

Ein Modell zur akustischen Optimierung von offenporigen Fahrbahnbelägen

A model for acoustical optimization of open porous road surfaces

Jörn Hübelt, Ennes Sarradj,

Technische Universität Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Institut für Akustik und Sprachkommunikation, 01062 Dresden

Tobias Lerch,

Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, 01069 Dresden

Abstract (English)

The magnitude of tire/road noise depends on both the properties of the tire and the properties of the road surface. To predict the attenuation of the of the tire/road noise a model was set up, which considers the open porous road structure as a porous sound absorbing layer.

Here various well known theories of sound absorber have been applied and enhanced. Furthermore based on the data of the asphalt mixture a theory have been developed for the calculation of the input parameters of the absorber model. Moreover the predictions could be confirmed by measurements on above 200 asphalt specimen. For that purpose measurement tools were developed.

The sound propagation above the road surface were predicted by use of analytical and numerical methods. So a Boundary-Element-Model and a Transmission-Line-Matrix-Model have been applied. In consequence of this examinations an analytical approach were used for the optimization of the open porous road surface.

For the validation of the theoretical models a measurement technique was developed, which enables the determination of the acoustical properties of road surfaces in situ.

Abstrakt (deutsch)

Das Rollgeräusch von Kraftfahrzeugen wird sowohl durch Eigenschaften des Reifens als auch durch Eigenschaften der Straße beeinflusst. Zur Vorhersage ihrer schallmindernden Wirkung sollte daher die offenporige Fahrbahn als Schallabsorber modelliert werden.

Dazu wurden verschiedene bekannte Theorien für Absorber angewendet und weiterentwickelt. Zur Vorhersage der Eingangsparameter für diese Theorien sind Modelle entwickelt worden, die von der Rezeptur des Asphaltmischgutes ausgehen. Die Bestätigung der erreichten Ergebnisse erfolgte an über 200 eigens hergestellten Asphaltproben. Außerdem wurden die zur Messung notwendigen Geräte innerhalb des Projekts entwickelt, gebaut und erprobt.

Unter Verwendung des Absorbermodells war es möglich, die Schallpegelminderung im Nahfeld am Reifen und bei der Ausbreitung über der Fahrbahn zu berechnen. Dazu kamen verschiedene numerische und analytische Berechnungsverfahren zur Anwendung; u.a. wurde ein spezielles Randelementeverfahren und ein Transmission-Line-Matrix-Verfahren entwickelt. Die Untersuchungen mündeten in einem analytischen Ansatz, dessen Ergebnisse zur akustischen Optimierung von Fahrbahnaufbauten verwendet werden können.

Zur Überprüfung der akustischen Eigenschaften von vorhandenen Fahrbahnen wurde ein Messverfahren entwickelt.

Einleitung

Statistischen Untersuchungen zufolge ist der Güter- und Personenverkehr auf der Straße häufigste Ursache für Lärmbeschwerden aus der Bevölkerung. Hersteller von Verkehrsmitteln und -wegen sind daher bemüht, die vom Gesamtsystem Fahrzeug/Straße emittierte Schallenergie drastisch zu verringern. Große Bedeutung wurde dabei in den letzten Jahren den fahrzeugeigenen Geräuschquellen (z.B. Auspuff, Motor) beigemessen. Der Einfluss dieser Maßnahmen auf den Verkehrslärm ist jedoch begrenzt, da besonders im mittleren Geschwindigkeitsbereich (ca. 40-100 km/h z.B. [Sandberg 2002]) die emittierte Schallenergie wesentlich durch das Rollgeräusch bestimmt wird.

Die Teilmechanismen der Rollgeräuschentstehung und deren Kopplung sind bis zum heutigen Zeitpunkt nicht vollständig verstanden und beschrieben. Es existiert jedoch eine Vielzahl physikalischer, empirischer und hybrider Modelle, die deutlich zeigen, dass das Rollgeräusch wesentlich durch die geometrischen, mechanischen und akustischen Eigenschaften der Straßenoberfläche beeinflusst wird. Darüberhinaus bestätigen die Ergebnisse neuerer Untersuchungen aus der Literatur [Beckenbauer 2001], [Sandberg 2001] und [Descornet 2000] eindeutig, dass ein erhebliches Potential zur Lärminderung in der akustisch optimalen Gestaltung der Fahrbahnoberfläche liegt.

Ziel eines Forschungsvorhabens war es daher, ein theoretisches Modell zu schaffen, das die detaillierte Untersuchung des Einflusses der Fahrbahn auf die Schallentstehung und -ausbreitung am System Reifen/Straße ermöglicht. Mit Hilfe der so gewonnenen Modellbeschreibung sollten anschließend erste Vorstellungen über eine akustisch optimale poröse Fahrbahn abgeleitet werden.

Theorie

Grundphilosophie der akustischen Modellierung des offenporigen Asphalts ist die Auffassung der offenporigen Straße als homogener Absorber.

Das entstandene Modell besteht aus mehreren Stufen, an deren Schnittstellen der Abgleich mit Ergebnissen von Labormessungen an Marshall-Probekörpern möglich ist. Dabei wurden etwa 250 Probekörper unterschiedlichster Zusammensetzung untersucht.

