

# E-Modul und mechanische Eingangsimpedanz von Asphaltfahrbahnbelägen

Jutta Lindemann<sup>1</sup>, Jörn Hübelt<sup>1</sup>, Tom Georgi<sup>1</sup>, Frohmut Wellner<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Hochschule Mittweida, 09648 Mittweida, E-Mail: jutta.lindemann@hs-mittweida.de

<sup>2</sup> Technische Universität Dresden, 01069 Dresden, E-Mail: frohmut.wellner@tu-dresden.de

## Einleitung

Für den störungsfreien Verkehr von Fahrzeugen ist eine ausgebaute und intakte Verkehrsinfrastruktur erforderlich. Die Abschätzung der Kosten der baulichen Erhaltung beruht dabei auf der Bewertung der strukturellen Substanz der vorhandenen Verkehrswege. Für die Bestimmung der Substanz von Fahrbahnbelägen sind derzeit Labormessverfahren Stand der Technik. Dafür werden den vorhandenen Verkehrswegen Bohrkern entnommen, deren Substanzparameter anschließend im Labor ermittelt werden. Mit diesem Verfahren wird der Fahrbahnbelag zerstört. Die Substanz kann nur an ausgewählten Stellen und nur, mit einer durch die Labormessung bestimmten, deutlichen Zeitverzögerung ermittelt werden. Es soll daher ein In-situ Messverfahren entwickelt werden, das die flächendeckende Bewertung der Substanz von Fahrbahnbelägen direkt während des Einbauprozesses mit hoher Genauigkeit erlaubt. Mit der erfolgreichen Entwicklung eines derartigen Verfahrens kann ebenfalls der Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe bei Neubau ohne erneute Zerstörung des Fahrbahnbelages und ohne zeitliche Verzögerung exakt bestimmt werden.

## In-situ-Impedanz-Messverfahren und Bestimmung des E-Moduls

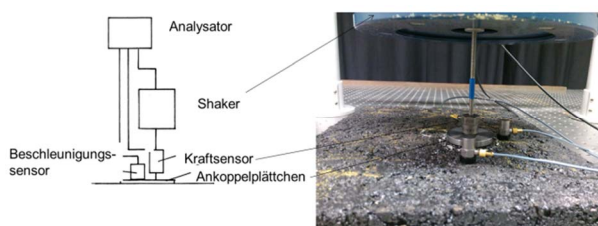


Abbildung 1: Messaufbau zur Messung der mechanischen Impedanz einer Asphaltplatte

In Abbildung 1 ist der Messaufbau des entwickelten Messverfahrens dargestellt. Bei diesem Verfahren erfolgt die punktuelle Anregung des Asphaltkörpers mit einem Schwingungserreger. Die dabei in die Struktur eingetragene Kraft wird mit Hilfe eines Kraftaufnehmers erfasst. Ein Beschleunigungsaufnehmer detektiert zeitgleich die von der eingeleiteten Kraft hervorgerufenen Schwingungen. Auf der Basis dieser Messgrößen wird die mechanische Impedanz  $Z(f)$  berechnet. Zur Substanzbewertung soll der E-Modul der Fahrbahnoberfläche herangezogen werden. Für die Bestimmung des E-Moduls werden die Messergebnisse zunächst mit einem theoretischen Modell der mechanischen Impedanz  $Z(f)$  eines unendlichen, isotropen Halbraums [1] verglichen. Der in das Modell  $Z(E, f)$  einfließende E-Modul

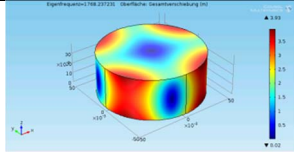
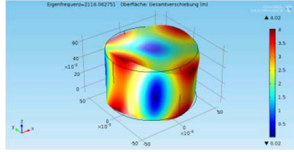
und dessen Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  sind dabei automatisch durch einen geeigneten mathematischen Algorithmus so zu variieren, dass ein Minimum der Abweichung zwischen Messung und Modell entsteht.

