

Untersuchung von elektromagnetischen und akustischen Emissionen während Bruchvorgängen in faserverstärkten Kunststoffen

Benjamin B. ALACA¹, Sebastian O. GADE¹, Markus G. R. SAUSE¹

¹ Universität Augsburg, Institut für Physik, Experimentalphysik II, D-86135 Augsburg

Kurzfassung. Neben Schallemissionssignalen werden bei Rissausbreitung in Faserverbundwerkstoffen auch elektromagnetische Emissionen erzeugt. Untersucht werden die elektromagnetischen Emissionen von kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff mit variierendem Lagenaufbau unter Biegebelastung. Die Detektion der Schallemissionssignale erfolgt dabei durch kommerzielle piezoelektrische Sensoren, während für die Messung der elektromagnetischen Emission kapazitive Sensoren verwendet werden. Da die auftretenden Signale jedoch relativ schwach sind, müssen Vorkehrungen am Messaufbau zur elektromagnetischen Abschirmung getroffen werden. Zudem wurde eine Sensorik entwickelt, die der räumlichen Orientierung der Rissausbreitung Rechnung trägt. Es zeigt sich, dass die Messung dieser elektromagnetischen Signale, in Kombination mit der Schallemissionsanalyse, zusätzliche Einblicke in Bruchvorgänge in faserverstärkten Kunststoffen bietet. So werden die elektromagnetischen Wellen bei ihrer Ausbreitung nicht durch die Geometrie des Prüfkörpers als Propagationsmedium beeinflusst. Weitere Vorteile sind die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Signale sowie die Möglichkeit, durch Verwendung räumlich unterschiedlich orientierter Sensoren Rückschlüsse auf die Bruchflächenorientierung zu ziehen.

1. Einleitung

Bei Bruchvorgängen in Festkörpern können neben Schallemission (SE) auch elektromagnetische Emission (EME) detektiert werden. Diese konnte für unterschiedlichste Materialien wie Gestein [1], Metall [2], Keramik und Glass [3] oder Kunststoff [4] bereits nachgewiesen werden. Auch Verbundmaterialien wie glasfaser- oder kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe zeigen elektromagnetische Emission unter mechanischer Belastung [5,6], wobei hier eine Vielzahl von mikroskopischen Schädigungen als Quelle in Frage kommen (z.B. Matrixbrüche, Faserbrüche,...) [7]. Von Vorteil erweist sich dabei der Umstand, dass die Stärke des detektierten elektromagnetischen Signals von der räumlichen Orientierung der Sensorik zur Signalquelle abhängt und somit Aussagen über die Orientierung der Quelle im Material getroffen werden können [4,8].



Ziel ist es, die Ergebnisse einer Schallemissionsanalyse mit den Daten über die elektromagnetischen Emissionen eines Materials zu kombinieren, um so detailliertere Einblicke in die komplexen Vorgänge der Bruchentstehung und -ausbreitung in Verbundmaterialien zu erhalten.

Über die Quelle der elektromagnetischen Emission, welche von Material und Bruchvorgang abhängt, existieren verschiedene Theorien. Ein Überblick über ausgewählte Modelle sowie deren Widersprüche zu einigen Experimenten geben Frid et al in [9]. Als mögliche Ursachen für EME bei Bruchvorgängen wurden Ladungstrennung beim Aufbrechen molekularer Bindungen sowie deren mechanische Schwingungen bzw. die Bildung von Ladungsvibrationen auf den Bruchflächen in Betracht gezogen. Auch das Abbremsen von Leitungselektronen durch Versetzungen sowie Konzentration negativer Ladungen an der Rissspitze oder verschiedene Polarisierungseffekte [10] werden als Quellen diskutiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein gemessenes EME-Signal auch eine Überlagerung mehrerer Signale unterschiedlichen Ursprungs und unterschiedlicher Frequenzbereiche sein kann [4]. Generell lässt sich direkt folgern, dass die zeitliche Veränderung von Strom- und Ladungsdichten zur Ausbildung elektromagnetischer Felder führt.

