

Experimentelle US-Untersuchungen zur Entwicklung eines 4D-P-Wellen-Geschwindigkeitsmodelles von hochfestem Beton unter Brandbeanspruchung

Ronald RICHTER*, Mascha KRAPP*, Christian GROSSE*

*Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

Kurzfassung. Beton wird als nichtbrennbarer Baustoff klassifiziert, jedoch können Schädigungen wie Rissbildung und Abplatzungen unter einer Brandbeanspruchung auftreten. Besonders nachteilig ist das explosive Abplatzverhalten von Hochleistungsbeton. Ziel des DFG-Forschungsprojekts „Explosive Abplatzung von Beton unter Brandeinwirkung“ ist die Untersuchung der Mechanismen, die zu einem solchen Verhalten führen. Zur Untersuchung werden Methoden der Zerstörungsfreien Prüfung wie Schallemissionsanalyse, Thermographie und Ultraschall in Kombination mit numerischen Simulationen angewendet. Durch eine Kombination dieser Verfahren soll die Zuverlässigkeit der Aussagen erhöht werden. Die Geschwindigkeit der P-Wellen ist abhängig vom Schädigungsgrad, aber auch von der Temperatur der Probekörper. Vorgestellt werden verschiedene experimentelle Ultraschalluntersuchungen an Betonprobekörpern, die vor, während und nach Brandversuchen durchgeführt wurden. Ein Zwischenziel ist die Erstellung eines räumlichen und zeitlichen 4D-Geschwindigkeitsmodells der Kompressionswellenausbreitung in den Betonprobekörpern. Ein verbessertes Geschwindigkeitsmodell trägt zu einer höheren Genauigkeit, u.a. hinsichtlich der Lokalisierung von Schallemissionsereignissen, bei.

Einführung

Auch wenn Beton nicht brennbar ist, verändern sich einzelne Bestandteile des Betons und damit seine mechanischen Eigenschaften sobald er einer Brandbelastung ausgesetzt wird. Hinzu kommt eine Schädigung in Form von Rissbildung durch thermische Spannungen, sowie bei hochfestem Beton explosive Abplatzungen. Zum einen sind diese Phänomene noch nicht ausreichend untersucht, zum anderen hängen sie sehr stark von der Betonrezeptur ab. Daher sind experimentelle Untersuchungen notwendig, um die Vorgänge besser zu erfassen. Da Brandexperimente aber sehr aufwändig sind, wäre oftmals eine Simulation hilfreich um verschiedene Fragestellungen zu klären. Hierfür wurde ein thermo-hygro-mechanisches Modell entwickelt [6][7][8].

Um Messdaten für eine Kalibrierung der Simulation zu bekommen und aus den aufwändigen Brandexperimenten möglichst viele Daten zu erhalten, sollen Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt werden. Die Schallemissionsanalyse bietet als Volumenmessverfahren die Möglichkeit einer dreidimensionalen und zeitlichen Überwachung der Probekörper [1]. In verschiedenen Branduntersuchungen wurde die Schallemissionsanalyse erfolgreich adaptiert und lieferte gute Ergebnisse [9][10][11]. Von besonderem Interesse ist hier die Lokalisierung der Quellorte von 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. 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.

