





# Akustische Dauerhaftigkeit lärmmindernder dichter oder semi-dichter Asphaltdeckschichten ADURA

## Ein Projekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2017 DACH 2017

Mai 2020









Bundesamt für Strassen ASTRA

## Impressum:

1030 Wien

Österreich

#### Herausgeber und Programmverantwortung: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) Invalidenstraße 44 10115 Berlin Deutschland



Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur

Bundesministerium für Klimaschutz (BMK) Radetzkystraße 2

Bundesamt für Strassen (ASTRA) Mühlestrasse 2, Ittigen 3003 Bern Schweiz

Für den Inhalt verantwortlich: AIT Austrian Institute of Technology GmbH Giefinggasse 4 1210 Wien Österreich

#### Programmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbh Thematische Prohramme Sensengasse 1 1090 Wien Österreich

💳 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Schweizerische Eidgenossenschaft Confédération suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra

Bundesamt für Strassen ASTRA





Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur  Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie





## Akustische Dauerhaftigkeit lärmmindernder dichter oder semi-dichter Asphaltdeckschichten

## ADURA

Ein Projekt finanziert im Rahmen der D-A-CH Kooperation Verkehrsinfrastrukturforschung 2017 DACH 2017

AutorInnen:

Dipl.-Ing. Reinhard Wehr Dipl.-Ing. Andreas Fuchs, BSc. MSc. ETH Felix Schlatter MSc. MBA Erik Bühlmann Dipl.-Ing. (FH) MBA & Eng. Manuel Männel Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Wistuba Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Jens Grönniger Dipl.-Ing. Dr. Alfred Weninger-Vycudil

## Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Deutschland

Bundesministerium für Klimaschutz, Österreich

Bundesamt für Strassen, Schweiz

Auftragnehmer: AIT Austrian Institute of Technology GmbH







## Inhaltsverzeichnis

1	Einl	eitung		7
2	Bau	technis	che Grundlagen	9
	2.1	Maßge	ebende Deckschichtarten und deren Einteilung	9
		2.1.1	Einteilung der Deckschichten nach Hohlraumgehalt	13
	2.2	Allgem	neine Anforderungen an Deckschichten	13
	2.3	Bauteo	chnische Deckschichtbeschreibung	14
	2.4	Decks	chichten in Österreich	15
		2.4.1	Historie	15
		2.4.2	Spezifische Anforderungen an semi-dichte Deckschichten	17
	2.5	Decks	chichten in Deutschland	20
	2.6	Decks	chichten in der Schweiz	28
	2.7	Vergle	ich von Deckschichten und Clusterung	33
		2.7.1	Anforderung und Clusterung nach Materialcharakteristika	33
		2.7.2	Clusterung Lage im Querschnitt und Schwerverkehrsbelastung	36
	2.8	Auswa	hl von semi-dichten Deckschichten	37
3	Alte	rungsv	erhalten dichter und semidichter Asphaltdeckschichten	39
	3.1	Ausga	ngslage	39
		3.1.1	Deutschland	40
		3.1.2	Schweiz	42
		3.1.3	Österreich	43
	3.2	Lände	rspezifische Herangehensweise	46
		3.2.1	Datenerhebung in der Schweiz	47
		3.2.2	Datenerhebung in Österreich	50
		3.2.3	Datenerhebung in Deutschland	51
	3.3	Model	lierung des Alterungsverhaltens	54
		3.3.1	Alterungsverhalten von Deckschichten im DACH – Raum (Clusterung)	54
		3.3.2	CPX-Pegel aufgeschlüsselt nach einzelnen Deckschichten und Ländern	58
		3.3.3	Variation innerhalb der Baulose	66
		3.3.4	Zeitliche Entwicklung und Vergleich zu Referenzbelag	68







Bundesamt	für	Strassen	ASTRA

	3.4	Zusam	menfassung	71
4	Änd	erung d	er Deckschichteigenschaften	73
	4.1	Beschr	eibung der Messverfahren	74
		4.1.1	Messung der 3D-Oberflächentextur	75
		4.1.2	Parameter der 3D-Textur	76
		4.1.3	Bestimmung der in-situ-Schallabsorption	79
	4.2	Alterun	gsverhalten der 3D-Texturparameter	81
	4.3	Hauptk	omponentenanalyse	86
		4.3.1	Alterungsverhalten der Hauptkomponenten	89
	4.4	Alterun	gsverhalten der Schallreflexion	91
	4.5	Zusam	menfassung	91
5	Alte	rungsm	odellierung Textur und Rollgeräusch	93
	5.1	Gruppi	erung der Akustik-Terzbanddaten	94
	5.2	statistis	sche Modellierung	96
		5.2.1	Einfluss der Hauptkomponenten - lineare 1-Parameter-Modellierung	96
		5.2.2	Einfluss der Texturparameter - Mehrparameter-Modellierung	99
	5.3	Speron	-Simulationen	109
		5.3.1	Grundlagen	109
		5.3.2	Parameterstudie Hohlraumgehalt	109
	5.4	Fahrba	hnabsorptionsmessungen	130
	5.5	Zusam	menfassung	132
6	Prob	peplatte	n und Stabilisierungsansätze	134
	6.1	Herstel	lung und künstliche Alterung der Asphalt-Probeplatten	134
	6.2	Messm	ethoden an den Probeplatten	140
		6.2.1	Inline Computational Imaging	140
		6.2.2	Schallabsorptionsmessungen	143
	6.3	Einfach	n gealterte Probeplatten	144
	6.4	Schrittv	veise gealterte Probeplatten	145
		6.4.1	Alterungsverhalten der Texturparameter	145
		6.4.2	Visuelle Texturänderungen	148
		6.4.3	Messung der Schallabsorption	159







		6.4.4	Anwendung der Rollgeräusch-Modellierung	161
	6.5	Probe	olatten mit experimenteller Bauweise	163
		6.5.1	Alterungsverhalten der Texturparameter	163
		6.5.2	Visuelle Texturänderungen	164
		6.5.3	Messung der Schallabsorption	164
		6.5.4	Anwendung der Rollgeräusch-Modellierung	167
	6.6	Zusam	nmenfassung	170
7	Leb	enszyk	lusbetrachtung von dichten und semi-dichten Deckschichten aus bau-	
	tech	nische	r und akustischer Sicht	171
	7.1	Analys	e von Nutzungsdauern von Deckschichten im Netz der ASFINAG	171
		7.1.1	Statistischen Analyse Nutzungsdauern	171
		7.1.2	Interpretation der Nutzungsdauern sowie ingenieurmäßige Bewertung von	
			vorhandenen Lebenszyklen	173
		7.1.3	ASFINAG Standardlebenszyklus für SMA-Deckschichten	173
	7.2	Akusti	sche Entwicklung und Auswirkungen auf den Lebenszyklus	178
		7.2.1	Verknüpfung bautechnische und akustische Anforderungen	178
		7.2.2	Vorschlag für die Bewertung der akustischen Wirkungen über den Lebenszyklu	us182
8	Ana	lyse un	d Zusammenfassung	183
	8.1	Ausbli	ck	186
Та	belle	nverzei	chnis	188
At	bildu	ingsvei	zeichnis	191
Lit	eratu	ırverzei	chnis	196







## **1 EINLEITUNG**

Durch wachsende Verkehrszahlen kommt es im hochrangigen Straßennetz zu starken Belastungen der Fahrbahndecken. Mit dem Ziel, die Verfügbarkeit des Straßennetzes hoch und die Erhaltungskosten niedrig zu halten, steigen in Bezug auf die Dauerhaftigkeit die Anforderungen der relevanten Deckschichtparameter, wie der Griffigkeit, Längs- und Querebenheit sowie der akustischen Eigenschaften der Fahrbahndecken.

Gerade im Bereich der Lärmemission, die im Geschwindigkeitsbereich von Schnellstraßen und Autobahnen durch das Abrollgeräusch der Reifen dominiert wird, zeigt sich hier bei den eingesetzten Deckschichttypen ein differenziertes Bild. Hier muss, abhängig von der Verkehrsstärke und -zusammensetzung, ein Kompromiss zwischen den akustischen Eigenschaften und der Belastbarkeit der Fahrbahndecke gefunden werden.

Während offenporige Asphaltdeckschichten sehr gute akustische Eigenschaften besitzen, können diese an hochbelasteten bzw. beanspruchten Strecken aufgrund der damit einhergehenden sinkenden Lebensdauer nur in geringem Ausmaß eingesetzt werden. Fahrbahndecken wie Asphaltbetone oder Waschbetondecken weisen zwar eine gute Beständigkeit auch bei hohen Schwerverkehrsanteilen auf, jedoch wird diese bautechnische Langlebigkeit durch erhöhte Schallemissionen erkauft.

Um eine hohe Qualität aller Parameter zu gewährleisten, kommt den lärmmindernden dichten bzw. semi-dichten Asphaltdeckschichten eine große Bedeutung zu. Diese weisen zum Zeitpunkt ihres Einbaus gute akustische Eigenschaften sowie eine hohe Lebensdauer auch bei hochbelasteten Streckenabschnitten auf, allerdings zeigt sich eine Reduktion ihrer lärmmindernden Wirkung, die innerhalb von 5 Jahren ein Ausmaß von 3-5 dB(A) annehmen kann.

Ziel des Forschungsprojektes "ADURA - Akustische Dauerhaftigkeit dichter und semi-dichter Asphaltdeckschichten" ist es, das Alterungsverhalten dieser Deckschichten zu untersuchen und Lösungswege zu finden, um die akustischen Eigenschaften der lärmarmen Asphaltdeckschichten zu stabilisieren. Im ersten Teil des vorliegenden Berichtes wird daher auf die unterschiedlichen dichten und semi-dichten Asphaltdeckschichten im DACH-Raum sowie deren verschiedene Bauweisen eingegangen.

Im zweiten Teil wird basierend auf den primären Einsatzorten auf die grundlegenden Alterungsverläufe der Deckschichten eingegangen, anschließend werden die Änderungen der Oberflächentextur der Asphaltdecken analysiert. Basierend auf den Datenerhebungen zur Lärmemission und Oberflächentextur werden durch eine statistische Modellierung Zusammenhänge zwischen der akustischen







und der Textur-Alterung hergestellt und interpretiert, um die Wirkmechanismen der zunehmenden Lärmemissionen aufzuzeigen.

Im Weiteren werden Untersuchungen an Asphalt-Probeplatten gezeigt, die einer schrittweisen künstlichen Alterung unterzogen worden sind. Hier werden Vergleiche zwischen der Änderung der Oberflächentextur an den Labor-Proben sowie den in situ erhobenen Messwerten gezogen. Basierend darauf wird ein Stabilisierungsansatz an Asphalt-Probeplatten in veränderter Bauweise vorgestellt, der die Alterung der akustischen Eigenschaften der Fahrbahndeckschichten minimiert.

Abschließend wird eine Lebenszykluskostenanalyse der untersuchten Deckschichten präsentiert. Diese soll einen Vergleich zwischen den verschiedenen dichten und semi-dichten Asphaltdecken, wie sie im DACH-Raum zum Einsatz kommen, geben.







## 2 BAUTECHNISCHE GRUNDLAGEN

Der Straßenoberbau bzw. die Straßenbefestigung stellt den oberen tragenden Teil einer Straße bzw. Verkehrsfläche dar. Er besteht in der Regel aus unterschiedlichen Schichten, die aus ungebundenen (losen, jedoch stark verdichteten) und gebundenen (Asphalt oder Beton) Materialien errichtet werden, wobei für die unterschiedlichen Schichten und die darin verbauten Materialien auch unterschiedliche Anforderung definiert werden. Welcher Baustoff in welcher Schicht zur Anwendung gelangt, hängt somit von diesen Anforderungen ab. Die in Deutschland, Österreich und der Schweiz vorherrschenden Bauweisen des gebundenen Oberbaus können wie folgt zusammengefasst werden:

- Asphaltbauweise: flexible Bauweise, bei welcher sämtliche gebundenen Tragschichten aus Asphalt bestehen
- Betonbauweise: die maßgebenden (aktiven) gebundenen Tragschichten bestehen aus Zementbeton, wobei eine Überbauung mit einer (dünnen) Asphaltschicht auch möglich ist
- Asphaltbauweise mit zementstabilisierter Tragschicht: semi-flexible Bauweise, bei welcher eine teilgebundene Tragschicht in Form einer Zementstabilisierung ausgeführt ist

Das am häufigsten eingesetzte Straßenbaumaterial für die gebundene Bauweise ist in allen 3 DACH-Ländern der Asphalt. Er ist ein Gemisch aus den Ausgangsstoffen Gestein (meist mit stetig verlaufender Sieblinie) und Bitumen, welches die Gesteinskörner miteinander verklebt (Bindemittel). Bitumen ist ein Produkt der Erdölverarbeitung (Erdöldestillation) mit temperaturabhängigen (visko-elastischen) Eigenschaften, das bei Raumtemperatur nahezu fest ist. Es wird im Straßenbau als sogenanntes Straßenbaubitumen in unterschiedlicher Härte eingesetzt. Es kann durch Zusatz von Kunststoffen in seinen Gebrauchseigenschaften verbessert werden und wird dann als polymermodifiziertes Bitumen (PmB) bezeichnet.

## 2.1 Maßgebende Deckschichtarten und deren Einteilung

Da im Rahmen des gegenständlichen Projektes ausschließlich die Deckschichte, der oberste Abschluss des gebundenen Straßenoberbaus, behandelt wird, kann auf eine detaillierte Erläuterung der anderen Schichtarten und deren Anforderung an dieser Stelle verzichtet werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird jedoch eine entsprechende Beschreibung von unterschiedlichen, häufig verwendeten Deckschichtarten in den 3 DACH-Ländern gegeben, wobei auch hier auf eine allgemeine, in allen 3 Ländern verwendete Terminologie geachtet wurde.







#### Asphaltbeton Deckschicht (AC deck)

Asphaltbeton ist die häufigste Deckschichtart, die auf Straßen in den 3 DACH-Ländern eingesetzt wird. Der Asphaltbeton zeichnet sich durch eine kontinuierliche, dem Betonbauprinzip folgende Sieblinie des Gesteinsmaterials aus (Fuller-Parabel) und weist in der Regel einen Bindemittelanteil von mehr als 3 M.-% auf und einen Hohlraumgehalt in den meisten Fällen von nicht mehr als 5 oder 6 Vol.-%. Neben normalem Straßenbaubitumen kommt vor allem im Bereich von hochbelasteten Straßen auch polymermodifiziertes Bitumen häufig zum Einsatz.

#### Splittmastixasphalt (SMA)

Beim Splittmastixasphalt handelt es sich in den meisten Fällen um einen dichten Deckschichtbautyp mit einem hohen Füller- und Splittgehalt (siehe Abbildung 1). Dadurch ergibt sich eine besonders hohe Standfestigkeit und somit der primäre Einsatzbereich auf hochbelasteten Straßen.

Im Vergleich zum Asphaltbeton, wo eine kontinuierliche Sieblinie für die Übertragung der Kräfte zwischen den Gesteinskörnern unterschiedlicher Korngröße verantwortlich zeichnet, erfolgt beim Splittmastixasphalt die Kraftübertragung in erster Linie durch das maßgebende (Größt)Korn, d.h. dass hier grundsätzlich das Makadamprinzip zur Anwendung gelangt.

In der Zwischenzeit gibt es auch entsprechende Adaptierungen zu semi-dichten Splittmastixasphalten, die vor dem Hintergrund einer optimierten Schallabsorption entwickelt wurden und seit vielen Jahren eine Standardbauweise für lärmmindernde Deckschichten in den 3 DACH-Ländern darstellt.



Abbildung 1: Beispiel Sieblinie SMA 11 S1 aus Österreich [1]







In Abhängigkeit von der Dichtheit liegt bei konventionellem Splittmastixasphalten der Bindemittelgehalt bei mindestens 6 M.-% und der Hohlraumgehalt ist mit 4 Vol.-% etwas geringer als beim Asphaltbeton. Beim lärmmindernden Splittmastixasphalt kann von einem Bindemittelgehalt von bis zu 8 M.-% ausgegangen werden, wobei natürlich der Hohlraumgehalt in der Regel bei mehr als 9 Vol.-% liegen sollte, um die schallabsorbierenden Eigenschaften zu entfalten.

Ungeachtet der Dichtheit dieser Asphaltdeckschicht kommt beim SMA ausschließlich polymermodifiziertes Bindemittel zu Anwendung.

#### Gussasphalt (Mastixasphalt MA)

Gussasphalt ist im Vergleich zum Asphaltbeton und zum Splittmastixasphalt so aufgebaut, dass alle Hohlräume des Splittgesteinsgerüstes mit Bitumen verfüllt sind. Gussasphalt muss daher nicht gesondert verdichtet werden sondern wird auf die Straße gegossen. Gussasphalt kommt auf sehr hochbelasteten Straßen oder als Brückenbelag zum Einsatz, aber auch im kommunalen Bereich auf Gehsteigen und Gehwegen. Der Bindemittelgehalt beträgt mindestens 6 M.-% und der Hohlraumgehalt ist aufgrund der Bauweise natürlich 0%. Um eine hohe Verformungsresistenz aufweisen zu können, kommt besonders hartes Bindemittel zum Einsatz, dabei sowohl hartes Straßenbaubitumen (z.B. Straßenbaubitumen 35/50 in Österreich) als auch polymermodifiziertes Bindemittel (z.B. PmB 25/55-65 in Österreich).

Um eine optimale Oberfläche sicher zu stellen, wird auf die noch heiße Oberfläche bituminierter Edelsplitt gleichmäßig dicht, in der Regel maschinell aufgebracht und mit leichten Glattmantelwalzen eingedrückt.

#### Offenporiger Asphalt / Drainasphalt (PA)

Neben den dichten und semi-dichten Deckschichten spielt im Bereich der lärmmindernden Deckschichten der "Offenporige Asphalt" oder "Drainasphalt" (in der älteren Literatur auch manchmal Flüsterasphalt bezeichnet) eine wesentliche Rolle. Grundsätzlich charakterisiert sich seine Sieblinie durch einen extrem hohen Splittanteil einer bestimmten Körnung und einem sehr geringen Sandbzw. Fülleranteil (siehe Abbildung 2).

Der Hohlraumgehalt beträgt dabei in der Regel mehr als 20 Vol.-% und der Bindemittelgehalt mindestens 3 M.-%. Um eine ausreichende "Verklebung" zwischen den Splittgesteinskörnern zu gewährleisten, kommt ausschließlich polymermodifiziertes Bindemittel zur Anwendung.



Abbildung 2: Beispiel Sieblinie PA 11 aus Österreich [1]

Die wesentlichen Vorteile des Drainasphalts gegenüber den dichten und semi-dichten Deckschichten liegt einerseits in der Lärmminderung durch die hohe Schallabsorption und die Verschiebung des Frequenzbereichs, sodass bis zu -6 dB(A) Lärmminderung erreicht werden können. Ein weiterer Vorteil liegt in der Drainagewirkung und der Vermeidung von Sprühfahnen, was der Verkehrssicherheit zu Gute kommt.

Ein wesentlicher Nachteil ist im Winterdienst zu beobachten, da aufgrund des Abrinnens des Salz-Wasser-Gemisches im Rahmen der Salzstreuung deutlich mehr Auftaumittel auf die Straße aufgebraucht werden muss und auch das "Zufrieren" (Umschließung der Körner an der Oberfläche mit einer Eisschicht) wesentliche Nachteile bringt. Auch im Bereich der Erhaltung ist die Lebensdauer dieser Deckschichtart deutlich geringer als bei konventionellen Deckschichten und auch das plötzliche Versagen des Korngefüges (Haftverhalten) führte in der Vergangenheit zu größeren erhaltungstechnischen Problemen. Darüber hinaus "verstopfen" mit der Zeit die Hohlräume, sodass auch im Rahmen des Straßenbetriebes durch Reinigungsarbeiten auf bestimmten Strecken mit einem Mehraufwand gerechnet werden muss.

#### Lärmmindernde Dünnschichtdecken (BBTM)

Neben den zuvor beschriebenen konventionellen, lärmmindernden sowie sehr dichten Deckschichten mit einer Einbaudicke von in der Regel mehr als 3 cm, spielen auch Dünnschichtdecken (Schichtdicke < 2,5 cm) eine wesentliche Rolle und da vor allem die Gruppe der "Lärmmindernden Dünnschichtdecken". Lärmmindernde Dünnschichtdecken sind dünne Oberflächenabschlüsse mit







einem Größtkorn in der Regel von 5 oder 8 mm und mit einer Sieblinie ähnlich zum offenporigen Asphalt jedoch mit einem Hohlraumgehalt von nicht mehr als 15 Vol.-%. Der Bindemittelgehalt beträgt mindestens 5 M.-%. Lärmmindernde Dünnschichtdecken werden häufig als Sanierungs- bzw. Verbesserungsmaßnahmen in lärmsensiblen Bereichen eingesetzt. Sie können ohne größeren Aufwand auf bestehende dichte Deckschichten aufgebracht werden und versiegeln darüber hinaus ältere, bereits durch leichte strukturelle Schäden gekennzeichnete Deckschichten.

#### 2.1.1 Einteilung der Deckschichten nach Hohlraumgehalt

Unter Bezugnahme auf den Hohlraumgehalt der unterschiedlichen Deckschichtarten kann grundsätzlich zwischen dichten, semi-dichten (halb-offenen) und offenen Deckschichten unterschieden werden. Die Grenze hierfür ist in den 3 DACH-Ländern nicht einheitlich, jedoch liefert die nachfolgende Gruppierung eine gute Einteilung:

- Dichte Deckschichten: Hohlraumgehalt < 6 Vol.-%
- Semi-dichte Deckschichten (halb-offene Deckschichten): Hohlraumgehalt zwischen 6 und 18 Vol.-%
- Offene Deckschichten: Hohlraumgehalt > 18 Vol.-%

## 2.2 Allgemeine Anforderungen an Deckschichten

Von wesentlicher Bedeutung bei der Auswahl eines geeigneten Deckschichttyps sind natürlich die Anforderungen aus Verkehr und dessen Beanspruchungen auf die Deckschicht. Die allgemeinen Anforderungen an Deckschichten von gebundenen Straßenoberbaukonstruktionen können daher wie folgt zusammengefasst werden:

- Hoher Verschleiß- und Verformungswiderstand aufgrund der Einwirkung von Verkehrslasten (in erster Linie des Schwerverkehrs)
- Hohe Griffigkeit durch polierresistentes Gesteinsmaterial und die Ausbildung einer entsprechenden optimierten Makrotextur
- Geringe Geräuschemissionen unter Berücksichtigung eines optimalen Hohlraumgehaltes und/oder einer optimalen Makrotextur
- Gute Ebenheit als Ergebnis der Ausführung







- Gute Drainagewirkung durch eine optimierte Oberflächentextur (Makrotextur) z.B. zur Verringerung von Aquaplaning
- Gutes Reflexionsverhalten z.B. zur Verringerung der Blendung bei tiefstehender Sonne

Die Liste dieser Anforderung zeigt, dass natürlich keine einzige zuvor beschriebene Deckschichtart alle Anforderungen im gleichen Ausmaß erfüllen kann. Umso wichtiger ist der Aspekt, in Abhängigkeit von den örtlichen Randbedingungen, die beste Lösung aus der großen Auswahlliste der Deckschichten zu wählen und diese dann so zu optimieren, dass auch die Anforderungen bestmöglich erfüllt werden können.

## 2.3 Bautechnische Deckschichtbeschreibung

Für eine detaillierte Untersuchung und Analyse der Lärmeigenschaften von Straßenoberflächen ist es sinnvoll und zweckmäßig, die unterschiedlichen baulichen Gegebenheiten zu spezifizieren bzw. eine entsprechende Clusterung oder Gruppierung vorzunehmen. Dabei spielen auch die bautechnischen Eigenschaften der zu untersuchenden Fahrbahndecken eine wesentliche Rolle. Der Inhalt des gegenständlichen Kapitels liefert die Vorgabe für eine entsprechende Clusterung bzw. Gruppierung auf der Grundlage bestimmter Eigenschaften von lärmmindernden Asphaltdeckschichten. Diese Clusterung bildet dabei die Grundlage für statistische Auswertungen im Rahmen des gegenständlichen Projektes.

Die Grundlage für die nachfolgend beschriebene Clusterung liefern die derzeit in Deutschland, Österreich und in der Schweiz in Anwendung befindlichen Richtlinien und Vorschriften für das Asphaltmischgut bzw. die Asphaltdeckschichten. Dabei handelt es sich um folgende Grundlagen:

- RVS 08.97.05 Anforderungen an Asphaltmischgut. Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, Wien, 2015
- RVS 08.16.01 Anforderungen an Asphaltschichten. Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr, Wien, 2010
- Der Bundesminister f
  ür Verkehr (Hrsg.): Richtlinien f
  ür den L
  ärmschutz an Stra
  ßen (RLS-90).
   Bonn, 1990.
- Forschungsgesellschaft f
  ür Stra
  ßen- und Verkehrswesen e.V. (Hrsg.): Technische Lieferbedingungen f
  ür Asphaltmischgut f
  ür den Bau von Verkehrsfl
  ächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07). K
  öln, 2007







- Forschungsgesellschaft f
  ür Stra
  ßen- und Verkehrswesen e.V. (Hrsg.): Empfehlungen f
  ür die Planung und Ausf
  ührung von l
  ärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA (E LA D), K
  öln, 2014
- Forschungsgesellschaft f
  ür Stra
  ßen- und Verkehrswesen e.V. (Hrsg.): Zus
  ätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien f
  ür den Bau von Verkehrsfl
  ächenbefestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB 07). K
  öln, 2008
- Forschungsgesellschaft f
  ür Stra
  ßen- und Verkehrswesen e.V. (Hrsg.): Zus
  ätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien f
  ür die Bauliche Erhaltung von Verkehrsfl
  ächenbefestigungen -Asphaltbauweisen (ZTV BEA-StB 09/13), K
  öln 2013
- SNR 640436 Semidichtes Mischgut und Deckschichten, Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung. Vereinigung Schweizer Strassenfachleute, VSS, Zürich 2015

Um einen entsprechenden Überblick der Anwendung von lärmmindernden Deckschichten zu geben, werden die aktuellen Vorgaben der einzelnen Länder in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

## 2.4 Deckschichten in Österreich

## 2.4.1 Historie

Die Entwicklung der unterschiedlichen Deckschichtarten in Österreich ist eng mit der Entwicklung und Erweiterung des hochrangigen Straßennetzes verbunden. Mit dem Autobahnbauboom in den 60er und 70er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden auch die technologischen Anforderungen für Asphaltdeckschichten immer mehr untersucht und präzisiert. Deckschichtarten, die noch vor dem Zweiten Weltkrieg häufig zum Einsatz kamen (z.B. Teermakadam) wurden nicht mehr gebaut und durch modernere Asphaltbetonanwendungen ersetzt. Auch die Entwicklung von Splittmastixasphalt geht auf diese Zeit zurück, wobei der flächendeckende Einsatz auf dem hochrangigen Straßennetz in Österreich (Autobahnen und Schnellstraßen, ASFINAG-Netz) Ende der 1990er Jahre einsetzte und bis heute anhält. Die Entwicklung von lärmmindernden Deckschichten und deren praktischer Einsatz liegt in Österreich in den 80er und 90er Jahren. Im Zuge des Baus der A9 Pyhrnautobahn und der A10 Tauernautobahn (siehe Abbildung 3) kam auf vielen Abschnitten der Drainasphalt erstmals im großen Umfang zum Einsatz. Auf der A9 wies der Drainasphalt sogar den größten Anteil an Deckschichtmaterial auf. Auch auf vielen anderen Abschnitten auf der A12 Inntalautobahn sowie







Bundesamt für Strassen ASTRA



Abbildung 3: Drainasphalteinbau auf der A10 (Foto Litzka)

A21 Außenringautobahn wurde aufgrund von lärmtechnischen Anforderungen diese Deckschichtart eingesetzt.

Gerade die zuvor beschriebenen Nachteile des Drainasphalts führten vor allem gegen Ender der 90er Jahre sowie zum Beginn der 2000er Jahre zu einem Umdenken beim Einsatz von Drainasphalt, sodass mit Ausnahme der A12 auf kaum einer anderen österreichischen Autobahn Drainasphalt heute noch vorzufinden ist bzw. eingebaut wird.

Mit dem Wegfallen des Drainasphalts als lärmmindernde Deckschicht stand nur die Option einer Weiterentwicklung einer semi-dichten, halb-offenen Deckschichtart auf der Basis des Splittmastixasphalt im Raum. Das Ergebnis ist der SMA S3 mit einem Hohlraumgehalt zwischen 6 und 12 Vol.-%, der fast ausschließlich mit einem Größtkorn von 11 mm eingebaut wird. Diese Deckschichtart stellt bis heute die maßgebende lärmmindernde Deckschichtart im hochrangigen Straßennetz in Österreich dar. Obwohl auch aktuelle Daten des Pavement Management Systems der ASFINAG eine deutlich kürzere Lebensdauer im Vergleich zum dichten Splittmastixasphalt erkennen lassen, ist der SMA 11 S3 die bevorzugte Lösung für Straßenabschnitte mit erhöhten Anforderungen im Bereich der Lärmminderung.







Bundesamt für Strassen ASTRA

	Nationale Regelwerke - Österreich								
Lärmarme Asphaltdeck- schichten	Mischgutanforderungen im Einzelnen	Anforderungen an Asphaltmischgut (Zusammenfassende Darstellung)	Anforderungen an Asphaltschichten (zwecks Einbau)						
Lärmmindernde Dünnschichtdecke (BBTM)	ÖNORM B 3581	DVC 00 07 05							
Splittmastixasphalt (SMA S3)	ÖNORM B 3584	KVS 08.97.05	RVS 08.16.01						

Tabelle 1: Übersicht der Österreichischen Regelwerke für lärmmindernde semi-dichte Asphaltdeckschichten

## 2.4.2 Spezifische Anforderungen an semi-dichte Deckschichten

Für Österreich sind beim Einbau von lärmmindernden Asphaltdeckschichten einige Vorschriften zu berücksichtigen (siehe Tabelle 1).

Die spezifischen technischen Anforderung für die Deckschichten und das hierfür ausgewählte Asphaltmischgut kann der RVS 08.97.05 [1] entnommen werden. Diese Richtlinie ist für Asphaltmischgut anzuwenden, das auf Flächen mit öffentlichem Verkehr eingebaut wird. Die nachfolgende Tabelle 2 enthält zunächst die Empfehlung für die Auswahl der Mischgutsorten gem. der RVS 08.97.05 [2] in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung.

Verkehrs- belastung gemäß RVS 03.08.63	Deckschicht	Tragdeckschicht	Obere Tragschicht	Untere Tragschicht
LK S, I u. II für Bundes- straßen A und S	SMA D (S1, S2, S3), GS AC D deck (A2, A3, A4), GS MA D M1, GS PA D, (P1, P2), GS	-	AC D binder (H1, H2), G4	AC D binder (H1, H2), G4 AC D trag T1, G4 AC D trag T3, G4 unter Betondecke
LK S, I u. II	SMA D (S1, S2, S3), G1 AC D deck (A2, A3, A4), G1 MA D M1, G1 PA D, (P1, P2) G 1	i2, S3), G1 , 2, A3, A4), 1, G1 P2) G 1		AC D binder (H1, H2), G4 AC D trag (T1, T2), (G4, G5) AC D trag T3, (G4, G5) unter Betondecke
LK III BNLW > 1,0 Mio.	SMA D (S1, S2, S3), G1 AC D deck (A1, A2, A3, A4), G1	-	AC D binder (H1, H2), G4 AC D trag (T1, T2), G4	AC D trag (T1, T2), (G4, G5)
LK III BNLW bis 1,0 Mio., LK IV	AC D deck (A1, A2, A3, A4), (G1, G2)	AC D deck (A5, A6), (G7, G8, G9)	AC D trag (T1, T2), (G4, G5)	AC D trag (T1, T2), (G4, G5, G6)
LK V, VI	AC D deck (A1, A2, A3, A4) (G1, G2, G3) MA D M2 (G1, G2, G3)	AC D deck (A5, A6), (G7, G8, G9)	AC D trag (T1, T	2, T3), (G4, G5, G6)

Tabelle 2: Empfehlungen für die Auswahl von Mischgutsorten nach RVS 08.97.05







Neben den zuvor beschriebenen generellen Anforderungen, die für alle Deckschichtarten gelten, präzisiert die RVS 08.97.05 auch die Anforderungen vor dem Hintergrund der Verkehrsbelastung gem. Oberbaudimensionierungsrichtlinie RVS 03.08.63 [3] unter Bezug auf die in dieser Richtlinie festgeschriebenen Lastklassen. In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass eine Umrechnung in die alten Lastklassen zu erfolgen hat, da im Jahr 2016 mit der Novellierung dieser Richtlinie auch die Lastklassen überarbeitet wurden. Eine entsprechende Umrechnungstabelle kann der RVS 03.08.63 entnommen werden kann.

Unter Bezugnahme auf die Fragestellung des gegenständlichen Projektes können grundsätzlich 2 verschiedene Arten von lärmmindernden, semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in die Untersuchungen miteinbezogen werden. Dabei handelt es sich um folgende Deckschichtarten:

- Splittmastixasphalt SMA S3
  - Größtkorn 8 mm
  - Größtkorn 11 mm
- Lärmmindernden Dünnschichtdecken BBTM
  - Größtkorn 5 mm
  - Größtkorn 8 mm

Die Empfehlungen der RVS 08.97.05 definieren einen Einsatzbereich des lärmmindernden SMA S3 von den höchsten Lastklassen bis zu einer LK III (bzw. mehr als 1 Mio. Bemessungsnormlastwechsel BNLW nach RVS 03.08.63). Da es sich bei der lärmmindernden Deckschicht BBTM in den meisten Fällen, wie bereits erwähnt, um eine Sanierungsmethode handelt, wird eine Empfehlung in dieser Tabelle nach RVS 08.97.05 nicht gegeben.

Die nachfolgenden beiden Tabellen 3 und 4 spezifizieren die technischen Anforderungen an das Asphaltmischgut SMA S3 und BBTM nach RVS 08.97.05.

Mit dem entsprechenden Querverweis in den Anforderungstabellen der RVS 08.97.05 sind unterschiedliche Bindemittelsysteme anwendbar. Diese Anforderungen an das Bindemittel können der nachfolgenden Tabelle 5 entnommen werden.

Unter Bezugnahme auf diese Anforderungen ist es möglich, die semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in Österreich zu definieren und im Rahmen von Erstprüfungen auch den entsprechenden Untersuchungen zu unterziehen. Welche Deckschichtart im Rahmen des gegenständlichen Projektes







Bundesamt	für	Strassen	ASTRA

Mischgut	SMA D S3							
	Anforderungen an die Erstprüfung gemäß ÖNORM B 3584-1							
Eigenschaft	SMA 8 S3	max. Bandbreite						
Bindemittelsorte	gemäß Anhar	g 3, Tabelle 9						
Gesteinsmaterial	gemäß Anhang 2	, Tabelle 7 und 8						
Größtkorn D [mm]	8	11						
Bindemittelgehalt [M%]	B min5,4	B min5.2	0,6					
Zusätze	anzug	eben						
Hohlraumgehalt [V%]	V <sub>min5</sub> / V <sub>max12</sub>	V min6 / V max12	4,0					
Prop. Spurrinnentiefe [%]	PRD							
Bindemittelablauf [%]	D	D 0,6						
Brandverhalten	ÖNORM B 3584-1, Tabelle 12 - bei Ve							
Cisher#0s (mm)	Anforderungen an die Sieblinien für	lärung [M%]						
Slebgroise (mm)	SMA 8 S3	SMA 11 S3	max. Bandbreite					
16		100	12					
11,2	100	90 bis 100	12					
8	90 bis 100	37 bis 58	12					
5,6	144	•	12					
4	23 bis 43	22 bis 38	12					
2	20 bis 35	20 bis 35	12					
1	anzugeben	anzugeben						
0,5	9 bis 24	9 bis 24	12					
0,25	anzugeben	anzugeben						
0,063	5,0 bis 9,0	5,0 bis 9,0	4,0					

#### Tabelle 3: Anforderungen SMA S3 (Erstprüfung) nach RVS 08.97.05

Mischgut	ВВТМ							
Eigenschaft	Anforderungen an die Erstprüfung gemäß ÖNORM B 3581							
	BBTM 5A	BBTM 8B	max. Bandbreite					
Bindemittelsorte	gemäß Anhar	ig 3, Tabelle 9						
Gesteinsmaterial	gemäß Anhang 2	, Tabelle 7 und 8						
Größtkorn D [mm]	5	-						
Bindemittelgehalt [M%]	B <sub>min5,4</sub>	B <sub>min5,2</sub>	0,6					
Zusätze	anzug							
Hohiraumgehalt [V%]	V <sub>min11</sub> / V <sub>max15</sub>	V <sub>min11</sub> / V <sub>max15</sub> V <sub>min11</sub> / V <sub>max15</sub>						
Brandverhalten	Iten ÖNORM B 3581, Tabelle 8 - bei Verwendung in geschlossenen Räumen							
Cichorë@a [mm]	Anforderungen an die Sieblinien für	klärung [M%]						
Siebgröße [mm]	BBTM 5A	BBTM 8B	max. Bandbreite					
16			12					
11,2		100	12					
8	100	90 bis 100	12					
5,6	90 bis 100		12					
4		25 bis 45	12					
2	25 bis 35	15 bis 25	12					
1	anzugeben	anzugeben	-					
0,5	8 bis 18	6 bis 16	12					
0,25	anzugeben	anzugeben	-					
0,063	7,0 bis 9,0	4,0 bis 6,0	4,0					

Tabelle 4: Anforderungen BBTM (Erstprüfung) nach RVS 08.97.05







Bundesamt für Strassen ASTRA

								Asph	altmis	chguts	orten,	-funktio	on und	I-typ <sup>1)</sup>								
			AC dec	k			ACE	inder		AC tra	9	BB	TM	1	SMA		N	IA		P	A	
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	H1	H2	Т1	T2	T3	5A	88	S1	S2	S3	M1	M2	P1	P2	P3	P4
A	-	-	-	A	A	A	-	-	Α	A	A	-	-	-	-	-		-	-		A	A
в	в	в	в	в	в	в	-	в	в	в	в	-	-	-	-			-	-	-	в	В
C	c	c	C	C	C	C	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	с	C	С	C
-	-	-	-	-	-	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	E	E	-	-	-		-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	F	F	F	-	-		-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	G	G	-	-	-	-
	A		1	E	3			С			D	<u> </u>	1	E	y.		-	F			G	
	-				_			-				_	1							20/	30,	н
	50/7	D		50/70,, H			-			-			-			50/70,, H			50/70,, H		н	
	70/10	0	1	70/100 H				-			- 7		70/100,, H		70/100,, H		+	70/100,, H		. н		
	160/2	20	1	60/22	0,, H	+					-	-				_			-			
	-				_						-	-			-			90/10,, H		н		
	_			-	_					Pm	B 10/4	0-60			-						_	
	-			-	-		PmB	25/55-	65	Pm	B 25/5	5-65		-			PmB 25/55-65		15	PmB	25/55	-65
	122						PmB 25/55-55		55	Pm	B 25/5	5-55		12			PmB 2	5/55-5	15	PmB	25/55	-55
	-				-		PmB	45/80-	65	Pm	B 45/8	0-65	P	mB 45	/80-65		PmB 4	5/80-6	5	PmB	45/80	-65
	-			-	-		PmB	45/80-	50	Pm	B 45/8	0-50	P	mB 45	/80-50		PmB 4	5/80-5	0	PmB	45/80	-50

H ... Bindemittelmodifizierende Zusätze sind zulässig (H steht für die Bezeichnung des Zusatzes)

Tabelle 5: Bindemittelsysteme und deren Anforderungen nach RVS 08.97.05

näher untersucht wird, kann dem nachfolgenden Kapitel "Auswahl von semi-dichten Deckschichten" (Abschnitt 2.8) entnommen werden. Es hat sich aber bereits im Zuge der Erhebung der Daten gezeigt, dass SMA 8 S3 und BBTM im Netz der ASFINAG praktisch nicht zum Einsatz kommen, sodass der Schwerpunkt der Untersuchungen ausschließlich beim SMA 11 S3 liegt.

## 2.5 Deckschichten in Deutschland

Für die semidichten und dichten Fahrbahndecken zur Lärmminderung in Deutschland sind die folgenden Regelwerke heranzuziehen (Tabelle 6). Auffällig ist die im Vergleich zu seinen Nachbarländern breitere Auswahl an lärmmindernden Asphaltdeckschichten. Sowohl grundlegende, sich auf die Deckschicht auswirkende Parameter sind thematisiert, als auch eigens angelegte Regelungen zur entsprechenden Bauweise. Nicht jedes Regelwerk ist aber nach der FGSV Klassifikation (R1, R2, W1, W2) gleichzusetzen. Jede lärmmindernde Asphaltdeckschicht hat eine eigene Vorschrift (Wissensdokument) vorzuweisen. Ausnahme stellt die Erhaltungsmaßnahme DSH-V dar. In den folgenden Beschreibungen der lärmmindernden Deckschichten werden mittlere Lärmreduzierungen angegeben. Diese beziehen sich auf die jeweils in den Regelwerken angegebenen Lärmminderungen. Zusätzlich zu den dichten und semi-dichten Bauweisen werden der Vollständigkeit halber kurz die offenporigen Asphaltbauweisen angeschnitten. Eine detaillierte Untersuchung dieser Deckschichten ist im weiteren Projekt nicht vorgesehen.



digitale Infrastruktur

💳 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie





Bundesamt für Strassen ASTRA

		eutschland			
Lärmarme Asphaltdeck- schichten	Grundlagen	Physikalische Eigenschaften und deren Einfluss			
Lärmoptimierter Asphalt (AC D LOA)	R1: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und	R2: Empfehlugen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA (FGSV 739)			
Lärmarmer Splittmastixasphalt	Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt (FGSV 799)	R2: Empfehlugen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten	-		
(SMA LA)	R1: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und	aus AC D LOA und SMA LA (FGSV 739)	R2: Merkblatt zur Optimierung d. Oberflächeneigenschaften von Asphaltdeckschichten (FGSV 768)		
Lärmarmer Gussasphalt	Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen -	R2: Empfehlugen für den Bau von Asphaltschichten aus Gussasphalt			
(MA lärmmindernd)	Asphaltoauweisen (FGSV 798)	(FGSV 740)	W2: Arbeitspapier Textureinfluss		
Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche (PMA)	KI: Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (FGSV 797)	W2: Arbeitspapier von Asphaltdeckschichten aus Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche (FGSV 738)	auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken (FGSV 442)		
Dünne Schichten in Heißbauweise auf Versiegelung (DSH-V)	R1: Zusätzliche Technische Vertrag Bauliche Erhaltung von Verkehrsfläc (FGS)	sbedingungen und Richtlinien für die henbefestigungen - Asphaltbauweisen V 798)			

Tabelle 6: Übersicht der Deutschen Regelwerke für lärmmindernde Asphaltdeckschichten

Lärmoptimierter Asphaltbeton AC D LOA 5 wird bis dato praktisch ausnahmslos auf innerörtlichen Strecken eingesetzt. Durch die Verwendung modifizierter Bindemittel wird eine hohe Stabiliät bzw. Widerstandsfähigkeit der Asphaltdeckschicht bei gleichzeitigem geringem Hohlraumgehalt erzielt. Eine Asphaltdeckschicht aus AC D LOA 5 weist einen Hohlraumgehalt von 4,0 bis 9,0 Vol.-% auf. Die lärmoptimierte Wirkung des Fahrbahnbelags beruht auf dessen konkaver ("Plateau mit Schluchten") Oberflächentextur [4]. Richtwerte für Asphaltmischgut AC 5 D LOA sind in den Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA [5] zusammengestellt. Beim Einbau eines AC 5 D LOA muss die Lufttemperatur mindestens 10 ℃ betragen, die der Unterlage 8 ℃. Im Gegensatz zu "klassischen" Asphaltdeckschichten ist die lärmoptimierte Variante nicht abzustumpfen. Nach bisherigen Erfahrungen ist die Anfangsgriffigkeit ausreichend gegeben (siehe FGSV 739 [5]). Eine zusammenfassende Orientierung der Bauweise ist aus dem Wissensdokument ("Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken") der FGSV zu entnehmen.

Der SMA LA ging als Alternative zum offenporigen Asphalt und als weiterentwickelte Form des klassischen Splittmastixasphalt hervor [6]). Dabei unterscheidet sich der SMA LA von SMA durch eine veränderte Sieblinie. Im Wesentlichen ist darunter die Verringerung an feinkörnigen Gesteinskörnern







zu verstehen. Die neue günstige Makrotextur mit einem höheren Hohlraumgehalt von 9,0 bis 14,0 Vol.-% in Verbindung mit einem polymermodifizierten Bindemittel ist charakteristisch für diesen Straßenbelag. Im Mittel ist ein Lärmminderungspotential von 3 bis 4 dB(A) zu erwarten, je nach Verwendung im innerörtlichen oder außerörtlichen Bereich [4]. Bedingt durch einen erhöhten Hohlraumgehalt kann die Lebensdauer und das Entwässerungsverhalten problematisch sein. Aus diesem Grund ist die Unterlage auch stets abzudichten bzw. wasserdicht auszuführen [6]. Die zu erwartende Lebensdauer liegt unter der des klassischen Splittmastixasphaltes, aber höher als beim offenporigen Asphalt [4].

Zusammenfassende Richtwerte für das Asphaltmischgut SMA LA sind Tabelle 7 zu entnehmen. Es finden sich dazu auch Angaben zur Gesteinskörnung und dem Gesteinskörnungsgemisch.

Die Verwendung von Asphaltgranulat ist grundsätzlich zu unterlassen. Vor dem eigentlichen Einbau der Asphaltdeckschicht ist für eine zweckmäßige Unterlage zu sorgen, d.h. die Unterlage sollte eine homogene und geschlossene Oberfläche bilden.

Für den SMA 8 LA (siehe Abbildung 4) findet sich im FGSV-Dokument Arbeitspapier (W2) – "Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken" folgende Zusammenfassung (Orientierung).

Abschließend ist noch anzumerken, dass das Asphaltmischgut für SMA LA nicht den derzeit geltenden DIN EN 13108-5 entspricht und daher nicht mit der CE-Kennzeichnung versehen werden kann.

**Gussasphalt (MA)** als solches ist eine weitestgehend porenfreie, respektive dichte Asphaltdeckschicht, die über eine lange Zeitspanne sehr verformungsbeständig und dauerhaft ist. Die dichte



Abbildung 4: Asphaltdeckschicht aus Lärmarmen Splittmastixasphalt - SMA 8 LA (FGSV 442, 2013 [7])



💳 Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie





Bundesamt für Strassen ASTRA

Einheit	SMA 8 LA	SMA 5 LA	
Baustoffe Gesteinskörnungen (Lieferkörnung) Anteil gebrochener Kornoberflächen Widerstand gegen Zertrümmerung Widerstand gegen Polieren Mindestanteil von Lieferkörnungen 0/2 mit <i>E</i> <sub>cs</sub> 35 Bindemittel, Art und Sorte			
gut M% M% M% M% M%	100 90 bis 100 20 bis 30 15 bis 20 6 bis 8	100 85 bis 100 20 bis 30 7 bis 10	
M% Vol% M%	6,6 ist anzugeben ≥ 0,3	7,0 ist anzugeben ≥ 0,15	
Vol% Vol% %	9,0 11,0 ist anzugeben	9,0 11,0 ist anzugeben	
	Einheit )) hen )g en gut M% M% M% M% Vol% Vol% Vol% Vol% %	Einheit         SMA 8 LA           )) $C_{100/0}; C_{95/1}; C_{90/1}$ ng $SZ_{18}/LA_{20}$ $PSV_{angegeben}(51)$ $PSV_{angegeben}(51)$ en         100           40/100-65; $45/80-50^{11}$ ; $(25/55-55)^{11}$ $(25/55-55)^{11}$ gut         100           M%         90 bis 100           M%         20 bis 30           M%         6 bis 8           M%         6,6           Vol%         9,0           Vol%         9,0           Vol%         11,0           %         ist anzugeben           %         ist anzugeben	

1) bis zu einer Belastungsklasse von maximal Bk1,8.

<sup>2)</sup> Faktor α analog TL Asphalt-StB 07, Abschnitt 3.1.

<sup>30</sup> Raumdichtebestimmung nach TP Asphalt-StB, Teil 6, Verfahren B (...) Bindemittelsorte f
ür Ausnahmef
älle

Tabelle 7: Richtwerte für Asphaltmischgut SMA LA (FGSV 739, 2014, [5])







Ausführungsart hat zur Folge, dass sowohl die Gesteinskörnung als auch der Bindemittelfilm durch eindringendes Wasser, Schmutz oder Salz (Winterdienst) nicht in die Grenzflächen eindringen kann. Verhärtungen des Bindemittels durch oxidative und destillative Vorgänge werden somit ebenfalls verhindert [8]. Schlussendlich kann die Lärmoptimierung des Straßenbelags nur über eine günstige Oberflächenbearbeitung, d.h. über dessen Abstreuung, erfolgen. Die Abstreuung wird beim Einbau dauerhaft in die Fahrbahnoberfläche eingebunden. Die (neu) erzeugte Mikrotextur wirkt lärmreduzierend (im Mittel 2 bis 3 dB(A)) [4]. Ausschlaggebend für die tatsächliche Lärmminderung ist folgerichtig die Art, Form, Menge und Struktur der in die Fahrbahndeckschicht eingelassenen Splitte. Die leicht mit Bitumen umhüllten Abstreusplitte, der frisch produzierten Kornklasse 1-3 mm oder 2-4 mm, sind auf die noch heiße Gussasphaltdeckschicht aufzubringen [8].

