

Operational Modal Analysis (OMA) an Straßen

FA 2.349

Forschungsstelle: Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, Dresden

Bearbeiter: Hübelt, J. / Schulze, C. / Ruhnau, M.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn

Abschluss: Juli 2014

1 Einleitung

Ein aktuelles Problem der industriellen Zeit stellt der kontinuierlich zunehmende Verkehrslärm dar. Zur Vermeidung der Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit existieren verschiedene Strategien der Minderung des Verkehrslärms, insbesondere des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs. Der Fokus primärer Schallschutzmaßnahmen liegt dabei auf der Lärminderung in unmittelbarer Nähe der Schallquelle. Im konkreten Fall des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs ist die Schallemission im Bereich der Kontaktstelle zwischen Reifen und Straße besonders von der Fahrbahnoberfläche und den Reifeneigenschaften abhängig.

Zur Minderung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs werden zum Beispiel Fahrbahnoberflächen und Fahrzeugreifen im Hinblick auf deren Schall- und Schwingungsverhalten optimiert. Im Gegensatz dazu finden sekundäre Schallschutzmaßnahmen wie Schallschirme, Wälle und Tröge zur Beeinflussung des Schalls auf dem Ausbreitungsweg Anwendung, um am Immissionsort zur Minderung des Schalldruckpegels zu führen. Dabei ist zum Beispiel zu kalkulieren, ob breitflächig installierte sekundäre Schallschutzmaßnahmen gegenüber primären Schallschutzmaßnahmen zu höheren Kosten führen.

Ziel der Untersuchungen war die schalltechnische Bewertung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs unter Berücksichtigung der Fahrbahneigenschaften. In den letzten Jahren wurden Untersuchungen durchgeführt, eine Geräuschkinderung von Straßen durch den Einsatz von elastischen Schichten, insbesondere unterhalb der Fahrbahndeckschicht, zu erzielen. Grundprinzip dieses Ansatzes ist die Beeinflussung der schwingungstechnischen Anregung der Fahrbahn und des Reifens.

Zur Erweiterung des Kenntnisstands über die akustische Wirkungsweise von Fahrbahnbefestigungen mit elastischen Zwischenschichten wurden korrelierte Messungen von Schwingungen und resultierender Geräuschemission an acht bestehenden Fahrbahnbefestigungen unterschiedlichen Aufbaus durchgeführt. Die Anregung der Fahrbahnoberfläche erfolgte dabei durch kontrollierte Fahrzeugüberfahrt.

Unterstützend durch die mechanische und schalltechnische Bewertung der Schichtaufbauten der Fahrbahnoberflächen mithilfe konventioneller Shaker-Anregung wurden Zusammenhänge zwischen dem Schwingverhalten der Struktur und der resultierenden Schallabstrahlung der Fahrbahnbefestigung abgeleitet. Mithilfe eines speziell entwickelten Berechnungsmodells soll es zukünftig möglich sein, Hinweise zur weiteren Optimierung von Fahrbahnbefestigungen mit elastischen Zwischenschichten im Hinblick auf eine mögliche Geräuschkinderung

geben zu können. Im Fokus der vorliegenden Untersuchungen lag dabei die Bewertung des Anteils der über die Fahrbahnbefestigung abgestrahlten Schalleistung an der während der Fahrzeugvorbeifahrt insgesamt emittierten Schalleistung. Die Anteile der durch den Reifen sowie in Folge von Air-pumping abgestrahlten Schalleistung wurden dabei nicht im Detail modelliert.

2 Modellierung der Schallabstrahlung von Fahrbahnbefestigungen

Im ersten Schritt wurden mathematische Beschreibungen zur Schallemission von gelenkig gelagerten Platten mit geringem sowie hohem Dämpfungsverhalten zusammengestellt und messtechnisch sowie numerisch verifiziert. Dabei hat es sich als zielführend erwiesen, das Berechnungsmodell in drei Hauptabschnitte – von der schwingungstechnischen Anregung der Fahrbahn, über die Körperschallausbreitung in der Struktur bis hin zur Schallabstrahlung der Fahrbahnbefestigung – zu unterteilen (vgl. Bild 1 aus [KOLLMANN, 2006]). Die dabei gewonnenen Erkenntnisse waren Voraussetzung für die Bewertung der Ergebnisse der innerhalb des Projekts durchgeführten korrelierten Messungen von Schwingungen und resultierender Geräuschemission an Fahrbahnbefestigungen.

