



## BERICHT

# AUSFÜHRUNGSBESTIMMUNGEN AKUSTIK FÜR SEMIDICHTE ASPHALTE AUSWERTUNG PHYSISCHER PARAMETER

---

Ihre Kontaktperson: Erik Bühlmann  
erik.buehlmann@grolimund-partner.ch  
T 031 356 20 06

I:\A4684\BERICHT\ber20170320\_V3\_AusfbestAkustikFuerSemidichteAsphalte.docx

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Lärm und NIS; Kanton Aargau, ATB  
A4684 & A4822  
24. März 2017

### **GROLIMUND + PARTNER AG**

THUNSTRASSE 101A, 3006 BERN  
031 356 20 00  
WWW.GROLIMUND-PARTNER.CH  
BERN@GROLIMUND-PARTNER.CH

### **NIBUXS SÀRL**

CHEMIN DU CROSET 9, 1024 ECUBLENS  
021 550 95 32  
WWW.NIBUXS.CH  
INFO@NIBUXS.CH

## IMPRESSUM

### PROJEKTTEAM

- + Erik Bühlmann, Grolimund + Partner AG
- + Emanuel Hammer, Grolimund + Partner AG
- + Nicolas Bueche, Nibuxs sàrl
- + Jacques Perret, Nibuxs sàrl

### BEGLEITKOMMISSION

- + Hanspeter Gloor, Abteilung Tiefbau Kanton Aargau
- + Hans-Peter Beyeler, Strasseninfr. & Fachunterstützung, Bundesamt für Strassen ASTRA
- + Hans-Peter Bucheli, Implenia Schweiz AG & Präsident NFK 3.9
- + Stefano Bradanini, Abteilung Tiefbau Kanton Aargau
- + Dominique Schnewly, Lärm und NIS, Bundesamt für Umwelt BAFU
- + Simon Steiner, Lärm und NIS, Bundesamt für Umwelt BAFU
- + Fabian Traber, Abteilung Tiefbau Kanton Aargau

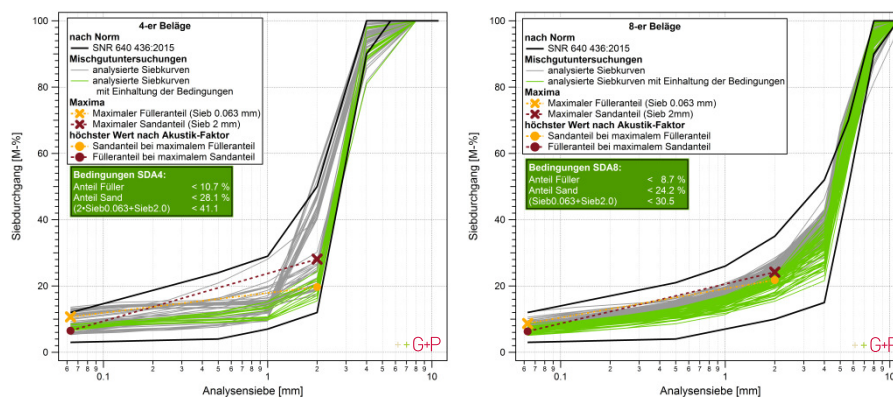
Version	Datum	Autoren	Beschrieb	Verteiler
V 1.0	18.02.2017	E. Bühlmann & E. Hammer	Entwurf	TBA Kt AG, Nibuxs, Kt AG, BAFU
V 2.0	01.03.2017	E. Bühlmann & E. Hammer	Endfassung	Begleitkommission
V 3.0	24.03.2017	E. Bühlmann & E. Hammer	überarbeitete Endfassung	Begleitkommission

## ZUSAMMENFASSUNG

In der VSS Norm SNR 640 436:2015 Semidichtes Mischgut und Deckschichten wurde erfolgreich der Grundstein zur breiten Anwendung von lärmarmen Strassenbelägen im Innerortsbereich gelegt. Die Erfahrungen im *Forschungsprojekt lärmarme Beläge innerorts* des Bundes sowie Praxiserfahrungen im Rahmen von Wirkungsanalysen auf lärmarmen Belägen in diversen Kantonen zeigen, dass die akustische Leistung der semidichten Asphalte, auch innerhalb derselben Grösst Korn- und Hohlraumgehaltsklasse, sehr stark variieren kann. Die Ursache für die akustische Variabilität der einzelnen SDA Rezepturen ist auf bautechnische Unterschiede zurückzuführen, die sich bei der eingebauten Schicht mit abweichenden mechanischen und weiteren physischen und für die Akustik relevanten Eigenschaften äussern.

Das Hauptziel des vorliegenden Projektes ist, die entscheidenden physischen Parameter zu eruieren und dafür klare Kriterien festzulegen, um damit die langfristige akustische Leistung von Asphalten im semidichten Bereich zu gewährleisten. Der Fokus der Studie liegt auf sämtlichen Rezepturen im semidichten Bereich (nach Norm eingebaute SDA Beläge sowie Eigenprodukte von Bau-firmen) mit Grösstkorn 4 mm und 8 mm. Dazu wurde ein möglichst grosser Datensatz mit akustischen und physischen Parametern zu den schweizweit bereits realisierten semidichten Asphalten statistisch ausgewertet und analysiert.

Aus den Analysen des vorliegenden Projektes ist auf konsistente Weise hervorgegangen, dass diejenigen Beläge mit hoher akustischer Leistung allesamt durch tiefe Luftströmungsgeräusche und somit durch von der Oberfläche zugängliche Hohlräume charakterisiert sind. Die Ergebnisse zeigen zudem, 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. Es wurde je ein Maximum für die Füller- als auch Sandanteile eruiert um unter dessen Einhaltung von der Oberfläche zugängliche Hohlraumgehalte garantieren zu können. Zudem wurde ein akustischer Faktor ermittelt, welcher den Zusammenhang von Füller- und Sandanteil beinhaltet und welcher als weitere Bedingung für von der Oberfläche zugängliche Hohlräume fungiert.



Empfohlene Ausführungsbestimmungen Akustik für die Normierung von semidichten Asphalten

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 zur Norm SNR 640 436:2015 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.

## INHALT

<b>1.</b>	<b>AUSGANGSLAGE &amp; PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>DATENGRUNDLAGE</b>	<b>6</b>
2.1	Untersuchte Beläge Hauptdatensatz	6
2.2	Analysierte Parameter Hauptdatensatz	7
2.3	Kontrolldatensatz	8
<b>3.</b>	<b>METHODEN</b>	<b>9</b>
3.1	Selektion und Kategorisierung der Parameter	9
3.2	Identifizieren der entscheidenden Parameter	10
3.3	Lokalisieren der akustisch optimalen Wertebereiche	11
3.4	Ermitteln und überprüfen des akustischen Grenzbereiches	11
3.5	Volumetrische Analysen zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes	11
<b>4.</b>	<b>RESULTATE</b>	<b>13</b>
4.1	Beschreibung der Daten	13
4.2	Akustisch entscheidende Parameter	18
4.3	Akustisch optimale Wertebereiche	19
4.4	Zusammenhang Fülleranteil-Sandanteil-Akustik	22
4.5	Akustischer Grenzbereich zwischen semidicht und dichten Rezepturen	23
4.6	Volumetrische Analysen	26
<b>5.</b>	<b>SYNTHESE</b>	<b>29</b>
5.1	Bautechnische Abklärungen	29
5.2	Akustische Wirkungsweise	31
5.3	Empfehlungen für akustische Ausführungsbestimmungen	31
<b>6.</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	<b>33</b>
6.1	Wichtige Erkenntnisse	33
6.2	Einschränkende Bemerkungen	33
6.3	Weiterer Forschungsbedarf	34
<b>7.</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>53</b>
<b>ANHANG</b>		
1	Übersicht Metadaten Bohrkern- & Mischgutuntersuchungen	35
2	In-situ Messmethoden	36
3	Zusammenhang Hohlraumbestimmungsmethoden Ausmessung und Tauchwäge	38
4	Detailanalyse statistische Modelle	39
5	Detailanalyse der Optima-Werte	45
6	Analyse der erweiterten Optima-Werte	46

## 1. AUSGANGSLAGE & PROBLEMSTELLUNG

---

In der VSS Norm SNR 640 436:2015 Semidichtes Mischgut und Deckschichten wurde erfolgreich der Grundstein zur breiten Anwendung von lärmarmen Strassenbelägen im Innerortsbereich gelegt. Die Bezeichnung SDA steht für *Semi Dichter Asphalt* und ist zusammen mit der Grösstkorn- und Hohlraumklassenangabe als Sammelbegriff für die neue Generation von lärmarmen Belägen zu verstehen. Die Norm ermöglicht den Strasseneigentümern, bei einer beliebigen Bauunternehmung einen lärmarmen Strassenbelag zu bestellen und anschliessend das gelieferte Mischgut sowie die eingebaute Deckschicht gegenüber den Normanforderungen zu prüfen. Erste Erfahrungen mit SDA Rezepturen wurden bereits 2010 im *Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts* des Bundes gesammelt. Seither wurde in diversen Kantonen eine Vielzahl von Asphalten im semidichten Bereich von verschiedenen Unternehmen eingebaut.

Die Erfahrungen im *Forschungsprojekt lärmarme Beläge innerorts* des Bundes sowie Praxiserfahrungen im Rahmen von Wirkungsanalysen auf lärmarmen Belägen in diversen Kantonen zeigen, dass die akustische Leistung der SDA Beläge – auch innerhalb derselben Grösstkorn- und Hohlraumgehaltsklasse – sehr stark variieren kann. Im Schlussbericht des Forschungsprojektes wird deshalb auch auf den weiteren Optimierungsbedarf bezüglich der Sicherstellung der akustischen Leistung von SDA Belägen hingewiesen. Dies ist ein zentrales Bedürfnis des Lärmvollzugs, da in den Projekten von einer gewissen akustischen Leistung ausgegangen werden muss, um diese als Lärmschutzmassnahme einsetzen zu können. Die Ursache für die akustische Variabilität der einzelnen SDA Rezepturen ist auf bautechnische Unterschiede zurückzuführen, die sich bei der eingebauten Schicht mit abweichenden mechanischen Eigenschaften und Differenzen bezüglich der von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume äussern.

Das Hauptziel des vorliegenden Projektes ist, die entscheidenden physischen Parameter zu eruiieren und dafür klare Kriterien festzulegen, um damit die langfristige akustische Leistung von Asphalten im semidichten Bereich zu gewährleisten. Der Fokus der Studie liegt auf sämtlichen Rezepturen im semidichten Bereich (nach Norm eingebaute SDA Beläge sowie Eigenprodukte von Bauunternehmen) mit Grösstkorn 4 mm und 8 mm. Dazu wurde ein möglichst grosser Datensatz mit akustischen und physischen Parametern zu den schweizweit bereits realisierten semidichten Asphalten statistisch ausgewertet und analysiert.

## 2. DATENGRUNDLAGE

Mit dem Ziel für die Studie eine möglichst breite Datengrundlage zu schaffen, wurden sowohl nach Norm 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, welche die flächendeckenden akustischen Eigenschaften ganzer Strassenabschnitte erfasst.

Für Beläge mit Grösstkorn 8 mm (8-er Beläge) besteht eine hervorragende Datenverfügbarkeit im Kanton Aargau (über 100 Beläge mit belagsakustischen Messungen sowie Mischgut- und Bohrkernuntersuchungen). Für Beläge mit Grösstkorn 4 mm (4-er Beläge) wurden Daten von weiteren Kantonen (Wallis, Waadt und Genf) beigezogen um aussagekräftige Resultate über schweizweit verfügbare lärmarme Beläge machen zu können.

Nebst diesem Hauptdatensatz wurde ein Kontrolldatensatz beigezogen, welcher zur Verifizierung der statistischen Analysen am Hauptdatensatz und zur Ermittlung eines akustischen Faktors dient (siehe Kapitel 2.3).

### 2.1 UNTERSUCHTE BELÄGE HAUPTDATENSATZ

Abbildung 1 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. Da die physischen Parameter und die akustischen Eigenschaften von lärmarmen Belägen im Streckenverlauf variieren können, wurde die Studie auf Ebene Bohrkern durchgeführt.

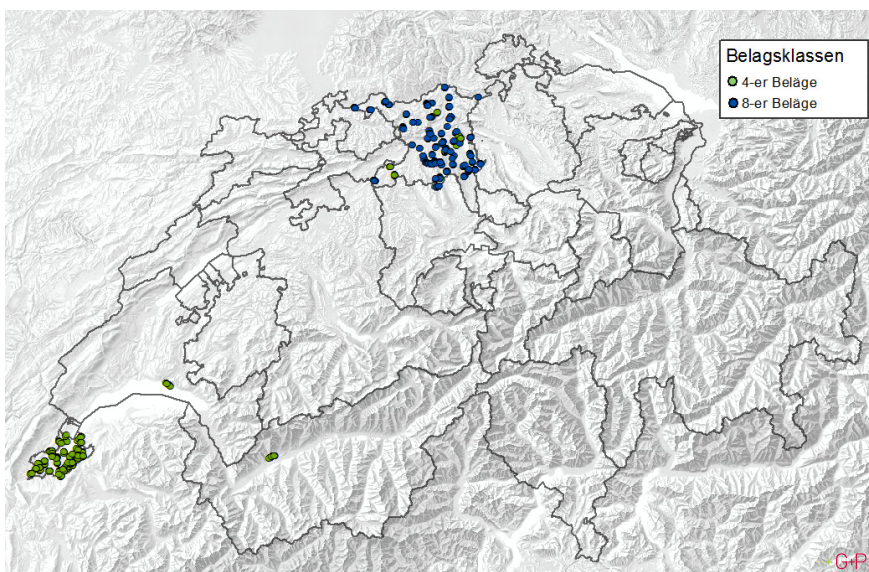


Abbildung 1: In diesem Projekt untersuchte 4-er Beläge (in grün) und 8-er Beläge (in blau)

In Tabelle 1 sind die Anzahl in diesem Projekt analysierten Bohrkern pro Belagsklasse mit der mittleren Verkehrslast (Durchschnittlicher Tagesverkehr DTV und dem durchschnittlichen Schwerverkehrsanteil) aufgelistet. Da die meisten Beläge als Lärmschutzmassnahme auf stark lärmbe-

teten Streckenabschnitten eingesetzt wurden, sind diese allesamt relativ hohen Verkehrsbelastungen ausgesetzt. Für die mechanische Beanspruchung massgebend sind die Anzahl Überrollungen aller Fahrzeuge, wobei der Schwerverkehrsanteil aufgrund der grossen Achslasten besonders stark ins Gewicht fällt.

Tabelle 1: Anzahl vorhandener Daten an Belägen und den Bohrkernen pro Belagsklasse mit der mittleren Verkehrslast sowie den Standardabweichungen in Klammern

	4-er	8-er
Anzahl Beläge [-]	65	61
Anzahl Bohrkern [-]	223	259
Ø DTV [Anz. Fz. / Tag]	8'240 (±2'400)	5'720 (±3'910)
Ø Schwerverkehrsanteil [%]	6.6 (±1.5)	6.3 (±2.6)

## 2.2 ANALYSIERTE PARAMETER HAUPTDATENSATZ

In diesem Kapitel werden alle analysierten Parameter des Hauptdatensatzes, welche für die statistischen Analysen verwendet wurden, beschrieben.

Tabelle 2: Analytierte Parameter im Hauptdatensatz

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	Sieb 0.063 mm / Füller	
Bauunternehmung	Sieb 0.5 mm	
	Sieb 2 mm	
	Sieb 4 mm	
	Sieb 8 mm	
	Temperatur Mischgut	
	Module de Richesse	
	Fahrzeit	
	Mischwerk	

### 2.2.1 PHYSISCHE PARAMETER

Für die Klasse der 4-er Beläge liegen Mischgut- und Bohrkernuntersuchungen der Kantone AG, GE, VD und VS vor. Für Klasse der 8-er Beläge wurden Mischgut-, Bohrkernuntersuchungen und Erstprüfungen der Belagswerke vom Kanton AG im Projekt berücksichtigt. Die Daten wurden für alle Bohrkern georeferenziert um diese mit den lokalen akustischen Daten zusammenzuführen. Dementsprechend ist die kleinste Einheit des Datensatzes der Bohrkern, woran jegliche anderen Daten daran verknüpft werden. Da die Mischgutuntersuchungen nicht in derselben Auflösung vorliegen, wurden diese als Mittelwert pro Belagsabschnitt den jeweiligen Bohrkernen zugeordnet.

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

### 2.2.2 BELAGSAKUSTISCHE DATEN

Aus der mehrjährigen akustischen Messreihe mit der CPX-Anhängermethode von G+P AG wurden für alle gemessenen Jahre die Reifen-Fahrbahn-Geräusche 1) spektral und 2) in Abweichung zum in der Schweiz gültigen Strassenlärmemissionsmodell StL-86+ eruiert. Um die CPX Messwerte an

der Bohrkernentnahmestelle zu ermitteln wurde ein gemittelter akustischer Wert auf einem kleinräumigen Abschnitt der jeweiligen Fahrbahn von 10 m vor und nach der jeweiligen Entnahmestelle verwendet.

### 2.2.3 VERKEHRSDATEN

Um einen möglichen Einfluss der Verkehrslast auf die akustische Alterung der Beläge analysieren zu können, wurde aus den jeweiligen Kantonsstrassennetzdaten der durchschnittlich tägliche Verkehr (DTV) sowie der Schwerverkehrsanteil für die Strassen, wo die Bohrkernentnahmen entnommen wurden, ausgelesen. Auch die Steigung des jeweiligen Belagsabschnittes wurde aus den Kantonsstrassennetzdaten ausgelesen und floss in die statistischen Analysen mit ein.

Um einen Parameter für eine allfällige Abkühlung des Mischguts während der Fahrt vom Asphaltmischwerk zur Baustelle zu eruieren, wurde die Fahrdistanz sowie die Fahrzeit mittels des Strassennetzes von GoogleMaps ermittelt.

### 2.2.4 METEOROLOGISCHE DATEN

Die vorherrschende Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit während des Einbaus von Belägen kann einen Einfluss auf deren Einbaupraktiken haben. Aus diesem Grund wurden diese drei Parameter im Hauptdatensatz beigezogen. Leider lag uns das genaue Zeitfenster des Belageinbaus nicht vor, so dass wir für das Einbaudatum den Median der jeweiligen meteorologischen Parameter berechneten und für die statistischen Analysen verwendeten.

## 2.3 KONTROLLDATENSATZ

Um die statistischen Analysen mit einem unabhängigen Datensatz zu überprüfen und verifizieren, wurden Daten aus detaillierteren akustischen Analysen (von G+P AG durchgeführten Wirkungsanalysen) auf SDA4 und SDA8 Belägen im Kanton AG und dem nationalen Forschungsprojekt TP3 (siehe Bühlmann et al. 2017) beigezogen. Der Fokus der Auswertungen lag auf Daten der Lufttopfmessungen und der Indikatorfrequenz von 2'000 Hz der Reifen-Fahrbahn-Geräusche (CPX Messungen, Methode nach Bühlmann & Ziegler 2012).

Zusätzlich zur Verifizierung der statistischen Analysen wurde der Kontrolldatensatz zur Beschreibung des Zusammenhangs der entscheidenden physischen Parametern mit der Akustik (siehe Kapitel 4.4), sowie zur Bestimmung des akustischen Grenzbereichs zwischen semidicht und dichten Rezepturen (siehe Kapitel 4.5) verwendet.



### 3. METHODEN

In diesem Kapitel werden das Vorgehen sowie die in der vorliegenden Studie verwendeten Methoden beschrieben. Eine Übersicht über die Vorgehensweise ist in Abbildung 2 gegeben. Die Prozesse sind als Kreise und die Outputs als Rechtecke dargestellt.

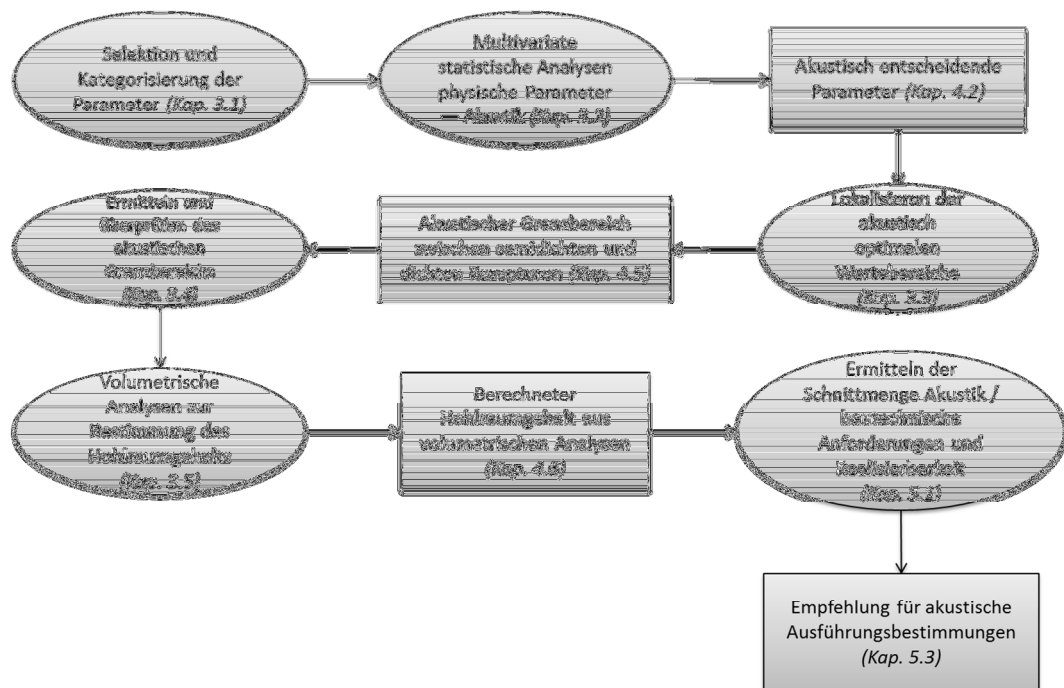


Abbildung 2: Skizze des Ablaufs der Datenanalyse für die Ermittlung der wichtigsten Parameter für nachhaltig wirksame 4-er und 8-er Beläge. Kreise bezeichnen Prozesse und Rechtecke die daraus resultierenden Ergebnisse/Outputs.