Gussasphalt mit verbesserten lärmtechnischen Eigenschaften ( $D_{Stro}$ -Wert von -2 dB(A)) ist nach den ZTV Asphalt-StB 07 im Verfahren B herzustellen. Zusätzliche ausführungstechnische Hinweise für den Bau von Asphaltschichten aus Gussasphalt für Verkehrsflächenbefestigungen, insbesondere im Hinblick auf lärmtechnische Eigenschaften sind im R2 – Empfehlungen für den Bau von Asphaltschichten aus Gussasphalt, kurz E GA, (FGSV 740 [9]) festgehalten.

Kennzeichnend für das Verfahren B ist die Abstreumenge der jeweiligen mit Bindemittel umhüllten Lieferkörnung. Für die Lieferkörnung 2/3 gilt eine Abstreumenge von 10 bis 12 kg/m<sup>2</sup>, die maschinell oder per Handeinbau bei kleinen Flächen auf die heiße Oberfläche gleichmäßig aufzubringen ist. Für die Lieferkörnung 2/4 gilt der Richtwert von 11 bis 13 kg/m<sup>2</sup> Abstreumenge. Das Abstreumaterial muss für den Einbau frisch produziert werden und bedarf eines thermoisolierten Transportes. Die Streufähigkeit und Haftung des Abstreumaterials ist abhängig von der Bindemittelmenge. Es gilt, die Parameter aufeinander abzustimmen. Die Kombination des Mischgutes mit der Abstreuung führt zu einer vorteilhaften, d.h. besonders gleichmäßigen und feinkörnigen Textur. Die grundsätzlichen Anforderungen an Gussasphaltmischgute sind Tabelle 8 zu entnehmen.

Im Arbeitspapier (W2) – "Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken" finden sich ebenfalls Angaben (Erfahrungen) zur lärmmindernden Fahrbahndecke aus MA 5 S (Abbildung 5).

Im Gegensatz zum traditionellen Gussasphalt (MA) kann durch eine Anpassung der Asphaltrezeptur ein **Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche (PMA)** entwickelt werden. Im Fokus steht dabei das Mischgut, welches nun einen höheren Anteil an grober Gesteinskörnung aufweist. Daraus resultiert, dass der Gussasphalt im oberen Bereich offenporig ausgebildet ist, aber im unteren Bereich weiterhin dicht ist. Die offenporige Oberfläche bzw. die konkave Textur ("Plateau mit Schluchten") bildet sich,





Bundesamt für Strassen ASTRA



Bezeichnung	Einheit	MA 8 S	MA 5 S
Baustoffe			
Gesteinskörnungen (Lieferkörnun Anteil gebrochener Kornoberfläc	g) chen	Com	Court
Widerstand gegen Zertrümmerur	ag	\$7.// A.	SZ./I Ass
Widerstand gagan Poliaran*)	-6	DCU (48)	DCV (49)
Widerstand gegen Polieren		PSV angegeben (40)	PSV angegeben (46)
körnungen 0/2 mit Ege 35	G/c	35	35
Bindemittel Art und Sorte**)	10	20/20-	20/20-
Bindemitter, Art und Softe		20/30,	20/30,
		10/40-65	10/40-65
		25/55-55	25/55-55
Zusammensetzung Asphaltmisch Gesteinskörnungsgemisch Siebdurchgang bei	gut		
16 mm	M%		
11,2 mm	M%	100	
8 mm	M%	90 bis 100	100
5,6 mm	M%	75 bis 90	90 bis 100
2 mm	M%	50 bis 60	55 bis 65
0,063 mm	M%	22 bis 30	24 bis 32
Mindest-Bindemittelgehalt		$B_{ m min7.0}$	$B_{\min 7,0}$
Asphaltmischgut minimale statische Eindringtiefe W	/ürfel	$I_{\min 1,0}$	$I_{\min 1,0}$
maximale statische Eindringtiefe W	Vürfel	I <sub>max 3,0</sub>	I <sub>max 3,0</sub>
Zunahme Eindringtiefe Würfel		$I_{\rm nc \ 0,A}$	$I_{\rm nc \ 0,4}$
dynamische Stempeleindringtiefe	mm	ist anzugeben	ist anzugeben

Tabelle 8: Richtwerte für Asphaltmischgut MA (FGSV 797, 2013 [10])











nachdem sich der Mörtel in die untere Schicht niedergesetzt hat. Die dichte Schicht macht einen extra Schutz der Binder- und Tragschicht gegen Wasser hinfällig, da die untere Schicht bereits wasserundurchlässig ist. Eine Lärmreduzierung von 4 dB(A) kann mit dieser Asphaltdeckschicht erwartet werden [4]. Die Deckschicht aus Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche findet für alle Geschwindigkeitsbereiche Anwendung. Geltende Richtwerte sind im Arbeitspapier für die Ausführung von Asphaltdeckschichten aus PMA [11] zusammengefasst.

Bei Erhaltungsmaßnahmen von Verkehrsflächen kommen vorwiegend dünne Asphaltdeckschichten zum Einsatz. Diese können auf bereits bestehende Befestigungen aus Beton, Asphalt oder Pflaster aufgebracht werden. Da es sich um jeweils geringe Schichtdichten handelt, kommen feinkörnige und somit auch lärmmindernde Mischgüter zum Einsatz [4]. Eine besondere Art der **dünnen Asphaltdeckschicht ist die Heißbauweise auf Versiegelung (DSH-V)**. Kennzeichnend dafür ist eine für den Verwendungszweck eigens konzipierte Asphaltmischgutzusammensetzung und die Versiegelung der Unterlage durch eine polymermodifizierte Bitumenemulsion. Überwiegend sind jedoch Mischgutzusammensetzungen mit einem Größtkorn von 5 mm (DSH-V 5) vertreten, da die lärmmindernde Wirkung eines DSH-V 8 (Größtkorn 8 mm) nicht so hoch ausfällt [12]. Das Aufbringen der Bitumenemulsion und der Einbau des Mischgutes erfolgt in einem Arbeitsgang. Durch einen Straßenfertiger mit Sprühvorrichtung wird zunächst eine Schicht der Bitumenemulsion aufgetragen, die sofort mit dem heißen Mischgut überbaut wird [6]. Die feinkörnige und konkave Fahrbahntextur führt zu einem Lärmminderungspotential von -4 bis -5 db(A) [4].

Sind lärmtechnische Aspekte zu berücksichtigen, wird der Einbau von DSH-V 5 empfohlen. Ein Mindestbindemittelgehalt von  $B_{min}$ = 6,2 M.-% ist dabei einzuhalten. In Kombination mit dem Gesteinskörnungsgemisch führt dies zu einem fiktiven Hohlraumgehalt von 17 bis 21 Vol.-%. Am Marshall-Probekörper sollte ein Wertebereich von  $V_{min}$ = 3,5 Vol.-% bzw.  $V_{max}$ = 5,5 Vol.-% gewährleistet werden [13]. Die Richtwerte für Asphaltmischgut DSH-V 8 und DSH-V 5 sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Der Einbau auf vorhandene Verkehrsflächen jeglicher Art und aller Belastungsklassen ist gestattet, obliegt aber gleichzeitig bestimmten Ausführungskriterien. Die Gefahr des schnellen Auskühlens setzt voraus, dass der Einbau nur bei günstigen Wetterbedingungen zu erfolgen hat. Unter günstigen Wetterbedingungen werden in diesem Zusammenhang eine Lufttemperatur von mindestens 10 ℃, die Unterlagentemperatur von mindestens 8 ℃ und nur schwache Windverhältnisse beim Einbau verstanden. Ebenso ist durch ein schnelles Auskühlen ein schneller respektive direkter Einsatz von Walzen hinter dem Straßenfertiger notwendig.



Γ

Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie





٦

Bundesamt für Strassen ASTRA

Bezeichnung	Einheit	DSH-V 8	DSH-V 5
Baustoffe			
Gesteinskörnungen (Lieferkörnung)			
Anteil gebrochener		$C_{90/1}; C_{95/1};$	$C_{90/1}; C_{95/1};$
Kornoberflächen		$C_{100/0}$	$C_{100/0}$
Widerstand gegen			
Zertrümmerung		SZ <sub>18</sub> / LA <sub>20</sub>	SZ <sub>18</sub> / LA <sub>20</sub>
Widerstand gegen Polieren			
Belastungsklasse Bk100 bis Bk3,2		PSV <sub>angegeben</sub> (51)	PSV <sub>angegeben</sub> (51)
Belastungsklasse Bk1,8 bis Bk0,3		PSV <sub>angegeben</sub> (48)	PSV <sub>angegeben</sub> (48)
Kornform-/Plattigkeitskennzahl		$SI_{15} / FI_{15}$	$SI_{15} / FI_{15}$
Mindestanteil von Lieferkörnungen 0/2	~		50
mit $E_{\rm CS}$ 35	%	50	50
Bindemittel, Art und Sorte		15/00 50 4	15/00 50 1
Belastungsklasse Bk100 bis Bk3,2 Belastungsklasse Bk1 8 bis Bk0.2		45/80-50 A;	45/80-50 A;
Belastungsklasse Bk1,8 bis Bk0,5		70/100	/0/100
Zusammensetzung Asphaltmischgut			
Gesteinskörnungen			
Siebdurchgang bei			
11,2 mm	M%	100	100
8 mm	M%	90 bis 100	100
5,6 mm	M%	60 bis 65	90 bis 100
0.125 mm	M%	0 bis 13	40 bis 50 8 bis 12
0.063 mm	M -%	6 bis 10	7  bis  11
Mindest-Bindemittelgehalt	MI 70	$B_{\min 6.0}$	$B_{\min 6.2}$
Asphaltmischguteigenschaften			
minimaler Hohlraumgehalt MPK		Valence	Verlage
maximaler Hohlraumgehalt MPK		Vmax 5.5	Vmax 5.5
Fiktiver Hohlraumgehalt des Gesteins-		• max 5,5	, max 5,5
körnungsgemisches	Vol%	17 bis 21	17 bis 21

Tabelle 9: Richtwerte für Asphaltmischgut DSH-V 8 und DSH-V 5 (FGSV 798, 2013) [13]





Eine zusammenfassende Orientierung der Bauweise des DSH-V 5 ist in Abbildung 6 dargestellt.

#### 2.6 Deckschichten in der Schweiz

Für die semidichten und dichten Fahrbahndecken zur Lärmminderung in der Schweiz sind die folgenden Regelwerke heranzuziehen (Tabelle 10):

Semdichtes Mischgut (SDA) repräsentiert eine neue Art lärmarmer Asphaltdeckschicht im Innerortsbereich. Ebenfalls wird SDA mit Größtkorn 8 mm auf Autobahnen eingesetzt und wurde dort zum momentanen Standardbelag. Alternativ ist die neue Zusammensetzung von Größtkorn und Hohlraumgehalt als Semidichter Asphalt (SDA) zu verstehen. Zur Anwendung kommt in der Schweiz der semidichte Asphalt mit einem Größtkorn von 4 mm (SDA 4) oder 8 mm (SDA 8). Charakteristisch

<b>.</b> .		Nationale Regelwerke	- Schweiz	
Larmarme Asphaltdeck- schichten	Grundlagen	Grundlagen Mischgutanforderungen		
Semidichter Asphalt	Lärmmindernde Decken	Semidichtes Mischgut (SNR 640 436)		
(SDA)	(SNR 640 425)	(3142 040 450)	Walzasphalt	
Rauasphalt (AC MR)	Anforderungen Asphaltbeton Gesteinskörnungen Asphalte u. Oberflächenbehandlungen		(SN 640 430)	
Gussasphalt (MA)	fur Strassen, Flugplätze u. andere Verkehrsflächen (SN 670 103b)	Gussasphalt (SN 640 441b)	Gussasphalt (SN 640 440c)	

Tabelle 10: Übersicht der Schweizerischen Regelwerke für lärmmindernde Asphaltdeckschichten







ist hier ein Hohlraumgehalt, welcher einen Wert zwischen 12 und 20 Vol.-% am Marshall-Probekörper aufweist (üblich sind dabei die Hohlraumklassen 12, 16 und 20%, die zB. als SDA 4-12, SDA 4-16 und SDA 4-20 bezeichnet werden). Der obere Hohlraumgehaltbereich (20 Vol.-%) ist eher die Ausnahme. In der Westschweiz sind jedoch hohlraumreichere Varianten von SDA4 stark verbreitet. Dabei handelt es sich um baufirmeneigene Mischungen, die SDA4-20 ähnlich sind und bautechnisch nicht charakterisiert werden dürfen und daher nicht in das Projekt ADURA eingeflossen sind. Bei diesen Einbauten tragen die Baufirmen oft das Risiko und die zu erreichenden Lärmminderungen sind vertraglich zu verschieden Zeitpunkten im Lebenszyklus festgelegt (meistens nach 1 und 5 Jahren). Verschiedene Wirkungsanalysen führen jedoch zu dem Ergebnis, dass die akustische Minderung auch innerhalb derselben Größtkorn- und Hohlraumgehaltsstufe schwanken kann (explizit kann die Akustik bis zu 3 dB(A) variieren). Ursache dafür sind bautechnische Unterschiede je nach SDA Rezeptur. Eine gute akustische Wirkung setzt voraus, dass der Belag durch tiefe Luftströmungsgeräusche und an der Oberseite durch freie Hohlräume gekennzeichnet ist. Um eine Wirksamkeit der Hohlräume im Belag zu gewährleisten, müssen diese von der Oberflächenseite her zugänglich sein. Für diese Zugänglichkeit der Hohlräume sind wiederum die Füller- und Sandanteile entscheidend. Verklebte Hohlräume an der Oberfläche, respektive ein falsches Verhältnis von Füller- und Sandanteilen sind infolgedessen für die akustische Unwirksamkeit des SDA verantwortlich [14]. Semidichtes Mischgut (SDA) wird durch die SNR 640 436 [15] geregelt. Diese legt Anforderungen und Hinweise zur Konzeption, Herstellung und Ausführung fest (Tabelle 11).

Zur Thematik des Bindemittels ist ausschließlich der Einsatz von Polymerbitumen gestattet. Explizit die Sorte PmB (CH-E) wird in diesem Fall empfohlen. Unabhängig vom Hohlraumgehalt ist für ein SDA 4 ein dosierter Bindemittelgehalt von  $B_{\min} \ge 6,0$  M.-% nicht zu unterschreiten. Für einen SDA 8 liegt der Grenzwert bei:  $B_{\min} \ge 5,8$  M.-%. Generell beruhen die Sorten des semidichten Mischgutes

Teneur en vides	caractéristiques et valeurs limi	tes de la teneur en vides des é	prouvettes Marshall
Sorte und Klasse Sorte et classe	- 12	- 16 ,	- 20
		[Volumen-%] / [% volumique]	
SDA 4	12	16	20
SDA 8	12	16	
	Grenzwerte für den Hohlraur Valeurs limites de la teneur ei	ngehalt der Marshall-Prüfkörper n vides des éprouvettes Marshall	
SDA 4	1014	1418	1822
SDA 8	1014	1418	

Tabelle 11: Charakteristischer Hohlraumgehalt und Grenzwerte für den Hohlraumgehalt der Marshall-Prüfkörper (SNR 640 436, 2015, [15])







auf den Korngruppen 0/2, 2/4 und 4/8 und sollten auf einen erhöhten Widerstand gegen das Polieren abzielen (PSV<sub>50</sub>).

Die Korngrößenverteilung der beiden Mischguttypen SDA 4 und SDA 8 setzt sich wie folgt zusammen (Tabelle 12).

Semidic Enrobés	htes Mischgut SDA, Sollwertbereiche der Korn semi-denses SDA, plages des valeurs nomina	grössenverteilung les de la granularité				
Analysensieb Tamis d'analyse (mm)	Siebdurchgang Passant [Masse-%] / [% massique]					
	SDA 4	SDA 8				
11,2		100				
8,0	8	90100				
5,6	100	5070				
4,0	90100	1552				
2,0	1250	1035				
1,0	729	726				
0,5	424	421				
0,063	312	312				

Tabelle 12: Korngrößenverteilung des semidichten Mischgutes (SNR 640 436, 2015, [15])

Für einen optimalen Schichtenverbund ist der Einsatz eines Haftvermittlers notwendig. Dieser wird vor dem Einbau der Asphaltdeckschicht auf die Unterlage gesprüht. Das Auftragen des Bindemittels muss in einer gleichmäßigen Verarbeitungsweise erfolgen. Die tatsächliche Dosierung richtet sich nach Zustand der Oberfläche. Als Richtwert ist im Regelwerk eine Dosierung 150 bis 200 g / m<sup>2</sup> festgelegt. Handelt es sich um geschlossene Oberflächen, soll laut Empfehlung der kleinere Wert für eine optimale Dosierung verwendet werden. Je rauer die Oberfläche, desto höher soll die Dosierungsmenge gewählt werden. Für den Haftvermittler sind polymermodifizierte Bitumenemulsion (SN EN 13808 "Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Rahmenwerk für die Spezifizierung kationischer Bitumenemulsionen"), Haftkleber bzw. andere geeignete Produkte zu benutzen. Der Einbau der Asphaltdeckschicht ist erst gestattet, wenn der Haftvermittler abgebunden ist. Ebenso sind die Witterungsverhältnisse zu berücksichtigen. Asphaltmischgut SDA darf nur bei einer Unterlagentemperatur von min. +15 °C eingebaut werden. Bei Niederschlägen ist der Einbau nicht erlaubt. Die für semidichtes Mischgut zu erzielenden Schichtdicken sind Tabelle 13 zu entnehmen [15].

Der AC MR (Rauasphaltdeckschicht) Belag entspringt dem des früher zur Anwendung gekommenen Splittmastixasphalt. Im Besonderen ist der AC MR 8 LN (ehemals AC MR 8, Typ ASTRA) Nachfolger des SMA 8. Grund für dessen Austausch ist das bessere Lärmminderungspotential der Rauasphaltdeckschicht AC MR. Charakteristisch für MR Beläge ist die Kombination aus einem reduzierten Bindemittelgehalt und einem gegenüber Splittmastixasphalten leicht erhöhten Hohlraumgehalt





Bundesamt für Strassen ASTRA



Empfohlene Sollwertbe Plages des valeurs r	ereiche der Schlchtdicken In A nominales recommandées des et classe	Abhängigkeit der Mischgutsort s épaisseurs des couches en n s d'enrobés	en und Mischgutklassen elation avec les sortes
Sorte und Klasse Sorte et classe	- 12	- 16	- 20
		[mm]	
SDA 4	2035	2035	2035
SDA 8	2540	2540	

Tabelle 13: Schichtdicken in Abhängigkeit der Mischgutsorten und -klassen (SNR 640 436, 2015, [15])

[16]. Die Asphaltdeckschicht AC MR ist zwar als Asphaltbeton deklariert, zeichnet sich aber mit maximalen Anteilen (bis zu 80 %) an grober Gesteinskörnung aus. Dies entspricht in etwa einer Splittmastix ähnlichen Mischung [17]. Sowohl eine hohe Verformungsbeständigkeit als auch ein geringes Ermüdungsverhalten sind eindeutige Vorteile dieser Asphaltdeckschicht. Entsprechend kommt diese Belagsart vorwiegend bei stark verkehrsbeanspruchten Straßen zum Einsatz. Ansonsten haben die MR und SMA Beläge dieselben Eigenschaften und ihre Einbautechniken sind identisch [16].

Die Asphaltdeckschicht aus AC MR wird u.a. in der SN 640 431-1-NA (Asphaltmischgut Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton, [18]) geregelt. Das europäische Pendant ist die Norm für Asphaltbeton [19]), wobei diese keinerlei Bezüge auf das AC MR Mischgut aufweist. Der Nationale Anhang enthält Empfehlungen zur Wahl der Baustoffe, Bindemittel, Gesteinskörnungen, Zusätze und allgemeine empirische Anforderungen an den Asphaltbeton. Die im Regelwerk verankerten Mischgutsorten beschränken sich auf den AC MR 8 und AC MR 11. Eine direkte Nennung, welches Mischgut lärmmindernd wirkt, erfolgt nicht. Die in der Regel zur Anwendung kommenden Polymerbitumen sind PmB 45/80-65 (CH-E) und PmB 65/105-60 (CH-E). Je nach Verkehrsbeanspruchung und vorherrschendem Klima sind auch andere Polymerbitumen (PmB 45/80-50 (CH-C), PmB 65/105-45 (CH-C) oder PmB 25/55-65 (CH-E)) zu berücksichtigen. Straßenbaubitumen sind generell ausgeschlossen. Die beiden Mischgutsorten basieren auf der kombinierten Korngruppe 4/8 (AC MR 8) und 8/11 (AC MR 11). Unabhängig von der Belastungsklasse und dem Größtkorn ist ein Hohlraumgehalt von 3,0 bis 6,0 Vol.-% vorgesehen. Ergänzend zum Bindemittelgehalt bleibt festzuhalten, dass für die Sollzusammensetzung der Richtwert von  $\geq$  5,8 M.-% für einen AC MR 8 und  $\geq$  5,6 M.-% für einen AC MR 11 nicht unterschritten werden darf (SN 640 431-1-NA, 2013) [18]. Für eine genaue Korngrößenverteilung der Asphaltdeckschicht siehe Tabelle 14.

Das Regelwerk "Walzasphalt – Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten" (SN 640 430) weist der Rauasphaltdeckschicht, unabhängig vom Größtkorn, veränderte Einzel- und Mittelwerte bzgl. der Hohlraumgehalte der Schichten zu. Explizit ist der AC MR Deck-



ium uktur

Bundesministerium
 Klimaschutz, Umwelt,
 Energie, Mobilität,
 Innovation und Technologie



Bundesamt für Strassen ASTRA



Asphaltbeton, Sollwertbereiche der Korngrössenverteilung Enrobés bitumineux, plages des valeurs nominales de la granularité								
Analysensieb		Sieb	durchgang [Mass	e-%]				
Tamis d'analyse		Passar	nt au tamis [% ma	ssique]				
[mm]	AC MR 8	AC MR 11	AC 4	AC 8	AC 11 AC B 11 AC T 11			
16,0		100			100			
11,2	100	90100		100	90100			
8,0	90100	3040		90100	7293			
5,6			100	7293				
4,0	3242	2333	90100	5881	4770			
2,0	2131	1626	5781	3861	3153			
1,0			3760	2545	2039			
0,5	1321	917	2344	1633	1429			
0,063	611	59	616	612	512			

Tabelle 14: Korngrößenverteilung u.a. AC MR (SN 640 431-1-NA, 2013) [18]

schicht im Einzelnen ein Toleranzbereich von 2,5 bis 8,0 Vol.-% Hohlraumgehalt zugeordnet. Im Mittel ausgedrückt sind folgende Grenzwerte zu beachten: 3,0 bis 7,0 Vol.-% Hohlraumgehalt. Die gleiche Aufteilung betrifft die Anforderung an die Verdichtungsgrade der Schichten. Für beide Größtkornvarianten gilt ein Verdichtungsgrad von  $\geq$  97,0 % im Einzelnen (Mittelwert $\geq$  0,98 %). Voraussetzung für die definierten Verdichtungsgrade sind der maschinelle Einbau respektive die Einhaltung der Schichtdicken von 2,5 bis 4,0 cm für einen AC MR 8 bzw. 3,5 bis 5,0 cm für einen AC MR 11.

Die Thematik des (lärmreduzierenden) Gussasphaltes in der Schweiz unterscheidet sich im Wirkungsprinzip nicht von dem in Deutschland zum Einsatz kommenden Gussasphalt. Für dessen Lärmminderungspotential sind auch hier das Abstreumaterial und dessen Kornklassen maßgebend. Im Folgenden wird auf eine sich wiederholende vollständige Charakterisierung verzichtet und auf den entsprechenden Abschnitt "Deckschichten in Deutschland" verwiesen.

Grundsätzlich werden in der Schweiz lärmreduzierten Gussasphalte in "Gussasphalt – Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten" [20] beschrieben. Allgemein ist die Konzeption, d.h. die zu erzielenden Schichtdicken, abhängig vom Größtkorn und der jeweiligen Beanspruchung (siehe Tabelle 15)

Eine lärmreduzierende Wirkung ist bis dato lediglich beim MA 8 in Abhängigkeit des Abstreumaterials nachzuweisen.

Details zur Mischgutkonzeption sind in "Anforderungen Gesteinskörnungen Asphalte und Oberflächenbehandlungen für Strassen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen" (SN 670 103b) und zum





Bundesamt für Strassen ASTRA



Gussasphalt MA Asphalte could	, Sollwertbereiche fü é routier MA, plages en fond	r die Schichtdicken in . des valeurs nominales ction des sortes et des	Abhängigkeit der Sorte pour les épaisseurs de types	n und Typen s couches
Schichten und Sorten		Ту	ben	
Couches et sortes		Tyj	oes	
	L	N	S	н
		[m]	m]	
Gussasphalt für Deck-, Bind Asphalte coulé routier pour	der- und Schutzschicht couches de roulemen	ten t, de liaison et de protect	ion	
MA 4	1220	1220		
MA 8	2035	2035	2035	2035
MA 11	3045	3045	3045	3045
MA 16	4055	4055	4055	4055

Tabelle 15: Gussasphaltschichtdicken in Abhängigkeit der Sorten und Typen (SN 640 440, 2008) [20]

anderen in "Anforderungen Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen – Teil 6: Gussasphalt" (SN 640 441b) zu finden.

## 2.7 Vergleich von Deckschichten und Clusterung

Unter Bezugnahme auf die jeweiligen nationalen Regelungen ist es nun möglich, einen Vergleich der unterschiedlichen semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten vorzunehmen und eine entsprechende Clusterung für die detaillierten labortechnischen Untersuchungen und Analyse der Daten durchzuführen.

## 2.7.1 Anforderung und Clusterung nach Materialcharakteristika

Die nachfolgende Tabelle 16 gibt zunächst einen Überblick über die aus diesen Richtlinien entnommenen Anforderungen für die ausgewählten semi-dichten Deckschichtarten. Auf der Grundlage dieser Anforderungen und die diesbezüglichen Grenzwerte der unterschiedlichen Materialcharakteristika von lärmmindernden semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in Deutschland, in der Schweiz und in Österreich kann eine erste Clusterung vorgenommen werden, die in der Tabelle 17 dargestellt ist.

Diese Clusterung kann so gewählt werden, dass für eine statistische Untersuchung von Abhängigkeiten durch die maßgebenden Materialkenngrößen (Hohlraumgehalte, Verdichtungsgrad, etc.) sowie Einbaumerkmale (Schichtdicke) die Spannweiten der wertmäßigen Beschreibungen (auf der Grundlage der Grenzwerte der nationalen Normung) in zumindest zwei Gruppen zu unterteilen sind. Jeder Cluster kann dann für sich individuell untersucht und mit dem anderen Cluster verglichen werden. Ergeben sich Unterschiede im Verhalten, so lassen sich zumindest im Rahmen dieser Betrachtung bestimmte Abhängigkeiten ausschließen oder eingrenzen. Voraussetzung hierfür ist jedoch das Vorhandensein der Detailinformationen über die Materialeigenschaften und Einbaumerkmale.







Die Tabelle 17 zeigt hier eine solche mögliche Clusterung für die Untersuchungen und Analysen für unterschiedliche Kenngrößen. Die Wahl der Grenze zwischen den Clustern erfolgte bei diesem Ansatz entweder durch die Auswahl der Mitte zwischen dem oberen und unteren Grenzwert oder durch eine ingenieurmäßige Beurteilung.

Leider hat sich gezeigt, dass die Clusterung zwar mathematisch eine sinnvolle Möglichkeit zur Beurteilung von Abhängigkeiten darstellt, jedoch die übermittelten bzw. zur Verfügung gestellten Daten nicht die notwendigen Informationen beinhalteten, sodass letztendlich auf diese Stufe der Clusterung verzichtet werden musste. Aus Gründen der Vollständigkeit wird jedoch die Tabelle 17 im gegenständlichen Bericht belassen, sodass für zukünftige Auswertungen auf eine solche Einteilung zurückgegriffen werden kann.

Figonschaft	Österreich			Deutschland			Schweiz					
	SMA 8 S3	SMA 11 S3	BBTM 5A	BBTM 5B	DSH-V 5	SMA 5 LA	SMA 8 LA	SDA 4-12	SDA 4-16	SDA 4-20	SDA 8-12	SDA 8-16
Schichtdicke [cm]	2,5 bis 3,5	3,0 bis 4,0	1,5 bis 2,5	2,0 bis 2,5	3,0 bis 5,0 <sup>a</sup>	2,0 bis 3,0	2,5 bis 4,0		2,0 bis 3,5		2,5 b	is 4,0
Verdichtungsgrad [%]	$\geq$ 98	≥ 98	-	-	k.A <sup>b</sup>	$\ge$ 97	$\geq$ 97		$\geq$ 96		2	97
Hohlraumgehalt	6,0 bis	6,0 bis	11,0 bis	11,0 bis	۲A	9,0 bis	9,0 bis	6,0 bis	10,0 bis	14,0 bis	5,5 bis	9,0 bis
Schicht [Vol%]	12,0	12,0	17,0	17,0	K.A.	14,0	14,0	16,0	20,0	24,0	13,0	17,0
Bindemittelgehalt	B	B	B	B	B	B	B	>62		6.0		5.8
[M%]	D <sub>min5,4</sub>	D <sub>min5,2</sub>	D <sub>min5,4</sub>	D <sub>min5,2</sub>	D <sub>min6,2</sub>	D <sub>min7,0</sub>	Dmin6,0	≥ 0,2		0,0		5,0
Hohlraumgehalt	Vial	Vial	V /	Vint	V · ar/	Vial	V /					
Marshall-Probekörper	Vmin6 /	V min6 /	Vmm117	Vmin117	V	Vmin97	$V_{ming}$	8	12	16	8	12
[Vol%]	• max12	• max12	• max15	• max15	• max5,5	· max11	• max11					
Haftzugfestigkeit	۲A	۲A	k A	k A	>10			۲A		۲A	k A	k۸
[N/mm <sup>2</sup> ]	n.A.	г. <b>А</b> .	<u>к.</u> А.	<u>к.</u> А.	/ /1,0			<u>к.</u> А.	к. <b>А</b> .	к. <b>А</b> .	к. <b>А</b> .	к. <b>А</b> .

Tabelle 16: Anforderungen Materialeigenschaften von semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in DACH

<sup>a</sup>Einbaumenge [kg/m<sup>2</sup>] <sup>b</sup>k. A. = keine Anforderungen

Figeneebeft		Öster	rreich		Deutschland			Schweiz				
Eigenschalt	SMA 8 S3	SMA 11 S3	BBTM 5A	BBTM 5B	DSH-V 5	SMA 5 LA	SMA 8 LA	SDA 4-12	SDA 4-16	SDA 4-20	SDA 8-12	SDA 8-16
Schichtdicke	<3 ≥3	<3,5 ≥3,5	<2 ≥2	<2 ≥2	<2 ≥2	<2,5 ≥2,5	<3 ≥3	<3 ≥3	<3 ≥3	<3 ≥3	<3,5 ≥3,5	<3,5 ≥3,5
Verdichtungsgrad [%]	<99 ≥99	<99 ≥99	-	-	-	<99 ≥99	<99 ≥99	<99 ≥99	<99 ≥99	<99 ≥99	<99 ≥99	<99 ≥99
Hohlraumgehalt Schicht [Vol%]	<9 ≥9	<9 ≥9	<14 ≥14	<14 ≥14	-	<11,5 ≥11,5	<11,5 ≥11,5	<8 ≥8	<15 ≥15	<19 ≥19	<9 ≥9	<13 ≥13
Bindemittelgehalt [M%]	<7 ≥7	<7 ≥7	<7 ≥7	<7 ≥7	<7 ≥7	<8 ≥8	<8 ≥8	<7 ≥7	<7 ≥7	<7 ≥7	<7 ≥7	<7 ≥7
Hohlraumgehalt Marshall-Prüfkörper [Vol%]	<9 ≥9	<9 ≥9	<13 ≥13	<13 ≥13	<5 ≥5	<10 ≥10	<10 ≥10	-	-	-	-	-
Haftzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	>1,0	-	-	-	-	-	-	-

nt für Strassen ASTRA



Tabelle 17: Clusterung Materialeigenschaften von semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in DACH

rium

1

ADURA







Land	Gruppe SMA 5	Gruppe SMA 8	Gruppe SMA 11	Gruppe BBTM	Gruppe DSH
D	SMA 5 LA	SMA 8 LA			DSH-V 5
A		SMA 8 S3	SMA 11 S3	BBTM 5A BBTM 5B	
СН	SDA 4-12 SDA 4-16 SDA 4-20	SDA 8-12 SDA 8-16			

Tabelle 18: Vergleichsmatrix von semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in DACH

Auf der Grundlage der zuvor beschriebenen Eigenschaften lässt sich die nachfolgende Vergleichsmatrix erstellen (siehe Tabelle 18), welche als Grundlage für eine Gegenüberstellung von ermittelten Kennzahlen herangezogen werden kann. Dabei wurde wiederum eine Unterscheidung zwischen den einzelnen Ländern vorgenommen, sodass auch die jeweilige Zuordnung zu den nationalen Anforderungen in den entsprechenden Richtlinien einfach und effizient möglich ist.

#### 2.7.2 Clusterung Lage im Querschnitt und Schwerverkehrsbelastung

Im Zusammenhang mit der statistischen Analyse der zur Verfügung gestellten Daten erscheint es sinnvoll und zweckmäßig, auch die Beanspruchung der Deckschichten durch den Schwerverkehr entsprechend zu berücksichtigen. Da die Verkehrsdaten in der Regel nicht fahrstreifenbezogen vorhanden sind, muss die Einteilung unter Heranziehung der Querschnittsinformation erfolgen. In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass die größte Schwerverkehrsbeanspruchung in der Regel am äußerst rechten Fahrstreifen vorhanden ist. In der nachfolgenden Tabelle 19 ist ein entsprechender Vorschlag beschrieben.

Fahrstreifen	JDTLV bzw. DTV $_{ m SV}$ [LKW/24h]	Clusterbezeichnung	
HFS	[0 - 1.000)	HFS₋N	
(hauptbelasteter	[1.000 - 5.000)	HFS_M	
Fahrstreifen,	[5.000 - 10.000)	HFS_H	
	> 10.000	HFS₋SH	
NFS (Nebenfahrstreifen, linke Fahrstreifen	alle	alle	

Tabelle 19: Clusterung Lage im Querschnitt und Schwerverkehrsbelastung






## 2.8 Auswahl von semi-dichten Deckschichten

Unter Bezugnahme auf die Fragestellungen des gegenständlichen Forschungsprojektes sowie die Verfügbarkeit an Daten und natürlich auf der Grundlage der Erfahrungen des praktischen Einsatzes von semi-dichten Deckschichten in den 3 DACH-Ländern werden folgende Deckschichten ausgewählt.

## Deutschland

Bei Splittmastixasphalt handelt es sich um das am häufigsten verwendete Asphaltmischgut für Deckschichten im deutschen Fernstraßennetz. Die relativ einfache und kostengünstige Bauweise zeichnet sich durch seine hohe Verformungsbeständigkeit aus. Bereits standardmäßigen Splittmastixasphalten aus SMA 8 und SMA 11 sind lärmmindernde Eigenschaften [D<sub>Stro</sub>-Wert von -2 dB(A)] zugeschrieben. Der SMA LA als Alternative zum offenporigen Asphalt und als weiterentwickelte Form des klassischen Splittmastixasphalt unterscheidet sich u. A. durch eine veränderte Sieblinie. Im Wesentlichen ist darunter die Verringerung an feinkörnigen Gesteinskörnern zu verstehen. Die neue günstige Makrotextur mit einem höheren Hohlraumgehalt von 9,0 bis 14,0 Vol.-% in Verbindung mit einem polymermodifizierten Bindemittel ist charakteristisch für diesen Straßenbelag.

Wie die Vergleichsmatrix von semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in DACH zeigt (Tabelle 18), ist der SMA LA dem Cluster "SMA 5" zugeordnet. Ebenfalls diesem Cluster zugehörig ist der SDA 4, welcher auf Basis der Erfahrungen in der Schweiz zur für die weiteren Untersuchungen ausgewählt werden (siehe Teil Schweiz). Um die Anzahl der Varianten zu begrenzen, aber trotzdem möglichst viele Cluster abzudecken, wird daher auf die Auswahl eines SMA LA verzichtet. Die Bauweise DSH-V 5 spielt bei Betrachtung des Gesamtnetzes nur eine untergeordnete Rolle und wird daher ebenfalls nicht für weitere Untersuchungen ausgewählt.

#### Schweiz

Die meiste Erfahrung bezüglich der Anwendung von semi-dichten Asphaltdeckschichten besteht in der Schweiz der semidichte Asphalt mit einem Größtkorn von 4 mm (SDA 4) oder 8 mm (SDA 8). Um beide Gruppen "SMA 4" und "SMA 8" der Vergleichsmatrix von semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in DACH (siehe Tabelle 18) zu berücksichtigen, werden für die weitergehenden Untersuchungen SDA 4 und SDA 8 ausgewählt.







## Österreich

Nach Durchsicht der Pavement Management System Datenbank der ASFINAG, der Rücksprache mit den Experten der ASFINAG sowie mit Experten aus akkreditierten Laboren, die auch eine hohe Anzahl von Abnahmeprüfungen vornehmen, ist die maßgebende semi-dichte Deckschichtart in Österreich der SMA 11 S3 mit einem Größtkorn von 11 mm. Obwohl auch der SMA 8 S3 in der RVS verankert ist, gelangt dieser im hochrangigen Straßennetz praktisch nicht zur Anwendung, sodass derzeit eine einzige semi-dichte Deckschichtart in Österreich flächendeckend zur Anwendung gelangt. Ebenfalls wird im weiteren die Deckschicht SMA S1, die zu den dichten Asphaltdeckschichten zählt, berücksichtigt.







# 3 ALTERUNGSVERHALTEN DICHTER UND SEMIDICHTER ASPHALTDECK-SCHICHTEN

Um einen umfangreichen und nachhaltigen Lärmschutz entlang von Straßen zu ermöglichen, ist die Langzeitwirksamkeit von lärmmindernden Fahrbahndecken von hoher Bedeutung. Dies wird unter anderem dadurch hervorgehoben, als dass in Annex II der European Environmental Noise Directive 2002/49/EC für die die Fahrbahndecke charakterisierenden Korrekturparameter darauf verwiesen wird, dass diese die Deckschicht in einem mittleren Alter und in ordnungsgemäßem Erhaltungszustand repräsentieren sollen [21].

Im Rahmen von Langzeituntersuchungen wurde gezeigt, dass die Rollgeräuschemission, bedingt durch Änderungen in der Deckschicht, innerhalb weniger Jahre stark zunehmen kann. Die Ursachen, die zu der Verschlechterung der akustischen Eigenschaften von den beschriebenen Asphalt-Fahrbahndecken führen, sind in Änderungen in der Oberflächentextur sowie bei den semi-dichten Fahrbahndecken durch schwerverkehrsverursachte Nachverdichtungen der Deckschicht und dadurch einhergehender Reduktion des Hohlraumgehaltes zu suchen. Einerseits werden die das Air-Pumping reduzierenden akustisch wirksamen Kanäle in semi-dichten Fahrbahndeckschicht verschlossen, andererseits wird die Oberflächentextur verändert, wodurch es zu vermehrten Reifenvibrationen und somit zu erhöhter Schallemission kommen kann. Ebenfalls wird der akustisch wirksame Hohlraumgehalt unter der die Texturoberfläche einhüllenden Kontaktfläche des Reifen/Fahrbahnkontaktes durch die Verdichtung weiter reduziert. Dabei ist es möglich, dass die Mikrotextur ebenfalls negativ beeinflusst wird und die Reifen/Fahrbahn-Kontaktfläche erhöhte Pegel in relevanten Textur-Wellenlängenbereichen aufweist.

Ziel des folgenden Abschnittes ist es nun, das Alterungsverhalten der dichten und semi-dichten Asphaltdeckschichten zu quantifizieren. Dazu wird auf bestehende und zusätzlich im Projektverlauf erhobenen Datensätze zugegriffen und diese mit weiteren Deckschichtinformationen, insbesondere der Verkehrsbelastung, gemeinsam analysiert.

## 3.1 Ausgangslage

Im Verlauf des Forschungsprojektes hat sich gezeigt, dass die Einsatzgebiete der dichten – und vor allem semi-dichten – Asphaltdeckschichten über die Länder des DACH-Raumes hinweg divers sind. Während in Deutschland und Österreich in erster Linie auf semi-dichte Asphalte mit verschiedenem Größtkorn im hochrangigen Straßennetz fokussiert wird, wird durch die in der Schweiz im Innerorts-







Bereich verwendeten SDA-Decken mit Größtkorn 4 und 8 deutlich abweichende Deckschichttypen zur allgemeinen Betrachtung der Deckschichtgruppe beigetragen.

Im vorliegenden Abschnitt wird nun kurz eine länderspezifische Übersicht über die Herangehensweise an lärmmindernde Deckschichten gegeben. Dabei wird kurz auf die jeweiligen gesetzlichen Grundlagen bzw. Richtlinien, die Historie der Nutzung lärmmindernder Deckschichten sowie der Berücksichtigung derer Alterungsverhalten gegeben.

## 3.1.1 Deutschland

Die Bewertung der Lärmsituationen an Straßen wird in Deutschland auf Basis der "Richtlinien für Lärmschutz an Straßen – RLS-90" geregelt. Die RLS-90, sind durch das Allgemeine Rundschreiben Straßenbau Nr. 8/1990 des Bundesministers für Verkehr im Einvernehmen mit den obersten Straßenbaubehörden der Länder eingeführt worden.

Die Richtlinien befassen sich mit Lärmschutzmaßnahmen und mit Berechnungsverfahren zur quantitativen Darstellung der Lärmbelastung. Mit den Richtlinien soll eine einheitliche Verfahrensweise erreicht werden. Sie sollen es dem Anwender ermöglichen, Aussagen zur Berücksichtigung und Abwägung der Lärmschutzbelange bei Straßenplanungen zu machen, den Nachweis der Erforderlichkeit von Lärmschutzmaßnahmen zu führen, wirtschaftliche und wirkungsvolle Lösungen für den Lärmschutz zu entwickeln und Lärmschutzmaßnahmen zu bemessen und zu optimieren. Auf Kapitel 4 der RLS-90 (Berechnung des Beurteilungspegels) wird in der Verkehrslärmschutzverordnung (16. BImSchV) Bezug genommen. Dadurch gelten die RLS-90 bei der Lärmvorsorge als Rechtsvorschrift.

Der Lärmpegel (Immissionspegel) ist grundsätzlich zu berechnen und nicht zu messen, da Messungen Momentaufnahmen darstellen und oft nicht repräsentativ für die tatsächliche durchschnittliche Lärmbelastung sind. Die Berechnungen sind in der Anwendungspraxis schneller umzusetzen und liefern eine ausreichende Genauigkeit.

Eine Eingangsgröße für die Lärmberechnung ist der  $D_{StrO}$ -Wert, der die unterschiedlichen akustischen Eigenschaften von Deckschichten berücksichtigt. Dieser  $D_{StrO}$ -Wert ist für einzelne Deckschichttypen entweder bereits in den RLS-90 genannt oder durch ein weiteres "Allgemeines Rundschreiben Straßenbau" festgelegt und herausgegeben. Hieraus ergibt sich implizit, dass neue, innovative Deckschichten bei der Berechnung der Lärmimmissionen nicht, bzw. zumindest nicht einfach in Ansatz gebracht werden können, da für diese kein  $D_{StrO}$ -Wert verfügbar ist. Dieser Schwachstelle ist bei der jüngsten Überarbeitung der RLS hin zu der neuen, noch nicht eingeführten Version RLS-19







Beachtung geschenkt worden: in Zukunft werden die Geräuschminderungswerte, die dann zur Abgrenzung nicht mehr  $D_{StrO}$ - sondern  $D_{SD}$ -Werte heißen, über ein ebenfalls festgelegtes Verfahren, nämlich der Technischen Prüfvorschrift zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten, TP KoSD-19 bestimmt. Diese können dann auch in einem noch nicht näher beschriebenen Intervall aktualisiert werden und so Veränderungen in der Bautechnik Rechnung tragen.

Nach aktuellem Stand sind folgende  $D_{StrO}$ -Werte vergeben:

- -2 dB: für SMA 8, AC 8, Gussasphalt eingebaut nach Verfahren B, etc.
- -4 dB: für OPA mit 11 mm Größtkorn
- -5 dB: für OPA mit 8 mm Größtkorn

Für weitere Fahrbahnbeläge, z.B. hohlraumreiche Splittmastixasphalte, Feinkörnige Dünnschichtbeläge etc. sind bisher keine verbindlichen  $D_{StrO}$ -Werte eingeführt.

Die  $D_{StrO}$ -Werte sind genauso wie die künftigen  $D_{SD}$ -Werte als Mindestwerte am Ende einer angenommenen und ggf. genauer beschriebenen akustischen Lebensdauer definiert. So ist z.B. im ARS 03/2009 in Kombination mit dem ARS 05/2002 festgelegt, dass für Offenporigen Asphalt ein  $D_{StrO}$ -Wert von -5 dB für "mindestens 8 Jahre" in Ansatz gebracht werden kann. Der Wert der Lärmminderung in dB wird also mit einer Liegedauer – quasi einem Ablaufdatum – versehen. Dieses Ablaufdatum ist nun von der akustischen Alterung abhängig. Wenn die akustische Alterung verringert werden kann, kann entweder bei gleicher angenommener maximaler Liegedauer ein besserer Geräuschminderungswert festgelegt werden oder es kann die angenommene Liegedauer bei gleichem Geräuschminderungswert verlängert werden. Dies zeigt, dass es sich bei dem hier beschriebenen Forschungsgegenstand (akustische Alterung von Fahrbahnbelägen) im Hinblick auf die in Deutschland festgelegte Herangehensweise um eine zentrale Steuerungsgröße handelt.

#### Verteilung von Deckschichten

Eine einheitliche, bundesweite Verteilung der Deckschichttypen und deren Alter ist im übergeordneten Verkehrsnetz nicht ohne nennenswerte Fehler bei der Kumulation der Daten einzelner Länder möglich. Dies ist der Fall, da einzelne Länderstatistiken unter anderem unterschiedliche Zeiträume und Deckschichtkategorien zur Gruppierung ansetzen. Die Daten werden in Deutschland auf Länderebene in



Abbildung 7: Deckschichtverteilung in Bayern, links: bis einschließlich 2019 auf dem Autobahnnetz, rechts: gruppiert nach Alter. Dimension Baufläche in m<sup>2</sup>.

Datenbanken gepflegt. Im Weiteren werden deshalb die Daten von Bayern als ein großes Flächenland in Deutschland exemplarisch dargestellt (Abbildung 7).

Den Abbildungen kann entnommen werden, dass SMA als dominante Bauweise im Autobahnnetz eingesetzt wird. Daneben werden in absteigenden Flächenanteilen Beton (mehrheitlich als Waschbeton), DSH-V (Dünnschichtbelag im Heißeinbau auf Versiegelung), MA (Gussasphalt) und schließlich Asphaltbeton eingesetzt. Weitere Geräuschmindernde Deckschichttypen wie PA (offenporiger Asphalt) und SMA LA (hohlraumreicher SMA, vergleichbar mit SMA S3 in Österreich) schließen sich in der Häufigkeitsverteilung an. Somit ergibt sich eine deutlich andere Zusammensetzung in Deutschland als beispielsweise in Österreich (siehe Abschnitt 3.1.3): zwar sind in beiden Ländern SMA und Betondecken dominante Bauweisen, in Deutschland sind jedoch die Anteile für Gussasphalte, Dünnschichtbeläge und offenporigen Asphalt im Verhältnis zur Gesamtfläche deutlich größer. Gerade DSH-V wird häufig aus Lärmschutzgründen eingebaut, wobei berücksichtigt werden muss, dass einzelne Bauweisen in Deutschland eine regional unterschiedliche Verwendungsdichte aufweisen.

## 3.1.2 Schweiz

Die Geschichte von lärmarmen Deckschichten geht in der Schweiz bis in die frühen 90-er Jahre zurück. Damals wurden auf dem Schweizer Straßennetz hauptsächlich poröse Asphalte als lärmarme Beläge eingebaut. Diese Deckschichten kommen ebenfalls heute noch auf Nationalstraßen zur Anwendung. Die porösen Asphalte stellen wasserdurchlässige Drainagebelage dar, die nur solange wirksam Schall absorbieren können, als ihre Poren nicht verstopft sind. [22] konnte zeigen, dass sich bei porösen Belägen bei hohen Geschwindigkeiten (> 80 km/h) ein Selbstreinigungseffekt einstellt. Aus diesem Grund kommen diese Belagstypen hauptsächlich auf Nationalstraßen zum Einsatz.







