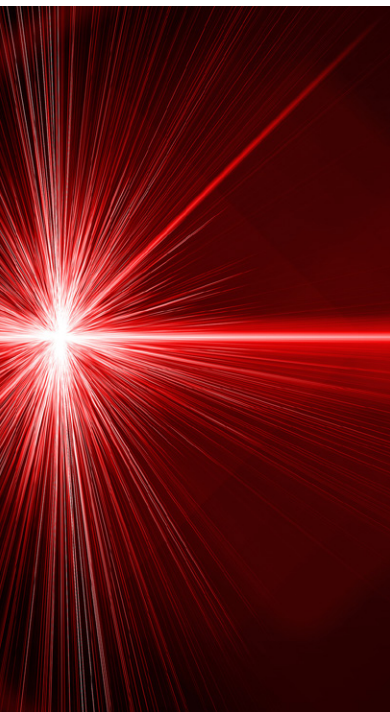




Laser-Ultraschall zur Charakterisierung von Zementwerkstoffen

Aushärtvorgänge berührungslos untersuchen
Applikationsnote



Dieser Beitrag berichtet über Laser-Ultraschall zur berührungslosen Untersuchung auf zementgebundenen Baustoffen während des Erstarrens und Erhärtens. Der Schall wird opto-akustisch durch einen kurzgepulsten Nd:YAG-Laser angeregt und nach Durchtritt durch die Probe interferometrisch per Laser-vibrometer erfasst.



Durch die Wahl geeigneter Materialien und Laserstrahlparameter wurde eine reproduzierbare Schallanregung erreicht, die es ermöglicht, neben der Bestimmung der Schallgeschwindigkeit eine interferometrische Erfassung und Auswertung der Ultraschall-induzierten Auslenkung der Oberfläche vorzunehmen.

Laser-Ultraschall zur Charakterisierung von Werkstoffeigenschaften

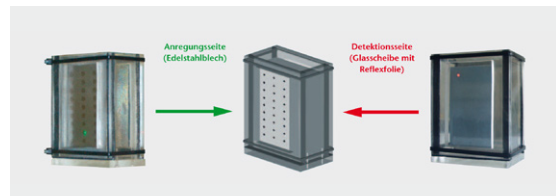
Für die Werkstoffforschung und Qualitätssicherung, aber auch für die Planung und Ausführung von Bauvorhaben ist die Kenntnis der zeitlichen und lokalen Änderungen der Materialeigenschaften zementgebundener Systeme von wesentlicher Bedeutung. Die Materialeigenschaften können mithilfe von Ultraschallparametern beschrieben werden. Beispiele sind die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Longitudinalwelle v_p , die Amplitude der Auslenkung beim Ersteinsatz sowie der übertragene Frequenzgehalt. Zementgebundene Baustoffe weisen unmittelbar nach dem Anmischen eine große Dämpfung gegenüber Ultraschallwellen verbunden mit einer niedrigen Schallgeschwindigkeit v_p auf. In Abhängigkeit vom Verlauf der Gefügeentwicklung nehmen die Schallgeschwindigkeiten bzw. Signalamplituden dann kontinuierlich zu. Die zeitliche Entwicklung der Schallgeschwindigkeit v_p hängt von den verwendeten Zementen, Zusatzmitteln bzw.

-stoffen, aber auch vom Verhältnis Wasser zu Zement (w/z-Wert), von der verwendeten Gesteinskörnung und vom Luftporengehalt ab. Laser-Ultraschallverfahren sind attraktiv für eine Reihe von Anwendungen, da die Untersuchungsobjekte ohne mechanischen Kontakt und weitestgehend rückwirkungsfrei aus Entfernungen von mehreren Metern untersucht werden können. Gepulste Laser ermöglichen dabei eine berührungslose Anregung von Longitudinal-, Scher- und Oberflächenwellen direkt auf den exponierten Oberflächen. Mit Laservibratoren erfolgt dann die berührungslose Erfassung der Ultraschall-induzierten Auslenkung der Oberfläche. Im Folgenden wird ein Versuchsaufbau beschrieben, der die Anwendung des Ultraschall-Transmissionsverfahrens für die Untersuchung von Zementleimen und Mörteln ermöglicht.



