

Lärmindernde Fahrbahnbeläge

Ein Überblick über den Stand der Technik

Lärmindernde Fahrbahnbeläge
Ein Überblick über den Stand der Technik

von

Urs Reichart

Umweltbundesamt

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

ISSN 1862-4804

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Email: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet I 3.3, Lärminderung im Verkehr
Urs Reichart

Dessau-Roßlau, August 2009

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
1. Motivation für Lärm mindernde Fahrbahnbeläge.....	2
1.1. Wirkung von Lärm auf Menschen.....	2
1.2. Exkurs: Wahrnehmung Pegelminderungen < 3 dB?	4
2. Auswirkung der Fahrbahneigenschaften auf die Lärmemission.....	5
3. Straßenbeläge.....	11
3.1. Straßenarten in Deutschland.....	11
3.1.1. Innerorts / niedrigere Geschwindigkeiten	11
3.1.2. Außerorts / höhere Geschwindigkeiten	12
3.2. Bauformen	13
3.2.1. Asphalt.....	13
3.2.2. Pflaster	21
3.2.3. Betondecken.....	22
3.2.4. Sonstige Bauformen / Bauausführungen.....	22
3.3. Fahrbahnbeläge im Forschungsstadium	23
4. Ergänzende Maßnahmen.....	27
Literatur	28
Anhang: Datenblätter Fahrbahnbeläge	35

Zusammenfassung

59 % der Deutschen fühlen sich durch Straßenverkehr gestört oder belästigt; ca. 16 % der Bevölkerung sind durch den Straßenverkehr gesundheitsgefährdenden Lärmpegeln ausgesetzt. Da das Reifen-Fahrbahngeräusch ab Geschwindigkeiten von ca. 30 bis 40 km/h die dominierende Quelle im Straßenverkehrsgeräusch ist, kann der Einsatz Lärm mindernder Fahrbahnbeläge einen Beitrag zur Verringerung der Lärmbelastung und ihrer Folgen leisten. Das Rollgeräusch entsteht im Wesentlichen durch zwei Mechanismen: Mechanische Anregung und aerodynamische Vorgänge (v.a. Air-Pumping). Diese werden durch das Reifendesign und die Gestaltung der Fahrbahndecke (u.a. Texturspektrum, Gestalt und Hohlraumgehalt) bestimmt.

Dieser Bericht fasst die wichtigsten generellen Empfehlungen für die Gestaltung von Lärm mindernden Fahrbahndecken zusammen und stellt die Erkenntnisse aus der Literatur und – sofern vorhanden – die praktischen Erfahrungen in den Bundesländern dar.

Geringe Rollgeräusche werden vorwiegend über eine günstige Textur der Oberfläche und/oder einen hohen Hohlraumgehalt der Deckschicht erreicht. Da sich diese Maßnahmen auch auf andere Eigenschaften der Fahrbahn (Haltbarkeit, Belastbarkeit, etc.) auswirken, können nicht alle Fahrbahndecken für alle Anforderungen verwendet werden. Asphalte mit hohen Hohlraumgehalten und hohen Pegelminderungen bleiben in den meisten Fällen Straßen mit annähernd konstant fließendem Verkehr bei Geschwindigkeiten ≥ 50 km/h vorbehalten. Dichte Fahrbahnbeläge mit geringen Hohlraumgehalten, aber optimierter Oberflächenstruktur, können auch bei geringeren Geschwindigkeiten und besonderen Belastungen Pegelminderungen erbringen. Ein sehr hohes Lärminderungspotential (> 10 dB(A) bei 50 km/h) besitzen PoroElastic Rubber Surfaces (PERS). Allerdings fehlen – zumindest in Europa – noch Erfahrungen in der praktischen Anwendung.

Für Straßen außerorts steht eine Reihe von Lärm mindernden Fahrbahnbelägen zur Verfügung, wie die Übersicht am Ende dieses Berichtes zeigt. Innerorts sind dagegen weniger Möglichkeiten vorhanden. Dies ist durch die Randbedingungen (Einbausituation, Durchführung von Aufgrabungen, etc.) und die anderen Verkehrssituationen (viele Lenk-, Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge und daraus resultierend größere horizontale Kräfte) bedingt. Hier empfiehlt es sich, Beläge einer Textur einzusetzen, die wenig mechanische Anregung verursacht. Hierfür ist ein kleines Größtkorn hilfreich. Es bieten sich SMA 0/5, LOA 5 D und evtl. auch Asphaltbetone und Dünnschichtbeläge an.

1. Motivation für Lärm mindernde Fahrbahnbeläge

Für die Menschen in Deutschland ist Lärm eine der am stärksten empfundenen Umweltbeeinträchtigungen. Das geht aus einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage an etwa 2 000 Erwachsenen zum „Umweltbewusstsein in Deutschland 2008“ hervor.

59 % der Befragten gaben an, sich in ihrem Wohnumfeld durch Straßenverkehr gestört oder belästigt zu fühlen, 12 % fühlten sich sogar „äußerst“ oder „stark belästigt“.

Durch die Umgebungslärmrichtlinie (2002/49/EG, §§ 47 a-f BImSchG) sind die Kommunen in Deutschland aufgefordert, Maßnahmen zur Verminderung der Lärmbelastung zu ergreifen (siehe auch <http://www.umweltbundesamt.de/laermprobleme/ulr.html>).

Dazu werden im Rahmen der Lärmaktionsplanung auch technische Maßnahmen zur Lärminderung geprüft. Die ersten Ergebnisse der Erfassung der Lärmbelastung (Lärmkartierung) haben bspw. gezeigt, dass die größten Lärmbelastungen und Probleme in den Innenstädten vorhanden sind. So wohnen beim Straßenverkehr 78 % der betroffenen Bevölkerung in der Umgebung von Straßen in der Baulast der Kommunen. Den Kommunen steht jedoch nur eine begrenzte Anzahl an eingeführten technischen Maßnahmen zur Lärminderung zur Verfügung. Eine Möglichkeit ist, im Zuge von Straßensanierung verstärkt lärmarme Straßendecken einzusetzen.

Der hier vorliegende Bericht gibt einen Überblick über den Stand der Technik lärmarmen Fahrbahnbeläge und einen kurzen Ausblick über innovative Techniken mit großem Potential zur Minderung des Straßenverkehrslärms innerorts. Zudem erinnert am Ende ein kurzer Abschnitt an ergänzende Maßnahmen, die eine Entlastung der betroffenen Bürgerinnen und Bürger bewirken können.

1.1. Wirkung von Lärm auf Menschen

Lärm löst in Abhängigkeit von der Tageszeit (Tag/Nacht) in unterschiedlichem Maße unterschiedliche Reaktionen aus. Im Allgemeinen sind innerhalb von Wohnungen bei Mittelungspegeln (L_m), die nachts unter 25 dB(A) und tags unter 35 dB(A) liegen, keine nennenswerten Beeinträchtigungen zu erwarten. Diese Bedingungen werden bei geöffneten Fenstern (bei Annahme einer mittleren Schalldruckpegeldifferenz von 10 dB(A)) bei Außenpegeln nachts unter 35 dB(A) und tags unter 45 dB(A) sichergestellt. Bei gekippten Fenstern (max. etwa 10 cm Öffnungsschlitz in Kippstellung) kann von einer 5 dB(A) höheren Schallpegeldifferenz ausgegangen werden. [Kötz, W-D.2004] Die Bedingungen werden demnach bei gekippten Fenstern noch erreicht, wenn die Außenpegel nachts unter 40 dB(A) und tags unter 50 dB(A) liegen. Bei Mittelungspegeln über 55 dB(A) tags außerhalb der Häuser ist zunehmend mit Beeinträchtigungen des psychischen und sozialen Wohlbefindens zu rechnen.

Die akustische Kommunikation ist eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung der Persönlichkeit und für die soziale Entwicklung. Störungen der Kommunikation führen zu einer Minderung des Wohlbefindens und werden sehr häufig bei Befragungen genannt. Nach den vorliegenden Untersuchungsergebnissen besteht eine gute Sprachverständlichkeit bei normalhörenden Erwachsenen bei entspannter Sprechweise in Räumen üblicher Größe bei Störgeräuschpegeln, die 40 dB(A) nicht übersteigen. Für den Außenbereich unterstellt man geringere Erwartungen, Sprecher und Hörer werden Anstrengungen zugemutet. Mit Störungen der Kommunikation ist außerhalb von Gebäuden bei Mittelungspegeln > 50 dB(A) zu rechnen.

Viele Lärmbetroffene leiden unter Schlafstörungen. Sie können weitgehend vermieden werden, wenn die Mittelungspegel im Schlafraum 30 dB(A) und Einzelgeräusche 45 dB(A) nicht überschreiten.

Ergebnisse epidemiologischer Untersuchungen zeigen, dass Straßenverkehrslärm ein Risikofaktor für Herzinfarkt ist. Eine Studie des Umweltbundesamtes (UBA) [Babisch et al.2004] bestätigt einen Zusammenhang zwischen Straßenverkehrslärm und Herzinfarkt: Das Risiko, einen Herzinfarkt zu erleiden, steigt bei Männern um etwa 30 %, wenn sie längere Zeit in Gebieten mit Mittelungspegeln über 65 dB(A) am Tage wohnen. Das Umweltbundesamt hat bereits vor längerer Zeit als vorrangiges Umweltqualitätsziel zum vorbeugenden Gesundheitsschutz vor Straßenverkehrslärm die Einhaltung eines Mittelungspegels von 65 dB(A) am Tage in Wohngebieten formuliert. [Wende et al.2006] Mittel- bis langfristig sieht das Umweltbundesamt die Einhaltung von 55 dB(A) tags und 45 dB(A) nachts als notwendig an.

Tabelle 1: Geräuschbelastung der Bevölkerung (alte Länder) durch Straßenverkehrslärm.

Quelle: Umweltbundesamt – Daten zur Belastung der Bevölkerung durch Lärm. Berlin 2000

Mittelungspegel in dB(A)	Belastete Bevölkerung in % tags	Belastete Bevölkerung in % nachts
> 45 - 50	16,4	17,6
> 50 - 55	15,8	14,3
> 55 – 60	18	9,3
> 60 - 65	15,3	4,2
> 65 – 70	9,0	2,9
> 70 -75	5,1	0,2
> 70	1,5	0,0

1.2. Exkurs: Wahrnehmung Pegelminderungen < 3 dB?

Werden bei der Berechnung der Auswirkungen straßenverkehrsrechtlicher Maßnahmen Pegelreduzierungen < 3 dB(A) festgestellt, so wird die Veranlassung derartiger Maßnahmen von Straßenverkehrsbehörden gern abgelehnt mit dem Hinweis, dass solche Pegelunterschiede nicht hörbar oder wahrnehmbar seien. Die Ablehnung von straßenverkehrsrechtlichen Maßnahmen mit Pegelminderungen, die kleiner als 3 dB(A) ausfallen, ist mit dem Argument, solche Pegelreduzierungen seien nicht wahrnehmbar, nicht begründbar. Auch Pegeländerungen von Verkehrsgeräuschen, die kleiner als 3 dB(A) ausfallen, werden von Anwohnern gut wahrgenommen. Je nach Maßnahme variieren die Größenordnungen der Reaktionsvariablen (Belästigung, Kommunikationsstörung etc.). Bei der Entscheidung für oder gegen Lärminderungsmaßnahmen wird deshalb zu kurz gegriffen, wenn lediglich solch restriktive akustische Kriterien zur Entscheidungsfindung herangezogen werden.

Unter dem Eindruck der in der Praxis oft anzutreffenden hohen (Lärm-)entlastenden Wirkung¹ von rein akustisch gesehen lediglich gering wirksamen Lärminderungsmaßnahmen, ist der pauschale Verzicht auf die Umsetzung dieser Maßnahmen mit Hinweis auf das so genannte „3 dB-Kriterium“ nicht zu vertreten.

¹ Siehe hierzu die Zusammenstellung von Studien zum Thema bei [Ortscheid&Wende2004] als pdf unter: <http://www.umweltbundesamt.de/laermprobleme/publikationen/lmm-geringer-akustischer-wirkung.pdf>

2. Auswirkung der Fahrbahneigenschaften auf die Lärmemission

Lärmemissionen aus dem Straßenverkehr setzen sich im Allgemeinen aus zwei Geräuschquellen zusammen: Dem Antriebs- und dem Rollgeräusch.²

Je nach Geschwindigkeit und Fahrzeugklasse (Pkw oder Lkw) überwiegt eines der beiden: In Abbildung 1 ist die prozentuale Aufteilung der Intensität der beiden Geräuschquellen für Pkw und Lkw in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für einen dichten Standard-Fahrbahnbelag aufgetragen. Zu erkennen ist, dass bei Pkw ab einer Geschwindigkeit von ca. 35 km/h das Rollgeräusch überwiegt. Für andere innerorts übliche Fahrbahnbeläge wie bspw. Pflaster verschiebt sich dieses Verhältnis zu noch geringeren Geschwindigkeiten (siehe Abschnitt 3.2.2 Pflaster). Auch die in Zukunft zunehmende Verbreitung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben (Hybrid- und Elektrofahrzeuge) wird die Rollgeräusche noch stärker in den Vordergrund rücken lassen.

Dies eröffnet die Möglichkeit, über eine geeignete Wahl von Fahrbahnbelägen auch innerorts eine Reduktion der Schallemissionen zu erreichen.

