Lärmarme Beläge – Erhalten was man bestellt!

Emanuel Hammer[1], Hanspeter Gloor[2] und Erik Bühlmann[1]

[1] *Grolimund + Partner AG, 3006 Bern, E-Mail: erik.buehlmann@grolimund-partner.ch*

[2] *Departement Bau Verkehr und Umwelt des Kantons Aargau, Abteilung Tiefbau, 5001 Aarau, E-Mail: hanspeter.gloor@ag.ch*

Einleitung

Lärmarme Beläge werden häufig als Lärmschutzmassnahme in Erwägung gezogen. Um die Lärmpegel unterhalb zulässiger Grenzwerte bringen zu können, müssen durch die lärmarmen Beläge gewisse akustische Leistungen garantiert werden können. Dies kann entweder mittels akustischer Zertifizierung von Unternehmerprodukten oder der Normierung von lärmarmen Rezepturen erfolgen. In der Schweiz wurde deshalb eine Norm für die Herstellung von lärmarmen semidichten Asphalten SDA erarbeitet. Obwohl diese den erfolgreichen Einbau von lärmarmen Belägen garantieren soll, variiert deren akustische Wirkung in der Praxis stark. Diese Studie hat zum Ziel die physischen Parameter statistisch zu bestimmen, um die akustische Leistung in Zukunft besser sicherstellen zu können. Dabei wurde ein Datensatz von Mischgut- und Bohrkern-untersuchungen sowie weiteren bautechnischen Abklärungen zusammen mit Rollgeräuschmessungen CPX auf fast 130 bereits realisierten Belägen analysiert. Die Studie präsentiert wichtige physische Parameter und deren Optima-Werte, welche für eine normbezogene akustische Spezifizierung von lärmarmen Belägen entscheidend sind um deren langanhaltende Wirkung zu garantieren. Somit wird dem Lärmvollzug ein Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, welches die Bestellung eines lärmarmen Belages unter Gewährleistung der Wirkung erlaubt.

Methoden

Datengrundlage

Mit dem Ziel für die Studie eine möglichst breite Datengrundlage zu schaffen, wurden sowohl nach der Schweizer Norm (SNR 640 436, 2015) eingebaute SDA-Beläge sowie Eigenprodukte von Baufirmen (Firmenlösungen) in die Studie aufgenommen. Die Firmenlösungen sind den SDA-Belägen bezüglich Rezeptur und Bauweise meist sehr ähnlich und entsprechen oft sogar vollumfänglich den Anforderungen der Norm. Als einschränkende Kriterien für die Aufnahme von Belägen in die Studie galten einerseits die Verfügbarkeit von kleinräumig lokalisierbaren technischen Untersuchungen der Deckschicht (Mischgutuntersuchungen und georeferenzierte Bohrkernuntersuchungen) sowie das Vorhandensein einer mehrjährigen akustischen Messreihe mit der CPX-Anhängermethode (siehe Abbildung 1), welche die flächendeckenden akustischen Eigenschaften ganzer Strassenabschnitte erfasst.

Abbildung 1: Close-Proximity (CPX) Messanhänger von Grolimund + Partner AG nach Norm ISO/FDIS 119-2:2016

Der Fokus der Studie liegt auf sämtlichen Rezepturen im semidichten Bereich mit Grösstkorn 4 mm (4-er Beläge) und 8 mm (8-er Beläge). Abbildung 2 zeigt die geographische Verteilung der in diesem Projekt analysierten 4-er und 8-er Beläge. Zu sämtlichen Belägen liegen mindestens eine Bohrkern- und eine Mischgutuntersuchung vor, welche kleinräumig mit den akustischen Daten der CPX-Messungen zusammengeführt wurden.

Bild kann vorübergehend nicht angezeigt werden (April 2020)

Abbildung 2: Geographische Lage der in diesem Projekt untersuchte 4-er Beläge (in grün) und 8-er Beläge (in rot)

Die Studie umfasst Daten von 65 4-er Beläge à 223 Bohrkerne und 61 8-er Beläge à 259 Bohrkerne. Da die meisten Beläge als Lärmschutzmassnahme auf stark lärmbelasteten Streckenabschnitten eingesetzt wurden, sind diese allesamt relativ hohen Verkehrsbelastungen ausgesetzt.

