

Zerstörungsfreie Prüfmethode zur Beobachtung rheologischer Prozesse bei Frischbeton

Christian Große

Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München
Tel. +49.89.289.27221 · grosse@tum.de



Prof. Dr.-Ing. habil. Christian U. Große

Studium der Geophysik an der Universität Karlsruhe bis 1989

1996 Promotion im Bauingenieurwesen, Universität Stuttgart

Habilitation und Außerplanmäßiger Professor an der Universität Stuttgart

Stellvertretender Direktor der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart

Seit 2010 Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung an der TU München

Einleitung

Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Untersuchung rheologischer Eigenschaften von zementgebundenen Materialien zielen auf verschiedene Fragestellungen. So steht bei vielen Praxisanwendungen die Verarbeitbarkeit einer Betonmischung im Vordergrund bzw. die Bestimmung des Erstarrungsanfangs und des Erstarrungsendes. In dem Zusammenhang ist es interessant, dass die messtechnischen Möglichkeiten hier nicht voll ausgeschöpft werden und die angewendeten Verfahren entweder nicht zerstörungsfrei arbeiten oder nur rudimentäre Informationen über die ablaufenden rheologischen Prozesse liefern. Beispiele für diese etablierten Methoden sind die Ermittlung von Erstarrungsanfang und -ende bei Zementleim mit dem Vicat-Nadel-Versuch (DIN EN 196-3), Penetrationsverfahren nach ASTM C-403 für Beton oder die derzeit üblichen Rheometer. Einen Überblick über die in der Praxis angewandten Verfahren enthält die Literatur [1]. Der wesentliche Nachteil der meisten etablierten Verfahren ist, dass sie nur eine Momentauf-

nahme der Werkstoffeigenschaften ergeben und sich mit ihnen der Hydrationsverlauf nicht kontinuierlich untersuchen lässt. Zuverlässige zerstörungsfreie Aussagen, z. B. über die Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln wie Verflüssiger, Luftporenbildner oder Beschleuniger, können mit diesen Verfahren in der Regel nicht gewonnen werden. Notwendig wären Verfahren, die Daten auf der Basis von bekannten physikalischen, rheologischen oder chemischen Gesetzmäßigkeiten gewinnen und in der Lage sind, den Erstarungs- und Erhärtungsvorgang möglichst kontinuierlich zu verfolgen. Nur so können die aktuellen Ansprüche im Betonbau oder der Zusatzmittelindustrie für die Herstellung von Betonwaren erfüllt werden.

Arbeit der RILEM TC's 185-ATC und

Unter der Leitung von Prof. Hans-Wolf Reinhardt nahm 1999 das Komitee „Advanced testing of cement based materials during setting and hardening“ (TC 185-ATC) seine Arbeit auf. Die Methoden der im TC 185-ATC vertretenen Arbeitsgruppen stellen einen guten Querschnitt durch alle hierbei relevanten Verfahren dar. Dabei handelt es sich u. a. um das Kernspinnresonanzverfahren (NMR), elektrische Verfahren, Methoden auf der Basis von Ultraschall in Reflexion oder Durchschallung, die Schallemissionsanalyse, Reifegrad-Verfahren (maturity) oder die Radongas-Technik. Einige dieser Verfahren wurden im Rahmen einer Ringprüfung getestet, um ihre Handhabung, Zuverlässigkeit und Anwendbarkeit zu testen. Eine ausführliche Beschreibung mit weiterführender Literatur enthält der von den Mitgliedern zusammengestellte Sachstandsbericht [2].

Von den dort untersuchten Verfahren sind allerdings nur wenige geeignet, auch rheologische Untersuchungen zu unterstützen. Dazu zählen Verfahren, die elastische Wellen verwenden, wie die Ultraschalltechnik. In einem zweiten Komitee TC 218-SFC „Sonic methods for quality control of fresh cementitious materials“ wurden deshalb ultraschallbasierte Verfahren näher untersucht. Eines dieser Verfahren wurde dann im Rahmen einer „RILEM-Recommendation“ soweit ausgearbeitet [3], dass es als Standardverfahren für die Frischbetonprüfung einsetzbar ist. Es soll hier näher vorgestellt werden.

