

Auswertemöglichkeiten und Darstellung von Schallemissionsdaten am Beispiel von Brandexperimenten

Ronald RICHTER*, Christian U. GROBE*, Benjamin PORTNER*, Manuel RAITH*

* TU München Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) Lehrstuhl ZfP

Kurzfassung. Die Schallemissionsanalyse ist ein gutes Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung zur Messung der Entwicklung und des Verlaufs von Rissen und anderen Schädigungsmechanismen. Bei einer parameterbasierten Auswertung wird oftmals die Schallemissionsaktivität als Ergebnis verwendet. Hier werden die Anzahl der aufgezeichneten Ereignisse gegen die Zeit dargestellt. Zeitlich schnell aufeinanderfolgende Ereignisse lassen auf eine erhöhte Schädigung im jeweiligen Zeitraum schließen. Diese Auswerte- und Darstellungsmöglichkeit ist sehr anschaulich und gut zu verstehen. Die Aussagekraft ist aber beschränkt und die Gefahr einer Fehlinterpretation sehr hoch. Die Ergebnisse hängen stark vom Versuchsaufbau, von der verwendeten Hardware, der Sensorik und besonders von den Messgeräteeinstellungen ab, was in diesem Artikel durch den Einsatz mehrerer Messgeräte bei gleichem Versuchsaufbau nachgewiesen wird. Anschließend wird am Beispiel von Brandversuchen an hochfestem Beton aufgezeigt, wie durch einen verantwortungsvollen Umgang mit den Messdaten diese Probleme deutlich verbessert werden können. Durch kritische Betrachtung der einzelnen Signale und eine gezielte Auswahl steigt die Aussagekraft der Schallemissionsaktivität erheblich.

Einführung

Beton zeigt unter Brandeinwirkung ein Schädigungsverhalten in Form von Rissbildung durch thermische Spannungen, sowie bei hochfestem Beton explosive Abplatzungen. Da Brandexperimente sehr aufwändig und teuer sind, ist es notwendig möglichst viele Daten zu erhalten. Eine besondere Schwierigkeit ist die zeitliche Erfassung des Schädigungsverlaufes. Normalerweise kann man Brandprobekörper vor und nach dem Versuch betrachten und vermessen. Hierfür werden in zwei Forschungsprojekten des Lehrstuhls für Zerstörungsfreie Prüfung (Technische Universität München) Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt. Dabei bietet die Schallemissionsanalyse als Volumenmessverfahren die Möglichkeit einer dreidimensionalen und zeitlichen Überwachung der Probekörper.

Versuchsaufbau

Der verwendete Versuchsaufbau sieht eine gleichzeitige Prüfung von drei Betonprobekörper (jeweils 70x80x30 cm³) pro Versuch vor. Die Probekörper werden als Deckenelemente auf den Prüföfen aufgesetzt [Abb. 1] und von der Unterseite mit einer



Brandbeanspruchung belastet. Abb. 2 zeigt die Unterseite der Probekörper durch ein Beobachtungsfenster vor und während des Experimentes. Geprüft wurde nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK bis ca. 800 °C) und nach der ZTV-ING Tunnelbrandkurve (bis 1200 °C). Zur Ofensteuerung werden 8 Ölbrenner, verteilt auf beiden Seiten des Ofens, und eine Lüftungsanlage verwendet. Bei den geprüften Probekörpern handelt es sich um hochfeste Betone mit einer Druckfestigkeit von 90 N/mm² bzw. 135 N/mm². Es wurden verschiedene Betonrezepturen mit und ohne Zusatz von Polypropylenfasern (1 kg/m³) getestet. Die PP-Fasern verhindern das explosive Abplatzen des Betons.

