

Bauhaus-Universität Weimar
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde

2. Baustoffkolloquium

am 1. und 2. Oktober 2001 in Weimar

gemeinsam veranstaltet durch:

- Bauhaus-Universität Weimar
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde
- TU Bergakademie Freiberg
Institut für Bergbau
- Industrieverband Steine und Erden
Transportbeton, Mörtel und Asphalt
Thüringen und Sachsen-Anhalt e.V.
- Steine- und Erden-Industrieverband Sachsen e.V.

Tagungsband



Berührungslos arbeitendes Ultraschallmeßverfahren für die Bauwerksdiagnose

Wolfgang Erfurt, Wolfram Köhler, Jochen Stark

1 Problemstellung

Sollen an Bauwerken Umnutzungskonzepte realisiert werden, so ist es zur Lösung dieser Aufgabenstellung dringend erforderlich, die Homogenitäts- und Festigkeitseigenschaften der im Bauwerk miteinander verbundenen Bauwerksteile (z.B. Decken- und Wandelemente) zu kennen. Die traditionellen Untersuchungsmethoden zur Bestimmung dieser Eigenschaften bestehen in der Anwendung des Rückprallhammers, der Entnahme von Bohrkernen und in der Durchführung von Sondierbohrungen für endoskopische Untersuchungen. Die Anwendung des Rückprallhammers führt nur zu Festigkeitsaussagen im oberflächennahen Bereich der Betonoberfläche und setzt zusätzlich eine Kalibrierung an Betonprobekörpern bekannter Festigkeit voraus. Die Untersuchung von Bohrkernen, die hinsichtlich der erzielten Prüfergebnisse zwar eindeutig ist, kann jedoch aufgrund des zerstörenden Charakters des Prüfverfahrens immer nur für eine punktuelle Ermittlung der jeweiligen Betonfestigkeit angewendet werden. Der gleiche Sachverhalt ist für die Anwendung der Endoskopie zutreffend. Statistisch gesicherte Aussagen sind somit nicht erreichbar. Die Lösung dieser Problematik kann nur in der Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren gesucht werden. Dazu zählt das traditionelle Ultraschall-Impulslaufzeitverfahren. Dieses Verfahren erfüllt die gestellten Anforderungen zur Gewährleistung eines schonenden Eingriffs in die Bausubstanz, jedoch sind zur Durchführung von großflächigen Untersuchungen mit schneller Meßabfolge und beliebigen Meßrastern zusätzliche verfahrens- und meßtechnische Optimierungen erforderlich. Dies begründet sich aus dem gegenwärtigen technischen Stand des Ultraschallverfahrens, der wie folgt charakterisiert werden kann:

- ◆ Homogenitätsuntersuchungen erfordern ein präzises Einmessen von deckungsgleichen Meßrastern für die Schallgeber und -empfängerpositionen.
- ◆ Hoher zeitlicher Aufwand zum Auftragen des Ankoppelmittels auf die Schallwandler und zur Durchführung der Impulslaufzeitmessungen.
- ◆ Hohe, nicht reproduzierbare Signaldämpfung, bedingt durch die mechanische Ankopplung.
- ◆ Die Durchführung von Dämpfungsmessungen ist aufgrund des Einflusses der mechanischen Ankopplung am Bauwerk praktisch nicht möglich.
- ◆ Eine s-Wellenanregung an Bauwerksteilen erfordert eine möglichst starre Ankopplung (Verwendung aushärtender Ankoppelmittel), die nur mit einem hohen Zeitaufwand realisiert werden könnte.
- ◆ Die mechanische Ankopplung ist geprägt von feststehenden Ankopplflächen und nur fest einstellbaren Anregungsfrequenzen.

Die verfahrenstechnische Lösung dieser Problematik soll durch einen schrittweisen Aufbau eines berührungslos arbeitenden Meßverfahrens durch Anwendung der Lasertechnik erreicht werden. Aus der Anwendung moderner Lasertechniken können folgende Vorteile abgeleitet werden:

- ◆ Wegfall der kostenintensiven Einrüstung von Untersuchungsflächen
- ◆ Wegfall der aufwendigen Markierung von Meßstellen
- ◆ Realisierung einer hohen Meßpunktdichte und Meßgeschwindigkeit
- ◆ Anregung unterschiedlicher Wellenarten

Laserinduzierte Schallgeschwindigkeitsmessungen zur Bestimmung von Homogenitätseigenschaften des Betons sollen auch die Abschätzung der Verteilung von Festigkeitseigenschaften erleichtern. Hierzu werden entsprechend den Empfehlungen des DAFStb, Heft 422 [1], aus Bereichen unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit, gezielt Bohrkern entnommen, die nach erneuter Durchschallung einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen werden. Die Korrelationsbeziehung zwischen der zerstörungsfrei (Ultraschall) gemessenen Schallgeschwindigkeit V_L und der zerstörend ermittelten Druckfestigkeit β_D kann dann für weitere Untersuchungen am betreffenden Bauwerk unter der Voraussetzung einer gleichen Betonrezeptur zur Abschätzung der Verteilung von Festigkeiten benutzt werden. Auf die Einbeziehung der Schallgeschwindigkeit und der Betonrezeptur zur Berechnung von Festigkeitsunterschieden von Altbeton ohne einer nachträglich an Bohrkernen erstellten Korrelationsbeziehung zwischen V_L und β_D soll an anderer Stelle eingegangen werden.

