

Simulation des akustischen Lebenszyklus offenporiger Fahrbahnbeläge

Bruno Arbter¹, Benjamin Ahrenholz², Wolfram Ressel¹, Manfred Krafczyk²

¹ Institut für Straßen- und Verkehrswesen, 70569 Stuttgart, Deutschland, Email: vorname.nachname@isv.uni-stuttgart.de

² Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen, 38106 Braunschweig, Deutschland, Email: nachname@irmb.tu-bs.de

Einleitung

Der akustische Lebenszyklus offenporiger Fahrbahnbeläge wird im Wesentlichen vom Verschmutzungsgrad der Hohlraumstruktur bestimmt. Die porenskalige Simulation des Verschmutzungsvorgangs und die daraus resultierende Änderung der Hohlraumstruktur sind Gegenstand des DFG-Projekts „Infiltrationsprozesse in porösen Fahrbahnsystemen“. Darin wird an der numerischen Simulation von Strömungs- und Transportprozessen auf der Porenskala gearbeitet. Will man hingegen die akustischen Eigenschaften offenporiger Fahrbahnbeläge bestimmen, werden in der Regel homogenisierte Absorbermodelle für poröse Medien verwendet. Beiden Ansätzen ist gemein, dass sie von der Gestalt der Hohlraumstruktur abhängig sind. In diesem Beitrag wird zunächst dargestellt, wie die Hohlraumstruktur möglichst genau aus computertomographischen Aufnahmen rekonstruiert werden kann. Dann wird aufgezeigt, wie Modellparameter für Absorbermodelle aus der porenskaligen Simulation abgeleitet werden können. In einem abschließenden Beispiel werden die Ergebnisse gemessenen Größen gegenübergestellt.

Digitale Rekonstruktion

Die digitale Rekonstruktion der Porenraumgeometrie basiert auf tomographisch erfassten Graustufen-Bildern. Entscheidend für die Rekonstruktion ist, den passenden Schwellwert des Übergangs von Fluid zum Festkörper zu bestimmen. Da in der Regel a-priori-Informationen über die Zusammensetzung von Asphalt vorhanden sind, können diese Informationen genutzt werden.

Der hier gewählte Ansatz zur Bestimmung des Schwellwerts verläuft in vier Schritten: Im ersten Schritt wird die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte des dreidimensionalen Datensatzes bestimmt. Im zweiten Schritt wird der gesamte Grauwertbereich in k verschiedene Regionen eingeteilt, welche die Bestandteile des Asphalts abbilden sollen (Luft, Bitumen, Gestein). Durch die Clustering-Methode k -means werden deren Zentren bestimmt. Unter der Annahme normalverteilter Grauwerte in jeder Region wird aus den Zentren und den geclusterten Grauwertverteilungen die Varianz geschätzt. Man erhält so die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(B|A_i)$, wobei $A_1 \dots A_3$ die Komponenten Luft, Bitumen und Gestein sind und B die Menge der Grauwerte ist (Abbildung 1, Zeile 2).

Um die Robustheit gegenüber falscher Klassifikation zu erhöhen, werden im dritten Schritt a-priori-Informationen $P(A_i)$ über die Asphaltprobe genutzt. Ist die Zusammensetzung des offenporigen Asphalts

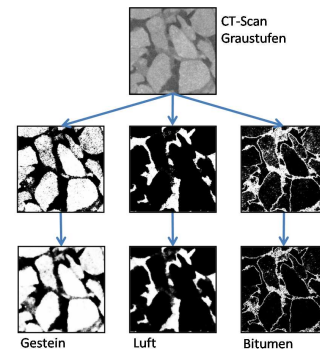


Abbildung 1: Segmentierung über a-priori-Informationen. Zeile 1: CT-Bild in Grauskala, Zeile 2: bedingte Wahrscheinlichkeiten bzw. Zeile 3: a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten von Gestein, Luft und Bitumen. Weiß entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 1, schwarz einer Wahrscheinlichkeit von 0

z. B. aus der Eignungsprüfung bekannt, können die bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(B|A_i)$ mit den a-priori-Wahrscheinlichkeiten $P(A_i)$ über den Satz von Bayes kombiniert werden und es ergibt sich für die a-posteriori-Wahrscheinlichkeit

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)}. \quad (1)$$

Die a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten der Regionen sind in Zeile drei der Abbildung 1 dargestellt. Im vierten Schritt werden aus den (normierten) a-posteriori-Wahrscheinlichkeiten die Schwellwerte zwischen Luft und Bitumen bzw. Bitumen und Gestein bestimmt.

Der Schwellwert zwischen Luft und Bitumen ist Ausgangspunkt der porenskaligen Simulation. Hier wird ein Verfahren zweiter Ordnung verwendet, um den Darcy-Durchfluss von Luft durch den Asphalt zu simulieren. Für Details zur porenskaligen Simulation sei auf [2] verwiesen. Im folgenden Abschnitt soll nun gezeigt werden, wie aus den Ergebnissen der Simulation die Parameter für Absorbermodelle abgeleitet werden können.

Offenporiger Asphalt als poröser Absorber

Die akustische Wirkung eines offenporigen Asphalts als poröser Absorber kann über homogenisierte Modellsätze beschrieben werden. Hier wird das Mikrostrukturmodell nach Champoux und Stinson [1] verwendet, da es gut an die Abweichung von idealisierten Kapillaren angepasst werden kann. Typisch für die Mikrostruktur-

modelle ist, dass diese Eigenschaften der Hohlraumstruktur erfassen. Im Folgenden wird beschrieben, wie diese Modellparameter aus der rekonstruierten Geometrie bzw. aus den Ergebnissen der numerischen Simulation auf der Porenskala hergeleitet werden können.