Da sich die Lärmproblematik ebenfalls zu großen Teilen im Innerortsbereich abspielt und oft nicht mit lärmmindernden Baumaßnahmen eingedämmt werden kann, muss die Lärmproblematik innerorts anderweitig mithilfe lärmarmer Beläge angegangen werden. So lancierte das BAFU zusammen mit dem Bundesamt für Strassen (ASTRA) im Jahr 2003 ein Forschungspaket, um Rezepturen für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich zu entwickeln [23]. Im Rahmen dieses Projektes konnte gezeigt werden, dass semidichte Asphalte mit kleinen Korngrößen und mittlerem Hohlraumgehalt die vielversprechendsten Eigenschaften aufweisen [24]. Die positiven Erkenntnisse dieses Projekts bewogen die Bundesämter ASTRA und BAFU dazu die Entwicklungen der semi-dichten Asphaltschichten voranzutreiben und mit 15 Testeinbauten ausgiebig zu testen. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Schweizer Norm VSS SN 640 436 [15] verfasst, welche die Anforderungen, Konzeption und Ausführung von semidichten Asphaltschichten festlegt. Die Ergebnisse aus dem Projekt sind im Schlussbericht [25] zusammengefasst, und es zeigte sich, dass die akustische Belagsgüte innerhalb derselben Größtkorn- und Hohlraumgehaltsklasse sehr stark variieren kann. Die Ursache für diese akustische Streuung der einzelnen SDA-Rezepturen sind in den bautechnischen Unterschieden zu suchen. Diese bautechnischen Unterschiede äußern sich in abweichenden mechanischen Eigenschaften und Differenzen bezüglich der von der Oberfläche zugänglichen Hohlräumen. Aus diesem Grund wurden mittels der Erfahrungen aus ca. 150 lärmarmen, semidichten Deckschichten, welche nach den Erkenntnissen der Testeinbauten eingebaut wurden in der Studie von [26], [27] die wichtigsten Material-, Herstellungs- und Einbauparameter identifiziert und verfeinert. Diese neuen Erkenntnisse werden bei der gegenwärtigen Überarbeitung der VSS-Norm SN640 436:2015 [15] aufgenommen.

Dass sämtliche Straßenbeläge mit der Zeit ein wenig lauter werden ist bereits in diversen Studien mit semidichten Asphaltbelägen nachgewiesen worden [25, 26, 27]. Eine im Jahr 2015 durchgeführten Studie zu den Haupteinflussfaktoren, welche eine akustische Alterung begünstigen, ergab, dass klimatische Bedingungen, sowie hohe Verkehrslasten entscheidend sind für die Alterung [28]. Bei den klimatischen Bedingungen waren namentlich die Anzahl durchgemachten Frostzyklen ein entscheidender Faktor.

## 3.1.3 Österreich

Im Umgebungslärmschutz wird die Schallausbreitungsberechnung in Österreich nach RVS 04.02.11 [29] durchgeführt. Diese unterscheidet in Bezug auf Asphalt-Fahrbahndeckschichttypen die Gruppen "Asphaltbeton", "Splittmastixasphalt" sowie "lärmmindernder Splittmastixasphalt" und gruppiert damit







die relevanten für die Schallausbreitungsberechnung genutzten Asphalt-Deckschichttypen. Dabei bezieht sich der lärmmindernde Splittmastixasphalt auf die Bauweise "SMA S3" mit einem Hohlraumgehalt am Marshallprüfkörper zwischen 9 und 11%. Die für die Ausbreitungsrechnung benötigten Basis- und Kennwerte der RVS beruhen dabei auf Vorbeifahrtsmessungen nach ISO 11819-1 [30], wobei in Abweichung zur Messmethode der Schallereignispegel bestimmt und daraus auf einen äquivalenten Dauerschallpegel pro Fahrzeug und Stunde geschlossen wird. Zu beachten ist hierbei, dass die Splittmastix-Bauweise sowohl mit einem Größtkorn von 8 wie auch 11 mm hergestellt werden kann.

#### Deckschichttypenverteilung

Um einen Überblick über die Relevanz der Deckschichten zu bekommen, wurde eine Analyse eines Datenbankauszuges der aktuellen in Österreich verbauten Streckenkilometer im Autobahn- und Schnellstraßennetz durchgeführt. In Abbildung 8 ist dazu die deckschichtspezifische Altersverteilung des A+S-Netzes dargestellt. Man erkennt eine klare Dominanz der Deckschichttypen "Asphaltbeton", "Beton" (wobei diese Deckschichtart sich in erster Linie auf die Gruppe der Waschbeton-Oberflächen bezieht), sowie die hier relevanten Deckschichttypen "SMA S1" und "SMA S3". Die farblich gekennzeichnete Altersverteilung zeigt die neu hinzugekommenen Bauweise "SMA S3", deren älteste Streckenabschnitte ein Alter von ca. 15 Jahren aufweisen. In einer weiteren Darstellungsweise ist die Altersverteilung in Abbildung 9 abgebildet. Dabei handelt es sich um die kumulierte Verteilung der Deckschichttypen im jeweiligen Betrachtungsjahr, die zum aktuellen Zeitpunkt noch in dieser Form vorliegt bzw. verbaut ist. Hier ist zu bedenken, dass nur der letzte vorhandene Datensatz des Jahres 2017 den vollständigen Stand der Deckschichtverteilung im A+S-Netz wiederspiegelt, alle anderen Zeitabschnitte bezeichnen die im Jahr 2017 noch vorhandenen Deckschichttypen mit ihrer jeweiligen Streckenlänge. Daraus ist die Verteilung der Deckschichttypen im Jahr 2017, die mindestens das jeweilige Einbaujahr vorweisen, ablesbar.

#### **Historischer Datenbestand**

Aufgrund der für die Charakterisierung der Fahrbahndecken in der Schallausbreitungsberechnung notwendigen gemessenen Schallereignispegel liegen bestehende Datensätze in erster Linie als Ergebnisse von Regressionsanalysen nach ISO 11819-1 vor. Dabei sind nur in wenigen Fällen Rohdaten vorhanden, die überwiegende Mehrheit der Datensätze kann nur aus Berichten in Form von Basis- und Kennwerten (Steigungen und Schnittpunkten der Regressionsanalyse) erhoben



Abbildung 8: Altersverteilung der Deckschichttypen im österreichischen A+S-Netz



Abbildung 9: kumulierte Altersverteilung der Deckschichttypen im österreichischen A+S-Netz zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt





Bundesamt für Strassen ASTRA

**FFG** Forschung wirkt.

werden.

Hauptsächlich die Schallausbreitungsberechnung beeinflussende Messungen in Bezug auf SMA-Deckschichten wurden dabei in zwei Projekten aus den Jahren 2006 [31] und 2012 [32] durchgeführt. Vor allem die im zweitgenannten Projekt erhobenen Vorbeifahrtsmessungen auf der A12 müssen separat betrachtet werden: die Projektziele beziehen sich auf das Monitoring einer Teststrecke für lärmmindernde Fahrbahnbeläge, die dort betrachteten Deckschichttypen weisen ein zu den typischerweise verbauten SMA-Decken bautechnische Abweichungen auf. So wurden offenporige Deckschichten bzw. gummimodifizierte Bitumen eingebaut, die im derzeitigen A+S-Netz keine Verbreitung finden. Eine Zusammenfassung der Datenbestände in Bezug auf lärmmindernde Deckschichten kann [33] entnommen werden.

In Bezug auf Rollgeräuschmessungen mittels Anhänger-Methode muss festgehalten werden, dass zum aktuellen Zeitpunkt in der relevanten RVS 11.06.64 [34] ein zum international üblichen CPX-Verfahren (ISO 11819-2 [35]) abweichendes System Verwendung findet. Die RVS nutzt dabei beispielsweise einen anderen Messreifen (PIARC-Reifen mit vier Längsrillen), wobei in der ISO 11819-2 seit einigen Jahren der ASTM SRTT [36] genutzt wird. Das RVS-System wurde auch in den letzten Jahren in erster Linie zur Konformitätsbewertung von Neubaustrecken genutzt, wobei diese nur in geringem Ausmaß durchgeführt wurden. Ebenfalls existiert kein ausreichend abgesicherter Vergleich der Messmethoden nach RVS 11.06.64 und ISO 11819-2.

Messungen nach ISO 11819-2 wurden in Österreich in erster Linie projektspezifisch, d.h. mit einem definierten Fokus auf die jeweiligen Projektziele, durchgeführt. Datensätze, die mit Hauptaugenmerk auf das Alterungsverhalten von Deckschichten durchgeführt wurden, existieren dabei lediglich für die Versuchsstrecke auf der A12. Dabei ist zu beachten, dass die zu diesem Zeitpunkt in der ISO 11819-2 vorgeschriebenen Messreifen sich vom aktuell definierten ASTM SRTT unterscheiden. Auch haben sich die notwendigen Korrektur-Prozeduren vor allem in Bezug auf die mittlerweile berücksichtigte Reifenhärtekorrektur geändert. Damit ist eine Nutzung des Datensatzes nicht in ausreichend abgesichertem Ausmaß möglich. Ein umfangreicher Datenbestand, der für eine Alterungsmodellierung herangezogen werden kann, existiert damit in Österreich zum Zeitpunkt des Projektbeginns nicht.

## 3.2 Länderspezifische Herangehensweise

Zur Abbildung des Alterungsverhaltens von Deckschichttypen können grundsätzlich zwei Herangehensweisen unterschieden werden: einerseits kann eine Teststrecke über mehrere Jahre hinweg







regelmäßig messtechnisch begleitet werden. Dies führt zu genauen Informationen über das Alterungsvehalten vor Ort, hat aber den Nachteil, dass sich die gewonnenen Informationen lediglich genau auf diese Messstelle beziehen und eine Verallgemeinerung auf alle weiteren Stellen dieses Deckschichttyps eine Grundannahme der Versuchskonzeption darstellt. Ebenfalls fordert diese Herangehensweise eine Projektlaufzeit, die zumindest die Dauer der relevanten Alterung, wenn nicht sogar die Gesamtliegedauer des Teststreckenabschnittes umfasst. Die zweite Herangehensweise um das Alterungsverhalten von Fahrbahndeckschichten abzubilden ist die Vermessung verschiedener Messstrecken unterschiedlichen Alters innerhalb kurzer Zeit. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Deckschichttypen baulich übereinstimmen, das selbe Alterungsverhalten zeigen und mit geringer Varianz den selben Ausgangswert aufweisen. Abweichungen in diesen Annahmen führen zu größeren Streuungen im abgebildeten Alterungsverhalten. Andererseits wird auf diese Weise das reale Altersverhalten (im Gegensatz bzw. Vergleich zum Alterungsverhalten) des Deckschichtkollektivs dieser Bauweise abgebildet.

Basis für die Untersuchung des akustischen Alterungsverlaufs von Fahrbahndeckschichten bildet eine statistisch ausreichende Datengrundlage. Dies bezieht sich dabei neben der Gesamtmenge auch auf die Altersverteilung der einzelnen Datenpunkte der untersuchten Deckschicht. Hier ist es wichtig, die typischen Liegedauern unter Berücksichtigung der Verkehrsbelastung, wie in Abschnitt 2 gegeben, zu berücksichtigen. Die Stichprobe, die durch die Datenerhebung in den einzelnen Ländern erhoben wurde, liefert dabei einen Querschnitt über die aktuell vorliegende Altersverteilung der Deckschichten.

Allen in den Analysen gemein ist die Nutzung der CPX-Methode [35] zur Erhebung der Lärmemissionsdaten. Dadurch wird aufgrund der Messgenauigkeit, die z.B. in einem Ringversuch im Jahr 2017 untersucht wurde [37, 38] einerseits der Vergleich zwischen den Ländern bzw. messenden Instituten verbessert, andererseits erlaubt es die Methode, eine Vielzahl an Messdaten in verhältnismäßig kurzer Zeit zu erheben. Ebenfalls können damit Untersuchungen zum Alterungsverlauf der Variation der Lärmemissionen einzelner Deckschichttypen innerhalb des betrachteten Bauloses getätigt werden.

## 3.2.1 Datenerhebung in der Schweiz

In der Schweiz werden seit dem Jahr 2010 lärmarme Beläge in Form von semidichten Asphaltschichten eingebaut. Dabei liegt der Fokus des Einbaus von lärmarmen Belägen hauptsächlich auf dem Innerortsbereich. Offizielle Statistiken zu der Gesamtanzahl respektive -Länge der eingebauten



Abbildung 10: Altersverteilung der eingebauten Deckschichten im Kanton AG im Innerortsbereich.

Strecken gibt es nicht, da die Eigentumsverhältnisse im Innerortsbereich entweder kantonal oder sogar kommunal geregelt sind.

Einen Eindruck über die Altersverteilung von Deckschichten im Schweizer Straßennetz kann hingegen anhand von Daten aus dem Kanton abgeschätzt werden. Dazu ist in Abbildung 10 die Altersverteilung aller im Jahr 2019 liegenden Deckschichten aufgeführt. Die Abbildung illustriert, dass die lärmarmen, semidichten Asphaltschichten SDA 4 und SDA 8 erst in der jüngeren Vergangenheit eingebaut wurden. Der häufigste eingesetzt Deckbelag sind neben SMA 11 und AC 11 Teerasphaltschichten (TA).

Grolimund + Partner führt aber seit 2010 CPX-Messungen durch und zählte seither über 1000 Messungen mit lärmarmen Deckschichten. Eine Verteilung der Lage der lärmminderenden semidichten Deckschichten ist in Abbildung 11 dargestellt.

Die für den Datensatz der Schweiz eingesetzte CPX-Methode richtet sich nach EN ISO 11819-2:2017 [35]. Bei dieser Methode werden die akustischen Eigenschaften von Strassenbelägen durch eine kontinuierliche und direkte Messung der Reifen-Fahrbahngeräusche mit einem Messanhänger ermittelt. Dabei werden die Messungen mit dem von der ISO TS 11819-3:2017 [39] empfohlenen Reifensätze Uniroyal Tigerpaw (SRTT) 225/60-R16 (Testreifen P1 für Personenwagen/Cars [36]) verwendet.

In Abbildung 12 sind die in die Analyse eingeflossen Streckenlängen abgebildet. Dabei zeigt sich, dass der Großteil der Daten aus dem G+P – Messnetz sehr jung ist und nur wenige Schichten > 4 Jahre



Abbildung 11: Geographische Lage der von G+P vermessenen Strecken mit Tempo = 50 km/h

im Datensatz vorhanden sind. Gleichwohl zeichnen sich die im Datensatz vorhandenen semidichten Asphaltdeckschichten durch einen mehrjährigen Betrachtungszeitraum aus. Dadurch konnten für einzelne Baulose an einzelnen Standorten Datenreihen über mehrere Jahre gesammelt werden. Jedem Standort wurden ebenfalls Verkehrszahlen zugewiesen. An einigen Standorten – vor allem im Kanton AG – konnten Verkehrsdaten von nahe gelegenen Zählstellen hinzugezogen werden. Bei Standorten ohne nahe gelegene Zählstellen wurden die Verkehrszahlen anhand Modellrechnungen (sonBASE) bestimmt.



Abbildung 12: In die Analyse eingeflossene Streckenlänge aus dem G+P – Messnetz, abhängig vom Deckschichtalter







#### Umrechnung von 50 km/h auf 80 km/h

In der Schweiz sind vor allem Belagsmessungen aus dem Innerortsbereich in die Analyse eingeflossen. Dies stellt im Vergleich zu den Datensätzen aus Österreich und Deutschland eine unterschiedliche Herangehensweise dar, bei welchen Daten auf dem Primärstraßennetz mit der Geschwindigkeit von 80 km/h zur Verfügung stehen. Da der Datensatz aus der Schweiz aus Strecken im Innerortsbereich besteht, muss der Datensatz zu Vergleichszwecken mit den Datensätzen aus Deutschland und Österreich auf 80 km/h hochskaliert werden. Zur Skalierung wurde die Geschwindigkeitskorrektur nach ISO 11819-3 angewandt:

$$L_{CPX,P1,80km/h} = B \cdot \log_{10} \left(\frac{80}{50}\right) + L_{CPX,P1,50km/h}$$
(1)

Wobei:

- $L_{CPX,P1,80km/h}$ : Skalierter CPX-Pegel bei 80 km/h
- L<sub>CPX,P1,50km/h</sub>: CPX-Pegel bei 50 km/h
- B = 35: Steigungsfaktor der CPX-Pegel-Umrechnung

Für die Hochrechnung der CPX-Pegel von 50 km/h auf die Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h wurde der Faktor B = 35 angewandt. Dieser angewendete Faktor von unterscheidet sich vom vorgeschlagenen Faktor der ISO 11819-3 für einen verschmutzen offenporigen, halboffenen oder dichten Asphaltbelag (B = 30) und wurde angewendet um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den CPX-Messungen der verschiedenen Ländern zu ermöglichen.

Die hochgerechneten CPX-Pegel sind dabei maßgeblich abhängig vom verwendeten Korrekturfaktor *B*. Die Norm-Korrektur stellt eine Gesamtpegelkorrektur dar, welche allfällige spektrale Verschiebungen nicht abbildet.

## 3.2.2 Datenerhebung in Österreich

Aus den in der Einleitung genannten Gründen wurde in Österreich der Ansatz der Messung an verschiedenen Strecken innerhalb des Projektzeitraumes gewählt. Durch die im Autobahnen- und Schnellstraßennetz bestehende Verfügbarkeit der verorteten Deckschichttypen und deren Alter im Pavement Management System kann mit hoher Genauigkeit der Bezug zwischen Messstelle und Belagsinformation hergestellt werden. Die Verkehrsmengen sind in ausreichendem Genauigkeitsgrad in einer Auflösung von ca. einer Zählstelle pro 15 km getrennt für Fahrzeuge unter und über



Abbildung 13: Übersicht über die in Österreich berücksichtigten CPX-Messstrecken (alle Deckschichttypen); Kartenmaterial ©openstreetmap.org

3,5 Tonnen höchstzulässigem Gesamtgewicht öffentlich verfügbar, die Zuordnung zur spezifischen Messstelle erfolgt über die Suche nach der nähestliegenden Zählstelle. Mögliche Abweichungen im baulichen Ausgangszustand der Deckschichttypen sollen durch die ebenfalls durchgeführten und später beschriebenen Oberflächen-Texturmessungen berücksichtigt werden.

Daher wurden im Projektverlauf umfangreiche CPX-Messungen im österreichischen A+S-Netz durchgeführt. Aufgrund der verorteten Deckschichttypen im Netz sowie der dazu vorhandenen Informationen zum Einbaujahr sowie zur Verkehrsmenge war es möglich, die CPX-Messungen sowie die Deckschicht- und Verkehrsmengeninformationen in einer Datenbank gemeinsam abzubilden. Die CPX-Messungen wurden mit einer Messgeschwindigkeit von 80 km/h am ersten Fahrstreifen in der Art einer teilweisen Netzbefahrung durchgeführt. Die berücksichtigten Strecken sind in Abbildung 13 dargestellt, insgesamt umfasst der Datensatz damit ca. 350 km vom Typ SMA S1 und 270 km vom Typ SMA S3.

## 3.2.3 Datenerhebung in Deutschland

Analog zur Vorgehensweise in Österreich wurden auch in Deutschland CPX-Messungen auf dem Autobahnnetz durchgeführt um das Alterungsverhalten verschiedener Deckschichten nachbilden zu können.

Parallel zu den CPX-Messungen, die durchwegs auf den rechten Fahrsteifen mit einer Nominalge-



Abbildung 14: Untersuchte Strecke in Deutschland

schwindigkeit von 80 km/h und dem Normmessreifen P1 durchgeführt wurden, wurden Lasertexturmessungen mit einem schnell abtastenden Punktlaser im CPX-Messsystem durchgeführt. Durch die parallele Aufzeichnung der CPX- und Texturmessdaten konnte sichergestellt werden, dass der örtliche Zusammenhang (sowohl in Fahrtrichtung wie auch in im Bezug auf die untersuchte Rollspur) mit hoher Genauigkeit gegeben ist. Der Texturlaser wurde mit einer Abtastfrequenz von 30 kHz betrieben. Unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit ergibt sich somit eine Ortsauflösung der Textur von ca. 0,7 mm sodass Texturparameter (MPD, Gestaltfaktoren, etc.) ausgewertet werden können. Die untersuchte Strecke ist in Abbildung 14 dargestellt. Es wurde bei der Wahl der Messstrecke darauf geachtet, dass unterschiedlich stark befahrene Autobahnen im Streckenkollektiv enthalten sind, sodass sich im Bezug auf die Befahrungsstärke eine repräsentative Stichprobe für das Deutsche Autobahnnetz ergibt.

Der Deckschichtanteil der untersuchten Strecken entspricht in erster Näherung der der Gesamtverteilung (Abbildung 15 vgl. auch Kapitel 3.1): auch in dem untersuchten Datensatz ist der Anteil an SMA am größten, das Verhältnis von Beton zu DSH-V Streckenanteilen ist etwas zu Ungunsten von DSH-V verschoben. Insgesamt wurden ca. 408 km untersucht. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass in der Gruppe SMA sowohl SMA 11 S, SMA 8 S, SMA LA und SMA Deckschichten mit unbekanntem Größtkorn eingebaut sind (hierbei handelt es sich um Abschnitte älteren Baujahres). In Abbildung 16 werden die Walzasphalte noch einmal feiner gegliedert dargestellt.



Abbildung 15: Deckschichtverteilung im untersuchten Datensatz.



Abbildung 16: Detail der Deckschichtverteilung im untersuchten Datensatz.







## 3.3 Modellierung des Alterungsverhaltens

Für die Modellierung des Alterungsverhaltens stehen über alle Länder hinweg gesehen nur wenige (einheitliche) Parameter zur Verfügung. Von allen Deckschichten der drei Länder gibt es Zahlen zu Verkehrslasten (Anzahl Überrollungen von Schwerverkehr sowie Personenverkehrswagen) sowie dem Alter von Deckschichten. Aus diesem Parameterbereich kann das Alterungsverhalten abgebildet werden.

Die Modellierung des Alterungsverhaltens folgt einem logarithmischen Ansatz. Da aber insbesondere im Schweizer Datensatz viele Strecken mit Belagsalter = 0 Jahren aufgenommen wurden und der Logarithmus von einem Alter = 0 undefiniert ist, wurde folgende Funktion zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Belagsalter und CPX-Pegel verwendet:

$$L_{\text{CPX,P1}} = a \cdot \log_{10} \left( \text{Alter} + c \right) + b \tag{2}$$

#### 3.3.1 Alterungsverhalten von Deckschichten im DACH – Raum (Clusterung)

Mit dem zusammengeführten Datensatz der drei Länder lassen sich vergleichende Analysen darstellen. Dabei wurden alle Daten pro Baulosabschnitt aggregiert. Für die folgenden Analysen wurde zur Darstellung des Schweizer Datensatzes, welche die Messungen bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h enthält auf 80 km/h hochskaliert (vgl.dazu Kapitel 3.2.1). Diese Hochskalierung mittels einer einfachen Gesamtpegelkorrektur in Anlehnung an die ISO 11819-3 stellt eine Vereinfachung dar und ist mit grösseren Unsicherheiten verbunden. So sind die resultierenden Pegel direkt abhängig vom gewählten *B*-Faktor.

In Abbildung 17 sind die in die Analyse eingeflossenen Streckenlängen abgebildet. Dabei wurden alle vorhandenen Daten verwendet und pro Baulosabschnitt aggregiert. Die Darstellung zeigt den weiten Spannungsbereich der erhobenen Daten und auch dass der Schweizer Datensatz hauptsächlich junge Deckschichten mit kaum mehr als 2000 Tage (ca. 5 Jahre) Lebensdauer enthält. Dem Gegenüber haben die Deckschichten aus Österreich und Deutschland deutlich weiterreichende Datenreihen. In der Abbildung ist ebenfalls die lokale Regression dargestellt, wobei aufgrund der grossen Datengrundlage einen logarithmischen Verlauf modelliert werden kann.

In der folgenden Abbildung 18 wird derselbe Gesamtdatensatz weiter unterteilt in die unterschiedlichen Deckschichten und Herkunftsländer und gegen die logarithmierte Anzahl an Gesamtüberrollungen dargestellt. Diese Abbildung verdeutlicht wiederum, dass die Beläge aus der



Abbildung 17: Überlagerung der nach Baulose gegliederten gemessenen CPX-Pegel über die 3 Länder Schweiz (CH), Österreich (AT) und Deutschland (DE). Der Datensatz aus der Schweiz wurde von 50 km/h auf 80 km/h hochskaliert. Zu den einzelnen Datensätzen wurde farblich ein Loess-fit der Daten eingezeichnet.



Abbildung 18: Vergleich der Deckschichten im DACH-Raum in Bezug auf Gesamtanzahl an Überrollungen. Die Daten aus der Schweiz wurden mit 50 km/h im Innerortsbereich erhoben. Zur Vergleichbarkeit mit den Daten aus dem DE und AT – Raum wurden sie auf 80 km/h hochskaliert.

Schweiz deutlich weniger Befahrungen von Schwerverkehr und Personenwagen erfahren haben.

Das Zusammenführen der Datensätze zeigt, dass die verschiedenen länderspezifischen Datensätzen miteinander verglichen werden können. Auffallend ist, dass die Datenätze aus der Schweiz im Vergleich zu den Datensätzen aus dem deutschen und österreichischen Raum grundsätzlich wesentlich niedrigere Verkehrslasten aufweisen. Der Grund für die tieferen Verkehrslasten liegt darin, dass sich die Daten aus der Schweiz auf den Innerortsbereich beziehen, während die Daten aus dem ATund DE-Raum auf das Primärstraßennetz beziehen. Weiter sind die Deckschichten der Schweiz im Vergleich zu den anderen Deckschichten deutlich jünger.

Um eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Datensätzen der Länder zu erreichen werden die im Gesamtdatensatz vorhandenen Deckschichten nach deren Korngröße geclustert und in Abbildung 19 respektive Abbildung 20 als bivariate Darstellung zwischen gemessen CPX(PKW)-Pegel und Belagsalter respektive logarithmierter Gesamtzahl an Überrollungen von Schwerverkehr dargestellt. Abbildung 19 zeigt, dass die hochskalierten Werte auf 80 km/h für 8er-Deckschichten aus der Schweiz zwar anfänglich mit tieferen gemessenen CPX-Pegel starten, sich aber mit der Zeit an die Loess-Kurve bestehend aus den Datensätzen von Deutschland annähern. Auffallend ist, dass die Streuung innerhalb des Datensatzes der SDA8-12 relativ groß ist.

Dieselbe Clusterung konnte ebenfalls für die 11er-Größtkornschichten aus dem Gesamtdatensatz angewendet werden. Dazu ist in Abbildung 20 das Belagsalter respektive die logarithmierte Gesamtzahl an Überrollungen durch Schwerverkehr gegenüber dem gemessenen CPX-Pegel pro Baulos dargestellt. Die Abbildung illustriert, dass die gemessenen CPX-Pegel in Deutschland und Österreich mit



Abbildung 19: Clusterung von 8er–Deckschichten aus dem DACH-Raum bei für CPX-PKW-Pegel bei 80 km/h gegen das Belagsalter in Tagen (links) und die logarithmierte Anzahl an Gesamtüberrollungen von Schwerverkehr.



Abbildung 20: Clusterung von 11er–Deckschichten aus dem DACH-Raum bei für CPX-PKW-Pegel bei 80 km/h gegen das Belagsalter in Tagen (links) und die logarithmierte Anzahl an Gesamtüberrollungen von Schwerverkehr.







den 11er Schichten durchaus vergleichbar sind, jedoch ist die Aussagekraft der SMA 11S-Schichten aus Deutschland aufgrund der kleinen Datenmenge eingeschränkt.

## 3.3.2 CPX-Pegel aufgeschlüsselt nach einzelnen Deckschichten und Ländern

Um das Alterungsverhalten der einzelnen Deckschichten zu modellieren wurden verschiedene lineare Regressionsmodelle mit den verfügbaren Eingangsparametern (Anzahl Überrollungen durch Schwerund Personenverkehr, sowie Belagsalter) gebildet. Dabei wurden verschiedene Ansätze getestet (lineare Modellierung, logarithmische Modellierung).

Die Tabellen 20 bis 22 zeigen die Ergebnisse der statistischen Ein-Parametermodellierung der untersuchten Deckschichten gegliedert nach bautechnischem Cluster und Herkunft. Deckschichten, deren Datenbasis zu gering für eine gesicherte Abbildung des Alterungsverhaltens ist, wurden hier nicht aufgeführt. Die Auswertung der Tabellen zeigt, dass die Modellierung mit Verkehrszahlen nicht bei allen Decksichten gleichermaßen gut funktioniert. So können insgesamt maximale Korrelationskoeffizienten von ca. 0,4 beobachtet werden (bei genügend großer Datenbasis). Hauptursache ist dabei die große beobachtete Streuung der einzelnen Messungen. Dies äußert sich ebenfalls in den mittleren quadrierten Fehlern der Residuen, welche teilweise relativ hoch sind. Dies lässt darauf schließen, dass die alleinige Modellierung mit der Befahrungsstärke respektive des Belagsalters nicht ausreichend ist und weitere (nicht erfasste) Parameter die akustische Leistung respektive die Alterung einer Deckschicht wesentlich mitbestimmen.

Belag	Herkunft	Modell	$R^2$	RSE	а	b	С	n
SDA4-12	CH	$a \cdot \text{Alter} + b$	0.47	0.81	1.66E-03	85.6		291
SDA4-16	CH	$a \cdot \text{Alter} + b$	0.66	0.86	1.79E-03	84.8		128
SDA4-12	CH	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter}) + b$	0.33	1.01	1.16E+00	83.7		291
SDA4-16	CH	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter}) + b$	0.48	1.32	1.71E+00	81.8		128
SDA4-12	CH	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter} + c) + b$	0.47	0.81	5.32E+01	-133.6	13137	291
SDA4-16	CH	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter} + c) + b$	0.66	0.87	9.21E+01	-313.9	21315	128
SDA4-12	CH	$a \cdot \log_{10}(nLKW) + b$	0.21	1.20	6.80E-01	83.2		291
SDA4-16	CH	$a \cdot \log_{10}(nLKW) + b$	0.26	1.89	8.20E-01	82.3		128
SDA4-12	CH	$a \cdot \log_{10}(nPKW) + b$	0.34	1.00	1.04E+00	80.0		291
SDA4-16	CH	$a \cdot \log_{10}(nPKW) + b$	0.41	1.51	1.37E+00	77.5		128
SDA4-12	CH	$a \cdot \log_{10}(nPKW + nLKW) + b$	0.28	1.09	4.40E-01	81.6		291
SDA4-16	CH	$a \cdot \log_{10}(nPKW + nLKW) + b$	0.34	1.69	5.50E-01	80.1		128

Tabelle 20: Modellierung des Alterungsverhaltens über die verschiedenen Deckschichttypen – bautechnischer Cluster SMA 5

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur		Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie	•	Schweizerisc Confédératic Confederazic Confederazic <b>Bundesamt f</b> i	he Eidgenossenschaft in suisse one Svizzera un svizra <b>ür Strassen ASTRA</b>	•	<b>3</b> FF	FG Ing wirkt.
Belag	Herkunft	Modell	$R^2$	RSE	а	b	С	n
SDA8-12	СН	$a \cdot \text{Alter} + b$	0.43	0.99	1.59E-03	87.6		305
SMA 8 S	DE	$a \cdot \text{Alter} + b$	0.10	0.27	5.00E-05	98.5		39
SDA8-12	CH	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter}) + b$	0.35	1.14	1.25E+00	85.4		305
SMA 8 S	DE	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter}) + b$	0.14	0.26	4.20E-01	97.3		39
SDA8-12	СН	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter} + c) + b$	0.45	0.96	7.40E+00	64.6	1217	305
SMA 8 S	DE	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter} + c) + b$	0.14	0.27	4.10E-01	97.4	-27	39
SDA8-12	CH	$a \cdot \log_{10}(nLKW) + b$	0.21	1.38	7.00E-01	85.3		305
SMA 8 S	DE	$a \cdot \log_{10}(nLKW) + b$	0.33	0.20	6.10E-01	94.3		39
SDA8-12	CH	$a \cdot \log_{10}(nPKW) + b$	0.36	1.11	1.08E+00	81.9		305
SMA 8 S	DE	$a \cdot \log_{10}(nPKW) + b$	0.27	0.22	5.60E-01	94.3		39
SDA8-12	CH	$a \cdot \log_{10}(nPKW + nLKW) + b$	0.30	1.23	4.70E-01	83.5		305
SMA 8 S	DE	$a \cdot \log_{10}(nPKW + nLKW) + b$	0.31	0.21	3.00E-01	94.2		39

Tabelle 21: Modellierung des Alterungsverhaltens über die verschiedenen Deckschichttypen – bautechnischer Cluster SMA 8

Belag	Herkunft	Modell	$R^2$	RSE	а	b	С	n
SMA 11 S	DE	$a \cdot \text{Alter} + b$	0.17	0.54	8.00E-05	98.7		16
SMA S1	AT	$a \cdot \text{Alter} + b$	0.03	0.89	8.00E-05	100.2		254
SMA S3	AT	$a \cdot \text{Alter} + b$	0.14	0.62	1.80E-04	99.2		207
SMA 11 S	DE	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter}) + b$	0.19	0.53	7.90E-01	96.4		16
SMA S1	AT	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter}) + b$	0.03	0.89	7.80E-01	97.7		254
SMA S3	AT	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter}) + b$	0.22	0.56	1.09E+00	96.0		207
SMA 11 S	DE	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter} + c) + b$	0.19	0.56	4.90E-01	97.6	-704	16
SMA S1	AT	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter} + c) + b$	0.03	0.89	8.80E-01	97.3	462	254
SMA S3	AT	$a \cdot \log_{10}(\text{Alter} + c) + b$	0.22	0.56	9.00E-01	96.8	-210	207
SMA 11 S	DE	$a \cdot \log_{10}(nLKW) + b$	0.32	0.44	8.60E-01	92.9		16
SMA S1	AT	$a \cdot \log_{10}(nLKW) + b$	0.06	0.86	8.10E-01	94.7		254
SMA S3	AT	$a \cdot \log_{10}(nLKW) + b$	0.24	0.54	8.30E-01	93.9		207
SMA 11 S	DE	$a \cdot \log_{10}(nPKW) + b$	0.28	0.47	9.10E-01	91.8		16
SMA S1	AT	$a \cdot \log_{10}(nPKW) + b$	0.14	0.78	1.21E+00	90.8		254
SMA S3	AT	$a \cdot \log_{10}(nPKW) + b$	0.31	0.49	1.13E+00	91.0		207
SMA 11 S	DE	$a \cdot \log_{10}(nPKW + nLKW) + b$	0.31	0.45	4.50E-01	92.3		16
SMA S1	AT	$a \cdot \log_{10}(nPKW + nLKW) + b$	0.10	0.82	5.60E-01	92.1		254
SMA S3	AT	$a \cdot \log_{10}(nPKW + nLKW) + b$	0.29	0.51	5.00E-01	92.4		207

Tabelle 22: Modellierung des Alterungsverhaltens über die verschiedenen Deckschichttypen – bautechnischer Cluster SMA 11







#### Schweiz

Abbildung 21 illustriert die Verteilung der Pegel der Deckschichten aus dem Schweizer Datensatz. Die Datengrundlage kann in Abbildung 12 nachvollzogen werden. Der Datensatz enthält deutlich mehr Werte für jüngere, neu eingebaute Deckschichten. So dünnt sich die Datengrundlage ab einem Belagsalter von 5 Jahren aus, was sich in den kleiner werdenden Boxen bemerkbar macht. In dieser Darstellung lässt sich über alle Deckschichten nach ca. 5 Jahren eine allmähliche Stabilisierung der gemessenen Pegel erkennen. Gut zu erkennen ist ebenfalls die relativ hohe Bandbreite an Messwerten innerhalb eines Belagsalters. So sind Streuungen von bis zu 2 dB innerhalb einer Box (50%) der Werte keine Seltenheit.

Außerdem zeigen sich die unterschiedlichen Wertebereiche der Deckschichten. So erreichen die 4er Deckschichten anfänglich deutlich tiefere CPX-Pegel als die 8er-Größtkornschichten. Innerhalb der 4er-Deckschichten zeigt sich eine Aufteilung nach Hohlraumgehalt: Die Deckschichten des Typs SDA 4-16 starten um ca. 1 dB(A) tiefer als die SDA 4-12 Deckschichten.

Die folgenden Abbildungen 22, 23 und 24 zeigen das Alterungsverhalten der in der Schweiz eingebauten Deckschichten SDA4-12, SDA4-16 und SDA8-12 modelliert mit der Befahrungsstärken  $log(n_{\rm PKW})$ ,  $log(n_{\rm LKW})$  sowie dem Belagsalter in Tagen.

Die Loess-Kurven der Abbildung 22 und Abbildung 23 lassen erahnen, dass die lineare Modellierung mit Verkehrszahlen bei den Deckschichten SDA 4-12 und SDA 4-16 unbefriedigend ist. Die Modellierung mit dem Belagsalter passt wesentlich besser. Ähnliches gilt für die Deckschicht SDA 8-12.

Die Modellierung mit dem strikt logarithmischen Ansatz zeigt bei den SDA Deckschichten deutlich die Problematik des Ansatzes auf: durch die tiefen Belagsalter (kurz nach Einbau und daher nahe bei 0) liegt die modellierte Kurve deutlich unterhalb der effektiven gemessenen Werte und daher ist dieser Ansatz zu verwerfen.

Allgemein kann bei der Betrachtung der 4er Deckschichten noch kein deutliches Abflachen der gemessenen CPX-Pegel festgestellt werden und das Plateau scheint bei diesen Deckschichten noch nicht komplett erreicht. Dies hängt damit zusammen, dass die Datengrundlage bereits nach 6-7 Jahren endet und in diesem Bereich sehr dünn gesät ist, was eine zuverlässige Prognose des Endwerts schwierig gestaltet.



Abbildung 21: Pegelverteilung Deckschichten über verschiedene Belagsalter dargestellt als Boxplots. Die Dimension der Boxen enthalten 50% der Werte, während die oberen und unteren Whisker (Antennen) 1.5x dem IQR (Boxenlänge) entsprechen.



Abbildung 22: Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SDA4-12 bei 50 km/h für die logarithmierte Anzahl an Überrollungen von Personen- und Schwerverkehr sowie dem Belagsalter. In den linken beiden Abbildungen ist jeweils in dunkelblau der Loess-Fit sowie in schwarz die lineare Trendline dargestellt. Die unterschiedlichen Punktgrößen stellen die Streckenlängen dar.



Abbildung 23: Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SDA4-16 bei 50 km/h für die logarithmierte Anzahl an Überrollungen von Personen- und Schwerverkehr sowie dem Belagsalter. In den linken beiden Abbildungen ist jeweils in dunkelblau der Loess-Fit sowie in schwarz die lineare Trendline dargestellt. Die unterschiedlichen Punktgrößen stellen die Streckenlängen dar.



Abbildung 24: Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SDA8-12 bei 50 km/h für die logarithmierte Anzahl an Überrollungen von Personen- und Schwerverkehr sowie dem Belagsalter. In den linken beiden Abbildungen ist jeweils in dunkelblau der Loess-Fit sowie in schwarz die lineare Trendline dargestellt. Die unterschiedlichen Punktgrößen stellen die Streckenlängen dar.



Abbildung 25: Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SMA S1 bei 80 km/h für die logarithmierte Anzahl an Überrollungen von Personen- und Schwerverkehr sowie dem Belagsalter. In den linken beiden Abbildungen ist jeweils in dunkelblau der Loess-Fit sowie in schwarz die lineare Trendline dargestellt. Die unterschiedlichen Punktgrößen stellen die Streckenlängen dar.

## Österreich

Die folgenden Abbildungen 25 und 26 zeigen die Modellierung der Deckschichten Österreichs. Beim Datensatz aus Österreich lässt sich anhand der Kennzahlen der Modellierung, sowie per Auge erkennen, dass die Modellierung mit Verkehrszahlen besser funktioniert als beim Datensatz der Schweiz. Sowohl die Altersstuktur als auch die Befahrungsmengen des Datensatzes weisen hierbei – vorwiegend aufgrund des verschiedenen Einsatzgebiets der Messstrecken innerorts bzw. im hochrangigen Straßennetz – nur einen geringen gemeinsam beschriebenen Bereich auf. Gerade durch das Fehlen von Datensätzen im sehr geringen Altersbereich kann so eine gute Übereinstimmung mit einer logarithmierten Alterungsmodellierung hergestellt werden.

#### Deutschland

Abbildung 27 zeigt den Zusammenhang von gemessenem CPX-Pegel (P1) und der Anzahl Überrollungen von LKWs, gegliedert nach Baulosen. In den folgenden Abbildungen 28 und 29 ist die detaillierte Modellierung der verfügbaren Parameter abgebildet für die Deckschichten SMA 11S und SMA 8S abgebildet. Für die anderen Schichten wurde auf eine Darstellung verzichtet, da die Datengrundlage aus weniger als neun Datenpunkten besteht und die Modellierung damit größeren Unsicherheiten unterliegt.



Abbildung 26: Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SMA S3 bei 80 km/h für die logarithmierte Anzahl an Überrollungen von Personen- und Schwerverkehr sowie dem Belagsalter. In den linken beiden Abbildungen ist jeweils in dunkelblau der Loess-Fit sowie in schwarz die lineare Trendline dargestellt. Die unterschiedlichen Punktgrößen stellen die Streckenlängen dar.



Abbildung 27: Datengrundlage von Deutschland aufgetragen als gemessener CPX-Pegel vs. logarithmierte Anzahl an LKW-Überrollungen gruppiert nach einzelnen Baulosen und deren Deckschichten.



Abbildung 28: Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SMA-8S bei 80 km/h für die logarithmierte Anzahl an Überrollungen von Personen- und Schwerverkehr sowie dem Belagsalter. In den linken beiden Abbildungen ist jeweils in dunkelblau der Loess-Fit sowie in schwarz die lineare Trendline dargestellt. Die unterschiedlichen Punktgrößen stellen die Streckenlängen dar.



Abbildung 29: Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SMA-11S bei 80 km/h für die logarithmierte Anzahl an Überrollungen von Personen- und Schwerverkehr sowie dem Belagsalter. In den linken beiden Abbildungen ist jeweils in dunkelblau der Loess-Fit sowie in schwarz die lineare Trendline dargestellt. Die unterschiedlichen Punktgrößen stellen die Streckenlängen dar.







## 3.3.3 Variation innerhalb der Baulose

Die folgenden Abbildungen zeigen einen weiteren Aspekt des Alterungsverhaltens von Deckschichten. Zur Charakterisierung der zeitlichen Entwicklung innerhalb eines Bauloses wird die Standardabweichung aller zugehörigen gemessenen CPX-Pegel eines Bauloses berechnet und gegen die logarithmierte Anzahl an LKW-Überrollungen aufgetragen. Eine Erhöhung der Standardabweichung entspricht somit einem inhomogeneren Belag innerhalb des Bauloses. Dieses kann auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sein:

- Lokale Effekte, wie z.B lokale Verschmutzungen
- Instabile Bauweise, die nur an bestimmten Stellen nachgibt

Für die Belagstypen SDA 4-12, respektive SDA 4-16 (siehe Abbildung 30) kann mit der Anzahl an Überrollungen eine deutliche Zunahme der Standardabweichung innerhalb des Bauloses beobachtet werden. Die Zunahme der Standardabweichungen für die SDA 8-12–Deckschicht mit dem größeren Größtkorn, ist jedoch kaum auszumachen.

Bei den Schichten SMA S1 und SMA S3 (Abbildung 31) lassen sich für beide Deckschichten eine leichte Zunahme der Standardabweichungen ausmachen. Die Deckschichten SMA 8-S und SMA 11-S in Abbildung 32 zeigen bezüglich der zeitlichen Entwicklung der Standardabweichungen innerhalb des Bauloses kaum Zunahmen.



Abbildung 30: Standardabweichungen der CPX-Messwerte (in [dB(A)]) innerhalb eines Bauloses aufgetragen gegen die logarithmierte Gesamtanzahl an Schwerverkehrsüberrollungen für SDA4 und SDA8-Deckschichten.



Abbildung 31: Standardabweichungen der CPX-Messwerte (in [dB(A)]) innerhalb eines Bauloses aufgetragen gegen die logarithmierte Gesamtanzahl an Schwerverkehrsüberrollungen für SMA S1 und SMA S3-Deckschichten.



Abbildung 32: Standardabweichungen der CPX-Messwerte (in [dB(A)]) innerhalb eines Bauloses aufgetragen gegen die logarithmierte Gesamtanzahl an Schwerverkehrsüberrollungen für SMA 8-S und SMA 11-S-Deckschichten.







## 3.3.4 Zeitliche Entwicklung und Vergleich zu Referenzbelag

Um die zeitliche Entwicklung verschiedener Deckschichten abschätzen zu können wurden für jede untersuchte Deckschicht jedes Landes die mittlere zeitliche Entwicklung ins Verhältnis zu einem Referenzbelag gesetzt. Dabei wird für jeden untersuchten Belagstyp die akustische Wirkung verglichen mit dem Referenztyp SMA 11 des jeweiligen Landes. Für die Schweiz entspricht dies dem SMA 11, in Deutschland SMA 11S und in Österreich dem SMA S1. Die akustische Wirkung wird für drei verschiedenen Zustände innerhalb des Lebenszyklus des Belages (bei Neuzustand, 5 Jahren und 10 Jahren nach Einbau) verglichen. Ebenso wird basierend auf den drei ermittelten Wirkungen eine mittlere akustische Wirkung abgeschätzt. Dadurch können die Vorteile aus der Lärmminderung eines Belagstyps abgeschätzt werden.

#### Schweiz

Die zeitliche Entwicklung, welche als Grundlage für die Abschätzung dient, der drei untersuchten Beläge SDA4-12, SDA4-16 und SDA8-12 ist in Abbildung 33 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass sich die akustische Belagsgüte bei den 4er Deckschichten anfänglich um knapp ca. 0.5 dB(A) unterscheidet. Die akustische Belagsgüte des SDA8-12 liegt im Anfangszustand ca. 2 dB(A) höher geht aber im Vergleich zu den 4er Belägen um weniger zurück.

In Tabelle 23 werden die resultierten Belagsgütewerte im Vergleich zum Standardbelag der Schweiz



Abbildung 33: Mittlere Belagsalterung des CPX (PKW) – Pegels für die Deckschichten SDA 4-12, SDA 4-16 und SDA 8-12 (Werte bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h).







	Akustische in Jahre	e Wirkung zun n nach Einbau	Mittlere Wirkung	Erwartete Lebens- dauer [a]				
	0 Jahre	0-10 Jahre						
Referenzwert SMA 11 (CH)**	89,5	91	91,5	91,5	20			
Wirkung SDA 8-12	-2	-1	-1*	-2*	15			
Wirkung SDA 4-12	-4	-2,5	-2*	-3,5*	12			
Wirkung SDA 4-16	-4,5	-3	-2,5*	-4*	12			
* Werte nicht gesichert (Datengrundlage nicht ausreichend)								

\*\* Basierend auf 855 CPX-Messungen auf SMA 11-Belägen im Innerorts- und Außerortsbereich

Tabelle 23: Lärmminderung im Vergleich zu SMA 11 - Schweiz

(SMA 11) für verschiedene Jahre nach dem Zeitpunkt des Einbaus dargestellt. Außerdem wird eine mittlere Wirkung des Einbaus des jeweiligen Belagstyps im Vergleich zum Referenzbelags ausgewiesen. So kann für die SDA 4-12 und SDA 4-16 Deckschichten insgesamt eine mittlere Wirkung von -3.5 - -4.0 dB(A) von 0 - 10 Jahre erwartet werden. Beim SDA 8-12 werden Wirkungen von bis zu -2 dB(A) erwartet.

#### Deutschland

Die zeitliche Entwicklung der gemessenen CPX-Pegel per Baulos der Datensätze aus Deutschland ist in Abbildung 34 abgebildet. Basierend aus diesen Messergebnissen werden mittlere Belagswirkungen der Schichten im Vergleich zum Referenzbelag SMA 11 S abgeleitet.

In Tabelle 24 werden die abgeschätzten mittleren Wirkungen im Vergleich zum Standardbelag (SMA 11 S) für Deckschichten verschiedene Jahre nach dem Zeitpunkt des Einbaus dargestellt. Im Vergleich zum Referenzwert des SMA 11S schneidet der Belag SMA 8 LA in Bezug auf die mittlere Wirkung über die Zeitdauer von 0 – 10 Jahren mit ca. -2 dB(A) am besten ab. Dieser Wert ist aber aufgrund der (zu) kurzen Datenreihe mit Unsicherheit verbunden. In einem ähnlichen Bereich ordnet sich die Deckschicht DSH-V 5 ein, welche ca. 1 dB(A) an mittlerer Wirkung erzielt.