2 Konzipierung der berührungslosen Meßmethode

Der schrittweise Aufbau optischer Anregungs- und Meßverfahren zur Schallgeschwindigkeitsmessung erfolgte im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 524, Teilprojekt B1. Dieses Projekt wird durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert.

2.1 Laserinduzierte Schwingungsanregung

Die technologischen Möglichkeiten, mit Laser berührungslos Schallwellen anzuregen, werden z.B. von KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER [2], DEUTSCH et al. [3] und MEYER et al. [4] für metallische Werkstoffe beschrieben. Die durch einen möglichst kurzen Laserimpuls induzierte Wärmeentwicklung in einer extrem dünnen Oberflächenschicht führt zur Entstehung von thermomechanischen Spannungen, die benachbarte Volumenelemente zu hochfrequenten Schwingungen anregen. Dabei wird in Abhängigkeit von der Leistungsdichte des Laserstrahls in einen thermoelastischen und in einen ablativen Anregungsprozeß (mit Plasmabildung) unterschieden. Nach [4] liegt der Übergangsbereich zur Plasmabildung bei einer Impulsleistungsdichte des Lasers für metallische Werkstoffe bei $> 10 \text{ MW/cm}^2$ (Dieser hohe Wert ist durch die Pulsdauer des Laserstrahls im Nanosekundenbereich bedingt). Die Strahlparameter Wellenlänge und Energiedichte haben entscheidenden Einfluß auf die sich ausbildende Wellenart und deren Frequenzgehalt. So erfordert die Anregung höherer Frequenzbereiche eine kürzere Impulsdauer. Erfolgt die Anregung von Schallwellen ohne Plasmabildung, so besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Schalldruckamplitude und Energiedichte. Prinzipiell können mit Laser in Abhängigkeit von der Energiedichte alle Wellenarten angeregt werden. Erfolgt eine verstärkte optische Bündelung des Laserstrahls, so dominiert mit zunehmender Energiedichte aufgrund der Rückstoßkraft des Plasmas die longitudinale Schwingungsrichtung [2, 4].

2.2 Laserinterferometrie

Oberflächenbewegungen, die z.B. durch Schallwellen verursacht werden, können berührungslos durch Anwendung der Laserinterferometrie detektiert werden. Dazu werden Zweistrahl-Interferometer benutzt, welche kohärentes Licht in Teilbündel aufteilen, die nach Durchlaufen unterschiedlich langer optischer Wegstrecken zur Interferenz gebracht werden. Die Aufteilung des Laserstrahles erfolgt mit einem halbdurchlässigen Spiegel (Strahlteiler) in einen Referenzstrahl und in einen Meßstrahl, der auf die Oberfläche des Meßobjektes gerichtet ist. Der Referenzstrahl wird über einen Spiegel zur Fotозelle reflektiert und mit dem von der Betonoberfläche reflektierten Meßstrahl überlagert. Die Frequenzdifferenz bewirkt eine Helligkeitsmodulation an der Fотозelle, so daß ein elektrisches Signal ausgegeben wird [2].

3 Versuche und Auswertung

Zur Realisierung eines kompletten optischen Meßsystems wurden folgende Arbeitsschritte konzipiert, die in Bild 1 dargestellt sind.