Die Stärke der Amplitude der elektromagnetischen Emission ist proportional zur Anzahl der durch den Riss getrennten Bindungen und somit zur Gesamtfläche des Risses. Daher entspricht auch die Anstiegszeit der Amplitude im EME-Signal der Dauer des Risswachstums [9].

Die Messung und Auswertung der elektromagnetischen Signale zusätzlich zur Schallemissionsanalyse bietet einige Vorteile. So wird das elektrische Feld kaum von Geometrie und Material des Probekörpers beeinflusst [11]. Desweiteren kann bei der Verwendung mehrerer Sensoren unterschiedlicher Ausrichtung auf die Orientierung der Quelle geschlossen werden [8]. Jedoch bringt die Messung elektromagnetischer Felder auch neue Herausforderungen mit sich. Der zu prüfende Probekörper und die Sensorik müssen gegen umgebene Felder ausreichend geschirmt sein. Außerdem sind für die Aufzeichnung der schwachen Signale Sensoren mit hinreichendem Signal-Rausch-Verhältnis erforderlich.

Nachfolgend wird im zweiten Abschnitt auf den experimentellen Messaufbau eingegangen, gefolgt von der Analyse und Interpretation der Messdaten im dritten Abschnitt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse sowie ein Ausblick über zukünftige Anwendungsmöglichkeiten finden sich im letzten Abschnitt.

2. Experimentelles

Zur Erzeugung von SE- und EME-Signalen wurden Prüfkörper aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff unter Biegebelastung in einem Dreipunktbiegeversuch untersucht. Die Prüfparameter des Biegeversuchs sowie die Bemaßung der Prüfkörper wurden nach Norm zur Bestimmung von Biegeeigenschaften DIN EN ISO 14125 gewählt.

Verwendet wurden 8- bzw. 10-lagige Prüfkörper aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoff mit einer Lagenorientierung von $[0,90,90,90]_{\text{sym}}$ bzw. $[0,90,90,0,90]_{\text{sym}}$, einer durchschnittlichen Dicke von 1,8 bzw. 2,2 mm, einer Breite von 15 mm und einer Länge von 95 mm.

Die Prüfungen erfolgten auf einer Universalprüfmaschine 1464 (Zwick/Roell). Die Kraft wurde mit einer 50 kN Kraftmessdose Xforce K (Zwick/Roell) aufgezeichnet. Die Prüfgeschwindigkeit wurde auf 0,01 bis 0,02 mm pro Sekunde gesetzt, damit eine bessere

zeitliche Trennung der Signale über den Zeitraum der Prüfung gewährleistet werden konnte.

Um eine Detektion der, in Relation zum elektromagnetischen Hintergrundrauschen, schwachen Signale zu ermöglichen, wurden Vorkehrungen zur elektromagnetischen Abschirmung des Aufbaus getroffen.

Dies erfolgte durch die Verwendung einer metallenen und geerdeten Abschirmkammer, die den gesamten Prüfaufbau sowie die Schall- und EME-Sensorik umschloss. Da jede metallische Komponente in Nähe der EME-Sensorik die EME-Messung beeinflusst, wurde weitgehend auf die Verwendung von Metallbauteilen innerhalb der Abschirmkammer verzichtet. Zu diesem Zweck wurde der gesamte Prüfaufbau der Dreipunktbiegung aus PMMA und PVC gefertigt und gegen die Prüfmaschine elektrisch isoliert befestigt. Für die Übertragung der Kraft in die Kammer wurde ein Rundstab aus glasfaserverstärktem Kunststoff verwendet. Eine schematische Darstellung des Aufbaus findet sich bei Abbildung 1 (links).

