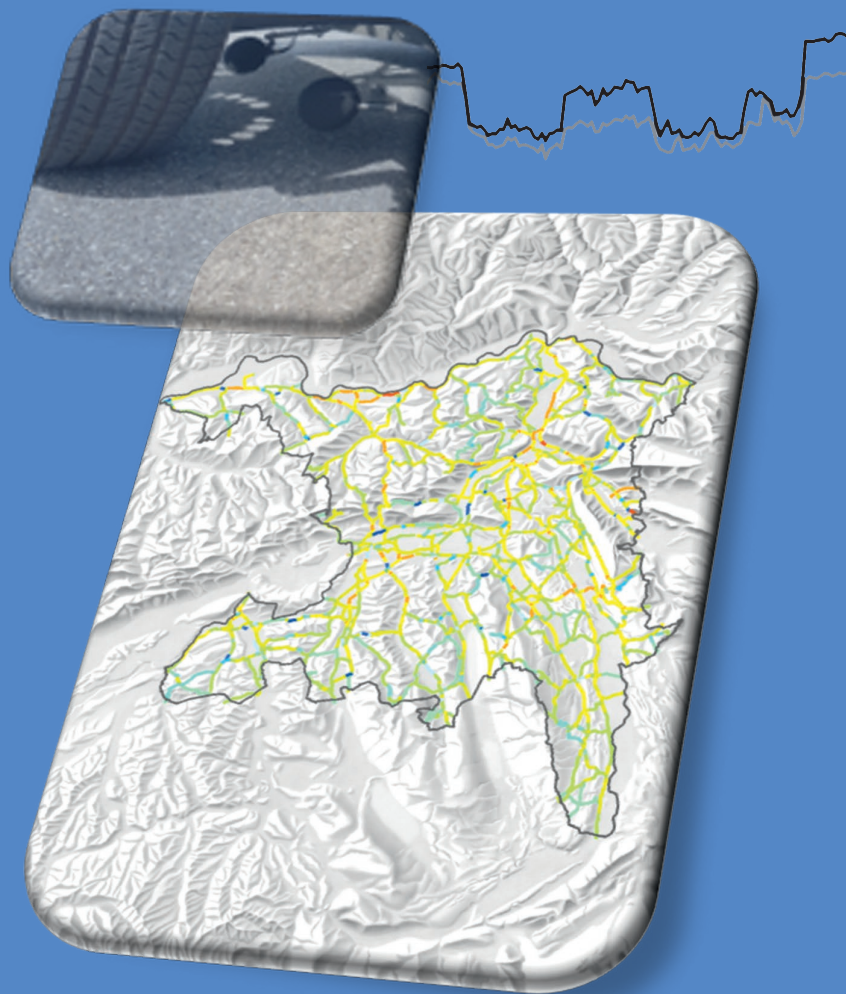


# **AKUSTIK DER STRASSENBELÄGE**

## GRUNDLAGEN, ERFAHRUNGEN UND PRAXIS KANTON AARGAU

2. Auflage



Tina Saurer  
Erik Bühlmann  
Dejan Milo  
Hanspeter Gloor

# AKUSTIK DER STRASSENBELÄGE

GRUNDLAGEN, ERFAHRUNGEN UND PRAXIS KANTON AARGAU

August 2020, V1.0

2. Auflage 2023

Anzahl Exemplare:

1. Auflage 2020: 185

2. Auflage 2023: 100

Das Buch kann bei Dejan Milo bezogen werden (PDF auf Anfrage).

Kontakt: [dejan.milo@ag.ch](mailto:dejan.milo@ag.ch); 062 835 36 84



**Grolimund + Partner AG**

Tina Saurer

Erik Bühlmann



**Departement Bau, Verkehr und Umwelt  
Abteilung Tiefbau / Sektion Lärmsanierung**

Dejan Milo

Hanspeter Gloor

---

Printed by AST&FISCHER AG im Auftrag der G+P AG

## **Die Autoren**

### **Tina Saurer**

Tina Saurer (Dipl. phil. nat. Geografin) arbeitet seit 2008 in den Fachbereichen Belagsakustik und Forschung und Entwicklung des spezialisierten Ingenieurbüros Grolimund + Partner AG und teilt mit Erik Bühlmann die Teamleitung des Fachbereichs Belagsakustik. Tina Saurer hat beim Aufbau des Fachbereiches Belagsakustik mitgearbeitet. Weiter führt sie nationale sowie internationale Forschungstätigkeiten bezüglich CPX und lärmarme Beläge (LAB) aus.

Kontakt: tina.saurer@grolimund-partner.ch; 031 356 20 04

### **Erik Bühlmann**

Erik Bühlmann (Dipl. phil. nat. Geograf, MBA, Dipl. Akustiker SGA) ist seit über 10 Jahren bei der Grolimund + Partner AG massgeblich für Forschungs- und Entwicklungsprojekte in diversen Bereichen verantwortlich. Er ist Teamleiter des Fachbereichs Forschung und Entwicklung und Co-Teamleiter des Bereichs Belagsakustik. Erik Bühlmann ist Mitglied der VSS Fachkommission FK 3, sowie Präsident der VSS Normierungs- und Forschungskommission (NFK) 3.5 Messverfahren und Messtechnik Fahrbahneigenschaften. Zudem ist er aktives Mitglied der ISO WG 33 und der SNV 103 (Akustik).

Kontakt: erik.buehlmann@grolimund-partner.ch; 031 356 20 06

### **Dejan Milo**

Dejan Milo (Dipl. Geophysik ETH/SIA) arbeitet seit mehr als 20 Jahren beim Amt für Tiefbau (ATB) Kanton Aargau in der Fachstelle Lärmsanierung und leitet diese seit dem Jahr 2020. Er ist seit Beginn bei der Forschung bezüglich lärmarme Beläge mit dabei und konnte in seiner Laufbahn viel wertvolle Erfahrung im Bereich Lärmermittlung und Lärmvollzug sammeln.

Kontakt: dejan.milo@ag.ch; 062 835 36 84

### **Hanspeter Gloor**

Hanspeter Gloor (Dipl. Ing. HTL/SIA) hat die Fachstelle Lärmsanierung des ATB Kanton Aargau von 2010 bis 2020 geleitet. Schon früh hat er im Kanton Aargau die lärmarmen Beläge in der Praxis vorangetrieben und übernahm somit schweizweit die Vorreiterrolle im Bereich der lärmarmen Beläge.

## Vorwort

Der Kanton Aargau, insbesondere dessen Sektion Lärmsanierung, beschäftigt sich seit vielen Jahren intensiv mit dem Thema *Akustik der Strassenbeläge*. Einerseits werden die akustischen Eigenschaften der bestehenden Beläge anhand von CPX-Messungen flächendeckend über das gesamte Kantonsstrassennetz überwacht. Andererseits setzt sich die Sektion Lärmsanierung stark für die Weiterentwicklung und Optimierung von leisen Strassenbelägen ein. Der grosse Erfahrungsschatz im Bereich Akustik der Strassenbeläge wird anhand der vorliegenden Dokumentation im Sinne einer Arbeitshilfe zusammengestellt. Dabei handelt es sich um eine Momentaufnahme, welche den aktuellen Wissensstand aufzeigt. Ziel der vorliegenden Dokumentation ist, die gewonnenen Erkenntnisse zur Herstellung und zum Einbau von leisen Strassenbelägen zu beleuchten, sowie Hinweise bezüglich der Planung und praktischen Realisierung bereitzustellen. Des Weiteren befasst sich die Dokumentation mit den Vor- und Nachteilen der einzelnen Technologien und stellt den Strassenbauämtern Handlungsempfehlungen zur Verfügung. Zudem werden verschiedene Messverfahren und Messmethoden erläutert. Die Dokumentation richtet sich an alle im Bereich Akustik arbeitenden Personen und soll einen vertieften Einblick in das Thema Akustik der Strassenbeläge geben.

---

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	3
1. GRUNDLAGEN.....	4
1.1 STRASSENLÄRM.....	4
1.1.1 <i>Einfluss Geschwindigkeit</i> .....	5
1.1.2 <i>Einfluss Fahrverhalten</i> .....	9
1.2 REIFEN-FAHRBAHN-GERÄUSCHE.....	11
1.2.1 <i>Lärmentstehungsmechanismen</i> .....	11
1.2.2 <i>Spektrum der Reifen-Fahrbahn-Geräusche</i> .....	13
1.2.3 <i>Temperatureinfluss</i> .....	13
1.3 WIRKUNGSWEISE LEISER STRASSENBELÄGE.....	14
2. LEISE STRASSENBELÄGE.....	16
2.1 DEFINITION EINES LEISEN STRASSENBELAGES.....	16
2.2 ANFORDERUNG AN LEISE DECKSCHICHTEN.....	17
2.3 ANFORDERUNGEN AN DIE QUALITÄT DES STRASSEN OberBAUS.....	18
2.4 LEISE STRASSENBELÄGE IN DER SCHWEIZ.....	19
2.4.1 <i>Poröse Asphalte PA</i> .....	19
2.4.2 <i>Semidichte Asphalte SDA</i> .....	19
2.4.3 <i>Texturoptimierte Bauweisen</i> .....	20
2.4.4 <i>Trends in der Forschung zu leisen Strassenbelägen</i> .....	24
2.4.5 <i>Potential für weitere Optimierungen</i> .....	25
2.5 SDA ALS PRÄFERIERTE BAUWEISE IM KANTON AARGAU.....	25
2.5.1 <i>Untertypen gemäss Norm</i> .....	26
2.5.2 <i>Ausführungsbestimmungen zur Sicherstellung der akustischen Leistung</i> .....	26
2.6 ERFOLGSFAKTOREN FÜR REALISIERUNG.....	29
2.6.1 <i>Gestaltung von belagsfremden Elementen</i> .....	29
2.6.2 <i>Lage der Übergänge zum angrenzenden Belag</i> .....	29
2.6.3 <i>Betonelemente in der Fahrbahn</i> .....	31
2.6.4 <i>Anbringen von Fahrbahnmarkierungen</i> .....	32
2.6.5 <i>Gestaltung von Schachtabdeckungen</i> .....	33
2.6.6 <i>Lichtsignalanlagen mit Detektoren</i> .....	33
2.6.7 <i>Tramschienen</i> .....	34
2.7 EINFLUSSFAKTOREN AUF DIE AKUSTISCHE ALTERUNG.....	34
2.8 MASSNAHMEN ZUR VERLÄNGERUNG DER AKUSTISCHEN LEBENS DAUER.....	35
2.8.1 <i>Reinigung von SDA Belägen</i> .....	35
2.8.2 <i>Mikrofräsen von SDA Belägen</i> .....	35
2.8.3 <i>Weitere Möglichkeiten</i> .....	36
3. AKUSTISCHE ERFOLGSKONTROLLE.....	37
3.1 NORMEN UND GRUNDLAGENDOKUMENTE ZU DEN AKUSTISCHEN MESSVERFAHREN.....	37
3.2 AKUSTISCHE CHARAKTERISIERUNG VON STRASSENBELÄGEN.....	37
3.3 MESSVERFAHREN.....	40
3.3.1 <i>Nahfeld-Anhängermessungen - close-proximity (CPX)</i> .....	40
3.3.2 <i>Statistische Vorbeifahrtsmethode (SPB)</i> .....	44

---

---

3.3.3	Stichprobe Emissionsmessungen (SEM) .....	44
3.3.4	Vor- und Nachteile Messverfahren .....	45
3.3.5	Auswahl Messverfahren .....	46
3.4	ANALYSEN UND ERMITTLUNG OPTIMIERUNGSPOTENTIAL .....	48
3.4.1	Akustische Wirkungsanalysen .....	48
3.4.2	Analyse zum Schmutzeintrag in leisen Strassenbelägen .....	52
3.4.3	CPX zur Klassierung der akustischen Leistung von semidichten Asphalten .....	54
3.4.4	Analysen zum kosteneffektiven Einsatz von leisen Belägen (FAME) .....	55
4.	BAUTECHNISCHE ERFOLGSKONTROLLE .....	56
4.1	MISCHGUT- UND BOHRKERNUNTERSUCHUNGEN .....	56
4.1.1	Methoden zur Hohlraumbestimmung .....	56
4.1.2	Analyse der Korngrößenverteilung der Rezeptur – Akustikfaktor Rezeptur .....	57
4.2	POLIERWIDERSTAND .....	58
4.3	BITUMENEIGENSCHAFTEN .....	59
4.4	MASTIXEIGENSCHAFTEN .....	61
5.	ERHEBUNG UND BEREITSTELLUNG AKUSTISCHER GRUNDLAGEN IM KANTON AARGAU .....	62
5.1	FLÄCHENDECKENDE AKUSTISCHE ZUSTANDSERFASSUNG CPX .....	62
5.1.1	Durchführung der Messung .....	62
5.1.2	Datenauswertung und Umrechnung zu StL-86+/SonRoad18 .....	62
5.1.3	Datenaufbereitung und Abgabe .....	64
5.1.4	Verwendung der Daten in Projekten .....	65
5.2	AKUSTISCHES MONITORING CPX LEISE BELÄGE .....	65
5.2.1	Durchführung der Messung .....	66
5.2.2	Datenauswertung und Umrechnung zu StL-86+/SonRoad18 .....	67
5.3	ÜBERPRÜFEN ANLAGEWERT STRASSEN .....	69
6.	ERKENNTNISSE AUS DER PRAXIS .....	70
6.1	AKUSTISCHE WIRKUNG VON SDA BELÄGEN IM KANTON AARGAU .....	70
6.2	AKUSTISCHE WIRKUNG STRASSENBELÄGE IN KNOTEN UND KREISELN .....	71
6.3	LEISE REIFEN AUF LEISEN STRASSENBELÄGEN .....	72
7.	STRATEGIE – LEISE STRASSENBELÄGE OPTIMAL EINSETZEN .....	74
7.1	EINBINDUNG DER ENTSCHEIDENDEN AKTEURE .....	74
7.2	AUSWAHL DER TECHNOLOGIEN UND DER STRASSENABSCHNITTE .....	74
7.3	MONITORING DER STRASSENBELÄGE UND PLANUNG DES ERSATZES .....	75
8.	SCHLUSSWORT .....	76
9.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	77
10.	QUELLENVERZEICHNIS .....	80

---

## Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Begriff</b>
A0	Ausserorts
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BK	Bohrkern
CPX	Close-Proximity
CT	Computertomographie
DB	Dezibel
DTV	Durchschnittlicher täglicher Verkehr
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Fz	Fahrzeug
GA	Gussasphalt
H1	Testreifen CPX Lastkraftwagen LKW
HR	Hohlraumgehalt
Hz	Hertz
IO	Innerorts
ISO	International Organization for Standardization
LAB	Leiser Strassenbelag (Lärmarmer Belag)
LCPX	CPX-Pegel
Leq	äquivalenter Dauerschallpegel
LKW	Lastkraftwagen
Lmax	Maximalpegel
LSP	Lärmsanierungsprojekt
LSV	Lärmschutzverordnung
M	Marshall
OB	Oberflächenbehandlung
P1	Testreifen CPX Personenwagen PW
PA	Porous asphalt
PmB	Polymermodifizierte Bindemittel
PSV	Polished Stone Value
PW	Personenwagen
PWS	Prüfverfahren nach Wehner/Schulze
SDA 4	Semi dichter Asphalt mit Grösstkorn 4mm
SDA 8	Semi dichter Asphalt mit Grösstkorn 8mm
SEM	Stichproben-Emissions-Messung
ShoreA	ShoreHärte / Kennwert für Gummihärte
SPB	Statistical Pass-by
SPERoN	Statistical and Physical Explanation of Rolling Noise
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute

## 1. Grundlagen

Um leise Strassenbeläge erfolgreich in der Praxis umsetzen zu können, ist es von grosser Bedeutung, dass die wichtigsten Grundlagen zur Entstehung von Strassenlärm und Reifen-Fahrbahngeräuschen, sowie zur Wirkungsweise von leisen Strassenbelägen bekannt sind.

### 1.1 Strassenlärm

In der Schweiz ist am Tag jede siebte und in der Nacht jede achte Person von übermässigem Strassenlärm betroffen [1]. Neben den Luftströmungsgeräuschen am Chassis stellen die beiden wichtigsten Quellen des Strassenlärms die Rollgeräusche (Schallentstehung durch die Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche) und die Antriebsgeräusche (Geräusche von Motor, Getriebe und Auspuff) dar.

Neueste Forschungen haben ergeben, dass die Rollgeräusche bei Personenwagen bei konstanter Fahrweise bereits ab einer Geschwindigkeit von ca. 16 km/h dominieren [2]. Bei LKW ist dies in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse bei Geschwindigkeiten von ca. 42 km/h der Fall [3]. Bei anderen Fahrzeugtypen (Traktoren, Motorrädern und Baumaschinen) ist zu erwarten, dass die Crossover-Geschwindigkeit (Geschwindigkeit, ab welcher der Anteil Rollgeräusch den Anteil der Antriebsgeräusch übersteigt) höher liegt als bei den LKW Fahrzeugklassen oder die Antriebsgeräusche über alle Geschwindigkeiten dominieren. Ähnlich verhalten sich sehr laute Fahrzeuge (Sportwagen, modifizierte oder getunte Fahrzeuge etc.), bei denen die Antriebsgeräusche oft über alle Geschwindigkeiten dominieren.

Der Wichtigkeit des Rollgeräuschs bei der Entstehung von Strassenlärm (bereits ab geringen Fahrgeschwindigkeiten) zeigt den grossen Einfluss des Strassenbelags.

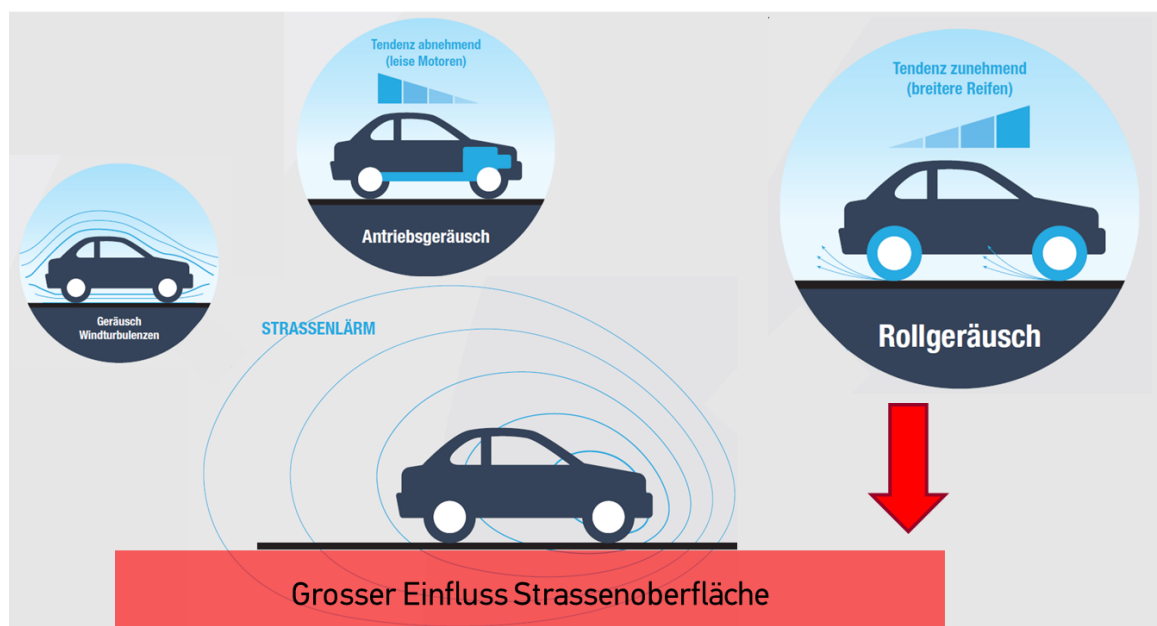


Abbildung 1: Einfluss Strassenoberfläche bei der Entstehung von Strassenlärm für Geschwindigkeiten ab 30 km/h; Grösse der Piktogramme in Abhängigkeit ihres Beitrag zur Gesamtschallenergie (Quelle: [4], adaptiert Grolimund + Partner AG)



Entsprechend sind sowohl im Innerortsbereich (bei signalisierten Geschwindigkeiten von 50 km/h und 30 km/h) wie auch im Ausserortsbereich und auf Autobahnen leise Beläge eine effektive Lärmschutzmassnahme. Allerdings muss beachtet werden, dass im Innerortsbereich bei sehr hohen LKW-Anteilen oder einer grossen Anzahl von sehr lauten Fahrzeugen, die durch leise Strassenbeläge erreichte Lärminderung kompromittiert werden kann.

### 1.1.1 Einfluss Geschwindigkeit

In der Studie [2] wurden 14 Fahrzeuge mit Baujahr zwischen 2002 und 2015 bezüglich der Schallentstehung bei unterschiedlicher Gangwahl und Fahrgeschwindigkeit untersucht und gemäss ihrer Häufigkeit auf Schweizer und Europäischen Strassen gewichtet. In der folgenden Abbildung sind die Emissionen einer durchschnittlichen europäischen Fahrzeugflotte dargestellt. Die schwarze Linie beschreibt die Gesamtlärmemissionen, die orange Linie stellt den Anteil des Rollgeräusches und die grüne Linie den Anteil des Antriebsgeräusches dar. Die Crossover-Geschwindigkeit, das ist die Geschwindigkeit, ab welcher der Anteil Rollgeräusch höher ist als der Anteil des Antriebsgeräusches, liegt bei 15.7 km/h. [2]

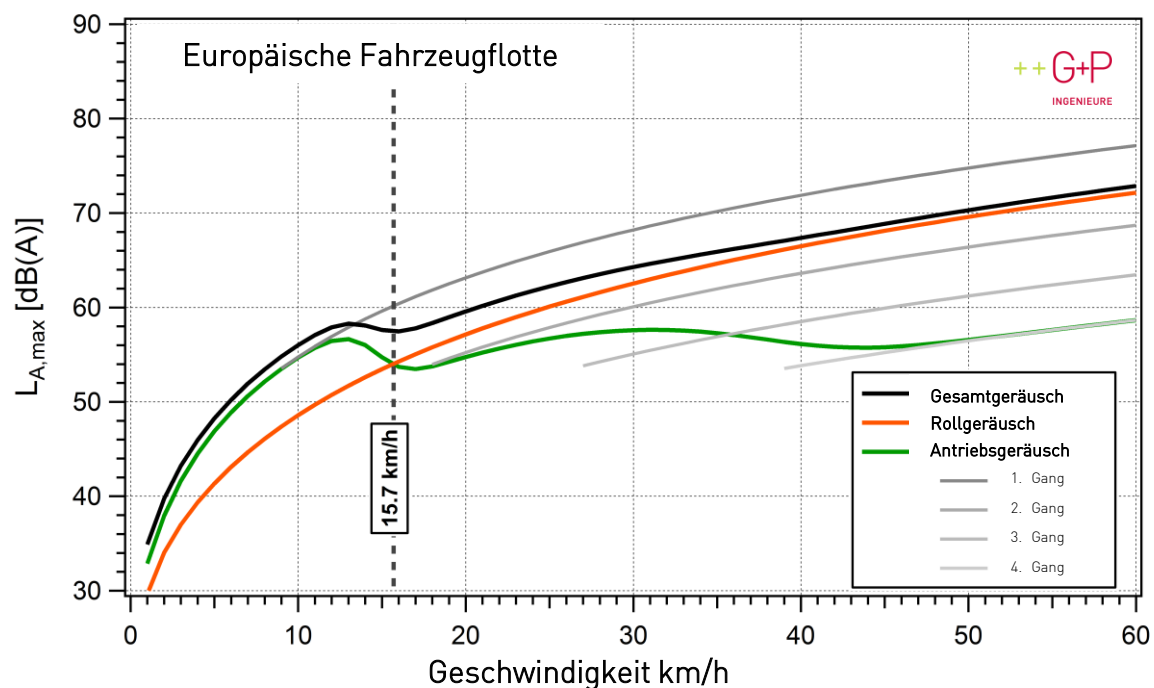
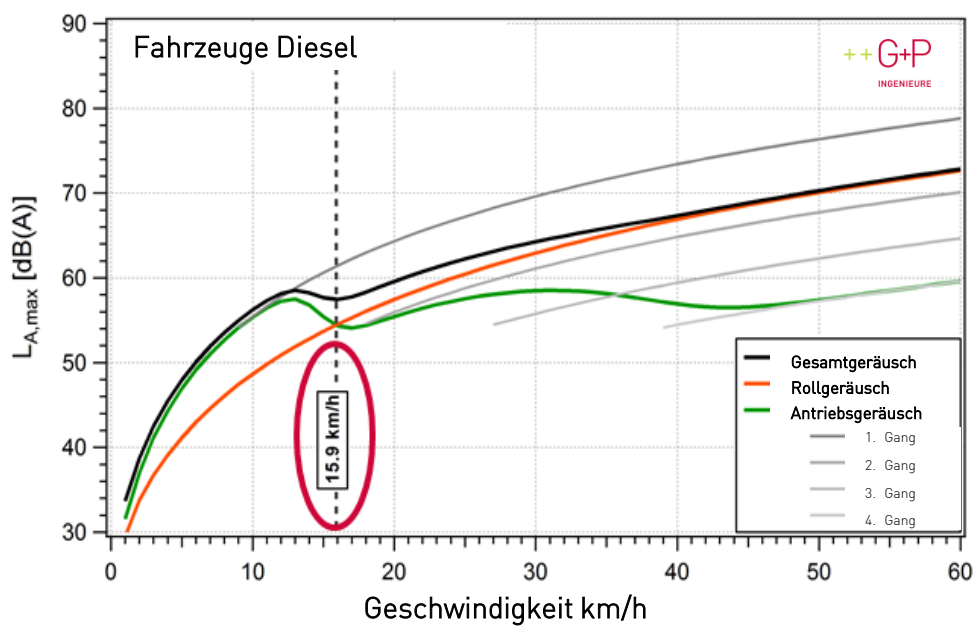
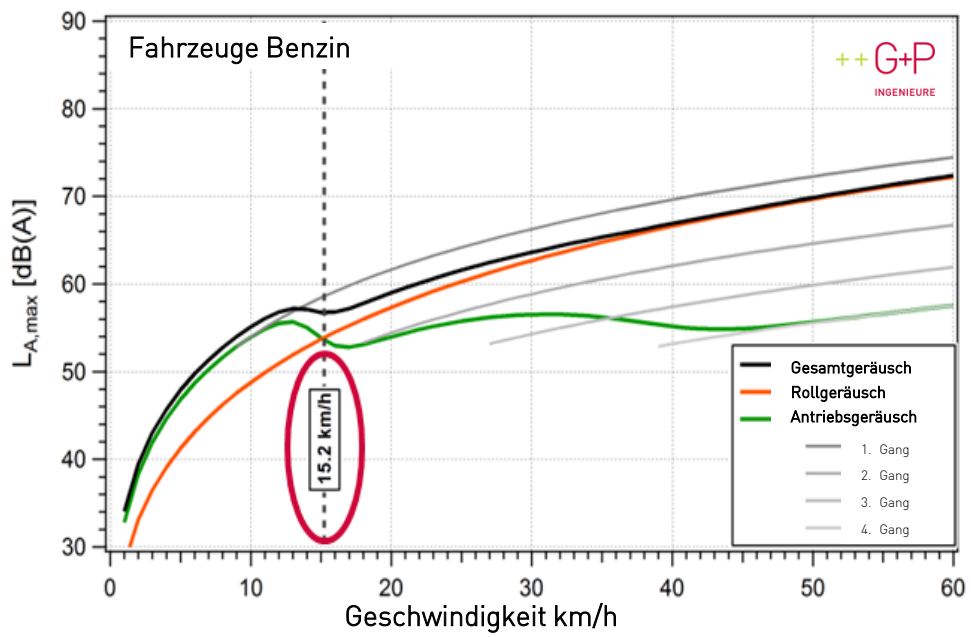


Abbildung 2: Emissionen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit – durchschnittliche europäische Fahrzeugflotte (Quelle: [2])

Aufgeschlüsselt nach Antriebsart liegt die Crossover-Geschwindigkeit für Benzin-Fahrzeuge bei 15.2 km/h, für Diesel-Fahrzeuge bei 15.9 km/h und für Hybrid-Fahrzeuge bei 14.8 km/h. Für Elektro-Fahrzeuge wurden grundsätzlich tiefere Gesamtemissionen gemessen. Die Hybridfahrzeuge zeigten gegenüber den Elektro-Fahrzeugen leicht höhere Rollgeräuschpegel, was in der vorliegenden Stichprobe wohl auf deren grösseren Gewicht und der damit zusammenhängenden breiteren Bereifung zurückzuführen ist (siehe Abbildung 3). [2]



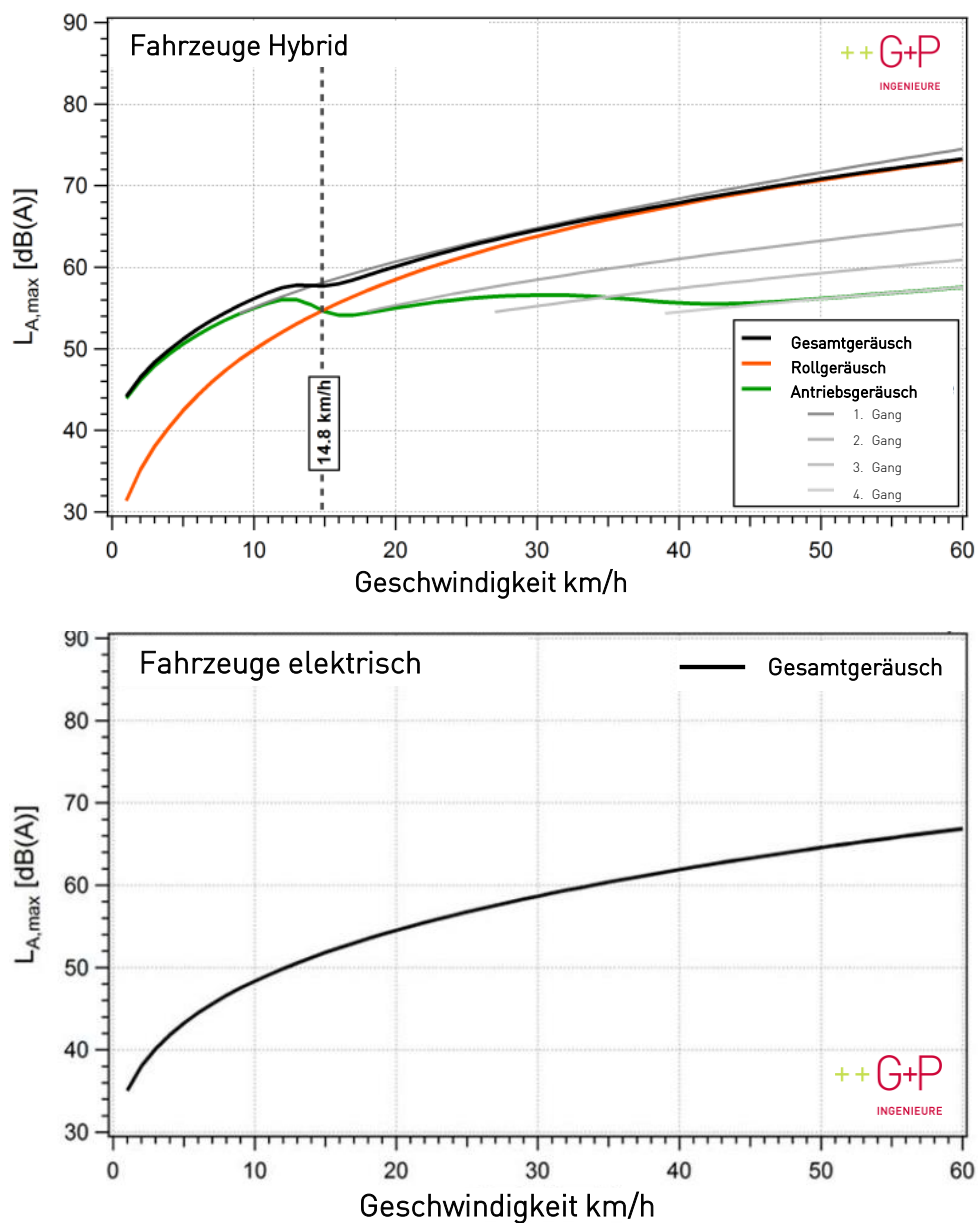


Abbildung 3: Emissionen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit für Benzin, Diesel, Hybrid und Elektrofahrzeuge (Quelle: [2])

Bei allen Fahrzeuggruppen zeigen die Antriebsgeräusche des Fahrens im ersten Gang die höchsten Emissionswerte. Wird im ersten Gang gefahren (vor allem beim Anfahren aus dem Stand), sind leise Strassenbeläge kaum wirksam. Dies ist zum Beispiel in Tempo 30 Zonen mit baulichen Massnahmen, welche die Fahrzeuge zum Anhalten zwingen (z.B. querversetzte, seitliche Parkierungen oder Hindernisse) zu beachten (siehe dazu auch Kapitel 1.1.2). Bereits ab dem zweiten Gang beginnen die Rollgeräusche, mit welchen die leisen Strassenbeläge ihre Wirksamkeit erlangen, zu dominieren.