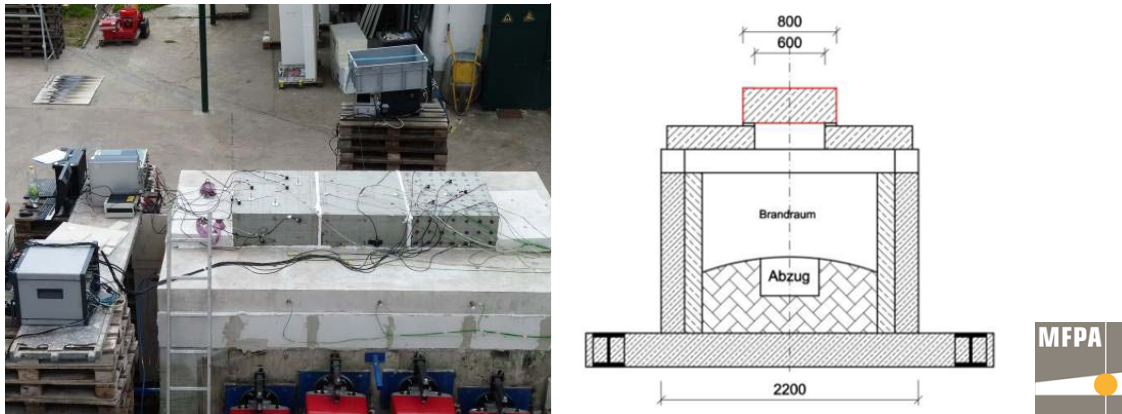


Abb. 1: Links: Brandofen der MFPA Leipzig GmbH mit drei aufgelegten Probekörpern, der installierten Schallemissionsmesstechnik und den roten Brennern im unteren Bereich. Rechts: Schnitt durch den Brandofen mit oben aufgelegtem Betonprobekörper (Rot umrandet) und dessen beflammt Unterseite mit einer Fläche von 60 cm x 70 cm.

Die Anordnung der Probekörper als einseitig beflamnte Deckenelemente, führt einerseits zu einem realitätsnahem Versuchsaufbau, da hochfester Beton als Wand, Deckenelement oder in Form von Tunneltübbingen normalerweise auch einer einseitigen Brandbeanspruchung ausgesetzt ist. Andererseits ermöglicht dieser Versuchsaufbau die Schallemissionsmesstechnik auf der Oberseite der Probekörper anzubringen und die empfindliche Messtechnik für einen gewissen Zeitraum vor der Temperatur zu schützen.



Abb. 2: Blick ins Ofeninnere, links vor Versuchsbeginn mit intakten Probekörpern, rechts während des Versuchs mit bereits geschädigten Probekörpern.



Abb. 3: Probekörper nach den Brandversuchen, links mit PP-Fasern, rechts ohne..

Ein Vergleich der Probekörper mit und ohne PP-Fasern nach dem Versuch zeigt eine starke Schädigung durch Abplatzen bei den Probekörpern ohne Fasern [Abb. 3, rechts]. Bei einem Einsatz von PP-Fasern treten keine Abplatzungen auf. Allerdings zeigt sich eine deutliche Verfärbung des Betons im direkt beflamten Bereich, was auf eine Veränderung im Material schließen lässt. Der Randbereich, in welchem die Probekörper auf dem Ofenrand auflagen [Abb. 3, links], bleibt hiervon unberührt.

Ergebnisse

Zunächst wird in der Auswertung die Schallemissionsaktivität betrachtet. Diese Darstellungen sind sehr anschaulich und liefern erste Hinweise über den Erfolg der Messungen. In Abb. 4 links ist die Schallemissionsaktivität in Ereignissen pro Sekunde dargestellt. Übersichtlicher anderen Messkurven, Die Darstellung in Abb. 4 rechts hingegen, ist übersichtlicher und besser mit anderen Messungen zu vergleichen. Hier werden die Ereignisse kumuliert dargestellt. Dadurch lässt sich die maximale Anzahl von Ereignissen besser erfassen. Die Information im linken Diagramm in Abb. 4 steckt im rechten Diagramm in der Steigung der Kurve. Dies wird in diesem Beispiel direkt mit der über mehrere Messstellen gemittelten Temperatur im Brandraum verglichen.

