Reifen-Fahrbahn-Geräusche – Minderungspotenziale der Straßenoberfläche

Thomas Beckenbauer
Müller-BBM GmbH, Planegg; Email: TBeckenbauer@MuellerBBM.de

Einleitung

Aufgrund der Dominanz der Antriebsgeräusche bei der beschleunigten Vorbeifahrt und der erheblichen Verschärfung der Grenzwerte in der akustischen Typprüfung von Straßenfahrzeugen in den vergangenen 25 Jahren hat sich die Bedeutung von Antriebs- und Rollgeräuschen für die durch den fließenden Straßenverkehr hervorgerufene Schalllast deutlich verändert [1]. Heute tragen die Reifen-Fahrbahn-Geräusche bei Pkw bereits ab Geschwindigkeiten von 40 km/h den Hauptanteil an den vom Straßenverkehr ausgehenden Schallemissionen. An der Entstehung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche sind Reifen- und Fahrbahneigenschaften gleichermaßen beteiligt, weshalb Fahrbahnoberflächen zukünftig auch funktionale Anforderungen in Zusammenhang mit dem Lärmschutz erfüllen werden müssen.

Um die systematische und zielgerichtete Verminderung der Straßenverkehrsgeräusche durch eine entsprechende Gestaltung der Straßenoberfläche zu unterstützen ist neben der qualitativen Kenntnis der Entstehungsmechanismen eine quantitative Beschreibung der Abhängigkeit der Reifen-Fahrbahn-Geräusche von den bautechnischen und strukturellen Eigenschaften der Straßenoberfläche notwendig. Die diesbezüglichen Arbeiten wurden in den vergangenen fünfzehn Jahren im In- und Ausland intensiviert. Die Ergebnisse geben deutliche Hinweise auf mögliche Geräuschminderungspotenziale. Hierüber wird in diesem Beitrag berichtet.

Entstehungsmechanismen

Mit Reifen-Fahrbahn-Geräusch wird Schall bezeichnet, der durch den auf der Fahrbahnoberfläche abrollenden Reifen hervorgerufen wird und sich über die ihn umgebende Luft ausbreitet. Die Fahrbahneigenschaften spielen sowohl bei der Schallanregung und -abstrahlung als auch bei der Schallausbreitung eine Rolle.

Schallanregung

Hinsichtlich der Schallanregung sind zwei Arten von Mechanismen zu unterscheiden:

- Anregung mechanischer Schwingungen des Reifens
- Auslösung aerodynamischer Vorgänge in der Kontaktfläche

Mechanische Anregung

Die Verformung des Reifens durch den Rollvorgang und das Eindringen von Rauigkeitselementen der Fahrbahnoberfläche in die (profilierte) Lauffläche führen zu einer lokalen Änderung der dynamischen Steife und damit zu einer parametrischen Kraftanregung. Der Zusammenhang zwischen Fahrbahnrauigkeit und entstehender Kraftverteilung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt ist damit hochgradig nicht linear, wodurch auch der Zusammenhang zwischen Fahrbahnrauigkeit und messbarer Schalldruckverteilung nicht linear ist. Anzahl, Form und Ausdehnung der Kontaktflächen und damit auch der Kontaktdruckverteilung zwischen Reifen (Profil) und Fahrbahn können je nach Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche stark variieren. Radiale Kontaktkräfte in der Aufstandsfläche stellen einen sehr effizienten Entstehungsmechanismus dar.

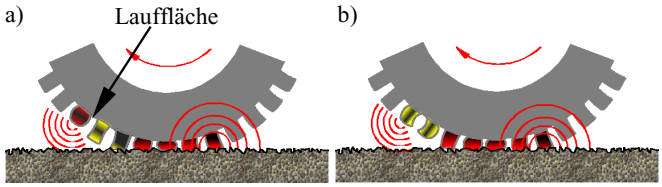

Abbildung 1. Mechanische Schwingungsanregung am rollenden Reifen. Entstehung (a) radialer Schwingungen, (b) tangentialer Schwingungen an Profilklötzen und Lauffläche.

Die Anregung des Reifens zu mechanischen Schwingungen betrifft auch die Profilklötze im Kontaktbereich. Die Klötze werden beim Abrollen unter Einwirkung großer tangentialer und radialer dynamischer Kräfte verformt, was wiederum zur Anregung von Schwingungen führt. Kommt der Profilklotz wieder los, schwingt er sowohl in radialer als auch tangentialer Richtung aus (Abbildungen 1a und 1b).

Hinsichtlich der mechanischen Anregung sind also die dynamischen Verformungen der Profilklötze und der Lauffläche durch

- den Abrollvorgang
- die Fahrbahntextur

zu unterscheiden.

Adhäsionskräfte und Gleitreibungseffekte (stick-snap bzw. stick-slip Effekte) zwischen Profilklötzen und Fahrbahn verstärken diese Effekte unter Umständen, stellen jedoch keine grundsätzlich neuen Entstehungsmechanismen dar.

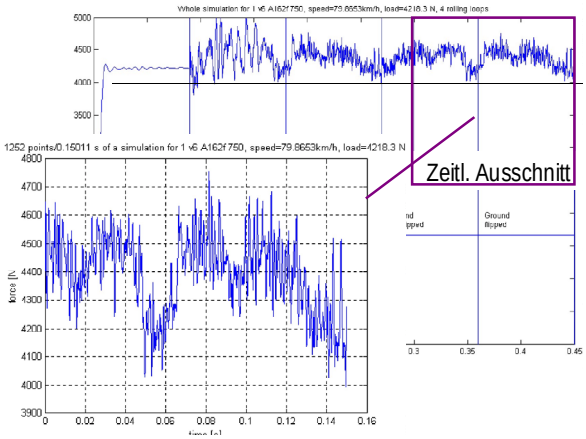

Abbildung 2. Beispiel des simulierten Zeitverlaufes der resultierenden Kontktkraft im Reifen-Fahrbahn-Kontakt durch Berechnung mit Hilfe des anaytischen Modells nach Kropp [2].

In Abbildung 2 ist ein Beispiel für den Zeitverlauf der resultierenden radialen Kraft im Reifen-Fahrbahn-Kontakt bei Simulation mit Hilfe des analytischen Modells nach Kropp [2] dargestellt. Zu Beginn der Simulation wird der profillose Reifen statisch mit einer Kraft von 4218 N beaufschlagt. Danach beginnt der Rollvorgang

auf der rauhen Fahrbahnoberfläche (Abstreuung mit einer Korngrößenverteilung von 5 bis 8 mm) mit einer Geschwindigkeit von rund 80 km/h. Nach Abklingen der Einschwingvorgänge ergibt sich der im Ausschnitt dargestellte, wiederkehrende Zeitverlauf für eine Umdrehung des Reifens. Die Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche führt zu erheblichen zeitlichen Schwankungen der resultierenden Kraft. Das zu diesem Zeitsignal gehörende Terzspektrum ist in Abbildung 3 dargestellt. Das der dargestellten Simulation zugrunde liegende Modell berücksichtigt nur radial reifeneinwärts gerichtete Kräfte („Zusammendrücken“ des elastischen Gebildes), nicht jedoch reifenauswärts gerichtete („Auseinanderziehen“), was zur Abbildung von Adhäsionseffekten notwendig wäre.

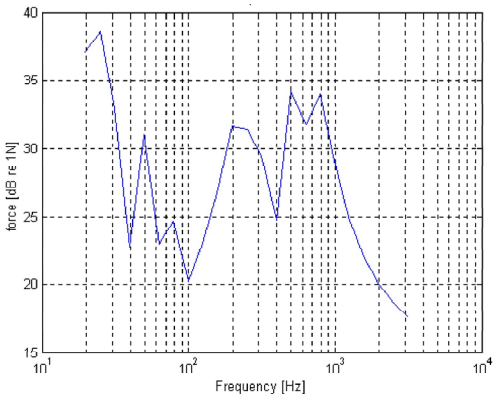

Abbildung 3. Terzspektrum der simulierten Kontaktkraft für den in Abbildung 2 gekennzeichneten Zeitausschnitt.

Aerodynamische Anregung

Luft ist ein kompressibles Medium. Dies führt dazu, dass die Luft in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn - im Gegensatz zu Wasser - nicht nur verdrängt, sondern bei hohem Staudruck in den Hohlräumen auch komprimiert wird (bei zu hohem Staudruck von Wasser schwimmt der Reifen wegen der sehr geringen Kompressibilität des Mediums auf („Aquaplaning“)). Rollt der Reifen weiter, kommen diese Hohlräume wieder frei und die eingeschlossene Luft wird entspannt („air-pumping“). Die räumliche Trennung zwischen Profileinlauf, an dem die Luft eingesaugt wird, und dem Profilauslauf, an dem die komprimierte Luft ausströmt, ist akustisch von Bedeutung. Sie führt zur Abstrahlung höherfrequenter Schallanteile (f > 1 kHz), wogegen sich tieffrequente Schallanteile mit - im Vergleich zur Länge der Reifenaufstandsfläche - großen Wellenlängen bereits unmittelbar an der Kontaktfläche aufgrund der Gegenphasigkeit der Vorgänge am Profilein- und -auslauf kompensieren.

