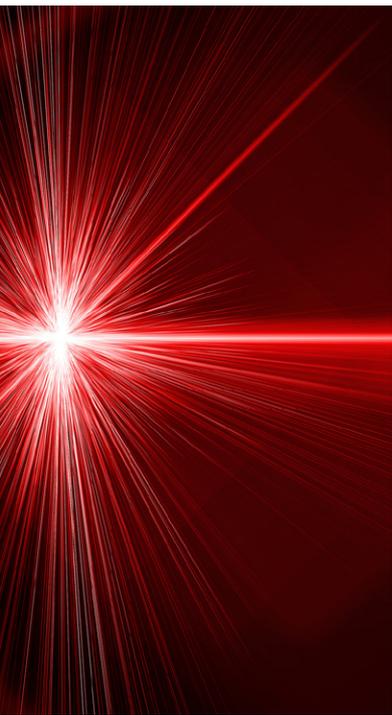


## Laser-Ultraschall zur Charakterisierung von Zementwerkstoffen



## 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

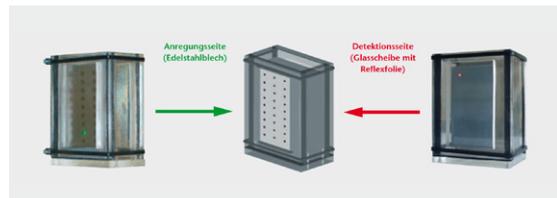
Für die Werkstoffforschung und Qualitätssicherung, aber auch für die Planung und Ausführung von Bauvorhaben ist die Kenntnis der zeitlichen und lokalen Änderungen der Materialeigenschaften zementgebundener Systeme von wesentlicher Bedeutung. Die Materialeigenschaften können mithilfe von Ultraschallparametern 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.



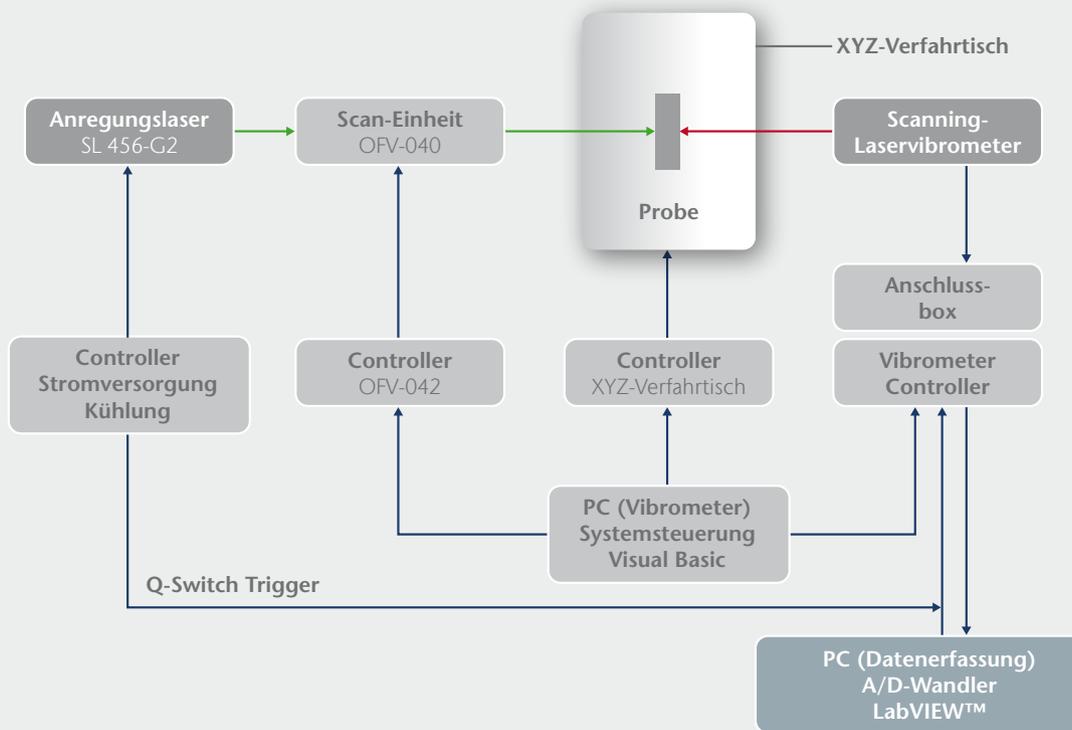
## Versuchsaufbau

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** Versuchsanordnung  
Mitte: Positioniersystem mit Probe;  
rechts hinten: Anregungslaser mit Scanner;  
links: Scanning-Laservibrometer

