

Lokalisierung von Schallemissionsereignissen in Probekörpern mit veränderlicher und inhomogener Schallgeschwindigkeitsverteilung

Ronald RICHTER *, Fabian MALM *, Christian U. GROBE *
* TU München Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm)
Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung
Baumbachstr. 7, 81245 München
rrichter@tum.de grosse@tum.de

Kurzfassung. Die Lokalisierung von Schallemissionsquellen ist ein wichtiges Werkzeug bei der Auswertung von Schallemissionsmessungen. Durch eine Lokalisierung ist es möglich, zusätzlich zur zeitlichen Betrachtung, eine räumliche Zuordnung von Schädigungsvorgängen zur Schallemissionsaktivität zu bekommen. Darüber hinaus wird die Diskriminierung zwischen schädigungsrelevanten Ereignissen und Störsignalen beispielsweise von Quellen außerhalb des Probekörpers ermöglicht. In den meisten Anwendungsfällen kann von einer annähernd homogenen Schallgeschwindigkeit ausgegangen werden. Dies erleichtert eine Lokalisierung ganz wesentlich. In einigen Fällen liegt jedoch eine inhomogene Schallgeschwindigkeitsverteilung vor, oder die Schallgeschwindigkeit ändert sich während eines Experimentes. Im Bauwesen tritt diese Problematik bei Messungen an Holz, Beton unter Brandbeanspruchung oder bei einbetonierten Spannkanälen auf. Darüber hinaus wird am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung der Technischen Universität München die Schallemissionsanalyse auch an Verbundwerkstoffen wie CFK und GFK sowie an Knochen (Femur, Oberschenkelknochen) angewendet. Auch bei diesen Materialien liegen sehr heterogene bzw. anisotrope Schallgeschwindigkeitsverteilungen vor. Im Rahmen dieses Beitrages werden Ansätze zur Lösung der Schwierigkeiten einer Lokalisierung in solchen Materialien diskutiert und die Ergebnisse von verschiedenen experimentellen Untersuchungen vorgestellt.

Einführung

Durch die Berechnung und Darstellung der Quellorte von Schallemissionen bekommt man bei der Auswertung von Schallemissionsmessungen dreidimensionale Informationen über die Schädigung im Probekörper, die dann auch zeitlich zugeordnet werden können. Eine reine parameterbasierte Auswertung ist oft nicht ausreichend um die jeweiligen Aufgabenstellungen zufriedenstellend lösen zu können. Darüber hinaus wird durch eine Lokalisierung ein Aussortieren von Störsignalen deutlich einfacher. Ein Signal, das nicht aus dem Probekörperinneren kommt, kann mit dem Werkstoff- und Schädigungsverhalten nichts zu tun haben. Im Vergleich zur Erfassung einzelner Signalparameter ist die Lokalisierung sehr rechenaufwendig. Da die Datensätze, welche bei Schallemissions-

messungen aufgezeichnet werden schnell sehr groß werden können und verhältnismäßig viele unbrauchbare Ereignisse und Störungen enthalten, ist ein vorheriges Sortieren der Ereignisse sinnvoll. Diese Sortierung kann bereits während der Aufzeichnung durch die Einstellung der Messsysteme erfolgen, oder durch einen Mustervergleich in der Auswertungssoftware gelöst werden. Ein solcher Mustervergleich funktioniert über den Vergleich mehrerer Signalparameter, aber auch durch eine automatische Qualitätsbeurteilung der Signale und der Ersteinsatzbestimmung [6]. Ein solches Aussortieren ist vertretbar, da ohnehin nie alle auftretenden Ereignisse in einem Probekörper mit den Messgeräten erfasst werden können.

Bei der Berechnung der Quellorte von Schallemissionsereignissen [1] wird in vielen Fällen von einer homogenen und isotropen Schallgeschwindigkeitsverteilung ausgegangen. Diese Vereinfachung ist meistens ausreichend und erleichtert die Lokalisierungsberechnungen entscheidend. Bei einigen Materialien und Prüfaufgaben tritt allerdings eine so starke Inhomogenität auf, dass die Schallgeschwindigkeitsverteilung berücksichtigt werden muss, um verwertbare Ergebnisse zu bekommen. Im Folgenden werden die Ergebnisse verschiedener Projekte vorgestellt, bei der dies realisiert werden konnte.

