

wellentheorie der dicken Platte kann das Ergebnis in Abbildung 3 erzielt werden. Hier ist zusätzlich zu den ausgelesenen und gefilterten lokalen Maxima aus dem Dispersionsdiagramm die Phasengeschwindigkeit der Biegewelle der dicken Platte eingetragen, die sich für den mittels eines Fittings mit der Biegewellentheorie der dicken Platte ermittelten E-Modul von 29,2 GPa ergibt. Dies stellt eine erste Abschätzung für den E-Modul dar. Im Frequenzbereich von ca. 10 kHz ist deutlich eine Überhöhung in Form der Abweichung von der theoretischen Kurve zu erkennen.

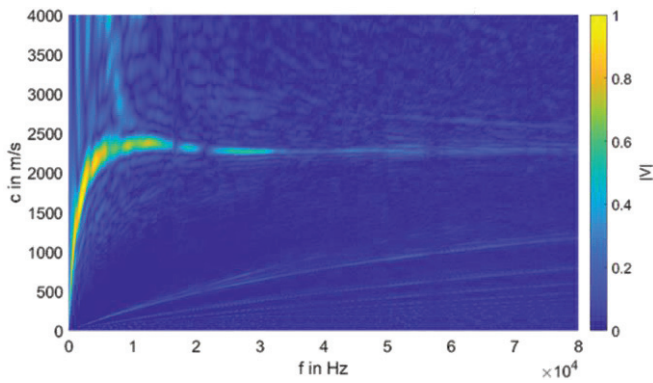


Abbildung 2: Dispersionsdiagramm

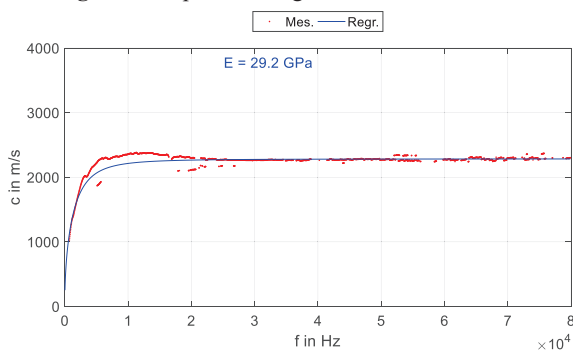


Abbildung 3: Aus dem Dispersionsdiagramm ausgelesene und gefilterte lokale Maxima (rot) sowie Phasengeschwindigkeit der Biegewelle der dicken Platte für einen abgeschätzten E-Modul von 29,2 GPa (blau)

Bestimmung des Elastizitätsmoduls

Die Ursache für den nicht-idealen Verlauf der Phasengeschwindigkeit liegt im inhomogenen Aufbau der Betonplatte. Wie in Abbildung 4 (rechts) erkennbar, weist die Platte einen zweischichtigen Aufbau bestehend aus einer ca. 23 bis 25 cm starken Unterschicht und einer Oberschicht von ca. 5 cm bis 7 cm Dicke auf. Da die sich ausbreitende Welle mit zunehmender Frequenz von der Biegewelle in die Rayleigh-Welle übergeht und diese eine mit zunehmender Frequenz geringer werdende Eindringtiefe aufweist, innerhalb welcher das Material die Wellenausbreitung beeinflusst, ergibt sich die Überhöhung bei ca. 10 kHz durch den mit steigender Frequenz abnehmenden Einfluss der Unterschicht in diesem Frequenzbereich. Bei sehr hohen Frequenzen bildet sich eine reine Rayleigh-Welle aus, deren Ausbreitung ausschließlich durch das Material der Oberschicht bestimmt ist. Um eine getrennte Charakterisierung der Ober- und der Unterschicht vorzunehmen, wurde die weitere Auswertung daher für zwei getrennte Frequenzbereiche vorgenommen. Um die Oberschicht zu beurteilen, erfolgte die Auswertung der aus dem

Dispersionsdiagramm ausgelesenen Maxima oberhalb von 30 kHz, während zur Beurteilung der Unterschicht der Frequenzbereich von 1 kHz bis 6 kHz betrachtet wurde. Es ist zu berücksichtigen, dass die Oberschicht auch einen Einfluss auf die Phasengeschwindigkeit der Biegewelle im tiefen Frequenzbereich nimmt und der sich ergebende E-Modul somit nicht ausschließlich die Unterschicht beschreibt.

