

Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Ressel

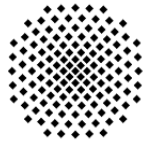
**Veränderung des
Schallabsorptionsverhaltens von
offenporigen Asphalten durch
Verschmutzung**

Stefan Alber

ISSN 0932 - 402X
ISBN 978 - 3 - 9810573 - 5 - 5
D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 46 (März 2013)



Universität Stuttgart

Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Ressel

Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung

Stefan Alber

Veröffentlichungen aus dem
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 46 (März 2013)

Herausgeber : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart

Copyright : Das Copyright liegt beim Verfasser.

Eigenverlag und Vertrieb : Institut für Straßen- und Verkehrswesen
Universität Stuttgart

Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau
Pfaffenwaldring 7
70569 Stuttgart

Hinweis / Note:

Diese Veröffentlichung ist auch als "Elektronische Dissertation" online unter <http://elib.uni-stuttgart.de> verfügbar und kann dort im PDF-Format heruntergeladen werden.

This paper is also published online as "Electronic Dissertation" at <http://elib.uni-stuttgart.de> and can be downloaded there as PDF file.

Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung

Von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität
Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Stefan Alber

aus Steinenbronn

Hauptberichter:	Univ.- Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel
1. Mitberichter:	Univ.- Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos
2. Mitberichter:	Univ.- Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer

Tag der mündlichen Prüfung: 18.01.2013

Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart

2013

Vorwort

Diese Arbeit ist während der Zeit meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel, meinem Doktorvater, danke ich sehr für die Betreuung der Arbeit und die Möglichkeit, diese Dissertation am Lehrstuhl zu verfassen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Ralf Roos und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Klaus Sedlbauer danke ich ebenfalls sehr für die Übernahme des Korreferats.

Diese Arbeit ist aus einem Forschungsprojekt („Leiser Straßenverkehr 2“) hervorgegangen, in dem mich viele unterstützt haben und denen ich dafür danken möchte.

Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr. Klaus Dirnberger, der mir von Seiten der Chemie wertvolle Hinweise geben konnte, und das Team der Versuchsanstalt für Wasserbau der Universität Stuttgart unter der Leitung von Henning Eickhoff, die mich beim Aufbau und den Umbauten des Versuchsstands in hervorragender Weise unterstützt haben. Ebenso gilt mein Dank Steffen Hägele aus der dortigen Elektrowerkstatt, der mir mit wertvollen Hinweisen zur Steuerung des Versuchsstands und tatkräftiger Hilfe zur Seite gestanden ist.

Danke auch allen Kollegen des Lehrstuhls für fachliche Diskussionen und Anregungen, die mir weitergeholfen haben.

Mein herzlicher und abschließender Dank gilt meiner Familie, meinen Eltern, meiner Frau und meiner kleinen Tochter, die mich immer unterstützt haben während meiner gesamten Ausbildung, während des Entstehens der Arbeit und vor der abschließenden Prüfung.

Steinenbronn, im Februar 2013

Stefan Alber

Erklärung

Stuttgart, 26.Juli 2012

Gemäß § 5 (3) der Promotionsordnung der Universität Stuttgart erkläre ich hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation abgesehen von den ausdrücklich bezeichneten Hilfsmitteln und den Ratschlägen von jeweils namentlich genannten Personen selbstständig verfasst habe.

Stefan Alber

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Straßenverkehrslärm	2
2.1	Problematik	2
2.2	Zusammensetzung von Straßenverkehrsgeräuschen	3
2.3	Entstehungsmechanismen von Reifen-Fahrbahngeräuschen	5
2.4	Lärmindernde Fahrbahndeckschichten	9
3	Offenporiger Asphalt im Straßenbau	13
3.1	Definition/Begriffsklärung	13
3.2	Historische Entwicklung von offenporigem Asphalt	14
3.2.1	Internationale Entwicklung	14
3.2.2	Entwicklung in Deutschland	18
3.2.3	Zweilagiger offenporiger Asphalt	20
3.3	Stand der Technik	21
3.3.1	Erfahrungen mit der Lärminderung/Akustik	21
3.3.2	Straßenbautechnische Anforderungen und Besonderheiten	29
3.3.3	Betriebliche Besonderheiten und Winterdienst	38
4	Verschmutzung von offenporigen Asphalten	41
4.1	Erfahrungen und prinzipielle Verschmutzungsmechanismen	41
4.1.1	Zusammensetzung des Schmutzes	41
4.1.2	Prinzipielle Verschmutzungsmechanismen	44
4.2	Lösungsansatz Reinigung	48
4.3	Lösungsansatz Materialmodifizierung	50
4.3.1	Mögliche Strategien/Vorgehensweisen	50
4.3.2	Porenstruktur und Rauheit der Porenwandungen	53
4.3.3	Bitumenfilmdicken	54
4.3.4	Folgerungen für die erprobten Strategien und Erfahrungen	55

5	Versuche zur Bestimmung des Verschmutzungsverhaltens	58
5.1	Modellversuche zur Untersuchung des Verschmutzungsverhaltens	58
5.1.1	Untersuchungsmethodik	58
5.1.2	Versuchsstand	60
5.1.3	Simulation von Verschmutzungszyklen offenporiger Asphalte	63
5.1.4	Schmutzzusammensetzung	65
5.2	Akustische Messverfahren und Ermittlung akustisch relevanter Parameter	66
5.2.1	Messung des Strömungswiderstands in situ	66
5.2.2	Messung des Schallabsorptionsgrads in situ	67
6	Akustik von offenporigen Asphalten	69
6.1	Physikalische Grundlagen	69
6.1.1	Schallanregung	69
6.1.2	Absorptionsdämpfung in einem porösen Absorber	70
6.2	Offenporiger Asphalt als poröser Absorber	71
6.2.1	Allgemeines	71
6.2.2	Geometrie- und Absorberparameter	72
6.3	Modellvorstellungen von porösen Absorbern	75
6.3.1	Theorie der homogenen Medien	77
6.3.2	Modell nach ATTENBOROUGH	80
6.3.3	Theorie nach BIOT und Modellerweiterung nach ALLARD	82
6.3.4	Modell nach CHAMPOUX und STINSON	83
6.3.5	Phänomenologisches Modell nach HAMET	85
7	Veränderung des akustischen Verhaltens durch Verschmutzung	87
7.1	Entwicklung der messtechnisch bestimmten (Absorber-)Parameter mit zunehmender Verschmutzung	87
7.2	Ermittlung der Tortuosität in Abhängigkeit der Verschmutzung	94
7.3	Modelle zur Darstellung der Auswirkung der Verschmutzung auf das akustische Verhalten	107
7.3.1	Anwendung der Modelle	107
7.3.2	Sensitivitätsanalyse	108
7.3.3	Fakultative Modellerweiterungen	110

8	Zusammenfassung	111
9	Literaturverzeichnis	113
Anhang A	Übersicht über Lärminderungspotentiale von offenporigen Asphalten	1
Anhang B	Gesetz von Hagen-Poiseuille	5

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich zwischen Antriebs- und Rollgeräusch eines durchschnittlichen Pkw bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten beim Pkw [15]	4
Abbildung 2: Anteile des Roll-/Antriebsgeräusches zum äquivalenten Dauerschallpegel [15].....	4
Abbildung 3: Rauheitselemente der Textur und zugeordnete Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche (nach [18][27]).....	7
Abbildung 4: Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs und typische Frequenzbereiche [18]	8
Abbildung 5: Typische Frequenzspektren des Vorbeirollpegels für Lkw und Pkw [19]	25
Abbildung 6: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum nach DIN EN 1793-3 [123]	25
Abbildung 7: Einfluss der Schichtdicke auf die Lage der Absorptionsmaxima im Frequenzspektrum (nach [124]).....	26
Abbildung 8: Verlust der lärmindernden Wirkung mit zunehmender Liegedauer anhand von Beispielen innerorts [104], außerorts [72] und einer Näherungsfunktion für 50 km/h [131].....	28
Abbildung 9: Schmutzanfall und -transport auf Straßen.....	42
Abbildung 10: Übersicht über Korngrößenverteilungen von Straßenschmutz unterschiedlicher Herkunft und von künstlich hergestelltem Straßenschmutz.....	44
Abbildung 11: Prinzipielle Verschmutzungsmechanismen, veranschaulicht an Dünnschliffen und Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von offenporigen Asphalten [182][183].	48
Abbildung 12: Schmutzabweisende Oberflächen in den OPA-Poren; links: sehr hydrophile Oberfläche, rechts: hydrophobe, mikrorauhe Oberfläche („Lotuseffekt“).....	51
Abbildung 13: Entmischung von Polymer- und Bitumenphase während der Abkühlung (selbst-stratifizierender Effekt)	52
Abbildung 14: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Poreninnenwandungen in unterschiedlichen Vergrößerungen zur Bestimmung der Mikrorauheiten [183].....	54
Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Bitumenfilmdicken in den Dünnschliffen aus [182]	55
Abbildung 16: Versuchsstand zur Beregnung und Verschmutzung von OPA-Probekörpern....	61
Abbildung 17: Ablaufschema der verschiedenen Beregnungsprogramme	62
Abbildung 18: Allgemeines Ablaufschema eines Lebens- bzw. Verschmutzungszyklus	63
Abbildung 19: Ablauf des Verschmutzungszyklus für den Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 480 g/m ²	64
Abbildung 20: Ablauf des Verschmutzungszyklus für den Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 960 g/m ²	64
Abbildung 21: Ablauf des Verschmutzungszyklus für den Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 1440 g/m ²	65
Abbildung 22: Messung des Schallabsorptionsgrads an Fahrbahnoberflächen in situ (Messprinzip) [28]68	
Abbildung 23: Anschauliche Darstellung des Strukturfaktors κ und Tortuosität τ anhand von idealisierten Geometrien	74

Abbildung 24: Anschauliche Erklärung der Absorptionsmaxima in Abhängigkeit der Frequenz bzw. der Schichtdicke des porösen Absorbers	80
Abbildung 25: Veränderung des Schallabsorptionsgrads (Lage und Höhe des 1. Maximums) durch Verschmutzung (schematische Darstellung)	88
Abbildung 26: Auswirkung des (künstlichen) Verschmutzungseintrags auf das Schallabsorptionsverhalten der OPA-Probekörper; links Vergleich zwischen unverschmutztem Zustand und 960 g/m ² Schmutzeintrag; rechts: OPA 0/8 und ZWOPA 0/8_0/16 in verschiedenen Verschmutzungsstadien.....	89
Abbildung 27: Entwicklung des längenspezifischen Strömungswiderstands an unterschiedlichen künstlich verschmutzten OPA-Probekörpern (gestrichelt sind die Standardabweichungen dargestellt)	90
Abbildung 28: Entwicklung des längenspezifischen Strömungswiderstands an unterschiedlichen künstlich verschmutzten OPA-Probekörpern (gestrichelt sind die Standardabweichungen dargestellt)	91
Abbildung 29: Entwicklung des Strukturfaktors von offenporigen Asphalten mit zunehmender Verschmutzung bei unterschiedlichen Mischgutsorten und Schichtaufbauten	102
Abbildung 30: Entwicklung des Strukturfaktors von offenporigen Asphalten mit zunehmender Verschmutzung bei unterschiedlichen Mischgutsorten und Schichtaufbauten	103
Abbildung 31: Entwicklung der Tortuosität von offenporigen Asphalten mit zunehmender Verschmutzung bei unterschiedlichen Mischgutsorten und Schichtaufbauten	104
Abbildung 32: Entwicklung der Tortuosität von offenporigen Asphalten mit zunehmender Verschmutzung bei unterschiedlichen Mischgutsorten und Schichtaufbauten	105
Abbildung 33 Schematische Darstellung der Auswirkung von Verschmutzungen in den Poren von offenporigen Asphalten auf Länge der gewundenen Porenkanäle (l), die Tortuosität τ , zusätzliches nicht beschleunigbares („Totraum“-)Volumen (gefärbte Flächen) und Strukturfaktor κ	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenstellung der vorgefundenen Schmutzmengen aus unterschiedlichen Untersuchungen.....	44
Tabelle 2: Spezifikationen der in den Versuchen verwendeten Mischgutsorten und Schichtaufbauten	59
Tabelle 3: Systematik der beprobten OPA-Probekörper.....	60
Tabelle 4: Zusammensetzung des künstlichen Schmutzes aus den Einzelkomponenten.....	66
Tabelle 5: Hohlraumgehalte der Probekörper aus Eignungsprüfungen und CT-Untersuchungen und berechneter Resthohlraumgehalt nach Verschmutzung	93
Tabelle 6: Zusammenfassung der Veränderung der messtechnisch erfassten Absorberparameter und des Schallabsorptionsverhaltens	94
Tabelle 7: Modelleingangsparameter aus Messungen und Korrekturfaktoren für die Modellrechnungen	96
Tabelle 8: Berechnete Tortuositäten τ bzw. Strukturparameter κ (aus den verschiedenen Modellansätzen).....	98
Tabelle 9: Korrekturfaktoren des längenspezifischen Strömungswiderstands c_{ε} (aus den verschiedenen Modellansätzen), effektive Adiabatenkoeffizienten γ_{eff} (Theorie der homogenen Medien) und Korrekturfaktor c_K (Modell nach CHAMPOUX/STINSON).....	98
Tabelle 10: Standardabweichungen des Strömungswiderstands ε_M (Absolutwerte vgl. Tabelle 6) und der Korrekturfaktoren c_{ε}	99
Tabelle 11: Durchschnittliche Summen der Fehlerquadrate zur Beurteilung der Qualität und Eignung der Modelle zur Beschreibung des Schallabsorptionsverhaltens von (verschmutztem) offenporigen Asphalt.....	100
Tabelle 12: Eingangswerte von Kennwerten und Korrekturfaktoren (und deren Standardabweichungen) für die Absorbermodelle nach Kap. 6.3 zur Bestimmung des Schallabsorptionsverhaltens von OPA im unverschmutzten und verschmutzten Zustand	108

Formelzeichen

Formelzeichen [Einheit]	Bedeutung
Lateinische Buchstaben	
A [m ²]	Fläche
c [m/s]	Schallgeschwindigkeit
c _B [-]	(Form-) Faktor (BIOT/ALLARD-Modell)
c _≡ [-]	Korrekturfaktor für den längenspez. Strömungswiderstand
c _φ , c _k [-]	Formfaktoren (CHAMPOUX/STINSON-Modell)
d [m]	Schichtdicke
f [1/s] bzw. [Hz]	Frequenz
f ₀ , f ₁ [-]	Funktionen (HAMET-Modell), die thermische bzw. viskose Vorgänge beschreiben
f _{n,s} [-]	Formfaktorenverhältnis (ATTENBOROUGH-Modell)
i [-]	komplexe Einheit mit i=√-1
k [1/m]	Wellenzahl
k _a [1/m]	komplexe Absorberwellenzahl
k _i [-]	Imaginärteil der komplexen Absorberwellenzahl
k _L [-]	Wellenzahl in Luft
k _r [-]	Realteil der komplexen Absorberwellenzahl
K [m ²]	Permeabilität (Darcy-Wert)
K _a [kgm/s ²]	komplexe dynamische Kompressibilität
l [m]	Länge der gewundenen Porenkanäle
l _{min} [m]	Länge von Porenkanälen ohne Windungen
n [-]	dynamischer Formfaktor (ATTENBOROUGH-Modell)
p [N/m ²]	Druck
p ₀ [N/m ²]	Luftdruck/Atmosphärendruck
P _r [-]	Prandtl-Zahl
Q [m ³ /s]	Volumenstrom (Luft oder Wasser)
r [-]	komplexer Reflexionsfaktor
R [Ns/m ³]	Strömungswiderstand
R _s [Ns/m ³]	spez. Strömungswiderstand
s [-]	statischer Formfaktor (ATTENBOROUGH-Modell)
t [s]	Zeit

Formelzeichen [Einheit]	Bedeutung
t _{rel} [s]	Relaxationszeit
T [s]	Periodendauer
v [m/s]	Schallschnelle
v _i [-]	innere Schallschnelle
V [m ³]	Volumen
v _s [m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
x [m]	Weg in Ausbreitungsrichtung einer Schallwelle
z [kg/m ² s]	Impedanz
Griechische Buchstaben	
α [-]	Schallabsorptionsgrad
γ [-]	Adiabatenkoeffizient
γ _{eff} [-]	effektiver Adiabatenkoeffizient
η [kg/ms]	dynamische Viskosität
κ [-]	Strukturfaktor
λ [-]	Parameter in ATTENBOROUGH-Modell und BIOT-Modell
λ [m]	Wellenlänge
λ _p [-]	dimensionsloser Parameter (ATTENBOROUGH-Modell) bei Betrachtung einer Einzelpore
λ _k , λ _φ	dimensionslose Parameter (CHAMPOUX/STINSON-Modell)
ν [-]	kinematische Viskosität
Ξ [Ns/m ⁴]	längsspez. Strömungswiderstand
Ξ _n [Ns/m ⁴]	aus Messung ermittelter längenspez. Strömungswiderstand
Ξ _{kor} [Ns/m ⁴]	korrigierter Strömungswiderstandswert
ρ [kg/m ³]	Dichte
ρ _{a,p} [kg/m ³]	kompl. dyn. Dichte bei Betr. einer Einzelpore im ATTENBOROUGH-Modell
ρ _a [kg/m ³]	komplexe dynamische Dichte
ρ _i [kg/m ³]	Dichte der Luft
σ [-]	Porosität
σ _F [-]	Flächenporosität
σ _v [-]	Volumenporosität
τ [-]	Tortuosität
ω [1/s]	Kreisfrequenz

Abstract

Road noise is an omnipresent problem in modern societies. Reducing noise emissions can be realised both by traffic measures and by technical measures concerning the vehicles and the road surface. Several approaches and both theoretical and practical solutions to build low noise road constructions have been made in the past or already exist (s. chapter 2).

Porous asphalt (PA) is a possible solution to reduce noise already at its source due to its technical specifications, especially the comparably high void content. Among the noise reducing pavements they have the greatest potential to reduce road noise. Porous asphalt has been already used for several decades worldwide. Because of the high void content, which was continuously increased over the years, constructional and operational problems has appeared which need to be solved (s. chapter 3). A great problem is the decrease in noise reducing properties with longer life time of the pavement.

The decrease in noise redcuing properties of porous asphalt with longer life time is commonly based mainly on soiling and clogging of the porous structure. External effects determine the soiling of porous asphalt in a decisive way. That is why soiling rates are quite different according to the environmental conditions. Furthermore different soiling processes take place at once and partially intensify each other; other processes, e.g. rolling traffic, work against soiling and clogging processes. There have been attempts in the past to clean the porous asphalt layers with water under high pressure, however, with little success. Accordingly, the idea is to prevent porous asphalt from being plugged with dirt using polymer technology. There are three possible solutions:

- 1) Coatings which equalise the roughness of the pores.
- 2) Coatings which do not allow dirt adsorption on the pores' surfaces or which make it easier to flush away adherent dirt with water.
- 3) Addition of polymers to the ready-mix of asphalt which has the same effect on the pores' surfaces as described in 2) after the asphalt layer is built and cooled down.

It has been proved in laboratory experiments whether a dirt-resistant surface of pores can prevent the porous structure from soiling and clogging (s. chapter 4).

The soiling experiments described and conducted in this thesis should simulate the soiling process of porous asphalt in a realistic and reproducible way (s. chapter 5). Defined amounts of artificial dirt are applied together with controlled rain impact on different porous asphalts. The basic knowledge of soiling processes and their effects on sound absorption properties is needed to plan the experiments, to apply the adequate models and the interpretation of measurement and calculation results.

Wittin this thesis it is possible for the first time to provide correlations between amount of dirt, stages of soiling and cloggingone the one side and absorbtion parameters (void content, porosity, flow resistivity, structure factor, tortuosity) on the other side. Thus, the decrease of the noise reducing potential of porous asphalts can be précised by the development of sound absorption properties. Typical absorption parameters can be determined from the results of the experiments dependent on the applied amounts of dirt for different layer sequences and thicknesses as well as polymer modifications and coatings (s. chapter 7.1).

In general, the influence of soiling processes on the sound absorption properties is lower for coarse-grained and double-layer porous asphalt constructions. The material modifications considered and applied in this work also show the tendency to diminish effects of soiling on the acoustical behaviour respectively the sound absorption properties of porous asphalt.

Existing acoustical models (s. chapter 6) to describe porous asphalt as porous acoustic absorber in front of an acoustic resistant background only describe the sound absorption properties of porous asphalt *without* the impact of soiling.

These existing models are proved whether they can also describe the sound absorption of porous asphalt *with* the impact of soiling. The applicability for this case was determined by using the adjustment theory between measured and calculated results of sound absorption properties with the experimentally determined absorption parameters (s. chapter 7). The quality of common models for porous asphalt considered in this thesis to describe the absorption behavior *with* the impact of soiling is quite different.

From the model calculations and the results of the adjustment theory typical parameters (absorption parameters and model parameters) can be specified dependent on asphalt mixture, layer sequences and thicknesses, material modification and especially the amount of dirt in the porous structure (s. chapter 7).

Thus it is possible to predict the sound absorption properties of porous asphalt during its life time. Therefore reasonable assumptions about time-dependent amounts of dirt during the life time of porous asphalt have to be made (this thesis summarizes as well experiences with amount of dirt from different works and researches in the past). The soiling process is simplified for the use in the models. A more general and complex assumption of the soiling process (different environmental conditions, different main soiling processes, extrapolation) can be integrated in the common models for porous asphalt considered in this thesis (s. chapter 7.3).

1 Einleitung

In einer weitgehend technisierten Welt ist Lärm ein allgegenwärtiges Problem. Die industrielle Entwicklung seit dem 19. Jahrhundert sowie die fortschreitende Motorisierung breiter Schichten im 20. Jahrhundert hat dazu geführt, dass Lärm in seiner Definition als unerwünschter Schall ein Phänomen darstellt, dem viele Menschen ausgesetzt sind. Durch die Siedlungsentwicklung und den Neu- und Ausbau von Straßen hat diese Problematik vor allem im Hinblick auf den Straßenverkehr stetig zugenommen. Mit technischen Innovationen wird versucht, dem Lärm zu begegnen und ihn, wenn er nicht zu verhindern ist, zu reduzieren.

Die Lärmreduktion kann am Immissionsort (Mensch, Wohnung), auf dem Ausbreitungsweg (bauliche Schall-„Hindernisse“) oder an der Quelle angesetzt werden, wobei letzteres die effektivste Möglichkeit darstellt, da von diesen aktiven Lärmschutzmaßnahmen in größeren Umfeldbereichen eine wesentliche Lärmreduzierung zu erwarten ist. Der Straßenverkehrslärm stellt die bedeutendste Lärmquelle dar, von der die meisten Menschen betroffen sind. Bei der Minderung von Antriebsgeräuschen von Kraftfahrzeugen sind durch Bemühungen in der Vergangenheit schon beachtliche Erfolge erzielt worden; auch die Reifen als Ursache für die Geräusentstehung werden zunehmend akustischen Optimierungsprozessen unterworfen. Ebenso sind die Fahrbahnen bzw. Straßenoberflächen Gegenstand von Untersuchungen zur möglichen Lärminderung. Die gezielte Veränderung von Textur und Hohlraumgehalt unter Berücksichtigung bautechnischer Anforderungen wie Standfestigkeit und Dauerhaftigkeit sind die am häufigsten beschrifteten Lösungsansätze.

Offenporige Asphalte, die durch einen hohen Hohlraumgehalt (unter anderem) als poröse Schallabsorber wirken, können die größten Pegelminderungen erzielen. Ihr weit verbreiteter Einsatz wird jedoch (noch) durch hohe Anforderungen an Materialien, bautechnische Ausführung sowie Betriebsdienst und damit einhergehender Nachteile bei den Investitions- und Folgekosten gehemmt. Ein weiteres Problem ist die mangelnde akustische Dauerhaftigkeit, d.h. die nachlassende lärmindernde Wirkung, die zu großen Teilen auf den Eintrag von Schmutzpartikeln in die offenporige Struktur zurückgeführt wird.

Die Kenntnis der dabei ablaufenden Verschmutzungsmechanismen ist die Voraussetzung zur Entwicklung von Lösungsansätzen, wie der Verschmutzung entgegengewirkt werden kann. In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Verschmutzung auf das Schallabsorptionsverhalten von offenporigen Asphaltdecken durch Laborversuche und begleitende Messungen quantifiziert. Es werden typische Verläufe von Absorberparametern (Porosität, Strömungswiderstand, Strukturfaktor, Tortuosität) in Abhängigkeit von Mischgutsorte, Schichtaufbau und eingetragener Schmutzmenge ermittelt. Diese dienen als Grundlage bzw. Eingangsparemeter für unterschiedliche akustische Absorbermodelle, die in dieser Arbeit behandelt und auf ihre Eignung und Genauigkeit hinsichtlich der Auswirkungen auf das akustische Verhalten (Schallabsorption) in Folge des Verschmutzungsprozesses von offenporigen Asphaltdecken untersucht werden sollen.

2 Straßenverkehrslärm

2.1 Problematik

Lärm wird von der Bevölkerung subjektiv in vielen Studien als eins der drängendsten Umweltprobleme überhaupt bezeichnet. Auch in objektiv messbaren Größen, wie Überschreitungen gewisser Schallpegel und der Anzahl der Betroffenen, ist Lärm ein großes Problem für Mensch und Umwelt (z.B. [1]). Lärm ist das einzige umweltbezogene Problemfeld, bezüglich dessen die Beschwerden der Öffentlichkeit in der EU in jüngster Zeit (seit 1992) zu- statt abgenommen haben [2]. Der Verkehrslärm und speziell der Straßenverkehrslärm stellt hierbei noch vor Flug- und Schienenverkehrslärm die größte, weil flächigste Problematik dar (z.B. [3]). Neben der subjektiven Störung von Menschen kann durch Lärm überdies eine Gesundheitsgefährdung eintreten. Es wird in dieser Hinsicht über Zusammenhänge mit Schlafstörungen, Wirkungen auf das vegetative Nervensystem (Beschleunigung der Herzfrequenz), Bluthochdruck und erhöhte Blutfettwerte berichtet [4][5][6][7]. Eine Metaanalyse zum Risiko von Herz-Kreislauferkrankungen durch Straßen- und Fluglärm zeigt zudem, dass das Herzinfarktrisiko durch Lärmexposition zu steigen scheint [8]. Lärm wirkt sich darüber hinaus negativ auf Immobilienpreise bei Wohnhäusern aus, was neben volkswirtschaftlichem Schaden u.a. auch zu einer „sozialen Segregation“ von armen und reichen Bevölkerungsschichten führt, wie anhand verschiedener Studien belegt werden kann [6].

Von Seiten der Politik und der Öffentlichkeit wird deshalb schon seit geraumer Zeit versucht, gegenzusteuern. Auf nationaler Ebene ist hinsichtlich dieser Bemühungen vor allem die 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (16. BImSchV) [9] aus dem Jahr 1990 zu nennen, die erstmals die Berechnung von Beurteilungspegeln für den Straßen- und Schienenverkehrslärm regelt [10] und zugleich für den Fall des Neubaus oder der „wesentlichen Änderung“ einer Straßen- oder Schienenverkehrsanlage Immissionsgrenzwerte für Wohngebiete und schützenswerte Einrichtungen festlegt. Um gebündelte Aktionsplanungen für die unterschiedlichen Lärmquellen (Straße, Schiene, Luftverkehr, Freizeit, Gewerbe) voranbringen zu können, wurde das BImSchG um den § 47 a ergänzt, der das Verfahren der sogenannten Lärminderungsplanung ab 1990 regelte.

Im Zuge der europäischen Harmonisierung folgte 2002 eine Verschärfung der Lärmschutzpolitik durch die sogenannte EU-Umgebungslärmrichtlinie¹, die per Bundesgesetz 2005² und Ausführungsverordnungen 2006³ in nationales Recht umgesetzt wurde und umfangreiche Lärmkartierungen und Aktionspläne (jeweils mit zeitlichen Fristen) für Großstädte ab einer bestimmten Größe und stark frequentierten Verkehrswegen von den Mitgliedsstaaten verlangt. Die Festlegung von Grenz- bzw. Schwellwerten von Lärmpegeln für Aktionsplanungen wird in Abwägung des Wünschenswerten und des Machbaren momentan auf unterschiedlichen Ebenen

¹ Richtlinie 2002/49/EG

² Gesetz zur Umsetzung der EU-Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm vom 24. Juni 2005

³ 34. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung – 34. BImSchV), LärmkartierungsVO v. 6. März 2006 und Bekanntmachung der Vorläufigen Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach §5 Abs. 1 der 34. BImSchV v. 22. Mai 2006.

kontrovers diskutiert. Um Aktionsplanungen sinnvoll und zielgerichtet umsetzen zu können, ist neben dem eigentlichen Beurteilungspegel bzw. Überschreitungen eines gewissen Pegels auch die Anzahl der Betroffenen zwingend einzubeziehen. Für die Verquickung von Immissionspegeln und Anzahl der Betroffenen besteht kein einheitlich festgelegtes Verfahren, aber mehrere (parallel verwendete) Ansätze wie z.B. „Lärmbelastungsmaße“ [11] oder „Lärmkennziffern“ [12].

Das komplexe Problem „Lärm“ nur auf den gemittelten Immissionspegel zu reduzieren, ist eine Vereinfachung, die manche Wirkungsaspekte auf den Menschen nur unzureichend berücksichtigen kann. Im Zuge von Forschungsaktivitäten zum Lärmschutz finden daher zunehmend andere Charakteristika von Geräuschen hinsichtlich ihrer Wirkung auf den Menschen größere Beachtung. Die Frequenzspektren von Lärm bilden hierbei das wohl am häufigsten untersuchte Kriterium; weitere Geräuschparameter aus der Psychoakustik wie beispielsweise Schärfe oder Rauigkeit werden zunehmend nicht nur zum gezielten „Geräuschdesign“ von Produkten herangezogen, sondern auch zur Beurteilung von Lärm. Für das Maß der Störung und Beeinträchtigung des Menschen durch Verkehrslärm spielt aber auch die Tageszeit und Häufigkeit der Belastung, unterschiedliche Pausen zwischen den Einzelschallereignissen, deren Maximalpegel und die verschiedene Zusammensetzung von Fahrzeugkollektiven eine Rolle [13][14].

2.2 Zusammensetzung von Straßenverkehrsgeräuschen

Straßenverkehrslärm setzt sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammen. Man unterscheidet hauptsächlich Antriebs- und Rollgeräusche. Zum Antriebsgeräusch gehören dabei nicht nur Motorengeräusche (maßgeblich beeinflusst durch die Drehzahl), sondern auch Auspuff- oder Kühlerlüftungsgeräusche. Zum Rollgeräusch werden neben den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen beispielsweise auch Klappergeräusche gezählt. Das aerodynamische Strömungsgeräusch, das vor allem bei höheren Geschwindigkeiten eine wesentliche Rolle spielt, wird als separater Schallentstehungsmechanismus angesehen (oder von manchen Autoren auch dem Rollgeräusch zugeordnet).

Bei Pkw ist festzustellen, dass das Antriebsgeräusch (bei beschleunigender Fahrt) im Geschwindigkeitsbereich bis zu ungefähr 50 km/h gegenüber dem Rollgeräusch dominiert und damit den Gesamtpegel maßgeblich bestimmt (s. Abbildung 1). Bei Lkw wird die Dominanz des Rollgeräuschs erst bei höheren Geschwindigkeiten zwischen ca. 60 und 80 km/h erreicht [15][16][17].

