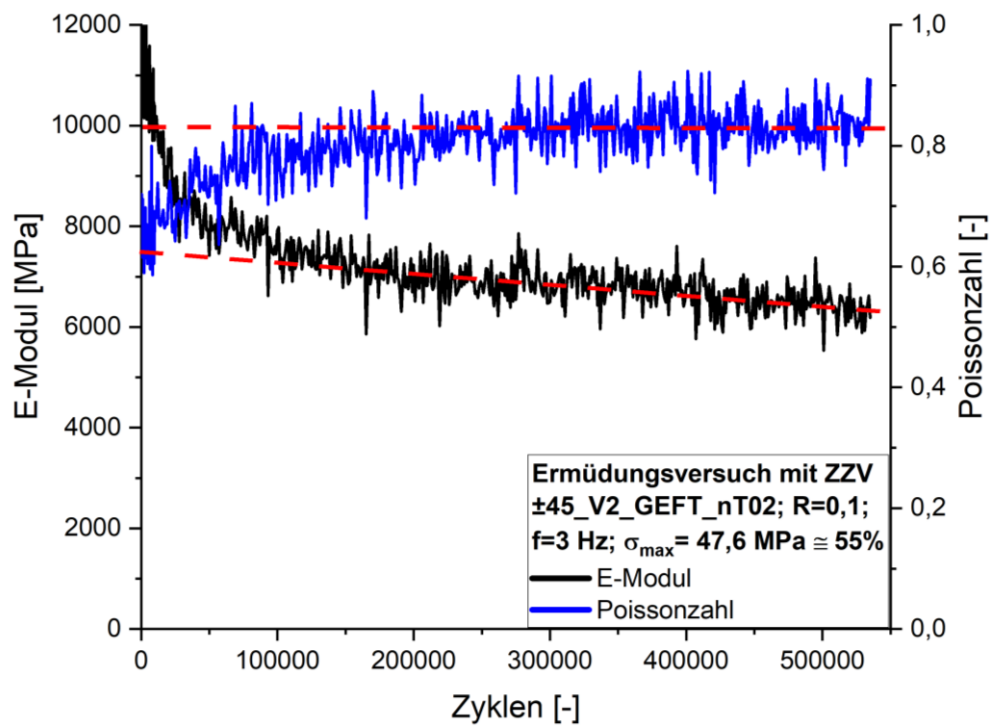


Abb. 4.3 Verlauf des absoluten E-Moduls in Belastungsrichtung, sowie der Poissonzahl, über die Zyklen des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT02$.

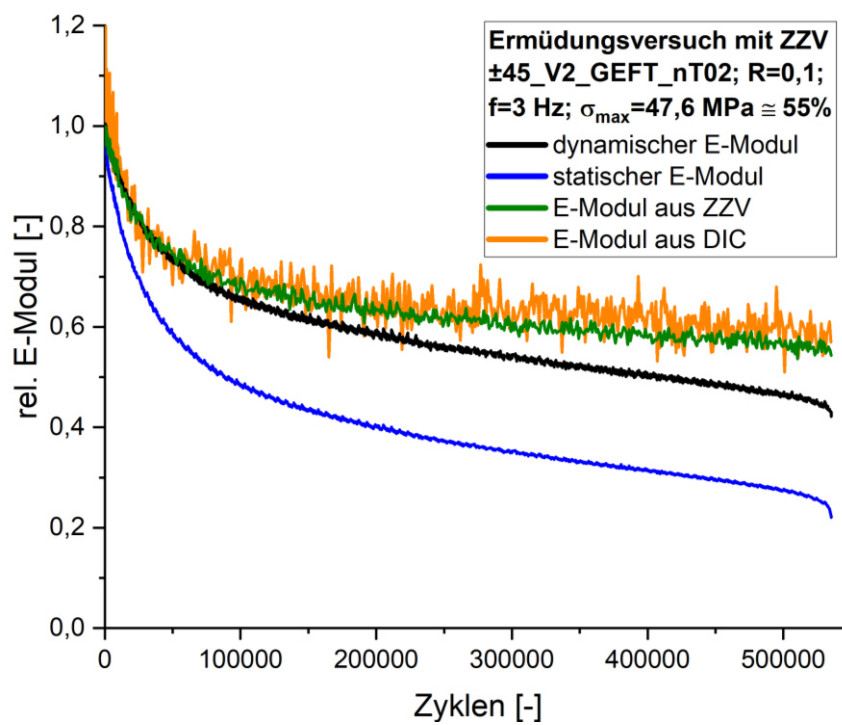


Abb. 4.4 Vergleich der relativen E-Moduln aus der Auswertung der Maschinenrohdaten und der DIC-Messung des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT02$.

4.1.3 Acoustic emission

Für die Auswertung der acoustic emission Daten werden in **Abb. 4.5** die kumulierten events, die Rissdichte und der relative E-Modul aus den DIC-Daten dargestellt. Zu Beginn ist zu sagen, dass die Rissdichte ebenfalls ein Maximum bei 100.000 Zyklen besitzt. Dies zeigt, dass ab diesem Zeitpunkt einerseits die erzeugten Risse zu fein für die Auflösung der Kamera waren, um korrekt erkannt zu werden. Andererseits wuchsen einzelne Risse zu größeren Rissen zusammen, wodurch die Anzahl sankt. Laut den Schädigungsgesetzen, auf denen diese Auswertung beruht, kann eine abnehmende Rissdichte nicht auftreten und deswegen dürfen die Daten nach dem Maximum nicht berücksichtigt werden. Für die Interpretation der waveforms wurden events gewählt, da diese eine Ortung innerhalb der Probengeometrie voraussetzen und somit unabhängig von Umgebungsgeräuschen sind. In der event-Kurve ist ersichtlich, dass das Risswachstum am Anfang nicht als events registriert wurde. Dies konnte auf die sehr hohe Dämpfung von Faserwerkstoffen quer zur Faser zurückgeführt werden. Der Anstieg fiel zeitlich mit der Entstehung der Delamination zusammen und dadurch kann darauf geschlossen werden, dass Reibungsgeräusche zwischen den einzelnen Schichten der Grund für die detektierten events waren. Das sichtbare Plateau konnte durch die immer stärker werdende Streuung der elastischen Wellen aufgrund von Matrixrissen erklärt werden. Deswegen konnten keine Signale mehr an beiden Sensoren registriert werden. Dies ist übereinstimmend mit den Untersuchungen von (Maillet et al., 2014), welche anhand von der Materialdämpfung in Keramik-Matrix Verbunden den Schädigungsverlauf abbilden konnten. Für einen optischen Vergleich sind Ausschnitte des Probekörpers zu spezifischen Zyklen abgebildet.

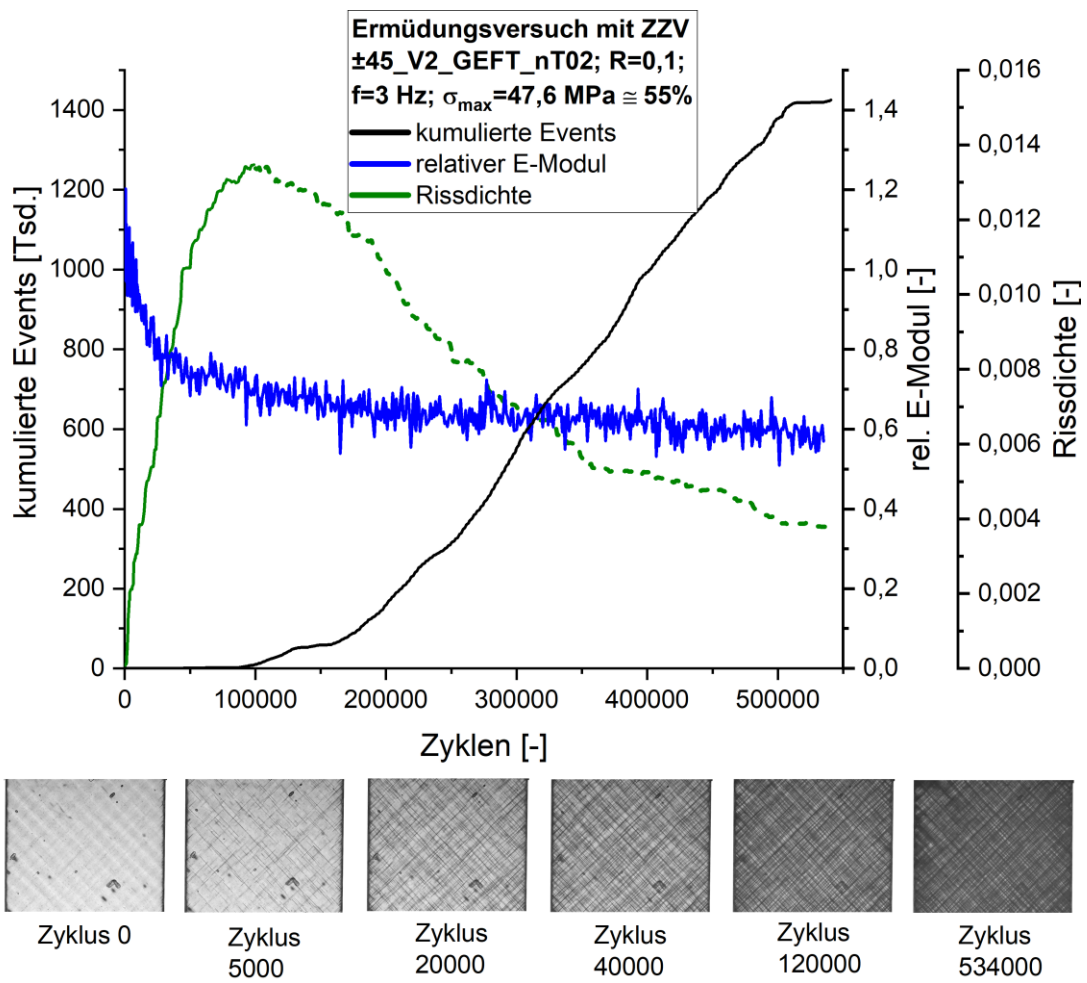


Abb. 4.5 Darstellung der Rissdichte, sowie der kumulierten events und des relativen E-Moduls, zusätzlich dazu Probenbilder von ausgewählten Zyklen der Probe $\pm 45_V2_GEFT_nT02$.

