

Untersuchung der elektromagnetischen Emission beim Bruch spröder Materialien

Christoph F. APPEL¹, Markus G. R. SAUSE¹

¹ Universität Augsburg, Institut für Materials Resource Management, Mechanical Engineering, Augsburg

Kontakt E-Mail: christoph.appel@mrm.uni-augsburg.de

Kurzfassung. Das Phänomen der elektromagnetischen Emission (EME) beim Bruchversagen von Materialien war ursprünglich wegen seiner vielversprechenden Anwendung in der Geologie als Frühwarnsystem für Erdbeben in den Fokus der Forschung gerückt und wurde inzwischen in vielen theoretischen und experimentellen Studien untersucht. Nichtsdestotrotz ist die Analyse der EME eine noch weitgehend unbekannte zerstörungsfreie Prüfmethode. Aufgrund der Vielfalt der in der Literatur verfolgten experimentellen Ansätze bei der Untersuchung des Phänomens an bestimmten Materialien haben wir begonnen, mit einheitlichen SENB (Single-Edge-Notched Bend) Probengeometrien und einer definierten Sensorik ein breites Spektrum an unterschiedlichen Materialien systematisch im Drei-Punkt-Biegeversuch mit begleitender EME-Messung zu untersuchen. Diese Experimente lassen keinen Zweifel daran, dass EME beim Bruch aller Werkstoffe auftritt, solange es sich um ein spontanes Bruchereignis ohne übermäßige plastische Verformung handelt. Im Gegensatz zu gängigen EME-Modellbeschreibungen der Literatur wurde das Phänomen sogar bei elektrisch hochleitfähigen Materialien beobachtet. Diese Universalität zeigt das enorme Potenzial als neue zerstörungsfreie Prüfmethode, die komplementär zur Schallemission (SE) eingesetzt werden kann, um in Zukunft die Vorteile beider Methoden zu kombinieren. Hier liegt die Hoffnung auf der Möglichkeit zur Unterscheidung von Bruchereignissen und Ruckgleiten. Unsere Forschung konzentriert sich derzeit einerseits auf die Entwicklung eines praxistauglichen Sensorkonzepts und andererseits auf die Nutzung der Informationen aus der EME-Signalanalyse. Dazu gehören Parameter der mikroskopischen Bruchdynamik wie die Risswachstumsgeschwindigkeit, sowie die angenommene Korrelation zwischen resultierender Bruchflächengröße und Amplitude des elektromagnetischen Signals. In diesem Beitrag wollen wir einen Überblick über die bisher im Rahmen unseres Forschungsprojekts gewonnenen Ergebnisse geben.

1. Die elektromagnetische Emission als zerstörungsfreie Prüfmethode

Dass beim Bruchversagen von Festkörpern Schallwellen emittiert werden, ist gemeinhin bekannt und entspricht unserer alltäglichen Erfahrung. Auch im Kontext der zerstörungsfreien Prüfung hat sich die Schallemissionsanalyse längst etabliert und Einzug in industrielle Anwendungen gefunden. Doch dass neben der Schallemission (SE) auch eine elektromagnetische Emission (EME) stattfindet, ist weit weniger bekannt. Diese entsteht primär durch ein sich während des Risswachstums bildendes Ladungsungleichgewicht auf den Bruchflächen aufgrund der getrennten chemischen Bindungen im Festkörper. Das sich dadurch aufbauende elektrische Feld kann im Experiment mithilfe kapazitiver Sensoren gemessen werden. Dynamische Folgeprozesse betreffend die Ladungsträger auf den



Bruchflächen können weitere Beiträge zum EME-Signal erzeugen. Für das genaue Zusammenspiel von Ursachen dieses Phänomens finden sich in der Literatur im Detail unterschiedliche Erklärungsansätze. Die am häufigsten herangezogene Modellvorstellung führt die EME auf drei Hauptbeiträge zurück. Diese sind erstens die Entstehung eines elektrischen Ladungsungleichgewichts – durch das Aufbrechen chemischer Bindungen – mit einer zur Rissfläche proportionalen Stärke, zweitens die Ladungsschwingungen auf beiden Seiten des Risses durch elektrische Oberflächenwellen und drittens das exponentielle Abklingen durch Ladungsrelaxation. Dieses Modell der elektrischen Ladungsoberflächenschwingungswellen (charge surface vibrational waves) wurde von Frid et al. [1] und Rabinovitch et al. [2] vorgeschlagen und war in der Lage, Unzulänglichkeiten bereits bestehender Modelle hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit experimentellen Befunden zu überwinden. Basierend auf dieser Überlegung schlugen Gade et al. eine Erweiterung des EME-Modells vor, die den dynamischen Beitrag der Bruchflächenbewegung ausgehend vom plötzlichen Bruch hinzufügt [3]. Dies wiederum erwies sich als äquivalent zum hochfrequenten Beitrag, der in der Schallemission gesehen wird [4].

Warum aber ist die EME eine interessante und vielversprechende zerstörungsfreie Prüfmethode? Ein entscheidender Vorteil gegenüber der Schallemission ist die nahezu ungehinderte Ausbreitung des Signals, welche vom Probenmaterial selbst kaum beeinflusst wird. Eine Veränderung des Signals allein durch den Propagationweg zwischen Quelle und Sensor wie im Falle der Schallemission findet demnach hier in dem Maße nicht statt. Aufgrund der theoretisch zu vermutenden Korrelation der Signalamplitude mit der neu entstehenden Rissfläche ist eine direkte Deduktion der Rissdynamik denkbar. Durch die ausgeprägte Richtcharakteristik der EME-Signale [3] bietet die Analyse von mit einem Sensorarray aufgenommenen EME-Signalen potentiell die Möglichkeit, Rückschlüsse auf die Orientierung der Bruchfläche ziehen zu können [5].