Geht man hingegen von einer gleichmäßigen (unbeschleunigten) Fahrt aus und berücksichtigt zusätzlich die zunehmend leiser werdenden Antriebssysteme, ist abzusehen, dass das Rollgeräusch in allen Geschwindigkeitsbereichen bei Lkw wie Pkw immer mehr zum bestimmenden Faktor des Gesamtgeräusches wird. Empirische Untersuchungen zeigen überdies, dass bereits heute bei allen Fahrzeugarten das Rollgeräusch den maßgeblichen Teil des Gesamtgeräuschs ausmachen kann (s. Abbildung 2) [15].

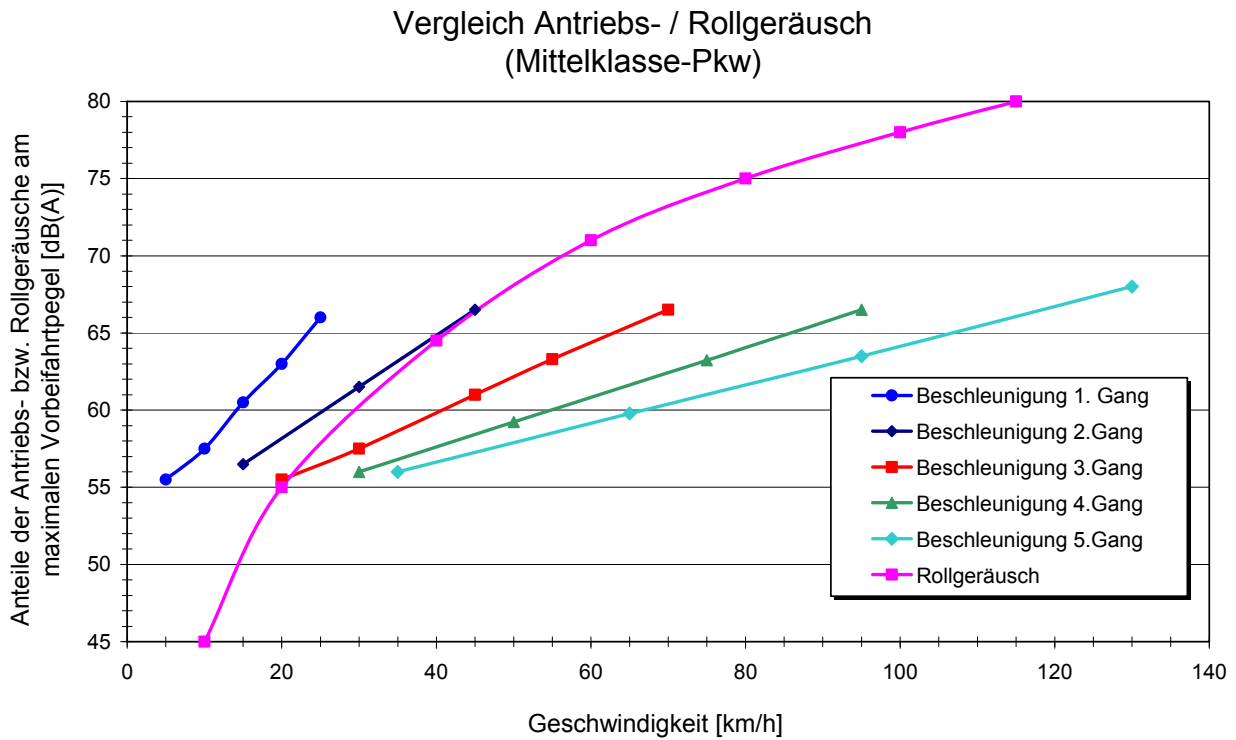


Abbildung 1: Vergleich zwischen Antriebs- und Rollgeräusch eines durchschnittlichen Pkw bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten beim Pkw [15]

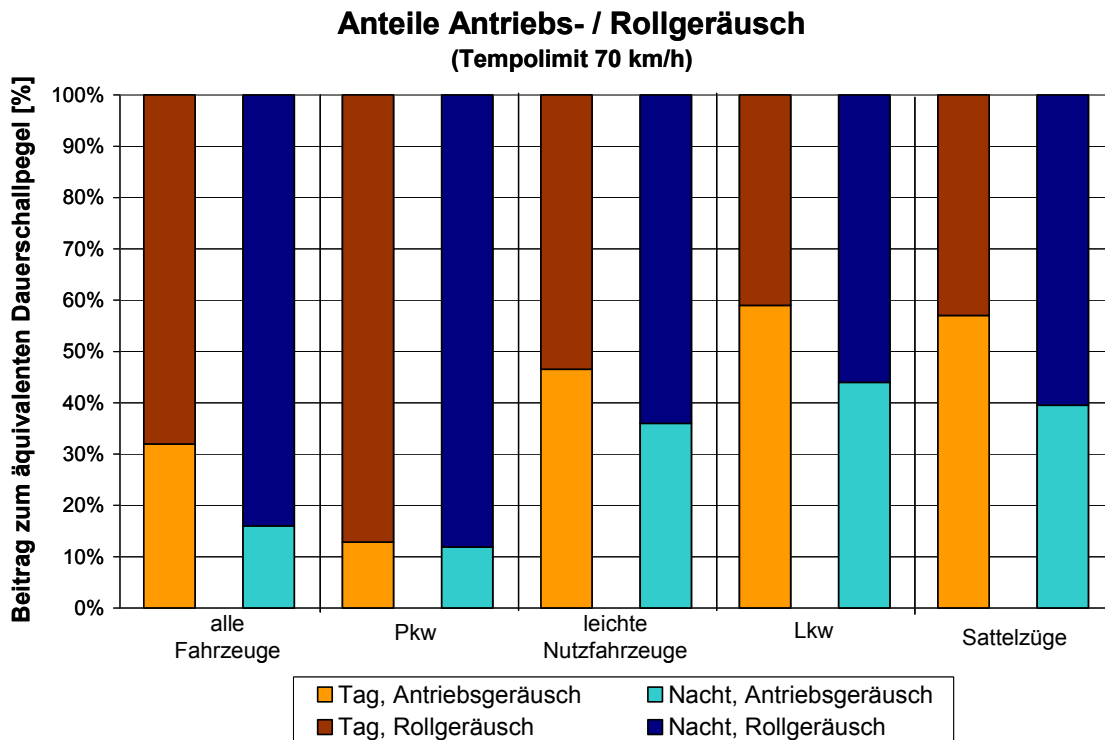


Abbildung 2: Anteile des Roll-/Antriebsgeräusches zum äquivalenten Dauerschallpegel [15]

2.3 Entstehungsmechanismen von Reifen-Fahrbahngeräuschen

Anstrengungen zur Minderung des Straßenverkehrslärms müssen gemäß Kap. 2.2 nach erfolgreichen Bemühungen um leisere Antriebe in der Vergangenheit in verstärktem Maße auch im Bereich der Reifen-Fahrbahn-Geräusche angesetzt werden. Um geeignete Maßnahmen treffen zu können, müssen die Schallentstehungsmechanismen zwischen Reifen und Fahrbahn bekannt sein. Verschiedene Autoren beschreiben die beiden bestimmenden Prinzipien der Schallanregung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs und weitere Nebeneffekte, die im Folgenden (teilweise zusammen mit der Wirkungsweise von offenporigem Asphalt) dargestellt werden sollen [18][19][20]:

Mechanische Schwingungsanregungen

Schwingungen des Reifenprofils, die in Schallenergie umgewandelt werden, entstehen durch die Textur der Fahrbahnoberfläche. Durch das Abrollen des Reifens werden die Profilklotze des Reifens eingedrückt und im weiteren Verlauf wieder entspannt („snap-out“), wodurch radiale Schwingungen der Profilklotze entstehen. Tangentiale Schwingungen des Profils werden durch Reibungskräfte in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn (z.B. Beschleunigen, Verzögern, Kurvenfahrt) erzeugt. Diese Mechanismen regen auch Seitenwand, Gürtel und Karkasse des Reifens zu Schwingungen an und erzeugen dort zudem Resonanzeffekte; der quantitative Beitrag dieser Reifenteile zur Schallentstehung ist jedoch umstritten.

Die Textur einer Straßenoberfläche hat vielen Anforderungen wie Griffigkeit, Rollwiderstand oder Entwässerung zu genügen (s. auch Abbildung 3). Entscheidende lärmwirksame Parameter der Textur sind dabei Wellenlängen und Amplituden (Rautiefen) des Texturspektrums sowie die Gestalt und Regelmäßigkeit der Textur. Typischerweise sind Wellenlängen im Bereich der Makro- und Megatextur zwischen 10 mm und 500 mm für die Entstehung von Schwingungen am Reifen verantwortlich (s. Abbildung 3). Weiterhin spielt eine Rolle, wie zufällig oder strukturiert eine Textur sich darstellt; zufällige Strukturen (z.B. beim Walzen oder Abstreuen) sind meist akustisch günstiger als eingeprägte Texturen (z.B. Besenstriche) [21]. Die Gestalt der Textur, d.h. wie die herausragenden Elemente des Rauheitsprofils („positive Textur“) ausgeprägt sind (herausragende, konvexe Spitzen vs. flache, konkave Plateaus), bestimmt ebenfalls maßgeblich, wie stark der Reifen zu Schwingungen angeregt wird. Ersten Erkenntnissen in dieser Richtung [22] folgten in neuerer Zeit Versuche, die Gestalt der Textur mit Hilfe eines Gestaltfaktors⁴ zu parametrisieren und damit lärmtechnisch besser charakterisieren zu können [19][23]. Neben der Textur wird zunehmend auch die Steifigkeit der Fahrbahnkonstruktion als Einflussparameter für die Lärmemission diskutiert [19][24].

Beim Reifen als Gegenpart der Textur sind als maßgebende Einflussgrößen der Schallentstehung Profilform, Profiltiefe, Gummihärte, Reifenbreite, Reifendruck, Achslast und Reifendurchmesser bzw. Reifenaufstandsfläche zu nennen [18].

⁴ Gestaltfaktor nach [19]: Tragflächenanteil bei halber Profiltiefe; hohe Werte weisen auf lärmarme konkave Texturen hin, niedrige Werte auf konvexe Oberflächen, die in stärkerem Maße Schwingungen anregen.

Aerodynamische Effekte

Geräusche durch aerodynamische Effekte in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche entstehen hauptsächlich durch Lufteinschlüsse zwischen Reifenprofil und Fahrbahnoberfläche und dadurch hervorgerufene Druckausgleichs-, Luftströmungs- sowie Resonanzvorgänge. Luft, die durch das Abrollen des Reifens im Profil eingeschlossen, komprimiert und im weiteren Verlauf wieder freigegeben wird, erzeugt durch den Druckausgleich beim Ansaugen und Freigeben Geräusche, das sogenannte „Air pumping“. Helmholtzresonanzen in Hohlräumen zwischen Profil und Fahrbahnoberfläche, Röhrenresonanzen in den Längs- und Querrillen des Profils und Strömungsgeräusche der Luft im Profil sind weitere maßgebende aerodynamische Entstehungsmechanismen von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen. Ebenfalls den aerodynamischen Effekten zuzurechnen ist der Horneffekt, der durch Trichterbildung zwischen Reifen und Fahrbahn ähnlich wie bei einem Lautsprecher zwar keine Geräusche emittiert, die Schallabstrahlung und -ausbreitung jedoch verstärkt [25][26].

Aerodynamische Effekte werden fahrbahnseitig von der Porosität der Oberfläche bzw. dem zugänglichen Hohlraumgehalt der Schicht sowie der Textur beeinflusst. Diese Faktoren bestimmen, in welchem Ausmaß schallemittierende Lufteinschlüsse und Resonanzeffekte zwischen Reifen und Fahrbahn überhaupt stattfinden können. Bei der Textur können hohe Amplituden im Wellenlängenbereich von ungefähr 0,5 mm bis 10 mm „entlüftend“ wirken und dadurch Lufteinschlüsse reduzieren (s. Abbildung 3). Hohlraumreiche Deckschichten (15-25 %) wie beispielsweise offenporige Asphalte (OPA) verstärken den „Entlüftungseffekt“ immens, wodurch „Air-Pumping“ und andere aerodynamische Entstehungsmechanismen sowie bezüglich der Schallausbreitung der Horneffekt stark reduziert werden können. Ein hoher Hohlraumgehalt⁵ bewirkt zudem eine schallabsorbierende Wirkung. Dadurch werden neben den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen auch andere Emissionen wie beispielsweise Antriebsgeräusche gemindert. Weitere für die Absorption entscheidenden Parameter sind die Schichtdicke, die Tortuosität bzw. der Strukturfaktor und der Strömungswiderstand der Fahrbahndeckschicht (s. auch Kap. 6.2.2).

Auch von Seiten der Reifen können durch entsprechende Profilierung aerodynamische Effekte der Geräuschemission reduziert werden [18].

⁵ entscheidend ist der zugängliche Hohlraumgehalt, was im akustischen Sinne der Porosität σ (s. auch Kap. 6.2.2) entspricht.

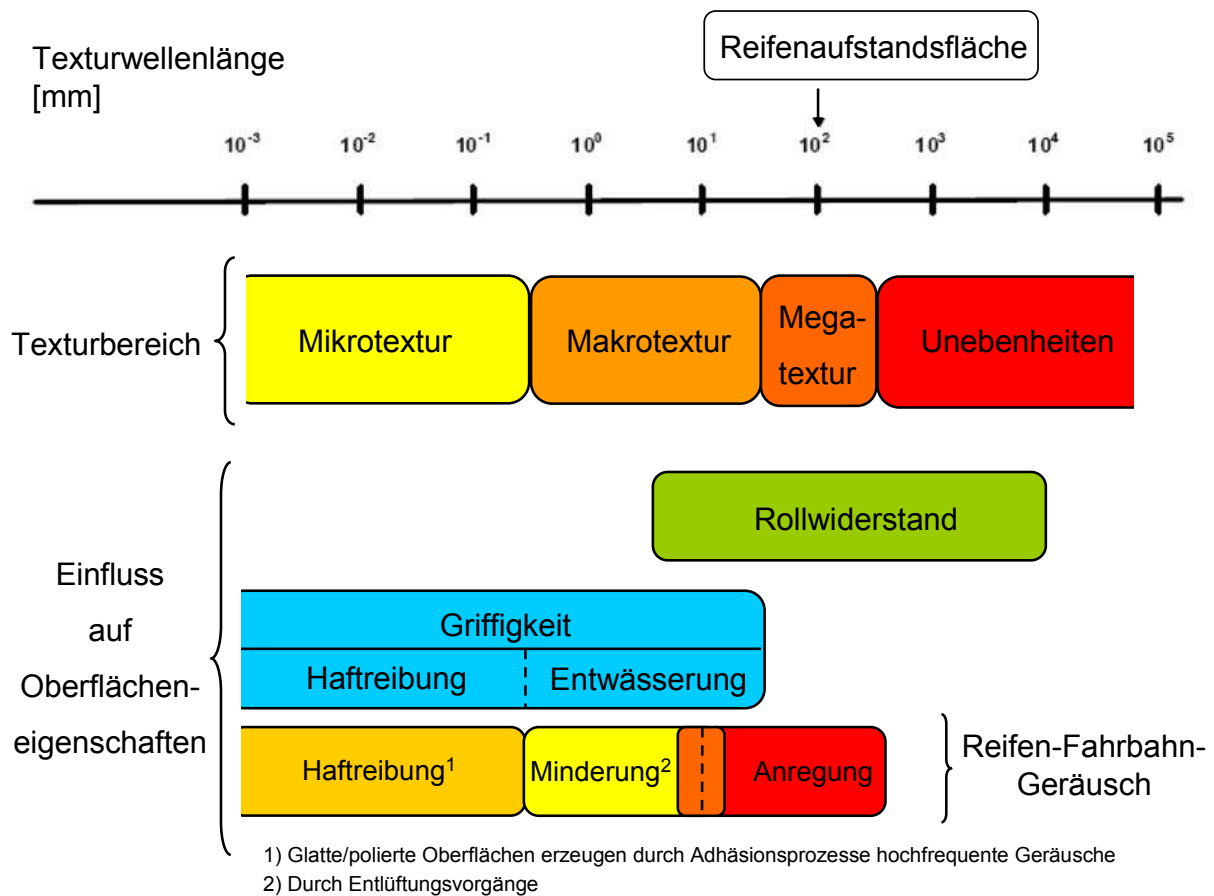


Abbildung 3: Rauheitselemente der Textur und zugeordnete Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche (nach [18][27])

Weitere Effekte

Gleitvorgänge von Reifenprofilklötzen auf Fahrbahntexturelementen, wie sie bei hohen tangentialen Kräften (Bremsen, Beschleunigen, Kurvenfahrt) auftreten können, erzeugen hochfrequente Geräusche. Dieser „Stick-Slip-Effekt“ ist jedoch bei gleichmäßigem Abrollen des Rades (z.B. Geradeausfahrt mit gleichförmiger Geschwindigkeit) zu vernachlässigen.

Adhäsionsprozesse zwischen Reifen und Fahrbahn können ebenfalls zur Geräuschenstehung beitragen. Der „Stick-Snap-Effekt“ beruht auf der klebrigen Wirkung zwischen Fahrbahnoberfläche (z.B. Asphalt bei hohen Temperaturen) und Reifen (Gummimischung). Durch die Lösung der Adhäsion beim Abrollen des Reifens können die Profilelemente zu zusätzlichen Schwingungen („snap-out“) angeregt werden. Die Adhäsionsvorgänge werden bei sehr glatten/polierten Fahrbahnoberflächen zusätzlich erhöht, was zur Verstärkung des „Stick-Snap-Effekts“ führt.

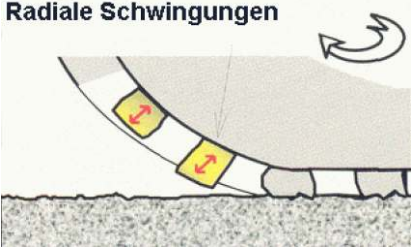

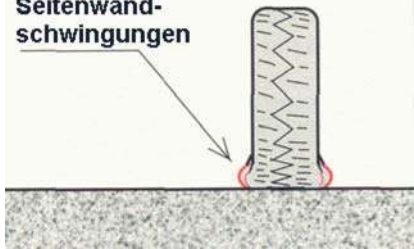
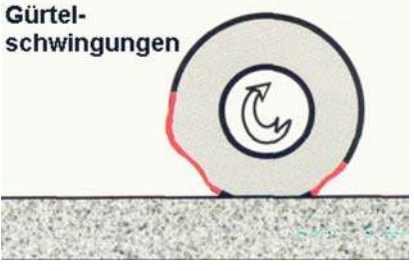
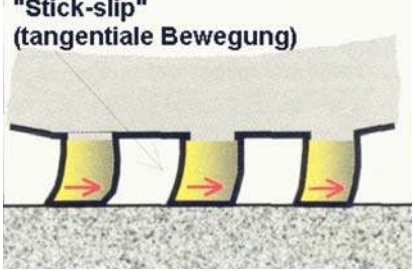
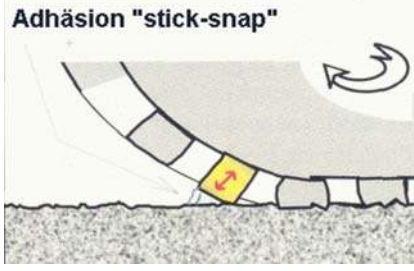
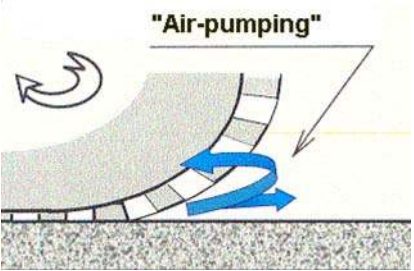
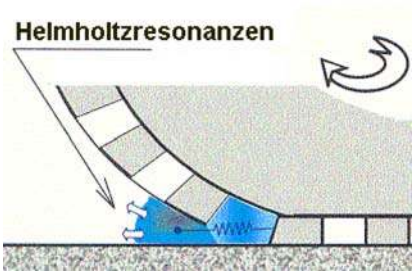
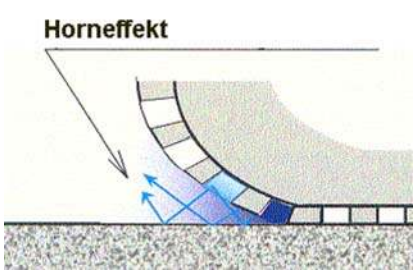

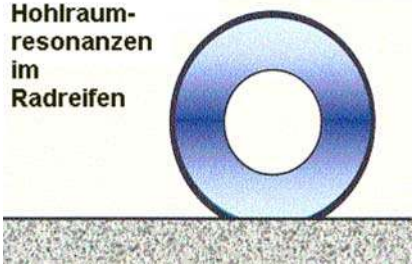
Mechanische Schwingungsanregung		
Radiale Schwingungen 	Tangente Schwingungen 	Seitenwand-schwingungen 
ca. 800-1200 Hz	ca. 800-1200 Hz	ca. 400-600 Hz
Gürtel-schwingungen 	"Stick-slip" (tangente Bewegung) 	Adhäsion "stick-snap" 
ca. 100 – 1000 Hz [19]	größer 1200 Hz [20]	größer 1200 Hz [20]
Aerodynamische Effekte		
"Air-pumping" 	Helmholtzresonanzen 	Horneffekt 
größer 1000 Hz [19]	ca. 1000-2500 Hz	ca. 600-2000 Hz ⁶
Röhrenresonanzen im Reifenprofil 	Hohlraum-resonanzen im Radreifen 	
ca. 900-2000 Hz	ca. 250 Hz ⁷	

Abbildung 4: Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs und typische Frequenzbereiche [18]

⁶ höchste Amplifikation (kein Schallentstehungsmechanismus)

⁷ für das Außengeräusch von untergeordneter Bedeutung [19]

Zusammenfassung

Reifen-Fahrbahngeräusche entstehen durch mehrere unterschiedliche Effekte, deren genaue quantitative (Pegel) und qualitative (Frequenz) Beiträge zum Gesamtgeräusch teilweise durchaus noch umstritten sind. Die grundsätzlichen Hauptentstehungsmechanismen der mechanischen Schwingungsanregung und der aerodynamischen Effekte sind jedoch allgemein anerkannt. Abbildung 4 stellt die Mechanismen zusammenfassend dar und gibt Anhaltswerte dafür an, in welchem Frequenzspektrum Geräusche durch den jeweiligen Mechanismus hauptsächlich emittiert werden. Generell erzeugen die mechanischen Schwingungsanregungen des Reifens durch die Textur tendenziell tieffrequenterer Geräusche (< 1 kHz), während durch aerodynamische Prozesse eher hochfrequente Geräusche (> 1 kHz) entstehen. Auch im hochfrequenten Spektrum findet noch mechanische Anregung statt, allerdings ist hier der Einfluss der Textur geringer und die Eigenschaften des Reifens spielen eine gewichtigere Rolle.

2.4 Lärmindernde Fahrbahndeckschichten

Aus den Erkenntnissen zur Schallentstehung durch den Reifen-Fahrbahn-Kontakt (s. Kap. 2.3) können grundsätzliche Anforderungen formuliert werden, wie lärmarme Deckschichten in die Praxis umgesetzt werden können. Dabei sind jedoch stets auch weitere Anforderungen an Fahrbahnoberflächen wie z.B. ausreichende Griffigkeit einzuhalten (s. auch Abbildung 3). Optimierungen in lärmtechnischer Hinsicht sind zum einen im Bereich der Textur durch geänderte bzw. verbesserte Herstellungsvorgänge (z.B. Walzeneinsatz, Abstreumaterial, Wahl des Größtkorns, Einprägen von Texturen) zur Minimierung von Schwingungsanregung und zur Reduzierung von aerodynamischen Schallentstehungsprozessen möglich, zum anderen kann durch die Herstellung hohlraumreicher Schichten nicht nur die „Entlüftung“ des Reifenprofils verbessert werden, sondern zusätzlich eine schallabsorbierende Wirkung erzielt werden.

In der Praxis sind daraus unterschiedliche Varianten lärmarmen Deckschichten entstanden:

- *Lärmarmen Splittmastixasphalt (SMA LA⁸)* [29][30][31]: Die lärmtechnische Optimierung von Splittmastixasphalten basiert auf Überlegungen zur besseren Entlüftung der Reifen durch Maßnahmen an der Textur und am Hohlraumgehalt der Schicht. SMA LA hat typischerweise durch eine stärkere Ausfallkörnung einen wesentlich höheren Hohlraumgehalt von 10-12 % als gewöhnlicher Splittmastixasphalt, die Schicht ist aber dadurch im Gegensatz zu OPA nicht wasserdurchlässig. Die Textur hingegen wird offenerporiger, was wesentlich zur lärmindernden Wirkung durch Entlüftung der Reifen und zu einer gewissen Schallabsorption führt. Weitgehend verzichtet wird auf Abstreumaßnahmen, um die Textur nicht zu schädigen. Eingebaut werden dabei üblicherweise Schichten mit einer Dicke von 1,5 bis 2,5 cm bzw. 2,5 bis 3,5 cm mit einem Größtkorn von 5 bzw. 8 mm. Durch die Zusammensetzung der Sieblinie und gezielten Walzeneinsatz wird neben dem lärmtechnisch günstigen Hohlraumgehalt zusätzlich eine konkave Textur erreicht (Gestaltfaktor $g = 90$ % nach [19]). Lärmpegelminderungen (im Vergleich zum Referenzbelag der RLS 90 [10]) von 4 dB(A) sind ersten Messungen zufolge möglich.

⁸ In Österreich auch: LSMA

- *Dünne Schichten im Kalt-/Heißeinbau (DSK, DSH, DSH-V)* [32][33][34]: Die Bauweise der „Dünnen Schichten“ mit bis zu 2 cm Einbaudicke, die ursprünglich als Instandsetzungsmaßnahme konzipiert worden ist, werden mutmaßlich zukünftig verstärkt auch gezielt als lärmindernde Oberfläche eingesetzt werden, wie es beispielsweise in Österreich bereits praktiziert wird⁹ [31]. Als Material wird gemäß [32] Splittmastixasphalt SMA 5 N/S, Gussasphalt MA 5 S und MA 8 S, Asphaltbeton AC 5 D L oder spezielles Kaltmischgut (DSK) eingesetzt. Allein durch die größere Ebenheit nach einer Instandsetzungsmaßnahme mit „Dünnen Schichten“ tritt bereits eine lärmindernde Wirkung ein. Zusätzlich kann auch die Mischgutzusammensetzung so gewählt werden, dass texturseitig (konkave, offene Oberfläche) eine lärmtechnisch günstige Deckschicht entsteht. Eine akustisch besonders günstige Mischgutzusammensetzung hat die Bauweise Dünne Schicht im Heißeinbau auf Versiegelung (DSH-V) [33] mit Sieblinien, die zwischen denen von Asphaltbeton und Splittmastixasphalt liegen und einen erhöhten Hohlraumgehalt von 4-6 % und damit eine offenere Textur aufweisen. Im europäischen Ausland werden der DSH-V-Bauweise ähnliche Verfahren, jedoch mit Hohlraumgehalten bis zu 14 %, eingesetzt (z.B. UTLAC¹⁰ in Dänemark [35]). Die Versiegelung steigt dabei wie bei DSH-V teilweise in der Schicht auf, so dass trotz des hohen Hohlraumgehalts nur der obere Teil der Schicht und damit die Textur „offen“ bleibt.
- *Lärmarme Gussasphalt* [37][38][39]: Durch die Wahl eines kleineren Größtkorns bei Gussasphalt MA 5 und MA 8 (anstatt MA 11) können die für die Geräuschenstehung ungünstigen Makrotexturelemente reduziert werden. Schon durch Beachtung einer gleichmäßigen Einbaudicke und -temperatur können ungünstige Ausbildungen der Mega- und Makrotextur verhindert werden. Zusätzlich wird ein kubisch gebrochenes, enggestuftes bindemittelumhülltes Korn als Abstreumaterial (üblicherweise 2/3 oder 2/4) eingesetzt, das im Unterschied zur konventionellen Bauweise jedoch nicht eingewalzt wird. Der Splitt muss dadurch schon bei heißeren Gussasphalttemperaturen, (normalerweise unmittelbar hinter der Einbaubohle) aufgestreut werden, damit er in der Oberfläche fest verankert werden kann. Durch Beachtung einer gleichmäßigen Einbaudicke und -temperatur wird eine gleichmäßige Einbettung des Abstreusplitts zusätzlich unterstützt. Die notwendige Abstreumenge wird aufgrund von Erfahrungen mit Versuchsstrecken in neuerer Zeit als höher eingeschätzt (10-13 kg/m² [36][39] statt 5-8 kg/m² [37]¹¹). Wie wichtig der Verzicht auf den Walzeneinsatz für die lärmindernde Wirkung zu sein scheint, lässt sich in einem erfolglosen Versuch, Gussasphalt allein durch Wahl kleinerer Größtkörner bei der Abstreuerung leiser zu gestalten, erkennen [40]. Durch die Form und Korngröße des Abstreumaterials sowie die Verfahrensweise ohne Einwalzen wird eine lärmarme, konkave Textur erzeugt, wodurch Pegelminderungen (im Vergleich zum Referenzbelag) von ungefähr 2-3 dB(A)¹² [37][39] ermöglicht werden. Die Fertigung von Gussasphalt mit besonderer Abstreuerung und dem Verzicht auf das Einwalzen ist in der neu erschienenen ZTV Asphalt-StB Ausgabe 2007 [36] explizit enthalten.