Abbildung 34: Mittlere Belagsalterung des CPX (PKW) – Pegels für die Deckschichten aus dem Datensatz von Deutschland (Werte bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h).

	Akustische in Jahre	e Wirkung zun n nach Einbau	Mittlere Wirkung	Erwartete Lebens- dauer [a]				
	0 Jahre	5 Jahre	0-10 Jahre					
$\begin{array}{c} \mbox{Referenzwert SMA 11S (D)} \\ \mbox{[CPX}_{P,80 \rm km/h}] \end{array}$	98,5	99	99,5	99				
Wirkung SMA 8S	0	0	-1	-0,5	?			
Wirkung DSH-V 5	-2	-1	-1*	-1,5*	?			
Wirkung SMA 8LA	-2	-2 -2 -1*		-2*	?			
* Werte nicht gesichert (Datengrundlage nicht ausreichend)								

Tabelle 24: Lärmminderung im Vergleich zu SMA 11 - Deutschland

#### Österreich

Die zeitliche Entwicklung der gemessenen CPX-Pegel per Baulos der Datensätze aus Österreich ist in Abbildung 35 abgebildet. Dabei zeigt sich, dass die Messungen des SMA S3 insgesamt tiefer starten, jedoch nach ca. 5 Jahren den anfänglich lauteren Belag SMA S1 einholt.

Basierend auf den Messergebnissen werden in der folgenden Tabelle ist die akustische Wirkung des SMA S3 im Vergleich zum Referenzbelag SMA S1 abgeschätzt. Eine Abschätzung zu Beginn der Lebensdauer ist aufgrund der dünnen Datengrundlage von neuen Strecken mit Unsicherheiten verbunden. Dennoch zeigt sich, dass sich ein SMA S3 Belag zu Beginn um ca. 1.5 dB(A) bessere Lärmwirkungen erzielt als der Standardbelag SMA S1. Über den Zeitpunkt von 10 Jahren ist vom



	Akustische in Jahre	e Wirkung zun n nach Einbai	Mittlere Wirkung	Erwartete Lebens- dauer [a]				
	0 Jahre	5 Jahre	0-10 Jahre					
Referenzwert SMA 11 (A)	100*	100,5	100,5	100,5	20			
[CPX <sub>P,80km/h</sub> ]								
Wirkung SMA S3	-1,5*	-0,5	-0,5	-1	15			
* Werte nicht gesichert (Datengrundlage nicht ausreichend)								

Belag SMA S3 im Vergleich zum Belag SMA S1 eine Wirkung von ca. 0.5 dB(A) zu erwarten.

Tabelle 25: Lärmminderung im Vergleich zu SMA 11 - Österreich

## 3.4 Zusammenfassung

Die Modellierung des Alterungsverhaltens der Deckschichten im DACH-Raum basiert auf einer heterogenen Datengrundlage. So konnten je nach Land unterschiedlich große Datenmengen zur Verfügung gestellt werden (Anzahl Standorte/Messstrecken pro Land, CH: 419, AT: 461, DE: 76). Die Daten aus der Schweiz wurden dabei im Innerortsbereich aufgenommen, während die Daten aus Deutschland und Österreich auf dem Primärstraßennetz erhoben wurden. Dieser Umstand erschwerte das Zusammenführen des Datensatzes, was sich als erhöhte Unsicherheit bei der Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Ländern äußert. Insgesamt konnten semidichte Asphaltschichten mit unterschiedlichen Bauweisen miteinander verglichen werden. Dabei reichte die Datengrundlage von 4er



Schweizerische Eidgenossenschaft Confederation suisse Confederazione Svizzera Confederazione svizzera Bundesamt für Strassen ASTRA



bis 11er Größtkornschichten.

Bei der Altersverteilung der Deckschichten ergaben sich ebenfalls länderspezifische Unterschiede. In der Schweiz liegen im Datensatz beispielsweise zu vielen Belägen neueren Einbaudatums Messungen vor, wohingegen ältere Deckschichten (> 6 Jahre) kaum im Datensatz vorhanden sind. Die Daten Österreichs zeigen ein gerade umgekehrtes Bild, mit vornehmlich Deckschichten im Altersbereich von 2 – 15 Jahren. Der Datensatz aus Deutschland verfügt bezüglich der Altersverteilung für einzelne Schichten die größte Bandbreite. Dafür ist die Datengrundlage bezüglich der Anzahl Teststrecken (Standorte) entsprechend geringer.

Zur statistischen Modellierung des Alterungsverhaltens wurden mit den (einheitlich) verfügbaren Datensätze statistische Modelle gebildet. Dabei wurde die akustische Belagsgüte als CPX-Pegel mit der Befahrungsmenge sowie dem Belagsalter mit mehreren unterschiedlichen Ansätzen modelliert. Dies hat gezeigt, dass eine Modellierung rein basierend auf Befahrungsstärken respektive Belagsalter den generellen Verlauf der Alterungskurven abbilden kann, aber nicht die gesamte Varianz im Datensatz zu erklären vermag. Die verbleibende Varianz ist u.a. durch klimatische Einflüsse, bautechnische Unterschiede bei der Herstellung und beim Einbau, wie auch durch unterschiedliche Nutzsbedingungen zu erklären.

Als weiterer Aspekt des Alterungsverhaltens wurde die Entwicklung der Deckschichten bezüglich ihrer Homogenität untersucht. So konnte gezeigt werden, dass die meisten Deckschichten innerhalb des Untersuchungszeitraums inhomogener wurden. Dies äußerte sich in der (wenn auch kleinen) Zunahme der Standardabweichung innerhalb des Bauloses. Die größte Zunahme der Standardabweichung innerhalb eines Bauloses konnte in den hohlraumreichen 4er Deckschichten aus der Schweiz im Innerortsbereich beobachtet werden. Die 8er- und 11er-Größtkornschichten zeigten bezüglich der Homogenität ein stabileres Verhalten.

Hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Deckschichten wurden Abschätzungen zur (gesamtheitlichen) Wirkung der lärmarmen Deckschichten vorgenommen. Dabei wurde mit der verfügbaren Datengrundlage eruiert, wie sich die lärmreduzierende Wirkung eines Einbaus einer lärmarmen Deckschicht im Vergleich zu einem im jeweiligen Land gängigen Referenzdeckschicht im zeitlichen Verlauf nach einem, fünf, 10 Jahren, sowie als mittlere Wirkung verhält. Damit können die Wirkung der einzelnen länderspezifischen Belagstypen einerseits innerhalb eines Landes, sowie bezüglich der Wirkung über die Landesgrenzen hinweg verglichen werden.






# 4 ÄNDERUNG DER DECKSCHICHTEIGENSCHAFTEN

Die Eigenschaften von Deckschichten in Hinblick auf die Reifen-Fahrbahninteraktion werden maßgeblich von deren Oberflächeneigenschaften beeinflusst. In Hinblick auf die Schallemissionen betrifft das in erster Linie die Oberflächentextur im Wellenlängenbereich der Makrotextur, die zu Reifenschwingungen und somit zu Schallabstrahlung führt, sowie die Fähigkeit der Deckschicht, durch das Abrollen des Reifens induzierte Strömungsgeräusche im Reifen-Fahrbahnkontakt zu mindern.

Durch das Abrollen des Reifens wird dieser – in Abhängigkeit der Fahrbahnoberfläche – in Schwingungen versetzt. Die Ausbildung der Makrotextur der Deckschicht bedingt hierbei die lokale Verformung des Reifens im Fahrbahnkontakt. Damit ist nicht die gesamte Makrotextur für diese Anregung verantwortlich, sondern lediglich die Anteile, die durch die Reifenverformung in direktem Kontakt mit dem Reifen stehen. Zur Reduktion dieses Anteils des Rollgeräusches wird somit eine möglichst geringe Änderung der Reifendeformation in der Kontaktfläche gesucht. Um die Makrotextur nun zu beschreiben, kann eine Vielzahl an geometrischen Texturparametern berechnet werden, die zum Ziel haben, verschiedene gebrauchsverhaltensorientierte Eigenschaften der Deckschicht abzubilden. Aufgrund der Komplexität der Reifen-Fahrbahn-Interaktion ist es allerdings nicht möglich, einen Parameter anzugeben, der die jeweils gesuchte Zielgröße (beispielsweise das Rollgeräusch, die Griffigkeit, …) alleine beschreibt. Im Allgemeinen kommt es zu einer Überlagerung von verschiedenen Anregungs- bzw. Wirkmechanismen, die jeweils von einer Kombination unterschiedlicher Texturparameter dargestellt werden.

Strömungsgeräusche, die durch Dichteschwankungen und Verschiebungen von Luftvolumina am Reifen-Fahrbahnkontakt entstehen, sind stark von den auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten abhängig. Eine Möglichkeit, diese zu reduzieren, liegt darin, hohlraumreiche Fahrbahndeckschichten herzustellen. Hier soll den Luftvolumina die Möglichkeit gegeben werden, in die Deckschicht selbst verdrängt zu werden. Die hierfür relevanten Oberflächeneigenschaften unterscheiden sich von der oben genannten Makrotextur. Während diese lediglich im direkten Kontakt mit dem Reifen eine Auswirkung auf dessen Schwingungsverhalten zeigt, ist vor allem die Tiefenstruktur der Textur verantwortlich für eine Reduktion des Strömungsgeräusches. Die Tiefenstruktur der Deckschicht bzw. ihr Hohlraumgehalt ist dabei nicht den selben messtechnischen Verfahren zugänglich wie die Makrotextur. Diese Eigenschaften werden deswegen meist nicht direkt durch optische Verfahren erhoben, sondern durch Bohrkernuntersuchungen oder indirekt wie beispielsweise durch die Messung der Schallabsorption.







## 4.1 Beschreibung der Messverfahren

Texturmessungen zur Bewertung der Oberflächeneigenschaften von Fahrbahndeckschichten werden typischerweise durch kontinuierliche Punktlaser-Messungen durchgeführt. Dadurch ergibt sich ein Linientexturprofil der Messstrecke, aus dem eine Vielzahl an Texturparametern berechnet werden kann. Beispiele für diese Texturkennwerte sind die mittlere Profiltiefe (Mean Profile Depth - MPD [40]) bzw. die daraus berechnete Estimated Texture Depth (EDT), der akustisch als bedeutend angesehene Gestaltfaktor, etc..

Bedingt durch die technische Entwicklung ist im Bereich der flächigen Texturbewertung in den letzten Jahren ein deutlicher Fortschritt zu sehen. 3D-Texturen von Oberflächen werden teilweise mit hoher Auflösung stationär mit Messlängen von wenigen Metern, teilweise mit niedrigerer Genauigkeit kontinuierlich z.B. durch aufgefächerte Lasersensoren erhoben. Im Zuge von ADURA wurden zur Bewertung der altersabhängigen Texturen der zu untersuchenden Deckschichten kontinuierliche flächige Texturmessungen durchgeführt, deren Messmethodik in Abschnitt 4.1.1 kurz vorgestellt wird. Im Bereich der Texturparameter der flächigen Oberflächeneigenschaften kann die Rautiefe sowie die Profilspitzenanzahl hervorgehoben werden, die z.B. in der RVS 08.16.01 [41] als Abnahme-Parameter vorgeschrieben werden und deren Messung in ÖNORM EN 13036-1 [42] beschrieben wird.

Im Bereich der Bestimmung des akustisch wirksamen Hohlraumgehaltes der Fahrbahndeckschichten können unterschiedliche Ansätze gewählt werden. Einerseits können an den zu untersuchenden Stellen Bohrkerne entnommen werden, die anschließend einer ingehenden Untersuchung unterzogen werden. Dies kann dabei durch Messungen der Schallabsorption im Impedanzrohr nach ISO 10534-1 [43] erfolgen, ebenfalls kann der Hohlraumgehalt nach EN 12697-8 [44] bestimmt werden. Beide Herangehensweisen fordern dabei die Extraktion von Bohrkernen.

Um den aufwändigen Einsatz von zerstörenden Untersuchungsmethoden zu verringern, wurden die Messmethoden nach ISO 13472-1 und -2 erstellt [45, 46]. Diese messen mittels akustischer Herangehensweise das Schallabsorptionsvermögen von Straßenoberflächen, um daraus Rückschlüsse auf den akustisch wirksamen Hohlraumgehalt liefern zu können.

Allen diesen Methoden gemein ist die nur lokale Anwendbarkeit unter gleichzeitiger Notwendigkeit von Straßensperren über einen Zeitraum von mehreren Stunden. Damit wird zwar die Möglichkeit geschaffen, lokal genaue Informationen zur Deckschichteigenschaft zu erheben, in Bezug auf eine statistische Auswertung der Daten bedeutet dies allerdings aufgrund der Notwendigkeit einer großen Stichprobe einen erheblichen Aufwand. Daher wurden in den letzten Jahren Versuche unternommen,



Abbildung 36: 3D-Textursensor; links: montierter Sensor in der rechten Rollspur des CPX-Anhängers; rechts: Arbeitsprinzip

Messmethoden zur Bestimmung der Schallabsorption von Fahrbahndecken im laufenden Betrieb zu erstellen. Im vorliegenden Projekt wurden derartige Messungen mittels Line-Array-Technik durchgeführt, die – wie auch die Messmethoden zur Erhebung der Oberflächentextur – folgend ausführlich beschrieben werden.

#### 4.1.1 Messung der 3D-Oberflächentextur

Zur Bestimmung der 3D-Oberflächentextur ist im Verlauf des Forschungsprojektes ein Hochgeschwindigkeits-3D-Straßentexturscanner eingesetzt worden (Abbildung 36). Mit diesem kann die Deckschicht mit einer Auflösung von ca. 75 µm bei einer Messgeschwindigkeit von 60 km/h auf einer Breite von 7,5 cm aufgenommen werden. Der Sensor besteht aus zwei gekoppelten xposure-Zeilenkameras, die ihre 1024 Pixel Linienbreite mit ca. 200 kHz auslesen. Durch die Kombination zweier gekoppelter Kameras wurde ein Messsystem geschaffen, das die Straßenoberfläche stereo-skopisch abtastet. Daraus kann bei bekannten Kamera-Positionen aus den Pixelverschiebungen auf die Höhenstruktur der abgetasteten Oberfläche geschlossen werden. Eine genaue Beschreibung der Algorithmen kann [47] entnommen werden.

Der Texturscanner ist im CPX-Anhänger direkt vor dem rechten Messrad montiert. Diese Position wurde gewählt um sicherzustellen, dass die gemessene Textur tatsächlich als Eingangsfunktion in das Reifen/Fahrbahn-System fungiert. Gekoppelt mit den Texturmessungen wurden ebenfalls CPX-Messungen durchgeführt. Damit konnten mögliche abweichende Fahrlinien zwischen den Textur-







und den CPX-Messungen ausgeschlossen werden. Dieser Vorteil wurde dabei durch zwei Nachteile erkauft: einerseits konnten die 3D-Texturmessungen systembedingt nur mit einer Messgeschwindigkeit von 60 km/h durchgeführt werden, was die Vergleichbarkeit mit dem wesentlich umfangreicheren Datensatz aus Abschnitt 3.2.2 verringert. Ebenfalls fungiert der Textursensor vor dem Messreifen als akustischer Streukörper, so dass vor allem die CPX-Werte des Mikrophons der vorderen Messposition einem zusätzlichen Störfaktor unterliegen. Dieser war allerdings über den Datensatz konstant, so dass die relative Vergleichbarkeit der Messergebnisse davon unberührt sein sollte. Auch wurden die in Abschnitt 5 durchgeführten Modellierungen jeweils in Bezug auf das Mikrophon an der hinteren Messposition durchgeführt.

Die aufgenommenen Zeilenkamera-Daten werden im weiteren Verlauf mehreren Postprocessing-Schritten unterzogen. Zuerst werden die kontinuierlichen Oberflächendaten in einzelne Textur-Patches mit einer Patch-Größe von jeweils 7,5 x 7,5 cm unterteilt. Um Schwankungen der Oberfläche relativ zur Sensorposition sowie Ausreißer des Stereo-Algorithmus zu korrigieren wurde anschließend eine Nivellierung der Texturpatches durch Gauss-Filterung durchgeführt. Kanteneffekte bei der weiteren Parameterberechnung wurden schließlich durch Fensterung der Texturpatches verringert.

Ein Beispiel des Post-Processings ist in Abbildung 37 gegeben. Am ursprünglichen Rohtextur-Patch links ist deutlich die leichte Verkippung des Messsystems relativ zur Fahrbahnoberfläche zu erkennen. Ebenfalls ist aus der farblich dargestellten Höheninformation der Arbeitsabstand von ca. 470 mm ablesbar. Nach erfolgtem Gauss-Levelling (rechts) wird die sich aus der Querneigung der Fahrbahndecke ergebende Verkippung des Texturbildes korrigiert. Auch wird dadurch die mittlere Texturhöhe auf Null korrigiert. Im Höhenbild treten die einzelnen Körner der Fahrbahndecke stärker hervor, im mittleren oberen Patchbereich ist ein Kornausbruch deutlicher zu sehen.

### 4.1.2 Parameter der 3D-Textur

Mit dem in 4.1.1 beschriebenen Verfahren zur Messung der 3D-Textur können nun verschiedene Parameter bzw. Kennwerte der Fahrbahntextur berechnet werden. Dabei werden einerseits Parameter, die aus den Verfahren der 2D-Textur bekannt sind, auf äquivalente Parameter einer 3D-Oberfläche umgesetzt, wobei zu beachten ist, dass die Zahlenwerte nicht notwendigerweise direkt ineinander übergeführt werden können. Andererseits werden weitere beschreibende Parameter, die sich aus der 3D-Betrachtung der Oberfläche ergeben, berechnet. Es wird hierbei versucht, vor allem Kennwerte, die eine einfache Interpretation der Ergebnisse erlauben, zu bestimmen. Die Kennwerte sind in Tabelle 26 aufgeführt.







Bundesamt für Strassen ASTRA



Abbildung 37: Beispiel eines 3D-Texturpatches; oben: Rohtextur-Patch vor dem Postprocessing; unten: der selbe Patch nach Gauss-Levelling und Fensterung. Die Höheninformation ist in [mm], die weiteren Abmessungen in Pixel (zu je ca. 75 μm) gegeben.







Parameter	Beschreibung	Anmerkung
nmax	Anzahl der lokalen Maxima im Texturpatch	Die Anzahl der lokalen Maxima hängt
		(aufgrund von Rangeffekten etc.) von der
		Patchgröße der 3D-Texturaufnahme ab
nmax₋rel	Anzahl der lokalen Maxima pro m $^2$ bzw.	siehe <i>nmax</i>
	Dichte der lokalen Maxima	
hmax	mittlere Höhe der lokalen Maxima, bezogen	
	auf die mittlere Höhe des Texturpatches	
dmax	Spannweite der Höhen der lokalen Maxima	Spannweite der 5-95%-Perzentile
	im Texturpatch	
nmin	Anzahl der lokalen Minima im Texturpatch	siehe <i>nmax</i>
hmin	mittlere Tiefe der lokalen Minima, bezogen	
	auf die mittlere Höhe des Texturpatches	
dmin	Spannweite der Tiefen der lokalen Minima	siehe <i>dmax</i>
	im Texturpatch	
mpd	Mittlere Profiltiefe	angepasster Parameter aus der 2D-Textur;
		die betrachtete Fläche zur Bestimmung
		entspricht der Fläche eines
		3D-Texturpatches
g	Gestaltfaktor	siehe mpd (angepasster Parameter aus der
		2D-Textur)
nneigh	mittlere minimale horizontale Distanz der	
	lokalen Maxima	
gk	Abschätzung des Größtkorns der	basiert auf der Anzahl der lokalen Maxima
	Fahrbahndecke	im Patch sowie einer kubisch dichtesten
		Kugelpackung; der Zahlenwert entspricht
		nicht dem tatsächlichen Größtkorn der
		Deckschicht
grad₋x	Maß für die Steigung der Textur in	bestimmt als Mittelwert des Betrags des
	Fahrtrichtung	Textur-Gradienten
grad₋y	Maß für die Steigung der Textur quer zur	siehe <i>grad₋x</i>
	Fahrtrichtung	
grad	Maß für die Steigung der Textur	siehe <i>grad₋x</i>

Tabelle 26: Beschreibung der Parameter der 3D-Textur







## 4.1.3 Bestimmung der in-situ-Schallabsorption

Um den Einfluss des Hohlraumgehaltes und dessen Altersverhalten auf das Rollgeräusch zu untersuchen, wurden Schallabsorptionsmessungen im hochrangigen Straßennetz durchgeführt. Hintergrund dabei ist der wahrscheinliche Zusammenhang zwischen (akustisch) zugänglichen Hohlräumen in der Fahrbahndeckschicht und der Schallabsorption poröser Schichten. Diese sollen durch den verringerten hohlrauminduzierten Strömungswiderstand den Anteil an Strömungsgeräuschen am gesamten Rollgeräusch mindern.

Um dabei einerseits eine ausreichende Datenbasis zu schaffen, andererseits lediglich die am stärksten belastete Fahrspur zu erfassen, wurden Absorptionsmessungen mittels Line Array im laufenden Verkehr durchgeführt. Die Messungen sind dabei methodisch mit den in Abschnitt 6.2.2 an den Asphalt-Probeplatten erfolgten Schallabsorptionsmessungen vergleichbar.

Zur Ermittelung der Absorptionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche wurde ein Linienarray an 16 Mikrofonen vertikal zwischen einem nach unten gerichteten Lautsprecher und der Fahrbahnoberfläche verwendet. Durch die phasengenaue Aufzeichnung der Mikrofonsignale ist diese *Endfire*-Konfiguration des Linienarrays in der Lage das Schallfeld in vertikaler Richtung örtlich zu erfassen und die nach unten laufende von der nach oben laufenden Schallwelle zu trennen. Zusätzlich können Signale aus seitlichen Richtungen gedämpft werden, indem ein Fokussierungspunkt gewählt wird. Ein Beamforming-Algorithmus berechnet je nach Fokussierungspunkt aus den Signalen aller Mikrofone ein resultierendes Mikrofonsignal. Das Gesamtsystem aus Mikrofonen und Algorithmus erlaubt somit die Schallaufzeichnung mittels einer steuerbaren Fokussierung bzw. Richtwirkung.

Um die Absorptionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche kontrolliert zu bestimmen wird mittels eines Lautsprechers ein Testsignal abgespielt und der Anteil der in vertikaler Richtung reflektierten Energie bestimmt (vgl. hierzu [45]). Hierbei wird mittels Messung einer MLS-Sequenz die Impulsantwort des Systems bestimmt. Nach ISO 13472-1 findet die Messung einer Freifeld-Impulsantwort statt um mittels Subtraktion den reflektierten Anteil von der Direktkomponente zu trennen. Diese Trennung kann aber ebenso mittels Beamforming-Algorithmus erfolgen, wobei dieser zur Bestimmung der Direktkomponenten auf den Lautsprecher, zur Bestimmung der reflektierten Komponenten auf die Spiegelquelle der Reflexion fokussiert wird. Durch die Verwendung eines Nahfeldmodells der Schallausbreitung innerhalb des Beamforming Algorithmus ist weiters keine Distanzkorrektur notwendig.

Abbildung 38 zeigt die resultierenden Richtwirkungsdiagramme der verwendeten Mikrofonkonfigura-



Abbildung 38: Richtwirkungsdiagramme des Beamformers für die Direktkomponente (links) und die reflektierte Komponenten (rechts).

tionen für diese beiden Fokussierungen. Neben einer Dämpfung von störenden Reflexionen innerhalb des Anhängers, kommt es auch zu einer Fokussierung auf einen schmalen Bereich der Fahrbahn, der der Breite einer Rollspur entspricht. Aufgrund der Abmessungen des Arrays ist eine verlässliche und saubere Trennung der Komponenten im Frequenzbereich von 425 Hz bis 5250 Hz möglich.

Durch die Kombination dieser Fokussierungen können die Impulsantworten der Direktkomponenten und der reflektierte Komponenten bestimmt werden, siehe Abbildung 39. Da es sich hierbei um eine relative Messung handelt, wurden die Amplituden derart angepasst, dass sich für die Direktkomponente ein Maximalwert von 1 ergibt. Da die reflektierte Komponente einen längeren Weg zurücklegen muss und zusätzlich von der Direktkomponente überlagert an den Mikrophonen ankommt, weist diese eine höhere Störanfälligkeit auf. Für alle Terzbänder von 1 - 5 kHz konnte jedoch ein Signal-Rauschabstand von über 13 dB innerhalb der reflektierten Komponenten erreicht werden. Zwischen 5 und 6 ms ist eine weitere Komponenten zu sehen, dabei handelt es sich um die an der Lautsprechermembran reflektierte Reflexion des Bodens. Diese störende Komponente wird durch Verwendung eines Zeitfensters ausgeblendet. Die Messung erfolgte mit einer Geschwindigkeit von 60 km/h, wobei das Mikrofonarray über der rechten Rollspur platziert wurde.

Da eine Straße im allgemeinen stark reflektierende akustische Eigenschaften aufweist, wird die Schallabsorption als Schallreflexionsindex  $RI_j$  angegeben. Dieser ist zur Bestimmung der Reflexionseigenschaften von Lärmschutzwänden in EN 1793-5 [48] definiert, wobei das zu Grunde



Abbildung 39: Getrennte Impulsantworten für die Direktkomponente und Reflexion nach Anwendung des Beamforming Algorithmus.

liegende Messverfahren nahezu ident mit ISO 13472-1 ist. Durch die Verwendung des Beamforming-Algorithmus und Auswertung rein der Direktkomponente berechnet sich der Schallreflexionsindex  $RI_i$ in Terzbändern somit mittels (vgl. EN 1793-5 und ISO 13472-1)

$$RI_j = \frac{\int\limits_{\Delta f_j} |F[h_{r,k}(t) \cdot w_{r,k}(t)]|^2 \mathrm{d}f}{\int\limits_{\Delta f_j} |F[h_{i,k}(t) \cdot w_{i,k}(t)]|^2 \mathrm{d}f}.$$
(3)

Dabei sind

 $h_{i,k}(t)$  die direkt einfallende Impulsantwort im Freifeld an der Mikrophonposition k,

 $h_{r,k}(t)$  die reflektierte Impulsantwort vor dem Prüfkörper an der Mikrophonposition k,

 $w_{i,k}(t)$  das Adrienne-Zeitfenster für die einfallende Impulsantwort  $h_{i,k}(t)$ ,

 $w_{r,k}(t)$  das Adrienne-Zeitfenster für die reflektierte Impulsantwort  $h_{r,k}(t)$ ,

j der Index des j-ten Terzbands (zwischen 100 Hz und 5 kHz),

F das Symbol für die Fourier-Transformation und

 $\Delta_{fj}$  die Breite des j-ten Terzbands.

### 4.2 Alterungsverhalten der 3D-Texturparameter

Im Zuge von ADURA wurden die Texturparameter mittels eines hochauflösenden optischen 3D-Oberflächenscanners erhoben. Damit sollte es ermöglicht werden, auch geringe Variationen der Oberflächentextur als relevante akustische Einflussfaktoren zu identifizieren. Um eine statistisch ausreichende Stichprobe an Fahrbahndecken verschiedenen Alters zu erheben, wurden Messungen an 54 Abschnitten im österreichischen hochrangigen Straßennetz durchgeführt, davon 21 vom Typ







SMA S1 und 33 vom Typ SMA S3. Als Messgeschwindigkeit wurde systembedingt 60 km/h gewählt. Die einzelnen Messabschnitte sind zwischen 0,5 und 1,0 km lang, entsprechend einer gesamten Messlänge von 9,5 km (SMA S1) bzw. 17,5 km (SMA S3). Die Messungen am Deckschichttyp SMA S1 überspannen dabei einen Altersbereich von 5 bis 21 Jahren, die Messungen am SMA S3 einen Bereich von 1 bis 14 Jahren, die Lage der Messabschnitte ist in Abbildung 40 dargestellt. Damit beschreiben die Datensätze den Großteil der im Netz verbauten Deckschichten des jeweiligen Typs (vgl. dazu die Altersverteilung der Deckschichten in Abbildung 9).

Um das Alterungsverhalten sowie die Variation der Textur-Parameter abschätzen zu können, ist in den Abbildungen 41 bis 45 das Alterungsverhalten ausgewählter Parameter abgebildet. Links wird jeweils der Texturkennwert gegen das Alter der Deckschicht, rechts gegen die (logarithmierte) Befahrungsanzahl des Messabschnittes gezeigt. Die Deckschichttypen sind dabei farblich codiert, die Punkt-Größe spiegelt die Länge der jeweiligen Messstrecke wider. Die Linien an den einzelnen Punkten geben die Standardabweichung des Parameters innerhalb des jeweiligen Messabschnittes an und können somit auch als Maß für die Variation der Parameter interpretiert werden.

In Abbildung 41 wird das Alterungsverhalten der relativen Anzahl lokaler Maxima im Texturpatch gezeigt. Die Variation innerhalb der Messstrecken, die sich als mittlerer Variationskoeffizient ausdrücken lässt, liegt bei einem geringen Wert von 4 %, die Strecken sind damit in Bezug auf den Parameter homogen. Ein klares Alterungsverhalten ist aus dem Datensatz nicht erkennbar. Während die Mess-



Abbildung 40: Lage der 3D-Textur-Messstellen im hochrangigen Straßennetz; Kartenmaterial ©openstreetmap.org



Abbildung 41: Änderung der relativen Anzahl lokaler Maxima gegen das Alter (links) und die (logarithmierte) Befahrungsstärke (rechts)

ergebnisse im Wertebereich ≤ 10000 eine mit dem Alter abnehmende Tendenz vermuten lassen, widerspricht der verhältnismäßig klar separierte Messergebnis-Cluster der SMA S1-Ergebnisse bei einem Alter von ca. 15 Jahren diesem Bild. Die Ursache der Abgrenzung dieser Messtellen kann nicht mit absoluter Sicherheit eruiert werden. Mögliche Gründe können in einem abweichenden Größtkorn der Deckschichten liegen, das zu einer geänderten Dichte der lokalen Maxima führt. Ebenfalls nicht gänzlich ausgeschlossen werden können Fehlklassifikationen in Hinblick auf das Deckschichtalter.

Modelliert man die Dichte der Maxima unter Ausschluss dieser Messwerte gegen das Deckschichtalter, so erhält man signifikante Hinweise auf eine Abnahme der Dichte an Maxima bei ca. -100 Maxima pro m<sup>2</sup> und Jahr. Eine zusätzliche Berücksichtigung des Deckschichttyps in dieser Modellierung führt zu keiner Signifikanz, das Verhalten ist unabhängig von den beiden betrachteten Deckschichten.

Die Ursache der Abnahme der Dichte lokaler Maxima der Oberflächentextur kann aus dem vorliegenden Datensatz nicht beantwortet werden. Mögliche Gründe können in plastischen Verschiebungen der Kornstuktur liegen, die einem (lateralen) Auswalzen der Textur gleichkommt. Ebenfalls möglich ist eine Beeinflussung der Messgröße durch das Bitumen an den Körnern, das mit der Befahrungsmenge abgetragen wird. Auf die Prozesse der Alterung wird in Abschnitt 6.4 genauer eingegangen, in dem die schrittweise künstliche Labor-Alterung von Probeplatten verschiedener Deckschichttypen beschrieben wird.

Als zweiter Parameter wird in Abbildung 42 die Änderung des Texturgradienten in Fahrtrichtung dargestellt. Der Variationskoeffizient ist mit ca. 16 % merklich höher, die Messstrecken weisen in Bezug auf ihre Oberflächengradienten eine vermehrte Inhomogenität im Vergleich mit der Dichte der lokalen Maxima auf. Die im Zusammenhang mit der Dichte lokaler Maxima abseparierten Messstellen



Abbildung 42: Änderung des Gradienten in Fahrtrichtung gegen das Alter (links) und die (logarithmierte) Befahrungsstärke (rechts)

sind im Hinblick auf den Texturgradienten nicht hervorzuheben.

Eine statistische Modellierung zeigt nur eine geringe Signifikanz in Bezug auf das Alterungsverhalten, leichte Tendenzen sind hin zu einer Verringerung des Gradienten mit zunehmendem Alter erkennbar (bei einer Abnahme von ca. 1,5 % pro Jahr). Berücksichtigt man allerdings die (faktoriellen) Deckschichttypen in der Modellierung, verschwindet diese Signifikanz zugunsten einer Trennung des Gradienten in Bezug auf den Deckschichttyp. Hier zeigt sich ein tendenziell höherer Wert des Gradienten für SMA S3.

Abbildung 43 zeigt das Alterungsverhalten der Nächste-Nachbar-Distanz. Aufgrund der großen Ähnlichkeit zum Parameter der Dichte lokaler Maxima (eine hohe Dichte führt zu einem geringen Abstand zwischen den Maxima), zeigt sich hier ein vergleichbares (inverses) Verhalten der Texturparameter. Daher weist auch der Variationskoeffizient mit 2,5 % eine hohe Homogenität der Einzel-Messabschnitte auf. Auch hier gruppieren fünf Messstellen des SMA S1 außerhalb des Großteils der Datenpunkte, die daher in der Alterungsmodellierung bewusst vernachlässigt werden.

Die lineare Alterungsmodellierung deutet auf eine langsame Erhöhung der Nächste-Nachbar-Distanz von ca. 50 µm pro Jahr hin. Eine Unterscheidung der Deckschichttypen kann nicht gefunden werden. Das ist in Bezug auf die bautechnischen Unterschiede von SMA S1 und SMA S3 zu erwarten, da sich die Bauweisen zwar in ihrer Tiefenstruktur, ausgedrückt durch die Forderung nach einem erhöhten Hohlraumgehalt bei SMA S3, unterscheiden, die Sieblinien der beiden Bauweisen aber bis auf geringe Unterschiede übereinstimmen.

In Abbildung 44 wird der Verlauf des Parameters "hmax", der die mittlere Höhe der lokalen Maxima im Texturpatch (relativ zur mittleren Texturebene) angibt, gezeigt. Der Variationskoeffizient des Parame-



Abbildung 43: Änderung der Nächster-Nachbar-Distanz gegen das Alter (links) und die (logarithmierte) Befahrungsstärke (rechts)

ters ist mit ca. 17 % gleich hoch wie der des verwandten Oberflächenparameters des Texturgradienten. Auch hier liegen die fünf im Vorfeld herausgehobenen Messstellen im Gesamtkollektiv und weisen damit keine Auffälligkeiten auf.

Im Alterungsverlauf ist eine geringe Abnahme der Höhe der Maxima bei -17 µm pro Jahr feststellbar. Diese tritt auch unter Berücksichtigung des Deckschichttyps auf, der allerdings in der Modellierung einen relevanten Einfluss auf den Texturparameter ausweist und sich durch einen höheren p-Wert verglichen mit dem Alter der Messstelle auszeichnet.

Als letzter Texturparameter, dessen Alterungsverlauf spezifisch untersucht wurde, wird der Gestaltfaktor in Abbildung 45 gezeigt. Während die Messstellen bei einem Variationskoeffizienten von 1,8 % in sich homogen sind, kann aus den vorliegenden Daten keinerlei relevanter Alterungsverlauf abgelesen werden. Auch eine gesonderte Betrachtung nach Gruppierung der Fahrbahndeckschichttypen führt



Abbildung 44: Änderung der mittleren Höhe der lokalen Maxima gegen das Alter (links) und die (logarithmierte) Befahrungsstärke (rechts)



Abbildung 45: Änderung des Gestaltfaktors gegen das Alter (links) und die (logarithmierte) Befahrungsstärke (rechts)

beim Gestaltfaktor zu keiner Abbildung eines Alterseinflusses.

Allgemein kann in den erhobenen Texturparametern ein geringer Altersverlauf bemerkt werden, der allerdings statistisch nicht sonderlich stark gefestigt ist. Teilweise ist dieser, verglichen mit der Spannweite der Messergebnisse der Einzelmessstellen, abhängig von der Beobachtungsgröße verhältnismäßig gering. Dies spiegelt sich auch im ersten Vergleich mit den Ergebnissen der Rollgeräusch-Analysen wider, wo ebenfalls die Variation der Messstellen bei ählichem Alter eine große Streuung in Gegenüberstellung mit ihrem Altersverlauf zeigen.

### 4.3 Hauptkomponentenanalyse

Die im vorigen Abschnitt in Tabelle 26 beschriebenen Textur-Parameter stehen miteinander in Wechselwirkung. Diese Wechselwirkungen trennen sich dabei in verschiedene Gruppen auf. Bei einer direkten Wechselwirkung wird eine Größe direkt aus einer anderen berechnet. So beruht beispielsweise das modellierte Größtkorn "gk" direkt auf der Anzahl lokaler Maxima im Texturpatch. Andererseits können Parameter miteinander in einem indirekt Zusammenhang stehen, z.B. führt eine höhere Anzahl lokaler Maxima im Patch zu einer geringeren Distanz zwischen den lokalen Maxima. Schlussendlich können Texturparameter in Abhängigkeit vom Deckschichttyp in Beziehung stehen. Für isotrope Fahrbahndecken werden die Gradienten der Textur in und quer zur Fahrtrichtung miteinander korrelieren, für anisotrope Fahrbahndecken wie z.B. Grinding-Strukturen wird diese Beziehung jedoch gebrochen.

Um einen Überblick über die 3D-Texturparameter zu geben, wird eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Dabei wird durch die n Texturparameter ein n-dimensionaler Raum aufgespannt und



Abbildung 46: Beschriebene Varianz des 3D-Texturdatensatzes durch die Hauptkomponentenanalyse

anschließend eine orthogonale Koordinatentransformation durchgeführt. Ziel derer ist die Abbildung einer höchstmöglichen Varianz des Datensatzes mittels einer geringen Anzahl von Basisvektoren, d.h. das Koordinatensystem wird so gedreht, dass die neuen Basisvektoren die Spannweiten des Datensatzes schnellstmöglich (in möglichst niedriger Dimension) beschreiben. Ergebnis der Hauptkomponententransformation ist nun eine Ladungsmatrix, die für die einzelnen Hauptkomponenten die Gewichtung der ursprünglichen Eingangsparameter für jede Hauptkomponente angibt. Dies führt dazu, dass Parameter, die im ursprünglichen Datensatz eine hohe Korrelation aufweisen, vor allem in den ersten Hauptkomponenten ähnlich stark laden und erst in späten Hauptkomponenten, die nur mehr eine geringe Varianz des Gesamtdatensatzes erklären, voneinander abweichen.

In Abbildung 46 wird die pro Hauptkomponente erklärte Varianz des 3D-Texturdatensatzes dargestellt. Bereits die ersten beiden Hauptkomponenten erklären ca. 90% der Gesamtvariation der bestehenden Datengrundlage. Die Ladungsgewichte der ersten drei Hauptkomponenten sind in Abbildung 47 vektoriell, in Abbildung 48 und Tabelle 27 als Zahlenwerte dargestellt. Anhand der ersten Verzweigung im Dendogramm erkannt man deutlich die Clusterung der Parameter in zwei grundsätzlichen Gruppen:

 hmin, mpd, dmin, dmax, g, hmax, grad, grad\_x, grad\_y: Die Parametergruppe der ersten Hauptkomponente beschreibt die Tiefenstruktur der Fahrbahndeckschicht. Sowohl die absolute Tiefen- bzw. Höhenwerte als auch die Art der Tiefenstruktur (abgebildet durch die Gradienten bzw. den Gestaltfaktor) geht in diese Hauptkomponente ein.

Die Hauptkomponente zerfällt in der nächsten Strukturtiefe in zwei weitere Untergruppen:

- hmin, mpd, dmin, dmax: Die Untergruppe beschreibt die absolute Tiefenstruktur der







Fahrbahntextur.

- *g*, *hmax*, *grad*, *grad\_x*, *grad\_y*: Die Untergruppe beschreibt die Art der Tiefenstruktur,
   wobei der Parameter *hmax* hier eine Ausnahme der allgemeinen Interpretation bildet.
- gk, nneigh, nmax\_rel, nmin: Die Parameter der zweiten Hauptkomponente beschreiben die Kornstruktur in Bezug auf ihre Packungsdichte bzw. Profilspitzenanzahl. Die verschiedenen Vorzeichen erklären sich durch die Relationen (kleines Größtkorn / geringe Abstände zur nächsten Profilspitze) – (hohe Profilspitzenanzahl / hohe Anzahl lokaler Minima).



Abbildung 47: Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten des 3D-Texturdatensatzes (die dritte Hauptkomponente ist farblich kodiert)

	PC1	PC2	PC3
grad_x	-0.35	-0.06	-0.00
grad	-0.35	-0.06	0.03
grad_y	-0.35	-0.06	0.08
hmax	-0.34	0.06	0.06
g	-0.33	-0.08	-0.09
dmax	-0.32	-0.03	-0.36
dmin	-0.32	0.08	0.42
mpd	-0.31	-0.04	-0.40
hmin	0.31	-0.11	-0.38
nmin	-0.04	-0.44	-0.48
nmax₋rel	0.04	-0.50	0.20
nneigh	-0.04	0.51	-0.19
gk	-0.02	0.50	-0.24

Tabelle 27: Ladungsvektoren der ersten drei Hauptkomponenten der Hauptkomponentenanalyse



Abbildung 48: graphische Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten als farbcodierte Ladungsmatrix (links, es werden die Beträge der Ladungsgewichte abgebildet) bzw. als Dendrogramm (rechts)

### 4.3.1 Alterungsverhalten der Hauptkomponenten

Wie schon in Abschnitt 4.2 kann auch nach Zusammenhängen zwischen den Hauptkomponenten und dem Alter der einzelnen Messstellen gesucht werden. Die erste Hauptkomponente, deren Werte in Abhängigkeit des Alters bzw. der Befahrungsmenge in Abbildung 49 gezeigt werden, weist starke Ähnlichkeiten mit den sie dominierenden Texturparametern auf. Wie auch zuvor bei den Parametern des Gradienten in Fahrtrichtung, der relativen Höhe der Maxima und des Gestaltfaktors tritt eine leichte Unterscheidung der Deckschichttypen auf, ein gesicherter Altersverlauf kann aber auch hier nicht abgeleitet werden.

Der Altersverlauf der zweiten Hauptkomponente (Abbildung 50) zeigt wiederum die Gruppierung fünf einzelner Messstellen bei höheren Werten der Hauptkomponente. Während auch hier wie schon zuvor bei den Parametern der Dichte der lokalen Maxima sowie der Nächste-Nachbar-Distanz die einzelnen Deckschichttypen nicht unterscheidbar sind, zeigt unter Ausschluss des separierenden Clusters eine signifikante Abnahme des Hauptkomponenten-Wertes mit dem Alter der Messstellen.



Abbildung 49: Änderung der ersten Hauptkomponente gegen das Alter (links) und die (logarithmierte) Befahrungsstärke (rechts)



Abbildung 50: Änderung der zweiten Hauptkomponente gegen das Alter (links) und die (logarithmierte) Befahrungsstärke (rechts)



Abbildung 51: Änderung des mittleren Schallreflexionsverhaltens im 1000-Hz-Terzband gegen das Alter (links) und die Befahrungsstärke (rechts) des Streckenabschnittes

## 4.4 Alterungsverhalten der Schallreflexion

Die Altersverteilung der Schallreflexion (bzw. deren Komplement der Absorption) nach Abschnitt 4.1.3 für die untersuchten Messstellen ist in Abbildung 51 dargestellt. Die Auswahl des Terzbandes von 1 kHz wird dabei aufgrund dessen später im Abschnitt 5.4 beschriebener Relevanz im Zusammenhang mit der Rollgeräusch-Emission ausgewählt. Während sich zwar ein unterer Grenzwert für den Deckschichttyp des SMA S1 einzustellen scheint, kann kein statistisch belastbares Alterungsverhalten festgestellt werden. Inwieweit das auf der geringen Spreizung der Messwerte beruht kann aufgrund der enigeschränkten Deckschichttypen nicht beantwortet werden. Von zukünftigen Interesse ist hierbei sicherlich der Vergleich mit offenporien Deckschichten, der auch der Absicherung des Messverfahrens dienen kann.

## 4.5 Zusammenfassung

Im vorliegenden Abschnitt wurde das Altersverhalten der messtechnisch zugänglichen Deckschichteigenschaften für die im Weiteren folgende statistische Modellierung untersucht. Dabei ist festzuhalten, dass es jeweils den Ist-Zustand der Messstellen zum jeweilgen Alter abbildet, Zeitreihen von einzelnen Messstellen können methodisch bedingt nicht erfolgen. Damit ist das gezeigte Altersverhalten mit den Unsicherheiten bzw. Spannweiten der jeweiligen Startwerte behaftet.

Die Parameter der 3D-Textur zeigen nach der Durchführung einer Hauptkomponentenanalyse eine bereits durch zwei Hauptkomponenten beschriebene hohe Erklärung der Varianz des Datensatzes. Dabei ist ein verständlicher Zusammenhang zwischen den einzelnen Texturparametern, die in die jeweiligen Hauptkomponenten eingehen, gegeben.







Allgemein weisen die einzelnen betrachteten Parameter – sowohl in Hinblick auf die Oberflächentextur als auch auf die hohlraumgehaltsbedingte Schallabsorption der Deckschichten – eine relevante Spreizung im vorliegenden Datensatz auf. Die Unterscheidung der beiden einfließenden Deckschichttypen SMA S1 und SMA S3 ist nicht für alle Parameter gegeben, es zeigen sich vor allem bei den Parametern, die in die erste Hauptkomponente eingehen, Unterschiede.

Das Altersverhalten ist für die einzelnen betrachteten Parameter differenziert ausgeprägt. Gerade die Parameter der zweiten Hauptkomponente, die sich auf die oberen Bereiche der Textur beziehen, zeigen hier ein signifikantes Altersverhalten. Im Gegensatz dazu ist in Hinblick auf die Tiefenstruktur der Messstellen im Datensatz kein ausgeprägtes Altersverhalten zu beobachten. Dies spiegelt sich auch in den Messungen der Schallreflexion bzw. -absorption wider.

Abschließend kann gesagt werden, dass für die meisten Parameter die Spreizung der Werte in einer vergleichbaren Größe mit der Spreizung des Gesamt-Datensatzes liegt. Dies ist durchaus vergleichbar mit den deutlichen Spannweiten, die in den Schallemissionspegeln für die verschiedenen Messstellen in Abschnitt 3 beobachtet wurden. Ein gleichförmiges Altersverhalten der Oberflächenparameter wird augenscheinlich durch inhomogene Anfangswerte maskiert.







## 5 ALTERUNGSMODELLIERUNG TEXTUR UND ROLLGERÄUSCH

Während in den vorangegangen Abschnitten die Alterung von akustischen und texturbezogenen Parametern separat betrachtet wurden, werden diese im Folgenden gemeinsam betrachtet. Dabei wird die Annahme vorausgesetzt, dass die beiden Prozesse miteinander in Verbindung stehen. Es wird somit versucht, basierend auf den Texturparametern auf deren Auswirkungen auf die Schallemissionen Bezug zu nehmen. Wie bei allen statistischen Modellierungen muss dabei auf einige grundlegende Annahmen Rücksicht genommen werden. Diese umfassen dabei in erster Linie den Datensatz an sich sowie die Art der Modellierung.

Der für die Modellierung verwendete Datensatz besteht aus Messabschnitten der Fahrbahndeckschichttypen "SMA S1" sowie "SMA S3" unterschiedlichen Alters aus dem österreichischen hochrangigen Straßennetz. Dabei muss davon ausgegangen werden, dass die Spannweite der betrachteten Fahrbahndeckschichtparameter im Vergleich zu der allgemeinen Gruppe der dichten und semi-dichten lärmmindernden Asphaltdeckschichten eingeschränkt ist. Gerade in Bezug auf das Größtkorn fokussiert die statistische Modellierung dadurch auf Größtkörner im Bereich von 11 mm. Diese Einschränkung ergibt sich dabei aus der fast vollständigen Einförmigkeit der Bauweise im österreichischen hochrangigen Straßennetz. Bei Extrapolation der Aussagen auf andere Bauweisen, vor allem auf die in der Schweiz betrachteten SDA-Deckschichten mit Größtkorn 4 mm, muss dies jedenfalls im Blick behalten werden. Um nichtsdestotrotz Aussagen für stark abweichende Größtkörner ziehen zu können wurde bei der künstlichen Alterung an Probeplatten spezifisch auf diese Bauweise Bezug genommen. Die Textur-Alterungsmechanismen können damit über diesen Umweg mit den Modellierungen in diesem Abschnitt verglichen werden.

Des Weiteren geht in die Modellierung des Zusammenhanges zwischen Texturänderung und Rollgeräusch das Alter bzw. die Befahrungsmenge der Messstrecke (bzw. des Datensatzes) nicht notwendigerweise ein. Die im Weiteren gefundenen Zusammenhänge beziehen sich dabei nicht ausschließlich auf Alterungsprozesse, sondern auf den globalen Zusammenhang der Texturparameter und des Rollgeräusches. Dabei besteht die grundlegende Annahme, dass die Variation der Texturparameter (und damit die Variation des resultierenden Rollgeräusches) zu jedem Alter geringer ist als die absolute Variation der jeweiligen Parameter. Auch hier können die getätigten Aussagen in Hinblick auf den Zusammenhang zwischen den Alterungsmechanismen durch Vergleich mit den schrittweise gealterten Probeplatten abgesichert werden. Dies steht auch damit in Zusammenhang, dass durch die grunsätzliche Herangehensweise vieler Messungen an Messstellen unterschiedlichen







Alters innerhalb des Projektzeitraumes nicht auf die Alterung bzw. Alterungsgeschwindigkeit der einzelnen Datensätze geschlossen werden kann, sondern die globale Änderung des Fahrbahndeckschichttyps betrachtet wird. Eine Aussage in Bezug auf die Alterungsrate einzelner Abschnitte und damit möglicherweise eine Clusterbildung von bisher nicht definierten Untergruppen des Deckschichttyps kann nur durch konsequentes Monitoring der Textur- und Rollgeräuschparameter über einen Zeitraum von mehreren Jahren erfolgen.

