

Schallemissionsverfahren zur Schädigungsanalyse bei Beton unter Brandeinwirkung

Prof. Dr.-Ing Christian GROSSE, Dipl.-Ing. Ronald RICHTER
Technische Universität München
Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Fachgebiet Zerstörungsfreie Prüfung
Baumbachstr.7 81245 München
grosse@cbm.bv.tum.de
RRichter@cbm.bv.tum.de

Kurzfassung. Das Verhalten von Beton unter Brandbeanspruchung wurde in den letzten Jahrzehnten intensiv erforscht. Obwohl viele Probleme gelöst wurden ist die explosivartige Abplatzung des Betons noch immer nicht ausreichend beschrieben. Der Bruchmechanismus und die Zusammenhänge zwischen den mechanischen und nichtmechanischen Eigenschaften des Betons, die zur dieser Bruchart führen, sind noch immer unklar. Es fehlen hier vor allem belastbare experimentelle Daten, die eine Modellierung des Abplatzverhaltens absichern könnten.

Eine Möglichkeit, das Betonverhalten während solcher Versuche zu beobachten, stellt die Schallemissionsanalyse (SEA) dar. Dabei werden die bei der Belastung eines Bauteils auftretenden Geräusche aufgezeichnet und ausgewertet. Der Schädigungsverlauf kann so auch in nichttransparenten Werkstoffen sichtbar gemacht werden.

Ziel war zunächst festzustellen, ob die Schallemissionsanalyse in der Lage ist, zuverlässige Daten über die Entstehung von Mikrorissen und deren Wachstum aufgrund von Brandeinwirkung zu liefern, sowie zu testen, ob technisch solche Messungen in den vorhandenen Brandöfen realisiert werden können. Es werden die Ergebnisse von zwei Experimenten vorgestellt, bei denen bereits eine erste bruchmechanische Interpretation der Messdaten möglich war.

Einführung

Wird Beton Brandeinwirkungen ausgesetzt, ändert sich sein Verhalten. Die mechanischen Eigenschaften wie Festigkeit und Elastizitätsmodul nehmen deutlich ab. Weiterhin kommt es durch die auftretenden Temperaturgradienten zu Eigenspannungen und einer Abnahme der Tragfähigkeit der Betonbauteile durch Rissbildung sowie den teilweise auftretenden explosiven Abplatzungen.

Diese Schädigungsmechanismen in Beton sind noch nicht ausreichend erforscht, weil experimentelle Untersuchungen der Auswirkungen von Brandbeanspruchungen an Beton- und Stahlbetonbauteilen sehr aufwändig sind und nur an relativ kleinen Probekörpern durchgeführt werden können. Eine Alternative hierzu sind numerische Simulationen. Um damit allerdings eine realistische Vorhersage des Betonverhaltens zu erreichen, müssen die nume-

rischen Modelle weiterentwickelt und an die Realität angepasst werden. Hierfür ist ein Vergleich zwischen Simulation und experimentellen Untersuchungen notwendig.

Ein Einsatz der Schallemissionsanalyse (SEA) ermöglicht es, das Betonverhalten und den Schädigungsverlauf während Brandversuchen zu beobachten und die aufgezeichneten Daten mit den Ergebnissen der Simulation zu vergleichen.

Um herauszufinden, ob die Schallemissionsanalyse tatsächlich in der Lage ist, diese Erwartung zu erfüllen und belastbare Daten über das Schädigungsverhalten im Laufe von Brandversuchen an Beton zu liefern, wurden zwei Experimente durchgeführt und ausgewertet.

Versuchsaufbau

Für die beiden durchgeführten Versuche wurde der Kleinbrandofen der MPA Universität Stuttgart (Abb. 1, links) mit Probekörpern aus Normalbeton bestückt. Die Probekörper wurden entweder als Seitenwände oder als Deckel eingesetzt (Abb. 1, rechts) und von einer Seite einer Brandbeanspruchung nach der Einheitstemperaturzeitkurve (Abb. 4) ausgesetzt. Die Probekörper hatten eine Abmessung von 54 x 22 x 48 cm (Seite) bzw. 80 x 63 x 22 cm (Deckel).