In einer ersten Stufe wird unter Verwendung des Modells der Kugelpackungen eine homogene Struktur von Kugeln unterschiedlicher Radien erzeugt. Diese Modellstufe erlaubt die Vorhersage der für den porösen Absorber typischen Eigenschaften (z.B. längenbezogene Strömungsresistanz, Porosität, Tortuosität).

In einer weiteren Stufe erfolgt dann die Berechnung der Kennwerte des porösen Absorbers (komplexe Ausbreitungskonstante und komplexer Wellenwiderstand). Dazu wurden verschiedenste Absorbertheorien hinsichtlich ihrer Eignung zur akustischen Beschreibung der offenporigen Fahrbahnoberfläche untersucht. Als günstig stellte sich dabei das „Phänomenologische Modell“ [Hamet 1992] heraus.

Die für das Rollgeräusch dominanten, sehr flachen Schalleinfallswinkel (z.B. [Heutschi 2001]) erfordern die Berücksichtigung von kugelförmigen Wellenfronten sowie die Beschreibung des Absorbers Straße als „lateral reagierend“ [Hübelt 2001].

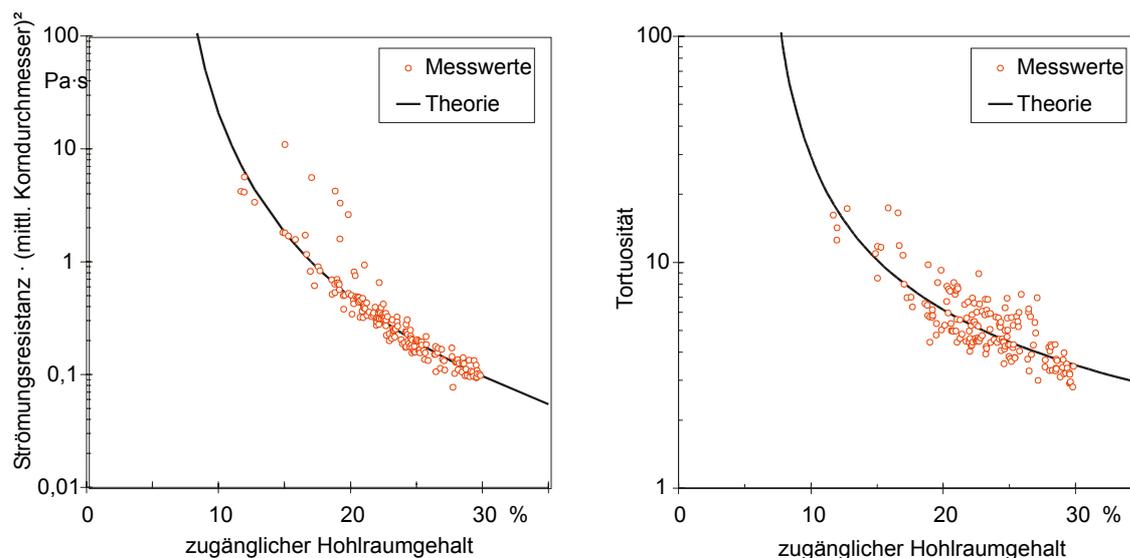


Bild 1: Vergleich zwischen Messwerten für einzelne Proben und Ergebnissen der Theorie, links: Produkt aus Strömungswiderstand und Quadrat des mittleren Korndurchmessers im Mischgut, rechts: Tortuosität.

Ein Vorzug analytischer gegenüber numerischen Modellbeschreibungen ist der geringere zeitliche Berechnungsaufwand. Zur Schaffung eines Werkzeugs für die Optimierung des offenporigen Asphalts wurde daher zunächst eine Vielzahl analytischer Schallausbreitungsmodelle auf ihre Brauchbarkeit untersucht. Als besonders erfolgversprechend erwies sich das Modell nach „Weyl von de Pool“ in Kombination mit dem Konzept der „effektiven Impedanz“ [Li 1998]. Dieses Modell beruht auf Vereinfachungen, z.B. der Annahme einer effektiven Wandimpedanz des absorbierenden Mediums, deren Gültigkeit mit Hilfe von Messungen und komplexeren Modellbeschreibungen auch für geringe Strömungsresistenzen (4500 Ns/m^4) bestätigt werden konnte. Der Übergang zwischen Straßenoberfläche und der Begrenzungsfläche neben der Straße (z.B. Rasen) kann dabei mit Hilfe des Ansatzes von Rasmussen [Rasmussen 1982] berücksichtigt werden. Das verwendete Spektrum nach DINEN1793-3 dient zur Erfassung der spektralen Wichtung des Rollgeräusches.

Zur modellhaften Abbildung spezieller akustischer Effekte (laterale Reaktion des Absorbers „offenporige Straße“, Schallfeld im Reifen/Straße Zwickel) wurden numerische Berechnungsverfahren weiterentwickelt, die eine Analyse dieser speziellen Effekte erlauben. So konnte zum Beispiel ein eigens entwickeltes Randlelementeverfahren [Sarradj 2003] zur Untersuchung der Schallausbreitung an der Grenzfläche zwischen Luft- und Absorberschallfeld eingesetzt werden. Zur Analyse des Einflusses der Richtwirkung des Reifen-Straße-Zwickels sowie der abschirmenden Wirkung der Fahrzeuggeometrie wurde das Transmission-Line-Matrix-Verfahren (TLM) zur Anwendung für verlustbehaftete Medien und deren Kopplung mit verlustlosen Medien weiterentwickelt [Hübelt 2003]. Dieses Verfahren erlaubt außerdem die Berechnung der während der Rollgeräuscherzeugung auftretenden transienten Vorgänge, z.B. die Vorhersage des Schalldruckverlaufes, erzeugt durch das Vorbeifahren eines Fahrzeuges.