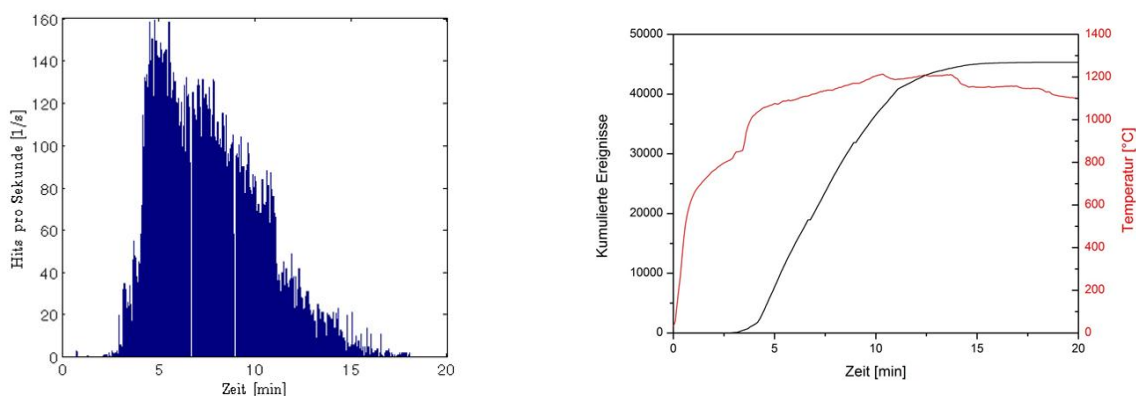


Abb. 4: Schallemissionsaktivität eines Experimentes ohne PP-Fasern nach der ZTV-ING. Links eine Darstellung der Ereignisse pro Sekunde und rechts die aufsummierten Ereignisse über die Zeit verglichen mit der aufgezeichneten Brandraumtemperatur.

Bei einem Vergleich verschiedener Brandexperimente mit unterschiedlichen Versuchsparametern wie Fasergehalt oder unterschiedlichen Normbrandkurven [Abb. 5] wird deutlich, dass es möglich ist diese Einflüsse in der Auswertung zu unterscheiden.

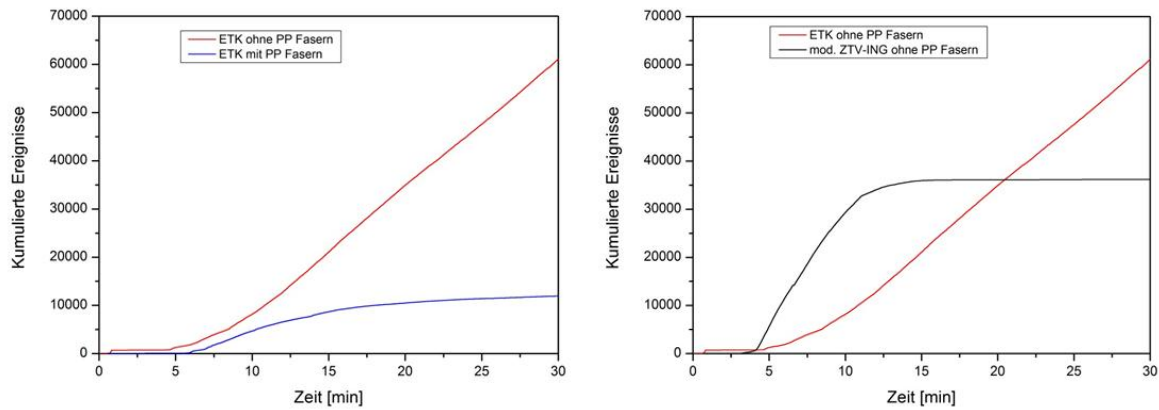


Abb. 5: Darstellung der Schallemissionsaktivität. Links ein Vergleich von Experimenten mit und ohne PP-Fasern, rechts die Ergebnisse bei der Verwendung unterschiedlicher Brandkurven.

Jedoch ist die Darstellung der Schallemissionsaktivität von mehreren Parametern abhängig, was zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Die Kurven hängen u. a. von der Sensorauswahl, der Sensorplatzierung, Messgeräteeinstellungen und der Probekörpergröße ab. Abb. 6 zeigt das Ergebnis einer Auswertung der Schallemissionsaktivität nach einem Brandexperiment. Der Unterschied in den drei Kurven besteht in der Wahl der Sensor-Messsystem-Kombinationen. Obwohl die Messsysteme vorher durch Bleistiftminen kalibriert und möglichst einheitlich eingestellt wurden, zeigen die Kurven einen deutlich unterschiedlichen Anstieg der kumulierten Ereignisse, wenn auch ähnliche Startzeitpunkte und ein ähnlicher Kurvenverlauf zu erkennen ist.