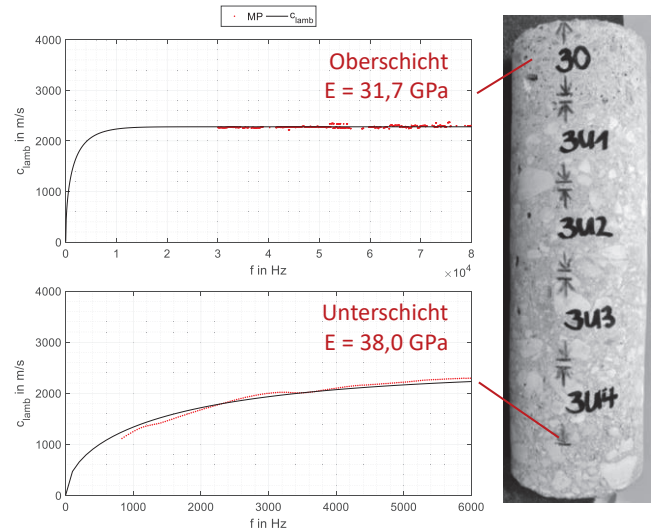


Abbildung 4: Aus Dispersionsdiagramm ausgelesene und gefilterte lokale Maxima (rot) für Oberschicht und Unterschicht; rechts: Bohrkern aus Straßenbetonplatte mit zweischichtigem Aufbau

Zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls der zwei Schichten fand das Modell der Lamb-Welle asymmetrischer Mode erster Ordnung (a_0) aus [7] Anwendung. Dieses beschreibt die Wellenausbreitung an einer dicken Platte von der Form der Biegewelle (tiefe Frequenz bzw. dünne Platte) bis hin zur Rayleigh-Welle (hohe Frequenz bzw. dicke Platte) einschließlich des Übergangs von der Biege-Welle zur Rayleigh-Welle. Da die Gleichung der Lamb-Welle keine eindeutige Beschreibung darstellt, erfolgte die Lösung der Lamb-Wellengleichung mittels eines numerischen Lösungsalgorithmus für jedes einzelne der ausgelesenen Maxima aus Abbildung 4. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl von Werten des E-Moduls, die anschließend über den entsprechenden Frequenzbereich gemittelt wurden. Die Ergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 4 enthalten. Es ergibt sich ein E-Modul der Oberschicht von 31,7 GPa und für die Unterschicht von 38,0 GPa. Der E-Modul der Oberschicht stimmt dabei in erster Näherung gut mit dem Ergebnis des Fittings der Biegewellentheorie der dicken Platte aus Abbildung 3 überein, für das die Oberschicht das Messergebnis durch die große Anzahl lokaler Maxima dominiert.

Vergleichende Messungen

Zur Validierung der Phase-Shift-Methode wurden der Straßenbetonplatte drei Bohrkern entnommen, wie in Abbildung 4, rechts dargestellt. An den Bohrkernen sowie den daraus gewonnenen Zylinderscheiben erfolgten anschließend weitere Messungen zur Bestimmung des E-Moduls.

Eigenfrequenz-Verfahren an Zylinderscheiben

Das angewandte Eigenfrequenz-Verfahren basiert auf der Resonant Acoustic Spectroscopy (RAS). Hierbei wird das

Ausbilden geometrie- und materialabhängiger Eigenformen bei Festkörpern genutzt, um auf den E-Modul zu schließen (vgl. [2]). Zur messtechnischen Bestimmung der Eigenfrequenz fand die Methode M1 aus [4] Anwendung. Hierbei erfolgt ein Krafteintrag mittels Impulshammer in die Mantelfläche des Prüfkörpers. Die resultierende Schwingung wird mittels eines oberflächennah angebrachten Mikrofons aufgezeichnet und aus dem Amplitudenspektrum die Eigenfrequenz ausgelesen. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 5 dargestellt.