Der offenporige Asphalt als Absorber

Zur Vorhersage der Porosität aus der Siebkennlinie und dem Bindemittelgehalt wurde eine neue Theorie entwickelt, die vom Hohlraumgehalt der im Mischgut verwendeten größeren Kornfraktion sowie von zwei weiteren Konstanten ausgeht, die indirekt Korngrößenverteilung und Kornform charakterisieren. Mit Hilfe des Modells einer minimalen Porosität, bei der noch zugängliche, nicht abgeschlossene Poren existieren (Durchdringungsschwelle bzw.

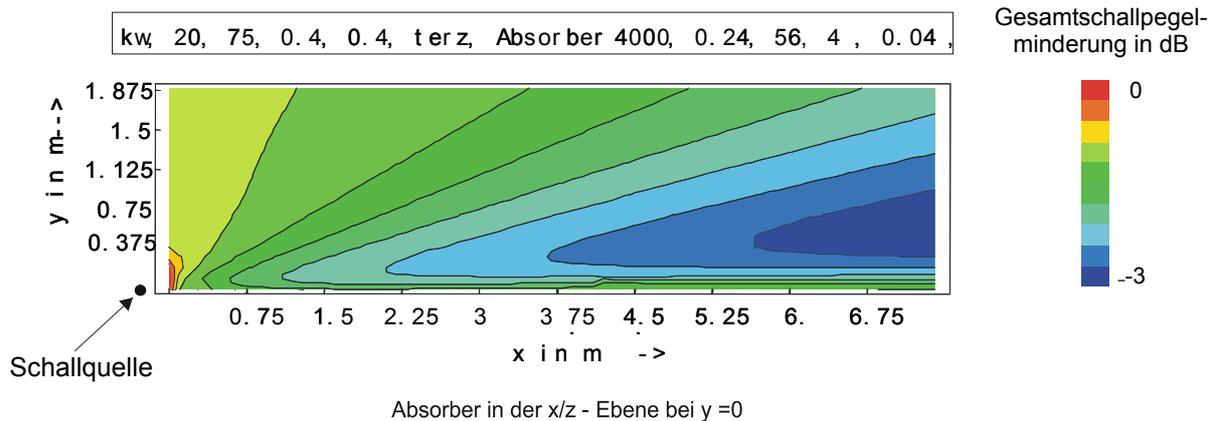


Bild 2: Minderung des A-bewerteten Gesamtschalldruckpegels, Mittelung über Terzmittenfrequenzen (Absorberfläche in der x/z - Ebene bei $y = 0$).

percolation threshold), gelang es, die für die Akustik interessante zugängliche Porosität aus der Gesamtporosität vorherzusagen. Ein in der Geophysik gebräuchlicher Zusammenhang [Sen 1981] zwischen Porosität und Tortuosität wurde so angepasst, dass das Vorhandensein einer Durchdringungsschwelle berücksichtigt wird. Für die Vorhersage des Strömungswiderstandes wurden Modelle auf der Grundlage von konsolidierten Kugel- bzw. Ellipsoidpackungen entwickelt. Als Eingangsparameter für diese Modelle werden die Porosität und die mittlere Abmessung der Körner des Gemischs benötigt.

Durch den Vergleich mit den an über 200 Proben gewonnenen Messdaten konnte bestätigt werden, dass die entwickelten Modelle [Sarradj 2003] gute bis sehr gute Vorhersagen von Porosität, Tortuosität und Strömungswiderstand erlauben, die über die bisher bekannten Möglichkeiten hinausgeht (Bild 1).

Schallausbreitung über der Fahrbahn

Der Horneffekt [Ronneberger 1989], die Tangentialschwingungen der Profilklotze [Kuijpers 2001], die Rillenresonanzen [Ronneberger 1985] sowie der sogenannte „Airpumping“-Effekt [Kuijpers 2001] spielen bei der Entstehung des Rollgeräuschs eine dominante Rolle. Modelle zur Vorhersage der Rollgeräuscherzeugung (z.B. Tyre Road Noise Simulation Model of the Chalmers University of Technology [Larsson 2001], TRIAS [Roo 2000] oder TINO [Gelosa 1999] verwenden als Eingangsgrößen Daten, die direkt von der Textur der Straßenoberfläche abgeleitet werden können (z.B. das Textur-Wellenlängen-Spektrum oder die Kontaktflächen zwischen Reifen und Straße). Weiterhin wird, den Ausführungen Sandbergs [Sandberg 2002] zufolge, der Mechanismus der Rollgeräuscherzeugung besonders durch die Ausbildung der Makro- und Megatextur der Straßenoberfläche beeinflusst. Folglich ist unter der Voraussetzung gleicher Fahrbahntextur zwischen der mechanischen Rollgeräuscherzeugung auf offenporigen und dichten Fahrbahnbelägen keine signifikante Änderung zu erwarten.