Die Liste aller in das Projekt eingegangener physischer Parameter der Bohrkern-, Mischgutuntersuchung und Erstprüfungen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Analysierte physische Parameter

Einbauparameter	Mischgutparameter	Materialparameter
Hohlraumgehalt (BK)	Ausfüllungsgrad	Wasserempfindlichkeit
Rohdichte (BK)	Bindemittelanteil	Bindemittelart
Schichtdicke	Fliesswert	Füllertyp
Verdichtungsgrad	Stabilität	Gesteinsherkunft
Luftfeuchte	Hohlraumgehalt (MPK)	
Windgeschwindigkeit	Raumdichte (MPK)	
Lufttemperatur	Rohdichte (Mischgut)	
Steigung	Analysesieb 0.063 mm	
Bauunternehmung	Analysesieb 0.5 mm	
	Analysesieb 2 mm	
	Analysesieb 4 mm	
	Analysesieb 8 mm	
	Temperatur Mischgut	
	Module de Richesse	
	Fahrzeit	
	Mischwerk	

Ermitteln der relevanten Parameter für die Akustik

Um die für die akustische Leistung der Beläge (Daten aus den CPX-Messungen) entscheidenden Parameter zu identifizieren, wurden multivariate lineare Regressionsmodelle (*stepwise forward*) für 4-er und 8-er Beläge jeweils im Neuzustand, 1 Jahr nach Einbau, 3 Jahre nach Einbau als auch 5 Jahre nach Einbau aufgestellt. Dabei wurden die vorselektionierten physischen Parameter als Input für das Modell genommen. Die akustische Leistung wurde somit als abhängige Variable und die physischen Parameter als unabhängige Variablen ins Modell aufgenommen. Für die definitive Analyse diente der Belagsgütewert für Personenwagen (Abw. SMA 11 Belag für Reifen P1, CPX) 3 Jahre nach Einbau als abhängige akustische Variable. Dieser Datensatz bildet einen guten Kompromiss, da er einerseits auf einem möglichst späten Zustand beruht und damit die Dauerhaftigkeit der akustischen Leistung berücksichtigt und andererseits aus einer genügend grossen Stichprobe für die Datenanalyse besteht.

Ermitteln der akustisch optimalen Wertebereiche

Die für die akustische Leistung als entscheidend bezeichneten Parameter werden weiter bezüglich akustisch optimaler Wertebereiche untersucht. Dabei geht es darum, für die entscheidenden Parameter diejenigen Werteregionen zu ermitteln, die eine dauerhafte akustische Leistung gewährleisten.

Um die ermittelten optimalen Wertebereiche der entscheidenden Parameter zu überprüfen und präzisieren, wurde ein Kontrolldatensatz mit unabhängigen Daten beigezogen. Dazu wurden Lufttopfmessungen sowie das Terzband der 2'000 Hz Frequenz der Reifen-Fahrbahn-Geräusche aus den CPX-Messungen (Indikator Luftströmungsgeräusche) verwendet um die akustische Wirkung von bisher nicht für die Analysen verwendeten Beläge betreffend Luftströmungsgeräusche zu charakterisieren und damit indirekt auf die von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume schliessen zu können. Dieser Sachverhalt wird in [3] detailliert beschrieben.

Resultate & Diskussion

Akustische Wirkung von semidichten Asphalten

Um die Ursache für die grosse akustische Variabilität der Wirksamkeit von lärmarmen Belägen über ihre Lebensdauer zu bestimmen, wurde der Zusammenhang zwischen den verfügbaren physischen Parameter und der Akustik mittels multivariater statistischen Analysen ermittelt. Daraus resultierte über verschiedene Belagsalter und beide Belagskategorien (4-er und 8-er Beläge) für die beiden Analysensiebe 0.063 mm und 2 mm konsistent ein signifikanter Zusammenhang. Um diesen Zusammenhang zu verstehen verstehen und die akustisch optimalen Wertebereiche zu ermitteln sind in Abbildung 3 die akustische Leistung als Funktion der beiden Analysesiebe 0.063 mm (Fülleranteil; unten) und 2 mm (Sandanteil; oben) dargestellt. Die Farbcodierung in Abbildung 3 zeigt die CPX-Rollgeräusch Pegel der Terzbandmittenfrequenz als Indikator für Luftströmungsgeräusche.