Zonare Ortung am Beispiel vom Femur (Oberschenkelknochen)

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Orthopädie und Unfallchirurgie der Technischen Universität München wurden im Rahmen einer Masterarbeit [5] Schallemissionsmessungen an Oberschenkelknochen (Femur) durchgeführt. Ziel der Untersuchungen ist es die Bruchprozesse, welche zu Frakturen an Oberschenkelknochen führen, besser zu verstehen, um daraufhin präventive Maßnahmen zu entwickeln. Die Schallemissionsanalyse soll hierbei die zerstörende Prüfung begleiten, um möglichst viele Daten aus den Versuchen zu generieren. Nach der Präparation der Knochen und einer aufwendigen Adaption der Messtechnik war es möglich Schallemissionen während des Verlaufes von Druckprüfungen aufzuzeichnen. Bei der Datenauswertung zeigten sich Schwierigkeiten wie eine unpräzise Ersteinsatzbestimmung aufgrund hoher Dämpfungseffekte im Knochen, einer komplizierten Geometrie und der inhomogenen Schallgeschwindigkeitsverteilung.

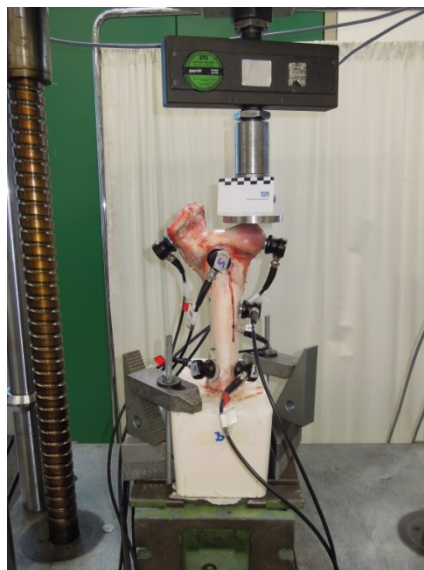


Abb. 1. Prüfmaschine mit einem eingespannten Rinderfemur und daran angebrachten Schallemissionssensoren, während eines Druckversuchs.

Eine der einfachsten Lokalisierungs-Methoden ist die zonare Ortung, bei der die aufgezeichneten Schallemissionsereignisse nur qualitativ ausgewertet werden, d.h. es interessiert nur der Sensor bei dem das SE-Ereignis zuerst ankommt. Geht man davon aus, dass dieser Sensor sich am nächsten zum Quellherd befindet, so kann eine regionale Eingrenzung der Schallemission erfolgen. Dieses Ortungsverfahren ist bei homogenen und isotropen Werkstoffen weitestgehend unabhängig von der Ultraschallgeschwindigkeit. Wie sich dieses Verhalten bei einem inhomogenen und anisotropisch aufgebauten Knochen widerspiegelt und welches Potential die zonare Ortung beinhaltet, soll mit Hilfe von einem Kompressionsversuch analysiert werden.

Die Resultate aus dem Kompressionsversuch zeigen, in Kombination mit der aufgezeichneten Kraft-Zeit-Kurve (schwarz) vielversprechende Ergebnisse [Abb. 2]. Die linke Bildseite markiert die Verteilung der Ersteinsätze, wobei die Farbe und die Höhe der Punkte an die jeweiligen Sensoren und deren Positionen am Knochen (rechten Bildseite) angepasst sind.

Es zeigt sich, dass das starre Deformationsverhalten zu Reibprozessen am Lasteinleitungsbereich (Femurkopf) führt, verstärkt bei Änderungen im Kraftanstieg. Mit zunehmender Messdauer kommt es zu einer Verdrehung des Knochens an der Einbettung, was zu Mikrorissen im Knochengefüge oder auch Ablöseprozessen in der Einspannung vom Gießharz führt.