Versuchsaufbau

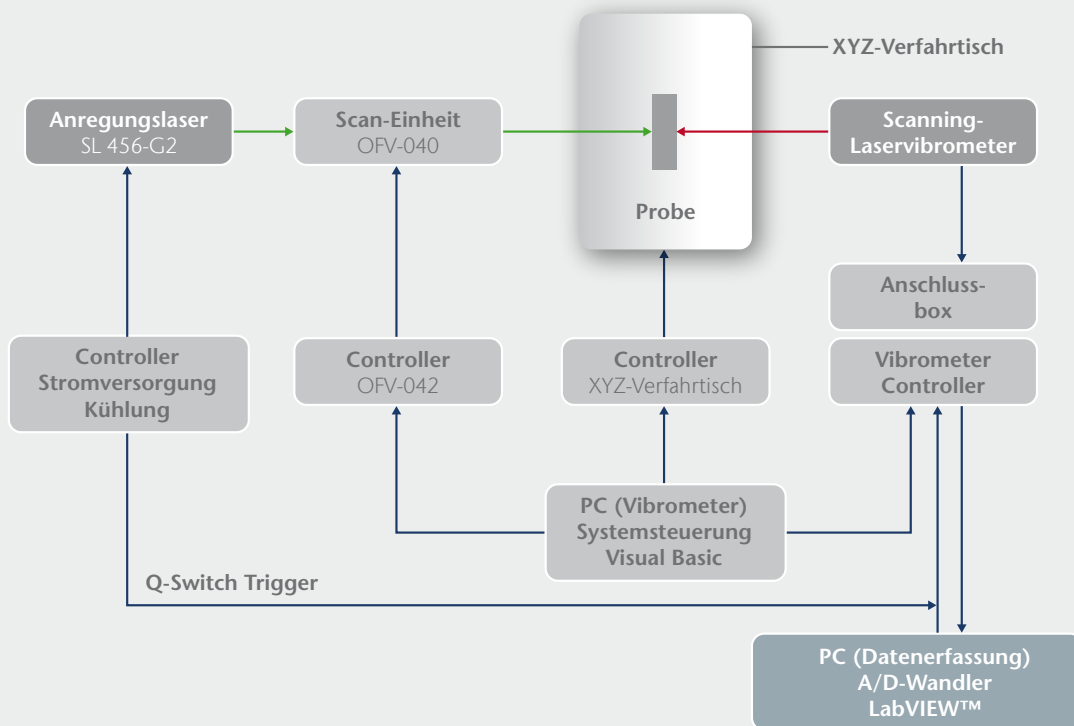
Die prinzipielle Geräteanordnung ist in Bild 1 dargestellt. Zur laserinduzierten Schallanregung wird ein kurzgepulster Nd:YAG-Festkörperlaser mit einer Wellenlänge von 1064 nm verwendet (Bild 2). Für die Aufnahme der Proben wurde eine spezielle Prüfform entwickelt, die eine laserinduzierte Schallanregung und -detektion von Ultraschallwellen zulässt (Bild 3). Zur Detektion der angeregten Ultraschallwellen wird ein Scanning-Laservibrometer eingesetzt. Dabei wurde auf der Probe ein Messgitter mit jeweils 27 gegenüberliegenden Punktpaaren definiert. Die Datenauswertung erfolgte mit einem in LabView™ implementierten Algorithmus, der die automatische Detektion des Zeitpunktes des Ersteinsatzes der Longitudinalwelle und weiterer Signalparameter wie z. B. Erstamplitude, Frequenzgehalt und Signal-Rausch-Verhältnis ermöglicht.