4.2 ±45-Laminat mit hohem Lastniveau

Für das ±45-Laminat mit hohem Lastniveau wurde der Probekörper ±45_V2_GEFT_nT03 ausgewählt. Einige der folgenden Ergebnissen dieses Versuchs wurden ebenfalls in (Schneider et al., 2021) veröffentlicht und die Interpretationen wurden durch die zusätzlichen Erkenntnisse erweitert.

4.2.1 Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten

In diesem Versuch wurde ein um 10 % höheres Lastniveau als im Versuch ±45_nT02 benützt. Dadurch konnte eine schnellere Eigenschaftsdegradation aufgrund von Materialschädigungen erwartet werden und tatsächlich kann dies in **Abb. 4.6** bei circa 10-15.000 Zyklen beobachtet werden. Des Weiteren ist am Beginn des dritten Intervallbereichs bei 10.000 Zyklen ein spontanes Absinken der E-Moduln erkennbar. Dies ließ sich auf die stärkere Temperaturerhöhung aufgrund der längeren Zyklenblöcke zurückführen. Die Oberflächentemperatur wurde in diesem Versuch zwar nicht mitgemessen, jedoch kann durch die höhere Belastung eine höhere Temperatur erwartet werden als in dem vorherigen Versuch. Allein durch diese Kurve kann die Sättigung der Risse und der Start der Delamination nicht ausreichend genug bestätigt werden.

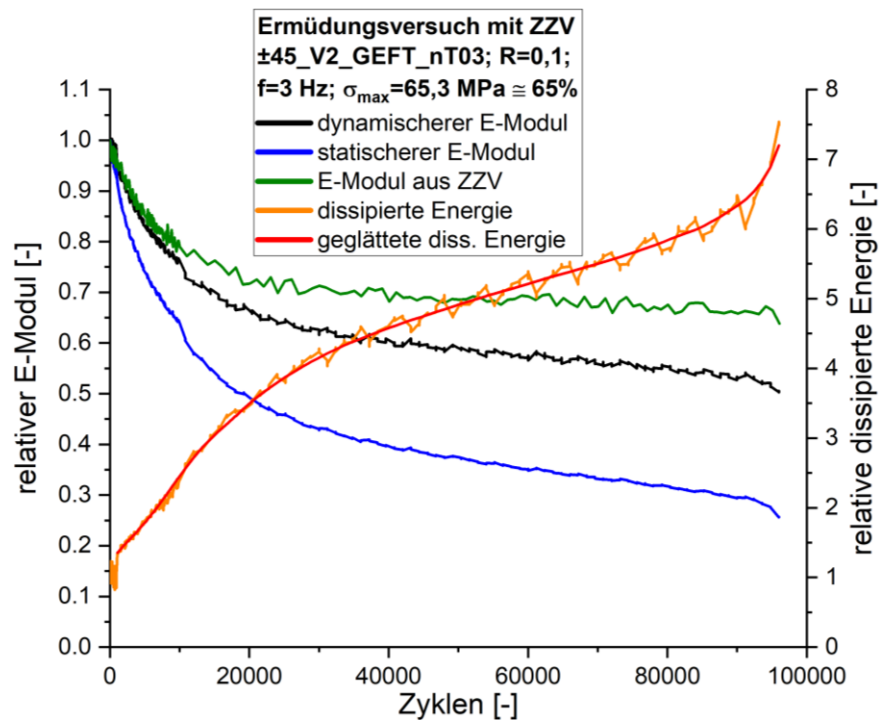


Abb. 4.6 Verlauf der verschiedenen E-Moduln, sowie der dissipierten Energie der Probe ±45_V2_GEFT_nT03.

4.2.2 DIC

Die Ergebnisse der digitalen Bildkorrelation (**Abb. 4.7**) lieferten ein ähnliches Bild, wie bereits im vorherigen Abschnitt besprochen. Der E-Modul sank nach 10.000 Zyklen ab und fiel danach leicht linear ab. Auch die absolute Höhe des Moduls lag in der richtigen Größenordnung. Die Poissonzahl zeigte einen ähnlichen Anfangswert wie der vorherige Versuch. Jedoch kann keine wesentliche Veränderung über den Versuchsablauf beobachtet werden. Dies könnte auf die kürzere Lebenszeit des Laminats zurückgeführt werden, wodurch sich keine signifikante Erhöhung ausbilden konnte. In **Abb. 4.8** ist der Vergleich der E-Moduln aus den verschiedenen Auswertemöglichkeiten dargestellt. Auch hierbei stimmten die Kurven gut mit den Erwartungen überein. Der Einfluss der Maschinensteifigkeit war in diesem Versuch nur nicht bedeutsam genug, damit sich die Verläufe der Zugversuchs-Moduln der DIC-Messung und der Maschinenrohdaten unterscheiden.

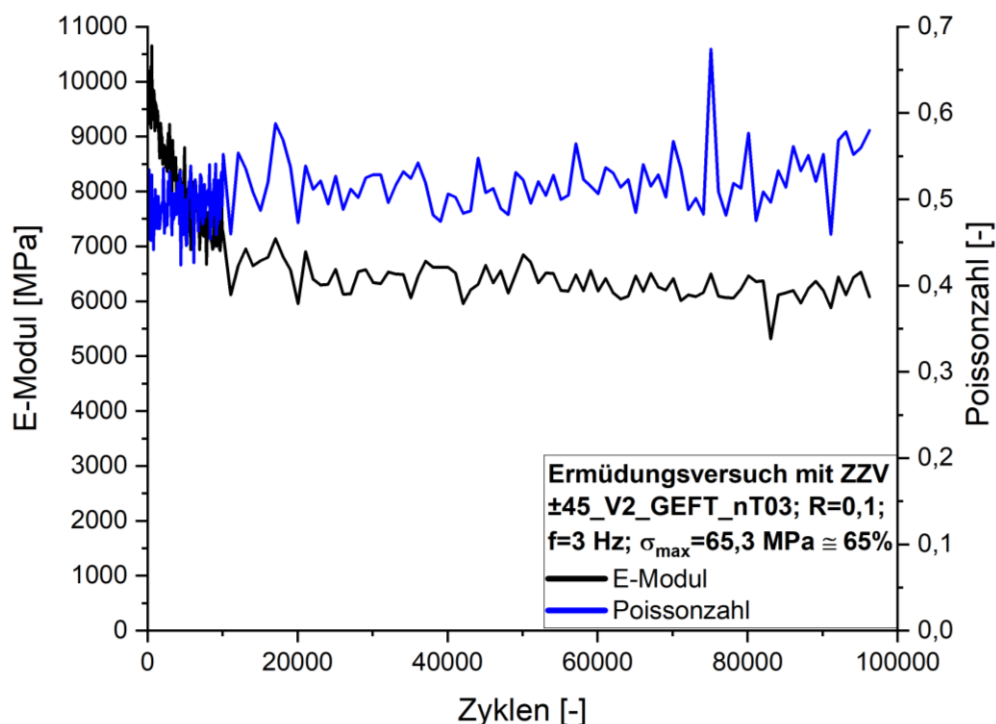


Abb. 4.7 Verlauf des absoluten E-Moduls in Belastungsrichtung, sowie der Poissonzahl, über die Zyklen des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT03$.

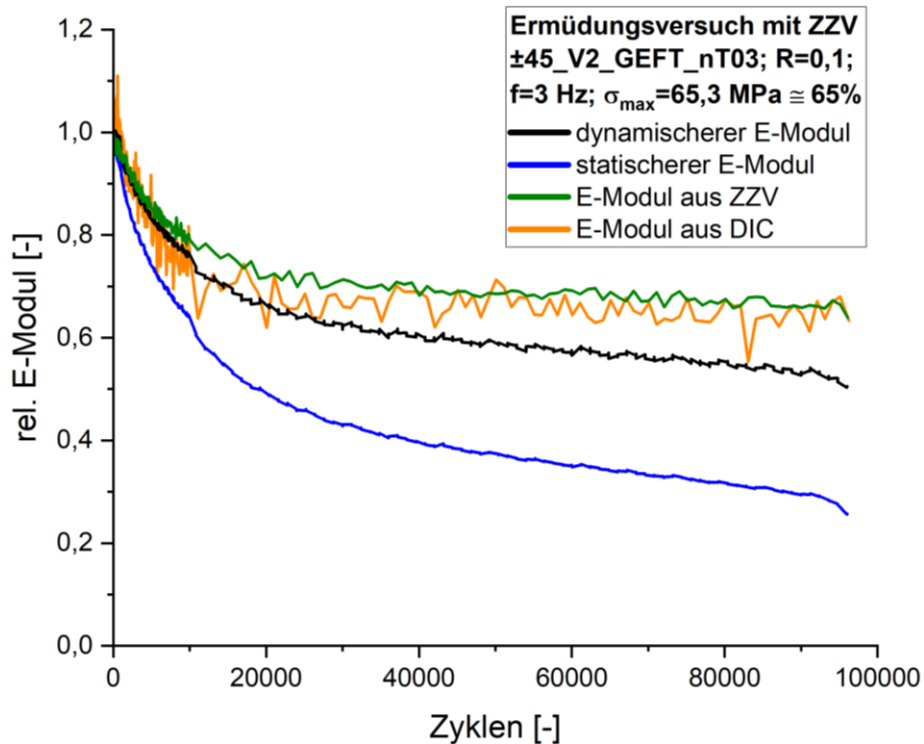


Abb. 4.8 Vergleich der relativen E-Moduln aus der Auswertung der Maschinenrohdaten und der DIC-Messung des Probekörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT03$.