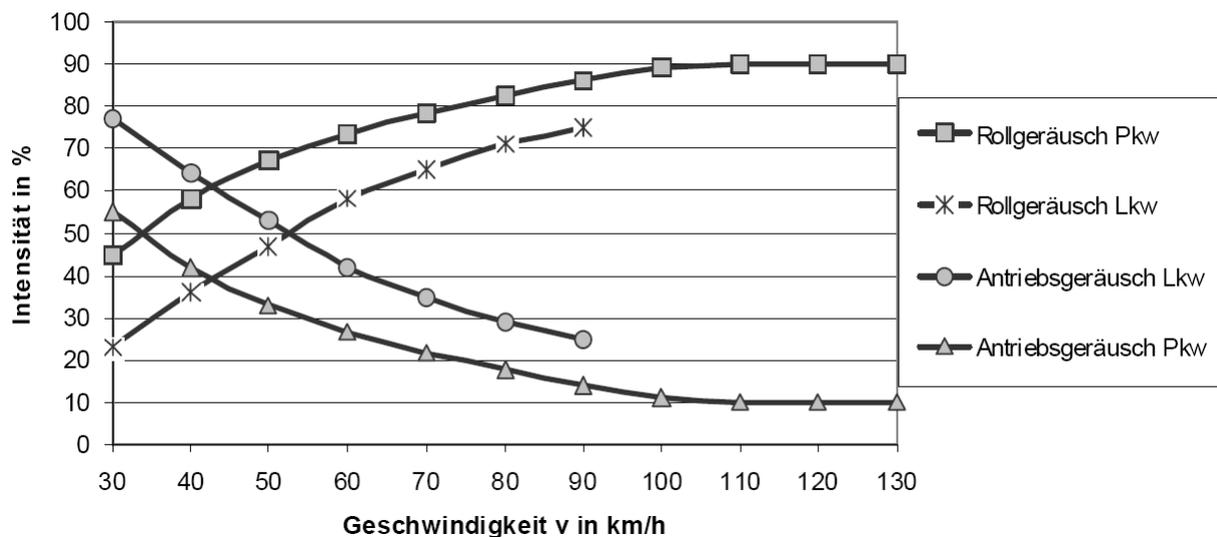


Abbildung 1: Anteil der Rollgeräusche, bzw. Antriebsgeräusche an der Gesamtemission in %, getrennt für PKW und schwere LKW auf dichten Standard-Fahrbahnbelägen (z.B. Asphaltbeton 0/11 oder Splittmastixasphalt 0/8 oder 0/11) Quelle: [Beckenbauer2008]

Rollgeräusche können ganz grob in zwei Klassen von Entstehungsmechanismen unterteilt werden: Zum einen die mechanische Anregung des Reifens zu Schwingungen; zum anderen aerodynamische Vorgänge. Aerodynamische Vorgänge bestimmen bei höheren Geschwindigkeiten die Emissionen. Bei geringen Geschwindigkeiten wie sie innerorts auftreten, dominieren mechanisch angeregte Emissionen.

² Für das Vorbeifahrtgeräusch spielen Windgeräusche erst bei sehr hohen Geschwindigkeiten eine Rolle und können im Allgemeinen vernachlässigt werden.

Straßendecken können für die Betrachtung ihrer akustischen Eigenschaften hinsichtlich des Hohlraumgehaltes, ihrer Oberflächengestalt und ihres Texturspektrums unterschieden werden.

Die Oberflächengestalt hat einen starken Einfluss auf die Schwingungsanregung des Reifens, die wiederum zur Abstrahlung von Schall nach außen und innen führt.

Vorteilhaft im Sinne des Lärmschutzes sind hierbei konkave Oberflächengestalten („Plateaus mit Schluchten“ - siehe Abbildung 4).

Der Hohlraumgehalt der Fahrbahndecke (dicht, semi-dicht, semi-porös und porös) hat sowohl Einfluss auf die Entstehung von Geräuschen (aerodynamische Anregung, „Air-Pumping“³) als auch auf die Ausbreitung von Schall (Schallabsorption bei offenporigen Asphalten).

Das Texturspektrum gibt die Rauigkeit (Mikro-, Makro- und Megarauigkeit – siehe Abbildung 2) eines Fahrbahnbelages längs zur Fahrtrichtung in Amplituden (Rauigkeitstiefe) über Wellenlängen an. Das Texturspektrum hat Einfluss auf Haftung, Rollwiderstand und Geräusch. Optimal für eine geringe Geräuschenstehung sind geringe Amplituden im Bereich von Wellenlängen oberhalb von 10 mm (Pkw) / 16 mm (Lkw), während des Maximum des Texturspektrums im Wellenlängenbereich von 1-8 mm (Pkw) bzw. 0,8-12 mm (Lkw), siehe Abbildung 3. Megatexturen (wie bspw. Schlaglöcher oder regelmäßige Querfugen) sowie Unebenheiten sollten vermieden werden [Sandberg2002]. [Beckenbauer2008] gibt eine Rauigkeitstiefe von 60 – 200 Mikrometer im Maximum der Texturwellenlänge bei Wellenlängen von 4 – 8 mm als optimal für geringe Geräuschenstehung an. Diese Wellenlängen werden mit Größtkorndurchmessern von 2 bis 5 mm erreicht.

Eine hohe Griffigkeit der Straße resultiert aus einer hohen Rauigkeit bei Wellenlängen $\lambda \leq 1\text{mm}$.

Die Nachgiebigkeit der Fahrbahndecke trägt ebenfalls zum Vorbeirollpegel bei. In Vergleichsexperimenten mit Oberflächen identischer Textur aber unterschiedlicher mechanischer Impedanz konnte gezeigt werden, dass eine höhere Nachgiebigkeit der Fahrbahn positiv zur Geräuschenstehung beiträgt. So finden sich bei vergleichbarer Textur Unterschiede in den Vorbeirollpegeln von Asphalt- und Betondecken von 1-2 dB.

[Beckenbauer2008]

³ Das Ansaugen und Verdrängen von Luft in/aus Hohlräumen des Reifenprofils wird als Air-Pumping bezeichnet [Müller 2003].

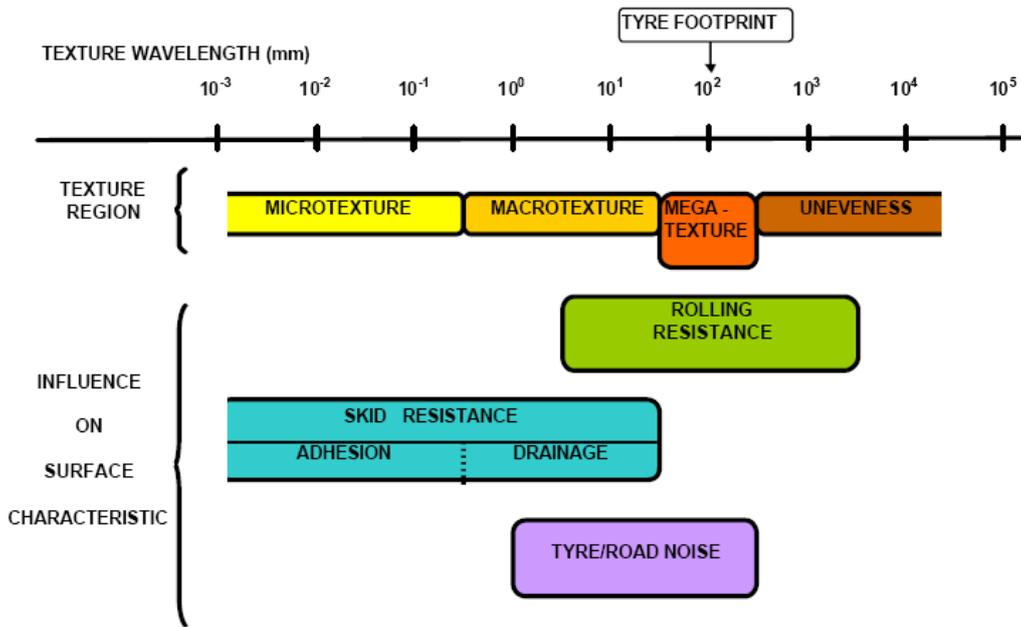


Abbildung 2: Einfluss des Texturspektrums von Straßen auf Rollwiderstand, Haftung und Rollgeräusch
 Quelle:[Fehrl2006, S.24]

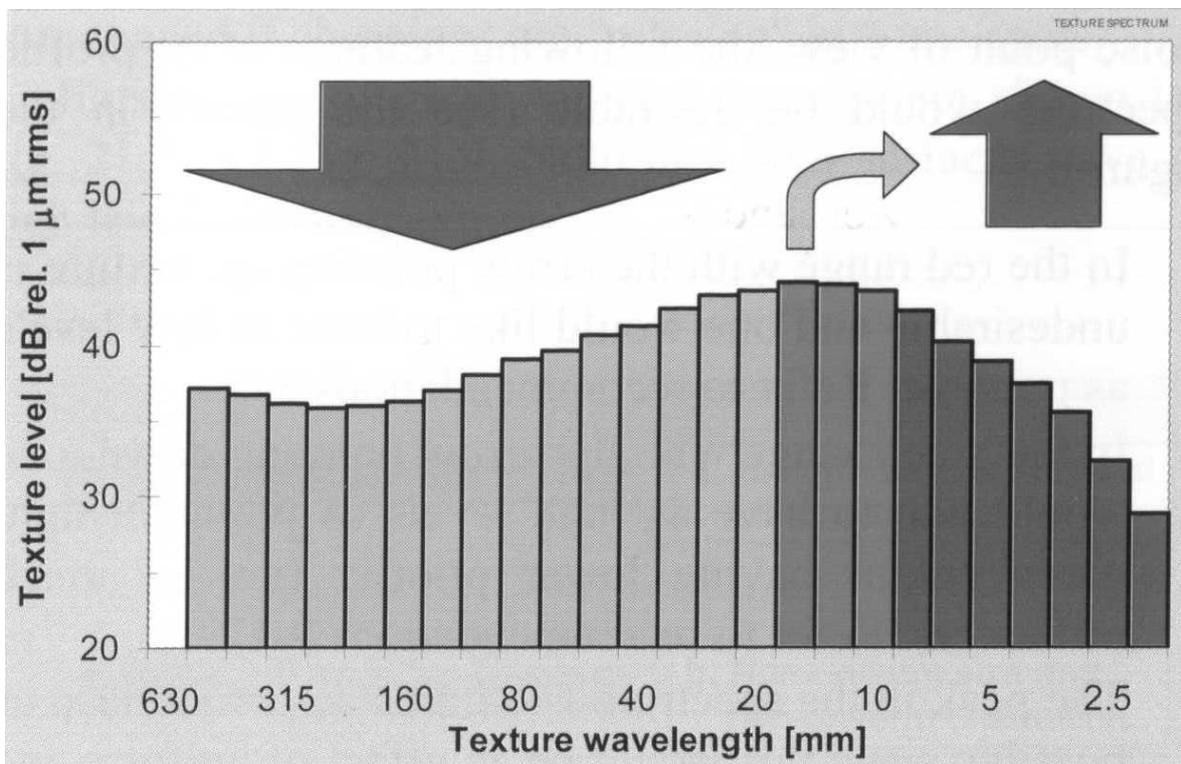


Abbildung 3: Typisches Makrotexturspektrum für einen dichten Fahrbahnbelag. Die Pfeile markieren das Optimierungsziel für einen lärmarmen Belag. Quelle: [Sandberg2002]

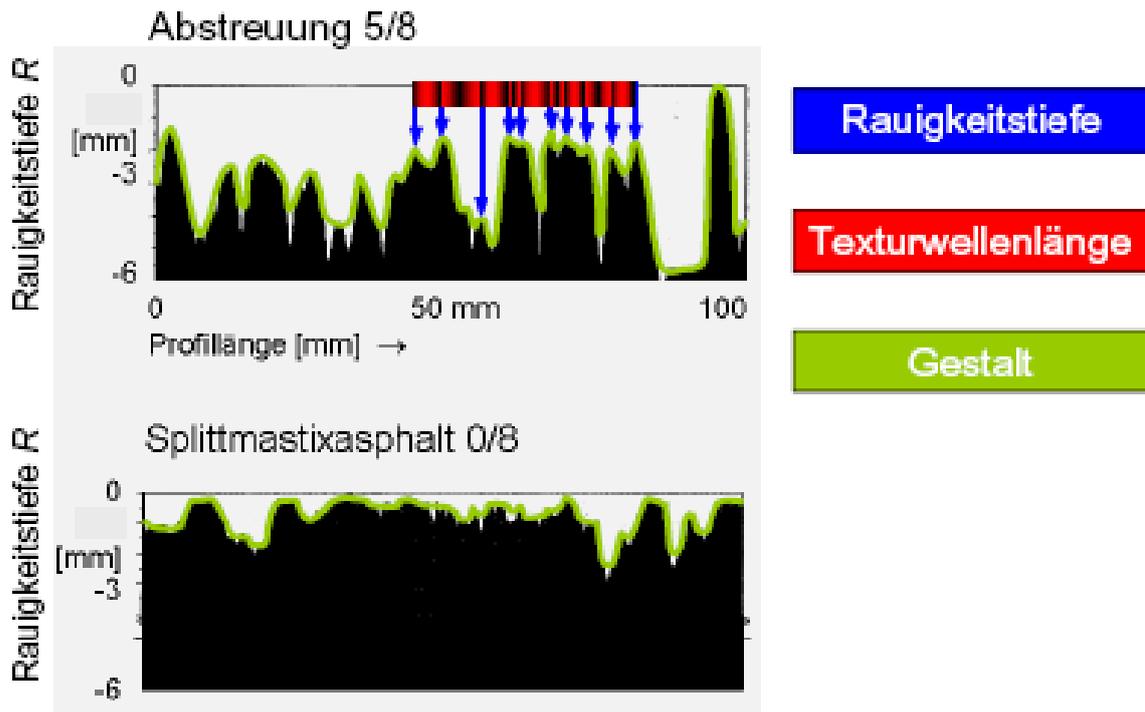


Abbildung 4: Darstellung der wichtigsten akustisch relevanten Parameter der Straßenoberfläche am Beispiel zweier verschiedener Bauausführungen. Der abgestreute Belag oben hat eine konvexe Oberflächengestalt, der Splittmastixasphalt 0/8 (ohne Abstreitung) eine konkave. Quelle: [Beckenbauer 2003]