#### 3.1 SELEKTION UND KATEGORISIERUNG DER PARAMETER

Um Kollinearität bereits vor den statistischen Analysen möglichst auszuschliessen wurde in Zusammenarbeit mit der Begleitkommission eine Selektion der Parameter durchgeführt. So wurden kollineare Variablen, welche statistische Analysen verfälschen können, aus den Analysen ausgeschlossen. Zudem wurden die Parameter in drei Gruppen unterteilt: Einbau-, Mischgut- und Materialparameter. So konnte spezifisch geschaut werden, ob eher die Einbauparameter, Mischgutparameter oder Materialparameter für eine langfristige akustische Wirkung eines semidichten Belages entscheidend sind.

Als massgebender akustischer Parameter wird die mittels CPX-Messungen ermittelte akustische Belagsgüte für die Fahrzeugkategorie Personenwagen verwendet. Das hochstandardisierte CPX Messverfahren zeichnet sich durch eine sehr gute Wiederholbarkeit der Messergebnisse aus und garantiert somit eine gute Vergleichbarkeit der akustischen Leistung der Beläge untereinander (siehe Anhang 2 für nähere Informationen zum Verfahren). Da die Wiederholbarkeit für die Fahrzeugkategorie Personenwagen aufgrund des verwendeten Standardteststreifens SRTT (ASTM F762 / F762M-08, 2014) besonders gut ist, stützen sich die in dieser Studie präsentierten Analysen ausschliesslich auf die Werte der Fahrzeugkategorie Personenwagen. Es ist allerdings zu beachten, dass für die Beurteilung der akustischen Leistung von Belägen im Lärmvollzug der Mischverkehrswert (gewichteter Wert zwischen den Fahrzeugkategorien Personenwagen und LKW) massgebend ist. Um die für die in der vorliegenden Studie untersuchten Beläge ermittelte akustische

Leistung besser einordnen zu können, wird diese dem Wert eines "guten" Belages derselben Kategorie in vergleichbarem Zustand gegenüber gestellt. Unter Einbezug der Erfahrungen aus dem nationalen Forschungsprojekt *Lärmarme Beläge innerorts – TP3* wurden dafür folgende Werte abgeleitet (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Kriterien zur Einordnung der akustischen Leistung eines Belages in Abhängigkeit seines Alters (Werte für die Fahrzeugkategorie Personenwagen)

	Neu	1 Jahr nach Einbau	3 Jahre nach Einbau	5 Jahre nach Einbau
4-er Beläge	-6.5 dB	-5.5 dB	-4.5 dB	-3.5 dB
8-er Beläge	-3.5 dB	-3.0 dB	-1.5 dB	-1.0 dB

Alle Beläge die den Kriterien in Tabelle 3 entsprechen oder grössere Lärmreduktionen aufweisen, werden der Kategorie der "guten" Beläge zugeordnet. Alle anderen der Kategorie der "schlechten" Beläge. Für den Einbezug der akustischen Veränderung über Zeit bzw. zur Ableitung der Werte für unterschiedliche Alter/Zustände, lagen folgende Annahmen zu Grunde:

Tabelle 4: Annahmen für die Beurteilung eines Belages in unterschiedlichen Zuständen

	Neuzustand	1 Jahr nach Einbau	3 Jahre nach Einbau	5 Jahre nach Einbau
Annahme	Akustische Wirkung mit:	Akustische Wirkung mit:	Akustische Wirkung mit:	Akustische Wirkung mit:
	✓ Schallabsorption	✓ Geringfügig reduzierter Schallabsorption	✓ Wenig Schallabsorption	✓ Rugosität induzierter Entlüftung
	✓ Poreninduzierter Entlüftung	✓ Poreninduzierter Entlüftung	✓ Poreninduzierter Entlüftung	✓ Intakter Oberflächen-textur
	✓ Intakter Oberflächen-textur	✓ Intakter Oberflächen-textur	✓ Intakter Oberflächen-textur	

### 3.2 IDENTIFIZIEREN DER ENTSCHEIDENDEN PARAMETER

Um die für die akustische Leistung entscheidenden Parameter zu identifizieren wurden multivariate lineare Regressionsmodelle 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. Nebst dem linearen Modell wurde auch ein multivariates logistisches Modell geprüft, wobei sich das lineare Gesamtmodell als signifikant genug herausstellte und somit in dieser Studie mit einem multivariaten linearen Modell gearbeitet wurde. Dabei wurden die vorselektionierten Variablen als Input für das Modell genommen. Die akustischen Daten wurden somit als abhängige Variablen und die physischen Parameter wurden als unabhängige Variablen ins Modell aufgenommen. Für die definitive Analyse wurde als abhängige akustische Variable der Belagsgütwert für Personenwagen (Abw. StL-86+ für N1) 3 Jahre nach Einbau genommen. 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. Für den Variableneinschluss in das multivariate lineare Regressionsmodell wurde die Methode der schrittweisen Vorwärts-Selektion (*forward*) gewählt. Bei dieser Methode werden die abhängigen Variablen schrittweise ins Modell aufgenommen und diejenige, welche am stärksten mit der akustischen Variable (abhängige Variable) korreliert wird zuerst zum Modell hinzugefügt. Als zweite Variable wird diejenige hinzugefügt, welche die nächsthöchste partielle Korrelation mit der akustischen Variable aufweist. Dieser Schritt wird wiederholt bis sich das Bestimmtheitsmass ( $R^2$ ) des Modells sich nicht mehr signifikant erhöht oder alle Variablen ins Modell aufgenommen sind (Stahel, 2002). Diejenigen Variablen für welche die höchsten Signifikanzniveaus ermittelt wurden bilden die Basis für die weiterführenden Analysen (siehe auch Kapitel 3.3).

### 3.3 LOKALISIEREN 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. Dazu wird die akustische Leistung sowie die Einteilung in akustische Klassen von "guten" und "schlechten" Belägen für den Zustand 3 Jahre nach Einbau verwendet. 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.

Da aufgrund der multivariaten Fragestellung für jede signifikante Variable in mehreren Werteregionen sowohl akustisch "gute" als auch akustisch "schlechte" Beläge vorhanden sein können, wurde ein Zweistichproben-t-Test angewendet um weitere Einflussgrössen miteinzubeziehen und die lokalen Optima näher zu bezeichnen. Dieser Test prüft ob sich die Mittelwerte jedes einzelnen Parameters in der Stichprobengruppe der "guten" verglichen mit den "schlechten" Belägen signifikant unterscheiden. Falls dieser Fall gegeben ist, kann der optimale Wertebereich unter Berücksichtigung eines zweiten Parameters entsprechend erweitert werden.

### 3.4 ERMITTELN UND ÜBERPRÜFEN DES AKUSTISCHEN GRENZBEREICHES

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, wurde ein Kontrolldatensatz beigezogen um die ermittelten optimalen Wertebereiche der entscheidenden Parameter mit unabhängigen Daten zu überprüfen und zu präzisieren. 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 Bühlmann & Ziegler (2012) detailliert beschrieben.

Der Hohlraumgehalt in der Deckschicht alleine ist für die akustische Wirkung nicht ausschlaggebend, sondern er muss von der Oberfläche her zugänglich sein. Mittels dieser zwei beschriebenen unabhängigen Messverfahren (Lufttopfmessungen und Indikator Luftströmungsgeräusche) und dem unabhängigen Datensatz kann so festgestellt werden, ob die ermittelten akustisch optimalen Wertebereiche tatsächlich zu zugänglichen Hohlräumen und einer Sicherstellung der akustischen Leistung führen. Zudem kann der akustische Grenzbereich zwischen semidichten (d.h. mit von der Oberfläche zugänglichen Hohlräumen) und dichten (d.h. ohne von der Oberfläche zugänglichen Hohlräumen) Belägen mithilfe einer umfassenden Stichprobe näher präzisiert werden (siehe auch Kapitel 4.3).

### 3.5 VOLUMETRISCHE ANALYSEN ZUR BESTIMMUNG DES HOHLRAUMGEHALTES

In der vorliegenden Studie werden akustisch optimale Wertebereiche für entscheidende physische Parameter ermittelt, die eine dauerhafte akustische Leistung von SDA Belägen garantieren sollen. Für die Normierung von lärmarmen Deckschichten ist der angestrebte Hohlraumgehalt am Mischgut oft eine wesentliche Zielgrösse. Mit volumetrischen Analysen soll der zugehörige Hohlraumgehalt für Rezepturen ermittelt werden, die den akustischen Ausführungsbestimmungen entsprechen und auf der angestrebten Seite des akustischen Grenzbereiches semidicht – dicht liegen.

Der Zusammenhang der Siebkurven und des Bindemittelgehalts ist bereits bekannt. Jedoch ist es schwierig diese Zusammenhänge zu quantifizieren und bei der Herstellung exakt zu kontrollieren. Deshalb wurde vom CRR (*Centre de Recherches Routières*) in Brüssel eine Berechnungssoftware für volumetrische Analysen entwickelt. Einzelheiten zu dieser Methode sind in (Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux, CRR R 69/97) beschrieben. PradoWin – das

dazugehörige Softwaretool – berechnet aus einer beliebig definierten Siebkurve und des dazugehörigen Bindemittelgehaltes den volumetrischen Hohlraumgehalt. Hierbei ist zu beachten, dass das Modell keinen Aufschluss über den Vernetzungsgrad und die Zugänglichkeit der Hohlräume gibt.

Die bei den volumetrischen Analysen verwendeten Parameter sind nachfolgend aufgelistet:

- + Die Analyse wird für 4-er Beläge und 8-er Beläge jeweils für den Grenzbereich semidicht – dicht separat vorgenommen.
- + Der berechnete Hohlraumgehalt entspricht dem Grenzbereich zwischen semidichten und dichten Belägen und kann als Zielwert gesehen werden um Beläge mit möglichst geringen Hohlraumgehalten aber unter Sicherstellung der akustischen Leistung zu gewährleisten.
- + Die Parameter für die Rohfraktionen (Füller, 0/2, 2/4 und 4/8) wurden aus einem früheren Projekt von Nibuxs abgeleitet und werden als repräsentativ für Schweizer Beläge erachtet.
- + Bei den Analysen wurde davon ausgegangen, dass die Kornaggregate eckig sind. Dieser Parameter hat einen entscheidenden Einfluss auf den Hohlraumgehalt und die mechanischen Eigenschaften des Belages.
- + Als Bindemittel wurde ein polymermodifiziertes Bitumen der Sorte PmB-E45/80-65 gewählt, welches für SDA Beläge normalerweise verwendet wird.

## 4. RESULTATE

### 4.1 BESCHREIBUNG DER DATEN

In diesem Kapitel werden für den Einbau von semidichten Asphalten wichtige Parameter und deren Zusammenhänge beschrieben.

#### 4.1.1 PHYSISCH

Abbildung 3 und 4 zeigen die Siebdurchgänge bei den verwendeten Analysensieben. Dabei sind in grau die gemessenen Siebkurven pro Belag dargestellt und in hellgrün/hellblau das 10. bis 90. Perzentil Bereich sowie in grün/blau den 25. bis 75. Perzentil Bereich für 4-er bzw. 8-er Beläge.

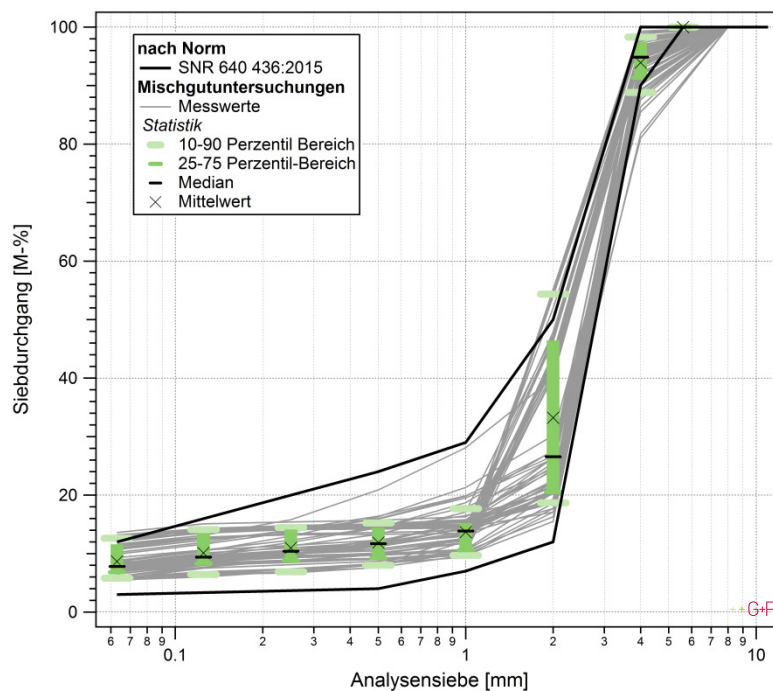


Abbildung 3: Siebkurven der analysierten Beläge (in grau) mit dem 10. bis 90. Perzentil Bereich (in hellgrün), 25. bis 75. Perzentil Bereich (in grün), Mittelwert (x) und Median (-) für 4-er Beläge.

Es ist zu erkennen, dass einige der untersuchten 4-er Beläge die Norm bei den Siebdurchgängen der Analysensiebe 0.063 mm (Füller) und 4 mm über- bzw. unterschreiten. Diese Abweichungen sind bei den Belägen im Kanton Aargau beobachtet worden. Zudem erfüllen wenige 4-er Beläge die Siebdurchgänge der Analysensiebe 2 mm nicht. Dabei handelt es sich ausschliesslich um Sapaphone und Nanosoft Beläge aus dem Kanton Genf, welche relativ grossen Anteil der Analysensiebe 2 mm aufweisen. Die statistischen Auswertungen zeigen, dass bei allen Analysensieben die Siebdurchgänge normalverteilt sind. Eine Ausnahme bildet das Analysensieb 2 mm. Dort gibt es aufgrund der teilweise von der Norm abweichenden Firmenlösungen eine schiefe Verteilung der Siebdurchgänge. Werden die Toleranzbereiche von  $\pm 1\%$  bei Analysensieb 0.063 mm und  $\pm 3\%$  bei Analysensieb 2 mm mitberücksichtigt, erfüllen fast alle Siebkurven die Norm SNR 640 436:2015.

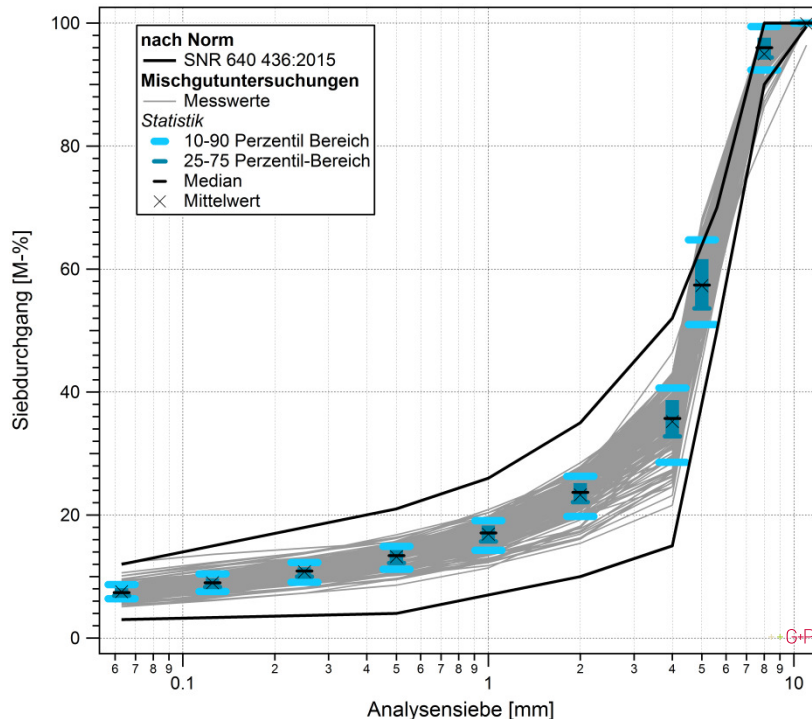


Abbildung 4: Siebkurven der analysierten Beläge (in grau) mit dem 10. bis 90. Perzentil Bereich (in hellgrün), 25. bis 75. Perzentil Bereich (in grün), Mittelwert (x) und Median (-) für 8-er Beläge.

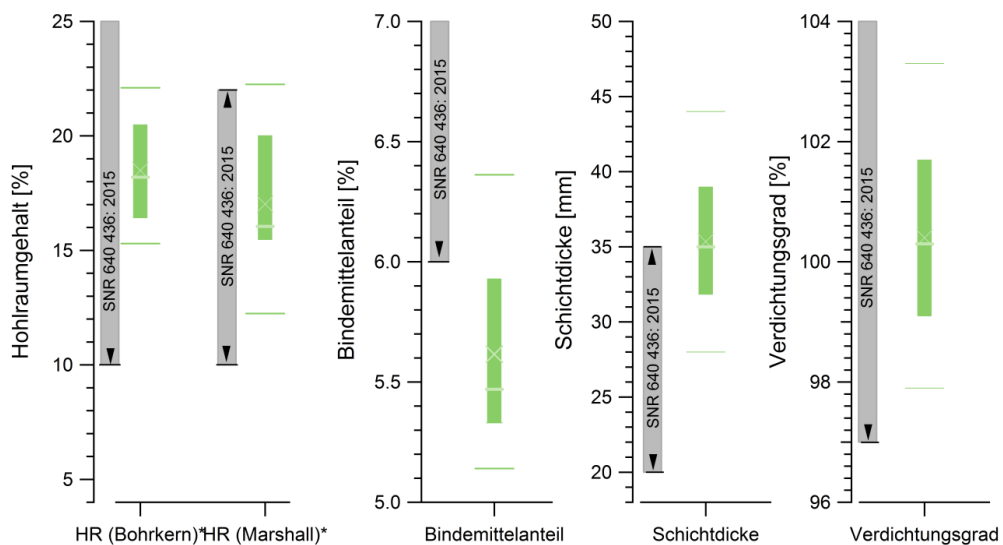
Bei den 8-er Belägen überschreiten einige der untersuchten Beläge die Norm beim Siebdurchgang des Analysensiebs 5 mm. Zudem sind in einigen wenigen Fällen Unterschreitungen beim Analysensieb 8 mm festzustellen. Diese Beläge befinden sich ausschliessliche im Kanton Aargau. Werden die Toleranzbereiche von  $\pm 4\%$  bei den Analysensiebe 4 mm und 8 mm mitberücksichtigt, erfüllen alle Siebkurven die Norm SNR 640 436:2015.

In Abbildung 5 sind Verteilungen wichtiger Kennwerte von 4-er und 8-er Belägen dargestellt. Der Hohlraumgehalt für die analysierten 4-er Beläge befindet sich im Bereich von 15 bis 22 % (10. und 90. Perzentil) am Bohrkern gemessen und 12 bis 22 % (10. und 90. Perzentil) am Marshall-Prüfkörper gemessen. Für die analysierten 8-er Beläge befinden sich die Hohlraumgehalte zwischen 10 und 15 % am Bohrkern und 9 und 13 % am Marshall-Prüfkörper. Es ist zu erkennen, dass alle 4-er Beläge die Norm SNR 640 436:2015 bezüglich Hohlraumgehalt (am Bohrkern: zwischen 10 und 26 %; am Marshall: zwischen 10 und 22 %) erfüllen. Bei den 8-er Belägen liegen einige wenige Beläge knapp unterhalb der Normanforderungen bezüglich des Hohlraumgehalts (nach SNR 640 436:2015 am Bohrkern: zwischen 9 und 23 % und am Marshall zwischen 10 und 18 %). Es ist zu beachten, dass es sich bei sämtlichen ausgewiesenen Hohlraumgehalten um volumetrische Angaben handelt. Auf Strecken wo lediglich mittels Tauchwägetverfahren ermittelte Werte vorlagen, wurden diese in volumetrische Werte umgerechnet (siehe Zusammenhang Hohlraumbestimmungsmethoden in Anhang 3).