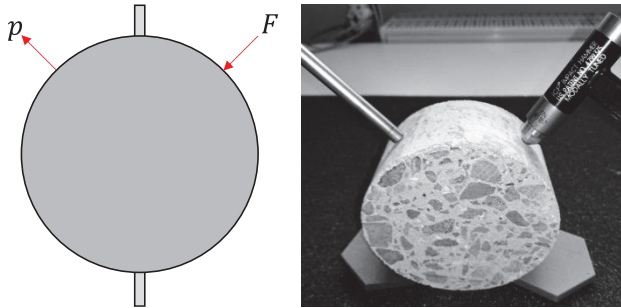


Abbildung 5: Bestimmung des E-Moduls mittels des Eigenfrequenz-Verfahrens

Parallel zur Messung erfolgt die rechnerische Bestimmung der Eigenfrequenz eines Prüfkörpers gleicher Geometrie und beliebigen E-Moduls mittels einer numerischen Simulation unter Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM). Aus dieser wird die normierte Frequenz Ω berechnet:

$$\Omega = 2\pi f_0 \cdot r^2 \cdot \sqrt{\rho h / D}. \quad (1)$$

Mithilfe der gemessenen Eigenfrequenz und dem per FEM-Simulation ermittelten Frequenzparameter Ω kann anhand von Gl. (1) entsprechend Abbildung 9 der E-Modul des Prüfkörpers ermittelt werden.

Spaltzug-Schwellversuch an Zylinderscheiben

Der Spaltzug-Schwellversuch in Abbildung 6 wird genutzt, um z. B. zylindrische Beton-Prüfkörper gezielt zu ermüden. Der Prüfkörper wird mit einer konstanten Frequenz, üblicherweise 10 Hz, und einer konstanten Kraftamplitude zyklisch belastet. Durch zeitgleiche Messung der Prüfkörperverformung mittels induktiver Wegaufnehmer lässt sich der E-Modul bestimmen.

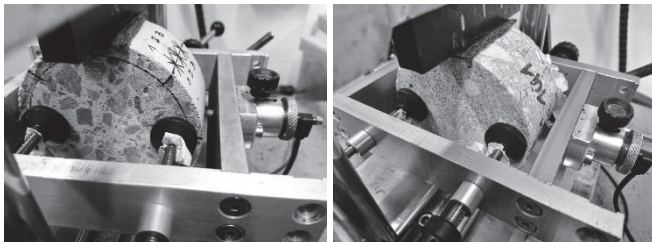


Abbildung 6: Bestimmung des E-Moduls mittels des Spaltzug-Schwellversuchs

Eigenfrequenz-Messungen an Bohrkernen

Auf Grundlage der Eigenfrequenzen langer Stäbe und Zylinder lassen sich entsprechend [3] die Poissonzahl und der E-Modul bestimmen. Zu diesem Zweck erfolgte zum einen die Bestimmung der Longitudinal-Eigenfrequenz durch einen Krafteintrag in die Stirnfläche des Bohrkerns bei zeitgleicher kontaktloser Aufzeichnung des resultierenden

Schwingungsspektrums an der gegenüberliegenden Stirnfläche (siehe Abbildung 7, links). Zum anderen wurde mittels eines triaxialen Beschleunigungssensors bei schrägem Krafteintrag in die Stirnfläche die Torsions-Eigenfrequenz ermittelt (siehe Abbildung 7, rechts).



Abbildung 7: Bestimmung des E-Moduls durch Eigenfrequenz-Messungen entsprechend [4]; links: Messung der Longitudinal-Eigenfrequenz; rechts: Messung der Torsions-Eigenfrequenz

Ultraschalllaufzeit-Messungen an Bohrkernen

Als viertes Verfahren fand die Messung der Ultraschalllaufzeit an den Bohrkernen Anwendung. Mittels eines an der Stirnfläche positionierten Sende-Prüfkopfes wurde ein Ultraschallsignal in den Prüfkörper eingetragen und das Antwortsignal an der gegenüberliegenden Stirnfläche zeitsynchron aufgezeichnet. Aus der auf diese Weise bestimmten Signallaufzeit kann unter Kenntnis der Bohrkernlänge auf die Phasengeschwindigkeit geschlossen und aus dieser mithilfe der Theorie der Longitudinalwelle der E-Modul berechnet werden. Der Messaufbau ist Abbildung 8 zu entnehmen.