2. Entstehung von elektromagnetischer Emission beim Bruch

In der Literatur wird über die Messung von EME bei einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien, wie Gesteinsarten und Zement [6] - [10], Gläsern [1], [11], [12], Metallen [13], Polymeren [3], [14] - [16], Eis [17] und faserverstärkten Kunststoffen [5], [18] - [21] berichtet. Unklar war bisher jedoch, ob es sich dabei tatsächlich um die Art EME handelt, welche mit der hier zugrunde gelegten Modellvorstellung in Verbindung steht, oder ob diese EME-Signale einen anderen Ursprung besitzen.

Ziel unserer Untersuchungen war es, die bruchinduzierte EME mithilfe eines definierten Sensorsystems und gleichbleibender Messmethodik an einer repräsentativen Auswahl verschiedener Materialklassen mit einheitlicher Probengeometrie zu messen. Dabei stand unter anderem die Frage im Fokus, ob sich das Phänomen der elektromagnetischen Emission auch bei elektrisch leitfähigen Materialien zeigt, was ausgehend von der beschriebenen Modellvorstellung kaum zu erwarten wäre. Die Zeitkonstante der Ladungsträgerrelaxation wäre in diesem Fall mindestens in derselben Größenordnung wie die Bruchzeit selbst, was eine Akkumulation von Ladungsträgern auf den Bruchflächen und somit die Erzeugung messbarer elektrischer Feldstärken über dem Rauschlevel unmöglich machen sollte.

Dazu wurden Drei-Punkt-Biegeversuche mithilfe einer Universalprüfmaschine des Typs Zwick ZT 5.0 in einem etablierten Prüfstand [3] durchgeführt (Abb. 1). Hierfür wurden einheitliche SENB-Proben (Abb. 2-a) mit einer Länge von $l = 25$ mm und einer Höhe von $h = 5$ mm verwendet. Die Breite b sowie die Kerbtiefe wurden variiert, um unterschiedliche Bruchflächengrößen $A = a \cdot b$ zu erhalten. Der eigentliche Bruchversuch fand in einer geerdeten Abschirmkammer aus einer 3 mm starken Aluminiumlegierung statt, welche eine

Beeinflussung der Messung durch äußere Störquellen verhindert und von der Universalprüfmaschine elektrisch isoliert angebracht ist. Die Krafteinleitung erfolgt über einen durch ein Loch im Deckel der Abschirmkammer geführten Stab mit Druckstempel, welche beide aus Polymethylmethacrylat (PMMA) gefertigt wurden. Auch alle anderen Teile des experimentellen Aufbaus innerhalb der Abschirmkammer – bis auf die Sensoren, Kabel und einem Vorverstärker – bestehen aus Kunststoff. Als Auflagepunkte der Drei-Punkt-Biegung wurden Keramikstäbe aus Al_2O_3 gewählt.

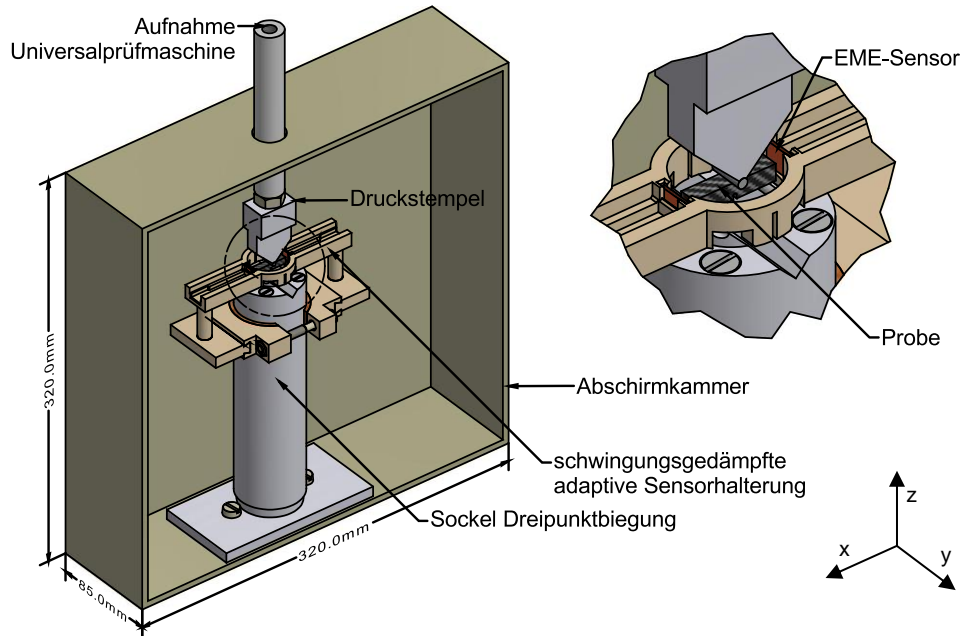


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau zur Messung der EME-Signale bei Belastung in Drei-Punkt-Biegung (links), sowie Detail der EME-Sensorplatzierung relativ zur Bruchfläche (yz-Ebene).