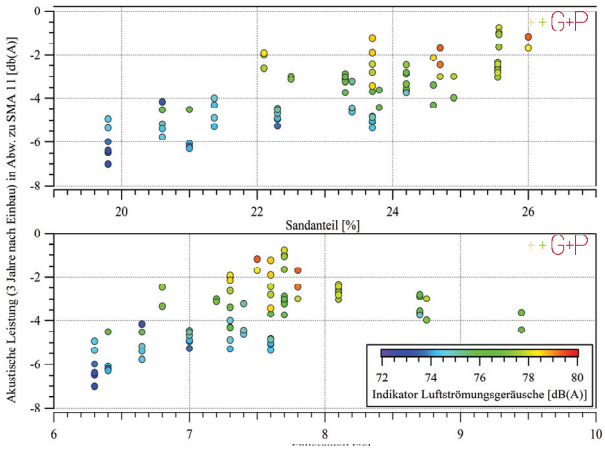

Abbildung 3: Zusammenhang der akustischen Leistung von lärmarmen Belägen 3 Jahre nach Einbau (in Abweichung eines konventionelles Strassenbelages (AC 11 o.ä.) mit dem Füller- (unten) und Sandanteil (oben) im Mischgut. Die Färbung weist auf den Indikator der Luftströmungsgeräusche hin.

Es bildet sich die Tendenz, dass mit zunehmendem Füller- und insbesondere Sandanteil die akustische Leistung der Beläge abnimmt (d.h. die Beläge werden lauter). Zudem zeigt die Farbcodierung, dass akustisch gute Beläge tiefere Luftströmungsgeräusche aufweisen. Daraus lässt sich ableiten, dass akustisch gute Beläge auf konsistente Art und Weise grössere Anteile von der Oberfläche zugängliche Hohlräume aufweisen, wodurch die Luftströmungsgeräusche reduziert werden. Der zugängliche Hohlraumgehalt scheint somit einen wesentlichen Einfluss auf eine langfristig gute akustische Wirkung von 4-er als auch 8-er Beläge zu haben. Ähnliche Resultate wurden auch in der Studie [4] präsentiert, allerdings für poröse Asphalte (PA) anhand von Bohrkernanalysen mittels Computertomographie und Schallabsorptionsmessungen. Übersteigen der Füller- bzw. der Sandanteil einen gewissen Wert, nehmen die Luftströmungsgeräusche zu und damit die akustische Leistung 3 Jahre nach Einbau ab. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieses Phänomen auf ein Verkleben der von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume durch Füller und Sand zurückzuführen ist. Abbildung 4 veranschaulicht dies für semidichte Asphalte anhand von zwei unterschiedlichen 4-er Belägen mit ähnlichem Hohlraumgehalt aber unterschiedlichem Fülleranteil.

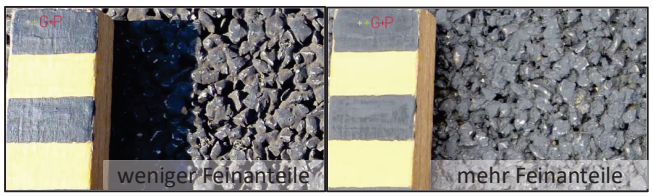

Abbildung 4: Zwei unterschiedliche 4-er Beläge mit ähnlichem Hohlraumgehalt am Marshall mit 11.9 % (links) und 11.5 % (rechts) und am Bohrkern 12.5 % (links) und 13 % (rechts) und unterschiedlichen Feinanteilen.

Die leichte Zunahme der akustischen Leistung zusammen mit der Zunahme des Indikators für Luftströmungsgeräusche bei Fülleranteil > 8.5 % zeigt, dass offenbar für das Erreichen der akustischen Leistung ein Zusammenspiel von Füller- und Sandanteil entscheidend ist. Entsprechend dürfen der Füller- sowie Sandanteil nicht als alleinstehende Parameter im bivariaten Raum betrachtet werden.