Für ein möglichst geringes Reifen-Fahrbahngeräusch sollten folgende generelle Hinweise zur Bauweise beachtet werden [Sandberg2002][Beckenbauer2008]:

- Das Makrotexturspektrum sollte bei Wellenlängen zwischen 1-8mm (Lkw: 0,5 -11 mm) hohe Werte erreichen.
- Das Makrotexturspektrum sollte bei Wellenlängen zwischen 10-50mm (Lkw: 16 -50 mm) niedrige Werte erreichen.
- Das Größtkorn (an der Oberfläche) sollte 8mm nicht überschreiten, besser sind 4-6mm.
- Eine konkave Textur ist einer konvexen Textur vorzuziehen. Gewalzte Oberflächen besitzen tendenziell eher konkave, abgestreute tendenziell eher konvexe Oberflächen [Beckenbauer2001]. Wenn möglich sollte auf Abstreitung verzichtet werden. Ausgenommen ist das Abstreuen mit sehr feiner Körnung (z.B. 1/3) zur Erhöhung der Anfangsgriffigkeit und das Abstreuen bei Lärmtechnisch verbesserter Gussasphalt.
- Der Anteil schlecht geformter Körner (Verhältnis Länge:Dicke > 3:1) sollte gering sein [Ehlert2008].
- Unabhängig von der Bauform sollte die Mischgutzusammensetzung so gewählt sein, dass ein möglichst großer Hohlraumgehalt entsteht.

- Es sollten Bindemittel bevorzugt werden, die eine vergleichsweise elastische Fahrbahn ergeben.
- Stark ausgeprägte Megatextur (Wellenlängen 50 -500 mm, z.B. durch Kornausbrüche, Querfugen, Querrillen, Fahrbahnschäden, ‚geflickte‘ Fahrbahndecken, Schlaglöcher) ist unbedingt zu vermeiden. Bei neugebauten Straßendecken sollte eine geringe Welligkeit der Fahrbahn (Wellen bis 50 cm) bauvertraglich vereinbart werden.

Der letzte Gestaltungshinweis lässt darauf schließen, dass sich aus der Sanierung von schadhafte Fahrbahndecken und Pflasterstraßen Möglichkeiten zur Lärminderung ergeben. Selbst wenn derselbe Belagstyp wie zuvor gewählt wird, lassen sich Geräuschminderungen erreichen. Diese sind allerdings im entsprechenden Regelwerk der RLS 90 (Richtlinie zum Lärmschutz an Straßen Ausgabe 1990) nicht abgebildet – es wird ‚nur‘ der Zustand nach RLS 90 wiederhergestellt.

Daraus ergibt sich folgende Handlungsempfehlung:

Im Allgemeinen ist das Potential zur Lärminderung an Straßen in schlechtem baulichen Zustand (und Pflasterstraßen) größer als das an Straßen in gutem baulichem Zustand gleichen Belagstyps – auch wenn die gesetzlichen Regelwerke dies nicht wiedergeben. Straßen in schlechtem baulichem Zustand sollten deswegen vorrangig behandelt werden. Allerdings ist darauf zu achten, dass es nicht zu einer Verlagerung des Verkehrs hin zur sanierten Straße kommt, so dass durch erhöhtes Verkehrsaufkommen die erreichte Pegelminderung (über-)kompensiert wird.

Exkurs: Messung der Lärmemissionen von Straßenoberflächen

Üblicherweise werden zur Bestimmung der Lärmemissionen von Straßenoberflächen zwei Verfahren verwendet:

1. Beim statistische Vorbeifahrtverfahren (statistical pass by - SPB) werden die A-bewerteten Schalldruckpegel und die Geschwindigkeiten einer großen Anzahl einzelner Fahrzeuge verschiedener Fahrzeugkategorien während ihrer Vorbeifahrt an einem festgelegten Ort in Straßennähe gemessen. Dabei wird jeder einzelne Vorbeifahrtpegel wird zusammen mit der Fahrzeuggeschwindigkeit aufgezeichnet und daraus der mittlere A-bewertete Schalldruckpegel für eine Referenzgeschwindigkeit bestimmt. Für das Endergebnis werden die Schalldruckpegel der Fahrzeugkategorien addiert. Es ergibt sich der statistische Vorbeifahrtindex (SPBI). Er kann für den Vergleich von Straßenoberflächen

verwendet werden. Der Wert eignet sich jedoch nicht zur Berechnung des tatsächlichen Verkehrsgeräusches. [ISO 11819-1] [BAFU]

2. Bei der CPX-Methode (Close-Proximity Methode) „wird der Schallpegel in schallgedämmten Kammern innerhalb des Messanhängers in unmittelbarer Reifennähe mit zwei Mikrofonen gemessen“ [BAFU]. Der Messanhänger ist mit definierten Referenzreifen bestückt und wird mit einer konstanter Geschwindigkeit hinter einem Fahrzeug über die zu messende Fahrbahn gezogen. Der Vorteil der CPX-Methode liegt darin, dass die akustischen Eigenschaften einzelner Streckenabschnitte und Fahrspuren bestimmt werden können. [ISO 11819-2]

3. Straßenbeläge

3.1. Straßenarten in Deutschland

In Deutschland gibt es 396.000 km Gemeindestraßen für den innerörtlichen Verkehr und 231.359 km Straßen des überörtlichen Verkehrs, davon sind ca. 12.500 km Autobahn, ca. 40.000 km Bundesstraßen, ca. 86.500 km Landesstraßen und ca. 91.500 km Kreisstraßen (Stand 01.01.2007) [Statistisches Bundesamt2007].

Der größte Teil der Straßen ist in Asphaltbauweise ausgeführt; so hat bspw. ca. 70 % des Autobahnnetzes in Deutschland einen Asphalt- und ca. 30 % eine Betonoberfläche [Bartolomaeus et al. 2002].

3.1.1. Innerorts / niedrigere Geschwindigkeiten

Straßen innerorts weisen gegenüber denen außerorts einige Besonderheiten auf, die die Auswahlmöglichkeit der einsetzbaren Fahrbahnbeläge einschränkt.

Hoch lärmbelastete Straßen sind hier meist solche, die entweder bei mittlerem Verkehrsaufkommen einen akustisch sehr ungünstigen Belag besitzen (Pflaster oder rauer Asphalt mit ungünstiger Megatextur) oder ein hohes Verkehrsaufkommen bewältigen müssen und somit entsprechenden Belastungen ausgesetzt sind. Dazu kommt, dass im Regelfall durch Anfahr-, Brems- und Abbiegevorgänge größere Scherkräfte auf die Deckschicht übertragen werden. Für diese Fälle muss die Fahrbahn bautechnisch ausgelegt sein. Zudem sind in vielen Situationen die Einbauhöhen nicht frei wählbar, so dass nicht jede Bauweise realisiert werden kann. Weiterhin ist auch durch die Anforderungen, die Entwässerung und Kanalisation stellen, nur wenig Gestaltungsraum vorhanden. Dennoch kann man durch geschickte Wahl von Fahrbahnbelägen eine Reduktion des Straßenverkehrslärms erreichen. Diese sind im ersten Abschnitt kurz dargestellt. Der Umbau von Pflaster- zu Asphaltdecken ist aus Sicht des Lärmschutzes besonders effizient und effektiv. In Fällen in denen aus Denkmalschutzgründen ein Pflasterbelag verwendet werden soll, sollten die Hinweise im Abschnitt Pflaster beachtet werden. Generell kann zwischen Regelbauweisen und Sonderbauweisen nach RLS-90 und RStO unterschieden werden. Die RLS-90 nennt für Straßen mit Geschwindigkeiten bis 50 km/h nur 4 verschiedene Typen von Straßenoberflächen (siehe

Tabelle 1):

1. nicht geriffelte Gussasphalte; Asphaltbeton, oder Splitt-Mastix-Asphalt (SMA)
(Referenzbelag)
2. Betone oder geriffelte Gussasphalte
3. Pflaster mit ebener Oberfläche
4. sonstige Pflaster

Die RLS-90 unterscheidet dabei nicht zwischen unterschiedlichen Ausführungsformen (Bspw. SMA 0/5 vs. SMA 0/11) der jeweiligen Fahrbahnbeläge. Eventuelle Unterschiede in den Geräuschemissionen können somit nicht ohne weiteres in der Immissionsberechnung berücksichtigt werden. Dennoch lohnt sich die Verwendung speziell lärmarm ausgeführter Beläge, da diese die Belastung der Anwohner reduzieren können.

Fahrbahnbeläge unterscheiden sich zudem noch hinsichtlich der Anforderungen an die Bauausführung. Hier kann man zwischen High-Tech-Bauweisen und „Standardbauweisen“ unterscheiden.

3.1.2. Außerorts / höhere Geschwindigkeiten

Für Strecken außerorts (bzw. innerorts mit konstant fließendem Verkehr höherer Geschwindigkeit) stehen mehr Gestaltungsspielräume zur Verfügung. Die Restriktionen, die innerorts gelten, fallen hier zum Teil weg. Durch konstant fließenden Verkehr ohne durch Ampeln oder Vorfahrtsregelungen vorprogrammierte Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge treten keine nennenswerten horizontalen Kräfte auf. Die meist fehlende seitliche Bebauung eröffnet mehr Möglichkeiten bei der Wahl der Entwässerung und der Bauhöhe der Fahrbahn⁴. Allerdings treten außerorts oft höhere Beanspruchungen durch Verkehr (siehe bemessungsrelevante Beanspruchung B in der RStO) und extremere Witterungsbedingungen auf. Demnach muss hier stärker auf Tragfähigkeit und das Verhalten, Wartung und Pflege der Fahrbahn bei extremen Witterungsbedingungen geachtet werden (Winterdienst, Beständigkeit gegen Temperaturschwankungen etc.).

Die RLS-90 (und die entsprechenden Allgemeinen Rundschreiben des BMVBW / BMVBS) nennen für Straßen mit Geschwindigkeiten ≥ 60 km/h 7 verschiedene Typen von Straßenoberflächen:

- nicht geriffelte Gussasphalte; Asphaltbeton, oder SMA (Referenz)
- Betone oder geriffelte Gussasphalte
- Betone mit Stahlbesenstrich und Längsglätter
- Asphaltbetone $\leq 0/11$ und SMA 0/8 und 0/11 *ohne* Absplittung

⁴ sofern diese nicht bei Regelbauweisen durch die RStO vorgegeben ist.

- Offenporige Asphalte (OPA) mit $\geq 15\%$ Hohlraumgehalt 0/11
- Offenporige Asphalte (OPA) mit $\geq 15\%$ Hohlraumgehalt 0/8
- Betone nach ZTV Beton-StB01 mit Waschbetonoberfläche

3.2. Bauformen

3.2.1. Asphalt

Lärmtechnisch verbesserter Gussasphalt

Nicht geriffelter (gewalzter) Gussasphalt stellt den Referenzbelag in der RLS-90⁵ dar und erfährt somit keine Korrektur ($D_{StrO}=0 \text{ dB(A)}$ ⁶). Gussasphalt ist über lange Zeiträume sehr verformungsbeständig und haltbar. Wegen seiner hohen Nutzungsdauer ist Gussasphalt, trotz der hohen Einbaukosten, ein Fahrbahnbelag für hochbeanspruchte Strecken mit einem guten Kosten-Nutzen-Verhältnis.

Gussasphalt gehört zu den dichten Fahrbahnbelägen; eine Lärminderung kann nur über eine günstige Gestaltung der Oberfläche erreicht werden. Die wichtigsten Gestaltungsgrößen sind die Körnung (feinkörnig und eng gestuft) und die Kornform (Kantenform und Anteil schlecht geformter Gesteinskörner) des Abstreusplittes, sowie die Methode zum Aufbringen des Abstreusplittes auf die Fahrbahn. Hierbei sollte der Abstreusplitt vorgewärmt sein und nicht mit einer Walze in den Asphalt eingedrückt werden.

Im Gegensatz zu gewalztem Gussasphalt, der eine ‚Standardbauweise‘ darstellt, stellt die Verlegung von lärmtechnisch verbessertem Gussasphalt besondere Anforderungen an die Bauausführung. Hier sind die „Hinweise für die Herstellung von Gussasphaltdeckschichten mit lärmtechnisch verbesserten Eigenschaften“, Ausgabe 2000 [FGSV2000] zu beachten.