Darüberhinaus wird in [Beckenbauer 2001] festgestellt, dass die Vorbeifahrtpegel, gemessenen während des Einsatzes eines Kollektivs unterschiedlicher Reifen, bei offenporigen Straßendecken im Gegensatz zu dichten Decken nur wenig streuen. Nach Meinung des Autors deutet dieser Sachverhalt auf die Verringerung der Wirksamkeit bestimmter Entstehungsmechanismen bei offenporigen Straßendecken hin. Ronneberger schlägt in [Ronneberger 1985] vor, die Rillenresonanzen mit Hilfe der Ausbildung einer

porösen Straßenoberfläche zu reduzieren. In [Huschek 1986] und [Ronneberger 1981] wird von der Verringerung des Airpumping-Effekts durch ausreichende Rautiefen berichtet. Diese

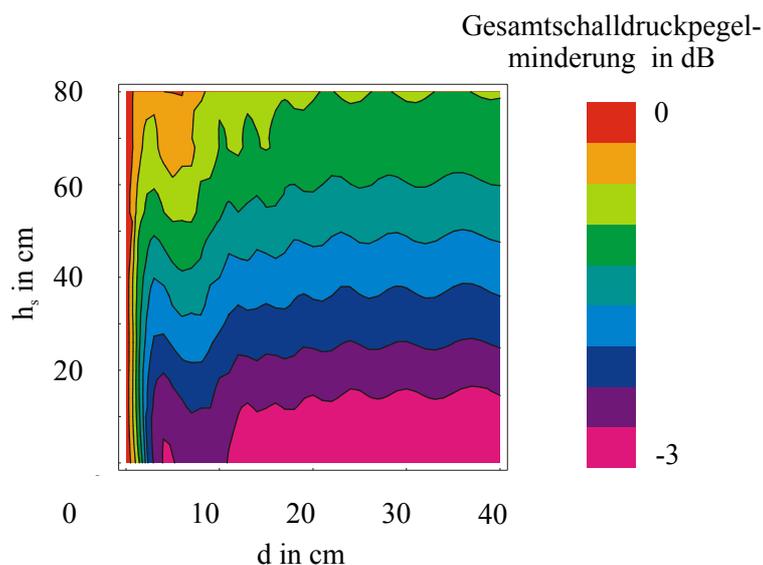


Bild 3: Lärmindernde Wirkung eines offenporigen Asphaltes als Funktion der Dicke des Straßenbelages d und der Höhe der Schallquelle über der Straßenoberfläche h_s .
Immissionspunkt: Entfernung zur Schallquelle: 7.5m; Höhe über der Fahrbahn: 1.2m;
Absorberparameter: $\Xi = 6000 \text{ Ns/m}^4$, $\sigma = 22 \%$, $\tau = 5$.

Gesichtspunkte bestärken die Annahme, dass bei gleicher Textur sogar eine Reduzierung der Rollgeräuschanregung durch poröse Straßenoberflächen zu erwarten ist. Innerhalb des Projektes wurden die Texturparameter offenporiger Asphaltes gemessen und analysiert [Huschek 2001]. Dabei konnten Ähnlichkeiten mit der Textur von Splittmastixasphalt festgestellt werden.

Die Vorhersage der lärmindernden Wirkung des offenporigen Asphalts wird durch den Vergleich mit dem Schallfeld über einer schallharten Straße (dichter Asphalt) ermöglicht. Zur Optimierung genügt die Berechnung der Schalldruckpegel an einem Punkt im Schallfeld, da sich unter der Voraussetzung der sehr geringen Quellhöhen und des Spektrums im relevanten Immissionsgebiet kein den A-bewerteten Schalldruckpegel bestimmendes, destruktives Interferenzgebiet ausbilden wird (Bild 2).

In Bild 3 ist die lärmindernde Wirkung eines offenporigen Fahrbelages als Funktion der Dicke des Belages d und der Höhe der Schallquelle über der Fahrbahn h_s dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass für geringe Quellhöhen bei einer Dicke des Belages d von etwa 4,5 cm ein erstes Minderungsmaximum auftritt. Dieses Minderungsmaximum entsteht durch die Ausbildung des ersten Maximums des Absorptionsgrad-Frequenzverlaufes bei 1kHz (vergleiche Bild 5, hier liegt das Maximum des Absorptionsgrads bei ca. 650 Hz) und verschiebt sich für höher gelegene Schallquellen h_s in den Bereich kleinerer Belagdicken d .

Erst ab einer Belagdicke größer als 12 cm entsteht, eine konstante Quellhöhe h_s vorausgesetzt, ein Bereich mit etwa gleichbleibender lärmindernder Wirkung. Die hier dargestellten Berechnungsergebnisse wurden für eine Straßenoberfläche mit fixierten Absorberparametern durchgeführt. Jedoch sind für andere poröse Straßenoberflächen mit Eigenschaften aus dem untersuchten Parameterbereich Ergebnisse berechnet worden, die eine gleiche Tendenz aufweisen. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Belagdicken an ein Viertel der Schallwellenlänge im absorbierenden Medium („Interferenzlichtfilter“; Dicke hier etwa 4,5 cm) angepasst oder größer als die Schallwellenlänge in diesem Medium sein sollten (übereinstimmend mit der empirischen Aussage in [Sandberg 2002] S. 443, 23b).