Abbildung 4 zeigt die Anteile der Rollgeräusche und Antriebsgeräusche für LKW in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeiten.

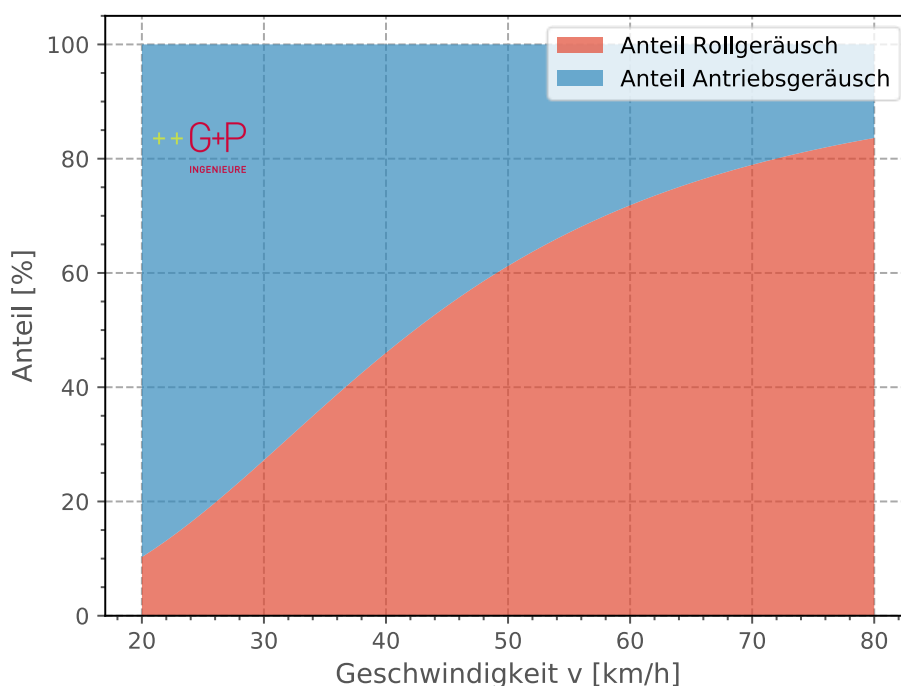


Abbildung 4: Emissionen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit für LKW nach SonROAD18 (Vorbeifahrenden LKW bei konstanter Geschwindigkeit gemäss Swiss10-converter, Berechnung SS-50) (Quelle: Grolimund + Partner AG gemäss [3])

Entsprechend den obigen Abbildungen lassen sich für verschiedene Geschwindigkeiten die Rollgeräuschbeiträge berechnen, welche in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgeführt sind. Diese Werte gelten bei konstanter Fahrweise und können als Indikator für die Wirksamkeit von leisen Strassenbelägen in Situationen mit niedrigen effektiv gefahrenen Geschwindigkeiten und konstanter Fahrweise beigezogen werden. Für den Mischverkehr sind die Schallenergieanteile für die einzelnen Fahrzeugkategorien mitzuberücksichtigen.

Tabelle 2: Anteil Rollgeräusch am Gesamtgeräusch nach SonROAD18 (Vorbeifahrenden PW bei konstanter Geschwindigkeit) und Vorschlag Berücksichtigung Wirkung von leisen Strassenbelägen (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Geschwindigkeit	20	30	40	50	60	80	100	120
Energieanteil Rollgeräusch	0.46	0.72	0.85	0.90	0.93	0.96	0.97	0.97
Wirksamkeit von LAB (Vorschlag Handhabung)	1/2	3/4	1	1	1	1	1	1

Tabelle 3: Anteil Rollgeräusch am Gesamtgeräusch nach SonROAD18 (Vorbeifahrenden LKW-Zweiachser bei konstanter Geschwindigkeit) und Vorschlag Berücksichtigung Wirkung von leisen Strassenbelägen (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Geschwindigkeit	20	30	40	50	60	80	100	120
Energieanteil Rollgeräusch	0.15	0.34	0.52	0.65	0.75	0.85	-	-
Wirksamkeit von LAB (Vorschlag Handhabung)	1/6	1/3	1/2	2/3	3/4	1	-	-

Die Belagswirkung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich wurde in der Studie von Egger et. al. (2016) für einen neueren Fahrzeugpark abgeschätzt [5]. Die akustische Leistung nimmt bei leisen Strassenbelägen grundsätzlich mit der Geschwindigkeit ab. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der relative Beitrag des Rollgeräusches zum Gesamtlärm mit abnehmender Geschwindigkeit ebenfalls abnimmt. [5]

Die Wirkung von SDA 4 und SDA 8 Belägen bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten kann demnach wie folgt abgeschätzt werden:

Tabelle 4: Wirkung Belag bei niedrigen Geschwindigkeiten bei Mischverkehr 8% (Quelle: [6])

Wirkung LAB	konventionell	Belag SDA 4	Belag SDA 8
Wirkung LAB @ 50km/h	0	-3.0	-1.0
Wirkung LAB @ 30km/h	0	-1.9	-0.6

Ebenso weist die Massnahme Tempo 30, wenn kombiniert mit leisen Strassenbelägen, eine reduzierte Wirksamkeit auf. Dies muss bei der Planung von Lärmschutzmassnahmen berücksichtigt werden. Zur zuverlässigen Prognose über eine Massnahmenkombination von leisen Strassenbelägen und Tempo 30 besteht Forschungsbedarf.

### 1.1.2 Einfluss Fahrverhalten

Grundsätzlich trägt das Fahrverhalten im tieferen Geschwindigkeitsbereich stärker zu den Schallemissionen bei als im höheren Geschwindigkeitsbereich. Die Emissionen werden entsprechend durch die Gangwahl und den Beschleunigungsstil (vorausblickend, sportlich/aggressiv) wesentlich beeinflusst. Die Drehzahl, sowie die Maxima in der Fahrgeschwindigkeit und der Beschleunigung wirken sich direkt auf die Emissionen aus. [7]

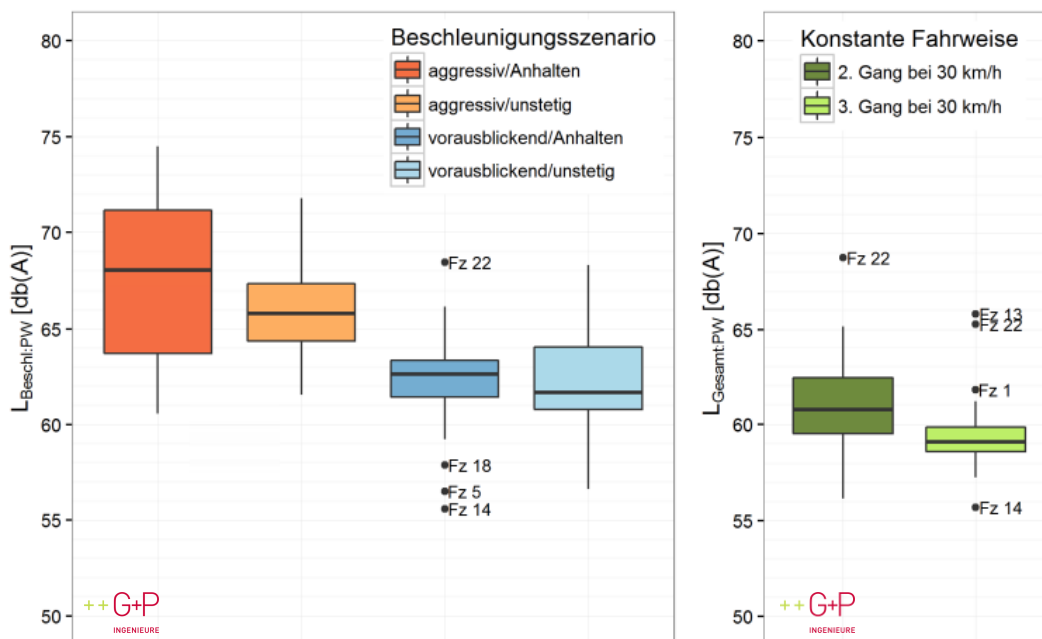


Abbildung 5: Statistische Verteilung (Boxplots) des Gesamtgeräusches pro Beschleunigungsszenario im Vergleich zum Gesamtgeräusch bei konstanter Fahrweise im 2. und 3. Gang (Quelle: [7])

Die folgenden typischen Innerortssituationen werden in höherem Masse durch das Fahrverhalten beeinflusst:

- Knoten / Kreisel
- Lichtsignalanlagen
- Bauliche Massnahmen in Tempo 30 Zonen, die Fahrzeuge zum Anhalten zwingen.
- Fussgängerstreifen
- Ampeln
- Kreuzungen / Rechtsvortritt
- Fahrbahnhaltestellen
- Bereich nach engen Kurvensituationen
- Geschwindigkeitswechsel innerorts - ausserorts
- Steigungen

Aufgrund von Erfahrungen kann davon ausgegangen werden, dass die Störwirkung von Beschleunigungen insbesondere dann gegeben ist, wenn auf höhere Geschwindigkeiten beschleunigt werden kann. Wird z.B. von 0 auf 50 km/h beschleunigt, werden aufgrund des längeren Beschleunigungsvorgangs sportliche (und lästigere) Beschleunigungen wahrscheinlicher, als dies z.B. von 0 auf 30 km/h der Fall ist. Ebenfalls zu erwarten ist, dass sich Beschleunigungen in den Ausserortsbereich von 50 bis 80 km/h verstärkt auf die Belästigung der Anwohner auswirken.

## 1.2 Reifen-Fahrbahn-Geräusche

### 1.2.1 Lärmentstehungsmechanismen

Die Reifen-Fahrbahn-Geräusche lassen sich anhand der folgenden vier Lärmentstehungsmechanismen beschreiben und zusammenfassen:

- Vibrationsschall (radial und tangential)
- Hohlraumresonanzen
- Luftströmungsgeräusche
- Horneffekt (Schallverstärkung)

In der folgenden Tabelle sind die vier Lärmentstehungsmechanismen näher erläutert.

Tabelle 5: Erläuterungen Lärmentstehungsmechanismen (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [8], [9], [10], [11])

<p>Vibrations-schall (radial)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Variierende Oberflächenhöhe (Textur Strassenbelag)</li> <li>▪ Variierende Kontaktfläche Reifen (Reifenprofil)</li> <li>▪ Veränderung der Kontaktkräfte → Vibration → Schallentstehung</li> <li>▪ Schallfrequenz: <math>f = v / \lambda</math> → tiefer bis mittlerer Frequenzbereich (gemäss Kuijpers &amp; van Blokland 2001 [8])</li> </ul>	
<p>Vibrations-schall (tangential)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stick-slip: klebende Kräfte zwischen Reifen und Strassenbelag</li> <li>▪ Wesentlich bei: <ul style="list-style-type: none"> <li>- feinen/glatten Strassenoberflächen (z.B. Parkiergaragen)</li> <li>- Reifen-Blockprofilen (LKW-Reifen der Antriebsachse)</li> </ul> </li> <li>→ hoher Frequenzbereich (gemäss Sandberg &amp; Ejsmont 2001 [9])</li> </ul>	

<p>Hohlraumresonanzen</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Eigenresonanzen im Reifen ähnlich wie beim Körper eines Musikinstrumentes (gemäss Mohamed et al. 2015 [10])</li> </ul>	
<p>Luftströmungsgeräusche</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Wegpressen und Einsaugen von Luft in der Kontaktzone</li> <li>▪ Helmholtz Resonanzen im Reifenprofil</li> <li>▪ Resonanzen im Reifenprofil der Standfläche → Hoher Frequenzbereich (gemäss Sandberg &amp; Ejsmont 2001 [9])</li> </ul>	
<p>Horneffekt (Schallverstärkung)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reifen und Strassenoberflächen formen einen Schalltrichter</li> <li>▪ Horneffekt PW Reifen (in Abhängigkeit der Reifenbreite): ab ca. 500-700 Hz (bis max. ca. 1500 Hz) (gemäss Peters &amp; Kuipers 2010 [11])</li> </ul>	



## 1.2.2 Spektrum der Reifen-Fahrbahn-Geräusche

Das Spektrum der Reifen-Fahrbahngeräusche lässt sich vereinfacht in drei Hauptfrequenzbereiche einteilen, die durch unterschiedliche Schallentstehungsmechanismen geprägt sind:

- **Tief (T):** Im tieffrequenten Bereich sind bei der Schallentstehung vor allem vibrationsbezogene Entstehungsmechanismen dominant. Die Beiträge von Hohlraumresonanzen (cavity) und Luftströmungsgeräuschen spielen eher eine untergeordnete Rolle.
- **Mittel (M):** Im mittleren Frequenzbereich findet der Übergang von Vibrations-schall zu Luftströmungsschall statt. Gleichzeitig ist ein Beitrag durch Hohlraumresonanzen der Reifen zu verzeichnen.
- **Hoch (H):** Der hochfrequente Bereich wird vor allem durch Luftströmungsgeräusche geprägt. In der neuesten Forschung geht man jedoch davon aus, dass vibrationsbezogene Schallentstehung in diesem Frequenzbereich zwar wesentlich geringer, jedoch nicht ganz vernachlässigbar ist.

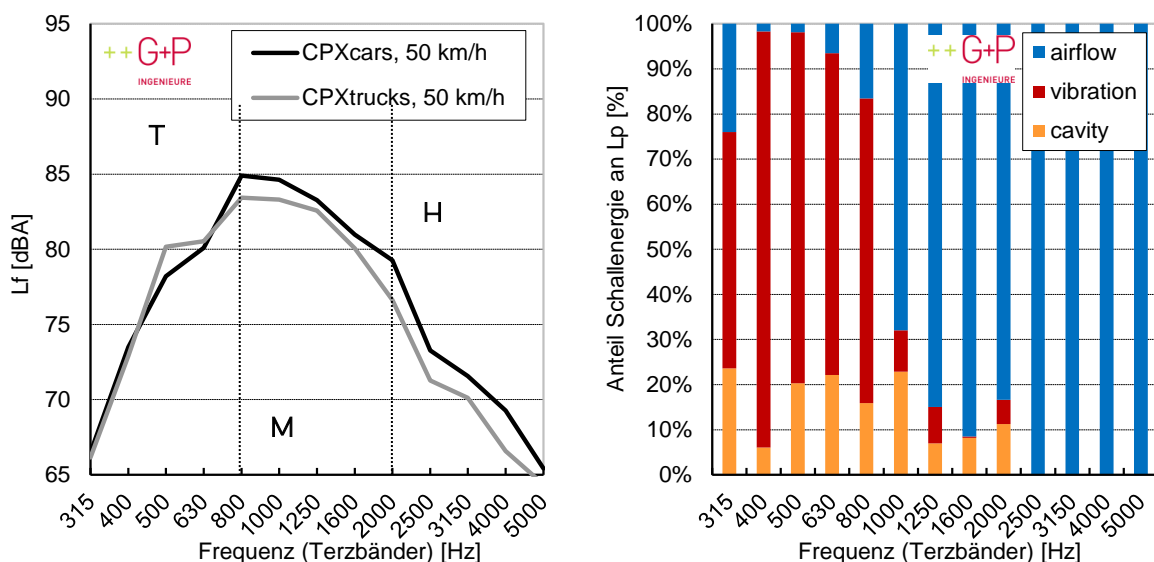


Abbildung 6: Beispiel eines Spektrums der Reifen-Fahrbahngeräusche für PW und LKW (links) und der jeweiligen Anteile verschiedener Entstehungsmechanismen an der Schallenergie pro Terzband basierend auf Modellierung SPERoN, (Quelle: Grolimund + Partner AG)

## 1.2.3 Temperatureinfluss

Die Lufttemperatur beeinflusst die Reifen-Fahrbahngeräusche, da sich die Eigenschaften der Reifen bei unterschiedlichen Temperaturen verändern. Grundsätzlich gilt: Je höher die Temperatur, desto leiser die Reifen-Fahrbahn-Geräusche (Erläuterungen siehe auch Kapitel 3.3.1).

### 1.3 Wirkungsweise leiser Strassenbeläge

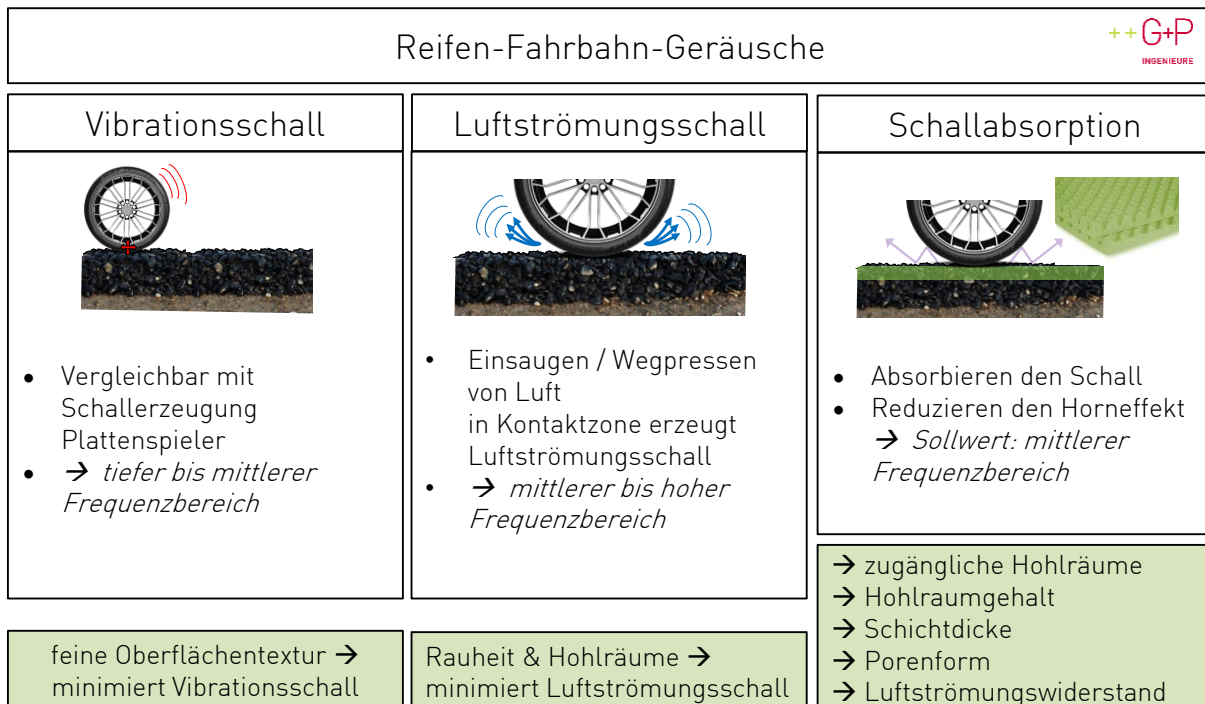


Abbildung 7: Wirkungsweise leiser Strassenbeläge (Quelle: Grolimund + Partner AG)

#### Reduktion des Vibrationsschalls

Die Oberflächenbeschaffenheit des Strassenbelags beeinflusst dessen akustische Qualität. Durch eine feine Oberfläche werden die Reifen der Fahrzeuge weniger stark angeregt, was den Vibrationsschall reduziert. Zugleich entstehen durch die verminderte Anregung auch weniger Hohlraumresonanzen im Reifen. Im Allgemeinen gilt: konkave Texturen regen die Reifen in geringerem Masse an als konvexe Texturen. Stark konvexe Texturen führen in der Regel zu einer Zunahme des Vibrationsschalls durch eine gesteigerte Anregung des Reifens beim Überrollen.

#### Reduktion des Luftströmungsschalls

Der spezifische Luftströmungswiderstand beschreibt wie einfach die Luft aus der Kontaktzone Reifen-Fahrbahn entweichen oder hineingesogen werden kann. Je niedriger der Luftströmungswiderstand, desto einfacher kann dies geschehen, was zu einer Abnahme des Luftströmungsschalls führt. Ein niedrigerer Luftströmungswiderstand kann durch eine Optimierung der Oberflächentextur (mit einem gewissen Mass an Oberflächenrauheit) oder durch das Vorhandensein von untereinander verbundenen Hohlräumen im Strassenbelag erreicht werden. Bei einer akustischen Texturoptimierung von Strassenbelägen (ohne nennenswerte Hohlräume im Belag) können gute Entlüftungseigenschaften sowohl durch Negativtexturen (z.B. ACMR), wie auch feine Positivtexturen (z.B. Gussasphalte, feine Oberflächenbehandlungen) erreicht werden, wie diverse Messungen und Modellierungen gezeigt haben.

### **Schallabsorbierende Wirkung**

Die Schallabsorptionseigenschaften eines Strassenbelages sind stark frequenzspezifisch und abhängig von dessen Schichtdicke, der Porosität, der Porenform, sowie deren Verbindungsgrad untereinander und dem spezifischen Strömungswiderstand. Die Schallabsorptionseigenschaften eines Strassenbelages können einen grossen Einfluss auf das Ausmass des Horneffekts und auf die Schallausbreitung haben. Deren messtechnische Bestimmung ist bei der näheren Analyse der akustischen Wirksamkeit von semidichten und porösen Belägen von grosser Wichtigkeit.

Die schallabsorbierenden Eigenschaften eines Strassenbelages sind dann am besten, wenn ein möglichst hoher Schallabsorptionsgrad in demjenigen Frequenzbereich realisiert wird, in welchem beim Überrollen des Strassenbelages mit Fahrzeugreifen auch am meisten Schallenergie entsteht. Dies ist typischerweise im mittleren Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 1250 Hz der Fall.

## 2. Leise Strassenbeläge

### 2.1 Definition eines leisen Strassenbelages

In der Schweiz gilt ein Belag als lärmarm sofern eine initiale Lärminderung von -3 dB und über die gesamte Lebensdauer eine Lärminderung von mindestens -1 dB erreicht wird [12]. Beläge mit einer Initialwirkung von -6 dB und einer Wirkung von -3 dB während der gesamten Lebensdauer gelten als lärmarmes Belag (LAB) mit grosser Wirkung. Die Wirkung, resp. Lärminderung bezieht sich gegenüber dem theoretischen Referenzbelag des schweizerischen Strassenlärmmodells StL-86+.

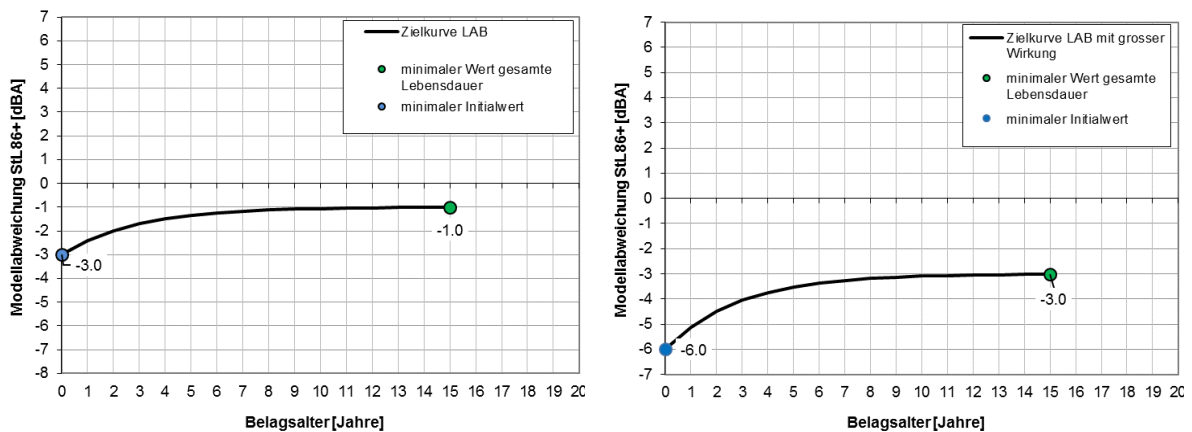


Abbildung 8: Zielkurven der akustischen Wirkung über die Lebensdauer LAB und LAB mit grosser Wirkung. (Basierend auf [12])

Während der gesamten Lebensdauer weisen leise Beläge eine wesentliche Lärmreduktion gegenüber einem konventionellen Strassenbelag auf. Für leise Beläge können Bundessubventionen geltend gemacht werden. Um Beiträge zu erhalten, muss im Lärmsanierungsprojekt (LSP) eine akustische Minderung von mindestens 1 dB (Endwert der akustischen Lebensdauer) berücksichtigt werden. Die akustische Wirkung des leisen Strassenbelags muss durch Messungen periodisch überprüft werden. Bei Überschreitung der zulässigen Lärmimmissionen müssen die notwendigen Massnahmen in Sinne von Artikel 37a LSV getroffen werden (z.B. Belagsersatz). [13]

## 2.2 Anforderung an leise Deckschichten

Die Herausforderung bei der Entwicklung und beim Einsatz von leisen Strassenbelägen besteht darin, den zahlreichen Anforderungen gerecht zu werden. Eine stetige Optimierung des gesamten Systems ist erforderlich.

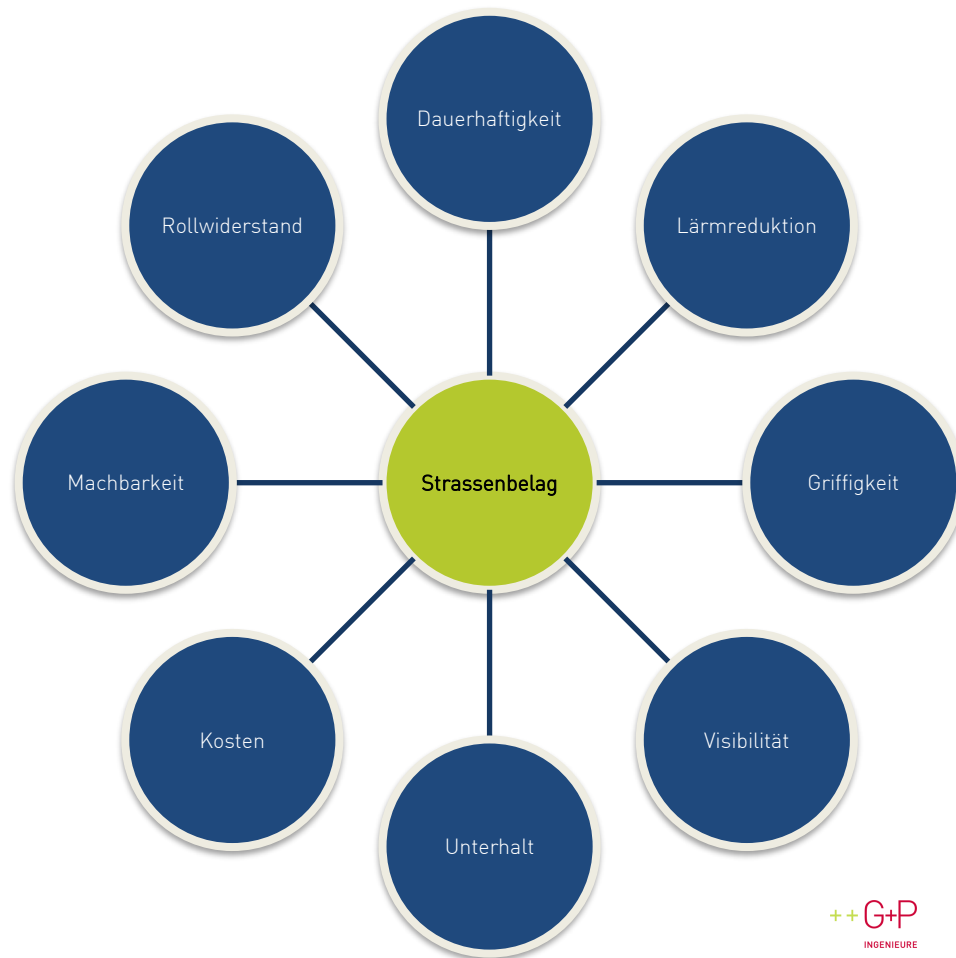


Abbildung 9: Anforderungen an leise Strassenbeläge, nicht abschliessend (Quelle: Grolimund + Partner AG)







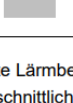
- **Dauerhaftigkeit:** Eine der wichtigsten Anforderungen an leise Deckschichten ist eine gute Dauerhaftigkeit sowohl in bautechnischer als auch in akustischer Hinsicht. Das ASTRA geht heute von einer Lebensdauer von 25 Jahren für konventionelle Beläge, 20 Jahre für SDA 8 und 10-15 Jahre für SDA 4 aus. [14]
- **Lärmreduktion:** Von leisen Strassenbelägen wird eine je nach Deckschichttyp entsprechende dauerhafte Lärmreduktion gefordert. Bei SDA 8 wird eine Lärmreduktion von mindestens -1 dB und bei SDA 4 von mindestens -3 dB während der gesamten Lebensdauer erwartet (siehe Kapitel 2.5).
- **Griffigkeit:** Die Griffigkeit (Nasshaftung, Kurvenhaftung, etc.) stellt eine zentrale generelle Anforderung an Deckschichten bezüglich Verkehrssicherheit dar.
- **Visibilität:** Die Anforderungen an die Sicht, insbesondere bei Nässe, sind ebenfalls zentrale Elemente bezüglich Verkehrssicherheit. Die Visibilität ist abhängig von der Bildung von Sprühhäfen auf der Fahrbahnoberfläche.

- **Unterhalt:** Die Aufwände und Anforderungen bezüglich Winterunterhalt (Schneeräumung etc.), anbringen von Flickern und Leitungen, Reinigungen, etc. sollten ähnlich wie diejenigen von konventionellen Deckschichten sein.
- **Kosten:** Die Einbaukosten von leisen Deckschichten sollten möglichst gleich oder nicht wesentlich höher sein als diejenigen von konventionellen Deckschichten.
- **Machbarkeit:** Spezielle Anforderungen bezüglich Machbarkeit (Mischgutherstellung, Materialien, Einbaubedingungen, Knowhow etc.) sollten möglichst gering sein, um einen breiten Einsatz zu ermöglichen.
- **Rollwiderstand:** Durch die Reduktion des Rollwiderstands des Fahrzeugs kann der Treibstoffverbrauch und die Schadstoffemissionen verringert werden. Die Oberflächenbeschaffenheit der Strassenbeläge beeinflusst den Rollwiderstand stark. Das Einsparpotential durch Strassenbeläge mit geringem Rollwiderstand ist gross, da alle Verkehrsteilnehmende dazu beitragen.

### 2.3 Anforderungen an die Qualität des Strassenoberbaus

Grundsätzlich muss die Binderschicht beim Einbau von SDA Belägen nicht ersetzt werden. Das Risiko für strukturelle Rissbildung ist jedoch erhöht, falls Absenkungen zu erwarten sind (z.B. bei Schächten). In diesem Fall wird empfohlen, Belagsbewehrungen aufzubringen.

Im Kanton Aargau ist der Belagsaufbau wie folgt normiert:

Verkehrsklasse		Dicke mm	Belagsaufbau	
			Innerort	Ausserort
<b>T5</b> 220 mm		30 95 95	SDA 4 - 12 / SDA 8 - 12 <sup>1</sup> AC B 22 H AC T 22 H	AC MR 8 AC B 22 H AC T 22 H
<b>T4b</b> 170 mm		30 70 70	SDA 4 - 12 / SDA 8 - 12 <sup>1</sup> AC B 22 H AC T 22 H	AC MR 8 AC B 22 H AC T 22 H
<b>T4a</b> 150 mm		30 50 70	SDA 4 - 12 / SDA 8 - 12 <sup>1</sup> AC B 16 S AC T 22 S	AC MR 8 AC B 16 S AC T 22 S
<b>T3</b> 130 mm		30 100	SDA 4 - 12 / SDA 8 - 12 <sup>1</sup> AC T 22 S	AC MR 8, AC 8, AC 11 <sup>2</sup> AC T 22 S
<b>Bushaltestelle oder Kreisell</b> 220 mm		30 95 95	SDA 4 - 12 / SDA 8 - 12 <sup>1</sup> AC B 22 H AC T 22 H	AC MR 8 AC B 22 H AC T 22 H
<b>Rad- Gehweg</b>		30 70	AC 8 N, AC 11 <sup>2</sup> AC T 22 N	

<sup>1</sup> erstgenannter Typ = erhöhte Lärmbelastung nach Strategieplan Lärm  
zweitgenannter Typ = durchschnittliche Lärmbelastung nach Strategieplan Lärm

<sup>2</sup> min. Schichtdicke 35 mm

Abbildung 10: Norm des Belagsaufbaus im Kanton Aargau (Quelle: [15])

## 2.4 Leise Strassenbeläge in der Schweiz

Aktuell sind die sechs folgenden Hauptansätze für die Entwicklung von leisen Strassenbelägen in der Schweiz zu verzeichnen, welche je nach Technologie und Ziel kombiniert oder auch einzeln zur Anwendung kommen (siehe auch Kapitel 1.3 Wirkungsweise von leisen Strassenbelägen):

- Optimierung der Oberflächentextur bezüglich Reifenanregung respektive Optimierung der Vibrationseigenschaften
- Optimierung der Oberflächentextur bezüglich der Entlüftungseigenschaften durch Negativtextur (konkave Texturen) oder sehr feine Positivtextur
- Optimierung der Entlüftungseigenschaften durch oberflächennahe Hohlräume
- Optimierung der Schallabsorptionseigenschaften (akustische Impedanz) durch von der Oberfläche zugängliche Hohlraumstrukturen
- Verringerung der mechanischen Impedanz durch Veränderung der Materialbestandteile und/oder -eigenschaften

Die in der Schweiz angewendeten Lösungen werden unten näher ausgeführt. In der letzten Dekade ist ein starker Zuwachs der leisen Strassenbeläge in der Schweiz zu verzeichnen. Während den letzten 10 Jahren wurden in der Schweiz auf über 1200 Strassenabschnitten leise Strassenbeläge als Lärmschutzmassnahme an der Quelle realisiert. Damit wurden leise Strassenbeläge in der Schweiz zur wichtigsten Lärmschutzmassnahme. Ungefähr 30% aller in der Schweiz realisierten leisen Strassenbelägen befanden sich zu diesem Zeitpunkt im Kanton Aargau.