Rotation und Fortbewegung des Reifens und die Verdrängung an Hindernissen in der Kontaktfläche (Fahrbahnrauigkeit) führen zu Strömung der Luft durch die von Profil und Fahrbahn gebildeten Kanäle, Hohlräume und Begrenzungsflächen. Sowohl die Gestalt als auch die Abmessungen dieser von Reifen und Fahrbahn gebildeten Hohlräume und Begrenzungsflächen spielen dabei eine wichtige Rolle. Insofern geht also die dreidimensionale Gestalt der Fahrbahnoberfläche in die Wirksamkeit auch dieses Entstehungsmechanismus ein.

Hinsichtlich der aerodynamischen Anregung sind im wesentlichen zwei Mechanismen zu unterscheiden:

- Kompressions- und Dekompressionsvorgänge in abgeschlossenen Hohlräumen (air pumping)
- Resonanzerscheinungen in offenen Hohlräumen
- Helmholtzresonanzen

In Abbildung 4 sind die ersten beiden Mechanismen schematisch dargestellt. Die Lage eines Helmholtzresonators, bestehend aus der schwingenden Luftmasse in der Querschnittsverengung zwischen Reifenlauffläche und Fahrbahnoberfläche und dem federnden Luftvolumen in dem abgeschlossenen Hohlraum dahinter, ist in Abbildung 5 eingezeichnet.

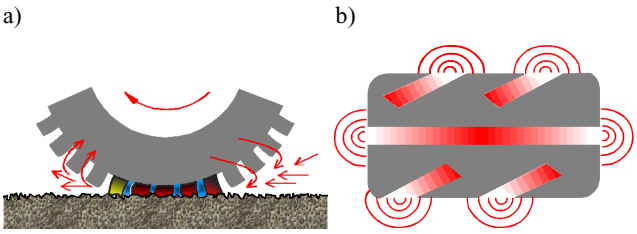

Abbildung 4. Aerodynamische Schwingungsanregung am rollenden Reifen. (a) „air-pumping“, (b) schwingende Luftsäulen im Reifen-Fahrbahn-Kontakt (Resonanzerscheinungen).

Schallabstrahlung

Der aus der Elektroakustik bekannte Trichter- oder Hornlautsprecher dient dazu, die Abstrahlung der vom trichterlosen Lautsprecher ausgehenden Schallwellen zu verbessern, das heißt zu verstärken. Ronneberger et al. [3] haben nachgewiesen, dass der von der gekrümmten Lauffläche und der Fahrbahnoberfläche gebildete Schalltrichter im Ein- und Auslauf des Reifens ebenfalls erheblich zu einer Verstärkung von bis zu +20 dB der Schallabstrahlung im Frequenzbereich ab 500 Hz beitragen kann („Horneffekt“, Abbildung 5). Die Wirksamkeit dieses und anderer Mechanismen hängt aber auch von den akustischen Eigenschaften der Fahrbahn ab. Verstärkung und Richtwirkung sind extrem empfindlich für kleine Änderungen in der Geometrie und den akustische Eigenschaften der Fahrbahn und der Reifenoberfläche. Schallabsorbierende Fahrbahnoberflächen vermindern den Horneffekt stark.

Abbildung 5. Schallabstrahlung und „Horneffekt“ (Schalltrichter blau dargestellt).

Die Effizienz der Strömungsvorgänge hängt stark vom Strömungswiderstand im Reifen-Fahrbahn-Kontakt ab. Der Horneffekt ist außerdem von den absorbierenden Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche und damit zum Teil auch vom Strömungswiderstand abhängig. In Abbildung 6 sind die Ergebnisse von Messungen des spezifischen Strömungswiderstandes R_s auf einer Vielzahl von Fahrbahnoberflächen dargestellt. Die Messungen wurden nicht im Prüfrohr, sondern in-situ in einer Kontaktfläche durchgeführt, die durch Anpressen eines in Größe und Beschaffenheit der Reifenlauffläche im Reifen-Fahrbahn-Kontakt ähnlichen elastischen Prüfkör-

pers entsteht [4]. Dadurch wird die Messung von Strömungswiderständen im Kontakt von Reifen und dichten, also nicht porösen Fahrbahnoberflächen möglich.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse von Messungen des spezifischen Strömungswiderstandes in-situ für unterschiedliche dichte und offenporige Oberflächen. Die Fahrbahnoberflächen sind in der Abbildung nach gemeinsamen Eigenschaften gruppiert. Bei der ersten Gruppe (ganz links) handelt es sich um offenporige Deckschichten in Asphalt- und Betonbauweise. Die zweite Gruppe umfasst als einzigen Belag einen Asphaltbeton 0/8 nach ISO 10844. Die dritte Gruppe umfasst Splittmastixasphalte mit den Korngrößenverteilungen 0/3, 0/5, 0/8 und 0/11. Dünne Schichten im Kalteinbau DSK 0/3 und 0/5 bilden die vierte Gruppe. B02 und A11 der fünften Gruppe stellen glatte, nicht verkehrstaugliche Oberflächen dar. Die Gruppen sechs, sieben und acht umfassen abgestreute Oberflächen mit Größtkorn von 1 bis 8 mm auf Beton, Asphalt und Gußasphalt. Bei gleichem Größtkorn besteht der Unterschied in der Kornform (“rundkörnig” oder “scharfkantig”). Bei der letzten Gruppe handelt es sich um Betonoberflächen mit rautenförmigen Rillen und Längsrillen. Bei allen Oberflächen handelt es sich um neu eingebaute Deckschichten.

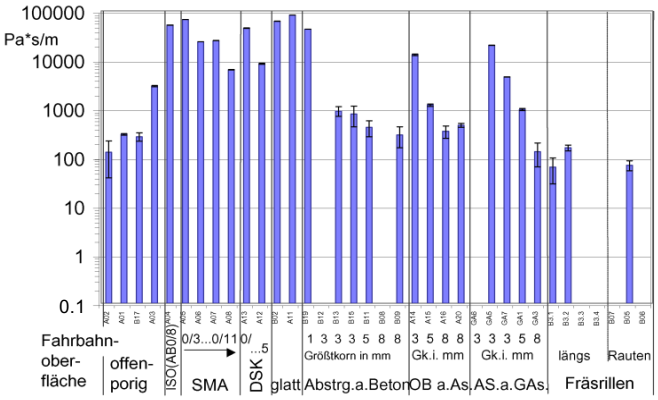

Abbildung 6. Spezifischer Strömungswiderstand R_s in-situ für unterschiedliche dichte und offenporige Fahrbahnoberflächen.

Wie Abbildung 6 zu entnehmen ist, unterscheiden sich die Strömungswiderstände um bis zu drei Zehnerpotenzen. Dichte, feinrauhe Oberflächen erreichen Werte von bis zu 100 kPa s/m, wogegen offenporige Beläge den Wert auf unter 200 Pa s/m senken können. Grobrauhe Oberflächen, die durch großkörnige Abstreuungen entstehen, weisen ebenfalls geringe Strömungswiderstände auf, da die Lauffläche des Reifens nur zu einem geringen Teil in deren Rauigkeitstiefe eindringt,.

In Abbildung 7 sind die Pegelanteile der durch die zeitabhängigen radialen Kontaktkräfte hervorgerufenen Reifenschwingungen und der durch air-pumping entstehenden aerodynamischen Geräusche für einen profillosen Reifen auf zwei verschiedenen Fahrbahnoberflächen wiedergegeben. Die Pegelanteile sind anhand einer Simulationsrechnung ermittelt [5]. Die grobrauhe Oberfläche, deren Rauigkeitsprofil in der linken Hälfte der Abbildung oben wiedergegeben ist, führt zu starker Anregung von Reifenschwingungen und einem dementprechend hohen Anteil der mechanisch induzierten Schalldruckpegel. Der air-pumpig Anteil spielt praktisch keine Rolle. Die feinrauhe Oberfläche führt dagegen zu erheblich geringeren Schalldruckpegeln der mechanisch induzierten Reifen-Fahrbahn-Geräusche und damit auch zu einem geringeren Gesamtpegel. Der air-pumping Anteil bekommt jedoch sehr viel größere Bedeutung im Frequenzbereich ab 1000 Hz, ab 1500 Hz sogar pegelbestimmende Bedeutung.