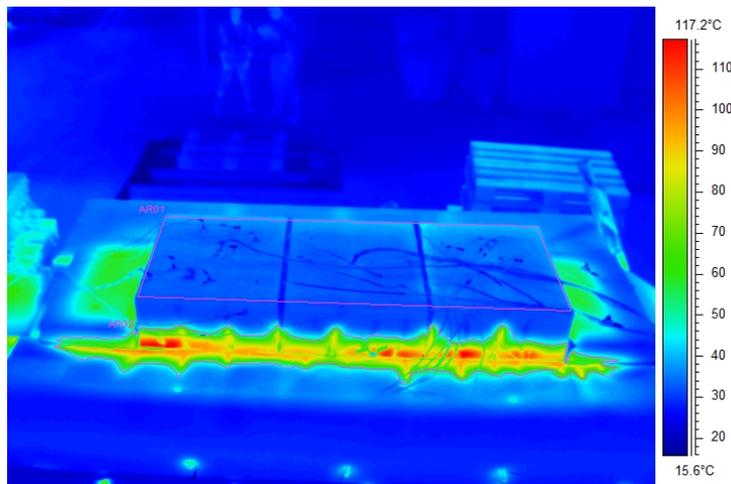


Abb. 1: Die ungleichmäßige Temperaturverteilung ist in den begleitenden Thermographieaufnahmen gut zu erkennen.

Da die Probekörper bei dem gewählten Versuchsaufbau von der Unterseite befeuert werden [Abb. 2] bekommt man einen Temperaturgradienten im Bauteil. Die Temperatur [Abb. 1] und somit auch die P-Wellengeschwindigkeit, variieren räumlich über den gesamten Probekörper und ändern sich über den zeitlichen Verlauf.

Zur Untersuchung dieser Schallgeschwindigkeitsveränderungen wurden verschiedene experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Eingesetzt wurden Systeme zur Ultraschall-Durchschallung von Beton. Untersucht wurde der Zustand der Probekörper im Vergleich vor und nach den Versuchen, der zeitliche Verlauf der Veränderungen, sowie der Zusammenhang zwischen Ultraschallgeschwindigkeit und Temperatur [5]. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen soll ein Geschwindigkeitsmodell der Probekörper bestimmt werden, welches sowohl die räumliche Verteilung, als auch die zeitliche Entwicklung erfasst. Dieses Modell soll später für eine verbesserte Lokalisierung von Schallemissionsereignissen eingesetzt werden.

Versuchsaufbau

Der im DFG-Projekt „Explosive Abplatzung von Beton unter Brandbeanspruchung“ verwendete Versuchsaufbau sieht eine gleichzeitige Prüfung von drei Betonprobekörper (jeweils $70 \times 80 \times 30 \text{ cm}^3$) pro Versuch vor. Die Probekörper werden als Deckenelemente auf den Prüfofen aufgesetzt [Abb. 2] und von der Unterseite mit einer Brandbeanspruchung belastet [Abb. 3]. Geprüft wurde nach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK bis ca. $800 \text{ }^\circ\text{C}$) und nach der ZTV-Ing Tunnelbrandkurve (bis $1200 \text{ }^\circ\text{C}$). 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/mm^2 bzw. 135 N/mm^2 in einem zweiten Versuchsprogramm. Es wurden

verschiedene Betonrezepturen ohne und mit einem Zusatz von Polypropylenfasern (1 kg/m^3) getestet. Die PP-Fasern verhindern das explosive Abplatzen des Betons.