Lärmtechnisch verbesserte Gussasphalte verbinden lange Liegezeiten mit einer Pegelreduktion, die zwar geringer ausfällt als bei halboffenen oder offenporigen Asphalten, sich jedoch nach derzeitigem Wissen mit zunehmender Nutzungsdauer kaum verändert. Bei einigen speziellen Einbauverfahren wurden sogar im Laufe der Zeit weiter sinkende Pegel gemessen [[Breitbach et al.2009].

Erfahrungen mit lärmtechnisch verbessertem Gussasphalt liegen u.a. in Nordrhein-Westfalen (BAB 1, BAB 52, BAB 57 und B56) Brandenburg (BAB13), Bremen (BAB 27), Niedersachsen (BAB 261) und Bayern (BAB 9 Nürnberg Ost) vor. [Ehlert2008] [Rode2005][Sadzulewsky2008] [Beckerbau] [Breitbach et al.2009]

Beanspruchungsklassen: alle

⁵ RLS-90: Richtlinie zum Lärmschutz an Straßen

⁶ Korrekturwert für unterschiedliche Straßenoberflächen in der RLS-90

Geschwindigkeitsbereiche: alle

Splittmastixasphalt (SMA)

Splittmastixasphalt zeichnet sich ähnlich wie Gussasphalt durch eine hohe Verschleißfestigkeit und lange Lebensdauer aus. Der relativ einfache und kostengünstige Einbau führt zusätzlich dazu, dass SMA einer der am häufigsten verwendeten Fahrbahnbeläge auf deutschen Straßen ist. Er ist für Verkehrsflächen aller Art geeignet [ZTV] und wird für hochbeanspruchte Straßen ebenso verwendet wie für Wohn- und Erschließungsstraßen im kommunalen Bereich. Da SMA gegen Schwankungen der Einbaudicke unempfindlich ist, wird er häufig im Rahmen der Instandsetzung auf unebener Unterlage eingesetzt [asphalt.de]. Splittmastixasphalt ist in seinen verschiedenen Ausführungsformen somit für sehr viele Anwendungsbereiche geeignet.

In seiner Grundform mit Absplittung stellt SMA neben nicht geriffeltem Gussasphalt die Standardbauweise nach RLS-90 mit DStrO=0 dB(A) dar. Nicht abgesplittete SMA 0/8 und 0/11 sind Regelbauweise nach RLS-90 und sind mit einem DStrO-Wert von -2 dB(A) belegt⁷. Diese Fahrbahnbeläge sind vielerorts (Rheinland-Pfalz, Nordrhein-Westfalen) bereits die vorzugsweise verwendeten Bauweisen.

Für eine lärmarme Gestaltung des Straßenbelages sind im Allgemeinen kleine Größtkörner sinnvoll (siehe Abschnitt

⁷ Die Geräuschmindernde Wirkung wird hierbei über die gegenüber abgesplittetem SMA günstigere Textur erreicht.

Auswirkung der Fahrbahneigenschaften auf die Lärmemission). Für Strecken mit hoher und höchster Beanspruchung ist jedoch ein gröberes und splittreicheres Mischgut, ggfs. mit polymermodifiziertem Bitumen (PmB), nötig. Geringere Verkehrsbelastungen erlauben auch ein feinkörnigeres, bindemittelreicheres und hohlraumärmeres Mischgut in geringerer Schichtdicke [asphalt.de].

Dementsprechend liegt der Schwerpunkt der Anwendung der im Folgenden genannten SMA-Typen in unterschiedlichen Bereichen.

SMA LA 0/8 bzw. SMA 0/8 LA

Lärmtechnisch optimierter Splittmastixasphalt 0/8 unterscheidet sich von der Regelbauweise SMA 0/8 durch eine veränderte Sieblinie. Durch einen geringeren Anteil feinen Mischgutes und die Verwendung eines Bindemittels mit hoher Klebkraft wird eine Deckschicht erreicht, die im Vergleich zu herkömmlichen SMA 0/8 einen höheren Hohlraumgehalt (10- 15%) und eine günstigere Makrotextur aufweist. [Schellenberger 2006] [Schellenberger2007] [Ehlert2008]

Erfahrungen mit SMA LA 0/8 liegen in Bayern (BAB 93, BAB 3, BAB 73), Baden-Württemberg (B10 / B 27 Ortsdurchfahrt Stuttgart-Zuffenhausen) und Nordrhein-Westfalen vor [Schellenberger2007], [Ehlert2008], [Raab2009]. Messungen ergaben anfängliche Rollgeräuschminderungen von ca. 4 dB(A) im Vergleich zum Referenzbelag [Schellenberger2007] [Ehlert2008].

Die Messungen mit CPX-Anhänger bei 80 km/h an der B10 / B 27 Ortsdurchfahrt Stuttgart-Zuffenhausen ließen eine erste Schätzung des DStrO-Wertes auf 5-6 dB(A) für die frisch verlegte Fahrbahndecke zu [Müller-BBM2008].

Ergebnisse zu den Rollgeräuschpegeln nach längerer Liegedauer liegen uns nicht vor.

Die Kosten für den lärmtechnisch optimierten SMA 0/8 liegen laut [Schellenberger2007] leicht über denen für herkömmlichen SMA, jedoch deutlich unter denen von offenporigem Asphalt (OPA).

Beanspruchungsklassen: alle

Geschwindigkeitsbereiche: alle, Geräuschmessung bislang nur bei höheren Geschwindigkeiten

SMA 0/5 bzw. SMA 0/5 S

Generell ist ein kleines Größtkorn günstig für die Geräuschenstehung insbesondere bei Pkw-Reifen. Jedoch sind kleine Größtkörner eher ungünstig für die Tragfähigkeit und Haltbarkeit der Straßendecke bei hohen Beanspruchungen [asphalt.de-Bautechnik].

Splittmastixasphalt mit der Körnung 0/5 ist im Allgemeinen (s.o.) nicht für hohe Beanspruchungen geeignet. Dementsprechend führt die ZTV⁸ Asphalt-StB 07 [ZTV] nur SMA 0/5 N (für normale Beanspruchungen) auf, nicht jedoch SMA 0/5 S. Nach Erfahrungen in Nordrhein-Westfalen (z.B. BAB 43) kann jedoch SMA 0/5 S gut auf hoch (Beanspruchung $B > 32$ Mio.), nicht jedoch höchst belasteten ($B > 120$ Mio.) Strecken, sowie innerorts und im nachgelagerten Straßennetz eingesetzt werden. Anhand von Messungen mit dem CPX-Anhänger [Ehlert2008] kann das Minderungspotential auf 2 bis 2,5 dB(A) gegenüber SMA 0/8 geschätzt werden.

Beanspruchungsklassen: I-VI , SV mit Einschränkungen

Geschwindigkeitsbereiche: alle, Geräuschemessung bislang nur bei höheren Geschwindigkeiten

LOA 5 D (Düsseldorfer Asphalt)

Im Gegensatz zu dem lärmtechnisch optimierten SMA 0/8 (SMA LA 0/8), der mit einem höheren Hohlraumgehalt nur bedingt den klassischen Splittmastixasphalten zuzurechnen ist, ist der LOA 5 D mit 5-7 % Hohlraumgehalt ein klassischer Splittmastixasphalt. Seine lärmmindernde Wirkung beruht auf der optimierten Korngrößenverteilung und einem kleinen Größtkorn (5mm), die zu einer lärmtechnisch optimierten Oberfläche verbaut werden. Ziel war es, mit einem geringen Hohlraumgehalt und einem modifizierten Bindemittel eine sehr hohe Stabilität und Widerstandfähigkeit der Oberflächentextur zu erreichen [Radenberg2007].

In Düsseldorf wurden zwei innerstädtische Versuchsstrecken realisiert. Erste Messungen ergaben Reduktionen des Rollgeräuschpegels gegenüber „typischen Asphaltbelägen (SMA 0/8 S, AB 0/11 und AB0/8)“ um 5,1 dB(A) für Pkw und 1,1 dB(A) für Lkw bei 50 km/h. [Radenberg2007]. Der neu verlegte Asphalt zeichnet sich zudem durch eine hohe Griffigkeit aus.

Berichte darüber, wie dauerhaft die Pegelminderung und die Griffigkeit der Fahrbahn ist, liegen noch nicht vor. Da die Lärminderung jedoch auf einer optimierten Oberflächenstruktur beruht und die Deckschicht zudem stark auf Haltbarkeit ausgelegt ist, ist ein schneller und starker Anstieg der Lärmemissionen nicht zu erwarten. [Radenberg2009] stellt fest, dass eine durch die Nutzung bedingte Veränderung der Lärmreduzierung nach ca. 2 Jahren nicht erkennbar sei.

Es sind weitere Untersuchungen geplant.

⁸ ZTV: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (siehe auch [ZTV])

Laut [Winkler2008] entstehen für die Kommunen durch den Einbau von LOA 5 D „im Vergleich zu herkömmlichem Asphalt keine wesentlich höheren Kosten“. Hinweise zur Umsetzung von LOA 5D Deckschichten im kommunalen Straßenbau gibt [Radenberg2009].

LOA 5 D könnte bei weiteren erfolgversprechenden Erfahrungen ebenso wie SMA 0/5 eine gute Option für die Reduktion des Straßenverkehrsgeräusches innerorts sein.

Beanspruchungsklassen: k.A. (vermutlich I-VI)

Geschwindigkeitsbereiche: k.A. (vermutlich < 80 km/h)

Offenporiger Asphalt (OPA) und 2-schichtiger offenporiger Asphalt (2OPA oder ZWOPA)

Offenporige Asphalte sind derzeit die Fahrbahnbeläge, die Reifenfahrbahngeräusche am effektivsten mindern und gleichzeitig bautechnische gut beherrschbar sind. Obwohl sie Regelbauweisen nach RLS-90 und ZTV Asphalt-StB 07 [ZTV] sind, stellen sie sehr hohe Anforderungen an Randbedingungen, Planung und Bauausführung – sie sind eine High-Tech-Bauweise. Deshalb sind – insbesondere bei doppelschichtigen offenporigen Asphalten – diverse Besonderheiten zu beachten [LFU Leitfaden2009] [Halbe2006].

Offenporige Asphalte erhalten einen DStrO-Wert von -5 dB(A) bei Geschwindigkeiten ≥ 60 km/h und sind in vielen Bundesländern auf hochbelasteten Autobahnen und auch Bundesstraßen verbaut (Bayern: BAB 9 Garching, Bindlacher Berg, B 17 Augsburg, Ingolstadt Westliche Ringstraße, BAB 99 Eschenrieder Spange, NRW: BAB 3 bei Köln, Brandenburg B 5 Dallgow/Döberitz, Rheinland-Pfalz). Sie werden vorrangig in Bereichen eingesetzt, in denen herkömmliche Lärmschutzmaßnahmen nicht wirtschaftlich und / oder nicht mehr ausreichend sind.

Die lärmindernde Wirkung ergibt sich aus zwei Effekten:

Durch eine günstig gewählte Textur und durch den hohen Hohlraumgehalt der Asphaltdecke. Dieser bewirkt, dass zum einen die Emissionen der aerodynamischen Schallquellen minimiert werden (Vermeidung des Air-Pumping), zum anderen wirkt die Asphaltschicht als akustischer Absorber. Das bedeutet, dass durch den offenporigen Asphalt dem Schallfeld Energie entzogen wird, indem die Schallwellen absorbiert anstatt wie bei dichten Fahrbahnbelägen reflektiert werden. Offenporiger Asphalt kann somit - zumindest theoretisch - auch die Antriebsgeräusche mindern. In der Praxis liegt der Frequenzbereich der Antriebsgeräusche meist unterhalb der Frequenzen, in denen die Absorption stattfindet. In welchem Frequenzbereich eine nennenswerte Absorption stattfindet, hängt von der Schichtdicke (je größer die Schichtdicke, desto tiefere Frequenzen werden absorbiert) und auch von der Bauweise ab (einschichtig oder zweischichtig). Dies eröffnet die Möglichkeit,

die Absorptionseigenschaften auf die Emissionen aus dem zu erwartenden Verkehr (bspw. Abstimmung auf hohen Lkw-Anteil) abzustimmen – sofern die baulichen Randbedingungen dies zulassen. Bei einem gut abgestimmtem 2-schichtigem offenporigem Asphalt konnten anfängliche Minderungen des Rollgeräuschpegels von 9 dB(A) gegenüber dem Referenzbelag gemessen werden (BAB 9 bei Eching und Garching) [Rodehack &Beckenbauer2006] [Rodehack &Beckenbauer2007].

Derzeit laufen Untersuchungen, die guten Absorptionseigenschaften von offenporigem Asphalt durch den Einbau von Resonatoren in die Fahrbahn auf ein breiteres Frequenzspektrum zu erweitern [Lorenzen2007]. Dieses Verfahren wird derzeit auf der BAB 24 in Brandenburg erprobt [MIR Brandenburg].