Geräuschminderung kann also grundsätzlich durch Verringerung der Fahrbahnrauigkeit und damit einer Verringerung der mechanisch induzierten Reifen-Fahrbahn-Geräusche bewirkt werden. air-pumping Mechanismus und Horneffekt werden dadurch jedoch begünstigt, weshalb die Fahrbahnrauigkeit nicht beliebig verringert werden kann und die räumliche Gestalt der Fahrbahnrauigkeit, also die Textur und die sich dadurch einstellenden Strömungsverhältnisse im Reifen-Fahrbahn-Kontakt beachtet werden müssen.

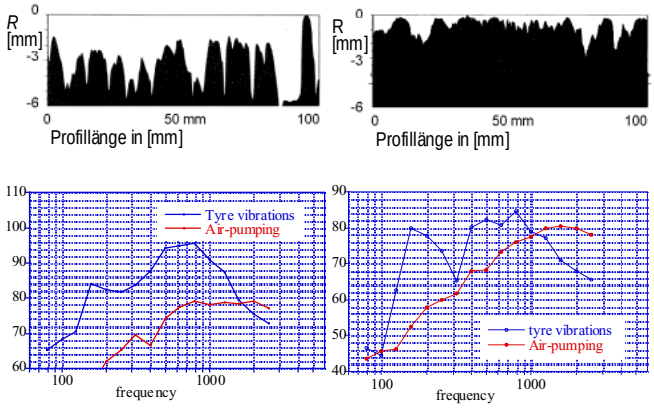

Abbildung 7. Mittlere Schalldruckpegel L_{pA} in 1 m Abstand zur Mitte der Reifenaufstandsfläche für eine grobrauhe (links) und eine feinrauhe Oberfläche (rechts). Oben sind die Rauigkeitsprofile über die Länge der Reifenaufstandsfläche dargestellt, unten die Spektren der Reifen-Fahrbahn-Geräusche getrennt nach mechanischer und aerodynamsicher Anregung.

Bezüglich der Simulationsrechnung als Hilfsmittel für den Entwurf geräuschmindernder Fahrbahndeckschichten hat sich in den letzten Jahren ein weiterer wichtiger Aspekt ergeben. Wie der Verlgeich von Mess- und Rechenergebnissen gezeigt hat [5] werden Vorbeirollpegel von Modellen, die auf die Berechnung radialer, reifeneinwärts gerichteter Kontaktkräfte und des air-pumping Anteils beschränkt sind, im Frequenzbereich oberhalb von etwa 1300 Hz für verhältnismäßig glatte Oberflächen nicht ausreichend gut wiedergegeben. In [6] wurde gezeigt, dass bei einer Frequenz von etwa 1300 Hz keine Trennung zwischen dem Einfluss mechanischer und aerodynamischer Entstehungsmechanismen stattfindet, sondern sich vielmehr die Rollenverteilung zwischen Reifen und Fahrbahn bei der Entstehung der mechanisch angeregten Schwingungen ändert. Unterhalb von etwa 1300 Hz hat die Textur der Fahrbahnoberfläche darauf maßgeblichen Einfluß, den sie oberhalb davon jedoch an den Reifen abgibt. Oberhalb von 1300 Hz ist nach wie vor mechanische Schwingungsanregung wirksam, allerdings ohne den Einfluss der für die mechanische Schwingungsanregung im tieffrequenten Bereich maßgeblichen Wellenlängen der Fahrbahnrauigkeit von 2 mm bis 500 mm. Damit kommt den Reibungsvorgängen in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche, die von mikroskopischen Vorgängen zwischen Reifen und Fahrbahn beeinflusst sind, nun größere Bedeutung zu. Auch bei konstanter Fahrgeschwindigkeit rollt der Reifen nicht reibungsfrei auf der Fahrbahnoberfläche ab. Vielmehr kommt es infolge der dynamischen Reifenverformung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung, also in tagentialen

Richtungen, zu erheblichen Gleitwegen. Durch die dabei auftretenden tangentialen und radial reifenauswärts gerichteten Kräfte werden Schwingungen mechanisch angeregt, die ebenfalls als Luftschall abgestrahlt werden.

Fahrbahneigenschaften

Systematik

Um Fahrbahnen dauerhaft herzustellen, werden im Straßenbau heute Mischungen aus bestimmten Mineralstoffen und leistungsfähigen Bindemitteln verwendet. Werden die feinstkörnigen Mineralstoffanteile im Mischgut vermieden, entstehen in der fertigen Deckschicht mehr oder weniger große, von außen für Luft zugängliche Hohlräume, also offenporige Beläge. Dichte wie offenporige Beläge können sowohl aus zementgebundenem als auch bituminösem Mischgut, das heißt sowohl aus Beton als auch aus Asphalt hergestellt werden, wobei die dauerhafte Herstellung offenporiger Betone noch am Anfang steht. Sowohl die Korngrößenverteilung der Mineralstoffe als auch der Gehalt und die Sorte des Bindemittels haben Einfluss auf die akustisch relevanten Eigenschaften der Fahrbahn. Form und Sorte des Mineralstoffs spielen bei dichten Fahrbahnbelägen akustisch keine Rolle. Bei offenporigen Belägen beeinflussen sie Gestalt und Beschaffenheit der Hohlräume, was akustisch bedeutsam ist. Aus Sicherheitsgründen muss die Fahrbahnoberfläche auch griffig sein, was durch entsprechende Oberflächenbearbeitung bewerkstelligt wird. In Abbildung 8 ist die beschriebene Systematik der akustisch relevanten bautechnischen Merkmale von Fahrbahnbelägen zusammengefasst dargestellt.

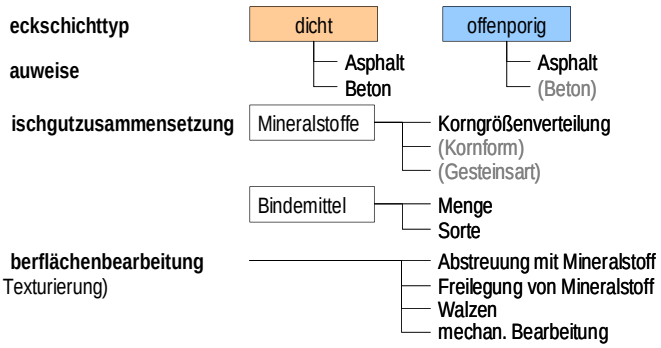

Abbildung 8. Systematik akustisch relevanter, bautechnischer Merkmale von Fahrbahnbelägen.

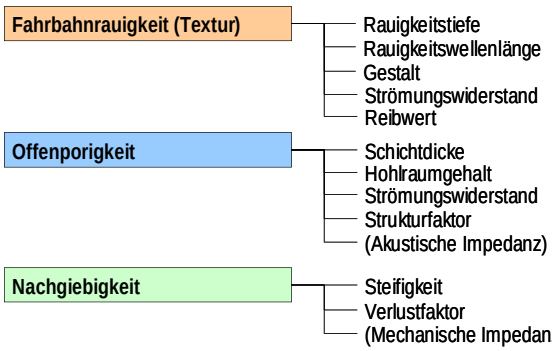

Abbildung 9. Bauweisenunabhängige Merkmale und Parameter zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften von Fahrbahnbelägen.

Unabhängig von der Bauweise und damit von den bautechnischen Eigenschaften lassen sich drei Merkmale zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften von Fahrbahnbelägen angeben: Fahrbahnrauigkeit, Offenporigkeit und Nachgiebigkeit. Alle drei Merkmale lassen sich ihrerseits jeweils durch einen Satz akustisch bedeutsamer Parameter qualifizieren und quantifizieren. Dies ist in Abbildung 9 dargestellt.

In Abbildung 10 sind Beispiele typischer Fahrbahnbeläge, die unterschiedliche Bauweisen und Typen der Oberflächenbearbeitung repräsentieren, dargestellt.

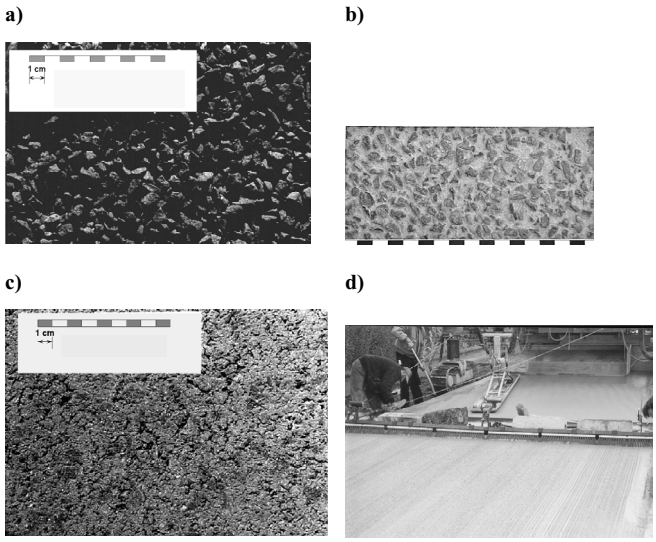

Abbildung 10. Beispiele von Fahrbahnbelägen unterschiedlicher Bauweise beziehungsweise Oberflächenbearbeitung. a) Abstreuung mit Mineralstoff: Gussasphalt mit Abstreuung Quarzporphyr Korngröße 5-8mm, b) Freilegung von Mineralstoff: Waschbeton 4-7mm, c) Walzen: Asphaltbeton Korngröße 0-8mm, d) mechanische Oberflächenbearbeitung: Betonoberfläche mit Längsglätter und Besenlängsstrich (Foto: BASt).