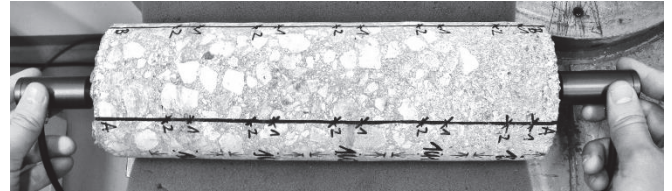


Abbildung 8: Bestimmung des E-Moduls mittels des Ultraschalllaufzeit-Verfahrens

Gegenüberstellung

In Abbildung 10 sind die mithilfe der verschiedenen Verfahren ermittelten Werte des E-Moduls dargestellt. Dabei erfolgte eine getrennte Darstellung der Ergebnisse der Ober- und der Unterschicht. Da aus der Unterschicht jedes Bohrkerns vier Zylinderscheiben gewonnen werden konnten, sind die Ergebnisse für die betreffenden Verfahren ebenfalls getrennt für die verschiedenen Subschichten enthalten. Die Nummerierung erfolgte aufsteigend mit zunehmender Schichttiefe. Die blauen bzw. grünen Säulen stellen die Ergebnisse des Eigenfrequenz-Verfahrens bzw. des Spaltzug-Schwellversuchs dar. Die blauen horizontalen Linien sind die Ergebnisse der Phase-Shift-Methode einerseits für die Oberschicht (Punktlinie) und andererseits für die Unterschicht (Strichlinie). Die rote bzw. pinke horizontale Linie geben das Ergebnis der Eigenfrequenz- bzw. Ultraschalllaufzeitmessungen an den Bohrkernen wieder.

Der Unterschied des E-Moduls zwischen Ober- und Unterschicht, der anhand der Phase-Shift-Ergebnisse erkennbar ist, bestätigt sich anhand der Ergebnisse des Eigenfrequenz-Verfahrens und des Spaltzug-Schwellversuchs.



Abbildung 9: Bestimmung des E-Moduls mittels des Eigenfrequenz-Verfahrens aus [4]

Grundsätzlich ist beobachtbar, dass der Spaltzug-Schwellversuch einen etwas höheren E-Modul wiedergibt als das Eigenfrequenz-Verfahren. Dies führt dazu, dass das Ergebnis der Phase-Shift-Methode für die Oberschicht zwischen denen des Eigenfrequenz-Verfahrens und des Spaltzug-Schwellversuchs liegt. Für die Unterschicht ergibt sich ein höherer E-Modul, der zudem für die untersten drei Schichten höher ist als für die erste Unterschicht U1. Dies ist auf das Herabsinken größerer Gesteinskörner im Herstellungsprozess der Betonplatte zurückzuführen, das dazu führt, dass sich im unteren Bereich ein größerer Anteil Gesteinskorn mit vergleichsweise hohem E-Modul ansammelt.

Für die Unterschicht liefern das Eigenfrequenz-Verfahren und der Spaltzug-Schwellversuch Werte des E-Moduls, die größer sind als das Ergebnis der Phase-Shift-Methode. Dies ist auf einen Einfluss der Oberschicht auf das Ergebnis der Phase-Shift-Methode zurückzuführen, da sich in dem hierfür betrachteten tieferen Frequenzbereich eine Biegewelle ausbreitet, deren Phasengeschwindigkeit vom gesamten Material der Platte beeinflusst wird. Dies bestätigt sich grundlegend anhand der sehr guten Übereinstimmung des Ergebnisses der Eigenfrequenz-Messung an den Bohrkernen mit dem Ergebnis der Phase-Shift-Methode für die Unterschicht, da auch bei der Eigenfrequenz-Messung ein Zusammenwirken von Ober- und Unterschicht stattgefunden hat.

Das Ergebnis der Ultraschalllaufzeit-Messungen an den Bohrkernen gibt ein Ergebnis wieder, das gut mit denen des Eigenfrequenz-Verfahrens und des Spaltzug-Schwellversuchs übereinstimmt, obwohl der Ultraschalllaufzeit-Messung der gleiche zweischichtige Aufbau zugrunde liegt. Dass sich dennoch ein Wert des E-Moduls ergibt, der höher ist als jener der Phase-Shift-Methode und der Eigenfrequenz-Messung ist möglicherweise auf eine systematische Beeinflussung des Messergebnisses der Ultraschalllaufzeit-Messung zurückzuführen.

