

Untersuchung des Ermüdungsverhaltens von Ultramid® mit Hilfe der Schallemissionsanalyse

Anne JÜNGERT *, Sandra DUGAN *, Max HOßFELD *, Chris KOHLER *
* MPA Universität Stuttgart

Kurzfassung. Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) werden auf Grund hoher Festigkeiten und Steifigkeiten bei gleichzeitig geringem Gewicht vielfach im Leichtbau eingesetzt. Neben kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK), die bereits seit etlichen Jahren in der Luft- und Raumfahrt Anwendung finden, erreichen inzwischen auch kurz- oder langfaserverstärkte Kunststoffe hohe Festigkeiten. Ihr großer Vorteil gegenüber CFK ist die Möglichkeit, dass Bauteile im wirtschaftlichen und großseriene geeigneten Spritzgussverfahren hergestellt werden können. Da sich die Schädigungsmechanismen von FVK deutlich von denen der sonst verwendeten metallischen Werkstoffe unterscheiden, ergeben sich bei der Auslegung und Bewertung von Bauteilen aus FVK diverse Fragestellungen. Eine Bewertung dieser Bauteile ist mit üblichen Berechnungsmethoden wie beispielsweise FKM-Richtlinie oder ASME Code nicht oder nur sehr begrenzt möglich. Dies betrifft insbesondere Materialermüdung unter zyklischer Belastung.

Ziel dieser Untersuchung ist die Charakterisierung des Schädigungs- und Versagensverhaltens von FVK (Ultramid® Structure) unter zyklischer Beanspruchung. Ultramid® Structure besteht aus Polyamid mit eingebetteten Glaslangfasern und kann im Fahrzeugbau insbesondere Strukturbauteile aus Leichtmetall ersetzen. Darüber hinaus weist es schalldämmende Eigenschaften auf. Zur Charakterisierung des Schädigungsverhaltens werden Proben aus Ultramid® Structure zyklisch beansprucht und während der Versuche durch eine Schallemissionsanalyse überwacht. Durch Sensoren werden die im Bauteil durch Faser-, Zwischenfaser- oder Matrixbrüche erzeugte Schallsignale erfasst. Je nach Sensoranordnung und Versuchsaufbau ist es so möglich, die Quelle der Schallemission sowie die Art der Schädigung zu bestimmen. Um die Schädigungslokalisierung besser bewerten zu können, wird im Vorfeld der Ermüdungsversuche die Faser-/Matrixverteilung im Bauteil über eine Durchstrahlungsaufnahme bestimmt um eventuelle Inhomogenitäten in Faserrichtungen und -verteilung aufzudecken, die lokale Festigkeits- und Steifigkeitsunterschiede, Dehnungslokalisierungen und damit Schädigung begünstigen.

Einführung

Ultramid® Structure ist ein langfaserverstärkter Kunststoff, der in verschiedenen Industriezweigen zunehmend metallische Werkstoffe als Konstruktionsmaterial für Strukturbauteile verdrängt [1]. Er besteht aus einer Polyamidmatrix, die mit Langglasfasern (mittlere Längen bis zu 25 mm) verstärkt ist. Aufgrund der thermoplastischen Polyamidmatrix lassen sich Bauteile im Spritzgussverfahren herstellen.



Herstellungsbedingt bildet sich im Bauteil ein komplexes Fasergerüst aus, welches die Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Bauteils gegenüber kurzfaserverstärkten Kunststoffen erheblich verbessern. Besonders die Schlagzähigkeit ist gegenüber kurzfaserverstärkten Kunststoffen und Leichtmetallen erhöht. Der Einsatz als Strukturbauteile erfordert eine Bewertung der Betriebsfestigkeit der Bauteile, was derzeit mit üblichen Berechnungsmethoden wie beispielsweise FKM-Richtlinie oder ASME Code nicht oder nur bedingt möglich ist.