Zusammenhang Fülleranteil-Sandanteil-Akustik

Wie im vorangegangenen Kapitel aufgezeigt, ist der von der Oberfläche zugängliche Hohlraum der semidichten Asphalte (4-er und 8-er Beläge) relevant für eine gute akustische Wirkung dieser Beläge. Zugängliche Hohlräume reduzieren die Luftströmungsgeräusche und sind eine Voraussetzung für die schallabsorbierende Wirkung eines Belages. Nun soll das Zusammenspiel der als relevant für den zugänglichen Hohlraum ermittelten Parameter Fülleranteil, Sandanteil und Akustik detaillierter betrachtet werden um die Wechselwirkung der Parameter untereinander besser verstehen zu können.

Es ist davon auszugehen, dass die beiden akustisch entscheidenden Parameter Füller- und Sandanteil die Akustik bzw. von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume nicht im selben Ausmass beeinflussen. Um die relative Wichtigkeit dieser Parameter zu bestimmen, wurden trivariate lineare Regressionsmodelle zwischen dem Füller- und Sandanteil und den massgebenden akustischen Grössen, wie die akustische Leistung, Indikator Luftströmungsgeräusche und den Luftströmungswiderstand erstellt. Für die 4-er Beläge resultierte eine relative Gewichtung der Wichtigkeit von Fülleranteil zu Sandanteil (ohne Füller) bei fast allen akustischen Grössen von 3:1 (siehe Tabelle 2). Dies bedeutet, dass der Einfluss des Fülleranteils auf die Akustik im Vergleich zum Sandanteil dreimal so stark ausfällt.

Tabelle 2: Gewichtung Fülleranteil und Sandanteil für Zusammenspiel Fülleranteil-Sandanteil-Akustik

	Gewichtung	
	4-er	8-er
Anteil Füller	3	2
Anteil Sand (ohne Füller)	1	1

Bei 8-er Belägen beträgt die relative Wichtigkeit von Fülleranteil zu Sandanteil (ohne Füller) 2:1 bei fast allen akustischen Grössen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass der Fülleranteil bei 8-er Belägen einen doppelt so starken Einfluss auf die Akustik und die von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume hat.

Akustischer Grenzbereich für zugängliche Hohlräume

Nun gilt es den akustischen Grenzbereich zwischen semidicht und akustisch dichten Rezepturen zu bestimmen. In diesem Bereich ist in der Regel ein wesentlicher Unterschied bezüglich der akustischen Leistung zu verzeichnen. Damit die Hohlräume im Belag wirksam sind müssen sie von der Oberfläche her zugänglich sein. Der Grenzbereich ist in der vorliegenden Studie so definiert, dass im entsprechenden Belag gerade noch ein Minimum an von Oberfläche zugänglichen und damit akustisch wirksamen Hohlräumen vorhanden ist. Wird dieser Grenzbereich überschritten, kann der Belag zwar noch wesentliche Hohlraumgehalte aufweisen, die Hohlräume sind jedoch von der Oberfläche abgeschlossen bzw. verklebt. Der Belag ausserhalb des Grenzbereiches verhält sich entsprechend akustisch wie ein dichter Belag und die akustische Wirkung bleibt faktisch auf Effekte der Oberflächentextur beschränkt.

Unter Beiziehung eines Kontrolldatensatzes bestehend aus Daten von Rollgeräuschmessungen CPX, Luftströmungswiderstandsmessungen und Indikatorwerte Luftströmungsgeräusche (aus CPX-Messungen) konnte aus dem Zusammenhang zwischen Luftströmung und der Akustik (siehe Abbildung 5), ein akustischer Grenzwert für semidichte (von der Oberfläche zugängliche Hohlräume) und akustisch dichte (von der Oberfläche keine zugänglichen Hohlräume) 4-er und 8-er Beläge ermittelt werden.