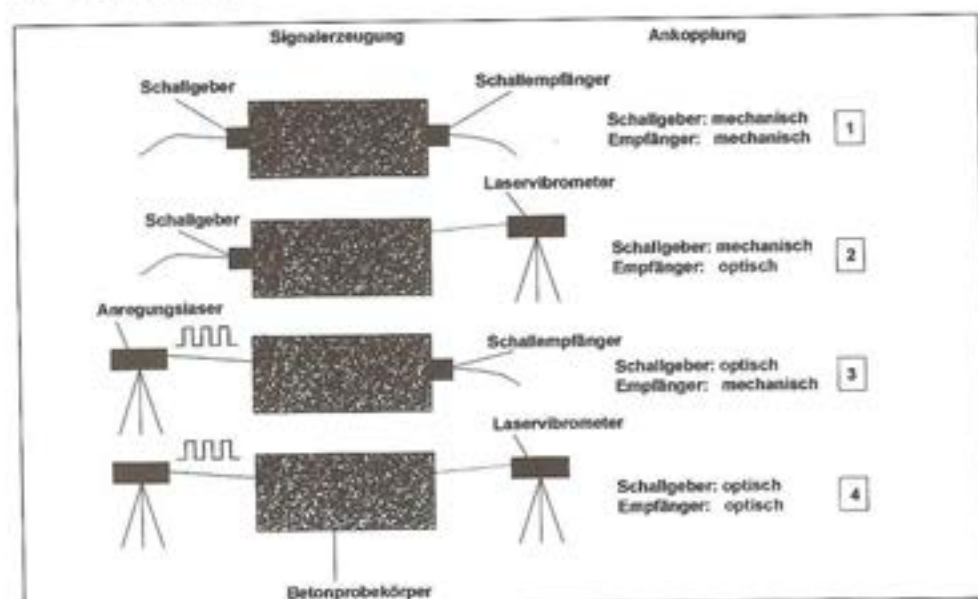
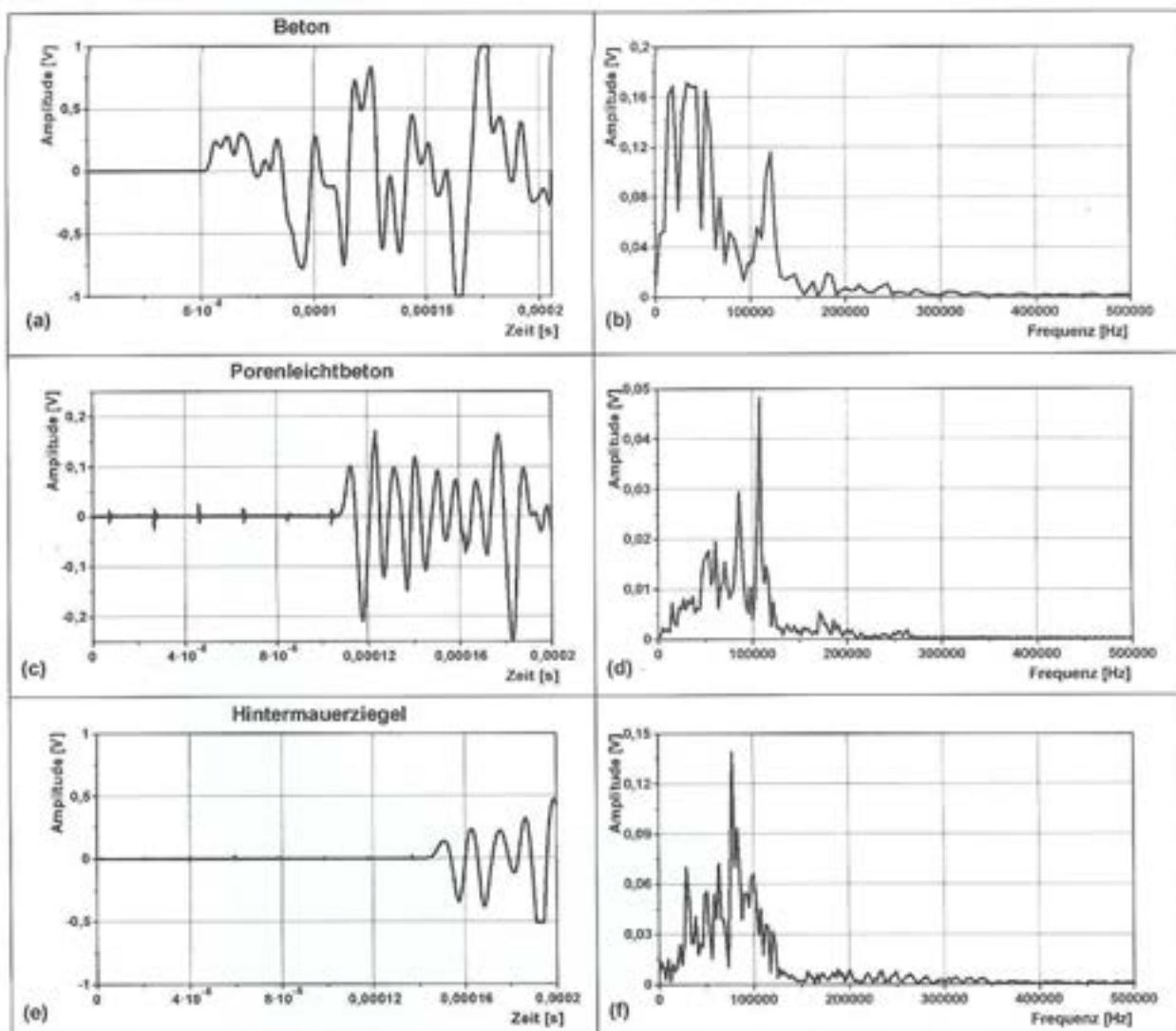


Bild 1: Versuchsvarianten zum Aufbau eines optischen Meßsystems

Die Versuche zur laserinduzierten Schallanregung wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) in Dresden durchgeführt. Für die Versuche zur Signalaufnahme stand ein eigenes Laservibrometer zur Verfügung.