2
Versuchs-
anordnung
Mitte: Positionier-
system mit Probe;
rechts hinten:
Anregungslaser
mit Scanner;
links: Scanning-
Laservibrometer

3
Prüfform zur
laserinduzierten
Durchschallung

1
Schematischer
Versuchsaufbau



Experimentelle Ergebnisse

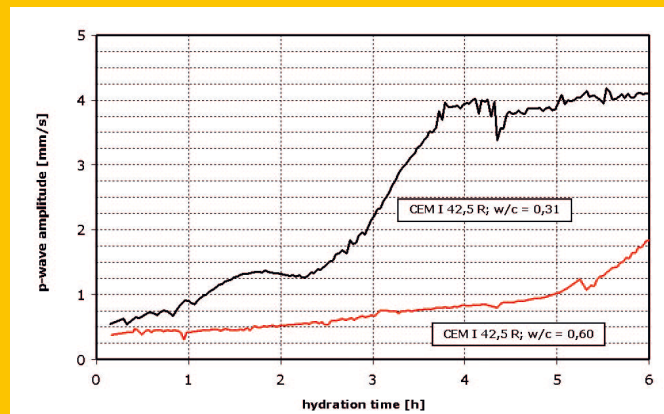
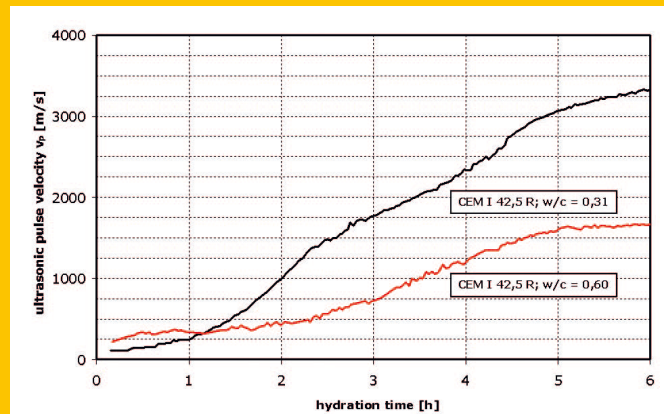
Mit dem vorgestellten Versuchsaufbau wurden kontinuierliche Untersuchungen während der Hydratation von zementgebundenen Baustoffen vorgenommen und die lokale Verteilung der Schallgeschwindigkeit v_p zu festgelegten Zeitpunkten bestimmt. Untersucht wurden u. a. zwei Zementleim-Proben mit unterschiedlichem Wasser/Zement-Verhältnis (w/z -Wert) sowie Mörtelproben mit verschiedenen Kornzusammensetzungen.

Bild 4 zeigt die mit Laser-Ultraschall an zwei Zementleim-Proben ermittelte Entwicklung der Schallgeschwindigkeit v_p . Die Messempfindlichkeit erweist sich als sensibel genug, eine Durchschallung dieser zunächst stark dämpfenden Systeme vorzunehmen.

Im Verlauf der Gefügeentwicklung kommt es bei beiden Versuchsmischungen zu einem Ansteigen der Schallgeschwindigkeit. Der Zementleim mit dem niedrigeren w/z -Wert zeigt einen deutlich stärkeren Anstieg der Schallgeschwindigkeit. Dagegen führt eine größere Wasserzugabe zu einem verzögerten und zugleich flacheren Verlauf. Bild 5 zeigt die zeitliche Entwicklung der Erstamplitude der Longitudinalwelle. Der Zementleim mit einem geringeren w/z -Wert weist gegenüber dem Zementleim mit einem höheren w/z -Wert einen früheren und steileren Anstieg auf. Im weiteren Verlauf der Gefügeentwicklung zeigt sich der Einfluss von Schwindprozessen auf die Ankopplungsbedingungen. Die Parameter Schallgeschwindigkeit v_p und die Geschwindigkeitsamplitude der Longitudinalwelle ermöglichen somit eine kontinuierliche Bewertung der Hydratationskinetik.