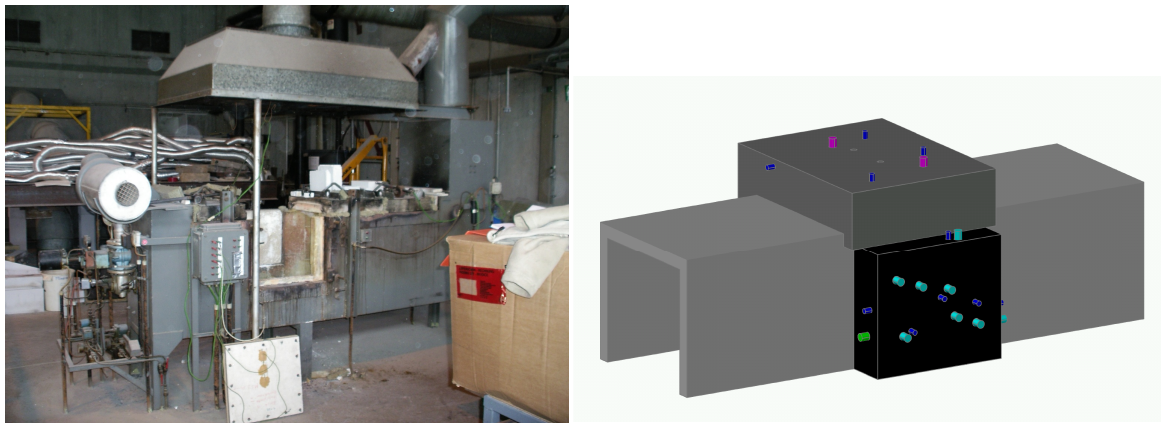


Abb. 1: Links: Kleinbrandofen an der MPA Universität Stuttgart.
Rechts: 3D-Modell des Prüfofens mit den Probekörpern „Seite“ und „Deckel“ und den Positionen der Schallemissionssensoren.

Auf der brandraumabgewandten Seite der Probekörper wurden verschiedene Schallemissionssensoren angebracht, aufgezeichnet wurde mit drei Transientenrekordern mit je acht Kanälen. Die Brandraumtemperatur, sowie die Oberflächentemperatur an mehreren Stellen der Probekörper wurden ebenfalls aufgezeichnet und die Probekörper mit einer Infrarot-Thermographie- sowie einer Videokamera überwacht.



Abb. 2: Links: An den Kleinbrandofen eingesetzter Seitenprobekörper mit angeschlossenem Messsystem. Rechts: Blick in den Brandraum während eines Brandversuchs. Der Probekörper befindet sich in der Aussparung links.

Versuchsergebnisse und Diskussion

Wegen der ungünstigen Umgebungsbedingungen und den Geräuschen aus dem Brandofen bestand ein vergleichsweise hoher Anteil der aufgezeichneten Daten aus Störsignalen und nicht-auswertbaren Signalen. Trotzdem wurden viele brauchbare Schallemissionssignale aufgezeichnet, die gut zu lokalisieren und auszuwerten waren. Die Signale eines dieser Schallemissionsereignisse zeigt exemplarisch Abb. 3.