Textur

Die dreidimensionale geometrische Abweichung der Fahrbahnoberfläche von einer völlig ebenen Oberfläche wird als Textur bezeichnet. Die Textur einer Fahrbahnoberfläche ist wesentlich geprägt durch die räumliche Verteilung der Rauigkeit. Die Rauigkeitselemente haben unterschiedliche Formen und Größen und bestimmte oder zufällige Abstände zueinander, was zu unterschiedlicher Zusammensetzung sowohl der Rauigkeitstiefen als auch der Rauigkeitswellenlängen führt. Texturen setzen sich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Rauigkeitswellenlängen zusammen.

Die Textur wird typischerweise anhand einer Fourieranalyse des Rauigkeitsprofils bestimmt und in Form eines Texturspektrums beschrieben. Trotz vergleichbaren Texturspektrums kann die Gestalt der Textur jedoch grundsätzlich unterschiedlich sein, wobei im wesentlichen zwei Typen auftreten:

- tendenziell konkave Gestalt („Plateaus mit Schluchten“), oder
- tendenziell konvexe Gestalt („Gebirge mit Tälern“).

Die Gestalt stellt eine zusätzliche, (statistisch) unabhängige Information über die Textur einer Fahrbahnoberfläche dar. Daraus ergeben sich die in Abbildung 11 dargestellten Parameter zur Beschreibung der geometrischen Feingestalt von Fahrbahnoberflächen. Die

in Abbildung 9 zusätzlich eingetragenen Parameter Strömungswiderstand und Reibwert sind darüberhinaus zu einer akustisch vollständigen Beschreibung der Textur notwendig.

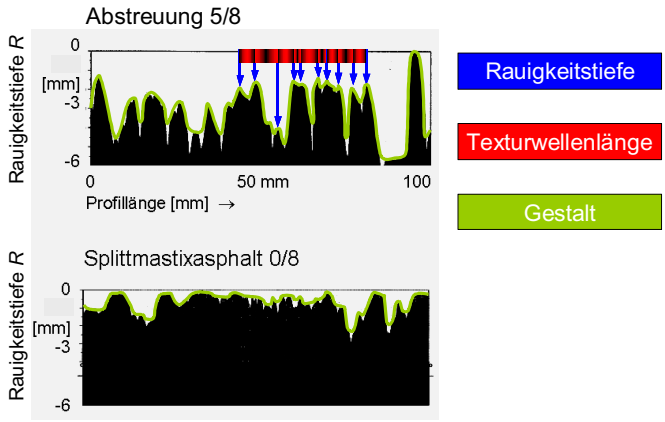

Abbildung 11. Beschreibung der Textur von Fahrbahnoberflächen. Akustisch relevante Parameter am Beispiel der Rauigkeitsprofile zweier grundsätzlich verschiedener Typen von Deckschichten.

In Abbildung 12 sind Texturspektren von dichten Fahrbahndeckschichten zweier Deckschichttypen dargestellt: auf der linken Seite Deckschichten mit freigelegtem bzw. abgestreutem Mineralstoff mit Größtkorndurchmessern von 1 mm bis 8 mm, auf der rechten Seite Deckschichten mit gewalzter Oberfläche und Größtkorndurchmessern des Mineralstoffs im Mischgut von 3 mm bis 11 mm. Die Texturspektren weisen in allen Fällen ausgeprägte Maxima (R_{max}, λ_{max} mit $\lambda_{max} = \lambda|_{R=R_{max}}$) auf, deren Höhe (bei gleichem Größtkorndurchmesser) von der Art der Oberflächenbearbeitung und deren Lage auf der Wellenlängenachse vom Größtkorndurchmesser (bei gleichem Deckschichttyp) abhängt.

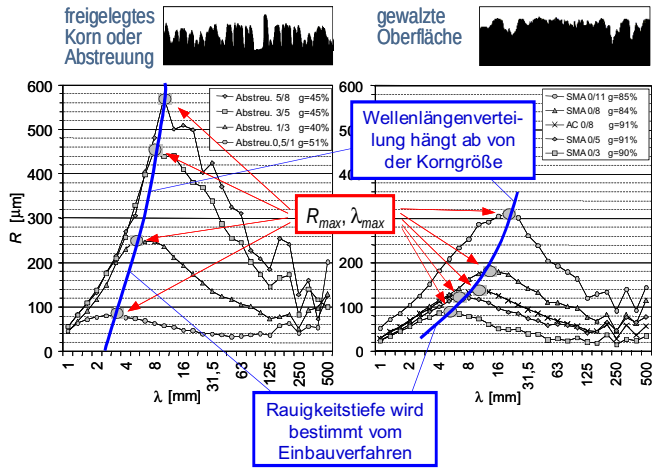

Abbildung 12. Beschreibung der Textur von Fahrbahnoberflächen. Verteilung von Rauigkeitstiefe- und Rauigkeitswellenlängen am Beispiel zweier Deckschichttypen unterschiedlicher Korngrößenverteilung.

Die Gestalt lässt sich mit Hilfe sogenannter Tragflächenkurven quantifizieren. In Abbildung 13 sind die beiden zuvor beschriebenen Gestalttypen am Beispiel zweier Deckschichten dargestellt. Deren Rauigkeitsprofile sind auf der linken Seite als Verlauf der Rauigkeitstiefe in Längsrichtung der Fahrbahnoberfläche über eine Länge von 100 mm, die etwa der Länge der Reifenaufstandsfläche entspricht, aufgetragen. Auf der rechten Seite ist die sogenannte Tragflächenkurve dargestellt. Die Tragflächenkurve gibt an, welcher prozentuale Anteil der maximal möglichen Kontaktlänge bei einer bestimmten relativen Profiltiefe erreicht wird. An der tiefsten Stelle des Profils beträgt der Traglängenanteil dementsprechend 100 %. Der Verlauf der Linien für die Traglängenanteile ist bei den beiden Gestalttypen sehr unterschiedlich und daher charakteristisch. Durch Abgreifen des Wertes des Traglängenanteils bei der halben maximalen Profiltiefe $\hat{R}/2$ ergibt sich ein Maß zur Kennzeichnung der Gestalt, das als Gestaltfaktor g bezeichnet wird. Hohe g-Werte kennzeichnen dabei tendenziell konkave Texturen, niedrige g-Werte dagegen tendenziell konvexe.

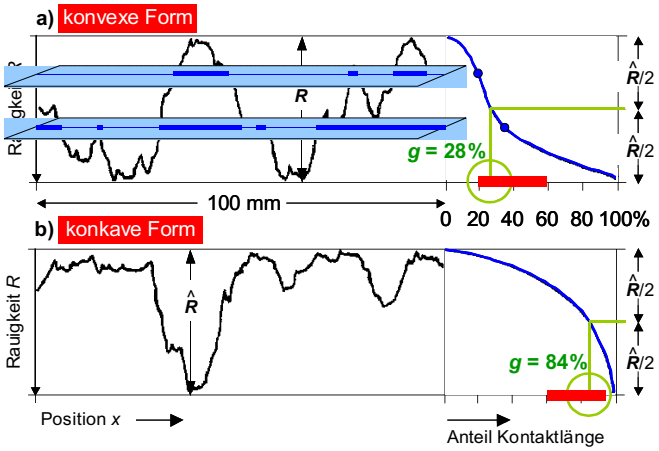

Abbildung 13. Ermittlung des Gestaltfaktors g zur Kennzeichnung der unterschiedlichen Gestalt von Texturen anhand von Tragflächenkurven.

In der Praxis ergeben sich Texturen, deren Gestaltfaktoren sich bis zu einem Faktor drei unterscheiden. Tendenziell konkave Gestalt mit Gestaltfaktoren zwischen 60 % und 90 % entsteht bei allen gewalzten Oberflächen, tendenziell konvexe Gestalt mit Gestaltfaktoren zwischen 20 % und 60 % dagegen bei allen abgestreuten Oberflächen.