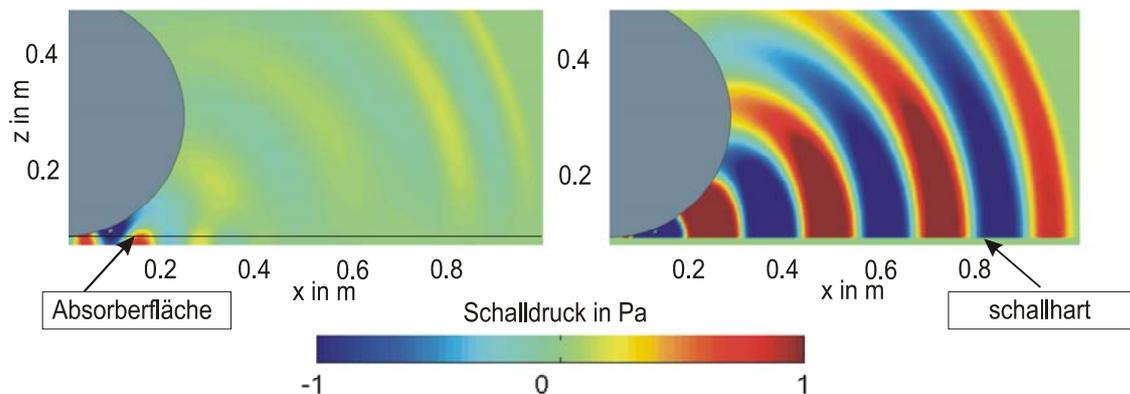


Bild 4 : TLM Modell, Schallfeld über einer 3 cm dicken porösen Asphaltsschicht (links) und über einer reflektierenden Fläche (rechts) bei einer Frequenz von 1 kHz, Absorberparameter: $\Xi=6000$ Ns/m, $\sigma=22$, $\tau=5$, $d=3$ cm.

Die direkte Anpassung der Belagdicke an die Schallwellenlänge im absorbierenden Medium hat jedoch zum Nachteil, dass bei einer Verschmutzung der offenporigen Straße die lärmindernde Wirkung sofort stark reduziert wird. Dieses Verhalten wurde anhand eines Verschmutzungsmodells abgeschätzt. Dazu ist der Asphalt als vertikal geschichtete Struktur modelliert worden, deren Schichtenparameter einem von oben nach unten zunehmend verschmutzten offenporigen Fahrbahnaufbau entsprachen.

Die Modellrechnungen belegen eindeutig, dass sich die Absorption durch offenporigen Asphalt nur auf sehr niedrig gelegene Schallquellen, wie die Quellen des Rollgeräusches, auswirkt. Höher gelegene Schallquellen, z.B. die der Antriebsgeräusche, werden dagegen nur sehr wenig beeinflusst (Bild 3).

Einschichtige reale poröse Fahrbahnen weisen trotz des angestrebten homogenen Aufbaus in vertikaler Richtung eine Änderung der Absorberparameter auf. Dies konnte anhand der Bestimmung der Parameter an einigen in Schichten zersägten Bohrkernen nachgewiesen werden. Zur Berechnung der lärmindernden Wirkung eines homogen aufgebauten Asphalts genügt jedoch die Messung der über die gesamte Höhe des Bohrkerns gemittelten Absorberparameter, da laut den Ergebnissen von dazu durchgeführten Modellrechnungen die o.g. Inhomogenität der Absorberparameter nahezu keinen Einfluss auf das Schallfeld über der Straße hat.

Die laterale Veränderung der Absorptionseigenschaften der offenporigen Straße kann mit Hilfe des Modells ebenfalls abgebildet werden. Laterale Unterschiede entstehen zum Beispiel bei einer verschmutzten Fahrbahn mit Fahrspuren, die durch die Sogwirkung der Reifen beim Überrollen gereinigt worden sind. Eine Verschmutzung führt zwar prinzipiell zur Verringerung der lärmindernden Wirkung. Nach den Ergebnissen der Modellrechnungen erweist sich die Reinigung im Bereich der Fahrspur jedoch als günstig, da sich durch die sehr geringe Höhe der Schallquellen die Absorption besonders effektiv in der Nähe der Quelle (Fresnel-Zonen-Modell) auswirkt. Der gezielte Aufbau der Fahrbahn mit lateral veränderlichen akustischen Eigenschaften (Streifen in Fahrtrichtung) würde zu einem breitbandigen Absorber führen. Dieser Gedanke kann mit dem Berechnungsmodell nachgewiesen, technologisch jedoch zum heutigen Zeitpunkt nur schwer umgesetzt werden.

Der Aufbau eines porösen Asphalts mit Schmutzfilter, darunter versteht man das Aufbringen einer Schicht mit relativ geringer Porosität über einer Schicht mit hoher Porosität, konnte mit Hilfe der Modellrechnung als günstig bewertet werden.