### 2.4.1 Poröse Asphalte PA

Die ersten leisen Strassenbeläge kamen Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre in der Schweiz zum Einsatz. Es handelte sich damals primär um poröse Asphalte (wasserdurchlässige Drainbeläge), die z.T. auch heute noch aufgrund ihrer grossen Lärminderung auf Nationalstrassen zur Anwendung kommen. Ein weiterer Vorteil von porösen Asphalten ist, dass diese bei Niederschlag durch ihre Wasserdurchlässigkeit die Sprühhahnen deutlich vermindern und somit für bessere Sicht, verbesserte Sicherheit und dadurch zu stetigerem Verkehr führen. In der Schweiz werden poröse Asphalte meist mit Maximalkorngrössen von 11 mm oder 8 mm ausgeführt. Zweischichtige poröse Asphalte (wie sie oft z.B. in den Niederlanden und in Japan zur Anwendung kommen) werden in der Schweiz nur selten eingebaut. Für poröse Asphalte gelten besondere Anforderungen an die Entwässerung und den Winterunterhalt, sie weisen eine geringere Lebensdauer auf und wirken nur, wenn sie nicht verschmutzt sind. Zur erfolgreichen Anwendung setzen poröse Asphalte hohe Geschwindigkeiten (>80 km/h) voraus, da sich nur dann ein selbstreinigender Effekt einstellt [9].

### 2.4.2 Semidichte Asphalte SDA

Um Lärmemissionen auch auf kommunalen und städtischen Strassen mittels leiser Beläge reduzieren zu können, mussten neue Lösungen gesucht werden. Erste Versuche diesbezüglich wurden Mitte der 1990er Jahre unternommen [16].

Die ersten Tests von leisen Strassenbelägen im Innerortsbereich konzentrierten sich auf dichte Lösungen. Die lärmindernde Wirkung wurde hauptsächlich durch eine lärmoptimierte Oberflächentextur erreicht. Diese fiel wesentlich geringer aus als diejenige der offenporigen Asphaltbeläge. Im Jahr 2003 initiierte deshalb das BAFU zusammen mit dem ASTRA ein Forschungsprojekt mit dem Ziel, leise Strassenbeläge spezifisch für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich zu entwickeln [17]. Die Studie zeigte, dass semidichte Asphalte mit kleinen Korngrößen und mittlerem Hohlraumgehalt im niedrigen Geschwindigkeitsbereich am zielführendsten sind [18]. In jüngerer Zeit setzte die Forschung in der Schweiz deshalb als Kompromiss zwischen Lärmreduktion und Langlebigkeit auf semidichte Asphalte.

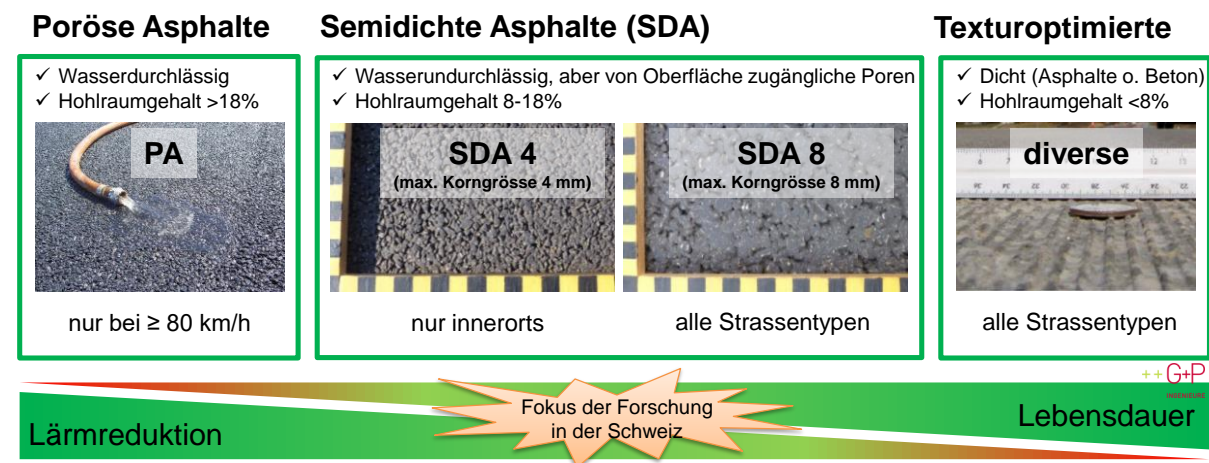


Abbildung 11: Übersicht der Haupttypen von leisen Strassenbelägen in der Schweiz (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Das BAFU und das ASTRA lancierten 2010 ein Forschungspaket, in welchem semidichte Asphalte im Innerortsbereich mit 15 Test-Einbauten ausgiebig getestet wurden. In diesem Zusammenhang wurde eine Schweizer Norm verfasst (VSS-40436 [19]), welche es Bauunternehmungen erlauben soll, lärmindernde semidichte Asphalte herzustellen und einzubauen. Die Erkenntnisse zur akustischen Wirkung und den bautechnischen Anforderungen dieser Testbeläge wurden im Schlussbericht des begleitenden Langzeitmonitorings festgehalten [20]. Unterdessen wurden die Rezepturen durch verschiedene Kantone mit weiteren Einbauten getestet. Mit den zusätzlichen Testresultaten konnten die wichtigsten Parameter für den erfolgreichen Einbau von SDA gewonnen werden. Durch Datenanalysen von ca. 150 Einbauten konnten im Rahmen von durch das BAFU und dem Kanton Aargau in Auftrag gegebenen Studien [21], [22] die wichtigsten Material-, Herstellungs- und Einbauparameter identifiziert werden. Mit diesen Parametern können die Lärmreduktion und die Dauerhaftigkeit von semidichten Asphalten weiter gesteigert werden. Diese Ergebnisse werden momentan in die bestehende VSS Norm aufgenommen. SDA 4 Beläge haben sich in der Schweiz als bewährte Lärmschutzmassnahme im Innerortsbereich durchgesetzt.

#### 2.4.3 Texturoptimierte Bauweisen

Die folgenden Bauweisen können lärmoptimiert hergestellt werden. Es ist aber zu beachten, dass damit generell oft geringere Lärmreduktionen erreicht werden als mit PA und SDA Belägen.



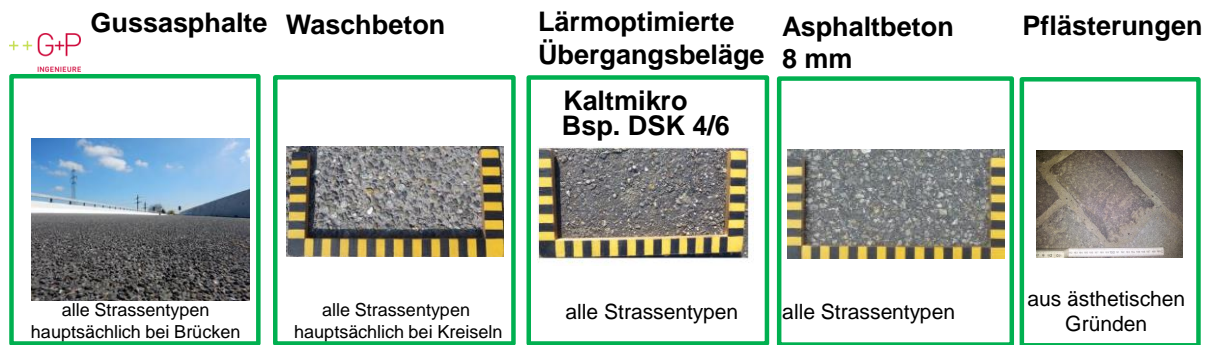


Abbildung 12: Texturoptimierte Beläge (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Tabelle 6: Zusammenfassung texturoptimierte Bauweisen (siehe auch untenstehende Ausführungen) (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Typ	Anwendungsbereich	Akustische Einordnung
Gussasphalte (GA, MA) Abstreifung 2/4	Brücken, Tunnel, Flicke	-2 bis -3 dB gegenüber StL-86+ (nach 4 Jahren)
Waschbeton 8mm	Kreisel	ca. +/- 0 dB gegenüber StL-86+
Waschbeton 11mm	Kreisel	ca. +2 dB gegenüber StL-86+
OB (Oberflächenbehandlung)	Übergangsbelag	ca. 0 bis +2 dB gegenüber StL-86+ (je nach Korngrössen)
DSAK (Dünnschicht Asphalt Kalt)	Übergangsbelag	ca. -2 bis +1 dB gegenüber StL-86+ (je nach Korngrössen)
AC 8 (Asphaltbeton 8 mm)	Standardbelag, Schächte, Flicke	ca. -1 dB bis 0 dB gegenüber StL-86+ nach 8 bis 10 Jahren
Pflästerung Kleinstein	aus ästhetischen Gründen	ca. 2 dB lauter als Pflästerung schräg
Pflästerung gerade	aus ästhetischen Gründen	ca. 1.5 bis 2.5 dB lauter als Pflästerung schräg
Pflästerung schräg	aus ästhetischen Gründen	ca. 1.5 bis 2.5 dB leiser als Pflästerung gerade

## Gussasphalte

Gussasphalte (GA, MA) sind aufgrund ihrer Zusammensetzung grundsätzlich witterungsbeständig und verschleissfest. Auf Brücken und Kunstbauten werden daher häufig Gussasphalte angebracht.

PA und SDA Belägen dichten das Bauwerk nicht gänzlich vor Wasser ab. Dies ist auf Brücken aufgrund möglicher Schädigungen der Abdichtung und des Brückenbauwerks unerwünscht. Deshalb werden auf Brücken meist wasserabdichtende Gussasphaltbeläge eingebaut. Diese können dank Optimierung der Oberflächentextur dennoch lärmindernd ausgeführt werden. Das Forschungsprojekt *Lärmarme Oberflächen bei Gussasphalt-Deckschichten auf Brücken* des ASTRA hat zum Ziel eine

Gussasphalt-Deckschicht zu entwickeln, deren Oberfläche so konstruiert ist (Splitteinstreuung, Bearbeitung mit speziellen Walzen usw.), dass eine möglichst deutliche Reduzierung des Verkehrslärms erreicht wird. [23]

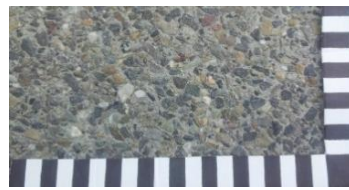
Dazu wurden verschiedene lärmoptimierte Gussasphalte mit verschiedenen Abstreusplitten eingebaut und messtechnisch begleitet. Nach 3 bis 4 Jahren erreichen diese zum Teil noch eine Lärminderung von bis zu -3 dB. Diese deutliche Lärmreduktion wird mit reiner Optimierung der Textur erzielt. Langzeiterfahrungen bezüglich lärmoptimierten Gussasphalten sind zurzeit noch nicht vorhanden. Verschiedene Forschungsaufträge zur Untersuchung und Optimierung von Gussasphalten sind geplant.

### Waschbeton

Beim Waschbeton handelt es sich um eine Betonbauweise, bei welcher durch eine Oberflächenbehandlung die Gesteinskörnung freigelegt wird. Der Waschbeton ist eine lärmoptimierte Betonbauweise, welche aber nicht per se als lärmarm gilt. Allerdings sind Waschbeton-Oberflächen weniger laut als mit herkömmlicher Bauweise angebrachter Beton (mit Querbesenstrich).

Die Korngrösse und in geringerem Masse die Gesteinsform beeinflussen die akustischen Eigenschaften von Waschbetonoberflächen. Erfahrungen zeigen, dass Waschbetonfahrbahnen mit Grösstkorn 8 mm ca. -2 bis 0 dB lärmindernd wirken können. Waschbeton mit Grösstkorn 11 mm weisen ähnliche oder um bis zu ca. 0 bis +2 dB lautere Werte auf als ein neutraler Belag (siehe Abbildung 14). Aufgrund der richtungsabhängigen und langlebigen Textur eignet sich der Waschbeton vor allem für den Einsatz in Kreiseln. Dessen Einbau ist eher teuer. Es gilt anzumerken, dass der Erfahrungsschatz zum heutigen Zeitpunkt relativ gering ist.

#### Rümlang 11mm Körnung



#### Oberrohrdorf 8mm Körnung

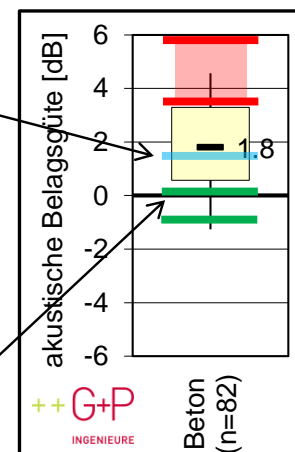


Abbildung 13: Vergleich von Waschbeton verschiedener Körnung bzgl. akustischer Belagsgüte (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Im Vergleich zu Beton mit Querbesenstrich vermag der Waschbeton die Lärmemissionen um ca. 4 dB zu reduzieren. Diese Reduktionen werden durch die Verringerung des Vibrationsschalls und des Luftströmungsschalls erreicht.

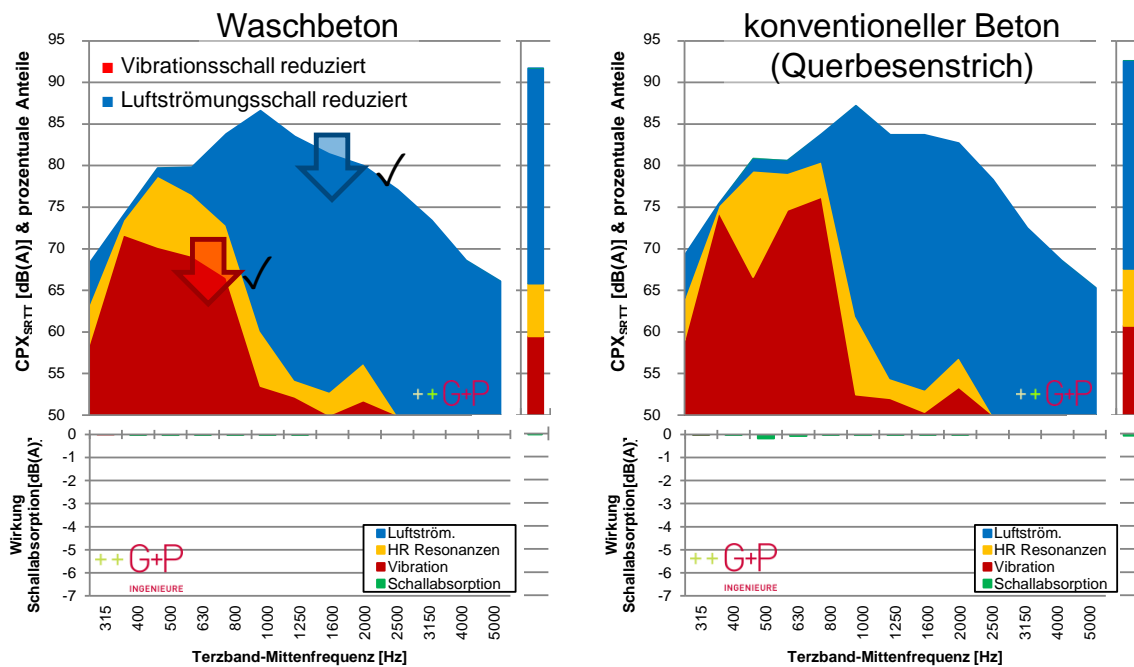


Abbildung 14: Spektraler Vergleich der Reifen-Fahrbahngeräusche von Waschbeton und konventionellem Beton als Strassenbelag (Quelle: Grolimund + Partner AG)

## Lärmoptimierte Übergangsbeläge

Kaltnikrobeläge stellen eine gute Option als Übergangsmassnahme (Kurz und mittelfristige Instandsetzungsmassnahmen) dar, wo in Folge des aktuellen Belagszustands hohe Lärmbelastungen auftreten. Es ist jedoch darauf zu achten, dass Korngrößen von 4/6 oder feiner verwendet werden, um gute akustische Eigenschaften zu erzielen. Auch Oberflächenbehandlungen (OB) sollten mit möglichst feinkörnigem Splitt angebracht werden.

## Pflasterung

Pflasterungen werden ausschliesslich aus ästhetischen Gründen angebracht. Bei der Anbringung von Pflasterungen als gestalterisches Element ist grundsätzlich darauf zu achten, dass möglichst keine oder geringe Niveauunterschiede zwischen den Pflastersteinen bestehen. Im Folgenden werden verschiedene Arten von Pflasterungen aus lärmtechnischer Sicht einander gegenübergestellt.

**Schräge vs. gerade Pflasterungen.** Pflasterungen mit schräger Fugenanordnung weisen im Vergleich zu Pflasterungen mit gerade angeordneten Fugen um 1.5 bis 2.5 dB tiefere Rollgeräusche auf. Beim Überrollen der schrägen Fugen entstehen weniger Impulsgeräusche.

**Grossteinpflasterungen vs. Kleinsteinpflasterungen.** Kleinsteinpflasterungen weisen um ca. 2 dB lautere Rollgeräusche auf als Grossteinpflasterungen mit schrägen Fugen. Die Erhöhung des Rollgeräuschs findet hauptsächlich im tiefen Frequenzbereich statt.

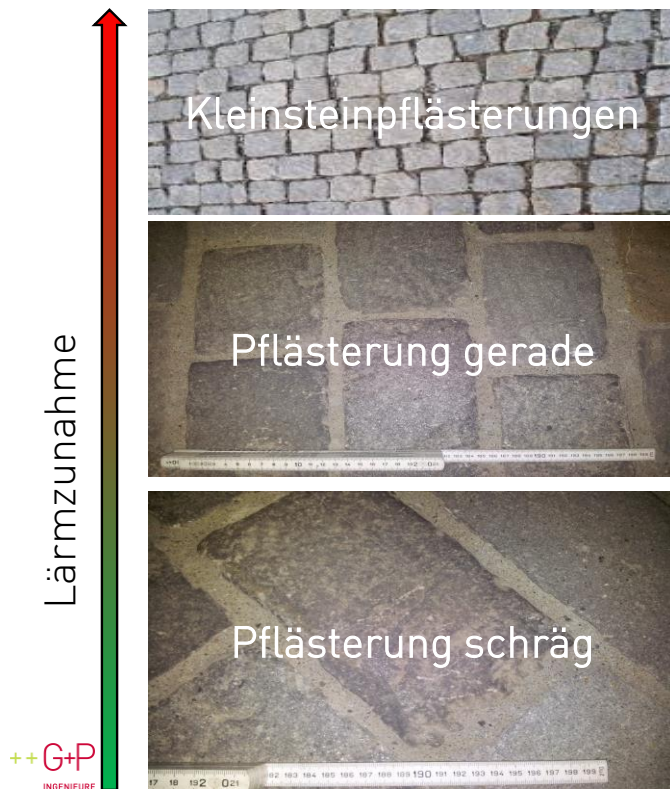


Abbildung 15: Pflasterungen im akustischen Vergleich (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Aufgrund des erhöhten Abrollgeräusches, wird empfohlen Pflasterungen nur auf Abschnitten mit niedrigen gefahrenen Geschwindigkeiten (Tempo  $\leq 30$  km/h) anzuwenden.

#### 2.4.4 Trends in der Forschung zu leisen Strassenbelägen

##### **PERS (Pore Elastic Road Surfaces)**

PERS (Pore Elastic Road Surfaces) wurden im Rahmen des Europäischen Projektes PERSUADE (2009-2015) entwickelt. Ziel des durch 12 Forschungsnehmer durchgeführten Projekts ist eine kosteneffektive Poro-Elastische Strassenoberfläche mit der Verwendung von altem Pneumaterial zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurden international einzelne Teststrecken eingebaut. Die Lärmreduktion von PERS wird durch Hohlräume sowie durch die mechanische Impedanz der Gummifraktion erreicht.

##### **Recyclingbeläge mit lärmindernden Eigenschaften**

Zurzeit werden in der Schweiz Forschungen an Recyclingbelägen durchgeführt. Diese werden ebenfalls auf ihre akustischen Eigenschaften geprüft und optimiert.

##### **Kühle Strassenbeläge mit lärmindernden Eigenschaften**

Gemäss internationalen Studien können Strassenbeläge mit kühlendem Effekt die Oberflächentemperatur um bis zu  $10^{\circ}\text{C}$  reduzieren. Der kühlende Effekt wird hauptsächlich durch eine höhere Albedo der Belagsoberfläche im Vergleich zu konventionellen Asphaltten erreicht. Zurzeit werden im Rahmen laufender Studien kühlende Strassenbeläge bezüglich deren Langzeitwirkung, deren Lärmwirkung und weiterer verschiedener Parameter getestet und untersucht.

### 2.4.5 Potential für weitere Optimierungen

Die folgende Auflistung enthält Aspekte für weiteres Optimierungspotential (nicht abschliessend):

- Verwendung hochwertiger Bitumen zur Verlängerung der Lebensdauer und Verminderung von Spurrinnenbildung
- Optimierung der Mastixseigenschaften (Zusammenspiel Bitumen und Füller)
- Verwendung von alternativen Materialien und Zusätzen (optimierte Granulate z.B. für Abstreuerungen, Gummizusätze im Asphaltmischgut im «trockenen» und «nassen» Verfahren etc.)
- Verbesserte strukturelle Widerstandsfähigkeit durch Zusätze mit Fasern
- Bewehrungen
- Extrem Feinkörnige Beläge (SDA 2)
- Einsatz nicht normierter Korngrössen wie z.B. SDA 6

### 2.5 SDA als präferierte Bauweise im Kanton Aargau

Im Zusammenspiel zwischen Lärmreduktion, Hohlraumgehalt und Nutzungsdauer kann davon ausgegangen werden, dass:

- Je grösser der Hohlraumgehalt, desto geringer die Nutzungsdauer
- je geringer der Hohlraumgehalt, desto länger die Nutzungsdauer

Ziel ist es, den optimalen Bereich (möglichst geringer Hohlraumgehalt bei möglichst grosser Lärmreduktion) zu eruieren und die Rezepturen dementsprechend auszulegen. Dabei kann entweder auf performanceorientierte Eigenprodukte gesetzt werden, bei welchen die Belagsfirmen Leistungen in den Werkverträgen garantieren. Oder aber Zusammensetzungsorientiert: z.B. nach VSS-40425 (Vorgehen Kanton Aargau).

Tabelle 7 zeigt die erwartete akustische Wirkung nach Einbau und nach 5 Jahren, sowie die Endwirkung.

Tabelle 7: Erwartete akustische Wirkung von SDA Belägen (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Typ	Anwendungsbereich	Wirkung nach Einbau	Wirkung nach 5 Jahren	Endwirkung
SDA 8	Alle Strassentypen inkl. Nationalstrassen	-5 bis -3 dB	-2 dB	-1 dB
SDA 4	Alle Strassentypen im Innerortsbereich	-6 bis -9 dB	-4 dB	-3 dB

### 2.5.1 Untertypen gemäss Norm

In «VSS-40436 2019 Semidichtes Mischgut und Deckschichten» wurden die Anforderungen für die neue Generation von leisen Strassenbelägen festgelegt. In der folgenden Abbildung wird die Bezeichnung beschrieben. Tabelle 8 enthält die in der Norm festgelegten Bezeichnungen und Grenzwerte für den Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper. Der Marshallprüfung erfolgt im Kanton Aargau für SDA-Beläge standardmässig mit dem Ausmessverfahren.



Abbildung 16: Bezeichnung SDA Beläge (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Die untenstehende Tabelle 8 zeigt die Zielhohlraumgehalte von SDA-Rezepturen mit dem zulässigen Hohlraumgehaltsbereich des Mischguts nach VSS-40436 [24].

Tabelle 8: Charakteristischer Hohlraumgehalt und Grenzwerte der Marshall-Prüfkörper gemäss VSS-40436 [24]

Sorte und Klasse	-12	-16	-20
	[Volumen-%]		
SDA 4	12	16	20
SDA 8	12	16	-
Grenzwerte für den Hohlraumgehalt der Marshallprüfkörper			
SDA 4	10...14	14...18	18...22
SDA 8	10...14	14...18	18...22

### 2.5.2 Ausführungsbestimmungen zur Sicherstellung der akustischen Leistung

Ziel von semidichten Belägen SDA ist es, mit dem kleinstmöglichen Hohlraumgehalt (Verminderung der Negativauswirkungen des Hohlraumgehalts auf die Dauerhaftigkeit), dennoch eine gute akustische Wirksamkeit zu gewährleisten. In der VSS Norm «VSS-40436 Semidichtes Mischgut und Deckschichten» wurde erfolgreich der Grundstein zur breiten Anwendung von leisen Strassenbelägen im Innerortsbereich gelegt.

Die Erfahrungen im Forschungsprojekt *lärmarme Beläge innerorts* des Bundes sowie Praxiserfahrungen im Rahmen von Wirkungsanalysen auf leisen Belägen in diversen Kantonen zeigen, dass die akustische Leistung der semidichten Asphalte, auch innerhalb derselben Grösstkorn- und Hohlraumgehaltsklasse, sehr stark variieren kann. Die Ursache für die Variabilität der akustischen Langzeitwirkung einzelner SDA Rezepturen ist oft auf bautechnische Unterschiede zurückzuführen.

Die Studie *Ausführungsbestimmungen Akustik für semidichte Asphalte (2017)*[21] zeigt, dass auf konsistente Weise diejenigen Beläge mit hoher akustischer Qualität drei Jahre nach Einbau 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 akustisch nicht wirksam sind. Es wurde je ein Maximum für die Füller- als auch für die Sandanteile eruiert, um unter dessen Einhaltung von der Oberfläche zugängliche Hohlraumgehalte garantieren zu können. Um eine dauerhafte Lärminderung zu erreichen, ist jedoch das Zusammenspiel von Füller- und Sandanteilen massgebend: Enthält eine Rezeptur einen eher hohen Sandanteil, kann die Zugänglichkeit der Hohlräume dennoch mit einem reduzierten Füllergehalt erreicht werden. Umgekehrt können auch Rezepturen mit Fülleranteilen nahe dem Maximum erfolgsversprechend sein bei gleichzeitig eher tieferen Sandgehalten. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wurde zusätzlich zu den einzelnen Maxima ein Akustik-Faktor ermittelt, welcher den Zusammenhang von Füller- und Sandanteil berücksichtigt, und welcher als weitere Voraussetzung für von der Oberfläche zugängliche Hohlräume fungiert. Aufgrund seiner grösseren Oberfläche erhält der Füllergehalt im Akustik-Faktor ein grösseres Gewicht als der Sandgehalt. Grenzbereiche für SDA 4 und SDA 8 Beläge mit akustisch wirksamen Hohlraumgehalt sind in Abbildung 17 aufgezeigt.

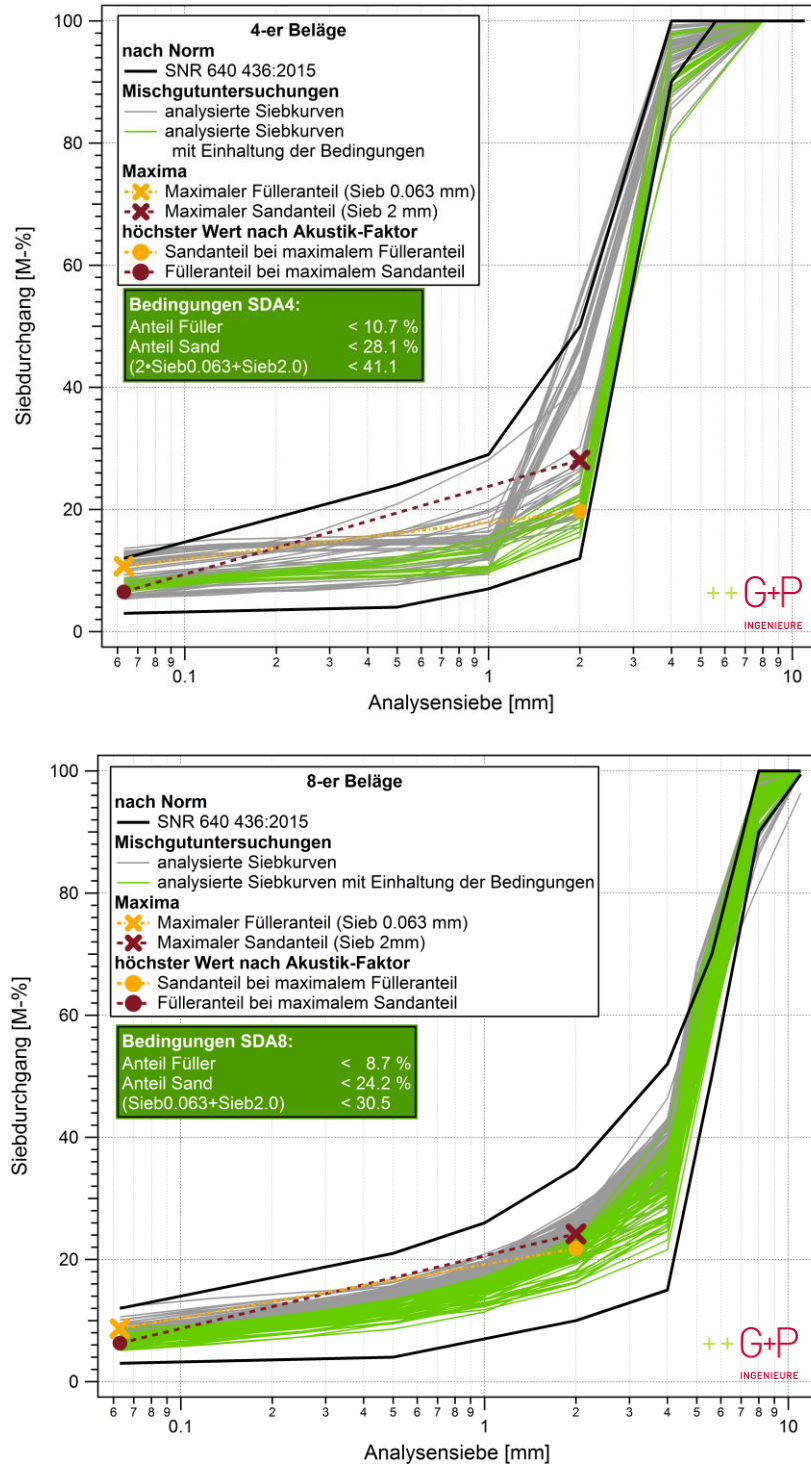


Abbildung 17: Empfohlene Ausführungsbestimmungen Akustik für die Normierung von semidichten Asphalten (Quelle: [21])

In der Praxis 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. Die vorgeschlagenen akustischen Ausführungsbestimmungen zu VSS 40436 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 leisen Strassenbelägen zu erreichen. [21]

Um die Wirksamkeit zu gewährleisten, wurden die Maximalwerte für Füller und Sand und der Akustikfaktor festgelegt. Minimalwerte sind zurzeit keine gegeben. Ziel ist es aber, bei den semidichten Belägen einen Hohlraumgehalt zu wählen, der unterhalb desjenigen von PA-Belägen liegt, um verbesserte Eigenschaften bezüglich Dauerhaftigkeit zu erreichen.