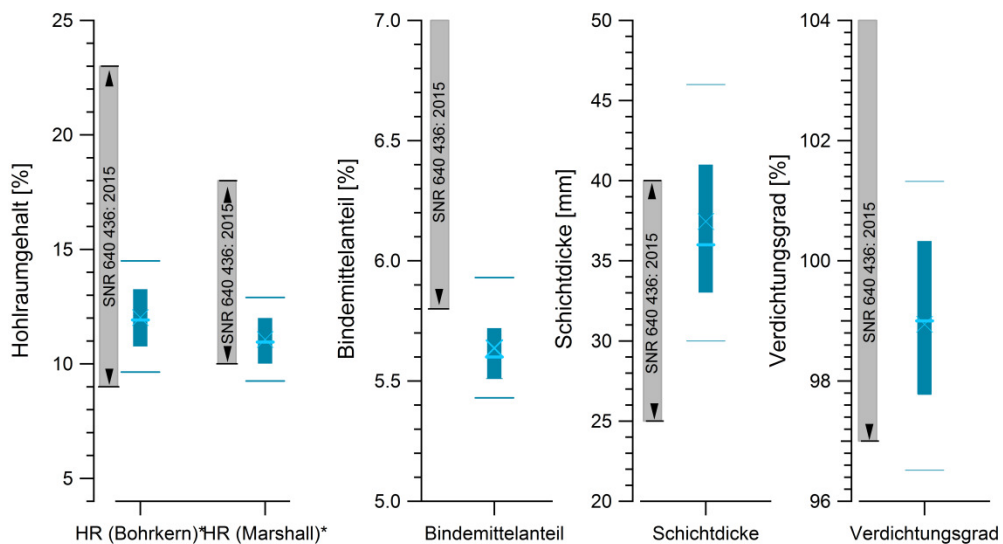
Der Bindemittelanteil für die analysierten 4-er Beläge liegt zwischen 5.1 und 6.4 % und zwischen 5.4 und 6.0 % für 8-er Beläge. Somit erfüllen nur wenige der analysierten semidichten Asphalte den von der Norm angegebenen Richtwert bezüglich Bindemittelanteils von 6 % für SDA4 und 5.8 % für SDA8, liegen aber mehrheitlich noch innerhalb des dort angegebenen Toleranzbereiches von  $\pm 0.3\%$ . Dabei ist anzumerken, dass die Unternehmen oft darauf abzielen, den Bindemittelgehalt so tief wie möglich zu halten um Kosten einzusparen. Wird der Bindemittelgehalt deutlich unterschritten, kann dies negative Auswirkungen auf die mechanische Widerstandsfähigkeit der eingebauten Schicht haben.

Die Schichtdicke der 4-er Beläge variiert zwischen 28 und 44 mm und zwischen 30 und 46 mm für 8-er Beläge (Differenz zwischen dem 10. und 90. Perzentil). Somit erfüllen die Hälfte der 4-er sowie dreiviertel der 8-er Beläge die in der Norm angegebenen Richtwerte bezüglich Schichtdicke, welche nach SNR 640 436:2015 für SDA 4 Beläge zwischen 20 und 35 mm und für SDA 8 Beläge zwischen 25 und 40 mm sein soll.

Der Verdichtungsgrad der analysierten 4-er Beläge befindet sich zwischen 98 und 103 % und zwischen 96 und 101 % für 8-er Beläge. Somit erfüllen die meisten dieser 4-er und 8-er Beläge die in der Norm angegebenen Richtwerte bezüglich Verdichtungsgrad von  $\geq 97$  %.



\* Einzelwerte



\* Einzelwerte

Abbildung 5: Statistische Verteilung (10., 25., 75. und 90. Perzentil, Median [-] und Mittelwert [x]) der Daten Hohlraumgehalt am Bohrkern und am Marshall, Bindemittelanteil, Schichtdicke und Verdichtungsgrad für 4-er (oben, grün) und 8-er (unten, blau).

Tabelle 5 fasst alle diese Werte zusammen und zeigt auch die Mittelwerte und deren Standardabweichungen aller in diesem Kapitel beschriebenen Parameter.

Tabelle 5: Mittelwerte, Standardabweichungen, 10. und 90. Perzentil der Siebkurven, Bindemittelanteil, Schichtdicke, Verdichtungsgrad und Hohlraumgehalt am Bohrkern (BK) sowie Marshall (MPK) aus 248 Mischgutuntersuchungen und 223 Bohrkernuntersuchungen von 4-er Belägen sowie aus 165 Mischgutuntersuchungen und 259 Bohrkernuntersuchungen von 8-er Belägen.

	Mittelwert		Standardabweichung		10. Perzentil		90. Perzentil	
	4-er	8-er	4-er	8-er	4-er	8-er	4-er	8-er
Sieb 0.063 mm [%]	7.4	7.5	1.8	0.9	5.8	6.4	9.4	8.7
Sieb 0.125 mm [%]	8.7	9.0	2.1	1.1	6.5	7.6	12.6	10.4
Sieb 0.25 mm [%]	9.5	10.8	2.2	1.2	6.7	9.1	13.7	12.3
Sieb 0.5 mm [%]	10.4	13.2	2.3	1.5	7.7	11.2	14.4	14.9
Sieb 1 mm [%]	12.3	16.9	2.6	1.9	9.7	14.3	15.2	19.1
Sieb 2 mm [%]	39.6	23.3	13.0	2.6	18.4	19.8	54.4	26.3
Sieb 4 mm [%]	95.1	35.3	3.3	4.6	90.5	28.6	98.8	40.7
Sieb 5.6 mm [%]	-	57.8	-	5.2	-	51.0	-	64.7
Sieb 8 mm [%]	100	95.8	0.0	2.8	100	92.4	100	99.4
Sieb 11 mm [%]	100	99.9	100	0.7	100	100	100	100
Bindemittelanteil [%]	5.6	5.6	0.4	0.2	5.1	5.4	6.4	5.9
Schichtdicke [mm]	35.3	37.5	6.0	6.7	28	30	44	46
Verdichtungsgrad [%]	100.4	98.9	2.2	1.9	97.9	96.5	103.3	101.3
Hohlraumgehalt BK [%]	18.5	12.0	2.6	2.0	15.3	6.6	22.1	11.5
Hohlraumgehalt MPK [%]	17.0	11.0	3.5	1.6	12.2	6.3	22.3	9.9

#### 4.1.2 AKUSTISCH

Zur Charakterisierung der akustischen Leistung wurden in der vorliegenden Studie die mittels Anhängermessmethode CPX ermittelten Belagsgütwerte für die Fahrzeugkategorie Personenwagen (nachfolgend bezeichnet als akustische Leistung) verwendet. Die Belagsgütwerte beziehen sich auf das in der Schweiz gültigen Strassenlärmemissionsmodell StL-86+ und geben die Abweichung dazu an. Die akustische Leistung liegt für diverse Zustände (Neuzustand, 1 Jahr nach Einbau, sowie 3 bzw. 5 Jahre nach Einbau) vor und gilt für die lokalen Eigenschaften des Belages an der Bohrkernentnahmestelle. Für alle Beläge wird die akustische Leistung im Neuzustand und 3 Jahre nach Einbau angegeben und mit dem für "gute" Beläge erwarteten Wert verglichen (siehe Annahmen in Kapitel 3.1). Die Datenlage liess es leider nicht zu, ältere Zustände abzubilden, da zum Zeitpunkt der Studie nicht genügend lange Messreihen vorlagen. Abbildung 6 zeigt die Verteilung der akustischen Belagsgütwerte aller analysierten Beläge in Abweichung zum Emissionsmodell StL-86+ für PW (N1), LKW (N2) und den Mischverkehr (mit 8 % N2-Anteil). Es ist zu erkennen, dass die meisten 4-er Beläge im Neuzustand zu den "guten Belägen" zugeordnet werden können. Beim Datensatz der 4-er Beläge 3 Jahre nach Einbau können noch die Hälfte der Beläge der Kategorie "gute Beläge" zugeordnet werden. Bei den 8-er Belägen sind ca. 30 % sich im Neuzustand befindenden Belägen der Kategorie "gute Beläge" zugeordnet. Für alle vorhandenen akustischen Daten der 8-er Beläge 3 Jahre nach Einbau können fast 75 % der Kategorie "gute Beläge" zugeordnet werden. Bei dieser Auswertung ist zu beachten, dass nicht für alle gemessenen Beläge im Neuzustand auch eine Messung 3 Jahre nach Einbau vorliegt und umgekehrt.



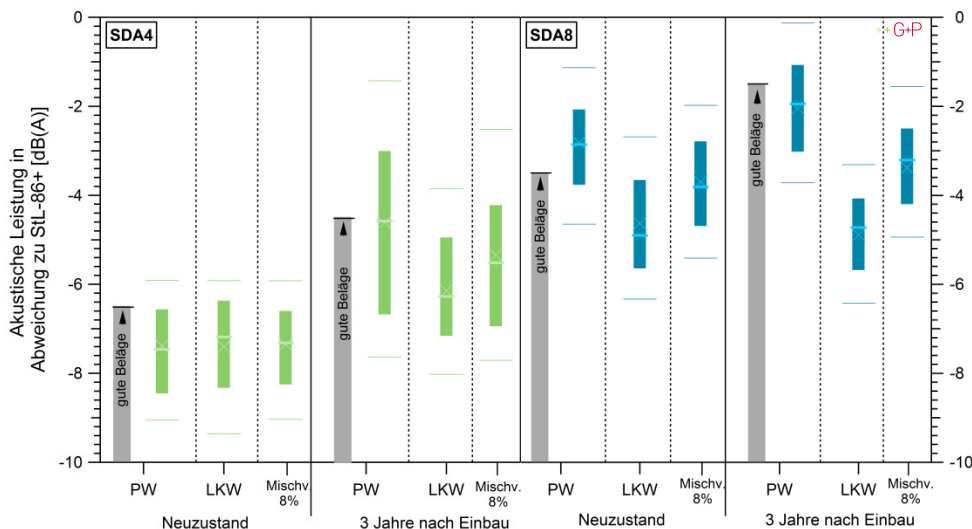


Abbildung 6: Statistische Verteilung (10., 25., 75. und 90. Perzentil, Median [-] und Mittelwert [x]) der akustischen Belagsgütwerte an den Bohrkernen aller analysierten 4-er (grün) und 8-er (blau) Beläge für PW (N1), LKW (N2) und Mischverkehr (mit 8 % N2-Anteil).

Um die akustische Entwicklung der Beläge vom Neuzustand bis 3 Jahre nach Einbau quantifizieren zu können, wurden diejenigen Beläge bei welchen zu beiden Alterskategorien akustische Belagsgütwerte vorliegen anhand der in Kapitel 3.1 beschriebenen Methode in "gute" und "schlechte" Beläge unterteilt. Wie bereits beschrieben, wird als massgebender akustischer Parameter für die Analysen in dieser Studie die akustische Leistung der Fahrzeugkategorie Personenwagen verwendet.

Tabelle 6 zeigt die relative Anzahl an "guten" sowie "schlechten" 4-er Beläge bei den Bohrkernentnahmeorten. Dieser Datensatz unterscheidet sich zu den in Abbildung 6 dargestellten Daten dadurch, dass nun lediglich die Beläge angeschaut werden, auf welchen sowohl im Neuzustand als auch 3 Jahre nach Einbau eine CPX-Messung durchgeführt wurde. Dabei ist zu erkennen, dass fast die Hälfte (45 %) aller analysierten 4-er Beläge sowohl im Neuzustand als auch 3 Jahre nach Einbau eine gute akustische Leistung aufweisen. Allerdings gehören 38% aller analysierten 4-er Beläge, welche im Neuzustand einen für 4-er Beläge guten akustischen Wert aufweisen, 3 Jahre nach Einbau der Kategorie mit eher schlechteren akustischen Leistungen an. 4-er Beläge, welche bereits im Neuzustand der Kategorie "schlechte" Beläge zugeordnet werden müssen gibt es lediglich 17 %, wovon 6 % 3 Jahre nach Einbau eine gute akustische Leistung aufweisen.

Tabelle 6: Akustische Entwicklung der 4-er Beläge an den Bohrkernentnahmeorten vom Neuzustand bis 3 Jahre nach Einbau in den Kategorien "gute" und "schlechte" Beläge angegeben nach Methode in Kapitel 3.1.

		3 Jahre nach Einbau	
		gut	schlecht
Neuzustand	gut	45 %	38 %
	schlecht	6 %	11 %

Tabelle 7 zeigt dieselbe Auswertung wie Tabelle 6 allerdings für 8-er Beläge.

Tabelle 7: Akustische Entwicklung der 8-er Beläge an den Bohrkernentnahmeorten vom Neuzustand bis 3 Jahre nach Einbau in den Kategorien "gute" und "schlechte" Beläge angegeben nach Methode in Kapitel 3.1.

		3 Jahre nach Einbau	
		gut	schlecht
Neuzustand	gut	38 %	5 %
	schlecht	22 %	35 %

Hierbei weisen 38% aller 8-er Beläge sowohl im Neuzustand als auch 3 Jahre nach Einbau eine gute akustische Leistung auf. Lediglich 5 % der Beläge weisen einen Kategorienwechsel von "gut" zu "schlecht" bei 3 Jahren nach Einbau auf. Allerdings weisen 35 % der 8-er Beläge sowohl im Neuzustand als auch 3 Jahre nach Einbau eher schlechte akustische Leistung auf. 22 % der 8-er Beläge weisen zwar im Neuzustand eher schlechte akustische Leistung auf, können aber 3 Jahre nach Einbau der Kategorie "gute" Beläge zugeordnet werden. Die relativ hohen Werte für die Klassenwechsel von "schlecht" zu "gut" und umgekehrt unterstreichen die Wichtigkeit, die Analysen auf einen möglichst späten verfügbaren Zustand (hier: 3 Jahre nach Einbau) zu basieren. Damit wird die Langfristigkeit der akustischen Leistung in den Vordergrund gerückt unter der Annahme, dass sich akustisch "gute" Beläge 3 Jahre nach Einbau auch weiterhin stabil verhalten.

#### 4.2 AKUSTISCH ENTSCHIEDENDE PARAMETER

Um die Ursache für die grosse akustische Variabilität der Wirksamkeit von lärmarmen Belägen über ihre Lebensdauer zu bestimmen, wurden sämtliche verfügbaren physischen Mischgut-, Einbau- und Materialparameter zusammengetragen. Alle diese Parameter wurden als abhängige Variablen genommen um ein multivariates lineares Regressionsmodell aufzustellen, mit dem Belagsgütwert 3 Jahre nach Einbau für die Fahrzeugkategorie Personenwagen am Bohrkernentnahmeort als abhängige Variable (siehe Kapitel 2.2). Tabelle 8 listet alle diese Parameter auf und zeigt in fett die aus dem Modell resultierenden signifikanten Variablen auf für 4-er (<sup>4</sup>) und 8-er (<sup>8</sup>) Beläge. Der Belagsgütwert wurde 3 Jahre nach Einbau genommen, da dies die älteste akustischen Eigenschaften der Beläge darstellt mit immer noch relativ guter Datenlage.

Aus Tabelle 8 ist zu erkennen, dass für den akustischen Belagsgütwert 3 Jahre nach Einbau sowohl für die 4-er als auch für die 8-er Beläge neben einigen Einbauparametern (Hohlraumgehalt am Bohrkern, Schichtdicke, Windgeschwindigkeit/Lufttemperatur während des Einbaus) hauptsächlich mischgutbezogene Parameter (Ausfüllungsgrad, Fließwert, Hohlraumgehalt am Marshallprüfkörper, Raumdichte, Fahrzeit von der Mischgutanlage zur Baustelle und die Siebe 0.063 mm und 2 mm) als signifikant eingestuft werden. Werden die Analysen für die akustische Leistung im Neuzustand und 1 Jahr nach Einbau beigezogen, fällt auf, dass vor allem die Siebe 0.063 mm und 2 mm als signifikant erscheinen und konsistente Tendenzen aufweisen. Deshalb wird im Folgenden der Fokus auf diese beiden mischgutbezogenen Parametern gelegt. In Anhang 4 sind die detaillierten Ergebnisse der statistischen Modelle dargestellt.

Für die akustische Leistung beider Belagskategorien 4-er und 8-er ist die Variable Fahrzeit von der Mischgutanlage zur Baustelle als signifikant beschrieben worden. Diese steht sehr wahrscheinlich in Kollinearität mit den Variablen Temperatur des Mischgutes und weiter mit der Lufttemperatur und der Windgeschwindigkeit. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass durch eine längere Fahrzeit das Mischgut in den nicht beheizten Transportfahrzeugen bei kühleren Lufttemperaturen abkühlt und so ein nicht mehr optimaler Verdichtungsgrad erreicht werden kann.

Tabelle 8: Im multivariaten linearen Regressionsmodell verwendeten abhängigen Variablen und die daraus signifikant resultierenden Variablen (in fett) unterteilt in Einbau-, Mischgut- und Materialparameter

Einbauparameter	Mischgutparameter	Materialparameter
<b>Hohlraumgehalt (BK)</b> <sup>4,8</sup>	<b>Ausfüllungsgrad</b> <sup>8</sup>	Wasserempfindlichkeit
Rohdichte (BK)	Bindemittelanteil	Bindemittelart
<b>Schichtdicke</b> <sup>4</sup>	<b>Fliesswert</b> <sup>8</sup>	Füllertyp
Verdichtungsgrad	<b>Hohlraumgehalt (MPK)</b> <sup>8</sup>	Gesteinsherkunft
Luftfeuchte	<b>Raumdicke (MPK)</b> <sup>4,8</sup>	
<b>Windgeschwindigkeit</b> <sup>8</sup>	Rohdichte (Mischgut)	
<b>Lufttemperatur</b> <sup>8</sup>	<b>Sieb 0.063 mm / Füller</b> <sup>4,8</sup>	
Steigung	Sieb 0.5 mm	
Bauunternehmung	<b>Sieb 2 mm</b> <sup>8</sup>	
	Sieb 4 mm	
	Sieb 8 mm	
	<b>Temperatur Mischgut</b> <sup>8</sup>	
	<b>Fahrzeit</b> <sup>4,8</sup>	
	Mischgutzentrale	

Signifikante Variablen für:

<sup>4</sup>: 4-er Beläge

<sup>8</sup>: 8-er Beläge

Für die akustische Leistung über verschiedene Belagsalter und beide Belagskategorien der 4-er und 8-er Beläge (siehe Anhang 4) sind die Analysensiebe 0.063 mm und 2 mm konsistent als signifikant beschrieben worden. Diese beiden Analysensiebe können einen wesentlichen Einfluss auf den Hohlraumgehalt am Marshall haben und stehen somit in möglicher Kollinearität untereinander. Der Fokus der weiteren Auswertungen wird deshalb durch die über mehrere Belagsalter konsistenten Tendenzen auf den beiden Hauptparameter Sieb 0.063 mm (Füller) und 2 mm (Sand) gelegt.

Tabelle 9: Signifikanz der relevanten Hauptparameter Füller (Siebdurchgang bei 0.063 mm)- und Sandanteil (Siebdurchgang bei Sieb 2 mm) bei den linearen Regressionsmodellen für verschiedene Belagsalter der akustischen Leistung

Belagsalter	Fülleranteil signifikant bei:		Sandanteil signifikant bei:	
	4-er Beläge	8-er Beläge	4-er Beläge	8-er Beläge
Neuzustand	x			x
1 Jahr n. Einbau	x	x	x	x
3 Jahre n. Einbau	x	x		x

### 4.3 AKUSTISCH OPTIMALE WERTEBEREICHE

Die in Kapitel 4.2 eruierten signifikanten Variablen werden nun detaillierter untersucht um die akustisch optimalen Wertebereiche dieser Variablen zu bestimmen. Der Fokus der Auswertungen wird dabei auf die beiden Hauptparameter Sieb 0.063 mm (Füller) und 2 mm (Sand) gelegt. Abbildung 7 zeigt den bivariaten Zusammenhang zwischen der akustischen Leistung und dem Fülleranteil für 4-er Beläge. Zudem sind die Werte, welche den in Kapitel 3.1 angegebenen Wert überschreiten in Dreiecken und die unter diesem Wert liegen als Kreise dargestellt. In Farbe sind zusätzlich die Indikatorwerte der Luftströmungsgeräusche dargestellt. Diese Frequenz kann als Indikator für Luftströmungsgeräusche betrachtet werden (Bühlmann & Ziegler, 2012).