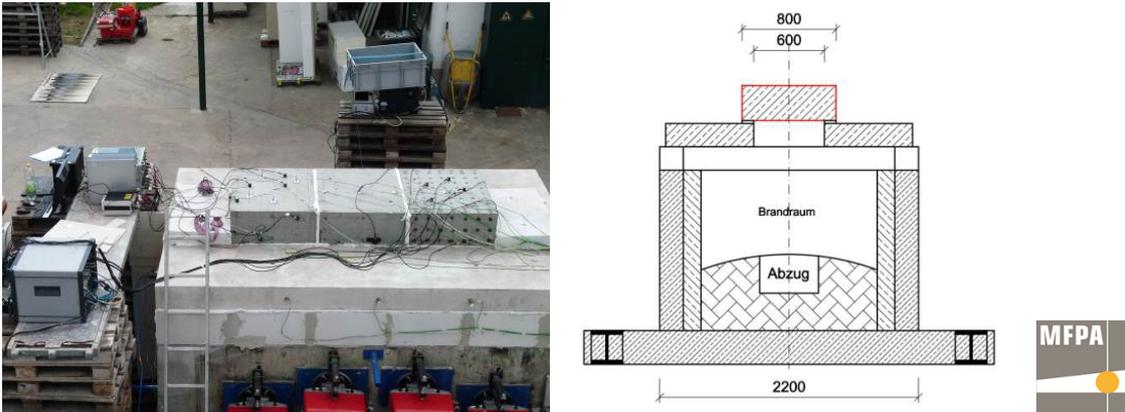


Abb. 2: Links: Brandofen der MFGPA Leipzig GmbH mit drei aufgelegten Probekörpern, der installierten Schallemissionsmesstechnik und den roten Brennern im unteren Bereich. Rechts: Schnitt durch den Brandofen mit oben aufgelegtem Betonprobekörper (Rot umrandet) und dessen beflammerter Unterseite mit einer Fläche von 60 cm x 70 cm.

Die Anordnung der Probekörper als einseitig beflamte Wandelemente, 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 Schallemissions-messtechnik auf der Oberseite der Probekörper anzubringen und die empfindliche Messtechnik dadurch für einen gewissen Zeitraum vor der Temperatur zu schützen.



Abb. 3: Blick ins Ofeninnere, links vor Versuchsbeginn mit intakten Probekörpern, rechts während des Versuchs mit bereits geschädigten Probekörpern.

Durch Beobachtungsfenster ist es möglich in das Innere des Ofens zu blicken [Abb. 3]. Vor Beginn des Versuchs sind die ungeschädigten Betonoberflächen und die Temperaturmessfühler zu erkennen. Wenige Minuten nach Versuchsbeginn waren an den Probekörpern ohne PP-Fasern die ersten Abplatzungen zu beobachten. Ein Vergleich der Probekörper mit und ohne PP-Fasern nach dem Versuch, zeigt eine starke Schädigung durch Abplatzen bei den Probekörpern ohne Fasern. 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. 2, rechts] bleibt hiervon unberührt.

Ultraschalluntersuchungen vor und nach der Brandbeanspruchung

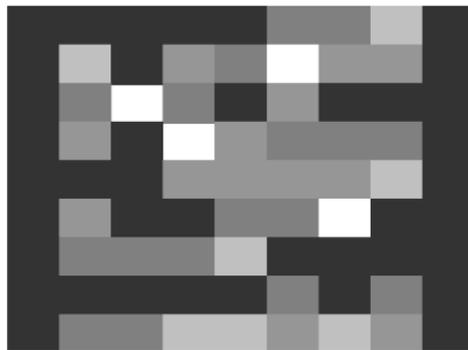
Die unter Brandbeanspruchung geprüften Probekörper wurden sowohl vor, als auch nach den Experimenten untersucht [Abb. 4]. Hierfür wurde ein gleichmäßiges Messraster auf die Probekörper aufgebracht. In diesen markierten Punkten wurde die Ultraschallgeschwindigkeit in Durchschallung bestimmt. Dadurch ergibt sich als Projektion für jede Raumrichtung eine Verteilung der Ultraschallgeschwindigkeiten [Abb. 5 und Abb. 6].



Abb. 4: Ultraschalluntersuchungen in Durchschallung an den Betonprobekörpern vor (links) und nach (rechts) der Brandeinwirkung.

Betrachtet man die Ergebnisse in der XY-Ebene (Grundfläche) sieht man eine ungleichmäßig verteilte Schallgeschwindigkeit in der beflamten Fläche [Abb. 5]. Besonders deutlich ist der Auflagerbereich an den beiden Rändern zu erkennen, wo die Probekörper auf dem Ofen auflagen. Hier ist analog zur nicht vorhandenen Verfärbung oder Abplatzung in diesem Bereich [Abb. 4, rechts] auch keine relevante Änderung der Schallgeschwindigkeit messbar.