Um für die Akustik optimalen Wertebereich der Siebkurve zu vervollständigen, wurden folgende ergänzende Analysen für die Siebe 1 mm (für SDA 4 und SDA 8) und 4 mm (SDA 8) durchgeführt. Aus den Detailanalysen der Siebe 1 und 4 mm geht folgendes hervor:

- Sieb 1 mm hat nur geringen Einfluss auf Akustik (SDA 4 und SDA 8) und wird ausreichend durch Sandanteil erklärt, kann aber bei SDA 4 in Extremfällen eine Rolle spielen.
- Sieb 4 mm hat bei SDA 8 kaum Einfluss auf Akustik.

Eine Anpassung der akustischen Ausführungen ist somit nicht nötig. Es gilt jedoch zu vermerken, dass starke Streuungen bei Sieb 1 mm zu vermeiden sind.

Erfahrungen zeigen Verbesserungen der akustischen Qualität von SDA Belägen durch das Einhalten der oben erläuterten Ausführungsbestimmungen. Es ist jedoch zu beachten, dass neben dem Verhältnis von Füller zu Sand weitere wichtige Faktoren wie beispielsweise der Bindemittelgehalt, der Mischguttransport, die Mischguttemperatur, die Verdichtung, etc. für eine erfolgreiche Anwendung massgebend sind (siehe dazu auch Kapitel 2.7).

## **2.6 Erfolgsfaktoren für Realisierung**

### **2.6.1 Gestaltung von belagsfremden Elementen**

Ein Faktor für die erfolgreiche Realisierung von leisen Strassenbelägen ist die Gestaltung von Schachtabdeckungen, Betonelementen (z.B. bei Bushaltestellen und Kreisel) und Fahrbahnmarkierungen. Durch diese Elemente können störende Impulsgeräusche entstehen oder es kann zu lästigen Frequenzverschiebungen kommen. Diese Phänomene treten auch bei konventionellen Strassenbelägen auf. Bei leisen Strassenbelägen sind sie allerdings deutlich besser wahrnehmbar, da sie in geringerem Masse durch den Fahrzeuglärm maskiert werden. In einer Studie wurde die Störwirkung von solchen Einflüssen näher untersucht, sowie Empfehlungen für die praktische Umsetzung ausgearbeitet (siehe auch Kapitel 2.6.2 ff.). [25]

### **2.6.2 Lage der Übergänge zum angrenzenden Belag**

Die Emissionsunterschiede zwischen leisen und konventionellen Belägen können bis zu 10 dB betragen. Zwar profitieren die Anwohner im Übergangsbereich ebenfalls von einer Lärminderung, allerdings entstehen beim Übergang abrupte

Pegelländerungen, welche als sehr lästig empfunden werden können. Anhand eines Lärmausbreitungsmodells wurde abgeschätzt, bis zu welcher Entfernung diese abrupten Pegelanstiege wahrnehmbar sind. [25] Dies wird in der schematischen Skizze in Abbildung 18 gezeigt.

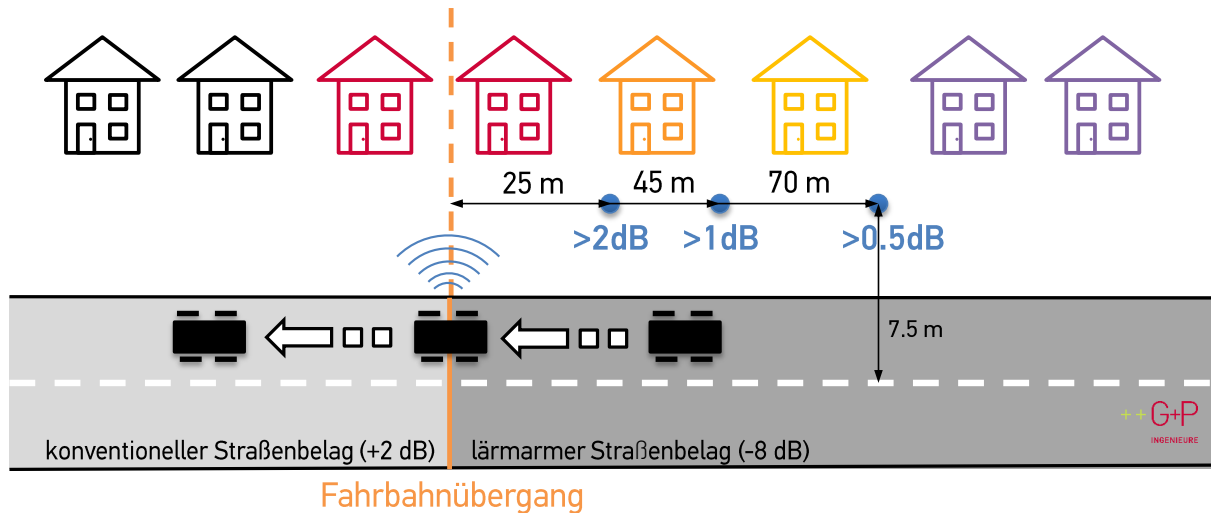


Abbildung 18: Immissionsseitige akustische Wirkung eines Fahrbahnübergangs von einem leisen auf einen konventionellen Strassenbelag. Die Wirkung ist beispielsweise in 25 m Abstand des Anwohners zum Fahrbahnübergang mit >2 dB sehr deutlich wahrnehmbar. [Quelle: [25]]

Wie aus der obigen Abbildung hervor geht, sind wahrnehmbare Pegelzunahmen bis ca. 45 m ab Übergang zu erwarten. Als wahrnehmbar gelten in der Regel Pegeldifferenzen von >1 dB. Da gleichzeitig auch Frequenzverschiebungen auftreten, welche die Lästigkeit erhöhen, sollte der Abstand zwischen dem Übergang und der Liegenschaft wenn möglich mindestens 70 m betragen. Wo dies nicht machbar ist, sollte trotz geringerer Lärmreduktion ein Übergangsbereich mit einem Belag mittlerer Lärmwirkung (z.B. AC 8) realisiert werden, um diese Effekte abzuschwächen.

Aktuell gilt im Kanton Aargau die folgende Handhabung:

Der leise Strassenbelag wird über die Grenze Innerorts/Ausserorts weitergezogen. Der Übergang des leisen Belags zum konventionellen Belag befindet sich dementsprechend mindestens 30 m von der letzten Liegenschaft respektive der Bauzonengrenze entfernt.

### 2.6.3 Betonelemente in der Fahrbahn

Oft sind Betonfahrbahnen bedeutend lauter als konventionelle Asphaltbeläge. Die akustische Qualität der Betonfahrbahn kann je nach Ausführung um bis zu 6 dB variieren (siehe auch Abschnitt Waschbeton in Kapitel 2.4.3).

Betonfahrbahnen mit Längsbesenstrich weisen die leisesten akustischen Werte auf (siehe Abbildung 19). Aus akustischer Sicht wird das Anbringen von Betonfahrbahnen mit Querbeseustrich nicht empfohlen.

#### Laute Bauweisen

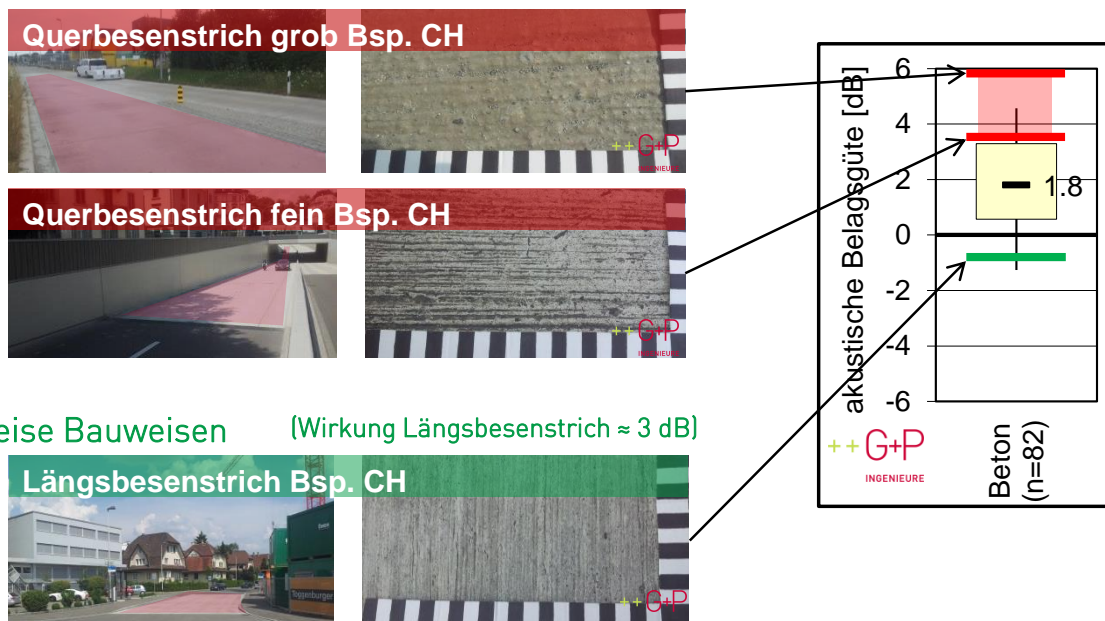


Abbildung 19: akustische Qualität Betonbauweisen, (Quelle: Grolimund + Partner AG)

#### Impulsgeräusche

Beim Überrollen von Übergängen und Fugen mit Niveauunterschieden können Impulsgeräusche entstehen und damit zu einer zusätzlichen Lästigkeit führen. Einerseits lässt sich diese Problematik durch lärmoptimierte Oberflächentexturen (feine und regelmässige Besenstrichtexturen) abschwächen. Andererseits können die Fugen zwischen einzelnen Betonelementen lärmarm ausgeführt werden, wenn diese ausreichend mit Fugenmasse gefüllt und niveaugleich realisiert werden. [25]



Abbildung 20: Betonelemente an einer Bushaltestelle (links) und Nahaufnahme einer Fuge zwischen zwei lärm-optimierten Betonelementen (rechts)



Niveauunterschied

niveaugleich

Abbildung 21: Übergang Betonfahrbahn – angrenzender mit Niveauunterschied (links) und niveaugleich (rechts) [Quelle: [25], Grolimund + Partner AG]

### 2.6.4 Anbringen von Fahrbahnmarkierungen

Ein weiteres Störpotential geht von Fahrbahnmarkierungen aus. Erfahrungen haben gezeigt, dass Strukturmarkierungen (mit Quarzsand versetzte texturierte Markierungen) vor allem auf neuen SDA 4 Belägen zu Klagen von Anwohnern führen können, da diese hörbare Pegelzunahmen und Frequenzverschiebungen verursachen. Messungen mit dem CPX-Verfahren zeigen, dass sich die Reifen-Fahrbahn-Geräusche um bis zu 6 dB erhöhen können. Reine Farbmarkierungen führen hingegen kaum zu einer Veränderung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Auf SDA 4 Belägen sollten deshalb Farbmarkierungen den Strukturmarkierungen vorgezogen werden (siehe Abbildung 22), wenn die Sicherheitsanforderungen dies zulassen. Es muss hervorgehoben werden, dass reine Farbmarkierungen Nachteile bezüglich Sichtbarkeit und Haftung bei Nässe aufweisen.

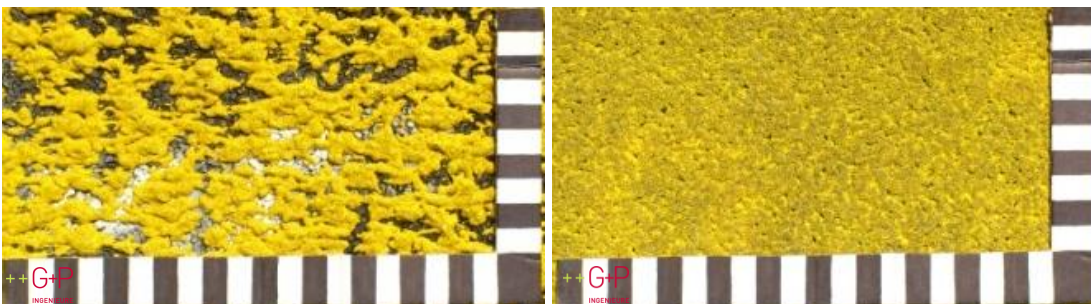


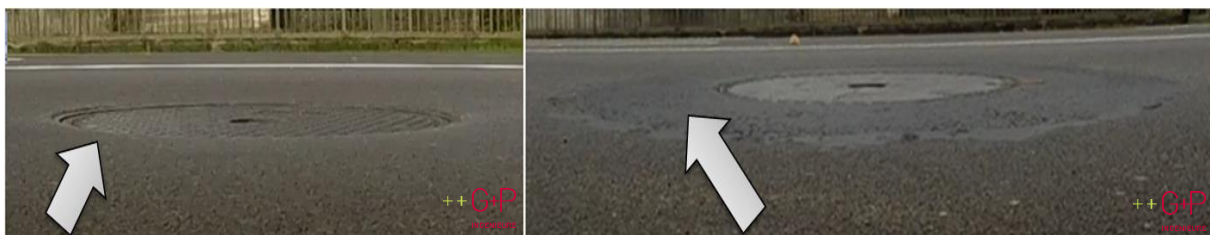
Abbildung 22: Bild einer Strukturmarkierung (links) und einer Farbmarkierung (rechts) auf einem leisen Strassenbelag im Kanton Aargau (Quelle: [25])

Im Kanton Aargau gilt folgende Regelung:

- Kernfahrbahn → Farbmarkierung
- Mittelmarkierung und Fussgängerstreifen → Strukturmarkierung

### 2.6.5 Gestaltung von Schachtabdeckungen

Messungen zeigen, dass aufgrund von Schachtabdeckungen Impulsgeräusche entstehen können, die sich um bis zu 10 dB von den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen abheben. Wo dies möglich ist, sollten Schachtdeckel nicht in der Radspur angebracht werden. Da die Position der Schachteckel bei bestehenden Strasseninfrastrukturen meist nicht mehr geändert werden kann, sollten Schachtzugänge niveaugleich zum Strassenbelag hochgezogen werden und die Schachtdeckel mit einer lärmoptimierten Textur versehen werden.



Niveauunterschied ca. 1-2 cm

Nachbesserung zur niveaugleichen Gestaltung

Abbildung 23: Gestaltung eines Schachtzuganges vor (links) und nach der Nachbesserung (rechts). Mit der niveaugleichenden Massnahme sowie einer geräuscharmen Textur des Schachtdeckels konnten die Pegelanstiege beim Überrollen um ca. 5 dB vermindert werden. (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Im Fall des Schachtdeckels in Abbildung 23 links musste die Position des Schachtzuganges kurz nach Wiederinbetriebnahme der Fahrbahn nachgebessert werden. Da sich der Schachtzugang mitten in der Radspur und 1-2 cm unterhalb des Strassenniveaus befand, führte der Vertikalversatz bei Fahrzeugüberrollungen zu deutlich wahrnehmbaren Impulsgeräuschen. Bei der Nachbesserung wurde der leise Strassenbelag in einem Umkreis von 10 bis 15 cm rund um den Schachtzugang entfernt und mit einer feinen Asphaltmischung niveaugleich aufgefüllt. Zudem wurden die Schachtdeckel durch einen texturoptimierten Typ (feine und gleichmässige Textur, siehe Abbildung 7 rechts) ersetzt. Durch diese Massnahmen konnten die Impulsgeräusche im Mittel um ca. 5 dB reduziert werden.

Im Kanton Aargau gilt folgende Regelung:

- BEGU-Deckel, keine Anti Grip-Gussdeckel

### 2.6.6 Lichtsignalanlagen mit Detektoren

Sofern durch das Anbringen der Detektoren keine Niveauunterschiede auftreten, führen diese zu keinen störenden Impulsgeräuschen und haben somit keinen Einfluss auf die Lärmemissionen und die Lärmbelastungen. Falls die Detektoren an der Oberfläche angebracht werden, könnten diese aufgrund des Niveauunterschieds zu stärkeren Impulsgeräuschen führen. Im Kanton Aargau werden die Detektoren nur bei provisorischen Massnahmen an der Oberfläche angebracht. Ansonsten werden diese eingegossen.

### 2.6.7 Tramschienen

Das Überfahren von Tramschienen in Längsrichtung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Lärmemissionen. Gegebenenfalls ist eine geringfügige Frequenzverschiebung in den hohen Frequenzbereich zu verzeichnen. Hingegen können beim Überqueren von Tramschienen in Querrichtung Impulsgeräusche auftreten. Es ist darauf hinzuweisen, dass im Kanton Aargau die Schienen hauptsächlich auf dem Eigentrasse verlaufen und somit keinen Einfluss auf die Strassenlärmemissionen haben.

### 2.7 Einflussfaktoren auf die akustische Alterung

Sämtliche Strassenbeläge werden mit der Zeit ein wenig lauter. Die Einflussfaktoren auf das akustische Alterungsverhalten können wie folgt vereinfacht zusammengefasst werden:

Bautechnisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material, Rezeptur, Einbau (Verdichtung)</li> <li>- Qualität Strassenoberbau</li> </ul>
Klimatisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Höhenlage (Bindemittelwahl, besondere Beanspruchung)</li> <li>- Klimatische Einflüsse (Frost, Hitze)</li> </ul>
nutzungsbezogen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mechanische Belastung durch Verkehr</li> <li>- Mechanische Belastungen Unterhalt</li> <li>- Schmutzeintrag (Landwirtschaft, Baustellen, etc.)</li> </ul>
Intervention	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unterhaltsmassnahmen</li> </ul>

Abbildung 24: Übersicht Einflussfaktoren akustische Alterung, nicht abschliessend (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Die statistischen Analysen einer 2015 durchgeführten Studie [26] ergaben drei Haupteinflussfaktoren für die akustische Alterung:

1. Eine hohe Anzahl an Frostzyklen erhöht aufgrund der starken Beanspruchung das Risiko für einen Wirkungsverlust am stärksten.
2. Mit steigender Verkehrslast verlieren leise Strassenbeläge ihre Wirkung aufgrund der starken Beanspruchung ebenfalls etwas schneller. Hier ist jedoch der Anteil des Schwerverkehrs relevanter als die gesamte Verkehrslast.
3. Einen Einfluss zeigt hoher Schmutzeintrag, beispielsweise aufgrund von Landwirtschaft oder Bautätigkeit. Gemäss neuen Ergebnissen aus einer im Kanton Aargau durchgeführten Studie zu Schmutz und Reinigung, gehört Schmutzeintrag (und damit zusammenhängender Wirkungsverlust) zur normalen Alterung von leisen Strassenbelägen.

## 2.8 Massnahmen zur Verlängerung der akustischen Lebensdauer

### 2.8.1 Reinigung von SDA Belägen

Die lärmindernde Wirkung von SDA Belägen nimmt durch die Einlagerung von Staubpartikel und externem Schmutzeintrag (z.B. durch Baustellen, Landwirtschaft) in den Hohlräumen ab [26]. Ob und inwiefern mit verschiedenen Reinigungsmassnahmen die akustische Wirkung von leisen Belägen wiederhergestellt, respektive verbessert werden kann, wurde in diversen Studien untersucht [27] [28] [29].

Im Kanton Aargau durchgeführte Studien untersuchen zurzeit, inwiefern sich eine regelmässige Reinigung der SDA Beläge zur Erhaltung der akustischen Qualität lohnt [27]. Interessanterweise ist der Einfluss durch Verschmutzung bei SDA 8 Belägen grösser als bei SDA 4 Belägen. Dies unterstützt die Hypothese, dass Wasser und Schmutz in semidichten Asphalten mit 4 mm Maximalkorngrösse aufgrund ihrer feineren Porenstruktur weniger gut eindringen können. Erste Erkenntnisse hinsichtlich Reinigungsmassnahmen zeigen, dass durch eine Reinigung vor allem oberflächennaher Schmutz im Belag effektiv entfernt werden kann (akustische Wirkung bis zu 2.5 dB). Ist der Schmutz einmal tief in die Hohlräume des semidichten Asphalts eingedrungen, kann er nur teilweise entfernt werden (Effekt 0.5 bis 1 dB). Bei der Reinigung scheint die Saugleistung von zentraler Bedeutung zu sein. Der Wasserdruck darf nicht zu hoch eingestellt werden, um Beschädigungen der Belagsoberfläche zu vermeiden. [27] Hinweis: Die Untersuchungen zu Reinigungen werden in den kommenden Jahren weitergeführt.

### 2.8.2 Mikrofräsen von SDA Belägen

Die akustische Wirkung von leisen Strassenbelägen nimmt mit der Zeit ab. Momentan werden verschiedene Verfahren geprüft, welche eine dünne Schicht der Belagsoberfläche abfräsen. Ziel ist es, die akustische Leistung des leisen Strassenbelags wiederherzustellen beziehungsweise wieder zu verbessern.

Zur Verbesserung der Makrotextur und Verbesserung der akustischen Leistung von SDA Belägen mit verstopften Poren werden zurzeit verschiedene Fräsverfahren getestet. Ebenfalls im Kanton Aargau finden zurzeit Untersuchungen zu Fräsungen von SDA 4 Belägen statt. In Zofingen auf der Kantonsstrasse K 104 wurden auf ca. 300 m des SDA 4 Belags aus dem Jahr 2012 Fräsungen mit unterschiedlichen Verfahren (Frästiefen) vorgenommen. Mittels CPX- und Schallabsorptionsmessungen (siehe Kapitel 3) wurde die durch die Fräsarbeiten erzielten Verbesserungen der akustischen Qualität des SDA 4 Belags erhoben. Aus den Messungen geht hervor, dass sich die akustische Belagsgüte mit zunehmender Schleiftiefe deutlich verbessert. Die Schallabsorptionseigenschaften des SDA 4 Belags konnten im Vergleich zu früheren Messungen ebenfalls verbessert werden. [30] Die Dauerhaftigkeit der durch die Fräsarbeiten erzeugten Wirkungen unter Verkehrslast werden zukünftige Messungen zeigen.

Grundsätzlich können Fräsungen zur Rückgewinnung der akustischen Qualität von leisen Strassenbelägen aufgrund der ersten Erkenntnisse als einen vielversprechenden Ansatz bezeichnet werden. Offene Fragen wie beispielsweise die Abfrästiefe, die

Abfrägeschwindigkeit, Abtransport des Materials ohne die Poren zu belasten, Staubbildung, anschließende Reinigungen, etc. müssen jedoch noch geklärt werden. Zukünftige Tests und Untersuchungen werden die Vor- und Nachteile von Mikrofräsungen von SDA Belägen als Massnahme zur Verlängerung der Lebensdauer aufzeigen.



Abbildung 25: Fräsen von SDA Belägen (Quelle: Hans Weibel AG)

### 2.8.3 Weitere Möglichkeiten

In den Niederlanden kommen Produkte zur Verlängerung der Lebensdauer eines Belags seit 2010 vor allem präventiv zum Zeitpunkt des ersten Auftretens von Kornausbrüche etwa nach 5 bis 7 Jahren nach Einbau zur Anwendung. Dabei darf aber die Belagsoberfläche noch nicht ernsthaft beschädigt sein. Die Lebensdauer der Deckschichten kann in der Folge um 2 bis 4 Jahr erhöht werden. Es wird pro Deckschicht nur eine einzige Behandlung empfohlen. Bei der Behandlung handelt es sich um kalte Bitumenemulsionen, die Bitumenverjüngungsmittel enthalten oder ein warm aufgetragenes polymermodifizierte Bitumen. Die Produkte werden mit einem Druckgebläse (PA-Beläge) oder mit einem Sprühbalken (Dünnschichtbeläge) aufgetragen, wo sie durch Dellen und Poren 10 bis 20 mm in die Schicht eindringen. [31] Des Weiteren sind international Forschungen, respektive Ideen, bezüglich biologischem oder chemischem Schmutzabbau im Gange.



### 3. Akustische Erfolgskontrolle

#### 3.1 Normen und Grundlegendokumente zu den akustischen Messverfahren

Sämtliche Normen können bei der jeweiligen Institution bestellt werden. Grundsätzlich sind immer die neusten Normen anzuwenden.

Tabelle 9: Übersicht Normen und Grundlegendokumente zu den akustischen Messverfahren (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Dokument	Bezeichnung	Erscheinungsjahr	Inhalte	Gültigkeit
CPX-Norm	ISO 11819-2 [32]	2017	Anforderungen Messsysteme, Anforderungen Messverfahren und Messablauf, Korrekturverfahren, Unsicherheitsabschätzung	international
CPX Spezifikation Teststreifen	ISO/TS 11819-3 [33]	2017	Anforderungen Inbetriebnahme, Lagerung und Nutzungsdauer, Anforderungen an Dokumentation, Shore-Härtekorrektur	international
CPX Temperaturkorrektur	ISO/TS 13471-1 [34]	2017	Belagskategorie- und geschwindigkeitsabhängige Temperaturkorrektur	international
SPB Norm	ISO 11819-1 [35]	2022	Anforderungen Messstandort, Messung und Auswertung	international
SPB-Messungen	Leitfaden Strassenlärm Anhang 1c [36]	2013	Anforderungen an Messung und Auswertung Leq	national
SEM-Messungen	Leitfaden Strassenlärm Anhang 1c [36]	2013	Anforderungen Messstandort, Messung und Auswertung	national
Umrechnung CPX-SPB	Leitfaden Strassenlärm Anhang 1c [36]	2013	Umrechnungsmodell CPX Referenzgeschwindigkeit 50 km/h und 80 km/h Fahrzeugkategorien Personenkraftwagen (N1) und LKW (N2)	national
Abnahmemessungen	VSS Nationaler Anhang zur ISO 11819-2	wird voraussichtlich Ende 2020 publiziert	Anforderungen für die Durchführung und Auswertung von Abnahmemessungen	national

#### 3.2 Akustische Charakterisierung von Strassenbelägen

Zur Bestimmung der akustischen Wirkung von Strassenbelägen werden je nach Land unterschiedliche Methoden, wie zum Beispiel CPX-Belagsgütemessungen (close proximity), statistical pass-by (SPB), Emissionsmessungen und Immissionsmessungen eingesetzt. Die internationalen Normen für die Messverfahren der akustischen Fahrbahneigenschaften ISO 11819-1 (SPB-Methode [35]) und ISO 11819-2 und ISO 11819-3 (CPX-Methode [32], [33], [34]) regeln die Durchführung und Auswertung von Messungen. Zudem präzisiert die dazugehörige Schweizer Norm SN ISO 11819-2 das Durchführen und Auswerten von Abnahmemessungen mit erhöhten Genauigkeitsansprüchen (z.B. zur Überprüfung von akustischen Anforderungen in Werkverträgen). Diese Normen lassen jedoch offen, wie die ermittelten Normpegel auf einen nationalen Belagsgütewert umgerechnet werden. Somit wird die Bestimmung von Belagsgütewerten nicht durch das CEN oder die ISO abgedeckt. Die ermittelten akustischen Messdaten werden länderspezifisch in einen akustischen Belagsgütewert umgerechnet. Die Belagsgütewerte sind für die Beschreibung der akustischen Qualität von

Strassenbelägen massgebend. Anhand dieser Messmethoden ist eine Überprüfung der akustischen Qualität von Strassenbelägen über die Zeit und untereinander gewährleistet.

### **Schweiz**

In der Schweiz wurde bisher auf eine Methodik zurückgegriffen, welche im Leitfaden Strassenlärm - Anhang 1c [36] beschrieben ist. Daraus resultierten Belagsgütewerte, die in Abweichung zum bisher gültigen Standardmodell StL-86+ ausgegeben werden und die Wirkung eines Belages in Bezug auf die Gesamtlärmemissionen (bestehend aus Roll- und Antriebsgeräusch) für zwei Geschwindigkeitsbereiche charakterisieren. Da StL-86+ bald seine Gültigkeit verlieren wird, ist die Entwicklung einer neuen Methodik zur Bestimmung der Belagsgütewerte zwingend notwendig. Ein analoges Verfahren mit Bezug zum neuen Lärmemissionsmodell SonROAD18 ist nicht zielführend, da dieses Modell laufend an neue Trends angepasst werden soll. Diese Fragen werden momentan bei der zuständigen Normierungskommission des VSS weiter abgeklärt.

### **International:**

Um Vergleiche zwischen Daten internationaler Herkunft zu ermöglichen, müssen die Wirkungen auf eine einheitliche Referenz bezogen werden. Im Rahmen des Forschungspaktes *Lärmarme Beläge innerorts EP 7: Innovative, lärmarme Beläge für den Potenziellen Einsatz in der Schweiz, ASTRA 2013/002, 2016* [31] wurde dazu eine Referenzierung gegenüber dem konventionellen Strassenbelag SMA 11 vorgenommen, da dieser Belag weltweit oft als Standard-Strassenbelag eingesetzt wird. In Abbildung 26 sind die unterschiedlichen nationalen Referenzen einander gegenübergestellt. Ebenfalls eingezeichnet ist der akustische Wert für den SMA 11 Belag im jeweiligen nationalen Modell.

### Wert SMA 11 (2-5 Jahre nach Einbau)

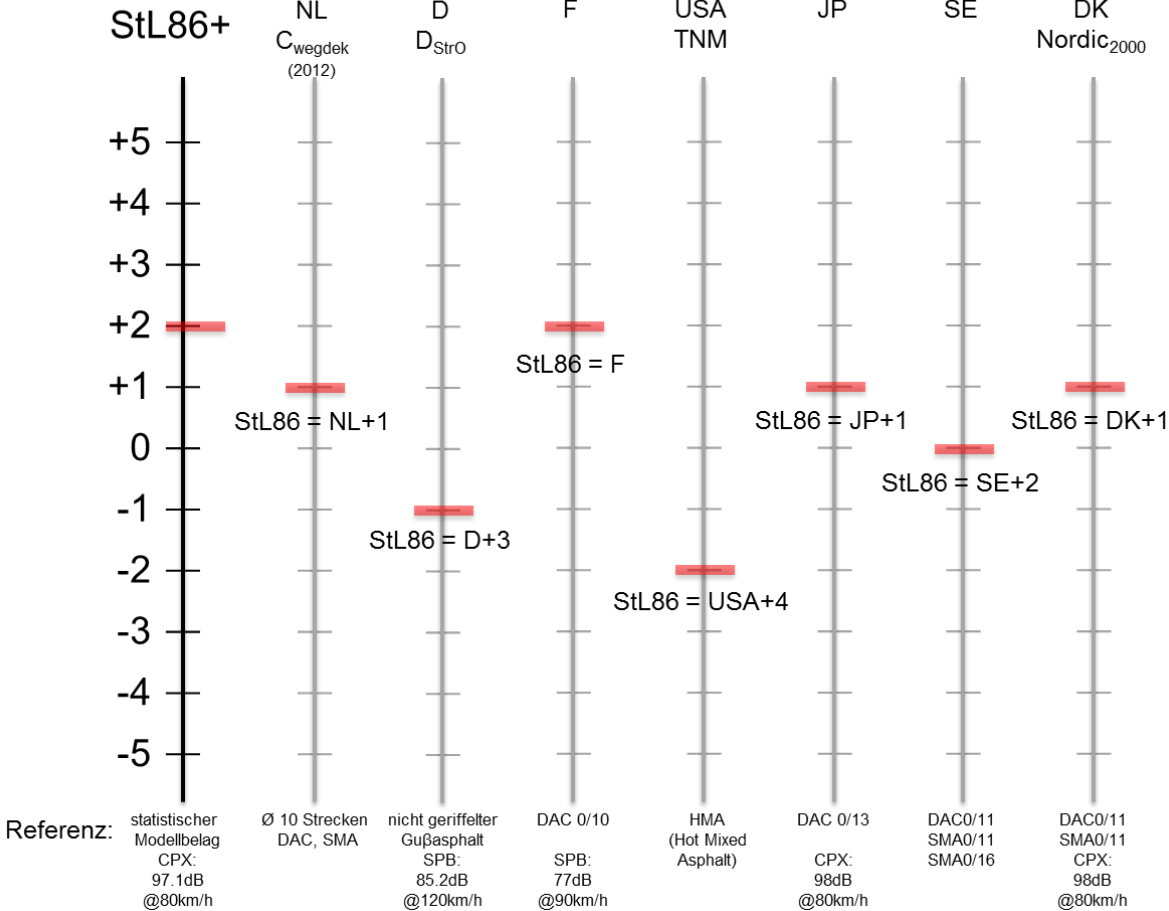


Abbildung 26: SMA 11 und Umrechnung zu StL86+ (Quelle: [31])

### 3.3 Messverfahren

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Messverfahren, sowie deren Vor- und Nachteile aufgezeigt. Kapitel 3.3.5 zeigt einen Vorschlag für die Auswahl des bestgeeigneten Messverfahrens je nach Fragestellung. Dieser basiert auf den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Messverfahren. Die für die Messmethoden geltenden Normen sind in Kapitel 3.1 zusammengestellt.

#### 3.3.1 Nahfeld-Anhängermessungen - close-proximity (CPX)

Bei der Messmethode CPX (close proximity) 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 Anhänger muss die in der ISO 11819-2:2017 [32] festgelegten Kriterien betreffend Beeinflussung der Messergebnisse durch geräteigene Schallreflexionen sowie durch interne und externe Schallgeräusche erfüllen.