Zur Untersuchung und Charakterisierung des Schädigungsverhaltens von Ultramid® Structure unter zyklischer Beanspruchung werden Ermüdungsversuche an Flachproben durchgeführt. Zur Untersuchung von Schädigungsmechanismen, werden die Proben während der Ermüdungsversuche mit zwei Schallemissionssensoren instrumentiert. In faserverstärkten Kunststoffen treten in der Regel vier verschiedene Schädigungsmechanismen auf: Faserbruch, Faserauszug, Ablösen von Faser und Matrix, Matrixbruch. Diese erzeugen Schallemissionen, die sich in Amplituden und Frequenzen voneinander unterscheiden. Durch die Analyse der aufgezeichneten Schallemissionen sollen neue Erkenntnisse über das Ermüdungsverhalten des Werkstoffs gewonnen werden.

1. Durchführung der Messungen

1.1 Messaufbau

Die Flachproben aus Ultramid® Structure wurden in eine servohydraulische Schwingprüfmaschine eingebaut und jeweils oben und unten an der Probe ein Schallemissionssensor angekoppelt. Nach Anbringen der Sensoren wurde die Probeneinspannung gegen Torsion versteift. Die Proben wurden anschließend auf vier unterschiedlichen Lastniveaus zyklisch bis zum Bruch belastet. Bei der zyklischen Beanspruchung von Kunststoffproben muss die Beanspruchungsfrequenz klein gehalten werden, um eine innere Erwärmung und eine daraus resultierende Schädigung des Materials auszuschließen. Die hier beschriebenen Ermüdungsversuche wurden mit einer Frequenz von 5 Hz durchgeführt.



Abbildung 1: Messaufbau

Zur Überwachung der Temperatur, wurden die Proben zum Teil über die gesamte Versuchsdauer mit einer Thermographiekamera beobachtet. Die dabei registrierten Temperaturschwankungen von maximal 3 K lassen sich auf Änderungen in der Raumtemperatur zurückführen, so dass eine Erwärmung der Proben aufgrund des Versuchsaufbaus auszuschließen ist.

Eine Übersicht der durchgeführten Ermüdungsversuche ist in nachstehender Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht Ermüdungsversuche

Anzahl	Proben	Spannungsamplitude σ_a [MPa]	Spannungsverhältnis R
	Bezeichnung		
1	UG13	90,0	0,1
5	UG4, UG6, UG7, UG8, UG18	45,0	0,1
4	UG3, UG9, UG10, UG12	37,1	0,1
4	UG1, UG2, UG5, UG14	33,8	0,1

Zur Aufzeichnung von Schallsignalen, die durch Bruchgeräusche im Material erzeugt werden, wurde ein Schallemissionsgerät mit zwei Sensoren verwendet. Die Schallemissionssensoren zeigen laut Hersteller ein breitbandiges Frequenzverhalten, was für die spätere Auswertung von Frequenzspektren wichtig ist. Die Signale wurden vor der Digitalisierung über Vorverstärker verstärkt und schließlich mit einer Abtastrate von 1 MHz gespeichert. Die aufgezeichneten Signale hatten eine Länge von etwa 16 ms und einen Dynamikbereich von $\pm 2V$. Die Triggerschwelle wurde auf 40% der maximalen Signalhöhe festgelegt.

1.2 Durchstrahlungsprüfung

Vor den Ermüdungsversuchen wurden die Flachzugproben durchstrahlt. Die Durchstrahlung sollte inhomogene Faser-Matrixverteilungen, sowie die Hauptausrichtung der Fasern aufzeigen. Auf den Durchstrahlungsaufnahmen (Abbildung 2) ist die Matrix-Faser Struktur von Ultramid® erkennbar. Die Fasern sind stark miteinander verwoben und es bildet sich ein 3-dimensionales Fasergeflecht. Die Ausrichtung der Fasern ist im Prüfquerschnitt überwiegend in Längsrichtung, während die Fasern am Querschnittsübergang keine Vorzugsrichtung haben. Es konnten keine auffälligen Inhomogenitäten in den Proben erkannt werden.