Über die Höhe der Probekörper (XZ-Ebene) ist eine klare Schichtung der Schallgeschwindigkeit zu erkennen [Abb. 6]. Die Schallgeschwindigkeit nimmt mit zunehmender Nähe zum Feuer ab, was zur erwarteten Temperaturverteilung in den Probekörpern passt.



Geschwindigkeit (m/s)	Farbe
≤3500	
3500 – 4000	■
4000 – 4500	■
4500 – 5000	■
5000 – 5500	■

Abb. 5: Messergebnisse der Ultraschallgeschwindigkeitsuntersuchungen in der XY-Ebene (Grundfläche) an einem Beton mit ca. 135 N/mm² Druckfestigkeit und nach einer Prüfung mit der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK).

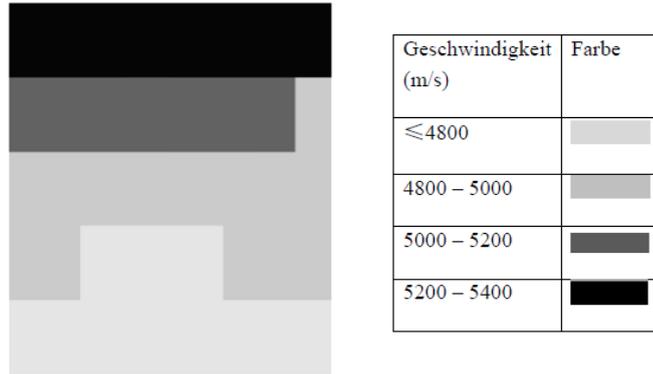


Abb. 6: Messergebnisse der Ultraschallgeschwindigkeitsuntersuchungen in der XZ-Ebene (über die Höhe des Probekörpers, Befeuert von unten) an einem Beton mit ca. 135 N/mm^2 Druckfestigkeit und nach einer Prüfung mit der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK).

Ultraschalluntersuchungen während des Versuchsverlaufs

Um die Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit über den zeitlichen Verlauf der Versuche zu untersuchen, wurde zusätzlich zur Schallemissionsanalyse ein Ultraschallsystem installiert. In einer Höhe von 2 cm wurde am mittleren Probekörper auf beiden Seiten Ultraschallsensoren befestigt [Abb. 7]. Eine Seite wurde als Sender, die andere Seite als Empfänger verwendet. Um den zeitlichen Verlauf abbilden zu können wurde in regelmäßigen Abständen, mit 10 Messwerten pro Minute, die Geschwindigkeit bestimmt.

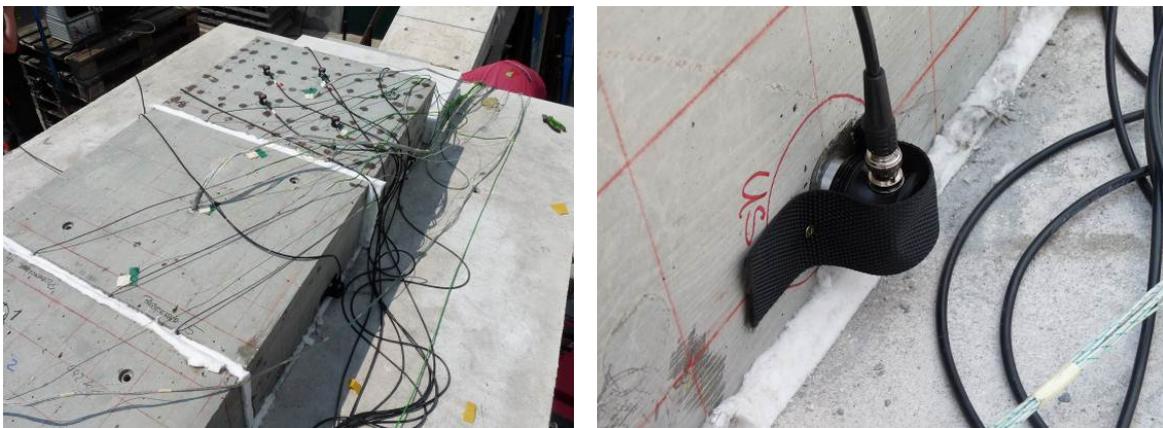


Abb. 7: Position der Ultraschallsensoren, verwendet als Sender und Empfänger auf beiden Seiten des mittleren Probekörpers.

