

## Tortuositätsmessungen an offenporigen Asphalten

Tobias Lerch<sup>1</sup>, Ennes Sarradj<sup>2</sup>, Jörn Hübelt<sup>2</sup>

TU Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau<sup>1</sup> und Institut für Akustik und Sprachkommunikation<sup>2</sup>

### Einleitung

Die Tortuositätsmessung ist Teil des interdisziplinären DFG-Projektes „Einfluß der Fahrbahneigenschaften auf das Rollgeräusch von Kraftfahrzeugen“, das in Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Akustik und Sprachkommunikation und der Professur für Straßenbau der TU Dresden durchgeführt wird.

Für die akustische Modellbildung zur Berechnung des Schallabsorptionsverhaltens offenporiger Asphalte zum Einsatz als lärmindernde Straßendeckschichten waren genaue Aussagen zur Struktur unerlässlich. Mit Hilfe des Parameters Tortuosität ließen sich Strukturunterschiede berücksichtigen.

### Geometrische Tortuosität

Die geometrische Tortuosität soll zur Veranschaulichung des Problems dienen. Der Begriff der Tortuosität läßt sich mit „Gewundenheit“ beschreiben. Geometrisch betrachtet ist sie das Verhältnis des kürzesten möglichen Weges zwischen zwei Punkten zum kürzesten Abstand. Diese geometrische Definition hilft zunächst nicht weiter, da der tatsächliche Weg innerhalb eines porösen Stoffes nicht meßbar ist.

### Hydraulische Tortuosität

Der Begriff der Tortuosität läßt sich auch auf die Strömung einer Flüssigkeit durch einen porösen Stoff anwenden. Da sich Flüssigkeits- und Luftströmungen sehr ähnlich sind, ist die hydraulische Tortuosität für die akustische Modellbildung geeignet. Es ist erforderlich, ein Modell für die Strömungskanäle durch das poröse Medium anzunehmen. Der Porenraum ist in der Modellvorstellung äquivalent zu einem Bündel von Kapillaren mit gleichem hydraulischen Radius und gleicher Querschnittsform. Der Fließweg kann gewunden sein mit einer effektiven hydraulischen Pfadlänge  $l_{eh}$ .

Eine Gleichung von CARMAN (1937) [1] ist als „kanaläquivalente“ Tortuosität bekannt geworden:

$$\tau_{hC} = \left( \frac{l_{eh}}{l_{min}} \right)^2 \quad (1)$$

$\tau_{hC}$  hydraulische Tortuosität nach Carman,  
 $l_{eh}$  gewundene Länge,  
 $l_{min}$  direkte Länge.

Das Quadrat läßt sich folgendermaßen begründen: Wenn für ein Bündel von Kapillaren die Länge erhöht wird, ohne das von ihnen eingenommene Gesamtvolumen zu erhöhen, muß die Anzahl der Kanäle reduziert werden. Der Exponent 2 ist nicht streng mathematisch abgeleitet, aber durch Versuche für granulare Stoffe nachgewiesen.

Die Definitionen der geometrischen und der hydraulischen Tortuosität sehen einander sehr ähnlich. Trotzdem sind beide nicht dasselbe. Das läßt sich aus den Eigenschaften der Flüssigkeitsströmung erklären. Die Fließlinien sind keine direkten Wege oder Tangenten an die Gesteinskörner. Sie bilden weiche Kurven, die den Achsen der Fließkanäle folgen. Das ist eine Folge der Verzögerung an den Wänden durch die Wandreibung. Demzufolge ist die hydraulische Tortuosität größer als die geometrische. Die hydraulische Tortuosität ist nicht meßbar, obwohl sie für die akustische Modellbildung benötigt wird.

### Elektrische Tortuosität

Sind die Poren eines porösen Stoffes mit einer leitfähigen Flüssigkeit gefüllt, kann beim Anlegen einer elektrischen Spannung ein Strom fließen. Dabei wird der Stromfluß durch die gewundenen Poren und die damit verbundene Wegverlängerung behindert. Die elektrische Tortuosität läßt sich wieder als effektive elektrische Pfadlänge angeben:

$$\tau_{eW} = \frac{l_{ee}}{l_{min}} \quad (2)$$

$\tau_{eW}$  elektrische Tortuosität nach Wyllie,  
 $l_{ee}$  gewundene Länge,  
 $l_{min}$  direkte Länge.

Damit ergibt sich für die elektrische Tortuosität ein ähnlicher Ausdruck wie bereits für die geometrische und die hydraulische Tortuosität.

Es erschien durchaus möglich, anhand der Definition der elektrischen Tortuosität die beiden Längen zu bestimmen. Für den elektrischen Stromfluß ist es unerheblich, ob der leitende Querschnitt aus einem Stück oder vielen Einzelquerschnitten besteht. Aufgrund der Wandreibung ist für Strömungsvorgänge dagegen der Durchfluß eines einzigen großen Querschnittes aber größer als für viele kleine Einzelquerschnitte. Also mußte eine Möglichkeit gefunden werden, beide Größen in Übereinstimmung zu bringen. In der Literatur waren Vermutungen von Brown (1980) und Johnson (1987) [1] beschrieben, daß die hydrodynamische Tortuosität in der Be-

grenzung auf hohe Frequenzen der elektrischen Tortuosität bei niederen Frequenzen entspricht. Diese Vermutung wurde der Konzeption eines Meßplatzes zur Bestimmung der elektrischen Tortuosität zugrunde gelegt.