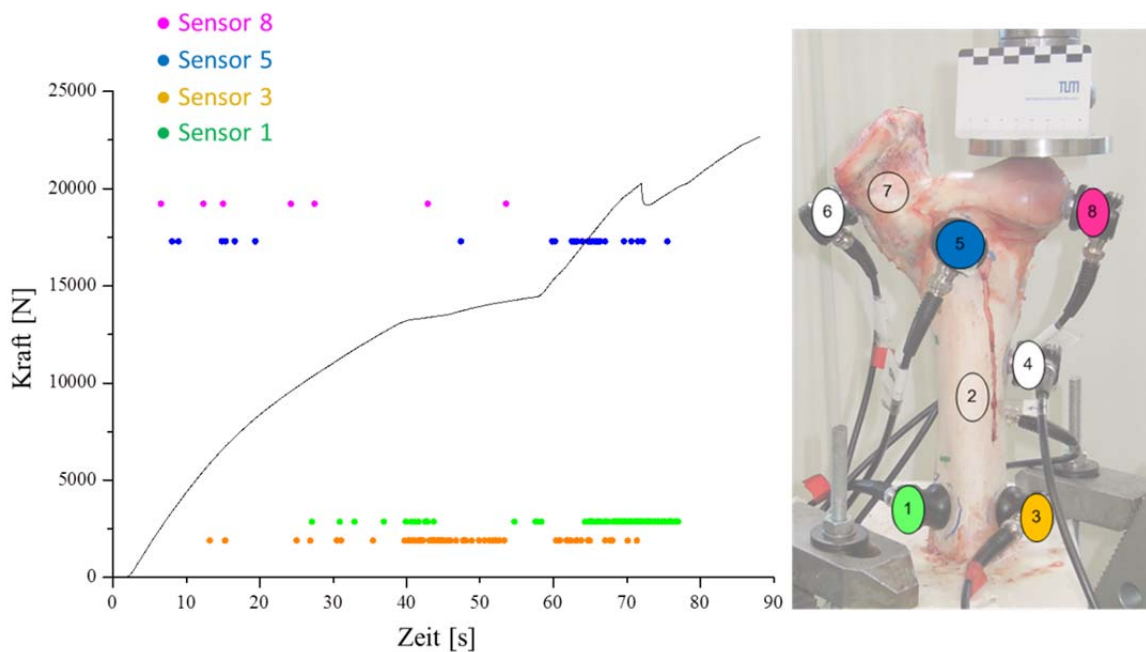


Abb. 2. Zonare Ortung von Schallemissionsereignissen bei einem Druckversuch am Rinderfemur.

Mustervergleich am Femur

Um die Ortung der Schallemissionen zu präzisieren wurde ein Mustervergleich herangezogen. Während die Lokalisierung der zonalen Ortung beschränkt wird durch die Anzahl der verwendeten Sensoren, kann der angewandte Mustervergleich, die Anzahl der möglichen Lokalisierungsorte durch einen direkten Abgleich der Schalllaufzeiten vergrößern.

Dafür wurden Bleistiftminenbrüche auf einem zuvor aufgezeichnetem Raster durchgeführt. Das individuelle Signalmuster von jedem Rasterpunkt konnte so mit den aufgezeichneten Zeitsignalen aus der SEA des Kompressionsversuchs verglichen werden. Dafür wurden die Differenzen des Residuums aus der Rasterung und dem

Kompressionsversuch nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate miteinander verglichen. Schwierig ist dieser Vergleich aufgrund der unterschiedlichen Schallemissionen aus Belastung und Bleistiftminenbrüchen. So ist ein Residuen-Vergleich von out-of-plane- und in-plane-Signalen problematisch und führt vermutlich, in Folge der hohen Empfindlichkeit auf Ausreißer, zu Ungenauigkeiten.