Um den hohen Hohlraumgehalt zu erreichen, wird fast ausschließlich (> 90 % der Gesamtmasse) Split einer Korngröße verwendet. Dadurch entsteht ein Korngerüst, dessen Körner sich aufeinander ‚abstützen‘. Die Zwischenräume zwischen den Körner bleiben leer, so dass die Kräfte über die Kontaktstellen der Körner abgetragen werden muss. Obwohl seit der 1.Generation von offenporigen Asphalten die Klebekraft und Haltbarkeit der Bindemittel, die den Zusammenhalt des Korngerüstes gewährleisten, stark verbessert wurden, bleiben offenporige Asphalte vergleichsweise anfällig für Kornausbrüche. Auslöser können zu hohe Schub- und Scherkräfte (Anfahr- und Verzögerungsvorgänge, starke Lenkmanöver etc), Unfälle und Defekte (Bsp. Felgenfahrt nach Reifendefekt) sein. Kornausbrüche verschieben das Maximum der Texturwellenlänge zu längeren Wellenlängen, was eine Erhöhung der Reifen-Fahrbahngeräusche mit sich bringt. Kornausbrüche führen außerdem dazu, dass die Fahrbahndecke vorzeitig erneuert werden muss. Ein weiteres Problem offenporiger Asphalte, das mittelfristig zu einer Erhöhung des Reifen-Fahrbahngeräusches führt, ist Verschmutzung, das Zusetzen der Hohlräume. Verstopfte Hohlräume sind für die Schallwellen nicht mehr zugänglich und verlieren somit ihre Absorptionswirkung (siehe [Attenberger2005] [Kragh2007] [Ressel2006]. Da verschiedene Reinigungsmethoden nur geringe Erfolge erzielen und die Rollgeräuschzunahme nur verlangsamen, aber nicht aufhalten konnten, wird seit einiger Zeit daran geforscht, die Oberflächen in den Hohlräumen so zu gestalten, dass sich Schmutz dort nicht anlagern kann [Ressel2006] [Lorenzen2007][Rodehack&Beckenbauer2007].

Eine weitere besondere Eigenschaft des OPA ist, dass Wasser in die Fahrbahn laufen kann und dort unterhalb der Oberfläche zur Seite abtransportiert wird. Dies bewirkt, dass keine Flüssigkeit auf der Fahrbahn stehen bleibt. Offenporige Asphalte verhindern somit die Sprühhahnenbildung und Aquaplaning. Nachteilig ist allerdings, dass eine Abdichtung gegen die Binderschicht und eine gesonderte Entwässerung erfolgen müssen und besondere Anforderungen an den Winterdienst bestehen (in der Regel 20% bis 50% höherer Tausalzverbrauch) [Ingolstadt2008][Rodehack&Beckenbauer2007].

Der größte Nachteil liegt derzeit in der geringen akustischen und bautechnischen Haltbarkeit von 6 (ARS Nr. 5/ 2002) bzw. 10 Jahren [Schellenberger2006] [Rodehack&Beckenbauer2007]. Bei gut geplanten und ausgeführten (ZW)OPA-Deckschichten können die Anfangsminderungen jedoch so hoch sein, dass die geforderten - 5 dB(A) auch über die bautechnische Lebensdauer von 10 Jahren sichergestellt werden können[Rodehack&Beckenbauer2007]. Eine Übersicht über die in Bayern verbauten OPA-Beläge und ihre akustische Wirkung nach mehreren Jahren Liegezeit gibt [Weißberger2006].

2-schichtiger offenporiger Asphalt zeichnet sich dadurch aus, dass neben der oberen Schicht mit einer relativ feinen Körnung (0/8) eine zweite, gröber gekörnte (0/16) (Deckschicht)-Schicht existiert, die ebenfalls akustisch wirksam ist. Der Vorteil ist, dass die gröbere untere Schicht größere akustisch wirksame Hohlräume besitzt, die mehr Wasser ableiten können und unempfindlicher gegen Verschmutzung sind.

Durch eine geeignete Wahl der Schichtdicken kann das Absorptionsspektrum gut auf das zu erwartende Frequenzspektrum abgestimmt werden, so dass hohe Pegelminderungen von 8 dB(A) und mehr bei einer akustischen Lebensdauer von 8 Jahren möglich sind [Schellenberger2006].

Durch die geringere Anfälligkeit gegen Verschmutzungen, ist zweischichtiger offenporiger Asphalt auch für geringere Geschwindigkeiten (unter 60 km/h) geeignet [Schellenberger2006]. Erfahrungen mit 2OPA innerorts liegen in Ingolstadt [Ingolstadt2008] Augsburg [Attenberger2005] und in der Schweiz vor [BAFU2008]. Außerorts sind 2OPA-Beläge derzeit u.a. in Bayern (BAB 9 Garching und Eching) und Niedersachsen (BAB 30 Osnabrück) verbaut.

Belastungsklassen: alle

Geschwindigkeitsbereiche: ≥ 50 (allerdings nur bedingt für Straßen innerorts geeignet)

OPA auf Gussasphalt (OPA MA)

Da Deckschichten aus offenporigem Asphalt wasserdurchlässig sind, muss die darunter liegende Binderschicht wasserdicht abgeschlossen sein, um sie vor Beschädigungen durch Wassereintritt zu schützen. Normalerweise wird dies durch das Aufspritzen einer wasserdichten Bitumenschicht auf die Binderschicht und anschließendes Aufbringen der Deckschicht erreicht. Besteht – bspw. bei Fahrbahnerneuerungen – eine intakte Gussasphaltschicht, kann die OPA-Deckschicht auch direkt auf den Gussasphalt aufgebracht werden (kurz OPA MA). Dies hat verschiedene Vorteile: Die untersten Gesteinskörner der Deckschicht können nicht in die Sperrschicht einsinken. Dieses Einsinken hätte zur Folge, dass die akustisch wirksame Schichtdicke des OPA verringert und damit das Maximum des Absorptionsspektrums zu höheren Frequenzen hin verschoben

würde, was nachteilig für die Geräuschkürderung wäre. Zum anderen können Fahrbahnerneuerung schneller und kostengünstiger durchgeführt werden, da eine ‚Reserve‘ beim Abfräsen der Deckschicht vorhanden ist und ein erneutes Aufbringen der Bitumen-Schicht entfällt. Probleme können allerdings durch die veränderte Schichtdicke der gesamten Fahrbahn entstehen. [Ehlert 2008] [Ehlert2009]. Erfahrungen mit dieser Bauweise liegen in Nordrhein-Westfalen (BAB 40 Essen-Holsterhausen, BAB 3 Kölner Ring) und Bayern (A9 Bindlacher Berg) vor.

Belastungsklassen: alle

Geschwindigkeitsbereiche: > 60 km/h

Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche (PMA)

Eine sehr neue Bauweise stellt Gussasphalt mit einer offenporigen Oberfläche dar, die in [Jannicke2009] beschrieben wird. Die Namensgebung PMA (Porous Mastix Asphalt) lehnt sich an die englische Bezeichnung für offenporige Asphalte (Porous Asphalt) an. Ausgehend von der traditionellen Herstellung von Gussasphalt wurde ein Konzept entwickelt und verfeinert, das ein Mischgut mit höherem Anteil an grober Gesteinskörnung vorsieht (> 70 M.-% im Vergleich zu traditionellem Gussasphalt mit < 50 M.-%). In ersten Versuchen konnte in einem einzigen Arbeitsgang eine Deckschicht hergestellt werden, die aus drei Schichten besteht: Eine untere ‚klassische‘ Gussasphaltschicht, eine dem Splittmastixasphalt ähnliche Schicht und eine Schicht mit hohem Hohlraumgehalt, der einem OPA ähnelt. Dadurch, dass diese Schichten nicht scharf gegeneinander abgegrenzt sind, sondern in ineinander übergehen, können Scherkräfte besser abgetragen werden. Ein aufwändiger Schutz von Binder- und Tragschicht vor Nässe ist nicht notwendig, da die Deckschicht wasserundurchlässig ist. Die Entwickler erhoffen sich aus diesen Gründen eine hohe akustische und bautechnische Haltbarkeit.

Die akustische Wirkung bei diesem Asphalt ergibt sich aus einer günstigen Oberflächentextur und einem hohen Hohlraumgehalt. Dies wird durch einen hohen Anteil an einem kleinen Größtkorn (5 mm oder 8 mm – PMA-5 oder PMA-8) bei einem gussasphalttypischen Mörtel und einer gussasphaltähnlichen Bauweise erreicht.

Im Frühjahr 2009 wurde auf einem kurzen Teilstück der A44 und im Rampenbereich des Autobahnkreuzes Neersen (A44 / A52) PMA-5-Deckschichten eingebaut. Erste CPX-Messungen bei 80 und 100 km/h auf dem noch nicht ganz eingefahrenen Asphalt, deuten auf eine gute dauerhafte Lärmkürderung hin. Die Entwickler schätzen die dauerhafte Pegelkürderung auf 4-5 dB(A). Langzeiterfahrungen liegen auf Grund der kurzen Liegedauer nicht vor.

Ein PMA-5-Belag wurde inzwischen auch in einer innerstädtischen Wohnstraße verbaut. Messergebnisse liegen jedoch noch nicht vor.

Beanspruchungsklassen: alle

Geschwindigkeitsbereiche: alle

3.2.2. Pflaster

Den Anteil der Pflasterflächen im Bereich von Gemeindestraßen in Deutschland schätzen [Richter und Heindel2004] auf etwa ein Viertel der befestigten Straßendecken. In der RLS-90 sind zwei Arten von Pflaster aufgeführt: Pflaster mit ebener Oberfläche und sonstige Pflaster. Pflaster mit ebener Oberfläche haben eine gering bis mittel strukturierte Oberfläche und Fugen, deren Füllung bündig mit der Oberfläche ist oder die schmaler als 5mm sind. Diese Pflaster erhalten einen DStrO-Wert von 2 / 2,5 / 3 dB(A) (bei 30 / 40 / 50 km/h). Alle anderen Pflaster erhalten einen DStrO-Wert von 3 / 4,5 / 6 dB(A). Allerdings sind in der Klasse „sonstige Pflaster“ in der Realität größere Unterschiede zu erwarten, da hierunter sowohl Betonsteinpflaster mit einer Fuge von 6mm als auch Kopfstein- und Findlingspflaster fallen. Exemplarische Messungen in Rostock zeigen, dass bei bestehenden Pflasterbelägen dieser Gruppe Unterschiede im Vorbeifahrtpegel von bis zu 7 dB(A) (bei 30 und 50 km/h) auftreten können. Bei 50 km/h lag der Vorbeifahrtpegel der lautesten Pflasterbeläge ca. 12 dB(A) über dem eines als Referenz verwendeten Gussasphaltes [Hansestadt Rostock2004].

Der Bericht der [Hansestadt Rostock2004] hält jedoch auch fest, dass „eine Straße mit altem Natursteinpflaster [...] kulturhistorisch und städtebaulich wertvoll und bewahrenswert“ ist. Die zuständigen Behörden müssen also zwischen denkmalschützerischen und lärmschutztechnischen Aspekten abwägen. Wenn die Straße in ihrem Grundzustand erhalten werden soll, sind ergänzende Maßnahmen (siehe 4. Ergänzende Maßnahmen) zu treffen.

Wenn ein neuer Pflasterbelag verbaut wird, sollten / müssen folgende Hinweise beachtet werden (vgl. [Hansestadt Rostock2004] als Erweiterung von [Steven1992]):

Geräuscharme Kunststeinpflasterbeläge (gleiches gilt mit Einschränkungen auch für Natursteinpflaster) setzen voraus:

- Ebenheit des Pflastersteines
- dauerhafte ebene Verlegung
- schmale Fugen ohne oder mit sehr kleiner Fase
- Diagonalverband bei größeren Fasen
- Verlegung von großformatigen Steinen, günstigerweise auch unterschiedlicher Formate
- glatte bis feinaufgeraute Oberfläche mit feiner Körnung

3.2.3. Betondecken

Längstexturierung mit Jutetuch

Bis 2006 waren diese Fahrbahnbeläge die einzigen Betonoberflächen, die in Berechnungen nach RLS-90 mit einem negativen DStrO-Wert von -2 dB(A) belegt waren. Allerdings waren sie wegen relativ geringer Griffigkeitsreserven in der Kritik. Sie wurden mit dem ARS 5/2006 des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung durch Waschbeton ersetzt.

Waschbeton

Die Waschbetonbauweise wird in Deutschland erst seit kurzem verwendet. Sie ist seit 2006 Regelbauweise nach RLS-90 und wird dort mit $DStrO = -2 \text{ dB(A)}$ berechnet.

Waschbetonoberflächen versprechen sehr hohe Liegezeiten von 30 Jahren und mehr und können bei sorgfältiger Bauausführung eine gute Lärminderung erzielen. [Ehlert2008] [Bollmann et al. 2007]. Bisher existieren in Deutschland allerdings keine Langzeiterfahrungen, da die entsprechenden Fahrbahndecken sich erst im Bau befinden (bspw. Brandenburg BAB 10 Autobahndreieck Nuthetal, BAB 11 und B12) oder nur sehr kurze Liegedauern aufweisen (Rheinland-Pfalz).

3.2.4. Sonstige Bauformen / Bauausführungen

DSK – DSH, Dünnschichtige Beläge im Kalt- bzw. Heißeinbau:

Dünnschichtbeläge werden im Rahmen der Erhaltung von Verkehrsflächen in allen Bauklassen eingesetzt. Aufgrund der geringen Schichtdicke finden feinkörnige – und damit i.A. lärmarme (siehe Abschnitt

Auswirkung der Fahrbahneigenschaften auf die Lärmemission) - Mischgute Verwendung (Bspw. SMA 0/5 und Asphaltbeton 0/5 im Heißeinbau [asphalt.de –Erhaltung]). Die Mischgutzusammensetzung kann noch hinsichtlich der Geräuschentwicklung optimiert werden, z.B. durch geeignete Kornform (siehe auch LOA 5 D). Messungen der Dünnschicht-Standardbeläge in Rheinland-Pfalz und Sachsen-Anhalt haben gegenüber dem Referenzbelag eine lärmindernde Wirkung gezeigt.