4

Schallgeschwindigkeitsverlauf v_p von Zementleim, Variation des w/z -Wertes



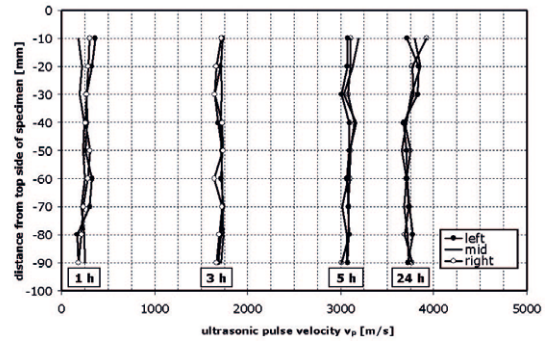
5

Erstamplitude der Longitudinalwelle von Zementleim, Variation des w/z -Wertes

Lokale Verteilung elastischer Parameter

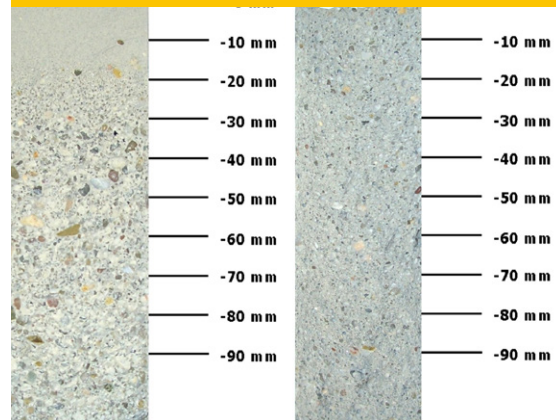
In Bild 6 ist die an einem Zementleim mit einem w/z -Wert von 0,31 bestimmte Verteilung der Schallgeschwindigkeit v_p zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Hydratationsbeginn dargestellt. Zu jedem Untersuchungszeitpunkt wurden über den gesamten Probekörper vergleichbare Schallgeschwindigkeiten ermittelt, d. h. die Probe ist in der Höhe und Breite homogen (Bild 7, rechts). Der Vergleich der Schallgeschwindigkeiten der Untersuchungszeitpunkte untereinander ermöglicht auch hier eine Bewertung der Hydratationskinetik.

In Bild 8 ist die an einer Mörtelprobe bestimmte Verteilung der Schallgeschwindigkeit v_p zu einem Zeitpunkt von 5 bzw. 24 Stunden nach Hydratationsbeginn dargestellt. Über die Probekörperhöhe sind deutliche Unterschiede in den Schallgeschwindigkeiten ersichtlich. Im unteren Bereich der Probe werden größere Schallgeschwindigkeiten erreicht, die sich aus einem größeren Gehalt an Gesteinskörnung ergeben. Dies wird auf eine ungenügende Sedimentationsbeständigkeit dieses Mörtels zurückgeführt. Dabei kommt es vor dem Ansteifen zum Absinken der groben Bestandteile der Gesteinskörnung und zur Anreicherung von Feinmörtel im oberen Bereich. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der visuellen Bewertung (Bild 7, links). Mithilfe des laserbasierten Ultraschall-Transmissionsverfahrens kann somit eine zerstörungsfreie Bewertung lokaler Gefügeunterschiede senkrecht zur Durchschallungsrichtung erreicht werden.