Die verwendeten Testreifensätze sind in Abbildung 27 dargestellt (links: Testreifen P1 für Personenwagen, rechts: Testreifen H1 für Lastwagen).



Abbildung 27: Beispiel Messanhänger und CPX-Testreifen P1 (links) und H1 (rechts) (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Eine schematische Übersicht eines CPX-Messsystems ist in Abbildung 28 dargestellt.

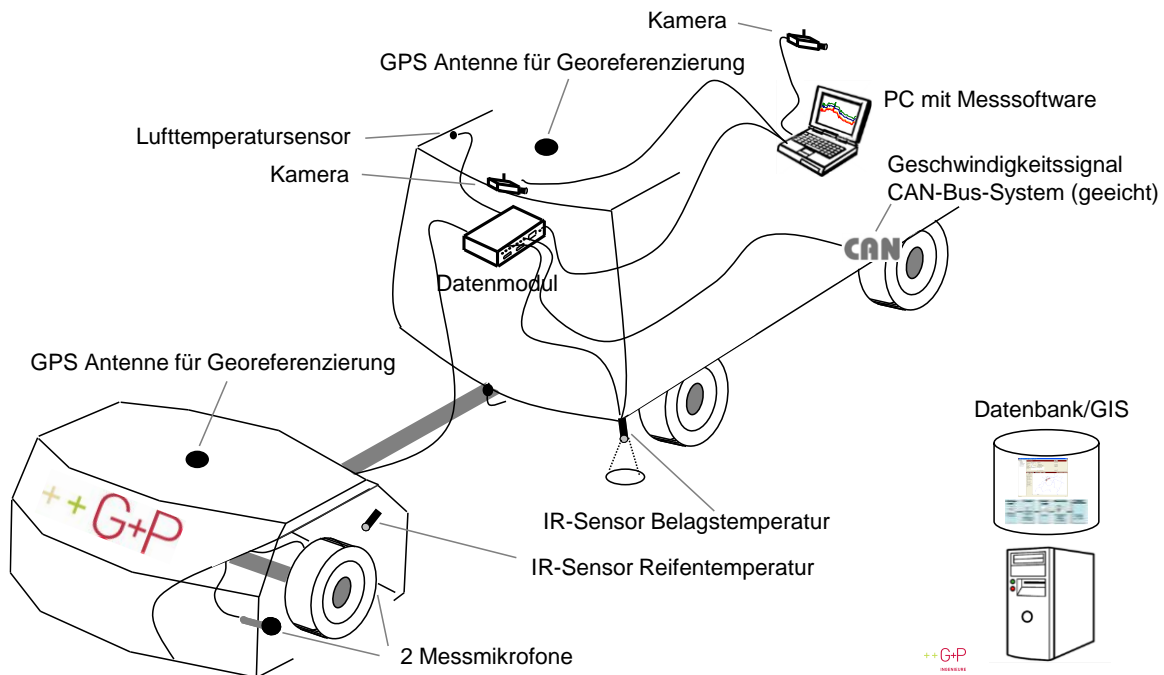


Abbildung 28: Schematische Übersicht eines Messsystems (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Die Signale der 4 Messmikrofone (2 Messmikrofone je Seite), das Geschwindigkeitssignal aus dem kalibrierten 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. Je eine Kamera auf der Vorder- und Hinterseite des Fahrzeugs fotografiert zu Interpretations- und Kontrollzwecken fortlaufend die Strassenoberfläche.

Pro Reifen werden die A-bewerteten Schallpegel kontinuierlich auf der gesamten Messstrecke erfasst. Dabei werden die Mikrofonsignale mit einer Frequenz von 8 Hz aufgezeichnet und pro Messsegment (Länge 20 m) energetisch gemittelt. Die Messfahrt erfolgt bei möglichst konstanter Geschwindigkeit (Referenzgeschwindigkeit von 50 km/h oder 80 km/h).

#### Erläuterungen

**Messreifen:** Die in der Norm angegebenen Referenz-Reifen sind Testreifen, die bestimmte Merkmale des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs darstellen und für die Verwendung in diesem Verfahren mit spezifizierten und reproduzierbaren Standardeigenschaften ausgewählt wurden. Je nach Zweck der Messung werden einer oder beide Testreifensätze verwendet.

Die Messreifen müssen vor Inbetriebnahme (ab Herstellung) gemäss Norm mindestens 400 km eingefahren werden (auf dem Messsystem montiert), damit keine allfälligen Noppen an den Reifen mehr vorhanden sind. Vor jeder CPX-Messung werden die Messreifen ebenfalls eingefahren, damit die Reifen erwärmt werden.

Messreifen P1: PW (SRTT)

Messreifen H1: LKW (AVON AV4)

Shore-Härte / Gummihärte: Die Gummihärte von Reifen ändert sich mit der Zeit und mit der Beanspruchung. Diese Veränderungen des Materials haben einen direkten Einfluss auf die Akustik. Daher müssen die Messreifen durch Messungen der Gummihärte überwacht werden, damit Abweichungen gegenüber einer Referenzhärte berücksichtigt werden können. Eine entsprechende Gummihärtekorrektur (Gummihärtekoeffizient in dB/ShoreA) wird bei den Auswertungen der CPX-Messungen mitberücksichtigt.

Grundsätzlich gilt:

Mit der Beanspruchung wird der Reifen härter. Je härter der Reifen, desto lauter die Reifen-Fahrbahn-Geräusche.

Die durch diverse Studien ermittelte Gummihärteeffekte für die Testreifen sind in Abbildung 29 dargestellt. In der entsprechenden Studie [37] wurden Daten aus 12 Studien zusammengetragen. Die existierende Norm ISO11819-3 [33] wird momentan bezüglich diesen neuesten Erkenntnissen angepasst:

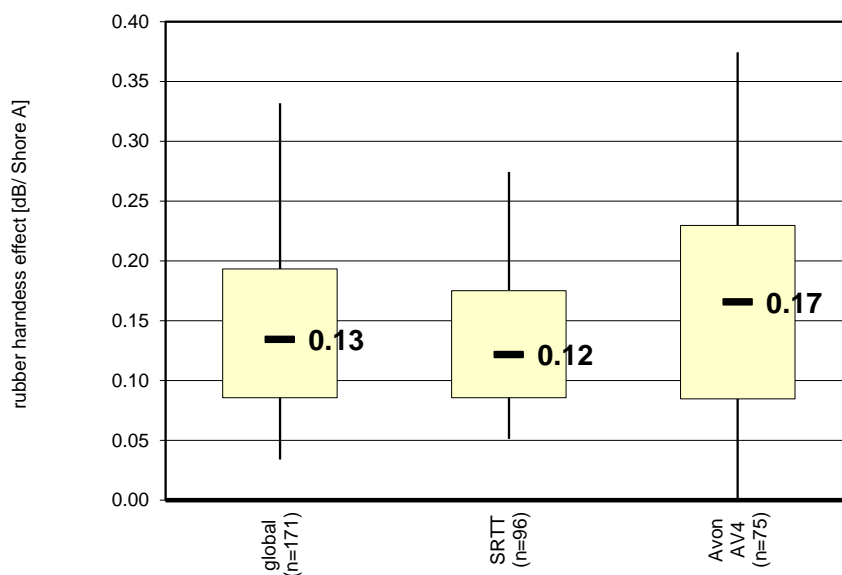


Abbildung 29: Gummihärteeffekt basierend auf 12 Studien und total 171 Datensätzen (Quelle: [[37]])

Temperatur: Die Temperatur beeinflusst die Reifen-Fahrbahngeräusche massgeblich. Grundsätzlich ist dabei die Reifentemperatur massgebend, welche sich auch aus Luft- und Belagtemperatur zusammensetzt. Als Gesamtsystem reagiert die Reifentemperatur auf Veränderungen aber nicht so schnell wie die Luft- und die Belagtemperatur. Um die am besten geeigneten Temperaturvariablen zur Korrektur von Temperatureinflüssen zu identifizieren, wurden alle gemessenen Temperaturen (Lufttemperatur bei 150 cm ( $T_{air150}$ ), 35 cm ( $T_{air35}$ ) und 15 cm ( $T_{air15}$ ) über der Fahrbahnoberfläche, Belagtemperatur ( $T_{tyre}$ ) und Reifentemperatur ( $T_{road}$ )) korreliert [38].

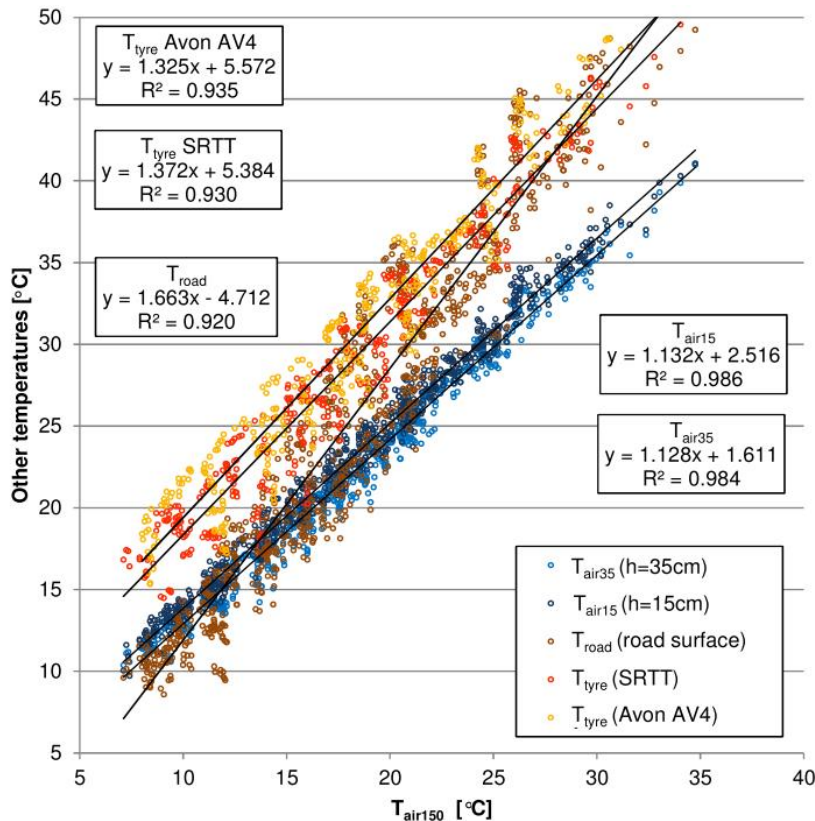


Abbildung 30: Abhängigkeit der gemessenen Temperaturen (Belagstemperatur, Reifentemperatur, Lufttemperatur H=15cm, Lufttemperatur H=35cm) von den am wenigsten oberflächenbeeinflussten Temperaturen (Lufttemperatur H= 150cm) [38] während ca. 10 Messtagen im September in der Schweiz. (Quelle:[39])

Aus dieser Studie geht hervor, dass sich die am wenigsten von der Oberfläche beeinflusste Lufttemperatur (gemessen 150cm über der Fahrbahnoberfläche) für eine Temperaturkorrektur am besten eignet. Dies insbesondere auch für Situationen mit unterschiedlicher Sonneneinstrahlung und Belägen mit unterschiedlichen Oberflächen [38].

Während den Messungen wird die Temperatur durchgehend aufgezeichnet, damit die CPX-Pegel entsprechend korrigiert werden können. Gemäss CPX-Norm sind CPX-Messungen in gemässigten und kontinentalen Klimazonen zwischen 5 und 30°C zulässig. Der zulässige Temperaturbereich ist von den örtlichen Strassenbaustoffen abhängig. In wärmeren Zonen kommen höhere Temperaturen vor und die Bitumenviskosität ist daran angepasst. In einem kälteren Klima kann die gleiche Temperatur zu Bitumenaustritten führen. Es ist bekannt, dass dies zu zusätzlichen Kleb/Reiss-Geräuschen des rollenden Reifens führt.

Der Temperaturkoeffizient ist geschwindigkeitsabhängig [40] und wird in Dezibel je Grad Celsius angegeben. Die Referenztemperatur beträgt 20 °C. Der Werte sind für P1 und H1 negativ.

Grundsätzlich gilt:

Je höher die Temperatur, desto leiser die Reifen-Fahrbahn-Geräusche.

## Erfahrungen ausserhalb Norm

Messreifen: Erfahrungen zeigen, dass die in der Norm vorgegebene Anzahl von 400 Einfahrkilometern nicht ausreicht. Um die Fehlerwahrscheinlichkeit zu minimieren, werden 1'000 km empfohlen.

Um die Vergleichbarkeit jederzeit zu gewährleisten, wird empfohlen, bei starker Nutzung die Testreifen jede Messsaison zu ersetzen.

Shore-Härte / Gummihärte: Erfahrungen zeigen, dass die in der Norm vorgegebenen Durchführungen von Gummihärtemessungen alle 3 Monate nicht ausreichen. Um die Fehlerwahrscheinlichkeit zu minimieren, werden monatliche Messungen der Gummihärte empfohlen.

### 3.3.2 Statistische Vorbeifahrtsmethode (SPB)

Vorbeifahrtsmessungen (Statistical Pass-by, SPB) sind Messungen einzelner Fahrzeuge auf einer Fahrspur nach ISO 11819 1 [35]. Für einzelne Personenwagen und Lastwagen-Vorbeifahrten werden der maximale Vorbeifahrtspegel ( $L_{AFmax}$ ) und Mittelungspegel ( $L_{Aeq}$ ) aufgezeichnet, sowie die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit und Fahrzeugkategorie (N1 oder N2) erhoben. Daraus werden für jede Vorbeifahrt die Emissionswerte  $L_{Amax}$  und  $L_{Aeq/h}$  in 1 m ab Fahrspurachse berechnet und mit den Referenzwerten des EMPA-Modells StL-86+ verglichen.

Mit den Vorbeifahrtsmessungen können Aussagen über die Belagswirkung unter Berücksichtigung des aktuellen Fahrzeugmixes getätigt werden. Dabei werden die Fahrzeugkategorien PW und LKW separat erhoben. Die Messungen beinhalten lediglich eine Fahrspur (punktuelle Erhebung) und sind abhängig vom momentanen und lokalen Fahrzeugmix wie z.B. dem vorherrschenden LKW-Typen. In Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten (z. B. hohes Verkehrsaufkommen, Einflüsse des Untergrunds, Abschirmung/Reflexionen an Leitplanken, Gebäuden sowie quellennahen Hindernissen) können die hohen Anforderungen des SPB-Messverfahrens an die Messbedingungen oft nicht gänzlich erfüllt werden.

Die neue internationale Norm zu SPB-Messungen wird voraussichtlich im Jahr 2020 publiziert.

### 3.3.3 Stichprobe Emissionsmessungen (SEM)

Die SEM-Messung ist eine vereinfachte Ermittlung der Belagsgüte. Während mindestens 30 Minuten wird strassennah der  $L_{Aeq}$  für die Gesamtheit, der auf allen Fahrspuren verkehrenden Fahrzeuge bei gleichzeitiger Verkehrszählung ermittelt. Der gemessene Immissionspegel wird mit dem Modell StL-86+ berechneten Immissionspegel verglichen.

Mit dem SEM-Verfahren werden neben der akustischen Belagswirkung unter Berücksichtigung quellennaher Schallausbreitungseffekte für die momentane Situation auch die Gesamtlärmemissionen erhoben. Insgesamt wird der gesamte Wagenpark erfasst. Eine Unterteilung in PW und LKW ist aber nicht möglich (nur Mischverkehr über alle Fahrspuren). Die Messungen sind abhängig von der Menge lauter Fahrzeuge und der gefahrenen Geschwindigkeiten. Deswegen ist diese Art von Lärmmessung für die



Bestimmung von Belagsgütwerten ungeeignet, insbesondere bei Monitoring Messungen.

### 3.3.4 Vor- und Nachteile Messverfahren

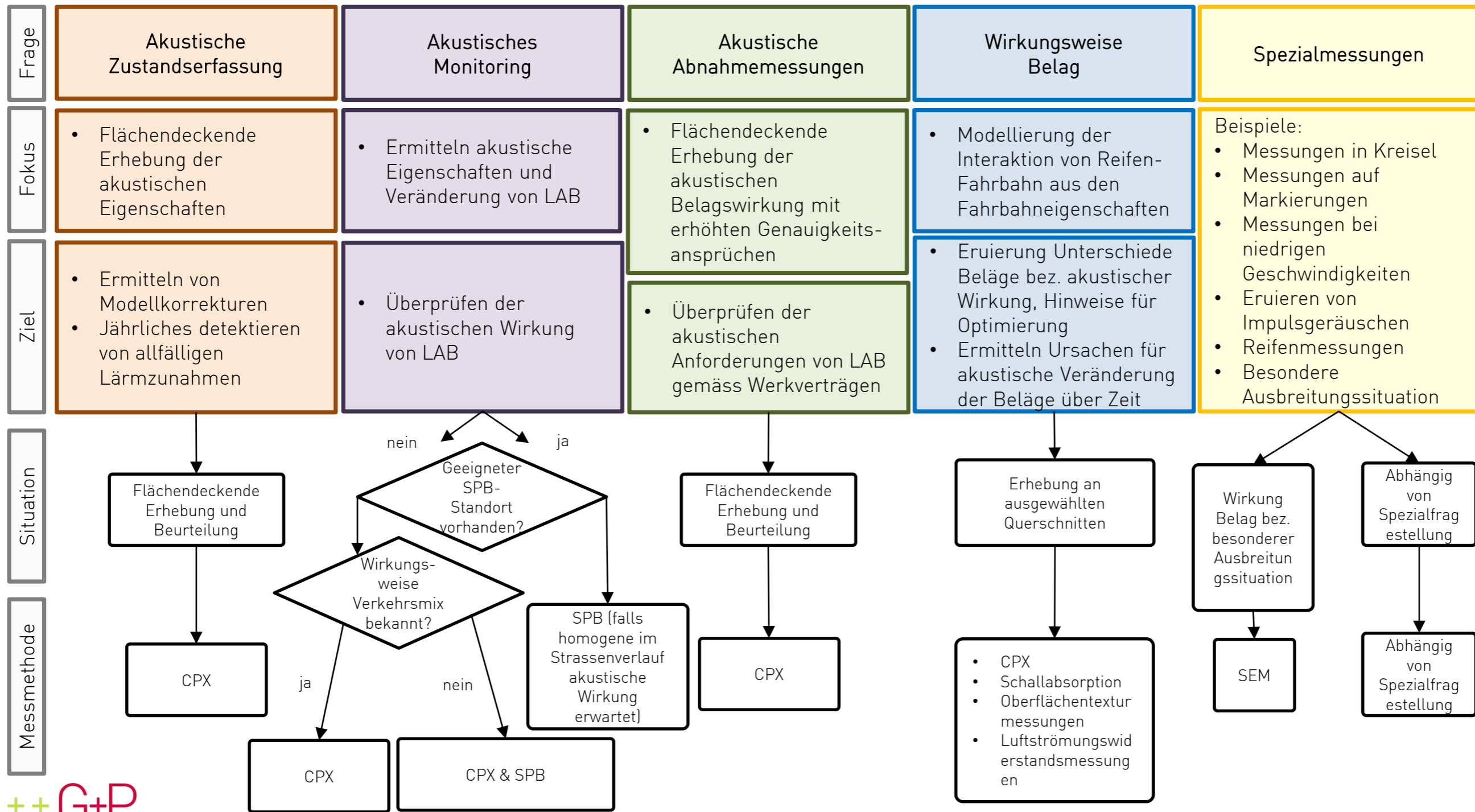
	Vorteile	Nachteile
CPX	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hochstandardisiertes Verfahren</li> <li>▪ Gute Wiederholbarkeit</li> <li>▪ Flächendeckende Erhebung</li> <li>▪ Erhebung über alle Spuren</li> <li>▪ Separate Erhebung der Fahrzeugkategorien PW und LKW</li> <li>▪ Berechnung Mischverkehr möglich</li> <li>▪ Unabhängig von Veränderungen des Fahrzeugmix</li> <li>▪ Lokale Belagseigenschaften identifizierbar</li> <li>▪ Verwendung in Projekten (LSP, etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mögliche Einschränkungen bei Prognose für Fahrzeugmix</li> <li>▪ PA Beläge in fortgeschrittenem Alter variieren die Belagseigenschaften lateral → Abhängigkeit der gemessenen Fahrspur</li> <li>▪ Begleitfahrzeug für Messungen auf Überholspuren notwendig</li> <li>▪ Aufwendige Messeinrichtung: Zugsfahrzeug, Messanhänger, Mehrkanaltechnik erforderlich sowie Messreifen notwendig</li> </ul>
SPB	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aussage Belagswirkung bezüglich aktuellem Fahrzeugmix möglich</li> <li>▪ Separate Erhebung der Fahrzeugkategorien PW und LKW</li> <li>▪ Berechnung Mischverkehr möglich</li> <li>▪ Wirkung in Bezug zur Gesamtemission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erhebung Querschnitt auf einer Fahrspur</li> <li>▪ Abhängig vom momentanen und lokalen Fahrzeugmix → ≠ Monitoring</li> <li>▪ Abhängigkeit vom Messingenieur (Fahrzeugauswahl und Klassierung)</li> <li>▪ Beschreibung von Idealdurchfahrten</li> <li>▪ Durchführung der Messungen mit mehr Aufwand als bei SEM-Verfahren verbunden</li> <li>▪ Hohe Anforderungen an Messbedingungen</li> <li>▪ Einzelne Vorbeifahrten auf stark belasteten Abschnitt schwierig zu erheben</li> <li>▪ Genauigkeitseinschränkung aufgrund der Abmessung der Distanzen zur Quelle</li> <li>▪ Messung kann mit Gefahren verbunden sein (Aufhalten des Messingenieurs in kleinem Abstand zur Strasse)</li> </ul>
SEM	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abschätzung der Belagswirkung für momentane Situation</li> <li>▪ Erhebung der Gesamtlärmemission</li> <li>▪ Erhebung des gesamten Wagenparks</li> <li>▪ Erhebung akustischer Belagswirkung unter Berücksichtigung quellennaher Schallausbreitungseffekte</li> <li>▪ Einfache Durchführung</li> <li>▪ Kosteneffiziente Durchführung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Abhängig vom momentanen und lokalen Fahrzeugmix → ≠ Monitoring</li> <li>▪ Erhebung nur Mischverkehr über alle Fahrspuren</li> <li>▪ Standortspezifisch</li> <li>▪ Nicht geeignet für zur Bestimmung von Belagsgütwerten</li> <li>▪ Abhängigkeit von der Menge der lauten Fahrzeuge</li> <li>▪ Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit</li> <li>▪ Verkehrsnormalisierung funktioniert nur bedingt</li> </ul>

### 3.3.5 Auswahl Messverfahren

Die Auswahl der Messverfahren basiert auf der spezifischen Eignung derer zur Beantwortung der Fragestellung. Die einzelnen Messmethoden, sowie deren Vor- und Nachteile sind in den Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.4 beschrieben.

Die akustischen Eigenschaften von Strassenoberflächen variieren im Streckenverlauf oft stark. Daher bietet die flächendeckende Erhebung mittels CPX-Methode oft Vorteile. Falls für die Beantwortung der Fragestellung ein spezifischer Querschnitt maßgebend ist, kann anstatt CPX-Messungen eine SPB-Messung durchgeführt werden. Die CPX-Methode weist den höchsten Standardisierungsgrad auf und ist deshalb für die Feststellung von akustischen Veränderungen über Zeit, sowie für Vergleiche von akustischen Eigenschaften von Belägen untereinander besonders geeignet.

Werden neuartige Bauweisen realisiert, ist die akustische Wirkung des Strassenbelages in Bezug auf den statistischen Fahrzeugmix mittels einer zusätzlichen SPB-Messung zu überprüfen. Falls die Wirkung eines Strassenbelages bei Auftreten einer besonderen Ausbreitungssituation überprüft werden soll, wird empfohlen, zusätzlich eine Stichprobenemissionsmessungen SEM durchzuführen.



INGENIEURE

Abbildung 31: Auswahl der zur Ausgangslage passenden Messmethode (Quelle: Grolimund + Partner AG)

### 3.4 Analysen und Ermittlung Optimierungspotential

Im folgenden Kapitel werden, die bei der Ermittlung des Optimierungspotentials von leisen Strassenbelägen zur Anwendung kommenden akustischen Analysen erläutert. Akustische Analysen werden immer mit bautechnischen Untersuchungen überlagert (siehe Kapitel 3.4.4).

#### 3.4.1 Akustische Wirkungsanalysen

Vermeintlich gleiche oder ähnliche Rezepturen ergeben manchmal sehr unterschiedliche Lärmreduktionen. Andere Beläge wiederum verhalten sich erst im Verlaufe der Zeit sehr unterschiedlich, ohne dass dies einfach so erklärt werden könnte. G+P hat deshalb die Dienstleistung «akustische Wirkungsanalysen» entwickelt. Mittels akustischer Wirkungsanalysen werden die wirklichen Ursachen für solche Unterschiede aufgedeckt, um notwendige Antworten für eine zukünftige akustische Verbesserung der Beläge zu finden.

Ziele

- Modellierung der Interaktion von Reifen-Fahrbahn aus den Fahrbahneigenschaften mittels SPERoN (Statistical and Physical Explanation of Rolling Noise)
- Wirksamkeit bezüglich Reduktion von Vibrations- und Luftströmungsgeräuschen verstehen
- Quantifizierung und mögliche Prognose der schallabsorbierenden Wirkung
- Eruierung der Unterschiede von Belägen bezüglich deren akustischer Wirkung
- Ermitteln der Ursachen für die akustische Veränderung der Beläge über die Zeit
- Analyse der von der Oberfläche zugänglichen Poren durch Einbezug der Bohrkern- und Mischgutuntersuchungen

Belagsakustische Wirkungsanalysen liefern somit wichtige Informationen für eine nachhaltige akustische Optimierung von leisen Strassenbelägen.

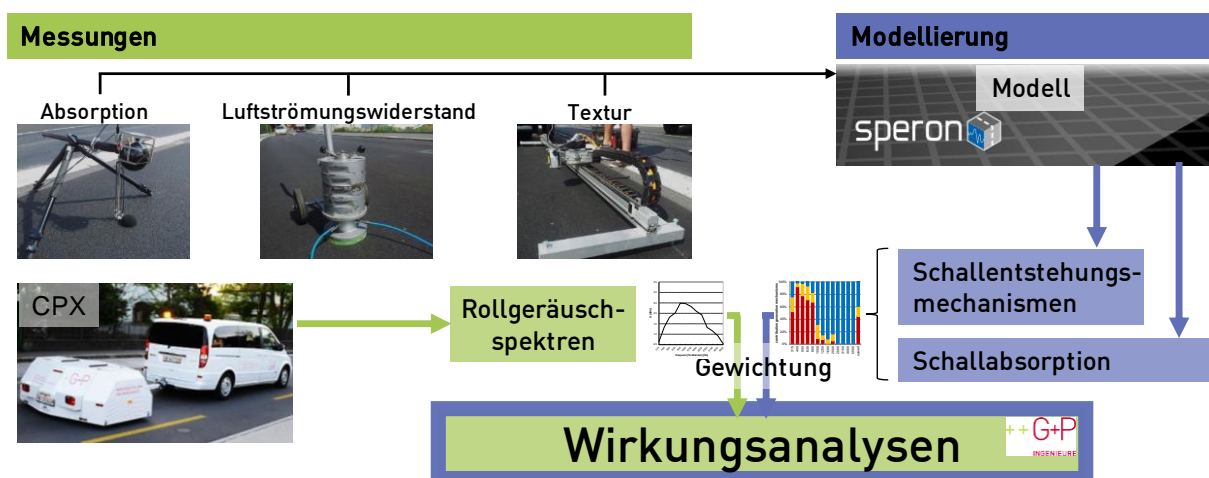


Abbildung 32: Vorgehen akustische Wirkungsanalyse (Quelle: Grolimund + Partner AG)

## Methoden

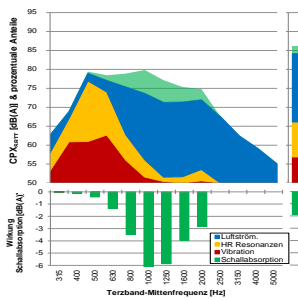
<p>CPX-Messungen</p> 	<p>Kontinuierliche Erhebung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Mindestens zwei Messfahrten pro Richtung und pro Teststreifen (PW und LKW)</p>
<p>Schallabsorptionsmessung</p> 	<p>Die Messung der Schallabsorptionseigenschaften erfolgt mit dem PU-Verfahren in-situ. Bei diesem Messverfahren wird ein Schallsignal auf die Testfläche ausgesendet. Neben dem Schalldruck wird zusätzlich die Schallschnelle aufgezeichnet. Daraus wird die Impulsantwort des abgestrahlten Signals und dessen Reflexion berechnet und hieraus der Schallabsorptionsgrad der Testfläche bestimmt. Im Vergleich zur Bestimmung des Absorptionsgrades mit der Impedanzrohrmethode kann mit dem PU-Verfahren der Schallabsorptionsgrad für einen breiteren Bereich des Lärmspektrums bestimmt werden. Ausserdem ist es möglich, verhältnismässig geringe Schallabsorptionseigenschaften in-situ mit hoher Genauigkeit zu bestimmen.</p>
<p>Oberflächentexturmessungen mit Laserprofilometer</p> 	<p>Für die Schallentstehung hat die Oberflächentextur eines Belages einen entscheidenden Einfluss. Mit einem Laser wird die Oberfläche des Strassenbelags abgetastet und ein 2D Profil erstellt. Das Oberflächenprofil wird nach EN ISO 13473-1 aufgezeichnet. Es werden mindestens 20 Profilquerschnitte von mindestens 2 m Länge (Abstand 1 cm) aufgezeichnet. Das daraus resultierende Pseudo 3D Profil wird dann als wichtige Einfuhrgrösse in SPERoN verwendet.</p>
<p>Luftströmungswiderstandsmessungen mit Lufttopf</p> 	<p>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 Reifen-Strassenbelag entweicht.</p>

## Reifen-Fahrbahn-Interaktionsmodell SPERoN



Das Reifen-Fahrbahn-Interaktionsmodell SPERoN (Statistical and Physical Explanation of Rolling Noise) wird verwendet, um die gemessene lärmreduzierende Wirkung von Belägen bezüglich der Schallentstehungsmechanismen sowie Schallabsorption zu interpretieren. SPERoN modelliert aufgrund von Oberflächentextur-, Luftströmungswiderstands- und Schallabsorptionsmessungen die Lärmpegel für die einzelnen Schallentstehungsmechanismen für PW und LKW Reifen bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Der physikalische Teil des Modells berechnet die Kontaktkräfte zwischen Belagsoberfläche und Reifen. Die Belagsoberfläche wird durch ein 3D-Profil quasi simuliert. Für den Reifen wird ein Standardmodell gewählt. Der statistische Modellteil bildet ein virtuelles Lärmspektrum anhand der modellierten Reifenvibrationen, Luftströmungsmechanismen, Reibungen, Reifenprofilen und dem aerodynamisch erzeugten Schall. SPERoN beinhaltet ebenfalls ein Modul für die Schallausbreitung unter Berücksichtigung des Horneffektes, welches eine Abschätzung der lärmreduzierenden Wirkung durch Schallabsorption erlaubt. Als Simulationsergebnis liefert das Modell ein Lärmspektrum ( $L_{max}$ ) der Rollgeräusche für die Mikrofonpositionen der CPX und SPB Verfahren [42].

## Akustische Wirkungsanalysen



Für die Interpretation der gemessenen Rollgeräuschspektren CPX bezüglich Lärmentstehung und Wirkung Schallabsorption, werden die mit den durch SPERoN modellierten Schallentstehungsmechanismus-spezifischen Geräuschanteilen gewichtet [43]. Auf diese Weise können Aussagen über die Wirksamkeit der Beläge bezüglich der Reduktion von Vibrations- und Luftströmungsgeräuschen, der Eindämmung von Hohlraumresonanzen, sowie der schallabsorbierenden Wirkung eines Belages gemacht werden. Solche akustische Wirkungsanalysen werden beigezogen, um Unterschiede der akustischen Wirkung zwischen einzelnen Belägen zu erklären. Ebenfalls ermöglichen diese, Ursachen für die akustische Veränderung der Beläge über Zeit zu finden.

Abbildung 33 zeigt die Ergebnisse einer Wirkungsanalyse. Beispielhaft wird ein akustischer schlechter (Links) und ein akustisch guter (rechts) Belag der gleichen Bauweise aufgezeigt.