Zielgröße für die Kennzeichnung der schalltechnischen Eigenschaften einer Fahrbahn ist der sogenannte Vorbeirollpegel. Als Vorbeirollpegel wird hier der maximale A-bewertete Schalldruckpegel bei der antriebslosen Vorbeifahrt eines Fahrzeugs (Gebtriebe ausgekuppelt, Motor abgeschaltet), gemessen in 7,5 m Abstand zur Fahrzeugmitte und 1,2 m Höhe über Fahrbahnoberkante, bezeichnet. Es ist möglich, den Vorbeirollpegel in Abhängigkeit von den maßgeblichen Texturparametern darzustellen. Die Darstellung bleibt hier auf dichte Oberflächen beschränkt.

Es werden drei Texturparameter berücksichtigt:

- der Effektivwert der Rauigkeitstiefe im Maximum der spektralen Hüllkurve R_{max}
- die Wellenlänge im Maximum der spektralen Hüllkurve λ_{max}
- der Gestaltfaktor g

Somit stehen drei maßgebliche Texturparameter zur Verfügung. Nachteil ist, dass der Vorbeirollpegel damit in Abhängigkeit von drei Variablen, also vierdimensional dargestellt werden muss. Dies ist anschaulich nicht möglich. Eine Reduzierung auf drei Dimensionen ohne Informationsverlust ist deshalb notwendig. Dies gelingt zufriedenstellend durch Einführung einer neuen Größe, der sogenannten charakteristischen Gestaltlänge g' , wobei gilt:

$$g' = \frac{g}{100\%} \cdot 100 \cdot \lambda_{max}$$

mit g' charakteristische Gestaltlänge in mm.
g Gestaltfaktor in %,
λ_{max} Wellenlänge im Maximum der spektralen Hüllkurve in mm,

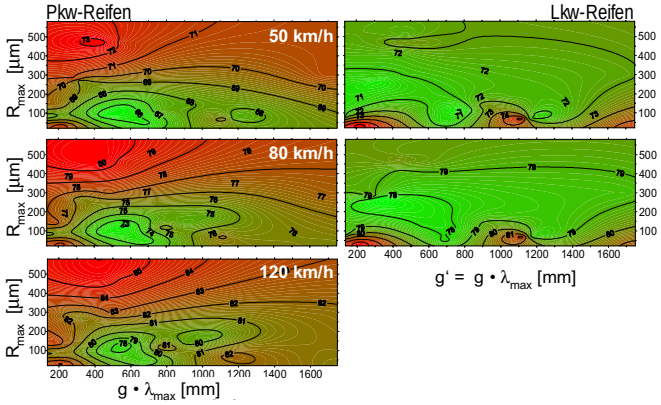

Abbildung 14. Zusammenfassende Darstellung der jeweils über die Reifen des Pkw-Reifenkollektivs und des Lkw-Reifenkollektivs gemittelten Vorbeirollpegel in Abhängigkeit von R_{max} und g'.

Für verschiedene Fahrbahnoberflächen lassen sich auf diese Weise - neben dem Vorbeirollpegel L_{pAF} - auch die maßgeblichen Texturparameter R_{max} und g' bestimmen und die Gesamtheit aller Datenpunkte in der Form

$$L_{pAF} = f(R_{max}, g')$$

dreidimensional darstellen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 als Farbflächendiagramme dargestellt. Den Diagrammen liegen die Ergebnisse der Vorbeirollmessungen mit zwölf verschiedenen Pkw-Normalreifensätzen im Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 km/h und 120 km/h und drei Lkw-Normalreifensätzen zwischen 50 km/h und 80 km/h auf 24 dichten Fahrbahnoberflächen zu Grunde. Die Ergebnisse für Pkw beruhen auf Messungen mit normalen Kraftfahrzeugen mit vier Reifen, wogegen die Ergebnisse für Lkw auf Messungen mit einer nachgeschleppten Lkw-Achse mit nur zwei Reifen beruhen. Bezüglich der Absolutwerte der Vorbeirollpegel für Lkw muss dementsprechend davon ausgegangen werden, dass sie bei normalen Kraftfahrzeugen, je nach Anzahl der Reifen, um größenordnungsmäßig 5 bis 7 dB höher ausfallen. Die Messungen wurden jeweils achtmal wiederholt, so dass die Diagramme auf insgesamt rund 8600 Vorbeifahrten aufbauen. Mit Hilfe eines Interpolationsverfahrens wurde durch die Datenpunkte jeweils ein 3D-Raster gelegt, das sich in seinem Verlauf optimal an die Datenpunkte (Stützpunkte) anpasst. Die Zuordnung der Pegelwerte zu den Farbwerten umfasst in jedem Diagramm einen Pegelbereich von 10 dB. Die Linien gleichen Vorbeirollpegels sind in Pegelabständen von 1 dB eingetragen.

Für g' = 400 mm bis 700 mm und R_{max} = 60 mm bis 200 mm nehmen die Vorbeirollpegel für Pkw-Reifen aufgrund optimaler Werte der Texturparameter der Fahrbahnoberfläche extrem niedrige Werte an – unabhängig vom Reifen. Die Lage der Minima ist unabhängig von der Geschwindigkeit, so dass die optimalen Texturparameter für jeden Geschwindigkeitsbereich gelten. Die Lkw-Reifen sind hingegen deutlich unempfindlicher gegenüber der Textur. Der Lkw-Reifen „sieht“ die Unterschiede in der Fahrbahntextur praktisch nicht. Nur nach sehr kleinen Rauigkeitstiefen hin (R_{max} < 150 mm) nehmen die Vorbeirollpegel schnell zu. Allerdings mit einer geringen Dynamik von nur 3 dB bis 4 dB.

Bezüglich des Geräuschminderungspotenzials der Straßenoberfläche bedeutet dies, dass alleine mit entsprechender Ausbildung der Fahrbahntextur eine erhebliche Reduzierung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche von Pkw-Reifen erzielt werden kann. Auf Fahrbahnen mit hohen Lkw-Anteilen schrumpft dieses Minderungspotenzial jedoch deutlich, wenn die Deckschicht nicht – wie nachfolgend dargestellt – mit zusätzlichen geräuschmindernden Eigenschaften ausgestattet wird.

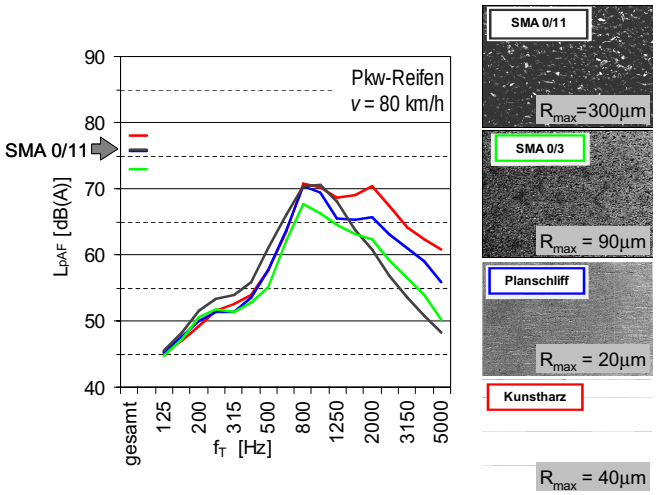

Abbildung 15. Spektren des mittleren Vorbeirollpegels L_{pAF} für Pkw-Reifen für v = 80 km/h auf Oberflächen mit unterschiedlichen Rauigkeitstiefen R_{max}: Grobrauhe Deckschicht (Splittmastixasphalt SMA 0/11), feinrauhe Deckschicht (SMA 0/3) und zwei feinstrauhe Oberflächen uterschiedlicher adhäsiver Eigenschaften (plangeschliffener Beton und nicht abgestreute Kunstharzbeschichtung). f_T: Terzmittenfrequenz in Hz.

Geringe Rauigkeitstiefe sorgt dafür, dass die mechanische Anregung des Reifens im tieffrequenten Bereich reduziert wird. Dass die Rauigkeitstiefe jedoch, abgesehen von Sicherheitsaspekten, auch aus akustischen Gründen nicht beliebig klein gemacht werden kann, hängt damit zuammen, dass der air-pumping Effekt aufgrund guter „Dichtigkeit“ der im Reifen-Fahrbahn-Kontakt eingeschlossenen Hohlräume bzw. hohem Strömungswiderstand sehr gut zur Wirkung kommt. Allerdings nicht allein der air-pumping Effekt. Wie bereits am Ende des Abschnitts „Entstehungsmechanismen“ beschrieben, treten aufgrund der deutlich größeren Kontaktflächen zwischen Reifen und Fahrbahn bei Oberflächen mit geringen Rauigkeitstiefen auch die mikroskopischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche in den Vordergrund, die die stick-slip und stick-snap Effekte beeinflussen. Außerdem begünstigen Fahrbahnober-

flächen mit geringer Rauigkeitstiefe auch den Horneffekt und damit eine sehr effiziente Abstrahlung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche.