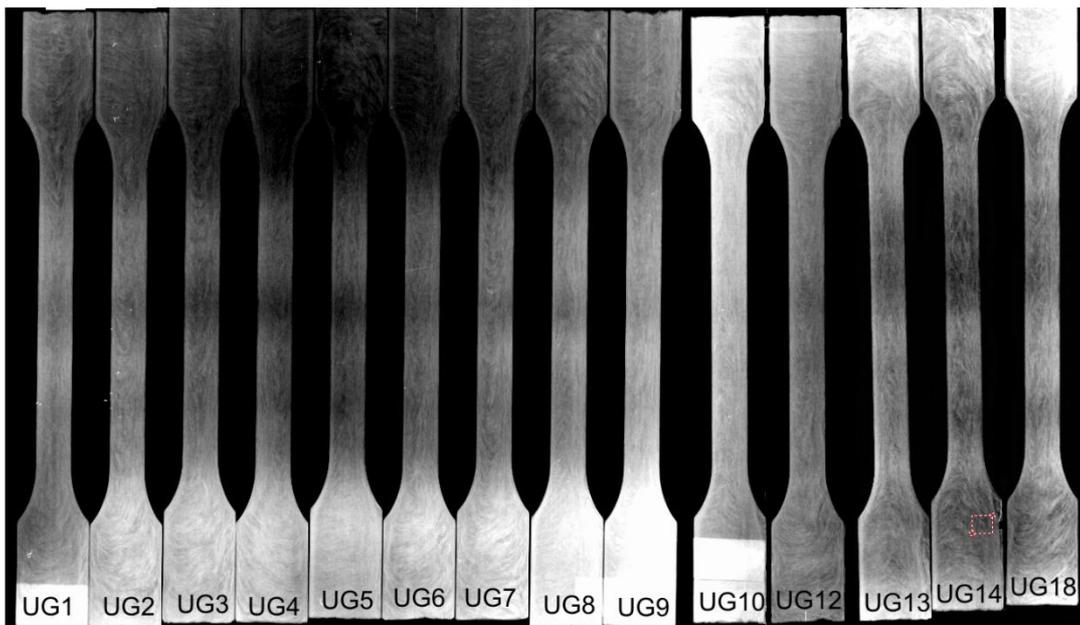


Abbildung 2: Durchstrahlungsaufnahmen der Flachproben aus Ultramid® Structure

2. Wöhlerlinie

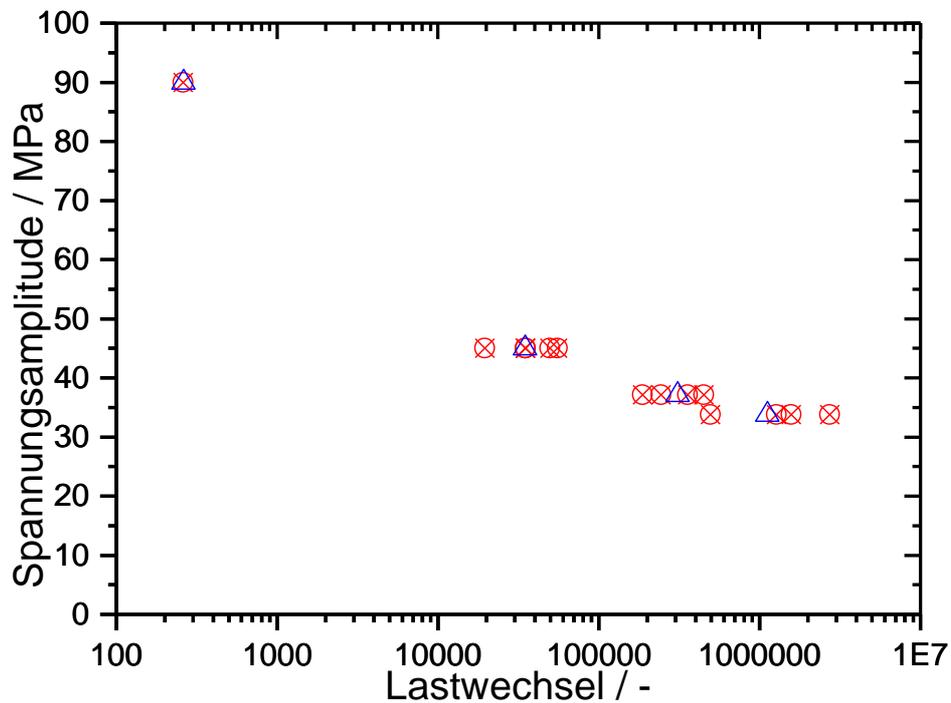


Abbildung 3: Ergebnisse der Ermüdungsversuche, R=0,1

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Ermüdungsversuche dargestellt. Insgesamt wurden 14 kraftgeregelte Ermüdungsversuche auf vier Laststufen durchgeführt. Die Ermüdungsversuche wurden im Zugschwellbereich, bei einem R-Verhältnis von R=0,1, ausgeführt. Die Mittelwerte der ertragbaren Lastwechselzahl bei den einzelnen Spannungsamplituden ist in nachstehender Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Ertragbare Lastwechselzahlen

Spannungsamplitude σ_a [MPa]	Ertragbare Lastwechselzahl
90,0	261
45,0	34795
37,1	309366
33,8	1115115

3. Auswertung der Schallemissionsdaten

Es wurden pro Ermüdungsversuch im Mittel 5500 Schallereignisse aufgezeichnet. Je nach Laststufe wurden diese Schallereignisse in Zeiträumen einiger Stunden bis hin zu mehreren Tagen registriert. Eine erste Darstellung des Schädigungsverlaufes lässt sich über das Auftragen der kumulierten Schallereignisse über der Versuchszeit (sog. Hitrate) erreichen.

3.1 Hitraten

Werden die Schallereignisse über der Zeit aufgetragen, wird ein prinzipiell ähnlicher Schädigungsverlauf für alle Laststufen ersichtlich. Dieser ist, anhand der Hitrate des Ermüdungsversuchs an Probe UG5 (niedrige Last), in Abbildung 4 exemplarisch dargestellt. Zunächst treten relativ viele Schallereignisse in kurzer Zeit auf (Initialschädigung). Danach folgt eine ruhigere Phase mit etwa linearem Anstieg der Kurve. Die Steigung dieser Kurve ist bei niedriger Last sehr flach. In den Versuchen mit größerer Lastamplitude ist die Steigung der Kurve in diesem Bereich größer.