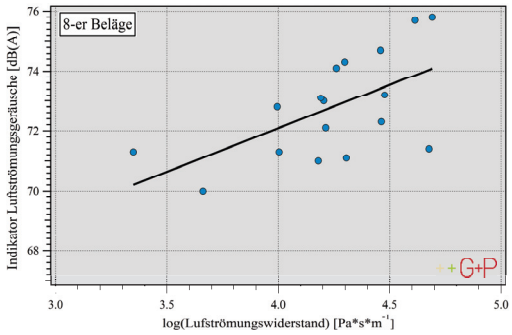

Abbildung 5: Indikator Luftströmungsgeräusche (aus Rollgeräuschmessungen CPX) als Funktion des Luftströmungswiderstandes (aus Lufttopfmessungen) für 8-er Beläge

Mit den Erkenntnissen bezüglich der ermittelten akustischen Grenzwerte des Indikators Luftströmungsgeräusche und dem Zusammenspiel von Füller- und Sandanteil aus Tabelle 2 wird ein Akustik-Faktor definiert, welcher die akustischen und technischen Eigenschaften zusammenbringen soll. Für 4-er Beläge wird dieser Akustik-Faktor $F_{4\text{-er}}$ wie folgt bestimmt:

$$F_{4-er} = 3 \cdot S_{0.063mm} + 1 \cdot \left(S_{2.0mm} - S_{0.063mm}\right) \qquad [-] \qquad (1)$$

Für 8-er Beläge wir der Akustik-Faktor $F_{8\text{-er}}$ wie folgt bestimmt:

$$F_{8-er} = 2 \cdot S_{0.063mm} + 1 \cdot \left(S_{2.0mm} - S_{0.063mm}\right) \qquad [-] \qquad (2)$$

In Abbildung 6 sind die maximalen Anteile an Füller und Sand eingezeichnet, welche eingehalten werden sollten um langfristig gute akustische Belagsgütewerte für 4-er und 8-er Beläge zu erreichen. Diese Werte sind zudem an die in der grünen Box der Abbildung 6 gelisteten Bedingungen an die $F_{4\text{-er}}$ und $F_{8\text{-er}}$ geknüpft. Dies bedeutet, dass wenn das Maximum an Fülleranteil gewählt wird, nicht mehr das Maximum vom Sandanteil genommen werden kann und umgekehrt, da der Akustik Faktor eingehalten werden muss. Somit können unter Einhalt der drei Bedingungen für semidichte Asphalte zugängliche und somit akustisch wirksame Hohlräume gewährleistet werden.

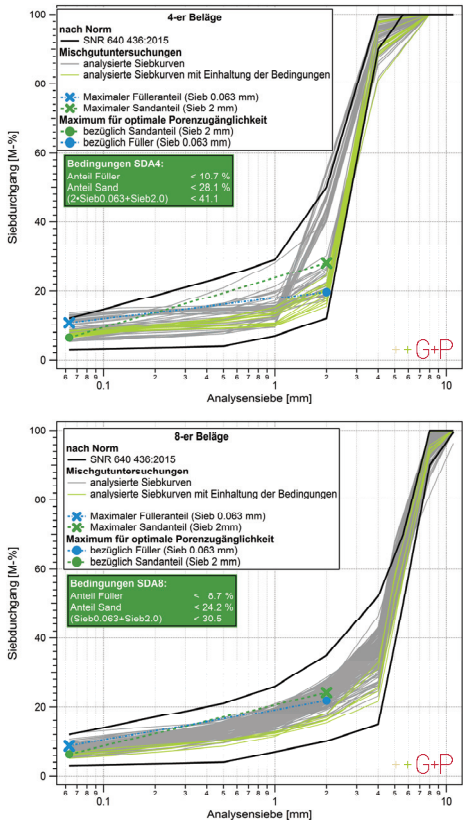

Abbildung 6: Alle analysierten Siebkurven von 4-er (oben) und 8-er Belägen (unten) mit dem Minimum und Maximum vorgegebenen Grenzwert der Norm SNR 640 436:2015. In grün und blau sind die maximalen Werte für Füller- (Siebdurchgang bei Analysensieb 0.063 mm) und Sandanteil (Siebdurchgang bei Analysensieb 2.0 mm) unter der Bedingung, dass $F_{4\text{-er}} < 41.1$ bzw. $F_{8\text{-er}} < 30.5$. In grün sind diejenigen Siebkurven dargestellt, welche die Bedingungen erfüllen.