In Abbildung 15 sind die Terzspektren des Vorbeirollpegels für ein Kollektiv von Pkw-Reifen bei einer Geschwindigkeit von v = 80 km/h für Oberflächen mit abgestufter maximaler effektiver Rauigkeitstiefe R_{max} = 300, 90, 40 und 20 µm aufgetragen. Nur die Oberfläche mit R_{max} = 90 µm (Splittmastixasphalt 0/3) weist Texturparameter auf, die im oben angegebenen optimalen Berich liegen. Bei den beiden letztgenannten Oberflächen handelt es sich um eine mechanisch polierte (plangeschliffene) Betonoberfläche und eine makro- und megatexturarme Kunstharzversiegelung ohne Abstreuung. Wie zu erwarten nehmen die Terzpegel in dem für die Anregung radialer Kontaktkräfte maßgeblichen tieffrequenten Bereich unter 800 Hz mit abnehmender Rauigkeitstiefe ab. Im mittelfrequenten Bereich zwischen 800 Hz und 1600 Hz Terzmittenfrequenz nehmen die Terzpegel mit kleiner werdendem R_{max}-Wert zunächst ab (vergleiche SMA 0/11 und SMA 0/3), um dann wieder zuzunehmen (vergleiche SMA 0/3 und Beton Planschliff). Oberhalb von 1600 Hz nehmen die Terzpegel mit abnehmender Rauigkeitstiefe erheblich zu. Dabei besteht auch ein deutlicher Pegelunterschied zwischen den beiden Oberflächen mit vergleichbarer Rauigkeitstiefe R_{max}. Diese Unterschiede lassen sich nicht allein mit unterschiedlicher Ausprägung des air-pumping Effektes erklären. Die beiden Oberflächen mit R_{max} < 60 µm unterscheiden sich deutlich in ihren adhäsiven Eigenschaften, wogegen die Textur sehr ähnlich ist. Auch die Strömungswiderstände weisen vergleichbare Werte auf (vergleiche Abbildung 6, Oberflächen A11 und B02 „glatt“). Die „klebrigere“ Kunstharzoberfläche (A11) führt zu einem um 3 dB höheren Vorbeirollpegel als die plangeschliffene Betonoberfläche (B02). Dies macht sich besonders stark im Frequenzbereich oberhalb von 1000 Hz bemerkbar, wo Pegelunterschiede von bis zu 5 dB auftreten. Da beide Oberflächen sehr glatt sind, ist davon auszugehen, dass dieser Effekt nicht mit einer Verstärkung der Kompression der Luft in den Hohlräumen zwischen Reifen und Fahrbahn und damit einer Verstärkung des air-pumping Effektes zusammenhängt, sondern vielmehr mit unterschiedlichen Kräften in tangentialer Richtung aufgrund unterschiedlicher Reibeigenschaften.

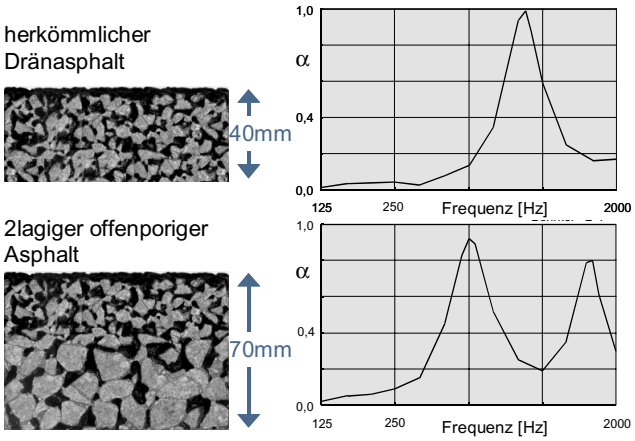

Abbildung 16. Frequenzgang der Schallabsorptionsgrade α offenporiger Deckschichten. (a) einlagiger OPA, Schichtdicke 40 mm; (b) zweilagiger OPA, Schichtdicke 25 / 45 mm.

Offenporigkeit

Offenporige Deckschichten sind im Gegensatz zu dichten Fahrbahnoberflächen zusätzlich durch schallabsorbierende Eigenschaften gekennzeichnet. Offenporigkeit wird derzeit durch Weglassen der Feinkornanteile im Mischgut erzielt. Dadurch entstehen Deckschichtstrukturen, die miteinander vernetzte Hohlräume aufweisen. Struktur und „Maschenweite“ dieses Netzes bestimmen maßgeblich das Schallabsorptionsvermögen. Der Schallabsorptionsgrad α von offenporigen Deckschichten, wie sie derzeit eingebaut werden, ist frequenzabhängig und erreicht in bestimmten schmalen Frequenzbereichen ausgeprägte Maxima mit Werten von bis zu 90 %.

Gleichzeitig wirken schallabsorbierende Oberflächen der verstärkenden Wirkung durch den „Horneffekt“ bei der Schallabstrahlung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche (siehe Abschnitt „Entstehungsmechanismen“) entgegen.

In Abbildung 16 ist der Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit von der Frequenz für einen einlagigen offenporigen Asphalt (OPA, Dränasphalt) mit einer Schichtdicke von 40 mm (Korngrößenverteilung 4-8 mm) und einem Hohlraumgehalt von 26 % und einen sogenannten zweilagigen offenporigen Asphalt (2OPA) neuester Technologie mit einer Gesamtschichtdicke von 70 mm (Korngrößenverteilung untere Lage: 11-16 mm, obere Lage: 4-8 mm) und einem Hohlraumgehalt von 27 % dargestellt. Bei dem einlagigen OPA werden in einem schmalen Frequenzbereich bei 800 Hz nahezu 100 % absorbiert, wogegen bei der zweilagigen Deckschicht bei 500 Hz 90 % und bei 1500 Hz 80 % absorbiert werden, die absorbierende Wirkung also breitbandiger ist.

Akustisch hochwirksame, zweilagige offenporige Asphalte repräsentieren derzeit noch eine Sonderbauweise. Die Zweilagigkeit wird - neben der Verbesserung der absorbierenden Wirkung - insbesondere dazu ausgenutzt, das Verhalten offenporiger Asphalte gegenüber Verschmutzung zu verbessern. Die feinkörnige obere Lage weist eine Siebwirkung auf, die verhindert, dass grober Schmutz in den Belag eindringt. Die grobkörnige untere Lage mit deutlich größeren Hohlräumen sorgt dafür, dass feiner, in die Deckschicht eindringender Schmutz gut ausgewaschen wird.

In Abbildung 17 sind Spektren der mittleren Vorbeirollpegel von Pkw-Reifen dargestellt für Farbahnoberflächen vergleichbarer Textur jedoch unterschiedlichen Hohlraumgehaltes. Am Verlauf der Terzspektren ist deutlich zu sehen, dass mit zunehmendem Hohlraumgehalt (offen zugängliche Hohlräume) zunächst eine starke Bedämpfung bei hohen Frequenzen eintritt, die sich auf den A-bewerteten Gesamtpegel jedoch kaum auswirkt, da die Frequenzanteile bei 1 kHz nach wie vor dominieren. Erst mit dem Wirksamwerden der Schallabsorption bei den deutlich höheren Hohlraumgehalten wird der Entstehung und Ausbreitung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche soweit entgegengewirkt, dass Pegelminderungen von 5 bzw. 7 dB gegenüber der dichten Oberfläche erreicht werden.

Um geräuschmindernde Wirkung zu entfalten, muss das Maximum des Absportionsfrequenzganges mit dem spektralen Maximum der Reifen-Fahrbahn-Geräusche zusammenfallen. Dieses liegt für Pkw- und Lkw-Reifen bei unterschiedlichen Frequenzen und ist ausserdem abhängig von der Geschwindigkeit. Die Eigenschaften offenporiger, schallabsorbierender Fahrbahnoberflächen müssen also auf die Verkehrszusammensetzung und das Geschwindigkeitsniveau einer Straße abgestimmt werden.

