

Zerstörungsfreie Prüfung des zugänglichen Hohlraumgehalts von offenporigen Fahrbahnbelägen

Jörn Hübelt¹, Christian Kühnert¹, Uta Figula¹, Frohmut Wellner², Anita Blasl²

¹Hochschule Mittweida, Lehrstuhl Technische Mechanik/Akustik, E-Mail: joern.huebelt@hs-mittweida.de

²TU Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, E-Mail: frohmut.wellner@tu-dresden.de

Einleitung

Der zugängliche Hohlraumgehalt von Porösen Asphalten wird in der Regel an Bohrkernen bestimmt, die aus der Fahrbahn entnommen werden müssen. Dieses Verfahren bringt einige Nachteile mit sich. So ist die Methode beispielsweise keine zerstörungsfreie Methode, der zugängliche Hohlraumgehalt kann nur exemplarisch an bestimmten Stellen, jedoch nicht flächendeckend und somit nicht mit statistischer Sicherheit bestimmt werden. Da der zugängliche Hohlraumgehalt erst nach dem Einbau an der bereits erkalteten Deckschicht ermittelt werden kann, ist eine Einflussnahme auf die Verdichtung noch während der Bauausführung ausgeschlossen.

Es war somit wünschenswert, eine zerstörungsfreie Methode zur Bestimmung des zugänglichen Hohlraumgehalts zu entwickeln, die ein Intervenieren nach dem Verdichtungsprozess erlaubt. Mit Hilfe der Messung der Wandimpedanz sollen dazu die akustischen Eigenschaften offenporiger Fahrbahnbeläge bestimmt werden. Mittels der Inversion eines Absorbermodells kann anschließend die Berechnung des zugänglichen Hohlraumgehalts erfolgen.

Berechnungsmethode

Ausgehend von der Theorie des verlustbehafteten schallführenden Fluids lässt sich die Wandimpedanz \underline{Z}_w an der Oberfläche eines geschichteten porösen Asphalts für den Fall Ebener Wellen nach folgender rekursiven Formel beschreiben:

$$\underline{Z}_{w_i} = \underline{Z}_i \frac{\underline{Z}_{w_{i+1}} + i \frac{\underline{Z}_{A_i}}{\cos \vartheta_i} \tan \vartheta_i}{\frac{\underline{Z}_{A_i}}{\cos \vartheta_i} + i \underline{Z}_{w_{i+1}} \tan \vartheta_i}, \quad \vartheta_i = k_{A_i} d_i \cos \vartheta_i \quad (1)$$

Hierbei wird die Wandimpedanz \underline{Z}_{w_i} der oberen Schicht anhand der Wandimpedanz der angrenzenden Schicht $\underline{Z}_{w_{i+1}}$ sowie mit den das Fluid beschreibenden Absorberkennwerten (\underline{Z}_{A_i} , k_{A_i}) und der Dicke d_i der einzelnen Schichten beschrieben. Diese Vorgehensweise erlaubt die Berücksichtigung doppellageriger Asphalte. Für den Fall, dass nur eine poröse Belagsschicht vorhanden ist, die Beschallung senkrecht stattfindet (oder von der lokalen Reaktion des schallführenden Fluid ausgegangen wird) und die angrenzende Tragschicht als nahezu schallhart angenommen werden kann ($\underline{Z}_w \rightarrow \infty$) vereinfacht sich Gl. (1) zu:

$$\underline{Z}_w(\omega) = -i \underline{Z}_A \cot(k_A d) \quad (2)$$

Die Absorberkennwerte k_A und \underline{Z}_A sind anhand des Phänomenologischen Modells [Hamet1993] berechenbar.

Hierbei werden als Eingangsparameter die (Makro) Materialeigenschaften des Porösen Asphalts, die Porosität σ , der längenbezogene Strömungswiderstand Ξ und die Tortuosität τ , herangezogen. Für die Wandimpedanz \underline{Z}_w an der Oberfläche des offenporigen Belags lässt sich somit folgender Zusammenhang schreiben:

$$\underline{Z}_w(\omega) = -i \underline{Z}_A(\sigma, \tau, \Xi, \omega) \cdot \cot(k_A(\sigma, \tau, \Xi, \omega) \cdot d) \quad (3)$$