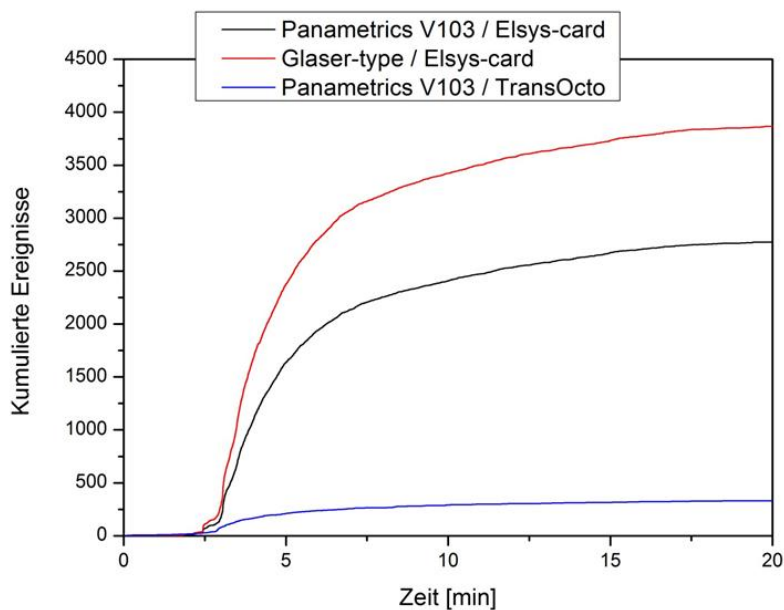


Abb. 6: Schallemissionsaktivität als Ergebnis des Einsatzes dreier verschiedener Messsystem-Sensor Kombinationen.

Aufgrund dieser Messungenauigkeiten sollten weitere Informationen für die Auswertung verwendet werden. Abb. 7 zeigt eine Darstellung der Signalenergie über die Zeit. Da die Signalenergien von allen Sensoren eines Ereignisses gemittelt werden, repräsentiert jeder Punkt ein Ereignis. Die Schallemissionsaktivität lässt sich nach wie vor auch von diesen Grafiken durch eine Häufung von Punkten abschätzen. Vergleicht man die Ergebnisse von Experimenten mit und ohne PP-Fasern, also auch mit und ohne Abplatzungen [Abb. 8 rechts und links], fällt auf, dass das Auftreten von Signalen mit

hoher Energie mit Abplatzungen einhergeht. In Experimenten ohne Abplatzungen sind diese hohen Energien nicht zu finden. Signale mit niedrigen Energien wurden jedoch in beiden Experimenten aufgezeichnet und zeigen auch ein ähnliches Bild. Dies kann einer Rissbildung zugeordnet werden, da bei allen Probekörpern Risse aufgrund der thermischen Dehnungen auftreten.

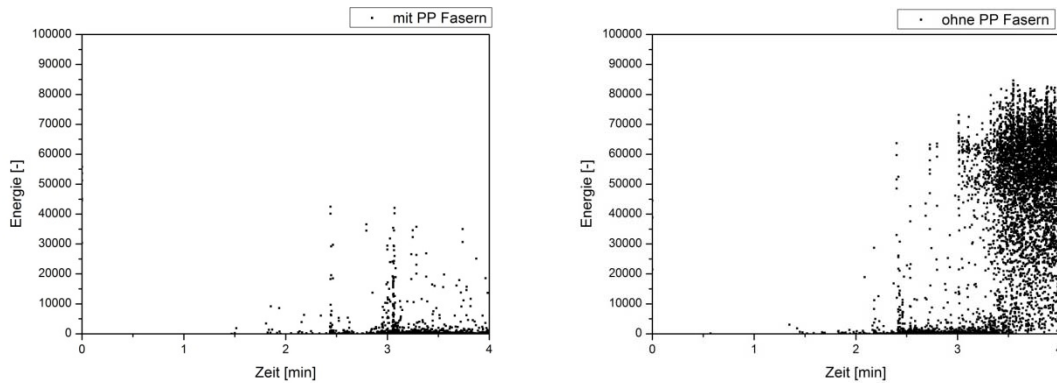


Abb. 7: Darstellung der Signalenergie über die Zeit. Jeder einzelne Punkt repräsentiert ein Ereignis. Links mit PP-Fasern und somit ohne Abplatzungen, rechts ohne PP-Fasern und mit massiven Abplatzungen.