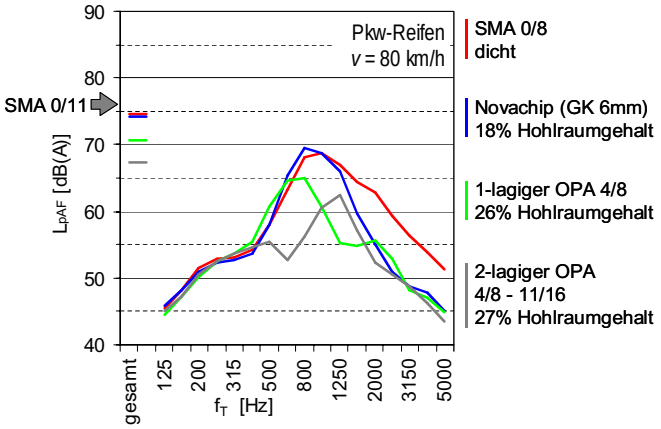

Abbildung 17. Spektrum des mittleren Vorbeirollpegels L_{pAF} für ein Kollektiv von 12 Pkw-Normalreifen für $v = 80$ km/h auf Oberflächen mit unterschiedlichen Hohlraumgehalten und Schallabsorptionsgraden. Zum Vergleich sind die Spektren für eine dichte Deckschicht (SMA 0/8), eine hohlraumreiche Deckschicht mit 18 % Hohlraumgehalt (Novachip), einen 1-lagigen und einen 2-lagigen offenporigen Asphalt aufgetragen, die aufgrund vergleichbaren Größtkorns und ähnlicher Bauweise (Heißeinbau mit Walzverdichtung) vergleichbare Texturen aufweisen. f_T: Mittenfrequenz des Terzbandes in Hz.

In Abbildung 18 sind typische Spektren des äquivalenten Dauerschallpegels (Mittelungspegel) der Reifen-Fahrbahn-Geräusche in 7,5 m Abstand und 1,2 m Höhe über Fahrbahnoberkante für zwei unterschiedliche Verkehrsströme dargestellt. Die rote Kurve bezieht sich auf einen Verkehrsstrom mit einer höchstzulässigen Geschwindigkeit von 50 km/h und einem Lkw-Anteil von 15 %, die blaue Kurve auf einen Verkehrsstrom mit 100 km/h und 5 % Lkw-Anteil. Die Geräusche des Verkehrsstroms mit dem geringeren Lkw-Anteil und der höheren Geschwindigkeit weisen ein ausgeprägtes Maximum bei 1 kHz auf, wogegen der andere Verkehrsstrom zu einem breitbandigen Geräuschspektrum führt mit wesentlichen Frequenzanteilen bis hinab zu 500 Hz. Das Absorptionsverhalten eines offenporigen Fahrbahnbelages ist entsprechend darauf abzustimmen.

Diese Abstimmung kann mit folgenden bautechnischen bzw. Strukturgrößen der Deckschicht erfolgen, die den Absorptionsfrequenzgang bestimmen:

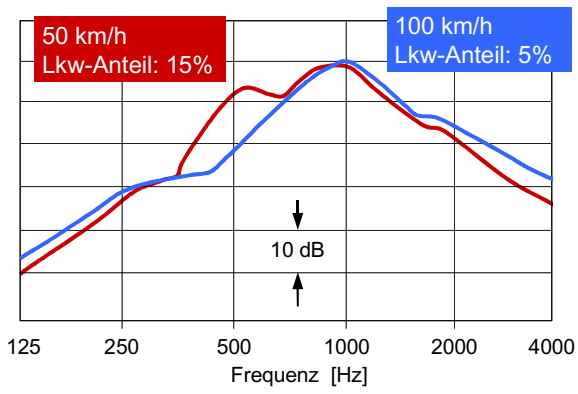

Abbildung 18. Reifen-Fahrbahn-Geräuschspektren (A-bewertet) für Verkehrsströme in 7,5 m Abstand zur Fahrbahn und 1,2 m Höhe über Fahrbahnoberkante. Rot: höchstzulässige Geschwindigkeit 50 km/h, Lkw-Anteil (Anteil der Fahrzeuge über 2,8 t) 15%; blau: höchstzulässige Geschwindigkeit 100 km/h, Lkw-Anteil 5%.

- Schichtdicke
- Hohlraumgehalt
- Strömungswiderstand für Luft

Wie in Abbildung 19 dargestellt, bestimmt die Schichtdicke die Lage des Maximums auf der Frequenzachse. Der Hohlraumgehalt ist im wesentlichen verantwortlich für die Höhe des Maximums, wogegen der Strömungswiderstand vor allen Dingen die Breite des Maximums bestimmt [7][[8]. Der Wert des Strömungswiderstandes ist kritisch für die Wirksamkeit der Deckschicht, da er nur in einem bestimmten Bereich zu optimaler Schallabsorption führt. Andernfalls erreicht der Absorptionsgrad keinesfalls Werte von 90 % und mehr.

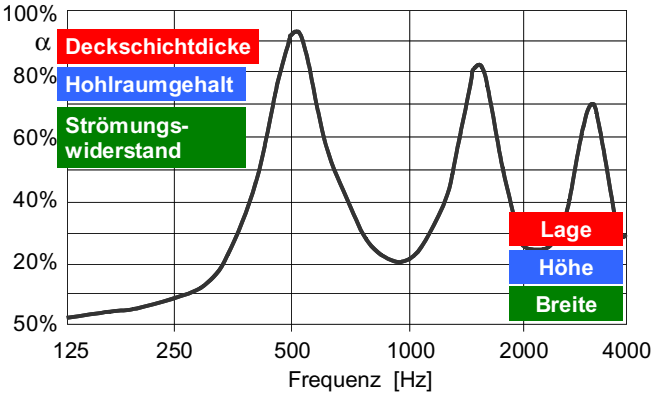

Abbildung 19. Einfluss bautechnischer Parameter auf den Absorptionsgrad offenporigen Deckschichten.

Nachgiebigkeit

Es wird immer wieder diskutiert, inwieweit eine eventuell vorhandene Schwingungsfähigkeit der Fahrbahndecke auch zur Abstrahlung von Schall von der Fahrbahnoberfläche außerhalb des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes beitragen kann. Wenngleich Fahrbahnschwingungen aufgrund der schlechten Anpassung der Wellenlängen an die Wellenlängen in Luft praktisch nicht abgestrahlt werden, ist ein lokaler Einfluss der mechanischen Impedanz der Fahrbahndeckschicht auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch feststellbar.

Zwischen Oberflächen auf Asphalt- und Betonuntergrund kann bei vergleichbarer Textur ein systematischer Unterschied von 1 bis 2 dB in den Vorbeirollpegeln für Pkw-Reifen zugunsten des Asphaltuntergrundes gemessen werden [6]. In einem Vergleichsexperiment mit zwei Oberflächen identischer Textur jedoch deutlich unterschiedlicher mechanischer Impedanz konnte bestätigt werden, dass Elastizität und Dämpfungseigenschaften der Deckschicht bei der Entstehung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen eine deutliche Rolle spielen. Auf zwei Testfeldern wurde Schleifpapier der Korngrößenverteilung 0,6 bis 1 mm einmal auf Betonuntergrund und einmal auf einer auf Betonuntergrund aufgeklebten elastischen Zwischenlage mit lastabhängigem Elastizitätsmodul E (E = 2,4 N/mm^2 bei einer Flächenpressung von 0,18 N/mm^2) aufgebracht. Die Terzspektren der mittleren Vorbeirollpegel für das Kollektiv der Pkw-Normalreifen sind in Abbildung 20 dargestellt. Durch die elastische Zwischenlage nimmt der Vorbeirollpegel bei identischer Textur um 4 dB ab, wobei insbesondere der Frequenzbereich um 1 kHz, in dem Schallanregung durch mechanische

Vorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt eine Rolle spielen, bedämpft wird.

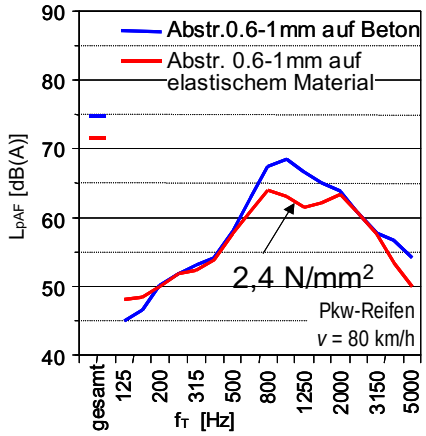

Abbildung 20. Spektrum des mittleren Vorbeirollpegels L_{pAF} für ein Kollektiv von 12 Pkw-Normalreifen für v = 80 km/h; Oberflächen mit identischer Textur jedoch unterschiedlicher mechanischer Impedanz. f_T: Mittenfrequenz des Terzbandes in Hz.

Eine systematische Untersuchung dieser Zusammenhänge besteht noch nicht. Aufgrund der Ergebnisse für das beschriebene Beispiel wäre eine solche Untersuchung jedoch sicher lohnenswert.

Geräuschminderungspotenziale

Legt man die in Deutschland heute gängigen Bauweisen Splittmastixasphalt (SMA) 0/8 oder SMA 0/11 als Vergleichsoberflächen zu Grunde, kann für Pkw-Reifen durch den Einbau entsprechender dichter Oberflächen eine Minderung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche von 2 bis 4 dB und unter Berücksichtigung schallabsorbierender, offenporiger Deckschichten neuester Technologie von 6 bis 8 dB erzielt werden. Modellberechnungen haben gezeigt, dass durch Realisierung optimaler Texturparameter eine zusätzliche Erhöhung des Geräuschminderungspotenzials der dichten Oberflächen von durchschnittlich 3 auf 5 dB erwartet werden kann. Insgesamt scheint also eine Minderung in der Größenordnung von 10 dB realisierbar zu sein.