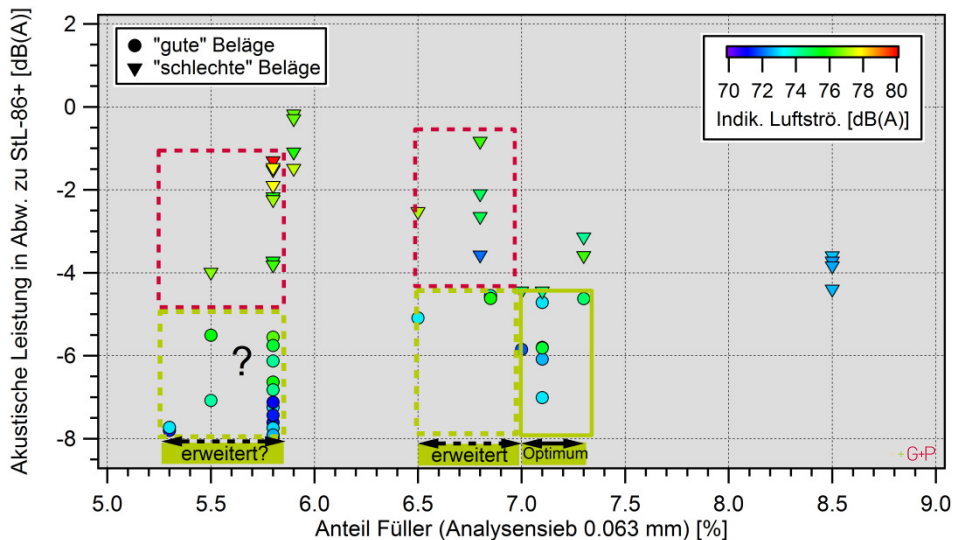


Abbildung 7: Gemessene akustische Leistung als Funktion des Siedurchganges des Analysensiebes 0.063 mm (Füller) für 4-er Beläge. Farbcodierung stellt den Indikator für Luftströmungsgeräusche dar.

Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass ein Zusammenhang des von der Oberfläche zugänglichen Hohlraumes und dem Indikator Luftströmungsgeräusche besteht. Aus Abbildung 7 geht ebenfalls hervor, dass die Beläge mit eher geringen akustischen Leistungen auch hohe Indikatorwerte der Luftströmungsgeräusche aufweisen und somit die "schlechten" Beläge wohl eher geringeren Zugang zum Hohlraum aufweisen als die "guten" Beläge.

Im Bereich vom Fülleranteil 7 bis 7.3 % ist zu erkennen, dass mehrheitlich Beläge zu finden sind, welche unter dem besagten akustischen Wert liegen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass in diesem Bereich ein Optimum bezüglich des Parameters Fülleranteil auszumachen ist. Bei tieferem Fülleranteil von 6.5 bis 7.0 % ist zu erkennen, dass sowohl Beläge unter wie auch über dem besagten akustischen Wert liegen ("gute" und "schlechte" Beläge sind vorhanden). Um diesen Unterschied erklären zu können, wurden alle verfügbaren Parameter (Einbau-, Mischgut- und Materialparameter) dieser Beläge genommen, in zwei Gruppen eingeteilt (Kreis und Dreiecke) und mit einem t-Test den Unterschied ermittelt (siehe auch Kapitel 3.3). Dabei resultierte als signifikanter Parameter der Hohlraumgehalt. Aus diesem Grund wurde das erweiterte Optimum bezüglich Fülleranteil mit der Bedingung festgelegt, dass der Hohlraumgehalt kleiner als 18 % (siehe Anhang 5 für Ermittlung Optimum des Hohlraumgehalts) sein muss um eine langfristige Wirkung von lärmarmen 4-er Belägen, unter Einhaltung der optimalen Einbaueigenschaften, garantieren zu können.

Es ist bekannt, dass der Hohlraumgehalt anhand des Korngerüstaufbaus zustande kommt. Deshalb ist das Zusammenspiel von Sand- (Analysensieb 2 mm) und Fülleranteil wichtig. In Abbildung 8 ist deshalb der Zusammenhang zwischen dem Sandanteil (Siebdurchgang bei Analysensieb 2 mm ohne Fülleranteil) und der akustischen Leistung der 4-er Beläge dargestellt. Das hier resultierende Optimum für den Sandanteil liegt zwischen 9 und 11 %. Für ein erweitertes Optimum bis ca. 13 % gilt die Bedingung, dass der Fülleranteil < 7.3 % sein muss (siehe auch Anhang 5).

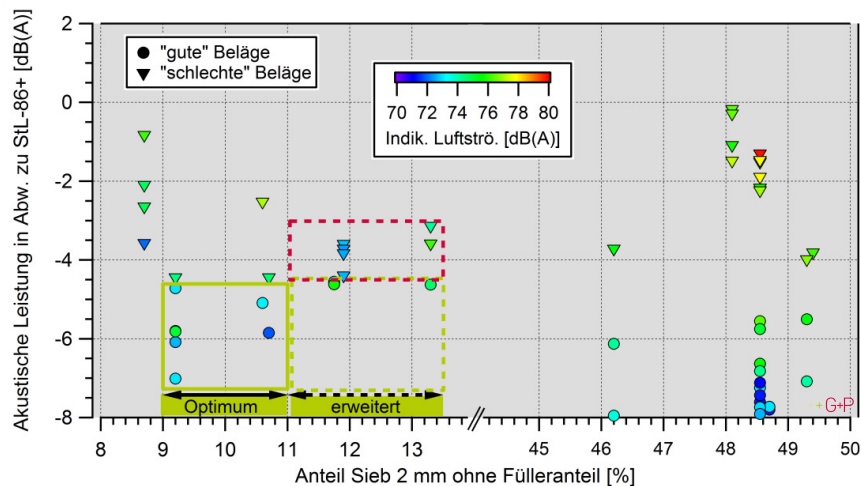


Abbildung 8: Gemessene akustische Leistung in Abweichung zu StL-86+ als Funktion des Siedurchganges des Analysesiebes 2 mm ohne Füllerteil bei 0.063 mm für 4-er Beläge. Farbcodierung stellt den Indikator für Luftströmungsgeräusche dar.

Für die 8-er Beläge wird der Zusammenhang zwischen Füllerteil und akustischer Leistung in Abbildung 9 sowie zwischen Sandanteil und Akustischer Leistung in Abbildung 10 dargestellt. In beiden Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass die Beläge mit eher geringerer akustischer Leistung auch höhere Indikatorwerte der Luftströmungsgeräusche aufweisen. Zudem zeichnet sich ein Trend ab, dass mit zunehmendem Füllerteil und insbesondere Sandanteil die akustischen Belagsgütwerte ebenfalls zunehmen. Dies bestätigt somit wiederholt die Hypothese, dass der zugängliche Hohlraumgehalt einen wesentlichen Einfluss auf eine langfristig gute akustische Wirkung von 4-er als auch 8-er Beläge hat. Es ist anzumerken, dass sich auch unter den 4-er Belägen mit über 48 % Sandanteil akustisch "gute" Beläge befinden. Hierbei handelt es sich mehrheitlich um Nanosoft und Sapaphone Beläge, die dank sehr tiefen Füllergehalten deutlich höhere Hohlraumgehalte aufweisen als die untersuchten SDA Beläge. Da der Fokus der vorliegenden Studie auf semidichten Asphalteln liegt, wurden für diese Extrembereiche keine separaten Optima ermittelt.

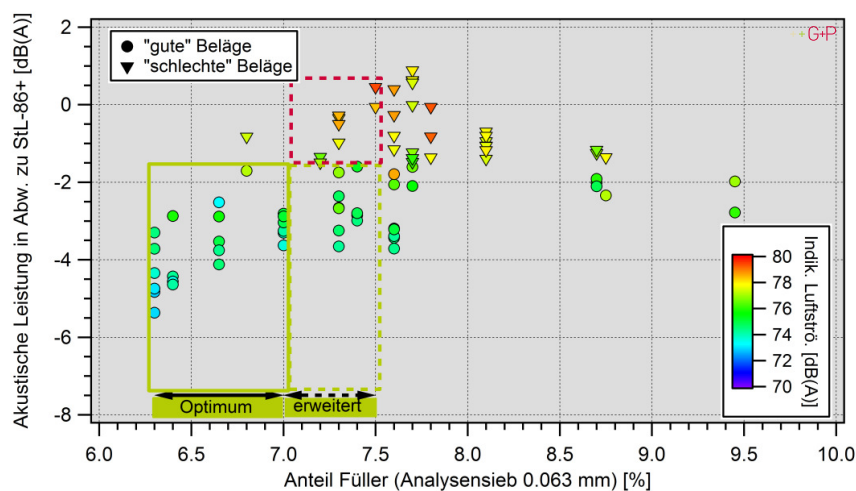


Abbildung 9: Gemessene akustische Leistung in Abweichung zu StL-86+ als Funktion des Siedurchganges des Analysesiebes 0.063 mm (Füller) für 8-er Beläge. Farbcodierung stellt den Indikator der Luftströmungsgeräusche dar.

In Abbildung 9 ist ein klar ersichtliches Optimum im Bereich von 6.3 bis 7 % Füllerteil zu erkennen. Dabei ist zu anzumerken, dass der untere Wert von 6.3 % deshalb zustande kommt, weil keine tieferen Werte vorliegen, was auf ein allenfalls erhöhtes Risiko bezüglich der mechanischen Wider-

standsfähigkeit zurückgeführt werden kann. Das erweiterte Optimum bis 7.5 % ist an die Bedingung der Schichtdicke, welche kleiner als 40 mm, sowie des Hohlraumgehalts am Bohrkern, welcher grösser als 8.5 % (mit Tauchwägetechnik gemessen) sein muss, geknüpft (siehe weitere Auswertungen dazu in Anhang 6).

Das Optimum für den Sandanteil (Siebdurchgang Analysensieb 2 mm ohne Füllanteil) zeichnet sich für 8-er Beläge ebenfalls deutlich ab und befindet sich im Bereich von 13 bis 15 % (siehe Abbildung 10). Ein erweitertes Optimum bis 16 % kann unter der Bedingung, dass der Füllanteil kleiner als 7.5 % ist, in Betracht gezogen werden. Auch hier ist ein relativ starker positiver Zusammenhang zwischen der Zunahme des Sandanteils und der akustischen Leistung auszumachen.

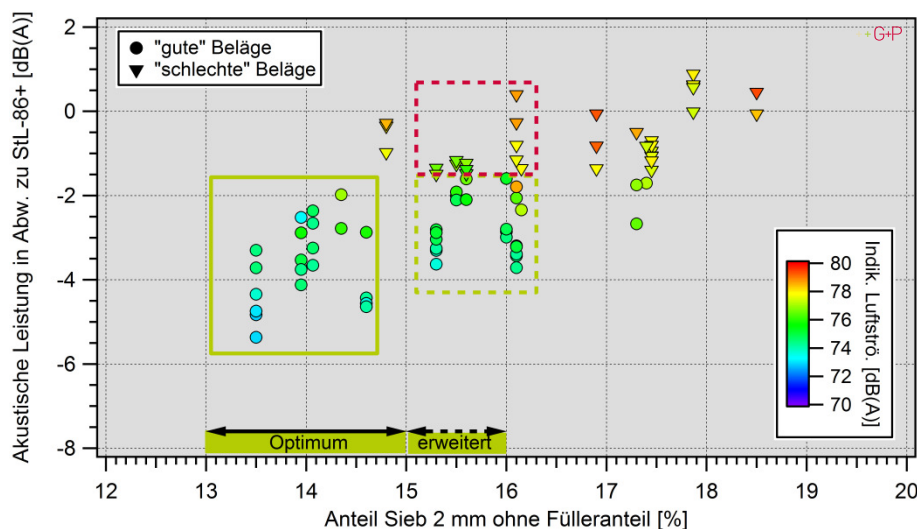


Abbildung 10: Gemessene akustische Leistung als Funktion des Siebdurchganges des Analysensiebes 2 mm ohne Füllanteil bei 0.063 mm für 8-er Beläge. Farbcodierung stellt den Indikator der Luftströmungsgeräusche dar.

Es muss beachtet werden, dass sämtliche im vorliegenden Abschnitt hergeleiteten akustischen optimalen Wertebereiche im bivariaten Raum abgeleitet wurden. Da jedoch zu erwarten ist, dass sich die beiden Variablen Füllanteil und Sandanteil abhängig voneinander die akustische Leistung beeinflussen, müssen die hier bestimmten optimalen Wertebereiche als eine Art Minimalbereich gesehen werden, die in den meisten Fällen zu akustisch guten Ergebnissen führen auch wenn der andere Parameter ausserhalb des Idealbereiches liegt. Diesem Sachverhalt ist im nachfolgenden Kapitel Rechnung getragen.

#### 4.4 ZUSAMMENHANG FÜLLERANTEIL-SANDANTEIL-AKUSTIK

Wie im vorherigen Kapitel 4.3 aufgezeigt, ist der von der Oberfläche zugängliche Hohlraum der semidichten Asphaltte relevant für eine gute akustische Wirkung dieser Beläge. Zugängliche Hohlräume reduzieren die Luftströmungsgeräusche und sind eine Voraussetzung für die schallabsorbierende Wirkung eines Belages. Um dies zu erreichen, wurden Optima-Werte des Füllanteils (Siebdurchgang bei Analysensieb 0.063 mm) und Sandanteils (Siebdurchgang bei Analysensieb 2 mm) separat aus den vorhandenen Daten für 4-er und 8-er Beläge elaboriert. Nun soll das Zusammenspiel von Füllanteil, Sandanteil und Akustik detaillierter betrachtet werden um die Wechselwirkung der Parameter untereinander besser verstehen zu können. Diese Analyse wurde mit dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Kontrolldatensatz durchgeführt.

Es ist davon auszugehen, dass die beiden akustisch entscheidenden Parameter Füll- und Sandanteils 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 lärmreduzierende Wirkung, Reifen-Fahrbahngeräusche bei 2000 Hz (Indikatorfrequenz für die 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 auch Tabelle 10). Dies bedeutet, dass der Einfluss des Fülleranteils auf die Akustik im Vergleich zum Sandanteil dreimal so stark ausfällt.

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. Es ist zu beachten, dass ein tiefer Fülleranteil negative bautechnische Auswirkungen haben kann, was in Kapitel 5.1 erläutert wird.

Tabelle 10: Gewichtung Fülleranteil und Sandanteil für Zusammenspiel Fülleranteil-Sandanteil-Akustik

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

#### 4.5 AKUSTISCHER GRENZBEREICH ZWISCHEN SEMIDICHT UND DICHTEN REZEPTUREN

Nun gilt es den akustischen Grenzbereich zwischen semidicht und 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 aus 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. Diese Analyse wurde mit dem in Kapitel 2.3 beschriebenen Kontrolldatensatz durchgeführt.

Eine Möglichkeit den von der Oberfläche zugänglichen Hohlraum indirekt zu bestimmen, ist das Lufttopfverfahren (siehe Anhang 2). Aus diesem Grund wurde der Zusammenhang zwischen Luftströmungswiderstand und der Akustik, beziehungsweise der Indikatorwerte der Luftströmungsgeräusche (aus CPX-Messungen), näher betrachtet. Jegliche Daten aus den von G+P durchgeführten Wirkungsanalysen auf 4-er Belägen im Neuzustand sind dabei verwendet worden. Mit dem Zusammenhang dieser beiden Parameter konnte ein akustischer Grenzwert für semidichte (von der Oberfläche zugängliche Hohlräume) und dichte (von der Oberfläche keine zugänglichen Hohlräume) 4-er Beläge ermittelt werden.

Für die 8-er Beläge liegen leider nicht genügend Daten (akustische Wirkungsanalysen) vor um ähnliche Auswertungen wie für die 4-er Beläge machen zu können. Allerdings liegen genügend Daten von CPX Messungen vor um den Zusammenhang zwischen Füller-, Sandanteil und Indikatorwerte für Luftströmungsgeräusche genauer betrachten zu können. Abbildung 10 zeigt diesen Zusammenhang mit einem klar ersichtlichen Trend: mit der Zunahme vom Sandanteil (Siebdurchgang bei Analysensieb 2 mm ohne Füller) nimmt auch der Indikatorwert für Luftströmungsgeräusche zu. Zudem treten hohe Indikatorwerte für Luftströmungsgeräusche eher mit einem hohen Fülleranteil auf. Um den für 8-er Beläge akustisch kritischen Bereich definieren zu können wurden die in Kapitel 3.1 definierten Richtwerte der akustischen Belagsgütwerte für PW beigezogen und zusammen mit dem Indikator für Luftströmungsgeräusche betrachtet. Daraus konnte ein akustischer Grenzwert für semidichte (von der Oberfläche zugängliche Hohlräume) und dichte (von der Oberfläche keine zugänglichen Hohlräume) 8-er Beläge ermittelt werden

Mit den Erkenntnissen aus Kapitel 4.4 bezüglich den ermittelten akustischen Grenzwerten der Reifen-Fahrbahn-Geräusche bei der Indikatorfrequenz für Luftströmungsgeräusche 2'000 Hz und dem Zusammenspiel von Füller ( $S_{0.063\text{mm}}$ )- und Sandanteil ( $S_{2.0\text{mm}}$ ) 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:

$$F_{4\text{-er}} = 3 \cdot S_{0.063\text{mm}} + 1 \cdot (S_{2.0\text{mm}} - S_{0.063\text{mm}}) \quad \text{Gl. 1}$$

oder vereinfacht:

$$F_{4\text{-er}} = 2 \cdot S_{0.063\text{mm}} + S_{2.0\text{mm}} \quad \text{Gl. 2}$$

Für 8-er Beläge ergibt sich folgender Akustik-Faktor  $F_{\text{SDA8}}$ :

$$F_{8\text{-er}} = 2 \cdot S_{0.063\text{mm}} + 1 \cdot (S_{2.0\text{mm}} - S_{0.063\text{mm}}) \quad \text{Gl. 3}$$

oder vereinfacht:

$$F_{8\text{-er}} = S_{0.063\text{mm}} + S_{2.0\text{mm}} \quad \text{Gl. 4}$$

In Zusammenhang mit den in Kapitel 4.4 eruierten Grenzwerte des Indikators für Luftströmungsgeräusche und den in Kapitel 3.1 beschriebenen Richtwerte der akustischen Leistung, konnte ein Richtwert für die beiden Akustik-Akustik-Faktoren  $F_{4\text{-er}}$  und  $F_{8\text{-er}}$  erarbeitet werden. Damit ein 4-er Belag bezüglich Einbau-, Mischgut- und Materialparameter langfristig von der Oberfläche zugängliche Hohlräume aufweisen kann, müssen der Fülleranteil kleiner als 10.7 % und der Sandanteil kleiner als 28.1 % sein sowie der Akustik-Faktor  $F_{4\text{-er}}$  kleiner als 41.1. Dies ergibt als Minimum einen Hohlraumgehalt gemessen am Marshall-Prüfkörper zwischen 11 und 12 % (mit Ausmessverfahren gemessen).

Für einen 8-er Belag mit langfristig von der Oberfläche zugängliche Hohlräume bezüglich Einbau-, Mischgut- und Materialparameter und somit akustisch wirksamen Belag muss folgende Bedingung erfüllt sein: der Fülleranteil kleiner als 8.7 % und der Sandanteil kleiner als 24.2 % sein sowie der Akustik-Faktor  $F_{8\text{-er}}$  kleiner als 30.5. Dies ergibt als Minimum einen Hohlraumgehalt gemessen Marshall-Prüfkörper zwischen 9 und 12 % (mit Ausmessverfahren gemessen).

In Abbildung 11 und 12 sind die maximalen Anteile an Füller und Sand eingezeichnet, welche eingehalten werden sollten um langfristig gute akustische Belagsgütwerte für 4-er und 8-er Beläge zu haben. Diese Werte sind zudem an die oben genannten Bedingungen der  $F_{4\text{-er}}$  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.



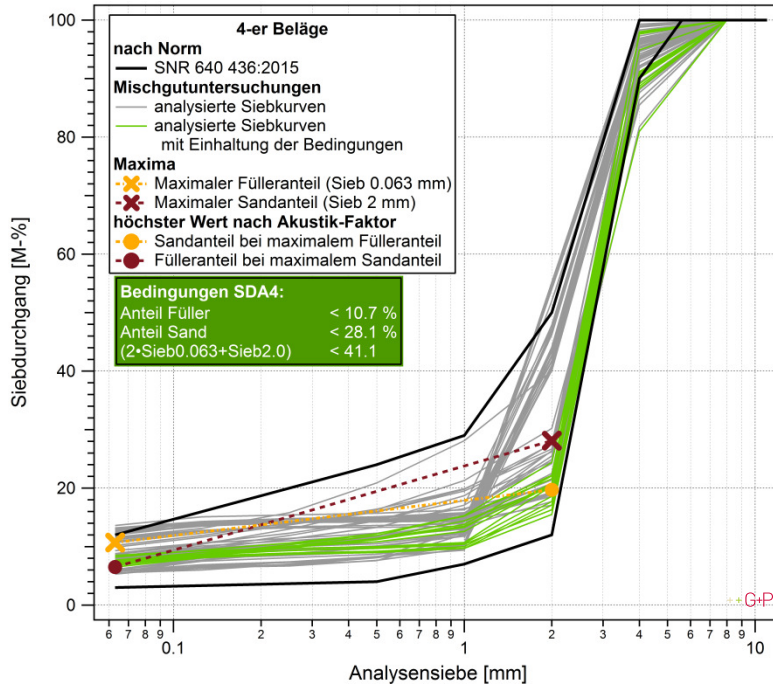


Abbildung 11: Alle analysierten Siebkurven von 4-er Belägen mit dem Minimum und Maximum vorgegebenen Grenzwert der Norm SNR 640 436:2015. Die Kreuze weisen auf die maximalen Werte für Füller- (gelb; Siebdurchgang bei Analysensieb 0.063 mm) und Sandanteil (rot; Siebdurchgang bei Analysensieb 2.0 mm) hin unter der Bedingung, dass  $F_{4-er} < 41.1$ . In hellgrün sind diejenigen Siebkurven dargestellt, welche die Bedingungen erfüllen.