Für die Messung wurden die im Straßenbau für Asphalt üblichen Marshall-Probekörper nach DIN 1996 Teil 4 [2] benutzt. Sie sind zylindrisch mit einem Durchmesser von 101,6 mm und einer Höhe von 63,5 mm. Der Versuchsbehälter zur Aufnahme der Proben besteht aus Kunststoffrohren. Die Elektroden wurden aus Edelstahl gefertigt und auf einer isolierten Schiene in gleichem Abstand befestigt. Das Rohr wird mit Leitungswasser gefüllt. Mit Hilfe einer Vakuumpumpe wird die Luft aus dem Probekörper entfernt.

Es wird eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 100 Hz und einer Spannung von 1 V angelegt. Gemessen werden die Teilspannungen, die proportional zu den Teilwiderständen sind. Die Verwendung einer Wechselspannung erwies sich als erforderlich, weil sonst elektrolytische Effekte die Leitfähigkeit veränderten.

#### Messung

Die Anordnung der Elektroden im Rohr bildet einen unverzweigten Stromkreis mit Reihenschaltung der Widerstände. Die Gleichung zur Berechnung der elektrischen Tortuosität lautet

$$\tau_{eW} = \frac{l_{\text{Poren}}}{l_{\text{PK}}} = \frac{H_{\text{zu}}}{l_{\text{PK}}} * \left( \frac{U_1 * l_W}{U_2} + l_{\text{PK}} - l_W \right)$$

- $l_{\text{Poren}}$  gewundene Länge durch die Probe
- $H_{\text{zu}}$  zugänglicher Hohlraumgehalt,
- $U_1$  Spannung auf der Probenseite des Meßrohrs,
- $U_2$  Spannung auf der freien Seite des Meßrohrs,
- $l_W$  Abstand zwischen den Elektroden,
- $l_{\text{PK}}$  direkte Länge (Höhe) des Probekörpers,
- $\tau_{hW}$  elektrische Tortuosität nach Wyllie.

Zur Überprüfung des Systems wurden zwei Modelle der Probekörper mit direkt meßbaren geometrischen Eigenschaften hergestellt. Das erste Modell hatte eine Vielzahl von Bohrungen parallel zur Längsachse. Nach jeder Messung wurden einige Löcher verschlossen. Es ergab sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Verhältnis der Spannungen und den aus den Abmessungen berechneten Werten. Ein zweites Modell wurde mit unter einem Winkel von 20 ° geneigten Bohrungen versehen. Damit ergab sich nicht nur eine Querschnittsverringerng, sondern auch eine Wegverlängerung. Auch beim zweiten Modell war eine gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen und der berechneten Tortuosität zu verzeichnen.

Nachdem die Eignung des Meßplatzes nachgewiesen war, wurde eine große Anzahl von Asphaltproben gemessen. Es handelte sich im wesentlichen um Proben mit einem Größtkorn von 8 mm aus zwei verschiedenen Mineralstoffen (Grauwacke und Granodiorit). Die Sieblinien der Proben wurden variiert, um verschiedene Hohlraumgehalte und andere Eigenschaften zu erzielen. Das Bindemittel, der Bindemittelgehalt und der Füllergehalt blieben dagegen konstant. Darüber hinaus standen Proben von Baustellen zur Verfügung, die z. T. andere Größtkorndurchmesser aufwiesen.

Aus dem Ergebnissen ist zu erkennen, daß die gemessenen Werte der elektrischen Tortuosität nicht von der Mineralstoffart abhängig sind. Dagegen gibt es eine deutliche Abhängigkeit vom zugänglichen Hohlraumgehalt (Porosität). Die Werte der Tortuosität liegen bei höheren, für eine Schallabsorptionswirkung sinnvoll erscheinenden Hohlraumgehalten zwischen 4 und 8 und damit annähernd in der Größenordnung der Werte, die für ungebundene Kornhaufwerke in der Literatur genannt werden.

Da die Messungen an den vorhandenen Probekörpern noch nicht vollständig abgeschlossen sind, werden erst nach Beendigung der Untersuchungen genauere Aussagen zur Tortuosität von Offenporigen Asphalten möglich sein. Es läßt sich jedoch schon heute feststellen, daß die Bestimmung der für die akustische Modellbildung notwendigen hydraulischen Tortuosität durch die Messung der elektrischen Tortuosität gute Ergebnisse liefert.

#### Literatur

- [1] CLENNELL, M. B.: Tortuosity: a guide through the maze. Department of Earth Sciences, University of Leeds, o. J.
- [2] DIN 1996 Teil 4: Prüfung von Asphalt – Herstellung von Probekörpern aus Mischgut. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Dez. 1992.