Ultraschall für die Frischbetonprüfung

Eine Arbeitsgruppe an der Universität Stuttgart [4-6] entwickelte seit Beginn der 90-er Jahre eine umfassende Ultraschall-Durchschallungs- und Analysetechnik. Die Veränderung von Amplitude, Geschwindigkeit und Frequenz der Ultraschallwellen wird dabei z. B. in Abhängigkeit vom Betonalter untersucht. Angewandt wurde das Verfahren bislang zur Analyse des Wasser-zu-Zement-Wertes, des Einflusses von Zusatzmitteln wie Beschleuniger oder Verzögerer und des Luftporengehalts. Eine kompakte Apparatur wurde entwickelt, die in der Lage ist, vollständig automatisierte Messungen durchzuführen (Bild 1). Neuere Veröffentlichungen berichten über die Wirkungsweise verschiedener Beschleuniger (Alkalialuminat- oder alkalifreie Beschleuniger),

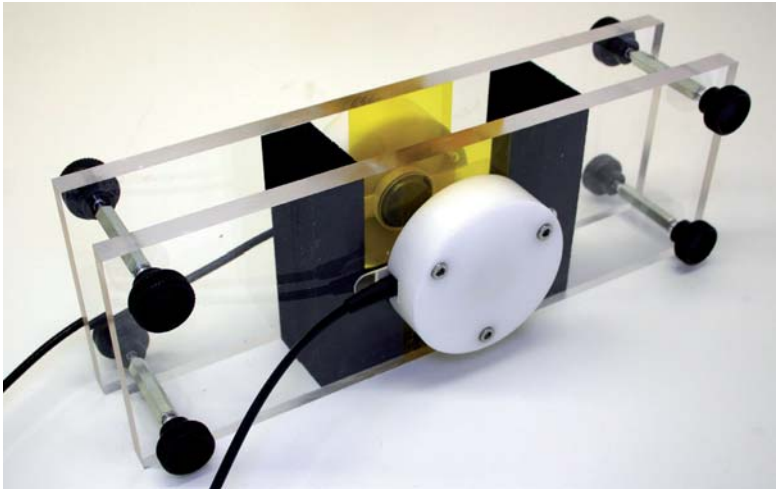
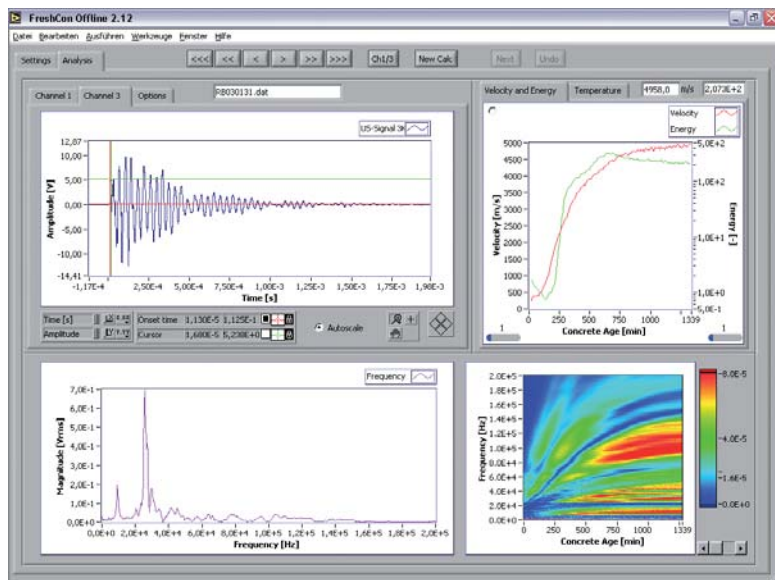