Durch das schlechte Signal-Noise-Verhältnis der aufgezeichneten Signale ist eine Ersteinsatzbestimmung, die zur Ermittlung der Schallgeschwindigkeit benötigt wird, schwierig. Die Signale sind von Schallemissionen aufgrund von Rissbildung und Abplatzung und vom Rauschen der Ölbrenner überlagert. Dies führt zu einer Ungenauigkeit in den Messergebnissen [Abb. 8]. Für die Ergebnisse wurde ein gleitender Mittelwert über 20 Punkte bestimmt, welcher ebenfalls in Abb. 8 grafisch dargestellt wird. Trotz der Messungenauigkeit ist das Absinken der Schallgeschwindigkeit deutlich zu erkennen. Der Wert sinkt innerhalb der ersten 5 Minuten, um annähernd die Hälfte des Startwertes ab. Bei einem Vergleich mit der Temperatur im Probekörper auf Höhe der Ultraschallsensoren zeigt sich, dass bis hier eine Temperatur erreicht wurde, die 100°C nur geringfügig überstieg.

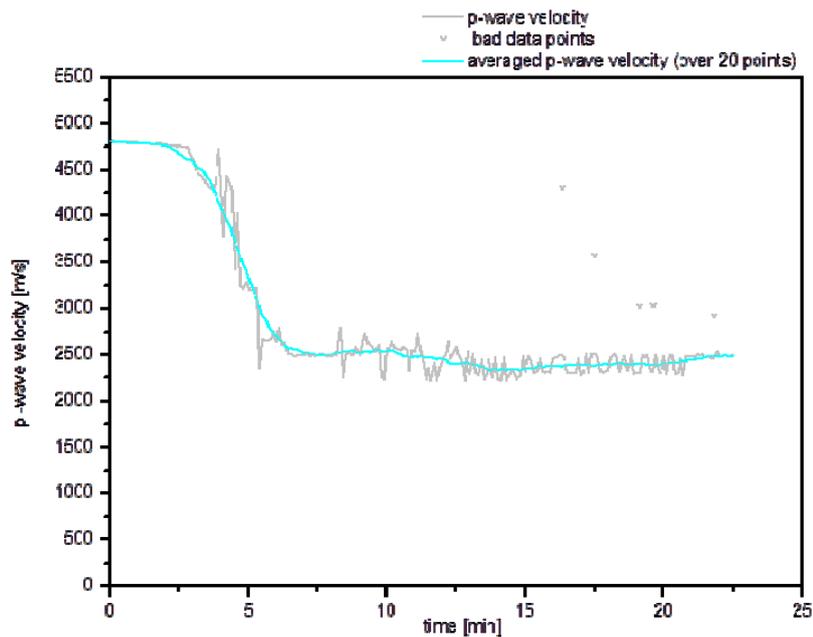


Abb. 8: P-Wellengeschwindigkeit über den Versuchsverlauf. Experiment nach mod. ZTV-Ing-Brandkurve und einer Druckfestigkeit des Betons von ca. 90 N/mm².

Zusammenhang zwischen Temperatur und Ultraschallgeschwindigkeit

Die Temperatur in den Probekörpern wurde während der Versuche mit mehreren Messstellen über die Probekörperhöhe erfasst. Darüber hinaus ist die Temperaturverteilung in Beton aufgrund von Brandeinwirkung durch numerische Simulation nachweislich gut zu beschreiben. Daher ist ein Zusammenhang zwischen Temperatur und der Schallgeschwindigkeit eine wichtige Information um ein Modell der Schallgeschwindigkeit zu entwickeln.