⁹ In Österreich auch: Lärmindernde Dünnschichtdecke heiß (LDDH)

¹⁰ Ultra Thin Layer Asphalt Concrete

¹¹ Üblicher gewalzter Gussasphalt wird mit 12 bis 15 kg/m² der Lieferkörnung 2/5 abgestreut [36]

¹² Eingeführter D_{Stro} -Wert von $D_{\text{Stro}} = -2$ dB(A) mit Allgemeinem Rumschreiben des Bundesministers für Verkehr Nr. 22/2010

- *Texturierung von Betonfahrbahnen*: Es wird auf verschiedene Weise versucht, durch gezielte Texturierung von noch frischen oder bereits (teilweise) erhärteten Betonoberflächen die lärmindernde Wirkung durch Minderung von Schwingungsanregungen und bessere Entlüftung des Reifens zu verbessern. Die früher angewendete Querstrukturierung mit Rosshaar- oder später Stahlbesen war akustisch deutlich ungünstiger als die seit den 90-er Jahren üblicherweise angewendete Technik der Längsstrukturierung der Oberfläche durch Nachschleppen eines Jutetuchs (oder neuerdings eines Kunstrasens). Zeitgleich wurde durch den Einsatz von Längsglättern eine Verbesserung der Megatextur erreicht, die ebenfalls das Reifen-Fahrbahn-Geräusch mindert [41]. Auf bereits erhärtetem Beton kann durch Fräsen (z.B. von Längsrillen mit anschließendem Kantenbruch) oder Abschleifen (z.B. Grinding [42]) nachträglich eine Texturierung erzeugt werden, wobei mit ersterem lärmseitig wegen erhöhter Schwingungsanregung eher schlechte Erfahrungen gemacht worden sind [38]. Im Gegensatz zu den gerichteten Texturen kann auch eine gleichmäßige (isotrope) Textur durch auftragende (Beschichtung mit anschließendem Abstreuen [40][42]) oder abtragenden Verfahren (Abschleifen [38]) erzeugt werden. Durch Verbesserung der Einbau- bzw. Texturierungstechnik sind überdies noch weitere Optimierungsmöglichkeiten der Makro- und Megatextur und der Ebenheit mit einhergehender Lärminderung denkbar. Die bis vor kurzem übliche Bauweise einer Texturierung mit Jutetuch findet in der neu erschienenen ZTV Beton-StB 07 [43] keine Anwendung mehr¹³; diese Texturierung hat eine Pegelminderung gegenüber dem Referenzbelag von -2 dB(A) (gültiger Korrekturwert D_{Stro} nach [10]).
- *Waschbeton* [43][44][45]: Der Oberflächenmörtel wird bei dieser Bauweise bereits im frischen Zustand durch einen motorisierten Stahlbesen ausgebürstet. Die gewünschte Ausbürstmenge bzw. Ausbürsttiefe (ca. 0,7 bis 0,8 mm [42]) wird dabei im Wesentlichen durch gezielten Einsatz von Verzögerern erreicht. Die auf diese Weise freigelegten groben Zuschlagstoffe bilden eine griffige, isotrope Makrotextur, die aufgrund ihrer Struktur (hoher Gestaltfaktor nach [19]) einem „Plateau mit Schluchten“ gleicht. Zusätzlich entstehen durch die Ausbürstung zwischen den groben Zuschlagstoffen Freiräume, die zur Entlüftung zwischen Reifen und Fahrbahn beitragen. Die Reduzierung der Schwingungsanregung und der aerodynamischen Effekte der Geräuschenstehung führen dazu, dass diese Bauweise lärmtechnisch der seither üblichen Texturierung mit Jutetuch gleichgesetzt wurde (Korrekturwert $D_{\text{Stro}} = -2$ dB(A) [46]). Waschbetonoberflächen sind bei ausreichend polierresistenten Zuschlagstoffen zudem dauerhaft griffiger als mit Jutetuch texturierte [42]. Zur Anwendung kommen dabei in Deutschland üblicherweise Decken mit 0/8-Körnung, da bei der 0/5-Körnung die Zuschläge ausgebürstet oder ausgefahren werden, was texturseitig zu lärmtechnischen Einbußen führt.
- *Offenporiger Beton/Dränbeton* [38][47][48]: Offenporiger Beton wird mit einer Ausfallkörnung in der Mischungszusammensetzung - üblicherweise wird als Zuschlagstoff nur eine Körnung 5/8 verwendet - hergestellt, wodurch ein Hohlraumgehalt von 20-25 % entsteht. Eingebaut wird der Dränbeton „frisch auf frisch“ mit Gleitschalungsfertigern oder üblicherweise „frisch auf fest“ (mit Haftbrücke) mit einem Asphaltfertiger mit Hochverdichtungsbohle in einer Schichtstärke von 4 bis 8 cm auf eine dichte Unterbetonschicht. Durch die hohe Porosität können, ähnlich wie beim OPA, durch Verminderung der aerodynamischen Effekte bei der Schallentstehung hohe Pegelminderungen erzielt werden. Dränbeton konnte sich trotz des Baus von Versuchsstrecken bislang als lärmarme Alternative aus unterschiedlichen Gründen nicht durchsetzen: Der hohe

¹³ Die Texturierung mit Kunstrasen ist in [43] jedoch noch enthalten.

Hohlraumgehalt führt zu einer hohen Schadensanfälligkeit. Niedrige Festigkeitswerte, die erhöhte Gefahr von Kornausbrüchen an Fugen¹⁴ und/oder in Folge von Rissbildungen, geringere Frost-Tausalzbeständigkeit, mangelnder Verbund zum Unterbeton, Griffigkeitsverlust) in Folge hoher physikalischer und chemischer Beanspruchung sind die Probleme, die bisher aus Erfahrungen mit offenporigem Beton gewonnen wurden. Die angeführten Aspekte deuten demnach auf das Hauptproblem dieser Bauweise hin, der mangelnden Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit.

- *Gummimodifizierter Asphalt* [49][50][51]: Zur Herstellung von „Gummi-asphalt“ wird Gummigranulat, das aus der Altreifenbearbeitung stammt, dem Bitumen (in gröberer Form) oder dem Asphaltmischgut während des Mischvorgangs (in feinerer Form) zugegeben. In den USA und Kanada werden gummi-modifizierte Asphalte bereits seit ca. 30 Jahren eingesetzt. Die bautechnischen Gründe für den Einsatz von gummi-modifiziertem Asphalt liegen dabei in der höheren Lebensdauer, der erhöhten Verformungsbeständigkeit, einem verbesserten Temperaturverhalten (hohe Gebrauchsspanne), der Erhöhung der Griffigkeit und in der lärm-mindernden Wirkung. Nicht zuletzt spielt auch der Recycling-Gedanke eine wesentliche Rolle. Die Ursache der lärm-mindernden Wirkung ist nicht abschließend geklärt, meist wird sie auf die durch das Gummi erhöhte Elastizität der Deckschicht zurückgeführt. In Deutschland und Österreich sind in den letzten Jahren Versuchsstrecken gebaut worden, die intensiv überwacht werden. Erfahrungen aus Nordamerika und Lärm-messungen in Österreich ergaben Pegelsenkungen von 3 bis 4 dB(A) zu vergleichbaren Belägen ohne Gummi-modifizierung. Als Weiterentwicklung sind die im Versuchsstadium befindlichen poroelastischen Decken zu sehen, die mit einer porösen/offenporigen Struktur durch hohe Hohlraumgehalte zusätzlich zur Lärm-minderung beitragen können (z.B. [52]).
- *Offenporiger Asphalt (OPA)*: Die lärm-mindernde Wirkung von offenporigem Asphalt (OPA) beruht auf seinem hohen Hohlraumgehalt (20-25 %). Dieser bewirkt zum einen eine deutliche Reduktion der aerodynamisch angeregten Geräusche, weil Luft-einschlüsse zwischen Reifen und Fahrbahn durch die offenporige Struktur stark reduziert werden, zum anderen besitzt OPA durch die Porosität eine hohe Schallabsorptionswirkung. Zu bautechnischen Fragen, Lärm-minderungspotentialen und Erfahrungen mit OPA wird auf Kapitel 3 verwiesen.

Zusammenfassung

Lärmarme Decken bedingen einen Trend zu qualitativ hochwertigen, aufwändigen Einbaumethoden und -verfahren, die Erfahrung und hohe fachliche Kompetenz vor Ort erfordern. Optimierungen in lärm-technischer Hinsicht sind weiterhin möglich, sowohl im Hinblick auf die Textur als auch den Hohlraumgehalt betreffend. Dabei ist jedoch stets das technisch und materialeitig Machbare beispielsweise hinsichtlich anderer, wesentlicher Fahrbahneigenschaften sowie die Wirtschaftlichkeit der Einbauverfahren im Auge zu behalten.

¹⁴ Offenporiger Beton wird deshalb häufig fugenlos hergestellt, da durch das Schneiden bereits erhebliche Beschädigungen eintreten können [38].

3 Offenporiger Asphalt im Straßenbau

3.1 Definition/Begriffsklärung

Offenporiger Asphalt (OPA)¹⁵ wird im Straßenbau fast ausschließlich als Deckschichtmaterial verwendet. Im Gegensatz zu anderen „dichten“ Deckschichten (Asphaltbeton, Splittmastixasphalt, Gussasphalt) hat er einen wesentlich höheren Hohlraumgehalt von (heutzutage) > 22 %, der durch eine Ausfallkörnung im Sand-/Splittbereich in der Sieblinienzusammensetzung erzeugt wird. Als Bindemittel wird dabei wegen hoher mechanischer Anforderungen (hoch) polymermodifiziertes Bitumen verwendet.

Der Einbau kann ein- und zweilagig erfolgen; die Schichtdicken der Einzelschichten betragen dabei im internationalen Vergleich üblicherweise zwischen 2,5 und 6,0 cm, der gesamte offenporige Aufbau liegt meist zwischen 4,0 und 7,0 cm. Das eingesetzte Größtkorn variiert zwischen 5 und 22 mm; üblicherweise wird in Deutschland Mischgut mit einem Größtkorn von 8, 11 und 16 mm verwendet¹⁶. Bei zweilagigen Ausführungen ist die untere Schicht gröber, die obere feiner ausgebildet.

Von der Besonderheit des hohen Hohlraumgehalts leiten sich die vorteilhaften Eigenschaften von OPA, aber auch die Nachteile ab. Vorteile, die als Hauptargumente für eine Verwendung von offenporigen Asphalten sprechen, sind:

- Drainagewirkung: Oberflächenwasser wird von der porösen Asphaltsschicht aufgenommen und abgeleitet.
- Lärminderung: Durch die poröse und offenporige Struktur wird die Entstehung von Lärm vermindert, die Gesamtlärmemission verringert sich zusätzlich durch Absorptionswirkungen in den Poren des OPA.

Daraus leiten sich weitere positive Eigenschaften ab:

- Vorteile hinsichtlich der Verkehrssicherheit durch
 - Reduzierung der Aquaplaninggefahr
 - Verringerung der Sprühhahnenbildung, dadurch auch geringere Verschmutzung von sicherheitsrelevanten Einrichtungen (wie z.B. Leitpfosten und Schilder)
 - Verringerte Blendung des Gegenverkehrs durch Lichtreflexionen bei Nässe, dadurch auch verbesserte Erkennbarkeit von Fahrbahnmarkierungen.
- Vorteile durch Wasserrückhaltevermögen bezüglich
 - Entlastung der Vorflut durch verzögerte Ableitung von Niederschlagswasser,
 - Entlastung der Entwässerungseinrichtungen durch Reduzierung der Spitzenabflüsse bei Starkregen.

¹⁵ Häufige synonym verwendete Begriffe: Drainasphalt, Flüsterasphalt®; Mischgutbezeichnung PA in neu erschienener ZTV Asphalt-StB Ausgabe 2007 [36]; engl.: porous asphalt, open-graded friction course (USA).

¹⁶ PA 8, PA 11 und PA 16 nach [36] (PA 16 nur für untere Schicht bei zweilagigem Aufbau)

Die offenporige Struktur bringt aber auch Nachteile im Gebrauchsverhalten mit sich:

- Erhöhte Schadensanfälligkeit durch hohen Hohlraumgehalt, woraus sich hohe materialseitige Anforderungen an Bindemittel und Mineralstoffe ergeben (s. Kap. 3.3.2)
- Besondere Anforderungen an die Griffigkeit, weil durch die offenporige Struktur weniger Kontaktpunkte zwischen Fahrbahnoberfläche und Reifen existieren (s. Kap. 3.3.2.6)
- Besonderheiten bei der baulichen Erhaltung sowie im Betriebs- und Winterdienst (s. Kap. 3.3.3).

Ein Hauptproblem stellt darüber hinaus die mit der Zeit nachlassende lärmmindernde Wirkung dar, die zu wesentlichen Teilen auf die Verschmutzung der offenporigen Struktur zurückgeführt wird (s. Kap. 3.3.1).

Eine besondere Bauweise stellt der zweilagige offenporige Asphalt (ZWOPA oder 2OPA¹⁷) dar. Er soll neben der Erzielung noch höherer Lärminderungspotentiale die Wasserableitung (durch eine grobe untere Schicht) und damit auch den Schmutzabtransport verbessern. Auf diese Weise soll die Verschmutzungsanfälligkeit des offenporigen Asphalts insgesamt heruntersetzt und seine akustische Dauerhaftigkeit wesentlich erhöht werden. Durch hohe Pegelminderungen im Neuzustand steht bei der Verwendung von ZWOPA zudem ein „Vorhaltemaß“ für die über die Zeit abnehmende Lärminderung zur Verfügung.

3.2 Historische Entwicklung von offenporigem Asphalt

3.2.1 Internationale Entwicklung

Die Idee, eine Asphaltdecke wasserdurchlässig zu gestalten, stammt aus Überlegungen, wie die Aquaplaninggefahr auf Flugverkehrsflächen reduziert werden kann. In den Vereinigten Staaten wurden diese wasserdurchlässigen Deckschichten nach ersten Experimenten in den 1930-er Jahren erstmals in den 1950-er Jahren zunächst zu Versuchszwecken auf (militärisch genutzten) Flugplätzen eingebaut (z.B. [53]). Nachdem erste positive Erfahrungen gesammelt wurden, erprobte man die neue Technologie auch auf Straßenverkehrsflächen in den USA, zunächst nur mit dem Ziel, Wasser schneller von der Fahrbahnoberfläche abzuführen und so die Verkehrssicherheit zu erhöhen. In den 1970-er Jahren hat sowohl die FAA¹⁸ für Flugverkehrsflächen als auch die FHWA¹⁹ (im Jahr 1974) für Straßendeckschichten in den USA erstmals technische Standards zur Verwendung von sogenanntem OGFC²⁰ (Open-graded friction course) veröffentlicht [54]. In den Folgejahren wurde man auf erste einhergehende Probleme (z.B. Bindemittelablösung in unterliegenden Schichten durch eindringendes Wasser, Kornausbrüche) mit OGFC aufmerksam, so dass sich einige Bundesstaaten sogar gezwungen sahen, ein Moratorium über den weiteren Einsatz von OGFC zu verhängen (z.B. Georgia 1982 [55]). Dennoch wurde OGFC weiterhin verwendet, obgleich mit einem niedrigeren Hohlraumgehalt

¹⁷ Engl. häufig Two-layer porous asphalt (TLPA)

¹⁸ Federal Aviation Administration

¹⁹ Federal Highway Administration, US Department of Transportation

²⁰ In den Anfangsjahren auch als PFC (porous friction course) oder PWC (porous wearing course) bezeichnet.

(anfangs ca. 15% [56], später > 18% [57]) und in geringerer Schichtdicke als in Europa. Der Einsatz von OGFC mit höheren Hohlraumgehalten findet erst in neuerer Zeit größere Verbreitung [58].

Nach und nach kamen neben der Verbesserung der Sicherheit durch schnelles Ableiten von Wasser von der Fahrbahnoberfläche weitere Vorteile zum Vorschein. Durch die Ableitung des Regenwassers in die poröse Asphaltschicht konnte auch die Sprühhahnenbildung und die Blendung des Gegenverkehrs durch Licht auf nassen Fahrbahnen erheblich reduziert werden. Darüber hinaus fand zunehmend auch die positive Eigenschaft des „porösen Asphalts“ Beachtung, Verkehrslärm reduzieren zu können. Eine der ersten Veröffentlichungen zu diesem Aspekt stammt aus dem Jahr 1975 aus den USA [59]. Dass die Lärminderung als Materialeigenschaft in dieser Zeit noch eine untergeordnete Rolle spielte, zeigt sich auch an den Beiträgen auf dem Internationalen Symposium zu offenporigen Asphalten 1976 in Amsterdam [60], die schwerpunktmäßig Eigenschaften und Zusammensetzung des Mischguts und die Entwässerungswirkung, nicht aber die lärmindernden Eigenschaften behandelten.

In Europa nahm die Entwicklung und Anwendung dieser neuen Technologie einen etwas zeitverzögerten Verlauf. Vorreiter der europäischen Entwicklung war Großbritannien, wo „friction course“ in den 1950-er Jahren erstmals erprobt und seit 1962 durch das britische Luftfahrtministerium routinemäßig für den Bau von Start- und Rollbahnen auf zivilen und militärischen Flugplätzen vorgeschrieben wurde [61]. Ab 1967 erprobte das TRRL²¹ angesichts der Vorteile, die sich aus der besseren Entwässerung von befestigten Oberflächen ergeben, offenporigen Asphalt auch auf mehreren Nationalstraßen [62][63]. Auch in den 1970-er und 1980er-Jahren wurden weitere Versuchsstrecken gebaut und beobachtet, bei denen hauptsächlich noch die Optimierung des Mischguts hinsichtlich Dauerhaftigkeits-, Festigkeits- und Entwässerungseigenschaften im Vordergrund stand [64], wobei die lärmreduzierende Wirkung in diesen Jahren dennoch erste zaghafte Beachtung fand [65]. Nach dem Erfahrungsgewinn aus diesen Versuchsstrecken und den dabei auch zu Tage tretenden Probleme und Tücken des Materials sprach der Minister für Straßen und Verkehr in Großbritannien im Jahre 1992 davon, dass er das Material gern „an den richtigen Stellen“ einsetzen und einen „beschränkten Einsatz auf Autobahnen und Fernstraßen“ dort erlauben würde, „wo die Vorteile die Nachteile überwiegen“ [65]. Während in anderen europäischen Ländern der offenporige Asphalt schon in der Anwendung war, wurde von manchen Autoren die Ansicht geäußert, dass offenporiger Asphalt „von den britischen Behörden weiter und weiter erprobt [wird], ohne dass der Dränasphalt allgemein zugelassen wird“ [61]. Eine Spezifikation für ‚porous asphalt‘ folgte schließlich Mitte der 90-er Jahre nach einer über 20-jährigen Erprobungsphase, die nach Ansicht anderer Autoren nötig war, um „ein angemessenes Maß an Sicherheit zu haben, dass die [...] Materialien ausreichend dauerhaft sind und auf Strecken, auf denen Nutzfahrzeuge einen signifikanten Anteil am Verkehr ausmachen, verwendet werden können“ [65].

In den Niederlanden, wo der offenporige Asphalt²² ab dem Jahr 1972 erstmals erprobt wurde und heutzutage wohl am weitesten verbreitet ist, sind die Erkenntnisse über offenporigen Asphalt dementsprechend umfangreich; ab 1985/86 wurde der offenporige Asphalt vor allem auf Autobahnen in größerem Maßstab eingesetzt [66]. Aus diesen Jahren stammen auch erste

²¹ Transport and Road Research Laboratory (seit 1992 Transportation Research Laboratory, TRL)

²² Niederländischer Begriff: Zeer open asfaltbeton (ZOAB); („sehr offener Asphaltbeton“)

Erkenntnisse zur Lärminderung, die an einem 1984 gebauten Teststück gesammelt wurden. Von den Behörden²³ wurde im Jahr 1990 nach den positiven Erfahrungen mit offenporigem Asphalt vorgegeben, dass im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen auf dem Haupt(fern)straßennetz zukünftig nur noch Dränasphalt eingesetzt werden soll [66][67].

In Frankreich startete man mit ersten Versuchen in den Jahren 1976/77, bevor 1984 erste Anwendungen in größerem Stil folgten [68]. In den Folgejahren wurden weitere Versuchsstrecken realisiert (z.B. [69]), wobei das Hauptaugenmerk auf der asphalttechnologischen Weiterentwicklung und den Entwässerungseigenschaften, jedoch weniger auf der lärmindernden Wirkung lag. Bis zum Jahr 1990 stieg die jährliche Einbaumenge offenporiger Deckschichten²⁴ stetig an, danach stagnierte die Verwendung und war sogar rückläufig, weil man zunehmende Probleme im Winterdienst (s. auch Kap. 3.3.3) feststellte, die den Betrieb der offenporigen Strecken entsprechend aufwändiger machten [68]. Aus Frankreich wird zudem schon verhältnismäßig früh (Anfang/Mitte der 1980-er Jahre) über die Verwendung von polymermodifiziertem Bitumen und Faserzugaben sowie Gummizuschlägen [70] zur Verbesserung von Festigkeitseigenschaften im Zusammenhang mit offenporigen Asphalten berichtet.

Bereits auf dem Internationalen Symposium zu offenporigen Asphalten im Jahr 1976 in Amsterdam konnte aus Dänemark über die Verwendung von „drainage asphalt“²⁵ berichtet werden [71]. Bis 1990 im Rahmen eines nordeuropäischen Verbundprojekts mehrere Versuchsstrecken mit dem ausdrücklichen Ziel der Untersuchung der lärmindernden Wirkung realisiert wurden, fanden vorher, auch aufgrund schlechter Erfahrungen im Winter (s. auch Kap. 3.3.3), nur vereinzelte Anwendungen von offenporigem Asphalt im experimentellen Bereich statt. Seither ist Dänemark ein Land, in dem offenporiger Asphalt vergleichsweise intensiv eingesetzt und begleitend untersucht wird [72].

In Italien hat der Bau von zweilagigen offenporigen Asphalten, bei dessen großflächiger Erprobung Italien 1996 zu den Vorreitern in Europa gehörte, dem offenporigen Material zu einem wirklichen Durchbruch verholfen. Auch vorher wurden gegen Ende der 1980-er Jahre bereits einlagige offenporige Asphaltdecken gebaut und (auch in größerem Maßstab) erprobt, so dass im Jahr 1996 bereits etwa 8 Mill. m² mit Dränasphalt versehen waren [73].

In Spanien wurde 1980 mit der Verwendung von Dränasphalt²⁶ auf einem Streckenabschnitt im Norden des Landes begonnen, wo es häufiger zu heftigen Regenfällen kommt [74]. Primäres Ziel war demnach auch hier die Verbesserung der Verkehrssicherheit durch die Entwässerungseigenschaften des offenporigen Asphalts. Nachdem anfänglich noch offenporiger Asphalt mit Hohlraumgehalten um 15 % gebaut wurde, ging man ab ungefähr 1986 dazu über, höhere Hohlraumgehalte mit mehr als 20 % zu realisieren, so dass bis 1990 bereits 3 Mill. m² Straßenoberfläche mit offenporigem Asphalt versehen waren [75]. Die Verwendung von offenporigem Asphalt stieg in den Folgejahren stetig, einen weiteren Impuls bekam die zunehmende Verwendung von offenporigen Asphalten ab dem Jahr 1993 durch neue

²³ Ministerium für Verkehr, öffentliche Anlagen und Wassermanagement

²⁴ Französischer Begriff: Enrobés drainants, („wasserdurchlassende Decke“)

²⁵ Späterer dänischer Begriff: drænasfalt, („Dränasphalt“)

²⁶ Spanischer Begriff: mezclas drenantes („wasserdurchlässiges Mischgut“)

Konstruktionsrichtlinien [76]. Auch auf den balearischen Inseln wird Dränasphalt seit 1981 sehr intensiv eingesetzt.

Die erste Anwendung von Dränasphalt²⁷ in Belgien datiert aus dem Jahr 1979 von einem kleinen Teilabschnitt einer Nationalstraße. Ab 1981 wurde offenporiger Asphalt auch in größerem Stil verwendet, unter anderem aus dem Grund, dass auf den Markt kommendes polymermodifiziertes Bitumen und Versuche mit Altgummizuschlägen große Fortschritte hinsichtlich Stabilität und Dauerhaftigkeit der Schichten versprachen. Ab 1983 wurde offenporiger Asphalt auch bereits innerorts eingesetzt, 1986 folgten erste technische Richtlinien für offenporige Deckschichten [77]. Bis 1987 wurden bereits insgesamt 1,5 Mill. m² Dränasphalt auf belgischen Straßen eingebaut. Als Besonderheit, die aufgrund der geringen Höhen über dem Meeresspiegel in Belgien bereits in den frühen 1980-er Jahren zur Anwendung kam, ist die Entwässerung von Tunneln, die unter dem Grundwasserspiegel liegen, anzusehen [78].

In Portugal kam offenporiger Asphalt relativ spät, erst 1991, zum ersten Mal zur Anwendung, mit dem Vorteil, dass man bereits von Erfahrungen der Nachbarländer profitieren konnte. Die größte private Autobahngesellschaft Portugals BRISA, die den größten Teil des Fernstraßennetzes betreibt, beschloss nach positiven Erfahrungen mit Teststrecken, alle Strecken im Zuge neuer Projekte im Norden Portugals, wo häufiger mit starken Regenfällen zu rechnen ist, in Zukunft mit offenporigem Asphalt zu bauen. Bis 1997 waren bereits 3 Mill. m² offenporiger Asphalt eingebaut, was damals 12 % des Gesamtnetzes der BRISA entsprach [79].

Die Schweiz erprobte seit 1979 erste Strecken mit offenporigem Asphalt, ab 1982 bestand ein Forschungsprogramm, im Zuge dessen insgesamt 17 Erprobungsstrecken realisiert wurden – die meisten im Zeitraum 1985/86. Einen großen Durchbruch für das offenporige Material in der Schweiz bedeuteten die Jahre 1993/94, in denen zwei Strecken auf stark befahrenen Abschnitten mit einer Gesamtfläche von über 300.000 m² realisiert wurden. Im Jahr 1997 waren insgesamt ca. 700.000 m² offenporige Deckschichten verbaut [80]. Im Jahr 2006 waren sogar bereits insgesamt ca. 250 Autobahnkilometer mit offenporigem Asphalt ausgestattet [81].

Die erste Dränasphaltdecke wurde in Österreich 1984 auf einem 1,5 km langen Abschnitt der Inntalautobahn eingebaut. Von Anfang an lag das Hauptaugenmerk gezielt auf der lärmindernden Wirkung, was auch am kommerziellen Namen „Flüsterasphalt“ abzulesen war. Bis zum Jahr 1992 wurden offenporige Asphaltsschichten auf insgesamt 7,5 Mill. m² eingebaut, was ca. 18 % des hochrangigen Straßennetzes entspricht. Ab 1992/93 ging der Einbau offenporiger Decken stark zurück. Gründe dafür waren Probleme im Winterdienst (Vereisung, erhöhter Salzverbrauch) sowie Mängel im Langzeitverhalten. Zusätzlich traten Schadensfälle mit massiven Kornverlusten auf, die zu einem vollständigen Versagen der Deckschicht führten. Im Jahr 2004 waren in Folge dessen nur noch ca. 8,4 % des hochrangigen Straßennetzes mit offenporigen Asphaltsschichten ausgeführt. Wegen „ständig steigender Anforderungen an den Lärmschutz“ und den ersten Erfolgen in anderen Ländern mit zweilagigen offenporigen Asphaltsschichten besann man sich in jüngster Zeit wieder auf die offenporige Bauweise, so dass 2005 nach den schlechten Erfahrungen von Anfang der 1990-er Jahre wieder eine Teststrecke in Österreich in Betrieb ging [82][83].

Auch in außereuropäischen Ländern wie Neuseeland, wo man offenporige Asphaltsschichten bereits ab 1975 einsetzte [84], und Japan nahm die Entwicklung von offenporigen Asphaltsschichten ihren Lauf.

²⁷ Begriff in Belgien (franz.): Enrobés drainants („wasserdurchlassende Decke“)

Aus Japan liegen bereits aus dem Jahr 1976 Berichte über „Probleme mit porösem Asphalt“ vor [85]. 1987 kam es zur ersten großflächigeren Anwendung. Auf Grund der Vorteile von offenporigem Asphalt gegenüber herkömmlichem Mischgut wurde 1998 entschieden, offenporigen Asphalt als „Standard-Oberflächen-Mischgut“ für alle Autobahnen zu verwenden. Dadurch sind heutzutage ca. 40 % des Autobahnnetzes Japans mit offenporigen Asphaltdeckschichten versehen [86].

3.2.2 Entwicklung in Deutschland

Wie in anderen Ländern begann die Dränasphaltnwendung in den Anfangsjahren auf Flugplätzen, wie z.B. mehreren Start- und Landebahnen von NATO-Flugplätzen. Aus dieser Art der Anwendung stammen auch die ersten Festlegungen zur Verwendung und zur Mischgutzusammensetzung von offenporigen Decken, die Richtlinien für Dränasphaltschichten auf Flugplätzen aus dem Jahr 1983 [87].

Schon 1974 machte man sich aufgrund von Entwicklungen in den Niederlanden und Großbritannien auch in Deutschland Gedanken über die Verwendung von „wasserdurchlässigen Makadam-Deckschichten“ auf Straßen, musste die Anwendung wegen der anhaltenden Verwendung von Spikesreifen²⁸ jedoch zunächst noch verwerfen [88]. Die erste Anwendung von Dränasphalt auf einer öffentlichen Straße in Deutschland datiert aus dem Mai 1978. In diesem Jahr wurde versuchsweise auf einem Autobahnabschnitt der A 45 (Sauerlandlinie) bei Katzenfurt, der Entwässerungsprobleme aufwies, ein „Asphaltbeton 0/16 mit einem Hohlraumgehalt von mind. 15 Vol.-%“ eingebaut, der als Dränasphalt wirken sollte [89]. Auf dem Nürburgring wurde 1980 zu Test- und Beobachtungszwecken hinsichtlich Griffigkeit, Drainagevermögen, Verminderung von Sprühhahnenbildung und Reduzierung des Reifenverschleißes neben geschlossenen Asphaltbetondecken auch ein Dränasphalt 0/11 eingebaut [90]. Dass in Deutschland im Gegensatz zu anderen Ländern von Anfang an auch das Lärminderungspotential von offenporigen Decken im Fokus des Interesses stand, zeigt die vergleichsweise intensive lärmtechnische Beobachtung der beiden Erprobungsstrecken in den Folgejahren. An der A 45 stellte man beispielsweise eine Minderung des Mittelungspegels bei „normalem Autoverkehr mit 25 % Schwerverkehrsanteil“ von 3 dB(A) gegenüber dem Gussasphaltbelag vor und hinter der Teststrecke fest; zusätzlich wurden an dieser Teststrecke bereits Frequenzspektren untersucht und Schallabsorptionsgrade von offenen Deckschichten diskutiert. Auch am Nürburgring konnte man bei Vorbeifahrtmessungen Pegelminderungen von 3-4 dB(A) feststellen. Das Problembewusstsein der Öffentlichkeit gegenüber dem Straßenverkehrslärm entstand durch die stetig stark zunehmende Motorisierung; gleichzeitig wuchsen die Erwartungen an den Straßenbau, Lärminderung durch technologische Maßnahmen bei den Deckschichten wesentlich voranzutreiben. Die FGSV sah sich daher 1982 zu einer Stellungnahme [91] über Möglichkeiten und Potentiale der Lärminderung an den Deckschichten gezwungen, um gleichzeitig auch übertriebene Erwartungen der Öffentlichkeit und der Politik zu zügeln. Im Jahre 1986 schließlich wurde bei der Bundesanstalt für Straßenwesen die Projektgruppe „Lärm mindernde Straßendecken“ eingerichtet, der auch Vertreter der zuständigen Bundesministerien, der Länder und der Straßenbauwirtschaft angehörten. Eine wesentliche Aufgabe der Projektgruppe lag in der Planung, Realisierung, Beobachtung und Bewertung von Versuchsstrecken. Zug um Zug wurden bis 1989 insgesamt 20 Strecken mit offenporigen

²⁸ Verbot von Spikesreifen in Deutschland erfolgte im Jahr 1975

Asphalten mit insgesamt ca. 40 km Länge realisiert [92], davon 7 Strecken im innerstädtischen Bereich, z.B. in Berlin, Köln, Hamburg, Düsseldorf und München [93]. Der Hohlraumgehalt dieser offenporigen Decken der „ersten Generation“ lag bei vergleichsweise niedrigen 15-18 %²⁹ [94]. Um Erfahrung zu gewinnen, wurden die asphalttechnologischen Größen Schichtdicke, Bindemittelart und -gehalt sowie Größtkorn variiert. Somit konnten neben der Lärminderung auch die Parameter des Gebrauchs- und Langzeitverhalten beobachtet werden [92]. Ein Fazit zu diesen Versuchsstrecken wurde im Jahr 1996 gezogen. Unter anderem wurden dabei neben generell hohen Verformungsbeständigkeiten und mit dem hohen Hohlraumgehalt einhergehenden Problemen vor allem auch die mit der Zeit nachlassende lärmindernde Wirkung festgestellt [93]. Die Zwischenergebnisse der Versuchsstrecken bezüglich der Lärminderung durch offenporige Fahrbahndecken fanden im Jahre 1990 sowohl Eingang in die 16. BImSchV³⁰ [9] als auch in die Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-90) [10]; die bautechnischen Erfahrungen resultierten im ersten „straßenbezogenen“ Merkblatt für offenporige Asphaltdeckschichten im Jahr 1991 [95]. Mit [96] wurden die in der RLS-90 [10] genannten Korrekturwerte („Lärminderungswerte“) für Straßenoberflächen D_{StrO} um konkrete Werte für offenporige Asphalte (bei einer zulässigen Geschwindigkeit von > 60 km/h) ergänzt:

- Für OPA 0/8 mit Hohlraumgehalten > 15 %: $D_{StrO} = -5,0 \text{ dB(A)}$
- Für OPA 0/11 mit Hohlraumgehalten > 15 %: $D_{StrO} = -4,0 \text{ dB(A)}$

Dieser ersten Generation offenporiger Deckschichten (Zeitraum ca. 1986-1993) folgten noch während der Erprobung bereits weitere Versuchsstrecken einer zweiten (Zwischen-) Generation (ab ca. 1988), die mit höheren Hohlraumgehalten von ca. 17-20 %³¹ das Lärminderungspotential zusätzlich steigern sollten [94]. Eine ebenso interessante Zwischenepisode in der Entwicklung poröser Asphalttschichten bildeten die Versuche, neben der Deckschicht auch tiefer liegende Schichten (Binder- und Tragschichten) mit hohen Hohlraumgehalten herzustellen und sie somit in die Entwässerung und Lärminderung mit einzubeziehen. Eine erste, nicht-öffentliche Versuchsstrecke von 25 m Länge wurde auf einem Gelände eines Kieswerks angelegt, der hohlraumreiche Oberbau hatte dabei eine Gesamtstärke von 45 cm. Die diesbezüglichen Forschungsarbeiten fanden an der Universität (TU) Karlsruhe statt (daher auch die Bezeichnung „Karlsruher Bauweise“), deren eingehender Untersuchung aller Kennwerte in einer Dissertation von 1997 nachgegangen wird [97]. Eine Teststrecke mit einer hohlraumreichen Deckschicht (0/8) von 4 cm Stärke und zusätzlich einer hohlraumreichen Binderschicht (0/16) von 8 cm Stärke, wurde 1989 in Köln-Poll realisiert. Lärmmessungen zeigten durch den hohlraumreichen Binder weitere Lärminderungspotentiale von 3 dB(A) [93]. Schichtenaufbau, Prinzip und lärmindernde Eigenschaften dieser Versuchsstrecke, die der Bauweise dennoch nicht zum Durchbruch verhelfen konnte, ähneln sehr den erst Jahre später erprobten zweilagigen offenporigen Asphalten (s. Kap. 3.2.3).