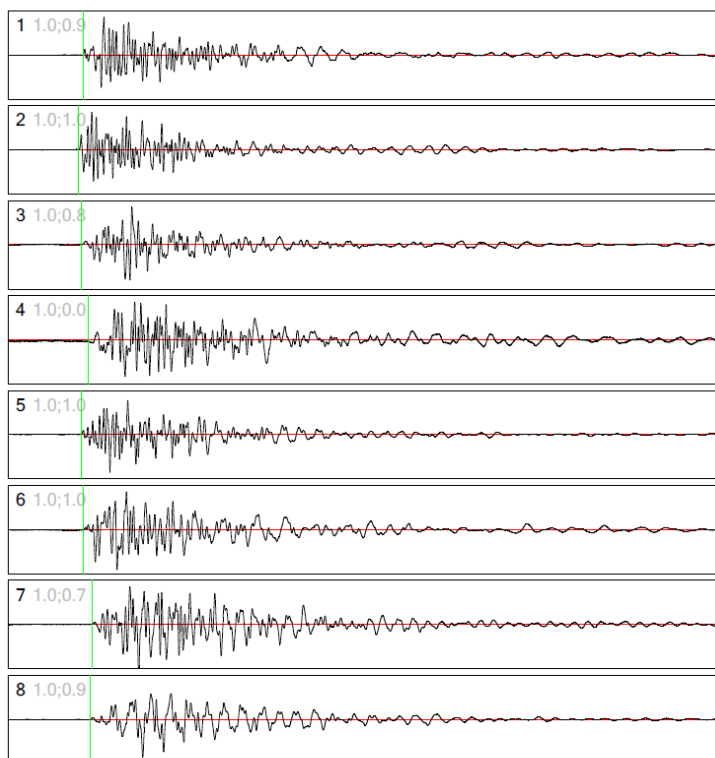


Abb. 3: Schallemissionssignale eines gut lokalisierbaren Schallereignisses. Die grünen Linien markieren den Ersteinsatz des Schallereignisses am jeweiligen Sensor.

Ein Vergleich der sogenannten Hitrate (Anzahl von aufgezeichneten Signalen, die eine vor-eingestellte Triggerschwelle überschreiten) mit der Brandraumtemperatur (Abb. 4) lieferte erste Ergebnisse über den Verlauf der Schädigung. Man kann davon ausgehen, dass mit dem Beginn einer Schädigung die ersten Schallemissionen auftreten und die Schädigung mit wachsender Anzahl an Schallemissionen umso größer wird. Unter Umständen lässt sich also aus der Schallemissionsrate der Beginn der Betonschädigung ableiten, was bei einer Temperatur im Brandraum von ca. 500°C der Fall war. Bis zu einer Temperatur von ca. 750°C steigt die Hitrate gleichmäßig an, um dann in einen weniger steilen Gradienten über zu gehen. Dies stimmt mit dem erwarteten Schädigungsverlauf überein. Zwischen 400°C und 750°C findet nach der Literatur die Zersetzung elementarer Hydratationsprodukte statt.

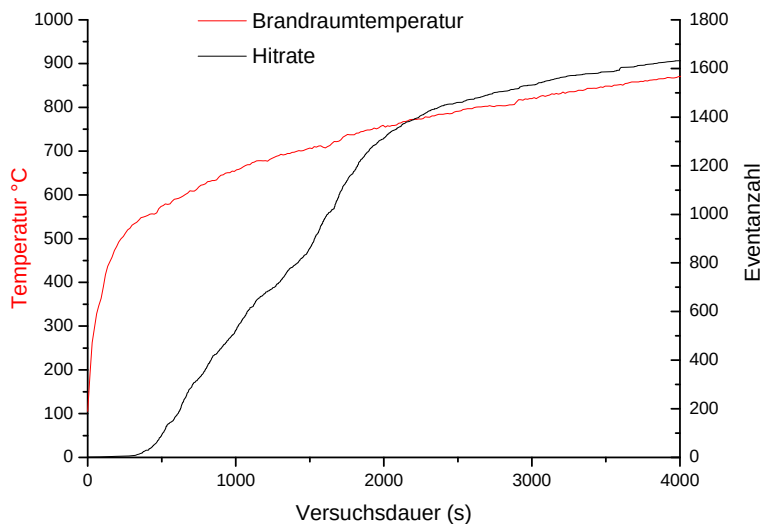


Abb. 4: Hitrate und Temperaturerhöhung im Brandraum aufgetragen über dem Versuchszeitraum.

Die lokalisierten Schallereignisse wurden sortiert. Ereignisse, die von weniger als sechs Sensoren aufgezeichnet wurden und deren Lokalisierungsgenauigkeit unter 2 cm lag, wurden nicht näher ausgewertet. Das Ergebnis der Lokalisierung zeigt Abb. 5 (links). Zu erkennen ist, dass die meisten Schallemissionsereignisse im Mittenbereich der Probekörper auftraten, also im Bereich mit dem höchsten Temperaturgradienten und damit der größten erwarteten Schädigung. Die Genauigkeit der Lokalisierung ist beispielhaft für die X/Z-Oberfläche eines Probekörpers in Abb. 5 (rechts) dargestellt.