Sowohl die Kennimpedanz \underline{Z}_A als auch die Wellenzahl k_A der Schicht sind auf die oben angegebene komplexe Weise von den Materialparametern abhängig. Die Tortuosität und der Strömungswiderstand können jedoch mit Hilfe von bereits ermittelten statistischen Zusammenhängen [Sarradj2002] durch die Porosität ausgedrückt werden:

$$\underline{Z}_w(\omega) = -i \underline{Z}_A(\sigma, \tau(\sigma), \Xi(\sigma), \omega) \cdot \cot(k_A(\sigma, \tau(\sigma), \Xi(\sigma), \omega) \cdot d) \quad (4)$$

Um nun die Porosität zu ermitteln, gilt es, Gleichung (4) nach σ umzustellen. Aufgrund der komplizierten Abhängigkeiten lässt sich dabei keine eindeutige analytische Lösung angeben. Aus diesem Grund werden die Materialparameter durch einen Fit der frequenzabhängigen Impedanz nach der Zielfunktion in Gl. (5) bestimmt. Die Lösungsverfahren für die dabei verwendeten Least-Square-Schätzverfahren sind im Allgemeinen Iterationsverfahren, welche die Abweichungen zwischen Modellgleichung und Messdaten mittels der geeigneten Zielfunktion quantifizieren.

$$F(\sigma, d) := \frac{1}{Z_0} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left| \underline{Z}_w^{data}(\omega_i) - \underline{Z}_w^{theory}(\omega_i) \right|^2} \longrightarrow \min \quad (5)$$

Dabei ist hinreichend bekannt, dass die Wahl der Startwerte die Genauigkeit des Ergebnisses bestimmt. Hierzu wurde in einem ersten Schritt mit Hilfe der Kettenbruchzerlegung ein Startwertschätzer entwickelt. Die Genauigkeit dieses Verfahrens erwies sich jedoch als unzureichend.

Die in Gl. (4) gezeigten Vereinfachungen führen zu kurzen Berechnungszeiten. Aus diesem Grund ist es möglich, in einem physikalisch plausiblen Intervall Startwerte auf einem Raster vorzugeben und nach Gl. (5) die Wertepaare für σ und d zu berechnen. Das Wertepaar des globalen Minimums von Gl. (5) ist dann die Lösung des Verfahrens. Der Abstand des Rasters der Startwerte wird dabei durch die Welligkeit des Funktionals (siehe Abbildung 1) in Gl. (5) bestimmt.

Die Materialparameter Porosität und Schichtdicke sind in der Praxis begrenzt. So können offenporige Asphalte zu Beginn des Einbaus einen Hohlraumgehalt von 40 % aufweisen. Der Hohlraumgehalt am Ende des sich

anschließenden Verdichtungsprozesses liegt i. d. R. über 20 %. Des Weiteren ist für eine Zieldicke von 4 cm beispielsweise vor Beginn der Verdichtung eine Ausgangsdicke von 5 cm realistisch. Die zu verwendenden Startwerte für das Iterationsverfahren sollten demnach vorzugsweise in den Intervallen [20 %, 40 %] und [3 cm, 5 cm] liegen.

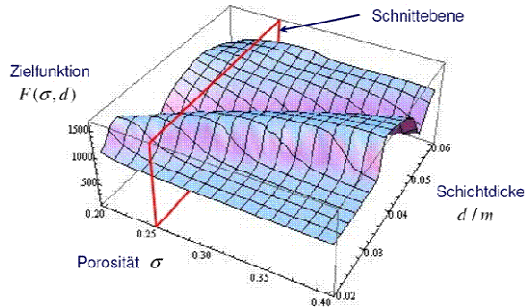


Abbildung 1: Funktional nach Gl.(5) in Abhängigkeit von Porosität und Schichtdicke

Erprobung des Verfahrens im Labor

In einem ersten Schritt wurden zur Validierung des Verfahrens der zugängliche Hohlraumgehalt sowie die Schichtdicke vorgegeben und hieraus mit Hilfe der Gleichungen des Phänomenologischen Modells Simulationsdaten für die Wandimpedanz erzeugt. Anschließend sind diese Daten in das Berechnungsverfahren eingegeben und daraus zugänglicher Hohlraumgehalt und Schichtdicke (zurück-) berechnet worden. Der Vergleich der verwendeten Parameter mit den „rückberechneten“ Werten zeigte eine 100 %-ige Übereinstimmung.