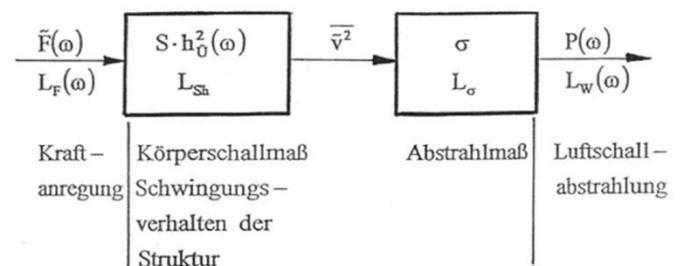


Bild 1: Blockschaubild der Maschinenakustischen Grundgleichung aus [KOLLMANN, 2006]

3 Messtechnische Voruntersuchungen

Im zweiten Schritt erfolgten erste messtechnische Voruntersuchungen an einer asphaltierten Teststrecke in Dresden. Dabei kamen zwei verschiedene mechanische Anregungsformen zum Einsatz – die punktförmige Anregung mittels Shaker sowie die reale Anregung bei kontrollierter Vorbeifahrt eines Pkw. Die Shakermessungen dienten der Bestimmung der mechanischen Eingangsimpedanz und der ortsabhängigen Schwingfrequenz der Fahrbahnbefestigungen. Anhand der Messergebnisse der ortsabhängigen Schwingfrequenz konnte gezeigt werden, dass die mechanische Anregung der Fahrbahnoberfläche bei kontrollierter Fahrzeugvorbeifahrt näherungsweise durch punktförmige Shakeranregung abgebildet werden kann. Dies ermöglicht die messtechnische Bestimmung der Schwingfrequenz auf der Fahrbahnoberfläche in unmittelbarer Nähe zum Punkt des direkten Kräfteintrags und damit in dem für die Luftschallemission der Fahrbahn relevanten Bereich. Die zeitgleiche Messung der Luftschallemission während der Fahrzeugvorbeifahrt gewährleistet anschließend die Einordnung der Schallemission der Fahrbahnoberfläche zur gesamten Schallemission während der Fahrzeugvorbeifahrt.

4 Messtechnische Untersuchungen

Im dritten Schritt wurden messtechnische Untersuchungen auf acht verschiedenen nichtelastischen/elastischen Dünnschichtbelägen auf dem NATO-Gelände in Geilenkirchen durchgeführt (vgl. Tabelle 1). Die mechanische Anregung der einzelnen Fahrbahnoberflächen erfolgte wiederum zum einen durch Anwendung eines Shakers (vgl. Bild 2 und Bild 3), zum anderen durch kontrollierte Vorbeifahrt eines Pkw mit der Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h (vgl. Bild 4 und Bild 5).

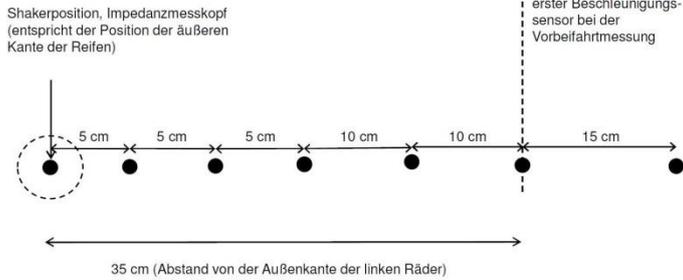


Bild 2: Prinzipdarstellung der Messanordnung zur Bestimmung der mechanischen Eingangsimpedanz der Fahrbahnoberflächen sowie der ortsabhängigen Schwingschnelle bei mechanischer Anregung der Fahrbahnoberflächen mit Shaker