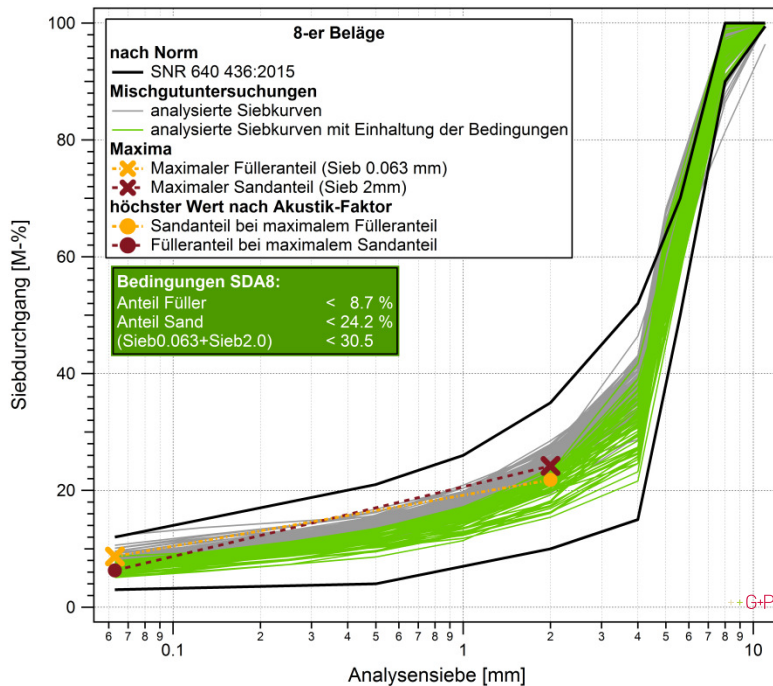


Abbildung 12: Alle analysierten Siebkurven von 8-er Belägen mit dem Minimum und Maximum vorgegebenen Grenzwert der Norm SNR 640 436:2015. Die Kreuze weisen auf die maximalen Werte für Füller- (gelb; Siebdurchgang bei Analysensieb 0.063 mm) und Sandanteil (rot; Siebdurchgang bei Analysensieb 2.0 mm) hin unter der Bedingung, dass  $F_{8-er} < 30.5$ . In hellgrün sind diejenigen Siebkurven dargestellt, welche die Bedingungen erfüllen.

#### 4.6 VOLUMETRISCHE ANALYSEN

In der vorliegenden Studie wurden akustisch optimale Wertebereiche für die entscheidenden Mischgutparameter ermittelt, um eine dauerhafte akustische Leistung von SDA Belägen zu gewährleisten. Für die Normierung von lärmarmen Deckschichten ist der angestrebte Hohlraumgehalt am Mischgut oft eine wesentliche Zielgrösse. Mit volumetrischen Analysen soll der zugehörige Hohlraumgehalt für Rezepturen ermittelt werden, die den akustischen Ausführungsbestimmungen entsprechen und auf der angestrebten Seite des Grenzbereiches semidicht – dicht liegen. Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, besteht das Prinzip der volumetrischen Berechnungen darin, eine Siebkurve und ein Bindemittel zu bestimmen um dann den Hohlraumgehalt des Belages mit unterschiedlichem Verdichtungsgrad zu bestimmen. Es ist wichtig zu bemerken, dass die Berechnungssoftware auf der Grundlage von belgischem Kornmaterial aufgebaut ist und somit deren Eigenschaften sich leicht unterschiedlich zu den Materialien in der Schweiz verhalten können. Somit sollten aufgrund der Erfahrungen durch Nibuxs mit dieser Methodik die Werte in der Regel relativ angeschaut werden, da sich die absoluten Werte aus dem Labor in der Realität unterscheiden können. Dieses Analyseverfahren ist besonders geeignet, um die Auswirkungen verschiedener Parameter zu quantifizieren und anschliessend die Formulierung zu optimieren.

Abbildung 13 und 14 stellen die Auswirkungen der Verdichtungsgrade am Hohlraumgehalt am Bohrkern dar je für SDA4 und SDA8 Beläge. Es kann ein Unterschied von fast 5 % am Hohlraumgehalt zwischen niedrigem Verdichtungsgrad (98 %) und relativ hohem Verdichtungsgrad (102 %) beobachtet werden, die nicht zu vernachlässigen sind. In Anbetracht der geringen Schichtdicke der SDA4 und SDA8 Beläge ist die Verdichtung ein wichtiger Schritt und besonders komplex für Unternehmen diese gut durchzuführen. Dabei spielen die optimalen Wetterbedingungen und der Einsatz von erfahrenen Mitarbeitern häufig eine wichtige Rolle.

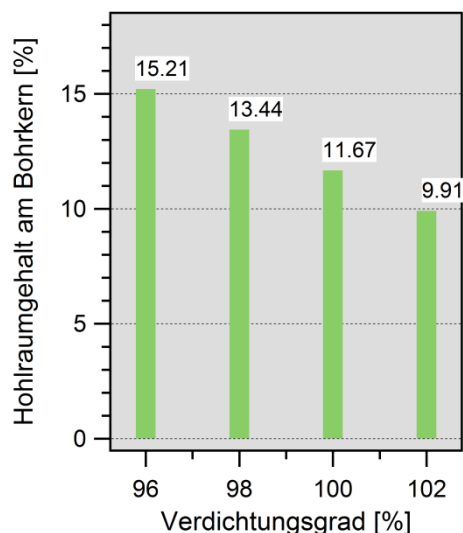


Abbildung 13: Hohlraumgehalt am Bohrkern als Funktion des Verdichtungsgrads für SDA4 Beläge

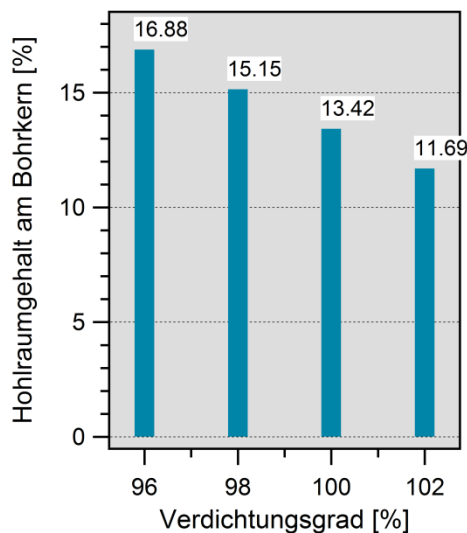


Abbildung 14: Hohlraumgehalt am Bohrkern als Funktion des Verdichtungsgrads für SDA8 Beläge

Die Kontrolle des Fülleranteils (Siebdurchgang beim Analysesieb 0.063 mm) im Matrixgefüge ist wichtig für SDA4 und SDA8 Beläge. Abbildung 15 zeigt wie gross die Auswirkungen einer geringen Änderung des Fülleranteils am Hohlraumgehalt bei SDA4 Belägen haben können. Generell ist zu erkennen, dass eine Erhöhung des Füllergehaltes eine Reduktion des Hohlraumgehaltes haben kann. Es gilt zu beachten, dass die Siebdurchgänge bei den Analysensieben bei 0.25 mm und 0.5 mm leicht modifiziert werden mussten um konsistente Siebkurven für den Fülleranteil von 3 %, 7.3 %, 10 % und 12 % erhalten zu können. Dies kann die Berechnung des Hohlraumgehaltes leicht beeinflussen. Jedenfalls kann eine Veränderung des Fülleranteils von 1 %, sich auf eine gleich hohe Veränderung im Hohlraumgehalt auswirken.

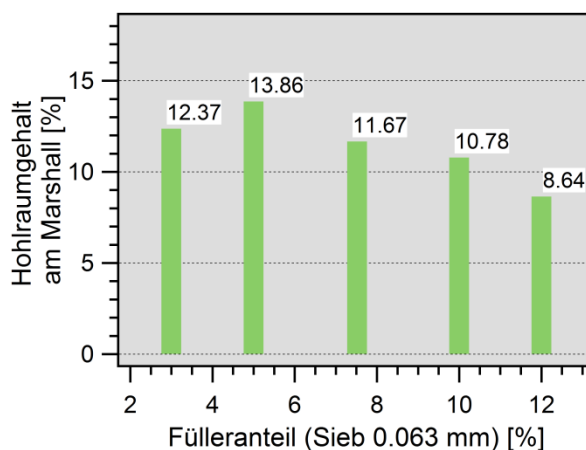


Abbildung 15: Wirkung des Fülleranteils auf den Hohlraumgehalt am Marshall für SDA 4 Beläge

Zum besseren Verständnis der Auswirkung der normativen Grenzen der Siebkurven, wurde ein Modell mit den minimalen und maximalen Siebkurven nach SN 640 436:2015 erstellt. Die Resultate sind in Tabelle 11 dargestellt und zeigen den berechneten Hohlraumgehalt für SDA4 und SDA8 Beläge. Dieser weist eine Differenz zwischen der maximalen und minimalen Siebkurve von fast 20 % auf. Obwohl diese Berechnung in der Praxis kaum realisierbar ist, zeigt es den wesentlichen Bereich der erreicht werden kann unter Einhaltung der Siebkurven nach Norm SN 640 436:2015.

Tabelle 11: Berechnung des Hohlraumgehalts für das Minimum und Maximum nach SNR 640 436:2015. Es wurde mit 100 % Verdichtungsgrad und SDA Grundgerüst (Hohlraumgehalt wurde nicht validiert) gerechnet. Der Bindemittelgehalt für SDA4 liegt bei 6.0 % und bei SDA8 bei 5.8 %.

	berechneter Hohlraumgehalt [%]	
	SDA4	SDA8
mit minimaler Siebkurve	26.0	26.4
mit maximaler Siebkurve	6.7	2.2

Tabelle 11 zeigt, dass unter Einhaltung der Siebkurven der SNR 640 436:2015 eine Vielzahl von Rezepturen möglich sind, die betreffend ihrem Hohlraumgehalt von sehr porös (mit Hohlraumgehalt von ca. 26 %) bis fast dicht (mit Hohlraumgehalten von ca. 2 bis 7%) reichen.

## **5. SYNTHESE**

### **5.1 BAUTECHNISCHE ABKLÄRUNGEN**

#### **5.1.1 MECHANISCHE ANFORDERUNGEN**

In den vorherigen Kapiteln wurde jeweils der Aspekt der Optimierung von semidichten Asphalten bezüglich Akustik angeschaut. Nun ist es wichtig auch die mechanischen Aspekte miteinzubringen um sicherzustellen, dass diese bautechnisch herstellbar und technisch zielführend sind. Grundsätzlich haben semidichte Asphalte immer mehrere Grundfunktionen zu erfüllen: neben möglichst lärmarmen Eigenschaften sind eine ausreichende Griffigkeit, der Schutz der darunterliegenden Schichten/Unterbaus, sowie ausreichende strukturelle Tragfähigkeit und eine gewisse Lebensdauer zu gewährleisten. Um in allen Bereichen möglichst gut abzuschneiden, sind langfristig gute mechanische Eigenschaften notwendig.

Die Qualität der Mastix ist ein entscheidender Faktor für die Lebensdauer des Belags. Es ist beispielsweise durch den "Module de Richesse" (siehe Anhang 1) charakterisiert. Ein genug hoher "Module de Richesse" Wert wird in der Regel ein besseres Verhalten bei niedrigen Temperaturen und eine gute Haftung des Bindemittels mit den Aggregaten garantieren. Falls der "Module de Richesse" Wert jedoch zu hoch ist, kann eine erhöhte Empfindlichkeit gegen Verformung (z.B. Spurrinnenbildung) erfolgen.

Der Füller spielt eine wesentliche Rolle beim mechanischen Verhalten von bituminösen Werkstoffen, da sie als Komponente (zusammen mit dem Bindemittel) die Verbindung zwischen den Aggregaten gewährleisten. Aus mechanischer Sicht erhöht der Füller die Qualität der Bindung zwischen den Körnern und reduziert die Gefahr der Rissbildung. Gleichzeitig erhöhen zu hohe Füllergehalte allerdings das Risiko für Spurrinnenbildung. Man beachte, dass der Füllergehalt im Allgemeinen immer im Zusammenhang mit dem Bindemittelgehalt (z.B. durch Module de Richesse) betrachtet werden muss. Aus akustischer Sicht spielt der Mastix (Füller + Bindemittel) ebenfalls eine wichtige Rolle, da dieser wesentliche Parameter wie die Textur und die Zugänglichkeit der Hohlräume beeinflusst. Der Mastix besteht zum grössten Teil aus Füller und somit ist es nicht überraschend, dass der Ausfüllungsgrad und der Bindemittelgehalt als relevanter Parameter in Kapitel 4.2 erscheint.

Ebenfalls spielt der Sandanteil (ohne Füller) eine wichtige Rolle bezüglich der Hohlraumstruktur: man kann davon ausgehen, dass eine akustisch wirksame Hohlraumstruktur und deren Verbindungsgrad in klarer Weise von den mittleren Korngrößen abhängen (Prinzip der fraktalen Geometrie). Gleichzeitig bildet der Sandanteil ein wichtiges Element zwischen grobem Aggregat und der Mastix.

Es kann gefolgert werden, dass ein Hohlraumgehalt knapp über dem akustischen Grenzbereich zwischen semidicht und dicht von ungefähr 14 bis 15 Vol-% ein guter Kompromiss zwischen Akustik und Mechanik darstellt. Dabei sollten allerdings auf ein möglichst gut abgestütztes Korngerüst geachtet werden. Im nachfolgenden Abschnitt wird auf diesen Sachverhalt näher eingegangen.

#### **5.1.2 ANFORDERUNGEN KORNGERÜST**

Wie in Kapitel 5.1.1 erläutert, kommt den mittleren Korngrößen wie dem Sandanteil eine wichtige Funktion bei der Sicherstellung der akustisch wirksamen Hohlraumstruktur zu. Um Verformung bzw. Spurrinnenbindung zu vermeiden, wird im Allgemeinen ein möglichst durch mittlere Korngrößen gut abgestütztes Korngerüst angestrebt (siehe Abbildung 16).

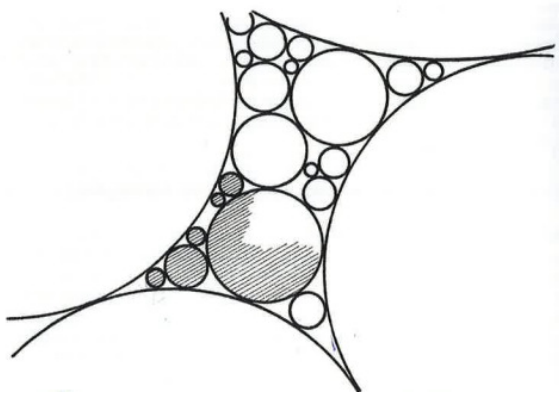


Abbildung 16: Bautechnisch ideales Korngerüst eines hohlraumarmen Asphalts (Quelle: Hintsteiner, 1996)

Das bautechnisch ideale Kornsystem mit stetigen Korngrößenabstufungen aus Abbildung 16 wird deshalb oft im Strassenbau eingesetzt (Hintsteiner, 1996). Bei semidichten Asphalten allerdings wird das Prinzip der Ausfallkörnung angewendet. Das so entstehende Hohlraumgeflecht zwischen den Mineralstoffen wird nur teilweise mit der Mastix und den mittleren Korngrößen ausgefüllt und gewährleistet somit auch die Verbindung der Hohlräume untereinander. Bei der akustischen Optimierung von semidichten Asphalten sollte jedoch immer darauf geachtet werden, dass trotz Ausfallkörnung immer genügend mittlere Korngrößen eingesetzt werden, damit ein stabiles Korngerüst entsteht, das dem Asphalt die gewünschte hohe Standfestigkeit und geringe Verformbarkeit verleiht.

### 5.1.3 PRAKTISCHE REALISIERBARKEIT

Sofern aufgrund akustischer Sachverhalte eine Anpassung der gültigen Norm erfolgen sollte, muss ebenfalls praktischen Aspekten der Mischgutherstellung Rechnung getragen werden. Die Herstellung des Mischgutes erfolgt normalerweise in einem elektronisch gesteuerten Prozess, in welchem die einzelnen Bestandteile des Asphaltmischgutes gezielt zusammengesetzt und vermischt werden. Entscheidend dabei ist die Qualität und Homogenität des Ausgangsmaterials. Von grosser Bedeutung ist zum Beispiel der natürliche Fülleranteil des Ausgangsmaterials, sowie die Fähigkeit der Mischgutzentrale diesen mit Hilfe einer Entstaubungsanlage abzutrennen und gegebenenfalls später dosiert dem Mischgut wieder beizugeben. Ähnliches gilt für die exakte Handhabung des Sandanteils, wozu ein Sieb der Maschenweite 2 mm notwendig wäre, worüber jedoch momentan nicht alle Mischgutanlagen der Schweiz verfügen. Darüber hinaus verändern sich die Eigenschaften des Gesteinsmaterials während der gleichen Einbausaison laufend, was einerseits mit der Homogenität des Ausgangsmaterials aber auch mit deren Lagerungs- und Transportbedingungen zusammenhängt. Diese Faktoren limitieren die exakte Steuerung des Füller- und Sandanteils in der Praxis.

Wie die Ergebnisse dieser Studie zeigen, ist für die akustische Optimierung von semidichten Asphalten eine möglichst exakte Steuerung des Füller- und Sandgehaltes von grosser Bedeutung. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, sind in der Normierung grundsätzlich zwei Vorgehensweisen denkbar: Einerseits könnten für die Herstellung von semidichten Asphalten zusätzliche Anforderungen bezüglich der Steuerung der Füller- und Sandgehalte aufgestellt werden, was potentiell zu höheren Herstellungskosten führt. Andererseits könnten den praktischen Limitierungen bei der Mischgutherstellung mit der Einführung von entsprechenden Toleranzen Rechnung getragen werden.

## 5.2 AKUSTISCHE WIRKUNGSWEISE

Aus den Auswertungen zu den akustisch optimalen Wertebereichen in Kapitel 4.2 ist auf konsistente Weise hervorgegangen, dass die bezüglich der akustischen Leistung "guten" Beläge 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 und „gute“ Beläge folgendes gemeinsam haben: Von der Oberfläche zugängliche Hohlräume, die für tiefe Luftströmungsgeräusche und einem gewissen Mass an Schallabsorption sorgen.

Werden diese Hohlräume durch Füller- und Sandanteile verklebt, kann der Belag noch immer wesentliche Hohlraumgehalte aufweisen, die allerdings nicht von der Oberfläche zugänglich sind. Im Neuzustand weisen solche Beläge manchmal zwar vergleichbare akustische Leistungen auf wie die akustisch "guten" Beläge, allerdings sind diese akustischen Leistungen im Neuzustand bedingt durch die feinere Oberflächentextur (aufgrund der hohen Füller- und Sandanteile). Mit der Zeit werden die an der Oberfläche liegenden Feinanteile durch die mechanischen Beanspruchungen des darüber rollenden Verkehrs wegpoliert. Nach Wegpolieren der Feinanteile ist bereits im ersten Jahr nach Einbau mit wesentlichen Abnahmen der akustischen Leistung zu rechnen. Was zurückbleibt ist die rauhere aggregatbedingte Oberflächentextur, die zu einer deutlichen Verminderung der akustischen Leistung führt (ähnlich wie dies bei AC-Rezepturen zu beobachten ist).

Auch bei akustisch "guten" Belägen vermindert sich die akustische Leistung mit der Zeit, allerdings deutlich weniger schnell als bei den Belägen mit hohen Füller- und Sandanteilen. Die akustische Leistung vermindert sich dort aufgrund von Schmutzablagerungen, die mit der Zeit ein Teil der Porenzugänge blockieren können. Da die akustisch massgebende Oberflächentextur bei akustisch "guten" Belägen von Anfang an aggregatbedingt war, sind auf diesen Belägen keine wesentlichen Veränderungen der Oberflächentextur zu erwarten, zumindest solange diese unbeschädigt bleibt. Der in diesem Kapitel behandelte Sachverhalt ist mit folgendem Beispiel aus dem Kanton Aargau veranschaulicht (siehe Abbildung 17).

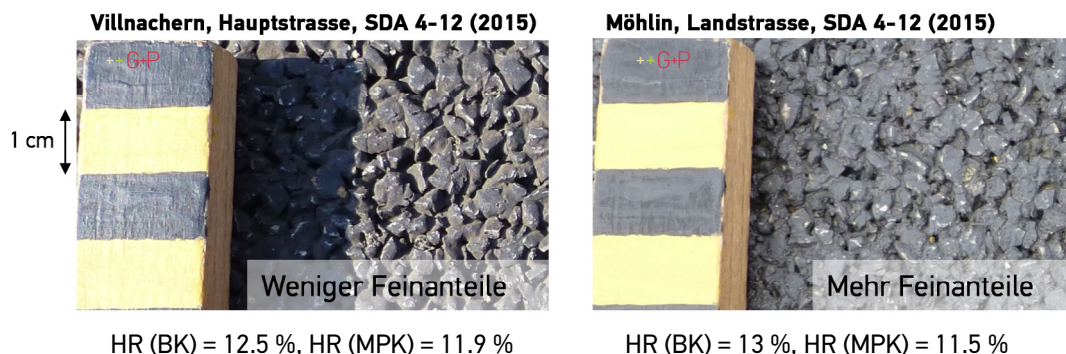


Abbildung 17: Veranschaulichungsbeispiel der Oberflächentextur zweier SDA 4 Beläge mit ähnlichen Hohlraumgehalten und unterschiedlichen Feinanteilen.

