

Schallemissionsanalyse und numerische Simulation zur Schädigungsanalyse bei Brandversuchen mit hochfestem Beton

Ronald RICHTER*, Christian GROSSE*, Josko OZBOLT**, Josipa BOSNJAK**

*Technische Universität München
Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Lehrstuhl Zerörungsfreie Prüfung
Baumbachstraße 7 81245 München
grosse@tum.de
richter@cbm.bv.tum.de

**Universität Stuttgart
Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Pfaffenwaldring 4 70569 Stuttgart

Kurzfassung. Wird Beton einer Brandbeanspruchung ausgesetzt, ändern sich seine mechanischen Eigenschaften. Die Festigkeit und der Elastizitätsmodul verringern sich mit zunehmender Temperatur. Durch die unterschiedliche Ausdehnung von erwärmten Bereichen kann es zu Eigenspannungen in den Betonbauteilen und damit zu Rissbildung und Abplatzungen kommen. Bei hochfesten und ultrahochfesten Betonen können explosive Abplatzungen auftreten.

Brandversuche an Beton sind sehr aufwändig und die konventionellen Messmethoden zur Überwachung der Versuche (wie z. B. Dehnungsmessungen) sind wenig aussagekräftig. So gibt beispielsweise eine Betrachtung der Probekörper vor und nach den Versuchen Aufschluss über entstandene Schäden, jedoch nicht über den zeitlichen Verlauf der Schädigung. Sie gibt auch keine Informationen darüber, bei welchen Temperaturen die Schädigungen aufgetreten sind.

Um diese Schädigungsprozesse nachvollziehen und eine bruchmechanische Interpretation vornehmen zu können, wird die Schallemissionsanalyse im Rahmen des DFG Forschungsprojektes "Explosive Abplatzung von Beton unter Brandeinwirkung" (GR 1664/7-1) zur Dokumentation des Riss- und Abplatzverhaltens eingesetzt. Berichtet wird von Brandversuchen in Zusammenarbeit mit der MFPA Leipzig. Die Ergebnisse der experimentellen Beobachtungen werden mit numerischen Simulationen verglichen, die von Projektpartnern am Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart durchgeführt werden.

Einführung

Die Mechanismen und Vorgänge, die zu explosiven Abplatzungen von Hochfesten Betonen führen, sind nach wie vor nicht umfassend geklärt. Es gibt mehrere Ansätze, dieses Phänomen zu beschreiben, es fehlen aber geeignete Messverfahren. Brandversuche sind sehr aufwändig und mit konventionellen Methoden sind die Vorgänge nicht

zufriedenstellend zu beobachten. Die Schallemissionsanalyse bietet die Möglichkeit, die Schädigungsprozesse während des Versuchs zu überwachen und aufzuzeichnen. Damit können Informationen nicht nur vor und nach einem Brandversuch, sondern über die komplette Versuchsdauer gewonnen werden. Zudem werden Daten nicht nur aus oberflächennahen Bereichen, sondern auch aus dem Inneren der Probekörper gewonnen.

Im DFG-Forschungsprojekt „Explosive Abplatzung von Beton unter Brandbeanspruchung“ werden zusätzlich zu den experimentellen Untersuchungen numerische Simulationen durchgeführt. Wie auch die Schallemissionsanalyse, betrachten diese Simulationen die zeitliche Entwicklung der Schädigung. Der Vergleich von Ergebnissen beider Verfahren ermöglicht eine Kalibrierung der Simulation und eine Verbesserung der Aussage der Schallemissionsuntersuchungen. Dadurch können die Schädigungsprozesse an hochfesten Betonen detaillierter untersucht werden.

Im Folgenden werden experimentelle Untersuchungen beschrieben, bei welchen die beiden Verfahren erstmals gemeinsam zur Anwendung kamen. Gezeigt werden der Versuchsaufbau sowie erste Ergebnisse der Schallemissionsanalyse. Die Ergebnisse der Simulation sind Gegenstand anderer Berichte [6].

Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen an der MFPA Leipzig GmbH wurde ein mit Ölbrennern ausgestatteter Prüfofen verwendet [Abb.1]. Auf der Oberseite des Prüfofens wurden drei Betonprobekörper liegend angeordnet. Somit wurden eine Brandbeanspruchung von der Unterseite [Abb.2 rechts] und eine gute Zugänglichkeit zur Positionierung der Schallemissionssensoren [Abb.2 links] auf den Seiten und der Oberseite erreicht. Die Probekörper hatten eine Abmessung von 70x70x30 cm. Die beiden äußeren Probekörper wurden mittels Schallemissionsanalyse untersucht.