Die Steifigkeit des Kunststoffaufbaus wurde durch Biegeprüfung an einem Stahlblock im erwarteten Kraftbereich überprüft und mit den Daten eines konventionellen Prüfaufbaus aus Stahl verglichen. Wenngleich die Steifigkeit nur noch 40% des Stahlaufbaus betrug, wiesen die korrespondierenden Kraft-Weg-Diagramme auch nach mehrmaliger Belastung einen identischen Verlauf auf, wodurch plastische Verformung des Messaufbaus aus PMMA und PVC im geprüften Kraftbereich ausgeschlossen werden konnte.

Die Messung von EME und SE erfolgte durch ein PCI 2-System (Mistras, Software: AEWin). Zur Detektion der SE-Signale standen zwei kommerzielle Schallsensortypen, multi-resonante WD-Sensoren (Mistras) und Punktkontaktsensoren KRNB-PC (KRN), zur Verfügung. Die SE-Signale wurden mittels 2/4/6 Vorverstärker (Mistras) ohne internen Bandpassfilter verstärkt. Die elektromagnetischen Signale wurden mittels kapazitiver Sensoren detektiert. Zwei Verstärkerstufen wurden verwendet: Ein Sperrschicht-Feldeffekttransistor (Junction Field Effect Transistor – JFET), der sich direkt hinter dem Sensor befand, um durch eine kurze Wegstrecke den Einfluss auf das Signal-Rausch-Verhältnis zu minimieren, und einen Niederfrequenz-Vorverstärker UBBV-NF-35 (Aaronia). Die Gesamtverstärkung der EME-Messkette beträgt 54dB.

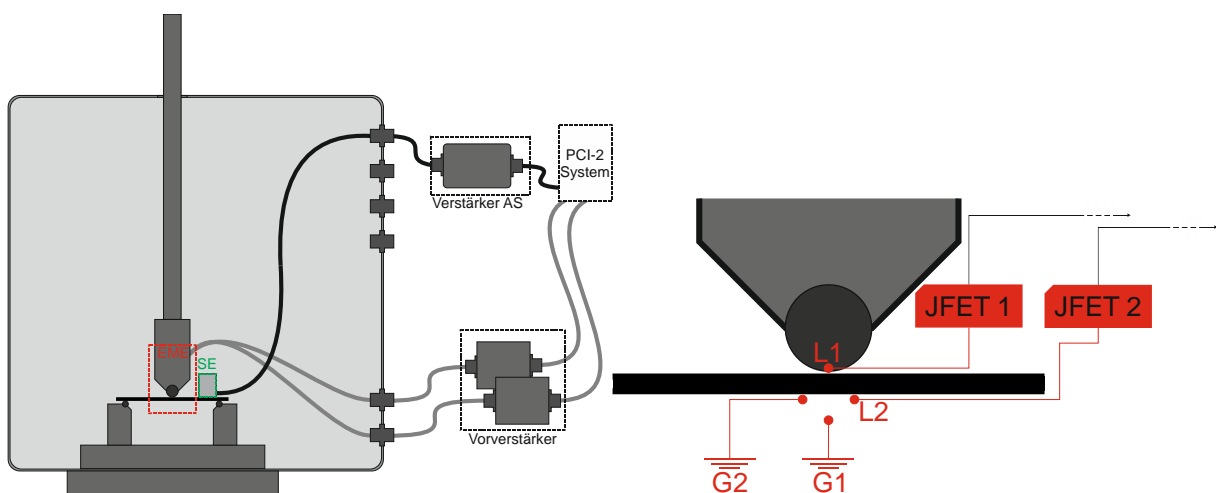


Abb. 1. Links: Schematische Darstellung der Abschirmkammer mit Messaufbau und Messketten. EME-Sensorenposition in rot und SE-Sorpositon in grün. Rechts: Sensoranordnung bei richtungsabhängiger EME-Messung mit Leiter L1, L2 und Erde G1, G2

Im Falle der richtungsabhängigen Messungen wurden zwei identische Messketten verwendet. Die Anordnung der kapazitiven Sensoren ist in Abbildung 1 (rechts) dargestellt.