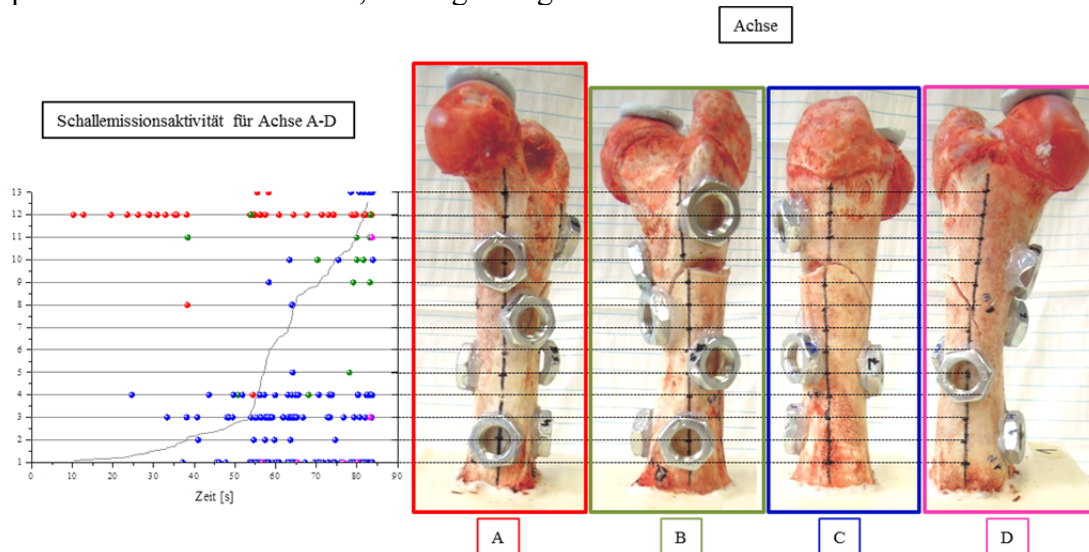


Abb. 3. Lokalisierung durch Mustervergleich am Schweinefemur.

Eine vordefinierte Sollbruchstelle, in Form einer Kerbe, ermöglichte eine gezielte Schädigung in einem bekannten Bereich. Für das Experiment am Schweinefemur [Abb. 3] wurden 39 definierte Referenzsignale erzeugt, aufgezeichnet über acht Sensoren. Die detektierten Schallemissionen, dargestellt als Punkte, können über die farblichen Kombinationen einem exakten Rasterpunkt an jeder Knochenachse (A-D) zugeordnet werden. Aufgrund der Sollbruchstelle wurde eine Vielzahl von Schallemissionsereignissen im mittleren Bereich des Femurs erwartet. Dieses Verhalten konnte anhand der Ergebnisse nicht nachvollzogen werden. Vielmehr zeigte sich eine verstärkte Schallemissionsaktivität im Bereich der Einspannung und am Femurkopf. Dies kann auf Störgeräusche der Prüfmaschine und der Reibung in den Auflagern zurückgeführt werden. Die Rissbildung im Bereich der Sollbruchstelle konnte nicht nachvollzogen werden.

Grid-search an Holz

Eine weitere Möglichkeit eine inhomogene oder anisotrope Schallgeschwindigkeitsverteilung in Probekörpern zu berücksichtigen ist die Grid-search-Methode. Hierbei wird der Probekörper in ein dreidimensionales Gitterraster aufgeteilt. Von jedem Gitterpunkt werden die theoretischen Ankunftszeiten an den Sensoren berechnet, die auftreten würden wenn dieser jeweilige Gitterpunkt die Schallemissionsquelle wäre. Diese Berechnungen werden, analog zum gezeigten Mustervergleich am Femur, durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit den tatsächlichen Ankunftszeiten bei der Schallemissionsmessung abgeglichen.

Für die Berechnung der theoretischen Laufzeiten wird ein Geschwindigkeitsmodell verwendet, welches ermöglicht, die Schallgeschwindigkeitsverteilung im Werkstoff zu berücksichtigen. Ein solches Berechnungsverfahren wurde in das vorhandene Auswertungsprogramm am Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung implementiert und kann sowohl dreidimensional verteilte Geschwindigkeiten als auch in alle drei Raumrichtungen unterschiedliche Geschwindigkeiten berücksichtigen.