4.2.3 Acoustic emission

Für die Ergebnisse der Schallemissionsanalyse müssen zuerst wieder die Daten der Rissdichte betrachtet werden; wie in **Abb. 4.9** dargestellt. Da diese unabhängig von der Zyklusblocklänge waren, konnte durch das Maximum bestätigt werden, dass bei circa 10.000 Zyklen ein Wechsel des Schadensmechanismus stattfand. Auch in diesem Versuch konnten keine einzelnen Matrixrisse detektiert werden, wie in den Probenbildern bis zum Anstieg der eventkurve ersichtlich ist. So wie im vorherigen Versuch kann von detektierten Reibungsgeräuschen ausgegangen werden, welche die events verursachten. Ebenfalls konnte ein Wendepunkt in den kumulierten events beobachtet werden. Dieser konnte durch die stärker werdende Dämpfung der elastischen Wellen erklärt werden. Zur Vollständigkeit soll gesagt werden, dass ein veränderter Schadensmechanismus ebenfalls zu einem derartigen Ergebnis hätte führen können. Es konnte jedoch kein weiteres Anzeichen für eine Änderung in der Schädigung in den Ergebnissen und den Probenbildern gefunden werden. Für die Zukunft könnte ein derartiger Punkt als geeignetes

Abbruchkriterium für Ermüdungsversuche gewählt werden, da dieser ausreichend spät in der Lebenszeit erreicht wird, um die Materialausnutzung zu maximieren und trotzdem noch Zeit für einen Austausch des Bauteiles bleibt. Es werden jedoch weitere Forschungen in diesem Gebiet notwendig sein, um dieses Kriterium auf mehrere Winkelverbunde ausbreiten zu können und die weitere Sinnhaftigkeit zu bestätigen.

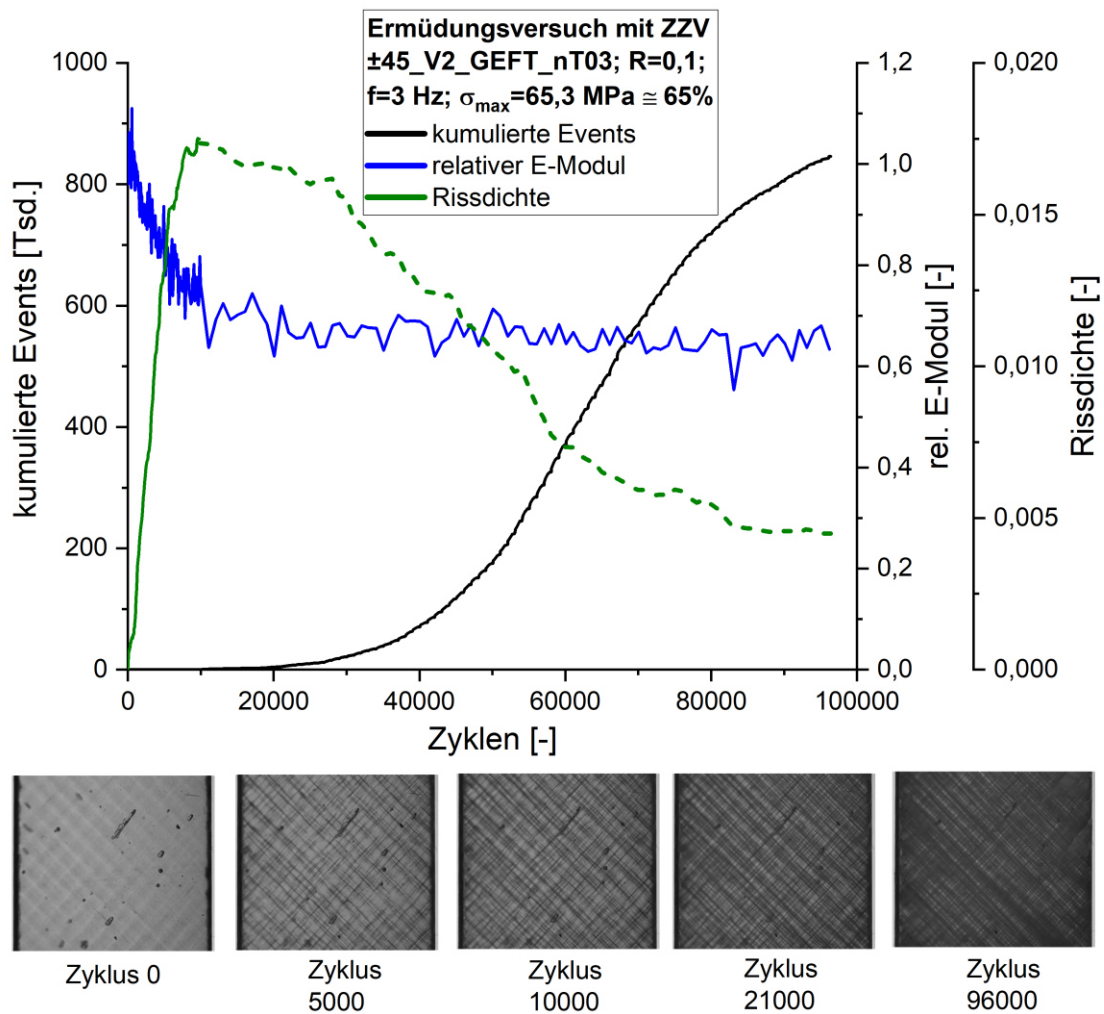


Abb. 4.9 Darstellung der Rissdichte, sowie die kumulierten events und des relativen E-Moduls, zusätzlich dazu Probenbilder von ausgewählten Zyklen des Prüfkörpers $\pm 45_V2_GEFT_nT03$.

4.3 UD90-Laminat

Für das Laminat mit reinen 90° Schichten wurde der Probekörper UD90_V3_GEFT_nT03 ausgewählt. Die aufgebrachte Belastung ist in **Tabelle 3.1** beschrieben.

4.3.1 Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten

In diesem Versuch konnte ein linearer Abfall der E-Moduln; wie in **Abb. 4.10** dargestellt; beobachtet werden. Dies deutete auf eine ständig wachsende Anzahl an Matrixrissen hin, welche schlussendlich zum Bruch der Probe führte. Auch die dissipierte Energie zeigte ein interessantes Minimum in ihrem Verlauf. Durch einen weiteren Versuch ohne zyklische Zugversuche konnte gezeigt werden, dass dieses unabhängig von den Bereichen und auch ohne Zugversuche auftritt. Eine plausible Erklärung wäre das Ausrichten der Schussfäden des UD-Gewebes. Diese sind enthalten, um die UD-Fasern während der Verarbeitung in ihrer Position zu halten. Im Normalfall sind diese stark onduliert (**Abb. 3.1**), wodurch ihre Eigenschaften oft vernachlässigbar sind. Durch die zunehmende Schädigung wird die Möglichkeit geschaffen, dass die Schiefelage der Fasern aufgrund der Ondulation oder einer schlechten Probenausrichtung reduziert wird. Dies würde zu einer kleineren Phasenverschiebung zwischen Spannung und Dehnung führen. Schlussendlich würde dies eine Abnahme der Fläche der Hysteresenschleife verursachen.

Für diesen Versuch ist ebenfalls zur Validierung der Ergebnisse in **Abb. 4.11** ein Vergleich der E-Moduln mit der Probenoberflächentemperatur dargestellt. Erkenntlich ist, dass durch die fehlende Reibung zwischen den Schichten kaum eine Temperaturschwankung stattfand. Des Weiteren ist auch keine Abhängigkeit der E-Moduln an der Temperatur erkennbar.

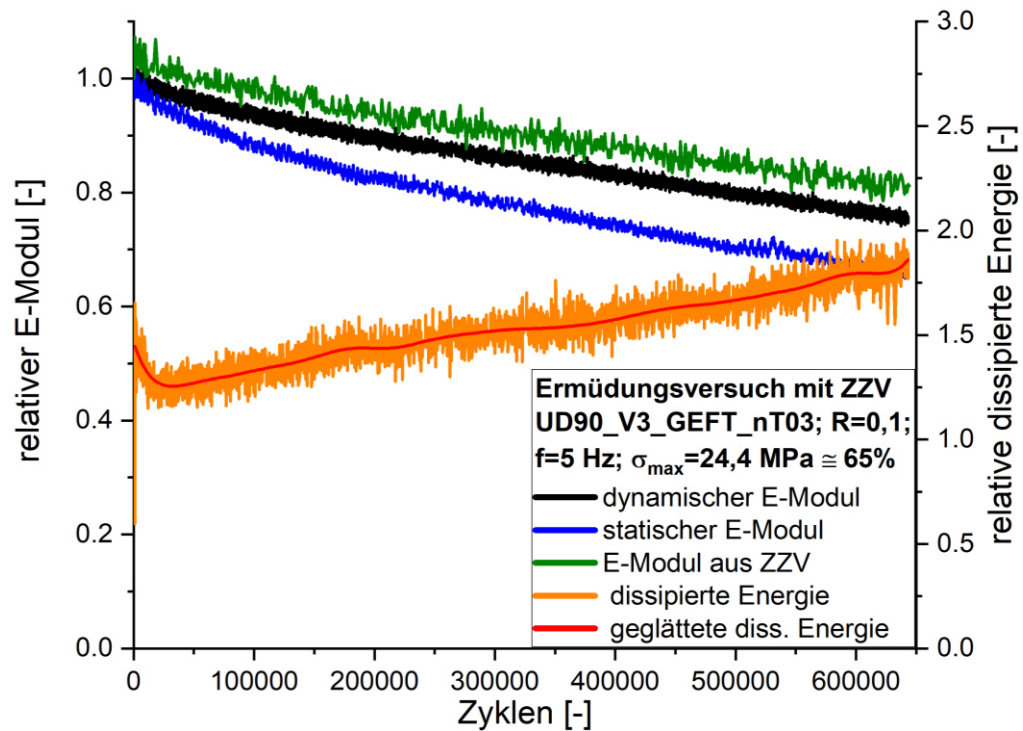


Abb. 4.10 Verlauf der verschiedenen E-Moduln, sowie der dissipierten Energie des Prüfkörpers UD90_V3_GEFT_nT03.