## E-Modul - Labormessung

Der in das Modell für die mechanische Impedanz einfließende E-Modul ist für Asphalt stark temperatur- und frequenzabhängig. Daher sollte das temperaturabhängige Verhalten im Abkühlprozess und beim Wiedererwärmen untersucht werden. Dazu wurde zunächst ein Standardverfahren, der Druckschwellversuch, angewendet. Zusätzlich sind die temperaturabhängigen Zusammenhänge mit einem zerstörungsfreien Messverfahren untersucht worden.

In z.B. [1] wird beschrieben, dass beliebig geformte Körper Eigenfrequenzen aufweisen. Diese Eigenfrequenzen sind vom Material, den Abmessungen, den Randbedingungen, der Dämpfung und der Art der Anregung abhängig. Zu jeder Eigenfrequenz gehört ein bestimmtes Schwingungsmuster der Struktur [2]. In Tabelle 1 ist jeweils die numerisch berechnete erste Eigenschwingungsform für Zylinder unterschiedlicher Höhenabmessungen dargestellt. Die Materialparameter und die Abmessungen entsprechen denen eines Marshall-Probekörpers.

Tabelle 1: FEM-Simulation der ersten Eigenfrequenz von Zylinderkörpern unterschiedlicher Abmessungen

| Materialparameter  | $E = 1000 \text{ MPa}$<br>$\rho = 2550 \text{ kg/m}^3$<br>$\mu = 0,3$                 | 1. Eigenfrequenz |
|--|---|------------------|
| Zylinder<br>Durchmesser<br>$d = 10 \text{ cm}$<br>Höhe<br>$h = 4 \text{ cm}$ |  | 1768 Hz          |
| Zylinder<br>Durchmesser<br>$d = 10 \text{ cm}$<br>Höhe<br>$h = 6 \text{ cm}$ |  | 2116 Hz          |

Anhand von Tabelle 1 ist die unterschiedliche Lage der ersten Eigenformen im Frequenzbereich ersichtlich. Demzufolge können aus der Eigenfrequenz eines Körpers

Rückschlüsse auf dessen Eigenschaften, beispielsweise dem E-Modul, gezogen werden. In [3] ist dieses Messverfahren bereits standardisiert worden. Der zu untersuchende scheibenförmige Körper wird möglichst frei gelagert. Anschließend wird dieser mit einem kleinen Hämmerchen zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen detektiert ein auf dem Probekörper befestigter Beschleunigungsaufnehmer. In Abbildung 2 sind die Art der Lagerung, die Anregungspunkte und die Positionen des Beschleunigungssensors für die ersten zwei Eigenfrequenzen dargestellt.

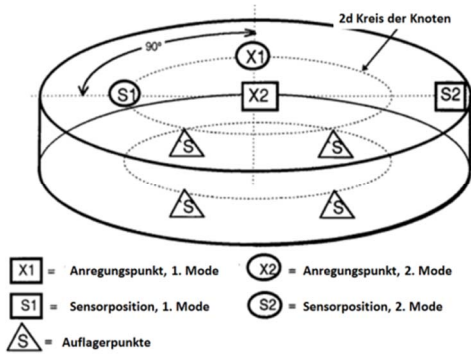


Abbildung 2: Anregungspunkte und Sensorposition für die ersten zwei Eigenfrequenzen eines flachen Zylinders [4]

Abbildung 2 zeigt, dass sich je nach Anregungsart und Position des Sensors eine bestimmte Eigenfrequenz ausbildet. Nach Messung der Eigenfrequenz kann anhand der Gleichung (1) der zu interessierende E-Modul der Struktur berechnet werden [3]:

$$E_1 = \frac{37,6991 \cdot f_1^2 \cdot d^2 \cdot m \cdot (1 - \mu^2)}{K_1^2 \cdot h^3} \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

Das hier beschriebene Verfahren ist zunächst auf PVC-Probekörper angewendet worden.