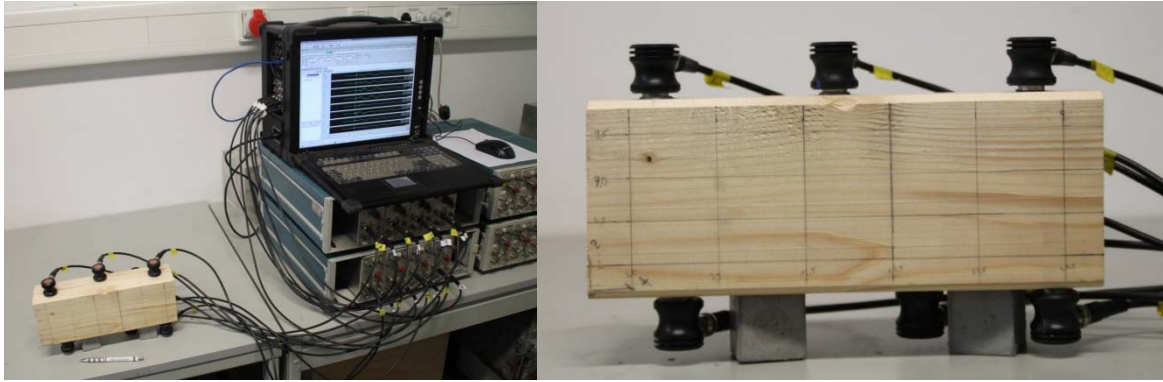


Abb. 4. Schallemissionsanalyse im Labor, zur Lokalisierung von Bleistiftminen an der Oberfläche eines Holzprobekörpers.

Zur Kalibrierung und zum Test der implementierten Grid-Search mit dem entwickelten Geschwindigkeitsmodell wurden Bleistiftminenbrüche auf einem Raster auf der Oberfläche eines Vollholzprobekörpers [Abb. 4] lokalisiert. In der Abb. 5 und Abb. 6 zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Lokalisierungsergebnisse, bei Berücksichtigung der anisotropen Geschwindigkeitsverteilung.

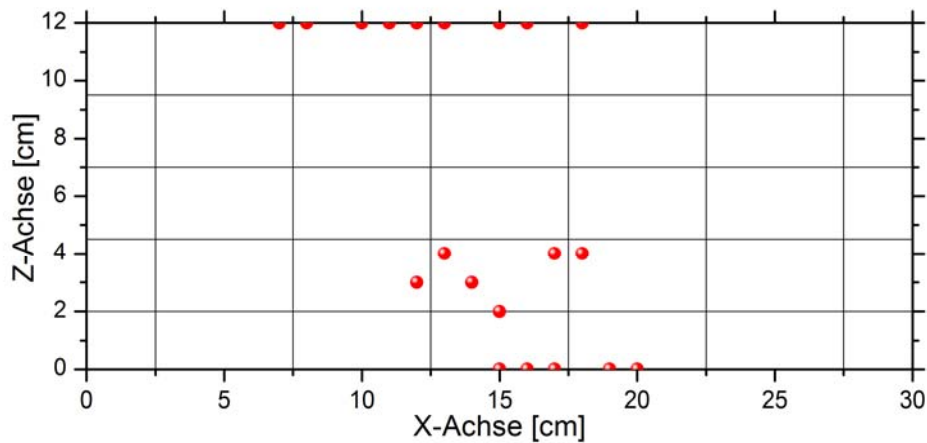


Abb. 5. Lokalisierungsergebnis von Bleistiftminenbrüchen an den Kreuzungspunkten des Holzprobekörpers bei der Berechnung mit einer mittleren Schallgeschwindigkeit über den gesamten Probekörper.

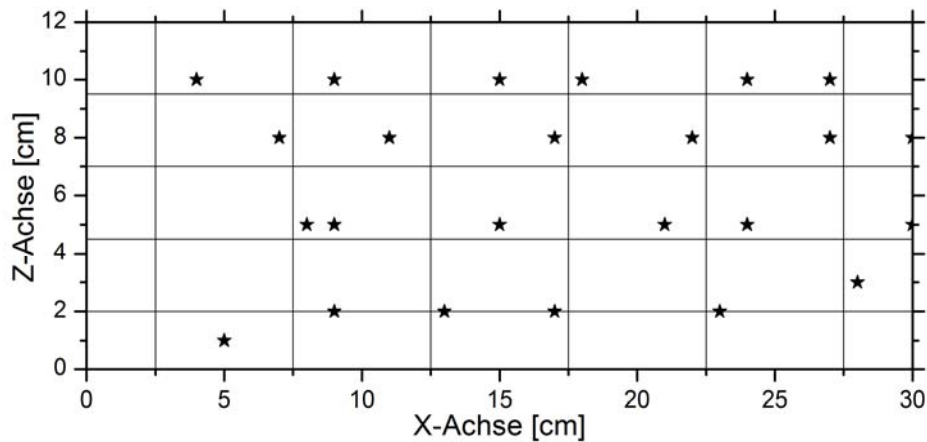


Abb. 6. Lokalisierungsergebnis von Bleistiftminenbrüchen an den Kreuzungspunkten des Holzprobekörpers bei Berücksichtigung der anisotropen Schallgeschwindigkeitsverteilung des Holzes.