Bei dem getesteten Material handelt es sich um einen hochfesten Beton (HPC) mit einer Druckfestigkeit nach 28 Tagen von 135 N/mm^2 . Es wurden zwei Experimente durchgeführt, wobei bei dem zweiten Versuch 1 kg/m^2 Polypropylen(PP)-Fasern in die Betonrezeptur zugegeben wurden. Eine Zugabe von PP-Fasern soll das Abplatzverhalten von hochfesten Betonen positiv beeinflussen.

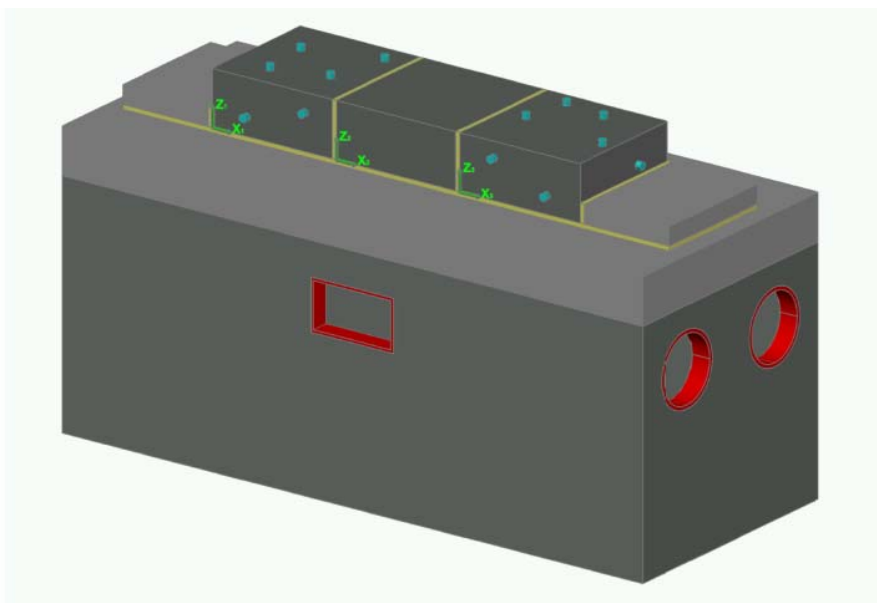


Abb. 1: 3D-Modell des Prüfofens mit drei liegenden Probekörpern auf der Oberseite, runden Brenneröffnungen und Beobachtungsfenster. Die Positionen der Schallemissionssensoren sind auf den Probekörpern blau markiert.



Abb. 2: Links: Oberseite eines der HPC Probekörper mit Schallemissionssensoren.
 Rechts: Innenansicht des Prüfofens vor dem Experiment mit der brandbeanspruchten Unterseite der Probekörper, der Temperaturmesstechnik und den Brenneröffnungen.

Der Prüfofen wurde durch zwei Brenner befeuert, die an zwei Öffnungen an der Seite des Brandraumes angeordnet waren. Die Temperatursteuerung des Brandraumes [Abb.3] erfolgte nach der Einheitstemperaturzeitkurve (DIN 4102), wobei die Temperatur mit sechs Messstellen direkt unter den Probekörpern beobachtet und anhand der mittleren Temperatur dieser Messwerte geregelt wurde.

Brandraumtemperatur (MW / Einzelwerte)