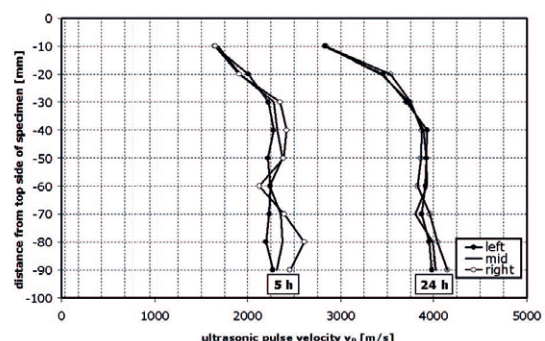
6

Verteilung der Schallgeschwindigkeit v_p über einen homogenen Probekörper



7

Bruchflächen der untersuchten Mörtel: Mörtel M1 mit Sedimentationserscheinungen (links) und homogener Mörtel M2 (rechts)



8

Mörtel M1 – räumliche Verteilung der Schallgeschwindigkeit v_p in einer inhomogenen Mörtelprobe



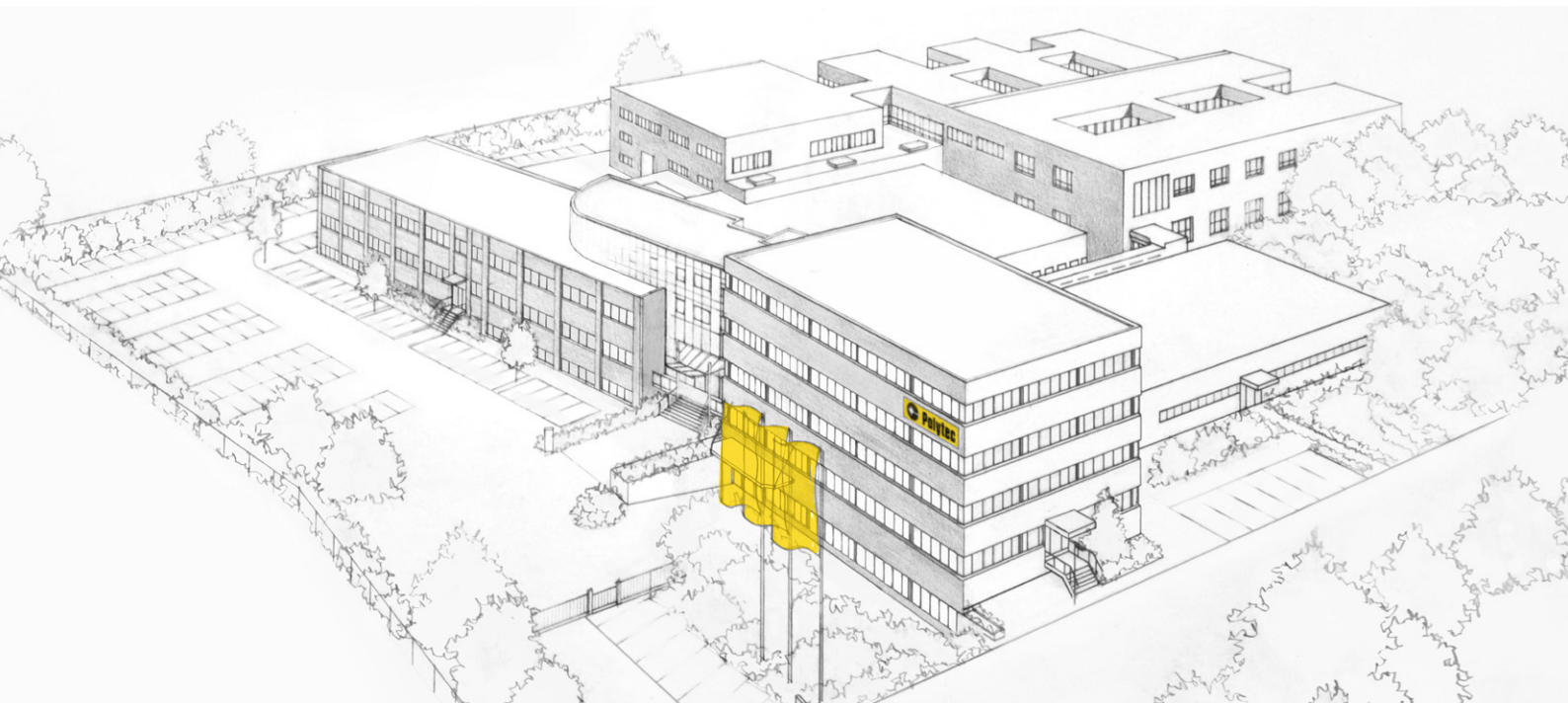
Fazit

Wie die Ergebnisse zeigen, kann das Laser-Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien und berührungslosen Untersuchung von erstarrenden und erhärtenden Baustoffen eingesetzt werden. Die zeitlichen und lokalen Änderungen der Ultraschallparameter eignen sich gut zur Beschreibung der Materialeigenschaften, wobei speziell die Schallgeschwindigkeit v_p und die Auslenkungsamplitude der Longitudinalwelle eine kontinuierliche Bewertung der Hydratationskinetik ermöglichen. Senkrecht zur Durchschallungsrichtung können lokale Unterschiede in der Mischungszusammensetzung der untersuchten Zementleime und Mörtel nachgewiesen werden. Dies ermöglicht die zerstörungsfreie Bewertung der Sedimentationsstabilität derartiger Gemische.

Der im Beitrag beschriebene Versuchsaufbau erlaubt zunächst nur die Detektion von flächennormalen Auslenkungen (out-of-plane). Untersuchungen mit einem Polytec PSV 3D-Scanning Vibrometer haben gezeigt, dass an hydratisierenden Zementen neben der Longitudinalwelle auch die Ausbreitungsgeschwindigkeiten transversaler Schwingungskomponenten simultan erfasst werden können. Dies stellt einen interessanten Ansatz dar, der eine umfassendere Beurteilung der untersuchten Werkstoffe durch die Berechnung der elastischen Größen Elastizitätsmodul und Poissonzahl ermöglicht.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark,