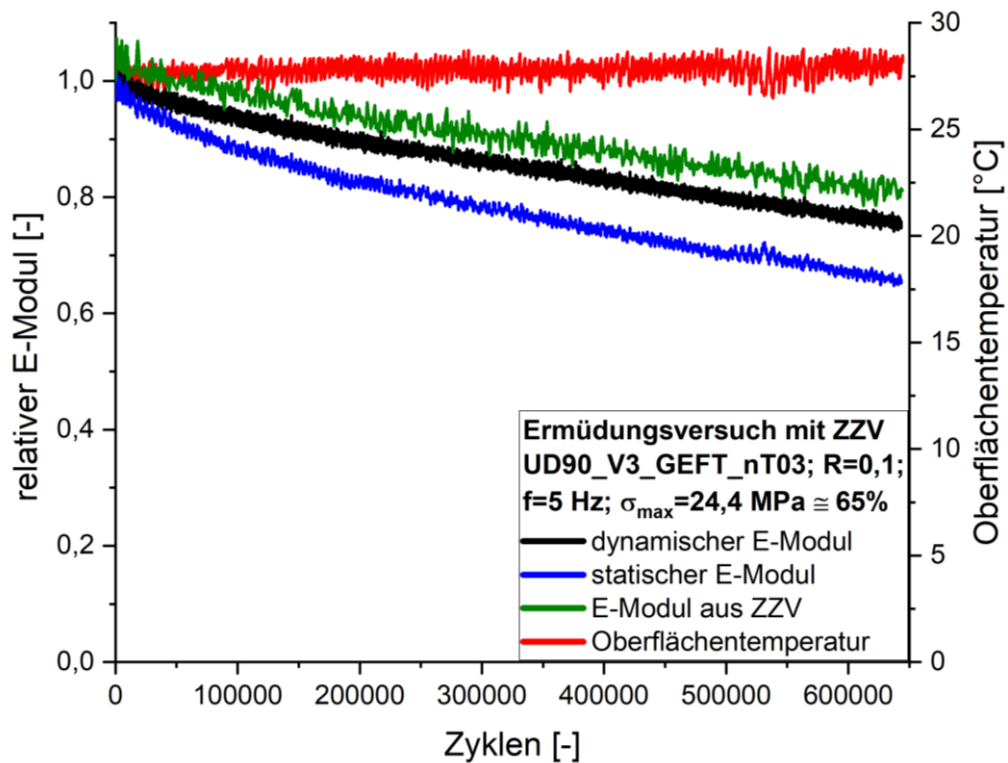


Abb. 4.11 Vergleich der verschiedenen E-Moduln und der Oberflächentemperatur des Probekörpers UD90_V3_GEFT_nT03.

4.3.2 DIC

Auch die Auswertung der mittels DIC-Systems generierten Daten zeigte einen linearen Abfall des E-Moduls in Zugrichtung; wie in **Abb. 4.12** dargestellt ist. Dieser startete ähnlich wie der Theoriewert von 10.000 MPa. Die hohe Steifigkeit in Faserrichtung und die dadurch geringe Verschiebung des Sprengelmusters verursachte eine sehr hohe Streuung in den Dehnungen quer zur Belastungsrichtung. Schlussendlich war es nicht möglich einen Trend in dem Verlauf der Poissonzahl zu erkennen. Über den Mittelwert konnte jedoch eine Aussage getroffen werden, dieser liegt sehr nahe an der theoretischen Poissonzahl von 0,09. Zur Validierung der Ergebnisse sind in **Abb. 4.13** die Verläufe der relativen Moduln dargestellt. Erkennlich ist ebenfalls, dass sich die E-Modulverläufe, welche in den Zugversuchen ermittelt wurden, kaum unterscheiden. Dies konnte durch die hohe Streuung und die niedrige Steifigkeit des Probekörpers erklärt werden. Da der Effekt der Maschinensteifigkeit bei steiferen Materialien zu einem stärkeren Abfall der Module, welche mittels den Kolbenwegen ermittelt wurden, führt.

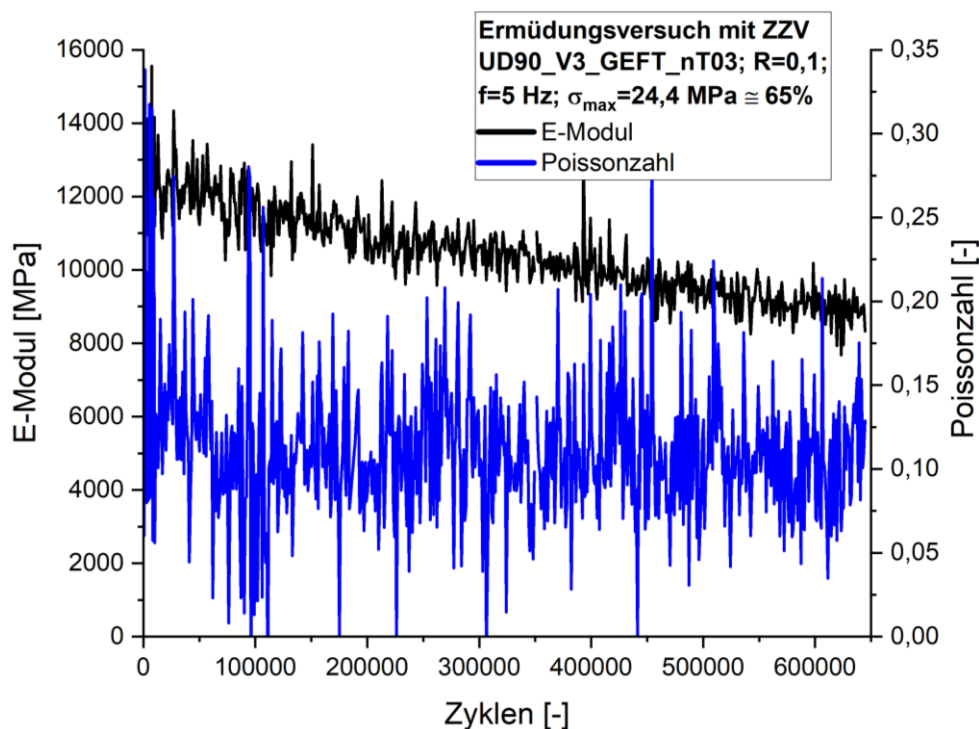


Abb. 4.12 Verlauf des absoluten E-Moduls in Belastungsrichtung, sowie der Poissonzahl des Probekörpers UD90_V3_GEFT_nT03.

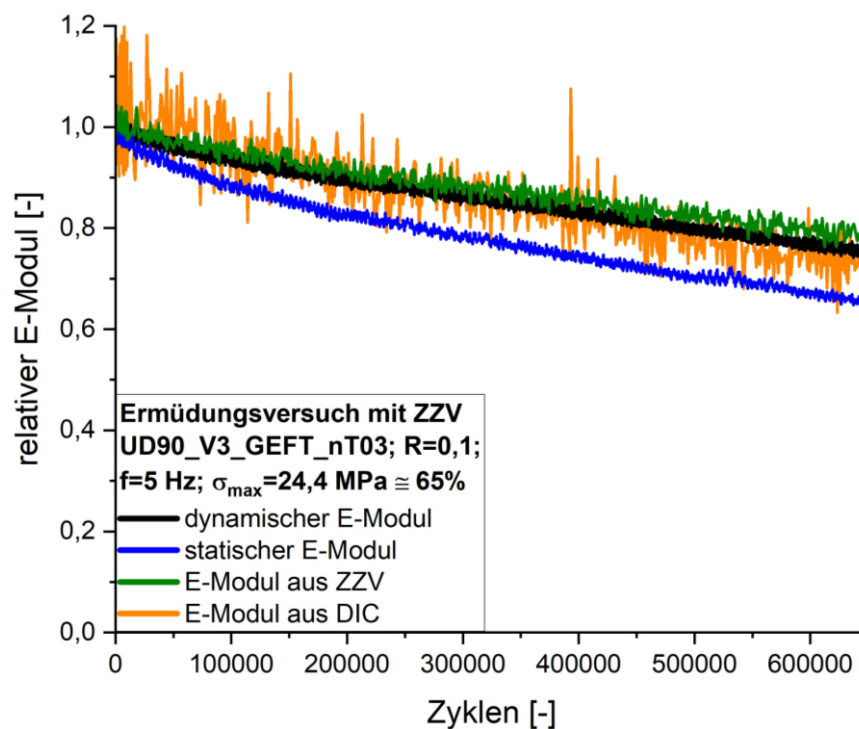


Abb. 4.13 Verläufe der relativen E-Moduln des Probekörpers UD90_V3_GEFT_nT03 aus verschiedenen Auswertemöglichkeiten.