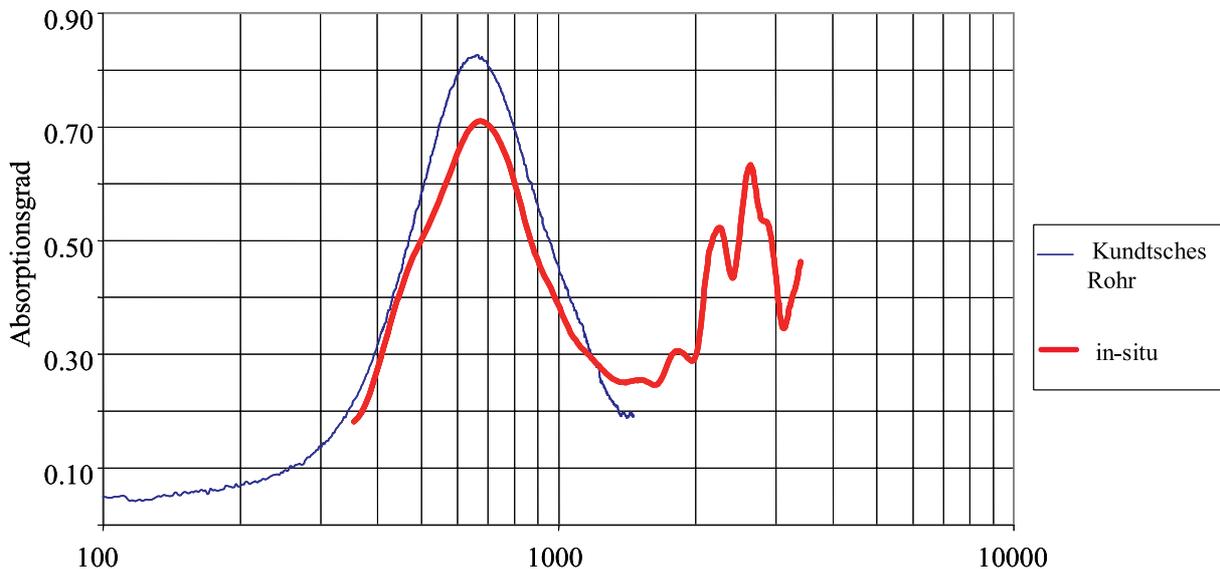


Bild 5: Absorptionsgrad eines offenporigen Asphaltbelages gemessen an der real existierenden Fahrbahn vor Ort und an einem der Fahrbahn entnommenen Bohrkern im Kundtschen Rohr.

In Bild 4 ist beispielhaft das Schallfeld bei 1 kHz über einer reflektierenden Fläche (rechts) dem Schallfeld über einer 3 cm dicken porösen Asphaltschicht (links) gegenübergestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die offenporige Deckschicht zu einer erheblichen Minderung des Schalldruckpegels führt. Diese Minderung ist auf einen Interferenzeffekt an der Grenzschicht zwischen Fahrbahn und Luft zurückzuführen. In der Optik wird dieser Effekt bei der Herstellung von Interferenzlichtfiltern erfolgreich ausgenutzt.

„In situ“ – Messtechnik

Zur Validierung der Modellansätze wurde eine „in situ“ Messtechnik entwickelt [Hübelt 2001]. Diese erlaubt die Messung der komplexen Wandimpedanz der realen Straße direkt vor Ort. Dem Aufbau eines komfortablen Messsystems (Bild 6) ging eine intensive Auswertung der bekannten Methoden der „in-situ“ Messtechnik voraus. Hierbei erwies sich das Verfahren nach [Bolton 1984], bei dem zur Extraktion der akustischen Eigenschaften aus den gemessenen Impulsantworten des Systems Schallfeld/Straße das Cepstrum verwendet wird, als am besten geeignet. Die Methode weist jedoch im Bereich tiefer Frequenzen ($f < 800$ Hz) eine erhebliche Fehleranfälligkeit auf.

Zur Erprobung des Algorithmus erfolgte anschließend der Aufbau einer Messapparatur. Diese Apparatur wurde zunächst in schallreflexionsarmer Umgebung getestet und entsprechend den Erfahrungen eines jeden in-situ-Einsatzes stetig vervollkommen. Da zum Beispiel die Messungen oft während des fließenden Verkehrs stattfanden, war es notwendig, eine Punktschallquelle mit ausreichend hoher Schallleistung zu konzipieren. Eine optimale Lösung wurde dabei durch die Kombination eines Horntriebers mit einem flexiblen Schlauch gefunden. Die Übertragungsfunktion des Schlauches als akustischer Wellenleiter weist eine Kammfilterfunktion auf. Durch die Variation der Schlauchlänge kann diese Filterfunktion auf die untere Grenzfrequenz des zu bestimmenden Schalldruckpegel-Frequenz-Spektrums abgestimmt werden.

Die akustische Vermessung offenporiger Asphalte wurde mit der Genehmigung der zuständigen Ämter auf einem Versuchsgelände in Sperenberg, auf Parkplätzen am Flughafen Dresden und auf verschiedenen Bundesautobahnen durchgeführt (Bild 5). Zur Bestätigung der Messergebnisse sind dazu an den Messorten Bohrkerne oder zumindest Proben des verwendeten Mischgutes entnommen worden.