Grid-search an Beton unter Brandbeanspruchung

Bei Brandversuchen an Beton besteht eine erschwerende Problematik. Einerseits ist es möglich den Probekörper vor und nach dem jeweiligen Experiment zu betrachten und zu vermessen, andererseits liegen aber kaum Messergebnisse über den zeitlichen Verlauf der Schädigung vor. Hierfür kommt die Schallemissionsanalyse zum Einsatz [7]. Signale die durch Schädigungen wie Rissbildung aufgrund von thermischen Spannungen und durch explosive Abplatzungen entstehen, werden aufgezeichnet. Um die Schädigungen räumlich und zeitlich zuordnen zu können, ist wiederum eine Lokalisierung der Ereignisse notwendig. Schwierigkeiten bereitet hierbei allerdings die Schallgeschwindigkeit, die sich aufgrund der Temperaturerhöhung im Beton ändert [Abb.7 rechts]. Dies ist einerseits auf ein Verdampfen des physikalisch gebundenen Wassers bis ca. 150°C und andererseits auf eine Zersetzung des Zementsteins ab ca. 400°C zurückzuführen [4].

Die Betonprobekörper werden als Deckenelemente in die Brandprüföfen eingebaut und von der Unterseite her einer Brandbelastung ausgesetzt [Abb.7 links]. Dies ermöglicht es die Messtechnik auf der Brandraumabgewandten Seite anzubringen. Hinsichtlich der Temperaturverteilung kommt es im unteren Bereich der Probekörper zu einer Erwärmung und damit zu einer ungleichen Verteilung über den Probekörper. Die daraus resultierende inhomogene und sich zeitlich ändernde Schallgeschwindigkeitsverteilung muss bei der Lokalisierung berücksichtigt werden, was wiederum durch die Grid-search-Methode möglich ist.

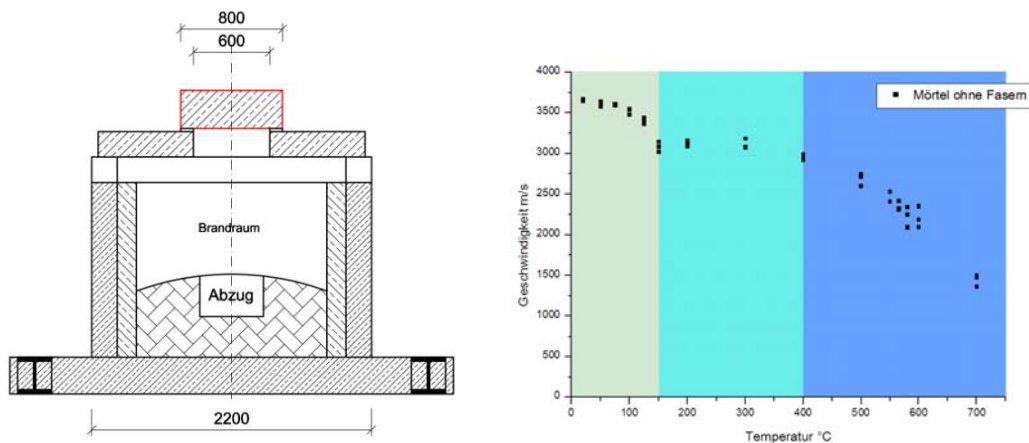


Abb. 7. Brandprüföfen der MFPA Leipzig GmbH mit aufgelegten Probekörper (links) und der durch Ultraschallmessungen bestimmte Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Betontemperatur.