Die Verwendung von elektrisch nicht leitfähigen Materialien ist essentiell, um die Signalausbreitung möglichst nicht zu beeinflussen. Als kapazitiver Sensor wurde eine $7 \times 10 \text{ mm}^2$ Kupferplatte mit einer Dicke von 1 mm verwendet. Unmittelbar am Sensor schließt sich eine Vorverstärkerschaltung an – basierend auf einem Sperrschicht-Feldeffekttransistor (J-FET) – der eine Verstärkung des Signals um 27 dB ermöglicht. Die Abschirmkammer dient als Bezugsmasse für den Sensor. Schließlich wird das Signal mit einem PCI-2 System der Firma Mistras aufgezeichnet. Ein Beispiel eines EME-Signals ist in Abb. 2-b zu sehen. Zudem wurde vor jeder Messung der Kunststoff-Aufbau mit ionisierter Druckluft aus einer Ion Air Gun (Top Gun von Simco-Ion) entladen, um eine statische Aufladung des gesamten Aufbaus weitgehend zu neutralisieren.

Anhand des Beispielsignals (Abb. 2b) lassen sich die zur Auswertung herangezogenen Haupt-Features verdeutlichen: die maximale Amplitude, die Anstiegszeit t_{rise} als Zeit zwischen erstmaligem Überschreiten des Schwellwerts bis zum Erreichen der maximalen Amplitude, sowie die Signalenergie E – definiert als

$$E = \frac{1}{Z_M} \int_{t_0}^{t_E} (U(t))^2 dt$$

Dabei ist $Z_M = 10 \text{ k}\Omega$ die Eingangsimpedanz des Messsystems, t_0 der Zeitpunkt des erstmaligen Überschreitens des Schwellwerts und messtechnisch damit der Beginn des EME-Signals. Wir setzen außerdem $t_E = t_0 + t_{rise}$. Somit betrachten wir für die Feature-Berechnung ausschließlich den ersten Teil des Signals bis zum Erreichen der maximalen Amplitude, was dem physikalisch relevanten Zeitintervall der Rissentstehung entspricht. Das liegt daran, dass nach der theoretischen Modellvorstellung das Erreichen der maximalen Signalstärke zeitlich mit dem Abschluss des Bruchvorgangs korrelieren sollte. Nur solange

weitere Bindungen getrennt werden, kann das Ladungsungleichgewicht und somit die Feldstärke zunehmen. Basierend auf dieser Annahme kann die Rissgeschwindigkeit direkt aus der Steigung des Signalanstiegs abgeleitet werden, was wertvolle Informationen über die Rissdynamik liefert [15]. Zudem wird erwartet, dass die Intensität der EME nahezu linear zur entstehenden dreidimensionalen Bruchfläche ist.

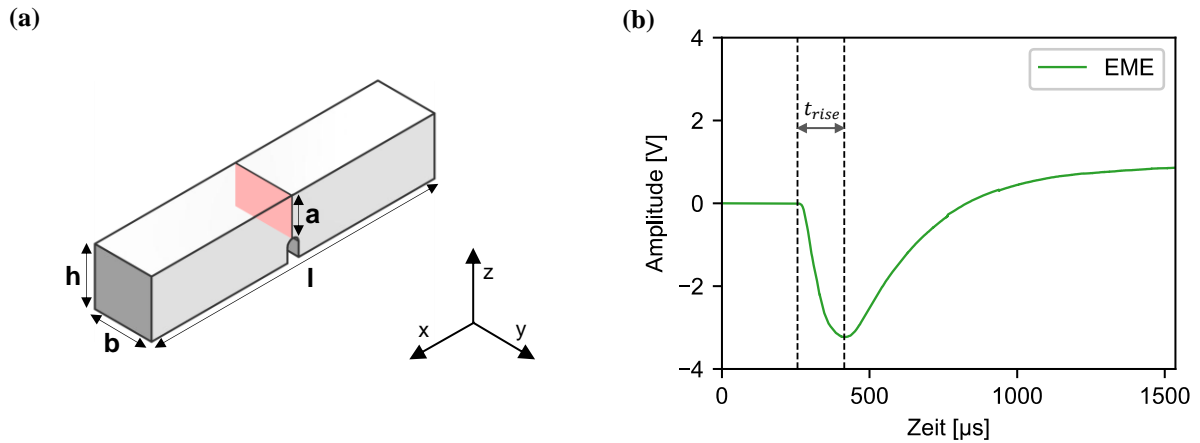


Abbildung 2: Geometrie der SENB-Proben (a), sowie Beispiel eines EME-Signals (b).

Bisher wurden im Projekt verschiedene Kunststoffe (RTM6, PEEK, PE, PP, PMMA), Metalle (Aluminiumguss AlSi₉Cu₃, Grauguss GG25), kristalline Materialien (Aluminiumoxid Al₂O₃, Siliziumdioxid SiO₂, Siliziumeinkristall [100]), Verbundwerkstoffe (CFK, GFK – jeweils quer zur Faser) und Naturstoffe (Schiefer, Granit, Beton, Holz T-Richtung) untersucht. In allen Fällen zeigten sich deutlich messbare EME-Signale. Eine Auswahl hierzu ist in Abb. 3-a für vier verschiedene Materialien gezeigt.