Hierfür wurden Zementstein- und Zementmörtelwürfel hergestellt [Abb. 9, links], die nach einer definierten Lagerungszeit, in einen vorgeheizten Ofen eingesetzt wurden. Vor und nach der Temperaturbelastung (80 min bei definierter Temperatur) wurde die Ultraschallgeschwindigkeit im Durchschallungsverfahren bestimmt [Abb. 9, rechts].



Abb. 9: Würfel mit einer Kantenlänge von 4 cm (Links) die für die Untersuchungen im Ofen erwärmt und anschließend die Schallgeschwindigkeit in Durchschallung bestimmt wurde (Rechts).

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigt Abb. 10. Hier ist ein Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit mit zunehmender Temperatur zu sehen. Die Geschwindigkeit sinkt im Versuchsverlauf auf unter 1500 m/s, was weniger als 50% der Referenzmessung beträgt.

Dieser Abfall ist auf Entwässerungs- und Abbaureaktionen im Zement zurückzuführen. Sie werden durch die Temperaturerhöhung ausgelöst und führen zu einer

Veränderung des Zementsteingefüges. In Abb.14 wurde der Abfall in verschiedene Bereiche eingeteilt. Sie zeigen verschiedene Reaktionsbereiche: Von 20°C bis 150°C stehen Entwässerungsreaktionen im Vordergrund, wobei eingelagertes und physikalisch gebundenes Wasser freigesetzt wird. Im Bereich von 150°C bis 400°C beginnen der Gelabbau in der Zementstruktur, sowie die Zersetzung der CSH- Phasen. Diese Prozesse zeigen jedoch keinen nennenswerten Geschwindigkeitsabfall. Der Temperaturbereich von 400°C bis 700°C wird von Abbaureaktionen der CSH- Phasen und des Portlandits dominiert.

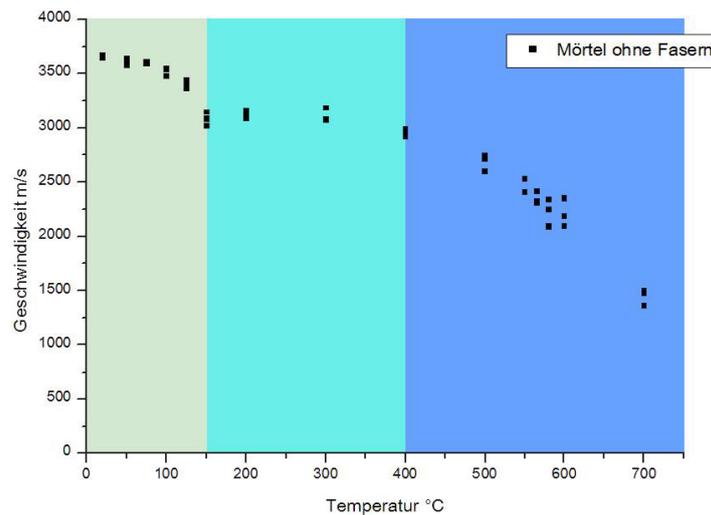


Abb. 10: Schallgeschwindigkeitsentwicklung in den Probewürfeln in Abhängigkeit der Temperatur.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Schallgeschwindigkeit in Beton ändert sich durch Brandeinwirkung. Um diese Veränderungen zu untersuchen, wurden Probekörpern vor und nach Brandbeanspruchung, sowie der zeitliche Verlauf und die Temperaturabhängigkeit betrachtet. Zu beobachten ist ein sehr starker Abfall der Geschwindigkeit im Bereich bis ca. 150°C. Dies ist in den Randbereichen der Probekörper bei Experimenten nach Normbrandkurven bereits nach wenigen Minuten der Fall. Je nach Betonzusammensetzung und verwendeter Brandkurve kann die Schallgeschwindigkeit um die Hälfte absinken.