Eine dritte Generation offenporiger Asphalte mit Hohlraumgehalten > 22 % wurde in Deutschland ab 1994 erprobt. Ein großes Versuchsfeld mit einer Gesamtfläche von über 700.000 m² stellte dabei die A 2 zwischen Hannover und Helmstedt dar, das zur Erfahrungsgewinnung und weiteren Optimierung auch von intensiven Forschungsbemühungen begleitet war [94][98]. Mit den höheren

²⁹ Hohlraumgehalt in der eingebauten Schicht

³⁰ Eingang in das Berechnungsverfahren des Beurteilungspegels durch Einführung des Korrekturglieds D_{StrO}

³¹ Hohlraumgehalt in der eingebauten Schicht

Hohlraumgehalten hoffte man trotz bautechnischer Bedenken, z.B. hinsichtlich der Versprödung des Bindemittels, höhere Lärminderungen zu erzielen und die akustische Wirkung über längere Zeit erhalten zu können. Die Ergebnisse waren vielversprechend, so dass diese Mischgutkonzeption mit Hohlraumgehalten $> 22\%$ in die Neuauflage des Merkblatts für offenporige Asphaltdeckschichten im Jahre 1998 eingegangen ist [99].

Die Erfahrungen im Langzeitverhalten mit den OPA-Deckschichten der 1. und 2. Generation wurden in einem Statuspapier der Bundesanstalt für Straßenwesen im Jahr 2001 zusammengefasst. Mit einem Allgemeinen Rundschreiben des BMV wurden daraufhin die in Ansatz zu bringenden D_{StrO} -Werte für OPA im Hinblick auf die akustische Lebensdauer auf 4 bzw. 6 Jahre³² begrenzt [100]. Eine Reinigung wird ausdrücklich als „akustisch nicht erfolgversprechend“ bezeichnet, so dass nach diesen Zeiträumen „die vorhandene Deckschicht zu ersetzen“ wäre [100]. Für OPA-Deckschichten der 3. Generation [99] wurde durch das Allgemeine Rundschreiben 3/2009 in Zusammenhang mit einem neuen Statuspapier die ansetzbare akustische Lebensdauer für OPA 0/8 auf „mindestens 8 Jahre“ verlängert. Die Einschränkung der Verwendung auf „Ausnahmefälle“, wo ohne OPA Einhausungen oder Schallhindernisse in unvertretbarer Höhe nötig wären, wurde mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau 8/2004 [101] relativiert und den Entscheidungsträgern vor Ort mehr Abwägungsspielraum zugestanden.

Bis vor kurzem wurde offenporiger Asphalt in Deutschland nach den Maßgaben des Merkblatts von 1998 und den Regelungen der RLS-90 unter Berücksichtigung der ergänzenden Rundschreiben eingesetzt. Die „Regelbauweisen“ OPA 0/8 und OPA 0/11 sind in die Neuauflage der ZTV Asphalt-StB³³ eingegangen [36], weiterhin ist ein neues Merkblatt zu offenporigen Deckschichten, das auch die zweilagige Bauweise und erweiterte Hinweise zur akustischen Bemessung von offenporigen Decken enthält, derzeit in der Entstehung.

3.2.3 Zweilagiger offenporiger Asphalt

Zweilagiger offenporiger Asphalt (ZWOPA) ist eine Entwicklung, die erst aus neuerer Zeit stammt und deren Ziel es gewesen ist, die lärmindernde Wirkung und die akustische Lebensdauer deutlich zu steigern (s. auch Kap. 3.1).

Vorreiter waren in dieser Hinsicht die Niederlande, die erste Versuche im Rahmen eines groß angelegten Forschungsprojekts unter dem Namen „Twinlay“ bereits 1990 durchführten und nach guten Erfahrungen ab 1995 die Anwendung und weitere Erprobung noch intensivierten [102]. Eine ebenfalls relativ frühe Anwendung stammt aus Italien, wo ab 1996 sogenannter DDL („Double Draining Layer“) erprobt wurde. 1997 waren bereits 40 km mit zweilagigem offenporigen Asphalt versehen [103]. Dänemark zog 1999 mit drei innerstädtischen Erprobungsstrecken (mit Längen von je 100-200 m) nach, die unterschiedliche Schichtdicken und Größtkörner aufwiesen und bis heute intensiv überwacht werden [104]. Der erste Versuch in Deutschland fand 1998 auf der A 3 bei Siegburg statt, 2003 folgte eine weitere Erprobung auf ca. 700 m Länge auf der B 17 bei Augsburg [106], ab 2004 trat die Anwendung in eine intensivere, großflächigere Phase mit weiteren Versuchsstrecken beispielsweise auf der A 9 bei Garching und der A 30 bei Osnabrück.

³² 4 Jahre für OPA 0/11 auf einbahnigen Straßen, 6 Jahre für OPA 0/11 auf Autobahnen, 6 Jahre für OPA 0/8 auf Autobahnen und einbahnigen Straßen

³³ neue Bezeichnungen PA 8 und PA 11 (statt OPA 0/8 und OPA 0/11)

Auf der A 30 wurde auch erstmals die Kompaktbauweise eingesetzt, bei der beide Schichten mit einem Fertiger „heiß auf heiß“ hergestellt werden. Erstmals erprobt wurde diese Vorgehensweise bei ZWOPA testweise im Rotterdamer Hafen im Jahr 2000 [105]. 2005 wurde ZWOPA in Ingolstadt erstmals in Deutschland auch unter innerstädtischen Bedingungen eingesetzt [106].

3.3 Stand der Technik

3.3.1 Erfahrungen mit der Lärminderung/Akustik

Die lärmindernde Wirkung von offenporigen Asphalten wird meist mit Hilfe der Angabe von Schalldruckpegelunterschieden in dB(A) quantifiziert. Allerdings muss dieser reine Zahlenwert stets unter Beachtung des Mess- und/oder Rechenverfahrens und des zugrunde liegenden Bezugsbelags kritisch beurteilt werden.

Die am häufigsten verwendeten Verfahren zur Messung des Pegelunterschieds im Fernfeld sind die Statistische Vorbeifahrtmessung (SPB-Methode³⁴) und die Kontrollierte Vorbeifahrtmessung (CPB-Methode³⁵). Für Nahfeldmessungen kommt typischerweise die Anhängerermessmethode (CPX³⁶) zur Anwendung.

Der Unterschied besteht darin, dass bei Nahfeldmessungen die Schallabsorption und -dämpfung auf dem Ausbreitungsweg im Gegensatz zu Fernfeldmessungen im gemessenen Pegel nicht enthalten sind. Weiterhin wird durch Nahfeldmessungen erreicht, bei der Bestimmung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs das „unerwünschte“ Antriebsgeräusch vernachlässigen zu können. Der statistische Zusammenhang zwischen SPB- und CPX-Pegeln ist generell stark von den Nebenbedingungen abhängig. Umrechnungsbeziehungen existieren daher nicht oder lediglich für bestimmte definierte Randbedingungen (z.B. Reifentypen, Fahrbahneigenschaften, Umfeldbedingungen) [107][108].

- Statistische Vorbeifahrtmethode (SPB) nach DIN ISO 11819-1 [109]: Es werden an einem Kollektiv von Fahrzeugen der maximale Schalldruckpegel und die Geschwindigkeit für jedes einzelne vorbeifahrende Fahrzeugs in einem Abstand von 7,5 m von der Fahrstreifenmitte und in 1,2 m Höhe gemessen. Die Fahrzeuge werden in Pkw, Lkw mit zwei Achsen und mehrachsige Lkw kategorisiert und für jede Fahrzeugkategorie durch Regression der jeweils gemessenen Pegel auf eine bestimmte Geschwindigkeit ein typischer Fahrzeuggeräuschpegel L_{veh} ermittelt. Mit der beschriebenen Messmethode bzw. einem näher spezifizierten Verfahren nach GESTrO-92 [110] werden auch die Korrekturwerte D_{StrO} nach [10] für verschiedene Fahrbahnoberflächen bestimmt, die im weiteren Sinne eine lärmtechnische Klassifizierung darstellen. Abweichend davon wird zum Teil länderspezifisch oder zur Umgehung von Hindernissen (z.B. Schutzplanken) die Mikrofonposition relativ zur Fahrstreifenachse variiert. Aus einem statistisch signifikanten Kollektiv an Fahrzeugen kann aus den L_{veh} -Werten mit festgelegten Annahmen über die Verkehrszusammensetzung der statistische Vorbeifahrtindex (SPBI) bestimmt werden. Dieser kann als Kennwert einer Straßenoberfläche zum Vergleich beispielsweise mit einer Referenzdeckschicht aufgefasst werden.

³⁴ Statistical Pass-By Methode

³⁵ Controlled Pass-By Methode

³⁶ Close-Proximity-Methode

- Kontrollierte Vorbeifahrtmethode (CPB): In Abwandlung der SPB-Methode wird in diesem Fall kein statistisches Kollektiv ausgewertet, sondern eine definierte Anzahl „kontrollierter“ Vorbeifahrten festgelegter Fahrzeugtypen, Geschwindigkeiten (und ggf. Reifentypen) gemessen.

Anstatt einer Vorbeifahrtmessung kann in beiden Fällen auch eine Vorbeirollmessung mit ausgekuppelten Fahrzeugen durchgeführt werden, um den Einfluss des Antriebsgeräuschs auf den Gesamtpegel zu minimieren.

- Anhängermessmethode (CPX)³⁷ (z.B. nach [19]): Gemessen wird das Abrollgeräusch eines Reifens auf der Fahrbahn in geringer Entfernung vom Reifen selbst. Um Antriebsgeräusche auszuschalten, wird die Messung an einem mitgeführten Anhänger durchgeführt. Durch schallabsorbierende Auskleidung des Raums um Reifen und Messmikrofone werden externe Störgeräusche (Antrieb des Zugfahrzeugs, Strömungsgeräusche etc.) weitgehend ausgeschaltet. Die prinzipielle Messmethode ist weit verbreitet. Detailfragen des Messaufbaus wie der Aufbau der Anhänger, Mikrofonpositionen, Radlasten und Reifentypen sind noch nicht endgültig normiert und unterscheiden sich daher zum Teil deutlich, was die Vergleichbarkeit von Ergebnissen unterschiedlicher Untersuchungen erschwert.

Die Verwendung von Referenzdeckschichten als Bezugsgröße für erzielte Pegelminderungen stellt sich in verschiedenen Untersuchungen (und Ländern) relativ uneinheitlich dar (s. auch Anhang A). Dennoch existieren zum einen, wenn auch wenig detaillierte, Festlegungen von Bezugsdeckschichten (z.B. DIN ISO 11819-1³⁸ [109], ISO 10844 [111]), zum anderen wird auf europäischer Ebene eine Harmonisierung dieser wichtigen Bezugsgröße vorangetrieben. Im EU-Projekt HARMONOISE wird eine virtuelle Oberfläche als Referenz benannt, die aus dem Durchschnitt von Messwerten für Asphaltbeton 0/11 und SMA 0/11 abgeleitet wird [112].

Häufig werden in der Praxis jedoch lokal angrenzende Teilstrecken mit einem Vergleichsbelag als Referenz herangezogen, die zwar nicht den Festlegungen von Referenzdeckschichten entsprechen, aber den örtlichen Begebenheiten (Randnutzung, Schallausbreitung usw.) besser Rechnung tragen können.

In zahlreichen Untersuchungen ist die lärmindernde Wirkung (ausgedrückt in Pegeldifferenzen) von offenporigen Asphaltdecken untersucht worden. Anhang A zeigt eine Übersicht von nationalen und internationalen Erfahrungen. Folgendes kann man zusammenfassend festhalten:

- Mit standardmäßig, weit verbreitet verwendeten einlagigen Ausführungen mit einem Größtkorn zwischen 8 und 11 mm und einer Schichtdicke von ungefähr 4 cm lassen sich im Neubauzustand Pegelminderungen gegenüber dichten Asphaltdecken von 3-6 dB(A)³⁹ (s. Anhang A) erzielen. Vereinzelt wird vor allem bei offenporigen Belägen neuerer Bauart (mit

³⁷ Bislang nicht normiert; Normierung ist in Arbeit (vorauss. DIN EN ISO 11819-2)

³⁸ Festlegung auf eine „glatt –texturierte Asphaltbetondecke mit einem maximalen Korndurchmesser von 11 bis 16 mm“. Hohlraumgehalt und Schallabsorptionsgrad sollen dabei bestimmte Maximalwerte aus ISO 10844 nicht überschreiten. Die Decke soll mindestens ein Jahr alt sein und eine Texturtiefe zwischen 0,5 und 1,0 mm aufweisen.

³⁹ Ausgedrückt als statistischer Vorbeifahrtpegel (SPB bzw. SPBI) für ein „übliches“ Fahrzeugkollektiv mit überwiegendem Pkw-Anteil

sehr hohem Hohlraumgehalt > 22 %) auch von höheren Minderungspotenzialen bis zu 8 dB(A) berichtet [94][113].

- Höhere Schichtdicken vergrößern, kleinere Schichtdicken verringern die erzielbaren Pegelminderungen (z.B. [19][104][114]). Begründet liegt dies im vergrößerten Schallabsorptionsvermögen durch ein vergrößertes Hohlraumvolumen und der Verschiebung der Absorptionsmaxima hin zu den im Straßenverkehr auftretenden relevanten Frequenzbereichen (breitbandigere Absorption).
- Durch zweilagige Ausführungen lässt sich die bautechnisch begrenzte Schichtdicke für einlagigen Einbau weiter steigern, was die (durch Steigerung der Schichtdicke) erwähnten Effekte und entsprechend erhöhte Pegelminderungen (5-8 dB(A)) zur Folge hat (z.B. [19][94][104]).
- Mit zunehmendem Hohlraumgehalt [Vol.-%] einer OPA-Schicht vergrößert sich das Schallabsorptionsvermögen, das Pegelminderungspotential nimmt zu (z.B. [94]). Diese Erkenntnis führte in der Vergangenheit zu einer stetigen Steigerung des Hohlraumgehalts bis an die bautechnisch vertretbare Grenze (s. auch Kap. 3.2.2).
- OPA-Decken mit größerem Größtkorn an der Fahrbahnoberfläche (> 11 mm) führen zu vergleichsweise geringeren Pegelminderungen im Neuzustand; die Wahl eines kleineren Größtkorns (z.B. 5 mm) führt hingegen in der Regel zu höheren Pegelminderungen im Neubauzustand. Begründet liegt dies in der unterschiedlich starken Schwingungsanregung des Reifens durch die Textur, die in den für die Lärmentstehung entscheidenden Wellenlängenbereichen wesentlich vom Größtkorn bestimmt wird (z.B. [65][116][117]).
- Bei höheren Geschwindigkeiten (80-100 km/h) ergeben sich durch offenporige Asphalte größere Pegelminderungspotentiale als bei niedrigeren „Stadtgeschwindigkeiten“ (50 km/h). Es lassen sich aber durchaus schon bei stadttypischen Geschwindigkeiten (vor allem mit zweilagigen Ausführungen) beachtliche Pegelminderungen erreichen (z.B. [19][104][115]). Als Begründung lässt sich anführen, dass das Rollgeräusch erst bei höheren Geschwindigkeiten dominant wird (s. auch Kap. 2.2), so dass die erreichbare Pegelminderung bei niedrigen Geschwindigkeiten geringer ausfallen muss. Von anderen Autoren wird zusätzlich angeführt, dass der Air-Pumping-Effekt, dem der OPA entgegenwirkt, erst bei höheren Geschwindigkeiten maßgebenden Einfluss auf das Gesamtgeräusch hat [66].
- Aus zahlreichen Messungen und Untersuchungen zeigt sich, dass bei Lkw die erzielbare Pegelminderung (bezogen auf eine Vorbeifahrtmessung) schwächer ausgeprägt ist als bei Pkw [65][115]. Erklären lässt sich das Phänomen dadurch, dass bei Lkw (trotz Fortschritten in der Typprüfung) das Antriebsgeräusch (in allen Geschwindigkeitsbereichen) nach wie vor eine wesentlich wichtigere Rolle spielt als beim Pkw; die Rollgeräuschminderung durch OPA schlägt demnach beim Lkw in der Gesamtpegelminderung weniger zu Buche. Es existieren jedoch auch einzelne Untersuchungen mit gegenteiligem Ergebnis [114][119]. So ergeben sich in einer reinen Vorbeirollmessung (ohne Antriebsgeräusch) sogar höhere Rollgeräuschminderungen beim Lkw gegenüber dem Pkw, was allerdings die These der Dominanz des Antriebsgeräuschs beim Lkw stützt. Bei OPA-Decken mit größerem Größtkorn können ebenfalls größere Pegelminderungen beim Lkw gegenüber dem Pkw festgestellt werden [114], was auf unterschiedlich starke Schwingungsanregung der Reifen zurückzuführen sein dürfte. Durch die sehr unterschiedlichen Einflüsse bei der Geräuschentstehung zwischen Lkw und Pkw (z.B.

Verhältnis Antriebs-/Rollgeräusch, Radlast, Reifenprofil, Anzahl der Reifen, Reifenaufstandsfläche) lassen sich jedoch noch keine gesicherten Aussagen zu den Ursachen der unterschiedlich starken Pegelminderungen treffen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die erzielbaren Pegeldifferenzen von OPA im Vergleich mit einer herkömmlichen, geschlossenen Deckschicht durch unterschiedliche Faktoren (Hohlraumgehalt und -struktur, Schichtdicke bzw. mehrlagiger Aufbau, Größtkorn, Verkehrszusammensetzung, Geschwindigkeiten, Fahrmodi, Bereifung) bestimmt werden.

Die lärmindernde Wirkung von offenporigen Asphalten kann allein durch Schalldruckpegelunterschiede jedoch nicht umfassend beschrieben werden. Untersuchungen zeigen, dass die erreichten Verbesserungen subjektiv höher bewertet werden als sie objektiv messbar sind [120] bzw. der von offenporigen Asphalten emittierte Lärm im Vergleich zu herkömmlichen, geschlossenen Decken bei gleichen (Immissions-)pegeln als weniger „störend“ eingeschätzt wird [121].

Neben psychoakustischen Aspekten, die an dieser Stelle nicht näher behandelt werden sollen, spielt vor allem das im Vergleich zu dichten Decken unterschiedliche Frequenzspektrum des von OPA emittierten Lärms hierbei eine wesentliche Rolle. Ursachen hierfür sind die sich ändernden Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs und die schallabsorbierenden Eigenschaften des offenporigen Asphalts.

Frequenzspektrum von Straßenverkehrslärm

Emissionen aus Straßenverkehrslärm an herkömmlichen geschlossenen Decken (z.B. Splittmastixasphalt oder Asphaltbeton mit 8 oder 11 mm Größtkorn) besitzen bestimmte „typische“ Frequenzspektren, die im wesentlichen durch die in Kapitel 2.3 beschriebenen Entstehungsmechanismen von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen bestimmt werden. Unterschiede im Frequenzspektrum im realen Verkehrsablauf ergeben sich vor allem durch die Fahrzeugart (Pkw/Lkw) mitsamt dessen Bereifung und hinsichtlich gefahrener Geschwindigkeiten. Von verschiedenen Autoren werden bei SPB-Messungen für Pkw typische Peaks zwischen 1000 und 1250 Hz⁴⁰ und für Lkw zwischen 630 und 800 Hz angegeben (z.B. [19][104][122], s. Abbildung 5). Wie typisch diese Charakteristik ist, zeigt sich auch daran, dass sogar standardisierte Verkehrslärmspektren herausgegeben werden⁴¹ (s. Abbildung 6).

⁴⁰ Pegel für die Mittenfrequenzen des Terzbandes

⁴¹ DIN EN 1793-3 Standardisiertes Verkehrslärmspektrum [123]

Gemessene (typische) Frequenzspektren für Lkw und Pkw [19]

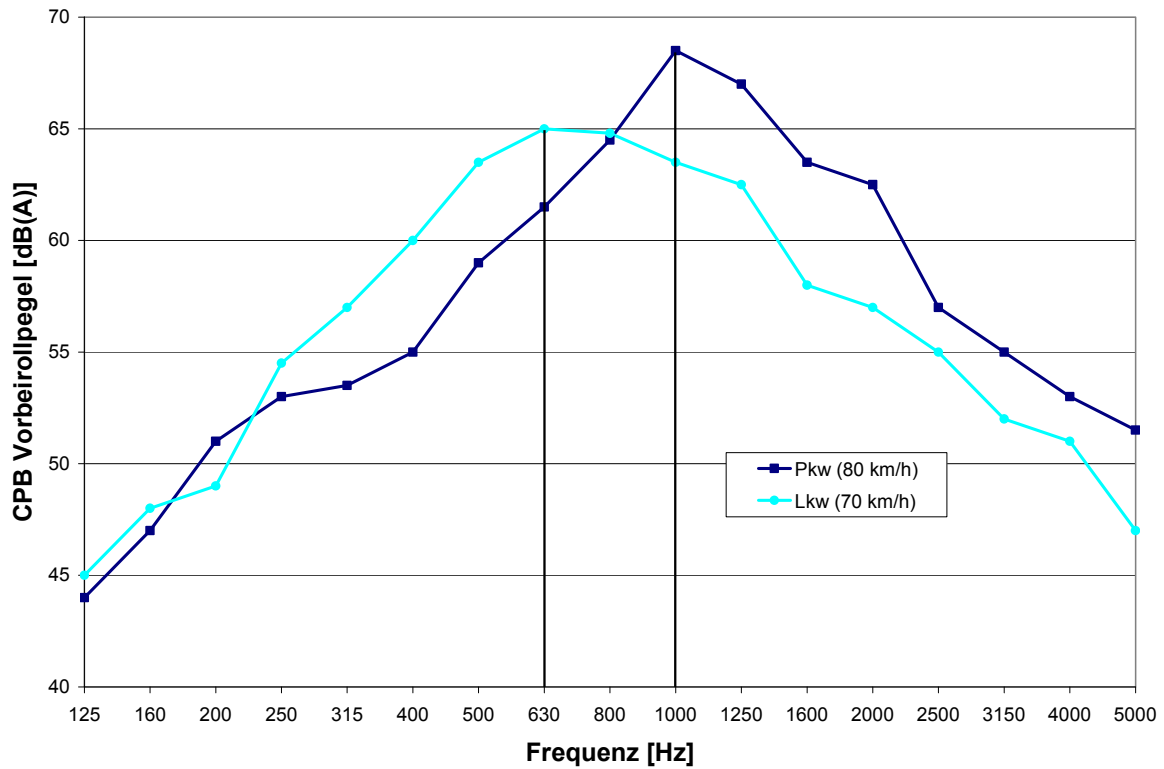


Abbildung 5: Typische Frequenzspektren des Vorbeirollpegels für Lkw und Pkw [19]

Standardisiertes Verkehrslärmspektrum nach DIN EN 1793-3 [123]

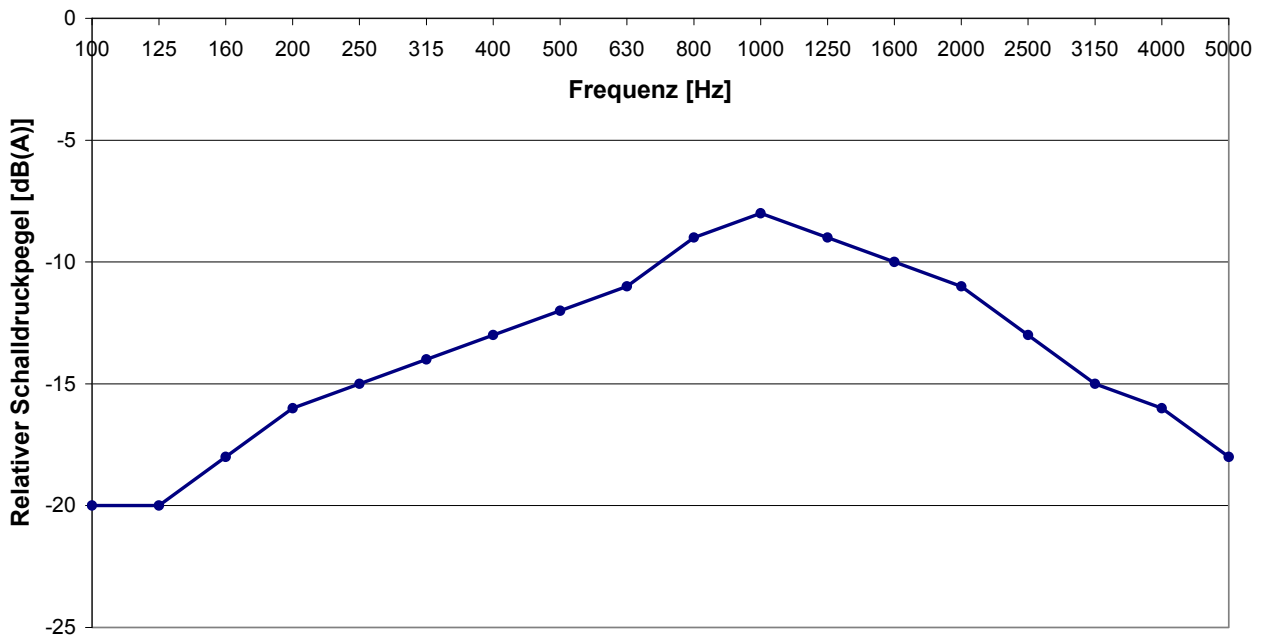


Abbildung 6: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum nach DIN EN 1793-3 [123]

Schallabsorptionsgrad von offenporigen Asphaltdeckschichten

Neben der Verhinderung der Anregung von Geräuschen durch die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche besteht vor allem durch Schallabsorption ein hohes Geräuschminderungspotential. Das Schallabsorptionsverhalten basiert auf folgenden Eigenschaften der offenporigen Asphaltdeckschicht (s. auch Kap. 6.2):

- hohe Porosität σ bzw. zugänglicher Hohlraumgehalt
- Strömungswiderstand Ξ ,
- Schichtdicke d ,
- Strukturfaktor κ bzw. Tortuosität τ .

Das Schallabsorptionsverhalten von offenporigen Asphaltdeckschichten ist jedoch nicht sehr breitbandig, sondern weist vielmehr einen (bzw. mehrere) Peaks im Frequenzspektrum auf. Die Lage dieser Maxima des Schallabsorptionsgrads $\alpha(f)$ basiert im Wesentlichen auf der Schichtdicke d des offenporigen Asphaltaufbaus (s. auch Kap. 6.2.1 und Abbildung 7). Dadurch besteht die Möglichkeit, durch Abgleich des vorgefundenen Emissionsspektrums (auf geschlossenen) Deckschichten die Schichtdicke derart zu variieren, dass die Absorptionsmaxima in Frequenzbereichen mit hohen Emissionspegeln zu liegen kommen (z.B. durch zweilagigen OPA). Durch die Erhöhung der Schichtdicke kann auch erreicht werden, dass mehrere Absorptionsmaxima im maßgebenden Frequenzspektrum liegen, die Absorption somit breitbandiger wird und auch die für Lkw-Verkehr typischen Frequenzbereiche stärker absorbiert werden.

Einfluss der Schichtdicke auf den Schallabsorptionsgrad (nach [124])

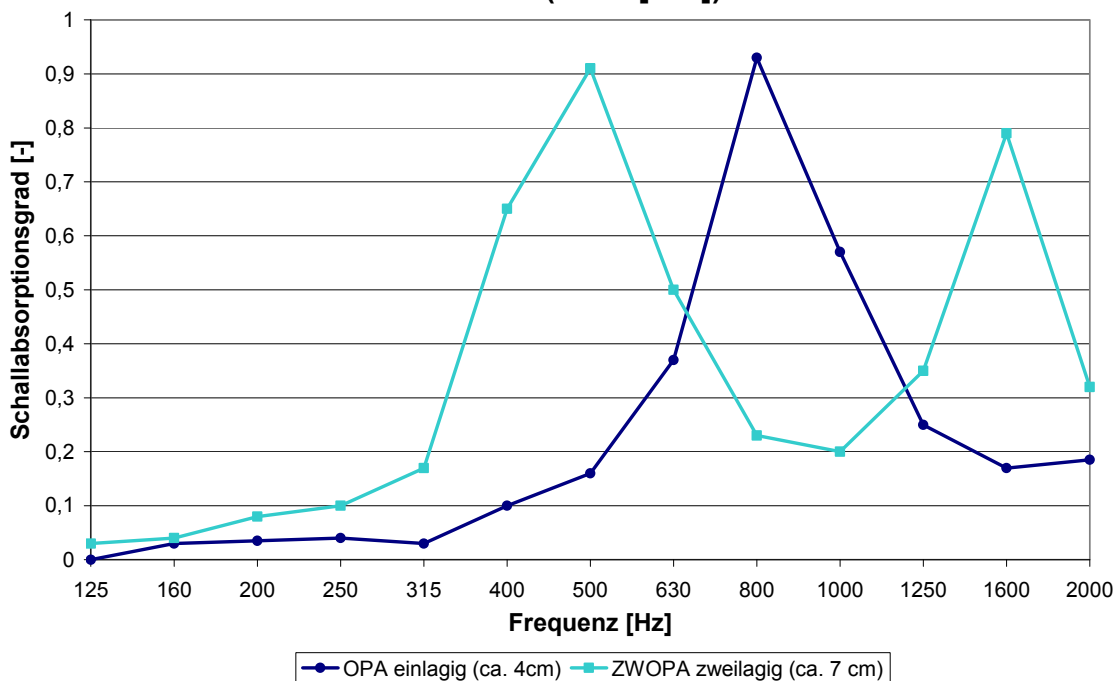


Abbildung 7: Einfluss der Schichtdicke auf die Lage der Absorptionsmaxima im Frequenzspektrum (nach [124])

Einfache Zusammenhänge zwischen Fahrbahneigenschaften und Lärmpegel aus der Literatur

Verschiedentlich wird versucht, einfache Zusammenhänge zwischen der zu erzielenden Pegelminderung und maßgebenden Eigenschaften von OPA bzw. Straßenoberflächen im Allgemeinen herzustellen, die jedoch die komplizierteren Zusammenhänge nur näherungsweise und tendenziell darstellen können. So wird in [125] folgender Zusammenhang für OPA angegeben, der im Vergleich mit Messdaten trotz seiner Einfachheit erstaunlicherweise (hoch) signifikant ist:

$$\Delta L = 0,5 \cdot \text{Schichtdicke}[mm] \cdot \text{Hohlraumgehalt}[-] \quad (3.1)$$

Nach [126] kann die Pegelminderung durch (einlagige) offenporige Asphaltdeckschichten mit folgender Näherung bestimmt werden:

$$\Delta L = -0,7 + 136 \cdot \frac{\text{Hohlraumgehalt}[\%]}{\text{Größtkorndurchmesser}[mm] \cdot \text{Größtkornanteil}[\%]} \quad (3.2)$$

Verlust der lärmindernden Wirkung von OPA

Die lärmindernde Wirkung von offenporigen Asphaltdeckschichten im Neubauzustand geht mit zunehmender Liegedauer nach und nach verloren (s. Anhang A, Abbildung 8 sowie Kap. 3.2).