Die Modellierungen in diesem Abschnitt fokussieren in erster Linie auf linearen Modellansätzen. Während für die Mehrparameter-Modellierung teilweise auf Random Forest Regressions zurückgegriffen wird, zeigen die sich dadurch ergebenden Modelle keine deutlich verbesserten Aussagegenauigkeiten. Ebenfalls ist das Ziel der Modellierungen nicht eine hohe Vorhersagegenauigkeit des (unbekannten) Rollgeräusches aus gemessenen oder modellierten Texturkennwerten, sondern grundsätzliche gemeinsame Verhaltensmuster zwischen den Eingangs- und Ausgangsparametern zu finden und anschließend zu interpretieren. Die Ausnahme dieser Herangehensweise liegt in der Berechnung der erwarteten Rollgeräuschpegel bei Anwendung der Modelle auf die schrittweise gealterten Probeplatten in Abschnitt 6.

## 5.1 Gruppierung der Akustik-Terzbanddaten

Da unterschiedliche Anregungsmechanismen des Rollgeräusches in verschiedenen Frequenzbereichen Wirksamkeit zeigen, ist für die Modellierung des Zusammenhangs zwischen Textur und Rollgeräusch eine frequenzaufgelöste Betrachtung notwendig. Einerseits kann diese in Terzbändern als übliche Auflösung der (A-bewerteten) CPX-Messungen erfolgen, andererseits führt dies zu einer Vielzahl an Modellen, die auf Kosten der Übersichtlichkeit der gesuchten Aussagen geht. Deswegen wird in diesem Abschnitt nach einer möglichen Gruppierung der Rollgeräusch-Terzbänder gesucht, die eine Reduktion der betrachteten Frequenzbereiche und damit Modelle ermöglicht, ohne relevante Informationen zu verlieren.

Als Ausgangspunkt kann wie schon zuvor im Bereich der Textur-Parameter eine Hauptkomponentenanalyse der Terzbanddaten durchgeführt werden. Datenbasis dieser Analyse sind die Ergebnisse der CPX-Messungen, die zeitgleich mit den 3D-Texturmessungen durchgeführt werden und für die Modellierung Verwendung finden. Die Darstellung der Hauptkomponentenanalyse ist in Abbildung 52 gezeigt. Man sieht vor allem in den ersten beiden Hauptkomponente die Aufspaltung in drei gruppierende Basisvektoren. Diese trennen die Frequenzbereiche geordnet in einen tief-, mittel- und hochfrequenten Bereich.



(a) Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten (k









(b) Spearman-Korrelationsmatrix

Abbildung 53: Autokorrelations-Matrizen der CPX-Terzbanddaten

Eine zweite Betrachtung basiert auf der Berechnung der Autokorrelation der Terzbanddaten untereinander. Dazu ist in Abbildung 53 die sich aus den Einzel-Korrelationen ergebende Pearson- bzw. Spearman-Matrix dargestellt. Auch hier sieht man eine klare Trennung der drei in der Hauptkomponentenanalyse auftretenden Frequenzbereiche. Deswegen wird in der weiteren Modellierung jeweils auf diese gruppierten Bereiche (Tabelle 28) eingegangen. Dazu werden die jeweiligen Frequenzbereiche für jeden Datensatz energetisch summiert. Hier muss beachtet werden, dass diese Vorgangsweise (im Gegensatz zu einer ebenfalls möglichen energetischen Mittelung) verstärktes Gewicht auf die lautesten Terzbänder legt. Dies ist bewusst gewählt, da diese Terzbänder auch den relevantesten Einfluss auf die akustische Alterung der Fahrbahndeckschicht bedeuten.







Frequenzbereich	unteres Terzband	oberes Terzband	Kurzbezeichnung
tieffrequentes Rollgeräusch	315 Hz	800 Hz	"low"
mittelfrequentes Rollgeräusch	1000 Hz	1250 Hz	"mid"
hochfrequentes Rollgeräusch	1600 Hz	5000 Hz	"high"

Tabelle 28: Gruppierung der CPX-Terzbanddaten in drei Frequenzbereiche

## 5.2 statistische Modellierung

In diesem Abschnitt werden zwei Herangehensweisen an die Rollgeräuschmodellierung vorgestellt. Einerseits wird auf Basis der Hauptkomponenten der 3D-Texturen mittels linearer 1-Parameter-Modellierung auf die das Rollgeräusch beeinflussenden Texturvariationen geschlossen, zweitens wird - ausgehend von den Texturparametern - durch lineare 2-Parameter-Modellierung und durch Random Forest Regression genauer auf den Einfluss einzelner Texturkennwerte fokussiert. Allen Ansätzen gemein ist die Beurteilung des Rollgeräusches in den drei Bereichen des tief-, mittel- und hochfrequenten Rollgeräusches.

### 5.2.1 Einfluss der Hauptkomponenten - lineare 1-Parameter-Modellierung

Basierend auf der Hauptkomponentenanalyse aus Abschnitt 4.3 kann nun ein einfaches Regressionsmodell erstellt werden. Die Zusammenhänge der aus den Texturparametern berechneten Hauptkomponenten mit den tief-, mittel- und hochfrequenten Rollgeräuschanteilen sind dazu in Abbildung 54 gezeigt. In der unteren Hälfte des Streudiagramms sind dazu die einzelnen Datenpunkte, farblich nach Deckschichttyp "SMA S1" bzw. "SMA S3" gekennzeichnet, aufgetragen. Die Diagonale zeigt die jeweilige Kerndichteverteilung des Parameter-Datensatzes. Die obere Hälfte des Diagramms gibt schließlich das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression der einzelnen Parameter gegeneinander an.

Erwartungsgemäß sind die drei Hauptkomponenten linear unabhängig zueinander, was sich durch ein Bestimmtheitsmaß von 0 ausweist. Auch weisen die unterschiedlichen Frequenzbereiche des Rollgeräusches wie erwartet nur einen geringen Zusammenhang auf.

Im Zusammenhang der aus den Texturparametern berechneten Hauptkomponenten zum Rollgeräusch ist bereits augenscheinlich zu sehen, dass die erste Hauptkomponente die tieffrequenten Schallemissionen bereits mit genügender Genauigkeit beschreibt. Diese Komponente setzt sich aus den Gradienten und der Variation der Höheninformationen zusammen. Bildlich interpretiert führt ein hoher Wert in der ersten Hauptkomponente und – aufgrund des negativen Vorzeichens in



Abbildung 54: Streudiagramm-Matrix der tief-, mittel und hochfrequenten Anteile mit den ersten drei Hauptkomponenten der 3D-Texturparameter

der Ladungsmatrix – somit ein niedriger Wert in den Gradienten zu einem geringen tieffrequenten Rollgeräuschpegel. Dieser Zusammenhang ist physikalisch interpretierbar, da die tieffrequenten Rollgeräuschanteile auf Reifenvibrationen zurückzuführen sind, die durch eine unregelmäßige Fahrbahntextur verstärkt werden. Hier ist auch beachtenswert, dass die erste Hauptkomponente bis zu einem gewissen Grad eine Trennung zwischen den beiden betrachteten Fahrbahndeckschichttypen "SMA S1" und "SMA S3" erlaubt. Dabei tendiert der "SMA S3" tieffrequent zu höheren Schallemissionen.

Der den Gesamt-Rollgeräuschpegel dominierende mittlere Frequenzbereich wird hauptsächlich von der zweiten Hauptkomponente abgebildet, die auf die Korngrößenverteilung zurückzuführen ist. Ein hoher Wert der zweiten Hauptkomponente lässt dabei auf eine geringe Profilspitzenanzahl schließen. In diesem Sinn führt eine hohe Anzahl an Profilspitzen bzw. ein damit korreliertes geringes Größtkorn zu einem verminderten Rollgeräuschpegel in diesem Frequenzbereich.

Im dritten betrachteten, hochfrequenten Bereich des Rollgeräusches wird wiederum die erste Hauptkomponente wirksam, wobei im Vergleich mit den tiefen Frequenzen eine gegenläufige Tendenz zu beobachten ist. Eine einfache Interpretation ist an dieser Stelle nicht gegeben. Der möglicherweise wirksame Einfluss der Unterscheidung der absoluten und relativen Tiefenstruktur kann hier nicht







abgelesen werden. Im Gegensatz zum tieffrequenten Rollgeräuschbereich kommt hier die durch den vermehrten Hohlraumgehalt vermutete lärmmindernde Wirkung des "SMA S3" zur Wirkung.

In den Tabellen 29 bis 31 sind die Ergebnisse der linearen 1-Parameter-Regressionsanalysen mit der jeweils relevantesten Hauptkomponente gegeben. Die niedrigen p-Werte der Regressionsanalysen weisen auf einen statistisch signifikaten Zusammenhang zwischen den jeweiligen Hauptkomponenten und den Rollgeräusch-Frequenzbereichen hin. In Tabelle 32 sind die Bestimmtheitsmaße sowie die Standardfehler der Residuen angegeben. Die Parameter zeigen vor allem im mittleren Frequenzbereich ein gutes Bestimmtheitsmaß, der Standardfehler liegt im erwarteten Bereich der Messunsicherheiten. In den anderen Frequenzbereichen kommt es zu größeren Abweichungen, wobei im Streudiagramm geringe Nichtlinearitäten in den Loess-Kurven zu sehen sind. Da die Abweichungen vom linearen Verhalten im beobachteten Bereich gering sind und in erster Linie grundlegende Zusammenhänge und nicht hohe Genauigkeiten in der Rollgeräuschvorhersage gesucht sind, wird von einer nichtlinearen Modellierung hier vorerst abgesehen.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	89.15	0.097	923.59	< 2e-16
PC1	-0.38	0.035	-11.07	2.75e-15

Tabelle 29: Ergebnisse der linearen Regression - tieffrequentes Rollgeräusch mit erster Hauptkomponente

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	92.61	0.060	1555.76	< 2e-16
PC2	0.42	0.031	13.46	< 2e-16

Tabelle 30: Ergebnisse der linearen Regression - mittelfrequentes Rollgeräusch mit zweiter Hauptkomponente

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	90.00	0.112	804.35	< 2e-16
PC1	0.31	0.040	7.61	5.20e-10

Tabelle 31: Ergebnisse der linearen Regression - hochfrequentes Rollgeräusch mit erster Hauptkomponente







	Residual standard error	Multiple R-squared
low	0.71	0.70
mid	0.44	0.78
high	0.82	0.53

Tabelle 32: Ergebnisse der linearen Regressionsmodelle

### 5.2.2 Einfluss der Texturparameter - Mehrparameter-Modellierung

In diesem Abschnitt wird die Modellierung auf Basis der ursprünglichen Texturparameter durchgeführt. Dazu wird in einem ersten Schritt für die einzelnen Frequenzbereiche für alle möglichen Parameterkombinationen ein zweidimensionales lineares interagierendes Modell gesucht. Die Beschränkung auf ein 2-Parameter-Modell erfolgt dabei, um eine Überanpassung des Modells zu verhindern und die weitere Interpretation zu erleichtern. Die Modellerstellung der einzelnen Parameterkombinationen basiert auf einem Trainingsdatensatz, der 75% der vorhandenen Daten beinhaltet. Das erstellte Modell wird am verbleibenden Testdatensatz evaluiert und daraus die Parameterkombination mit dem besten Bestimmtheitsmaß gewählt. Zur Vermeidung eines Bias durch Ausreißer im Datensatz und zur Abschätzung der Aussagekraft des Modellansatzes wird dieser Vorgang 1000x durchgeführt (Bootstrapping). Die sich daraus ergebenden Modell-Informationen sind in Abbildung 55 für die drei relevanten Frequenzbereiche gezeigt. Links sind jeweils die Kerndichteschätzer der Einzel-Bestimmtheitsmaße der Modellierung gezeigt, rechts werden die häufigsten besten Parameterkombinationen der Modellbildung angegeben.

#### **Tieffrequentes Rollgeräusch**

In der ersten Zeile der Abbildung 55 wird die Leistungsfähigkeit der tieffrequenten Rollgeräusch-Modellierung gezeigt. Bis auf wenige Bootstrapping-Durchläufe werden Bestimmtheitsmaße im Modelltest von über 0,8 erreicht. Die am häufigsten auftretende Parameterkombination wird als die Anzahl lokaler Maxima mit dem Textur-Gradienten in Fahrtrichtung bestimmt. Bei der zweiten Kombination wird die Gradientenrichtung vertauscht, wobei diese Parameter für isotrope Fahrbahndecken eine hohe Korrelation aufweisen. In weiterer Folge werden sowohl das modellierte Größtkorn (das auf Basis der Anzahl lokaler Maxima modelliert wird) als auch der Gestaltfaktor als erklärende Parameter für den tieffrequenten Rollgeräuschanteil identifiziert.

Wertet man nun das Modell auf Basis der ersten beiden Parameter auf dem gesamten Datensatz aus, so erhält man die Ergebnisse der Tabelle 33. Bei einem Bestimmtheitsmaß von 0,86 und einem



Abbildung 55: Häufigkeitsverteilung der Kerndichteverteilung des Bestimmtheitsmaßes (links) und Häufigkeit der Parameterverteilung (rechts) für eine zweidimensionale lineare Modellierung; die verschiedenen Rollgeräuschanteile sind von oben nach unten tief-, mittel- und hochfrequent angeordnet.







Standardfehler von 0,49 weist der p-Wert des Modells den Textur-Gradienten in Fahrtrichtung als relevantesten Eingangsparameter aus. Ein hoher Wert des Gradienten führt hierbei zu einem Anstieg in den tieffrequenten Rollgeräuschanteilen. Der nach dem p-Wert geordnet zweite relevante Wert der Regressionsanalyse ist der Interaktionsterm zwischen den Parametern "nmax\_rel" und "grad\_x". Das negative Vorzeichen bedeutet in diesen Fall, dass ein hoher Wert des Produktes der beiden Parameter zu einer Verringerung der modellierten tieffrequenten Rollgeräuschemissionen führt. Im Sinne eines möglichst geringen Textur-Gradienten führt dies zur Forderung einer gleichzeitig möglichst hohen Anzahl lokaler Maxima, selbst wenn der dritte, am wenigsten signifikante Term der Anzahl lokaler Maxima dem wieder leicht entgegenwirkt.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	79.553	2.854	27.87	< 2e-16
nmax_rel	0.001	0.000	1.96	5.56e-02
grad₋x	35.842	6.859	5.23	3.40e-06
nmax_rel:grad_x	-0.003	0.001	-3.98	2.21e-04

Tabelle 33: Ergebnisse des zweidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells - tieffrequenter Rollgeräuschbereich

Die Zusammenhänge aus dem Modell lassen sich für zwei erklärende Parameter auch visualisieren. In Abbildung 56 sind die Einflussfaktoren des Modells gegen den tieffrequenten Rollgeräuschanteil aufgetragen. Die linke Seite der Abbildung zeigt dabei das bisher beschriebene lineare 2-Parameter-Modell, auf der rechten Seite wird das Modell eines nichtlinearen Random-Forest-Regression-Ansatzes gezeigt. Man sieht, dass sich durch die Zulassung von Nichtlinearitäten nur eine geringe Änderung in der grundlegenden Modellform ergibt. In den wesentlichen Bereichen, die innerhalb des Ursprungs-Datensatzes liegen, kommt es nur zu geringen Abweichungen in den Ergebnissen der beiden Modellansätze. Lediglich bei hohen Textur-Gradienten und geringen Anzahlen lokaler Maxima divergieren die beiden Modelle deutlich. Dabei ist zu beachten, dass in diesen Parameterbereichen keine oder nur wenige Stützdaten vorhanden sind, wie aus der zweidimensionalen Kerndichteverteilung der Modell-Eingangsparameter hervorgeht (siehe Abbildung 57).

Reevaluiert man nun das lineare 2-Parameter-Modell, d.h. trägt man die Messwerte gegen die aus dem Modell rückgerechneten Vorhersagen auf, erhält man den Zusammenhang von Abbildung 58<sup>1</sup>. Man erkennt augenscheinlich einen guten Zusammenhang der Mess- und Vorhersagewerte, wobei die beiden betrachteten Deckschichttypen "SMA S1" und "SMA S3" in den extremeren Werten trennen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Aufgrund der beschränkten Größe des Datensatzes wird diese Reevaluierung auf dem Trainingsdatensatz durchgeführt. Durch die Einschränkung auf ein lineares 2-Parametermodell ist die Gefahr eines Overfittings jedoch gering.





(b) Random Forest Regression

Abbildung 56: Zusammenhang zwischen dem Textur-Gradienten, der Anzahl lokaler Maxima und dem (durch die Farbkodierung dargestellten) tieffrequenten Rollgeräusch



Abbildung 57: Häufigkeitsverteilung der tieffrequenten Modell-Einflussfaktoren für SMA S1 und SMA S3.



Abbildung 58: Reevaluierung des zweidimensionalen linearen Modells - tieffrequenter Rollgeräuschbereich

Hier ist zu schlussfolgern, dass der voraussichtlich dichtere "SMA S1" geringere Textur-Gradienten aufweist, die direkt das tieffrequente Rollgeräusch lärmmindernd beeinflussen. Dies ist auch in Abbildung 57, die die zweidimensionale Kerndichteverteilung des Textur-Gradienten und der Anzahl lokaler Maxima für die beiden Fahrbahndeckschichttypen zeigt, direkt zu sehen.

#### Mittelfrequentes Rollgeräusch

Der mittlere Frequenzbereich umfasst die Terzbänder von 1000 und 1250 Hz. Die Häufigkeitsverteilung der Bootstrapping-Durchläufe in Abbildung 55 zeigt ähnlich zum tieffrequenten Bereich ein durchgängig ausreichend hohes Bestimmtheitsmaß für die nichtlineare 2-Parameter-Modellierung. Ebenfalls wieder als relevanter Einflussfaktor wird die Anzahl der lokalen Maxima "nmax\_rel" identifiziert, wobei als zweiter Parameter die dazu ähnliche Nächster-Nachbar-Distanz "nneigh" ausgewählt wird. Diese tritt in den ersten vier Parametersätzen jeweils auf und berücksichtigt im Gegensatz zur absoluten Anzahl der lokalen Maxima auch deren relative Anordnung. Beide Parameter sind in der Hauptkomponentenanalyse gemeinsam in der zweiten Hauptkomponente abgebildet, erst mit der mittleren Profiltiefe "mpd" bzw. Höhenverteilung der lokalen Maxima "dmax" treten Parameter der ersten Hauptkomponente in der Parameterverteilung auf.





**FFG** Forschung wirkt.

Die Auswertung des Modells liefert nun die in Tabelle 34 gegebenen Koeffizienten, das Bestimmtheitsmaß ist mit über 0.8 und der Standardfehler mit 0.39 für die weiteren Übelegungen als hinreichend zu betrachten. Als Parameter mit der höchsten Signifikanz zeigt sich die Anzahl lokaler Maxima, die bei hohen Werten das mittelfrequente Rollgeräusch mindert. Des weiteren sollte der Interaktionsterm berücksichtigt werden. Geringe mittlere Abstände zwischen den lokalen Maxima führen demnach bei konstant gehaltener hoher Anzahl dieser zu einer Reduktion des mittelfrequenten Rollgeräusches. Eine bildliche Interpretation dieses Zusammenhangs gestaltet sich allerdings als schwierig, da eine Vielzahl an unterschiedlichen Einflussfaktoren das Ergebnis der Nächster-Nachbar-Distanz beeinflussen können. Dies umfasst sowohl z.B. Randeffekte wie auch mögliche Unterschiede zwischen der Mittelwert- und beispielsweise der Median-Bildung zur Berechung eines repräsentativen mittleren Wertes des Parameters innerhalb des einzelnen 3D-Texturpatches. Betrachtet man wieder die zweidimensionale Kerndichteverteilung der beiden Parameter (Abbildung 59), sieht man augenscheinlich (und wenig überraschend) eine hohe Korrelation zwischen der Anzahl lokaler Maxima und der mittleren Distanz zwischen diesen. Es stellt sich die Frage, ob die Variationsbreite der Parameter genügt, um mit ausreichender Sicherheit vernünftige Aussagen über das interagierende Zusammenspiel mit dem mittelfrequenten Rollgeräusch zu treffen.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	88.349	9.018	9.80	3.19e-13
nneigh	-484.746	920.959	-0.53	6.01e-01
nmax₋rel	-0.002	0.001	-3.71	5.21e-04
nneigh:nmax_rel	0.455	0.124	3.66	6.01e-04

Tabelle 34: Ergebnisse des zweidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells - mittelfrequenter Rollgeräuschbereich

Bei diesen Überlegungen sollte bedacht werden, dass auch das lineare 1-Parameter-Modell, das lediglich auf der Anzahl lokaler Maxima im Texturpatch beruht, bereits ein Bestimmtheitsmaß von 0,77 bei einem Standardfehler von 0,44 aufweist. Vergleichbare Bewertungsmaße ergeben sich unter Berücksichtigung der Nächster-Nachbar-Distanz. In den beiden Fällen führt eine hohe Anzahl lokaler Maxima bzw. geringe Nächster-Nachbar-Distanz zu einem reduzierten mittelfrequenten Rollgeräusch. Das Modell-Ergebnis ist dazu in Tabelle 35 gegeben.

Die Reevaluierung des linearen 1-Parameter-Modells auf Basis der Anzahl lokaler Maxima "nmax\_rel" ist in Abbildung 60 abgebildet. Die Vorhersage ist wie auch aus Tabelle 35 für den Vorhersageparameter ersichtlich gut. Die Trennung der beiden Deckschichttypen "SMA S1" und "SMA S3", die im tieffrequenten Rollgeräusch deutlich zu sehen war, tritt hier nicht mehr in diesem Ausmaß auf.



Abbildung 59: Häufigkeitsverteilung der mittelfrequenten Modell-Einflussfaktoren für SMA S1 und SMA S3.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	99.913	0.555	179.98	< 2e-16
nmax₋rel	-7.95e-04	6.01e-05	-13.23	< 2e-16

Tabelle 35: Ergebnisse des eindimensionalen linearen Regressionsmodells - mittelfrequenter Rollgeräuschbereich



Abbildung 60: Reevaluierung des eindimensionalen linearen Modells - mittelfrequenter Rollgeräuschbereich







#### Hochfrequentes Rollgeräusch

Im Bereich ab 1600 Hz zeigt sich in Abbildung 55 eine merklich breitere Verteilung der Einzel-Bestimmtheitsmaße der Modellbildung. Der häufigste Wert des Kerndichteschätzers liegt im Gegensatz zu den anderen Frequenzbereichen unter 0.8, teilweise werden im Bootstrapping lediglich Bestimmtheitsmaße von unter 0.5 erreicht. Als häufigste Parameterkombination treten die bereits in den tiefen und mittleren Frequenzbereichen wirksame Anzahl lokaler Maxima sowie der Parameter "hmax" auf, der die mittlere Höhe der lokalen Maxima relativ zur mittleren Profilhöhe beschreibt. Dieser tritt auch in den ersten vier Parameterkombinationen auf.

Stellt man nun auf Basis dieser erklärenden Parameter das Modell für das hochfrequente Rollgeräusch auf, erhält man die in Tabelle 36 gezeigten Modellergebnisse. Das Bestimmtheitsmaß sinkt im Vergleich zu den bisherigen Modellierungen auf einen Wert von ca. 0,67 bei einem Standardfehler von 0,70. Die p-Werte für die einzelnen Modellparameter weisen ebenfalls geringe Werte auf, was den Zusammenhang der Parameter mit dem hochfrequenten Rollgeräusch in Frage stellt.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	91.211	2.772	32.91	< 2e-16
nmax_rel	2.12e-04	2.88e-04	0.74	4.64e-01
hmax	5156.896	4454.621	1.16	2.53e-01
nmax_rel:hmax	-1.05e+00	0.472	-2.22	3.11e-02

Tabelle 36: Ergebnisse des zweidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells - hochfrequenter Rollgeräuschbereich

Lediglich das Zusammenspiel der beiden Parameter erweist sich als signifikant, ein hohes Produkt der beiden Werte führt demnach zu einer hochfrequenten Lärmminderung. Dazu ist in Abbildung 61 das Zusammenspiel der Parameter visualisiert. Links wird die Auswertung des linearen 2-Parameter-Modells, rechts die Auswertung eines Random-Forest-Regression-Ansatzes gezeigt. Die damit in Zusammenhang stehende Kerndichteverteilung der Eingangsparameter ist in Abbildung 62 abgebildet. Die Parameter sind augenscheinlich voneinander unabhängig, was sich bereits aus der Hauptkomponentenanalyse lesen lässt. Während die Anzahl lokaler Maxima in einem ähnlichen Wertebereich liegt, zeigt sich für den SMA S3 hier eine deutlichere Höhenstruktur der Fahrbahndeckschicht, die gerade in diesem Bereich in der Random-Forest-Regression einen niedrigen hochfrequenten Roll-geräuschpegel ergibt.

Reevaluiert man das Modell, erhält man den Zusammenhang von Abbildung 63. Hin zu niedrigen Pegelwerten ist dabei eine Auftrennung der beiden Deckschichttypen zu sehen. Hier stellt sich die





(b) Random Forest Regression

Abbildung 61: Zusammenhang zwischen der Anzahl lokaler Maxima, deren Höhenverteilung und dem (durch die Farbkodierung dargestellten) hochfrequenten Rollgeräusch

Frage, ob eine gemeinsame Modellierung über die Deckschichttypen hinweg mit den aktuell zur Verfügung stehenden erklärenden Parametern möglich ist. Das bautechnische Hauptunterscheidungskriterium von SMA S1 und SMA S3 liegt im Hohlraumgehalt der Fahrbahndecke, die sich über die Texturmessung nicht direkt abbilden lässt. Lediglich Parameter, die die sichtbare Tiefenstruktur der Deckschicht abbilden (wie beispielsweise die mittlere Höhe der lokalen Maxima bzw. die mittlere Profiltiefe) lassen in gewissem Ausmaß Rückschlüsse auf den vermuteten Hohlraumgehalt bzw. die Zugänglichkeit zu der akustisch gesuchten Porenstruktur zu.

Aus diesem Grund wird hier abschließend noch ein lineares 3-Parameter-Modell, das als weiteren faktoriellen Parameter den Deckschichttyp miteinbezieht, vorgestellt. Auf Interaktionsterme wird in diesem Fall aus Gründen der Gefahr der Überanpassung und zu Gunsten der Übersichtlichkeit verzichtet. Das Ergebnis dieser Modellierung ist in Tabelle 37 gegeben, es ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,64 und ein Standardfehler von 0,73. Sowohl die mittlere Höhe der lokalen Maxima als auch deren Anzahl führen zu einer Reduktion im hochfrequenten Rollgeräusch, der faktorielle Wert des Deckschichttyps fordert mit vernachlässigbarer Signifikanz eine Pegelerhöhung von 0.2 dB im Falle des Deckschichttyps SMA S3. Während die grundsätzlichen Tendenzen aus den Parametern als relevant angenommen werden können, fehlt hier für eine genauere Vorhersage ein belastbarer Texturbzw. Fahrbahndecken-Parameter, der die beobachtete Unterscheidung der beiden Deckschichttypen abbildet.





(b) SMA S3

Abbildung 62: Häufigkeitsverteilung der hochfrequenten Modell-Einflussfaktoren für SMA S1 und SMA S3.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	96.879	1.072	90.40	< 2e-16
nmax_rel	-3.78e-04	1.02e-04	-3.72	5.12e-04
hmax	-4.93e+03	584.106	-8.44	3.53e-11
s1mSMA_S3	0.215	0.240	0.89	3.76e-01

Tabelle 37: Ergebnisse des dreidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells - hochfrequenter Rollgeräuschbereich



Abbildung 63: Reevaluierung des zweidimensionalen linearen Modells - hochfrequenter Rollgeräuschbereich






# 5.3 Speron-Simulationen

### 5.3.1 Grundlagen

Das Rechenmodell SPERoN für die Vorhersage des Reifen-Fahrbahn-Geräusches geht hervor aus Arbeiten im sogenannten Sperenberg-Projekt [49] und im Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr 1" [50]. Es dient der Vorhersage des Rollgeräusches in Abhängigkeit der Eigenschaften des Fahrbahnbelags und wurde in mehreren nationalen und internationalen Nachfolgeprojekten weiterentwickelt und validiert, zuletzt im Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr 3" [51].

Das Modell ist ein sogenanntes Hybridmodell. Der hybride Ansatz entsteht durch Kombination eines physikalischen analytischen Rechenmodells mit einem statistischen Modell, das Berechnungsergebnisse auf einen großen Datensatz von Messungen projiziert [52, 53].

Zwei Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Geräusches werden durch das Modell abgebildet: die mechanisch durch den Rollkontakt des profilierten Reifens mit der rauhen Fahrbahnoberfläche induzierten Reifenschwingungen und aerodynamische Prozesse, das heißt Luftströmungsprozesse im Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Da das Modell kein vollständiges Verständnis aller komplexen Zusammenhänge verlangt, können Teile des Modells auch empirisch beschrieben sein. Das Teilmodell für die Berechnung der mechanisch induzierten Rollgeräusche ist ein analytisches Modell und implementiert die physikalischen Zusammenhänge zwischen Rollkontakt und mechanischer Schwingungsanregung des Reifens. Das Teilmodell für die Rollgeräuschentstehung durch das sogenannte "air pumping" (aerodynamische Rollgeräuschentstehung) ist bislang empirisch beschrieben.

### 5.3.2 Parameterstudie Hohlraumgehalt

#### Ausgangspunkt

Durch entsprechende Zusammensetzung der Sieblinie und Wahl eines angepassten Bindemittelgehaltes lässt sich der Hohlraumgehalt einer Asphaltdeckschicht in weiten Grenzen steuern. Der Hohlraumgehalt reicht von wenigen Volumenprozent bei dichten Deckschichten über Hohlraumgehalte zwischen 12 und 16 Vol.-% bei semidichten Asphalten bis zu 26 Vol.-% bei offenporigen Asphalten.

Luftgefüllte Hohlräume in einer Asphaltdeckschicht führen per se zu schallabsorbierenden Eigenschaften, die die Reifen-Fahrbahn-Geräusche bereits am Ort ihrer Entstehung, also im Reifen-Fahrbahn-Kontakt, aber auch auf dem Schallausbreitungsweg über die Fahrbahn hinweg mindern. Je größer







der Hohlraumgehalt ist, desto größer ist das Schallabsorptionsvermögen und umso größer ist auch die Schallpegelminderung.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben ist von Interesse, inwieweit die Steuerung des Hohlraumgehaltes bei der Mischgutkonzeption oder die alterungsbedingte Veränderung eines mit der Mischgutkonzeption anfänglich festgelegten Hohlraumgehaltes einer Deckschicht die Reifen-Fahrbahn-Geräusche initial und im Laufe der Zeit verändert. Der Fokus liegt dabei auf den dichten und semidichten Asphaltdeckschichten mit Hohlraumgehalten von bis zu 16 Vol.-%.

Die schallabsorbierende Wirkung der Hohlräume in einer Deckschicht setzt voraus, dass diese Hohlräume für Bewegungen der umgebenden Luft auch von außen zugänglich sind. Schallwellen, die an der Fahrbahnoberfläche entstehen, müssen in die Deckschicht eindringen können, um die Schallleistung im passiven Schallabsorber, den die Deckschicht darstellt, zum Großteil in thermische Energie umzuwandeln und nach außen unwirksam zu machen.

Die heute im Baustoffprüflabor angewandten Methoden zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes von Mischgut- oder Deckschichtproben, die zu den oben angegebenen Werten des Hohlraumgehaltes führen, sind verhältnismäßig ungenau und lassen keine Unterscheidung nach geschlossenen und zugänglichen Hohlräumen zu. Insofern lassen die im Baustoffprüflabor ermittelten Hohlraumgehalte grundsätzlich keinen Rückschluss auf den für die Akustik wichtigen Prozentsatz zugänglicher Hohlräume zu. Erst der Einsatz fortschrittlicher Mess- und Auswertemethoden führt zum Ziel. Hierzu zählt unter anderem die Computertomographie, die einen Prüfkörper -- beispielsweise einen Bohrkern -- schichtenweise abtastet und in einem bildgebenden Verfahren dreidimensional darstellt und auch auflöst. Strukturanteile unterschiedlicher Dichte werden im Bild in unterschiedlichen Graustufen wiedergegeben. Da die Dichte von Luft gegenüber der Dichte von Bindemittel, grober Gesteinskörnung und Feinstoffen im Prüfkörper erheblich geringer ist, werden die luftgefüllten Hohlräume sehr gut dargestellt. Das vollständige und hochaufgelöste dreidimensionale Modell des Probekörpers erlaubt mit Hilfe leistungsfähiger Bildverarbeitung schließlich die Bestimmung des Anteils geschlossener und zugänglicher Hohlräume. Eine wichtige Voraussetzung, um die Lücke zwischen der Hohlraumgehaltsbestimmung im Baustoffprüflabor und der für die Akustik wichtigen Information über den Anteil zugänglicher Hohlräume zu schließen. Abbildung 64 zeigt das Ergebnis der Computertomographie eines Bohrkerns mit 100 mm Durchmesser aus einer hohlraumreichen Asphaltdeckschicht. Der Anteil der mit Luft gefüllten Hohlräume beträgt 5,3 Vol.-%.

Der zugängliche Hohlraumgehalt ist eine wichtige Kenngröße, die das Schallabsorptionsvermögen einer Asphaltdeckschicht bestimmt. Der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad lässt sich je-



Abbildung 64: Ergebnis der Computertomographie eines Bohrkerns (Durchmesser 100 mm) aus einer hohlraumbesetzten Asphaltdeckschicht. Links: 3D-Modell; rechts: Schnittbild; hellblau: Luft, gelb: Bindemittel, pink: Gestein; Auflösung in allen drei Raumrichtungen 0,218 mm. Quelle: Müller-BBM

doch erst dann vollständig beschreiben, wenn außer dem Hohlraumgehalt auch Werte für die Schichtdicke, den hohlrauminduzierten Strömungswiderstand und den Strukturfaktor vorliegen. Der Strömungswiderstand der hohlraumbesetzten Deckschicht beeinflusst darüber hinaus und im Zusammenwirken mit dem texturinduzierten Strömungswiderstand im Reifen-Fahrbahn-Kontakt den Anteil der Luftströmungsgeräusche am Reifen-Fahrbahngeräusch. Dabei handelt es sich um eine auf den Einfluss des Schallabsorptionsgrades völlig getrennte und unabhängige Wirkung des hohlrauminduzierten Strömungswiderstands.

Um die Parameterstudie zum Einfluss des Hohlraumgehalts einer Asphaltdeckschicht auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch durchführen zu können ist also eine ganze Reihe von Eingangsgrößen und Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Außerdem müssen für die Simulation realitätsnahe Absolutwerte der einzelnen Parameter vorliegen. Hierzu ist eine gesicherte Datenbasis, die Kenntnis über die Abhängigkeiten der einzelnen Parameter und ein zielführender Ablauf der Modellierung notwendig. Abbildung 65 zeigt das der vorliegenden Studie zugrunde gelegte Ablaufschema der Modellierung. Das Modell, die Eingangsdaten und deren Abhängigkeiten werden in den folgenden beiden Kapiteln beschrieben und diskutiert.

Ausgangspunkt der Parameterstudie ist der im Baustoffprüflabor bestimmte Hohlraumgehalt  $\sigma_{\text{bau.}}$  eines Prüfkörpers (Bohrkerns) aus einer Asphaltdeckschicht. Darüberhinaus steht aus dem Baustoffprüflabor die Fahrbahnoberflächentextur der Deckschicht in Form von parallelen Längsprofilen der Rauigkeitstiefe  $d_{\text{P}}$  zur Verfügung. Durch die Verwendung des im Baustoff-



Abbildung 65: Kenngrößen und Ablaufschema der Parameterstudie zum Einfluss des Hohlraumgehalts von Asphaltdeckschichten auf den Schalldruckpegel des Reifen-Fahrbahn-Geräusches.







prüflabor mit den dort zur Verfügung stehenden Methoden ermittelten Hohlraumgehalts wird der Bezug zur Praxis im Straßenbau hergestellt.

Aus dem bautechnischen Hohlraumgehalt  $\sigma_{\rm bau.}$  wird der für die Modellierung der Deckschicht als Schallabsorber notwendige zugängliche Hohlraumgehalt bestimmt, der hier als akustisch wirksamer Hohlraumgehalt  $\sigma_{\rm ak.}$  bezeichnet wird. Anhand der Datenbasis wird der für eine direkte Messung unzugängliche Strukturfaktor X aus dem Hohlraumgehalt  $\sigma_{\rm ak.}$  abgeleitet. Die akustisch wirksame Schichtdicke d ergibt sich zusammen mit dem Strukturfaktor ebenfalls aus dem zugänglichen Hohlraumgehalt. Dies wird im folgenden Kapitel näher erläutert. Auch der hohlrauminduzierte längenbezogene Strömungswiderstand R' bzw. der für die jeweilige Deckschicht mit bestimmter Dicke spezifische Strömungswiderstand  $R_{\rm s}$  ergeben sich für das Kollektiv hohlraumbesetzter Asphaltdeckschichten bis 16 Vol-% Hohlraumgehalt aus dem zugänglichen Hohlraumgehalt  $\sigma_{\rm ak.}$ .

Aus den Rauigkeitsprofilen der Fahrbahnoberflächentextur wird der texturinduzierte Strömungswiderstand  $R_{s,T}$  bestimmt. Der texturinduzierte Strömungswiderstand ergibt sich aus dem Verhältnis der Druckdifferenz (Überdruck) zwischen dem Luftdruck im Kontaktvolumen zwischen Reifen- und Fahrbahnoberfläche und dem Luftdruck der umgebenden Luft und der mittleren Strömungsgeschwindigkeit der Luft, die notwendig ist, um den Überdruck aufrechtzuerhalten. Der texturinduzierte Strömungswiderstand ist allein durch die Textur der Fahrbahnoberfläche bestimmt und vom hohlrauminduzierten Strömungswiderstand  $R_s$  unabhängig. In das Rechenmodell SPERoN wird schließlich der für die Berechnung des strömungsinduzierten Anteils der Reifen-Fahrbahn-Geräusche notwendige und in der Praxis auch messbare resultierende spezifische Strömungswiderstand  $R_s^*$  eingespeist. Letzterer ergibt sich quasi aus der Parallelschaltung des texturinduzierten mit dem hohlrauminduzierten Strömungswiderstand:

$$R_{\rm s}^* = \frac{R_{\rm s,T} \cdot R_{\rm s}}{R_{\rm s,T} + R_{\rm s}} \tag{4}$$

Für die Berechnung der durch das Schallabsorptionsvermögen einer hohlraumdurchsetzten Deckschicht bewirkten Pegelminderung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches  $\Delta L_{\rm H}$  wird zunächst der Frequenzgang des Schallabsorptionsgrads  $\alpha(f)$  anhand der Parameter  $\sigma_{\rm ak.}$ , X, d und R'bestimmt. Hierfür wird das Absorbermodell nach Mechel eingesetzt (siehe folgendes Kapitel).







Die "Übersetzung" des frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrads in die frequenzabhängige Pegelminderung ist in SPERoN implementiert. Die Pegelminderung  $\Delta L_{\rm H}$  wird von dem von SPERoN ohne Berücksichtigung der schallabsorbierenden Eigenschaften der Deckschicht berechneten CPX-Pegel  $L_{\rm CPX}^*$  subtrahiert, was zur Endgröße  $L_{\rm CPX}$  des Modells führt.

#### Modellierung der Asphaltdeckschicht als Schallabsorber

Das Modell für poröse Absorber von F. P. Mechel [54] ist Grundlage der hier durchgeführten Berechnungen des frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrads und der daraus abgeleiteten absorptionsbedingten Pegelminderung der mit SPERoN berechneten Rollgeräuschpegel. Es sei hier nochmals kurz beschrieben.

Ausgangspunkt ist die durch die aus dem Reifen-Fahrbahn-Kontakt auf die hohlraumdurchsetzte Asphaltdeckschicht abgestrahlte Schallwelle hervorgerufene Bewegung der einzelnen Luftmoleküle, die durch Reibungskräfte im Absorber behindert wird. Deren um den Reibterm  $R_v$  erweiterte Bewegungsgleichung ist

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + R_{\rm v} = \frac{\partial p}{\partial x} \tag{5}$$

mit

$$\rho$$
 Dichte der Luft in kg/m<sup>3</sup>,

v Schallschnelle in m/s,

t Zeit in s,

- *p* Schalldruck in Pa,
- x Ort in m.

Aus der Lösung der Differenzialgleichung leiten sich die komplexen Kenngrößen für einen porösen Absorber, die Ausbreitungskonstante  $\underline{\Gamma}_{a}$  in 1/m und der Wellenwiderstand  $Z_{a}$  in Pa s/m, ab. Bezogen auf typische Materialparameter von porösen Absorbern wie der Strömungsresistanz  $\Xi$  in Pa s/m<sup>2</sup>, dem Hohlraumgehalt  $\sigma_{V}$  (hier auch mit  $\sigma_{ak}$  bezeichnet) in Vol.-%, der thermischen Relaxationszeit  $\tau$ in s und dem Strukturfaktor X ergibt sich für die beiden oben genannten Kenngrößen in normierter Darstellung:

$$\frac{\underline{\Gamma}_{a}}{k_{0}} = j\sqrt{\kappa_{eff}\chi \cdot (1-j/\Omega)}; \quad \frac{\underline{Z}_{a}}{\overline{Z}_{0}} = \frac{1}{\sigma_{v}}\sqrt{\frac{\chi}{\kappa_{eff}} \cdot (1-j/\Omega)}$$
(6)







mit 
$$\Omega = \chi \frac{\omega \rho_0}{\sigma_v \Xi} = \chi \frac{\omega \rho_0 d}{\sigma_v R_s}; \quad \kappa_{eff} = 1 + \frac{\kappa - 1}{1 + j\omega\tau}$$
 (7)

mit

- $k_0$  Wellenzahl von Luft in 1/m,
- $Z_0$  Schallkennimpedanz von Luft in Pa s/m,
- $\omega$  Kreisfrequenz in 1/s,
- $\rho_0$  Dichte der Luft in kg/m<sup>3</sup>,
- $\kappa$  Adiabatenexponent,
- *d* Schichtdicke in m,
- $R_{\rm s}$  Strömungswiderstand in Pa s/m.

Der Hohlraumgehalt  $\sigma_V$  ist definiert als die Summe der offenen, also von außen zugänglichen Porenvolumina  $V_{\text{Poren}}$  zum Gesamtvolumen  $V_{\text{Gesamt}}$  des Absorbers, also:

$$\sigma_{\rm V} = \frac{V_{\rm Poren}}{V_{\rm Gesamt}} = \frac{\frac{1}{dx_0} \int S_p(x) dx}{S_0} \tag{8}$$

mit  $S_{\rm P}$  als Porenfläche und  $S_0$  als Gesamtquerschnittsfläche, jeweils in m<sup>2</sup>. Somit ist die Volumenporosität gleich der mittleren Flächenporosität, was allerdings die Wirklichkeit nicht zwangsläufig mit ausreichender Genauigkeit beschreibt. Um dies auszugleichen, hat Mechel den Strukturfaktor  $\chi$ eingeführt. Der Strukturfaktor ist keine klar definierte Größe und kann für inhomogene Materialien nur schwer ermittelt werden. Der Strukturfaktor dient der zahlenmäßigen Bewertung der Porenstruktur des Absorbers und lässt sich nicht durch Rechnung oder direkt durch Messung ermitteln. Sein Wert wird über die gemessenen Absorber-Kennwerte errechnet. Der Strukturfaktor hat massiven Einfluss auf das Frequenzverhalten des Schallabsorptionsgrads der porösen Deckschicht.

Der komplexe Reflexionsgrad  $\underline{r}$  ergibt sich für senkrechten Schalleinfall dann zu

$$\underline{r} = \frac{\underline{Z}_{a} - Z_{0}}{\underline{Z}_{a} + Z_{0}} \tag{9}$$

$$\alpha = 1 - |\underline{r}|^2 \tag{10}$$

Die Wirksamkeit der absorbierenden Asphaltdeckschicht in Abhängigkeit der Frequenz hängt auch von der Schichtdicke *d* ab. In diesem Zusammenhang muss auch unterschieden werden zwischen der







bautechnischen und der akustisch wirksamen Schichtdicke. Als akustisch wirksame Schichtdicke wird hier die Dicke der Teilschicht bezeichnet, die für Schallwellen zugänglich ist. Hohlraumdurchsetzte Asphaltdeckschichten weisen oftmals keine gleichmäßige Verteilung der Hohlräume über die gesamte (bauchtechnische) Schichtdicke auf. Dies führt dazu, dass die akustisch wirksame Schichtdicke meistens geringer ist als die bautechnische. Dies hängt beispielsweise mit von unten aufgestiegenem Bindemittel, mit ungleichmäßiger bautechnischer oder verkehrlich bedingter Verdichtung oder auch mit Verschmutzungen zusammen, die sich in der Deckschicht absetzen.

Die Beteiligung der (akustisch wirksamen) Schichtdicke d am Zustandekommen der Schallabsorption erfolgt über den spezifischen Strömungswiderstand  $R_s$  in Pa s/m der Deckschicht. Der spezifische Strömungswiderstand ist auch diejenige Größe, die im akustischen Labor neben dem Schallabsorptionsgrad an Probekörpern (Bohrkerne) direkt gemessen werden kann. Der Betrag der in die Berechnung des für die Schallabsorption ausschlaggebenden Wellenwiderstands  $Z_a$  eingehenden Strömungresistanz  $\Xi$  in Pa s/m<sup>2</sup> entspricht einem längenbezogenen Strömungswiderstand. Dieser ergibt sich aus dem spezifischen, also dem tatsächlichen Strömungswiderstand  $R_s$  durch Verknüpfung mit der Schichtdicke d in m zu

$$\Xi = \frac{R_{\rm s}}{d} \tag{11}$$

Über diese Beziehung kommt der Zusammenhang des Frequenzverhaltens der Schallabsorption mit der Schichtdicke zustande.

#### Eingangsdaten

Die Parameterstudie zum Hohlraumgehalt basiert auf einer Vielzahl von systematischen Erfassungen bautechnischer wie akustischer Kenngrößen an ein und dem selben Kollektiv von Bohrkernen aus Betriebsstrecken mit Asphaltbelägen auf Autobahnen. Bei den Asphaltbelägen handelt es sich um hohlraumdurchsetzte Deckschichten unterschiedlicher Mischgutzusammensetzung und unterschiedlichen Hohlraumgehaltes, aber bei allen um solche mit 8 mm oder 11 mm Größtkorn. Insgesamt standen 75 Bohrkerne zur Verfügung, von denen 57 auch computertomographisch untersucht wurden.

Für diese 57 Bohrkerne stehen die nachfolgend aufgeführten Parameter und Parameterwerte zur Verfügung. Die Bohrkerne mit 150 mm Durchmesser für die bautechnischen Untersuchungen wurden in unmittelbarer Nähe zu den Entnahmestellen für die akustisch zu untersuchenden Bohrkerne mit 100 mm Durchmesser gezogen.



Abbildung 66: Funktionale Zusammenhänge zwischen den bautechnischen und akustischen Kenngrößen für die Berechnung des Schallabsorptionsgrads.

Aus dem Baustoffprüflabor (Bohrkerndurchmesser 150 mm):

Р	Raumdichte des Bohrkerns in kg/m $^3$
ρ	Rohdichte des Bohrkerns, in kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_{ m bau.}$	Hohlraumgehalt, bestimmt nach ALP A-StB, Teil 1 [55],
	Wertebereich 9,0 26,9 Vol%
$\sigma_{ m ak.}$	zugänglicher Hohlraumgehalt durch Computertomographie,
	Wertebereich 2,7 23,0 Vol%
d	Schichtdicke im m

Aus dem Akustiklabor (Bohrkernduchmesser 100 mm):

lpha Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit der Frequenz

R<sub>S</sub> spezifischer Strömungswiderstand in Pa s/m

Aus den Laborwerten lassen sich nun die für die Durchführung der Parameterstudie notwendigen Größen bestimmen. Die funktionalen Zusammenhänge der für das Absorbermodell wichtigen Parameter  $\Xi$  und X mit dem bautechnischen Hohlraumgehalt  $\sigma_{\text{bau.}}$  sind in Abbildung 66 zusammenfassend dargestellt. Die in der Abbildung grau markierten Flächen kennzeichnen den Wertebereich der einzelnen Größen für den hier festgelegten Wertebereich des bautechnischen Hohlraumgehalts  $\sigma$  bau. von 8 bis 16 Vol.-%. Der Wert von 16 Vol.-% markiert das obere Ende der Hohlraumgehalte semidichter Beläge. Bei Werten unter 8 Vol.-% ist davon auszugehen, dass die Deckschicht praktisch dicht ist und keine akustisch relevanten Hohlräume mehr aufweist. Die Parameterstudie schließt deshalb am unteren Rand bei 8 Vol.-% ab.