Bild 3: Messanordnung zur Bestimmung der mechanischen Eingangsimpedanz der Fahrbahnoberflächen sowie der ortsabhängigen Schwingschnelle bei mechanischer Anregung der Fahrbahnoberflächen mit Shaker

Tabelle 1: Beschreibung der einzelnen untersuchten Testfelder auf dem NATO-Gelände in Geilenkirchen

| Feld | Bezeichnung | Aufbau |
|------|--------------------------------------|---|
| 1 | BSW Regupol Version II (offen) | 2,5 cm SMA 5 S 0,6 cm Regupol II 5,9 cm AC 16 B S |
| 2 | BSW Regupol Version I (dicht) | 2,5 cm SMA 5 S 0,6 cm Regupol I 5,9 cm AC 16 B S |
| 3 | HNL Einstreugummi | 2,5 cm SMA 5 S 0,6 cm Einstreugummi 5,9 cm AC 16 B S |
| 4 | HNL Spezialasphalt | 2,5 cm SMA 5 S 1,5 cm Spezialasphalt 5,0 cm AC 16 B S |
| 5 | HNL Spezialasphalt | 2,5 cm SMA 5 S 2,5 cm Spezialasphalt 4,0 cm AC 16 B S |
| 6 | RUB IA 5 (dicht) | 2,5 cm SMA 5 S 1,5 cm IA 5 5,0 cm AC 16 B S |
| 7 | RUB IA 5 (offen) | 2,5 cm SMA 5 S 1,5 cm IA 5 5,0 cm AC 16 B S |
| Ref | Referenz | 2,5 cm SMA 5 S 6,5 cm AC 16 B S |

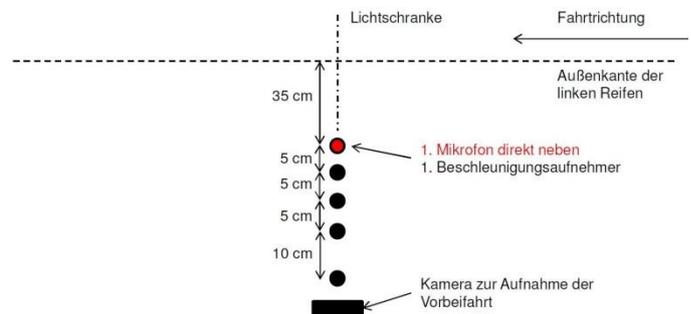


Bild 4: Prinzipdarstellung der Messanordnung zur Bestimmung der ortsabhängigen Schwingschnelle sowie der Luftschallemission der Fahrbahnoberflächen bei mechanischer Anregung der Fahrbahnoberflächen durch kontrollierte Vorbeifahrt eines Pkw



Bild 5: Messanordnung zur Bestimmung der ortsabhängigen Schwingschnelle sowie der Luftschallemission der Fahrbahnoberflächen bei mechanischer Anregung der Fahrbahnoberflächen durch kontrollierte Vorbeifahrt eines Pkw

Die Ergebnisse der Shakermessungen zeigten, dass die Fahrbahnoberflächen mit elastischer Zwischenschicht gegenüber dem Referenzbelag eine um bis zu Faktor 10 geringere mechanische Eingangsimpedanz aufweisen (vgl. Bild 6).

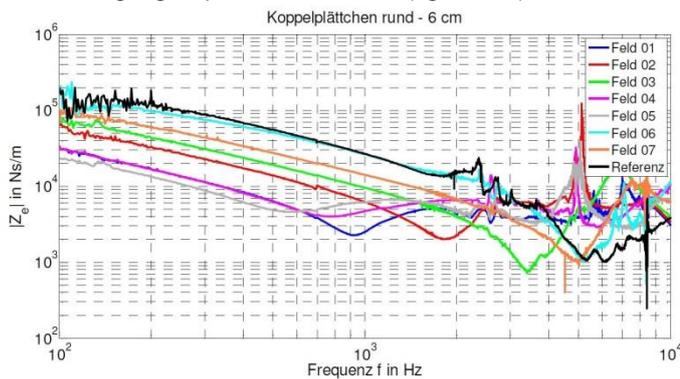


Bild 6: Messtechnisch bestimmte mechanische Eingangsimpedanz der Testfelder durch das Kopplungsplättchen mit dem Durchmesser 6 cm in Abhängigkeit von der Frequenz