Die Sensorik setzte sich aus vier Kupferdrahnten zusammen, von denen jeweils zwei direkt mit einem JFET verbunden waren und zwei geerdet waren, wodurch die Sensorik zwei zueinander senkrechten Kondensatoren entsprach.

Alle Messungen erfolgten im synchronisierten Aufnahmemodus mit einer Abtastrate von 10 MS/s. berschritt auf einem Kanal das Spannungssignal einen vordefinierten Schwellwert, wurde auf allen Kanälen, SE und EME, zeitgleich aufgezeichnet. Als Schwellwert wurde ein Wert kurz über dem Rauschniveau der jeweiligen Kanäle gewählt.

Durch die Abschirmung, die Erdung und den Verzicht auf elektrisch leitende Prufaufbauten konnte der Einfluss des Umgebungsrauschens auf die Messungen erheblich reduziert werden (Abbildung 2, links). Abbildung 2 (rechts) zeigt die charakteristische Frequenzabhängigkeit der gesamten Messkette. Im Frequenzbereich zwischen 1kHz und 3 MHz ist die Verstärkung nahezu konstant.

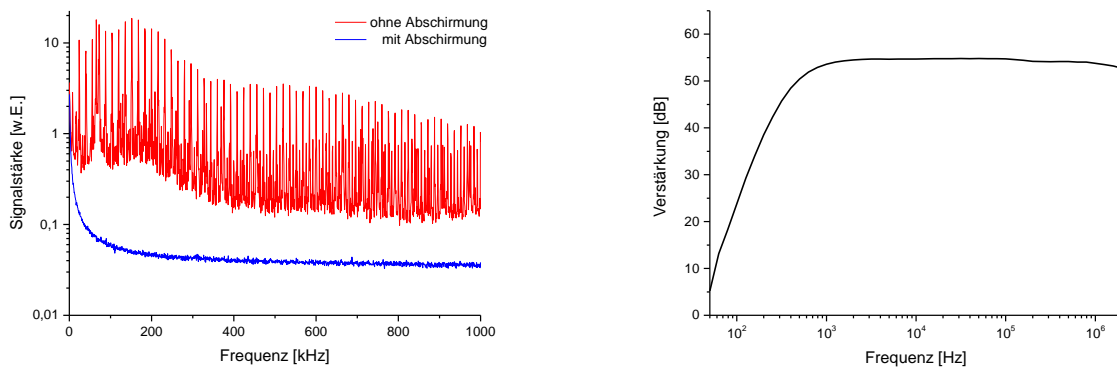


Abb. 2. Links: Einfluss der Abschirmmaßnahmen auf das gemessene Umgebungsrauschen. Rechts: charakteristische Frequenzabhängigkeit der Messkette

3. Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 3 zeigt die gemessenen Zeit-Kraft-Verläufe zweier Prüfkörper. Die Zeitpunkte, an denen die nachfolgenden Signalbeispiele aufgenommen wurden, sind farblich markiert.