Schwierigkeiten in der Lokalisierung ergeben sich durch eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit im Beton mit zunehmender Temperatur. Durch den auftretenden Temperaturgradient kommt es zu einer sehr ungleichmäßigen Schallgeschwindigkeit in den einzelnen Bereichen der Probekörper. Die Temperaturverteilung wird an den Ergebnissen der parallel zu den Versuchen durchgeführten Überwachung der Probekörperoberfläche mit einer Thermographiekamera deutlich (Abb. 6).

Die zunehmende Schädigung des Betons durch Rissbildung führt aufgrund der daraus resultierenden längeren Schalllaufwege ebenfalls zu einer Verschlechterung der Genauigkeit der Lokalisierung.

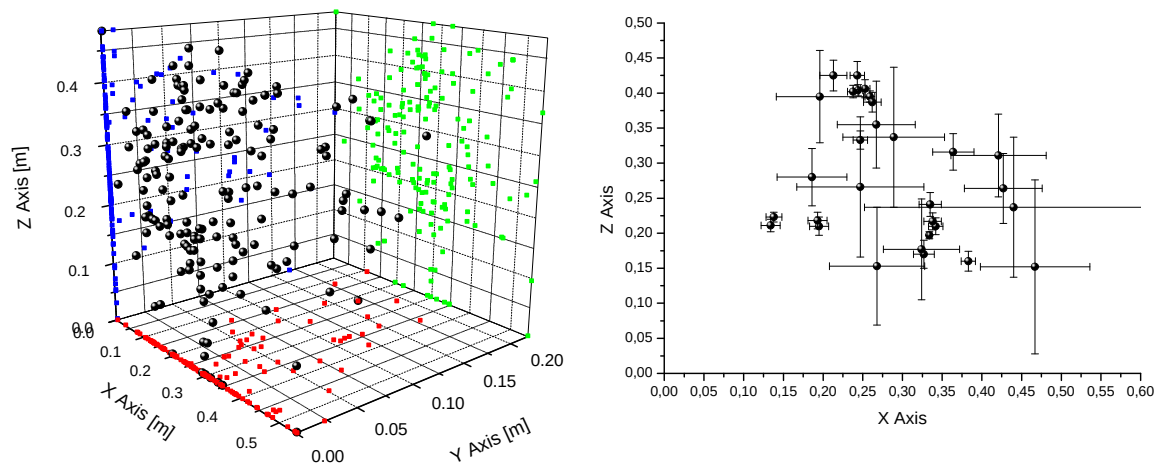


Abb. 5: Links: 3D Darstellung von lokalisierten Schallereignissen. Die farbigen Punkte geben die Projektionen auf die Ebenen wieder (rot = X/Y, blau = Y/Z, grün X/Z).
Rechts: Projektion der SEA-Signale auf die Oberfläche des Probekörpers (X/Z). Die Fehlerbalken geben die laterale Genauigkeit der Lokalisierung an.

Durch eine Auswertung mittels Laufzeittomographie sollen zukünftig diese systematischen Fehler in der Lokalisierung erkannt und durch Gewichtung der einzelnen Sensoren minimiert werden. Der Fehler in der Lokalisierung kann zusätzlich zur Auswertung herangezogen werden. Eine Betrachtung der Fehlerzunahme über den Versuchsverlauf führte zu weiteren Anhaltspunkten über die Zunahme der Schädigung im Beton.