Bild 1 a: Ultraschallmessgerät FreshCon mit der entsprechenden Software (Teil b von Bild 1 , S.44) entwickelt an der Universität Stuttgart



dem Einfluss der Dosis sowie der Verträglichkeit zwischen Zement und Zusatzmittel [7]; ähnliche Untersuchungen betrafen den Einsatz von Flugasche im Zement bzw. Beton [8]. Für die Anwendung des Verfahrens in der Baupraxis ist die Korrelation mit etablierten Materialparametern interessant. Aus der automatischen Echtzeitbestimmung von Geschwindigkeit und Energie lässt sich im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit des Betons eine ebenfalls automatisierte Bestimmung von Erstarrungsbeginn und Erstarrungsende implementieren. Der Vergleich zu Kurven von Standardmischungen kann einen Überblick über das Materialverhalten und z. B. die Verarbeitbarkeit der Mischung geben. Da die Umgebungs- und die Hydratationstemperatur (in der FreshCon-Probe und im Bauteil) einen wesentlichen Einfluss auf diese Messungen haben, ist die zeitgleiche Messung dieser drei Temperaturen u. a. nach DIN EN 196-9 von Vorteil und kann die Aussagesicherheit erhöhen. Dies wurde ebenfalls beim FreshCon-Gerät implementiert. Eine Weiterentwicklung des Verfahrens stellt der Einsatz von Scherwellen dar. Damit lassen sich weitere Werkstoffparameter, wie Querdehnzahl σ_{dyn} , dynamischer E-Modul E_{dyn} oder auch dynamischer Schubmodul G_{dyn} wie folgt berechnen:

$$\sigma_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_p^2 - v_s^2}{v_p^2 - v_s^2}$$

$$E_{dyn} = \frac{(1 + \sigma_{dyn}) \cdot (1 - 2\sigma_{dyn})}{(1 - \sigma_{dyn})} \cdot v_p^2 \cdot \rho_c = (2 + 2\sigma_{dyn}) \cdot v_s^2 \cdot \rho_c$$

$$G_{dyn} = \frac{E_{dyn}}{2 + 2\sigma_{dyn}} = v_s^2 \cdot \rho_c$$

Eingabeparameter für die Berechnung sind dabei die Rochdichte ρ_c sowie die mit dem Gerät ermittelten Schallgeschwindigkeiten der P- und der S-Welle v_p und v_s [9]. Obwohl die Festigkeitsentwicklung mit den dynamischen Materialparametern nicht direkt bestimmt werden kann, stellen die ermittelten elastischen Materialparameter gute Bewertungskriterien für die Rheologie, den Hydratationsprozess und damit der Festigkeitsentwicklung dar.

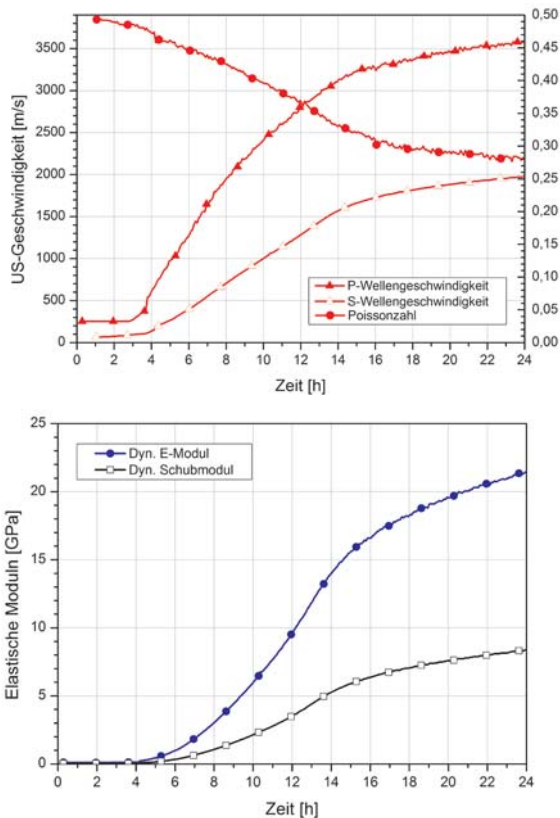


Bild 2: Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeiten und der elastischen Materialparameter während der Erstarrung und Erhärtung eines Zementmörtels [10].