4.3.3 Acoustic emission

Die Schallemission zeigte in diesem Versuch zu Beginn keine events, diese stiegen erst ab einer Zykluszahl von 20.000 Zyklen, wie in **Abb. 4.14** ersichtlich. Anhand von Probenbildern ist ersichtlich, dass schon vor dem Anstieg kleinere Risse entstanden sind. Eine Rissdichtekurve könnte die Erklärung für den verspäteten Anstieg der Kurve liefern, da es möglich wäre, dass ab diesen Zeitpunkt die Rissdichte stark angestiegen ist. Jedoch war die Qualität der Probenbilder für diese Auswertung zu niedrig. Eine weitere Möglichkeit ist, dass zu diesem Zeitpunkt die vorher besprochenen Schussfäden in Zugrichtung genug ausgerichtet sind, damit diese die große Dämpfung des Werkstoffes verringern, sodass Signale an beiden Sensoren registriert werden können. Durch die große Anzahl an Störgeräuschen wurde die Datenmenge zu groß, sodass keine Schallemissionsdaten nach 270.000 Zyklen aufgezeichnet werden konnten. Nach einer Analyse dieser Signale konnte für zukünftige Messungen ein Hochpassfilter mit einer gemittelten Frequenz von 50 kHz

ausgewählt werden. Diesen konnten bei darauffolgenden Versuchen nur ein Viertel der Störgeräusche passieren.

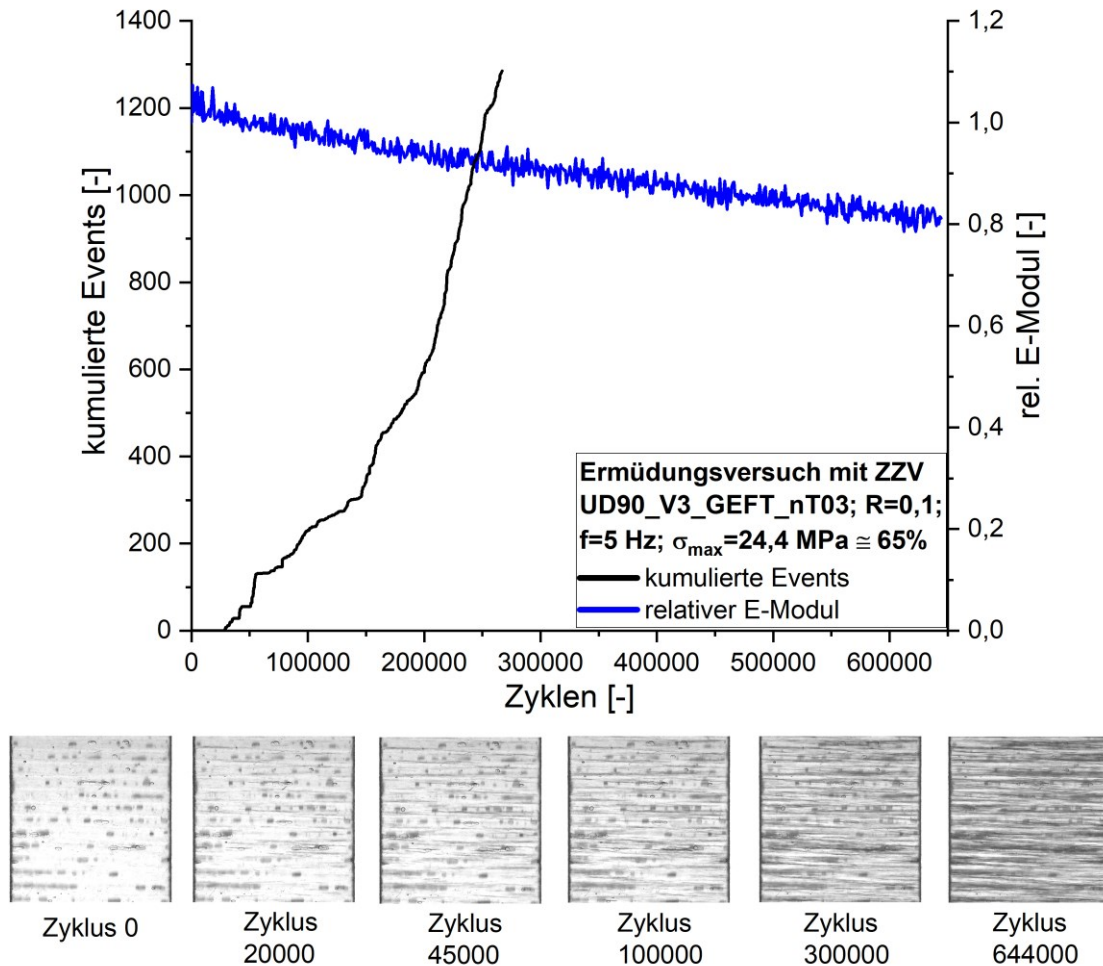


Abb. 4.14 Darstellung der kumulierten events und des relativen E-Moduls, zusätzlich dazu Probenbilder von ausgewählten Zyklen des Prüfkörpers UD90_V3_GEFT_nT03.

4.4 Laminate mit eingebetteten 90° Schichten

Als Laminat mit eingebetteten 90° Schichten wurde exemplarisch der Probekörper EMB90_V2_GEFT_nT07 ausgewählt. Die aufgebrachte Belastung ist in **Tabelle 3.1** beschrieben.

4.4.1 Zug-Druck Universalprüfmaschinen Rohdaten

Hierbei ist in **Abb. 4.15** der starke Einfluss der Temperatur auf alle Daten, welche mittels den Maschinendaten ermittelt wurden, ersichtlich. Kontraintuitiv ist der beobachtete Effekt, dass bei einer abnehmenden Temperatur die E-Moduln ebenfalls sinken, da laut Kurven der dynamisch-mechanischen Analyse für klassische Duromere bei sinkender Temperatur ein steigender E-Modul zu erwarten ist. Dies weist darauf hin, dass durch die Temperaturänderung ein zweiter Effekt vorhanden ist, der dem eben besprochenen Effekt entgegenwirkt.

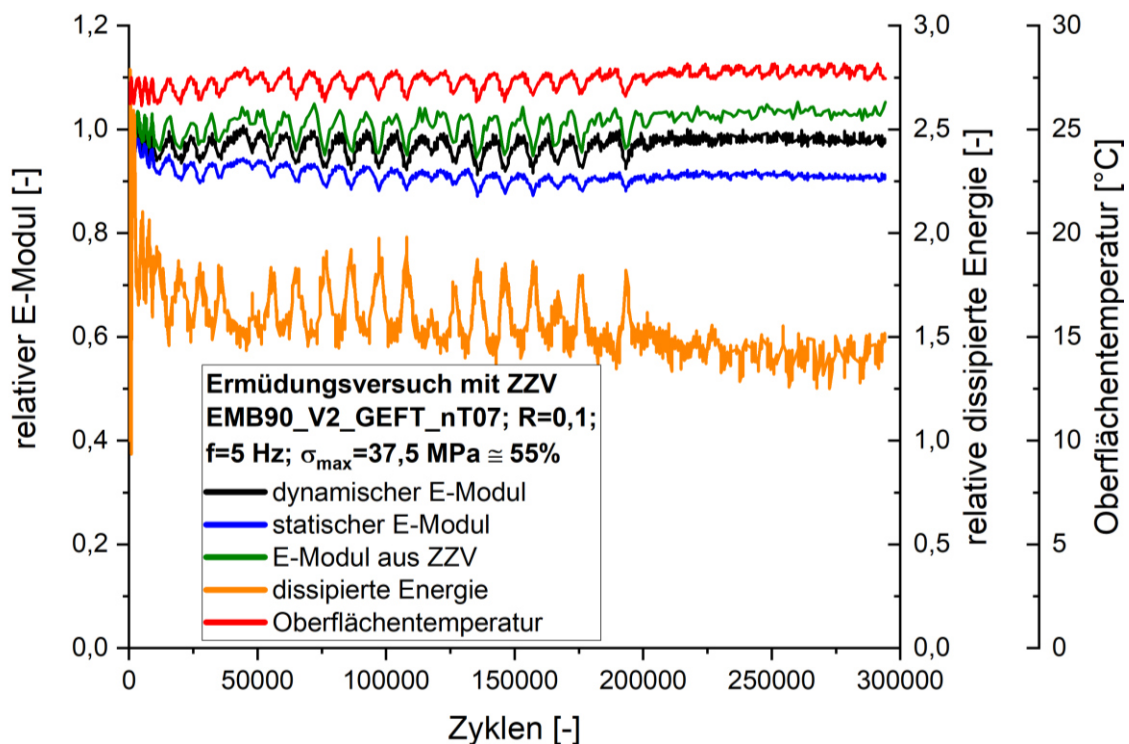


Abb. 4.15 Verlauf der verschiedenen E-Moduln, der dissipierten Energie, sowie der Oberflächentemperatur des Prüfkörpers EMB90_V2_GEFT_nT07.

Um die Ursache dieser periodischen Temperaturschwankungen von 2 °C zu ermitteln, wurde ein weiterer Versuch mit zwei weiteren Temperatursensoren durchgeführt. Diese wurden auf dem bewegten Kolben und auf dem Querbalken der Zug-Druck Universalprüfmaschine platziert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in **Abb. 4.16** dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass die Umgebungstemperatur am Querbalken, sowie die Probenoberflächentemperatur im selben Ausmaß und auch mit derselben Zyklusdauer geschwungen sind. Des Weiteren ist ersichtlich, dass die thermische Masse des Kolbens zu hoch für einen signifikanten Temperaturwechsel war. Durch diesen Versuch konnte schlussendlich gezeigt werden, dass der Grund dieser Anomalie die Klimaanlage im Raum war, die genauen Vorgänge in der Zug-Druck Universalprüfmaschine müssen jedoch weiter untersucht werden. Als Konsequenz müssen in Zukunft die Versuchsergebnisse der Maschinenrohdaten auf Temperaturabhängigkeiten untersucht werden.