Gummiasphalt

Gummiasphalt bezeichnet i.A. keine eigenständige Bauweise, sondern eine Modifikation verschiedener Bauweisen (offenporige Asphalte, SMA) über den Zusatz von Gummi in den Binder. In den USA ist "rubber-asphalt" in einer ASTM Norm (ASTM D 8-88) definiert als eine Mischung aus „Asphalt Zement“, Gummi aus Altreifen und bestimmten Additiven, in denen der Gummianteil mindestens 15% des Gesamtgewichtes ausmacht. Ein direkter Einfluss des Gummimaterials auf die Geräuschemissionen ist nach [Sandberg2002, S.270f] nicht eindeutig belegbar, jedoch kann sich ein nennenswerter Anteil Gummi im Binder positiv auf die Nachgiebigkeit, die Haltbarkeit bei Asphalten allgemein und auf die Anfälligkeit für Verschmutzungen bei offenporigen Asphalten auswirken. Damit hätte der Gummianteil auch einen positiven Einfluss auf die Höhe und die Dauerhaftigkeit der Geräuschminderung. Systematische Untersuchungen hierzu liegen dem UBA nicht vor. Die Vorteile von ‚Gummiasphalt‘ bzw. gummimodifiziertem Binder liegen in einer erhöhten Haltbarkeit der Fahrbahndecke insbesondere auf Strecken mit starken Temperaturschwankungen.

3.3. Fahrbahnbeläge im Forschungsstadium

PERS – PoroElastic Rubber Surface

PERS-Straßendecken wurden in den 1970iger Jahren in Schweden erstmalig getestet und in den letzten Jahren v.a. in Japan für den Einsatz auf Autobahnen weiterentwickelt. Für Autobahnen wird eine Lärminderung von mindestens 10 dB(A) erwartet [Meiarashi2004]. PERS-Straßenbeläge werden aus Gummi (z.B. aus Alt-Reifen) hergestellt und enthalten für gewöhnlich kein Steinmaterial. Das Material ist mit einem Hohlraumgehalt von 33-38% sehr porös und zudem elastisch, was ebenfalls zur Geräuschminderung beiträgt (siehe Abschnitt

Auswirkung der Fahrbahneigenschaften auf die Lärmemission („Nachgiebigkeit). Die Dicke der PERS-Schicht (ca. 30 mm) bestimmt die Lage des Maximums der Absorptionsfähigkeit (ca. bei 1,3 kHz), so dass auch hier die bauliche Planung (in Grenzen) auf die Emissionen des zu erwartenden Verkehrs abgestimmt werden kann.

In Europa wurden vier Teststrecken realisiert – davon drei in Holland [Morgan2008] und eine innerorts⁹ in Schweden. Eine Autobahnteststrecke auf der A50 in Holland ist in Planung [Superstillwegverkehr]

In Schweden [Sandberg2005] ergaben sowohl die Messung des Rollwiderstands als auch die Griffigkeitsmessung gute, mit herkömmlichen Straßenbelägen vergleichbare Werte. Mit dem CPX-Anhänger wurden 9-12 dB(A) geringere Rollgeräuschpegel gemessen als auf einem Asphaltbeton 0/11mm. Zu ähnlich positiven Ergebnissen kommt [Ejsmont2009] bei Laborversuchen mit PERS-Belägen: Bei 80 km/h sind die PERS-Beläge im Vergleich zum wenig rauen und leisen ISO Referenzbelag im Schnitt 5,7 dB leiser, wobei bei Sommerreifen eine größere Reduktion (6,5 dB) erreicht wurde als bei Winterreifen (4,7 dB). Im Vergleich zu einem rauen Standardbelag wurde eine durchschnittliche Reduktion um 7 dB (Sommer 9,2 dB und Winter 6,4 dB) erreicht, wobei die größte Reduktion bei 11,7 dB lag. Der durchschnittliche Rollwiderstand der Testreifen auf PERS entsprach etwa dem durchschnittlichen Rollwiderstand auf Standardbelägen.

[Sandberg2002] führt die Geräuschminderung auf folgende Faktoren zurück: 1. vermindertes Air-Pumping 2. Verringerte Anregung durch günstige Textur 3. Verringerte Vibrationen auf Grund des elastischen Untergrundes und verminderte Stick-Slip Geräusche. Allerdings traten Probleme mit der baulichen Haltbarkeit auf: Der in Stockholm unter dem PERS verlegte Asphalt löste sich von der darunter liegenden Binderschicht. [Sandberg2005] vermuten die Gründe in einem nicht abgestimmten Fahrbahnunterbau.

⁹ Mit einem DTV 5000 Fzg. und Geschwindigkeitsbegrenzung auf 50 km/h.



Abbildung 5: Teststrecke mit PERS-Belag nahe Stockholm (Schweden). Quelle: [Bendtsen et al.2005]

Tabelle 1: Korrekturwerte Straßenoberfläche (DStrO) in dB(A) nach RLS-90 und ARS des BMVBS / BMVBW¹⁰

		Geschwindigkeit in km/h				RLS-90	ARS des BMVBS / BMVBW Nr.
		30	40	>50	>60		
Typ	nicht geriffelte Gussasphalte; Asphaltbeton oder SMA	0	0	0	0	x	
	Betone oder geriffelte Gussasphalte	1	1,5	2		x	
	Pflaster mit ebener Oberfläche	2	2,5	3		x	
	sonstiges Pflaster	3	4,5	6		x	
	Betone mit Stahlbesenstrich und Längsglätter				1		14/91
	Betone ohne Stahlbesenstrich mit Längsglätter und Längstextur mit Jutetuch				-2		14/91 Aufgehoben mit ARS 5/2006
	Asphaltbetone ≤ 0/11 und SMA 0/8 und 0/11 ohne Absplittung				-2		14/91
	OPA mit ≥ 15% Hohlraumgehalt 0/11				-4		14/91 & 5/2002
	OPA mit ≥ 15% Hohlraumgehalt 0/8				-5		14/91 & 5/2002
	Betone nach ZTV Beton-StB01 mit Waschbetonoberfläche				-2		5/2006

¹⁰ Allgemeines Rundschreiben des Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (ab 1998), bzw. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (bis 1998)

4. Ergänzende Maßnahmen

Die Sanierung von Straßen ist – neben dem Haupteffekt der Lärminderung durch die verbesserte Fahrbahnoberfläche – eine günstige Gelegenheit für einen teilweisen Straßenrückbau. Der so gewonnene Straßenraum kann bspw. für die Markierung von Radfahrstreifen genutzt werden. Dies ergibt als Nebeneffekt den Anreiz zur Verlagerung von Verkehr auf emissionsärmere Verkehrsmittel.

Ein weiteres Mittel, das insbesondere in hochbelasteten Gebieten (Hot Spots) eine Entlastung der Lärmbetroffenen erbringt, sind Geschwindigkeitsbeschränkungen. So kann bspw. die Reduktion der Geschwindigkeit von 50 auf 30 km/h eine Reduktion der Immissionspegel um 2,5 dB(A) (bei 10 % Lkw-Anteil) erbringen. Verschiedene Untersuchungen (siehe [Ortscheid&Wende2004]) zeigen, dass diese moderate Reduktion des Mittelungspegels einen überproportional hohen Rückgang der Belästigung bewirkt. In sensiblen Zeiträumen, wie bspw. in der Nacht und am Abend, kann ein zusätzliches Lkw-Fahrverbot weitere Entlastung bringen.

In Kombination können diese Maßnahmen für hochbelastete Gebiete eine spürbare Entlastung bringen:

Bsp.: Ausgangssituation :	Straße mit sonstigem Pflaster	
	einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 50 km/h und einem	
	Lkw-Anteil von 10 %	
Maßnahmen:	Umbau auf Referenzasphaltdecke:	- 3 dB(A)
	Geschwindigkeitsreduktion auf 30 km/h:	- 2,5 dB(A)
	Lkw-Fahrverbot:	- 2 dB(A)
	Gesamt:	- 7,5 dB(A)

Bei Verwendung eines lärmoptimierten Belages (SMA 0/5, LOA 5 D) oder bei Rückbau eines akustisch sehr ungünstigen Pflasters (siehe Abschnitt 3.2.2 Pflaster) können noch größere Reduktionen erzielt werden. Für eine nachhaltige Lärminderung ist es sinnvoll, verschiedene sich ergänzende Maßnahmen zu kombinieren.

Literatur

[asphalt.de – Baustoffe] Deutscher Asphaltverband, asphalt.de – Baustoffe:

http://www.asphalt.de/site/startseite/technik/bautechnik/6_baustoffe_und_baustoffgemische/ Abruf am 20.05.2009

[asphalt.de – Erhaltung]Deutscher Asphaltverband, asphalt.de - Erhaltung:

http://www.asphalt.de/site/startseite/technik/bautechnik/10_erhaltung/
Abruf am 08.06.2009

[Attenberger2008] Attenberger, Alexander Kühne, R.: Pilotprojekt: 2 OPA als innerstädtische Lärmschutzmaßnahme, in: Fortschritte der Akustik 2005, DAGA München 2005

[Babisch et al2004] Babisch et. al. (2004): Chronischer Lärm als Risikofaktor für den Myokardinfarkt. Umweltbundesamt, WaBoLu-Hefte 02/04

[BAFU2008] Angst, Chr. et al.: „Lärmarme Fahrbahnbeläge innerorts Jahresbericht 2008“, Bundesamt für Straßen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU) der Schweiz, 2008

[Bartolomaeus et al 2002] Bartolomaeus, W. Glaeser, K.-P. Hemmert-Halswick, A. Ripke, O. und Weck, U. : „Lärminderung – Optimierung des Systems Fahrbahn-Fahrzeug-Reifen im Projekt „Leiser Verkehr“ , in Straße+Autobahn 12/2002

[Beckenbauer 2001] Beckenbauer, Thomas: Akustische Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen, in: Straße + Autobahn 10/2001

[Beckenbauer2002] Beckenbauer, Th. et al. (2002): Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 847. Hrsg: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn 2002

- [Beckenbauer2003] Beckenbauer, Thomas: Reifen-Fahrbahn-Geräusche – Minderungspotenziale der Straßenoberfläche, DAGA'03 , Aachen, 18. - 20. März 2003
- [Beckenbauer2008] Beckenbauer, Thomas: Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Geräuschenstehung, Wirkungsmechanismen und akustische Wirkung unter dem Einfluss von Bautechnik und Straßenbetrieb, 4. Informationstage Geräuschkindernde Fahrbahnbeläge in der Praxis – Lärmaktionsplanung 11. / 12.6.2008
- [Beckerbau] Beckerbau Lärmtechnisch optimierter Gussasphalt:
http://www.beckerbau-bbb.de/databases/internet/_public/content.nsf/Navigation?OpenAgent&docid=C39E52684566E824C125751300496D20&urldocid=C968BF408CD2FABEC12575150045CEFF
- [Bendtsen et al.2005] Bendtsen, Hans Andersen, Bent Larsen, Lars Ellebjerg: Notes from Forum Acusticum in Budapest 2005 , Vejdirektoratet, Vejteknisk Institut 2005, download unter:
<http://www.vejdirektoratet.dk/publikationer/V/Inot027/pdf/not27vi.pdf>
- [Bollman et al.2007] Bollmann, Katrin Lyhs, Peter und Bilgeri, Peter: „Waschbeton – neue Bauweise für Betonfahrbahndecken“, in : Beton Information 2/2007, Seite 32-35
- Breitbach et al.2009] Breitbach, Peter Jannicke, Bernd Rode, Peter Sikinger, Thomas und Zilken, Markus: „Lärmtechnisch optimierte Gussasphaltdeckschichten – Stand der Technik“ in: asphalt 5/2009
- [Ehlert2008] Ehlert, Stefan: Geräuschkindernde Fahrbahnbeläge in Nordrhein-Westfalen, Sonderdruck anlässlich des Deutschen Straßen und Verkehrskongresses 2008 in Düsseldorf vom 08.- 10. Oktober 2008. Download unter:
http://www.strassen.nrw.de/_down/pub_offenporiger_asphalt.pdf
- [Ehlert2009] Ehlert, Stefan: Innovativer Offenporiger Asphalt in Nordrhein-Westfalen, in : Straße und Autobahn 3/2009

- [Ejsmont2009] Ejsmont, Jerzy A. und Ronowski, Grzegorz: Laboratory Tests of Poroelastic Road Surfaces, in Proceedings of the Sixteenth International Congress on Sound and Vibration, Krakow, 5.-9.Juli 2009
- [FEHRL2006] FEHRL, The Forum of European National Highway Research Laboratories.: "SILVIA (silenda via) Sustainable road surfaces for traffic noise control – Guidance Manual for Low-Noise Road surfaces" Projekt Report , 2006, Download unter: <http://www.trl.co.uk/silvia>
- [FGSV 2000] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV), AK Gussasphalt „Hinweise für die Herstellung von Gussasphaltdeckschichten mit lärmtechnisch verbesserten Eigenschaften“, Ausgabe 2000
- [Halbe2006] Halbe, Kurt: Offenporiger Asphalt auf der A7 – Von der Planung bis zum Einbau, in: asphalt 5/2006
- [Hansestadt Rostok2004]Hansestadt Rostock: Planungsempfehlung zum Einsatz von Pflasterbelägen - Lärminderungsplanung Hansestadt Rostock - Handlungsfeld: Straßenverkehrslärm Baustein: Sanierung akustisch problematischer Fahrbahnoberflächen; Rostock 2004
Download unter:
http://rathaus.rostock.de/sixcms/media.php/144/Planungsempfehlung_nPflaster.pdf
- [Ingolstadt2008] Ingolstadt: Ingolstadt Westliche Ringstraße Pilotprojekt zweischichtiger offenporiger Asphalt – Eine Handreichung, 2008, Download unter:
http://www.lfu.bayern.de/laerm/forschung_und_projekte/opa/projektbeschreibung/doc/2opa.pdf
- [ISO 11819-1:2001] Deutsche Fassung EN ISO 11819-1:2001: „Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgläusche Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren“ , 2001
- [ISO 11819-2] ISO 11819-2 (draft): Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: CPX Close-Proximity Method, Entwurf