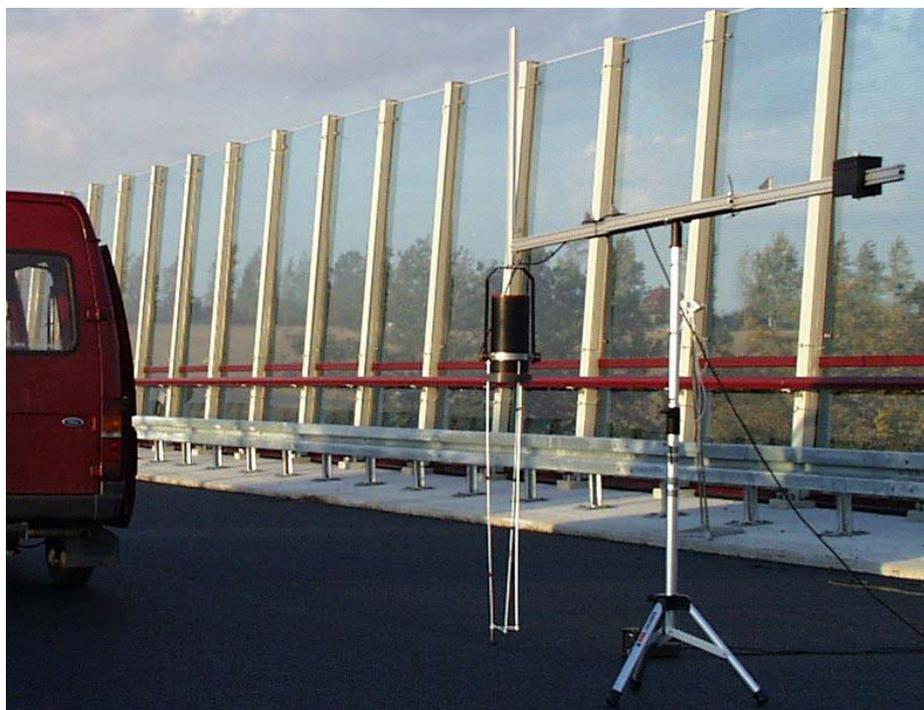


Bild 6: Messvorrichtung zur winkelabhängigen Bestimmung der Wandimpedanz der Fahrbahnoberfläche.

Zusammenfassung

Das Rollgeräusch von Kraftfahrzeugen ist eine der wesentlichen Quellen des Straßenverkehrslärms. Es wird sowohl durch Eigenschaften des Reifens als auch durch Eigenschaften der Fahrbahn beeinflusst. Zur Minderung des Rollgeräuschs genügt es daher nicht, die Reifen allein zu untersuchen und zu verbessern. Auch Kenntnisse über die akustischen Fahrbahneigenschaften sind notwendig.

Zu den wichtigsten Zielen des Projektes gehörte es daher, ein theoretisches Modell zu schaffen, das die detaillierte Untersuchung des Einflusses der Fahrbahn auf die Schallentstehung und -ausbreitung am System Reifen/Straße erlaubt. Die Untersuchungen konzentrierten sich dabei auf offenporige Fahrbahnbeläge. Solche Beläge haben das höchste Lärminderungspotential, da sie in der Lage sind, Schallenergie zu absorbieren.

Im Rahmen des Projekts wurde demzufolge die Fahrbahn als Schallabsorber modelliert. Verschiedene bekannte Theorien für Absorber wurden angewendet und weiterentwickelt. Die notwendigen Eingangsparameter zur Vorhersage der akustischen Eigenschaften sind die Porosität, der längenbezogene Strömungswiderstand und die Tortuosität. Im Projekt wurden Verfahren entwickelt, um diese Parameter aus der Rezeptur des Asphaltmischgutes vorherzusagen. Die Bestätigung der erreichten Ergebnisse erfolgte an über 200 eigens hergestellten Asphaltproben. Die notwendigen Messgeräte wurden ebenfalls innerhalb des Projekts entwickelt, gebaut und erprobt.

Zur quantitativen Abschätzung der Rollgeräuschminderung wurde zugrundegelegt, dass die Entstehung des Rollgeräuschs auf offenporigen Fahrbahnen zumindest nicht über die auf dichten Fahrbahnen mit ähnlichen Textur-Eigenschaften hinausgeht. Davon ausgehend, wurde die Schallpegelminderung im Nahfeld am Reifen und bei der Ausbreitung über der Fahrbahn berechnet. Dazu kamen verschiedene numerische und analytische Berechnungsverfahren zur Anwendung; u.a. wurde ein spezielles Randelementeverfahren und ein Transmission-Line-Matrix-Verfahren entwickelt. Die Untersuchungen mündeten in einem analytischen Ansatz, dessen Ergebnisse zur akustischen Optimierung von Fahrbahnaufbauten verwendet werden können.

Zur Überprüfung der akustischen Eigenschaften von vorhandenen Fahrbahnen wurde ein Messverfahren entwickelt. Dieses Messverfahren ermöglicht die Bestimmung der akustischen Impedanz und des Absorptionsgrades von Fahrbahnen in situ auf der Grundlage der Impuls-Echo-Methode. Durch eine neuartige Signalverarbeitung konnte die Zuverlässigkeit dieser Methode stark verbessert werden.

Insgesamt wurde mit den entwickelten Modellen, Messverfahren und -geräten die Grundlage für eine systematische und gezielte akustische Optimierung der akustischen Eigenschaften von ein- oder mehrschichtigen Fahrbahnaufbauten geschaffen.