Im zweiten Schritt erfolgte die Validierung mit den Resultaten der Messungen an ca. 200 Marshall-Probekörpern. Dazu wurde das oben beschriebene Verfahren auf die an diesen Probekörpern gemessenen Wandimpedanzen angewandt und der jeweilige zugängliche Hohlraumgehalt sowie die Dicke berechnet. Anschließend erfolgte der Vergleich mit den an den Proben direkt gemessenen Werten des Hohlraumgehalts. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 2 dargestellt:

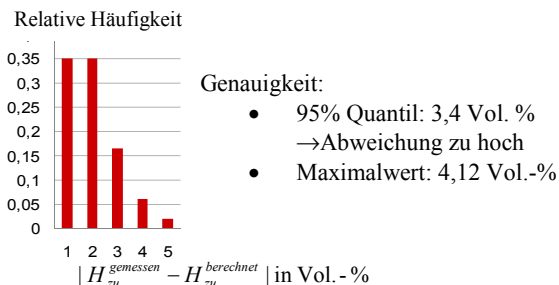


Abbildung 2: Fehlerhistogramm bei Anwendung des Verfahrens an einem Probenpool von ca. 200 Marshallprobekörpern

Auf der Abszisse sind die Abweichungen zwischen dem direkt gemessenen und dem rechnerisch ermittelten Hohlraumgehalt in Form von Klassen aufgetragen, die Ordinate gibt die zugehörigen relativen Häufigkeiten wieder.

Die Ergebnisse zeigen eine Abweichung von 3,4 Vol. % (95% Quantil). Diese Angabe zur Genauigkeit muss aus der Sicht des Anwenders als zu hoch eingestuft werden. Als eine wesentliche Ursache für die Ungenauigkeit des Verfahrens kann das Phänomenologische Modell angegeben werden. Bei näherer Untersuchung zeigte sich, dass das akustische Verhalten von speziellen Asphaltproben nur unzureichend durch das Modell wiedergegeben wird. Wenn diese Proben aus der Berechnung ausgeschlossen wurden, erhöhte sich die Genauigkeit des Verfahrens wesentlich. Hierbei ist zu prüfen, inwiefern der Ausschluss der genannten Proben mit der Praxis in Übereinstimmung gebracht werden kann.

Anhand äußerst umfangreicher Versuchsreihen konnte ein sehr detailliertes Bild für die Eignung und Anwendungsbedingungen des Druck-Schnelle-Sensors (Microflown Technologies) gewonnen werden. Dabei wurden alle für die Messungen in-situ relevanten Bedingungen einbezogen und die Anforderungen an die Messbedingungen bzw. den Messaufbau sehr genau spezifiziert. Sie fanden ihren Niederschlag in einer speziell entworfenen Messvorschrift.

Der Vergleich mit der Messapparatur nach DIN ISO 13472 - 1 zeigte eine bessere Eignung des Druck-Schnelle-Sensors für Laboruntersuchungen (Messungen an im Walzsegmentverdichter gefertigten Platten), da die benötigte Messfläche mit einem Radius von ca. 60cm bedeutend kleiner als die nach der Norm geforderte Fläche ist.

Zusammenfassung

Aufbauend auf dem Phänomenologischen Modell für Poröse Absorber konnte ein Verfahren zur Berechnung des zugänglichen Hohlraumgehalts anhand der an der Oberfläche des Porösen Asphalts gemessenen Wandimpedanz entwickelt werden.

Die Validierung des Verfahrens mit Hilfe von Daten von ca. 200 vermessenen Marshall-Probekörpern zeigte jedoch eine noch zu verbessernde Genauigkeit (95% Quantil: 3,4 Vol. %). Die wesentliche Ursache für die Abweichungen ist auf die Modellbeschreibung durch das Phänomenologische Modell zurückzuführen. In Zukunft soll daher auf empirischem Wege eine Modellanpassung erfolgen. Darüber hinaus soll der Einfluss der Feuchtigkeit im Asphalt auf die Messergebnisse detaillierter untersucht werden.

Literatur

[Hamet1993] J. Hamet, M. Berengier: Inter-Noise 1993, Leuven, Belgium
 [Sarradj2002] E.Sarradj, T.Lerch, J.Hübelt, ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA 92/1 (2006), 85-96

- Das Projekt wurde gefördert durch die AIF aus Mitteln des BMWi mit Unterstützung des DAI.
- Besonderer Dank gilt der Firma Microflown Technologies für die kostenlose Bereitstellung des PU-Sensors