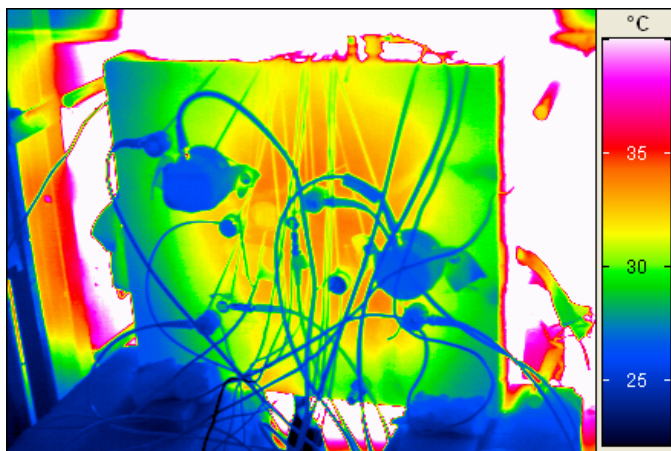


Abb. 6: Thermographieaufnahme des Seitenprobekörpers während des Brandversuchs.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass es sinnvoll ist, die Schallemissionsanalyse zur Überwachung von Betonprobekörpern während Brandeinwirkung einzusetzen. Es wurden Schallemissionsereignisse aufgezeichnet, deren Auswertung bereits erste Aussagen über den Schädigungsverlauf zuließ. Im Zuge weiterer Brandversuche an Hochleistungsbeton wird im Rahmen eines DFG-Projektes diese Anwendung der Schallemissionsanalyse weiterentwickelt und optimiert. Partner im DFG-Projekt "Explosive Abplatzung von Beton unter Brandbeanspruchung" sind zum einen das neue Fachgebiet für Zerstörungsfreie Prüfung der Technischen Universität München (Prof. Christian Große). Die numerische Simulation des Brandverhaltens ist dabei ein wesentliches Element und wird vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart durchgeführt (Prof. Joško Ožbolt). Durch die

Kombination von Simulation und Experiment werden gezielte Versuche zur Erforschung des Werkstoffverhaltens möglich. Das Ziel ist die Definition von Materialkriterien zu Vermeidung des explosionsartigen Versagens des Betons bei Brandbeanspruchung.

Danksagung

Für die Zusammenarbeit hinsichtlich der beschriebenen Brandversuche und der Mithilfe bei den experimentellen Arbeiten bedanken sich die Autoren bei den Mitarbeitern des Referats 51320 "Feuerwiderstand von Bauteilen" der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart sowie bei Prof. Joško Ožbolt, Dr. Jürgen Frick, Dr. Markus Krüger und Herrn Gerhard Bahr. Die Videoaufnahmen wurden von Herrn Kaiserauer angefertigt. Die weiteren Arbeiten zu diesem Forschungsthema werden seit 1. Januar 2010 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG unter dem Zeichen GR1664/7-1 gefördert.

Referenzen

- [1] **Grosse C., Ohtsu M. (Eds.):** *Acoustic Emission Testing in Engineering – Basics and Applications*. ISBN: 978-3-540-69895-1, 415 S., Springer publ., Heidelberg (2008)
- [2] **Grosse C., Reinhardt H.-W., Finck F.:** *Signal-based acoustic emission techniques in civil engineering*. J. of Mat. in Civ. Eng. 15 (2003), No. 3, S. 274-279
- [3] **Grosse C., Reinhardt H.-W.:** *Entwicklung eines Algorithmus zur automatischen Lokalisierung von Schallemissionsquellen*, Die Materialprüfung 41: 342-347. (1999)
- [4] **Ožbolt J., Kožar I., Eligehausen R., Periškić G.:** *Instationäres 3D Thermo-mechanisches Modell für Beton*. Beton- und Stahlbetonbau, 100 (2005), Heft 1, 39-51. (2005).
- [5] **Ožbolt J., Reinhardt H.W.:** *Three-dimensional finite element model for creep-cracking interaction of concrete*. Proceedings of the sixth international conference CONCREEP-6 , Ed. By Ulm, Bažant & Wittmann, 221-228. (2001).
- [6] **Reinhardt H.-W., Grosse C., Kurz J.:** *Localization and mode determination of fracture events by acoustic emission*, acoustic Emission and Critical Phenomena, Carpinteri & Lacidogna (eds), ISBN 978-0-415-45082-9, Taylor & Francis Group, London, (2008)
- [7] **Richter R.:** *Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Detektion des Riss- und Abplatzungsverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung*. Diplomarbeit, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (2009)