3.1 Anregung von Schallwellen in Baustoffen

Die experimentellen Versuche (Bild 1, Variante 3) zur Anregung von Schallwellen wurden mit einem Festkörperlaser durchgeführt, dessen aktives Medium ein Neodym-YAG-Kristall ist. Reiner YAG (Yttrium-Aluminium-Granat) ist ein farbloser, optisch isotroper Granat mit kubischer Struktur, der mit Nd_2O_3 dotiert ist. Die emittierte Wellenlänge der Grundwelle liegt bei 1064 nm. Als Schallempfänger wurde ein breitbandiger Schwingungsaufnehmer der Baureihe UPE der Firma GEOTRON verwendet, der während der Laserversuche mit einem aushärtenden Ankoppelmittel mit dem Probekörper verbunden war. Die Ultraschallsignale wurden mit einem Transientenrecorder digitalisiert und gespeichert. Die zur Anregung der Schallwellen benötigte Impulsleistungsdichte betrug 20 bis 100 MW/mm^2 , bei einer Laserenergie von 0,2 bis 1,0 J. Bild 2a-k verdeutlicht die digitalisierten Zeitsignale und die Amplitudenspektren der untersuchten Baustoffe.



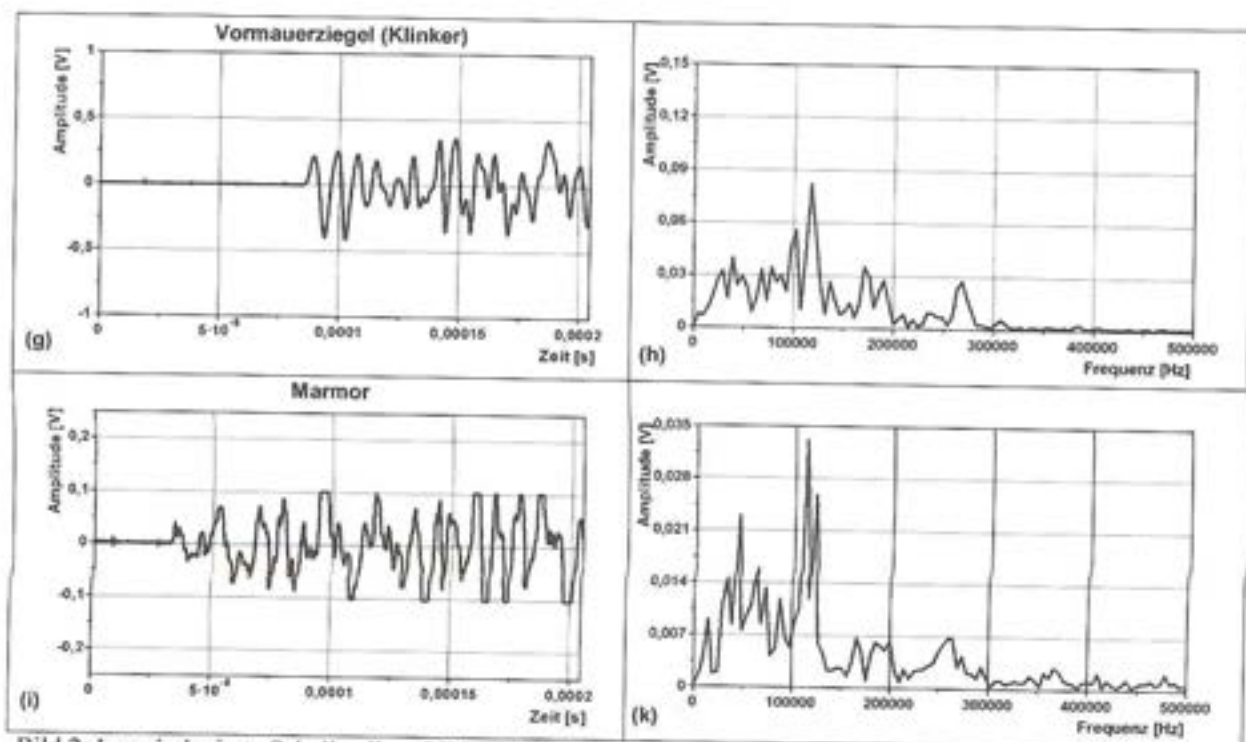


Bild 2: Laserinduzierte Schallwellen: Bilder (a), (c), (e), (g) und (i); sowie die jeweils zugehörigen Frequenzspektren der Bilder (b), (d), (f), (h) und (j)

In den ersten Vorversuchen konnte prinzipiell nachgewiesen werden, daß an unterschiedlichen Baustoffen wie Beton, Porenbeton, Ziegel und Marmor eine Schallanregung mit vergleichbarer Amplitudenhöhe der P-Welle zur herkömmlichen Schwingungsanregung mit Piezokristallen möglich ist. Tabelle 1 verdeutlicht die gemessenen Schallgeschwindigkeiten V_L der untersuchten Baustoffe auf der Basis der Laseranregung und der konventionellen Anregung mit einem Piezokristall (UPG 250 kHz). Die aufgetretenen Differenzen resultieren aus den zur Zeit noch nicht präzise ermittelbaren Verzögerungszeiten des Laserverfahrens.