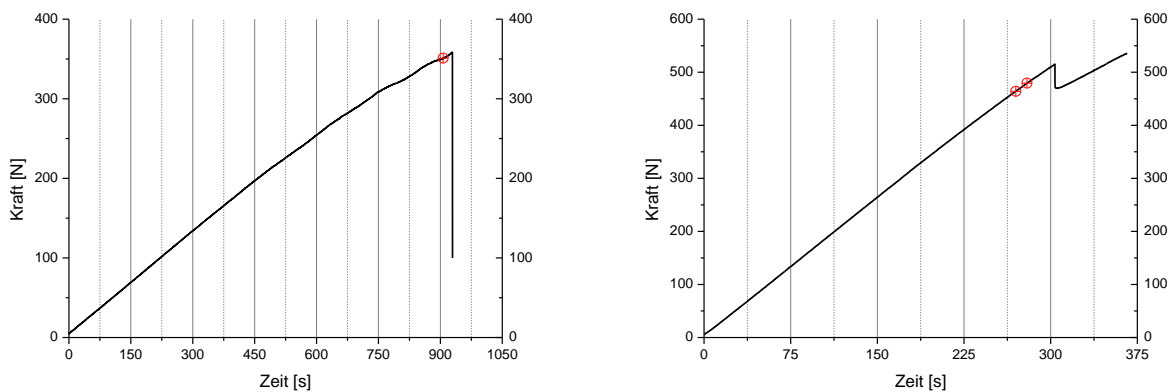


Abb. 3. Zeit-Kraft-Verlauf einer 8-lagigen Probe (links) und einer 10-lagigen Probe (rechts) mit markierten Detektionszeitpunkten der EME in Abbildung 4 und Abbildung 5

Die 8-lagigen Prüfkörper zeigten ein abruptes Versagen ab einer Kraft von 350 N. Bei den 10-lagigen Prüfkörpern trat stets ein Teilversagen bei etwa 500 N auf, das sich bei nachträglicher Betrachtung unter dem Mikroskop als Bruch der obersten 0-Lage unter Druckbelastung herausstellte. Vor dem makroskopischen Versagen der Proben konnte

erwartungsgemäß eine erhebliche Anzahl von Schallemissionssignalen aufgezeichnet werden, die jedoch nur in Einzelfällen von der Emission messbarer elektromagnetischer Signale begleitet wurden.

Das beispielhaft in Abbildung 4 gezeigte Signalpaar wurde 20 Sekunden vor Versagen des 8-lagigen Prüfkörpers aufgezeichnet. Als EME-Sensor diente bei dieser Messung ein Kupferdraht, der parallel zur Druckfinne leicht versetzt 1 mm über der Probe positioniert wurde. Auf dem EME-Kanal ist 5 μs vor Eintreffen des Schallsignals ein Spannungsanstieg zu verzeichnen. Das EME-Signal trifft entsprechend der höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit zeitlich versetzt am Sensor ein. Die Anstiegszeit beträgt 22 μs . Das Abklingverhalten wird durch die untere Grenzfrequenz des verwendeten Sensorsystems dominiert und entspricht nicht dem Ladungsträgerabfluss. Änderungen im elektrischen Feld nach dem Bruch sind vergleichsweise langsam, d.h. es treten nur Frequenzen unter 1 kHz auf. Die Zeitkonstanten für das Abfließen der Ladungen können somit als $\tau \geq (2\pi f_c)^{-1} \approx 160 \mu\text{s}$ abgeschätzt werden.

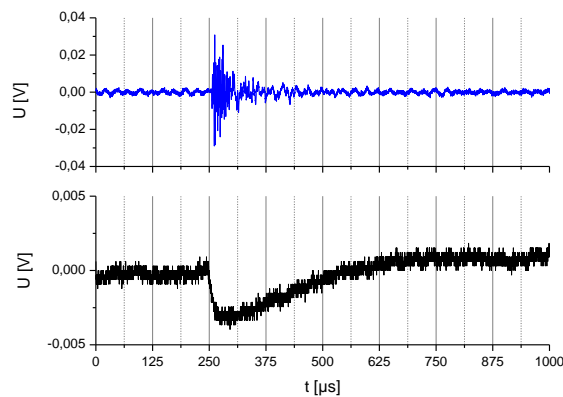


Abb. 4. Korrespondierendes SE- und EME-Signal kurz vor Bruch der 0°-Lage

Die Messung an 10-lagigen Prüfkörpern wurde mit dem Sensoraufbau aus Abbildung 1 (rechts) durchgeführt. 23 bzw. 33 Sekunden vor dem ersten Versagen wurden auf beiden EME-Kanälen Spannungsänderungen detektiert, die mit akustischer Emission einhergingen. Die Signale werden in Abbildung 5 dargestellt. Die Zeitdifferenz zwischen den EME- und SE-Signalen beträgt 6 μs und die Anstiegszeiten 30 μs bzw. 70 μs .