Dieser Effekt wird mit unterschiedlichen Ursachen in Verbindung gebracht. Zum einen führt die Verstopfung der offenen Poren durch Verschmutzungen zu Veränderungen im Schallabsorptionsvermögen (s. Kap. 4.1.2 und Kap. 7); weiterhin können aerodynamische Schallentstehungsmechanismen nicht mehr so effektiv unterdrückt werden wie im Neuzustand. Zum anderen werden Veränderungen an der Textur und der Ebenheit der Fahrbahnoberfläche, die durch eine besondere Anfälligkeit des OPA für Kornausbrüche zusätzlich begünstigt werden, für die Zunahme des Emissionspegels mit steigender Liegedauer der OPA-Decke mitverantwortlich gemacht [112][127]. Auch Verformungen bzw. Kornumlagerungen im Korngerüst können zur Verminderung des Hohlraumgehalts und damit der lärmindernden Wirkung führen.

Um die Ursachen im Einzelfall feststellen zu können, sind Kombinationen verschiedener Messmethoden und Erhebungen verschiedener Parameter notwendig. Der Verlust der lärmindernden Wirkung durch Schmutzeintrag lässt sich mit Hilfe von Messungen des Schallabsorptionsgrads und des Strömungswiderstands in situ nachweisen; eine ergänzende Texturmessung bringt Aufschluss darüber, inwieweit die Zerstörung bzw. Veränderung der Oberflächenstruktur zur Erhöhung des Emissionspegels beiträgt. Die Zielsetzung dieser Arbeit ist es, allein den Einfluss der Verschmutzung auf den akustischen Wirkungsverlust (hinsichtlich der Schallabsorption) zu untersuchen, um ihn von Texturänderungen als Ursache abgrenzen zu können (s. Kap. 7).

Erfahrungen an verschiedenen Strecken unterschiedlichster Charakteristik (Schichtdicke, Größtkorn, Geschwindigkeiten, Verkehrszusammensetzung usw.) zeigen einen Anstieg der (Vorbeifahrt-)Pegel, der von vielen Autoren mit ungefähr 0,5 dB(A)/Jahr angegeben wird [127][128]. Andere Autoren geben davon deutlich abweichende Größenordnungen an. Die Angaben reichen von ca. 0,8 dB(A)/Jahr [129] bis zu ca. 2 dB(A)/Jahr in älteren Untersuchungen [130]. Neuere Untersuchungen weisen dagegen lediglich jährliche Pegelzunahmen von 0,2 dB(A) für einlagige und 0,33 dB(A) für zweilagige Bauweisen aus. Bei geringen Geschwindigkeiten wie in Innerortssituationen können die Pegelsteigerungen mit 0,7 bis 1 dB(A)/Jahr vergleichsweise höher

liegen (z.B. [104]), was mit der stärkeren Verschmutzung und der geringeren Selbstreinigungswirkung bei niedrigeren Geschwindigkeiten begründet werden kann.

Diese Durchschnittswerte dürfen allerdings nicht in der Weise interpretiert werden, dass der tatsächliche Verlauf der Abnahme der lärmindernden Wirkung über die Zeit zwangsläufig linear sein müsste. Vielmehr treten in unterschiedlichen Untersuchungen sprunghafte Verläufe auf (mit starken Pegelzunahmen zu Beginn oder erst nach längerer Liegedauer) [68][69]. In [131] wird ein starker Pegelanstieg zu Anfang der Nutzungsdauer angenommen, während sich der Pegelanstieg in späteren Jahren deutlich abflacht (logarithmischer Verlauf, s. auch Abbildung 8). Die sehr unterschiedlichen Verläufe in verschiedenen Untersuchungen legen nahe, dass die Pegelzunahmen durch unterschiedliche Einflussparameter zu Stande kommen müssen.

Andere Autoren stellen ganz im Gegensatz dazu keinen Verlust der lärmindernden Wirkung fest. Erfahrungen aus der Schweiz⁴² zeigen demnach, dass der OPA „seine Lärmschutzleistung auch nach 9 Jahren selbst unter starkem Verkehr nicht verliert“ und im Gegenteil damit „seine akustische Lebensdauer [...] durchaus seiner technischen, die bei 12 bis 15 Jahren liegt, [entspricht]“ [81][132].

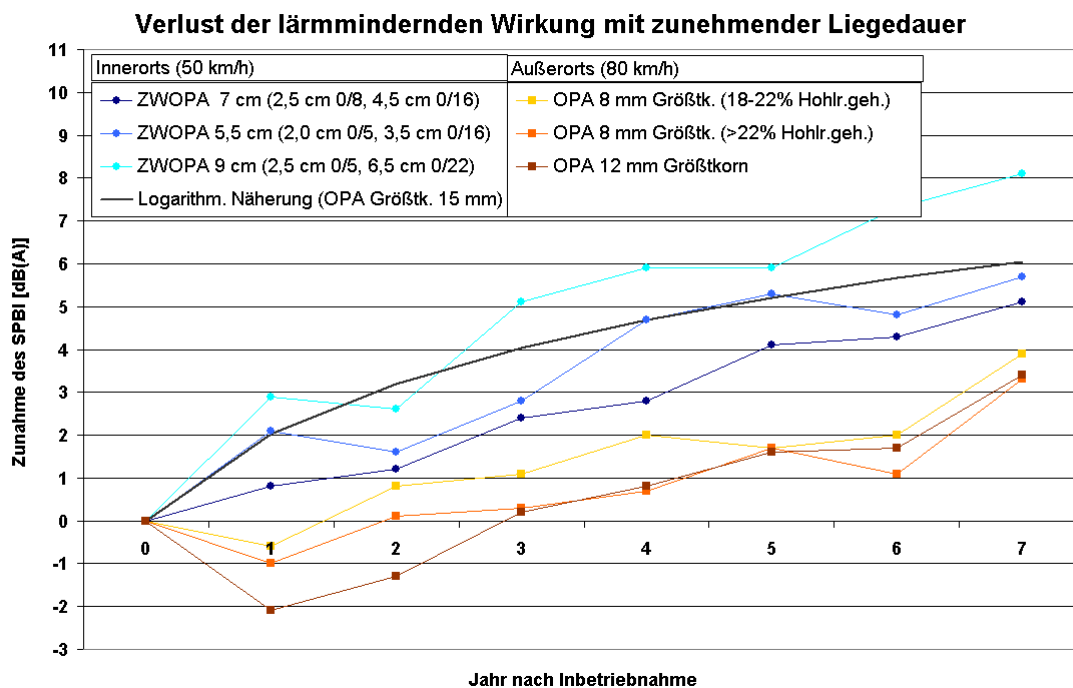


Abbildung 8: Verlust der lärmindernden Wirkung mit zunehmender Liegedauer anhand von Beispielen innerorts [104], außerorts [72] und einer Näherungsfunktion für 50 km/h [131]

Es sind verschiedentlich Untersuchungen zur Veränderung von Schallabsorptionsgraden auf offenporigen Asphaltdecken im Betrieb mit zunehmender Liegedauer angestellt worden [104][133][134]. Die nachlassende Schallabsorption kann dabei zum einen indirekt durch einen Anstieg der Pegel in Frequenzbereichen, in denen das Absorptionsmaximum der jeweiligen OPA-

⁴² Referenzen zu diesen Angaben sind Strecken in der Schweiz bei Montreux (N9, Einbau 1991) und Morges (N1, Einbau 1993)

Deckschicht im Neuzustand liegt, beobachtet werden⁴³. Zum anderen ist durch die direkte Messung von Schallabsorptionsgraden an OPA-Deckschichten bzw. Bohrkernen deren Abnahme insbesondere in den relevanten Frequenzbereichen festzustellen [117][133]. Weiterhin tritt eine Frequenzverschiebung der Absorptionsmaxima in Bereiche außerhalb des im Verkehrslärmspektrum auftretenden Pegelmaximums auf, wobei sowohl Verschiebungen zu höheren wie zu tieferen Frequenzen auftreten können [134] (s. auch Kap. 7.1).

3.3.2 Straßenbautechnische Anforderungen und Besonderheiten

Offenporige Asphaltbauweisen unterscheiden sich aufgrund des wesentlich höheren Hohlraumgehalts bautechnisch deutlich von herkömmlichen (geschlossenen) Bauweisen. Der hohe Hohlraumgehalt bedingt hohe Anforderungen an Material und Einbau und zeigt Auswirkungen auf Gebrauchseigenschaften und das Langzeitverhalten offenporiger Decken. Im einzelnen werden im Folgenden die zu beachtenden Besonderheiten hinsichtlich Gebrauchsverhalten, Schadensmerkmalen und sich daraus ergebenden Materialanforderungen dargestellt.

3.3.2.1 Langzeitverhalten, Schadensfälle

OPA ist mit seinen Hohlraumgehalten über 20 % (in gewollter Weise) im Gegensatz zu dichten Decken zugänglich für Luft und Wasser. Insbesondere das eingesetzte Bitumen ist damit nicht nur an der Oberfläche sondern auch innerhalb der Schicht Alterungsprozessen ausgesetzt, was zur Versprödung und zum Nachlassen der Klebekraft des Bindemittels führt. Überdies kann es durch den Zutritt von Wasser zum Ablösen des Bindemittelfilms⁴⁴ (s. auch Kap. 3.3.2.2) von den Mineralstoffen kommen, wodurch wiederum die Verklebung und der Zusammenhalt des OPA-Korngerüsts gefährdet ist. Dies ist deshalb besonders kritisch, da die Kornstruktur des OPA nur auf punktförmigen Verklebungen der einzelnen Gesteinskörner beruht, so dass es beim Versagen des Bitumenmörtels zu Kornausbrüchen⁴⁵ und dadurch unmittelbar zu größeren Schäden mit Auswirkungen auf das Gebrauchsverhalten kommen kann. Die Schädigung durch Kornausbrüche wirkt sich nicht nur negativ auf die akustischen Eigenschaften aus (s. auch Kap. 3.3.1), sondern ist vielmehr der häufigste Grund für das Ende der bautechnischen Lebensdauer von offenporigen Deckschichten [58][135][136]. Insbesondere in den Wintermonaten, wenn sich das Bindemittel durch die niedrigen Temperaturen spröder verhält, kann es bei Vorschädigungen zu plötzlichen Versagensfällen bereits infolge geringer Lasteinwirkungen oder Frost-Tau-Wechsel kommen [137].

Die typischen Mechanismen, die dabei zum Versagen des kompletten OPA-Gerüsts führen können, sind Kohäsionsverluste innerhalb der Bindemittelmatrix und vor allem altersabhängige Adhäsionsverluste zwischen Mörtel und Gestein durch Versprödung, geringe Affinitäten und Wasserzutritt [138].

Langjährige Erfahrungen aus verschiedenen Ländern zeigen, dass mit technischen Lebensdauern von OPA (je nach länderspezifischen Anforderungen an das Material, Verkehrsbelastung und

⁴³ Dies lässt sich jedoch nicht eindeutig auf ein verringertes Schallabsorptionsverhalten zurückführen, sondern kann auch andere Ursachen haben (z.B. Textur, Oberflächenschäden) [104]

⁴⁴ engl.: Stripping

⁴⁵ engl.: Ravelling

Klimasituation) um die 10 Jahre gerechnet werden kann; die Angaben für europäische Mischgutzusammensetzungen reichen von 6 bis 12 Jahren [135][137], für (amerikanisches) OGFC-Mischgut können ungefähr 8 bis 11 Jahre, in sehr günstigen Fällen bis zu 15 Jahre angesetzt werden [58]. Für herkömmliche geschlossene Decken (z.B. Splittmastixasphalt) kann unter vergleichbaren Bedingungen eine Lebensdauer von ca. 15-20 Jahren angesetzt werden.

Die Versprödung des Bindemittels mit zunehmender Liegedauer kann prüftechnisch beispielsweise anhand der Parameter Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel nachgewiesen werden. Wie stark die zusätzliche Alterung des Bitumens durch den Zutritt von Wasser und Luft ist, zeigt der Vergleich von Erweichungspunkten von Ausbauproben aus übereinanderliegenden SAMI- und OPA-Schichten aus demselben Bindemittel. In der OPA-Schicht, die in erhöhtem Maße einer Alterung unterliegt, liegen die Erweichungspunkte zwischen ca. 3 und 10 °C höher als in der SAMI-Schicht [139]. In [94] wird von einem Anstieg von 1,5 bis 2 °C pro Jahr ausgegangen. Andere Untersuchungen finden Hinweise auf die Verhärtung/Versprödung des Bitumens anhand der Nadelpenetration am zurückgewonnenen Bindemittel. OPA zeigen nach einer Liegedauer zwischen 6 und 12 Jahren Restpenetrationen von 10-20 % des ursprünglichen Wertes, Splittmastixasphalte hingegen noch 30 bis 50 % [140]. In [141] wird nach einer Liegedauer von 10 Jahren unabhängig von der Bindemittelsorte und für Bindemittelgehalte von 4,5 und 5,5 % eine (Rest)penetration von nur noch 20 1/10mm bestimmt.

Polymermodifizierte Bitumen haben höhere Plastizitätsspannen und sind damit weniger anfällig für Kornausbrüche bei Kälte. Sie können zudem Alterungsphänomene wie zunehmende Versprödungen besser abpuffern und werden gerade deshalb heutzutage für offenporigen Asphalt standardmäßig angewendet. Auch gummimodifizierte Bitumen mit ihren günstigeren Alterungseigenschaften kommen zum Einsatz.

Um den Auswirkungen der Alterung begegnen zu können, ist es weiterhin zielführend, dickere Bindemittelfilmdicken im OPA zu erzeugen, um ein gewisses Vorhaltemaß für versprödendes Bindemittel zu erreichen. Höhere Filmdicken können durch höhere Bindemittelgehalte erzielt werden. Diese wiederum bergen jedoch die Gefahr des Bindemittelablaufs und der Verringerung des Hohlraumgehalts bereits beim Einbau. Zur Verhinderung des Bindemittelablaufs während des Transports ist die Zugabe von Fasern unbedingt notwendig.

Der Widerstand gegen Kornverlust wird üblicherweise durch Abrasionsversuche (sog. Cantabro-Verlust) im Los-Angeles-Prüfgerät untersucht [142], das üblicherweise zur Prüfung des Widerstands von Gesteinskörnungen gegen Zertrümmerung verwendet wird [143]. Mit einem OPA-Prüfkörper (z.B. Marshall-Probekörper oder Bohrkern) werden in der Los-Angeles-Trommel bei 30-33 Umdrehungen pro Minute insgesamt 300 Umdrehungen (ohne Metallkugeln) durchgeführt und danach der prozentuale Gewichtsverlust bestimmt.

In verschiedenen Untersuchungen werden mittels des Cantabro-Versuchs folgende qualitative Zusammenhänge ermittelt bzw. belegt (z.B. [74][144][145]). Höhere Bindemittelgehalte, höhere Verdichtungsgrade bzw. größere Verdichtungsarbeit, niedrigere Hohlraumgehalte und die Verwendung von weicheren Bitumen⁴⁶ sowie (polymer)modifizierten Bitumen führen zu geringerer Kornausbruchneigung in OPA-Decken. Der Cantabro-Versuch ist sehr temperatursensitiv, bei -10 °C ist der Kornverlust zwei bis fünf mal höher als bei 25 °C, was auch die erhöhte Gefahr von

⁴⁶ Zur Erhöhung der Standfestigkeit sind im Gegensatz dazu jedoch härtere Bitumensorten angeraten

Schäden an OPA-Decken in den Wintermonaten anschaulich belegt [146]. OPA-Proben, die nach einer gewissen Liegezeit mittels Kernbohrung in situ gewonnen werden oder labormäßig gealtert werden, zeigen im Cantabro-Versuch erwartungsgemäß höhere Kornverlustraten als ungealterte Vergleichsproben. Durch gezielte Wasserlagerung vor der Versuchsdurchführung ist der beobachtete Kornausbruch ebenfalls stärker (s. auch Kap 3.3.2.2) [147][148].

3.3.2.2 Haftverhalten und Affinität zwischen Gestein und Bindemittel

Eine hohe Klebekraft bzw. Affinität zwischen dem verwendeten Bitumen und den Gesteinsorten ist besonders bei OPA-Bauweisen aufgrund der punktuellen Verbindungen im offenporigen Korngerüst ein sehr wichtiger Parameter. Geringe Affinitäten begünstigen unter Wasserzutritt Adhäsionsverluste zwischen Bindemittel und Zuschlagstoffe, was zu Kornausbrüchen und in der Folge zum kompletten Versagen von OPA-Decken führen kann (s. auch Kap. 3.3.2.1).

Geprüft werden kann das Haftverhalten beispielweise durch das Lagern von bindemittelumhülltem Splitt in Wasser bei gleichzeitigem Rotieren in einer Flasche, wodurch es zusätzlich zu einem mechanischen Abrasionsprozess des Bindemittels vom Gestein kommt (Rolling-Bottle-Test nach [149]). Häufig wird international der Spaltzugversuch (indirekter Zugversuch [150]) eingesetzt, anhand dessen im Vergleich von trocken und wassergelagerten Probekörpern eine Beurteilung der Affinität bzw. der Wasserempfindlichkeit der Bitumen-Gestein-Kombination möglich ist [151]. Der maßgebende Parameter für die Wasserempfindlichkeit bzw. das Haftverhalten ist das Verhältnis zwischen den Spaltzugfestigkeiten ($ITSR^{47}$) von in Wasser und trocken gelagerten Probekörpern in %. Zur verschärften Prüfung des Haftverhaltens können zusätzliche Frost-Tau-Wechsel von wassergesättigten Probekörpern zum Einsatz kommen [152]. Durch den Spaltzugversuch lassen sich auch weitere Eigenschaften wie Festigkeit, Kälteverhalten, Alterung und Verdichtungsgrad ansprechen [146].

Durch (Polymer-)Modifizierungen des Bitumens, höhere Bindemittelgehalte, den bevorzugten Einsatz basischer statt saurer Gesteine (z.B. Gabbro) und die Zugabe von Haftvermittler (z.B. Kalkhydrat) können höhere Affinitäten zwischen Gestein und Bitumen erzielt werden [98]. Die Affinität beruht nicht zuletzt auf der jeweiligen Kombination von Gestein und Bindemittel und deren chemischen, petrologischen und physikalischen Eigenschaften [145].

Der Haftproblematik zuzuordnen ist weiterhin der Bindemittelablauf, der im OPA vor allem aufgrund der verwendeten höheren Bindemittelgehalte verstärkt auftreten kann. Durch den Einsatz von hochwertigen (polymermodifizierten) Bindemitteln und vor allem Fasern als Bindemittelträger können dennoch die für OPA notwendigen höheren Bindemittelfilmdicken in der hergestellten Schicht sichergestellt werden [145][148].

Die Haftung zwischen Gestein und Bitumen ist bedingt durch die offenporige Struktur neben der Verwitterung durch Luft und Wasser auch verstärkt chemischen Angriffen (z.B. durch Kraftstoffe, die als Lösungsmittel wirken) ausgesetzt [137][153].

⁴⁷ nach [151]: $ITSR$ (Indirect Tensile Strength Ratio) = ITS (wassergelagert) / ITS (trocken gelagert)

3.3.2.3 Verdichtung und Verdichtbarkeit

Die Verdichtung verdient gerade bei der Herstellung offenporiger Asphalttschichten besondere Aufmerksamkeit. Zu Beginn des Einsatzes von offenporigen Fahrbahnbelägen bestanden auf Grund des hohen Hohlraumgehalts sogar Bedenken, dass eine Nachverdichtung unter Verkehr erfolgen könnte [154]; diese Befürchtungen konnten jedoch bald zerstreut werden, da sich das Korngerüst trotz hohem Hohlraumgehalts als außerordentlich verformungsresistent herausstellen sollte.

Die Verdichtungsarbeit durch Walzen (ohne Vibration) darf einerseits nicht zu hoch sein, um keine Zertrümmerung von Mineralstoffkörnern zu verursachen. Diese Gefahr besteht besonders dadurch, dass sich die Lastabtragung der Schicht zu großen Teilen an relativ kleinen Kontaktflächen zwischen den Mineralstoffkörnern vollzieht und damit lokal sehr hohe Spannungen entstehen.

Andererseits muss die Schicht ausreichend gut verdichtet sein [36], um eine ausreichende Festigkeit und gute Gebrauchseigenschaften zu erreichen; die Erzielung eines hohen Hohlraumgehalts darf dabei keinesfalls zu Lasten des Verdichtungsgrads gehen [145].

Der Zusammenhang zwischen Verdichtung(sarbeit) und Hohlraumgehalt (Verdichtungsfunktion) ist neben der Temperatur des Mischguts beim Einbau von der Mischgutzusammensetzung (Sand- und Fülleranteile), der Mineralstoffart, der Kornform, dem Größtkorn im Mischgut, dem Bindemittelgehalt und der Bindemittelart abhängig. Aus diesem Grund ist es ratsam, vor dem Einbau einer offenporigen Asphaltdeckschicht im Rahmen von Laborprüfungen des Mischguts insbesondere aus der Verdichtungsfunktion Rückschlüsse auf die einzusetzende Verdichtungsarbeit zu ziehen [137][145][146].

An Deckschichten (der 3. OPA-Generation) mit langjähriger Liegedauer konnten trotz Erreichung eines hohen Verdichtungsgrads im Neuzustand Nachverdichtungen nachgewiesen werden⁴⁸, die an Stellen mit niedrigerem Verdichtungsgrad (im Neuzustand) verstärkt auftreten [155].

3.3.2.4 Verformungsverhalten/Spurrinnenbildung

Befürchtungen, dass offenporige Asphalttschichten aufgrund ihres hohen Hohlraumgehalts höheren Verformungen (durch Ermüdung und Verformungsvorgänge aus Last und Temperatur) ausgesetzt sein könnten, haben sich in langjährigen Erfahrungen nicht bestätigt. Im Gegenteil ist die Lastabtragung, die wie beim Splittmastixasphalt über die in sich abgestützte Matrix aus einzelnen Splittkörnern geschieht, gegen Verformungen wenig anfällig [67][72][126]. Abzulesen ist die relativ geringe Problematik auch an den wenigen Erfahrungsberichten, die zu diesem Sachverhalt vorliegen. Durch die (standardmäßige) Verwendung von polymermodifizierten Bitumensorten wird die Verformungsbeständigkeit von offenporigen Asphalttschichten zusätzlich erhöht [86].

Im Labor ist die Verformungsbeständigkeit jedoch schwierig zu prüfen, da die Versuche für Probekörper aus Mischgut mit hohem Hohlraumgehalt das Verformungsverhalten nicht korrekt ansprechen können; der einaxiale Druckschwellversuch ist ungeeignet, da der hohlraumreiche Asphalt zum seitlichen Ausweichen neigt, beim Stempel Eindringversuch tauchen Aufwölbungen

⁴⁸ Abnahme des Hohlraumgehalts und Zunahme des Verdichtungsgrads

neben der Lasteinleitungsstelle auf, wodurch die Ergebnisse nicht verwertbar sind [145]. Die Ansprache des Verformungsverhaltens durch den Spurbildungsversuch wird ebenfalls kritisch gesehen, weil durch die geringen Unterschiede im Ergebnis differenzierte Betrachtungen der Asphaltvarianten nicht möglich sind [137][145].

Anfällig für Verformungen ist offenporiger Asphalt allerdings bei niedrigen Verdichtungsgraden, wie sie im Zuge von falscher Mischgutkonzeption oder Einbaufehlern entstehen können (s. auch Kap. 3.3.2.3). So ist bei einem Verdichtungsgrad von 100 % eine um die Hälfte niedrigere Spurrinnenbildung zu erwarten als bei 97 % [155]. Auf den Einfluss des Verdichtungsgrades dürften sich auch Beobachtungen zurückführen lassen, wonach zu Beginn der Liegedauer eine relativ hohe Spurrinnenbildung (vermutlich durch Nachverdichtung) auftritt, danach aber kaum weitere Verformungen entstehen [63].

3.3.2.5 Kornzertrümmerung

Der Aufbau der offenporigen Struktur als Korngerüst, das Lasten punktuell von Korn zu Korn überträgt, verursacht an den Kontaktpunkten hohe lokale Spannungen, die zu Kornzertrümmerungen bzw. Zerkleinerungen der Splittkörner führen können.

Kornzerkleinerungen treten sowohl durch den Verdichtungsprozess (s. auch Kap. 3.3.2.3) während des Einbaus als auch über die Liegedauer durch Verkehrslasten auf. Verschiedene Untersuchungen belegen die Kornzertrümmerung mit zunehmender Liegedauer von offenporigen Deckschichten (z.B. [72][139]). In [139] ist beispielsweise eine Reduktion des eingesetzten Größtkorns (durch Kornzertrümmerung) der Schicht nach 4-6 Jahren unter Verkehr um 3 bis 13 M-% beobachtet worden.

Die Kornzertrümmerung ist auch bei der Herstellung von Marshallprobekörpern zu beobachten. Dies geschieht sogar in verstärktem Maße, da die Hammerschläge im punktuell abgestützten Korngerüst kurzzeitig hohe Spannungen verursachen [97][156].

Die Kornzertrümmerung kann in situ zu Kornausbrüchen, zu einer Reduzierung des Haftverhaltens zwischen Bitumen und Gestein durch Aufbrechen des Bindemittelfilms und den Zutritt von Wasser führen [145]. Dadurch entstehen Verformungen und nicht zuletzt auch (Eigen-)Verschmutzungen (s. auch Kap. 4.1.2) sowie Hohlraumreduzierungen durch zerbrochene Körner, die in der Größe der Füller- und Sandfraktion vorliegen.

3.3.2.6 Griffigkeit

Offenporiger Asphalt wurde in seinen Anfangsjahren zur Verbesserung der Griffigkeit von Befestigungen auf Flugplätzen verwendet (s. auch Kap. 3.2). Der höhere Reifen-Fahrbahn-Kontakt wurde in diesen Fällen durch die wasserableitenden Eigenschaften des offenporigen Asphalts und die Verhinderung von größeren Wasserfilmen bewirkt. Die eigentlichen Reibungs- und Schlupfeigenschaften zwischen Reifen und Fahrbahn, die auch bei trockener Fahrbahn die Griffigkeit bestimmen, beruhen hingegen auf der Mikrotextur der Fahrbahnoberfläche bzw. der Gesteinskörner.

Die Griffigkeit offenporiger Asphaltdeckschichten verdient aus dem Grund besondere Beachtung, dass durch die offene Textur weniger Kontaktpunkte als bei dichten Deckschichten die Kraftübertragung (Reibungskräfte) zwischen Reifen und Fahrbahn sicherstellen müssen. Aus

diesem Grund müssen die eingesetzten Gesteine, die mit ihrer Mikrorauheit bzw. „Schärfe“ die Griffigkeit zu wesentlichen Teilen bestimmen, besonders resistent gegen Abrieb bzw. Polieren sein [68][157]. Als charakteristischer Wert für die Polierresistenz der eingesetzten Mineralstoffe (und damit auch die Griffigkeit der Decke) wird der PSV-Wert verwendet [158].

Messtechnisch wird die Griffigkeit üblicherweise mit einem gegenüber der Fahrtrichtung schräg gestellten blockierten Schlepprad, das an einem Messfahrzeug mitgeführt wird, angesprochen. Gemessen wird bei diesem Verfahren (SKM-Verfahren⁴⁹) der Seitenreibungsbeiwert. Neben der linienförmigen Messung ist auch die punktförmige Messung mit dem SRT-Pendel⁵⁰ (kombiniert mit Ausflussmesser-Messungen) möglich. Der Schwachpunkt dieser Messungen auf offenporigen Asphalten, der bei der Interpretation von Messergebnissen beachtet werden sollte, besteht darin, dass vor der Messung ein bestimmter (rechnerischer) Wasserfilm auf die Fahrbahnoberfläche aufzubringen ist. Jedoch werden bei gleicher Wassermenge auf offenporigen Schichten aufgrund der drainierenden Wirkung wesentlich geringere Wasserfilmdicken erzeugt als bei dichten Deckschichten. Verschiedentlich sind deshalb zur Griffigkeitsbeurteilung z.B. in den Niederlanden Bremsverzögerungstests auf trockener Fahrbahn durchgeführt worden [161].

Bei der Herstellung von Asphaltdecken ist die Griffigkeit kurz nach der Herstellung der Deckschichten (Anfangsgriffigkeit) immer kritisch, da sich auf den Gesteinskörnern an der Fahrbahnoberfläche noch dünne Bitumenfilme befinden, die sich erst mit der Zeit abnutzen. Beim offenporigen Mischgut wird dieser Zustand durch dicke Bindemittelfilme, die Verwendung von hochwertigem Bitumen mit hoher Affinität zum Gestein und den Verzicht auf Abstreumaßnahmen verschärft bzw. zeitlich verlängert [68]. Verschiedene Untersuchungen gehen von einer geringeren Anfangsgriffigkeit von 3 bis 6 Monaten aus, nach 1 Jahr ist die gemessene Griffigkeit durch die Abnutzung der Bitumenfilme gegenüber dem Neubauzustand deutlich erhöht (z.B. [67][126]). Bei der Verwendung polymermodifizierter Bitumen kann die schwache Anfangsgriffigkeit sogar über einen Zeitraum bis zu 18 Monaten anhalten [67][68]. Zur Erhöhung der Anfangsgriffigkeit nach der Herstellung sind in den Niederlanden verschiedene Verfahren erprobt worden (Abstreuerung mit Kalksteinmehl, Entfernen des Bindemittelfilms durch Wasser oder Bürsten), von denen einige potentiell anwendbar scheinen [67][162]; dennoch werden heutzutage in der Regel keine Maßnahmen zur Erhöhung der Anfangsgriffigkeit durchgeführt.

Griffigkeitsuntersuchungen im Vergleich von dichten und offenporigen Deckschichten zeigen nach Überwindung der schwachen Anfangsgriffigkeit bei Messungen ähnliche Größenordnungen, die den Anforderungen der Mindestgriffigkeit bei Abnahme⁵¹ meist mehr als genügen [126]. Nach ungefähr einem Jahr werden häufig die größten Griffigkeiten im Lebenszyklus gemessen [68][112], danach erfolgt eine Abnahme der Griffigkeit, die aber auch nach ca. 6-7 Jahren noch unkritisch ist [72][157]. Voraussetzung dafür ist jedoch stets die Verwendung von ausreichend polierresistentem Gestein.