Tabelle 1: Vergleich der gemessenen Schallgeschwindigkeiten

	Schallweg s [mm]	Laufzeit t_L [μ s] ¹⁾	Laufzeit t_L [μ s] ²⁾	V_L [m/s] ¹⁾	V_L [m/s] ²⁾	Differenz [%]
Beton	250,1	51,5	53,3	4856	4692	3,4
Porenbeton	201,9	106,3	108,2	1899	1865	1,8
Hintermauerziegel	243,7	142,6	137,1	1709	1777	3,8
Vormauerziegel	239,4	84,4	80,9	2836	2959	4,1
Marmor	196,4	31,8	33,0	6191	5966	3,7

¹⁾ Laufzeitwert aus Laseranregung/UPE, Ankopplung aushärtender Klebstoff

²⁾ Laufzeitwert aus UPG 250 kHz/UPE, Ankopplung Ton

Ein weiteres Versuchsziel bestand in der Erfassung der Auswirkungen, inwieweit ein wiederholtes Pulsen mit einem fokussierten Laserstrahl bei einer Frequenz von 10 Hz auf den gleichen Punkt der Betonoberfläche zu Änderungen der Höhe der Erstamplitude führt. Dieser Sachverhalt ist für die Durchführung von tomographischen Untersuchungen wichtig, da pro Anregungspunkt ein bestimmter Zeitbedarf zum Scannen aller auszuwertenden Empfängerpositionen (Zeitsignale) entsteht. Das Ergebnis ist in Bild 3a dargestellt. Zu erkennen ist aus der grafischen Darstellung, die alle 128 Messungen in Folge beinhaltet, daß die Amplitudenhöhe der P-Welle (positiver Ersteinsatz), erkennbar an der durchgehend gleichmäßigen Färbung, nur geringe Änderungen aufweist. Die Amplitudenhöhe, die nachträglich mit einem Transientenrecorder ausgemessen wurde, ergab Änderungen von ± 2 mV (4%). Bild 3b verdeutlicht den Frequenzgehalt der aufgezeichneten Schallwellen. Zur Erfassung der geringfügigen Frequenzänderungen sind noch weitere Untersuchungen bzw. Analysen erforderlich.

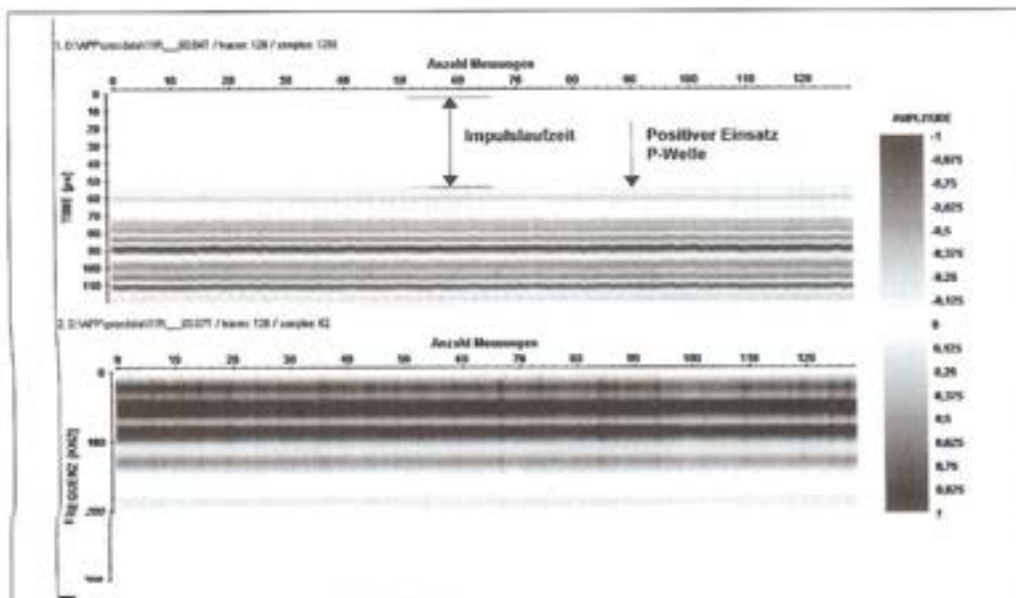


Bild 3: Auswirkung der Laser-Pulsanzahl auf die Amplitudenhöhe der P-Welle sowie den Frequenzgehalt der Schallwellen

Um den Einfluß der Strahlparameter auf die Schallanregung zu testen, wurden in einer 1. Versuchsetappe die Parameter Wellenlänge, Energiedichte, Einfallswinkel des Laserstrahls variiert.