Während für Pkw-Reifen bei dichten Oberflächen ohne zusätzliche Eigenschaften eine deutliche Reduzierung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche durch entsprechende Gestaltung der Oberflächeneigenschaften erzielt werden kann, schrumpft das Minderungspotenzial der dichten Fahrbahnoberflächen bei Lkw-Reifen auf etwa 2 dB zusammen. Erst wenn man der Fahrbahndeckschicht zusätzliche Eigenschaften wie Schallabsorptionsvermögen verleiht, treten die Fahrbahneigenschaften bezüglich der Entstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches auch bei Lkw-Reifen wieder in den Vordergrund. Gegenüber den "leisesten" dichten Oberflächen ohne zusätzliche Eigenschaften liegt das Geräuschminderungspotenzial der Fahrbahn dann für Lkw-Reifen bei 4 bis 5 dB, bezogen auf einen SMA 0/11 als Vergleichsoberfläche. Offenporige Deckschichten repräsentieren also, bezogen auf einen Verkehrsstrom, der sich sowohl aus Pkw als auch aus Lkw zusammensetzt, die derzeit leiseste Bauweise.

Dies wird in Abbildung 21 nochmals deutlich. Diese Abbildung zeigt in einer flächenhaften Darstellung die Abhängigkeit des äquivalenten Dauerschallpegels der Reifen-Fahrbahn-Geräusche eines Verkehrsstroms von Geschwindigkeit und Lkw-Anteil (Anteil von Fahrzeugen mit mehr als 2,8 t) für vier verschiedene Fahrbahnoberflächen (Anmerkung: die Oberfläche „Gussasphalt 5/8“ bezieht sich auf eine mit Korngrößenverteilung 5-8 mm speziell abgestreute Gussasphaltdeckschicht und stellt eine gegenüber der Referenzoberfläche nach den RLS-90 [9] um 2-3 dB verbesserte Deckschicht dar). Lkw-Reifen sind ab v = 80 km/h mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h gleichbleibend berücksichtigt.

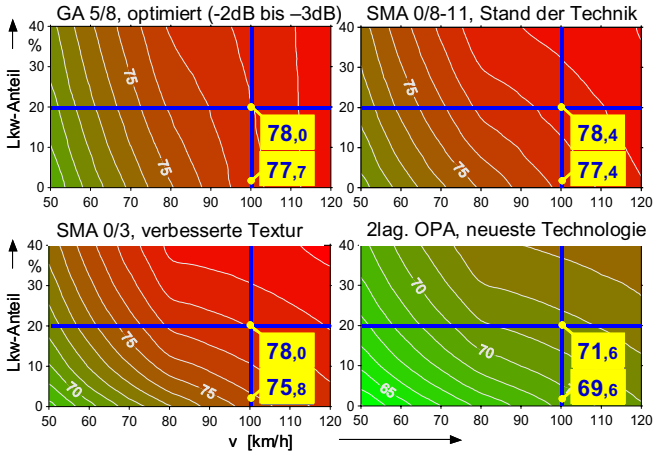

Abbildung 21. Äquivalenter Dauerschallpegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche in dB(A) in 7,5 m Abstand zur Fahrbahnmitte und 1,2 m Höhe über Fahrbahnoberkante für Verkehrsströme unterschiedlicher Geschwindigkeit v in km/h mit unterschiedlichem Lkw-Anteil in %. Oberflächen: links oben: Gussasphalt 0/11, optimierte Abstreuung mit Korn 5-8 mm; rechts oben: Splittmastixasphalt 0/8 oder 0/11; links unten: Splittmastixasphalt 0/3; rechts unten: 2-lagiger offenporiger Asphalt wie oben beschrieben.

Abbildung 21 ist zu entnehmen, dass die Pegel bei den für Pkw-Reifen günstigen Oberflächen SMA 0/8-11 und insbesondere SMA 0/3 stark vom Lkw-Anteil abhängen. Bei Lkw-Anteilen von mehr als 10 % ist der Einfluss der Lkw-Reifen so stark, dass die Oberflächen gegenüber der für Pkw-Reifen ungünstigeren Oberfläche GA 5/8 kaum noch geräuschmindernd wirken – mit Ausnahme des zweilagigen offenporigen Asphalts. Auch bei dieser Fahrbahnoberfläche ist eine deutliche Abhängigkeit vom Lkw-Anteil vorhanden, allerdings auf einem gegenüber den anderen Oberflächen um 6 dB bis 7 dB erheblich niedrigeren Pegelniveau. Darüberhinaus ist festzustellen, dass alleine der zweilagige offenporige Asphalt eine über den gesamten Geschwindigkeitsbereich, also auch bei niedrigen Geschwindigkeiten von etwa 50 km/h, nahezu gleichmäßige geräuschmindernde Wirkung erzielt.

Fazit

Es gibt neue, bisher bautechnisch noch nicht realisierte Texturen, die bei Pkw-Reifen zu einer Minderung von 5 dB gegenüber der herkömmlichen, geräuschmindernden Bauweise SMA 0/8 führen können. Die Kombination solch neuartiger Texturen mit schallabsorbierenden Konstruktionen erbringen zusätzlich 4 bis 5 dB Min-

derung – unabhängig vom Reifen und vom Geschwindigkeitsbereich.

Um dieses Gesamtminderungspotenzial von 10 dB auf Straßen dauerhaft umzusetzen, bedarf es andersartiger Materialien und Bauverfahren, die die gezielte, reproduzierbare und dauerhafte Herstellung von Texturen und Hohlraumstrukturen ermöglichen. Die primären Gebrauchseigenschaften der Straße Griffigkeit, Dauerhaftigkeit und geringer Rollwiderstand müssen dabei zusätzlich beachtet werden.

Das Festhalten an herkömmlichen Verfahren, bei denen die akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche mehr oder weniger zufällig entstehen, muss überwunden werden. Die Entwicklung, Herstellung, Untersuchung und Qualitätssicherung der akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen mit Hilfe geeigneter Messverfahren und Rechenmodelle aus der Akustik und Schwingungstechnik wird helfen, die Situation zu verbessern und ist deshalb in Zukunft von grundlegender Bedeutung.

Mit dem durch das BMBF geförderten und von der BASt koordinierten, interdisziplinären Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ ist ein erster wichtiger Schritt in diese Richtung getan worden.

Danksagung

Für die Zustimmung zur Verwendung von Ergebnissen des im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW), vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), durchgeführten Forschungsprojektes “Einfluß der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch” (FE 03.293/1995/MRB, “Projekt Sperenberg”) und von Ergebnissen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten und von der BASt koordinierten, interdisziplinären Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ bedanke ich mich sehr.

[1] de Graaff, D.F., “A speed and acceleration limit in the noise type approval of vehicles will enable silent cars to reveal their silence”, Proc. inter noise 2001, Den Haag, Niederlande, paper no. 590, 2001.

[2] Kropp W, "Ein Modell zur Beschreibung des Rollgeräusches eines unprofilierten Gürtelreifens auf rauher Straßenoberfläche", Fortschritt-Berichte Reihe 11, Nr. 166, VDI Verlag, Düsseldorf, 1992.

[3] Ronneberger, D. et al.: “Rolling noise of tyres - fluctuation of pressure and flow velocity in the vicinity of the contact area. Publ. Wiss. Film Sekt. Techn. Wiss./Naturw. Ser. 8, Nr. 25/C 1503, 1984.

[4] Interdisziplinäres Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“, Teilprojekt 3122 „System zur Messung des Strömungswiderstandes von Fahrbahnoberflächen in-situ“, Veröffentlichung des Schlussberichtes in 2003.

[5] Kropp, W. et al.: “The modelling of tyre/road noise – a quasi threedimensional model”, Proc. Inter noise 2001, Den Haag, Niederlande, paper no. 657, 2001.

[6] Beckenbauer, T. et al.: „Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“, Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 847, August 2002.

[7] Attenborough, K., Howorth, C.: “Models for the acoustic characteristics of porous road surfaces”, Proc. Int. Tire Noise Conference ’90, Göteborg, Schweden, pp. 177-191, 1990.

[8] Kuijpers, A., van Blokland, G.: “Modelling and optimization of two layer porous asphalt roads”, Proc. inter noise 2000, Nizza, Frankreich, paper no. 1043, 2000.

[9] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen - RLS-90: Ausgabe 1990. Der Bundesminister für Verkehr. Bonn, den 22. Mai 1990. Berichtigter Nachdruck Februar 1992.