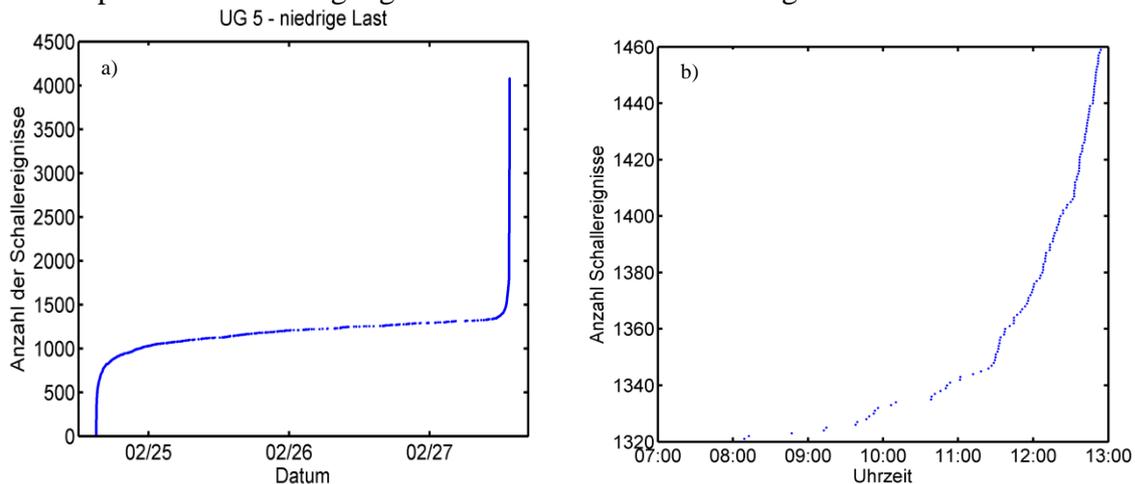


Abbildung 4: a) Hitrate des Ermüdungsversuch von Probe UG 5 bei niedriger Last; b) Beginn der globalen Schädigung; Schallereignisse treten oft zeitlich gebündelt auf.

Der Beginn der progressiven Schädigung ist durch einen Wendepunkt gekennzeichnet. Die progressive Schädigung lässt sich ebenfalls in zwei Bereiche unterteilen. Zunächst verläuft die globale Schädigung stufenweise, d.h. es treten immer mehrere Schallereignisse in einem kurzen Zeitfenster auf, auf das ein kurzes Zeitfenster der Ruhe folgt (siehe Abbildung 4b). Im weiteren Verlauf der Schädigung lässt sich dieser stufige Verlauf nicht mehr beobachten. Es werden praktisch kontinuierlich Schallereignisse aufgezeichnet.

3.2 Klassifizierung der Schallereignisse

In Faserverbundwerkstoffen treten verschiedene Versagensmechanismen auf. Diese erzeugen charakteristisch unterschiedliche Schallemissionen. Die Unterschiede zeigen sich sowohl in den Frequenzen als auch in den Amplituden der aufgezeichneten Signale [2]. Für jeden der durchgeführten Ermüdungsversuche wurden die aufgezeichneten Schallsignale hinsichtlich ihrer Signalamplituden und Frequenzinhalte untersucht.

In Abbildung 5a) ist die maximale Amplitude beider Kanäle für jedes Schallereignis eines Ermüdungsversuches aufgetragen. Deutlich erkennbar wird hierbei die Triggerschwelle, die bei etwa 800 mV liegt, sowie die Grenze des Dynamikbereichs der Amplitudenaufzeichnung bei ca. 2V. Größere Amplituden wurden in den Signalen abgeschnitten. Es ist zu sehen, dass auch Signale mit Amplituden unterhalb der Triggerschwelle aufgezeichnet wurden. Diese wurden am jeweils anderen Sensor aufgezeichnet, wenn nur an einem Sensor die Triggerschwelle überschritten wurde. Bis zum Beginn der globalen Schädigung nach etwa 1300 Schallereignissen, triggert das Messsystem gleichmäßig oft an beiden Sensoren. Die Schallemissionen werden gleichmäßig räumlich verteilt in der Probe erzeugt.

Zu Beginn der progressiven Schädigung werden vermehrt an Kanal 1 große Amplituden registriert. Hier befinden sich die Amplituden oft am Maximum des Dynamikbereichs. An Kanal 2 wird ebenfalls eine Steigerung der Signalamplituden registriert, die sich bei fortschreitender Schädigung jedoch wieder reduzieren. Der Bruch der Probe erfolgte nach etwas mehr als 4000 Schallereignissen in Nähe zum zu Kanal 1 gehörigen Sensor. Die höheren Amplituden und das durchgehende Triggern auf Kanal 1 deuteten bereits auf eine Schädigung in Nähe des Sensors 1 hin.