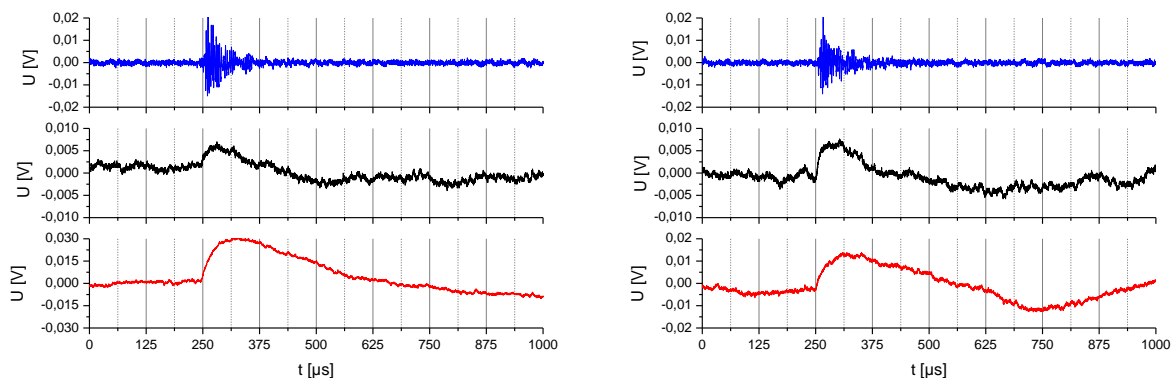


Abb. 5. Korrespondierende Signale detektiert vom Schallsensor (oben), senkrechten EME-Sensor (mitte), waagrechtem EME-Sensor (unten)

In beiden Fällen wurde auf dem Kanal des waagrechtem EME-Sensors ein stärkeres Signal detektiert. Um Aufschluss über die Art des Versagens zu erhalten, wurde die Prüfung nach dem ersten Kraftabfall beendet und der Prüfkörper unter dem Mikroskop untersucht. Abbildung 6 zeigt einen Bruch der obersten 0°-Lage, der in einem Winkel von

15° zur Probenkörper senkrecht verläuft. Entsprechend dem Modell geladener Bruchflächen würde man die höchste Signalintensität in Richtung der Flächennormalen erwarten [4,8]. Die gemessenen Signalamplituden an den beiden EME-Sensoren entsprechen dieser Erwartung. Eine quantitative Beurteilung ist jedoch aufgrund der starken Abstandsabhängigkeit zwischen Sensor und Quelle sowie der Sensoren aufwendiger und immer noch Gegenstand aktueller Untersuchungen.