Die vorgestellten Untersuchungen eignen sich grundsätzlich um einen Überblick über die Entwicklung der Schallgeschwindigkeit in brandbeanspruchtem hochfestem Beton zu bekommen. Es bleiben allerdings noch Fragen offen. Zu klären wären die Einflüsse verschiedener Betonrezepturen, sowie der Geschwindigkeit mit welcher die Temperatur erhöht wird. Zusätzlich müssten die Anteile an den beobachteten Prozessen einer Änderung im Zementstein und der auftretenden Schädigung durch Riss- und Mikrorissbildung zugeteilt werden.

Aus den Ergebnissen soll in Verbindung mit einer numerischen Simulation der Temperaturverteilung ein räumliches und zeitliches Geschwindigkeitsmodell der Probekörper erstellt werden. Dieses Modell kann daraufhin zur Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit von Schallemissionsereignissen verwendet werden. In wie weit diese Lokalisierung verbessert werden kann, hängt natürlich von der Genauigkeit des Modelles 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. Eine 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.

Grundsätzlich ermöglicht die Kenntnis der Schallgeschwindigkeitsentwicklung den Einsatz von Ultraschallverfahren zur Bauwerksinspektion nach Brandereignissen. Ob quantitative Aussagen über den Zustand von Betonbauteilen dadurch möglich sind, müsste durch weitere Untersuchungen geklärt werden, da dies abhängig von den Betonrezepturen und dem vorherigen Zustand des Betons ist. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist die Zugänglichkeit und Geometrie, die für Ultraschalluntersuchungen geeignet sein müssen.

Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung unter der Projektnummer GR 1664/7-1. Unseren Projektpartnern Prof. Ozbolt und Josipa Bosnjak vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart danken wir für die gute Zusammenarbeit. Ein Besonderer Dank geht an die Mitarbeiter der MFPA Leipzig, Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig GmbH, der wir für die hervorragende Vorbereitung und Durchführung der Brandversuche danken.

Dankbar sind wir außerdem der Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart für die Unterstützung. Gedankt sei zudem den Kolleginnen und Kollegen des Centrums für Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München, sowie dem gesamten Team des Lehrstuhls Zerstorungsfreie Prüfung.

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] Grosse C., Ozbolt 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).
- [4] Grosse C., Richter R., Ozbolt 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).
- [5] Krapp M.: Veränderung der Ultraschallgeschwindigkeit bei hochfestem Beton unter Brandbeanspruchung., Master`s thesis, Technische Universität München (2012)
- [6] Ozbolt J., Kožar I., Eligehausen R., Periškić G.: Instationäres 3D Thermo-mechanisches Modell für Beton. *Beton- und Stahlbetonbau*, 100 (2005), Heft 1, 39-51, (2005).
- [7] Ozbolt 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).
- [8] J. Ozbolt, J. Bošnjak, G. Periškić and C. Grosse, “Numerical simulation of concrete exposed to high temperature – damage and explosive spalling”, *Rilem Proc. PRO80 (Eds. E. Koenders, F. Dehn)*. Proc. 2nd International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Delft, 25-32 (2011).
- [9] Richter R.: Einsatz der Schallemissionsanalyse zur Detektion des Riss- und Abplatzungsverhaltens von Beton unter Brandeinwirkung. Diplomarbeit, Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (2009).
- [10] Richter R., Große C.U.: Schallemissionsverfahren zur Schädigungsanalyse bei Beton unter Brandeinwirkung. Konferenzbeitrag, DGZfP-Jahrestagung Erfurt (2010)
- [11] Richter R., Große C.U., Bosnjak J., Ozbolt J.: Schallemissionsanalyse und numerische Simulation zur Schädigungsanalyse bei Brandversuchen mit hochfestem Beton. Konferenzbeitrag, DGZfP-Jahrestagung Bremen (2011)