⁴⁹ **Seitenkraft-Messverfahren** nach TP Griff StB-SKM (Ausgabe 2007) [159], früher SCRIM

⁵⁰ nach TP Griff StB-SRT (Ausgabe 2004) [160]

⁵¹ $\mu_{SKM} \geq 0,46$ bei 80 km/h 4-8 Wochen nach Verkehrsfreigabe (ZTV Asphalt-StB Ausgabe 2007) [36]

3.3.2.7 Anforderungen an Material und Gebrauchsverhalten

Aufgrund der oben ausgeführten Besonderheiten und den Erfahrungen mit offenporigen Bauweisen werden an das offenporige Asphaltmischgut und seine Komponenten im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen spezielle Anforderungen gestellt hinsichtlich:

- Material/Komponenten:
 - Gestein (Polierresistenz) (s. auch Kap. 3.3.2.6): Nur die obere Asphaltsschicht muss Anforderungen an dauerhafte Griffigkeit und damit gegenüber Abrieb und Polieren erfüllen: Die angegebenen Mindestwerte des PSV-Wertes schwanken zwischen 54 und 55 [137][157][163] (zum Vergleich: Anforderung an herkömmlichen Splittmastixasphalt PSV > 51).
 - Gestein (Widerstand gegen Zertrümmerung) (s. auch Kap. 3.3.2.5): Wegen der hohen Punktlasten bei der Kraftübertragung von Korn zu Korn sind entweder Schlagzertrümmerungswerte $SZ_{8/12,5} \leq 18 \%$ oder Los-Angeles-Koeffizienten von $LA \leq 20$ nachzuweisen [163]. In OGFC-Mischgut müssen beispielsweise für gewöhnlich nur LA-Höchstwerte zwischen 35 und 50 nachgewiesen werden [58].
 - Gestein (Kornform): Um eine hohe Festigkeit und gute Makrotextur zu erreichen, muss das Korngerüst fast ausschließlich aus vollständig gebrochenen Körnern bestehen [163] (Kategorie C_{100/0} nach [164]). Zur Erzeugung eines hohen Hohlraumgehalts ist zudem die massenmäßige Beschränkung ungünstig geformter Körner notwendig. Der Massenanteil nicht-kubischer Körner (Abmessungs-Verhältnis $\geq 3:1$) ist deshalb auf 8 M.-% zu beschränken [163] (Kornformkennzahl nach [165] $SI \leq 8$).
 - Gestein (Einsatz künstlicher Mineralstoffe): Als künstliche Zuschlagstoffe kommen wegen der oben genannten Anforderungen nur Schlacke(ngranulat) aus der Kupfererzeugung und Schmelzkammergranulat in Frage [163].
 - Füller: Aus der Erfahrung haben sich reine Kalksteinmehle bewährt [137][163] (Calciumcarbonatanteil $\geq 90 \%$, entsprechend CC₉₀ laut [164]). Zur Verbesserung der Haftung des Bindemittels (s. auch Kap. 3.3.2.2) am Gestein kann gegebenenfalls Mischfüller (Füller mineralischen Ursprungs, der mit Calciumhydroxid gemischt wurde), z.B. mit einem Calciumhydroxidgehalt von $\geq 10 \%$ (Ka₁₀ nach [164]) verwendet werden. Dabei soll nur Fremdfüller verwendet werden [166].
 - Fasern: Zur Anwendung sollen möglichst nur unbehandelte Zellulosefasern kommen, da sich diese in der Praxis gut bewährt haben.
 - Bitumen: An das Bindemittel sind hohe Anforderungen an Klebekraft, Alterungsbeständigkeit, Kälteverhalten, Plastizitätsspanne und Affinität zum Gestein zu stellen, die fast ausschließlich (hoch-) polymermodifizierte Bitumen (und teilweise gummimodifizierte Bitumen) leisten können [166]. Zur Anwendung kommt daher üblicherweise polymermodifiziertes Bitumen 40/100-65 nach [167].

- Mischgutzusammensetzung:
 - Sieblinie/Rezeptur: Die optimale Sieblinie des Mischguts wird anhand von Zielvorgaben zum Hohlraumgehalt, zum Gebrauchsverhalten (und neuerdings auch zum akustischen Verhalten) hinsichtlich Rezeptur und Bindemittelgehalt ermittelt. Rahmenvorgaben hierzu existieren in [163] für Größtkörner von 8, 11 und 16 mm (PA 8, PA 11, PA 16). Der Unterkornanteil ist auf 8 M.-% zu beschränken.
 - Hohlraumgehalt (Akustik, Entwässerung): Der Hohlraumgehalt sollte auf Grund der akustischen und entwässerungstechnischen Anforderungen möglichst hoch, aber dennoch bautechnisch noch vertretbar sein. In der fertig hergestellten Schicht sollen 22-28 % erreicht werden [36], wofür am Marshallprobekörper 24-28 % nachgewiesen werden müssen [163].
 - Bindemittelgehalt (Kornausbruch, Alterung): Der Bindemittelgehalt ist zur Erzielung möglichst dicker Bitumenfilme für PA 16 $\geq 5,5$ M.-%, für PA 11 $\geq 6,0$ M.-% und für PA 8 $\geq 6,5$ M% zu wählen. Häufig wird zur genaueren Einstellung des Bindemittelgehalts auch der Volumenanteil am Mischgut angegeben, der größer als 11 Vol.-% sein soll [163][166].
 - Asphaltgranulat: Wiederverwerteter Asphalt darf aufgrund der hohen Anforderungen in offenporigen Asphalten nicht verwendet werden [163].
- Gebrauchsverhalten/Verhalten gegen Beanspruchungen:
 - Griffigkeit (Abnahme nach TP Griff-StB) (s. auch Kap. 3.3.2.6): Bei der Abnahme müssen in Kontrollprüfungen wie bei herkömmlichen Asphaltdeckschichten Messwerte μ_{SKM} von 0,46 (80 km/h), 0,51 (60 km/h) bzw. 0,56 (40 km/h) nachgewiesen werden, nach Ablauf der Verjähungsfrist sind noch 0,40 (80 km/h), 0,45 (60 km/h) bzw. 0,49 (40 km/h) zu gewährleisten [36].
 - Anfälligkeit gegen Kornverlust (s. auch Kap. 3.3.2.1): Der Nachweis dieser wichtigen Eigenschaft mit Hilfe der Bestimmung des Cantabro-Verlusts im Los-Angeles-Prüfgerät ([142], s. auch Kap. 3.3.2.1) wird nicht standardmäßig gefordert. DIN EN 13108-7 [168] sieht die Möglichkeit vor, maximale Kornverluste nach [169] von 10 bis 50 % (PL₁₀ bis PL₅₀) vorzugeben. Diese Spezifikationen sind jedoch nicht in nationale Regelwerke übernommen worden, können jedoch im Einzelfall vorgegeben werden. In den USA wird der Cantabro-Verlust für OGFC-Mischgut beispielsweise auf 20 % begrenzt, spanische Regelwerke verlangen je nach Schwerverkehrsbelastung 20-25 % als Höchstwert, in Italien muss der Cantabro-Verlust < 25 % betragen [58][146][152]. In vielen anderen europäischen Ländern wird die Überprüfung des Cantabro-Verlustes vorgegeben, begrenzende Werte bestehen jedoch nicht.
 - Affinität zwischen Bindemittel und Gestein (s. auch Kap. 3.3.2.2): Der Nachweis der Affinität bzw. der Wasserempfindlichkeit geschieht laut DIN EN 13108-7 [168] mit der Bestimmung des Spaltzugfestigkeitsverhältnisses (ITSR) nach [151]. Es können Mindestwerte von 50 bis 100 % festgeschrieben werden, in den nationalen Regelwerken sind hierzu jedoch keine Spezifikationen vorhanden. Die Schweiz gibt beispielsweise einen Mindestwert von $ITSR = 70$ % vor [146].

- Herstellung des Mischguts und Einbau der Schicht in situ:
 - Abdichtung der Unterlage vor Einbau der offenporigen Schicht: Zur Verhinderung von Wasser und Frost-Tau-Schäden in den tieferliegenden Schichten des Oberbaus muss die offenporige Schicht nach unten hin abgedichtet werden. Dies geschieht normalerweise entweder mit einer Gussasphaltschicht oder einer Abdichtung aus 2,0 bis 3,0 kg/m² polymermodifiziertem Bitumen 40/100-65, die anschließend mit vorbituminiertem Splitt der Lieferkörnung 8/11 (SZ₁₈/LA₂₀) in einer Menge von 5 bis 10 kg/m² abgestreut (und ggf. eingewalzt) wird [36]. Die Viskosität des Bitumens soll beim Aufbringen möglichst weniger als 400 mm/s² betragen. Die Anwendung von Emulsionen muss wegen des Brechens unterbleiben [137].
 - Schichtdicke (Akustik, Standfestigkeit): Als Schichtdicke für einlagigen offenporigen Asphalt wird je nach Größtkorn 4,5-5,0 cm bzw. 4,0 cm einschließlich Abdichtung (PA 8 bzw. OPA 0/8) und 5,0-6,0 cm bzw. 5,0 cm (PA 11 bzw. OPA 0/11) angegeben [36][99]. Heutzutage wird jedoch vermehrt von dieser rein bautechnischen Vorgabe dergestalt abgewichen, dass die Schichtdicke insbesondere bei zweilagigen Ausführungen (z.B. untere Schicht PA 16, obere Schicht PA 8) je nach akustischer Anforderung bemessen wird. Dabei wird häufig ein Vorhaltemaß der Schichtdicke gegen aufsteigendes Bindemittel aus der Abdichtung vorgesehen.
 - Einbau: Der Einbau muss maschinell in voller Breite „heiß an heiß“ erfolgen, häufig fahren die Fertiger hierzu gestaffelt. Längsnähte und Querfugen (Arbeitsfugen) sind möglichst zu vermeiden.
 - Verdichtungsart: Am Fertiger ist die Hochverdichtungsbohle möglichst auszuschalten, die Verdichtung sollte ausschließlich mit Walzen erfolgen. Der Walzeneinsatz ist sorgfältig zu planen, da das offenporige Mischgut schneller auskühlt als herkömmliches und daher der Einbauvorgang zeitlich optimiert werden muss; das Walzen erfordert zudem eine gewisse Erfahrung des Walzenführers. Es ist nur statisch ohne Vibration mit ungefähr fünf bis sechs Walzübergängen zu verdichten. Es muss mit erhöhtem Wasserverbrauch gerechnet werden, der überdies zu einer zusätzlichen Auskühlung des Mischguts führt [36][137][166].
 - Verdichtungsgrad (Verformungsverhalten, Kornzertrümmerung) (s. auch Kap. 3.3.2.3): Der Verdichtungsgrad ist als Komplementärwert zum Hohlraumgehalt zu sehen. Er soll in der fertigen Schicht $k \geq 97 \%$ betragen [36][145].
 - Mischguttemperatur: Die Temperatur des offenporigen Mischguts ist im Vergleich zu herkömmlichen Deckschichtmaterialien niedrig. Bei der Herstellung in der Mischanlage soll die Temperatur maximal 170° C betragen (zur Verhinderung der Bindemittelschädigung und des Bindemittelablaufs), bei der Anlieferung auf der Baustelle minimal 140°C. Eine Silolagerung im Mischwerk soll zur Verhinderung von Bindemittelablauf vermieden werden [163].
 - Umgebungstemperatur beim Einbau: Um ein zu schnelles Auskühlen des Mischguts zu verhindern, wofür OPA besonders anfällig ist, soll der Einbau nicht bei zu starkem Wind erfolgen, wobei die Lufttemperatur mindestens +10 °C, die Temperatur der Unterlage mindestens +5 °C betragen soll [36][137][166].

- Abstreuerung (s. auch Kap. 3.3.2.6): Auf eine Abstreuerung zur Erhöhung der Anfangsgriffigkeit ist unbedingt zu verzichten, da Poren verstopft werden und dadurch der Hohlraumgehalt reduziert wird.

3.3.3 Betriebliche Besonderheiten und Winterdienst

Die betriebliche Unterhaltung und die bauliche Erhaltung (bauliche Unterhaltung, Instandsetzung und Erneuerung) bedingen bei offenporigen Asphaltdecken einige zusätzliche (höhere) Anforderungen im Vergleich zu herkömmlichen geschlossenen Decken.

Bauliche Erhaltung

Bauliche Erhaltungsmaßnahmen an offenporigen Deckschichten sind aufwändiger, weil herkömmliche Methoden wie z.B. das Einfügen von Flickstellen (mit dichtem Deckschichtmaterial, z.B. Kaltasphalt) oder das Vergießen von Rissen die offenporige Struktur unterbrechen und damit die Wirksamkeit von OPA hinsichtlich der Entwässerung (und bei flächenmäßig größeren Maßnahmen auch der Lärminderung) zumindest teilweise zunichte machen. An Stellen, an denen die Entwässerung gestört bzw. unterbrochen ist, kann Wasser gestaut werden, was vor allem im Winter bei Temperaturen nahe dem Gefrierpunkt lokale Glättebildung verursachen kann. Weiterhin kommen herkömmliche Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen wie Oberflächenbehandlungen, die Aufbringung von Dünnen Schichten im Hocheinbau oder ein Austausch der Deckschicht im Tiefeinbau von einzelnen Fahrstreifen aus oben genannten Gründen nicht infrage. Eine bauliche Erhaltung ist nur durch den Einbau der Deckschicht über die gesamte Fahrbahnbreite in sinnvoller Weise möglich, was zu einer aus Wirtschaftlichkeitserwägungen ungünstigen Erhaltung von offenporigen Deckschichten führt.

Betriebliche Unterhaltung

Im Betriebsdienst ist vor allem das Binden von ausgelaufenen Kraftstoffen und Schmiermitteln durch Abstreuen mit Ölbinder sehr kritisch zu sehen bzw. ohne Verschmutzung und Verstopfung der Poren nicht möglich. Auf die Entfernung kann allerdings auch nicht völlig verzichtet werden, da Kraftstoffe (in ihrer Wirkung als organisches Lösungsmittel) das Bitumen angreifen können, was gerade in offenporigen Asphalten aufgrund seiner besonderen Struktur des Korngerüsts besonders kritisch ist [153]. Durch die poröse Struktur bleibt ausgelaufener Kraftstoff nicht an der Fahrbahnoberfläche, sondern dringt in die Schicht selbst vor, wo er nicht mehr ohne weiteres gebunden werden kann und unter Umständen erst zeitverzögert in die Bankette und die Umwelt transportiert wird.

Auf die Besonderheiten von Strecken mit offenporigen Asphalten sind deshalb die mit dem Straßenbetriebsdienst betrauten Stellen sowie zusätzlich Polizei und Feuerwehr⁵² besonders hinzuweisen.

⁵² betrifft neben dem Binden von ausgelaufenen Kraftstoffen vor allem auch den Einsatz von Lösch- und Rettungsmitteln (die die Fahrbahn als Widerlager benutzen) sowie das Befahren (z.B. Vermeiden von engen Wendemanövern mit schweren Fahrzeugen)

Winterdienst

Offenporige Asphalte haben wegen ihrer porösen Struktur und der damit einhergehenden größeren Oberfläche bzw. Kontaktfläche zur (Umgebungs-)Luft eine geringere Wärmekapazität. Zusätzlich ist die Wärmeleitfähigkeit durch die isolierende Wirkung des hohen Luftporenanteils gegenüber herkömmlichen Asphalten stark reduziert (z.B. [128]).

OPA kühlt aus diesen Gründen schneller ab, erreicht somit bei fallenden Temperaturen früher als herkömmliche geschlossene Deckschichten den Gefrierpunkt an der Fahrbahnoberfläche und erwärmt sich bei steigenden Temperaturen langsamer, was dazu führt, dass der Gefrierpunkt erst später wieder überschritten wird [82][170]. Dies kann zu einer früheren Glättebildung und länger anhaltender Glätte als bei geschlossenen Decken führen. Die Gefahr von gefrierendem Regen auf einer entsprechend ausgekühlten Fahrbahnoberfläche („Blitzeis“) und die Bildung von Reifglätte ist auf OPA aus den genannten Gründen ebenfalls erhöht [171].

Zusätzlich kann in offenporigen Deckschichten nach Niederschlägen noch tagelang so viel Wasser bzw. Restfeuchte in der Schicht vorhanden sein, dass sich selbst bei sonst trockener Fahrbahn z.B. über Nacht Glätte durch die Entstehung von Raureif bildet [170].

Besonders bei Temperaturverhältnissen um den Gefrierpunkt kann es wegen der unterschiedlichen Fahrbahnoberflächentemperatur an Übergängen von geschlossenen und offenporigen Decken zu für den Kraftfahrer schwer erkennbarer und dadurch „überraschender“ Glätte auf der Fahrbahn kommen [172].

Aus den oben genannten Gründen ist offenporiger Asphalt grundsätzlich anfälliger für Glättebildung. Durch entsprechende Planung und Durchführung des Winterdienstes sind diese Probleme jedoch weitgehend kompensierbar. Für die Durchführung des Winterdienstes ergeben sich daraus und darüber hinausgehend folgende Anforderungen:

- Wegen der erhöhten Glättegefahr ist dem Winterdienst auf Abschnitten mit offenporigem Asphalt besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Der verstärkten Glättebildung kann durch höhere Tausalzmengen oder dem Einsatz stärkerer Taumittel mit geringerer Reaktionszeit (z.B. Erhöhung des Calciumchloridanteils im Streugut) begegnet werden
- Der Taumiteleinsetz ist gegenüber geschlossenen Decken zu verstärken (z.B.[82][128][173]), um das Versickern der Salzsole in der porösen Schicht und die damit einhergehende niedrigere Salzkonzentration an der Oberfläche zu kompensieren. Zum Einsatz soll (wie in Deutschland allgemein üblich) nur Feuchtsalz kommen, auf rein abstumpfend wirkende Streuung von Mineralstoffkörnungen (Splitt) ist zu verzichten.
- Die Effektivität einer Präventivstreuung ist aufgrund der schnellen Versickerung des gelösten Salzes in der Schicht bei einsetzendem Niederschlag umstritten. Bei drohendem einsetzenden Niederschlag (Schneefall oder gefrierender Regen) auf trockener Fahrbahn sowie zur Verhinderung des Gefrierens von Wasser in der Schicht ist eine vorsorgliche Streuung sinnvoll (z.B. [128][174])
- Die Schneeräumung ist aus mehreren Gründen kritisch. Zum einen kann der Schnee in die offenporige Schicht eingedrückt und verdichtet werden. Dies erschwert nicht nur die Beseitigung sondern kann auch zum erneuten und wiederholten Überfrieren der Fahrbahnoberfläche führen. Zum anderen ist die Oberfläche für Kornausbrüche (s. auch

Kap. 3.3.2.1), die durch die Schilde von Schneepflügen ausgelöst werden können, anfälliger (z.B. [58]).

- Aus diesem Grund ist auch die Verwendung von Schneeketten als sehr kritisch zu sehen [132].
- Der vermehrte Streumiteinsatz im Winterdienst trägt sowohl durch die Auskristallisierung der Salze als auch durch die im häufig eingesetzten Steinsalz vorhandenen feinen Mineralstoffe zur Verschmutzung von offenporigen Asphalten bei und konterkariert daher die Bemühungen, die Einlagerung von Schmutzpartikeln von offenporigen Asphalten möglichst gering zu halten (s. auch Kap. 4.1.2).

4 Verschmutzung von offenporigen Asphalten

4.1 Erfahrungen und prinzipielle Verschmutzungsmechanismen

4.1.1 Zusammensetzung des Schmutzes

Um die Wirkungsweise von eingetragenen Schmutz in offenporigen Asphalten verstehen und den Verschmutzungsvorgang in Laborversuchen nachbilden zu können, ist die Kenntnis der Zusammensetzung des Schmutzes erforderlich. Straßenschmutz enthält je nach lokaler Situation (u.a. Lage im Gelände, Umfeld, Jahreszeit, Laubfall, Verkehrsstärke und -zusammensetzung, gefahrene Geschwindigkeiten, landwirtschaftlicher Verkehr) unterschiedliche Mengen an Bestandteilen wie Fahrbahnabrieb, Reifenabrieb, Gesteinspartikel (Abrieb von der Straße und durch Wind aus dem Umfeld), Schmier- und Kraftstoffe, Abfälle, Schwermetalle, Tausalze und organische Abbauprodukte (z.B. Laub, Tiere, Mutterboden aus der Umgebung). Um Erkenntnisse über durchschnittliche Zusammensetzungen von Straßenschmutz zu ermöglichen, ist die Zusammensetzung auf folgende Parameter vereinfacht worden:

- Korngrößen(-verteilung) der Schmutzpartikel,
- chemische Zusammensetzung des Schmutzes, insbesondere Unterscheidung zwischen organischen und anorganischen Bestandteilen

Die Zusammensetzung von Straßenschmutz ist in verschiedenen Untersuchungen mit unterschiedlichen Zielrichtungen betrachtet worden. Aus diesem Grund unterscheiden sie sich grundsätzlich hinsichtlich des untersuchten Ausgangsmaterials:

- Reinigungsgut aus OPA,
- Kehrgut von herkömmlichen Decken,
- Bankettschälgut.

Abbildung 9 stellt anschaulich dar, wo diese Schmutzarten anfallen und wie sie sich deshalb mutmaßlich hinsichtlich Menge und Zusammensetzung voneinander unterscheiden. Daraus wird ersichtlich, dass der auf einer Straßenoberfläche anfallende Schmutz jedoch weder mit Kehrgut noch mit rückgewonnenem Reinigungsgut aus OPA oder Bankettschälgut identisch sein kann bzw. direkt vergleichbar ist.

In [175] wird Kehrgut verschiedener Straßentypen (BAB, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen), unterschieden nach räumlicher Lage (innerhalb/außerhalb von Ballungsräumen) und nach dem Kehrzeitpunkt (Frühjahr/Sommer, Herbst, Winter) untersucht. Danach ist für Autobahnen mit einem jährlichen Aufkommen an „Kehricht“ von ca. 407 g/m² zu rechnen. Dieser setzt sich zu 60-80 M.-% aus mineralischen Stoffen zusammen. Der Rest besteht aus organischem Material, das aus Mutterboden, Laub und anderem Grüngut besteht bzw. daraus hervorgegangen ist. Im Herbst ist der organische Anteil aufgrund des Laubfalls erhöht.

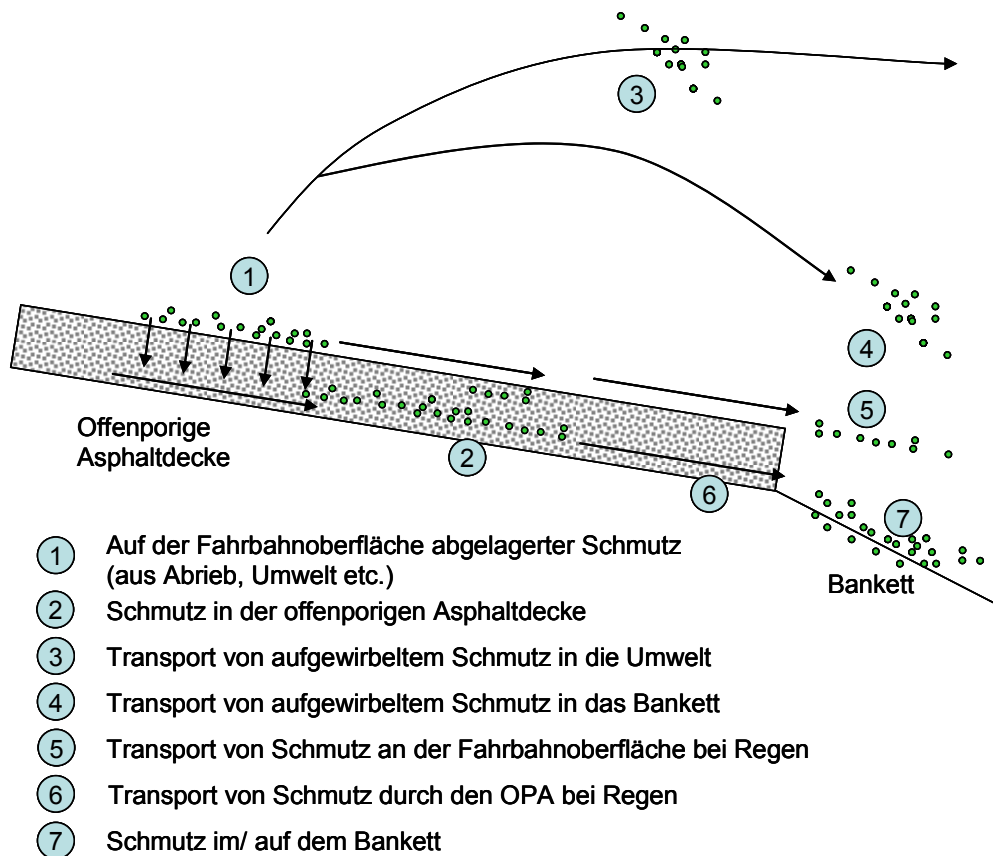


Abbildung 9: Schmutzanfall und -transport auf Straßen

Die sehr feinen Kornfraktionen $< 0,2$ mm machen einen Anteil von ca. 15-20 M.-% aus und bestehen hauptsächlich aus „Stäuben“ und kleinen organischen Schmutzpartikeln. Die Sandfraktion (0,2 bis 2 mm) hat einen ungefähren Anteil von 50-60 M.-% und besteht hauptsächlich aus mineralischen Stoffen. Weitere 20-35 M.-% sind der Splitt-/Kiesfraktion zuzuordnen (2 bis ca. 20 mm), welche auch hauptsächlich aus mineralischen Stoffen besteht. Die Kornfraktion > 20 mm besteht hauptsächlich aus größeren organischen Bestandteilen wie Laub oder Grüngut.

Untersuchungen an Bankettschälgut, das vom parallel zur Straße verlaufenden unbefestigten Seitenstreifen in Abständen von mehreren Jahren zur Gewährleistung der Entwässerung mit einer Bankettfräse in einer Dicke von 5 bis 10 cm abgeschält wird, sind in [176] durchgeführt worden. In dieser Untersuchung werden grobe Bestandteile aus Bewuchs (Gras und Wurzelmaterial) > 16 mm nicht in die Betrachtungen einbezogen, so dass sich die untersuchten Bankettschälgutproben nur noch aus anstehendem (Mutter-)Boden und Schmutz, der im Laufe der Jahre von der Straße und der Umgebung in das Bankett eingetragen worden ist, zusammensetzen (s. auch Abbildung 9). Erwartungsgemäß ergeben sich sehr hohe organische Gehalte. Die Korngrößenverteilungen der untersuchten Proben zeigen starke Unterschiede. In Abbildung 10 ist eine durchschnittliche und zum Vergleich eine sehr feine Bankettschälgutprobe dargestellt. Im Mittel weist Bankettschälgut demnach Feinkornanteile von ca. 20 M.-%, Anteile der Sandfraktion von 50 bis 60 M.-% und grobe Bestandteile (2 bis 16 mm) von bis zu 20-30 M.-% auf, was trotz unterschiedlicher Herkunft durchaus mit der Korngrößenverteilung von Kehrgut vergleichbar ist. Das sehr feine Bankettschälgut zeigt hingegen außerordentlich hohe Feinkornanteile von fast

70 M.-%, die bei keinem anderen der hier untersuchten Schmutzzusammensetzungen in dieser Art festgestellt wird.

Reinigungsgut aus Nassreinigungen von realen OPA-Flächen sollte dem Schmutz, der tatsächlich ursprünglich in die poröse Struktur eingetragen worden ist, von der Zusammensetzung mutmaßlich am nächsten kommen. Der Realität entspricht es dennoch auch nicht (s. auch Abbildung 9), da auch nach einer Reinigung weiterhin ein Teil des Schmutzes im OPA verbleibt. In [129] wird an Nassreinigungsgut ein organischer Anteil von ca. 2,5 bis 4 M.-% in der Trockenmasse nachgewiesen, allerdings ist in den schlämbaren Anteilen < 0,1 mm ein stark erhöhter organischer Gehalt von 27-32 M.-% festzustellen. Dieser hohe organische Anteil dürfte aus Abrieb von Reifen, Bitumen sowie fein zersetztem Laub und organischen Bodenpartikeln bestehen. Die Proben weisen (ähnlich wie die Untersuchungen an Kehr- und Bankettschälgut) einen Feinanteil (< 0,2 mm) von ca. 30 M.-% auf; der Sandanteil umfasst einen Anteil von ca. 50-60 M.-%, während gröbere Bestandteile (2 bis ca. 8 mm) mit ca. 10-20 M.-% vertreten sind. Mengenmäßig fällt je nach Gegebenheiten und Reinigungshäufigkeit ca. 17 bis 100 g/m² Reinigungsgut pro Jahr an.

Im Rahmen des Forschungsverbundes „Leiser Straßenverkehr 2“ ist durch die Firma Müller BBM Schmutz, der tatsächlich in realen OPA-Schichten eingelagert ist, untersucht worden [177]. Die Schmutzproben werden hierbei aus Bohrkernen, die mechanisch zerteilt und mit Wasser unter hohem Druck gespült werden, gewonnen. Die ermittelte Korngrößenverteilung des Schmutzes weist einen Feinanteil (< 2 mm) von ca. 35 M.-%, Anteile der Sandfraktion von ca. 40 M.-% und einen Grobanteil von ca. 25 M.-% auf, was im Vergleich zum konventionellen Nassreinigungsverfahren eine sehr ähnliche, jedoch etwas feinere Zusammensetzung bedeutet. Überdies wird ein durchschnittlicher organischer Anteil von ca. 6 bis 10 M.-% ermittelt, der anhand des Glühverlusts der Proben bestimmt wird [177]. Der TOC-Wert⁵³, der einen Anteil am gesamten Glühverlust darstellt und ein Maß dafür darstellt, inwieweit organische Bestandteile bereits zu Kohlenstoff abgebaut worden sind, weist durch hohe Werte auf einen bereits weit fortgeschrittenen Abbauprozess (zu reinem Kohlenstoff) hin.

In einer zusammenfassenden Betrachtung der Untersuchungen und Literaturquellen lässt sich bemerken, dass die Korngrößenverteilungen trotz der sehr unterschiedlichen Ablagerungsorte und Verfahren der Probegewinnung des Schmutzes erstaunlich ähnlich sind (s. Abbildung 10). Der tatsächlich auf der Fahrbahn abgelagerte Schmutz dürfte demnach in seiner Zusammensetzung den hier vorgefundenen Korngrößenverteilungen zumindest sehr nahe kommen, womit auch für die Rezeptur des künstlichen Schmutzes (s. Kap. 5.1.4), der in den Verschmutzungsversuchen verwendet werden soll, verlässliche Anhaltswerte ermittelt worden sind. Die organischen Anteile im Schmutz liegen hauptsächlich in der Feinfraktion < 0,2 mm und der Grobfraktion > 20 mm vor. Die Sand- (0,2 bis 2 mm) und Splitt-/Kiesfraktion (2 bis 20 mm) bestehen zum größten Teil aus mineralischen Stoffen. Die genaue Herkunft der organischen Anteile aus Pflanzenmaterial (Laub, Grüngut), Gummi (Reifen), Bitumen (Fahrbahnabrieb) und anderen Erdölderivaten (Schmieröl, Kraftstoff) ist aus den vorliegenden Untersuchungen nur ansatzweise anhand der chemischen Parameter abzulesen, jedoch auch durch weitere geeignete chemische Analyseverfahren kaum getrennt zu ermitteln [177].