Prüfung 1 am 23.11.2010

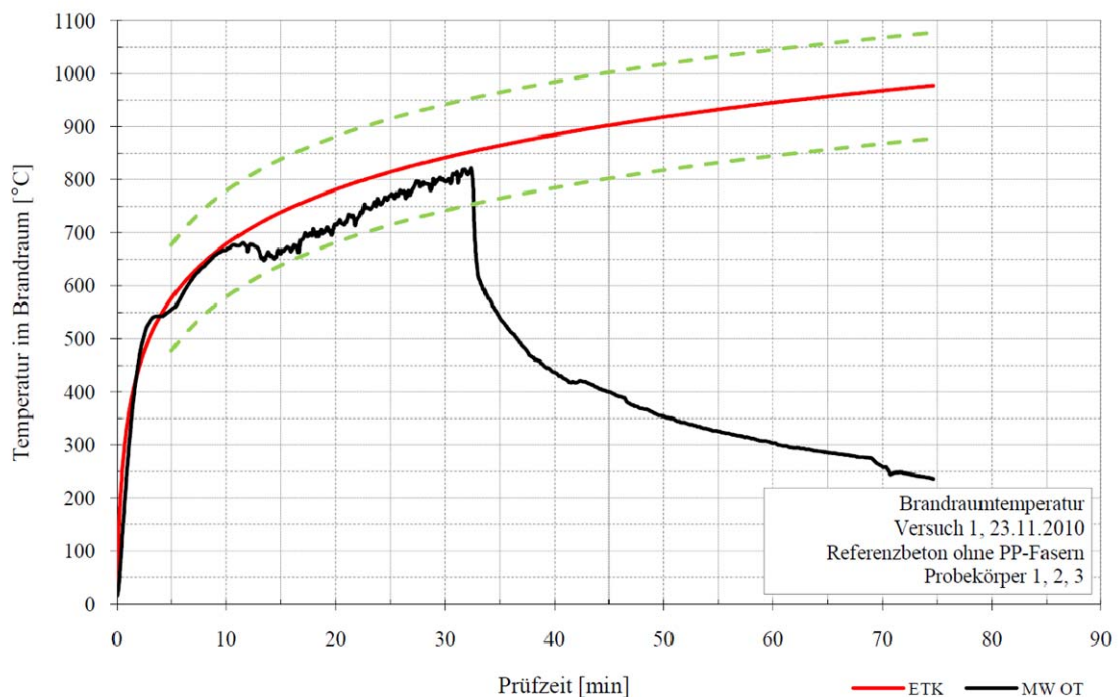


Abb. 3: Temperatur des Brandraumes (schwarz), gesteuert nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK).

Ergebnisse

Als Ergebnis der beiden Experimente konnte ein deutlich unterschiedliches Brandverhalten bei beiden Betonrezepturen festgestellt werden. Bei den Probekörpern aus HPC ohne PP-Fasern traten Rissbildung und starke Abplatzungen auf [Abb.4 rechts]. An den Probekörpern mit PP-Faser-Beimischung war keine Schädigung aufgrund von Abplatzungen, sondern ausschließlich eine Rissbildung zu erkennen [Abb.4 links].



Abb. 4: Links: HPC Probekörper mit 1 kg/m² PP-Fasern nach den Brandversuchen.
Rechts: Schädigung aufgrund von explosiven Abplatzung an einem Probekörper ohne PP-Fasern.

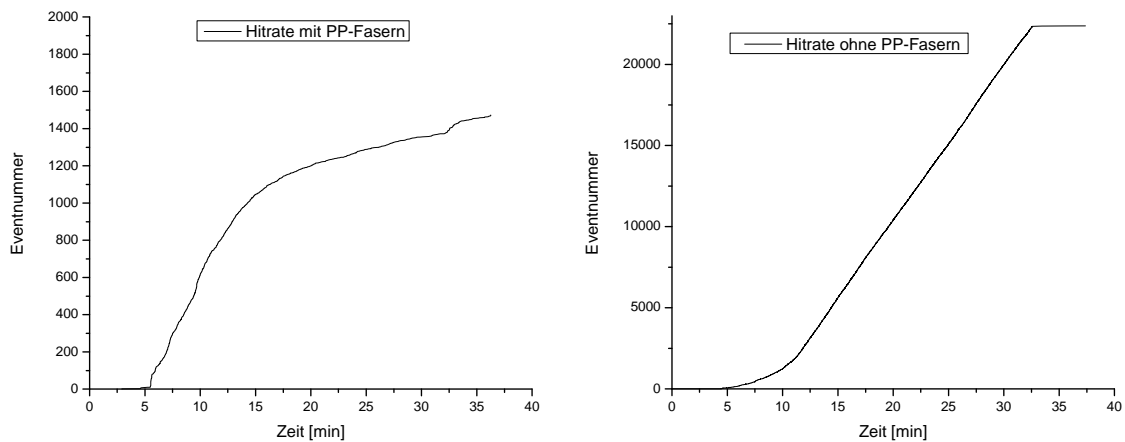


Abb. 6: Aufgezeichnete Schallemissionsereignisse kumulativ über den zeitlichen Versuchsverlauf dargestellt. Links an Probekörpern mit und rechts an Probekörpern ohne PP-Fasern.