Dr.-Ing. Wolfgang Erfurt und
Dipl.-Ing. René Tatarin
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde
der Bauhaus-Universität Weimar
Quelle: Polytec InFocus



Polytec GmbH
Polytec-Platz 1-7
76337 Waldbronn
Tel. +49 7243 604-0
info@polytec.de

Polytec GmbH
Vertriebs- und
Beratungsbüro
Schwarzschildstraße 1
12489 Berlin
Tel. +49 30 6392-5140



Polytec, Inc.
(USA)
North American
Headquarters
16400 Bake Parkway
Suites 150 & 200
Irvine, CA 92618
Tel. +1 949 943-3033
info@polytec.com

Central Office
1046 Baker Road
Dexter, MI 48130
Tel. +1 734 253-9428

East Coast Office
1 Cabot Road
Suites 101 & 102
Hudson, MA 01749
Tel. +1 508 417-1040



Polytec Ltd.
(Great Britain)
Lambda House
Batford Mill
Harpden, Herts AL5 5BZ
Tel. +44 1582 711670
info@polytec-ltd.co.uk



Polytec France S.A.S.
Technosud II
Bâtiment A
99, Rue Pierre Semard
92320 Châtillon
Tel. +33 1 496569-00
info@polytec.fr



Polytec Japan
Arena Tower, 13th floor
3-1-9, Shinyokohama
Kohoku-ku, Yokohama-shi
Kanagawa 222-0033
Tel. +81 45 478-6980
info@polytec.co.jp



Polytec South-East Asia
Pte Ltd
Blk 4010 Ang Mo Kio Ave 10
#06-06 TechPlace 1
Singapore 569626
Tel. +65 64510886
info@polytec-sea.com



Polytec China Ltd.
Room 402, Tower B
Minmetals Plaza
No. 5 Chaoyang North Ave
Dongcheng District
100010 Beijing
Tel. +86 10 65682591
info-cn@polytec.com