Die mechanische Anregung der Fahrbahnoberfläche durch kontrollierte Vorbeifahrt des Pkw verursachte auf einigen Testfeldern eine deutlich größere Amplitude der Beschleunigung und der Schwingschnelle (vgl. Bild 7) als auf dem nichtelastischen Referenzbelag. Dies betraf genau die Testfelder mit der messtechnisch am geringsten bestimmten mechanischen Eingangsimpedanz. Erwartungsgemäß kann somit von einer vorhandenen umgekehrten Proportionalität zwischen der mechanischen Eingangsimpedanz der Testfelder und dem während der kontrollierten Vorbeifahrt eines Pkw auf der Fahrbahnoberfläche erzeugten Körperschall ausgegangen werden.

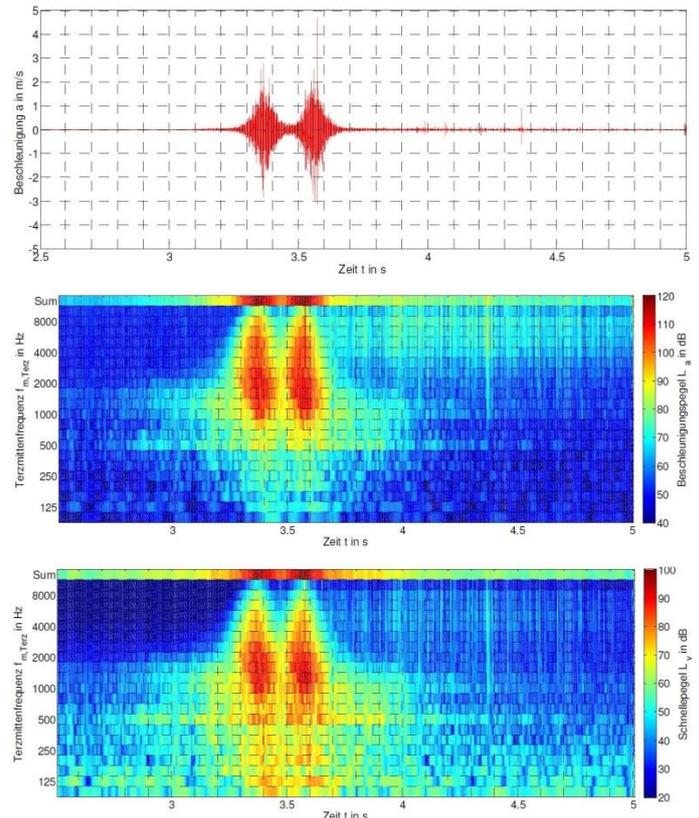


Bild 7: Exemplarische Messergebnisse des Körperschalls auf der Fahrbahnoberfläche während kontrollierter Fahrzeugvorbeifahrt im Abstand von 35 cm zur Reifenaußenkante auf Feld 1; Fahrzeuggeschwindigkeit 80 km/h; oben: Zeitverlauf der Beschleunigung; mittig: Sonogramm des Terzband-Beschleunigungspegels; unten: Sonogramm des Terzband-Schwingschnellepegels