**3** Prüfform zur laserinduzierten Durchschallung



**1** Schematischer Versuchsaufbau

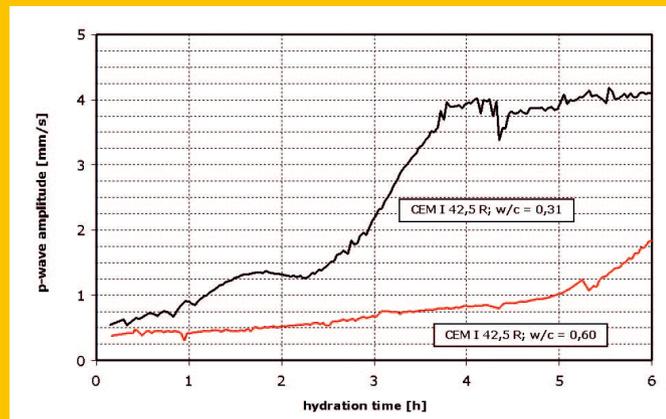
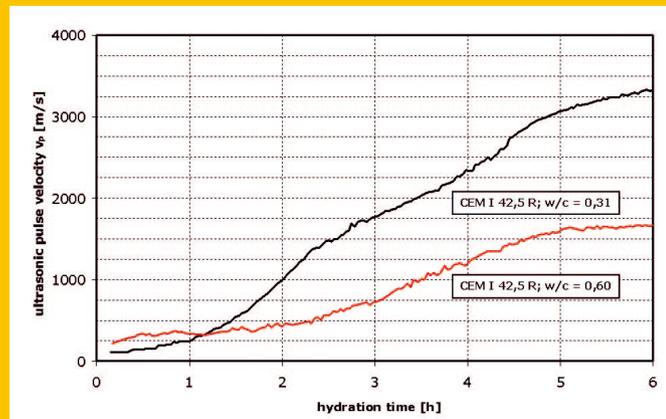
## Experimentelle Ergebnisse

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

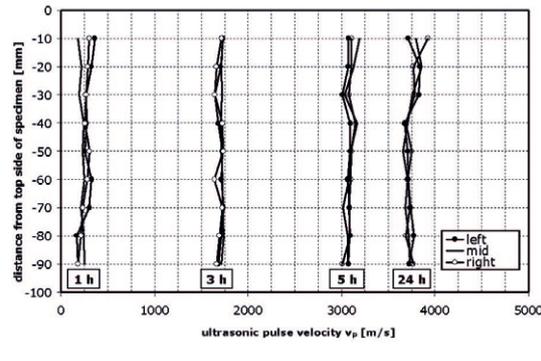


**5**  
Erstamplitude der Longitudinalwelle von Zementleim, Variation des  $w/z$ -Wertes

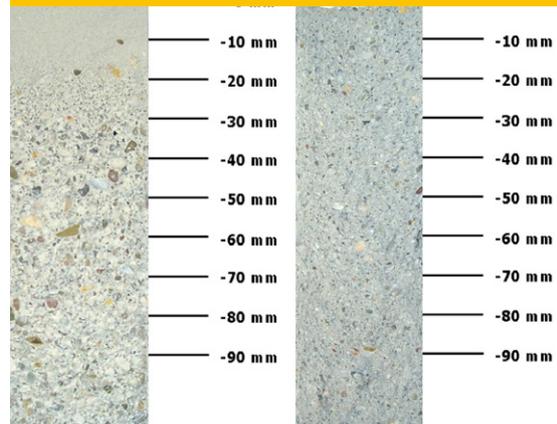
### Lokale Verteilung elastischer Parameter

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.