Ergebnisse der Schallemissionsanalyse, an denen das Abplatzverhalten analog zu den Beobachtungen zu erkennen ist, zeigt Abb.6. Dargestellt ist die Anzahl von aufgezeichneten Schallemissionsereignissen über der Brandzeit. Bei den Probekörpern mit PP-Fasern traten deutlich weniger Ereignisse auf. Diese Ereignisse lassen sich auf die Rissbildung zurückführen, die bei einseitiger Erwärmung der Probekörper durch innere Spannungen ausgelöst werden. Das Auftreten von mehr als zehnfach so vielen Schallemissionsereignissen bei den Probekörpern mit PP-Fasern resultiert aus den Abplatzungen. In der Kurve zusätzlich zu erkennen ist, dass nach dem Ausschalten des Prüfofens nach ca. 30 min kaum mehr Schallemissionen zu beobachten sind.

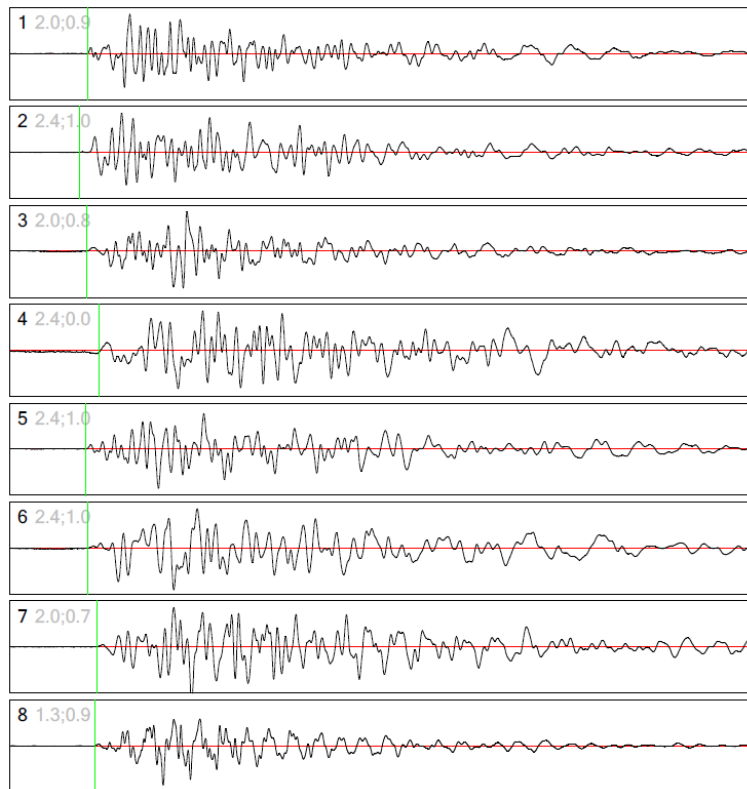


Abb. 8: Beispiel für ein Schallemissionsereignis, aufgezeichnet mit einem 8-Kanal Transientenrecorder.

Eines der aufgezeichneten Schallemissionsereignisse zeigt exemplarisch Abb.8. Aufgezeichnet wurde mit acht Kanälen mit einer Abtastrate von 1 MHz. Anhand der grün gekennzeichneten Ersteinsätze der Signale wird auf die Ursprungsorte der Signale zurückgerechnet. In Abb. 9 sind Ergebnisse der 3D-Lokalisierung zu sehen. Es handelt sich dabei um eine Auswahl aus den ersten 100 Ereignissen des Datensatzes des Versuches ohne PP-Fasern. Ausgewählt wurden dabei Ereignisse, zu deren Lokalisierung Signale von mindestens 6 Kanälen verwendet werden konnten und bei denen die Lokalisierungsgenauigkeit besser als 15 cm war. Eine genauere Lokalisierung ist zum momentanen Zeitpunkt noch nicht möglich, da der verwendete Lokalisierungsalgorithmus von einer konstanten Schallgeschwindigkeit im Probekörper ausgeht. Durch Temperatureinwirkung ergeben sich aber Änderungen der Schallgeschwindigkeit im Material.