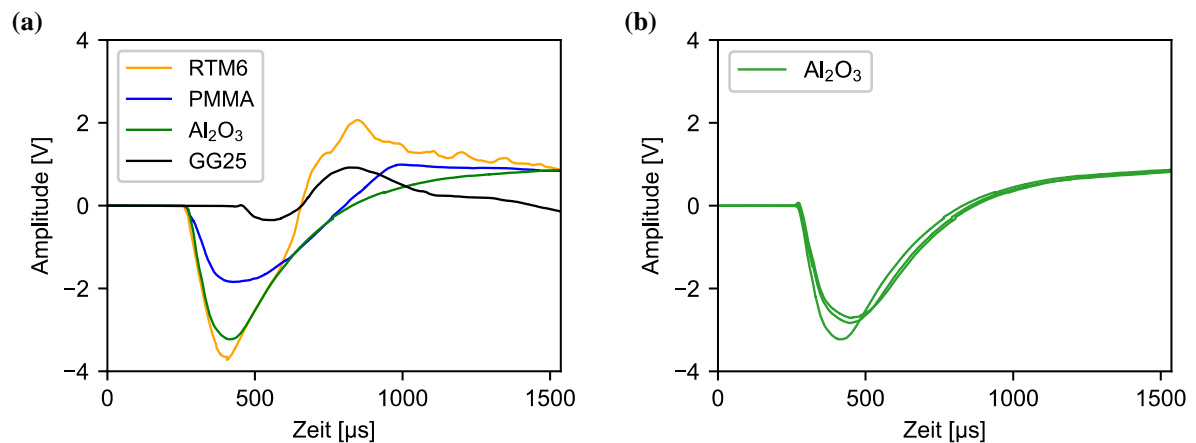


Abbildung 3: Auswahl von EME-Signalen des finalen Bruchvorgangs von vier unterschiedlichen Werkstoffen verschiedener Materialklassen (a), sowie reproduzierbare EME-Signale einer konstanten Probengeometrie von Aluminiumoxid (b).

Überraschend ist dabei das Auftreten von EME auch bei leitfähigen Materialien, was damit grundsätzlich andere experimentelle Berichte in der Literatur bestätigt. Sofern die Rissentstehung schnell genug abläuft, scheint es aufgrund der damit verbundenen hohen Dynamik keinen hinreichend schnellen Abfall der Intensität durch Ladungsträgerrelaxation zu geben. Vor allem Materialien mit einer homogenen Mikrostruktur, wie das verwendete Al₂O₃, zeigen eine hohe Reproduzierbarkeit in den resultierenden EME-Signalen (Abb. 3-b). Zudem konnte durch eine Variation der Probenbreite oder Kerbtiefe gezeigt werden, dass eine zunehmende Bruchflächengröße zu höheren EME-Signalstärken führt. Dies gilt jedoch nur uneingeschränkt, solange nicht beide Parameter gleichzeitig variiert und verglichen

Im Rahmen der bisherigen Untersuchungen wurden die Materialpaarungen PMMA-PMMA, CFK-CFK, Alu-Alu und PVC-PVC getestet. In allen Materialpaarungen zeigten sich im Frequenzbereich von 20 kHz – 1 MHz EME-Signale in jeder Sensororientierung, was zunächst im Widerspruch zur formulierten Erwartungshaltung zu sein scheint. Diese würde die Entstehung von EME grundsätzlich nur in Verbindung mit dem Aufbrechen von Bindungen, d.h. beim Bruchvorgang, erwarten lassen.

Anhand des in Abb. 5-a dargestellten Beispiels eines PMMA-PMMA Versuches ist gezeigt, dass der typische Zeitpunkt des Auftretens von EME-Signalen direkt bei der Stick-Slip-Bewegung ist. Zu diesem Zeitpunkt entstehen sowohl zahlreiche SE-Signale, als auch jeweils ein EME-Signal, welches als Beispiel in Abb. 5-b dargestellt ist. Im Unterschied zu den typischen EME-Signalen beim Bruchvorgang von Materialien (s. z.B. Abb. 3-a) weisen die EME-Signale bei der tribologischen Belastung eine um den Faktor 1000 größere Signallänge auf. Es ist daher zu erwarten, dass diese Signale einen anderen Ursprung besitzen.

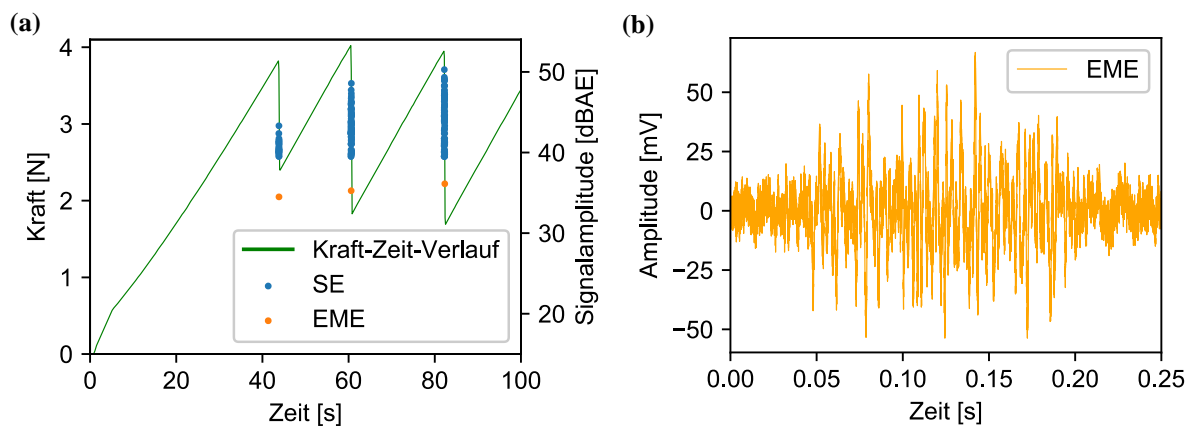


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf des Kraftsignals bei Stick-Slip-Bewegung mit überlagerten SE und EME Entstehungszeitpunkten (a) und Beispielsignal der EME für die Materialpaarung PMMA-PMMA (b).