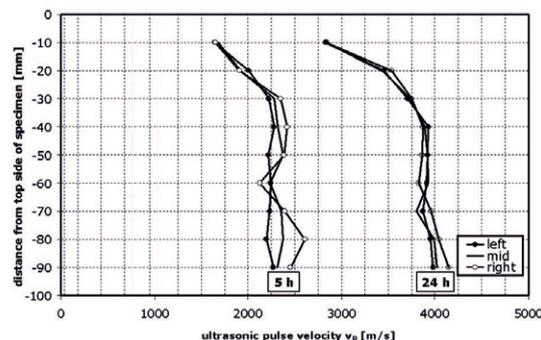
In Bild 8 ist die an einer Mörtelprobe bestimmte Verteilung der Schallgeschwindigkeit  $v_p$  zu einem Zeitpunkt von 5 bzw. 24 Stunden nach Hydratationsbeginn dargestellt. Über die Probekörperhöhe sind deutliche Unterschiede in den Schallgeschwindigkeiten ersichtlich. Im unteren Bereich der Probe werden 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



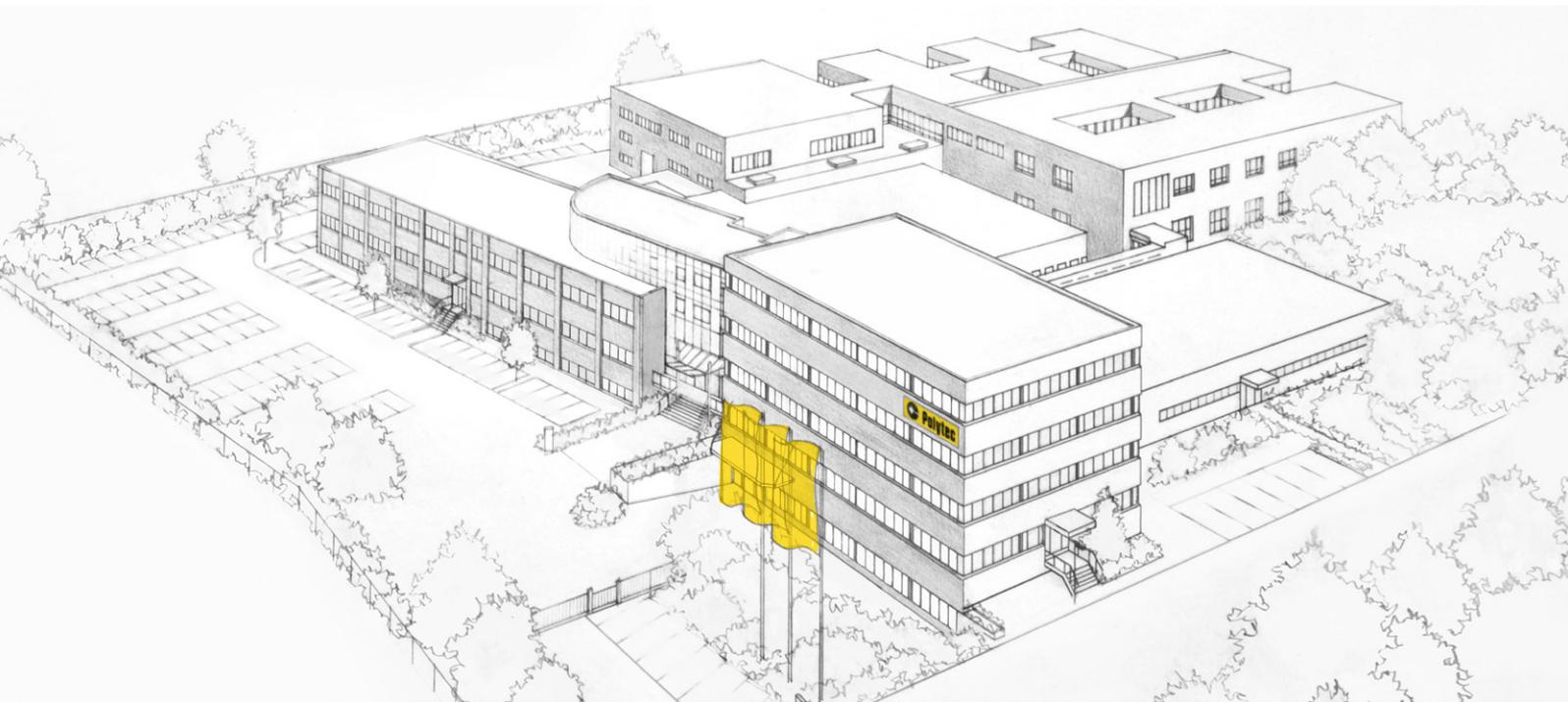
## Fazit

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  
 Harpenden, 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