Schlussfolgerungen

Zugängliche Hohlräume notwendig. Aus den Analysen dieses Forschungsprojekts ist auf konsistente Weise hervorgegangen, dass die Beläge mit guter akustischer Leistung allesamt durch tiefe Luftströmungsgeräusche und somit durch von der Oberfläche zugängliche Hohlräume charakterisiert sind. Diese Erkenntnis ist insofern von Bedeutung, da sich die Auswertungen nicht etwa auf den Neuzustand, sondern auf den Zustand 3 Jahre nach Einbau beziehen. Wird davon ausgegangen, dass semidichte Asphalte, die bei hohen Verkehrslasten 3 Jahre nach Einbau intakte Eigenschaften aufweisen sich nicht plötzlich verändern, kann entsprechend gefolgert werden, dass akustisch dauerhafte Beläge folgendes gemeinsam haben: Von der Oberfläche zugängliche Hohlräume, die für tiefe Luftströmungsgeräusche und einem gewissen Mass an Schallabsorption sorgen.

Bei semidichten Asphalten sind Füller- und Sandanteil die entscheidenden Parameter. Bei porösen Asphalten kann die für die Akustik massgebende Hohlraumstruktur direkt über den Hohlraumgehalt am Mischgut gesteuert werden. Bei semidichten Asphalten ist die akustische Wirkungsweise komplizierter und die Steuerung über den Hohlraumgehalt alleine nicht ausreichend. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie zeigen, dass die von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume im Wesentlichen von den Füller- und Sandanteilen der Rezeptur abhängen. Werden diese Hohlräume durch Füller- und Sandanteile verklebt, kann der Belag noch immer wesentliche Hohlraumgehalte aufweisen, die allerdings nicht von der Oberfläche zugänglich und damit nicht akustisch wirksam sind.

Der akustische Grenzbereich zwischen semidicht und dicht nicht überschreiten. Es gilt zu gewährleisten, dass der akustische Grenzbereich zwischen semidichten und dichten Rezepturen nicht überschritten wird und die Zugänglichkeit und der Verbindungsgrad der Hohlräume nicht aufgrund zu hoher Füller- und Sandanteile durch Verklebung eingeschränkt werden oder ganz verloren gehen. Die vorgeschlagenen akustischen Ausführungsbestimmungen stellen einen wesentlichen Schritt dar, im Bestreben mit semidichten Asphalten den Hohlraumgehalt unter der Gewährleistung der akustischen Leistung zu minimieren und damit eine möglichst grosse Dauerhaftigkeit von lärmarmen Belägen zu erreichen.

Literatur

[1] "VSS 640436 - Semidichtes Mischgut und Deckschichten." 2015.

[2] ISO/CD 11819-2, "Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity methdo." 2000.

[3] E. Bühlmann and T. Ziegler, "Interpreting measured acoustic performance on Swiss low-noise road surfaces using a tyre / road interaction model," pp. 1–6, 2012.

[4] B. Peeters, M. Hirschberg, and A. Kuijpers, "Influence of Pore Structure on Sound Absorption in Porous Road Surfaces," in *Proc. DAGA*, 2016, pp. 1054–1057.

[5] R. Gubler, Y. Liu, D. Anderson, and M. Partl, "Investigation of the system filler and asphalt binders by rheological means," *J. Assoc. Asph. Paving Technol.*, vol. 68, pp. 284–302, 1999.

[6] W. Stahel, *Statistische Datenanalyse*. Vieweg+Teubner Verlag, 2002.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Dr. Jacques Perret und Dr. Nicolas Bueche von Nibuxs sàrl für die wertvollen Diskussionen und Mithilfe bei der Datenanalyse und Interpretation der Resultate. Weiter möchten wir uns bei der Begleitkommission bedanken, welche uns während des gesamten Projektes mit wertvollen Inputs unterstützte. Dem Bundesamt für Umwelt und Kanton Aargau danken wir für die finanzielle Unterstützung des Projektes.