## 5.3 EMPFEHLUNGEN FÜR AKUSTISCHE AUSFÜHRUNGSBESTIMMUNGEN

Bei PA-Belägen kann die für die Akustik massgebende Hohlraumstruktur direkt über den Hohlraumgehalt am Mischgut gesteuert werden. Bei semidichten Asphalten ist die akustische Wirkungsweise komplizierter: die Ergebnisse des nationalen Forschungsprojektes haben gezeigt, dass semidichte Rezepturen trotz gleichem Hohlraumgehalt, grosse Unterschiede bezüglich der akusti-

schen Leistung aufweisen können. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie haben gezeigt, dass dies auf Unterschiede bezüglich der von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume zurückzuführen ist, die im Wesentlichen von den Füller- und Sandanteilen der Rezeptur abhängen. Zur Sicherstellung der akustischen Leistung von semidichten Asphalten ist diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen. Dabei gilt es 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. Es wird empfohlen, dies in der Normierung mit folgendem Zusatz für die akustische Ausführung von semidichten Asphalten zu berücksichtigen (siehe Abbildung 18).

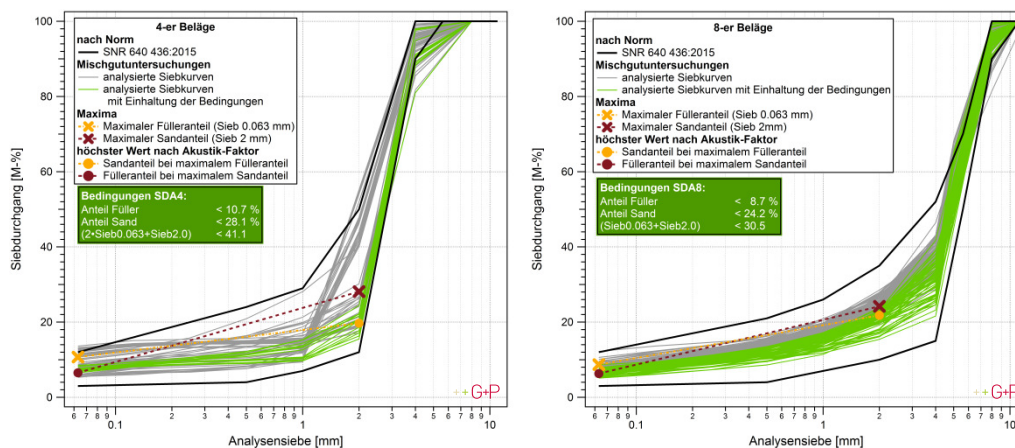


Abbildung 18: Empfohlene Ausführungsbestimmungen Akustik für die Normierung von semidichten Asphalten. Diese beinhalten Maximalwerte für die Füller- und Sandanteile (grüne Kreuze), welche gleichzeitig mit dem Kriterium für den Akustik-Faktor (grüne Box) zur Gewährleistung der akustisch wirksamen Hohlräume nicht überschritten werden dürfen.

In Anbetracht der Ergebnisse dieser Studie sowie der mechanischen Anforderungen an semidichte Asphalte (siehe Kapitel 5.1) kann gefolgert werden, dass ein Hohlraumgehalt knapp über dem akustischen Grenzbereich zwischen semidicht und dicht von ungefähr 14 bis 15 Vol-% am Marshallprüfkörper ein guter Kompromiss zwischen Akustik und Mechanik darstellt. Der minimale Hohlraumgehalt zur Sicherstellung der akustischen Leistung liegt bei ungefähr 12 Vol-%. Eine entsprechende Anpassung der Hohlraumgehaltsklassen in der Normierung wird empfohlen.



## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

### 6.1 WICHTIGE ERKENNTNISSE

- + **Zugängliche Hohlräume notwendig.** Aus den Analysen des vorliegenden Projektes ist auf konsistente Weise hervorgegangen, dass die bezüglich der akustischen Leistung "guten" Beläge 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 Asphaltbeläge, die bei hohen Verkehrslasten 3 Jahre nach Einbau intakte Eigenschaften aufweisen sich nicht plötzlich verändern, kann entsprechend gefolgert werden, dass akustisch dauerhafte und „gute“ Beläge folgendes gemeinsam haben: Von der Oberfläche zugängliche Hohlräume, die für tiefe Luftströmungsgeräusche und einem gewissen Mass an Schallabsorption sorgen.
- + **Bei semidichten Asphaltbelägen sind Füller- und Sandanteil die entscheidenden Parameter.** Bei PA-Belägen kann die für die Akustik massgebende Hohlraumstruktur direkt über den Hohlraumgehalt am Mischgut gesteuert werden. Bei semidichten Asphaltbelägen 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. Auch mit der Verkehrsbeanspruchung können diese nicht wieder freigelegt werden. Zur Sicherstellung der akustischen Leistung von semidichten Asphaltbelägen sollten die vorgeschlagenen Füller- und Sandanteile nicht überschritten werden. In der Normierung ist diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen.
- + **Den akustischen 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 zur Norm SNR 640 436:2015 stellen einen wesentlichen Schritt dar, im Bestreben mit semidichten Asphaltbelägen den Hohlraumgehalt unter der Gewährleistung der akustischen Leistung zu minimieren und damit eine möglichst grosse Dauerhaftigkeit von lärmarmen Belägen zu erreichen.

### 6.2 EINSCHRÄNKENDE BEMERKUNGEN

- + Als einschränkende Kriterien für die Aufnahme von Belägen in die Studie galten einerseits die Verfügbarkeit von Mischgutuntersuchungen und kleinräumig lokalisierbaren Bohrkernuntersuchungen, sowie das Vorhandensein einer mehrjährigen akustischen Messreihe mit der CPX-Anhängermethode. Währendem für die 8-er Beläge auf eine relativ grosse Stichprobe zurückgegriffen werden konnte, war diejenige der 4-er Beläge mit 68 Bohrkernen (mit akustischen Werten 3 Jahre nach Einbau) um mehr als die Hälfte geringer. Dies muss bei der Einordnung der Ergebnisse entsprechend mitberücksichtigt werden. Die Ergebnisse bei den 4-er Belägen können dennoch als vertrauenswürdig eingestuft werden, insofern diese konsistent mit den Folgerungen bei den 8-er Belägen sind und mit einem umfassenden unabhängigen Kontrolldatensatz überprüft und verifiziert werden konnten.

- + In den Analysen wurde die akustische Leistung 3 Jahre nach Einbau als massgebende Grösse verwendet. 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 bereits eine genügend grosse Stichprobe für die Datenanalyse vorlag. Würden bei entsprechender Verfügbarkeit von Daten die Analysen für spätere Zustände wiederholt (z.B. 5 oder 10 Jahre nach Einbau), könnten weitere entscheidende Parameter (z.B. Verdichtungsgrad an der eingebauten Schicht) resultieren, die zur Erreichung einer "guten" akustischen Leistung 3 Jahre nach Einbau noch keine Rolle gespielt haben.
- + Bei der in der vorliegenden Studie eingesetzten statistischen Analysen zur Identifikation der akustisch entscheidenden Parameter ist zu beachten, dass der Erfolg der Methodik stark von der Qualität bzw. der Genauigkeit der analysierten Grössen abhängt. Sind diese mit zu grossen Unsicherheiten behaftet oder erklären diese das zu untersuchende Phänomen nicht ausreichend, können diese mit der angewendeten Methodik nicht als entscheidend identifiziert werden. Entsprechend ist davon auszugehen, dass neben den identifizierten entscheidenden Parameter weitere Erfolgsfaktoren für die Sicherstellung der akustischen Leistung entscheidend sind. So ist zu erwarten, dass zum Beispiel die Eigenschaften und Qualität des verwendeten Bindemittels, die Eigenschaften des Eigen-/Fremdfüllers, sowie bestimmte Einbaupraktiken sich positiv oder negativ auf die langfristige akustische Leistung auswirken können. Entsprechende Grössen sind momentan schwierig zu erheben und zu quantifizieren. Des Weiteren ist zu beachten, dass die erfolgreiche Herstellung und Einbau von semidichten Asphalten eine delikate und hochkomplexe Aufgabe ist und der Erfolg nie mit einem entscheidenden Parameter erklärt werden kann. Die Fragestellung ist hochkomplex und muss entsprechend immer im multivariaten Raum betrachtet werden. An allen Fronten muss entsprechend nach Optimierungsmöglichkeiten gesucht werden.

### 6.3 WEITERER FORSCHUNGSBEDARF

- + Um weitere entscheidende Parameter für die Sicherstellung einer dauerhaften akustischen Leistung von semidichten Asphalten zu gewährleisten, sollten die vorliegenden Analysen zu einem späteren Zeitpunkt bei verbesserter Datenlage wiederholt werden.
- + Weiterer Forschungsbedarf besteht bei der Identifikation weiterer entscheidender Parameter, z.B. bei Vorgängen und Praktiken beim Einbau, die bisher nur selten detailliert erfasst und dokumentiert wurden.
- + Momentan fehlt eine einfache und direkte Methode um den zugänglichen Hohlraumgehalt im Labor zu bestimmen. Diese sollte mit in-situ Messungen kalibriert werden. Anhand einer solchen Methode könnte man im Labor die zukünftigen akustischen Eigenschaften besser bestimmen.

Grolimund + Partner AG



Erik Bühlmann



Emanuel Hammer

Nibuxs Sàrl



Jacques Perret



Nicolas Bueche

## ANHANG

### 1 ÜBERSICHT METADATEN BOHRKERN- & MISCHGUTUNTERSUCHUNGEN

Tabelle 1 zeigt alle für die statistischen Modelle verwendeten physischen Parameter.

Tabelle 12: Metadaten Bohrkern- und Mischgutuntersuchungen

Kategorie	Priorität	Legende:
		<i>Priorisierung nach Einschätzung der Begleitkommission</i> *** relevant ** eher relevant * weniger relevant
		<i>Kategorie</i> <b>B:</b> Belagsuntersuchung <b>E:</b> Erstprüfung <b>M:</b> Mischgut
<b>M</b>	*	Aufbereitungsanlage/Mischwerk
<b>M</b>	*	Ausfüllungsgrad
<b>E</b>	***	Bindemittel Art/Sorte
<b>M</b>	*	Bindemittel lösl. Anteil
<b>M</b>	*	Entnahmeort
<b>M</b>	*	Fliesen
<b>E</b>	*	Füller
<b>E</b>	*	Gesteinsart/-herkunft
<b>B</b>	***	Hohlraumgehalt (MPK)
<b>M</b>	***	HM volumetrisch
<b>M</b>	*	Mischguttemperatur
<b>M</b>	*	Module de richesse <sup>x</sup>
<b>B+M</b>	***	Raumdichte
<b>M</b>	***	Rohdichte
<b>B</b>	***	Schichtdicke
<b>M</b>	**	Siebkurve
<b>M</b>	*	Stabilität
<b>B</b>	**	Verdichtungsgrad
<b>E</b>	*	Wasserempfindlichkeit

<sup>x</sup>: Der "Module de Richesse" ist eine Kenngrösse für die Dicke des Bindemittelfilms, der die Gesteinskörnung im Asphaltmischgut umhüllt (VSS 640 431). Der Bindemittelfilm ist für eine gute Verbindung der Aggregate entscheidend um Kornausbrüche zu verhindern. Der "Module de Richesse"  $M_R$  ist wie folgt definiert:

$$M_R = \frac{B_{GK}}{A \cdot \sqrt[5]{\frac{0,25 \cdot (100-a) + 2,3(a-b) + 12 \cdot ( \quad )b - c + 150 \cdot c}{100}}}$$

Gl. 1

wobei:

$B_{GK}$ : Dosierter Bindemittelgehalt bezogen auf die Masse der Gesteinskörnung

$A$ : Anpassungskoeffizient für die tatsächliche Rohdichte der Gesteinskörnung

$a$ : Siebdurchgang bei 4.0 mm [Masse-%]

$b$ : Siebdurchgang bei 0.25 mm [Masse-%]

$c$ : Siebdurchgang bei 0.063 mm [Masse-%]

## 2 IN-SITU MESSMETHODEN

### LUFTSTRÖMUNGSWIDERSTANDSMESSUNGEN MIT LUFTTOPF

Durch eine Luftströmungswiderstandsmessung auf der Belagsoberfläche kann erfasst werden, wie „einfach“ die Luft beim Kontakt Reifen-Fahrbahn aus der Kontaktzone entweichen kann, was wiederum Aufschluss über die Schallentstehung in der Kontaktzone Reifen-Fahrbahn gibt.

Dazu wird mit einem Kompressor über einen Luftkanal im „Lufttopf“ ein gleichmässiger Luftstrom erzeugt, der in einem zweiten Luftkanal wieder gemessen wird. Gemessen wird der Überdruck in der Kammer in Abhängigkeit des geregelten Durchflusses der eintretenden Luft. Beide Messgrößen stehen theoretisch in einer linearen Abhängigkeit, wobei die Steigung von der Geschwindigkeit, bei der die Luft durch den Belag entweichen kann, abhängt. Dies ergibt das Mass für die Luft, die in der Kontaktzone Gummi-Strassenbelag entweicht.

Der Luftströmungswiderstand einer Deckschicht wird definiert als Quotient des Überdruckes in der Kammer  $\Delta p$  zum Durchfluss  $q$ . Der spezifische Strömungswiderstand  $R_s$  wird definiert als Quotient des Überdruckes zur Strömungsgeschwindigkeit  $q/A$  ( $A$  bezeichnet die Prüffläche).

Der spezifische Luftströmungswiderstand eines Strassenbelages wird empirisch bei einer Luftströmungsgeschwindigkeit von genau 0.0125 m/s bestimmt.

### CPX-MESSVERFAHREN

Die von G+P AG eingesetzte CPX-Methode richtet sich nach ISO/DIS 11819-2:2012. Bei dieser Methode werden die akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen durch eine kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche mit einem Messanhänger ermittelt.

Beim CPX-Messsystem wird der Schallpegel in zwei separaten schallgedämmten Kammern innerhalb des Messanhängers in unmittelbarer Reifennähe mit je zwei Mikrofonen gemessen. Der eingesetzte G+P Anhänger erfüllt die in der ISO/DIS 11819-2:2012 festgelegten Kriterien betreffend Beeinflussung der Messergebnisse durch geräteeigene Schallreflexionen sowie durch interne und externe Schallgeräusche (siehe Testergebnisse in Anhang 3).



Abbildung 19: G+P Messanhänger

Die verwendeten Testreifensätze sind in Abbildung 20 dargestellt: Uniroyal Tigerpaw (SRTT) 225/60-R16 (Testreifen A1 für Personenwagen/Cars) und Avon AV4 195-R14C (Testreifen D1 für Lastwagen/Trucks).



Abbildung 20: CPX-Testreifen A1 und D1

Eine schematische Übersicht über das G+P Messsystems ist in Abbildung 21 dargestellt.

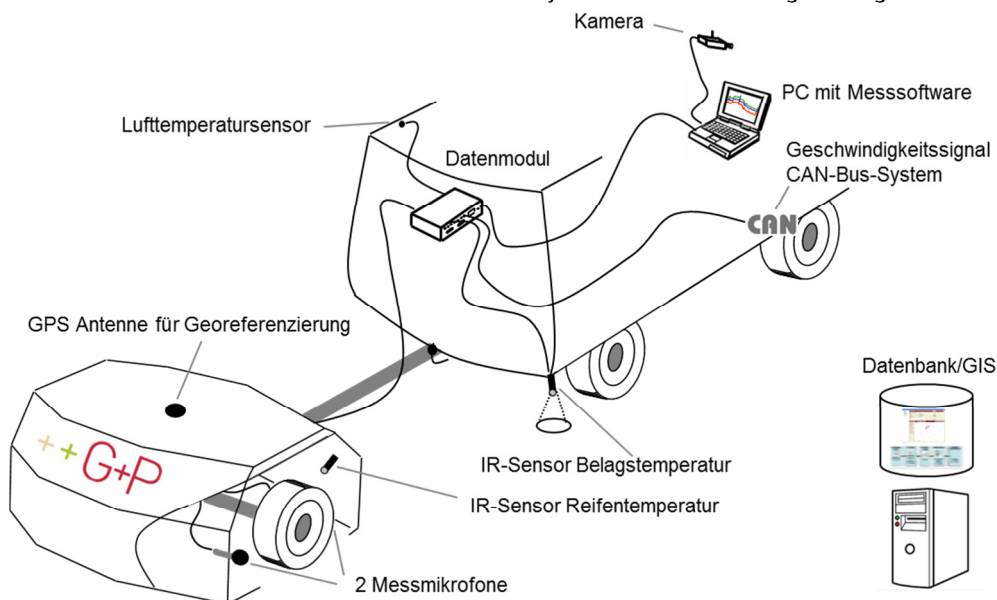


Abbildung 21: Schematische Übersicht des G+P Messsystems

Die Signale der 4 Messmikrofone (2 Messmikrofone je Seite), das Geschwindigkeitssignal aus dem CAN-Bus-System des Zugfahrzeuges, das GPS-Signal für die Georeferenzierung der Messdaten, sowie die Signale der Temperatursensoren werden im zentralen Datenmodul verarbeitet und von der Messsoftware aufgezeichnet. Die unmittelbare grafische Anzeige der Messsignale ermöglicht die ständige Überwachung des gesamten Messvorgangs während der Fahrt. Eine Kamera auf der Vorderseite des Fahrzeugs fotografiert zu Interpretations- und Kontrollzwecken fortlaufend die Strassenoberfläche. Alle Messdaten werden vom Datenmodul mit Ort/Zeit-Angaben versehen und zur Auswertung in einer eigens entwickelten Datenbankapplikation abgelegt.

### 3 ZUSAMMENHANG HOHLRAUMBESTIMMUNGSMETHODEN AUSMESSUNG UND TAUCHWÄGE

Abbildung 22 zeigt die Korrelation der beiden Messmethoden Ausmessung und Tauchwäge zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes am Bohrkern und Marshall-Prüfkörper. Die Korrelation beinhaltet 72 Bohrkerndaten von 4-er und 8-er Belägen aus dem Kanton Aargau mit Einbaujahr zwischen 2013 und 2016. Es ist zu erkennen, dass eine relativ geringe Streuung vorhanden ist mit einem  $R^2$  von 0.9. Die Korrelation ist sehr stark mit einer Steigung von 1.0. Der y-Achsenabschnitt von 3.0 besagt, dass mit dem Ausmessverfahren im Mittel 3 % höhere Hohlraumgehalte resultieren als mit dem Tauchwägeverfahren. Der mittlere Fehler ist dabei  $\pm 0.6$  %.

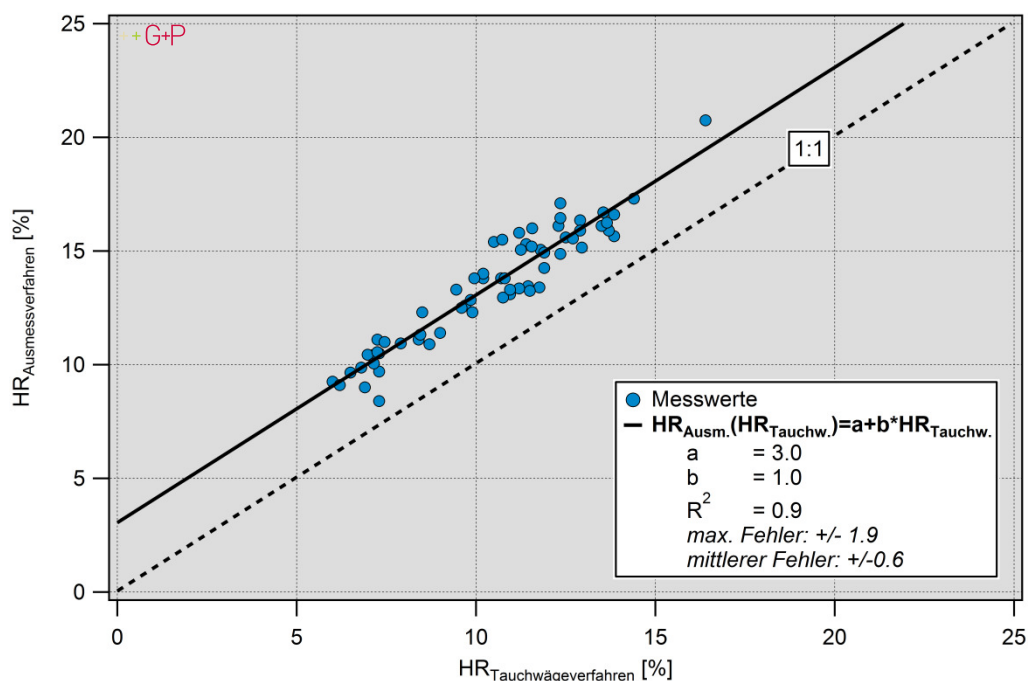


Abbildung 22: Korrelation der beiden Verfahren Tauchwäge und Ausmessung zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes in Bohrkernen und Marshall-Prüfkörper. Datengrundlage sind 4-er und 8-er Beläge im Kanton Aargau mit Einbaujahr 2013 bis 2016.