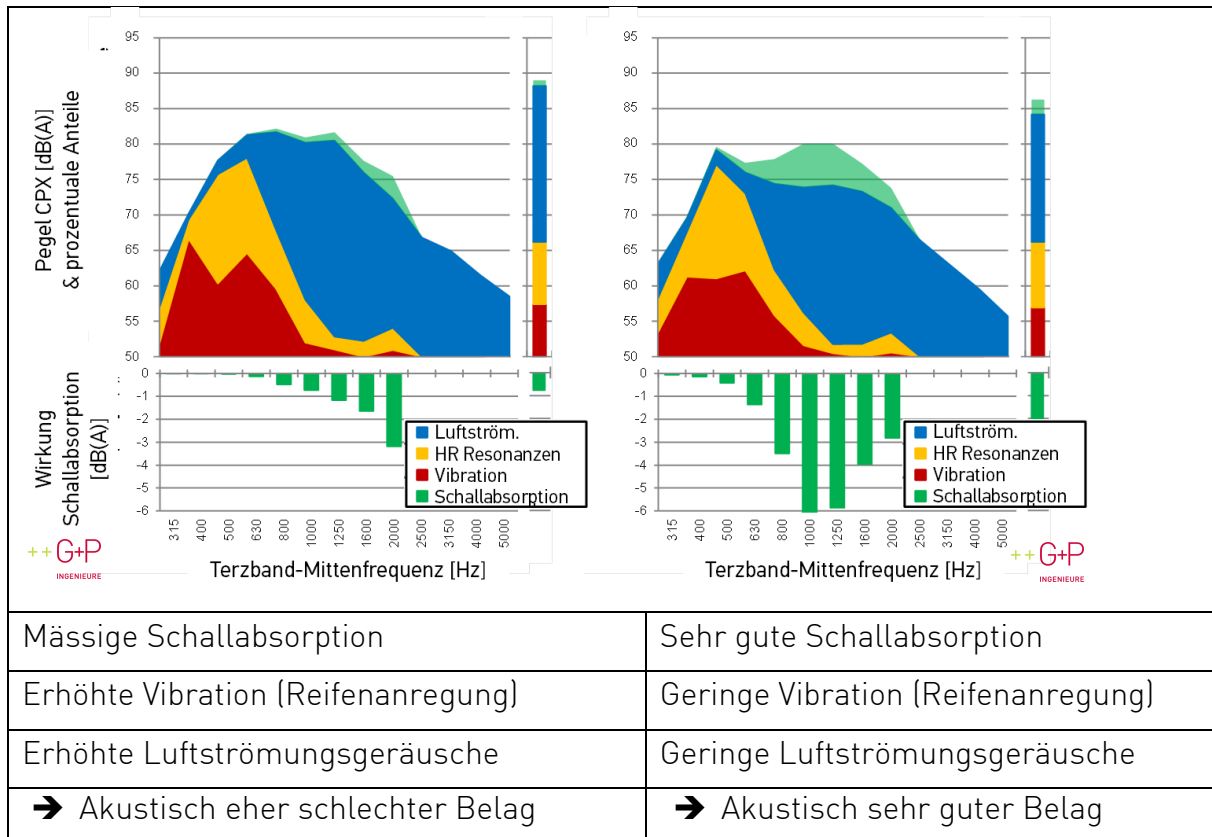


Abbildung 33: Beispiel Ergebnisse Wirkungsanalysen (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Mittels akustischer Wirkungsanalysen können die Anteile der verschiedenen Lärmmentstehungsmechanismen detailliert erhoben und ausgewiesen werden. Damit können die wirklichen Ursachen für unterschiedliche akustische Wirkungen und unterschiedliche akustische Alterungsverhalten erklärt werden. Wirkungsanalysen liefern Antworten und Grundlage für akustische Verbesserungen zukünftiger Mischgüter und Einbauten.

### 3.4.2 Analyse zum Schmutzeintrag in leisen Strassenbelägen

Um eine langfristige Lärmreduktion durch leise Strassenbeläge zu erreichen, sollte der Hohlraumgehalt auf ein Minimum reduziert werden, während gleichzeitig die Zugänglichkeit der Poren gewährleistet bleibt. Dieser heikle Optimierungsprozess erfordert ein detailliertes Verständnis der Porenstruktur der einzelnen Beläge. Bei älteren Belägen möchte man die genaue Lage von Verschmutzungen (durch Reifenabrieb, Landwirtschaft, Baustellen usw.) kennen, um die Anzahl der aktiven Poren mit geeigneten Massnahmen wieder zu erhöhen. G+P hat die AVCA-Methodik (Acoustic-Void-Content-Analysis) entwickelt, die es erlaubt, aufgrund von CT-Scans von Bohrkernen das aktive Porenvolumen von PA und SDA Belägen zu ermitteln. Der Schwerpunkt wird auf der Auswirkung des Schmutzeintrags gelegt. Es wurden Bildklassifizierungsalgorithmen entwickelt, um Steine, Kitte, Schmutz und Porenvolumen zu trennen. Eine anschliessende Pfadanalyse berechnet die Menge der aktiven und verstopften Poren. Das resultierende 3D-Modell der aktiven Porenstruktur wird verwendet, um ihre Auswirkungen auf die Akustik zu untersuchen. Diese Methodik liefert detaillierte Einblicke in die akustisch wirksame Entwicklung von Asphaltmischgut, dient als ideale Grundlage für deren Optimierung und ermöglicht die Quantifizierung und Lokalisierung von Verschmutzungen. Darauf basierend kann die zu erwartende Wirkung verschiedener Massnahmen kosteneffizient prognostiziert werden, so dass der Schmutzhorizont mit geeigneten Massnahmen adäquat entfernt werden kann (siehe Abbildung 34)

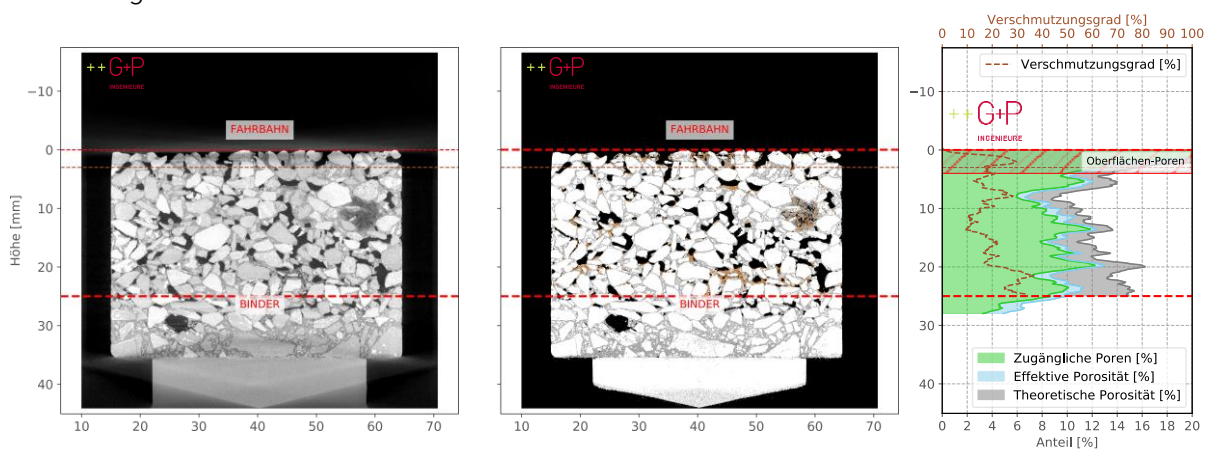


Abbildung 34: Schmutzeintrag- und Hohlraumanalysen (Quelle: [44])

Mit der CT-Methode werden Schichtbilder mittels Kegelstrahl-Röntgen-Computertomographie erzeugt. Die Analyse besteht darin, dass das Schattenbild der zu untersuchenden Probe auf einen Flachdetektor abgebildet wird. Aus den Bilddaten wird anschliessend mittels eines Bilderkennungsalgorithmus der Hohlraumgehalt und Schmutzeintrag für jede 0.03 mm dicke Schicht ermittelt. ([45], [46])



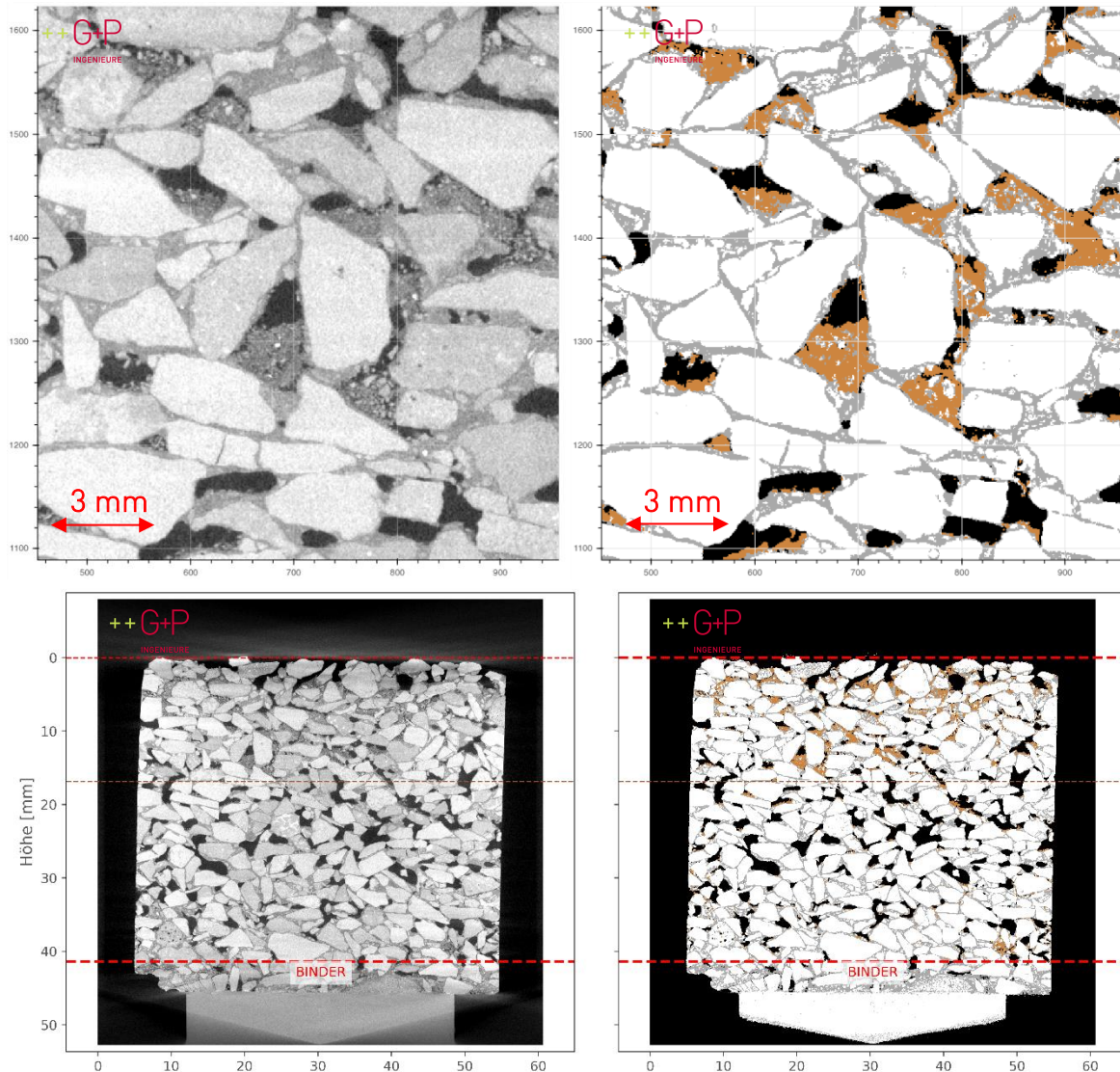


Abbildung 35: Klassifizierung zugänglicher Hohlraumgehalt (schwarz), Schmutzeintrag (braun), Gesteinsaggregate (grau) und Bitumen (hell-grau) im Bohrkern. Quelle: [[44]]

Mit einem von G+P entwickelten Modell werden mittels 3D-Partikelanalysen die höhenabhängigen Hohlraumgehalte (Resultate der Computertomographie) als Pfade der von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume quantifiziert. Der Schmutzeintrag kann bei derselben Analyse separat ausgewiesen werden. Als Beurteilungsgröße wird direkt das Volumen der von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume verwendet. [47]

Bei der Bestimmung des von der Oberfläche zugänglichen Hohlraumgehaltes ist die Art der Verschmutzung entscheidend. So kann Schmutz unterschiedliche Konsistenzen und Zusammensetzungen aufweisen. Durch die CT-Analysen und die nachgeschalteten Algorithmen wird Schmutz durch die Struktur und deren Grauwerte von der Mastix respektive Gestein unterschieden. Dies kann bei stark verdichtetem Schmutz zu gewissen Unsicherheiten führen, da keine Farbumterscheidung möglich ist. Die Klassierung der entwickelte Methode wurde anhand existierender 2.5D Methoden [48] erfolgreich überprüft.

Bei der Untersuchung des aktiven Porenvolumens ist die Handhabung von kleinen Poren wichtig. Denn die akustische Wirksamkeit ist abhängig von der Porengrösse, und deren 3D-Struktur. So ist der Einfluss kleiner Poren auf die akustische Leistungsfähigkeit Gegenstand der Forschung.

### 3.4.3 CPX zur Klassierung der akustischen Leistung von semidichten Asphalten

Erfahrungen zeigen, dass von der Oberfläche zugängliche Hohlräume für eine dauerhafte akustische Leistung von zentraler Bedeutung sind. Auch mit einer feinen Textur kann im Neuzustand eine gute akustische Qualität erreicht werden. Die Feinanteile werden allerdings durch die mechanische Beanspruchung abgetragen, so dass die akustische Qualität aufgrund der raueren Textur schnell abnimmt. Dementsprechend können semidichte Asphalte nicht ausschliesslich durch Messungen der Lärmpegel im Neuzustand charakterisiert werden. Anbindend an den in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Akustikfaktor, basierend auf den Maximalwerten für Füller und Sand, wurden weitere Beurteilungsmethoden entwickelt, mit dem Ziel, neueingebaute semi-dichte Asphalte bereits im Neuzustand zuverlässiger bezüglich der erwarteten akustischen Langzeitwirkung charakterisieren zu können. Im Folgenden wird der in der Studie des Kantons Aargau von Saurer et al., *Etablierung eines Akustik-Faktors zur Beurteilung der akustischen Leistung von semidichten Asphalten* (2018) [47] erarbeitete Akustik Faktor CPX dargestellt. Im Rahmen dieser Studie wurde mittels multivariater statistischer Analysen ermittelt, welche CPX-Frequenzen (im Bereich von 315 bis 5000 Hz) für langfristig gute akustische Leistungen signifikant sind. Aus den statistischen Analysen resultiert, dass sich die Vibrationsfrequenz (500 Hz) und die Luftströmungsfrequenz (3'150 Hz) für die Charakterisierung von SDA Belägen am besten eignen.

$$\text{Akustik Faktor CPX} = -2.5 \text{ Lp}500\text{Hz} + 2.3 \text{ Lp}3150\text{Hz} + 98.5$$

Es wird von einem Grenzwert von 41.1 ausgegangen. Unterhalb dessen kann mit dem Vorhandensein zugänglicher Hohlräume gerechnet werden. Die zwei hochsignifikanten Frequenzen liegen in Bereichen des Rollgeräuschspektrums, die stark durch einzelne Schallentstehungsmechanismen geprägt werden. Die Frequenz 3150 Hz charakterisiert die Luftströmungsgeräusche. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei tieferem Luftströmungsschall mehr zugängliche Hohlräume vorhanden sind. Die Frequenz 500 Hz charakterisiert die Entstehung von Vibrationsschall. [47] Diese Methode kann zur Abschätzung der akustischen Langzeitwirkung herbeigezogen werden. Grundlage dazu bilden die Daten der akustischen Messungen CPX kurz nach Einbau des SDA Belags.

### **3.4.4 Analysen zum kosteneffektiven Einsatz von leisen Belägen (FAME)**

FAME (Forecasting of Acoustic Maintenance Effectivity) ist ein Prognose-Tool, welches durch G+P entwickelt wird und Entscheidungsträger bei der wirtschaftlichen und effektiven Nutzung leiser Strassenbeläge unterstützt. Die akustische Wirkung von leisen Belägen nimmt mit der Zeit allmählich ab. Diese akustische Veränderung lässt sich oft einem oder mehreren Alterungsprozesse zuschreiben (z.B. teilweise Verlust der Hohlraumstruktur durch Schmutzeintrag, Texturveränderung, Kornausbrüche etc.). Die mit der akustischen Alterung des Belages zusammenhängende Zunahme der Lärmbelastung kann sich negativ auf die akustische Lebensdauer des Belages auswirken, da er frühzeitig ersetzt werden muss, um eine Überschreitung der maximal zulässigen Lärmbelastung zu verhindern. Anstatt die Deckschicht vollständig zu ersetzen, kann es rentabel sein, Mikro-Fräsungen oder Reinigungen anzuwenden, um frühere Wirkungen wieder zu erreichen und somit die akustische Lebensdauer zu verlängern. Um einen kosteneffizienten Einsatz von leisen Belägen zu gewährleisten, bedarf es folgender Informationen: Erstens ist für die Planung wichtig, für jeden leisen Strassenbelag eine spezifische Prognose für das Erreichen des akustischen Lebensdauerendes zur Verfügung zu haben. Zweitens bedarf es frühzeitig an Informationen über die erfolgversprechendste Behandlungsmethode sowie zum Zeitpunkt zu welchem diese Methode angewendet werden muss, um wirtschaftlich und effektiv zu sein. FAME stützt sich auf grosse Datensätze und Zeitreihen spektraler Reifen-Fahrbahn-Geräuschprofile (CPX-Messungen) und analysiert und kategorisiert die zugrunde liegenden Mechanismen der Schallentstehung. Die Kategorisierung sowie der abgeleitete momentane Zustand des Belages erlauben es, die zu erwartenden Alterungsprozesse und den damit zusammenhängenden akustischen Wirkungsverlust für jeden Belag spezifisch vorausszusagen und Optionen für die Intervention anzugeben. Diese Grundlagen stellen eine wichtige Basis dar für eine Kosten-Nutzen-Analyse und eine objektive Entscheidung, ob Erhaltungsmaßnahmen oder ein vollständiger Ersatz durchgeführt werden sollen.

## 4. Bautechnische Erfolgskontrolle

### 4.1 Mischgut- und Bohrkernuntersuchungen

Das folgende Kapitel gibt Aufschluss über Mischgutherstellung und -zusammensetzungen, sowie Informationen zur eingebauten Schicht.

#### 4.1.1 Methoden zur Hohlraumbestimmung

Zur Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern sieht die EN 12697 verschiedene Verfahren vor. Beim Tauchwägevorgang werden die zur Berechnung der Raumdichte notwendigen Probekörpervolumen durch Unterwasserwägungen berechnet. Beim Ausmessverfahren wird die Raumdichte geometrisch über das grösste denkbare Volumen des Probekörpers ermittelt.

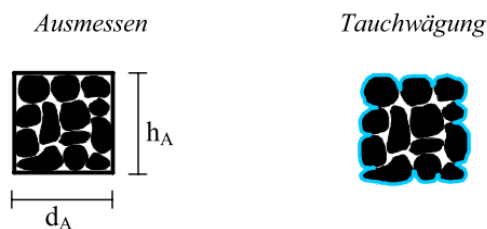


Abbildung 36: Ausmessverfahren und Tauchwägevorgang (Quelle: [49])

Das Tauchwägevorgang stellt eigentlich die präzisere Methode dar, da beim Ausmessverfahren kleine Messungenauigkeiten in der Ausmessung bedeutende Auswirkungen auf das Volumen und folglich auf die Raumdichte haben kann. Beim Tauchwägevorgang besteht die Problematik, dass das Wasser in den Prüfkörper eindringt. Insbesondere bei porösen und semi-dichten Belägen ist das Tauchwägevorgang deshalb nicht ausreichend präzise, da das Wasser in den Probekörper eindringt und danach wieder herausläuft. Das Tauchwägevorgang ist somit nur für dichte Beläge mit einem Hohlraumgehalt bis etwa 6% zielführend. [50] Im Kanton Aargau ist das Ausmessverfahren die massgebende Methode zur Hohlraumbestimmung.

In Abbildung 37 ist die Korrelation der beiden Messverfahren dargestellt. Diese basiert auf insgesamt 72 Bohrkerndaten von Belägen mit Grösstkorn 4 mm und 8 mm aus dem Kanton Aargau.

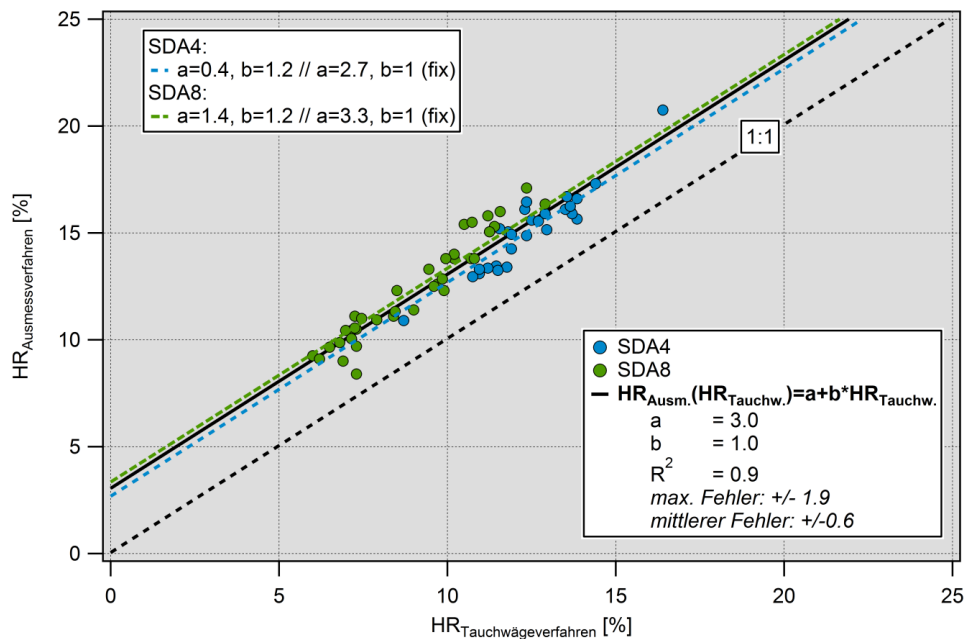


Abbildung 37: Korrelation Tauchwäge- und Ausmessungsverfahren zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes in Bohrkernen und Marshallprüfkörpern [21]

Die Korrelation erweist sich als sehr stark (Steigung 1.0). Es ist ebenfalls zu erkennen, dass eine relative geringe Streuung vorhanden ist ( $R^2 = 0.9$ ). Im Mittel resultieren mit dem Ausmessverfahren um absolut 3% höhere Hohlraumgehalte als mit dem Tauchwägeverfahren ( $a = 3.0$ ). Der mittlere Fehler liegt dabei bei +/- 0.6% [21].

#### 4.1.2 Analyse der Korngrößenverteilung der Rezeptur – Akustikfaktor Rezeptur

Im Rahmen eines Forschungsprojekts des BAFU und des Kantons Aargau wurden die entscheidenden physischen Parameter zur langfristigen akustischen Leistung von SDA Belägen ermittelt [21]. Aus dem Forschungsprojekt geht hervor, dass akustisch langfristig gute SDA Beläge durch tiefe Luftströmungsgeräusche und somit durch von der Oberfläche zugängliche Hohlräume charakterisiert sind. Zudem geht hervor, dass sich Einbau- und Materialparameter als sekundär erweisen. Entscheidend sind Mischgutparameter in der Rezeptur, denn insbesondere hängen die von der Oberfläche zugänglichen Hohlräume stark von den Anteilen Füller und Sand in der Rezeptur ab (siehe auch Kapitel 2.5.2).

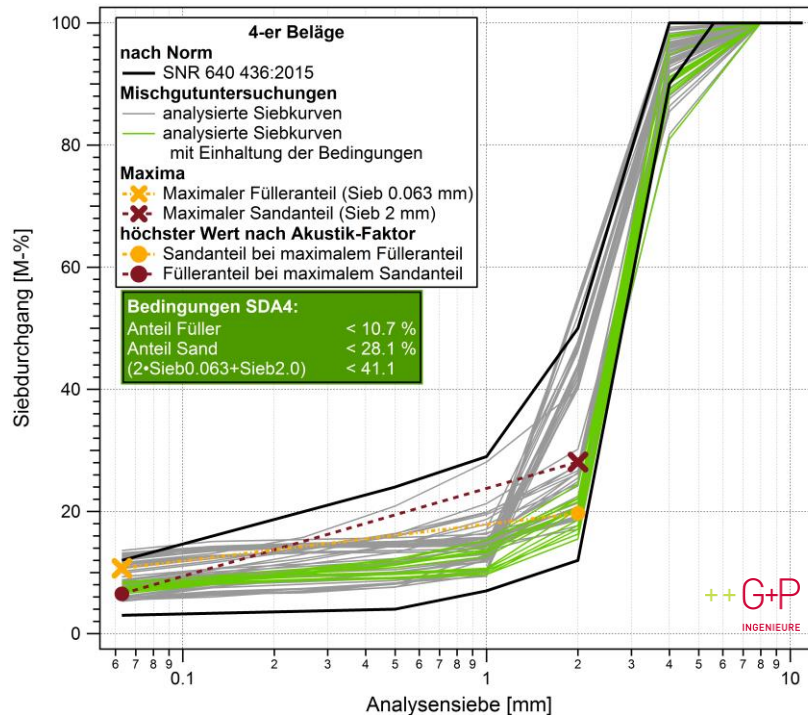


Abbildung 38: Bedingung an SDA 4 Füller- und Sandanteile zur Gewährleistung langfristiger guter Qualität (Quelle: [21])

Um langfristig gute akustische Leistungen von SDA Belägen gewährleisten zu können, wurde ein Faktor ermittelt, welcher den Zusammenhang zwischen Füller- und Sandanteil beinhaltet und als Bedingung für von der Oberfläche zugängliche Hohlräume gilt. [21]

$$\text{Akustikfaktor Rezeptur SDA 4} = 2 \cdot \text{Sieb}0.063 + \text{Sieb}2.0 < 41.1$$

wobei Anteil Füller < 10.7% und Anteil Sand < 28.1% einzuhalten ist

Bemerkung: Sieb = prozentualer Durchgang bei jeweiliger Korngröße

## 4.2 Polierwiderstand

Die Griffigkeit und somit die Sicherheit auf Strassen wird erfahrungsgemäss massgeblich (aber nicht alleinig) vom Polierwiderstand der Gesteine beeinflusst. Der Polierwiderstand beschreibt den Widerstand von Gesteinskörnungen gegen die polierende Wirkung von Fahrzeugen auf der Strasse. Das PSV-Verfahren (Polished Stone Value) und das PWS-Verfahren (Prüfverfahren nach Wehner/Schulze) zur Verfügung. Die Entwicklung beider Prüfverfahren hatte zum Ziel, die Polierbeanspruchung des Strassenverkehrs an Proben im Labor zu simulieren. In der Schweiz ist das PSV-Verfahren gebräuchlich. [51]

Günstig für den Polierwiderstand sind Gesteinskörnungen mit Mineralien, die sich gegenüber einer Polierbeanspruchung unterschiedlich verhalten, so dass die für die Griffigkeit notwendige Feinrauheit der Gesteinskörnungen immer wieder regeneriert wird. Die Gesteinskörnungseigenschaften Polierwiderstand, Festigkeit und Frostbeständigkeit liegen häufig in einem Gestein nicht gleichzeitig optimal vor. Gesteinskörnungen mit einem sehr guten Polierwiderstand können ein vergleichsweise

ungünstiges Festigkeitsverhalten und manchmal eine unbefriedigende Frostbeständigkeit aufweisen. Günstig für den Widerstand gegen Polieren können z.B. bestimmte Grauwacken, Quarzite, Granite oder Quarzporphyre, je nach Gewinnungsstätte, sein. [52]

### 4.3 Bitumeneigenschaften

Im Strassenbau und in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von leisen Strassenbelägen sind die Bitumeneigenschaften von grosser Wichtigkeit. Im vorliegenden Kapitel werden die Bitumeneigenschaften und deren Prüfverfahren grob erläutert. Sämtliche Verfahren sind in den DIN-Normen für Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel definiert.

Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht der drei näher erläuterten Parameter zur Charakterisierung von Bitumen sowie deren Prüfverfahren.

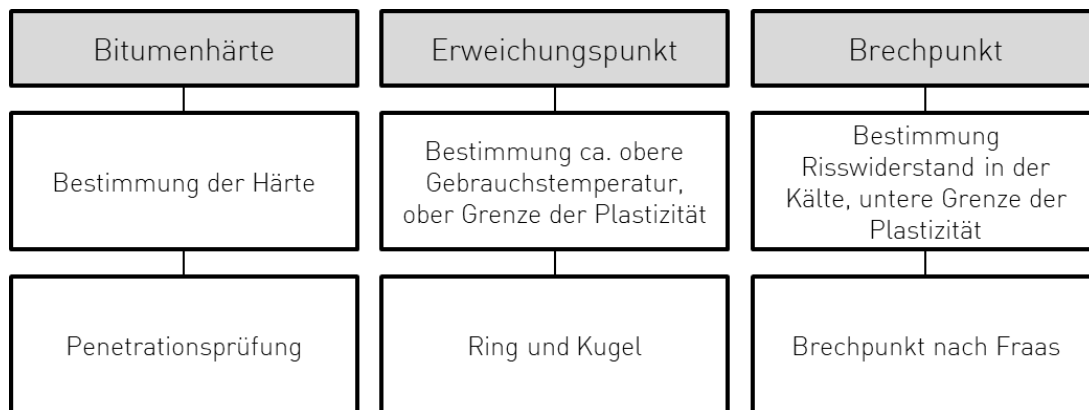


Abbildung 39: Bitumeneigenschaften, nicht abschliessend (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [53])

Zur Charakterisierung und Prüfung von Bitumen dient die Plastizitätsspanne. Diese ist definiert als Temperaturbereich zwischen dem Erweichungspunkt Ring und Kugel (Indikator für den Schmelzpunkt) und dem Brechpunkt nach Fraass (Temperatur bei welcher ein definierter Bindemittelfilm unter zyklischer Biegung reisst). [53]

#### Penetrationsprüfung nach EN 1426

Die Penetrationsprüfung lässt Aussagen über die Härte des Bitumens zu. Dabei wird eine genormte Nadel mit einem Gewicht belastet und die Eindringtiefe der Nadel in 0.1 mm bestimmt. Die für das Verfahren festgelegten Anforderungen an Temperatur, Zeit und Gewicht sind in der Norm festgelegt.

Die Penetrationswerte werden jeweils bei der Klassifizierung von Bitumen angegeben. Beispielsweise bedeutet die Bezeichnung Bitumen 50/70, dass das Bitumen Penetrationswerte (Eindringtiefe der Nadel) im Bereich von 50 bis 70 besitzt. [53]

### Erweichung Ring und Kugel Prüfung nach EN 1426

Anhand der Ring-und-Kugel Prüfung wird die obere Gebrauchstemperatur bestimmt, bei welcher der Übergang von fest/elastisch zu flüssig/plastisch stattfindet. Dazu wird eine Stahlkugel (3.50 g) auf eine Bitumenschicht in einem Ring angebracht. Das Bitumen wird gleichmässig erwärmt. Der Erweichungspunkt ist die Temperatur bei welcher die Stahlkugel einen 25mm langen Bitumenbeutel gebildet (nach unten gedrückt) hat. [53]

### Brechpunkt nach Fraass in EN 12593

Der Brechpunkt nach Fraass zeigt die Temperatur, bei welcher ein Bitumenfilm unter zyklischer Biegung reisst. Dabei wird ein Bindemittelfilm auf einem Blech aus Federstahl angebracht. Anschliessend wird die Temperatur gesenkt und das Blech wird zyklisch gestaucht und entspannt. Die Temperatur beim ersten Riss gilt als Brechpunkt nach Fraass. [53]

### Polymermodifizierte Bindemittel PmB

Polymermodifizierte Bindemittel sind wesentlich durch ihren strukturellen Aufbau sowie durch das mikro- und nanostrukturelle Zusammenwirken zwischen Polymer und Bitumen bestimmt. Polymermodifizierte Bitumen können verschiedene Eigenschaften bezüglich Elastizität, Oxidations- und Temperaturempfindlichkeit aufweisen [53].