In Abb.8 ist ein Probekörper der einer Brandbelastung nach einer Normbrandkurve (ZTV-ING) ausgesetzt wurde. Deutlich zu erkennen ist die Schädigung in Form von Abplatzungen bis zur Bewehrung, sowie die Verfärbung aufgrund der Zersetzung des Zementsteins. In einem Bereich des Probekörpers treten keine Abplatzungen auf, was hauptsächlich durch eine ungleichmäßige Temperaturverteilung im Brandofen erklärt werden kann.

Betrachtet man nun einen kleinen Teil der aufgezeichneten Daten und führt eine Lokalisierungsberechnung, wie in Abb.9 zu erkennen, durch, so zeigt sich, dass aus dem Bereich ohne Abplatzungen auch deutlich weniger Schallemissionen registriert wurden. Der nächste Schritt ist eine gezielte Datenauswahl einer Lokalisierungsberechnung sowie eine Darstellung des gesamten Datensatzes.

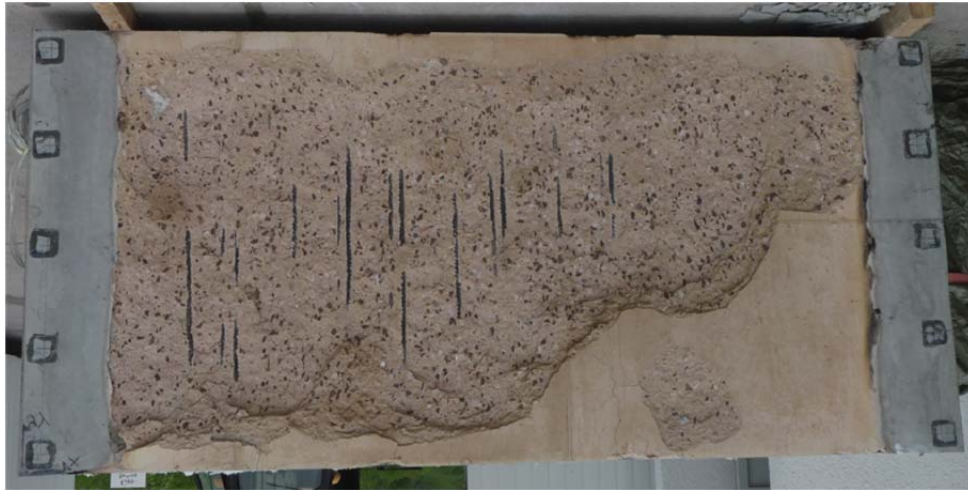


Abb. 8. Betonprobekörper nach einem Brandexperiment.
Zu erkennen sind Abplatzungen die bis zur Bewehrung reichen.