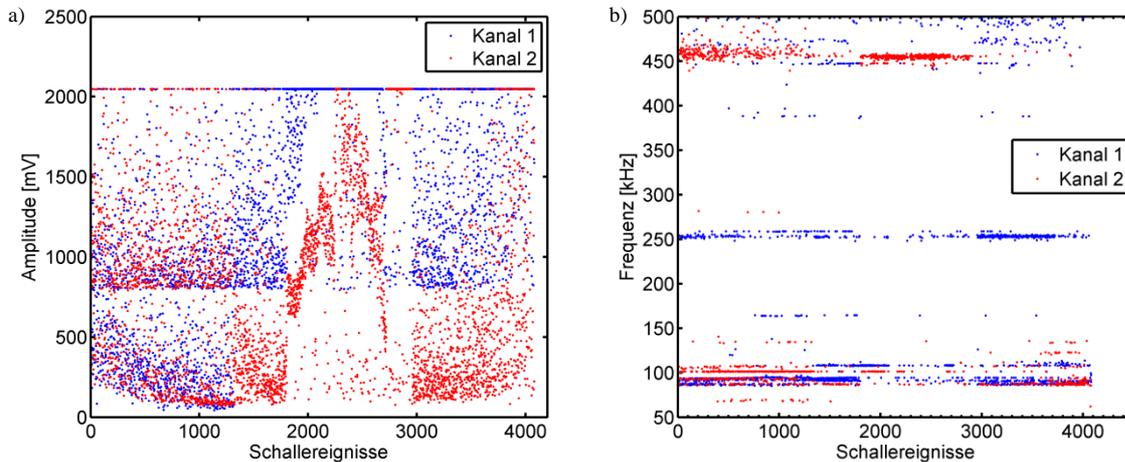


Abbildung 5: a) Maximale Signalamplitude im Schallereignis; b) Maximale Frequenz zu jedem Schallereignis eines Ermüdungsversuchs.

Barré und Bezeggagh [3] konnten in ihren Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen den Signalamplituden und den in Faserverbundkunststoffen auftretenden Versagensmechanismen herstellen. Qualitativ lässt sich anhand der Signalamplituden sagen, dass Signale mit großer Amplitude als Faserbrüche eingeordnet werden können, während Matrixbrüche Signale mit kleineren Amplituden erzeugen. Eine genauere Untersuchung dieses Zusammenhangs wurde für diese Messdaten aufgrund der großen Zahl von Signalen mit Amplituden, die außerhalb des Dynamikbereichs lagen, nicht durchgeführt.

Aus der Literatur ist bekannt, dass die verschiedenen Versagensmechanismen in Faserverbundkunststoffen sich ebenfalls dominanten Frequenzen zuordnen lassen [2]. Bei Schallereignissen mit Frequenzen zwischen 350 und 500 kHz handelt es sich um Faserbrüche, bei Frequenzen zwischen 50 und 180 kHz um Matrixbrüche. In den Frequenzbändern dazwischen befinden sich die Verbundversagensarten Faserauszug und Faser-Matrixablösung. Eine Trennung dieser beiden Versagensarten ist ohne weitere Versuche nicht möglich, so dass sie im Folgenden als Verbundversagen zusammengefasst werden.

Aus den Schallemissionssignalen wurden über eine Fouriertransformation jeweils die Frequenzen mit den größten Amplituden ermittelt. Zur Auswertung der Frequenzen wurden nur Signale verwendet, deren Amplituden innerhalb des Dynamikbereichs lagen. Aus Abbildung 5b) wird deutlich, dass die Frequenzen mit dem größten Energiegehalt sich in den in der Literatur beschriebenen Frequenzbändern bewegen, wodurch es möglich ist, die Schallereignisse verschiedenen Versagensmechanismen zuzuordnen.

Im Bereich der Initialschädigung und der weiteren Schädigungsentwicklung vor der progressiven Schädigung werden Signale aufgezeichnet, die sich allen Versagensmechanismen zuordnen lassen. Im Verlauf der progressiven Schädigung werden vermehrt Faserbrüche registriert, deren Frequenz in einem sehr engen Band liegen. Die Verbundversagensmechanismen und auch die Matrixbrüche treten zunächst in den

Hintergrund. Gegen Ende der progressiven Schädigung treten wieder vermehrt Matrixbrüche auf.