Zudem wurden die Kontaktflächen der Reibung nach den Messungen mikroskopisch auf Schädigungen untersucht. Vor allem bei den PMMA-Platten ließ sich mit zunehmender Anzahl der Stick-Slip-Bewegungen eine Zunahme an Kratzern deutlich feststellen und zwei-dimensional quantifizieren. Eine Auftragung gegenüber der Intensität der EME-Signale zeigte jedoch keine eindeutige Korrelation.

Im Zuge der Untersuchungen stellte sich heraus, dass die elektrostatische Aufladung des Aufbaus und der beiden Kunststoff-Prüfkörper tatsächlich einen erheblichen Einfluss auf die aufgezeichnete EME und sogar auf das tribologische Verhalten hat. Durch die Verwendung der Ion Air Gun konnte dieser Effekt zwar nicht vollständig unterdrückt, aber zumindest erheblich reduziert werden. Da insbesondere auch bei den Aluminiumproben eine EME zu beobachten ist, reicht die elektrostatische Aufladung allerdings nicht für eine umfassende Erklärung aus.

Somit können sowohl die Kontaktaufladung als auch die Bildung von Mikrorissen durch Abrasion nicht alleinige Erklärungsmodelle für die in diesen Versuchen gemessenen und durchaus ausgeprägten EME-Signale bei tribologischer Belastung sein. Ein weiterer entscheidender Faktor könnte – ähnlich wie im Drei-Punkt-Biegeversuch – die Translationsbewegung der Probekörper relativ zu den EME-Sensoren sein. Diese Annahme wird durch die mithilfe eines Laservibrometers gemessenen Geschwindigkeitsprofile der Stick-Slip-Bewegung gestützt. Dabei korreliert die maximal erreichte Geschwindigkeit der Bewegung mit der Signalstärke der EME. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse sind weitere Untersuchungen zur Klärung der Frage geplant, ob tribologisch induzierte EME tatsächlich auftreten kann.

4. Wiederkehrende Belastung von Faserverbundwerkstoffen

Eine spezielle Anwendung, die erheblich von einer Kombination der Messtechniken der SE und der EME profitieren kann, ist die Untersuchung des Versagensverhaltens von Faserverbundwerkstoffen. Im Rahmen des laufenden Projekts soll die existierende Kombination von SE und Computertomographie (CT) um eine simultane Messung der EME erweitert werden. Durch die aufgenommenen Volumenbilder mittels CT bei einer stufenweisen Belastung der Probe lässt sich so die Entstehung der SE- und EME-Signale direkt mit den beobachteten Schäden korrelieren.

Die Verwendung einer Abschirmkammer für in-situ Messungen im Computertomographen ist nicht umsetzbar. Im Hinblick auf derlei Anwendungen wurde ein differentielles Messprinzip (Common-Mode-Rejection) geplant und umgesetzt. In Abb. 6 ist diese Weiterentwicklung der bisherigen Messkette am Beispiel des Drei-Punkt-Biegeversuchs schematisch gegenübergestellt. Hierzu wird das Prüfobjekt im differentiellen Messprinzip (Abb. 6-b) zwischen den beiden Leitern des bipolaren Sensors positioniert und die Signalleitung direkt am Vorverstärker (20 dB oder 40 dB) angeschlossen. Hauptziel war die weitgehende Unterdrückung von Hintergrundrauschen im Frequenzbereich von wenigen kHz bis etwa 1 MHz.

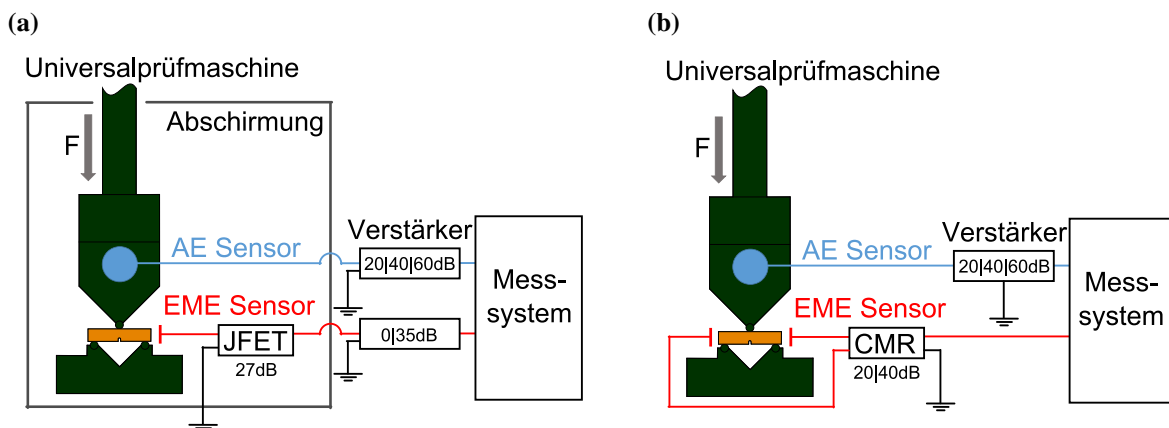


Abbildung 6: Skizze des Messprinzips der bisherigen Messkette (a) und der neuen Messkette mit differentiellem Sensorprinzip (b).