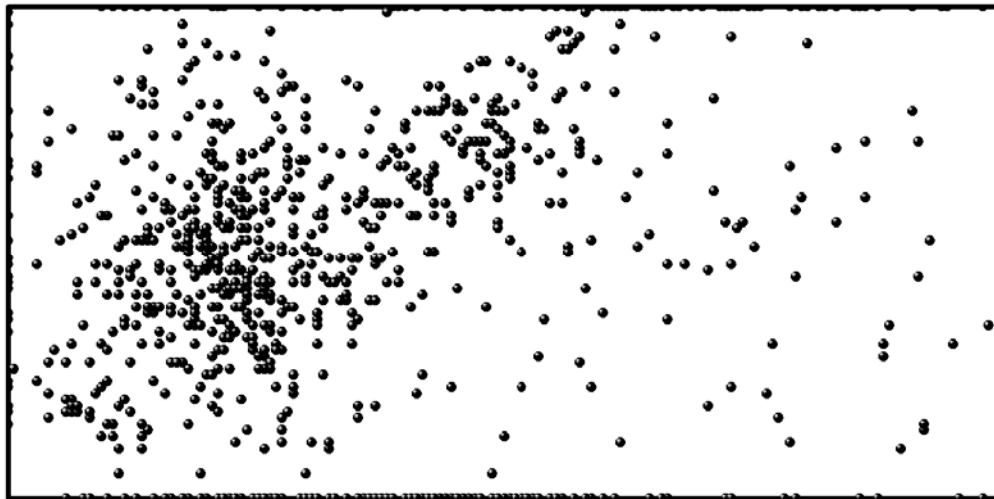


Abb. 9. Projektion der Lokalisierungsergebnisse in die x-y-Ebene zum Vergleich mit Abb.8.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Beitrages wurde aufgezeigt, dass die Lokalisierung bei einem Einsatz der Schallemissionsanalyse von entscheidender Bedeutung sein kann. Bei inhomogener und veränderlicher Schallgeschwindigkeitsverteilung in den Probekörpern ist die Berechnung aufwendiger und ungenauer, aber durchaus möglich. Es gibt verschiedene Lösungsmöglichkeiten für diese Problematik, die an mehreren Probekörpern getestet und bewertet wurden. Zusätzlich zu den hier angesprochenen gibt es weitere Möglichkeiten ein Modell der Schallgeschwindigkeit bei Lokalisierungsrechnungen zu berücksichtigen. Hierzu gehören time-reversal-modelling, probabilistische Verfahren oder iterative Lösungsalgorithmen.

Wichtig hierbei ist grundsätzlich eine Abschätzung der Genauigkeit der Lokalisierungsrechnungen. Sollte beispielsweise der Lokalisierungsfehler größer als der Probekörper selbst sein, sind solche Ereignisse ebenfalls auszusortieren. Die Genauigkeit der Lokalisierung hängt von verschiedenen Parametern ab, z.B. der Sensoranordnung, der Probekörpergröße und -geometrie, den maximalen Sensorabständen, der Abtastrate und ganz entscheidend von der Signalqualität. Wenn es aufgrund des verwendeten

Berechnungsalgorithmus nicht möglich ist eine Genauigkeit aus der Rechnung abzuleiten, muss die Genauigkeit beispielsweise durch die Gaußsche Fehlerfortpflanzung abgeschätzt werden oder das Ergebnis unter dem Einsatz weiterer Messverfahren kalibriert werden.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sowie dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Förderung. Des Weiteren sind wir unseren Projektpartnern für die hervorragende Zusammenarbeit dankbar, unter der die vorgestellten Ergebnisse entstanden sind. Wir danken der MFPA Leipzig GmbH, dem IWB Universität Stuttgart sowie der MPA Universität Stuttgart für die Unterstützung bei den Brandversuchen. Dem Lehrstuhl für Orthopädie und Unfallchirurgie der Technischen Universität München danken wir für die gemeinsame Arbeit an den Femur-Knochen.

Referenzen

- [1] Grosse C., Ohtsu M. (Hrsg.): Acoustic Emission Testing in Engineering – Basics and Applications. ISBN: 978-3-540-69895-1, 415 S., Springer Verlag, Heidelberg (2008).
- [2] Grosse C., Ožbolt J., Richter R., Periškić G.: Acoustic emission analysis and thermo-hygro-mechanical model for concrete exposed to fire. *J. Acoustic Emission*, 28 (2010) 188-203, (2010).
- [3] Grosse C., Richter R., Ožbolt J., Dehn F., Juknat M., Spalling of HPC evaluated by acoustic emission and numerical analysis, *Rilem Proc. PRO80 (Eds. E. Koenders, F. Dehn)*. Proc. 2nd International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Delft, 157-163 (2011).
- [4] Krapp M.: Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei hochfestem Beton unter Brandbeanspruchung., Master`s thesis, Technische Universität München (2012).
- [5] Malm F.: Schallemissionsanalyse am humanen Femur., Master`s thesis, Technische Universität München (2012).
- [6] Radlmeier M., Richter R., Große C.: Automatische Qualitätsbeurteilung der Ersteinsatzbestimmung von Schallemissionssignalen mit Hilfe von autoregressiven Pickerfunktionen. Konferenzbeitrag, DGZfP 19. Kolloquium Schallemission, Augsburg (2013).
- [7] Richter R.: Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Detektion des Riss- und Abplatzungsverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung. Diplomarbeit, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (2009).
- [8] Richter R., Krapp M., Große C.: Anwendung von moderner Messtechnik zur Optimierung von Hochleistungsbeton für den Brandfall. *Messtechnik im Bauwesen* 04/2013
- [9] Richter R., Portner B., Raith M., Große C.: Auswertemöglichkeiten und Darstellung von Schallemissionsdaten am Beispiel von Brandexperimenten. Konferenzbeitrag, DGZfP-Jahrestagung Dresden (2013).