⁵³ Total Organic Carbon (Gesamter organischer Kohlenstoff)

Die Menge des Schmutzanfalls soll, sofern Angaben vorliegen, nachfolgend in Tabelle 1 nochmals zusammenfassend dargestellt werden.

Literaturquelle	Art des Schmutzes	Schmutzanfall [g/(m ² *a)]
Ott/Jäger [175]	Gesamter Schmutzanfall	407
Bald/Wellner et al. [178]	Reinigungsgut von der Straßenoberfläche (Kehrgut)	20-192
Roos/Holldorb [129]	Nassreinigungsgut aus OPA	17 -100
Weyringer [179]	Nassreinigungsgut aus OPA	22

Tabelle 1: Zusammenstellung der vorgefundenen Schmutzmengen aus unterschiedlichen Untersuchungen

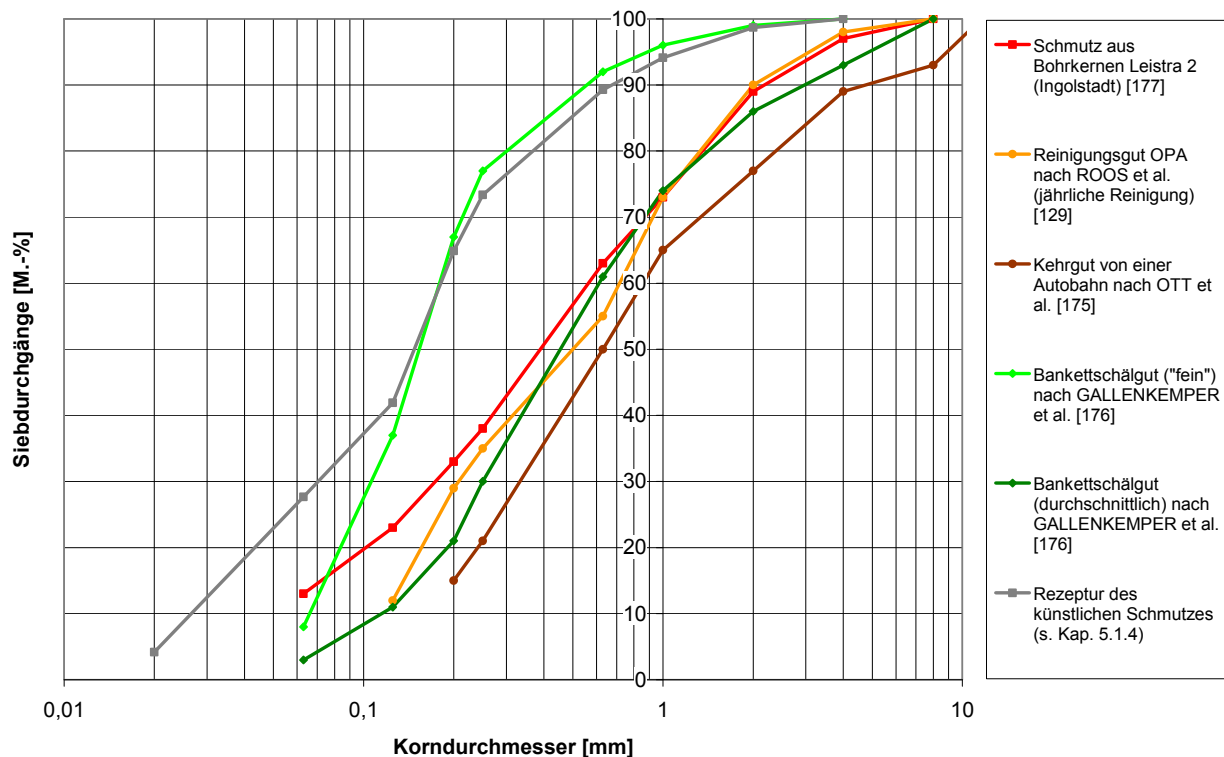


Abbildung 10: Übersicht über Korngrößenverteilungen von Straßenschmutz unterschiedlicher Herkunft und von künstlich hergestelltem Straßenschmutz

4.1.2 Prinzipielle Verschmutzungsmechanismen

Es existieren nur wenige Literaturquellen bzw. Untersuchungen, die sich im Detail mit dem Verschmutzungsprozess bzw. den zugrundeliegenden Mechanismen auseinandersetzen. Teilweise widersprechen sich unterschiedliche Studien sogar in prinzipiellen Ansichten beispielsweise zum Fortschreiten der Verschmutzung und zur Deposition des Schmutzes in der Schicht. Teilweise wird der Beginn des Verschmutzungsprozess und der hauptsächliche Ort der

Schmutzablagerung in „oberen Bereichen“ (jedoch nicht direkt an der Oberfläche) der offenporigen Schicht bzw. des zweilagigen Aufbaus gesehen. Es wird aber ebenso gemutmaßt, dass der Schmutz zum größeren Teil bis zur Unterkante der offenporigen Asphaltdecke sedimentiert und damit die Verschmutzung an der Unterkante der Schicht beginnt (z.B. [129][180]). Als Verschmutzung, die an der Unterkante der Schicht beginnt, kann auch aus der Abdichtung aufsteigendes Bitumen betrachtet werden. Weitgehende Einigkeit hinsichtlich der Verschmutzungsmechanismen besteht jedoch darin, dass Verkehr bzw. Reifenüberrollungen reinigende Wirkung haben. Dieser Selbstreinigungseffekt ist bei größeren Geschwindigkeiten und bei Lkw-Verkehr stärker, weshalb die Verschmutzungstendenzen innerorts häufig größer sind (z.B. [128][178][181]). Der genaue Mechanismus der Reinigung der Rollspuren durch Verkehr (Hineindrücken vs. Heraussaugen des Schmutzes) ist jedoch noch umstritten.

Aufgrund unterschiedlicher externer Einflüsse auf den Verschmutzungsprozess (Druckgradienten durch Verkehr, Transport durch Niederschlagswasser, Temperatur, Alterung der Schicht, Herstellungsprozess) und der komplexen Struktur des Porengerüsts, lässt sich der Verschmutzungsprozess auf unterschiedliche auslösende Mechanismen, die im nachfolgenden beschrieben werden, zurückführen. Die Komplexität und Vielfältigkeit der dort beschriebenen Vorgänge zeigen, dass auch auf den ersten Blick widersprüchliche Aussagen zum Verschmutzungsprozess (Beispiel oben) bei näherer Betrachtung durchaus widerspruchsfrei zu erklären sein können.

Aus labormäßig verschmutzten OPA 0/8-Probekörpern sind mit Hilfe der Dünnschlifftechnik Vertikalschnitte angefertigt worden [182], an denen durch Vergrößerung mit Polarisationsmikroskopie (neben Porenformen und -größen) verschiedene typische Verschmutzungsmechanismen von offenporigen Asphaltdecken sichtbar gemacht werden können. Weiterhin sind Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von „real“ verschmutztem OPA angefertigt worden [183], die in den Abbildungen mit „R“ gekennzeichnet sind. Diese Aufnahmen stammen von einem Bohrkern aus einer Rollspur der BAB A 3 bei Siegburg⁵⁴.

In Abbildung 11 werden die verschiedenen typischen Verschmutzungsmechanismen veranschaulicht, wobei die folgende Nummerierung zur Erläuterung und Veranschaulichung in den Abbildungen entsprechend verwendet wird.

(1) Aus dem Bitumenfilm, der die Mineralstoffe im OPA umhüllt, brechen kleine Bitumenpartikel sowie (mit Bitumen umhüllte) Füller- und Faserpartikel aus und gelangen durch Sedimentation in untere Schichten des OPA bzw. in Poren, die nur einseitig offen sind. Bei relativ neu hergestellten Decken bzw. Probekörpern ist das Phänomen auf (drucklose und druckbehaftete) Durchströmung mit Wasser, Abrieb unter Mitwirkung anderer Schmutzpartikel und Wasser und die mangelnde Verklebung von Füller und Fasern an manchen Stellen des Korngerüsts zurückzuführen. Bei älteren Decken kommt als weitere Ursache des Ausbrechens von Partikeln die Alterung und damit einhergehende Versprödung des Bitumens hinzu (s. auch Kap. 3.3.2.1). Im Schmutz von gealterten OPA-Schichten lassen sich Bestandteile von gealtertem Bitumen bzw. dessen hochmolekulare Bestandteile, die durch Versprödung am leichtesten herausbrechen, nachweisen [184]. Untersuchungen zum Verschmutzungsprozess in Dänemark bestätigen das hier beobachtete Phänomen, dass die Verschmutzung auch zu wesentlichen Teilen auf feine Partikel,

⁵⁴ zweilagiger Aufbau (untere Schicht 11/16, obere Schicht 2/5) Liegedauer ca. 2,5 Jahre.

die aufgrund von Versprödungstendenzen (verstärkt durch mechanische Belastungen aus Verkehr) aus der Mörtel- bzw. Bitumenmatrix ausbrechen, zurückzuführen ist [138][180].

(2) An manchen Stellen im grobkörnigen Gerüst des OPA können sich Ansammlungen von Füllerkörnern bilden, die nur ungenügend mit dem Bitumenfilm verbunden sind. Als Ursache hierfür könnte ein hinsichtlich Scherkräften und Mischzeit nicht optimaler Misch- bzw. Herstellungsprozesses des OPA verantwortlich sein. Teilweise werden dadurch Porenräume des offenporigen Asphalts schon bei der Herstellung verfüllt. Zudem können aus diesen nur schwach verklebten Fülleransammlungen Bitumen- oder Füllerpartikel leichter ausbrechen, die zur Verschmutzung, wie sie unter (1) beschrieben ist, beitragen.

Die Phänomene (1) und (2) können zusammenfassend als „Eigenverschmutzung“ des offenporigen Asphalts bezeichnet werden und führen zu den Folgephänomenen (4), (5) und (6).

Die Verschmutzung des OPA mit den einhergehenden Auswirkungen wird zum größeren Teil jedoch auf von außen eingetragene Schmutzpartikel zurückgeführt. Hierbei sind folgende Phänomene zu beobachten, die sich wie jeweils beschrieben auf die akustischen (Absorber-) Parameter auswirken (s. hierzu auch Kap. 6.2.2, 7.1 und 7.2 sowie Abbildung 33):

(3) Schmutzpartikel lagern sich an den Porenwänden durch Adhäsion an und verengen dadurch die Porenradien, was in der Folge zu Verstopfungen (5) der Poren führen kann. Durch die Verengung der Poren erhöht sich der längenspezifische Strömungswiderstand Ξ . Durch anhaftenden Schmutz werden die Porenwände rauer, was sich in erhöhten Werten der Tortuosität τ äußern kann.

(4) Erwärmungen des Bitumenfilms und ausgebrochener bituminöser Partikel sowie der Tausalzeinsatz im Winter können zu Verklumpungen und Verkrustungen des Schmutzes in den Porenräumen und an den Porenwandungen führen.

(4a) Durch den Einfluss von Wärme oder nach einer Zeitspanne von mehreren Jahren lagern sich die Schmutzpartikel nicht nur an der Oberfläche an, sondern können sich aufgrund der viskosen Eigenschaften des Bitumens bei Wärme und langanhaltender (auch geringster) Eigenlast regelrecht in den Bitumenfilm einbetten.

(4b) Durch die vom Winterdienst eingesetzten Tausalze Natriumchlorid (NaCl) und Calciumchlorid (CaCl₂) werden die Schmutzstoffe in ein stabiles Kristallgitter, das NaCl und CaCl₂ beim Abtrocknen bzw. Auskristallisieren bilden, regelrecht eingeschlossen und dadurch zusammengehalten. NaCl wird allerdings aus der offenporigen Struktur durch Regen zu über 90 % wieder ausgewaschen, wie die Versuche aus Kapitel 5.1 gezeigt haben. Der Beitrag von Tausalz zur Verschmutzung bzw. Verklumpung scheint demnach also eher klein, aber potentiell vor allem an Stellen mit geringen Wasserströmungen dennoch vorhanden zu sein. Calciumchlorid bzw. die in Lösung vorhandenen Calciumionen können zudem in bestimmten chemischen Milieus theoretisch mit im Regenwasser gelöstem Kohlendioxid (aus der Luft) Calciumcarbonat (Kalk) bilden, das ebenfalls zu hartnäckigen Verkrustungen und somit potentiell zur weiteren Verschmutzung des OPA beitragen könnte. Diese These ist aufgrund der chemischen Umfeldbedingungen (pH-Wert, Konzentrationen usw.), die gegeben sein müssten, damit die Reaktion ablaufen kann, eher unwahrscheinlich. Der im Schmutz aus realen OPA-Decken nachweisbare Kalk wird daher auf Füllerausbrüche zurückgeführt [184].

(5) Schmutzpartikel können Poren bzw. Verbindungen zwischen den Poren verstopfen und undurchlässig machen. Anfällig sind insbesondere schmale Verbindungen zwischen den Porenräumen, die schon durch wenige kleine Schmutzpartikel ihre Durchlässigkeit (für Luft, Wasser und weitere Schmutzpartikel) stark verringern bzw. komplett verlieren können. Die verringerte Durchlässigkeit wirkt sich erhöhend auf den längenspezifischen Strömungswiderstand Ξ aus, während sich der Hohlraumgehalt bzw. die Porosität σ kaum ändert. Durch Porenverschlüsse kann es zu zusätzlichen „Toträumen“ mit nicht beschleunigbaren Luftvolumina kommen, was sich in einer Erhöhung des Strukturfaktors κ auswirken würde. Zusätzlich können sich durch Verschlüsse die Weglängen durch das Porengerüst von Oberkante zur Unterkante durch Erzwingung von „Umwegen“ in der Schicht verlängern, wodurch sich die Tortuosität erhöhen würde.

(6) Schmutz kann sich in einseitig offenen Poren oder in Porenkanälen, die durch größere Schmutzpartikel bereits verschlossen sind, kumulieren. Die vor dem Verschluss liegenden Porenräume werden (durch weiteren herantransportierten Schmutz) schrittweise immer weiter verfüllt, da ein Weitertransport des Schmutzes nicht mehr stattfinden kann. Es sind unterschiedlich dichte Packungen solcher Schmutzansammlungen zu beobachten, die durch in (4) beschriebene physikalische Vorgänge zusätzlich verkrusten und verkleben können. Durch Verfüllung von Poren wird vor allem der Hohlraumgehalt bzw. die Porosität σ herabgesetzt, indirekt auch der längenspezifische Strömungswiderstand Ξ . Schmutzansammlungen können auch die Tortuosität τ erhöhen, indem sich einerseits die Weglängen durch die Ansammlungen hindurch erhöhen, andererseits können „Umwege“ durch die Schicht erzwungen werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Verschmutzung von OPA durch ein Zusammenspiel unterschiedlicher Phänomene zustande kommt, die (teilweise) unabhängig voneinander stattfinden, sich aber auch durch Zusammenwirken gegenseitig verstärken können. Die Beeinflussung des akustischen Verhaltens bzw. der Schallabsorption der OPA-Schicht durch Verschmutzung basiert auf der Veränderung der Absorberparameter Porosität σ , Strömungswiderstand Ξ , Tortuosität τ und Strukturfaktor κ (s. auch Kap. 6.2.2). Die Porosität wird hierbei vor allem durch Verfüllung von Poren (6) herabgesetzt, der längenspezifische Strömungswiderstand erhöht sich durch Schmutzanlagerungen (3) und vor allem durch daraus folgende Verengungen und Verschlüsse (5) von Poren. Die Erhöhung der Tortuosität beruht darauf, dass durch Schmutzanlagerungen (3), Verengungen (5) und Verfüllungen (6) die „Umwegigkeit“ der Porenstruktur erhöht wird. Der Strukturfaktor kann ebenfalls eine Erhöhung durch eine Vergrößerung des nicht beschleunigbaren Luftvolumenanteils („Totraum“) durch Verstopfung (5) von Poren und Porenverbindungen erfahren (s. auch Kap. 7.2).

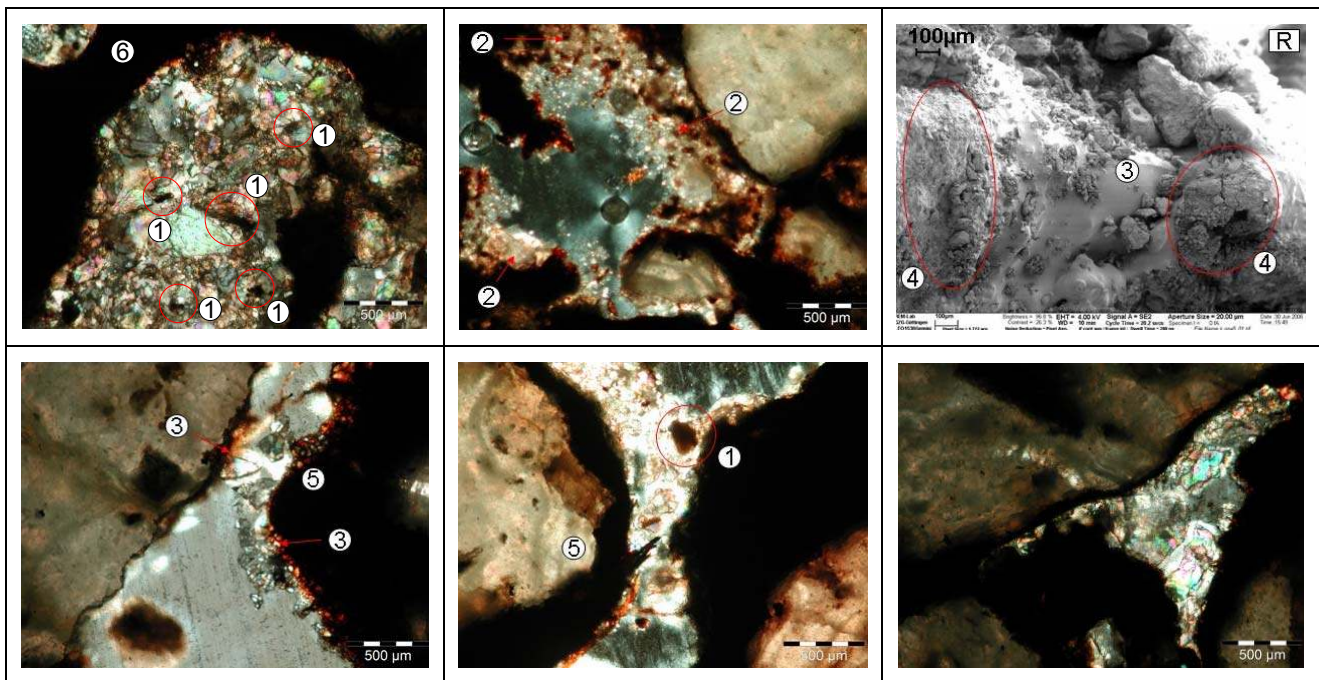


Abbildung 11: Prinzipielle Verschmutzungsmechanismen, veranschaulicht an Dünnschliffen und Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von offenporigen Asphalten [182][183].

4.2 Lösungsansatz Reinigung

Der Verschmutzung von offenporigen Asphalten (und den daraus resultierenden Auswirkungen auf Entwässerung und Lärminderung) ist in der Vergangenheit häufig mit Versuchen, die Schicht nass oder trocken zu reinigen, begegnet worden. Sowohl die erprobten Reinigungsmethoden (inkl. Reinigungsgeschwindigkeit) als auch die (wirtschaftlich und akustisch optimalen) Reinigungsintervalle sind dabei zum Teil sehr verschieden. Es liegen nur wenige systematische Studien vor, die hinsichtlich des Reinigungserfolgs eine vergleichende Betrachtungsweise der angewandten Methoden erlauben würden.

Nachweis der Reinigungsfunktion

Die verschiedenen Untersuchungen sind untereinander auch nicht objektiv vergleichbar, da häufig Vorher-Nachherbetrachtungen der Wasserdurchlässigkeit als Zeiger einer Reinigungswirkung durchgeführt werden. Hierbei werden jedoch unterschiedlichste Verfahren(sweisen) der Durchlässigkeitsmessung bzw. Ausflussmessung von Wasser⁵⁵ und teilweise Luft benutzt (z.B. [112][129][185]). Die in anderen Studien angewendete Bestimmung der rückgewonnenen Schmutzmenge ist dahingehend ein uneindeutiger Parameter, dass meist nur der Absolutwert bestimmt werden kann, weil die in der Schicht aktuell vorhandene Schmutzmenge nicht bekannt ist (sogar Schätzungen fallen hier sehr schwer, s. auch Kap. 4.1.1, Tabelle 1). Der indirekte Nachweis des Reinigungserfolgs über vergleichende Lärmpegelmessungen (z.B. SPB- oder CPX-Messungen) oder die Messung (akustischer) Absorberparameter wie Strömungswiderstand oder

⁵⁵ nach dem Messprinzip der fallenden Spiegelhöhe

Schallabsorptionsgrad in situ ist dagegen häufig zielführender, da der „Zielparameter“ der Reinigung, die Erhaltung der Lärminderung, unmittelbar nachgewiesen werden kann. Pegelmessungen haben überdies den Vorteil, dass sie eine flächige (und nicht nur punktuelle) Wirkungskontrolle auf der Fahrbahnoberfläche ermöglichen und dabei alle geräuscherzeugenden Eigenschaften der Schicht (Textur, Entlüftungsverhalten, Schallabsorption) automatisch einbezogen werden. Auch in den Versuchen, die in Kapitel 5 beschrieben sind, hat sich gezeigt, dass die Messung von Absorberparametern den Grad der Verschmutzung deutlicher anzeigen kann als entwässerungstechnische Parameter.

Prinzipielle Reinigungsverfahren

Die zur Reinigung am häufigsten verwendete Verfahrensweise ist das Reinigen mit Wasser, das mit Hilfe von Düsen unter hohem Druck in die Schicht eingespritzt und anschließend das Schmutz-Wasser-Gemisch abgesaugt wird (z.B. [102][112][181]). Variiert werden dabei Düsentypen und -anordnungen (Abstand zur Oberfläche, Aufprallwinkel, Rotation, ggf. zusätzlich Vibration), Druck und Wassermengen, so dass eine hohe Reinigungsleistung erzielt wird, ohne jedoch Kornausbrüche und Schädigungen des Porengerüsts zu provozieren. Hoher Druck kann dabei mutmaßlich vor allem an Porenverschlüssen aufgebaut werden, wodurch sich diese lösen lassen müssten. Im günstigsten, aber eher unwahrscheinlichen Fall lassen sich zusätzlich (verkrustete) Schmutzanlagerungen an den Porenwandungen und Schmutzagglomerationen in endenden Poren beseitigen. Die Lockerung von hartnäckigen Verkrustungen ist ebenso zweifelhaft, da das Wasser vor der Absaugung nur eine sehr kurze Verweilzeit in der Schicht hat. Diese These wird indirekt dadurch bestätigt, dass die Reinigungsleistung nach Niederschlägen bei durchnässter OPA-Schicht von mehreren Autoren als höher beschrieben wird (z.B. [112]). Wie Messungen der TU München zeigen, ist das Vordringen der oberflächlich aufgebracht hohen Drücke in tiefere Bereiche der OPA-Schicht kaum möglich, zudem ist der erzeugbare Unterdruck (durch Absaugen) in der Schicht sehr gering [186][187]. Das Reinigungsverfahren hat weiterhin den Nachteil sehr geringer möglicher Arbeitsgeschwindigkeiten von ca. 1-3 km/h [129].

Ein neueres Verfahren aus den späten 1990-er Jahren stellt die sogenannte Sandwichmethode dar [188]. Auf die offenporige Schicht wird eine Zellgummiplatte (ca. 7,5 x 3,5 m), die unter einem Lkw mitgeführt wird, aufgedrückt und die OPA-Schicht somit nach oben abgedichtet. Sie liegt zwischen Abdichtungsschicht und Zellgummiplatte wie in einem „Sandwich“. Wasser wird in der Mitte der Gummiplatte in die Schicht gepresst und an den Rändern der Platte wieder abgesaugt, so dass das Wasser in horizontaler Richtung die Poren durchströmt. Durch die dadurch hervorgerufene längere Einwirkdauer des Wassers wird eine höhere Reinigungsleistung erwartet. Der Reinigungsfortschritt beträgt jedoch durch die statische Verfahrensweise lediglich ca. 0,5 km/h.

In japanischen Versuchen wird erprobt, lediglich mit Druckluft (Erzeugung eines Überdrucks) offenporige Schichten zu reinigen [189][190]. Große Vorteile werden in der größeren Reinigungsgeschwindigkeit (10-20 km/h) und dem Entfallen der Mitführung von Wassertanks gesehen, ein großer Nachteil besteht in dem durch die sehr kurzen (wöchentlichen) Reinigungsabstände hohen betrieblichen Aufwand.

Die Reinigungsintervalle betragen in der Realität häufig ein halbes bis ein Jahr (z.B. [102][181]), obwohl kürzere (monatliche) Abstände zwischen den Reinigungen potentiell erfolversprechender wären.

Alle eingesetzten Reinigungsverfahren sind bisher hinsichtlich der teilweisen Wiederherstellung der ursprünglichen akustischen Wirkung von eher geringem Erfolg gewesen.

Prinzipiell bestünde eine weitere Möglichkeit in einer reinen Luftabsaugung von Schmutzpartikeln. Allerdings zeigen grundlegende Untersuchungen der TU München, dass bei luftabsaugenden Verfahren die erzeugten Unterdrücke in tieferen Bereichen des OPA sehr gering sind⁵⁶. Zudem sind die durch Unterdruck maximal erzeugbaren Drücke stark begrenzt (Differenz Luftdruck-Vakuum) [187]. Weitere denkbare Reinigungsprinzipien und -verfahren wie beispielweise eine Reinigung mit Ultraschall oder Wasserdampf bedürfen Erprobungen und weitergehenden Untersuchungen.

Bei der Entwicklung von Reinigungsverfahren ist grundsätzlich zu hinterfragen, ob das Prinzip, möglichst große Mengen Schmutz aus der OPA-Schicht wieder zu entfernen, hinsichtlich der Wiederherstellung der akustischen Funktionen die einzige Möglichkeit darstellt. Denkbar ist eine bloße Umlagerung von Schmutzpartikeln innerhalb der Schicht an Stellen, an denen die akustischen Auswirkungen geringer sind. Beispielsweise könnte das bloße Lösen von Verstopfungen der Porenverbindungen (ohne Entfernen des Schmutzes aus der Schicht) und das Transportieren des Schmutzes an die Unterkante der Schicht bereits wesentliche Verbesserungen bringen. Die Verringerung des Strömungswiderstands sowie die Erhöhung der zugänglichen Porenräume (Porosität) haben positiven Einfluss auf das Schallabsorptionsverhalten (s. dazu auch Kap. 4.1.2, 7.1 und 7.2).

4.3 Lösungsansatz Materialmodifizierung

Dem Verfahren der Reinigung von offenporigen Asphaltdeckschichten, das sowohl technisch noch nicht ausgereift ist als auch aufgrund des Aufwands wirtschaftliche Nachteile besitzt, wird ein weiterer Ansatz zur Lösung des Verschmutzungsproblems entgegengesetzt bzw. hinzugefügt. Durch gezielte Modifizierung der Poren bzw. der Porenwandungen sollen die Schmutzanhaftung und die dadurch entstehenden weiteren Verschmutzungsphänomene (s. Kap. 4.1.2) verringert werden bzw. durch die Schaffung schmutzabweisender Oberflächen die Reinigung wesentlich erleichtert werden. Die in Betracht gezogenen Lösungsansätze einschließlich der dafür benötigten Grundlagen sowie Ergebnisse von Machbarkeitsuntersuchungen und Wirksamkeitsanalysen werden im folgenden beschrieben.

4.3.1 Mögliche Strategien/Vorgehensweisen

Die Modifizierung der Porenwandungen in OPA-Deckschichten mit dem Ziel der Verringerung der Verschmutzung kann auf unterschiedliche Weise erreicht werden:

(1) Beschichtungen, die die Rauheit der Porenwandungen verringern bzw. ausgleichen und dadurch die Schmutzanlagerung erschweren.

Durch die Glättung der Rauheit sollen Mikrohaftstellen, an denen sich Schmutzpartikel bevorzugt ablagern, eliminiert werden. Voraussetzung für die Wahl einer geeigneten Beschichtung und einer optimalen (Beschichtungs-)Filmdicke ist die Kenntnis der Mikrorauheiten der Porenwandungen.

⁵⁶ Allerdings sind höhere Unterdrücke als bei Absaugung mit vorheriger Wassersättigung feststellbar.

(2) Beschichtungen, die schmutzabweisende Oberflächeneigenschaften erzeugen und dadurch die Schmutzanhaftung an den Porenwänden des OPA erschweren bzw. die Auswaschung des Schmutzes erleichtern.

Eine schmutzabweisende Wirkung kann prinzipiell durch verschiedene gegensätzliche Oberflächeneigenschaften erzeugt werden. Eine Möglichkeit besteht in der Erzeugung von sehr hydrophilen („superhydrophilen“) Oberflächen. Der Schmutz kann an dieser Oberfläche generell anhaften, die Entfernung durch Wasser (Niederschlag oder künstliche Reinigung) ist jedoch dadurch erleichtert, dass das Wasser nahezu komplett spreiten und die Oberfläche aufgrund der sehr hydrophilen Eigenschaften fast vollständig benetzen kann. Dadurch entsteht ein sehr dünner Wasserfilm, der die Schmutzpartikel unterspülen und somit von der Oberfläche abschwemmen kann (s. Abbildung 12, links).

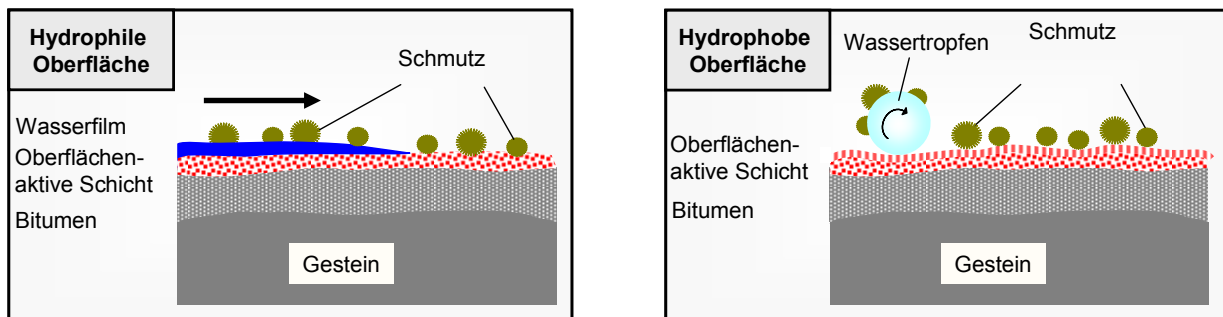


Abbildung 12: Schmutzabweisende Oberflächen in den OPA-Poren; links: sehr hydrophile Oberfläche, rechts: hydrophobe, mikrorau Oberfläche („Lotuseffekt“)

Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine Oberfläche zu erzeugen, die zum einen stark hydrophobe Eigenschaften aufweist und zum anderen gleichzeitig eine sehr feine Mikrostruktur besitzt. In Anlehnung an die Natur spricht man bei einer solchen Oberflächengestalt und den dadurch hervorgerufenen Eigenschaften vom sogenannten „Lotuseffekt“ (s. Abbildung 12, rechts). Wasser kann die Porenwänden wegen der stark wasserabstoßenden Wirkung nicht benetzen und kann daher auch nicht in die Mikrostruktur der Porenoberfläche eindringen. Vielmehr bewegt sich Wasser nur mit minimaler Kontaktfläche an der Oberfläche dieser feinen hydrophoben Rauheitsstruktur. Schmutz kann ebenfalls nicht in die mikrorau Porenoberfläche eindringen; daher entstehen nur wenige Kontakt- bzw. Anhaftungsstellen an der Oberfläche. Somit ist die Anhaftung des Schmutzes relativ schwach, Wasser kann den Schmutz durch seine hohe Oberflächenspannung leicht aufnehmen bzw. an sich binden und von der Porenoberfläche abspülen.