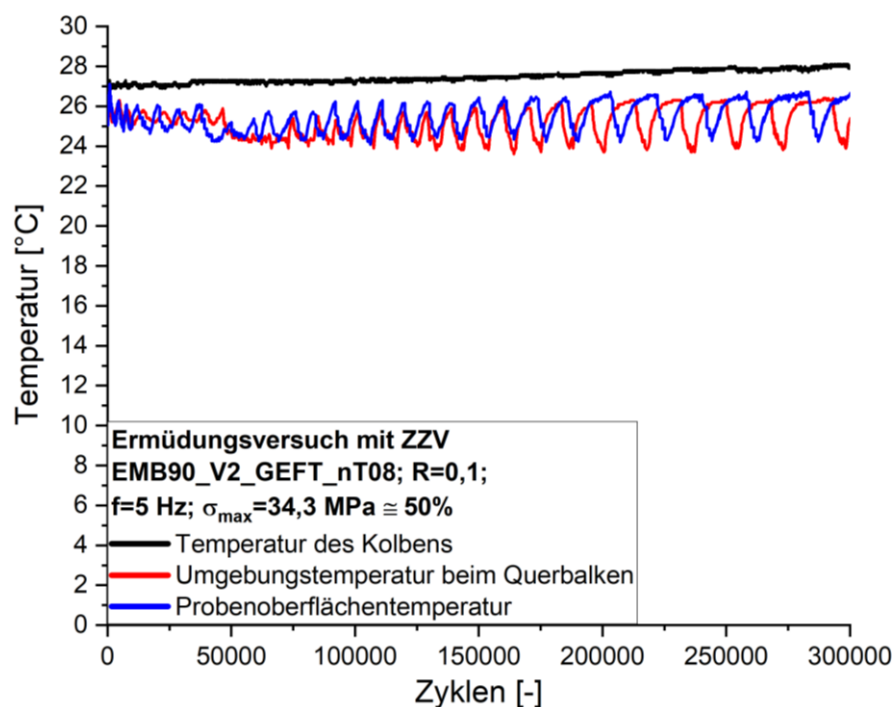


Abb. 4.16 Temperaturmessungen von drei verschiedenen Sensoren während eines separaten Versuchs mit der Probe EMB90_V2_GEFT_nT08.

4.4.2 DIC

Da die Mercury-Messungen unabhängig von den gemessenen Verschiebungswerten der Zug-Druck Universalprüfmaschine sind und da ebenfalls die Kraftwerte korrekt angefahren wurden, ist nicht zu erwarten, dass diese Materialwerte eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit aufweisen. In **Abb. 4.17** ist der E-Modul in Belastungsrichtung dargestellt. Die absolute Höhe beträgt laut der Laminattheorie einen Wert von 19.500 MPa. Dies korrespondiert sehr gut mit der Beobachtung, dass der E-Modul am Anfang um einen Wert von 20.000 MPa schwankte. Der Mittelwert blieb während des Versuchs nahezu konstant. Des Weiteren lag die gemessene Poissonzahl nahe an der Berechneten von ca. 0,1, zusätzlich kann in der Poissonzahl keine Veränderung beobachtet werden. Letzteres lässt sich auf die 90° Fasern zurückführen, welche trotz der sichtbaren Matrixrisse zu einer sehr hohen Steifigkeit in Querrichtung beitragen. Abschließend sind in **Abb. 4.18** die Verläufe der relativen E-Moduln dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass die E-Moduln aus den Zugversuchen und der dynamische Modul kein Absinken durch Schädigung zeigten, da diese um den Wert 1 schwankten. Zusätzlich ist zu sagen, dass das leicht höhere Niveau des E-Moduls aus den ZZV durch die Schwankung des ersten Werts erklärt werden kann, da dieser die Grundlage zur Berechnung der übrigen relativen Werte darstellt.

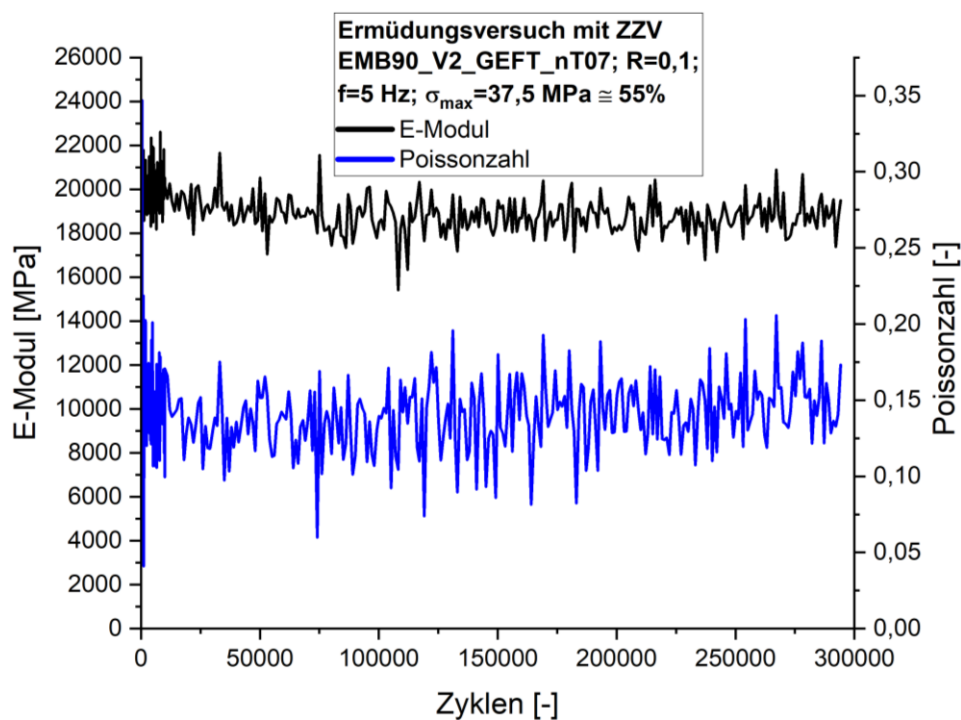


Abb. 4.17 Verlauf des absoluten E-Moduls in Belastungsrichtung, sowie der Poissonzahl, über die Zyklen des Probekörpers EMB90_V2_GEFT_nT07.

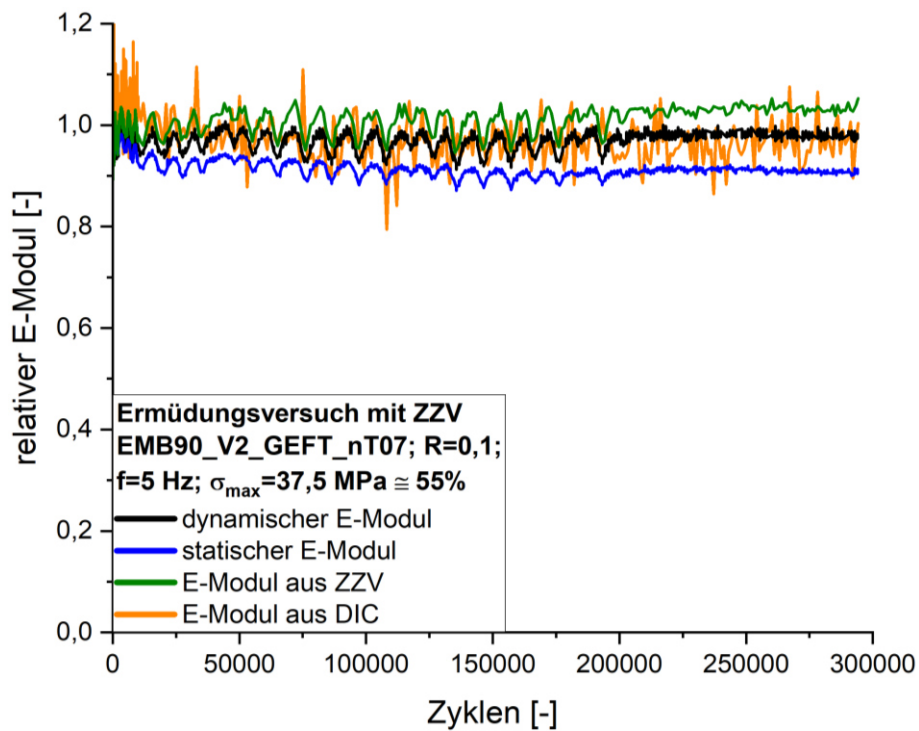


Abb. 4.18 Vergleich der relativen E-Moduln des Probekörpers EMB90_V2_GEFT_nT07.

4.4.3 Acoustic emission

Die Ergebnisse der Schallemission zeigten in **Abb. 4.19**, dass events von Beginn an steigen. Auch die Probenaufnahmen zeigten einzelne entstehende Risse bei den ersten Zyklen an. Das frühe Erscheinen kann durch die hohen Abkühlspannungen in den 90° Schichten begründet werden. Diese wurden mit der klassischen Laminattheorie unter Berücksichtigung der thermischen Belastung berechnet und betragen bis zu 10 % der Zugfestigkeit. Durch die geringe Dämpfung in Faserrichtung ist anzunehmen, dass die detektierten events von Matrixrissen stammen. Zum weiteren Verständnis muss gesagt werden, dass dieser Versuch nicht bis zum Bruch der Probe gefahren wurde, sondern bis optisch keine weiteren Risse entstanden sind. In dieser Anfangsphase treten noch keine Faserbrüche auf. Für ein besseres Verständnis des ganzen Schadensverlaufs muss der Versuch bis zum Bruch gefahren werden. Des Weiteren ist erwähnenswert, dass durch die gute Leitung allgemein die Signale mit einer höheren Amplitude digitalisiert wurden. Dadurch ist es wichtig Störsignale besonders effizient abzuschirmen. Dies wurde in diesen

Fall durch eine genaue Analyse dieser Störsignale und anschließender Filterung umgesetzt, jedoch könnte ebenso ein höherer threshold gewählt werden.