◆ Wellenlänge

Der eingesetzte Neodym-YAG-Laser arbeitet mit einer Grundwellenlänge von 1064 nm. Durch Einsatz eines Frequenzverdopplers wurde die 2. harmonische Welle mit der Wellenlänge 532 nm und eines Frequenzverdreifachers mit zusätzlicher Frequenzmischung, die 3. harmonische Welle mit der Wellenlänge von 355 nm zur Grundwellenlänge angeregt. Aus Bild 4 ist ersichtlich, daß der Einfluß der untersuchten Wellenlängen auf den Frequenzgehalt der angeregten Schallwellen erst oberhalb von ca. 100 kHz durch Auftreten höherer Frequenzanteile bei der Wellenlänge 1064 nm sichtbar wird. Zur Bestätigung der Versuchsergebnisse sind weitere Untersuchungen geplant.

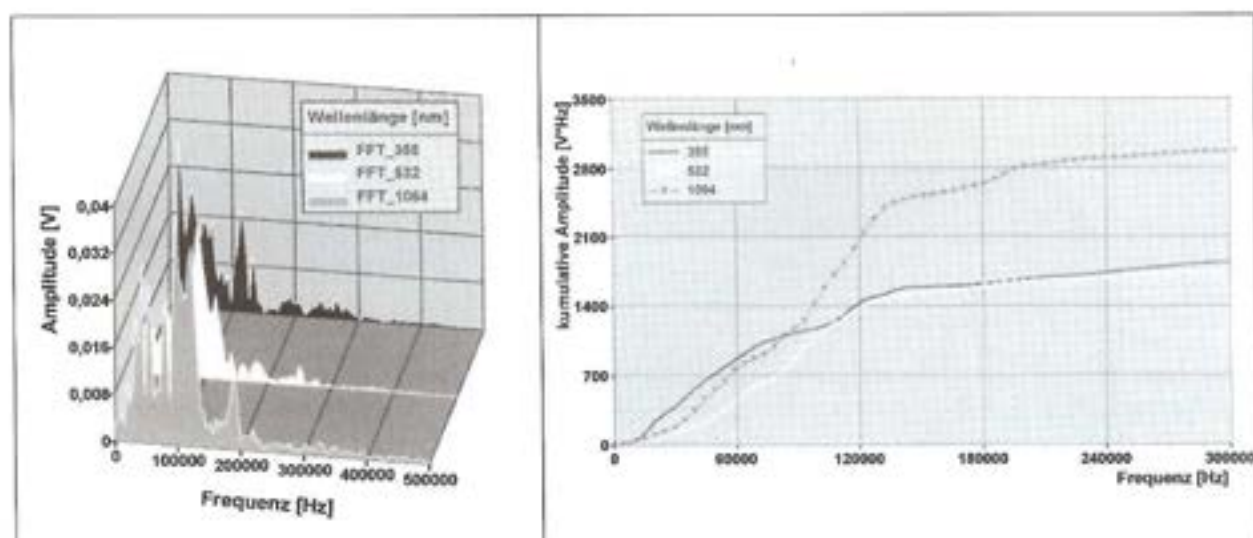


Bild 4: Einfluß der Wellenlänge des Laserstrahls auf den Frequenzgehalt der Schallwelle, links FFT-Spektren, rechts die Summation der Amplitudenbeträge

◆ Energiedichte

Der Einfluß der unterschiedlichen Energiedichte des Laserstrahls auf das Frequenzspektrum der angeregten Schallwelle ist Bild 5 zu entnehmen. Bei diesen Versuchen wurde bei gleicher Laserenergie die Größe des

Laserstrahlflecks optisch durch Einstellung unterschiedlicher Abstände zwischen einer Linse und der Betonoberfläche variiert. Erwartungsgemäß nimmt mit zunehmender Energiedichte, das heißt mit einer stärkeren Bündelung der Laserenergie auf eine kleine Fläche, Frequenzgehalt und dominierend die Amplituden zu. Der tatsächliche Durchmesser des Laserflecks wurde direkt über der Betonoberfläche mit Fotopapier ermittelt. Die Lichtleistung mit einem Power-Meter gemessen.