Bild 2 zeigt das Ergebnis einer Messreihe mit Scherwellen an einem ultrahochfesten Beton (UHPC) während der ersten 33,5 Stunden der Erhärtung. Aufgetragen sind die einzelnen Ultraschallsignale über der Erhärtungszeit, wobei die Signalamplituden farblich kodiert sind.

Zusammenfassung

Mit Ultraschallverfahren können detaillierte Informationen über rheologische Prozesse kontinuierlich gewonnen werden [11]. Durch die kombinierte P- und S-Wellenmessung ist es möglich, elastische Materialparameter direkt zu bestimmen [10, 12]. Dabei erlauben verschiedene Signalanalyseverfahren die weitgehende Automatisierung der Messdurchführung, was neben dem verminderten Aufwand sehr gut reproduzierbare Ergebnisse liefert. Mit der kombinierten Kompressions- und Scherwellenprüfung steht ein zuverlässiges Untersuchungsverfahren zur Verfügung, welches differenzierte Materialanalysen, z. B. zur Wirkungsweise von Betonzusatzmitteln, ermöglicht.

Literaturverzeichnis

- [1] Bunke, N.: Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft Nr. 422, Berlin (1991)
- [2] Reinhardt, H.-W., Große, C.U. (Eds.): Advanced testing of cement based materials during setting and hardening. RILEM Report 31. Bagnoux: 2005, 341 pp.
- [3] Reinhardt, H.W.: Recommendation of RILEM TC 218-SFC: Sonic methods for quality control of fresh cementitious materials - Testing of fresh concrete by ultrasound transmission. Materials and Structures, Juli 2011, Nr 44, S. 1047-1062.
- [4] Reinhardt H.W., Grosse C.U. (2004): Continuous monitoring of setting and hardening of mortar and concrete. J. of Constr. and Build. Mat. Vol. 18, No. 3, 145-154.
- [5] Reinhardt, H.W.; Große, C.U.; Herb, A.; Weiler, B.; Schmidt, G.: Verfahren zur Untersuchung eines erstarrenden und/oder erhärtenden Werkstoffs mittels Ultraschall. Method for examining a solidifying and/or hardening material using ultrasound, receptacle and ultrasound sensor for carrying out the method. US Patent no. 09/857, 536; Patent Nr. 198 56 259.4, Germany and Europe, (2001)
- [6] Große, C.U.: Qualitätssicherung von Betonwaren - Frischbetonanalyse mit Ultraschall. Betonwerk+Fertigteil-Technik 71 (2005), Heft 6, S. 26-32.
- [7] De Belie N., Große C.U., Kurz, J.H., Reinhardt H.W. (2005): Ultrasound monitoring of binding and hardening of shotcrete including different accelerating admixtures and cement types. Cement and Concrete Res. Vol. 35 (2005), No. 11, pp 2087-2094.
- [8] De Belie N., Große C.U., Baert G. (2005): Setting and hardening behaviour using ultrasound and compressive strength development of concrete with different replacement levels of cement by fly ash. Proc. 2nd International Symposium on Non-traditional Cement and Concrete. Brno, 14-16 June 2005, 187-198.

- [9] Reinhardt, H.-W.; Große C.U.: Mechanical wave propagation - basics, Chapter 4.1 in: Advanced testing of cement-based materials during setting and hardening, Reinhardt & Grosse (Eds.), RILEM Report 31, RILEM Publ. S.A.R.L.: Cachan ENS, 2005, pp 83-96.
- [10] Krüger, M.; Große C.U.; Lehmann, F.; Reinhardt, H.-W.: Zuverlässige Qualitätssicherung von Frischbeton mit Ultraschall – das FreshCon-System. Messtechnik im Bauwesen, Special 2011, Ernst & Sohn Verlag, S. 88-92.
- [11] Robeyst N.: Monitoring setting and microstructure development in fresh concrete with the ultrasonic through-transmission method. Dissertation, University of Ghent, Belgium, 2009, 261 pp.
- [12] Heiduck, D.: Untersuchung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens von Mörtel mit Kompressions- und Scherwellen. Diplomarbeit, MPA Universität Stuttgart, 2009.