Ausgehend von dem Hinweis, dass Abplatzungen durch hohe Signalenergien repräsentiert werden, erscheint es sinnvoll die Schallemissionsaktivität nach Energiekriterien zu sortieren um die neuen Informationen mit einzubinden. Abb. 8 links, zeigt eine Auswertung der Schallemissionsaktivität (schwarz). Diese Kurve wurde in Ereignisse mit hoher und niedriger Energie unterteilt. Die rote Kurve repräsentiert demnach ausschließlich Abplatzungsereignisse mit hoher Energie. Der zunehmende Anstieg ab ca. 3 min passt zu dem im Beobachtungsprotokoll visuell erfassten Abplatzungsbeginn.

Eine weitere Möglichkeit ist der Vergleich der Signalenergie mit der Temperatur. Hierfür wurden die Messdaten einer in 2 cm Abstand zum Brandraum einbetonierten Temperaturmesstelle verwendet. Der Beginn von Ereignissen mit hoher Signalenergie fällt in den Bereich von 100°C, was ein Hinweis auf ein Auslösen von explosiven Abplatzungen aufgrund einer Porendruckerhöhung durch Wasserdampfbildung sein kann.

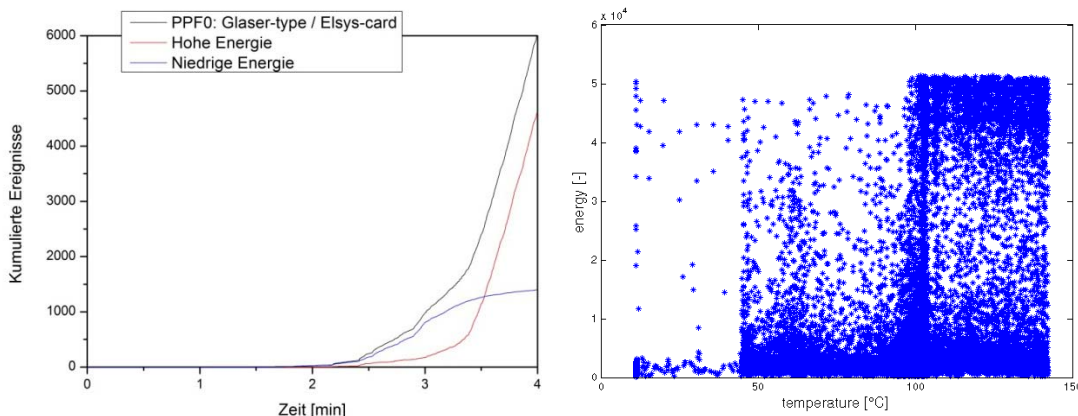


Abb. 8: Links: Schallemissionsaktivität und deren Sortierung nach Ereignissen mit hoher und niedriger Signalenergie. Rechts: Darstellung der Signalenergie über die Temperatur im Betonprobekörper, in 2 cm Abstand zum Brandraum.

Lokalisierung von Schallemissionsereignissen

Von besonderem Interesse ist eine Lokalisierung der Quellorte der aufgezeichneten Schallemissionen. Dadurch wird zusätzlich zur zeitlichen Erfassung des Schädigungsverlaufes eine Aussage über die räumliche Verteilung der Vorgänge möglich. Des Weiteren sind Störgeräusche durch die Lokalisierung identifizierbar und können so besser aussortiert werden. Darüber hinaus könnte man bei einer ausreichend genauen Lokalisierung eine zeitliche Erfassung der Abplatztiefe realisieren.

In ersten Untersuchungen konnten solche Lokalisierungen berechnet werden. Allerdings sind die Genauigkeiten dieser Berechnungen und damit auch die daraus resultierenden Aussagen nicht ausreichend. Zur Berechnung der Lokalisierung in Beton wird dieser normalerweise als homogen und somit mit gleichmäßiger Ultraschallgeschwindigkeit angenommen. Die Änderung der mechanischen Eigenschaften im Beton durch die Brandeinwirkung hat allerdings auch eine Änderung der Ultraschall-P-Wellen-Geschwindigkeit zur Folge [Abb. 9].