Beispiel Bezeichnung:

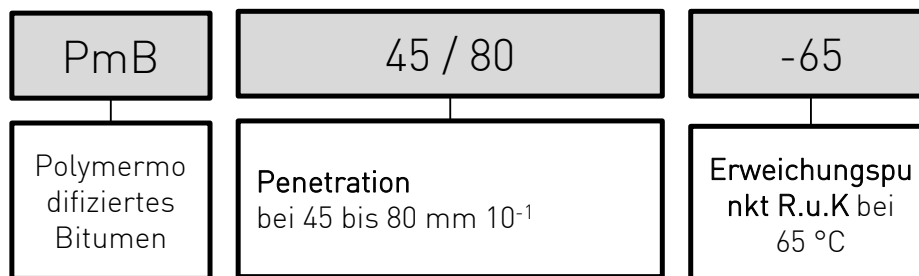


Abbildung 40: Bezeichnung Bitumen (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Die Eigenschaften von polymermodifizierten Bitumen hängen von der Art und der Menge des Polymers sowie der Dispersionsfreiheit ab. Nachfolgend sind Gründe zur Verwendung von Polymerbitumen aufgezeigt: [53]

- Weichere Bindemittel bei tiefen Gebrauchstemperaturen (wenig Risse)
- Steifere Bindemittel bei hohen Temperaturen (wenig Spurrinnenbildung)
- Reduktion der Viskosität bei Einbau- und Applikationstemperaturen (leichtere Verdichtbarkeit)
- Reduktion der erforderlichen Einbau- und Applikationstemperaturen
- Erhöhung der Dauerhaftigkeit und Festigkeit von Strassenbelägen
- Erhöhung der Abriebfestigkeit an der Oberfläche von Strassenbelägen
- Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit von Belägen
- Reduktion der Dicke von Strassenbelägen
- Erhöhung der Witterungsbeständigkeit
- Erhöhung der Bindemittelfilmdicke
- Realisierung spezieller Strassenbelagskonzepte (offenporiger Asphalt)



#### 4.4 Mastix Eigenschaften

Die Mastixqualität ist ein wichtiger Faktor für die Lebensdauer des Strassenbelags. Die Charakterisierung des Mastix erfolgt beispielsweise durch die «Module-de-Richesse-Methode». Im vorliegenden Kapitel wird die Charakterisierung der Mastix Eigenschaften durch diese Methode grob erläutert (nicht abschliessend).

Der «Module de Richesse» kennzeichnet die Dicke des Bindemittelfilms, der die Gesteinskörnung im Asphaltmischgut umhüllt (VSS 640 431) [54], [21]. Um Kornausbrüche zu verhindern, ist der Bindemittelfilm für eine gute Verbindung der Aggregate, insbesondere bei Ausfallkörnungen, von grosser Wichtigkeit

Der »Module de Richesse«  $M_R$  ist wie folgt definiert [21]:

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

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-%]

## 5. Erhebung und Bereitstellung akustischer Grundlagen im Kanton Aargau

### 5.1 Flächendeckende akustische Zustandserfassung CPX

Ziel:
- flächendeckende Erhebung der akustischen Belagsgüte (gesamtes Strassennetz) - jährliches Detektieren von allfälligen Lärmzunahmen.

#### 5.1.1 Durchführung der Messung

Die Anforderungen an die Messungen sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Anforderungen an die Durchführung von CPX-Messungen – akustische Zustandserfassung CPX  
(Quelle: Grolimund + Partner AG nach [32])

Normen, Grundlagen und Korrekturen	ISO 11819-2 [32], ISO/TS 11819-3 [33], ISO/TS 13471-1 [34]
Messgeschwindigkeit	50 km/h
Toleranzbereich Messgeschwindigkeit	±10 km/h (für einzelne Messsegmente)
Perimeter	Gesamtes Strassennetz oder Strassenzüge
Messtemperatur (Luft)	5°C bis 30°C
Meteo	Niederschlagsfrei, trockene Fahrbahn
Anzahl Messfahrten	1 Messfahrt pro Fahrspur PW-Reifen beidseitig montiert 1 Messfahrt pro Fahrspur LKW-Reifen beidseitig montiert
Gemessene Fahrspuren	Messungen immer in der Radspur
Kennzeichnungen, elektronische Markierung zu den akustischen Signalen	Anfang/Ende der Messstrecke, Störgeräusche, Spurverschiebungen, Brücken, Tunnel, Baustellen
Messfahrten sind solange zu wiederholen bis valide Messungen durchgeführt werden konnten	z.B. bei hohem Verkehrsaufkommen am Tage, können die Messungen in die Abend-/Nachtstunden verschoben werden

#### 5.1.2 Datenauswertung und Umrechnung zu StL-86+/ SonRoad18

Die Datenanalyse und -auswertung erfolgt nach den Vorgaben in der ISO 11819-2:2017 [32], ISO TS 11819-3:2017 und ISO 13471-1:2017 [34] geschilderten Vorgehensweise. Die Messresultate werden entsprechend der Messgeschwindigkeit sowie bezüglich geräteeigener Schallreflexionen, der in-situ gemessenen Lufttemperatur auf 1.5 m Höhe über dem Boden und der spezifischen Reifenhärte korrigiert. Eine schematische Darstellung des Vorgehens bei der Datenauswertung und -korrektur ist in Abbildung 41 gezeigt. Die Anforderungen an die Datenauswertung sind in Tabelle 11 zusammengefasst.



Abbildung 41: Schema zur Datenauswertung und -korrektur – akustische Zustandserfassung CPX (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [32], [33], [34], [36])

Tabelle 11: Anforderungen an die Auswertung von CPX-Messungen (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [32], [33], [34], [36])

Normen, Grundlagen und Korrekturen	ISO 11819-2 [32], ISO/TS11819-3 [33], ISO/TS 13471-1 [34]
Georeferenzierung	Fahrspuren parallel zueinander
CPX-System-Korrektur	ISO: 11819-2 [32]
Geschwindigkeitskorrektur	ISO 11819-2 [32]
Temperaturkorrektur	ISO/TS 13471-1 [34]
Gummihärtekorrektur	ISO/TS11819-3 [33]
20 m Segmente	ISO : 11819-2 [32]
Umrechnungsmodell CPX-Werte auf StL-86+	Leitfaden Strassenlärm Anhang 1c [36]
Ausschliessen von Segmenten mit nicht normkonformen Messergebnissen (falls nötig) und Dokumentation	z.B. Geschwindigkeitsabweichungen, Störgeräusche

### 5.1.3 Datenaufbereitung und Abgabe

Im folgenden Kapitel sind die wichtigsten Schritte für die Datenaufbereitung und Abgabe erläutert. Diese beziehen sich auf die dazu geltenden Normen und den spezifischen Anforderungen des Kantons Aargau.

Ergebnisse der 20 m Segmente, welche durch Störelemente (z.B. Geschwindigkeitsabweichungen, Störeinflüsse) beeinflusst werden, werden von der Beurteilung ausgeschlossen. Da bei der Zustandserfassungsmessung die akustische Beurteilung der gesamten Strassenfahrbahn im Vordergrund steht, werden «belagsfremde» Einflüsse in der Radspur nicht von der Beurteilung ausgeschlossen. Den 20 m Segmenten werden die Belagsinformationen (Belagstyp, Einbaujahr) zugeordnet (falls vorhanden). Basierend auf den Belagsinformationen werden pro Belagsabschnitt (über die gesamte aufeinanderfolgende Länge desselben Belagstyps und desselben Einbaujahrs) die Mittelwerte der Akustische Belagsgütwerte CPX in dB(A) in Abweichung zu StL-86+ berechnet. Dabei resultieren akustische Mittelwerte für die PW, LKW und Mischverkehr mit einem bestimmten Schwerverkehrsanteil (üblicherweise 8%). Für längere Abschnitte ohne Belagsinformationen werden akustisch homogene Abschnitte gebildet (nach dem in [55] beschriebenen Verfahren). D.h. bei statistisch signifikanten Veränderungen der akustischen Eigenschaften im Strassenverlauf, sowie unter Berücksichtigung einer minimalen Mittelwertdifferenz werden die Abschnitte unterteilt (akustisch homogene Abschnitte). Dazu eignet sich der Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) nach Alexandersson & Moberg [56], welcher häufig zur Identifikation von signifikanten Mittelwertveränderungen in Datenserien verwendet wird. Die Ergebnisse der CPX-Messungen werden anschliessend so aufbereitet, dass diese anhand von Shapefiles (Dateiformat für vektorielle Geodaten) in Plänen visualisiert werden können. In der folgenden Abbildung sind die wichtigsten Abgabeformate und deren Inhalte ersichtlich.

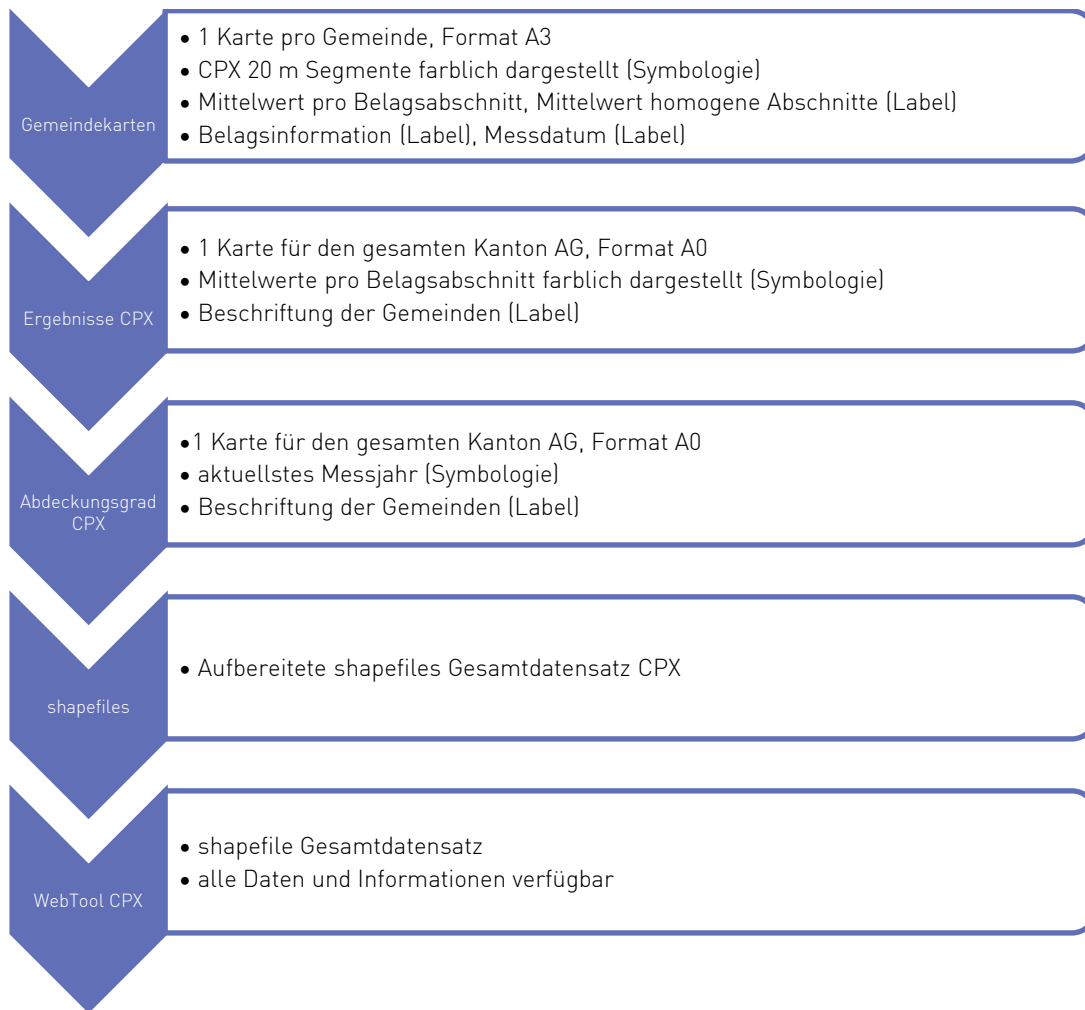


Abbildung 42: Abgabeformate und Inhalte akustischer Zustandserfassungen (Quelle: Grolimund + Partner AG)

### 5.1.4 Verwendung der Daten in Projekten

Die Verwendung der CPX-Daten in Projekten ist in der Arbeitsanleitung zur Durchführung von Lärmsanierungsprojekten detailliert beschrieben (IMS Kt Aargau Dokument 403.201).

### 5.2 Akustisches Monitoring CPX leise Beläge

- Ziel:
- Erhebung der akustischen Belagsgüte von Strecken mit leisen Strassenbelägen
  - jährliches Überprüfen der akustischen Wirkung.

### 5.2.1 Durchführung der Messung

Die Anforderungen an die Messungen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Anforderungen an die Durchführung von CPX-Messungen – akustisches Monitoring leise Strassenbeläge CPX (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [32])

Normen, Grundlagen und Korrekturen	ISO 11819-2 [32], ISO/TS 11819-3 [33], ISO/TS 13471-1 [34]
Messgeschwindigkeit	50 km/h
Toleranzbereich Messgeschwindigkeit	+/-5 km/h (für einzelne Messsegmente)
Perimeter	Einzelne Belagsabschnitte
Messtemperatur (Luft)	5°C bis 30°C
Anzahl Messfahrten	Niederschlagsfrei, trockene Fahrbahn
Gemessene Fahrspuren	2 Messfahrten pro Fahrspur PW-Reifen beidseitig montiert 2 Messfahrten pro Fahrspur LKW-Reifen beidseitig montiert
Messablauf bei mehreren Fahrspuren	Messungen immer in der Radspur
Kennzeichnungen, elektronische Markierung zu den akustischen Signalen	Anfang/Ende der Messstrecke/LAB, Störgeräusche, Brücken, Tunnel, Baustellen, alle belagsfremden Einflüsse wie Schachtdeckel, Markierungen, Flicke, etc.
Messfahrten sind solange zu wiederholen bis valide Messungen durchgeführt werden konnten	z.B. bei hohem Verkehrsaufkommen am Tage, können die Messungen in die Abend-/Nachtstunden verschoben werden

## 5.2.2 Datenauswertung und Umrechnung zu StL-86+/SonRoad18

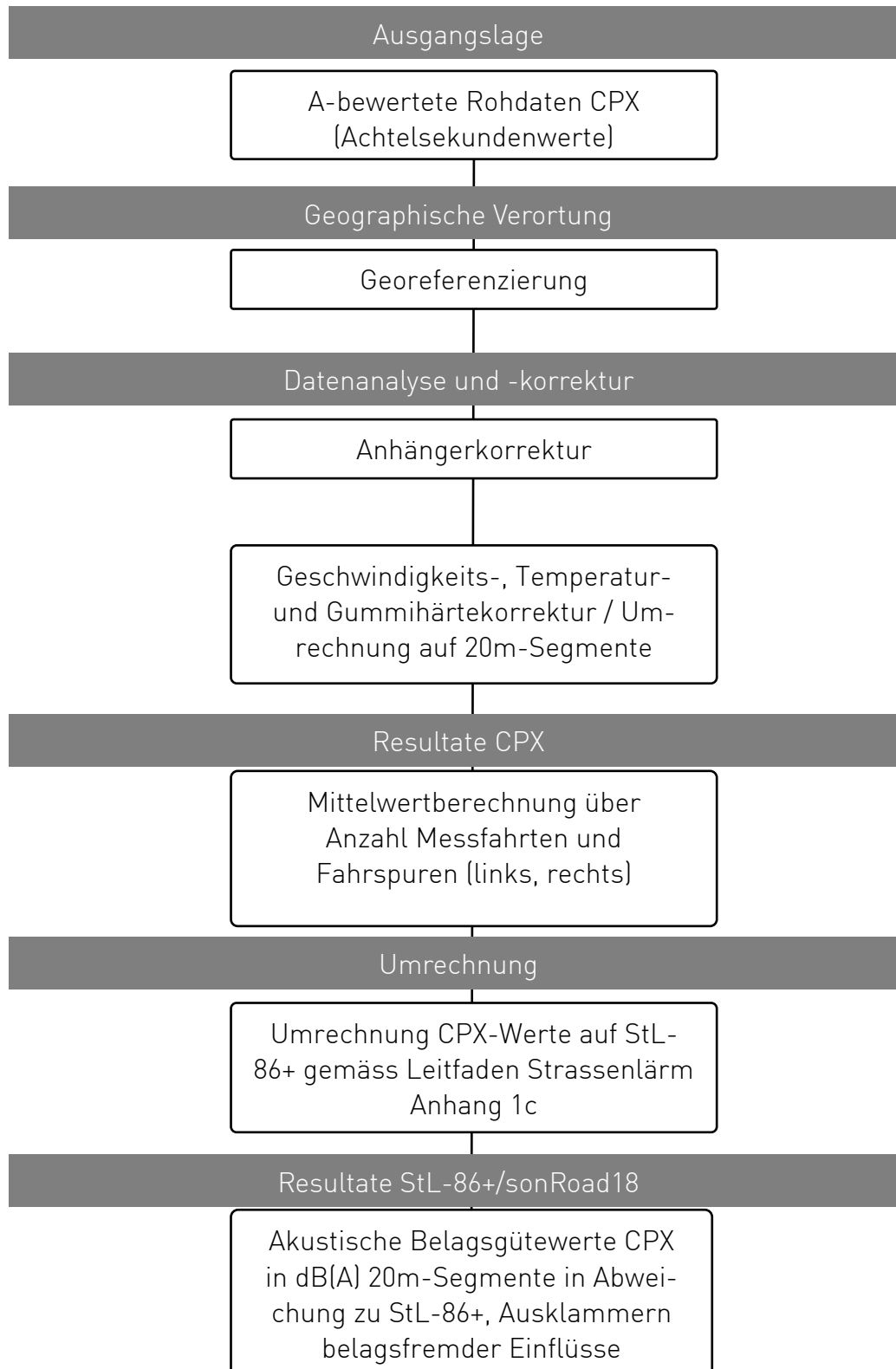


Abbildung 43: Schema zur Datenauswertung und -korrektur – akustisches Monitoring leise Strassenbeläge Datenaufbereitung und Abgabe (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [32], [33], [34], [36])

Im folgenden Kapitel sind die wichtigsten Schritte für die Datenaufbereitung und Abgabe erläutert. Diese beziehen sich auf die dazu geltenden Normen und den spezifischen Anforderungen des Kantons Aargau.

Ergebnisse der 20 m Segmente, welche durch Störelemente (z.B. Geschwindigkeitsabweichungen, Störeinflüsse) und «belagsfremde» Elemente (Schachtdeckel, Markierungen, Flicke, etc.) beeinflusst werden, werden von der Beurteilung ausgeschlossen (bei Monitoringmessungen steht die Beurteilung der akustischen Eigenschaft des Strassenbelages im Vordergrund). Den 20 m Segmenten werden die Belagsinformationen (Belagstyp, Einbaujahr) zugeordnet. Basierend auf den Belagsinformationen werden pro Belagsabschnitt die Mittelwerte der Akustische Belagsgütwerte CPX in dB(A) in Abweichung zu StL-86+ berechnet. Dabei resultieren akustische Mittelwerte für die PW, LKW und Mischverkehr mit einem bestimmten Schwerverkehrsanteil (üblicherweise 8%) pro Strecke mit LAB. In Abbildung 44 sind die wichtigsten Abgabeformate und deren Inhalte ersichtlich.

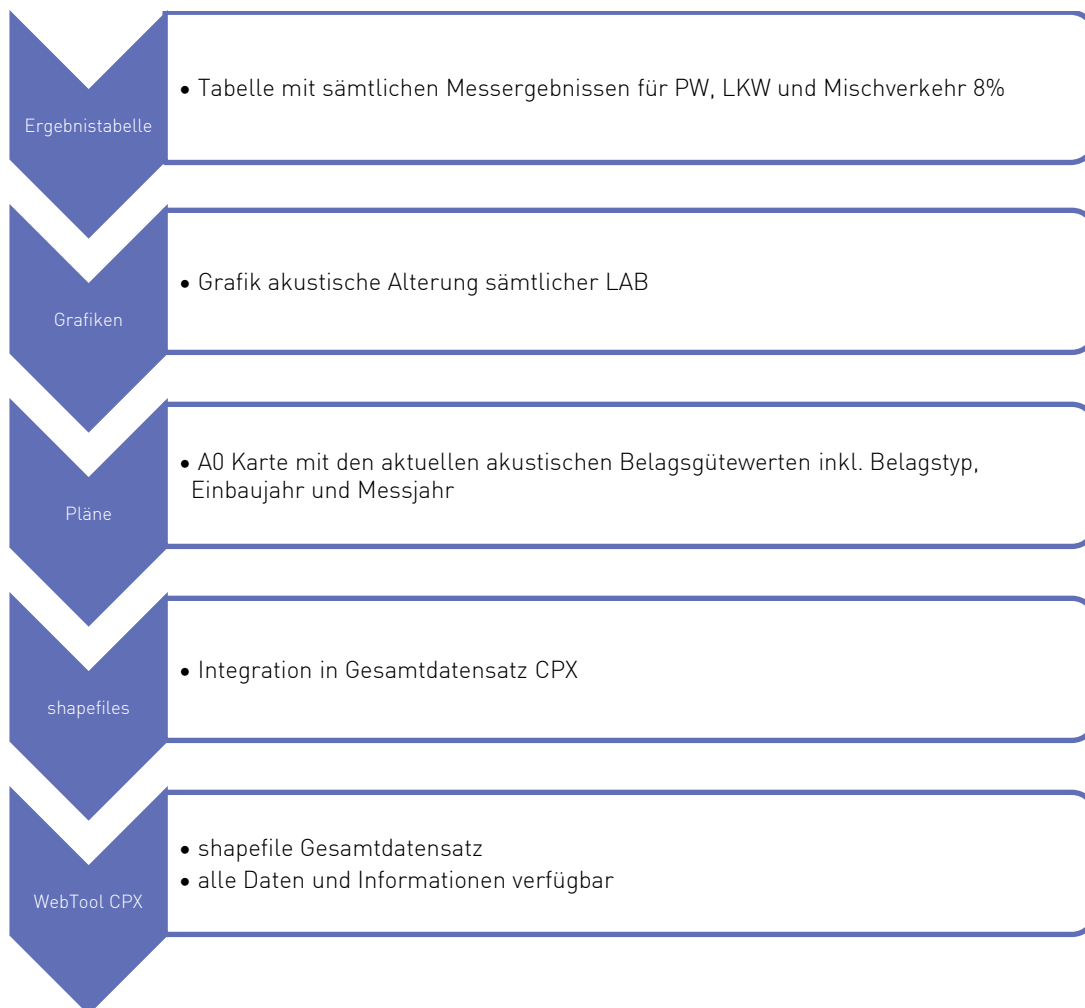


Abbildung 44: Abgabeformate und Inhalte von akustischem Monitoring (Quelle: Grolimund + Partner AG)



### 5.3 Überprüfen Anlagewert Strassen

Die in Kapitel 5.1 und 5.2 beschriebenen akustischen Messungen stellen ein Basiselement zur Überprüfung Anlagewertes der Strassen dar.

Die akustische Qualität der Strassenbeläge wird alle 3 Jahre flächendeckend über das gesamte Kantonsstrassennetz des Kantons Aargau mit der CPX-Methode messtechnisch erhoben (siehe Kap. 5.1). Diese Daten stellen ein zentrales Mittel zur Überwachung der durch den Strassenbelag bedingten Veränderungen der Lärmemissionen dar. Um die Anforderungen der Bundessubventionen zu überprüfen, wird die akustische Qualität der eingebauten leisen Strassenbeläge ebenfalls periodisch erhoben und beurteilt (siehe Kap. 5.2). Die Messungen dienen ebenfalls als Frühwarnsystem, um einerseits mögliche Fehler bei der Herstellung oder beim Einbau zu erkennen und andererseits, um eine Grundlage für die stetige Optimierung der Beläge herbeizuführen. [57]

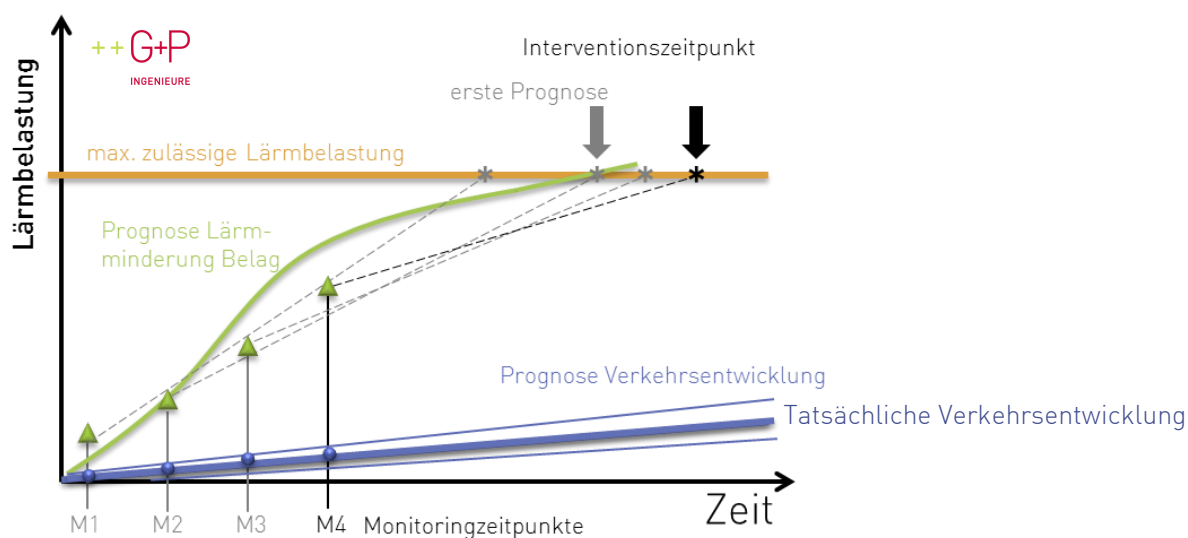


Abbildung 45: Ermittlung des Interventionszeitpunkts leiser Strassenbeläge (Quelle: Grolimund + Partner AG)

Anhand des oben dargestellt Prognosetools werden die Emissionen in regelmässigen Abständen überwacht. Der Zeitpunkt, bei welchem ein Belagsersatz erforderlich ist (Interventionszeitpunkt), kann somit frühzeitig ermittelt und entsprechend in die Planung miteinbezogen werden.

Der Interventionszeitpunkt, respektive die Veränderung der Emissionen ist von verschiedenen Faktoren abhängig:

- von der Verschlechterung der akustischen Belagsgüte der Strassenbeläge
- von der Verkehrsentwicklung

Die Erhebung des aktuellen akustischen Zustands der eingebauten leisen Strassenbeläge sowie des gesamten Strassennetzes erlaubt eine langfristige und effiziente Planung der Strassenerhaltung und des Strassenunterhalts, sowie auch die Überwachung und Einhaltung der Anforderungen des Lärmschutzes und der geforderten Wirksamkeit von leisen Strassenbelägen. [57] Um eine zielgerichtete und erfolgreiche Strategie zu verfolgen ist es von grosser Wichtigkeit den akustischen Zustand der Strassen langfristig zu überwachen.

## 6. Erkenntnisse aus der Praxis

### 6.1 Akustische Wirkung von SDA Belägen im Kanton Aargau

Der Kanton Aargau lässt die realisierten SDA Beläge jährlich auf deren akustischer Qualität hin überprüfen. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die akustischen Wirkungen in Abhängigkeit des Belagsalters.

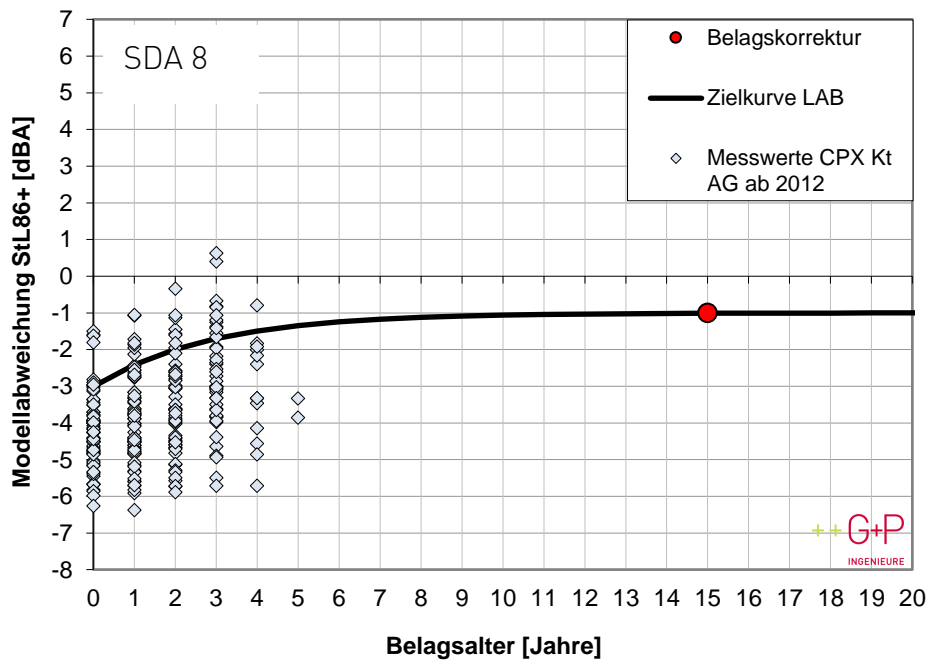


Abbildung 46: Messungen CPX Kt AG SDA 8 ab Einbaujahr 2012 (Stand Ende 2018, Mischverkehrswerte 8%)  
(Quelle: Grolimund + Partner AG)

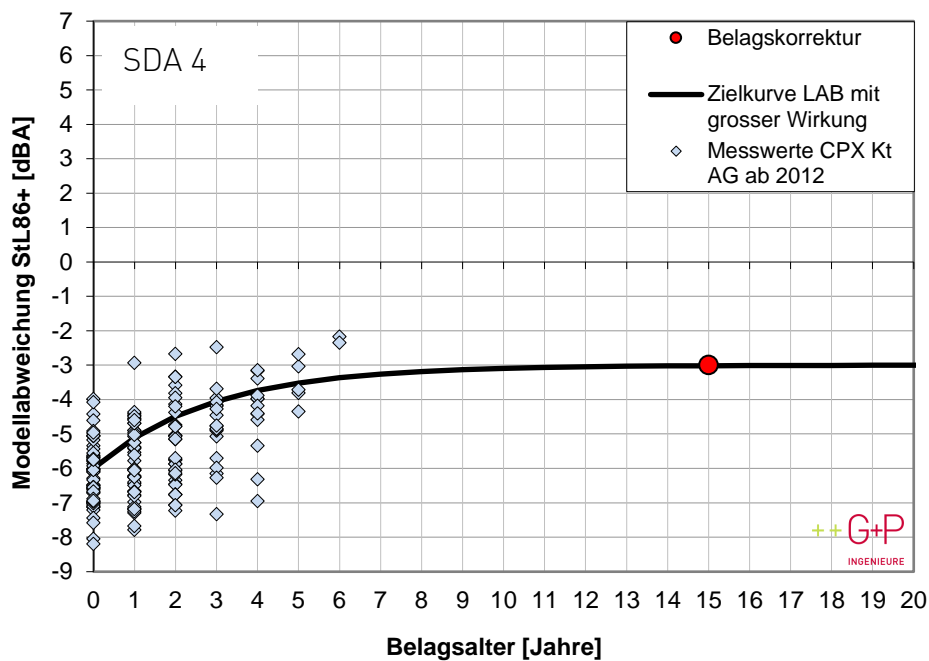


Abbildung 47: Messungen CPX Kt AG SDA 4 ab Einbaujahr 2012 (Stand Ende 2018, Mischverkehrswerte 8%)  
(Quelle: Grolimund + Partner AG)

## 6.2 Akustische Wirkung Strassenbeläge in Knoten und Kreiseln

In der Vollzugshilfe 3.21 des Cercle Bruit *Lärmtechnische Beurteilung von Knoten und Kreiseln* sind unter anderem die zu berücksichtigenden Belagswirkungen (emissionsseitig) aufgezeigt. [58]

### Belagswirkung emissionsseitig

Die Belagswirkung im Nahbereich von Knoten und Kreiseln ist in der nachfolgenden Tabelle als Prozentwert des Belagskennwerts auf der freien Strecke aufgeführt [58].