Wie aus Abbildung 66 hervorgeht, ergeben sich bei bautechnisch bestimmten Hohlraumgehalten zwischen 8 und 16 Vol.-% Werte des zugänglichen, akustisch relevanten Hohlraumgehaltes von knapp unter 3 Vol.-% bis 9 Vol.-%. Der akustisch wirksame Hohlraumgehalt liegt also immer um einige Prozentpunkte tiefer als der bautechnische Hohlraumgehalt, was gleichzeitig auch bedeutet, dass Asphaltdeckschichten mit einem bautechnischen Hohlraumgehalt von weniger als 8 Vol.-% praktisch als akustisch dicht und damit als nicht absorbierend bezeichnet werden können.

Bohrkerne, die in dem genannten Hohlraumgehaltsbereich liegen, weisen dann eine Strömungsresistanz von rund 60.000 bis 320.000 Pa s/m<sup>2</sup> auf. Übersetzt auf eine typische Dicke der Asphaltdeckschicht von 4 cm ergeben sich damit spezifische Strömungswiderstände  $R_s$  von rund 2.400 bis 12.900 Pa s/m. Der Strömungswiderstand in der Deckschicht ist also nicht unabhängig vom Hohlraumgehalt, weshalb beide Parameter nicht unabhängig voneinander variiert werden können. Eine Änderung des Hohlraumgehaltes  $\sigma$  erfordert auch immer eine entsprechende Anpassung der Strömungsresistanz  $\Xi$  im Modell.

Wie bereits erwähnt stellt der Strukturfaktor eine nicht messbare Größe des Absorbers dar. Er kommt aber sehr wohl zum Ausdruck im Verlauf des Frequenzgangs des gemessenen Schallabsorptionsgrades, da er Lage und Abstand der lokalen Maxima des Absorptionsgrades entlang der Frequenzachse bestimmt. Der Strukturfaktor ist ein "frei anpassbarer Parameter" [56], der zum Abgleich des Absorbermodells an den gemessenen Absorptionsfrequenzgang dienen kann. Er wird hier anhand des Vergleichs des berechneten Absorptionsfrequenzgangs mit dem gemessenen so abgeglichen, dass beide sowohl nach Magnitude als auch nach Frequenzverlauf möglichst gut übereinstimmen.

Außerdem ist der hier eingesetzte Strukturfaktor  $\Xi$  auch ein Konglomerat aus Strukturfaktor in Mechel'schem Sinne und akustisch wirksamer Schichtdicke. Mit abnehmendem Hohlraumgehalt ist --wie weiter oben beschrieben --- bei semiporösen Asphaltdeckschichten davon auszugehen, dass auch die akustisch wirksame Schichtdicke abnimmt und ihrerseits zu einer Verschiebung der Frequenz der Absorptionsmaxima zu höheren Frequenzen führt (genauso wie dies auch der abnehmende Strukturfaktor tut). Der hier benutzte Strukturfaktor dient zur Anpassung des Frequenzverhaltens des Modells an die Realität und repräsentiert auch das Verhältnis der bautechnischen zur akustisch wirksamen Schichtdicke. Er bildet die aus Abnahme des Strukturfaktors und Abnahme der akustisch wirksamen Schichtdicke resultierende Zunahme der Frequenz der Absorptionsmaxima ab. Auch der Strukturfaktor ist bei Asphaltdeckschichten zwischen 3 und 9 Vol.-% zugänglichem Hohlraumgehalt keine vom Hohlraumgehalt unabhängige Größe. Er variiert zwischen 1.0 und 5.0. Nur bei kleinen Hohlraumgehalten entspricht er also dem Strukturfaktor typischer bauakustischer Absorbermaterialien







Bundesamt f	ür Stra	issen AS	TRA
-------------	---------	----------	-----

Parameter- konstellation	$\sigma_{ m bau.}$ Vol%	$\overset{d}{cm}$	$\sigma_{ m ak.}$ Vol%	$\Xi$ Pa s/m $^2$	$R_{ m S}$ Pa s/m	X 1
1	8,0	3,5	2,9	321.239	11.243	1,00
2	9,0	3,5	3,5	273.337	9.567	1,03
3	10,0	3,5	4,1	229.485	8.032	1,13
4	11,0	3,5	4,8	190.106	6.654	1,31
5	12,0	3,5	5,5	155.391	5.439	1,56
6	13,0	3,5	6,3	125.325	4.386	1,88
7	14,0	3,5	7,1	99.733	3.491	2,25
8	15,0	3,5	8,0	78.312	2.741	2,66
9	16,0	3,5	8,9	60.673	2.124	3,10

Tabelle 38: Parameter für verschiedene Absorptionsgrade von Asphaltdeckschichten mit 8 mm oder 11 mm Größtkorn und einer typischen Dicke von 3,5 cm.

wie Stein- oder Glaswolle und weist auf senkrecht zur Oberfläche stehende luftdurchsetzte Kanäle hin. Der deutlich größere Strukturfaktor bei höheren Hohlraumgehalten weist hingegen darauf hin, dass die Hohlräume in den Querschnittebenen zunehmend auch parallel zur Oberfläche miteinander vernetzt sind.

In einem Wertebereich von 8 Vol.-% bis 16 Vol.-% für den bautechnischen Hohlraumgehalt ergeben sich mit den beschriebenen wechselseitigen Parameterabängigkeiten die in Abbildung 67 dargestellten Frequenzgänge des Schallabsorptionsgrads. Die Parameterkonstellationen, die der Kurvenschar zugrunde liegen, sind in Tabelle 38 eingetragen. Die Parameterwerte gelten für die mittlere Schichtdicke von SMA S3 Belägen von 3,5 cm.

Zum Praxisvergleich der Ergebnisse der Parameterstudie stehen im Forschungsvorhaben Texturmessungen und Bohrkerndaten von Asphaltdeckschichten auf österreichischen Schnellstraßen mit 8 mm Größtkorn zur Verfügung. Die Deckschichten sind unterschiedlich alt und weisen an den verschiedenen Messstellen unterschiedliche Hohlraumgehalte auf. Die Deckschichten werden herangezogen, um den Abgleich zwischen Fahrbahnoberflächentextur und dem ebenfalls für die Modellierung benötigten texturinduzierten Strömungswiderstand  $R_{s,T}$  herzustellen. Da für diese Oberflächen sowohl die bautechnischen Hohlraumgehalte als auch Texturdaten zur Verfügung stehen, können die Werte sowohl des hohlrauminduzierten als auch des texturinduzierten Strömungswiderstands berechnet und zu dem für SPERoN maßgeblichen resultierenden Strömungswiderstand  $R_s^*$  zusammengefasst werden. Dies ergibt dann einen Eingangsdatensatz realer Fahrbahnbeläge.

Die Fahrbahnabschnitte der österreichischen Strecken, deren Alter, Hohlraumgehalte und MPD-



Abbildung 67: Schallabsorptionsgrad  $\alpha$  und hohlrauminduzierte Pegelminderung  $\Delta L_{\rm H}$  in Abhängigkeit der Frequenz f bzw. Terzmittenfrequenz  $f_{\rm T,m}$  für die in Tabelle 38 definierten Parameterkonstellationen. Die eingekreisten Nummern beziehen sich auf die Nummern der Parameterkonstellationen in Tabelle 38

FFG





Bundesamt für Strassen ASTRA



Straße	BK-Nr.	A09	A09	A09	S06	S06	S06	S06
Alter, Jahre		5	13	14	12	2	7	1
Stationierung		km72+	km113-	km113+	km72+	km96,7+	km100+	km100-
	b1	5,7	6,1	9,9	-	5,9	4,9	5,8
	b2	5,5	4,5	8,7	-	6,8	3,9	6,3
$\sigma_{ m bau.}$ Vol%	b3	6,1	5,8	10,0	-	6,0	4,7	6,5
	b4	8,6	6,5	9,9	-	7,5	3,8	5,6
	b5	5,5	6,5	10,4	-	3,6	4,8	4,6
	b6	7,9	8,6	11,2	4,7	7,0	6,8	4,4
	b7	9,3	8,7	11,4	9,1	8,5	6,0	3,7
	b8	7,7	6,9	11,8	7,2	8,0	6,2	5,2
MPD, mm		0,72	1,09	0,67	0,71	0,85	0,67	0,60
$R_{ m s,T}$ , Pa s/m		53.500	12.025	77.791	72.577	32.164	107.227	62.003

Tabelle 39: Kennwerte von Bestandsstrecken mit Asphaltdeckschichten mit 11 mm Größtkorn in Österreich. BK = Bohrkern; Bohrkernentnahmestellen b1 bis b5 im 1. Fahrstreifen, b6 bis b8 im Standstreifen. Das Vorzeichen der Stationierung gibt die Fahrtrichtung an. Hohlraumgehalte von Bohrkernen mit potentiell akustisch wirksamen Hohlräumen sind hervorgehoben. *MPD* und  $R_{s,T}$  nur 1. Fahrstreifen.

Werte sind in Tabelle 39 eingetragen. Die MPD-Werte wurden anhand der 20 m langen Texturprofile bestimmt, die mit einer Auflösung von 0,1 mm in mehreren parallelen Spuren entlang der Radrollspur mit einem 3D-Kamerasystem während den CPX-Messfahrten aufgenommen wurden und deshalb nur für den 1. Fahrstreifen zur Verfügung stehen. 2 m lange Stichproben dieser Texturprofile sind in Abbildung 68 dargestellt. In jedem der Diagramme liegen sechs parallele Profile, die für die Berechnungen mit SPERoN verwendet werden, hintereinander. Wie Tabelle 39 entnommen werden kann, weist praktisch nur die Deckschicht auf der A09 (Pyhrn-Autobahn) bei km 113 in Richtung Graz Hohlraumgehalte auf, die darauf schließen lassen, dass sie wesentliche Anteile zugänglicher Hohlräume enthält. Im Anschluss an Abbildung 68 wird die Ermittlung der texturinduzierten Strömungswiderstände  $R_{s,T}$ , deren Mittelwerte ebenfalls in Tabelle 39 angegeben sind, beschrieben.

Die für die Modellberechnungen notwendigen texturinduzierten Strömungswiderstände  $R_{s,T}$  ergeben sich aus den *MPD*-Werten der den Berechnungen zugrunde gelegten Texturprofile. Die funktionale Abhängigkeit des texturinduzierten Strömungswiderstandes für Asphaltdeckschichten mit 8 mm und 11 mm Größtkorn vom *MPD*-Wert ist in Abbildung 69 dargestellt. Der Zusammenhang ergibt sich aus dem Eindringen von Rauigkeitsspitzen der Fahrbahnoberfläche in die Lauffläche des Reifens und der dadurch hervorgerufenen Veränderung der Querschnitte der von Luft durchströmten "Kanäle" im Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Durch permanente zeitliche Veränderung des verdrängten Luftvolu-



Abbildung 68: 2 m lange Texturprofile aus den Texturmessungen im 1. Fahrstreifen. Jedes Diagramm zeigt die sechs parallelen Texturprofile für SPERoN



Abbildung 69: Texturinduzierter Strömungswiderstand  $R_{s,T}$  für Asphaltdeckschichten mit 8 mm und 11 mm Größtkorn in Abhängigkeit der Mittleren Profiltiefe (Mean Profile Depth) *MPD*.

mens während des Rollvorgangs kommt es zur Beschleunigung der Luft in den Kanälen und zur Geräuschentstehung. Die Fahrbahnoberflächentextur legt die Querschnitte der luftdurchströmten Kanäle im Reifen-Fahrbahn-Kontakt sowohl in Abrollrichtung als auch in Querrichtung fest [57]. Ein Maß für die Durchströmbarkeit des Hohlraums zwischen Reifen- und Fahrbahnoberfläche ist der Strömungswiderstand  $R_{s,T}$  in diesem Volumen. Der Strömungswiderstand ergibt sich aus dem Verhältnis der Druckdifferenz  $\Delta p$  zwischen dem Luftdruck in diesem Volumen und dem Umgebungsluftdruck, die notwendig ist, um eine bestimmte Strömungsgeschwindigkeit v aufrechtzuerhalten. Der Zusammenhang mit der Mittleren Profiltiefe MPD ergibt sich aus Vergleichen einer Vielzahl von Messungen der Textur und des Strömungswiderstandes der Fahrbahnoberfläche einerseits und dem Vergleich gemessener mit berechneten Strömungswiderständen andererseits.

In Abbildung 70 sind die Spektren der in Abbildung 68 dargestellten Texturprofile aufgetragen. Die Abbildung enthält auch die sich ergebenden *MPD*-Werte und Strömungswiderstände  $R_{s,T}$ . Die Werte stellen arithmetische Mittelwerte über alle 100 mm langen Teilabschnitte der sechs 2 m langen und parallel in einem Querabstand von 20 mm zueinander angeordneten Texturprofile dar.

#### Ergebnisse

Die Fahrbahnabschnitte auf der A09 und S06 weisen im 1. Fahrstreifen Hohlraumgehalte  $\sigma_{\text{bau.}}$ zwischen 3,8 Vol.-% und 10,0 Vol.-% auf. In Abbildung 71 sind die Hohlraumgehalte, mittleren MPD-Werte, die berechneten maximalen Schallabsorptionsgrade  $\alpha$  und Frequenzen des ersten Absorptionsmaximums sowie die resultierenden Strömungswiderstände  $R_s^*$  in Abhängigkeit des Alters



Abbildung 70: Mittlere Texturspektren, MPD- und  $R_{s,T}$ -Werte im 1. Fahrstreifen der sieben gemessenen Fahrbahnabschnitte auf der A09 bzw. S06 in Österreich





aufgetragen.

Aus den Darstellungen sind keine systematischen funktionalen Zusammenhänge der Kenngrößen mit dem Deckschichtalter erkennbar. Allerdings ist auch nicht bekannt, welche Anfangswerte die Größen direkt nach Einbau der Deckschichten hatten. Die Hohlraumgehalte der Bohrkerne von der A09 bei km 113+ weisen die höchsten Werte auf, trotz des mit 14 Jahren höchsten Alters der sieben miteinander verglichenen Deckschichten.

Aufschlussreich ist jedoch, wie sich die berechneten Rollgeräuschpegel vor dem Hintergrund der verschiedenen Hohlraumgehalte und deren Variation darstellen. In Abbildung 72 sind die mit SPERoN berechneten CPX-Pegel für den P-Reifen mit 80 km/h  $L_{CPXP,80km/h}$  in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz  $f_{T,m}$  dargestellt. In dieser Abbildung zunächst mit den originalen Hohlraumgehalten der Deckschichten wie sie im Mittel an den Bohrkernen festgestellt wurden. Die rot dargestellten Säulen geben die Terzpegel des Reifen-Fahrbahn-Geräusches ohne Berücksichtigung der Pegelminderung aufgrund von Schallabsorption bzw. aufgrund des Hohlraumgehaltes wieder. Die in blau dargestellten Säulen Säulen beinhalten dagegen diese frequenzabhängige hohlrauminduzierte Pegelminderung  $\Delta L_{H}$ . Die resultierende Pegelminderung des Gesamtpegels ist als Zahlenwert in dB(A) in roter Farbe eingetragen. Zur Berechnung der Schallabsorption wurde in allen Fällen von einer Schichtdicke von 3,5 cm ausgegangen.

Die Abbildung zeigt, dass das Reifen-Fahrbahn-Geräusch von den niedrigen Hohlraumgehalten und daraus resultierenden geringen Pegelminderungen kaum beeinflusst ist. Die Pegelminderungen betragen, bezogen auf den Gesamt-A-Pegel, 0,1 dB(A) bis 0,6 dB(A). Diese geringen Pegelminderungswerte sind nicht nur den niedrigen Hohlraumgehalten, sondern auch der Tatsache geschuldet, dass das Spektrum des Schallabsorption aufgrund des niedrigen Strukturfaktors *X* nach hohen Frequenzen von deutlich über 1 kHz verschoben ist und damit in dem für die Reifen-Fahrbahn-Geräusche wichtigen mittleren Frequenzbereich zwischen 800 Hz und 1.600 Hz kaum Wirkung entfaltet. Die höchsten Pegelminderungswerte kommen für den Fahrbahnabschnitt der A09 bei km 113+ zustande. In zwei weiteren Schritten wurde nun der Hohlraumgehalt zu größeren Werten hin angepasst. Der maximale Hohlraumgehalt ergibt sich im Originaldatensatz zu rund 10 Vol.-% (A09 km 113+). Im ersten Schritt wurden alle Hohlraumgehalte mit einem Faktor 1,3 angehoben, so dass sich der maximale Hohlraumgehalt zu 13 Vol.-% ergibt. Im zweiten Schritt wurden alle Ohlraumgehalt zu 13 Vol.-% ergibt. Im zweiten Schritt wurden alle Ohlraumgehalt zu 16 Vol.-% ergibt. Abbildung 73 zeigt die Hohlraumgehalte der drei Berechnungsfälle im Vergleich. Die Texturprofile wurden für die SPERoN-Berechnungen jeweils unverändert beibehalten.





Abbildung 71: Hohlraumgehalte  $\sigma_{\text{bau.}}$ , mittlere MPD-Werte, maximale Schallabsorptionsgrade  $\alpha$ , Frequenzen des ersten Absorptionsmaximums und Strömungswiderstände  $R_{\text{s}}^*$  in Abhängigkeit des Alters im 1. Fahrstreifen der sieben gemessenen Fahrbahnabschnitte auf der A09 bzw. S06 in Österreich.



Abbildung 72: Terzspektren und Gesamtpegel  $L_{\text{CPXP},80\text{km/h}}$  des simulierten Reifen-Fahrbahn-Geräusches. Rote Säulen (teilweise verdeckt): ohne Berücksichtigung, blaue Säulen mit Berücksichtigung der Hohlraumgehalte der Deckschichten.



Abbildung 73: Hohlraumgehalte  $\sigma_{bau.}$ . Links: original; Mitte: Spreizung mit Faktor 1,3; rechts: Spreizung mit Faktor 1,6.



Abbildung 74: Terzspektren und Gesamtpegel  $L_{\text{CPXP},80\text{km/h}}$  des Reifen-Fahrbahn-Geräusches. Rote Säulen (teilweise verdeckt): ohne Berücksichtigung, blaue Säulen mit Berücksichtigung der mit Faktor 1,3 gespreizten Hohlraumgehalte der Deckschichten.

In Abbildung 74 und Abbildung 75 sind die Rollgeräuschspektren für die Spreizung der Hohlraumgehaltswerte mit Faktor 1,3 bzw. 1,6 dargestellt. Sie zeigen, dass das tendenzielle Anheben der Hohlraumgehalte bis maximal 16 Vol.-% zu einer Verbesserung der Rollgeräuschpegel von bis zu -3 dB(A) führt. Mit der Spreizung um Faktor 1,6 bewirken die erhöhten Hohlraumgehalte vor allen Dingen auch eine Verschiebung des Absorptionsspektrums in den mittleren Frequenzbereich. Im Falle des Fahrbahnabschnittes A09 km 113+ ergibt sich bei 1 kHz dadurch bereits eine Pegelminderung von 6,4 dB(A).







Bundesamt für Strassen ASTRA



Abbildung 75: Terzspektren und Gesamtpegel  $L_{\text{CPXP},80\text{km/h}}$  des Reifen-Fahrbahn-Geräusches. Rote Säulen (teilweise verdeckt): ohne Berücksichtigung, blaue Säulen mit Berücksichtigung der mit Faktor 1,6 gespreizten Hohlraumgehalte der Deckschichten.





**FFG** Forschung wirkt.

## 5.4 Fahrbahnabsorptionsmessungen

Wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben wurden an den Messstellen der 3D-Textur ebenfalls Messungen der Schallabsorption durchgeführt. In Abbildung 76 sind dazu zwei Beispiele der frequenzabhängigen Absorptionskurven dargestellt. Die beiden Beispiele wurden ausgewählt, da sie die Spannweite der vorhandenen Bohrkerndaten des Datensatzes abbilden (vgl. Tabelle 39). Hier ist vor allem zu beachten, dass die Messstelle mit dem höchsten Hohlraumgehalt am Bohrkern ein Alter von 14 Jahren aufweist ("A09 km113+", Hohlraumgehalt ca. 9,8 Vol.%). Im Gegensatz dazu ist an der Messstelle "S06 km100-" – bei einem Alter von einem Jahr – ein Hohlraumgehalt von 5,8 Vol.-% erhoben worden. Diese Unterschiede zeigen sich auch in den Absorptionskurven, die ab ca. 1 kHz zu trennen beginnen. Die hohlraumreichere Messstelle zeigt hier ein konstant höheres Schallabsorptionsverhalten, wobei sich die Position des Maximums und der Absorptionsverlauf ungefähr mit der Kurve des theoretisch vorhergesagten Schallabsorptionsgrades in Abbildung 67 deckt. Quantitative Werteaussagen sind aber aufgrund des neu entwickelten Messverfahrens aktuell nicht zielführend. Während die Messergebnisse durch Wiederholungsmessungen und Abschätzungen des Signal-Rauschabstandes validiert wurden, ist für eine Absicherung der Methode ein deutlich erweiterter Messumfang notwendig.

In Abbildung 77 ist der Zusammenhang der hochfrequenten Rollgeräuschanteile mit den Absorptionsmessungen (dargestellt als Schallreflexion im 1000 Hz- bzw. 1250 Hz-Terzband) gezeigt. Es ist ein geringer Einfluss im 1000 Hz-Terzband zu erahnen (lineares Einparameter-Modell mit R<sup>2</sup> = 0,43, Standardfehler = 0,9 dB), allerdings ist der Wertebereich der in-situ-Schallreflexion sehr gering. Dies muss auch im Zusammenhang mit der grundsätzlichen Hohlraumgehalts-Variation der im Datensatz vorhandenen Deckschichten gesehen werden. Wo ursprünglich ein deutlicher Einfluss des angestrebten erhöhten Hohlraumgehaltes der Deckschichten des SMA S3 erwartet wurde, zeigt bereits die Modellierung in Abschnitt 5.2 kaum Unterscheidungen zwischen den betrachteten Deckschichttypen SMA S1 und SMA S3. In Kombination mit den Stichproben-Erhebungen der Bohrkerne weist dies auf einen nur geringen Einfluss des typisch erzielten Hohlraumgehaltes der SMA S3-Deckschichten in Österreich hin. Auch die Modellierungen mittels SPERoN deuten darauf hin, dass die Hohlraumgehalte, die im für die Modellierung verwendeten Datensatz zur Verfügung stehen, keine hohe Auswirkung auf die Rollgeräuschemissionen ermöglichen.

Die Ergebnisse der Bohrkerne, die an 7 Messstellen im Zuge eines parallel laufenden Projektes in Hinblick auf ihren Hohlraumgehalt untersucht wurden und die einen Wertebereich von 4,4 bis 9,8 % umfas-



Abbildung 76: Beispiele der in-situ-Schallabsorptionsmessungen; dargestellt sind die frequenzabhängigen Absorptionskurven zweier ausgewählter Messtrecken, an denen Bohrkerndaten vorliegen.

sen, zeigen weder mit den Schallabsorptionsmessungen noch mit den CPX-Rollgeräuschmessungen (noch mit ebenfalls durchgeführten statistischen Vorbeifahrtsmessungen an den Messquerschnitten) einen statistisch signifikanten Zusammenhang. Ob dies auf den akustisch nicht signifikant Wirkung erzielenden Hohlraumgehalt, die sehr punktuelle Aussage der Bohrkerndaten oder die vorliegende experimentelle Messmethode der in-situ-Schallabsorption zurückzuführen ist, kann hier nicht beantwortet werden.

Nichtsdestotrotz wurde die in Abschnitt 5.2.2 erstellte hochfrequente Modellierung erneut unter Berücksichtigung der Schallreflexion durchgeführt. Eine Modellierung auf Basis des Wechselwir-



Abbildung 77: hochfrequente Rollgeräuschanteile im Vergleich mit dem Schallreflexionsverhalten der Messstellen im 1000 Hz- (links) und 1250 Hz-Terzband.







kungsterms zwischen der Dichte und der mittleren Höhe lokaler Maxima sowie der Schallreflexion bei 1250 Hz (Tabelle 40) führt zu einem Bestimmtheitsmaß von 0,7 bei einem Standardfehler von 0,7 dB, der Deckschichttyp geht im Gegensatz zu Abschnitt 5.2.2 nicht mehr ein. Die Berücksichtigung des – in der Abbildung weniger relevant erscheinenden – Terzbandes von 1250 Hz erfolgt hier aufgrund der etwas höheren statistischen Leistungsgrößen im Vergleich zur Schallreflexion bei 1 kHz, die sich aus dem Zusammenspiel mit dem zweiten Einflussparameter ergibt. Um ein geringes hochfrequentes Rollgeräusch zu erhalten, fordert der Wechselwirkungsterm dabei eine hohe Anzahl lokaler Maxima bei gleichzeitig großer Höhe dieser sowie eine geringe Schallreflexion der Fahrbahndeckschicht, die auf zugängliche akustisch wirksame Hohlräume deutet. Die Modell-Leistungskennwerte des Bestimmtheitsmaßes und des Standardfehlers sind hierbei leicht gegenüber den vorangehenden Modellansätzen verbessert.

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t )
(Intercept)	78.714	5.393	14.59	< 2e-16
tb_1250	48.113	17.642	2.73	9.14e-03
hmax:nmax_rel	-5.59e-01	0.056	-10.05	5.77e-13

Tabelle 40: Ergebnisse der linearen Regression - hochfrequentes Rollgeräusch unter Berücksichtigung der Schallreflexion

## 5.5 Zusammenfassung

Um den Einfluss der verschiedenen Deckschichteigenschaften auf das Rollgeräusch und dessen Alterung zu bestimmen wurden basierend auf den 3D-Texturmessungen statistische Modelle erstellt. Diese sollen relevante Einflussparameter identifizieren, die sich negativ auf die Rollgeräuschemissionen auswirken. Sie beziehen sich dabei in erster Linie auf die Obeflächentextur, die den durch Reifenvibrationen hervorgerufenen Rollgeräuschanteil beschreibt.

Um die Auswirkung des Hohlraumgehaltes zu untersuchen, wurden – basierend auf den 3D-Texturmessungen – Simulationen mittels SPERoN durchgeführt. Hier wurde auch eine Parameterstudie zum Hohlraumgehalt durchgeführt, um dessen zu erwartenden Einflussbereich und Wirkungsumfang zu beschreiben. Ebenfalls erfolgten in-situ-Messungen der Schallabsorptionseigenschaften der Fahrbahndeckschichten, die mit den SPERoN-Simulationen verglichen abschließend in die statistische Modellierung miteinbezogen wurden.

In Hinblick auf die Modellierung basierend auf der Oberflächentextur zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Dichte lokaler Maxima der Textur, die ebenfalls eine leichte Altersabhängigkeit zeigt. Diese







Wirkung findet dabei vor allem im tief- und mittelfrequenten Rollgeräuschbereich statt und kann auf die vermehrten Reifenvibrationen bei geringerer Kontaktfläche zurückgeführt werden. Betrachtet man diese Zusammenhänge auch unter Berücksichtigung der Altersabhängigkeit der Parameter in Abschnitt 4, erklärt die direkte Parameter-Modellierung mehr Varianz des Datensatzes als das Alter der Deckschicht an sich. Interessant ist hier auch die – vor allem hochfrequent – unerwartet geringe Trennung der Deckschichttypen SMA S1 und SMA S3, die sich im weiteren durch den verhältnismäßig niedrigen Hohlraumgehalt der SMA S3 erklärt.

Zur Betrachtung des Hohlraumgehaltes zeigen die SPERoN-Simulationen einen relevanten akustischen Einfluss ab ca. 10 Vol.-%. In Kombination mit den zur Verfügung gestellten Bohrkerndaten erklärt dies die geringe akustische Unterscheidung der SMA S1- und SMA S3-Deckschichten. Während in der ersten Projektphase von einem merklichen Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die SMA S3-Messstellen (sowie eines grundsätzlich höheren Wertebereiches) ausgegangen wurde, ist aus der guten Genauigkeit der auf den 3D-Texturen basierenden statistischen Modellierung abzuleiten, dass der im Datensatz umfasste Hohlraumgehalt nur geringe Auswirkungen auf die Rollgeräuschemissionen zeigt. Auch die frequenzabhängigen Rollgeräuschbereiche, in denen die Deckschichten grundsätzlich trennendes Verhalten zeigen, sind gering. Nur im hochfrequenten Bereich zeigen die SMA S3-Messstellen etwas geringere Rollgeräuschpegel. Auch die lediglich auf den 3D-Texturen basierenden statistische Modelle zeigen nur im Hochfrequenten geringere Leistungsparameter, was auf nicht erklärende Anteile in der Modellierung schließen lässt.

Die durchgeführten in-situ-Schallabsorptionsmessungen zeigen trotz ihrer geringen Spreizung einen signifikanten Einfluss auf die hochfrequenten Rollgeräuschanteile sowie eine leichte Verbesserung des statistischen Modellansatzes. Dabei stimmen auch die gemessenen Terzband-Einflussfaktoren in der Modellierung mit den theoretisch erwarteten beschreibenden Parametern überein. Hier scheint die Spreizung der akustisch wirksamen Hohlraumgehalte im Datensatz ausreichend, um in Kombination mit den SPERoN-Simulationen Aussagen zur akustischen Wirksamkeit tätigen zu können. Dabei ist zu beachten, dass die in-situ-Messungen ein neues Messverfahren skizzieren, das noch einer weiteren ausführlichen Validierung unterzogen werden muss.

Bundesministerium

digitale Infrastruktur

für Verkehr und





# 6 PROBEPLATTEN UND STABILISIERUNGSANSÄTZE

Neben den in situ aufgenommenen Oberflächeneigenschaften von Asphaltflächen unterschiedlichen Alters wurde das Alterungsverhalten auch durch Laborversuche abgebildet. Dazu wurden Asphalt-Probeplatten im Labor des Instituts für Straßenwesen der TU Braunschweig hergestellt und künstlich gealtert. Hier wurden insgesamt drei Durchläufe an Probeplatten durchgeführt:

- einfache Standard-Probeplatten der Typen SMA S1 und SMA S3: der erste Durchlauf an Probeplatten hatte zum Ziel, die Herangehensweise bzw. grundlegende Methodik zu validieren.
   Es wurden 12 Probeplatten hergestellt, die unterschiedlich stark gealtert wurden.
- schrittweise gealterte Probeplatten der Typen SMA S1, SDA 8 und SDA 4: der zweite Durchlauf an Probeplatten fokussierte auf die Veränderungen der Oberflächeneigenschaften der Probeplatten. Die Proben wurden daher schrittweise gealtert und vermessen.
- Probeplatten mit experimenteller Bauweise der Typen SMA S1, SDA 8 und SDA 4: der letzte Durchlauf an Probeplatten diente der Untersuchung einer veränderten Bauweise der Asphalt-Deckschichttypen. Auch hier wurden die Proben schrittweise gealtert und vermessen.

Die Herstellungs- und Alterungsmethode der Asphalt-Probeplatten wird wie auch die verschiedenen Messmethoden in den folgenden Abschnitten beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Messungen präsentiert und die Veränderungen in den Oberflächeneigenschaften diskutiert.

## 6.1 Herstellung und künstliche Alterung der Asphalt-Probeplatten

Es wurden insgesamt 6 unterschiedliche Asphaltvarianten im Labor hergestellt (Tabelle 41):

- SMA 11 S1 (normale + optimierte Variante),
- SMA 11 S3,
- SDA-4 (normale + optimierte Variante),
- SDA-8 (normale + optimierte Variante).

Zur Herstellung der Asphalte wurde ein Gegenlauf-Zwangsmischer eingesetzt. Beim Gegenlauf-Zwangsmischer (Abbildung 78) handelt es sich um einen Zwangsvermischer. Der etwa 75 dm<sup>3</sup> große Kessel rotiert gegenläufig zu der zentrisch angeordneten Welle, an der das Mischwerkzeug







	SMA 11 S1	SMA 11 S3	SDA-4	SDA-8	
Gestein (Füller)	Kalksteinmehl				
Gestein (Brechsand, Splitt)	Gat	obro	Gabbro, Ryolith		
Bindemittel	48/80-65	A (OMV)	25/55-55	5A (Total)	
Bindemittel (optimierte Variante)	10/40-65A (Total)	-	10/40-65	5A (Total)	
Bindemittelgehalt [M%]	6,0	5,4	6,0	5,8	
Faserstoffe [M%]	0,3	0,3	-	-	
Hohlraumgehalt Marshall-Prüfkörper [Vol%]	3,5	12	14	12	
Hohlraumgehalt Schicht [Vol%]	1,5 - 5,0	6,0 - 12,0	11,0 - 17,0	9,0 - 17,0	

Tabelle 41: Kennwerte zur Herstellung der Asphalte (Sollvorgabe bzw. Mittelwerte aus den Mischungen)

befestigt ist. Dadurch bewegt sich das Mischgut "zwangsweise" zwischen den sich drehenden Mischschaufeln, womit eine gleichmäßige Vermischung der Materialien sichergestellt ist. Allerdings wird das Asphaltmischgut im Vergleich zu großtechnischen Mischanlagen verhältnismäßig langsam umgewälzt.

Es können Mischgutmengen in einer Spanne von 6 bis 50 kg in einer Charge hergestellt werden. Im Betriebszustand bei geschlossenem Deckel sind der Mischkessel und das Mischwerkzeug um ca. 30 °C geneigt, was durch den sich drehenden Kessel eine zusätzliche Vermischung begünstigt. Neben der Drehzahlregelung lässt sich auch dieser Mischer stufenlos beheizen, so dass bei definierter Temperatur gemischt werden kann.

Um die Umsetzung der Modellierung auf die Labor-Probeplatten zu gewährleisten, werden im Anschluss an den Mischprozess Asphalt-Probeplatten hergestellt und künstlich gealtert. Dazu werden mittels Walzsektor-Verdichtungsgerät homogene Asphalt-Probeplatten hergestellt. Ein Walzsektor-Verdichtungsgerät, das diese unabdingbare Anforderung erfüllt, steht an der TU Braunschweig zur Verfügung und es besteht ein entsprechender Erfahrungshintergrund zur Herstellung großformatiger homogener Probeplatten. Mit Hilfe dieses Walzsektor-Verdichtungsgeräts der neuesten Generation ist es möglich, Asphalt-Probeplatten mit einer maximalen Höhe von 300 mm herzustellen (siehe Abbildung 79).

Die Dicke der Asphalt-Probeplatten richtet sich nach dem Größtkorn des herzustellenden Mischgutes [58]. Das Größtkorn der hergestellten Asphalte liegt zwischen 4 und 11 mm, daher wird die Höhe der Asphalt-Probeplatte einheitlich auf 40 mm festgelegt.

Das Walzsektor-Verdichtungsgerät besteht aus einer Verdichtungsform mit Einfüllaufsatz und einem







Bundesamt für Strassen ASTRA



Abbildung 78: Gegenlauf-Zwangsmischer zur Herstellung des Asphaltmischguts.



Abbildung 79: Walzsektor-Verdichtungsgerät zur Herstellung großformatiger Asphalt-Probeplatten



Abbildung 80: Walzsektor-Verdichtungsgerät - Funktionsweise [58]

sektorförmigen Verdichtungskörper (in der Folge als Walzsektor bezeichnet). Die Verdichtung erfolgt durch eine wiegeartige Bewegung des auf den Kreismittelpunkt fixierten Walzsektors auf der Probenplattenoberfläche, verursacht durch eine translatorische Bewegung der Verdichtungsform. Das Funktionsprinzip des Walzsektor-Verdichtungsgerätes kann Abbildung 80 entnommen werden.

Zunächst wird das zu verdichtende Asphaltmischgut auf die Verdichtungstemperatur (145 °C) temperiert und anschließend gleichmäßig auf das Einlegeblech in die auf 80 °C vorgeheizte, rechteckige Verdichtungsform gelegt. Die Verdichtungsform befindet sich auf einem spurgeführten, horizontal beweglichen Schlitten. Anschließend wird der ebenfalls beheizte Walzsektor abgesenkt. Daraus resultiert eine Druckspannung zwischen dem Sektor und dem zu verdichtenden Mischgut. Zeitgleich wird die Verdichtungsform horizontal hin und her bewegt. Der dabei mitgeführte Walzsektor wird während des Vorgangs um seinen Drehmittelpunkt ausgelenkt und erzeugt eine Walzbewegung auf der Oberseite der Mischgutprobe.

Für die Herstellung von Asphalt-Probeplatten mit praxisadäquaten Eigenschaften ist ein Verdichtungsregime definiert, das die Verdichtungsabläufe in situ möglichst praxisnah simuliert. Der Verdichtungsvorgang gliedert sich in zwei Verdichtungsdurchgänge. Während der *Vorverdichtung* wird die Verdichtungsarbeit der schwimmenden (Hochverdichtungs-) Einbaubohle des Straßenfertigers nachgestellt. Dazu wird der Walzsektor mit einer Geschwindigkeit von 0,5 mm / Übergang weggeregelt abgesenkt, bis auf der Asphalt-Probeplatte eine Last von 2,6 kN erreicht wird. Die dabei



Abbildung 81: Plattenhöhe und aufgebrachte Kraft je cm Plattenbreite während der Verdichtung im Walzsektor-Verdichtungsgerätes: weggeregelte Vorverdichtung, kraftgeregelte Hauptverdichtung [59].

erreichte Plattenhöhe wird für weitere fünf Übergänge konstant gehalten. Danach wird der Walzsektor hochgefahren (0,5 mm / Übergang), bis die Platte vollständig entlastet ist. Mittels der *Hauptverdichtung* wird der Verdichtungsprozess der in situ eingesetzten Glattmantelwalzen simuliert. Zunächst werden zur Glättung der Oberfläche 15 Übergänge bei konstanter Last von 0,52 kN aufgebracht. Danach wird die Linienlast kraftgeregelt in 15 Stufen bis zu Erreichen einer Maximalkraft von 19,5 kN gesteigert. Die Entlastung erfolgt in weiteren 15 gleichen Laststufen. In Abbildung 81 sind der Verlauf der zur Verdichtung aufgebrachten Kraft sowie die dabei erreichte Plattenhöhe während dieser Verdichtungsschritte schematisch dargestellt.

#### Beschreibung des künstlichen Alterungsverhaltens und der schrittweisen Alterung

Die künstliche Alterung der Asphalt-Probeplatten erfolgt mittels Spurbildungstest in Anlehnung an TP Asphalt-StB, Teil 22 (siehe Tabelle 42). Beim Spurbildungsversuch werden zwei Asphalt-Probeplatten mittels Lufttemperierung auf T =  $+60 \,^{\circ}$ C temperiert. Mittels eines hin und her rollenden, gummibeschichteten Prüfrads werden jeweils 10.000 Doppel-Überrollungen (Zyklen) auf die Platten aufgebracht (Abbildung 82).

Die Spurrinnentiefe wird in Abhängigkeit von der Anzahl der Überrollungen aufgezeichnet (siehe beispielhaft in Abbildung 83). Die Spurrinnentiefe nach 10.000 Zyklen wird aus der Differenz der Nullmessung und der Tiefe der mittleren Rollstrecke gebildet.

Für die künstliche Alterung wird die Annahme getroffen, dass die Belastung mit 10.000 Zyklen







Prüftemperatur	+60 ℃, Luft
Abmessungen	300 x 200 x 40 mm <sup>3</sup>
	Durchmesser: 203 mm
Pad und Padlaat	Breite: 50 mm
nau unu naulasi	Vollgummibereift
	Last: 700 N
	Absolute Spurrinnentiefe RD <sub>Luft</sub> in [mm]
Kenngrößen	Proportionale Spurrinnentiefe PRD <sub>Luft</sub> in [%]
	Spurbildungsrate WTS $_{ m Luft}$ in [mm/10 $^3$ Zyklen]

Tabelle 42: Versuchsparameter für den Spurbildungsversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 22



Abbildung 82: Prüfeinrichtung zur Durchführung der Spurbildungsversuche zur künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten.



Abbildung 83: Grafische Darstellung der Ergebnisse von Spurbildungsversuche - beispielhaft für SMA 11 S.







einer mechanischen Belastung, die während einer üblichen Verschleißdauer einer Asphaltdeckschicht aus SMA (ca. 10 Jahre bis 15 Jahre) auftritt entspricht. Im ersten Schritt werden drei lineare Alterungsstufen realisiert:

- 3.333 Zyklen (5 Jahre),
- 6.666 Zyklen (10 Jahre),
- 10.000 Zyklen (15 Jahre).

Auf Basis der Ergebnisse wurden in einer weiteren Versuchsreihe logarithmische Alterungsschritte gewählt:

- 20 Zyklen (0 Jahre),
- 100 Zyklen (0,25 Jahre),
- 500 Zyklen (2,5 Jahre),
- 3000 Zyklen (5 Jahre).

## 6.2 Messmethoden an den Probeplatten

Um die akustisch relevanten Oberflächeneigenschaften der Probeplatten untersuchen zu können, wurden zu den in-situ-Messverfahren vergleichbare Labor-Messmethoden angewandt. Diese umfassen dabei die Vermessung der 3D-Oberflächentextur wie auch die Erhebung des akustisch relevanten Hohlraumzuganges. Aufgrund der deutlich abweichenden zur Messung zur Verfügung stehenden Oberflächenbereiche mussten die Messmethoden angepasst werden. Dies führt im absoluten Vergleich mit den in-situ-Werten zu erhöhten Unsicherheiten, innerhalb der Versuchsklasse der Probeplatten ist aber von einer hohen Wiederholbarkeit der Parametererhebung auszugehen. Einschränkungen der Aussagen entstehend daher vor allem durch die methodisch bedingt verhältnismäßig wenigen Proben, die untersucht wurden. In den dargestellten Ergebnissen sollte daher neben den Absolutund Zeitverlaufswerten auch wo möglich deren Streuung beachtet werden.

## 6.2.1 Inline Computational Imaging

Um die Oberflächentextur der Asphalt-Probeplatten vermessen zu können, wurde auf ein Verfahren zur Höhenrekonstruktion aus optischen Informationen zurückgegriffen. Bekannte solche Verfahren

140







sind z.B. Lichtschnittverfahren, Streifenlichtprojektion, Stereo oder Lichtlaufzeitmessung, die jeweils spezifische Vor- und Nachteile haben. Weitere hier relevante Verfahren sind:

- Lichtfeld ist eine Verallgemeinerung von Stereo. Hier wird ein Objekt unter mehreren Beobachtungswinkeln betrachtet. Üblicherweise werden dazu mehreren Kameras herangezogen oder ein Mikrolinsen-Arrays am Sensor verwendet.
- Photometrisches Stereo ist eine Verallgemeinerung von Shape-from-Shading, bei der ein Objekt unter verschiedenen Beleuchtungswinkeln betrachtet wird. Das wird üblicherweise dadurch erreicht, dass die Objektbeleuchtung aus verschiedenen Richtungen erfolgt oder Licht verschiedener Frequenz verwendet wird (z.B. rot, grün, blau).

Im Gegensatz zu herkömmlichen Aufnahmesystemen berücksichtigt das vom AIT entwickelte Inline Computational Imaging (ICI)-System [60] mehrere Betrachtungs- und Beleuchtungswinkel, was eine robustere Fehlererkennung ermöglicht. Das ICI-System besteht aus drei Hauptkomponenten: ein Transportsystem, ein Multizeilen-Kamerasystem und zwei Beleuchtungsquellen (siehe Abbildung 84). Während des Aufnahmeprozesses wird das untersuchte Objekt mittels Linearantrieb an der Multizeilen-Kamera und den Beleuchtungsquellen vorbeibewegt und nach und nach aufgenommen. Dabei sieht jede Zeile der Multizeilen-Kamera das Objekt unter einem anderen Winkel. Dadurch wird jedes Pixel mehrmals und jeweils in verschiedenen Betrachtungs- und Beleuchtungsrichtungen aufgenommen. Die redundante Pixelinformation wird im genutzten Analyseverfahren zur Bildverbesserung genutzt. Durch Fusion von Lichtfeldverfahren und photometrischem Stereoverfahren können die Vorteile beider Verfahren genutzt und die jeweiligen Schwächen kompensiert werden:

Lichtfeld verlangt – so wie Stereo – Textur in den Bildern. Bei vollkommen texturlosen Oberflächen wäre es unmöglich Tiefeninformation abzuleiten. Außerdem können sich Glanzeffekte (von z.B. metallischen Objekten) störend auswirken, da mehrere Bilder aus unterschiedlichen Winkeln vorliegen. Dadurch entsteht eine Tiefenbild, das nicht unbedingt vollflächig ist. Der große Vorteil ist aber, dass an den vielen Stellen, wo 3D Information vorliegt, diese sehr zuverlässig ist.

Photometrisches Stereo verlangt keinerlei Textur der Oberfläche und glänzende Objekte sind ebenfalls unproblematisch. Es liegt also an jedem Punkt 3D Information vor und feinste Details werden sichtbar. Allerdings ist die Rekonstruktion der Tiefeninformation aus den Oberflächenorientierungen global oft nicht völlig korrekt. Erst durch die Fusion der beiden Verfahren wird ein vielflächiges, global korrektes und sehr detailreiches Tiefenbild erzeugt.



Abbildung 84: Setup "Inline Computational Imaging"

Mit dem verwendeten ICI-Aufnahmesystem sind 20.000 Lichtfeldaufnahmen/Sekunde möglich. Das bedeutet, dass bei einer optischen Auflösung von ca. 20 µm einen Aufnahme eines optimierten ICI-Farbbildes und eines 3D Tiefenbildes mit geringem Zeitaufwand erzeugt werden kann.

In der vorliegenden Aufgabenstellung wurde der gealterte Bereich der Asphalt-Probeplatten bei einer Alterungsbreite von ca. 4,5 cm auf voller Länge (aufgeteilt auf mehrere Einzel-Patches) aufgenommen. Ein Beispiel dieser Oberflächenbilder ist in Abbildung 85 gegeben. Die hohe Auflösung erlaubt es, Feinstrukturen an den Oberflächen der einzelnen Körnern der Fahrbahntextur zu beschreiben.

Beim Vergleich der so aufgenommenen Oberflächentexturen mit den in Abschnitt 4 genutzen in-situ-Texturmessungen muss beachtet werden, dass sich die Auflösungen der beiden Messverfahren sowie die Aufnahmebreite unterscheiden. Das führt dazu, dass die Texturparameter, die aus den einzelnen Aufnahmen berechnet werden, nicht notwendigerweise unhinterfragt ineinander übergeführt werden können. In den folgenden Auswertungen der Probeplatten-Texturen wurde jedoch versucht, diese Unterschiede so weit möglich zu minimieren und auch quantitative Vergleiche über die beiden Untersuchungsmethoden zu ermöglichen.



(a) Gesamtaufnahme

(b) Zoom

Abbildung 85: Beispiel einer ICI-Aufnahme; links der Gesamt-Patch mit einer Größe von ca. 4,5 x 4,5 cm, rechts Zoom auf ein einzelnes Korn der Oberflächentextur. Die Einheit des rechts unten eingeblendeten Maßstabes ist [mm].

#### 6.2.2 Schallabsorptionsmessungen

Neben den Textur wurde auch die Schallabsorption der Probeplatten gemessen um Veränderungen durch die künstliche Alterung darzustellen. Dabei wurde ebenfalls analog zur Messung der Fahrbahnabsorption in Kapitel 4.1.3 ein Linienarray an Mikrofonen verwendet, allerdings aufgrund der Größe der Probeplatten mit deutlichen geringeren Abmessungen. Von einer Messung der Schallabsorption mittels Impedanzrohr wurde Abstand genommen, da es sich hierbei entweder um ein zerstörendes Messverfahren (DIN ISO 10534 [43]) handelt, oder eine nicht komplett vollständige Abdichtung des auf die Oberfläche gepressten Impedanzrohres gewährleistet werden kann (ISO 13472-2 [46]). Ebenfalls wurde so versucht, eine Vergleichbarkeit mit den in-situ-Messungen aufrecht zu erhalten.