3.3 Signalbasierte Auswertung

Aufgrund der großen Anzahl von Daten beschränkte sich die bisherige Auswertung auf eine parameterbasierte Auswertung. Es wurden Amplituden und Frequenzen ausgewertet ohne jedoch die Signale selbst zu betrachten. In Abbildung 6 ist nun aus jedem der in Abschnitt 3.1 erwähnten Schädigungsbereiche der Hitraten beispielhaft ein Signal dargestellt.

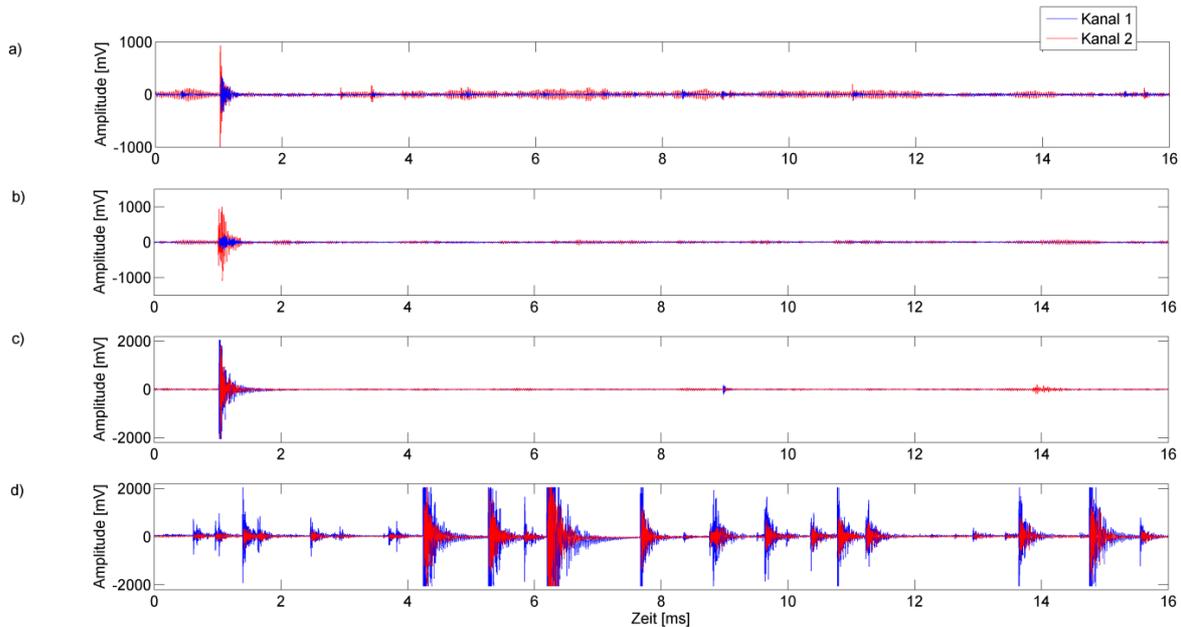


Abbildung 6: Signale der Schallereignisse aus den Bereichen der a) Initialschädigung, b) weiterer Schädigungsverlauf, c) Beginn der progressiven Schädigung, d) Schädigung bis Bruch.

Zu Beginn des Versuches, im Bereich der Initialschädigung werden oft Signale registriert, die sich knapp an der Triggerschwelle befinden. Dem Hauptsignal folgen weitere kleinere Signale, wie ein Knistern im Material. Im darauf folgenden Bereich, in dem die Schädigung langsam fortschreitet, werden einzelne Signale mit mittleren Amplituden aufgezeichnet. Zu Beginn der progressiven Schädigung treten die Signale wieder häufiger und vor allem mit höherer Amplitude auf. Mit fortschreitender Schädigung verkürzen sich die Zeitintervalle zwischen den Schallereignissen. In einem Aufzeichnungszeitraum von 16 ms treten mehrere Ereignisse unterschiedlicher Amplituden auf. Es werden kontinuierlich Ereignisse registriert, die sich für eine parameterbasierte Auswertung nur schwer voneinander trennen lassen.