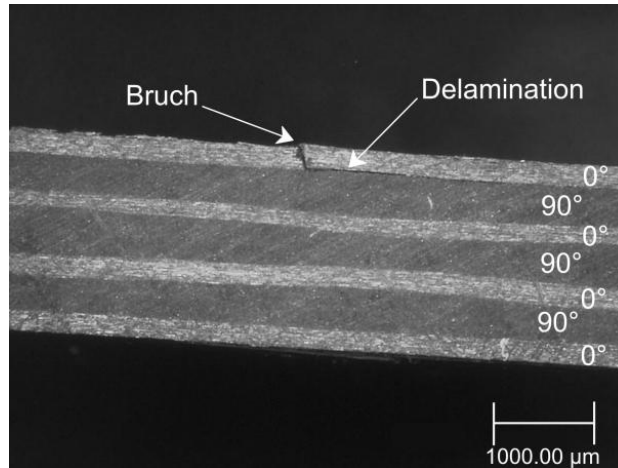


Abb. 6. Versagen der obersten 0°-Lage

Wurden bis zum Auftreten des ersten Versagens nur wenige starke EME-Signale gemessen, trat unmittelbar vor oder zum Zeitpunkt des Bruchs eine Vielzahl von EME-Signalen auf. Da die Verstärkung der EME-Messkette so gewählt wurde, dass schwächere Signale vor dem Bruch aufgezeichnet werden können, übersteigen die intensiveren Emissionsereignisse beim Bruch den Messbereich der Vorverstärker und der Messkarte. Diese Signale sind deshalb größtenteils übersteuert. Ein Signalbeispiel bei Bruch einer 10-lagigen Probe zeigt Abbildung 7. Auffällig ist, dass hier drei aufeinander folgende Schallsignale detektiert wurden, die von korrespondierenden EME-Signalen unterschiedlicher Stärke begleitet werden.

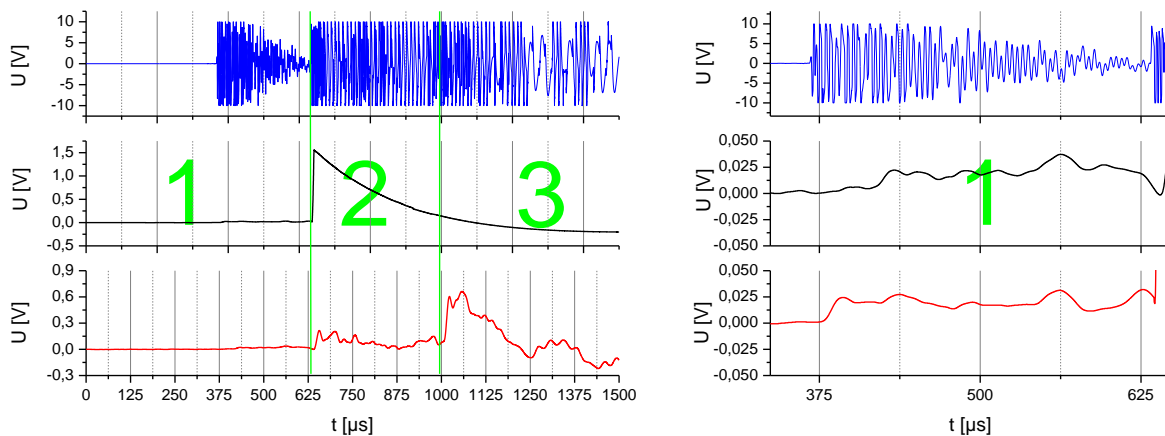


Abb. 7. SE- und EME-Signale zum Bruchzeitpunkt (links); Vergrößerung des ersten Abschnitts (rechts)

Das erste Schallsignal hat eine Dauer von 250 μs und übersteuert zu Beginn, bevor es abklingt. Danach folgt ein zweites, stärkeres Signal, dem nach 1000 μs ein drittes Signal folgt, das möglicherweise noch stärker ausfällt. Im ersten Abschnitt zeigen beide EME-Sensoren Spannungsauslässe von mehreren mV. Zum Zeitpunkt des zweiten SE-Signals

steigt die Amplitude des waagrechten Sensors in 26 μs auf 200 mV, während der senkrechte Sensor bereits sperrt (Überschreiten des Arbeitsbereichs des JFET) und von da an nur noch Abklingverhalten zeigt. Mit Eintreffen des dritten akustischen Signals wächst die Amplitude des waagrechten Sensors auf 600 mV in 24 μs . Die EME-Signale scheinen auch während der drei Phasen die Überlagerung mehrerer Einzelsignale darzustellen.