Da die Probekörper bei dem gewählten Versuchsaufbau von der Unterseite beflammt werden [Abb. 1] bekommt man einen Temperaturgradienten im Bauteil. Die Temperatur, und somit auch die P-Wellengeschwindigkeit, variiert räumlich über den gesamten Probekörper und ändern sich über den zeitlichen Verlauf. Um trotz dieser Schwierigkeiten eine Lokalisierung mit zufriedenstellender Genauigkeit zu realisieren wird in einem laufenden Forschungsprojekt ein umfangreiches Untersuchungsprogramm durchgeführt.

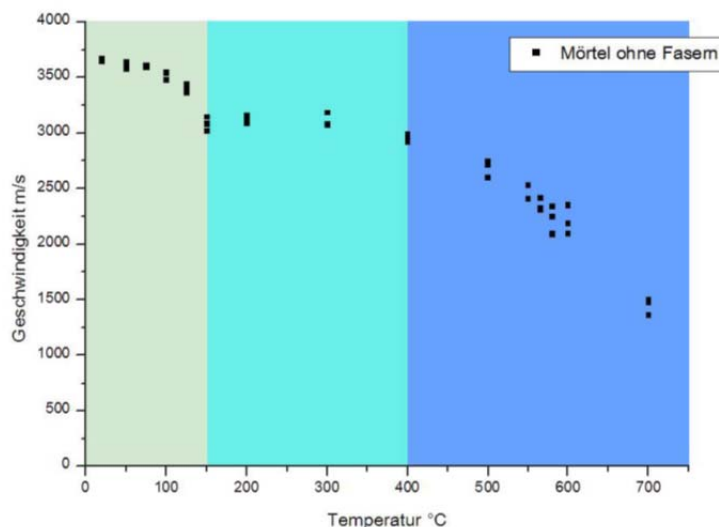


Abb.9: Schallgeschwindigkeitsentwicklung in den Probewürfeln in Abhängigkeit der Temperatur [4].

Zusammenfassung und Ausblick

In verschiedenen Branduntersuchungen wurde die Schallemissionsanalyse erfolgreich adaptiert und lieferte vielversprechende Ergebnisse. Durch eine Verknüpfung mehrerer Auswertungsparameter und der Wahl geeigneter Darstellungsmöglichkeiten lässt sich die Genauigkeit des Messverfahrens abschätzen und es wird möglich Schädigungsmechanismen zu unterscheiden.

Im Rahmen der laufenden Untersuchungen sollen Möglichkeiten zur Lokalisierung trotz geschichteter Geschwindigkeitsverteilung entwickelt und getestet werden. In wie weit

die Lokalisierungsgenauigkeit verbessert werden kann, hängt natürlich von der Genauigkeit des Geschwindigkeitsmodelles und damit direkt von der Messgenauigkeit der experimentellen Untersuchungen ab, die sicherlich begrenzt sind. Diese Fehler sind zu erfassen und bei einer Lokalisierung mit anzugeben. Die Angabe der Genauigkeit ist bei der Lokalisierung von Schallemissionsereignissen von entscheidender Bedeutung, da sie von vielen Faktoren abhängt und die Gefahr einer Fehlinterpretation, ohne zusätzliche Informationen, sehr hoch ist.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung unter der Projektnummer GR 1664/7-1. Unseren Projektpartnern vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart danken wir für die gute Zusammenarbeit. Dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie danken wir für die Förderung aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Ein Besonderer Dank geht an die MFPA Leipzig, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig GmbH.

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] Richter R: Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Detektion des Riss- und Abplatzungsverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung. Diplomarbeit, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (2009).
- [6] Richter R., Große C.U.: Schallemissionsverfahren zur Schädigungsanalyse bei Beton unter Brandeinwirkung. Konferenzbeitrag, DGZfP-Jahrestagung Erfurt (2010)
- [7] Richter R., Große C.U., Bosnjak J., Ožbolt J: Schallemissionsanalyse und numerische Simulation zur Schädigungsanalyse bei Brandversuchen mit hochfestem Beton. Konferenzbeitrag, DGZfP-Jahrestagung Bremen (2011)
- [8] Richter R., Krapp M., Große C.: Experimentelle US-Untersuchungen zur Entwicklung eines 4D-P-Wellen-Geschwindigkeitsmodelles von hochfestem Beton unter Brandbeanspruchung, Konferenzbeitrag, DACH-Jahrestagung Graz (2012)