Tabelle 13: Belagswirkung im Nahbereich von Knoten und Kreiseln (Quelle: [58])

	Distanz zum Knoten/Kreisel	Belagswirkung
Freie Strecke	>25m	100%
Knoten/Kreisel	≤25m	60%

Beispiel: Beton freie Strecke → +4 dB  
 Beton Knoten und Kreisel → +2.4 dB

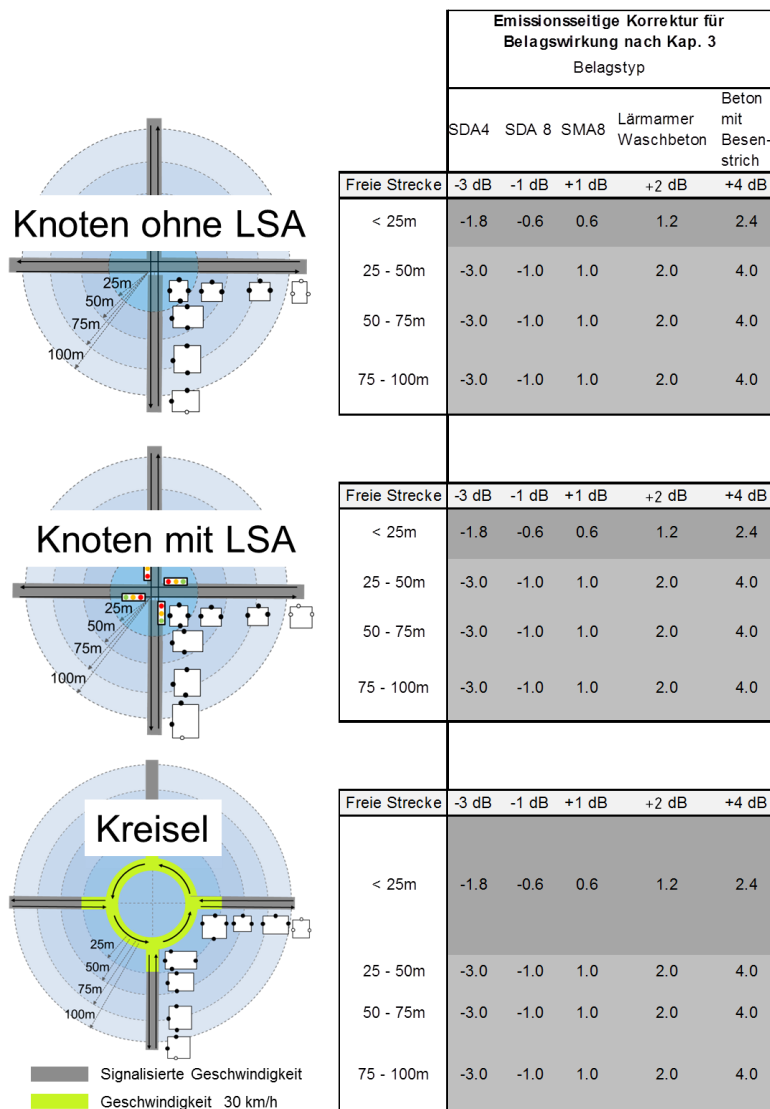


Abbildung 48: Emissionsseitige Korrekturen für die Belagswirkung in verschiedenen Szenarien (Quelle: [58])

Die normierten Messverfahren CPX, SPB und SEM können im Kreisverkehr nicht normgerecht angewendet werden, da diese auf geraden Strecken mit konstanter Geschwindigkeit basieren. Um Veränderungen der Lärmemissionen im Rahmen von Kreisverkehrsanlagen festzustellen, wird ein adaptiertes Messkonzept empfohlen. Hinweis: Ein dazugehöriger Bericht wird in Kürze veröffentlicht.

### 6.3 Leise Reifen auf leisen Strassenbelägen

Das Potential zur flächendeckenden Senkung der Lärmemissionen birgt Möglichkeiten, die Kosten für Lärmschutzmassnahmen in Zukunft zu reduzieren. In der Studie *Lärminderungspotential leiser Reifen auf gängigen Schweizer Strassenbelägen* wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) und den Kantonen Aargau, Graubünden, Solothurn und Zürich durch G+P der Rollgeräuschpegel von 14 marktüblichen Sommerreifen auf 10 verschiedenen herkömmlichen und auf einem leisen Strassenbelag gemessen. Ziel der Studie war die Ermittlung des Lärminderungspotentials, welches von „leisen“ Reifen auf den häufigsten Schweizer Strassenbelägen ausgeht. Zudem wurden die wichtigsten reifenseitigen Einflussgrössen identifiziert und quantifiziert, um damit Szenarien für zukünftige Trends erstellen zu können. Nachfolgend sind die aus dieser Studie hervorgehenden wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst

- Die Differenz zwischen den lautesten und den leisesten der in dieser Studie gemessenen Reifen ist relativ gross. Bei 100% Einsatz von leisen Reifen entspräche dies bis zu einer Halbierung des Verkehrs. [59]

Reifenbreite	185 mm	205 mm	225 mm	295 → 155 mm
Strassenbelag				
herkömmliche Schweizer Beläge	3.5 dB	1 dB	1.5 dB	4 dB

Abbildung 49: Lärminderungspotential leiser Reifen (Quelle: [59])

- Das ermittelte Lärminderungspotential ist auf allen untersuchten konventionellen Strassenbelägen beinahe identisch.
- Das Lärminderungspotential auf leisen Strassenbelägen ist interessanterweise nicht geringer.
- Die wichtigsten Einflussgrössen für das Lärmreduktionspotential sind: Reifenbreite, Reifenradius, Reifengummihärte (Profil und Seitenwand), Rollwiderstandslabel.
- Aufgrund der jüngsten Reifentrends (Zunahme der Reifenbreite und Reifenradius) muss davon ausgegangen werden, dass die reifenbedingten Lärmemissionen in Zukunft geringfügig bis mässig zunehmen.
- Kann das Lärminderungspotential der Reifen zukünftig stärker ausgenutzt werden, so liessen sich die Lärmemissionen um wenige dB reduzieren.
- Bei einem hundertprozentigen Einsatz von leisen Reifen wurde ein Lärminderungspotential von bis zu 3.5 dB ermittelt. [59]

**Hinweis:**

Im September 2019 startete ein EU-Projekt des CEDR (Conference of European Directors of Roads, Projektleitung G+P) mit den folgenden Zielen:

- Entwickeln und Prüfen von Varianten für weitere Verschärfung der Zulassungswerte der Reifen
- Optimierung Labeling-Verfahren
- Sicherstellen der Zuverlässigkeit und Repräsentativität auf Strassen Europas.

## **7. Strategie – leise Strassenbeläge optimal einsetzen**

### **7.1 Einbindung der entscheidenden Akteure**

Eine grundlegende Herausforderung zur erfolgreichen Anwendung von leisen Strassenbelägen stellt die Zusammenarbeit von Strassenbau, Strassenunterhalt, Erhaltungsplanung und Lärmschutz dar. Um diese Fachbereiche koordinieren zu können, ist eine übergeordnete Strategie des Tiefbauamts von grosser Wichtigkeit. Weiter sollten aktuelle relevante Daten und Informationen jederzeit abrufbar sein. Der konstante Austausch und Abgleich zwischen den Akteuren und Projekten ist notwendig. Da mit einem stetigen Monitoring vorausschauend geplant und dem Lärmschutz Rechnung getragen werden kann, ist es wünschenswert, dass der Lärmschutz in die Unterhaltsstrategie und Unterhaltsplanung integriert wird.

Die Vereinigung aller beteiligten Akteure und deren Interessen führt zu einer ständigen Aktualisierung des Wissensstands und des Knowhows, was für die Weiterentwicklung und Optimierung von Technologien von grosser Bedeutung ist. Der Erfolg der Anwendung von leisen Belägen als Lärmschutzmassnahme ist durch die Vereinigung aller Akteure und aller Interessen und einer vorhandenen und funktionierenden übergeordneten Strategie abhängig. Die Strategie und deren Erfolge sollten möglichst breit an der Öffentlichkeit kommuniziert werden. [57]

### **7.2 Auswahl der Technologien und der Strassenabschnitte**

Im Kanton Aargau werden in erster Priorität Massnahmen an der Quelle realisiert. Dazu gehören leise Beläge, Geschwindigkeitsreduktionen und verkehrslenkende Massnahmen. Um zukünftig die betroffenen Liegenschaften vor übermässigem Lärm zu schützen, soll deshalb der Einbau von leisen Belägen im primären Fokus stehen, da diese effektiv und flächendeckend wirken, ohne den Verkehrsablauf zu hindern.

Gemäss dem Konzept leise Beläge im Kanton Aargau werden im Innerortsbereich nur noch Strassenbeläge mit lärmmindernden Eigenschaften eingebaut. Dabei handelt es sich auf dem akustisch weniger stark belasteten Netz um den semi-dichten Belag SDA 8-12 sowie auf dem stärker belasteten Netz um einen SDA 4-12 gemäss VSS-40436 (ausgenommen sind Zonen mit der Lärmempfindlichkeitsstufe ES IV).

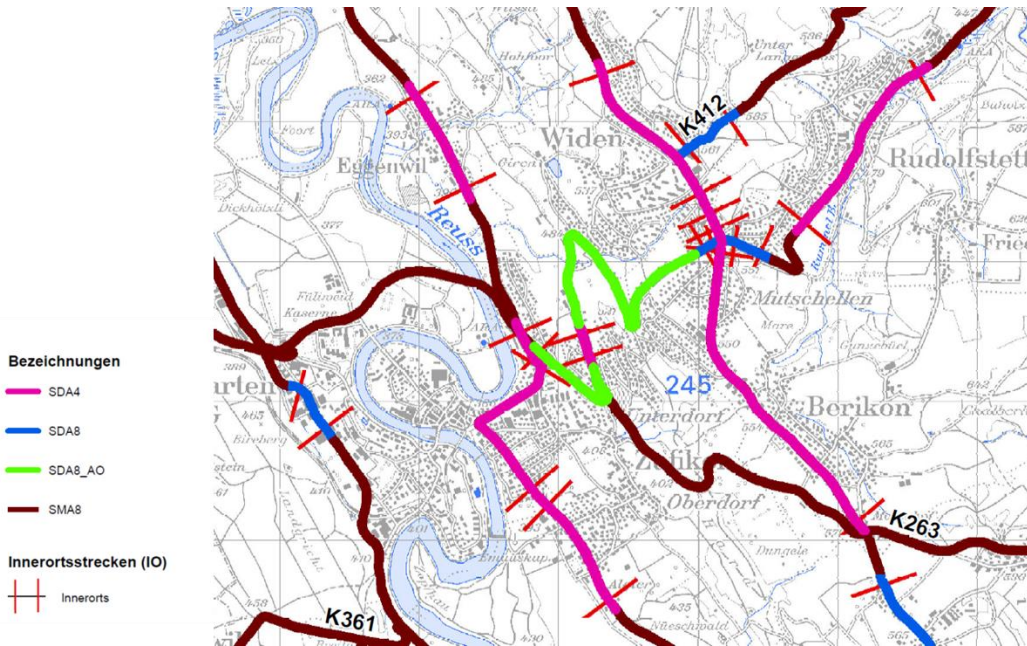


Abbildung 50: Auszug Strategieplan leise Strassenbeläge Kanton Aargau (Quelle: ATB, Kanton Aargau)

### 7.3 Monitoring der Strassenbeläge und Planung des Ersatzes

Zum heutigen Zeitpunkt wird angenommen, dass bei SDA 8 Belägen die Deckschicht nach 20 ersetzt werden muss. Bei SDA 4 Belägen erfolgt der Deckschichtersatz gemäss Annahme nach ca. 10 Jahren und ein Ersatz der Binder- und der Deckschicht nach 20 Jahren. Es besteht aber durchaus die Möglichkeit, dass die Langlebigkeit von SDA Belägen eventuell höher ist als angenommen.

Bei der Strassenbau-, Erhaltungs- und Unterhaltsplanung sollen die Interessen des Lärmschutzes möglichst frühzeitig berücksichtigt werden können. Dazu müssen die Lärmdaten in geeigneter Form aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden. Mit einem Monitoring der Strassenbeläge und einem Monitoring der Lärmsanierungsprojekte (LSP) wird sichergestellt, dass Informationen als Entscheidungsgrundlage zur Verfügung stehen (z.B. frühzeitiger Belagsersatz, Vorzug Nachsanierung LSP.) Um die durch den Strassenbelag bedingte Veränderung der Lärmemissionen zu überwachen und miteinzubeziehen, wird mit der periodischen Erhebung des Strassenzustandes ebenfalls eine akustische Zustandserfassung der Strassenbeläge mit der CPX Methode durchgeführt.

## 8. Schlusswort

Leise Strassenbeläge mindern die Schallentstehung an der Quelle und eignen sich in den typischen Situationen im Innerorts- und Ausserortsbereich und unter den meisten Verkehrsregimes als wirksame Lärmschutzmassnahme. Mit den heute bekannten Technologien können dauerhafte Lärminderungen erreicht werden. Geeignete akustische und bautechnische Mess- und Analysemethoden zur Erfolgskontrolle sind vorhanden. Allerdings muss angemerkt werden, dass die Langzeiterfahrungen mit leisen Strassenbelägen mit den in der Schweiz angewendeten Technologien zum Teil noch fehlen. So konnte zum Zeitpunkt der Erstellung des vorliegenden Dokuments zum Beispiel bei den SDA erst auf eine Zeitreihe von maximal 8 Jahren zurückgegriffen werden. Die vorliegende Dokumentation beleuchtet die gewonnenen Erkenntnisse zur Planung, Herstellung und Einbau von leisen Strassenbelägen. Da es sich um eine Momentaufnahme handelt, welche den aktuellen Wissenstand aufzeigt, sind sowohl positive wie auch negative Erfahrungen weiterhin zu sammeln und zu analysieren sowie die Messverfahren und Analysemethoden laufend weiterzuentwickeln. Die vorliegende Dokumentation versteht sich im Sinne einer Arbeitshilfe und wird periodisch mit neuen Erkenntnissen ergänzt. Weiterer Forschungsbedarf besteht beispielsweise in der Optimierung der Bitumen- und Mastixseigenschaften bei SDA, um eine verbesserte Dauerhaftigkeit, sowie ein besseres Verhalten bei Hitze und Frost zu erreichen. Des Weiteren sind für deren Anwendung in besonderen Lagen spezifische Weiterentwicklungen wünschenswert. Mit dem netzweiten Einsatz von leisen Strassenbelägen ergeben sich weitere Fragestellungen, um den Wirkungsgrad sowie das Kosten-Nutzen-Verhältnis weiter zu optimieren.

Der Kanton Aargau will auch weiterhin eine führende Rolle bei der Anwendung und der Weiterentwicklung von leisen Strassenbelägen einnehmen. Dazu werden systematische Monitoring-Messungen (akustische Belagsgütemessungen CPX) und gezielte Auswertungen durchgeführt. Die erhobenen Daten dienen als Grundlage um den Unterhalt und den Ersatz von Deckschichten zu planen. Diese periodische Erhebung wird auf subventionsberechtigten Sanierungsbelägen mit gezielten Monitoring-Messungen angereichert, um die Grundlagen für die Beantragung von Bundessubventionen zu erfüllen. Die akustischen Monitoring-Messungen dienen als Frühwarnsystem, um mögliche Fehler bei der Herstellung oder beim Einbau zeitig zu identifizieren. Es ist vorgesehen, besonders gute und schlechte Fälle weiter zu untersuchen, um die Technologie der leisen Beläge auf die Bedingungen des Kantons Aargau zu optimieren und damit ein verbessertes Kosten-Nutzen-Verhältnis zu erreichen. Die Synergien zwischen Lärmschutz und Erhaltungsplanung sollen dabei genutzt werden. Der Kanton Aargau ist bestrebt, Erfahrungen in der Fachwelt auszutauschen.



## 9. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfluss Strassenoberfläche bei der Entstehung von Strassenlärm für Geschwindigkeiten ab 30 km/h; Grösse der Piktogramme in Abhängigkeit ihres Beitrag zur Gesamtschallenergie (Quelle: [4], adaptiert Grolimund + Partner AG) ..	4
Abbildung 2: Emissionen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit – durchschnittliche europäische Fahrzeugflotte (Quelle: [2]) .....	5
Abbildung 3: Emissionen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit für Benzin, Diesel, Hybrid und Elektrofahrzeuge (Quelle: [2]) .....	7
Abbildung 4: Emissionen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit für LKW nach SonROAD18 (Vorbeifahrten LKW bei konstanter Geschwindigkeit gemäss Swiss10-converter, Berechnung SS-50) (Quelle: Grolimund + Partner AG gemäss [3]) .....	8
Abbildung 5: Statistische Verteilung (Boxplots) des Gesamtgeräuschs pro Beschleunigungsszenario im Vergleich zum Gesamtgeräusch bei konstanter Fahrweise im 2. und 3. Gang (Quelle: [7]) .....	9
Abbildung 6: Beispiel eines Spektrums der Reifen-Fahrbahngeräusche für PW und LKW (links) und der jeweiligen Anteile verschiedener Entstehungsmechanismen an der Schallenergie pro Terzband basierend auf Modellierung SPERoN, (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	13
Abbildung 7: Wirkungsweise leise Strassenbeläge (Quelle: Grolimund + Partner AG)	14
Abbildung 8: Zielkurven der akustischen Wirkung über die Lebensdauer LAB und LAB mit grosser Wirkung. (Basierend auf [12] ).....	16
Abbildung 9: Anforderungen an leise Strassenbeläge, nicht abschliessend (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	17
Abbildung 10: Norm des Belagsaufbaus im Kanton Aargau (Quelle: [15]) .....	18
Abbildung 11: Übersicht der Haupttypen von leisen Strassenbelägen in der Schweiz (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	20
Abbildung 12: Texturoptimierte Beläge (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	21
Abbildung 13: Vergleich von Waschbeton verschiedener Körnung bzgl. akustischer Belagsgüte (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	22
Abbildung 14: Spektraler Vergleich der Reifen-Fahrbahngeräusche von Waschbeton und konventionellem Beton als Strassenbelag (Quelle: Grolimund + Partner AG).	23
Abbildung 15: Pflästerungen im akustischen Vergleich (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	24
Abbildung 16: Bezeichnung SDA Beläge (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	26
Abbildung 17: Empfohlene Ausführungsbestimmungen Akustik für die Normierung von semidichten Asphalten (Quelle: [21]) .....	28
Abbildung 18: Immissionsseitige akustische Wirkung eines Fahrbahnübergangs von einem leisen auf einen konventionellen Strassenbelag. Die Wirkung ist beispielsweise in 25 m Abstand des Anwohners zum Fahrbahnübergang mit >2 dB sehr deutlich wahrnehmbar. (Quelle: [25]) .....	30
Abbildung 19: akustische Qualität Betonbauweisen (Quelle: Grolimund+Partner AG)	31

Abbildung 20: Betonelemente an einer Bushaltestelle (links) und Nahaufnahme einer Fuge zwischen zwei lärmoptimierten Betonelementen (rechts) .....	32
Abbildung 21: Übergang Betonfahrbahn – angrenzender mit Niveauunterschied (links) und niveaugleich (rechts) (Quelle: [25], Grolimund + Partner AG) .....	32
Abbildung 22: Bild einer Strukturmarkierung (links) und einer Farbmarkierung (rechts) auf einem leisen Strassenbelag im Kanton Aargau (Quelle: [25]) .....	32
Abbildung 23: Gestaltung eines Schachtzuganges vor (links) und nach der Nachbesserung (rechts). Mit der niveauegleichenden Massnahme sowie einer geräuscharmen Textur des Schachtdeckels konnten die Pegelanstiege beim Überrollen um ca. 5 dB vermindert werden. (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	33
Abbildung 24: Übersicht Einflussfaktoren akustische Alterung, nicht abschliessend (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	34
Abbildung 25: Fräsen von SDA Belägen (Quelle: Hans Weibel AG) .....	36
Abbildung 26: SMA 11 und Umrechnung zu StL86+ (Quelle: [31]) .....	39
Abbildung 27: Beispiel Messanhänger und CPX-Teststreifen P1 (links) und H1 (rechts) (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	40
Abbildung 28: Schematische Übersicht eines Messsystems (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	41
Abbildung 29: Gummihärteeffekt basierend auf 12 Studien und total 171 Datensätzen (Quelle: [[37]]) .....	42
Abbildung 30: Abhängigkeit der gemessenen Temperaturen (Belagstemperatur, Reifentemperatur, Lufttemperatur H=15cm, Lufttemperatur H=35cm von den am wenigsten oberflächenbeeinflussten Temperaturen (Lufttemperatur H= 150cm) [38] während ca. 10 Messtagen im September in der Schweiz.(Quelle:[39]) .....	43
Abbildung 31: Auswahl der zur Ausgangslage passenden Messmethode (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	47
Abbildung 32: Vorgehen akustische Wirkungsanalyse (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	48
Abbildung 33: Beispiel Ergebnisse Wirkungsanalysen (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	51
Abbildung 34: Schmutzeintrag- und Hohlraumanalysen (Quelle: [44]) .....	52
Abbildung 35: Klassifizierung zugänglicher Hohlraumgehalt (schwarz), Schmutzeintrag (braun), Gesteinsaggregate (grau) und Bitumen (hell-grau) im Bohrkern. Quelle: [[44]] .....	53
Abbildung 36: Ausmessverfahren und Tauchwägeverfahren (Quelle: [49]) .....	56
Abbildung 37: Korrelation Tauchwäge- und Ausmessungsverfahren zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes in Bohrkernen und Marshallprüfkörpern [21] .....	57
Abbildung 38: Bedingung an SDA 4 Füller- und Sandanteile zur Gewährleistung langfristig guter Qualität (Quelle: [21]) .....	58
Abbildung 39: Bitumeneigenschaften, nicht abschliessend (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [53]) .....	59
Abbildung 40: Bezeichnung Bitumen (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	60
Abbildung 41: Schema zur Datenauswertung und -korrektur – akustische Zustandserfassung CPX (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [32], [33], [34], [36]) .....	63

---

Abbildung 42: Abgabeformate und Inhalte akustischer Zustandserfassungen (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	65
Abbildung 43: Schema zur Datenauswertung und -korrektur – akustisches Monitoring leise Strassenbeläge Datenaufbereitung und Abgabe (Quelle: Grolimund + Partner AG nach [32], [33], [34], [36]).....	67
Abbildung 44: Abgabeformate und Inhalte von akustischem Monitoring (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	68
Abbildung 45: Ermittlung des Interventionszeitpunkts leiser Strassenbeläge (Quelle: Grolimund + Partner AG) .....	69
Abbildung 46: Messungen CPX Kt AG SDA 8 ab Einbaujahr 2012 (Stand Ende 2018, Mischverkehrswerte 8%) (Quelle: Grolimund + Partner AG).....	70
Abbildung 47: Messungen CPX Kt AG SDA 4 ab Einbaujahr 2012 (Stand Ende 2018, Mischverkehrswerte 8%) (Quelle: Grolimund + Partner AG).....	70
Abbildung 48: Emissionsseitige Korrekturen für die Belagswirkung in verschiedenen Szenarien (Quelle: [58]) .....	71
Abbildung 49: Lärminderungspotential leiser Reifen (Quelle: [59]) .....	72
Abbildung 50: Auszug Strategieplan leise Strassenbeläge Kanton Aargau (Quelle: ATB, Kanton Aargau) .....	75

## 10. Quellenverzeichnis

- [1] Bundesamt für Umwelt BAFU, "Lärmbelastung in der Schweiz," Umwelt-Zustand, 2018.
- [2] E. Hammer, S. Egger, T. Saurer, and E. Bühlmann, "Traffic noise emission modelling at lower speeds," in Conference Proceeding ICSV 2016, 2016, pp. 1–8.
- [3] K. Heutschi and B. Locher, "sonROAD18 Berechnungsmodell für Strassenlärm," 2018.
- [4] Bundesamt für Umwelt BAFU, "Leise Strassen," 2012.
- [5] S. Egger, T. Saurer, E. Hammer, and E. Bühlmann, "A new method for reliable determination of the acoustic performance of low-noise road surfaces at speeds below 50 km/h," pp. 6942–6951, 2016.
- [6] Grolimund + Partner AG, "Nachschlagetabelle für Wirkungsprüfung T30 und laB," in Bearbeitung., 2020.
- [7] S. Egger, E. Bühlmann, E. Hammer, and T. Ziegler, "Grundlagen zur Beurteilung der Lärmwirkung von Tempo 30," Forschungsprojekt VSS 2012/214 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute, 2017.
- [8] A. Kuijpers and G. Van Blokland, "Tyre / road noise models in the last two decades : a critical evaluation," 2001 Int. Congr. Exhib. Noise Control Eng., 2001.
- [9] U. Sandberg and J. A. Ejsmont, Tire/Road Noise Reference Book. Sweden: Informex, 2002.
- [10] Z. Mohamed, X. Wang, and R. Jazar, "A survey of wheel tyre cavity resonance noise," Int. J. Veh. Noise Vib., vol. 9, no. 3–4, pp. 276–293, 2015.
- [11] B. Peeters, I. Ammerlaan, A. Kuijpers, and G. Van Blokland, "Reduction of the Horn Effect for Car and Truck Tyres By Sound Absorbing Road," Imagine, pp. 1–10.
- [12] VSS, VSS-40425 Lärmindernde Decken - Grundlagen. 2019.
- [13] ASTRA und BAFU, "Leitfaden Strassenlärm," 2006.
- [14] H. Beyeler, "Lärmindernde Strassenbeläge," Präsentation Forum Bauen - November 2014.
- [15] Kanton Aargau Departement für Bau Verkehr und Umwelt, Norm Belagsaufbau – Konzeption und Anforderungen Verkehrsklasse Kanton Aargau. 2020.
- [16] R. Attinger and A. Meister, "Akustische Eigenschaften von Fahrbahnbelägen im niederen Geschwindigkeitsbereich, Stand der Erkenntnisse 1996," 1997.
- [17] H. Pestalozzi, H.-J. Grolimund, and C. Angst, "Lärmarme Strassenbeläge innerorts Statusbericht 2003," Bundespublikationen, vol. Bundesamt, 2004.

- 
- [18] C. Angst, F. Beltzung, D. Bosshardt, H.-J. Grolimund, and H. Pestalozzi, "Lärmarme Beläge innerorts. Schlussbericht 2007 – Kurzfassung," Bundesamt für Umwelt und Bundesamt für Strassen, Bern, 2008.
- [19] VSS, "VSS 640436 - Semidichtes Mischgut und Deckschichten." 2015.
- [20] E. Bühlmann, P. Bürgisser, T. Ziegler, C. Angst, and Beckenbauer Thomas, "Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts Teilprojekt (TP 3): Langzeitmonitoring," 2017.
- [21] E. Bühlmann, E. Hammer, N. Bueche, and J. Perret, "Ausführungsbestimmungen Akustik für semidichte Asphalte - Auswertung physischer Parameter (in German and French)," Bern, 2017.
- [22] E. Bühlmann and E. Hammer, "Towards semi-dense asphalt mixtures that guarantee acoustic performance and durability," INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc., no. 4, pp. 1559–1568, 2017.
- [23] Bundesamt für Strassen (ASTRA) 2009/007, Lärmarme Oberflächen bei Gussasphalt-Deckschichten auf Brücken. 2016.
- [24] VSS, "VSS-40436 Semidichtes Mischgut und Deckschichten, Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung." 2019.
- [25] S. Egger, E. Bühlmann, and H. Gloor, "Kritische Faktoren für den erfolgreichen Einsatz lärmarmen Belägen im Innerortsbereich Kritische Faktoren," Conf. Proc. DAGA 2017, pp. 619–622, 2017.
- [26] E. Bühlmann, M. Dias, and S. Steiner, "Influence of environment- and traffic-related factors on acoustic ageing of low-noise road surfaces in Switzerland," Conf. Proc. EuroNoise Maastricht, pp. 1321–1326, 2015.
- [27] V. Roth, H. Gloor, D. Milo, and E. Bühlmann, "Reinigung von semi-dichten Asphalten zur Erhaltung der akustischen Leistung," 2019.
- [28] E. Hammer, E. Bühlmann, and T. Ziegler, "Forschungspaket : Lärmarme Beläge innerorts EP 8 : Akustische Wirkung betrieblicher Reinigungsmaßnahmen bei Lärmarmen Belägen," 2016.
- [29] A. M. Delaby, J. Perret, A. E. Bühlmann, and V. Roth, "Nettoyage des revêtements phono- absorbants du canton de Fribourg : Bilan Campagnes 2018 et 2019," 2020.
- [30] Grolimund + Partner AG, "Schleifarbeiten Zofingen , Zwischenbericht," 2019.
- [31] T. Saurer, E. Bühlmann, and T. Ziegler, "Research Package: Low-noise Pavements in Urban Areas EP7: Applicability of Low Noise Asphalt in Switzerland (in German)," Bern, Switzerland, 2016.
- [32] ISO 11819-2: 2017, Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 2: The close-proximity method (ISO 11819-2:2017). .
- [33] ISO/TS 11819-3:2017, Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 3: Reference tyres. .

- 
- [34] ISO/TS 13471-1:2017, Acoustics — Temperature influence on tyre/road noise measurement — Part 1: Correction for temperature when testing with the CPX method, vol. 2017. 2017.
- [35] ISO 11819-1:2022, “Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method,” 2022.
- [36] Bundesamt für Strassen (ASTRA) & Bundesamt für Umwelt (BAFU), “Leitfaden Strassenlärm Anhang 1c : Technisches Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen,” 2013.
- [37] E. Bühlmann, S. Egger, P. Mioduszewski, and U. Sandberg, “An in-depth look at the tire rubber hardness influence on tire/road noise measurements,” INTER-NOISE 2018 - 47th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. Impact Noise Control Eng., 2018.
- [38] E. Bühlmann and G. van Blokland, “Temperature effects on tyre / road-noise – A review of empirical research,” in Conference Proceedings Forum Acusticum, Kraków, 2014, vol. 43.5, p. 6.
- [39] E. Bühlmann and T. Ziegler, “Temperature effects on tyre/road noise measurements,” 40th Int. Congr. Expo. Noise Control Eng. 2011, INTER-NOISE 2011, vol. 1, pp. 557–564, 2011.
- [40] E. Bühlmann, U. Sandberg, and P. Mioduszewski, “Speed dependency of temperature effects on road traffic noise,” 2015.
- [41] Y. Pillonel, M. Trocmé, E. Bühlmann, and T. Saurer, “CPX-Messungen auf Nationalstrassen - ASTRA 88010,” pp. 1–48, 2017.
- [42] B. Peeters, I. Ammerlaan, and a Kuijpers, “Noise reduction by absorbing road surfaces : destroying the horn effect,” Isma, pp. 4053–4064, 2010.
- [43] E. Bühlmann and T. Ziegler, “Interpreting measured acoustic performance on Swiss low-noise road surfaces using a tyre / road interaction model,” pp. 1–6, 2012.
- [44] F. Schlatter and E. Bühlmann, “Acoustic optimization of asphalts using Acoustic Void Content Analysis AVCA on drill cores,” Conf. Proc. Internoise 2020, 2020.
- [45] BAM, “CT-Messungen und Hohlraumanalyse von Asphaltbohrkernen,” 2017.
- [46] D. Meinel, A. Staude, and K. Ehrig, “Analyzing Microstructure and Damage in Construction Materials with 3D Micro CT,” Proc. 2nd Int. Congr. 3D Mater. Sci., pp. 23–28, 2014.
- [47] T. Saurer, H. Gloor, E. Bühlmann, and E. Hammer, “Etablierung eines Akustik-Faktors zur Beurteilung der akustischen Leistung von semidichten Asphalten,” pp. 2–5, 2018.
- [48] T. Balmer and F. Steiner, “Akustische Alterung lärmarmen Beläge durch Verschmutzung – Grundlegende Mechanismen,” VSS-Strasse und Verkehr, pp. 22–30, 2018.

- [49] B. Wallner, "Bewertung von Asphalt mit dem Gyrator," 2003.
- [50] M. Hugener and S. Hean, "Bituminöse Baustoffe," 2009.
- [51] V. Rosauer and C. K. Schulze, Widerstand gegen Polieren : Kritische Bewertung PSV / PWS, vol. 2012. .
- [52] Deutscher Asphaltverband, "Asphaltdeckschichten Griffigkeit," 2006.
- [53] P. M. N. Partl, "Asphalt und Bitumen Geschichte-Bitumen-Asphalt," pp. 1–27, 2011.
- [54] VSS, "SN 640 431-1-NA - Asphaltmischgut, Mischgutanforderungen - Teil1: Asphaltbeton." VSS Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, 2017.
- [55] M. Merki, R. Schibli, S. Schulze, and E. Bühlmann, "Statistical methods to determine acoustically homogeneous sections and predict road surface type changes using tyre / road noise data," Proc. Forum Acusticum, Kraków, Pol., pp. 1–6, 2014.
- [56] H. Alexandersson and A. Moberg, "Homogenization of Swedish temperature data.," . Int. J. Clim. 17, vol. 17, 1997.
- [57] T. Saurer, H. Gloor, D. Milo, and E. Bühlmann, "Strategie zur erfolgreichen Anwendung von leisen Straßenbelägen im Innerortsbereich Einleitung Leise Straßenbeläge als Lärmschutzmaßnahme Auswirkungen auf Planung und Prozesse," 2019.
- [58] Cercle Bruit, "Lärmtechnische Ermittlung bei Knoten und Kreiseln," pp. 1–12, 2016.
- [59] E. Hammer and E. Bühlmann, "Lärminderungspotential leiser Reifen auf gängigen Schweizer Strassenbelägen," Bundesamt für Umwelt BAFU, 2018.