Tabelle 2: Eigenschaften der PVC-Probekörper laut Prüfprotokoll

|                  | B2   | C2    | A2   |
|------------------|------|-------|------|
| Durchmesser [mm] | 150  | 101,6 | 100  |
| Höhe [mm]        | 60   | 60,1  | 40   |
| Masse [g]        | 1537 | 702   | 453  |
| E-Modul [MPa]    | 3803 | 3716  | 3701 |
| h/d              | 0,40 | 0,59  | 0,40 |

Die Tabelle 2 fasst die Eigenschaften der PVC-Probekörper zusammen. Anhand der gemessenen Eigenfrequenzen wurden nach Gleichung (1) die E-Moduln für die Probekörper berechnet. Für die Querkontraktionszahl ist  $\mu = 0,2$  eingesetzt worden. Tabelle 3 zeigt den Vergleich des messtechnisch ermittelten E-Moduls mit dem Wert aus dem Prüfprotokoll.

Tabelle 3: Vergleich der messtechnisch ermittelten E-Moduln und der E-Moduln laut Prüfprotokoll

|                             | B2   | C2   | A2   |
|-----------------------------|------|------|------|
| E-Modul [MPa]               | 3803 | 3716 | 3701 |
| Prüfprotokoll               |      |      |      |
| E-Modul [MPa] messtechnisch | 3749 | 3870 | 3712 |
| Abweichung [%]              | 0,87 | 1,74 | 0,3  |

Die messtechnisch ermittelten E-Moduln der drei Probekörper stimmen mit den Werten aus dem Prüfprotokoll überein. Die größte Abweichung wird bei dem Probekörper C2 mit 1,74 % beobachtet. Das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser ist für diesen Probekörper im Vergleich zu den beiden anderen Probekörpern mit 0,59 am größten. Somit liegt es außerhalb des Geltungsbereiches für eine Scheibe nach [3]. Demzufolge nimmt der Messfehler zu. Auf Basis dieser Untersuchungen wurde die Geometrie der zu untersuchenden Marshall-Probekörper, den Asphalt-Probekörper, auf  $d = 10,1$  cm und  $h = 4$  cm festgesetzt. Die Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine Messkurve für einen untersuchten Marshall-Probekörper.

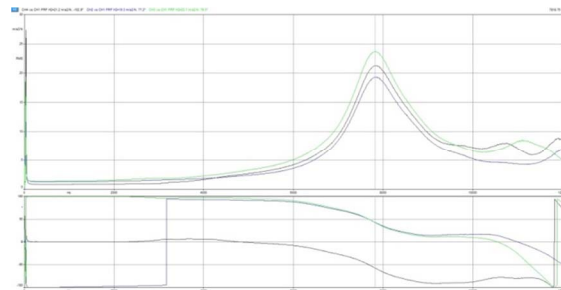


Abbildung 3: Messkurve für die erste Eigenfrequenz eines Marshall-Probekörpers der Höhe 4 cm bei 20°C

Anhand der ermittelten Eigenfrequenz ist für jeden Probekörper und der jeweiligen Prüftemperatur der E-Modul in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt worden. Anhand dessen kann ein Verlauf der Steifigkeiten beim Abkühlprozess im Vergleich zum Wiedererwärmen aufgezeigt werden.

### Danksagung

Wir möchten uns bei dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE, Deutsch: EFRE) für die Gewährung des Forschungsprojekts bedanken.



### Literatur

- [1] Möser, M.; Kropp, W.: Körperschall: Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen. – 3. Auflage. Berlin: Springer, 2010
- [2] Möser, M. (Hrsg.): Messtechnik der Akustik. – Berlin: Springer, 2010
- [3] ASTM C1259-08: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration, ASTM International, 2009