Ein entsprechender Vergleich der Signal-Rausch-Verhältnisse (SNR) der beiden Messketten ist hierzu in Abb. 7 gezeigt. Als Hintergrundrauschen wurde das kontinuierliche Rauschen für einen Zeitraum von insgesamt 30 s getriggert mit einer Einzelsignallänge von 1536 μ s aufgezeichnet. Das resultierende Frequenzspektrum des Hintergrundrauschens wurde über alle Einzelsignale gemittelt. Als Testquelle kam ein piezoelektrisches Feuerzeug im Abstand von 15 mm zum EME-Sensor zum Einsatz. Die Signale des piezoelektrischen Feuerzeugs sind sehr gut reproduzierbar [4] und stellen damit eine gute Referenzquelle dar. Zur statistischen Absicherung wurde ein Mittelwert von 15 Signalen berechnet und die erhaltenen Frequenzspektren über 100 Punkte mit einem Savitzky-Golay Filter 5. Ordnung gemittelt. Das Signal-Rausch-Verhältnis der neuen Messkette liegt demnach in einem Frequenzbereich von einigen Hz bis 1 MHz im Durchschnitt nur ungefähr 5,7 dB unter dem der bisherigen Messkette, wodurch eine Detektion der EME auch ohne Abschirmkammer gut möglich ist.

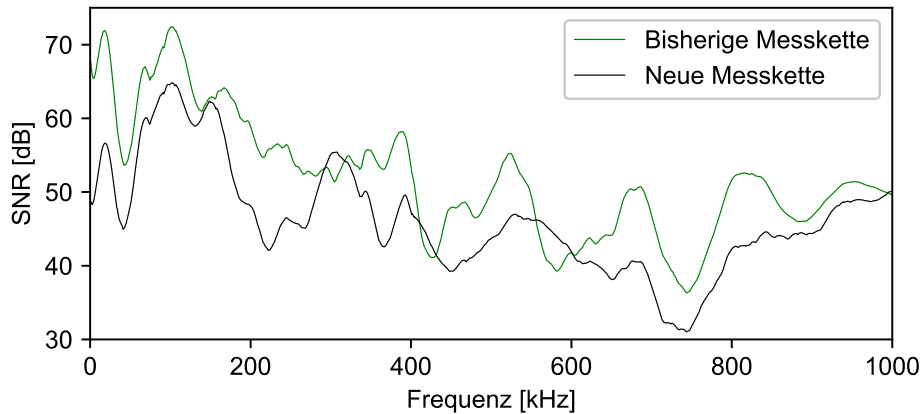


Abbildung 7: Vergleich der Signal-Rausch-Verhältnisse der beiden Messketten unter Nutzung einer Piezofeuerzeugquelle als Signalgeber.

Tests im Inneren der verwendeten kommerziellen Röntgencomputertomographieanlage haben gezeigt, dass das Signal-Rausch-Verhältnis der Messkette innerhalb der Anlage zudem besser ist, als außerhalb (Abb. 8). Hieraus kann gefolgert werden, dass das Gehäuse des Vollschutzgeräts eine gewisse Abschirmwirkung entfaltet und der Betrieb von Komponenten im Inneren die Messtechnik nicht zusätzlich stört.

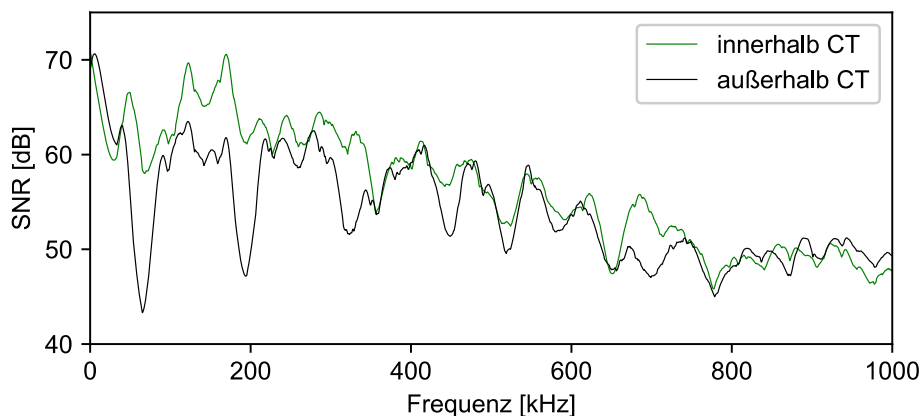


Abbildung 8: Untersuchung des S/N-Verhältnisses bei Messung im Röntgencomputertomographen.