- [Jannicke2009] Jannicke, Bernd: PMA – Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche, in: asphalt 5/2009
- [Kötz, W-D.2004] Kötz, W-D.: Zur Frage der effektiven Schalldämmung von geöffneten Fenstern. Zeitschrift für Lärmbekämpfung, 51 (2004) Nr. 1, S. 21 – 26.
- [Kragh2007] Kragh, Jørgen: Ageing of Porous Pavements - Acoustical effects, Danish Road Institute, Technical note 56, 2007
- [LFU Leitfaden 2009] Bayerisches Landesamt für Umwelt **LFU** (Hrsg): „Leitfaden für das Aufbringen zweischichtiger offenporiger Asphaltdeckschichten“, März 2009, Download unter http://www.lfu.bayern.de/laerm/forschung_und_projekte/opa/projektbeschreibung/doc/leitfaden_2opa.pdf
- [Lorenzen2007] Lorenzen, Arne : “Low Road Traffic Noise” The German research program ”Leistra2“, INTER-NOISE 2007, 28-31 AUGUST 2007, ISTANBUL, TURKEY
- [Meiarashi2004] Meiarashi, S.: Porous elastic road surface as an ultimate highways noise measure, in: Transportation Research Record No. 1880, Energy and Environmental Concerns, Washington D.C., 2004; Download unter <http://www.pwri.go.jp/eng/activity/pdf/reports/meiarashi031017.pdf>
- [MIR] Ministerium für Infrastruktur und Raumordnung Brandenburg: Leiser Straßenverkehr, auf: <http://www.mir.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.154213.de>
- [Morgan2008] Morgan, P.A. : Innovatieprogramma Geluid voor wegverkeer, Scientific Strategy Document End Report, Centre for Transport and Navigation of Rijkswaterstaat, Report Number DVS-2008-016, März 2008
- [Müller-BBM2008] Müller-BBM: „B10 / B27 Ortsdurchfahrt Stuttgart-Zuffenhausen Nahfeld(CPX)-Messung der Reifenfahrbahngeräusche nach ISO/CD 11819-2 nach Umbau der Südfahrbahn Bericht Nr. M70 323“, Planegg bei München, November 2008

- [Müller 2003] Müller, Gerhard und Möser, Michael: Taschenbuch der Technischen Akustik, 3. erweiterte und überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg München 2003
- [Ortscheid und Wende2004]Ortscheid, Jens und Wende, Heidemarie: Können Lärminderungsmaßnahmen mit geringer akustischer Wirkung wahrgenommen werden? Ein klärendes Wort zur Wahrnehmung von Pegeländerungen, Umweltbundesamt, Berlin 2004
- [RLS90] Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen RLS-90
- [Raab2009] Raab, Christel und Heine, Thomas: Schalltechnische Untersuchung zu Lärminderungsmaßnahmen an der Bundesstrasse B10 / B 27 Ortsdurchfahrt Stuttgart-Zuffenhausen – Vorabversion, Stuttgart 20.2.2009
- [Radenberg2007] Radenberg, Martin und Sander, Rolf: „Lärmtechnisch optimiertes Asphaltdeckschichtkonzept für den kommunalen Straßenbau“, in: asphalt 8/2007
- [Radenberg2009] Radenberg, Martin: Hinweise zur Umsetzung Lärmoptimierter Asphaltdeckschichten für den kommunalen Straßenbau; Ruhr-Universität-Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, 29.06.2009, download unter: <http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/verkehrswegebau/aktuell/hinweise-loa5d-29-6-2009.pdf>
- [Ressel2006] Ressel, W. Eisenbach, C.D. Alber, S. Bergk, B.: Enduring traffic noise reduction by improved porous asphalt, in : Proceedings 6th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2006, Tampere, Finland, European Acoustics Association (EAA), download unter: http://www.fv-leiserverkehr.de/pdf-dokumenten/eurnoise_2006/Ressel.pdf
- [Richter und Heindel2004]Richter, D. und Heindel, M. : Straßen- und Tiefbau. Teubner Verlag, Wiesbaden 2004,

- [SuperStilwegverkeer]Rijkswaterstaat - SuperStilwegverkeer:
<http://www.rijkswaterstaat.nl/wegen/innovatie%5Fen%5Fonderzoek/stiller/superstil%5Fwegverkeer/>
- [Rode2005] Rode,Peter : Leiser Gussasphalt – Wege zu Belägen mit lärmreduzierenden Eigenschaften. asphalt 5/2005
- [Rodehack2006] Rodehack, Gernot und Beckenbauer, Thomas: Lärmarme Fahrbahnoberflächen: Möglichkeiten und Grenzen von offenporigen Asphaltdeckschichten, Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2006, 27.-29.September 2006 in Karlsruhe
- [Rodehack2007] Rodehack, Gernot und Beckenbauer, Thomas: Möglichkeiten und Grenzen von offenporigen Asphaltdeckschichten, in: Straße und Autobahn 4/2007
- [RStO] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen RStO 01, 2001
- [Sadzulewsky2008] Sadzulewsky, Siegfried: Lärmtechnisch verbesserter Gussasphalt - Besonderheiten dieser Bauweise, VSVI NRW Seminar, Krefeld, 19.02.2008, Download unter: http://www.vsvi-nrw.de/fortbildung/seminarberichte/seminarbericht_07_vsvi_krefeld_2008.pdf
- [Sandberg2002] Sandberg, Ulf und Ejsmont, Jerzy A.: „Tyre/Road Noise Reference Handbook“, Informex, Kisa, 2002
- [Sandberg2005] Sandberg, Ulf und Kalman, Björn: SILVIA PROJECT REPORT The Poroelastic Road Surface – Results of an Experiment in Stockholm, 2005, download unter: http://www.trl.co.uk/silvia/Silvia/pdf/Associated_Reports/SILVIA-VTI-006-00-WP4-030605.pdf

- [Schellenberger2006] Schellenberger, Matthias: Lärmindernde Beläge – Eine Chance für die Asphaltbauweise, in: asphalt 4/2006
- [Schellenberger2007] Schellenberger, Matthias und Scheuer, Siegfried: Lärmtechnisch optimierte Splittmastixasphalte, in: Straße und Autobahn, 8/2007
- [Statistisches Bundesamt2007] Statistisches Bundesamt Deutschland, Stand 1. Januar 2007
- [Steven1992] Steven, Heinz: Geräuschemissionen auf Betonsteinpflaster, FIGE GmbH, Herzogenrath 1992
- [Weißberger2006] Weißberger, Walter: Weiterentwicklung offenporiger Asphalte – Schalltechnische und bautechnische Untersuchung an realisierten Strecken in Bayer Schlussbericht, Bericht Nr.M61 791/5, 2006
Download unter:
http://www.lfu.bayern.de/laerm/forschung_und_projekte/opa/projektbeschreibung/doc/schlussbericht_opa.pdf
- [Wende et al. 2006] Heidemarie Wende, Jens Ortscheid, Matthias Hintzsche: Lärmwirkungen von Straßenverkehrsgeräuschen - Auswirkungen eines lärmarmen Fahrbahnbelages , Umweltbundesamt Dessau 2006,
Download unter: <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3047.pdf>
- [Weißelborg2008] Weißelborg: Lärmtechnisch verbesserte Bauweisen (Offenporiger Asphalt), VSVI-Seminar Oberflächeneigenschaften von Straßen, 19. Februar 2008, Download unter: http://www.vsvi-nrw.de/fortbildung/seminarberichte/seminarbericht_07_offenporiger_asphalt.pdf
- [Winkler2008] Winkler, Marcus: Neuer lärmarmen Asphalt für den kommunalen Straßenbau, in : Baumagazin 6/2008
- [ZTV] ZTV Asphalt-StB 07, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, FGSV Verlag, Köln, 2008

Anhang:
Datenblätter Fahrbahnbeläge

Lärmtechnisch verbesserter Gussasphalt

Belastungsklassen:	alle
Geschwindigkeitsbereiche:	alle
DStrO-Wert nach RLS-90:	0 dB(A), da RLS-90 nicht zwischen verschiedenen Gussasphaltbauweisen unterscheidet. Eine Aufnahme in die RLS-90 mit einem DStrO-Wert von -2 dB(A) ist für 2009 angekündigt.

Pegelminderung¹¹ Einzelmessung: k.A.

Haltbarkeit:

Bautechnisch:	sehr hoch
Akustisch:	k.A.
Anforderungen an Planung:	durchschnittlich
Anforderungen an Ausführung:	hoch
Praktische Erfahrungen in:	Nordrhein-Westfalen (BAB 1, BAB 52 Kaarst , BAB57 Moers und B56) Niedersachsen (BAB 261, Tötensen) Brandenburg (BAB13), Bremen (BAB 27) Bayern (BAB 9 Nürnberg Ost)

Literatur:

Ehlert, Stefan: Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in Nordrhein-Westfalen, Sonderdruck anlässlich des Deutschen Straßen und Verkehrskongresses 2008 in Düsseldorf vom 08.- 10. Oktober 2008. Download unter: http://www.strassen.nrw.de/down/pub_offenporiger_as

Rode, Peter : Leiser Gussasphalt – Wege zu Belägen mit lärm reduzierenden Eigenschaften. asphalt 5/2005

Sadzulewsky, Siegfried: Lärmtechnisch verbesserter Gussasphalt - Besonderheiten dieser Bauweise, VSVI NRW Seminar, Krefeld, 19.02.2008, Download unter: http://www.vsvi-nrw.de/fortbildung/seminarberichte/seminarbericht_07_vsvi_krefeld_2008.pdf

Beckerbau Lärmtechnisch optimierter Gussasphalt: <http://www.beckerbau-bbb.de/databases/internet/public/content.nsf/Navigation?OpenAgent&docid=C39E52684566E824C125751300496D20&urldocid=C968BF408CD2FABEC12575150045CEFF>

¹¹ gegenüber Referenzbelag

„Hinweise für die Herstellung von Gussasphaltdeckschichten mit lärmtechnisch verbesserten Eigenschaften“, Ausgabe 2000

Breitbach, Peter Jannicke, Bernd Rode, Peter Sikinger, Thomas und Zilken, Markus:
„Lärmtechnisch optimierte Gussasphaltdeckschichten – Stand der Technik“ in: asphalt
5/2009

Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche (PMA)

Belastungsklassen:	alle
Geschwindigkeitsbereiche:	alle
DStrO-Wert nach RLS-90:	0 dB(A), da RLS-90 nicht zwischen verschiedenen Gussasphaltbauweisen unterscheidet.
Pegelminderung¹² Einzelmessung:	ca. 4 dB(A) , dauerhaft geschätzt 4-5dB (A)
Haltbarkeit:	
Bautechnisch:	sehr hoch
Akustisch:	k.A.
Anforderungen an Planung:	durchschnittlich
Anforderungen an Ausführung:	mittel - hoch
Praktische Erfahrungen in:	Nordrhein-Westfalen (BAB 44 und Autobahnkreuz Neersen)

Literatur:

Jannicke, Bernd „PMA – Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche“, in: asphalt 5/2009

¹² gegenüber Referenzbelag

Lärmarmer SplittmastixSMA LA 0/8 bzw. SMA 0/8 LA

Belastungsklassen:	alle
Geschwindigkeitsbereiche:	alle
DStrO-Wert nach RLS-90:	-2 dB(A) (nicht abgesplitteter SMA 0/8) bei v > 60 km/h
Pegelminderung¹³ Einzelmessung:	4 dB(A) (SPB-Messung in Düren)
Haltbarkeit:	
Bautechnisch:	Prognose: etwas geringer als ‚klassischer‘ SMA
Akustisch:	k.A.
Anforderungen an Planung:	durchschnittlich
Anforderungen an Ausführung:	hoch
Praktische Erfahrungen in:	Bayern (BAB 39 Schwandorf, BAB 3, BAB 73), Baden-Württemberg (B10 / B 27 Ortsdurchfahrt Stuttgart-Zuffenhausen) Nordrhein-Westfalen (B 56 Düren)

Literatur:

Schellenberger, Matthias: Lärmindernde Beläge – Eine Chance für die Asphaltbauweise, in: asphalt 4/2006

Schellenberger, Matthias und Scheuer, Siegfried: Lärmtechnisch optimierte Splittmastixasphalte, in: Straße und Autobahn, 8/2007

Ehlert, Stefan: Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in Nordrhein-Westfalen, Sonderdruck anlässlich des Deutschen Straßen und Verkehrskongresses 2008 in Düsseldorf vom 08.- 10. Oktober 2008. Download unter: http://www.strassen.nrw.de/download/pub_offenporiger_as