Auffällig sind die unterschiedlichen Amplituden der beiden EME-Signale. In Abschnitt 2 (Abb. 7, links) ist das Signal des senkrechten Sensors deutlich stärker als das des waagrechten Sensors. Dies deutet auf eine horizontale Rissausbreitung hin. Ein Matrixbruch zwischen der obersten 0° -Lage und der darunterliegenden 90° -Lage (Delamination) würde als Quelle für dieses gerichtetes EME-Signal in Frage kommen.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Verglichen mit der Anzahl an detektierten SE-Signalen fiel der Anteil der detektierten EME-Signale gering aus. In den meisten Fällen zeigte sich auf den EME-Kanälen Hintergrundrauschen, während auf dem SE-Kanal ein Signal empfangen wurde. Dies deutet entweder darauf hin, dass das korrespondierende elektromagnetische Signal zu schwach und vom Rauschen überlagert war, oder nicht jede akustische Emission zwangsläufig mit elektromagnetischer Emission einhergeht. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass bei Dreipunktbiegeprüfung an kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen vereinzelt starke elektromagnetische Signale auftreten, die jeweils einige μs vor einem Schallsignal eintreffen. Zudem deuten die Daten der EME-Messung in zwei Raumrichtungen darauf hin, dass Sensororientierung und Stärke des erhaltenen Signals Rückschlüsse auf die Lage der Bruchflächen zulassen. In diesem Hinblick kann davon ausgegangen werden, dass weitere Untersuchungen mit einer gezielten Variation der Lage der Bruchflächen im Material eine direkte Validierung dieser Hypothese erlauben. Des Weiteren ist geplant, diese richtungsabhängige Messung noch auf die dritte Raumrichtung auszuweiten um damit die 3D-Orientierung der Lage der Bruchfläche zu bestimmen.

Danksagung

Unser Dank gilt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung im Rahmen des Projekts "Relation of electromagnetic and acoustic emission to temporal and spatial crack motion on a microscopic scale in polymers and carbon fibers".

Referenzen

- [1] I. Yamada, K. Masuda, H. Mizutani *Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 57, 1-2, pp. 157–168 (1989)
- [2] A. Misra, R. C. Prasad, V. S. Chauhan, B. Srilakshmi *A theoretical model for the electromagnetic radiation emission during plastic deformation and crack propagation in metallic materials*. *International Journal of Fracture* 145, 2, pp. 99–121 (2007)
- [3] D. Bahat, V. Frid, A. Rabinovitch, V. Palchik *Exploration via electromagnetic radiation and fractographic methods of fracture properties induced by compression in glass-ceramic*. *International Journal of Fracture* 116, 2, pp. 179-194 (2002)
- [4] S. O. Gade, U. Weiss, M. A. Peter, M. G. R. Sause *Relation of electromagnetic emission and crack dynamics in epoxy resin materials*. *Journal of Nondestructive Evaluation* 33, 4, pp. 711-723 (2014)
- [5] C. Sklarczyk, S. Winkler, B. Thielicke *Die elektrische Emission beim Versagen von Faserverbundwerkstoffen und ihren Komponenten*. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 27, 11, pp. 559–566 (1996)
- [6] P. Koktavy *Experimental study of electromagnetic emission signals generated by crack generation in composite materials*. *Measurement Science and Technology* 20, 1 (2008)
- [7] S. R. Winkler *Field Emissions Caused by Fracture and Yielding*. *International Journal of Fracture* 136, 1-4, pp 221-235 (2005)
- [8] P. Koktavy, J. Pavelka, J. Sikula *Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources*. *Measurement Science and Technology* 15, 5, pp. 973–977 (2004)
- [9] V. Frid, A. Rabinovitch, D. Bahat *Fracture induced electromagnetic radiation*. *Journal of Physics D: Applied Physics* 36, 13, pp. 1620–1628 (2003)
- [10] A. I. Laptukhov *Generation of an electromagnetic field during rupture of a dielectric*. *Russian Physics Journal*, 1 (1995)
- [11] M. G. R. Sause, S. Horn *Influence of Specimen Geometry on Acoustic Emission Signals in Fiber Reinforced Composites: FEM-Simulations and Experiments*. 29th European Conference on Acoustic Emission Testing, Vienna 09/2010 (2010)