Mithilfe einer eigens für in-situ CT-Messungen entworfenen Load Stage (Abb. 9-a) für Maximalbelastungen bis 25 kN [22] wurden erste Laststeigerungsversuche an GFK- und CFK-Zugproben zusammen mit einer simultanen Messung von EME und SE (Abb. 9-b) durchgeführt. Hierbei lässt sich deutlich eine Korrelation zwischen SE- und EME-Aktivität erkennen, die bei zunehmender Schädigung der Probe einsetzen. Eine genauere Quantifizierung der Korrelation vor allem zwischen gemessener Schädigung durch die Volumenbilder und der EME-Signalenergie wird im Rahmen des laufenden Projekts angestrebt. Hierzu sei erwähnt, dass es für die EME von Faserverbundwerkstoffen einer Auswerterroutine bedarf, die sich von einzelnen Sprödbrech-Ereignissen wie im Falle der Drei-Punkt-Biegung unterscheidet. Anders als dort kommt es bei Faserverbundwerkstoffen zu einer Vielzahl an einzelnen Faser- oder Matrixbrüchen, deren Signale sich teils überlagern. Eine weitere Herausforderung liegt in der generellen Steigerung der Sensitivität der EME-Sensorik aufgrund der teils noch sehr schwachen Signale, was die Auswertung zusätzlich erschwert.

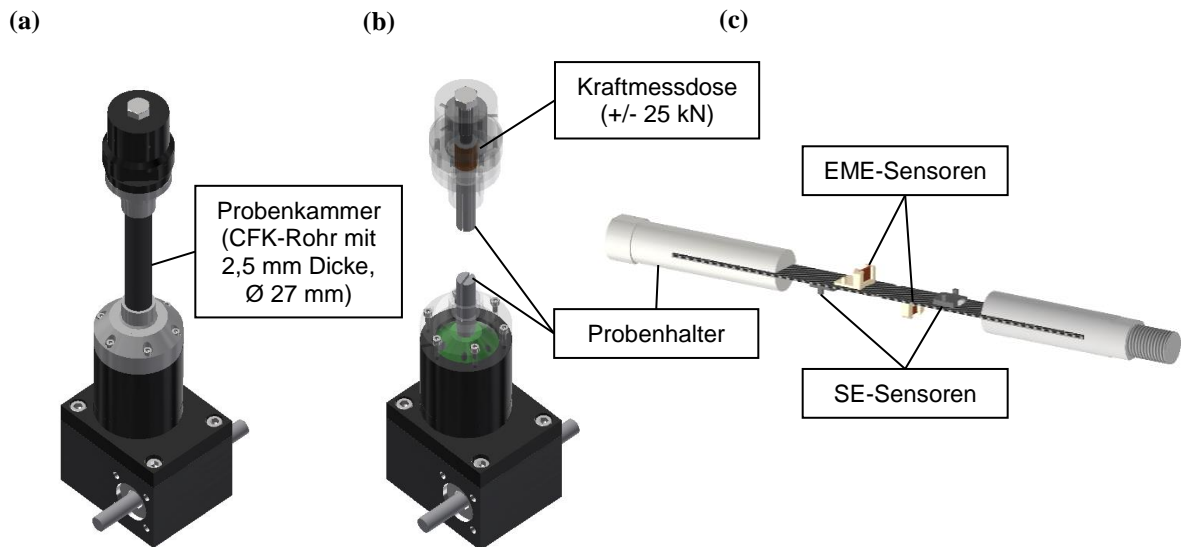


Abbildung 9: 25kN Load Stage für in-situ Messungen im CT (a), dessen transparente Darstellung ohne eingebauten Zugprüfkörper (b), sowie Zugprüfkörper mit angebrachter SE- & EME-Sensorik (c).

5. Zusammenfassung

Es wurde ein Überblick über die bisherigen im Rahmen eines DFG-Projekts durchgeführten Forschungen zur elektromagnetischen Emission bei Bruchversagen vorgestellt. Bislang bestätigen alle Experimente, dass es keinen Grund zur Annahme gibt, das Phänomen der EME wäre auf bestimmte Materialklassen beschränkt, solange es sich um ein spontanes Bruchereignis ohne übermäßige plastische Verformung handelt. Auch bei elektrisch leitfähigen Materialien konnte EME nachgewiesen werden. Durch eine Variation der Probenbreite oder Kerbtiefe der SENB-Proben konnte im Drei-Punkt-Biegeversuch gezeigt werden, dass eine zunehmende Bruchflächengröße zu höheren EME-Signalstärken führt. Jedoch scheint neben der Bruchflächengröße auch die Bruchdynamik selbst einen erheblichen Einfluss auf die Stärke und Signatur des EME-Signals zu haben. Es wurde ferner auch bei tribologischer Beanspruchung eine EME nachgewiesen, deren Ursache noch nicht zufriedenstellend geklärt werden konnte. Hierzu werden weitere Untersuchungen zur potentiellen Klärung der noch unbeantworteten Fragen durchgeführt. Ein differentielles Messprinzip wurde vorgestellt, welches die Detektion von EME-Signalen auch ohne Abschirmkammer ermöglicht und z.B. für in-situ Messungen im CT eingesetzt werden kann. Die erste Erprobung dieser Messung stellt in Kombination mit dem erzielten Signal-Rausch-Verhältnis in einer kommerziellen Röntgencomputertomographieanlage einen wichtigen Schritt zur Demonstration der Machbarkeit einer simultanen Messung von SE und EME bei einer CT-Aufnahme dar und soll dazu beitragen, den Ursprung der EME-Signale noch besser zu verstehen.

Danksagung

Die hier vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts SA 2310/3-1 „Zusammenhang zwischen Materialmikrostruktur und elektromagnetischer Emission“ erzielt. Auch die in diesem Rahmen von Joshua Winkeljann angefertigte Masterarbeit, sowie die Bachelorarbeit von Maximilian Mihm haben erheblich dazu beigetragen.