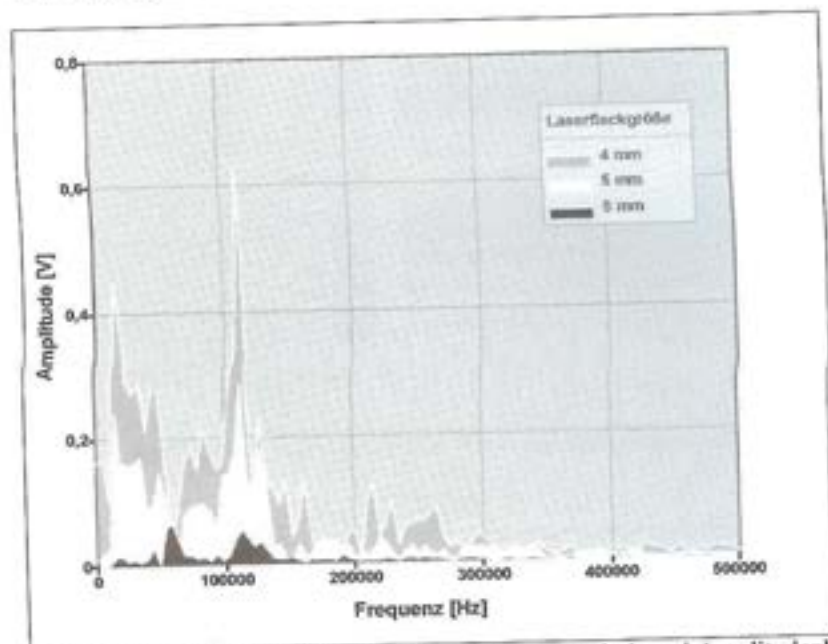


Bild 5: Einfluß der Laserfleckgröße auf Frequenzgehalt und Amplitudenhöhe

◆ Einfallswinkel des Laserstrahls

Die Durchführung von Bauwerksuntersuchungen ist von dem Umstand begleitet, daß der Laserstrahl nur in Einzelfällen senkrecht auf die Betonoberfläche auftreffen würde. Der Einfallswinkel des Laserstrahls wurde deshalb durch Kippen des Probekörpers in einem Bereich von 0 bis 45°, mit einer Abstufung von 15°, variiert, die abgestrahlte Laserenergie blieb unverändert. Bild 6 verdeutlicht die Ergebnisse dieser Versuche. Den Frequenzspektren ist zu entnehmen, daß sich der Frequenzgehalt in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Laserstrahls kaum ändert, jedoch die Amplituden aufgrund der abnehmenden Energiedichten (Laserfleckgröße nimmt zu) bei größeren Winkeln deutlich abnehmen.

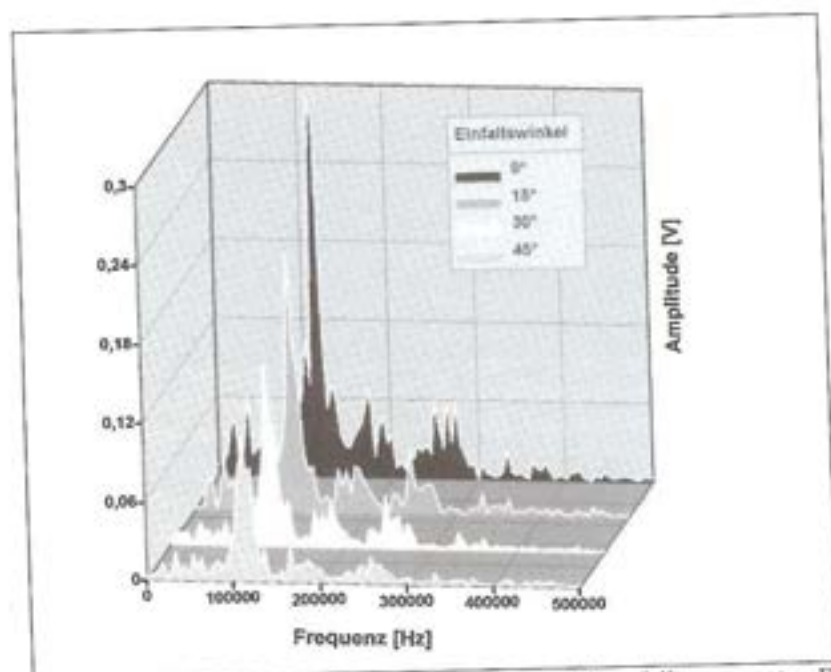


Bild 6: Einfluß des Einfallswinkels des Laserstrahls auf die angeregten Frequenzspektren