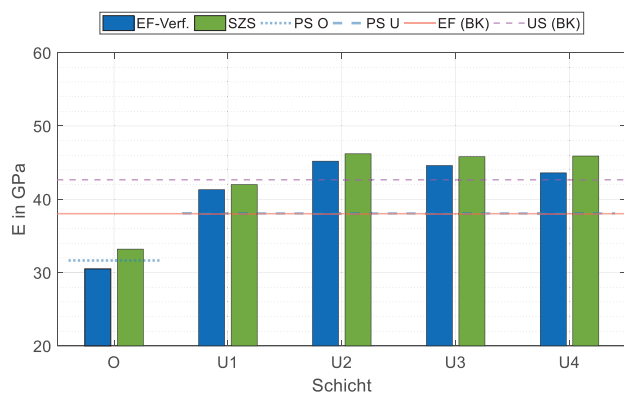


Abbildung 10: Mittels der verschiedenen Verfahren bestimmter E-Modul; blaue/grüne Säulen: Eigenfrequenz-Verfahren/Spaltzug-Schwellversuch; blaue/rote/pinke horizontale Linien: Phase-Shift-Methode/Eigenfrequenz-Messung/Ultraschalllaufzeit-Messung

Zusammenfassung

Anhand der Messung an einer Straßenbetonplatte im Seitenstreifen einer Autobahn bestätigt sich die Phase-Shift-Methode als geeignetes Verfahren zur zerstörungsfreien Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Betonplatten in situ. Mithilfe von vier verschiedenen Messverfahren konnten die Messergebnisse der Phase-Shift-Methode validiert werden. Dabei zeigte sich, dass die Phase-Shift-Methode grundlegend geeignet ist, tiefenabhängige Aussagen über geschichtete Medien zu treffen. Die Phase-Shift-Methode ermöglicht somit potentiell das Monitoring des E-Moduls ausgewählter Streckenabschnitte durch turnusmäßige Messungen. Zum Zweck der schnelleren Messung – ggf. als mobiles Messsystem – sind Optimierungen hinsichtlich der Sensorapplikation sowie des Ressourcenaufwands sinnvoll. Ebenfalls ist die Implementierung eines Mehrschichtmodells in Erwägung zu ziehen, um eine präzisere Trennung der einzelnen Schichten mehrschichtiger Systeme zu ermöglichen.

Anmerkung

Diesem Bericht liegen Teile des im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, vertreten durch das Bundesamt für Straßenwesen, unter FE 04.0306/2016/AGB laufenden Forschungsvorhabens zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein beim Autor.

Literatur

- [1] Boileau, P. E., Greiner, M., Leach, M. F.: A modified resonance method for determining elastic moduli. NDT International, Volume 4, Issue 2, 1981, Pages 43-48
- [2] Gudmarsson, A.: „Resonance Testing of Asphalt Concrete“, Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology Stockholm, 2014
- [3] Kolluru, S. V.; Popovics, J. S.; Shah, S. P.: „Determining Elastic Properties of Concrete Using Vibrational Resonance Frequencies of Standard Test Cylinders“, Cement, Concrete, and Aggregates, CCAAGDP, Vol. 22, No. 2, December 2000, pp. 81-89, 2000
- [4] Lindner, P. G., Schulze C., Hübelt, J., Bolz, P. G., Wellner, F.: Bestimmung des Elastizitätsmoduls zylindrischer Beton-Prüfkörper aus dem Spaltzug-Schwellversuch. DAGA 2020 Hannover
- [5] Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J.: Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. SEG Technical Program Expanded Abstracts 1998. January 1998, 1377-1380
- [6] Rindel, J. H.: Dispersion and absorption of structure-borne sound in acoustically thick plates. Applied Acoustics, Volume 41, Issue 2, 1994, Pages 97-111
- [7] Rydén, N., et al.: Lamb Wave Analysis for Non-Destructive Testing of Concrete Plate Structures. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2003