Um das Schallfeld möglichst wenig zu beeinflussen und die Mikrofone möglichst nahe zum Prüfobjekt zu positionieren wurde das Linienarray mit MEMS Mikrofonen aufgebaut. Diese auf Halbleitertechnologie aufbauenden Mikrofone sind aufgrund ihrer kompakten Bauform direkt auf Elektronikplatinen angebracht. Abbildung 86 zeigt das verwendete Array mit 14 MEMS-Mikrofonen. Aufgrund der Abmessungen des Arrays ergibt sich mit dem verwendeten Beamforming Algorithmus ein nutzbarer Frequenzbereich von 980 Hz bis 12860 Hz. Dieser umfasst hier leider nicht die in den in-situ-Messungen für die erweiterte Modellierung genutzten Frequenzbänder, weshalb aktuell nur ein qualitativer Vergleich zwischen den Größen angestellt werden kann. Um den Einfluss lokaler Inhomogenitäten der Probeplatten zu mindern wurden für jeden Alterungsschritt pro Probeplatte fünf Messungen mit einem Zentimeter Abstand zueinander durchgeführt. Die Auswertung der Schallabsorptions- bzw. Schallreflexionsgrade erfolgt analog zu den Absorptionsmessungen in situ. Aufgrund der geringen Ausdehnungen der gealterten Fläche wurden hierbei neben den RI's auch weitere das Absorptions-





Bundesamt für Strassen ASTRA

-





Abbildung 86: Linienarray mit MEMS-Mikrofonen zur Messung der Schallabsorption der Probeplatten. Am Lautsprecher wurden Linienlaser zur genauen Positionierung befestigt.

vermögen beschreibende Parameter ausgewertet. Diese beinhalten beispielsweise das sogenannte *Peak Ratio*, das einen Vergleich der Spitzen der einlaufenden und reflektierten Impulsantworten beschreibt und in den folgenden Auswertungen genutzt wird.

## 6.3 Einfach gealterte Probeplatten

Um einen ersten Blick auf das Alterungsverhalten der Textur von Asphalt-Probeplatten zu erhalten, wurden insgesamt 12 Probeplatten der Bauweise SMA S1 und SMA S3 hergestellt, die einer künstlichen Alterung unterschiedelichen Ausmaßes unterzogen wurden. Anschließend wurden Oberflächentexturen der Probeplatten im Labor untersucht, wobei jeweils der gealterte und ungealterte Bereich vermessen wurde. Dabei zeigte sich durch Vergleich der Platten, dass bereits im geringsten Alterungsschritt, der ca. 3000 Zyklen (bzw. ca. 5 Jahre) abbildet, der Hauptbereich der relevanten Texturänderungen erfolgt ist.

Auf eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse der erhobenen 3D-Texturparameter der einfach gealterten Probeplatten wird hier verzichtet. Zusammenfassend kann berichtet werden, dass die Probeplatten unterschiedlicher Alterungsstufen keine deutliche Unterscheidung in ihren Kennwerten aufweisen. Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der akustischen Alterungsmodellierung in Abschnitt 3, wo über einen weiten Bereich ein logarithmischer Zusammenhang zwischen Befahrungsmenge und Änderung der Schallemissionen beobachtet wurde. Dadurch ist anzunehmen, dass auch die relevanten Texturänderungen bereits nach verhältnismäßig wenigen Alterungszyklen hervorgerufen werden.






# 6.4 Schrittweise gealterte Probeplatten

Basierend auf den Erkenntnissen der einfach gealterten Probeplatten wurde der Fokus der Texturänderungen in den geringer belasteten Bereich der künstlichen Alterung gelegt. Ebenfalls wurde angestrebt, durch eine schrittweise Alterung zu ermöglichen, den Alterungsverlauf der Texturparameter direkt an den Probeplatten beoabchten zu können. Daher wurden jeweils 4 Probeplatten des Typs SMA S1, SDA 4 und SDA 8 hergestellt, die sowohl im ungealterten als auch in 4 logarithmisch verteilten Alterungszyklen untersucht wurden. Um den möglichen Einfluss von Seitenkräften, wie sie bei beispielsweise bei Kurvenfahrten auf die Fahrbahnoberfläche auftreten, abzubilden, wurden jeweils 2 der Probeplatten mit einer Seitenneigung von ca. 2 ° hergestellt. Durch diese Verkippung wurde versucht, bei der künstlichen Alterung mittels Spurbildungsversuch diese Seitenkräfte zu erzeugen.

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der schrittweise gealterten Probeplatten dargestellt. Dabei werden sowohl die Ergebnisse und Verläufe der 3D-Texturparameter als auch die der Schallabsorptionsmessungen gezeigt. Ebenfalls wird eine Interpretation der visuell beobachteten Texturänderungen gegeben, die auf Einzelbeispielen der Probeplatten beruht. Schlussendlich werden die in Abschnitt 5 erstellten in-situ-Rollgeräuschmodelle auf die Texturparameter angewandt, wobei hier zu beachten ist, dass die Umsetzung aus verschiedenen Gründen (Änderung der betrachteten Fläche und optischen Auflösung, nicht-Berücksichtigen der Schallabsorption in der Modellierung, Extrapolation der Modelle zu stark abweichenden Größtkörnern) mit hohen Unsicherheiten behaftet ist.

#### 6.4.1 Alterungsverhalten der Texturparameter

In den Abbildungen 87 bis 91 ist die schrittweise künstliche Alterung der Asphalt-Probeplatten für ausgewählte Parameter der 3D-Textur dargestellt. Auf der Abszisse ist die Anzahl an Zyklen des Spurbildungstest angegeben, auf der Ordinate sind die jeweiligen Parameter, getrennt für die einzelnen Probeplatten des getesteten Deckschichttyps, angegeben. Die jeweiligen Unter-Abbildungen gruppieren die Probeplatten nach Deckschichttyp. Die Einzelpunkte zeigen die Messwerte der jeweiligen Textur-Platten der Parameter an, wobei die ausgewertete Oberfläche der Probeplatte der typischen Fläche eines Texturpatches der in-situ-Messungen entspricht (ca. 55 cm<sup>2</sup>). Die Auswahl der Parameter erfolgt hier im Sinne der beschreibenden Parameter der drei Modelle des Abschnitts 5.2.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der Probeplatten-Messungen ist in der Abbildung der Probeplatten







vom Typ "SMA S1"ein Wertebereich (Quantile im Bereich [10%, 90%]) dunkel hinterlegt. Dieser weist den Wertebereich des Parameters der in-situ-Messungen aus und somit den erwarteten Werteberich der Texturparameter. Dabei sollte beachtet werden, dass die Probeplattenparameter nicht notwendigerweise in diesem Bereich zu liegen kommen. Sowohl geringe Abweichungen im Messverfahren (beispielsweise die höhere Auflösung der Labor-Messungen) sowie die veränderte Geometrie (7,5 x 7,5 cm für die in-situ-Messungen, 4,5 x 12 cm für die Labormessungen) können zu relevanten Abweichungen im Vergleich der Messmethoden führen. Die relativen Vergleiche der Parameter innerhalb der einzelnen Messmethode bleiben davon unberührt.

Der Parameter "nmax\_rel" in Abbildung 87, der die relative Anzahl lokaler Maxima im Textur-Patch beschreibt, zeigt eine mit der Anzahl der Alterungszyklen abnehmenden Wert. Hier ist vor allem die deutliche Abnahme bei beginnender mechanischer Alterung, d.h. die Reduzierung der Dichte lokaler Maxima vom ungealterten hin zum durch 20 Zyklen beanspruchten Messwert zu beachten. Dieser Sprung liegt wahrscheinlich in der Algorithmik der Maxima-Suche, die bei der noch unbeanspruchten Oberfläche, die sich bedingt durch das Walzen durch Ebenen an der obersten Höhenschicht auszeichnet, stark reagiert. Im weiteren Alterungsverlauf sieht man eine fortgesetzte, allerdings wesentlich geringere Abnahme des Parameters hin zu Werten von 8.000 (SMA S1), 10.000 (SDA 8) und 13.000 (SDA 4). Die Ursache für diese Reduktion ist in der weitergehenden Abnahme der obersten Plateaus der Textur begründet: das die Gesteinskörner umschließende Bitumen wird durch die mechanische Beanspruchung zu tieferen Texturbereichen hin verdrängt, wodurch die einzelnen Kornspitzen prominenter hervortreten und die Zahl an Mehrfach-Maxima an einzelnen Gesteinskörnern verringert wird. Zu beachten ist auch, dass die Parameter der Maxima-Suche auf Größtkörner begründet in der Konsistenz mit den in-situ-Messwerten und der statistischen Modellierung – von 8 und 11 mm optimiert sind. Dies kann (wie auch bei den weiteren Textur-Parametern) zu Abweichungen der Probeplatten des SDA 4 führen, wurde aber aus Konsistenzgründen beibehalten. Da der in Abbildung 88 gezeigte Alterungsverlauf des Parameters der Nächste-Nachbar-Distanz "nneigh" in starkem Zusammenhang mit der Dichte der lokalen Maxima steht, gelten die obigen Überlegungen analog.

Die so gefundenen Änderungen dieser Parameter sind in Einklang mit den Altersverläufen der insitu-Messwerte. Auch der Wertebereich (beispielsweise der Dichte lokaler Maxima mit in-situ-Werten zwischen 10.000 und 7.000) bildet sich in den Probeplatten-Analysen ab.

In den Abbildungen 89 und 90 sind die Parameter zum Gradienten sowie zur mittleren Höhe der lokalen Maxima der Textur gezeigt, die gemeinsam in der ersten Hauptkomponente gruppieren



Abbildung 87: Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "nmax\_rel"



Abbildung 88: Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "nneigh"

(siehe Abschnitt 4.3). Beide Parameter zeigen mit zunehmender Beanspruchung der Probeplatten eine gleichmäßige Abnahme, die für den Gradienten deutlicher ausfällt. Als Ursache ist hier die Verschiebung der Körner tiefer in die Deckschicht anzusehen. Alle Probeplatten weisen im gealterten Flächenbereich eine merkliche Verschiebung der einhüllenden Oberfläche im Millimeter-Bereich auf, die gleichzeitig die (optisch) zugängliche Tiefenstruktur verringert. Der Sonderfall des Parameters "hmax" der Platte "s1-4", die in einem merklich abweichenden Wertebereich liegt, ist in einer atypischen Kornstruktur der Probeplatte begründet, die sich an einer Stelle durch einen offenen Bereich in der Oberflächentextur auszeichnet.

Der Vergleich mit den Änderungen der in-situ-Messungen zeigt eine deutlichere Änderung der Tiefen-Parameter der Probeplatten. Während in den in-situ-Messungen eine geringe Abnahme der Parameter mit zunehmendem Alter zu beobachten war, konnte in Bezug auf die Überfahrungsstärke keine gesicherte Aussage getätigt werden.

Als letzter Parameter wird die Alterung des Gestaltfaktors in Abbildung 91 gezeigt. Hier ist zu sehen, dass der Gestaltfaktor in der Alterung nur geringen Veränderungen unterworfen ist, die sich statistisch nicht signifikant einordnen lassen. Dies ist in Übereinstimmung mit den Änderungen der in-situ-Werte, die für den Gestaltfaktor ebenfalls kein signifikantes Alterungsverhalten (bei einem Wertebereich



Abbildung 89: Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "grad\_x"



Abbildung 90: Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "hmax"

zwischen 88 und 95 %) zeigten.

#### 6.4.2 Visuelle Texturänderungen

Neben der Bestimmung der Texturparameter und der Interpretation ihrer Änderungen durch die künstliche Alterung können die Probeplatten auch direkt untersucht werden. Gerade in Hinblick auf die mechanischen Verformungen an der Oberfläche kann dadurch ein Einblick in die Alterungsprozesse gewonnen werden. Bei der Betrachtung der lokalen Verformungen der Deckschicht müssen hier zwei





FFG







unterschiedliche Größenordnungen herangezogen werden:

- globale Verformung der Oberflächentextur: durch die mechanische Belastung kommt es zu einer plastischen Verformung des Bitumens und der Körner, die somit ihre ursprüngliche Position verändern
- Iokale Höhenänderung: am Korn selbst kommt es durch Abrasion von Bitumen sowie durch die Verschiebung des Korns zu Höhen- und Gestaltänderungen

Um die globale Veränderung der Oberflächentextur zu betrachten, wurden die Einzelmessungen an den Probeplatten zueinander ausgerichtet, wobei als Ankerpunkte Markierungen im unbelasteten Bereich, d.h. auf der Betoneinfassung der Probeplatten genutzt wurden. In den Abbildungen 92 bis 94 sind die Oberflächentexturen zu den einzelnen Alterungsschritten für jeweils eine Probeplatte der drei betrachteten Deckschichttypen dargestellt. Die Spannweite der Höhenauflösung umfasst jeweils 2 mm, die Skala ist am Median angepasst. Vor allem im ersten Alterungsschritt, der nur 20 Zyklen erfahren hat, ist bereits eine deutliche Änderung der gesamten Oberflächenstruktur der Gesteinskörner zu sehen. Aus der ehemals plateauartigen Oberfläche treten vermehrt einzelne Profilspitzen an den Körnern hervor. Am augenscheinlichsten tritt dies beim Deckschichttyp SMA S1 auf, das selbe Verhalten ist aber auch für die SDA-Deckschichten zu sehen. Diese Verformung bedingt auch die in den Abschnitten 4.2 bzw. 6.4.1 beschriebene Reduktion der Dichte der lokalen Maxima. Während auf dem plateauartigen Korn mehrere einzelne Profilspitzen gefunden werden, führt die Ausrundung der Oberfläche der Körner zu wenigeren, prominenteren lokalen Maxima. Gleichzeitig wird eine stetigere Oberflächenstruktur geschaffen, kleine Oberflächenstrukturen des Bitumens am Korn selbst werden durch die Belastung geglättet, was zur Reduktion des Textur-Gradienten führt. Dabei bleibt allerdings lokal die Gesamt-Höhe des Maximums relativ zu seiner ursprünglichen Position annähernd unverändert. Während sich auf größerer Längenskala teilweise merkliche Höhenänderungen ergeben (sichtbar vor allem in Abbildung 93 für den SDA 4), treten lokal die Maxima relativ zur Tiefenstruktur hervor, ohne selbst merklich einer Höhenreduktion zu unterliegen. Durch diese Texturänderungen, die in den betrachteten Alterungsschritten vor allem im obersten Bereich der Rauigkeit erfolgen, ist auch anzunehmen, dass sich der Gestaltfaktor nicht grundlegend ändert. Bei all diesen Überlegungen ist natürlich zu beachten, dass die betrachtete Oberfläche bei der Berechnung und Interpretation der Texturänderungen gering ist.

Aufbauend auf den einzelnen ausgerichteten Texturmessungen können nun die Höhendifferenzen zwischen den einzelnen Alterungsschritten berechnet werden. Um die langwelligen Höhenänderungen,







Bundesamt für Strassen ASTRA



#### (a) Alterungsschritt 0



(b) Alterungsschritt 1



#### (c) Alterungsschritt 2



(d) Alterungsschritt 3



(e) Alterungsschritt 4

Abbildung 92: Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen - SMA S1







Bundesamt für Strassen ASTRA



(a) Alterungsschritt 0



(e) Alterungsschritt 4

Abbildung 93: Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen - SDA 4







Bundesamt für Strassen ASTRA



#### (a) Alterungsschritt 0



(b) Alterungsschritt 1



(c) Alterungsschritt 2



(d) Alterungsschritt 3



(e) Alterungsschritt 4

Abbildung 94: Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen - SDA 8







die vor allem für die Probeplatten des SDA 4 stark sichtbar sind, auszublenden, wurden die Texturen vorab einer grobaufgelösten Höhenfilterung unterzogen. Die Ergebnisse der Berechnung der Höhendifferenzen – jeweils zum ungealterten Zustand – sind in den Abbildungen 95 bis 97 abgebildet. Bereiche, die hier hohe, d.h. gelbliche Farbwerte aufweisen, deuten auf eine relative Zunahme der Textur hin. Dabei ist zu beachten, dass durch die notwendige Höhenfilterung die absolute Höheninformation verloren geht. Die betrachteten Höhenänderungen müssen in den Abbildungen also relativ zueinander interpretiert werden. Ein Anwachsen der lokalen Textur ist allerdings grundsätzlich möglich. Dieses kann z.B. durch die Verschiebung von Körnern enstehen, die in Verschubrichtung lokal zu einer höheren Textur führt. Somit kann aus den gelben Bereichen, die damit vor allem an den Rändern der einzelnen Körner auftreten, in den Abbildungen die Richtung der Verformungen der Oberflächenstruktur abgelesen werden. Man sieht für alle Deckschichttypen mit steigender Anzahl an Zyklen bzw. Überrollungen ein Anwachsen in den Verschiebungen. Die lokalen Verformungen am Korn selbst können allerdings durch diese Betrachtung noch nicht interpretiert werden. Dazu müsste die lokale Verschiebung der Körner begleitet bzw. korrigiert werden, was einer geometrischen Transformation in das lokale Koordinatensystems der einzelnen Körner entspräche.



1

FFFG



(b) Alterungsschritt 2



Abbildung 96: Höhendifferenzen der Oberflächentexturen zum ungealterten Zustand - SDA 4

razione Svizzera raziun svizra imt für Strassen ASTRA

FFFG



(a) Alterungsschritt 1

(b) Alterungsschritt 2



(c) Alterungsschritt 3

(d) Alterungsschritt 4

Abbildung 97: Höhendifferenzen der Oberflächentexturen zum ungealterten Zustand - SDA 8

155







Um nun die lokale Änderung der Textur am Gesteinskorn zu betrachten, wird beispielhaft ein Korn ausgewählt und dessen Oberflächenänderung bei der schrittweisen Alterung begleitet. Als Beispiel wird hier ein Ausschnitt aus einer SDA 8-Probeplatte gewählt. Das ausgewählte Korn liegt in der in Abbildung 98 links gezeigten rot eingerahmten Kornstruktur. Rechts in der Abbildung wird eine Vergrößerung dieses Korns in zwei Alterszuständen dargestellt: einerseits wird oben der ungealterte Zustand gezeigt, unten wurde die Probeplatte der vollständigen künstlichen Alterung unterzogen. Bei den Abbildungen handelt es sich um Falschfarbenaufnahmen, um die Strukturen des Korns besser zur Geltung zu bringen. Dabei deuten helle Bereiche auf eine reflektierende bzw. glänzende Oberfläche hin.

Um das geometrische Alterungsverhalten des ausgewählten Korns nun zu begleiten, müssen die Koordinaten der einzelnen Alterungsschritte aneinander angepasst werden. Dabei kann es zu gewollten Streckungen bzw. Stauchungen des Korns kommen, um der Verschiebung des Korns entgegenzuwirken. Die Transformation macht sich beispielsweise in der linken unteren Ecke des Bildes des gealterten Korns bemerkbar. Die für die Transformationen notwendigen Fixpunkte sind in den rechten beiden Graphiken durch grüne Markierungen eingezeichnet.

In Abbildung 99 sind nun die Auswirkungen der künstlichen Alterung abgebildet. Auf der linken Seite werden als Konturplot die Höhendifferenzen nach Subtraktion der einzelnen Korn-Zustände abgebildet. Rote Bereiche kennzeichnen hier einen relativen Zuwachs an Höhe, blaue Bereiche eine relative Abnahme, die ursprüngliche Geometrie ist grau im Hintergrund dargestellt. Von Interesse ist hier der stetig anwachsende rote Bereich im linken unteren Viertel der Graphiken, der die Verschiebung des Nachbarkorns zum fixierten Betrachtungskorns zeigt. Am Gesteinskorn selbst kommt es vor allem an den Flanken zu einer Reduktion der Texturhöhe, während das Maximum des Korns in der Mitte des Bildes an Prominenz gewinnt.

Rechts in der Abbildung sind als Vergleich dazu Einzel-Schnitte durch die Texturhöhen abgebildet. Als Linie wurde dabei die Linie bei der Y-Koordinate 350 ausgewählt. Die Höhen der ursprünglichen und der gealterten Textur sind dabei so aneinander angepasst, dass es zu genau einer Berührung der gealterten und der ungealterten Textur kommt, alle Höhen sollten somit als Relativwerte betrachtet werden.

In den Schnittbildern ist deutlich zu sehen, dass sich der oberste Bereich der Kornform ändert. Während zu Beginn eine verhältnismäßig abgerundete Kuppe vorhanden war, die als Kontaktfläche zum Reifen fungiert, ist in den weiteren Altersschritten in dem Beispiel eine schärfere Kornspitze zu sehen. Dies spiegelt die Betrachtung der globalen Verformungen der Oberflächentextur wider.







Bundesamt für Strassen ASTRA



Abbildung 98: Falschfarbendarstellung eines Ausschnittes einer SDA 8-Probeplatte: rechts die lokale Korngruppe, rechts ein ausgewähltes Korn in zwei Alterungszuständen. Die X- und Y-Skalierung bezieht sich auf Pixel rel. 20µm.



Abbildung 99: Höhenanderungen bei der künstlichen Alterung eines SDA 8-Korns; links die flächige Höhenänderung, rechts der Schnitt durch das Bild bei der Y-Koordinate von 350. Die X- und Y-Skalierung bezieht sich auf Pixel rel. 20µm.







#### 6.4.3 Messung der Schallabsorption

Abbildung 100 zeigt den Verlauf der Schallabsorption für die künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten. Als den Verlauf am besten beschreibender Parameter wurde das quadratische Verhältnis der ersten Spitzen der Impulsantworten der reflektierten zur Freifeld-Komponente identifiziert (*quadratisches Peak Ratio - PR*<sup>2</sup>). Ebenso wie der Reflexionsindex  $RI_j$  aus Gleichung 3 ist das Peak-Ratio ein Wert für die Schallreflexion, wodurch niedrigere Werte einer stärkeren Schallabsorption entsprechen. In der Abbildung sind für die jeweiligen Probeplatten für jeden Grad der Alterung die fünf Messpunkte eingetragen; außerdem ist ein lineares Regressionsmodell zur logarithmischen Anzahl der Alterungszyklen eingezeichnet.

Für die Probeplatten mit den Kennnummern 1 und 2 zeigt sich unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der einzelnen Messungen ein linearer Anstieg von  $PR^2$  über die logarithmischen Alterungszyklen. Ein  $PR^2$  von 1 ist dabei der theoretischen Maximalwert, der die Reflexion an einer schallharten Oberfläche beschreibt. Einzelne Messungen erreichen hier einen Wert knapp über 1, was einem Messfehler von ca. 0,3 dB entspricht. Für die Platten des SMA S1 steigt der anfängliche Wert von 0,9 bis hin zu einer vollständigen Reflexion des eintreffenden Schalls an. Somit kann der SMA S1 am Ende der Alterung in Bezug auf den zugänglichen Hohlraumanteil als dicht angesehen werden. Die Platten SMA S1-3, SMA S1-4, SDA 4-3, SDA 4-4, SDA 8-3 und SDA 8-4 zeigen ein teilweise abweichendes Verhalten. Diese wurden, wie eingangs erwähnt, mit einer Verkippung von 2 % hergestellt, um zu versuchen, den Einfluss von Seitenkräften während der künstlichen Alterung abzubilden. Dadurch zeigen sich weniger konsistente Ergebnisse, die möglicherweise mit der Verkippung und damit einer nicht geradlinigen Reflexion in Zusammenhang stehen.

Für die hohlraumreicheren Platten SDA 4 und SDA 8 liegt der Startwert des  $PR^2$  deutlich niedriger. Die Platten des SDA4 erreichen am Ende der künstlichen Alterung einen Wert von knapp über 0,9 dB und sind somit am Ende ihrer Lebensdauer in Bezug auf die gemessene Schallabsorption einem gering gealterten SMA S1 ähnlich. Die zwei horizontal gefertigten Platten des SDA 8 zeigen leicht unterschiedliches Verhalten, wobei die SDA 8-1 mit einem vergleichbaren Wert zu den SDA 4-Platten beginnt, am Ende jedoch ebenso wie die SMA S1-Platten schallhart zu wirken beginnt. Die SDA 8-2-Platte weist von den 6 horizontalen Platten in der linken Hälfte der Abbildung die niedrigsten Startund Endwerte bei einer ebenso niedrigen Steigung auf.



Abbildung 100: Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "Peak Ratio"



160







#### 6.4.4 Anwendung der Rollgeräusch-Modellierung

Basierend auf den so erhobenen Texturparametern kann die in Abschnitt 5.2.2 erstellte Modellierung angewandt werden. Dabei ist einerseits zu beachten, dass die Stichprobe der Probeplatten sich auf einen Bereich von vier Textur-Patches je Deckschichttyp bezieht, wodurch eine Mittelung über eine große Stichprobe damit nicht durchführbar ist. Ebenfalls wurden die Textur-Parameter mit einem höher aufgelösten Messverfahren, allerdings systembedingt durch die künstliche Alterung auf anderer Breite aufgenommen, was Kanteneffekte in der Parameterberechnung zur Folge hat. Schlussendlich gehen in die Modellierung nur Daten mit verhältnismäßig großem Größtkorn ein, was vor allem die Vorhersage der SDA 4-Platten aufgrund der Modell-Extrapolation mit Bedacht zu interpretieren veranlasst.

In Abbildung 101 sind die Ergebnisse der Modellvorhersage für die drei modellierten Frequenzbereiche abgebildet. Die farblich hinterlegte Fläche zeichnet dabei die aus Messwerten erwarteten CPX-Wertebereiche der einzelnen Frequenzbereiche aus. Hier ist zu beachten, dass die Messergebnisse der SDA-Platten von einer Messgeschwindigkeit von 50 km/h stammen und auf 60 km/h umgerechnet wurden, ohne mögliche Frequenzverschiebungen zu berücksichtigen.

Die Probeplatten des Typs SMA S1 zeigen in der Modell-Vorhersage in allen Frequenzbereichen eine gute Übereinstimmung mit den erwarteten CPX-Werten. Auch die akustische Alterung liegt in einem erwarteten Wertebereich. Die Probeplatten des Typs SDA 8 weisen einen dazu vergleichbaren, allerdings zu hohen Frequenzen hin leiseren Altersverlauf auf. Hier ist auch eine deutliche Abweichung hin zum erwarteten Messwertebereich zu beobachten, der aufgrund der in der Modellierung nicht berücksichtigbaren Hohlraumstruktur zu erwarten ist. Die Modellierung des Deckschichttyps SDA 4, die aufgrund der Modell-Extrapolation mit hohen Unsicherheiten behaftet ist, liegt tieffrequent im erwarteten Wertebereich. Während mittelfrequent der CPX-Messwertebereich noch annähernd abgebildet wird, zeigt sich hochfrequent deutlich das Fehlen der Hohlrauminformationen der Deckschicht in der Modellierung. Hier muss auf die Aussagen des Abschnittes 6.4.3 verwiesen werden.



**Bundesministerium** Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie





Bundesamt für Strassen ASTRA



Abbildung 101: Ergebnis der Rollgeräusch-Modellierung bei Anwendung auf die schrittweise gealterten Probeplatten







## 6.5 Probeplatten mit experimenteller Bauweise

Aufgrund der im Projektverlauf gewonnenen Erkenntnisse zum Alterungseinfluss der Texturänderungen auf die Rollgeräuschemissionen wurden 6 weitere Probeplatten der Typen SMA S1, SDA 4 und SDA 8 hergestellt. Da vor allem die geometrischen Verformungen an der Kornoberfläche sowie deren Lageänderungen in der Asphaltmatrix als Ursache für die erhöhten Rollgeräuschemissionen identifiziert wurden, wurde hier eine härtere Bitumensorte (10/45-65A anstelle des bisher verwendeten 25/55-55A) eingesetzt. Auf die künstliche seitliche Verkippung wurde bei diesen Probeplatten verzichtet, da sich in den schrittweise künstlich gealterten Probeplatten in Standardbauweise dadurch keine zusätzlichen Erkenntnisse abgezeichnet haben. Die Asphalt-Probeplatten wurden nun zwei Alterungsschritten unterzogen, wobei sie nach 20 und 3.000 Zyklen einer Laboruntersuchung unterzogen wurden, um sowohl den gering als auch den stark gealterten Zustand abzubilden.

#### 6.5.1 Alterungsverhalten der Texturparameter

In Abbildung 102 sind die altersabhängigen Ergebnisse der einzelnen 3D-Texturmessungen an den Probeplatten in adaptierter Bauweise abgebildet. Wie schon zuvor sind die Wertebereiche der in-situ-Messungen dunkel hinterlegt.

Die Parameter der zweiten Textur-Hauptkomponente "nmax\_rel" und "nneigh" sind in den ersten beiden Zeilen der Abbildung angegeben. Während die ursprünglichen Asphalt-Probeplatten bei der Dichte lokaler Maxima für die SMA S1-Platten eine Abnahme hin zu ca. 8.100 Maxima pro m<sup>2</sup> zeigen, kommt die adaptierte Bauweise nach 3.000 Alterungszyklen zu einem um ca. 8 % höheren Wert (ca. 8.800 Maxima pro m<sup>2</sup>). Ähnliche Verhaltensweisen zeigen sich bei den SDA S4 (~14.800 im Vergleich ~13.300) und SDA 8 (~10.600 zu ~13.300), der Parameter der Nächste-Nachbar-Distanz zeigt wieder dazu inverses Verhalten.

Auch die Gradienten der Textur zeigen ein mit der Zeit konstanteres Verhalten. Dies ist – bezogen auf die Modellierung – gerade in Bezug auf die tieffrequenten Rollgeräuschanteile von Bedeutung. Hier führt der Wechselwirkungsterm zwischen der Dichte lokaler Maxima und des Texturgradienten zu einer Verringerung des Rollgeräusches, wohingegen die Einzelterme jeweils diesem Effekt gegensteuern. Die ebenfalls in der ersten Hauptkomponente liegende Höhenverteilung der lokalen Maxima, die vor allem in die hochfrequente Modellierung eingeht, unterliegt bei den Probeplatten mit veränderter Bitumenrezeptur einem anderen Verhalten. Während sich die Werte im selben Bereich wie schon







zuvor bei den schrittweise gealterten Asphalt-Probeplatten in Standardbauweise bewegen, kommt es bei den Deckschichttypen SDA 4 und SDA 8 zu einem leichten Anstieg des Parameters. Die Ursachen dafür können nicht abschließend geklärt werden, liegen aber möglicherweise in der Kalibrierung der Labor-Texturmessungen, die bei geometrischen Änderungen der Kamera- und Beleuchtungspositionen eine veränderte Tiefenauflösung der Probeplatten erlauben.

Als letzter Parameter wird in Abbildung 102 wieder der Gestaltfaktor angegeben. Dieser zeigt – wie schon zuvor bei den Probeplatten in Standardbauweise – ein nicht klar interpretierbares Verhalten. Wo der Wertebereich des Parameters wieder in der korrekten Größenordnung liegt, kann kein stichhaltiger Alterungsverlauf abgebildet werden.

#### 6.5.2 Visuelle Texturänderungen

Die Abbildungen 103 bis 105 zeigen die Höheninformationen der Oberflächen der Asphalt-Probeplatten in adaptierter Bauweise, in Abbildung 106 sind die Höhendifferenzen zwischen den beiden Alterungsstufen abgebildet. Bei Vergleich mit den Probeplatten der Standard-Bauweise ist hier darauf zu achten, dass es sich um die Alterungsschritte 1 und 4 handelt, diese Nummerierung wurde hier beibehalten.

Während die grundlegenden Alterungsprozesse auch für die Probeplatten in experimenteller Bauweise ersichtlich sind, gestalten sich Quervergleiche zwischen der Standard- und adaptierten Bauweise schwierig. Wie schon zuvor ist in den Probeplatten die wachsende Prominenz der einzelnen Profilspitzen zu beobachten. Auch kommt es – wie auch bei den Probeplatten des Typs SDA 4 der Standard-Bauweise – hier zu einer langwelligen globalen Höhenänderung dieser Probeplatte. Ebenfalls sind in den Höhendifferenzbildern Verschiebungen von einzelnen Gesteinskörnern zu erkennen. Quantitative Bewertungen der visuellen Texturänderungen sind allerdings auch im Vergleich mit der Standard-Bauweise nicht möglich. Die grundsätzliche Erstellung von Bewertungsparametern auf Basis der Höhentexturänderungen würde den Projektrahmen sprengen. In diesem Zusammenhang muss auf die Auswertung der Texturparameter sowie der Schallabsorptionsmessungen verwiesen werden.

#### 6.5.3 Messung der Schallabsorption

Abbildung 107 zeigt den Verlauf der Schallabsorption für die künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten mit experimenteller Bauweise. Da hier nur zwei Alterungsschritte durchgeführt wurden sind die beobachteten Auswirkungen in erster Linie qualitativ als quantitativ zu betrachten.



Bundesministerium
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie





Bundesamt für Strassen ASTRA









Bundesamt für Strassen ASTRA





(a) Alterungsschritt 1



(b) Alterungsschritt 4

Abbildung 103: Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen - experimentelle Bauweise - SMA S1



(b) Alterungsschritt 4

Abbildung 104: Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen - experimentelle Bauweise - SDA 4



(b) Alterungsschritt 4

Abbildung 105: Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen - experimentelle Bauweise - SDA 8



Abbildung 106: Höhendifferenzen der Oberflächentexturen zum gering gealterten Zustand

Für die Prüflinge SMA S1-N zeigt sich im gering gealterten Bereich ein vergleichbarer Wert zu den Asphalt-Probeplatten SMA S1, auch die Steigung des Regressionsmodells ist in einem ähnlichen Bereich. Dennoch liegt das quadratische Peak Ratio beider Platten am Ende der Alterung unter 1, was einer (wenn auch geringen) Erhöhung des Absorptionsvermögens gleichkommt. Für die Asphalt-Probeplatten SDA 4-N ist ebenso der Wert im gering gealterten Bereich mit der ursprünglichen Bauweise vergleichbar, es kann aber eine geringere Steigung des Peak Ratios beobachtet werden, wobei nur die SDA 4-N1 einen signifikant niedrigeren Endwert zu den SDA 4-Platten aufweist.

Ebenso liegen die Startwerte der SDA 8-N-Platten in dem erwarteten Bereich, es konnte jedoch nur eine schwache Veränderung, d.h. eine geringe Steigung der Regressionsgeraden, durch die künstliche Alterung dieser Probeplatten in experimenteller Bauweise beobachtet werden. Für die SDA 8-N1 ist diese Veränderung sogar leicht negativ, was jedoch eher auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist, als auf einen vermehrten zugänglichen Hohlraumgehalt, der durch die Alterung hervorgerufen wird. Dennoch kann in dieser Bauweise eine erhöhte Stabilität im Bezug auf die Schallabsorptionseigenschaften vermutet werden.

#### 6.5.4 Anwendung der Rollgeräusch-Modellierung

In den Tabellen 43 bis 45 sind die Auswertungen der Modellanwendung auf die Probeplatten-Texturmessungen sowohl für die Standard- als auch für die adaptierte Bauweise angegeben. Wie



Abbildung 107: Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten mit experimenteller Bauweise - Parameter "Peak Ratio"







bereits erwähnt müssen dabei die hochfrequenten Bereiche aufgrund der in der Modellierung nicht berücksichtigbaren Hohlrauminformationen mit Bedacht interpretiert werden.

Die Ergebnisse zeigen tieffrequent in der Modell-Prognose keine relevanten Änderungen im Rollgeräusch. Während die Ergebnisse des SMA S1 leicht über den Aussagen der Standard-Bauweise liegen, schlagen die SDA 8-Ergebnisse eine Reduktion durch die adaptierte Bauweise vor.

Im Gegensatz dazu zeigen mittelfrequent beide Ergebnisse mit höherem Größtkorn eine Reduktion des Alterungsverhaltens auf. Das ist insofern von Bedeutung, als gerade dieser Frequenzbereich das Gesamt-Rollgeräusch am deutlichsten beeinflusst. Hierbei ist in erster Linie die konstant hohe Dichte der lokalen Maxima für diesen Effekt als verantwortlich anzusehen.

Die hochfrequente Modellauswertung, die in Tabelle 45 angegeben wird, muss wie bereits erwähnt unter spezifischen Gesichtspunkten interpretiert werden. Während die Dichte lokaler Maxima, die den Frequenzbereich positiv beeinflusst, sich auch in den Parameter-Verläufen der Probeplatten in adaptierter Bauweise durch eine gute Konstanz auszeichnet, reduzieren die Unsicherheiten des Parameters "hmax" die Aussagegenauigkeit. Auch muss die Fähigkeit der Bauweise zur Schallabsorption, die in die Modellierung nicht direkt eingeht, separat berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 6.4.3).

#Überrollungen	S1_std	S1_neu	SDA4_std	SDA4_neu	SDA8_std	SDA8_neu
1	86.4		83.3		83.4	
20	88.4	88.3	86.0	87.4	87.6	86.8
100	88.3		86.3		88.0	
500	87.7		86.2		87.6	
3000	87.0	87.9	86.6	85.6	87.5	86.1

Tabelle 43: Ergebnisse der tieffrequenten Rollgeräuschmodellierung bei Anwendung auf die Probeplatten

#Überrollungen	S1_std	S1_neu	SDA4_std	SDA4_neu	SDA8_std	SDA8_neu
1	87.3		79.9		86.8	
20	91.6	91.3	86.6	87.7	90.9	89.6
100	92.6		87.2		91.0	
500	91.9		87.1		90.9	
3000	92.3	91.8	88.0	84.8	91.0	88.8

Tabelle 44: Ergebnisse der mittelfrequenten Rollgeräuschmodellierung bei Anwendung auf die Probeplatten







#Überrollungen	S1_std	S1_neu	SDA4_std	SDA4_neu	SDA8_std	SDA8_neu
1	88.7		88.6		84.1	
20	90.7	91.2	90.5	91.5	88.0	88.0
100	91.1		90.4		88.3	
500	91.0		90.3		88.2	
3000	91.1	90.2	90.5	90.3	88.7	86.5

Tabelle 45: Ergebnisse der hochfrequenten Rollgeräuschmodellierung bei Anwendung auf die Probeplatten

#### 6.6 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurde die Herstellung sowie künstliche Alterung von Asphalt-Probeplatten beschrieben. Die Probeplatten wurden dabei schrittweise gealtert sowie deren Textur- und Schallabsorptionseigenschaften währenddessen untersucht. Dadurch wurden zusätzliche Einblicke in die relevanten Änderungen der Deckschichten gewonnen, die zu einer erhöhten Schallemission führen.

Insbesondere die Analysen der schrittweise gealtertern Porbeplatten in Standard-Bauweise erlauben im Vergleich mit den in-situ-Messungen der dichten und semi-dichten Asphalt-Fahrbahndeckschichten ein weiteres Verständnis der plastischen Verformungen in der Deckschichtmatrix. Verschiebungen bzw. Verkippungen der Einzel-Körner führen hier in Kombination mit der Verdrängung des Bitumens in tiefere Texturschichten zu akustisch relevanten geometrischen Änderungen im Reifen-Fahrbahnkontakt. Durch die Darstellung dieser Änderungen mittels Differenzbildern wurde versucht, einen visuellen Eindruck der Strukturänderungen zu vermitteln. Hierbei wird vor allem auf die Unterscheidung in globale und lokale Texturänderungen verwiesen.

Im Zuge der Stabilisierungsansätze wurden auch Probeplatten mit veränderter Bitumenrezeptur durchgeführt. Hier zeigen sich in Bezug auf die Oberflächentextur geringfügig positive Änderungen, die Messungen zum akustisch relevanten Hohlraumgehalt mittels Schallabsorptionsmessungen zeigen eine konsistente Verbesserung im direkten Vergleich zur Standard-Bauweise.

Die Änderungen der Oberflächentextur werden auch mittels Anwendung der auf den in-situ-Messungen basierenden Rollgeräuschmodellen abgebildet. Dabei werden im Bereich der Interpolation der Rollgeräuschmodelle gut interpretierbare Aussagen erzielt, im Hinblick auf die Extrapolation der Modelle – vor allem für kleine Größtkörner und vermehrt wirksamen Hohlraumgehalt – sind die Aussagen daraus wie erwartet deutlich eingeschränkt.







# 7 LEBENSZYKLUSBETRACHTUNG VON DICHTEN UND SEMI-DICHTEN DECKSCHICHTEN AUS BAUTECHNISCHER UND AKUSTISCHER SICHT

Eine wesentliche Zielsetzung im Bereich der Erhaltung des Straßenoberbaus liegt in der Abschätzung des Lebenszyklus der Konstruktion als Grundlage für die Beurteilung und Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen. Dadurch wird die Planung und letztendlich Ausführung dieser Erhaltungsaktivitäten wesentlich effizienter und eine Koordination mit der Erhaltungsplanung anderer Anlagenteile (Brücken, Tunnel, etc.) auch einfacher. Da eine große Anzahl von Oberbaukonstruktionen bereits ein- oder mehrmals instandgesetzt bzw. erneuert wurde, muss auch die Planung eines Bauprogramms bzw. eines Erhaltungsprogramms so vorgenommen werden, dass die zu beurteilenden Abschnitte durch die Wahl des nächsten Maßnahmenzeitpunktes sowie der nächsten Maßnahmenart in einen "standardisierten" Lebenszyklus eingetaktet werden können. Ein solcher standardisierter "bautechnischer" Lebenszyklus ist auch anhand der Entwicklung der akustischen Eigenschaften zu bewerten, was im Rahmen des gegenständlichen Projektes vorgenommen wird.

Die 3 DACH-Länder haben in den letzten Jahren die Untersuchungen der Lebenszyklen im Bereich des Oberbaus intensiviert. Erste Ergebnisse dieser Anstrengungen sind seit 2020 in das österreichische PMS aufgenommen worden, sodass auch im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes zunächst auf diese aktuellen Entwicklungen Bezug genommen wird. Die Ergebnisse dieser Überlegungen können jedoch auch auf die anderen beiden Länder direkt übertragen werden.

#### 7.1 Analyse von Nutzungsdauern von Deckschichten im Netz der ASFINAG

#### 7.1.1 Statistischen Analyse Nutzungsdauern

Eine wesentliche Grundlage für die Beschreibung des Lebenszyklus ist die Auswertung von aktuellen Daten aus dem Pavement Management. In den Jahren 2018 und 2019 wurde in Österreich eine umfangreiche statistische Auswertung von Nutzungsdauern (Liegedauern) auf dem hauptbelasteten (maßgebenden Fahrstreifen) unter Heranziehung von historischen Oberbaudaten am Netz der ASFINAG vorgenommen [61], deren zusammenfassende Ergebnisse der nachfolgenden Tabelle 46 entnommen werden können. Die bis dato durchgeführten Analysen und Veröffentlichungen (siehe hierzu RPE Stra 01 [62] sowie Dissertation Weninger (2001) [63] sind bereits mehrere Jahrzehnte alt und spiegeln nur bedingt die aktuelle Situation der Nutzungsdauern von modernen Deckschichten der letzten Generation wieder.

Die Anmerkungsspalte beinhaltet darüber hinaus Informationen zur Qualität der Aussage bzw.







Bundesamt für Strassen ASTRA

Schichtart	Material- kategorie	Zyklus	Nutzungsdauer [Jahre]	Anmerkung	
Deckschicht	AC deck	Z1	20,7	Datengrundlage ausreichend,	
	AU deck	Z2	15,3	verschiedene AC deck zusammengefasst	
	SMA S1	Z1	15,2	Datengrundlage ausreichend	
		Z2	14,1		
	SMA S3	Z1	9,1	Datengrundlage gering nur bedingt repräsentative Aussage	
		Z2	9,8		
		Z1	25,0	Datengrundlage ausreichend, Überbauung mit Asphalt wurden	
	Beton	Z2	24,5		
		Z3	24,4	ausgefiltert	

Tabelle 46: Nutzungsdauer Oberbaukonstruktionen ASFINAG-Netz [61]







der für die Auswertung verwendeten Daten. Dabei zeigt sich natürlich auch die Schwäche der Auswertung im Bereich einzelner Deckschichten, wo die aktuelle Datengrundlage derzeit nur bedingt repräsentativ eingestuft werden kann. Die ermittelten Nutzungsdauern wurden auch mit den Experten der ASFINAG diskutiert und mit den Erfahrungen verglichen, sodass beide Informationsgrundlagen zu dem nachfolgend entstandenen Bildern eines Lebenszyklus zusammengeführt werden konnten.

# 7.1.2 Interpretation der Nutzungsdauern sowie ingenieurmäßige Bewertung von vorhandenen Lebenszyklen

Die Ergebnisse in Tabelle 46 zeigen vor allem im Bereich der Deckschicht sehr unterschiedliche Ergebnisse zwischen Asphaltbeton (AC deck) und Splittmastixasphalt (SMA), wobei höhere Nutzungsdauern beim AC ermittelt werden konnten obwohl der SMA im Hinblick auf seinen strukturellen Aufbau (Makadamprinzip) deutlich widerstandsfähiger gegen Verkehrsbeanspruchung sein sollte. Die hohen Nutzungsdauern von Asphaltbeton sind jedoch auch auf den Umstand zurückzuführen, dass diese Deckschichtart im Netz der ASFINAG vor allem auf gering belasteten Abschnitten eingesetzt wird, im Vergleich zum SMA, der natürlich in erster Linie auf den hochbelasteten Streckenabschnitten zur Anwendung gelangt. Auch die Unterschiede zwischen 1. und 2. Zyklus (Z1 und Z2) zeigen die Notwendigkeit einer ähnlichen Überlegung im Rahmen einer umfassenden Lebenszyklusbetrachtung, wobei aufgrund der zunehmenden Beeinträchtigung der darunter liegenden gebundenen Schichten der zweite Zyklus kürzer ist als der Erste. Dies entspricht auch der ingenieurmäßigen Erwartung [61] der in die Analyse eingebundenen Experten.

Obwohl die Datengrundlage gering und dadurch auch eine Aussage derzeit nur bedingt möglich ist, zeigen Deckschichten, die mit einem semi-dichten SMA S3 errichtet wurden, deutlich geringer Nutzungsdauern als die dichten Deckschichten. Die derzeitigen Erfahrung gehen von einer Nutzungsdauer von ca. 12 Jahren aus, was etwas höher ist als es momentan die geringen Datenmengen zeigen.

#### 7.1.3 ASFINAG Standardlebenszyklus für SMA-Deckschichten

Wie bereits erwähnt, diente die Untersuchung der ASFINAG zur Definition von Standardlebenszyklen für die Bewertung von geplanten Erhaltungsmaßnahmen am Straßenoberbau im Zuge der Erstellung des 6-jährigen Bauprogramms. Auch der Vergleich der tatsächlichen Zustandsprognose auf einem Straßenabschnitt (als Ergebnis des PMS) mit dem Standardlebenszyklus soll ermöglichen, entsprechende Erhaltungsmaßnahmen optimal zu planen, sodass die im Standardlebenszyklus definierten







Ziele auch zukünftig erreicht werden können.

Der standardisierte Lebenszyklus für einen Straßenoberbau in Asphaltbauweise mit einer dichten SMA S1 oder SMA S2 Deckschicht oder einer Asphaltbetondeckschicht kann der nachfolgenden Abbildung 108 entnommen werden. Dabei sind insgesamt 3 maßgebende Intervalle definiert, wobei davon ausgegangen wird, dass die Bemessungslebensdauer gem. RVS 03.08.63 [3] zumindest 30 Jahre beträgt. Gekennzeichnet wird dieser Lebenszyklus durch folgende Erhaltungsmaßnahmen:

- 1. Instandsetzung: Erneuerung der Deckschicht und der direkt darunter situierten Binderschicht im Bereich des hauptbelasteten Fahrstreifens, wobei es sich um keine maßgebende strukturelle Verstärkung handelt, und einer Erneuerung der Deckschicht auf den restlichen, nicht hauptbelasteten Fahrstreifen ohne einen Austausch der Binderschicht.
- 2. Instandsetzung: Erneuerung der Deckschicht sowie der darunter liegenden Binderschicht und eines Teils der gebundenen Tragschicht am hauptbelasteten Fahrstreifen. Hierbei handelt es sich um eine strukturelle Verstärkungsmaßnahme. Auf den restlichen Fahrstreifen erfolgt eine Erneuerung der Deckschicht und der direkt darunter situierten Binderschicht.
- Erneuerung des gesamten gebundenen Oberbaus ggf. mit Anpassung der Trassierungselemente an aktuelle Anforderungen (z.B. Querneigung) über den gesamten Querschnitt (alle Fahrstreifen und befestigte Seitenstreifen). Dies entspricht einer Neuherstellung.



Abbildung 108: Standardisierter Lebenszyklus Straßenoberbau ASFINAG – Asphaltbauweise mit konventioneller Deckschicht (AC deck, SMA S1 und SMA S2)

П

FG







Es sei an dieser Stelle nochmals explizit darauf hingewiesen, dass es sich hier um einen auf der Grundlage von statistischen Auswertungen und der Beurteilung durch Experten entwickelten Standardlebenszyklus handelt. Die Abbildung 108 gibt auch gewisse Streuungen an, sodass über den gesamten Lebenszyklus gesehen die Nutzungsdauern durchwegs variieren können (und auch werden), was natürlich auf die große Anzahl von Einflussfaktoren während Bau, Betrieb und Erhaltung zurückzuführen ist. Auch die Auswirkungen klimatischer Veränderungen führen zu entsprechenden Veränderungen der Nutzungsdauern und erfordern, dass für die detaillierte Planung eines Bauprogramms jeder einzelne Abschnitte (im PMS) genau untersucht werden muss.