Raab, Christel und Heine, Thomas: Schalltechnische Untersuchung zu Lärminderungsmaßnahmen an der Bundesstrasse B10 / B 27 Ortsdurchfahrt Stuttgart-Zuffenhausen – Vorabversion, Stuttgart 20.2.2009

Müller-BBM: „B10 / B27 Ortsdurchfahrt Stuttgart-Zuffenhausen Nahfeld(CPX)-Messung der Reifenfahrbahngeräusche nach ISO/CD 11819-2 nach Umbau der Südfahrbahn Bericht Nr. M70 323“, Planegg bei München, November 2008

¹³ gegenüber Referenzbelag

ZTV Asphalt-StB 07, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, FGSV Verlag, Köln, 2008

SMA 0/5 bzw. SMA 0/5 S

Belastungsklassen:	I-VI , SV mit Einschränkungen
Geschwindigkeitsbereiche:	alle
DStrO-Wert nach RLS-90:	0 dB(A)
Pegelminderung¹⁴ Einzelmessung:	2 bis 2,5 dB(A) (CPX-Messung bei 50 und 80 km/h)
Haltbarkeit:	
Bautechnisch:	k.A. (vermutlich hoch)
Akustisch:	k.A.
Anforderungen an Planung:	durchschnittlich
Anforderungen an Ausführung:	durchschnittlich
Praktische Erfahrungen in:	Nordrhein-Westfalen (BAB 43)
Literatur:	

Ehlert, Stefan: Geräuschkindernde Fahrbahnbeläge in Nordrhein-Westfalen, Sonderdruck anlässlich des Deutschen Straßen und Verkehrskongresses 2008 in Düsseldorf vom 08.- 10. Oktober 2008. Download unter: http://www.strassen.nrw.de/download/pub_offenporiger_as

Deutscher Asphaltverband, Asphalt.de – Baustoffe:

http://www.asphalt.de/site/startseite/technik/bautechnik/6_baustoffe_und_baustoffgemische/

Abruf am 20.05.2009

¹⁴ gegenüber Referenzbelag

LOA 5 D (Düsseldorfer Asphalt)

Belastungsklassen:	k.A.
Geschwindigkeitsbereiche:	alle
DStrO-Wert nach RLS-90:	0 dB(A), da als SMA zu behandeln
Pegelminderung¹⁵ Einzelmessung:	5,1 dB(A) für Pkw und 1,1 dB(A) für Lkw (CPX-Messung bei 50 km/h)
Haltbarkeit:	
Bautechnisch:	Prognose: wie klassischer SMA
Akustisch:	k.A.
Anforderungen an Planung:	durchschnittlich
Anforderungen an Ausführung:	hoch
Praktische Erfahrungen in:	Nordrhein-Westfalen (Düsseldorf: Mecumstraße, Kennedydamm) In Planung: B 474 Bad Coesfeld, Gelsenkirchen (Hauptstraße, Festweg, Görresstraße)

Literatur:

Winkler, Marcus: Neuer lärmarmen Asphalt für den kommunalen Straßenbau, in :
Baumagazin 6/2008

Radenberg, Martin und Sander, Rolf: „Lärmtechnisch optimiertes Asphaltdeckschichtkonzept für den kommunalen Straßenbau“, in: asphalt 8/2007

<http://www.derwesten.de/nachrichten/nachrichten/staedte/gelsenkirchen/2009/8/5/news-128310911/detail.html>

[Radenberg2009] Radenberg, Martin: Hinweise zur Umsetzung Lärmoptimierter Asphaltdeckschichten für den kommunalen Straßenbau; Ruhr-Universität-Bochum, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Lehrstuhl für Verkehrswegebau,

¹⁵ gegenüber Referenzbelag

29.06.2009, download unter: <http://www.ruhr-uni-bochum.de/imperia/md/content/verkehrswegebau/aktuell/hinweise-loa5d-29-6-2009.pdf>

Offenporiger Asphalt (OPA)

Belastungsklassen:	alle
Geschwindigkeitsbereiche:	> 60 km/h
DStrO-Wert nach RLS-90:	-4 dB(A) für 0/11 -5dB(A) für 0/8

Pegelminderung¹⁶ Einzelmessung: k.A.

Haltbarkeit:

Bautechnisch: 10 a

Akustisch: 6 a

Anforderungen an Planung: hoch

Anforderungen an Ausführung: hoch

Praktische Erfahrungen in:

Literatur:

Schellenberger, Matthias: Lärmindernde Beläge – Eine Chance für die Asphaltbauweise, in: asphalt 4/2006

Rodehack, Gernot und Beckenbauer, Thomas: Lärmarme Fahrbahnoberflächen: Möglichkeiten und Grenzen von offenporigen Asphaltdeckschichten, Deutscher Straßen- und Verkehrskongress 2006, 27.-29.September 2006 in Karlsruhe

Rodehack, Gernot und Beckenbauer, Thomas: Möglichkeiten und Grenzen von offenporigen Asphaltdeckschichten, in: Straße und Autobahn 4/2007

Lorenzen, Arne : "Low Road Traffic Noise" The German research program "Leistra2", INTER-NOISE 2007, 28-31 AUGUST 2007, ISTANBUL, TURKEY

Ministerium für Infrastruktur und Raumordnung Brandenburg: Leiser Straßenverkehr, auf: <http://www.mir.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.154213.de>

Angst, Chr. et al.: „Lärmarme Fahrbahnbeläge innerorts Jahresbericht 2008“, Bundesamt für Straßen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (BAFU) der Schweiz, 2008

¹⁶ gegenüber Referenzbelag

Ressel, W. Eisenbach, C.D. Alber, S. Bergk, B.: Enduring traffic noise reduction by improved porous asphalt, in : Proceedings 6th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2006, Tampere, Finland, European Acoustics Association (EAA), download unter:
http://www.fv-leiserverkehr.de/pdf-dokumenten/eurnoise_2006/Ressel.pdf

Weißenberger, Walter: Weiterentwicklung offenporiger Asphalte – Schalltechnische und bautechnische Untersuchung an realisierten Strecken in Bayer Schlussbericht, Bericht Nr.M61 791/5, 2006

Download unter:

http://www.lfu.bayern.de/laerm/forschung_und_projekte/opa/projektbeschreibung/doc/schlussbericht_opa.pdf

Kragh, Jørgen: Ageing of Porous Pavements - Acoustical effects, Danish Road Institute Technical note 56, 2007

2-schichtiger offenporiger Asphalt (2OPA oder ZWOPA)

Belastungsklassen:	alle
Geschwindigkeitsbereiche:	≥ 50 (allerdings nur bedingt für Straßen innerorts geeignet)
DStrO-Wert nach RLS-90:	-5dB(A) für 0/8
Pegelminderung¹⁷ Einzelmessung:	7-9 dB(A) in CPX-Messungen
Haltbarkeit:	
Bautechnisch:	10 a
Akustisch:	6-10 a wenn Kriterium Pegelminderung ≥ 5 dB(A) angesetzt wird
Anforderungen an Planung:	sehr hoch
Anforderungen an Ausführung:	sehr hoch
Praktische Erfahrungen in:	Außerorts: Bayern (BAB 9 bei Eching und Garching Niedersachsen (BAB 30 Osnabrück) Innerorts: Ingolstadt Augsburg

Literatur:

Bayerisches Landesamt für Umwelt **LFU** (Hrsg.): „Leitfaden für das Aufbringen zweischichtiger offenporiger Asphaltdeckschichten“, März 2009, Download unter http://www.lfu.bayern.de/laerm/forschung_und_projekte/opa/projektbeschreibung/doc/leitfaden_2opa.pdf

Halbe, Kurt: Offenporiger Asphalt auf der A7 – Von der Planung bis zum Einbau, in: asphalt 5/2006

Schellenberger, Matthias: Lärmindernde Beläge – Eine Chance für die Asphaltbauweise, in: asphalt 4/2006

Attenberger, Alexander Kühne, R.: Pilotprojekt: 2 OPA als innerstädtische Lärmschutzmaßnahme, in: Fortschritte der Akustik 2005, DAGA München 2005

¹⁷ gegenüber Referenzbelag

Ingolstadt: Ingolstadt Westliche Ringstraße Pilotprojekt zweischichtiger offenporiger Asphalt – Eine Handreichung, Download unter:

http://www.lfu.bayern.de/laerm/forschung_und_projekte/opa/projektbeschreibung/doc/2opa.pdf

Angst, Chr. et al.: „Lärmarme Fahrbahnbeläge innerorts Jahresbericht 2008“, Bundesamt für Straßen (ASTRA) und Bundesamt für Umwelt (**BAFU**) der Schweiz, 2008

Kragh, Jørgen: Ageing of Porous Pavements - Acoustical effects, Danish Road Institute Technical note 56, 2007

Ressel, W. Eisenbach, C.D. Alber, S. Bergk, B.: Enduring traffic noise reduction by improved porous asphalt, in : Proceedings 6th European Conference on Noise Control, EURONOISE 2006, Tampere, Finland, European Acoustics Association (EAA), download unter:
http://www.fv-leiserverkehr.de/pdf-dokumenten/eurnoise_2006/Ressel.pdf

Weißenberger, Walter: Weiterentwicklung offenporiger Asphalte – Schalltechnische und bautechnische Untersuchung an realisierten Strecken in Bayer Schlussbericht, Bericht Nr.M61 791/5, 2006

Download unter:

http://www.lfu.bayern.de/laerm/forschung_und_projekte/opa/projektbeschreibung/doc/schlussbericht_opa.pdf

OPA auf Gussasphalt (OPA MA)

Belastungsklassen:	alle
Geschwindigkeitsbereiche:	> 60 km/h
DStrO-Wert nach RLS-90:	-4 dB(A) für 0/11 -5dB(A) für 0/8
Pegelminderung¹⁸ Einzelmessung:	k.A.
Haltbarkeit:	
Bautechnisch:	10 a (wie konventioneller OPA)
Akustisch:	6 a (wie konventioneller OPA)
Anforderungen an Planung:	hoch
Anforderungen an Ausführung:	hoch
Praktische Erfahrungen in:	Nordrhein-Westfalen (BAB 40 Essen-Holsterhausen, BAB 3 Kölner Ring) Bayern (A9 Bindlacher Berg)

Literatur:

Ehlert, Stefan: Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in Nordrhein-Westfalen, Sonderdruck anlässlich des Deutschen Straßen und Verkehrskongresses 2008 in Düsseldorf vom 08.- 10. Oktober 2008. Download unter: http://www.strassen.nrw.de/download/pub_offenporiger_as

Ehlert, Stefan: Innovativer Offenporiger Asphalt in Nordrhein-Westfalen, in : Straße und Autobahn 3/2009

¹⁸ gegenüber Referenzbelag

Waschbeton

Belastungsklassen:	alle
Geschwindigkeitsbereiche:	> 60 km/h
DStrO-Wert nach RLS-90:	-2 dB(A)
Pegelminderung¹⁹ Einzelmessung:	k.A.
Haltbarkeit:	
Bautechnisch:	Prognose: sehr hoch (30a)
Akustisch:	k.A.
Anforderungen an Planung:	durchschnittlich
Anforderungen an Ausführung:	hoch
Praktische Erfahrungen in:	in Bau : Brandenburg BAB 10 Autobahndreieck Nuthetal, BAB 11 und B12 Nordrhein-Westfalen Rheinland-Pfalz

Literatur:

Ehlert, Stefan: Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in Nordrhein-Westfalen, Sonderdruck anlässlich des Deutschen Straßen und Verkehrskongresses 2008 in Düsseldorf vom 08.- 10. Oktober 2008. Download unter: http://www.strassen.nrw.de/down/pub_offenporiger_as

¹⁹ gegenüber Referenzbelag

PERS – PoroElastic Rubber Surface

Belastungsklassen:	k.A.
Geschwindigkeitsbereiche:	k.A.
DStrO-Wert nach RLS-90:	-
Pegelminderung²⁰ Einzelmessung:	9-12 dB(A) (CPX-Messung)
Haltbarkeit:	
Bautechnisch:	???
Akustisch:	k.A.
Anforderungen an Planung:	hoch
Anforderungen an Ausführung:	mittel
Praktische Erfahrungen in:	Japan, in Europa Forschungsstadium Teststrecken in Stockholm (Stadtstraße) und Holland Teststrecke in Holland in Planung (Autobahn)

Literatur:

Meiarashi, S.: Porous elastic road surface as an ultimate highways noise measure, in: Transportation Research Record No. 1880, Energy and Environmental Concerns, Washington D.C., 2004; Download unter

<http://www.pwri.go.jp/eng/activity/pdf/reports/meiarashi031017.pdf>

Sandberg, Ulf und Ejsmont, Jerzy A.: „Tyre/Road Noise Reference Handbook“, Informex, Kisa, 2002

Sandberg, Ulf und Kalman, Björn: SILVIA PROJECT REPORT The Poroelastic Road Surface – Results of an Experiment in Stockholm, download unter:
http://www.trl.co.uk/silvia/Silvia/pdf/Associated_Reports/SILVIA-VTI-006-00-WP4-030605.pdf

Ejsmont, Jerzy A. und Ronowski, Grzegorz: “Laboratory Tests of Poroelastic Road Surfaces” in Proceedings of the Sixteenth International Congress on Sound and Vibration, Krakow, 5.-9.Juli 2009

Morgan, P.A. : Innovatieprogramma Geluid voor wegverkeer, Scientific Strategy Document End Report, Centre for Transport and Navigation of Rijkswaterstaat, Report Number DVS-2008-016, März 2008

²⁰ gegenüber Referenzbelag