Modellparameter

POROSITÄT: Die Porosität kann direkt aus der rekonstruierten Geometrie abgeleitet werden. Sie wird bestimmt aus dem Verhältnis der Anzahl der Luft-Voxel zur Anzahl der Gesteins-Voxel. Dabei fließen nur die von außen zugänglichen Hohlräume in die Berechnung ein. Dies wird durch einen Füll-Algorithmus sichergestellt.

TORTUOSITÄT: Die Tortuosität beschreibt die Gewundenheit und die Vernetzung von Poren, die an Transportvorgängen in porösen Strukturen beteiligt sind. Es wird zwischen geometrischer, elektrischer, diffusionsbasierter und hydraulischer Tortuosität unterschieden. Für die Verwendung in Akustikmodellen ist die hydraulische Tortuosität τ_h maßgebend. Sie wird hier aus den Stromlinien einer porenskaligen Simulation des Darcy-Durchflusses von Luft durch den Asphalt bestimmt (siehe Abbildung 2).

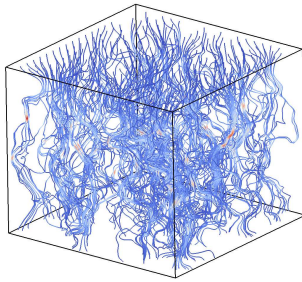


Abbildung 2: Stromlinien Luft in OPA 0/8

Die Tortuosität ergibt sich aus dem Mittelwert der Verhältnisse der Längen der Stromlinien l_{eff} zur Schichtdicke l , wobei $\tau_{h,i} = \frac{l_{eff}}{l}$, mit $i = 1 \dots n$ ist. Die Länge der Stromlinien wird über das Runge-Kutta-Verfahren bestimmt. Um den Anteil jeder Stromlinie am gesamten Fluss zu berücksichtigen, wird zusätzlich jede Stromlinie mit dem Faktor $1/t_i$ gewichtet, wobei t_i die Zeit ist, die ein Partikel für den Durchfluss entlang dieser Stromlinie benötigt. Man erhält dann

$$\tau_h = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\tau_{h,i}}{t_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i}} \quad (2)$$

Zur Kalibrierung des Modells an realen Messdaten ist bei den bisher simulierten Proben zusätzlich ein konstanter Korrekturfaktor von $\tau_k = 2.0$ verwendet worden.

STRÖMUNGSWIDERSTAND: Zur numerischen Bestimmung des Strömungswiderstands wird das Gleichstromverfahren nach DIN EN 29053 [3] nachgebildet. Ein über die digital rekonstruierte Asphaltprobe aufgebracht Druckgradient Δp führt zu einem kontinuierlichen Vo-

lumenstrom q_v . Aus dem Druckgradient Δp , dem Volumenstrom q_v , der Querschnittsfläche A und der Dicke des Probekörpers d berechnet sich der längenbezogene Strömungswiderstand zu

$$\Xi = \frac{\Delta p A}{q_v d} \quad (3)$$

Im Gegensatz zum Strömungswiderstand von Wasser verändert sich der Strömungswiderstand der Luft in Abhängigkeit des Drucks bzw. der Strömungsgeschwindigkeit. Die Abhängigkeit zwischen Strömungswiderstand und Strömungsgeschwindigkeit ist bei sehr kleinen Geschwindigkeiten linear. Dieser Zusammenhang wird verwendet, um aus Messungen mit höheren Geschwindigkeiten auf den Referenzwert der Strömungsgeschwindigkeit von 0.0005 m/s zu extrapolieren.

ANPASSUNGSFAKTOREN: Die Anpassungsfaktoren s_ρ und s_k werden beide auf 1.0 gesetzt.

Beispiel

Beispielhaft wurden die Modellparameter eines offenporigen Asphalts 0/8 mittels porenskaliger Simulation bestimmt. In Abbildung 3 ist der sich daraus ergebende Verlauf des Schallabsorptionsgrads (nach Champoux-Stinson) den gemessenen Werten gegenübergestellt.

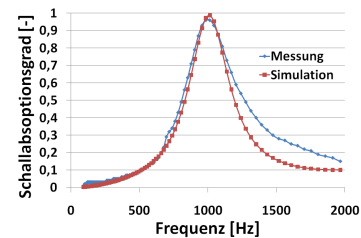


Abbildung 3: Vergleich Schallabsorptionsgrad gemessen und nach Champoux-Stinson mit Eingangsparametern aus porenskaliger Simulation

Eine Kopplung der Modellansätze ist also prinzipiell möglich. Zur Validierung des Verfahrens sind Untersuchungen an weiteren Datensätzen vorgesehen.

Literatur

- [1] Y. Champoux and Stinson, M.: On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. Journal of the Acoustical Society of America (USA), 92, 1120-1131, 1992.
- [2] B. Ahrenholz; Tölke, J.; Krafczyk, M.: Lattice-Boltzmann simulations in reconstructed parametrized porous media, International Journal of Computational Fluid Dynamics, 20, 6, 369-378, 2006.
- [3] DIN EN 29053/05.93: Akustik, Materialien für akustische Anwendungen, Bestimmung des Strömungswiderstandes, 1993.