Referenzen

- [1] V. Frid, A. Rabinovitch and D. Bahat, "Fracture induced electromagnetic radiation," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 13, pp. 1620-1628, Jul. 2003.
- [2] A. Rabinovitch, V. Frid and D. Bahat, "Surface oscillations – A possible source of fracture induced electromagnetic radiation," *Tectonophysics*, vol. 431, pp. 15-21, Feb. 2007.
- [3] S. O. Gade, U. Weiss, M. A. Peter and M. G. R. Sause, "Relation of Electromagnetic Emission and Crack Dynamics in Epoxy Resin Materials," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 33, pp. 711-723, Dec. 2014.
- [4] M. G. R. Sause, *In Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*, Springer International Publishing, 2016.
- [5] S. O. Gade, B. B. Alaca and M. G. R. Sause, "Determination of Crack Surface Orientation in Carbon Fibre Reinforced Polymers by Measuring Electromagnetic Emission," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 36, no. 2, p. 21, 2017.
- [6] I. Yamada, K. Masuda and H. Mizutani, "Electromagnetic and acoustic emission associated with rock fracture," *Phys. Earth Planet. Int.*, vol. 57, no. 1-2, pp. 157-168, Oct. 1989.
- [7] G. Lacidogna, A. Carpinteri, A. Manuello, G. Durin, A. Schiavi, G. Niccolini and A. Agosto, "Acoustic and electromagnetic emissions as precursor phenomena in failure processes," *Strain*, vol. 47, no. SUPPL. 2, pp. 144-152, 2011.
- [8] A. Rabinovitch, V. Frid, D. Bahat and J. Goldbaum, "Fracture area calculation from electromagnetic radiation and its use in chalk failure analysis," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 37, pp. 1149-1154, 2000.
- [9] S. Koshevaya, V. Grimalsky, N. Makarets, A. Kotsarenko, J. Siquieros-Alatorre, R. Perez-Enriquez and D. Juarez-Romero, "Electromagnetic emission from magnetite plate cracking under seismic processes," *Adv. Geosci.*, vol. 14, pp. 25-28, Jan. 2008.
- [10] Y. Mori, Y. Obata and J. Sikula, "Acoustic and electromagnetic emission from crack created in rock samples under deformation," *J. Acoust. Emiss.*, vol. 27, pp. 157-166, 2009.
- [11] A. Rabinovitch, V. Frid, J. Goldbaum and D. Bahat, "Polarization-depolarization process in glass during percussion drilling," *Philos. Mag.*, vol. 83, no. 25, pp. 2929-2940, Sep. 2003.
- [12] S. Aman, A. Aman and J. Tomas, "Method of Crack Formation Analysis Based on Mechanoluminescence," *Mater. Sci. Appl.*, vol. 3, no. 10, pp. 739-744, 2012.
- [13] A. Misra, R. C. Prasad, V. S. Chauhan and B. Srilakshmi, "A theoretical model for the electromagnetic radiation emission during plastic deformation and crack propagation in metallic materials," *Int. J. Fract.*, vol. 145, no. 2, pp. 99-121, 2007.
- [14] S. O. Gade and M. G. R. Sause, "Untersuchung elektromagnetischer Emission von Polymeren in Verbindung zur Schallemissionsanalyse," in *19. Kolloquium Schallemission*, 2013.
- [15] S. O. Gade and M. G. R. Sause, "Measurement and Study of Electromagnetic Emission Generated by Tensile Fracture of Polymers and Carbon Fibres," *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 36, no. 1, p. 9, Mar. 2017.

- [16] J. T. Dickinson, L. C. Jensen and R. P. Dion, "Fracto-emission from high density polyethylene: Bond breaking versus tribological stimulation," *J. Appl. Phys.*, vol. 73, no. 6, pp. 3047-3054, Mar. 1993.
- [17] Y. Mizuno, "Light emission associated with deformation and fracture of ice," *J. Japanese Soc. Snow Ice*, vol. 64, no. 3, pp. 241-248, 2002.
- [18] J. T. Dickinson, A. Jahan-Latibari and L. C. Jensen, "Electron emission and acoustic emission from the fracture of graphite/epoxy composites," *J. Mater. Sci.*, vol. 20, no. 1, pp. 229-236, Jan. 1985.
- [19] P. Sedlak, M. Enoki, T. Ogasawara and J. Sikula, "Electromagnetic and Acoustic Emission in PEEK/Carbon Nanotube Composites," in *29th European Conference on Acoustic Emission Testing*, 2010.
- [20] B. B. Alaca, S. O. Gade and M. G. R. Sause, "Untersuchung von elektromagnetischen und akustischen Emissionen während Bruchvorgängen in faserverstärkten Kunststoffen," *20. Kolloquium Schallemission*, pp. 1-8, 2015.
- [21] V. V. Astanin, G. O. Shchegel, W. Hufenbach, A. Hornig and A. Langkamp, "Characterising failure in textile-reinforced thermoplastic composites by electromagnetic emission measurements under medium and high velocity impact loading," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 49, pp. 22-30, Nov. 2012.
- [22] F. Thum, P. Potstada and M. G. R. Sause, "Development of a 25kN in-situ Load Stage combining X-ray computed tomography and acoustic emission measurement," in *22. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, Kaiserslautern, 2019.