#### 4 DETAILANALYSE STATISTISCHE MODELLE

Abbildung 25 und Abbildung 28 zeigen die Roh-Resultate aus dem linearen multivariaten Regressionsmodell für 4-er und 8-er Beläge in Bezug auf die akustische Leistung im Neuzustand, 1 Jahr nach Einbau, 3 Jahre nach Einbau als auch 5 Jahre nach Einbau. Die Variablen aus diesen Resultaten wurden weiter auf Kollinearität und Plausibilität überprüft.

```
Call:
lm(formula = dd_dependent[, "STLN1TK_SOL_neuz_4mm"] ~ Sieb04_000_MW +
  Steigung_4mm + Bindemittelanteil_MW + Temperatur_50 + Sieb00_063_MW +
  Feuchte_50 + Verdichtungsgrad_4mm + Rohdichte_BK_4mm, data = dd_independent)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.40647 -0.41380  0.01261  0.39917  2.38936

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -13.736492  10.968448  -1.252  0.21473
Sieb04_000_MW    0.005727  0.070019   0.082  0.93505
Steigung_4mm   -0.170733  0.050189  -3.402  0.00112 **
Bindemittelanteil_MW  1.749182  0.385423   4.538  2.37e-05 ***
Temperatur_50    0.071041  0.034944   2.033  0.04596 *
Sieb00_063_MW  -0.159940  0.059834  -2.673  0.00940 **
Feuchte_50     -0.034596  0.016916  -2.045  0.04471 *
Verdichtungsgrad_4mm -0.122131  0.060593  -2.016  0.04780 *
Rohdichte_BK_4mm  0.004906  0.003443   1.425  0.15880
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8678 on 68 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5199,    Adjusted R-squared: 0.4635
F-statistic: 9.206 on 8 and 68 DF,  p-value: 1.726e-08
```

Abbildung 23: Resultat aus linearem multivariaten Regressionsmodell für 4-er Beläge mit der akustischen Leistung im Neuzustand

```
Call:
lm(formula = dd_dep_AlterA[, "STLN1TK_SOL_AgeA_4mm"] ~ Sieb00_063_MW +
  Anzueberroll_N2 + Anzueberroll_Ges + Steigung_4mm + Sieb02_000_MW +
  Bindemittelanteil_MW + Temperatur_50 + a_Fahrzeit, data = dd_indep_AlterA)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.4576 -0.5411 -0.0525  0.5678  5.9922

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -3.184e+01  8.260e+00  -3.855 0.000288 ***
Sieb00_063_MW    5.840e-01  1.536e-01   3.802 0.000343 ***
Anzueberroll_N2  8.469e-06  3.554e-06   2.383 0.020430 *
Anzueberroll_Ges -1.597e-07  7.687e-08  -2.077 0.042129 *
Steigung_4mm    -1.900e-01  8.144e-02  -2.333 0.023064 *
Sieb02_000_MW    1.023e-01  3.927e-02   2.605 0.011620 *
Bindemittelanteil_MW 2.460e+00  1.126e+00   2.184 0.032916 *
Temperatur_50    1.634e-01  8.075e-02   2.023 0.047580 *
a_Fahrzeit      -7.009e-02  4.278e-02  -1.638 0.106672
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.342 on 59 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4856,    Adjusted R-squared:  0.4158
F-statistic: 6.962 on 8 and 59 DF,  p-value: 2.018e-06
```

Abbildung 24: Resultat aus linearem multivariaten Regressionsmodell für 4-er Beläge mit der akustischen Leistung 1 Jahr nach Einbau

```
Call:
lm(formula = dd_dep_AlterB[, "STLN1TK_SOL_ageB_4mm"] ~ a_Fahrzeit +
  Schichtdicke_4mm + Raumdichte_MPK_MW + Hohlraumgehalt_BK_4mm +
  Sieb00_063_MW + verdichtungsgrad_4mm + Wind_50, data = dd_indep_AlterB)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.2570 -1.1975 -0.0298  0.8470  4.0540

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   23.43586   20.70161   1.132 0.265298
a_Fahrzeit    -0.21986    0.05851  -3.758 0.000625 ***
Schichtdicke_4mm -0.12177    0.06071  -2.006 0.052675 .
Raumdichte_MPK_MW -21.23642    5.76243  -3.685 0.000768 ***
Hohlraumgehalt_BK_4mm 0.70836    0.24387   2.905 0.006330 **
Sieb00_063_MW  -1.22949    0.54883  -2.240 0.031527 *
Verdichtungsgrad_4mm 0.24360    0.15493   1.572 0.124875
Wind_50        0.36195    0.23170   1.562 0.127249
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.839 on 35 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4599,    Adjusted R-squared:  0.3519
F-statistic: 4.258 on 7 and 35 DF,  p-value: 0.001709
```

Abbildung 25: Resultat aus linearem multivariaten Regressionsmodell für 4-er Beläge mit der akustischen Leistung 3 Jahre nach Einbau



```
Call:
lm(formula = dd_dependent[, "STLN1TK_SOL_neuz_8mm"] ~ Rohdichte_BK_8mm +
  Fließwert_MW + Wind_50 + AnzUeberroll_Ges + Hohlraumgehalt_BK_8mm +
  Temperatur_insitu_MW + a_Fahrzeit + AnzUeberroll_N2 + Steigung_8mm +
  Sieb00_500_MW + Sieb04_000_MW + Sieb02_000_MW + Hohlraumgehalt_MPK_MW,
  data = dd_independent)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.83544 -0.49832 -0.03674  0.51970  2.97210

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -5.464e+01  2.439e+01  -2.240  0.026613 *
Rohdichte_BK_8mm  1.953e-02  1.064e-02   1.837  0.068353 .
Fließwert_MW    1.841e+00  3.071e-01   5.996  1.59e-08 ***
Wind_50        2.944e-01  1.313e-01   2.242  0.026537 *
AnzUeberroll_Ges  8.986e-07  1.721e-07   5.221  6.19e-07 ***
Hohlraumgehalt_BK_8mm  2.389e-01  2.667e-01   0.896  0.371966
Temperatur_insitu_MW -2.237e-02  9.430e-03  -2.373  0.019004 *
a_Fahrzeit     -2.482e-02  9.067e-03  -2.737  0.006994 **
AnzUeberroll_N2  -7.289e-06  2.066e-06  -3.529  0.000563 ***
Steigung_8mm   -6.914e-02  2.950e-02  -2.343  0.020505 *
Sieb00_500_MW  9.851e-02  1.224e-01   0.805  0.422134
Sieb04_000_MW  -1.008e-01  2.758e-02  -3.656  0.000360 ***
Sieb02_000_MW  2.621e-01  9.541e-02   2.747  0.006790 **
Hohlraumgehalt_MPK_MW  1.637e-01  1.014e-01   1.615  0.108587
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.8407 on 142 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5483,    Adjusted R-squared:  0.5069
F-statistic: 13.26 on 13 and 142 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Abbildung 26: Resultat aus linearem multivariaten Regressionsmodell für 8-er Beläge mit der akustischen Leistung im Neuzustand

```
Call:
lm(formula = dd_dep_AlterA[, "STLN1TK_SOL_ageA_8mm"] ~ Sieb02_000_MW +
  a_Fahrzeit + Temperatur_50 + Steigung_8mm + wind_50 + Sieb08_000_MW +
  Sieb00_063_MW + Schichtdicke_8mm, data = dd_indep_AlterA)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.34040 -0.38173  0.01968  0.37719  1.68598

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)   -18.074982   2.785602  -6.489 3.26e-09 ***
Sieb02_000_MW    0.264731   0.034256   7.728 8.29e-12 ***
a_Fahrzeit     -0.034459   0.009694  -3.555 0.000578 ***
Temperatur_50    0.110908   0.023120   4.797 5.57e-06 ***
Steigung_8mm   -0.132700   0.032761  -4.050 0.000100 ***
wind_50         0.304686   0.113002   2.696 0.008216 **
Sieb08_000_MW   0.093610   0.031167   3.003 0.003365 **
Sieb00_063_MW  -0.318317   0.146187  -2.177 0.031774 *
Schichtdicke_8mm 0.013205   0.009322   1.417 0.159706
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.6893 on 101 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6579,    Adjusted R-squared: 0.6308
F-statistic: 24.27 on 8 and 101 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Abbildung 27: Resultat aus linearem multivariaten Regressionsmodell für 8-er Beläge mit der akustischen Leistung 1 Jahr nach Einbau

```
Call:
lm(formula = dd_dep_AlterB[, "STLN1TK_SOL_ageB_8mm"] ~ Sieb02_000_MW +
  a_Fahrzeit + Temperatur_50 + Temperatur_insitu_MW + wind_50 +
  Fließwert_MW + Hohlraumgehalt_MPK_MW + Ausfüllungsgrad_MW +
  Raumdichte_MPK_MW + Sieb00_063_MW, data = dd_indep_AlterB)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.68415 -0.46937 -0.05401  0.48207  1.57013

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)      -2.791e+02  5.695e+01  -4.901 7.18e-06 ***
Sieb02_000_MW     1.004e+00  1.292e-01  7.769 9.96e-11 ***
a_Fahrzeit       -3.863e-02  1.200e-02  -3.220 0.002040 **
Temperatur_50    1.148e-01  3.629e-02  3.163 0.002418 **
Temperatur_insitu_MW -2.592e-04  1.360e-02  -0.019 0.984860
wind_50           8.129e-01  2.167e-01  3.752 0.000389 ***
Fließwert_MW     -2.221e+00  5.672e-01  -3.916 0.000227 ***
Hohlraumgehalt_MPK_MW 5.910e+00  1.165e+00  5.072 3.82e-06 ***
Ausfüllungsgrad_MW 1.120e+00  2.417e-01  4.634 1.89e-05 ***
Raumdichte_MPK_MW 6.534e+01  1.618e+01  4.039 0.000150 ***
Sieb00_063_MW   -6.726e-01  2.338e-01  -2.877 0.005501 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7118 on 62 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.8043,    Adjusted R-squared:  0.7727
F-statistic: 25.48 on 10 and 62 DF,  p-value: < 2.2e-16
```

Abbildung 28: Resultat aus linearem multivariaten Regressionsmodell für 8-er Beläge mit der akustischen Leistung 3 Jahre nach Einbau

Abbildung 29 und 30 zeigen die modellierten versus die gemessenen akustischen Leistung 3 Jahre nach Einbau für 4-er und 8-er Beläge. Das relativ hohe Bestimmtheitsmass (multiple R-squared) von 0.8 bei 8-er Belägen ist auch in Abbildung 30 aufgrund der relativ geringen Streuung gut ersichtlich.

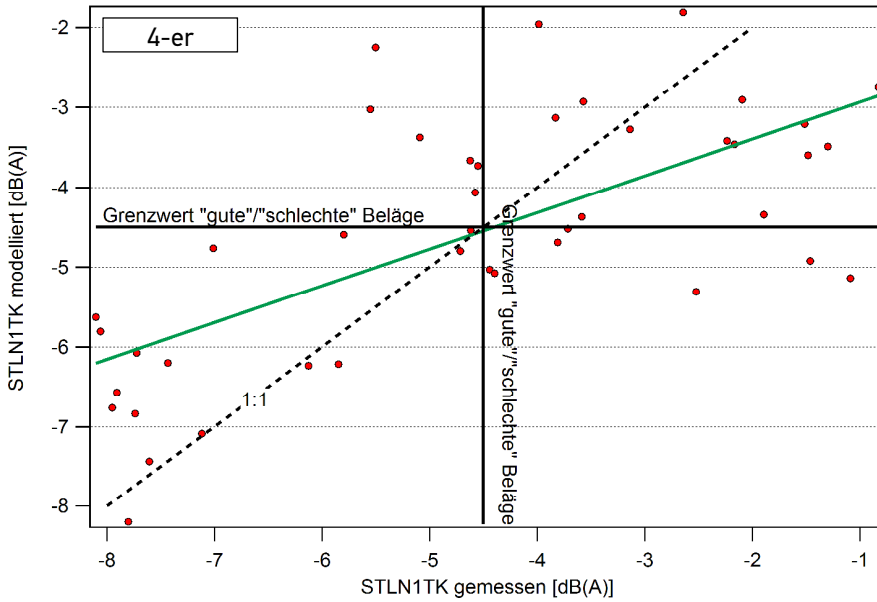


Abbildung 29: Gemessene versus modellierte akustische Belagsgütwerte für PW (STLN1TK) für 4-er Beläge.

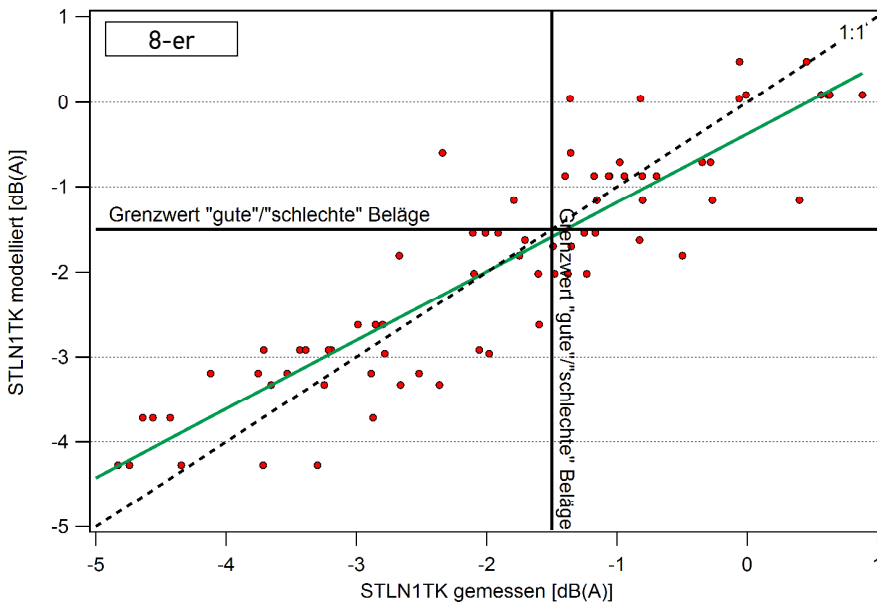


Abbildung 30: Gemessene versus modellierte akustische Belagsgütwerte für PW (STLN1TK) für 8-er Beläge.

## 5 DETAILANALYSE DER OPTIMA-WERTE

Nachfolgend befinden sich Abbildungen der Parameter Anteil Sieb 0.063 mm (Fülleranteil), Anteil Sieb 2.0 mm (Sandanteil) und Verdichtungsgrad mit dem relativen Anteil an Belägen bei diesen Parametern mit guten akustischen Belagsgütwerten für 4-er und 8-er Beläge. Diese Analyse wurde getätigt um für die Parameter die jeweiligen Optima-Werte zu eruieren.

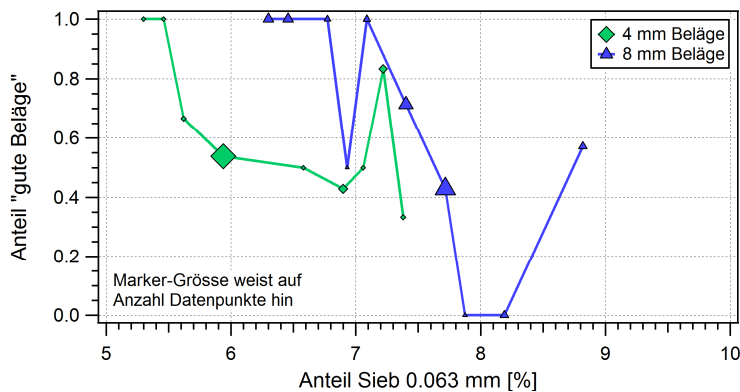


Abbildung 31: Anteil Beläge mit guten akustischen Belagsgütwerten bei Anteil Sieb 0.063 mm (Fülleranteil) für 4-er und 8-er Beläge.

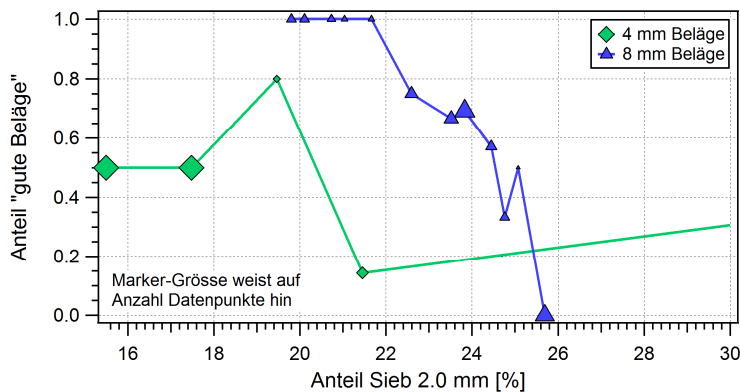


Abbildung 32: Anteil Beläge mit guten akustischen Belagsgütwerten bei Anteil Sieb 0.2 mm (Sandanteil) für 4-er und 8-er Beläge.

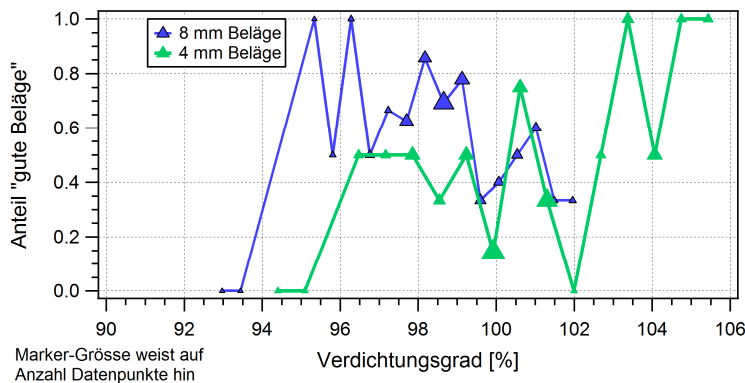


Abbildung 33: Anteil Beläge mit guten akustischen Belagsgütwerten bei Verdichtungsgrad für 4-er und 8-er Beläge.

## 6 ANALYSE DER ERWEITERTEN OPTIMA-WERTE

In Kapitel 4.3 sind die Analysen der Optima-Werte beschrieben und dargestellt. Um innerhalb eines bestimmten Wertes (z.B. bezüglich Fülleranteil) den Unterschied zwischen den Belägen mit tieferen und höheren akustischen Belagsgütwerten zu ermitteln, wurde zusätzlich ein t-Test (siehe Kapitel 3.3) angewendet. So wurde pro Wertebereich, wo tiefe und hohe akustische Belagsgütwerte vorkommen (d.h. grüne und rote Vierecke) ein t-Test angewendet über alle für diese beiden Gruppen vorhandenen Parameter um die Relevantesten zu eruieren.

Abbildung 34 zeigt das Resultat des t-Tests für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 4-er Beläge in Abbildung 7 des Wertebereichs für den Fülleranteil (Sieb 0.063 mm) von 6.5 bis 7.0 %. Die einzigen signifikanten Variablen, welche den Unterschied der beiden Gruppen bezüglich dem akustischen Belagsgütwert beschreiben sind: Reifen-Fahrbahn-Geräusch CPX bei der Frequenz 1'000 Hz (CPXcar1000TK\_SOL\_ageB\_4mm), Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt\_BK\_4mm) und Rohdichte (Rohdichte\_BK\_4mm). Dass der Parameter Reifen-Fahrbahn-Geräusch CPX bei der Frequenz 1'000 Hz als signifikant definiert werden ist nicht überraschend und wird in Kapitel 0 und 4.4 diskutiert. Nach Prüfung auf Kollinearität bleibt der Parameter Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt\_BK\_4mm) übrig. Für den signifikant resultierenden Parameter Hohlraumgehalt am Bohrkern sind die Verteilungen der beiden Gruppen in Abbildung 35 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Gruppe der "guten" 4-er Beläge tiefere Werte für Hohlraumgehalt aufweisen (kleiner 18 %) als die der "schlechten" 4-er Beläge, welche eher im Bereich grösser als 20 % liegen.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL AgeB 4mm	1	0.0514218	-2.15223
1	CPXcar1000TK SOL AgeB 4mm	0	0.00140973	-3.90647
2	CPXcar2000TK SOL AgeB 4mm	1	0.161013	-1.48029
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 4mm	0	0.00255541	-3.619
5	Rohdichte BK 4mm	0	0.00321182	3.50351
6	Schichtdicke 4mm	1	0.955818	0.0563692
7	Verdichtungsgrad 4mm	1	0.0781128	1.89911
8	Feuchte 50	1	0.597409	-0.540411
9	Temperatur 50	1	0.33042	-1.01246
10	Wind 50	1	0.871444	-0.164788
11	Bindemittelanteil MW	1	0.076363	-1.90394
12	Raumdicke MPK MW	1	0.0628645	2.019
13	Sieb00 063 MW	1	0.700611	0.392622
14	Sieb02 000 MW	1	0.572042	0.581164
15	Sieb04 000 MW	1	0.0613333	2.11185
16	Sieb08 000 MW	1		
17		0	0	0
18	a Fahrzeit	1	0.296606	-1.08148
19	Steigung 4mm	1	0.652799	0.45921
20		0	0	0
21	AnzUeberroll Ges	1	0.701239	-0.39121
22	AnzUeberroll N2	1	0.555078	0.607454

Abbildung 34: Resultat des t-Tests beim Sandanteil (Anteil Sieb 0.063 mm) im Bereich von 6.5 und 7.0 % für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 4-er Beläge in Abbildung 7

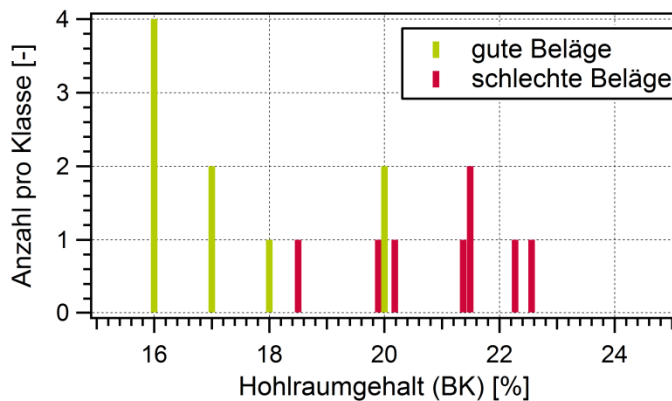


Abbildung 35: Verteilungen Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt BK; mit Ausmessverfahren gemessen) mit Fülleranteil (Siebdurchgang bei Analysesieb 0.063 mm) im Bereich von 6.5 und 7.0 % für die beiden Gruppen der "guten" (grün) und "schlechten" (rot) 4-er Beläge.