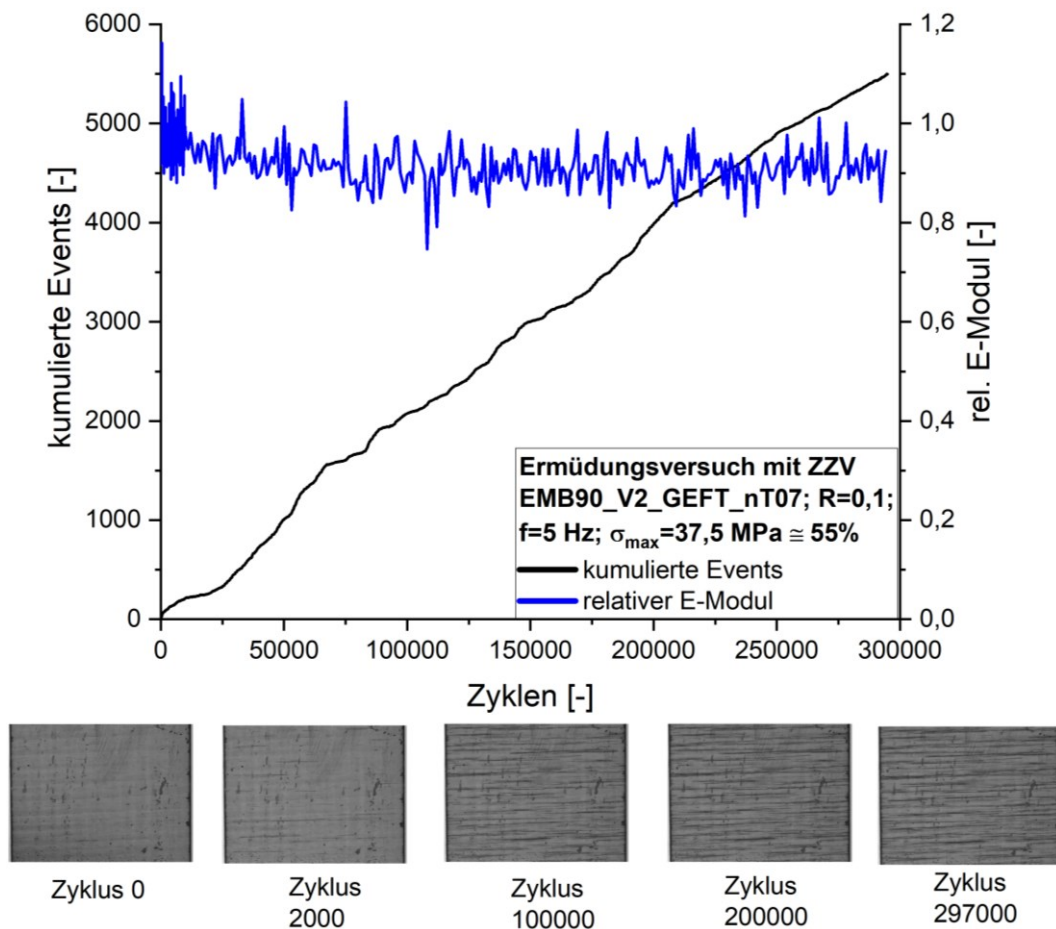


Abb. 4.19 Darstellung der kumulierten events und des relativen E-Moduls, zusätzlich dazu Probenbilder von ausgewählten Zyklen des Prüfkörpers EMB90_V2_GEFT_nT07.

4.5 Vergleich der Laminataufbauten

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, für jeden Laminataufbau nochmals zusammengefasst und die Aussagen, welche getroffen werden können, miteinander verglichen.

In ± 45 -Laminaten sind die zu erwartenden Schädigungsmechanismen Matrixrisse, die sich im Verlauf des Versuches zu Delaminationen entwickeln. Hierbei kann gesagt werden, dass Anhand eines Abfalles der Steifigkeit, sowie mit dem Verlauf der Poissonzahl die Schädigung der Matrix durch Matrixrisse bis zur Rissättigung gut abgebildet werden kann. Dazu kann der E-Modul aus den Rohdaten der Zug-Druck Universalprüfmaschine, sowie aus der digitalen Bildkorrelation verwendet werden. Die dissipierte Energie schien ebenfalls sensibel auf die Schädigungsmechanismen zu reagieren und eine weitere Forschung in diesem Gebiet könnte vielversprechende Ergebnisse bringen. Durch die starke Dämpfung von elastischen Wellen quer zur Faserrichtung konnten keine einzelnen Matrixrisse mit Hilfe der Schallemission als events erkannt werden. Es konnte jedoch der Beginn von wachsenden Delaminationen beziehungsweise die so entstehende Reibung zwischen zwei Schichten als events erkannt werden. Der Beginn der Delamination konnte zusätzlich durch ein Plateau in der Kurve des E-Moduls und der Poissonzahl festgestellt werden, ebenfalls durch ein Maximum in der Rissdichtekurve. Des Weiteren konnte ein mögliches Abbruchkriterium für Wöhlerversuche mit diesen Laminataufbauten gefunden werden. Hierbei wird der Ermüdungsversuch abgebrochen, wenn durch eine zunehmende Materialdämpfung ein Wendepunkt in der eventkurve erreicht wurde.

Die Schädigung bei dem UD90-Laminat bestand aus Matrixrissen und den oft vernachlässigbaren Brüchen der Schussfäden kurz vor dem Versagen des Prüfkörpers. In diesem Versuch konnte die Schädigung mittels linearen Abfalls des E-Moduls bis zum Probenkörperversagen beschrieben werden. Der Mittelwert der Poissonzahl korrelierte gut mit dem Absolutwert, welcher durch die klassische Laminattheorie vorhergesagt wird. Laut der Literatur sollte durch die zunehmende Anzahl an Rissen die Poissonzahl sinken, dies konnte jedoch durch die hohe Streuung nicht beobachtet werden. Bei der Schallemissionsanalyse wurden durch die hohe Dämpfung des Materials zu Beginn ebenfalls keine Matrixrisse aufgezeichnet. Der verspätete Start der Detektion kann entweder auf ein Ausrichten der Schussfäden oder durch einen massiven Anstieg der

Anzahl an erzeugten Matrixrissen zurückgeführt werden. Die dissipierte Energie besitzt zu diesem Zeitpunkt ein Minimum, dies wurde durch eine Abnahme der Phasenverschiebung zwischen Spannungs- und Dehnungskurve verursacht. Da das Ausrichten der Schussfasern zu solch einem Phänomen führen kann, ist dies ein Hinweis für die erste Hypothese. Die Erstellung einer Rissdichtekurve könnte einen wichtigen Beitrag zu der Lösung leisten, da diese sensibel auf die Anzahl der Risse ist. Für diesen Laminataufbau konnte schlussendlich kein Abbruchkriterium für Ermüdungsversuche gefunden werden.

Ähnlich wie bei dem UD90-Laminat werden bei dem EMB90-Laminat am Anfang Matrixrisse in den 90° Schichten erzeugt. Gegen Ende leiten Faserbrüche den Bruch der Probe ein. Jedoch wurde der Versuch nach einer visuellen Kontrolle der gleichbleibenden Rissanzahl gestoppt und so wurden keine Faserbrüche beobachtet. Die Ergebnisse der Maschinenrohdaten zeigten einen starken Einfluss der Umgebungstemperatur, die genauen Mechanismen dahinter sind noch ungeklärt. Die Auswertung der digitalen Bildkorrelation und der Rohdaten zeigte keinen signifikanten Abfall des E-Moduls und der Poissonzahl. Anders als bei den vorherigen Laminaten, besitzt das EMB90 eine sehr gute Leitung der Schallemissionen durch die 0° Schichten. Dadurch könnten die Matrixrisse von Beginn an als events aufgezeichnet werden. Dies ist möglich, da durch die Zugeigenspannungen in den 90° Schichten die ersten sichtbaren Matrixrisse früher als in UD90-Laminaten mit demselben Lastniveau auftreten sind. Aufgezeichnete Probenbilder konnten diese Aussage bestätigen. Das Fazit aus diesem Versuch ist, dass die Schallemission durch die sehr gute Leitung der Wellen in Faserrichtung in solchen Kreuzverbunden und in anderen multiaxialen Laminaten das Potential besitzt den Schadensverlauf über die gesamte Lebenszeit abzubilden. Aufgrund der geringen Dämpfung ist es ebenfalls besonders wichtig die Störsignale sehr effizient von den Nutzsignalen zu filtern.

5 ZUSAMMENFASSUNG, SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Unter den Standardbelastungsarten führen Ermüdungsbelastungen früher zum Versagen von Bauteilen als monotone Beanspruchungen oder statische Langzeitbeanspruchungen. Der Grund dafür liegt in dem schwerwiegenderen Schädigungsverlauf. Da das Auftreten von Ermüdungsbelastungen bei Leichtbauanwendungen keine Ausnahme sind und da für diese Anwendungen vermehrt Faserverbundwerkstoffe verwendet werden, müssen die Schädigungen in diesen Materialien mittels Ermüdungsversuchen untersucht werden. Anders als bei Metallen gibt es für Faserverbunde aufgrund ihres komplizierten Schädigungsverhalten noch keine geeigneten Abbruchkriterien für Ermüdungsversuche.

Um einen Beitrag in diesem Bereich zu leisten, wurden in dieser Arbeit Ermüdungsversuche mit zyklischen Zugversuchen an Proben mit drei verschiedenen Laminataufbauten durchgeführt, vier dieser Versuche sind hierbei genauer beschrieben. Diese Proben wurden aus jeweils 12 Lagen eines UD-Gewebes und einem Epoxidharzsystem mittels einer hydraulischen Presse gefertigt. Nach einem Temperschnitt und Aufkleben von Aufleimern wurden die Prüfkörper ausgeschnitten.