3.2 Scannen von Zeitsignalen

Zur berührungslosen Erfassung der zweidimensionalen Verteilung von Schwingungsgeschwindigkeiten auf Betonoberflächen wird ein Laservibrometer PSV 300 F (Bild 7), der Firma POLYTEC, verwendet. Im Hochleistungsscankopf befindet sich das Interferometer, die Scanner zum Auslenken des Laserstrahls sowie eine Videokamera zum Visualisieren des Meßobjektes. Der Scankopf ist auf einem schweren Stativ mit einem motorisierten Schwenk-Neige-Kopf montiert. Mit diesem Stativ kann der Scankopf um $\pm 90^\circ$ geschwenkt und mit einem Winkel nach oben von 90° und nach unten von 20° (oder umgekehrt, je nach Montage des Scankopfes) geneigt werden. Die maximale Auslenkung der Scanner beträgt horizontal bzw. vertikal $\pm 20^\circ$. Die bisher praktizierten Abstände des Scankopfes vom Meßobjekt betragen 1 bis 4 m. Innerhalb der festgelegten Untersuchungsfläche können beliebige Meßpunktabstände gewählt werden. Neben der üblichen Geschwindigkeits- und Frequenzmessung einschließlich FFT-Auswertung an jedem Meßpunkt, kann durch ein Zusatzmodul auch eine Zeitmessung zur Bestimmung der Schallaufzeiten durchgeführt werden. Da die Ultraschallsignale während des Scansvorganges einer automatischen P-Wellenerkennung unterzogen werden müssen, ist das Signal-Rausch-Verhältnis im Ergebnis der Reflektionseigenschaften der Betonoberfläche von großer Bedeutung. Zur Steuerung des gesamten Meßablaufes wird das Ultraschallmeßsystem CONSONIC 60 verwendet, welches durch zusätzliche Triggerfunktionen die Zeitmessung sowie die jeweilige Laserposition steuert. Die Erprobung des Meßablaufes erfolgte entsprechend *Versuchsvariante 2, Bild 1*. Die in diesem Versuchsstadium noch angewendete mechanische Anregung von Schallwellen führte zu auswertbaren Zeitsignalen mit dem Laservibrometer, die Schallwegen im Beton von ca. 0,5 bis 0,75 m entsprechen. Den Meßpunkten im Meßgitter werden bezogen auf eine Nulllinie Winkel zugeordnet, aus denen alle Meßpunktkoordinaten berechnet werden können, so daß das zeitaufwendige Einmessen der Meßstellen entfällt. Gegenwärtig erfolgt die Erprobung der *Versuchsvariante 4*, entsprechend der schematischen Darstellung im Bild 1.



Bild 7:
Laservibrometer PSV 300 F montiert auf Stativ mit
motorisiertem Schwenk-Neige-Kopf

4 Zusammenfassung

Der schrittweise Aufbau einer laserinduzierten Ultraschallanregung verbunden mit der berührungslosen Signalerfassung soll dazu führen, die angesprochenen Nachteile der mechanischen Ankopplung des gegenwärtig praktizierten Ultraschallverfahrens zu überwinden. Die zeitaufwendigen Vorbereitungsarbeiten, wie das Aufstellen von Einrüstungen und das Einmessen der Meßpunkte in den jeweiligen Untersuchungsflächen könnte somit entfallen. Die schnelle Meßabfolge, verbunden mit einer hohen Meßpunktdichte, kann zur Durchführung von tomographischen Untersuchungen von Bauwerksteilen sowie an Probekörpern, die dem Bauwerk entnommen wurden, genutzt werden. Damit werden verfahrenstechnisch die Möglichkeiten eröffnet, die Verteilung von Schallgeschwindigkeiten 2- und 3-dimensional abzubilden.

5 Ausblick

Gleichzeitig zum schrittweisen Aufbau eines berührungslos arbeitenden Ultraschallverfahrens, sollen die Meß- und Auswertungsmöglichkeiten des Radarverfahrens mit der Zielstellung weiter entwickelt werden. Informationen zur Verteilung von Feuchtigkeit und Salzen im Gefüge von Bauwerksteilen zu erhalten. Diese Aussagen

sollen mit den aus den Ultraschallmessungen gewonnenen Erkenntnissen zur Verteilung der mechanischen Eigenschaften verknüpft werden. Die Darstellung der Meßergebnisse (Schallgeschwindigkeit, Festigkeitsunterschiede, Verteilung von Feuchte und Salzen) beider Untersuchungsverfahren ist mit einer einheitlichen Tomographiesoftware REFLEX vorgesehen.

Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Stark
Dipl.-Ing. Wolfgang Erfurt

Dipl.-Phys. Wolfram Köhler

F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Fakultät Bauingenieurwesen
Bauhaus-Universität Weimar

Labor für Bauwerksdiagnose, Archäometrie und
Geophysik
Potsdam

6 Literatur

- [1] BUNKE, N.: *DAfStb Nr. 422: Dynamischer Elastizitätsmodul, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048*. DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON, Prüfung von Beton, 1991
- [2] KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall* 5. Aufl. Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Springer-Verlag, 1986
- [3] DEUTSCH, V.; PLATTE, M.; VOGT, M.: *Ultraschallprüfung, Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1997
- [4] MEYER, E. H.; RADTKE, U.; CROSTACK, H.-A.: *Zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung mittels laserinduziertem Ultraschall und holographischer Schallfeldabbildung*. UNIV. DORTMUND, FB Maschinenbau, Lehrstuhl für Qualitätswesen: Forschungsverbundprojekt, 1997