Der standardisierte Lebenszyklus für einen Straßenoberbau in Asphaltbauweise mit einer semidichten Deckschicht unter Verwendung eines SMA S3 kann nach [61] der nachfolgenden Abbildung 109 entnommen werden. Dabei sind wiederum insgesamt 3 maßgebende Intervalle definiert, wobei davon ausgegangen wird, dass die Bemessungslebensdauer gem. RVS 03.08.63 [3] auch bei dieser Bauweise zumindest 30 Jahre beträgt. Gekennzeichnet wird dieser Lebenszyklus durch folgende Erhaltungsmaßnahmen:

- 1. Instandsetzung: Erneuerung der Deckschicht des hauptbelasteten Fahrstreifens und auf den restlichen, nicht hauptbelasteten Fahrstreifen ohne einen Austausch der Binderschicht
- 2. Instandsetzung: Erneuerung der Deckschicht und der direkt darunter situierten Binderschicht für sämtliche Fahrstreifen.
- Erneuerung des gesamten gebundenen Oberbaus ggf. mit Anpassung der Trassierungselemente an aktuelle Anforderungen (z.B. Querneigung) über den gesamten Querschnitt (alle Fahrstreifen und befestigte Seitenstreifen). Dies entspricht einer Neuherstellung.



Abbildung 109: Standardisierter Lebenszyklus Straßenoberbau ASFINAG – Asphaltbauweise mit lärmmindernder Deckschicht (SMA S3) [61]

П

FG







Der in Abbildung 109 dargestellte Lebenszyklus zeigt auch die geringeren bautechnischen Nutzungsdauern von semi-dichten Deckschichten. Die Ursache der geringen Nutzungsdauern ist wie bereits häufig untersucht und durch Experten bestätigt in erster Linie auf die raschere Alterung des Materials durch den erhöhten Hohlraumgehalt zurückzuführen. Ob eine Verbesserung der Eigenschaften des Bindemittels vor dem Hintergrund der Entwicklung der akustischen Eigenschaften sinnvoll und zweckmäßig ist, soll im Rahmen des nächsten Kapitels diskutiert werden.

## 7.2 Akustische Entwicklung und Auswirkungen auf den Lebenszyklus

#### 7.2.1 Verknüpfung bautechnische und akustische Anforderungen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, ist es sinnvoll und zweckmäßig, den bautechnischen (standardisierten) Lebenszyklus eines Straßenoberbaus mit einer semi-dichten Deckschicht auch mit der Entwicklung der akustischen Eigenschaften zu vergleichen. Der in Abbildung 109 dargestellte in Osterreich entwickelte Lebenszyklus für SMA S3 Deckschichten bezieht sich ausschließlich auf die bautechnischen Zustandsindikatoren in Form des Gebrauchswertes und des Substanzwertes und enthält keinerlei Aussagen zur Entwicklung von akustischen Parametern. Eine ähnliche Funktion kann auch für die Deutschland unter Heranziehung des deutschen Gebrauchswertes und des Substanzwertes Oberfläche sowie für die Schweiz skizziert werden. Die Vergleiche der Erhaltungsintervalle in den 3 Ländern zeigen hier sehr ähnlich Entwicklungen, da auch die Eigenschaften der eingesetzten Baumaterialen sehr ähnlich sind. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass in fast allen Fällen, wo Instandsetzungen bzw. Erneuerungen notwendig sind, diese auf die bautechnischen Eigenschaften zurückzuführen sind. Dabei spielt auch der Umstand, dass im Rahmen der systematischen Straßenzustandserfassung nur auf wenigen Strecken Lärmmessungen vorgenommen werden, eine entscheidende Rolle. Auch ist eine Erneuerung aus rein akustischen Mängeln, ohne dass die Deckschicht permanente Deformationen, eine schlechte Griffigkeit und/oder strukturelle Schäden aufweist, nicht gegenüber den Straßenbenützern vertretbar, da hier die Verfügbarkeit der Straße deutlich im Vordergrund steht. Dies gilt natürlich ebenfalls für alle 3 DACH-Länder, wobei die strategischen Zielsetzung auch aufgrund der organisatorischen Gestaltungen der Straßenverwaltungen variieren können. Ungeachtet dessen, wird aber praktisch in keinem der 3 Länder eine in der Regel in gutem bautechnischen Zustand befindliche Deckschicht infolge eingeschränkten bzw. reduzierter Lärmeigenschaften erneuert bzw. instand gesetzt.

Wie bereits zuvor beschrieben und in Abbildung 109 dargestellt, sind die Nutzungsdauern von semi-dichten Deckschichten im Mittel ca. 4 Jahre kürzer als bei dichten, konventionellen Asphalt-







deckschichtarten, wobei dies für den ersten bzw. dritten Erhaltungszyklus gilt. Auch die Experten aus Deutschland und der Schweiz bestätigen diesen Umstand in ihren Ländern. Die Ursachen liegen, wie bereits erwähnt, in einer schnelleren Alterung des Bindemittels aufgrund eines höheren Hohlraumgehalt, der es natürlich zulässt, dass wesentlich mehr Oberfläche des Bindemittels der Luft, deren Schadstoffen und natürlich auch der Nässe ausgesetzt ist. Von wesentlicher Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch die Entwicklung der akustischen Eigenschaften. Ziel ist es bei der Auswahl einer lärmmindernden Deckschicht, die positiven akustischen Eigenschaften einer lärmmindernden Deckschicht über den gesamten Lebenszyklus aufrecht zu halten, sodass die bautechnische Lebensdauer ggf. in den Hintergrund tritt. Lange Nutzungsdauern bei denen die positiven akustischen Eigenschaften bereits über einen größeren Zeitraum verloren gegangen sind, sollten auf jeden Fall vermieden werden. Für eine ganzheitliche Bewertung ist es daher sinnvoll, die in Kapitel 3.3.4 im Detail beschriebene zeitliche Entwicklung der akustischen Eigenschaften mit dem bautechnischen Lebenszyklus und den darin verankerten bautechnischen Nutzungsdauern zusammenzuführen, um zumindest eine qualitative Aussage zu ermöglichen (siehe Abbildung 110). Wie in den Abbildungen 33, 34 und 35 (Kapitel 3.3.4) dargestellt, kann über einen Zeitraum von im Mittel ca. 8 Jahren (über alle 3 Länder betrachtet) ein besseres akustischen Niveau bei semi-dichten Deckschichten gegenüber konventionelle Deckschichten gehalten werden (siehe Abbildung 110). Danach sind die Unterschiede im Bereich der Streuungen der Ergebnisse aus den Messung, sodass der akustische Vorteil gegenüber einer dichten Deckschicht nicht mehr oder nur in geringem Ausmaß gegeben ist.

Die Grundlage für die Abbildung 110 bildet der aus den österreichischen Daten ermittelte und durch die Experten der ASFINAG ermittelte generelle Lebenszyklus für den SMA S3. Die Verschneidung der bautechnischen Lebensdauern mit den akustischen Eigenschaften kann jedoch in analoger Weise auch für Lebenszyklen anderer Oberbaukonstruktionen bzw. anderer semi-dichten Deckschichten vorgenommen werden, sodass die die Abbildung 110 nur ein mögliches Beispiel für eine solche Bewertung darstellt.

Auch hier zeigen sich große Streuungen, sodass wiederum nur von einer mittleren Erwartung gesprochen werden muss. Unter Heranziehung dieser Abschätzung ist es jedoch zumindest eine qualitative Aussage über die Wirkungsdauer der verbesserten akustischen Eigenschaften gegenüber einer dichten, konventionellen Deckschicht möglich. Diese zeigt über einen Zeitraum von ca. 2/3 des gesamten Lebenszyklus bessere akustische Eigenschaften als eine Deckschicht mit dichten, konventionellen Asphalt, jedoch muss hier einschränkend erwähnt werden, dass die geschätzte Länge







des Gesamtlebenszyklus Straßenoberbau von 44 Jahren auf 36 Jahren im Durchschnitt in diesem österreichischen Fall reduziert wird. Die Notwendigkeit eines Austausches der Deckschicht liegt jedoch nach wie vor bei den bautechnischen Kriterien. Würde der Zyklus der akustischen Eigenschaften den Zeitpunkt der Deckschichterneuerung bestimmen, müsste zumindest eine weitere Erhaltungsmaßnahme Berücksichtigung finden oder die Länge des Gesamtlebenszyklus weiter herabgesetzt werden. Dies würde auch bei den meisten Standardoberbaukonstruktionen in Deutschland und in der Schweiz zutreffen. Es sei jedoch hier nochmals erwähnt, dass in fast allen Fällen die bautechnischen Eigenschaften, also der bautechnische Zustand und nicht der akustische Zustand für den Ersatz einer Deckschicht verantwortlich zeichnet.


Abbildung 110: Kombinierter Lebenszyklus baulich und akustisch – Asphaltbauweise mit lärmmindernder Deckschicht (SMA S3) nach [61]

FG







# 7.2.2 Vorschlag für die Bewertung der akustischen Wirkungen über den Lebenszyklus

In vielen Fällen stellt sich natürlich die Frage, wie eine Bewertung der akustischen Eigenschaften über einen Lebenszyklus erfolgen kann. Dabei spielt natürlich die Bestimmung des Nutzens der akustischen Wirkungen eine wesentliche Rolle. Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes ISABELA [64] wurde diese Problematik untersucht und empfohlen, die positiven Wirkungen auf die betroffene Bevölkerung über die Zeit zu bewerten. Im Rahmen des Projektes konnte gezeigt werden, dass eine Gegenüberstellung der Mehrkosten aus der baulichen Erhaltung bzw. aus der verkürzten Gesamtnutzungsdauer durch die positiven Effekte von weniger und geringer betroffenen Anrainern (Stakeholder) monetär gegenübergestellt werden kann. Die monetäre Bewertung der betroffenen Personen kann dabei über erhöhte Kosten infolge gesundheitlicher Beeinträchtigungen bereits sehr gut abgeschätzt werden. Natürlich ist dabei die zeitliche Änderung der akustischen Eigenschaften zu berücksichtigen, sodass die jährlichen monetären Einsparungen entsprechenden Schwankungen (gem. der akustischen Zustandslinie in Abbildung 110) in Abhängigkeit von der Anzahl der Erhaltungsmaßnahmen unterworfen sind. Ob die daraus resultierenden einzusparenden Kosten (= monetärer Nutzen) höher oder geringer als die Mehrkosten der baulichen Erhaltung durch die verkürzte Nutzungsdauer sind, kann von Fall zu Fall bzw. von Strecke zu Strecke sehr unterschiedlich sein. Die im Rahmen des gegenständlichen Projektes ermittelten Grundlagen können für eine solche Untersuchung auf jeden Fall herangezogen werden.







### 8 ANALYSE UND ZUSAMMENFASSUNG

In ADURA - "Akustische Dauerhaftigkeit lärmmindernder dichter oder semi-dichter Asphaltdeckschichten" wurde das Alterungsverhalten typischer Deckschichten in Deutschland, der Schweiz und Österreich untersucht. Dabei wurden die verschiedenen länderspezifischen Bauweisen zusammengefasst und verglichen. Hier zeigen sich bereits merkliche Unterschiede: während in der Schweiz semi-dichte Asphalte mit geringem Größtkorn vielfach innerorts zur Lärmminderung eingesetzt werden, liegt der Fokus in Deutschland und Österreich vornehmlich im hochrangigen Straßennetz. Sowohl die dabei eingesetzten Größtkörner bzw. Sieblinien als auch die bautechnischen Hohlraumgehalte zeigen in der Schweiz eine wesentlich differierende Herangehensweise im Vergleich zu Österreich auf. Größtkörner von 4 und 8 mm bei Hohlraumgehalten im Bereich von 12 bis 20 Vol.% stehen hier der fast ausschließlichen Nutzung von Größtkörnern mit 11 mm und Hohlraumgehalten von max. 12 Vol.-% gegenüber. Dabei ist allerdings auch der abweichende Einsatzbereich zu berücksichtigen. Deckschichten der untersuchten Bautypen in Deutschland liegen hierbei tendenziell im mittleren Wertebereich.

Um das Alterungsverhalten abzubilden, wurde in einem ersten Schritt ein umfangreicher Datensatz an Bestandsstrecken statistisch untersucht. Hier ist zu berücksichtigen, dass damit die Altersverteilung der akustischen Eigenschaften der Deckschichten abgebildet wird. Dieser unterscheidet sich insofern vom Alterungsverlauf, als mehrere Deckschichten desselben Typs mit unterscheidlichem Alter im Gegensatz zu einer dezidierten Messstelle, die über einen längeren Zeitraum messtechnisch untersucht wird, abgebildet werden. Dadurch wird einerseits die akustische Bandbreite der Deckschicht berücksichtigt, allerdings kommt als zusätzlicher Unsicherheitsfaktor der Ausgangszustand der spezifischen Deckschicht hinzu. Hier ergibt sich die Unterscheidung des akustischen Zustandes zu einem gewissen Alter im Vergleich zur Altersentwicklung eines Deckschichttyps. Die so erstellte Darstellung eignet sich, die generellen Erwartungswerte eines Deckschichttyps zu einem gewählten Alter abzuschätzen. Die Abbildung der erwarteten Entwicklung eines spezifischen Belags basierend auf einem festgelegten Ausgangswert (beispielsweise basierend auf einer Erstmessung) ist dadurch aber mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet.

Grundsätzlich zeigt sich, dass die zeitliche Entwicklung des akustischen Zustandes von dichten und semi-dichten Fahrbahndecken durch nichtlineare Funktionen abgebildet werden sollte, die allerdings in eingeschränkten zeitlichen Bereichen durchaus linearisiert werden können. Hier wurden mehrere Modellansätze untersucht, die auf linearen bzw. nichtlinear logarithmischen Ansätzen beruhen.







Als Einflussparameter wurden sowohl das Alter als auch die Befahrungsstärke durch PKW- und Schwerverkehr unter den Aspekten der Modellform untersucht. Es zeigt sich, dass vor allem für stark belastete Straßen ein Ansatz basierend auf der logarithmierten Gesamt-Befahrungsmenge als sinnvoll erachtet werden kann. Ebenfalls ist auch eine Abschätzung der Unsicherheiten dieser Modellierungen zu sehen: weder das Alter noch die Befahrungsmengen alleine führen zu geringen Standardfehlern der Modelle. Diese nicht erklärte Varianz des Modellbildungsprozesses deutet auf weitere, nicht berücksichtigte Einflussparameter hin, die vor allem in der ursprünglichen Einbauqualität zu suchen sind.

Abschließend wurden die verschiedenen Deckschichten länderspezifisch in den Kontext eines Referenzbelages vom Typ SMA S1 gestellt. Dadurch wurde abgeschätzt, mit welchen Lärmminderungen bei den aus dem Datensatz erhobenen Altersverlauf gerechnet werden kann. Hier wurde auch auf die erwartete mittlere Wirkung über die abgeschätzte Lebensdauer der Deckschichttypen Bezug genommen.

Um die nicht erklärten weiteren Einflüsse des Altersverhaltens zu veranschaulichen, wurden gekoppelte Messungen des Rollgeräusches und der Oberflächeneigenschaften der Fahrbahndeckschichten durchgeführt. Dabei wurden – basierend auf Messungen der 3D-Textur der Messstellen – mehrere Parametersätze berechnet, die den altersabhängigen Zustand und die Streuung der Deckschichten abbilden. Diese Datensätze wurden daraufhin einer eingehenden Datenanalyse unterzogen mit dem Zweck, Zusammenhänge zu finden und damit Wirkmechanismen der Rollgeräuschentwicklung und der akustischen Alterung identifizieren. Hier wurden vor allem im Bereich der Reifenvibrationen Modelle erstellt, die auf Basis einzelner Texturparameter bereits ein hohes Maß an Modellgenauigkeit erlauben. Ziel dieser Modellierungen war aber nicht, ein hohes Maß an Vorhersagen auf Basis von Texturdaten zu erzielen, sondern statistisch modellierte funktionale Zusammenhänge zwischen den Deckschichteigenschaften und der Rollgeräuschentwicklung zu erstellen. Es zeigt sich hier in erster Linie ein starker Einfluss der Abnahme der Dichte lokaler Maxima in der Oberflächentextur, die im Reifen-Fahrbahnkontakt zu einer Zunahme an tief- und mittelfrequenten Rollgeräuschemissionen führt.

Im Bereich des über den textur- sowie hohlraumgehaltsinduzierten Strömungswiderstand beeinflussten hochfrequenten Air Pumpings wurden zwei Wege beschritten: einerseits wurde durch SPERoN-Simulationen der Wirkbereich verschiedener Hohlraumgehalte und Deckschichtdicken abgebildet, sowie eine Parameterstudie des Einflusses dieser auf den frequenzabhängigen Rollgeräuschpegel durchgeführt. Dabei wurden Messergebnisse der 3D-Oberflächentextur mit Hohlraumdaten aus







Bohrkerninformationen verwendet. Ebenfalls wurden Messungen der Schallabsorption der Fahrbahndecken mittels neu eingeführtem in-situ-Messverfahren durchgeführt und mit den Simulationen verglichen. Es zeigt sich dabei ein vergleichbarer funktionaler Verlauf der Absorptionskurven. Auf Basis der Messdaten der in-situ-Absorptionsmessungen wurden die vorangehenden Modelle erneut berechnet. Dabei konnte ein Einfluss der Schallabsorption auf den hochfrequenten Rollgeräuschbereich identifiziert werden. Hier ist zu erwähnen, dass auch der Altersverlauf der Hohlraumgehalte sowohl in den zur Verfügung stehenden Bohrkerndaten als auch im erhobenen in-situ-Datensatz kein eindeutiges Verhalten zeigt. Während zur Zeit der Datensatz-Erhebung noch von einem vergleichbaren Hohlraumgehalt der semidichten Deckschichten in den drei Ländern des DACH-Raumes ausgegangen wurde, zeigt sich bei den Deckschichten des Typs SMA S3 in erster Linie ein Wertebereich an der unteren Grenze.

Um weitere Einblicke in das Alterungsverhalten von dichten und semi-dichten Asphaltdeckschichten zu erlangen, wurden Laborversuche an Probeplatten unterschiedlicher Deckschichttypen durchgeführt. Dabei wurden Probeplatten der Typen SMA S1, SDA 8 und SDA 4 hergestellt, im Labor künstlich schrittweise gealtert und nach jedem Alterungsschritt vermessen. Hier wurden sowohl Messungen der Oberflächentextur als auch der Schallabsorption mittels nicht-invasiver Linien-Array-Technik durchgeführt. Die Verläufe der so erhobenen Textur- und Schallabsorptionsparameter stehen in Einklang mit den in situ erhobenen Messwerten und Modellbildungen. Die beobachteten Texturänderungen lassen sich durch die künstliche Alterung reproduzieren, vor allem die Abnahme der als relevant erachteten Dichte lokaler Maxima konnte deutlich abgebildet werden. Auch die Abnahme der Schallabsorption und damit einhergehend die Annahme der Reduktion akustisch wirksamer Hohlräume konnte gezeigt werden. Aufgrund der geringen Breite des künstlich gealterten Bereiches konnte hier allerdings kein direkter Vergleich mit den in-situ-Messungen hergestellt werden.

Darauf folgend wurde eine visuelle Analyse der Probeplatten durchgeführt. Einerseits wurden die schrittweise gealterten Oberflächentexturen abgebildet, um einen augenscheinlichen Eindruck der Veränderungen an den Oberflächentexturen zu vermitteln. Andererseits wurden Differenzbilder der Texturen erstellt, um die globalen Änderungen der Texturen abzubilden. Dabei zeigt sich eine Verschiebung der einzelnen Gesteinskörner, die zu einer akustisch relevanten Änderung im Reifen-Fahrbahnkontakt führt. Zusätzlich wurde die lokale Änderung der Oberfläche an einem ausgewählten Gesteinskorn dargestellt. Hier zeigt sich die – teilweise durch plastische Verformungen des Bitumens hervorgerufene – Änderung der für den Reifenkontakt relevanten Oberfläche des Einzel-Korns.

Schlussendlich wurden Asphalt-Probeplatten mit veränderter Rezeptur hergestellt und ebenfalls







schrittweise gealtert. Dabei wurde anstelle eines Bitumens 25/55-55A ein härteres Bitumen der Sorte 10/45-65A verwendet, um die mechanischen Veränderungen in der Oberflächentextur zu reduzieren. Sowohl die Oberflächentexturparameter als auch die gemessenen Schallabsorptionen zeigen bei diesen Probeplatten ein geringfügig konstanteres Verhalten.

Abschließend wurde im Projekt – basierend auf der anfangs erstellten Abschätzung der altersabhängigen Lärmminderung – eine Lebenszyklusbetrachtung der Deckschichttypen erstellt. Dabei wurde auf die österreichische Herangehensweise der Erhaltungsplanung Bezug genommen. Hier soll besonders auf die Möglichkeit einer altersabhängigen Berücksichtigung der akustischen Eigenschaften der Fahrbahndecken in der Lärmschutz- sowie der Instandsetzungsplanung hingewiesen werden.

#### 8.1 Ausblick

Durch den Vergleich der Bauweisen und Erfahrungen der akustischen Eigenschaften der dichten und semi-dichten Asphaltdeckschichten wurde ein Wissensaustausch innerhalb des DACH-Raumes ermöglicht. Erfahrungen innerhalb der im Projekt vertretenen Länder können somit in die weitere länderspezifische Lärmschutzplanung einfließen. Hier ist als nächster Schritt ein geordnet konzipierter Test der Erkenntnisse mittels Versuchsabschnitten unter Variation von Größtkorn, Hohlraumgehalt und Bitumensorte vorzuschlagen. Dieser Versuch sollte auf die in der Lebenszyklusanalyse erarbeitete typische Lebensdauer der Deckschichten hin ausgerichtet sein und eine regelmäßige Vermessung der relevanten Parameter beinhalten.

In Hinblick auf die im Projekt angewandten Methoden erscheint eine Weiterentwicklung und Vereinheitlichung der 3D-Oberflächenerfassung bzw. Parameterberechnung als zielführend. Sowohl im Zuge von ADURA als auch in weiteren in letzter Zeit geförderten Projekten, die die Untersuchung von Deckschichteigenschaften zum Ziel hatten wurden, zeigt sich das Potential dieser Messtechnik in Hinblick auf die Deckschichtcharakterisierung. Die gekoppelte Messung von Rollgeräuschpegeln und 3D-Oberflächentexturen kann es ermöglichen, die vibrationsinduzierten Entstehungsmechanismen des Rollgeräusches zu untersuchen.

Erstmalig eingesetzt wurde die experimentelle Messmethode zur in-situ-Schallabsorptionsbestimmung von semi-dichten Fahrbahndeckschichten. Diese könnte im Falle einer ausführlichen Methodenerarbeitung und -überprüfung in Hinblick auf semi-dichte und offenporige Deckschichten weitere Untersuchungsmöglichkeiten eröffnen.







Auch die ausführliche Untersuchung des Strömungswiderstandes in Hinsicht auf die Rollgeräuschentstehung erscheint weitere Forschungsmöglichkeiten zu eröffnen. Hier kann die 3D-Oberflächentextur es ermöglichen, gerade in Hinblick auf den texturinduzierten Strömungswiderstand (z.B. unter Beachtung von anisotropen Fahrbahndeckschichten) neue Erkenntnisse zu gewinnen. Gekoppelt mit möglichen Messungen der Schallabsorption der Deckschichten scheint hier eine weitere Vertiefung des Wissensstandes zur Rollgeräuschentstehung möglich.

Schlussendlich zeigt die visuelle bzw. optische Erfassung der Oberflächenänderungen der schrittweise gealterten Probeplatten ein hohes Potential zur Interpretierbarkeit der Alterungsvorgänge. Eine umfassende Bewertung der sich ergebenden Differenz-Texturen kann auch für weitere Deckschichtbauweisen und gebrauchsorientierten Fahrbahneigenschaften von hohem Interesse sein. Zudem erscheint eine Weiterentwicklung der Methode zur Laboralterung der Asphalt-Probeplatten sinnvoll, da im bisherigen Ansatz der Aspekt der Verschmutzung durch Reifenabrieb und anderen Umwelteinflüssen nicht berücksichtigt wurde.







## Tabellenverzeichnis

1	Übersicht der Österreichischen Regelwerke für lärmmindernde semi-dichte Asphalt-	
	deckschichten	17
2	Empfehlungen für die Auswahl von Mischgutsorten nach RVS 08.97.05	17
3	Anforderungen SMA S3 (Erstprüfung) nach RVS 08.97.05	19
4	Anforderungen BBTM (Erstprüfung) nach RVS 08.97.05	19
5	Bindemittelsysteme und deren Anforderungen nach RVS 08.97.05	20
6	Übersicht der Deutschen Regelwerke für lärmmindernde Asphaltdeckschichten	21
7	Richtwerte für Asphaltmischgut SMA LA	23
8	Richtwerte für Asphaltmischgut MA	25
9	Richtwerte für Asphaltmischgut DSH-V 8 und DSH-V 5	27
10	Übersicht der Schweizerischen Regelwerke für lärmmindernde Asphaltdeckschichten	28
11	Charakteristischer Hohlraumgehalt und Grenzwerte für den Hohlraumgehalt der	
	Marshall-Prüfkörper	29
12	Korngrößenverteilung des semidichten Mischgutes	30
13	Schichtdicken in Abhängigkeit der Mischgutsorten und -klassen	31
14	Korngrößenverteilung u.a. AC MR	32
15	Gussasphaltschichtdicken in Abhängigkeit der Sorten und Typen	33
16	Anforderungen Materialeigenschaften von semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten	
	in DACH	35
17	Clusterung Materialeigenschaften von semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in	
	DACH	35
18	Vergleichsmatrix von semi-dichten (halb-offenen) Deckschichten in DACH	36
19	Clusterung Lage im Querschnitt und Schwerverkehrsbelastung	36
20	Modellierung des Alterungsverhaltens über die verschiedenen Deckschichttypen -	
	bautechnischer Cluster SMA 5	58
21	Modellierung des Alterungsverhaltens über die verschiedenen Deckschichttypen -	
	bautechnischer Cluster SMA 8	59
22	Modellierung des Alterungsverhaltens über die verschiedenen Deckschichttypen -	
	bautechnischer Cluster SMA 11	59
23	Lärmminderung im Vergleich zu SMA 11 - Schweiz	69
24	Lärmminderung im Vergleich zu SMA 11 - Deutschland	70







25	Lärmminderung im Vergleich zu SMA 11 - Österreich	71
26	Beschreibung der Parameter der 3D-Textur	78
27	Ladungsvektoren der ersten drei Hauptkomponenten der Hauptkomponentenanalyse	88
28	Gruppierung der CPX-Terzbanddaten in drei Frequenzbereiche	96
29	Ergebnisse der linearen Regression - tieffrequentes Rollgeräusch mit erster Haupt-	
	komponente	98
30	Ergebnisse der linearen Regression - mittelfrequentes Rollgeräusch mit zweiter Haupt-	
	komponente	98
31	Ergebnisse der linearen Regression - hochfrequentes Rollgeräusch mit erster Haupt-	
	komponente	98
32	Ergebnisse der linearen Regressionsmodelle	99
33	Ergebnisse des zweidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells -	
	tieffrequenter Rollgeräuschbereich	101
34	Ergebnisse des zweidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells -	
	mittelfrequenter Rollgeräuschbereich	104
35	Ergebnisse des eindimensionalen linearen Regressionsmodells - mittelfrequenter	
	Rollgeräuschbereich	105
36	Ergebnisse des zweidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells -	
	hochfrequenter Rollgeräuschbereich	106
37	Ergebnisse des dreidimensionalen interagierenden linearen Regressionsmodells -	
	hochfrequenter Rollgeräuschbereich	108
38	Parameter für verschiedene Absorptionsgrade von Asphaltdeckschichten 1	119
39	Kennwerte von Bestandsstrecken mit Asphaltdeckschichten mit 11 mm Größtkorn in	
	Österreich	121
40	Ergebnisse der linearen Regression - hochfrequentes Rollgeräusch unter Berücksichtigun	g
	der Schallreflexion	132
41	Kennwerte zur Herstellung der Asphalte	135
42	Versuchsparameter für den Spurbildungsversuch gemäß TP Asphalt-StB, Teil 22 1	139
43	Ergebnisse der tieffrequenten Rollgeräuschmodellierung bei Anwendung auf die	
	Probeplatten	169
44	Ergebnisse der mittelfrequenten Rollgeräuschmodellierung bei Anwendung auf die	
	Probeplatten	169







45	Ergebnisse der hochfrequenten Rollgeräuschmodellierung bei Anwendung auf die
	Probeplatten
46	Nutzungsdauer Oberbaukonstruktionen ASFINAG-Netz



Schweizerische Eidgenossenschaft Confederation suisse Confederazione Svizzera Confederaziun svizra Bundesamt für Strassen ASTRA



# Abbildungsverzeichnis

1	Beispiel Sieblinie SMA 11 S1 aus Österreich	10
2	Beispiel Sieblinie PA 11 aus Österreich	12
3	Drainasphalteinbau auf der A10	16
4	Asphaltdeckschicht aus Lärmarmen Splittmastixasphalt - SMA 8 LA	22
5	Asphaltdeckschicht aus Lärmarmen GUssasphalt - MA 5 S	25
6	Dünne Asphaltdeckschicht in Heißbauweise auf Versiegelung DSH-V 5	28
7	Deckschichtverteilung in Bayern	42
8	Altersverteilung der Deckschichttypen im österreichischen A+S-Netz	45
9	kumulierte Altersverteilung der Deckschichttypen im österreichischen A+S-Netz	45
10	Altersverteilung der eingebauten Deckschichten im Kanton AG im Innerortsbereich.	48
11	Geographische Lage der von G+P vermessenen Strecken	49
12	in die Analyse eingeflossene Streckenlänge aus dem G+P – Messnetz $\ldots$ .	49
13	Übersicht über die in Österreich berücksichtigten CPX-Messstrecken	51
14	Untersuchte Strecke in Deutschland	52
15	Deckschichtverteilung im untersuchten Datensatz	53
16	Detail der Deckschichtverteilung im untersuchten Datensatz.	53
17	Überlagerung der nach Baulose gegliederten gemessenen CPX-Pegel über die 3	
	Länder Schweiz (CH), Österreich (AT) und Deutschland (DE)	55
18	Vergleich der Deckschichten im DACH-Raum in Bezug auf Gesamtanzahl an	
	Überrollungen	56
19	Clusterung von 8er-Deckschichten aus dem DACH-Raum	57
20	Clusterung von 11er-Deckschichten aus dem DACH-Raum	57
21	Pegelverteilung Deckschichten über verschiedene Belagsalter	61
22	Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SDA4-12	61
23	Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SDA4-16	62
24	Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SDA8-12	62
25	Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SMA S1	63
26	Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SMA S3	64
27	Datengrundlage von Deutschland	64
28	Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SMA-8S	65
29	Modellierung des Alterungsverhaltens für die Deckschicht SMA-11S	65







30	Standardabweichungen innerhalb eines Bauloses - SDA-Deckschichten	66
31	Standardabweichungen innerhalb eines Bauloses - SMA-Deckschichten	67
32	Standardabweichungen innerhalb eines Bauloses - SMA-S-Deckschichten	67
33	Mittlere Belagsalterung - SDA	68
34	Mittlere Belagsalterung - Deutschland	70
35	Mittlere Belagsalterung - Österreich	71
36	3D-Textursensor	75
37	Beispiel eines 3D-Texturpatches	77
38	Richtwirkungsdiagramme des Beamformers	80
39	Getrennte Impulsantworten für die Direktkomponente und Reflexion nach Anwendung	
	des Beamforming Algorithmus	81
40	Lage der 3D-Textur-Messstellen im hochrangigen Straßennetz	82
41	Änderung der relativen Anzahl lokaler Maxima gegen Alter und Befahrungsstärke	83
42	Änderung des Gradienten in Fahrtrichtung gegen Alter und Befahrungsstärke	84
43	Änderung der Nächster-Nachbar-Distanz gegen Alter und Befahrungsstärke	85
44	Änderung der mittleren Höhe der lokalen Maxima gegen Alter und Befahrungsstärke	85
45	Änderung des Gestaltfaktors gegen Alter und Befahrungsstärke	86
46	Beschriebene Varianz des 3D-Texturdatensatzes durch die Hauptkomponentenanalyse	87
47	Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten des 3D-Texturdatensatzes	88
48	graphische Darstellung der ersten drei Hauptkomponenten als farbcodierte Ladungs-	
	matrix bzw. als Dendrogramm	89
49	Änderung der ersten Hauptkomponente gegen Alter und Befahrungsstärke	90
50	Änderung der zweiten Hauptkomponente gegen Alter und Befahrungsstärke	90
51	Änderung des mittleren Schallreflexionsverhaltens im 1000-Hz-Terzband gegen Alter	
	und Befahrungsstärke	91
52	Hauptkomponentenanalyse der CPX-Daten	95
53	Autokorrelations-Matrizen der CPX-Terzbanddaten	95
54	Streudiagramm-Matrix der tief-, mittel und hochfrequenten Anteile mit den ersten drei	
	Hauptkomponenten der 3D-Texturparameter	97
55	Häufigkeitsverteilung der Kerndichteverteilung von Bestimmtheitsmaß und Häufigkeit	
	der Parameterverteilung für eine zweidimensionale lineare Modellierung	100







56	Zusammenhang zwischen dem Textur-Gradienten, der Anzahl lokaler Maxima und
	dem tieffrequenten Rollgeräusch
57	Häufigkeitsverteilung der tieffrequenten Modell-Einflussfaktoren für SMA S1 und
	SMA S3
58	Reevaluierung des zweidimensionalen linearen Modells - tieffrequenter Roll-
	geräuschbereich
59	Häufigkeitsverteilung der mittelfrequenten Modell-Einflussfaktoren für SMA S1 und
	SMA S3
60	Reevaluierung des eindimensionalen linearen Modells - mittelfrequenter Roll-
	geräuschbereich
61	Zusammenhang zwischen der Anzahl lokaler Maxima, deren Höhenverteilung und
	dem hochfrequenten Rollgeräusch
62	Häufigkeitsverteilung der hochfrequenten Modell-Einflussfaktoren für SMA S1 und
	SMA S3
63	Reevaluierung des zweidimensionalen linearen Modells - hochfrequenter Roll-
	geräuschbereich
64	Ergebnis der Computertomographie eines Bohrkerns
65	Kenngrößen und Ablaufschema der Parameterstudie zum Einfluss des Hohlraumgehalts112
66	Funktionale Zusammenhänge zwischen den bautechnischen und akustischen Kenn-
	größen für die Berechnung des Schallabsorptionsgrads.
67	Schallabsorptionsgrad $lpha$ und hohlrauminduzierte Pegelminderung $\Delta L_{ m H}$ in Abhängigkeit
	der Frequenz f
68	2 m lange Texturprofile aus den Texturmessungen im 1. Fahrstreifen
69	Texturinduzierter Strömungswiderstand $R_{ m s,T}$ für Asphaltdeckschichten
70	Mittlere Texturspektren, $MPD$ - und $R_{\rm s,T}$ -Werte $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ $\ldots$ 124
71	Hohlraumgehalte $\sigma_{ m bau.}$ , mittlere $MPD$ -Werte, maximale Schallabsorptionsgrade $lpha$ ,
	Frequenzen des ersten Absorptionsmaximums und Strömungswiderstände $R_{ m s}^{st}$ in
	Abhängigkeit des Alters
72	Terzspektren und Gesamtpegel $L_{ m CPXP,80km/h}$ des simulierten Reifen-Fahrbahn-
	Geräusches
73	Hohlraumgehalte $\sigma_{\text{bau.}}$







74	Terzspektren und Gesamtpegel $L_{ m CPXP,80km/h}$ des Reifen-Fahrbahn-Geräusche -
	Spreizung 1,3
75	Terzspektren und Gesamtpegel $L_{ m CPXP,80km/h}$ des Reifen-Fahrbahn-Geräusche -
	Spreizung 1,6
76	Beispiele der in-situ-Schallabsorptionsmessungen
77	hochfrequente Rollgeräuschanteile im Vergleich mit dem Schallreflexionsverhalten . 131
78	Gegenlauf-Zwangsmischer zur Herstellung des Asphaltmischguts
79	Walzsektor-Verdichtungsgerät zur Herstellung großformatiger Asphalt-Probeplatten . 136
80	Walzsektor-Verdichtungsgerät - Funktionsweise
81	Plattenhöhe und aufgebrachte Kraft je cm Plattenbreite während der Verdichtung im
	Walzsektor-Verdichtungsgerätes
82	Prüfeinrichtung zur Durchführung der Spurbildungsversuche zur künstlichen Alterung
	der Asphalt-Probeplatten
83	Grafische Darstellung der Ergebnisse von Spurbildungsversuche - beispielhaft für
	SMA 11 S
84	Setup "Inline Computational Imaging"
85	Beispiel einer ICI-Aufnahme
86	Linienarray mit MEMS-Mikrofonen zur Messung der Schallabsorption der Probeplatten144
87	Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "nmax_rel" 147
88	Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "nneigh" 147
89	Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "grad_x" 148
90	Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "hmax" 148
91	Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "g" 148
92	Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen -
	SMA S1
93	Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen -
	SDA 4
94	Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen -
	SDA 8
95	Höhendifferenzen der Oberflächentexturen zum ungealterten Zustand - SMA S1 154
96	Höhendifferenzen der Oberflächentexturen zum ungealterten Zustand - SDA 4 154
97	Höhendifferenzen der Oberflächentexturen zum ungealterten Zustand - SDA 8 155





Bundesamt für Strassen ASTRA



98	Falschfarbendarstellung eines Ausschnittes einer SDA 8-Probeplatte
99	Höhenanderungen bei der künstlichen Alterung eines SDA 8-Korns
100	Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten - Parameter "Peak Ratio" . 160
101	Ergebnis der Rollgeräusch-Modellierung bei Anwendung auf die schrittweise gealter-
	ten Probeplatten
102	Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten mit verändertem Bitumen . 165
103	Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen -
	experimentelle Bauweise - SMA S1
104	Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen -
	experimentelle Bauweise - SDA 4
105	Höheninformationen der Oberflächentexturen zu verschieden gealterten Zuständen -
	experimentelle Bauweise - SDA 8
106	Höhendifferenzen der Oberflächentexturen zum gering gealterten Zustand 167
107	Verlauf der künstlichen Alterung der Asphalt-Probeplatten mit experimenteller Bauwei-
	se - Parameter "Peak Ratio"
108	Standardisierter Lebenszyklus Straßenoberbau ASFINAG – Asphaltbauweise mit
	konventioneller Deckschicht
109	Standardisierter Lebenszyklus Straßenoberbau ASFINAG – Asphaltbauweise mit
	lärmmindernder Deckschicht
110	Kombinierter Lebenszyklus baulich und akustisch – Asphaltbauweise mit lärmmindernder
	Deckschicht





### Literatur

- [1] A. Weninger-Vycudil. Skriptum Straßenbau, basierend auf RVS 08.97.05 (Anforderungen an Asphaltmischung. Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schien Verkehr, Wien, 2008). FH-Campus Wien, 2017.
- [2] FSV Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr. *RVS 08.97.05 Anforderungen an Asphaltmischgut.* Wien, 2015.
- [3] FSV Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr. RVS 03.08.63 Oberbaubemessung. Wien, 2016.
- [4] G. Rodehack. Leiser Straßenverkehr Zuverlässig lärmmindernde Asphaltdeckschichten., 2015.
- [5] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA. FGSV 739, FGSV Verlag, Köln, 2014.
- [6] A. Buttgereit. Lärmmindernde Asphaltfahrbahnen in Kommunen. Straße und Autobahn, Heft 4, S.273-278, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2015.
- [7] Forschungsgesellschaft f
  ür Stra
  ßen- und Verkehrswesen. Arbeitspapier Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken. FGSV 442, FGSV Verlag, K
  öln, 2013.
- [8] K. Schellenberg. Lärmarme Oberflächen bei Gussasphalt-Deckschichten. Straße und Autobahn, Heft 11, S.869-875, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2017.
- [9] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Empfehlungen für den Bau von Asphaltschichten aus Gussasphalt. FGSV 740, FGSV Verlag, Köln, 2011.
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. FGSV 797, FGSV Verlag, Köln, 2013.
- [11] Forschungsgesellschaft f
  ür Stra
  ßen- und Verkehrswesen. Arbeitspapier f
  ür die Ausf
  ührung von Asphaltdeckschichten aus PMA. FGSV 738, FGSV Verlag, K
  öln, 2015.
- [12] R. Schmerbeck. Asphaltmischgut f
  ür D
  ünne Asphaltdeckschichten im Hei
  ßeinbau auf Versiegelung. Stra
  ße und Autobahn, Heft 11, S.723-727, Kirschbaum Verlag, Bonn, 2009.







- [13] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen. FGSV 798, FGSV Verlag, Köln, 2013.
- [14] E. Bühlmann und E. Hammer und N. Bueche und J. Perret. Ausführungsbestimmungen Akustik für Semidichte Asphalte – Auswertung Physischer Parameter. Clusterung Lage im Querschnitt und Schwerverkehrsbelastung, 2017.
- [15] Schweizer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Semidichtes Mischgut und Deckschichten – Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung, SNR 640 436, S.1-16. VSS, Zürich, 2015.
- [16] M. Schweizer. Handbuch Strassenbau. Bau- und Verkehrsdepartment des Kantons Basel-Stadt, Basel, 2017.
- [17] O. Ripke. Lärmmindernder Splittmastixasphalt. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 68, S.1-23, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 2017.
- [18] Schweizer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Asphaltmischgut Mischgutanforderungen – Teil 1: Asphaltbeton, SN 640 431-1-NA. VSS, Zürich, 2013.
- [19] European Comittee for Standardization. ÖNORM EN 13108-1: Asphaltmischgut Mischgutanforderungen Teil 1: Asphaltbeton, 2016.
- [20] Schweizer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS. Gussasphalt Konzeption, Ausführung und Anforderungen an die eingebauten Schichten, SN 640 440c, S.1-16. VSS, Zürich, 2008.
- [21] The European Comission. Comission Directive (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council. Brussels, 2015.
- [22] U. Sandberg und J. Ejsmont. Tire/Road Noise Reference Book. Informex, 2002.
- [23] H. Pestalozzi, H.-J. Grolimund und C. Angst. Lärmarme Strassenbeläge innerorts, 2004.
- [24] C. Angst, B. Francoise, B. Dieter, G. Hans-Jörg und P. Hansueli. Lärmarme Strassenbeläge innerorts. Schlussbericht 2007, 2007.







- [25] E. Bühlmann, P. Bürgisser, T. Ziegler, C. Angst und T. Beckenbauer. Forschungspaket lärmarme Beläge Innerorts - Teilprojekt (TP) 3: Langzeitmonitoring, 2017.
- [26] E. Bühlmann, E. Hammer, N. Bueche und J. Perret. Ausführungsbestimmungen Akustik für semidichte Asphalte Auswertung physischer Parameter (in German and French), 2017.
- [27] E. Bühlmann und E. Hammer. Towards semi-dense asphalt mixtures that guarantee acoustic performance and durability, 2017, no. 4.
- [28] E. Bühlmann, M. Dias und S. Steiner. Influence of environment- and traffic-related factors on acoustic ageing of low-noise road surfaces in Switzerland. Euronoise 2015, Maastricht, pp. 1321-1326, 2015.
- [29] FSV Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr. *RVS 04.02.11 Lärmschutz.* Wien, 2009.
- [30] International Organization for Standardization. *ISO 11819-1: Acoustics Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise Part1: Statistical Pass-By method.* Genf, 1997.
- [31] M. Kalivoda, M. Jaksch, P. Riederer und G. Strohmayer. *Studie über das Kraftfahrzeuggeräusch unter realen Fahrbahnoberflächenbedingungen*. Wien, April 2006.
- [32] Johann Litzka and Jürgen Haberl. Versuchsstrecke Lärmmindernde Straßendecken A12. Technical Report Heft 603, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2012. ISSN 0379-1491.
- [33] R. Wehr and M. Conter. *On the acoustic long-term performance of asphalt and concrete road surfaces on Austrian motorways*. Euronoise, 2015.
- [34] FSV Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr. *RVS 11.06.64 Rollgeräuschmessungen.* Wien, 1997.
- [35] International Organization for Standardization. *ISO 11819-2: Acoustics Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise Part 2: Close-proximity method.* Genf, 2012.
- [36] ASTM International F09 Committee. ASTM F2493 14: Standard Specification for P225/60R16
   97S Radial Standard Reference Test Tire. West Conshohocken, Pennsylvania, USA, 2006.
- [37] B. Peeters, F. Reinink und W. van Vliet. *Close Proximity (CPX) Round Robin Test 2017*. Euronoise, 2018.





- [38] T. Vieria und U. Sandberg. Close Proximity (CPX) Round Robin test: Comparison of results from four different CPX trailers measuring noise properties of 10 Swedish road surfaces. Internoise, 2019.
- [39] International Organization for Standardization. *ISO/TS 11819-3: Acoustics Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise Part 3: Reference tyres.* Genf, 2017.
- [40] International Organization for Standardization. ISO 13473-1: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe. Genf, 2019.
- [41] FSV Österreichische Forschungsgesellschaft Straße Schiene Verkehr. *RVS 08.16.01 Anforderungen an Asphaltschichten.* Wien, 2010.
- [42] Eurpean Comittee for Standardization. ÖNORM EN 13036-1: Oberflächeneigenschaften von Straßen und Flugplätzen — Prüfverfahren — Teil 1: Messung der Makrotexturtiefe der Fahrbahnoberfläche mit Hilfe eines volumetrischen Verfahrens. Brüssel, 2010.
- [43] International Organization for Standardization. ISO 10534-1: Acoustics Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes Method using standing wave ratio. Genf, 1996.
- [44] Eurpean Comittee for Standardization. ÖNORM EN 12697-8: Asphalt Prüfverfahren Teil 8: Bestimmung von volumetrischen Charakteristiken von Asphalt-Probekörpern. Brüssel, 2019.
- [45] International Organization for Standardization. *ISO 13472-1: Acoustics Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ Extended surface method.* Genf, 2002.
- [46] International Organization for Standardization. ISO 13472-2: Acoustics Measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ - Part 2: Spot method for reflective surfaces. Genf, 2010.
- [47] K. Valentin and R. Huber-Mörk and S. Stolc. Binary descriptor-based dense line-scan stereo matching. Journal of Electronic Imaging, 2017.
- [48] Eurpean Comittee for Standardization. ÖNORM EN 1793-5: Lärmschutzvorrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 5: Produktspezifische Merkmale - In-situ-Werte der Schallreflexion in gerichteten Schallfeldern. Brüssel, 2019.





- [49] T. Beckenbauer, et.al. Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundeministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 847, Bonn, 2002.
- [50] Verbundprojekt. leiser Straßenverkehr Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 37, Bergisch Gladbach, 2005.
- [51] T. Beckenbauer und W. Kropp. Verbundprojekt Leiser Strassenverkehr 3, Teilprojekt SPERoN 2020 1 – Erweiterung des effizienten Rechenmodells um physikalische Teilmodelle. Schlussbericht, Förderkennzeichen 19 U 10016 C, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Berlin, 2016.
- [52] ITARI. Integrated Tyre And Road Interaction (ITARI). EU Research and Development Project, 6th Research Framework Programme, 2007.
- [53] T. Beckenbauer, P. Klein, J.-F. Hamet und W. Kropp. Tyre/road noise prediction: A comparison between the SPERoN and HyRoNE models – Part 1. Proc. Acoustics'08 conference, Paris, 2008.
- [54] F.P. Mechel. Schallabsorber, Band II Innere Schallfelder. S.Hirzel Verlag, Stuttgart, 1995.
- [55] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV, Arbeitsgruppe Asphaltstraßen. Arbeitsanleitungen zur Prüfung von Asphalt ALP A-StB, Teil 1: Bestimmung der zugänglichen Hohlräume in Asphalt mit dem Hohlraummessgerät, 1999.
- [56] E. Sarradj. Absorbertheorien für offenporigen Asphalt. Proc. DAGA 2001, Hamburg, Deutsche Gesellschaft für Akustik DEGA, Berlin, 2001.
- [57] T. Beckenbauer. Rollgeräuschentstehung und Rollgeräuschminderung. Strasse und Verkehr, Nr. 9, September 2017, Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS, Zürich, 2017.
- [58] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Technische Pr
  üfvorschriften f
  ür Asphalt, Teil 33, Verfahren zur Herstellung von Asphalt-Probeplatten im Laboratorium mit dem Walzsektor-Verdichtungsger
  ät. K
  öln, 2007.







- [59] A. Ringleb. Einfluss der Walzsektor-Verdichtung auf Ergebnisse des Triaxialen Druck-Schwellversuchs. Diplomarbeit, erschienen in: Schriftenreihe Straßenwesen, 25, Institut für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, 2012.
- [60] S. Stolc et al. Depth and all-in-focus imaging by a multi-line-scan light-field camera. Journal of Electronic Imaging, 23(5):053020, 2014.
- [61] A. Weninger-Vycudil und B. Brozek. Bewertung Straßenoberbau auf der Grundlage von standardisierten Lebenszyklen, Standard-Life-Cycle-Assessment (S-LCA). Studie im Auftrag der ASFINAG, Wien, (unveröffentlicht), 2020.
- [62] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Richtlinie für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen. FGSV 488, FGSV Verlag, Köln, 2001.
- [63] A. Weninger-Vycudil. Entwicklung von Systemelementen für das österreichische PMS. Dissertation, ausgeführt am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, TU-Wien, Wien, 2001.
- [64] ISABELA. Integration of social aspects and benefits into life-cycle asset management. Research project under the CEDR transnational research program 2014, Conference of European Directors of Roads (CEDR), Brussels, Belgium, 2017.