Literatur

- [Beckenbauer 2001] BECKENBAUER, T. ; KUIJPERS, A.: Prediction of pass by levels depending on road surface parameters by means of a hybrid model. In: *Inter-Noise 2001, International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Hague (Netherlands), 2001*
- [Bolton 1984] BOLTON, J. S. ; GOLD, E.: The Application of Cepstral Techniques to the Measurement of the Transfer Functions and Acoustical Reflection Coefficients. In: *Journal of Sound and Vibration* 93 (1984), Nr. 2, S. 217–233
- [Descornet 2000] DESCORNET, G.: Low-noise road surface techniques and materials. In: *Inter-Noise 2000, International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Nice (France), 2000*
- [Gelosa 1999] GELOSA, E. ; CERVI, E.: Predictive model of noise due to tyre structural vibrations. In: *First International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction*. Rom, May 1999
- [Hamet 1992] HAMET, J.: Modelisation acoustique d'un enrobe drainant / INRETS. 1992. – Forschungsbericht
- [Heutschi 2001] HEUTCHI, K.: New Swiss source model for road traffic noise. In: *Inter-Noise 2001, International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Hague (Netherlands), 2001*
- [Hübelt 2001] HÜBELT, J. ; LERCH, T. ; SARRADJ, E.: Porous road surfaces: Acoustical characteristics, models and measurements, 2001, ICA Rom 2001.
- [Hübelt 2002] HÜBELT, J. ; SARRADJ, E.: A model for the optimization of porous road surfaces. In: *Inter-Noise 2002, International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering, Detroit (USA), 2002*
- [Hübelt 2003] HÜBELT, J.: Modelling of porous asphalt as extended reacting absorber using the transmission line matrix method (TLM). In: *Euronoise 2003*. Naples, Italy, May 19-21 2003
- [Huschek 1986] HUSCHEK, S.: Zur Entwicklung l'armmindernder Straßenoberflächen. In: *Bitumen* (1986), S. 163–167
- [Huschek 2001] HUSCHEK, S.: Texturmessungen auf acht offenporigen Asphaltplatten / TU Berlin, Fachgebiet Straßenbau. 2001. – Forschungsbericht
- [Kuijpers 2001] KUIJPERS, A. ; BLOKLAND, G. van: Tyre/road noise models in the last

- [Larsson 2001] two decades: a critical evaluation. In: *Proc. of the Inter-Noise '01*, 2001
LARSSON, Krister: A rolling contact model using Green's functions. In:
*Inter-Noise 2000, International Congress and Exhibition on Noise Control
Engineering, Nice (France)*, 2000
- [Li 1998] LI, K. M. ; WATERS-FULLER, T. ; ATTENBOROUGH, K.: Sound
propagation from a point source over extended-reaction ground. In: *Journal
of the Acoustical Society of America* 104 (1998), Nr. 2, S. 679–685
- [Rasmussen 1982] RASMUSSEN, K.B.: A note on the calculation of sound propagation over
impedance jumps and screens. In: *Journal of Sound and Vibration* 84
(1982), Nr. 4, S. 598–602
- [Ronneberger 1981] RONNEBERGER, D. ; RICHTER, K. ; FLÖTKE, H. ; HELMSEN, F. ;
SCHAAF, K.: Der Reifen als Schalltrichter. Grundlegende Mechanismen der
Schallerzeugung und -abstrahlung. In: *Entwicklungsrichtlinien in Kfz-
Technik und Straßenverkehr* (1981), S. 476–484
- [Ronneberger 1985] RONNEBERGER, D.: Reifenrollgeräusche. In: *11. Tagung der Deutschen
Arbeitsgemeinschaft für Akustik (DAGA 85), Hamburg, Tagungsband*,
1985, S. 75–86
- [Ronneberger 1985] RONNEBERGER, D.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen
spezieller Mechanismen der Rollgeräuschenentstehung und -abstrahlung /
Universität Göttingen. 1985. – Forschungsbericht
- [Ronneberger 1989] RONNEBERGER, D.: Verkehrslärm: Reifenrollgeräusche. In: *Physik in
unserer Zeit* Bd. 20, 1989, S. 82–90
- [Roo 2000] ROO, F. de ; GERRETSEN, E.: TRIAS-Tyre/road interaction acoustic
simulation model. In: *Inter-Noise 2000, International Congress and
Exhibition on Noise Control Engineering, Nice
(France)*, 2000
- [Sandberg 2001] SANDBERG, U.: Abatement of traffic, vehicle, and tire/road noise - the
global perspective. In: *Noise Control Eng. J.* 49 (2001), Nr. 2, S. 170–181
- [Sandberg 2002] SANDBERG, Ulf ; EJSMONT, J.A. ; SANDBERG, Ulf (Hrsg.): *Tyre/road
noise - Reference book*. 1. Harg : Informex, 2002 (ISSBN 91-631-2610-9)
- [Sarradj 2003] SARRADJ, E.: Multi-Domain Boundary Element Method for Sound Fields
in and around Porous Absorbers. In: *Acta Acustica united with Acustica*
(2003). – erscheint Anfang 2003
- [Sen 1981] SEN, P. ; SCALA, C. ; COHEN, M.: A self-similar model for sedimentary
rocks with application to the dielectric constant of fused glass beads. In:
Geophysics 46 (1981), Nr. 5, S. 781–795