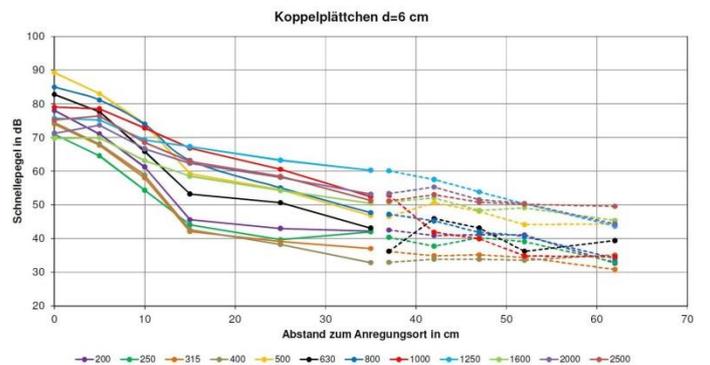


Bild 8: Exemplarische Messergebnisse des Terzband-Schwingschnellepegels auf der Fahrbahnoberfläche von Feld 1 in Abhängigkeit vom Abstand zum Punkt der mechanischen Anregung; gestrichelte Linien: kontrollierte Fahrzeugvorbeifahrt mit Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h; kontinuierliche Linien: Shakermessung (frequenzabhängige Anpassung der Amplitude für den Abstand zur Reifenaußenkante von ca. 0,35 m an Ergebnisse bei kontrollierter Vorbeifahrt)

Die Kombination der Ergebnisse von Shakermessungen und kontrollierter Vorbeifahrt ermöglichte die Darstellung des zu erwartenden Verlaufs der abstandabhängigen Körperschallausbreitung bei realer mechanischer Anregung durch die Fahrzeugvorbeifahrt über einen vergrößerten Abstandsbereich, beginnend am Punkt des direkten Kräfteintrags. Es zeigt sich,

dass der an der Fahrbahnoberfläche erzeugte Schwingungspegel, in tendenzieller Übereinstimmung mit dem Berechnungsmodell der punktförmigen mechanischen Anregung, mit zunehmendem Abstand vom Anregungsort abfällt (vgl. Bild 8).

Die Messergebnisse der Luftschallemission am Mikrophon im Abstand von 0,35 m zur Reifenaußenkante unmittelbar über der Fahrbahnoberfläche bei kontrollierter Fahrzeugvorbeifahrt zeigten, dass die verschiedenen untersuchten Fahrbahnoberflächen mit elastischen Zwischenschichten keine signifikanten Unterschiede in der Geräuschemission aufweisen, trotzdem starke Unterschiede in der mechanischen Eingangsimpedanz auftreten. Die ermittelte maximale Pegelminderung gegenüber dem Referenzbelag von ca. 1 dB(A) liegt im Bereich der Genauigkeit des Messverfahrens (vgl. Bild 9).

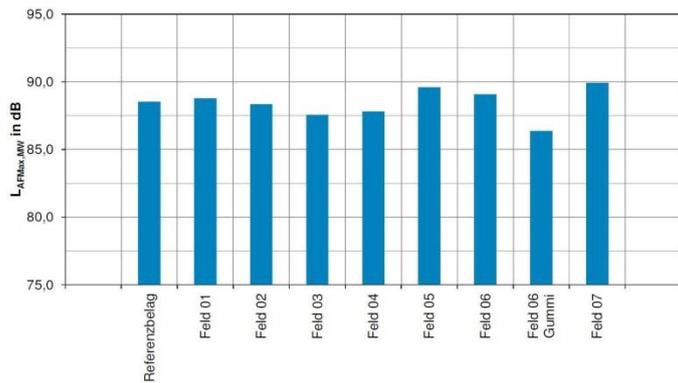


Bild 9: Messergebnisse des maximalen Vorbeifahrtpegels am Mikrophon im Abstand von 0,35 m zur Reifenaußenkante unmittelbar über der Fahrbahnoberfläche bei kontrollierter Fahrzeugüberfahrt der verschiedenen Testfelder

Zu Demonstrationszwecken wurde die Oberfläche des Testfelds 6 zusätzlich mit einer Gummi-Abstreuerung verändert. Dadurch konnte eine relevante Minderung des maximalen Vorbeifahrtpegels auf dem Testfeld von ca. 3 dB(A) erzielt werden. Es zeigte sich, dass der energetische Schwerpunkt des Terzband-Schwingungspegels für die Mittenfrequenz von 500 Hz durch die Gummi-Abstreuerung zu deutlich tieferen Terzbändern verschoben wurde (vgl. Bild 10). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Gummi-Abstreuerung nicht nur die mechanische Eingangsimpedanz der Fahrbahnoberfläche verändert hat, sondern auch die Textur der Fahrbahnoberfläche. Im Gegensatz dazu wurde für alle anderen untersuchten Testfelder eine einheitliche Textur angestrebt.