Die Versuche bestanden aus drei Bereichen mit unterschiedlich langen Zyklenblöcken zwischen den Zugversuchen, um die Schädigung in der Anfangsphase besser zu charakterisieren. Zusätzlich wurden drei verschiedene Analysemethoden verwendet. Für diese wurde jeweils ein Python-Skript modifiziert oder neu geschrieben, welches die Auswertungen im höchsten Ausmaß automatisiert.

Anhand der E-Modul und der Poissonzahl konnte der Schädigungsverlauf der $\pm 45^\circ$ Laminaten nachvollzogen werden. Mit Hilfe des Schallemissionssystems konnte der Beginn von wachsenden Delaminationen erkannt werden. Zusätzlich konnte ein mögliches Abbruchkriterium für Wöhlerversuche mit diesen Laminataufbauten gefunden werden.

Beim UD90 Laminat führten die Matrixrisse zu einem linearen Abfall des E-Moduls bis zum Probenkörperversagen. Durch die hohe Dämpfung von Schallemissionen wurden events deutlich nach dem ersten Auftreten von Matrixrisse detektiert. Für diesen Laminataufbau konnte schlussendlich kein Abbruchkriterium für Ermüdungsversuche gefunden werden.

Die Messung der Laminare mit 90° Schichten eingebettet in 0° Fasern zeigte einen starken Einfluss der Umgebungstemperatur. Die E-Modul Kurven besaßen keinen deutlichen Abfall aufgrund von Matrixrissen. Die Ergebnisse der Schallemissionen zeigten events von Beginn an, dies korrespondierte gut mit sichtbaren Matrixrissen in den Probenbildern. Durch die sehr gute Leitung der Wellen in Faserrichtung besitzen die Proben die Möglichkeit, den Schadensverlauf über die gesamte Lebenszeit abzubilden.

Weitere Forschung in diesem Gebiet durch Anwendung von acoustic emission-Systemen scheint vielversprechend zu sein, da für reale Bauteile in den meisten Fällen ein multiaxialer Aufbau verwendet wird und somit eine gute Leitung in mehreren Richtungen vorhanden ist. Dadurch besteht die Möglichkeit auftretende Schadensmechanismen zu detektieren und so für jeden Lagenaufbau ein geeignetes Abbruchkriterium zu finden.

Ein weiteres Augenmerk kann in Zukunft auf die verschiedenen Arten der künstlichen Intelligenz gelegt werden. Diese sind derzeit schon ein sehr nützliches Tool in einigen Segmenten der Auswertung von acoustic emission Daten. Diese werden in den nächsten Jahren laufend weiterentwickelt und auf spezielle Problemstellungen abgestimmt, um dadurch bei komplexeren Anwendungsfällen Verwendung zu finden. Vorstellbar ist, dass in Zukunft die Zuordnung von waveforms zu den korrespondierenden Schadensmechanismen möglich ist, sodass die KI die Schädigung beurteilen kann und den Versuch vor dem Bruch abbrechen kann.

6 LITERATURVERWEISE

Akay, E., Yilmaz, C., Kocaman, E. S., Turkmen, H. S. and Yildiz, M., "Monitoring Poisson's Ratio Degradation of FRP Composites under Fatigue Loading Using Biaxially Embedded FBG Sensors", *Materials (Basel, Switzerland)*, **9** (2016), DOI:10.3390/ma9090781

Armin Huber, Dispersion Calculator, Center of Lightweight Production Technology, Institute of Structures and Design (2020)

Brunbauer, J., Arbeiter, F., Stelzer, S. and Pinter, G., "Stiffness Based Fatigue Characterisation of CFRP", *AMR*, **891-892**, 166 – 171 (2014), DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.891-892.166

Brunner, A. J., "Identification of damage mechanisms in fiber-reinforced polymer-matrix composites with Acoustic Emission and the challenge of assessing structural integrity and service-life", *Construction and Building Materials*, **173**, 629 – 637 (2018), DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.04.084

Chawla, K. K., *Composite Materials*, Springer International Publishing, Cham (2019)

Chlada, M., Prevorovsky, Z. and Blahacek, M., "Neural network AE source location apart from structure size and material", *Journal of Acoustic Emission*, **28**, 99 – 108 (2010)

Drvoderic, M., 2011, "Probeneinflüsse bei der mechanischen Prüfung von Composites". Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben

Drvoderic, M., Rettl, M., Pletz, M. and Schuecker, C., "CrackDect: A crack density detection tool for fiber-reinforced polymers", *SoftwareX* (to be published)

"Firma Tissa Glasweberei AG. Unidirektionales Gewebe", <https://www.tissa.ch/home> (2021), accessed April 30, 2021

"ISO 13003:2003. Fibre-reinforced plastics - Determination of fatigue properties under cyclic loading conditions", **83.120**

Landau, L. D. and Lifšic, E. M., *Lehrbuch der theoretischen Physik*, 7th Edition, Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main (1991)

Maillet, E., Godin, N., R'Mili, M., Reynaud, P., Fantozzi, G. and Lamon, J., "Real-time evaluation of energy attenuation: A novel approach to acoustic emission analysis for damage monitoring of ceramic matrix composites", *Journal of the European Ceramic Society*, **34**, 1673 – 1679 (2014), DOI:10.1016/j.jeurceramsoc.2013.12.041

Nijssen, R. P., "Phenomenological fatigue analysis and life modeling", in *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures*, Elsevier, p. 47 – 75 (2020)

"ÖNORM EN 1330-9:2017 09 01. Zerstörungsfreie Prüfung- Terminologie- Teil_9: Begriffe der Schallemissionsprüfung", **01.040.19 | 19.100**

"ÖNORM EN 15857:2010 03 01. Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Prüfung von faserverstärkten Polymeren - Spezifische Vorgehensweise und allgemeine Bewertungskriterien", **19.100**

"ÖNORM EN ISO 527-4:1997 09 01. Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe", **83.120 | 83.080.01**

Puck, A., *Festigkeitsanalyse von Faser-Matrix-Laminaten. Modelle für die Praxis*, Hanser, München, Wien (1996)

Radaj, D. and Vormwald, M., *Ermüdungsfestigkeit. Grundlagen für Ingenieure*, 3rd Edition, Springer, Berlin, New York (2007)

Reifsnider, K. L., "Damage and Damage Mechanics", in *Fatigue of composite materials*, Reifsnider, K. L. (Ed.), Elsevier, Amsterdam, p. 11 – 77 (1991)

Sause, M., *In situ monitoring of fiber-reinforced composites. Theory, basic concepts, methods, and applications*, Springer, Cham (2016)

Sause, M., Müller, T., Horoschenkoff, A. and Horn, S., "Quantification of failure mechanisms in mode-I loading of fiber reinforced plastics utilizing acoustic emission analysis", *Composites Science and Technology*, **72**, 167 – 174 (2012), DOI:10.1016/j.compscitech.2011.10.013

Sause, M. G., Schmitt, S., Hoeck, B. and Monden, A., "Acoustic emission based prediction of local stress exposure", *Composites Science and Technology*, **173**, 90 – 98 (2019),

DOI:10.1016/j.compscitech.2019.02.004

Schneider, C., Wiener, J., Sperling, C., Pinter, G. and Brunner, Andreas, J,

"Zerstörungsfreie Detektion von Schädigungsprozessen bei Ermüdungsbelastung von Polymermatrix- Faserverbundwerkstoffen" (2021)

Schürmann, H., *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Mit 39 Tabellen*, 2nd

Edition, Springer, Berlin, Heidelberg, New York, NY (2007)

Sendeckj, G. P., "Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials", in *Fatigue of composite materials*, Reifsnider, K. L. (Ed.), Elsevier, Amsterdam, p. 431 – 483 (1991)

Sevenois, R. and van Paepegem, W., "Prediction of fatigue crack initiation in UD laminates under different stress ratios", in *Fatigue Life Prediction of Composites and Composite Structures*, Elsevier, p. 465 – 494 (2020)

Stinchcomb, W. W. and Bakis, C. E., "Fatigue Behavior of Composite Laminates", in *Fatigue of composite materials*, Reifsnider, K. L. (Ed.), Elsevier, Amsterdam, p. 105 – 180 (1991)

Talreja, R. and Janis, V., *Modeling Damage, Fatigue and Failure of Composite Materials*, Elsevier Science, San Diego (2015)

Trofimowa, T. I., *Physik*, 4th Edition, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden (1997)

Unnorsson, R., "Hit Detection and Determination in AE Bursts", in *Acoustic Emission - Research and Applications*, Sikorski, W. (Ed.), InTech (2013)

van Paepegem, W., Baere, I. de, Lamkanfi, E. and Degrieck, J., "Monitoring quasi-static and cyclic fatigue damage in fibre-reinforced plastics by Poisson's ratio evolution",

International Journal of Fatigue, **32**, 184 – 196 (2010),

DOI:10.1016/j.ijfatigue.2009.02.026

Vassilopoulos, A. P., "Predicting the fatigue life of adhesively-bonded structural composite joints", in *Fatigue and Fracture of Adhesively-Bonded Composite Joints*, Vassilopoulos, A. P. (Ed.), Elsevier, p. 443 – 491 (2015)

Vassilopoulos, A. P., "The history of fiber-reinforced polymer composite laminate fatigue", *International Journal of Fatigue*, **134**, 105512 (2020),
DOI:10.1016/j.ijfatigue.2020.105512

Zahnt, B.-A., 2003, "Ermüdungsverhalten von diskontinuierlichen glasfaserverstärkten Kunststoffen: Charakterisierungsmethoden, Werkstoffgesetze und Struktur-Eigenschafts-Beziehungen". Dissertation, Montanuniversität Leoben, Leoben

ANHANG