3. Diskussion der Ergebnisse

Bei den durchgeführten Ermüdungsversuchen an Ultramid® Structure konnten mit der Schallemissionsanalyse viele Schallereignisse aufgezeichnet werden. Diese lassen sich anhand ihres Frequenzgehaltes verschiedenen Schadensmechanismen zuordnen. Jedoch werfen die Ergebnisse weitere Fragen auf. Aus Abbildung 5 geht hervor, dass die an Kanal 1 und Kanal 2 aufgezeichneten Signale desselben Schallereignisses sich in Amplitude und Frequenz unterscheiden können. Ein Signal, das beispielsweise nahe Kanal 1 mit großer Amplitude registriert wurde, besitzt oft eine hohe Frequenz und wird demnach als

Faserbruch eingeordnet. Das gleiche Signal erreicht Kanal 2 nach einer zeitlichen Verzögerung mit anderer Amplitude und anderem Frequenzgehalt und wird demnach als Verbundversagen klassifiziert. Aufgrund des ausgeprägten Fasergeflechts im Material ist die Dämpfung der sich im Material ausbreitenden Schallwellen sehr groß. Dies wirkt sich zum einen auf die Signalamplitude aus, jedoch wird der Frequenzgehalt ebenfalls verändert, da hohe Frequenzen in der Regel sehr viel stärker gedämpft werden als niedrige Frequenzen. Zu einer genauen Klassifikation der Schadensmechanismen sollte also der ungefähre Ort des Schallereignisses ebenfalls mit berücksichtigt werden.

4. Ausblick

In diesem Beitrag wurden exemplarisch für einen Ermüdungsversuch verschiedene Möglichkeiten der Signalauswertung dargestellt. Neben diesem Versuch wurden 12 weitere auf 3 unterschiedlichen Lastniveaus durchgeführt. Durch den Vergleich der Daten miteinander soll ermittelt werden, ob sich die Schadensentwicklung auf unterschiedlichen Lastniveaus ein anderes Verhalten zeigt.

Des Weiteren wird eine signalbasierte Auswertung der Signale angestrebt um die unterschiedlichen Schadensmechanismen besser voneinander trennen zu können. Die Betrachtung von ganzen Frequenzspektren [4] und eine weiterführende Signalverarbeitung könnten noch neue Erkenntnisse liefern.

Im Verlauf der Versuche blieben verschiedene Fragen ungeklärt. Mithilfe weiterer Versuche sollen verschiedene Einflüsse des Messaufbaus genauer untersucht werden. Es sollen kürzere Signale registriert, das Abschneiden großer Amplituden verhindert, sowie die Triggerschwelle empfindlicher gewählt werden. Dadurch sollen Einzelsignale besser voneinander getrennt und die Einordnung zu den Schadensmechanismen verbessert werden. Neben den bisher verwendenden Schallemissionssensoren sollen außerdem andere mit einem breitbandigen Frequenzverhalten zum Einsatz kommen, damit Sensoreffekte bei den Frequenzauswertungen ausgeschlossen werden können.

Referenzen

- [1] BASF (Hg.): Ultramid® Structure - Von führenden Testern empfohlen. Online verfügbar unter www.ultramid-structure.basf.com, zuletzt geprüft am 07.05.2014.
- [2] Groot, P. J. de; Wijnen, P. A.M; Janssen, R. B.F (1995): Real-time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites. In: Composites Science and Technology 55 (4), S. 405–412.
- [3] Barré, S.; Benzeggagh, M. L. (1994): On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene. In: Composites Science and Technology 52, S. 369–376.
- [4] Giordano, M.; Calabro, A.; Esposito, C.; D'Amore, A.; Nicolais, L. (1998): An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials. In: Composites Science and Technology 58 (12), S. 1923–1928.