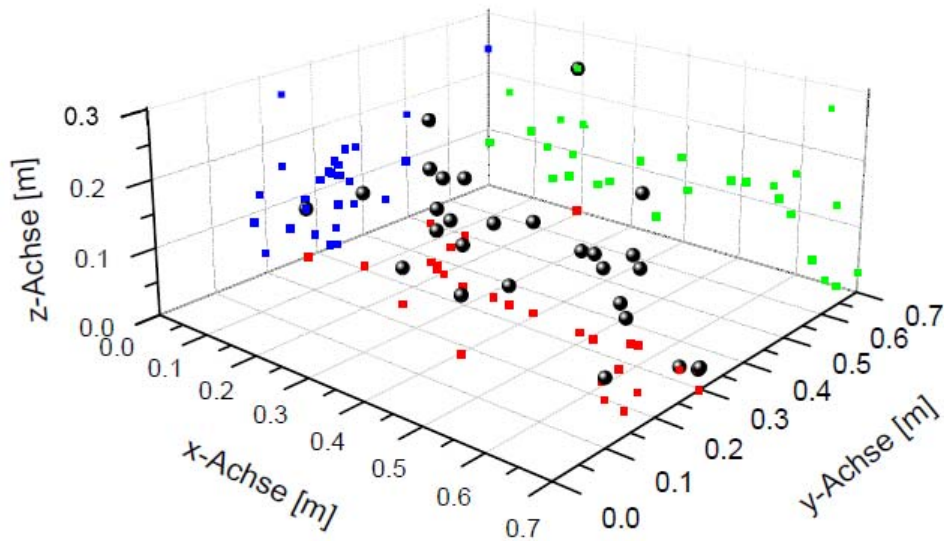


Abb.9: 3D-Lokalisierung einer Auswahl von Schallemissionsereignissen. Die schwarzen Kugeln zeigen die Position im Raum, die Projektionen auf die Ebenen sind rot, blau und grün gekennzeichnet.

Zusammenfassung und Ausblick

Diese vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass die Schallemissionsanalyse eine Unterscheidung des Brandverhaltens von Betonen mit verschiedenen Betonrezepturen ermöglichen kann. Eine Verbesserung der Genauigkeit der Lokalisierung und eine Unterscheidung von Rissen und Abplatzungen bedürfen noch weiterer Untersuchungen. Die Genauigkeit der Lokalisierungen soll durch eine Weiterentwicklung der Lokisierungsalgorithmen unter Einbezug einer veränderlichen Schallgeschwindigkeit, sowie Methoden zur Kalibrierung des Messsystems während der Messungen erfolgen.

Nach Weiterentwicklung der Messtechnik und Einbeziehung der Möglichkeiten des direkten Vergleiches von numerischer Simulation und Schallemissionsanalyse werden die beiden Verfahren zur systematischen Untersuchung von verschiedenen Betonrezepturen und Einflussparametern wie Feuchte, Bewehrung, Vorspannung und zusätzlicher statischer Belastung eingesetzt werden. Das Ziel ist, Möglichkeiten zur Herstellung von hochfesten Betonen mit niedrigem Risiko zu explosiven Abplatzungen zu entwickeln.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung unter der Projektnummer GR 1664/7-1.

Dankbar sind wir außerdem der Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart und der MPA-Bau, Massivbauinstitut Arcisstraße der TU München, sowie der MFPA Leipzig, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig GmbH, der wir für die Vorbereitung und Durchführung der Brandversuche danken.

Gedankt sei zudem den Kolleginnen und Kollegen des Centrums für Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München, sowie dem gesamten Team des Lehrstuhls Zerstörungsfreie Prüfung für die Unterstützung.

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., Reinhardt H.-W., Finck F.: Signal-based acoustic emission techniques in civil engineering. J. of Mat. in Civ. Eng. 15 (2003), Nr. 3, S. 274-279.
- [3] Richter R: Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Detektion des Riss- und Abplatzungsverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung. Diplomarbeit, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (2009).
- [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. In: Proceedings of the sixth international conference CONCREEP-6 , Ulm, Bažant & Wittmann (Hrsg.), 221-228, (2001).
- [6] 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).