5 Bewertung

Die Beurteilung des gemessenen Reifen-Fahrbahn-Geräuschs der verschiedenen Testfelder auf der Grundlage der erprobten Berechnungsmodelle sowie der ermittelten Fahrbahnparameter ergab, dass der Anteil der von der Fahrbahnoberfläche abstrahlten Schalleistung an der emittierten gesamten Schalleistung bei der Fahrzeugvorbeifahrt nicht relevant ist (vgl. Bild 11 und Bild 9). Aussagen zum Anteil der durch den Reifen sowie in Folge von Airpumping abgestrahlten Schalleistung lassen sich durch das angewendete Bewertungsverfahren nicht treffen.

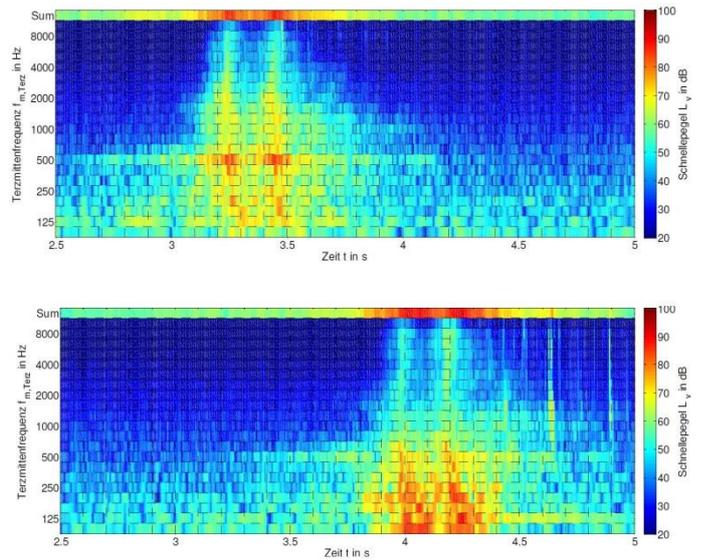


Bild 10: Sonogramm des messtechnisch bestimmten Terzband-Schwingungspegels während kontrollierter Fahrzeugüberfahrt der Fahrbahnoberfläche von Testfeld 6 im Abstand von 35 cm zur Reifenaußenkante; Fahrzeuggeschwindigkeit 80 km/h; oben: ohne Gummi-Abstreuerung; unten: mit Gummi-Abstreuerung

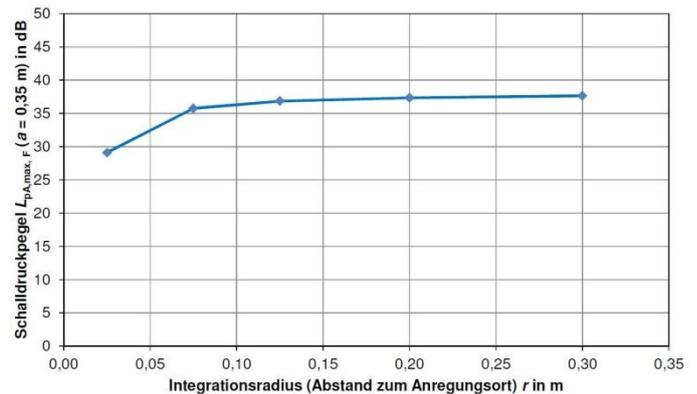


Bild 11: Berechnungsergebnisse des Immissionsschalldruckpegels im Abstand von 0,35 m zum Krafteintragungsort bei maximaler emittierter Schalleistung der Fahrbahnoberfläche von Feld 1 bei kontrollierter Fahrzeugvorbeifahrt mit einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h in Abhängigkeit vom effektiven Radius der relevanten kreisförmigen Querschnittsfläche

6 Literatur

Kollmann, F., G.; Schösser, T. F.; Anger, R.: Praktische Maschinenakustik. 1. Auflage, Berlin u. a. Springer-Verlag, 2006