Abbildung 36 zeigt das Resultat des t-Tests für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 4-er Beläge in Abbildung 7 des Wertebereichs für den Fülleranteil (Sieb 0.063 mm) von 5 bis 6 %. Es resultiert hauptsächlich die Anzahl Überrollungen des Schwerverkehrs (N2; AnzUeberroll\_N2), welche den Unterschied der beiden Gruppen bezüglich dem akustischen Belagsgütwert signifikant beschreiben. Dies bedeutet, dass eine grössere Anzahl an Überrollungen des Schwerverkehrs das Risiko für "schlechte" Beläge bei 4-er Belägen mit Feinanteil bei 5 bis 6 % erhöht.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL AqeB 4mm	1	0.777615	-0.286909
1	CPXcar1000TK SOL AqeB 4mm	0	4.7421e-09	-11.3663
2	CPXcar2000TK SOL AqeB 4mm	0	9.19796e-06	-6.17545
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 4mm	1	0.873575	-0.161702
5	Rohdichte BK 4mm	1	0.389811	0.881226
6	Schichtdicke 4mm	1	0.0538767	2.10719
7	Verdichtungsgrad 4mm	1	0.526381	0.646103
8	Feuchte 50	1	0.785361	-0.276441
9	Temperatur 50	1	0.0570583	2.03313
10	Wind 50	1	0.97607	0.0304161
11	Bindemittelanteil MW	1	0.135352	-1.58741
12	Raumdicke MPK MW	1	0.495186	0.698819
13	Sieb00 063 MW	1	0.167851	-1.5
14	Sieb02 000 MW	1	0.288686	-1.09665
15	Sieb04 000 MW	1	0.0674867	-1.95272
16	Sieb08 000 MW	1		
17		0	0	0
18	a Fahrzeit	0	0.00042325	4.42841
19	Steigung 4mm	1	0.799081	0.258736
20		0	0	0
21	AnzUeberroll Ges	1	0.0782994	-1.8803
22	AnzUeberroll N2	0	0.00699856	-3.2725

Abbildung 36: Resultat des t-Tests beim Sandanteil (Anteil Sieb 0.063 mm) im Bereich von 5 und 6 % für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 4-er Beläge in Abbildung 7

Abbildung 37 zeigt das Resultat des t-Tests für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 4-er Beläge in Abbildung 8 des Wertebereichs für den Sandanteil (Sieb 2.0 mm) von 11 bis 13 %. Die einzigen signifikanten Variablen, welche den Unterschied der beiden Gruppen bezüglich dem akustischen Belagsgütwert beschreiben sind: Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt\_BK\_4mm) und Rohdichte am Bohrkern (Rohdichte\_BK\_4mm). Nach Prüfung auf Kollinearität bleibt der Parameter Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt\_BK\_4mm) übrig. Für den signifikant resultierenden Parameter Hohlraumgehalt am Bohrkern sind die Verteilungen der beiden Gruppen in Abbildung 38 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Gruppe der "guten" 4-er Be-

läge eher tiefere Werte für Hohlraumgehalt aufweisen (kleiner 18 %) als die der "schlechten" 4-er Beläge, welche eher im höheren Bereich liegen.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL AqeB 4mm	1	0.105902	-1.86317
1	CPXcar1000TK SOL AqeB 4mm	1	0.11737	-1.71337
2	CPXcar2000TK SOL AqeB 4mm	1	0.513302	-0.68234
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 4mm	0	0.0462893	-2.31607
5	Rohdichte BK 4mm	0	0.0467399	2.31416
6	Schichtdicke 4mm	1	0.283974	1.13525
7	Verdichtungsgrad 4mm	1	0.155818	1.56887
8	Feuchte 50	1	0.810202	-0.247616
9	Temperatur 50	1	0.600834	-0.545654
10	Wind 50	1	0.430993	-0.81974
11	Bindemittelanteil MW	1	0.0907769	-1.96745
12	Raumdicke MPK MW	1	0.124385	1.7703
13	Sieb00 063 MW	1	0.15935	-1.62535
14	Sieb02 000 MW	1	0.0674967	-2.04869
15	Sieb04 000 MW	1	0.784592	0.279266
16	Sieb08 000 MW	1		
17		0	0	0
18	a Fahrzeit	1	0.117305	-1.68151
19	Steigung 4mm	1	0.949653	0.0645733
20		0	0	0
21	AnzUeberroll Ges	1	0.53254	-0.658738
22	AnzUeberroll N2	1	0.490214	0.71018

Abbildung 37: Resultat des t-Tests beim Sandanteil (Anteil Sieb 2.0 mm) im Bereich von 11 und 13 % für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 4-er Beläge in Abbildung 8

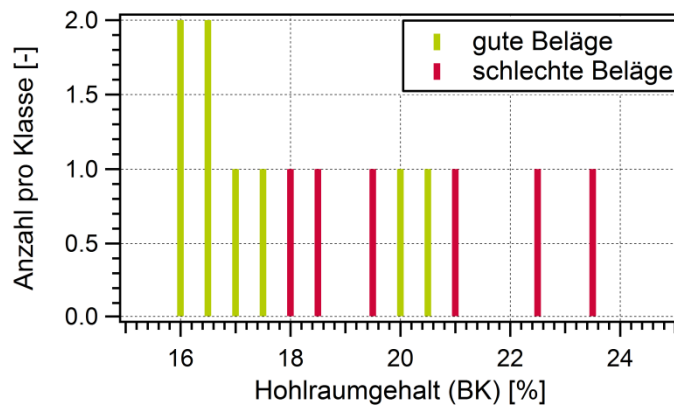


Abbildung 38: Verteilungen Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt BK; mit Ausmessverfahren gemessen) mit Sandanteil (Siebdurchgang bei Analysesieb 2.0 mm) im Bereich von 11 und 13 % für die beiden Gruppen der "guten" (grün) und "schlechten" (rot) 4-er Beläge.

Abbildung 39 zeigt das Resultat des t-Tests für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 4-er Beläge in Abbildung 8 des Wertebereichs für den Sandanteil (Sieb 2.0 mm) von 46 bis 50 %. Es resultiert hauptsächlich die Anzahl Überrollungen des Schwerverkehrs (N2; AnzUeberroll\_N2), welche den Unterschied der beiden Gruppen bezüglich dem akustischen Belagsgütewert signifikant beschreiben. Dies bedeutet, dass eine grössere Anzahl an Überrollungen des Schwerverkehrs das Risiko für "schlechte" Beläge bei 4-er Belägen mit Sandanteil bei 46 bis 50 % erhöht.



Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL AgeB 4mm	1	0.517454	-0.657859
1	CPXcar1000TK SOL AgeB 4mm	0	4.0157e-10	-11.033
2	CPXcar2000TK SOL AgeB 4mm	0	1.05731e-06	-6.68275
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 4mm	1	0.762747	0.306169
5	Rohdichte BK 4mm	1	0.797371	0.259913
6	Schichtdicke 4mm	1	0.0614621	1.97878
7	Verdichtungsgrad 4mm	1	0.790583	0.268933
8	Feuchte 50	1	0.64694	-0.464895
9	Temperatur 50	1	0.106611	1.69103
10	Wind 50	1	0.463906	0.745444
11	Bindemittelanteil MW	1	0.137428	-1.54918
12	Raumdichte MPK MW	1	0.127897	1.59852
13	Sieb00_063 MW	1	0.16397	-1.44822
14	Sieb02_000 MW	1	0.295694	-1.07137
15	Sieb04_000 MW	1	0.0824205	-1.82254
16	Sieb08_000 MW	1		
17		0	0	0
18	a Fahrzeit	0	0.0341429	2.26027
19	Steigung 4mm	1	0.430712	0.803281
20		0	0	0
21	AnzUeberroll Ges	1	0.0607508	-2.01151
22	AnzUeberroll N2	0	0.039343	-2.24399

Abbildung 39: Resultat des t-Tests beim Sandanteil (Anteil Sieb 2.0 mm) im Bereich von 46 und 50 % für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 4-er Beläge in Abbildung 8

Abbildung 40 zeigt das Resultat des t-Tests für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 8-er Beläge in Abbildung 9 des Wertebereichs für den Fülleranteil (Sieb 0.063 mm) von 7 bis 7.5 %. Mehrere signifikante Variablen resultieren aus diesem t-Test welche den Unterschied der beiden Gruppen bezüglich dem akustischen Belagsgütwert beschreiben. Nach Prüfung auf Kollinearität und Plausibilität bleiben die Parameter Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt\_BK\_8mm) und Schichtdicke (Schichtdicke\_8mm). Für den signifikant resultierenden Parameter Schichtdicke sind die Verteilungen der beiden Gruppen in Abbildung 41 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Gruppe der "guten" 8-er Beläge eher tiefe Schichtdicken im Bereich um 30 mm aufweisen und die der "schlechten" 8-er Beläge eher im Bereich um 40 mm liegen.

Abbildung 42 zeigt den als signifikant resultierenden Parameter Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt\_BK\_8mm) für die beiden Gruppen "gute" und "schlechte" Beläge mit Fülleranteil (Sieb 0.063 mm) von 7 bis 7.5 %. Es ist zu erkennen, dass ein Minimum an Hohlraumgehalt am Bohrkern von 8 % (gemessen mit Tauchwägevverfahren) vorhanden sein muss um in diesem Bereich von Fülleranteil auch 3 Jahre nach Einbau einen akustisch wirksamen 8-er Belag gewährleisten zu können.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL aqeB 8mm	1	0.385625	0.876139
1	CPXcar1000TK SOL aqeB 8mm	0	2.60768e-10	-8.87327
2	CPXcar2000TK SOL aqeB 8mm	0	4.03394e-09	-8.28141
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 8mm	0	0.000267355	3.94219
5	Rohdichte BK 8mm	0	0.000559466	-3.71362
6	Schichtdicke 8mm	0	0.000100303	-4.25211
7	Verdichtungsrad 8mm	1	0.062128	-1.91352
8	Feuchte 50	1	0.454119	0.755664
9	Temperatur 50	1	0.415592	-0.821355
10	Wind 50	1	0.69574	0.395196
11	Ausfuellungsrad MW	0	0.00197036	-3.28826
12	Bindemittelanteil MW	1	0.234264	-1.20833
13	Fließwert MW	0	1.24899e-07	6.27934
14	Hohlraumgehalt MPK MW	0	0.0029211	3.14634
15	Raumdicke MPK MW	0	0.00822735	-2.80044
16	Rohdichte Mischgut MW	1	0.661668	0.442053
17	Sieb00 063 MW	0	0.00130051	-3.42647
18	Sieb00 500 MW	0	0.00447796	-3.0726
19	Sieb02 000 MW	0	0.000596728	-3.69566
20	Sieb04 000 MW	1	0.0844381	-1.76281
21	Sieb08 000 MW	1	0.14614	-1.49891
22		0	0	0
23		0	0	0
24	Temperatur insitu MW	0	0.0012803	3.50831
25	a Fahrzeit	0	0.000252779	4.33155
26	Steigung 8mm	1	0.870016	-0.164595
27		0	0	0
28		0	0	0
29	AnzUeberroll Ges	1	0.594623	0.536938
30	AnzUeberroll N2	1	0.496633	0.685974

Abbildung 40: Resultat des t-Tests beim Sandanteil (Anteil Sieb 0.063 mm) im Bereich von 7 und 7.5 % für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 8-er Beläge in Abbildung 9

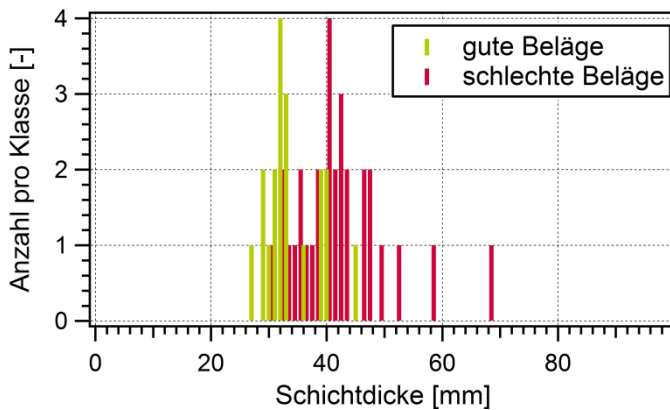


Abbildung 41: Verteilungen Schichtdicke mit Füllanteil (Siebdurchgang bei Analysesieb 0.063 mm) im Bereich von 7 und 7.5 % für die beiden Gruppen der "guten" (grün) und "schlechten" (rot) 8-er Beläge.

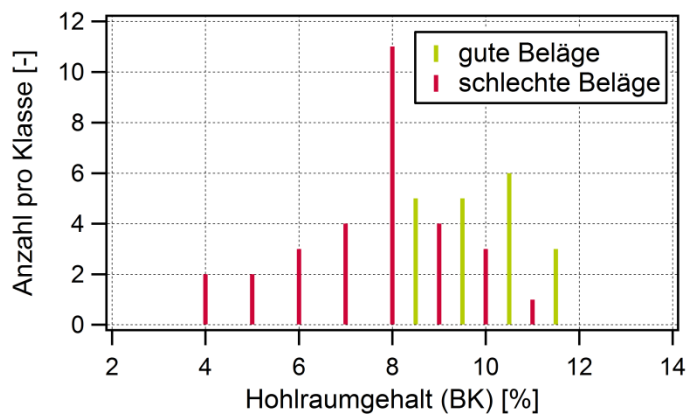


Abbildung 42: Verteilungen Hohlraumgehalt am Bohrkern (Hohlraumgehalt BK; mit Tauchwägetechnik gemessen) mit Füllanteil (Siebdurchgang bei Analysesieb 0.063 mm) im Bereich von 7 und 7.5 % für die beiden Gruppen der "guten" (grün) und "schlechten" (rot) 8-er Beläge.

Abbildung 43 zeigt das Resultat des t-Tests für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 8-er Beläge in Abbildung 10 des Wertebereichs für den Sandanteil (Sieb 2.0 mm) von 11 bis 13.5 %. Die einzigen signifikanten Variablen, welche den Unterschied der beiden Gruppen bezüglich dem akustischen Belagsgütwert beschreiben sind: Reifen-Fahrbahn-Geräusch CPX bei der Frequenz 1'000 Hz (CPXcar1000TK\_SOL\_ageB\_8mm) und 2'000 Hz (CPXcar2000TK\_SOL\_ageB\_8mm), Schichtdicke (Schichtdicke\_8mm) und Zeit des Mischguttransportes von der Mischgutzentrale zur Baustelle (a\_Fahrzeit). Dass die beiden Parameter Reifen-Fahrbahn-Geräusch CPX bei der Frequenz 1'000 Hz und 2'000 Hz als signifikant definiert werden ist nicht überraschend und wird in Kapitel 0 und 4.4 diskutiert. Für den signifikant resultierenden Parameter Schichtdicke sind die Verteilungen der beiden Gruppen in Abbildung 44 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Gruppe der "guten" 8-er Beläge eher tiefe Schichtdicken im Bereich um 30 mm aufweisen und die der "schlechten" 8-er Beläge eher im Bereich um 40 mm liegen.

Point	testedWave	tTestH0Acc	tTest_P	tTest_t_stat
0	CPXcar500TK SOL aceB 8mm	1	0.0516907	2.01097
1	CPXcar1000TK SOL aceB 8mm	0	4.92163e-09	-7.52543
2	CPXcar2000TK SOL aceB 8mm	0	7.2655e-07	-5.87693
3	KI2	1		-inf
4	Hohlraumgehalt BK 8mm	1	0.111642	1.63872
5	Rohdichte BK 8mm	1	0.0722305	-1.86399
6	Schichtdicke 8mm	0	0.0246704	-2.34758
7	Verdichtungsgrad 8mm	1	0.0941414	-1.724
8	Feuchte 50	1	0.123566	1.57534
9	Temperatur 50	1	0.35751	-0.934343
10	Wind 50	1	0.142666	-1.49702
11	Ausfüllungsgrad MW	1	0.788842	0.269631
12	Bindemittelanteil MW	1	0.966269	-0.0425541
13	Fliesswert MW	1	0.0876325	1.75103
14	Hohlraumgehalt MPK MW	1	0.724699	-0.354746
15	Raumdichte MPK MW	1	0.963119	0.0465407
16	Rohdichte Mischgut MW	1	0.588306	-0.545706
17	Sieb00 063 MW	1	0.291231	1.07033
18	Sieb00 500 MW	1	0.420848	0.813335
19	Sieb02 000 MW	1	0.318761	1.01595
20	Sieb04 000 MW	1	0.521414	0.646868
21	Sieb08 000 MW	1	0.377558	-0.892466
22		0	0	0
23		0	0	0
24	Temperatur insitu MW	1	0.654692	0.450944
25	a Fahrzeit	0	7.06835e-05	4.5742
26	Steigung 8mm	1	0.44247	-0.777095
27		0	0	0
28		0	0	0
29	AnzUeberroll Ges	1	0.918212	-0.103337
30	AnzUeberroll N2	1	0.916728	-0.105252

Abbildung 43: Resultat des t-Tests beim Sandanteil (Anteil Sieb 2.0 mm) im Bereich von 11 und 13.5 % für die beiden Gruppen der "guten" und "schlechten" 8-er Beläge in Abbildung 10

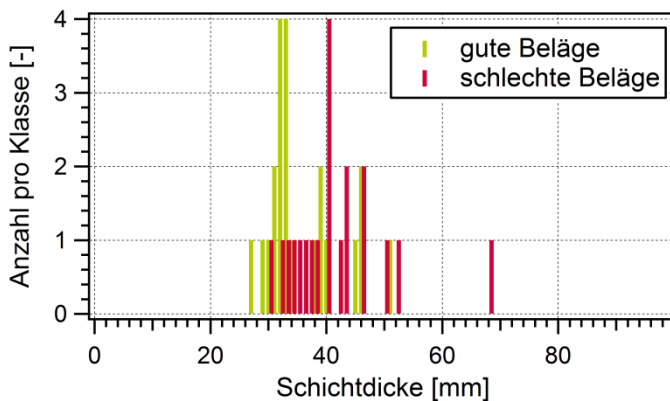


Abbildung 44: Verteilungen Schichtdicke mit Sandanteil (Siebdurchgang bei Analysesieb 2.0 mm) im Bereich von 11 und 13.5 % für die beiden Gruppen der "guten" (grün) und "schlechten" (rot) 8-er Beläge.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- ASTM F762 / F762M-08. (2014). Standard Test Method for Determining Change in Groove (or Void) Depth With Distance Traveled for Passenger Car Tires. *ASTM International, West Conshohocken, PA*. Retrieved from [www.astm.org](http://www.astm.org)
- Bühlmann, E., Bürgisser, P., Ziegler, T., Angst, C., & Beckenbauer Thomas. (2017). *Forschungspaket lärarme Beläge innerorts Teilprojekt (TP 3): Lanzeitmonitoring. mobilityplatform*.
- Bühlmann, E., & Ziegler, T. (2012). Interpreting measured acoustic performance on Swiss low-noise road surfaces using a tyre / road interaction model, 1–6.
- Dumont, A., & Junod, A. (2004). Formulation et optimisation des formules d'enrob{é}. EPFL-LAVOC.
- Hintsteiner, E. (1996). *Asphalt-Handbuch*. GESTRATA. Retrieved from <https://books.google.ch/books?id=Xkd3SwAACAAJ>
- Stahel, W. (2002). *Statistische Datenanalyse*. Vieweg+Teubner Verlag. <http://doi.org/10.1007/978-3-322-96962-0>
- VSS 640436:2015 - Semidichtes Mischgut und Deckschichten. (2015).