Bei den vorgestellten Beschichtungsverfahren (Strategie 1 und 2) wird das Beschichtungsmaterial in flüssiger Form⁵⁷ grundsätzlich nachträglich in die fertig eingebaute Asphaltsschicht eingebracht. Die Beschichtungen müssen hinsichtlich grundsätzlicher Anforderungen wie Haftfähigkeit, Verträglichkeit mit dem Bitumen und Wirksamkeit sowohl materialeseitig als auch bezüglich der Vorgehensweise optimiert werden. Dabei spielen der Zeitpunkt des Beschichtens (im heißen oder im abgekühlten Zustand), die Frage des Aufbringens von Druck (drucklose Flutung vs. Einbringung unter Druck) und der Umgang mit überschüssiger Beschichtungssuspension (Absaugung vs.

⁵⁷ Suspension aus Trägerflüssigkeit (Wasser), festen Beschichtungspartikeln und ggf. weiteren Zusätzen

Ablauf der Suspension durch die Schicht und an der Unterkante) eine wesentliche Rolle. Entscheidend für den Beschichtungserfolg ist die Viskosität. Sie sollte so eingestellt werden, dass die Beschichtung in möglichst viele (auch enge) Bereiche des Porenengerüsts vordringen kann, die Porenoberfläche dort gleichmäßig beschichtet, ohne dabei jedoch die Porenstruktur wesentlich zu verengen bzw. zu verstopfen. Um ein adäquates Vorgehen hinsichtlich der Beschichtung ermitteln zu können, ist es deshalb auch notwendig, bestimmte Eigenschaften von offenporigen Asphaltdecken zu ermitteln. Dazu zählen insbesondere die Ermittlung der Rauheit der Porenoberfläche und die Visualisierung von typischen Porengrößen und -formen (s. Kap. 4.3.2).

(3) Zugabe selbst-stratifizierender, oberflächenaktiver Polymere in das Asphaltmischgut (vor dem Einbau der Schicht in situ), welche die unter (2) beschriebenen schmutzabweisenden Effekte nach dem Auskühlen der eingebauten Schicht bewirken.

Die Zugabe von Polymeren zur gezielten Veränderung bestimmter Eigenschaften von Asphaltbaustoffen ist sowohl bereits bei der Herstellung von Bitumen als auch bei der Mischung von Asphalt in der Mischanlage ein durchaus übliches Verfahren. Meist wird mit dem Einsatz von Polymeren im Straßenbau versucht, auf bautechnische Eigenschaften wie Widerstand gegen Verformung, Ermüdungsverhalten, Temperatur- und Alterungsverhalten und damit letztendlich auf die Dauerhaftigkeit und Langlebigkeit der Straßenkonstruktion einzuwirken (s. auch Kap. 3.3.2).

Zur Erzeugung schmutzresistenter Oberflächen werden dem Asphaltmischgut bzw. dem Bitumen bereits während des Mischvorgangs Polymere beigemischt. Die Polymere, die im heißen Zustand nach dem Mischen noch gleichmäßig und fein in der Bitumenmatrix verteilt sind, steigen während des Erkaltes der Asphaltsschicht bzw. des Bitumenfilms durch kontrollierte Entmischung aus dem Bitumen an die Grenzfläche zur Luft auf (selbst-stratifizierender Effekt, s. Abbildung 13) und bilden dort eine Polymerschicht, die der Oberfläche schmutzabweisende Charakteristika verleiht. Bei dieser Art der Erzeugung der gewünschten Oberflächeneigenschaften entfällt der zusätzliche Arbeitsschritt der nachträglichen Beschichtung.

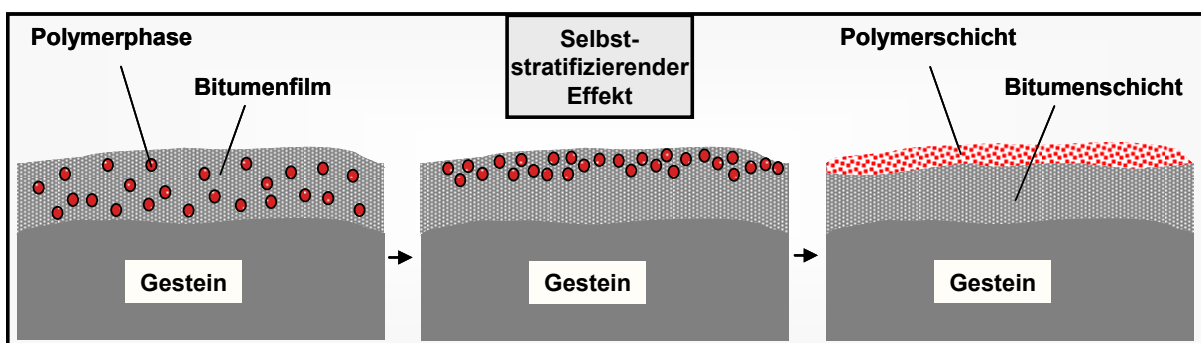


Abbildung 13: Entmischung von Polymer- und Bitumenphase während der Abkühlung (selbst-stratifizierender Effekt)

Die Zugabe von stratifizierenden Polymeren mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften wird hinsichtlich notwendiger Zugabemenge und Mischvorgang (Temperatur und Mischzeit), Auftreten des stratifizierenden Effekts durch Oberflächenanalytik (Kontaktwinkelmessung) sowie schmutzabweisender Wirkung untersucht. Die Ermittlung von sich typischerweise in offenporigen Asphalten einstellenden (mittleren) Bitumenfilmdicken auf den Mineralstoffen (s. Kap. 4.3.3) dient der Abschätzung, inwieweit sich der erwartete selbst-stratifizierende Effekt einstellen kann.

4.3.2 Porenstruktur und Rauheit der Porenwandungen

Porenstruktur

Die Kenntnis der Porenstruktur ist für die Wahl von geeigneten Beschichtungsmaterialien und -verfahren von entscheidender Bedeutung. Sie kann beispielsweise durch CT-Aufnahmen (z.B. [187]) oder an Dünnschliffen [182] sichtbar gemacht werden.

Die struktur- und formbildenden Elemente des Porengerüsts liegen im Größenordnungsbereich der Makrotextur bzw. des eingesetzten Größtkorns. Die Durchmesser der (zu beschichtenden) Poren in offenporigen Asphalten betragen demnach zwischen < 1 mm und ungefähr dem jeweiligen Größtkorndurchmesser; Verbindungen zwischen größeren Poren können durchaus noch enger sein. Die einzelnen Poren, die untereinander verbunden sind, können von der Form her sowohl gedrunken und tendenziell kugelförmig als auch kanalförmig und länglich (Porenverbindungen) sein. Die Streubreite von Form und Größe der Poren ist enorm, die Ableitung typischer Kennwerte daher kaum möglich. Aufgrund der teilweise sehr engen Porenverbindungen sollte die Beschichtungssuspension jedoch möglichst niedrig-viskos eingestellt werden, um Verstopfungen und negative Folgen für das Schallabsorptionsverhalten möglichst vermeiden zu können (s. auch Kap. 4.1.2).

Rauheit der Porenwandungen

Ausbruchstücke aus labormäßig hergestellten Probekörpern und Bohrkernen aus OPA-Decken in situ⁵⁸ sind zur Ermittlung von typischen Rauheitsmustern unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht worden [183].

Die Rauheit der Porenwandungen kann als sehr inhomogen charakterisiert werden; regelmäßige Strukturen, aus denen sich charakteristische Rauheitsprofile ableiten lassen, sind nicht zu erkennen. Der Bitumenfilm selbst weist nur äußerst feine Rauheiten im Vergleich zu anderen rauheitsbildenden Phänomenen auf. Vielmehr treten einzelne, unregelmäßige Rauheitsspitzen, die durch Füllpartikel, Fasern oder Gesteinsrauheiten verursacht werden und dazwischen liegende ausgeprägte Rauheitstäler mit relativ glatten Bitumenoberflächen, auf [183].

Abbildung 14 veranschaulicht glatte Bitumenfilme (1), freiliegende bzw. sich abzeichnende Rauheiten des Mineralstoffs (2) und Zellulosefasern (3) als Rauheitsbildner. Füllpartikel (4) spielen eine gewichtige Rolle bei der Entstehung der Mikrorauheit der Porenwandungen. Sie treten entsprechend der Korngrößenverteilung des Füllmaterials in sehr unterschiedlichen Größen auf (5)(6).

Da anhand der Untersuchungen keine einheitliche Rauheitsstruktur der Porenwandungen festgestellt werden kann, ist die Wahl einer geeigneten Beschichtung, die den reinen Ausgleich der Porenrauheit als Ziel hat (Strategie 1), als schwierig einzuschätzen. Deshalb sind vielmehr vertieft die Strategien 2 und 3 verfolgt worden (s. Kap. 4.3.4).

⁵⁸ aus der Rollspur der BAB A 3 bei Siegburg, zweilagig 11/16 (unten) und 2/5 (oben), Alter ca. 2,5 Jahre

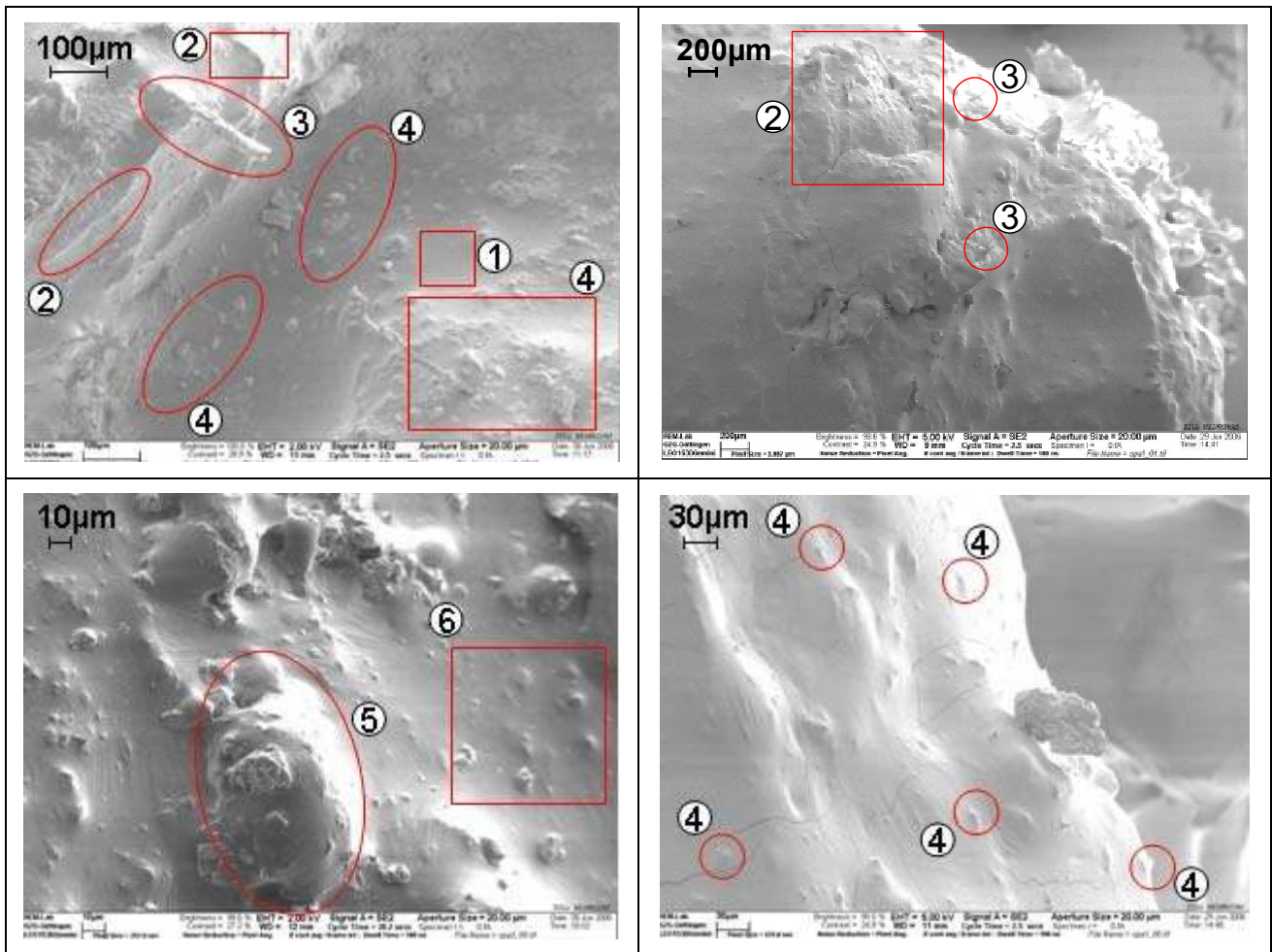


Abbildung 14: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Poreninnenwandungen in unterschiedlichen Vergrößerungen zur Bestimmung der Mikrorauheiten [183]

4.3.3 Bitumenfilmdicken

Die auf den Mineralstoffen auftretenden Stärken des Mörtel- bzw. Bitumenfilms sind eine wichtige Eingangsgröße für die Stratifizierungsversuche an Bitumenfilmen sowie für die Auswahl der hierfür geeigneten Polymere.

Aus den Polarisationsmikroskopieaufnahmen der Dünnschliffe [182] werden an geeigneten Bildern Mörtel- bzw. Bitumenfilmdicken auf den mineralischen Zuschlagstoffen abgegriffen und gemessen. Die auf diese Weise gewonnenen Werte werden statistisch ausgewertet.

Aus den Polarisationsmikroskopiebildern werden lediglich solche Bitumenfilme in die Betrachtung mit einbezogen, die eine Pore begrenzen, also zwischen Mineralstoff und Porenraum (Luft) liegen. Bitumenfilme, die zwei Mineralstoffkörner miteinander verbinden, werden nicht in die Auswertung mit einbezogen, da sie keinen Porenraum umschließen.

Die statistische Auswertung ergibt eine mittlere Bitumenfilmdicke von 150 µm bei einer Standardabweichung von 120 µm. Die Häufigkeitsverteilung der ermittelten Bitumenfilmdicken ist in Abbildung 15 wiedergegeben. Das Histogramm zeigt eine stark rechtsschiefe Verteilung (Schiefe 2,07) mit einer Häufung der Werte ungefähr um den Wert 100 µm (+/- 50 µm).

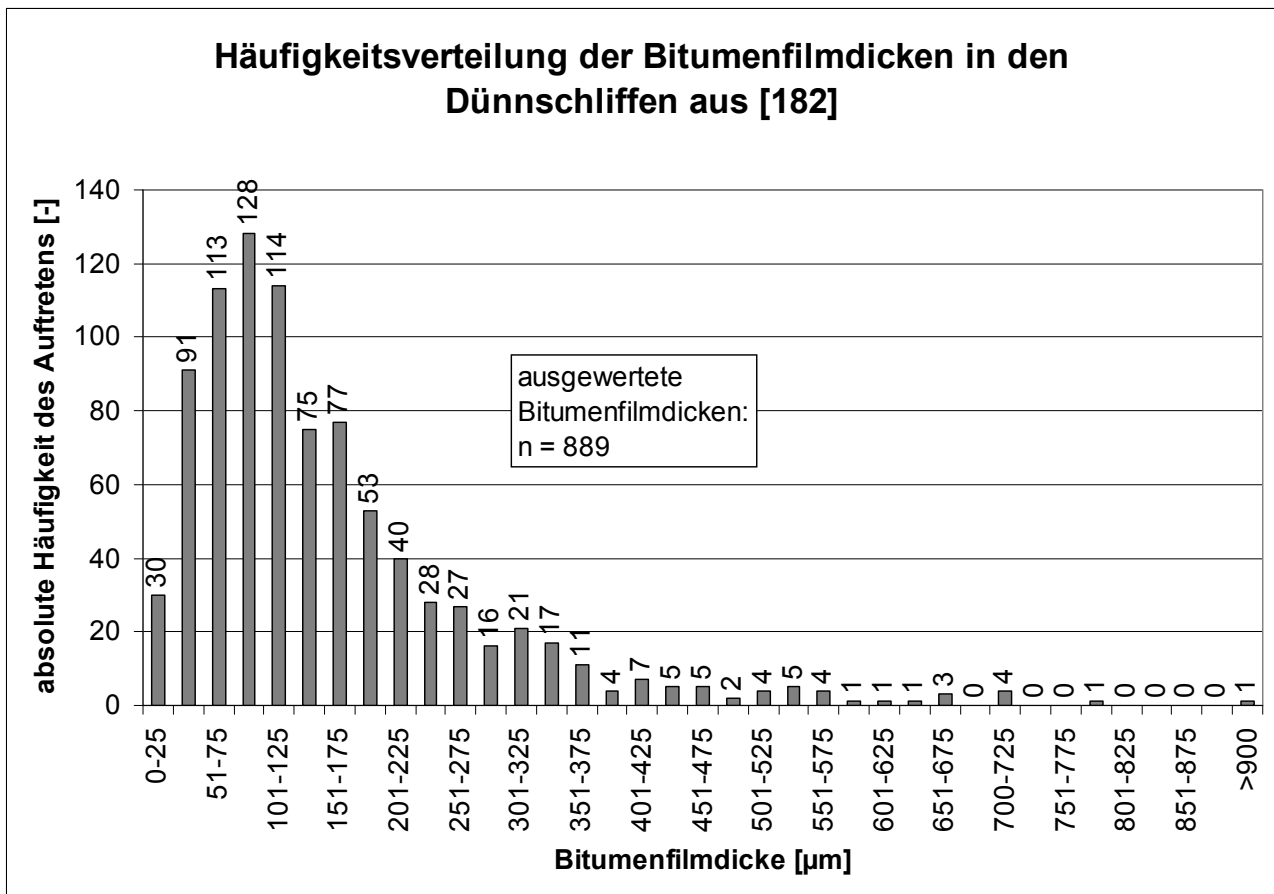


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Bitumenfilmdicken in den Dünnschliffen aus [182]

4.3.4 Folgerungen für die erprobten Strategien und Erfahrungen

Beschichtung

Die Ergebnisse der Vorversuche mit Beschichtungsmaterial auf Basis einer handelsüblichen Dispersionsfarbe zeigen eine sehr gute Haftfähigkeit auf Bitumenfilmen [186].

An zwei Probekörpern (2,5 m²), die zur Wirkungsanalyse nach der Beschichtung Verschmutzungsversuchen (s. Kap. 5) unterzogen werden, ist ein Verfahren zur Beschichtung erprobt worden. Es werden zwei grobkörnigere OPA-Varianten (OPA 0/11 und ZWOPA 0/8_0/16 nach Materialspezifikationen aus Kap. 5.1.1) für die Beschichtungsversuche herangezogen, um Verstopfungsphänomenen durch Ablagerungen des Beschichtungsmaterials von vornherein durch größere Porenvolumen weitgehend vorzubeugen. Die Beschichtung wird wie in den Vorversuchen in einer wässrigen Suspension mit einer Verdünnung von 90 % auf die OPA-Probekörper aufgebracht.

Die flüssige Beschichtung wird in einer definierten Menge gleichmäßig auf die mit 2,5 % Neigung gelagerten Probekörper aufgegossen. Die Suspension sickert rein durch die Schwerkraft und hydrostatischen Druck in die Poren des OPA ein; es wird kein zusätzlicher Druck oder Sog aufgebracht. Eine Vollsättigung des Porenraums wird dadurch nicht erreicht, was aber auch nicht angestrebt wird. Die Poren werden nicht vollflächig verkleidet, die Beschichtung lagert sich aber durch die Verfahrensweise hauptsächlich an Stellen ab, an denen vergleichsweise geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorherrschen und die dadurch als besonders verschmutzungsanfällig

(bezüglich Schmutzablagerungen) angesehen werden können. Eine nachträgliche Absaugung nach dem Eintrag der Beschichtung findet nicht statt; die überschüssige Beschichtungssuspension fließt an der Unterkante des OPA in Richtung der Neigung allein durch die Schwerkraft nach und nach ab.

Es kann anhand von Vorher-Nachher-Messungen des längenspezifischen Strömungswiderstands Ξ (s. Kap. 5.2.1) gezeigt werden, dass die eingebrachte Beschichtung hinsichtlich dieses sich gegenüber Verschmutzungen sehr sensibel verhaltenden Parameters keine Auswirkungen zeigt. Befürchtungen, dass durch das Beschichtungsmaterial Poren verstopft und der zusammenhängende Hohlraum unterbrochen werden könnten, haben sich demnach nicht bestätigt.

Deposition und Filmdicken der eingebrachten Beschichtung können jedoch selbst durch Zugabe von Kontrastmittel⁵⁹ in die Beschichtungssuspension und nachfolgender Computertomographie nicht sichtbar gemacht werden.

Eine Abnahme der Griffigkeit an der Kontaktfläche zwischen Straßenoberfläche und Reifen durch die Beschichtung wird nicht befürchtet, da sich der dünne Beschichtungsfilm durch Überfahung schnell abreiben und sich nachfolgend eine vergleichbare Griffigkeit zu herkömmlichen OPA-Decken einstellen dürfte (s. auch Kap. 3.3.2.6).

Beimischung von Polymer und stratifizierender Effekt

Zur Überprüfung der grundsätzlichen Machbarkeit und des Nachweises des auftretenden stratifizierenden Effekts werden dünne, plane Bitumenfilme mit Polymerbeimischungen auf Stahlblechen in einer Dicke, wie sie üblicherweise in offenporigen Asphalten vorkommen (s. Kap. 4.3.3) aufgetragen. Die erkalteten Bitumenfilme werden Oberflächenanalysen in Form von Kontaktwinkelmessungen unterzogen, um eine Hydrophilierung bzw. Hydrophobierung nachweisen zu können. Weiterhin werden einfache Schmutzabwaschversuche durchgeführt [186].

Nach Vorversuchen mit mehreren potentiell geeigneten Polymeren sind das amphipolare Blockcopolymer P(E₁₆EO₄₀) und ein weiteres Polymer auf Polydimethylsiloxanbasis (TEGOPREN 6846 der Fa. Evonik Goldschmidt GmbH) weitergehend untersucht worden, da diese nach Vorversuchen aufgrund der ausgeprägten Hydrophilierung bzw. Hydrophobierung der Bitumenoberfläche und der damit einhergehenden schmutzabweisenden Wirkung als besonders geeignete Additive erscheinen [186].

Für das Blockcopolymer P(E₁₆EO₄₀) wird unabhängig von den zugesetzten Anteilen (für die Oberflächenwirksamkeit sind gemäß Vorversuchen mehr als 2 M.-% notwendig) und der Gesteinsart (geprüft wurden Grauwacke und Granit) anhand von Prüfungen nach [149] eine extrem schlechte Haftung des Bitumens am Gestein beobachtet, weshalb der Einsatz dieses Polymers nicht weiter verfolgt wurde [186]. Aufgrund der starken Oberflächenwirkung ist aber prinzipiell zukünftig in Erwägung zu ziehen, zusätzlich einen Haftvermittler zwischen Bitumen und Gestein einzusetzen, um das Polymer ggf. doch in OPA-Mischgut einsetzen zu können.

TEGOPREN 6846 hingegen zeigt keine Auffälligkeiten im Haftverhalten und wird daher weitergehenden Betrachtungen und Untersuchungen unterzogen [186].

⁵⁹ Bariumsulfat

Die Einmischbarkeit von TEGOPREN 6846, das in Pellet-Form vorliegt, in das Asphaltmischgut wird im Labormaßstab (Mischungen zu je 50 kg Mischgut) in Mischversuchen untersucht. Durch den niedrigen Schmelzpunkt kann das Polymer in der Bitumenmatrix auch bei kurzen Mischzeiten vollständig aufgeschmolzen und augenscheinlich gleichmäßig verteilt werden, so dass es möglich sein sollte, das Polymer in dieser Form auch potentiell großtechnisch in Asphaltmischanlagen einzusetzen [187].

Um ungewollte negative Auswirkungen der Materialmodifizierungen, insbesondere der Beimischungen auf die Gebrauchstauglichkeit einer Straßendeckschicht auszuschließen, werden asphalttechnologische Versuchsreihen durchgeführt. Im einzelnen werden folgende Prüfungen durchgeführt, die allesamt keine Auffälligkeiten zeigen:

- Spaltzugversuche [150] zum Nachweis der Festigkeit und eines eventuellen Festigkeitsverlusts durch Ablöseerscheinungen des Bitumens vom Gestein durch Wasserzutritt [151] (damit auch indirekter Nachweis der Affinität des modifizierten Bitumens zum Gestein) (s. auch Kap. 3.3.2.2)
- Zusätzlicher Nachweis der Affinität zwischen Bitumen und Gestein durch Rolling-Bottle-Versuche [149] (s. auch Kap. 3.3.2.2)
- Prüfung der Verformungsbeständigkeit durch Spurbildungsversuch [191] (s. auch Kap.3.3.2.4)
- Prüfung des Temperatur- und Plastizitätsverhaltens des rückgewonnenen modifizierten Bitumens anhand von Nadelpenetration [192] und Erweichungspunkt [193]. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass die im Mischgut entmischt vorliegende Polymerphase bei der Rückgewinnung wieder (in nicht bekanntem Maße) in der Bitumenphase verteilt wird.

Die schmutzabweisende Wirkungsweise sowie sich verändernde Benetzungseigenschaften der Porenwandungen durch Beschichtung bzw. Polymerbeimischung im komplexen Baustoff Asphalt sind ebenso wie die Auswirkungen des veränderten Verschmutzungsverhaltens auf das Schallabsorptionsverhalten nur durch kontrollierte Modell-Verschmutzungsversuche unter definierten Bedingungen nachweisbar (s. Kap. 5).

5 Versuche zur Bestimmung des Verschmutzungsverhaltens

5.1 Modellversuche zur Untersuchung des Verschmutzungsverhaltens

5.1.1 Untersuchungsmethodik

Durch kontrollierte Beregnung von Probekörpern (1,00 m x 2,50 m) aus offenporigem Asphalt (s. auch Abbildung 16) sollen Schmutzpartikel⁶⁰, die zuvor in definierten Mengen auf die Oberfläche aufgetragen werden, in den OPA eingeschwemmt (und teilweise wieder ausgeschwemmt) werden. Hiermit soll der Prozess der Verschmutzung des OPA als definierter Verschmutzungs- bzw. Lebenszyklus möglichst realitätsnah im Zeitraffer nachgebildet werden. Der Schmutzeintrag geschieht dabei allein durch die Beregnung bzw. die dadurch erzeugte Wasserströmung in der Porenstruktur. Transportvorgänge des Schmutzes durch Verkehr, die durch Reifenüberrollungen und dadurch entstehende Druckimpulse⁶¹ entstehen, können im Versuch nicht realistisch simuliert werden, weshalb zugunsten eines reproduzierbaren Versuchsablaufs darauf verzichtet wird.

Es werden drei unterschiedliche Verschmutzungszyklen im Versuch nachgebildet, die in den folgenden Verschmutzungsgraden mit entsprechenden Mengen, die in mehreren einzelnen Schritten in den OPA eingebracht werden, resultieren:

- 480 g/m² Gesamtschmutzauftrag („schwach“)
- 960 g/m² Gesamtschmutzauftrag („mittel“)
- 1440 g/m² Gesamtschmutzauftrag („stark“)

Mit den gewählten Mengen sollen unterschiedliche Liegedauern von OPA-Decken nachempfunden werden; als Anhaltswerte für die Mengen dienen die Untersuchungen in Kap. 4.1.1 sowie Erfahrungswerte aus Bohrkernuntersuchungen an OPA-Decken mit unterschiedlicher Liegedauern [177]. Die Herstellung von direkten Zusammenhängen von im Versuch gewählten Schmutzmengen und Liegedauern von offenporigen Asphaltdecken ist aufgrund starker lokaler Schwankungen in situ und der fehlenden Simulation von Verkehr im Versuch nur sehr schwer möglich (s. auch Kap. 4.1.1).

In den Versuchen kommen folgende in Tabelle 2 näher spezifizierte OPA-Mischgutsorten und Schichtaufbauten zum Einsatz⁶². Als Bindemittel wird ein PmB 45 A (Olexobit 45[®]) nach den Spezifikationen der inzwischen ersetzten⁶³ TL PmB [194] verwendet. Die grobe Gesteinskörnung besteht aus Granit, als Füller wird Kalksteinmehl verwendet. Als Bindemittelträger werden Zellulosefasern in einer Menge von 0,5 M.-% eingesetzt.

⁶⁰ Künstlicher Schmutz nach Kap. 5.1.4

⁶¹ Aus der Literatur ist bekannt, dass diese Druckimpulse tendenziell der Verschmutzung entgegenwirken (s. auch Kap. 4.1.2), so dass in den Versuchen mit gleichen Schmutzmengen tendenziell höhere Verschmutzungsgrade erzeugt werden als in situ. Jedoch ist auch zu berücksichtigen, dass sich die Verschmutzungsmechanismen durch die fehlenden Überrollungen von denen in der Realität unterscheiden.

⁶² Spezifikationen laut Eignungsprüfung der TPA Bau- und Umwelttechnik GmbH vom 16.10.2006

⁶³ ersetzt durch TL Bitumen-StB Ausgabe 2007 [195]

Fragestellungen

Insgesamt werden auf diese Weise 14 OPA-Probekörper (2,5 m²) untersucht, die sich in Modifizierung, Schichtaufbau und -dicke sowie Verschmutzungsgrad unterscheiden (s. Tabelle 3). Aus diesen Versuchsreihen sollen systematisch vergleichend die Auswirkungen von Modifizierung und Verschmutzung in Abhängigkeit von Mischgutsorte und Schichtaufbau auf folgende Eigenschaften der offenporigen Asphalte untersucht werden:

- Akustisches Verhalten: frequenzabhängiger Schallabsorptionsgrad $\alpha(f)$, Entwicklung von Absorberparametern (Porosität σ , längenspezifischer Strömungswiderstand Ξ , Tortuosität τ , s. auch Kap. 6.2.2) durch Messung (s. Kap. 5.2) und Rechnung (s. Kap. 7.1 und 7.2).
- Entwässerungsverhalten (Wasserrückhaltevermögen, Spitzenabflussraten bei unterschiedlichen Beregnungsereignissen, zeitliche Verzögerung des Abflussverhaltens nach Beregnung⁶⁴)
- Schmutzauswaschverhalten durch Beregnung

Bezeichnung	OPA 0/8	OPA 0/11	ZWOPA 0/8_0/16		ZWOPA 0/5_0/11	
Schichtaufbau, Schichtdicke	einlagig, 4cm	einlagig, 4cm	untere Schicht, 4,5 cm	obere Schicht, 2,5 cm	untere Schicht, 4,5 cm	obere Schicht, 2,5 cm
Mischgutsorte	0/8	0/11	0/16	0/8	0/11	0/5
Hohlraumgehalt [Vol.-%] ⁶⁵	25,3	27,2	27,7	25,3	27,2	25,1
Bindemittelgehalt [M.-%] ⁶⁵	6,3	6,3	6,1	6,3	6,3	6,6
Kornverteilung des Mineralstoffgemischs [Anteile M.-%]⁶⁵						
0-0,09 mm	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7	3,7
0,09-0,25 mm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
0,25-0,71 mm						
0,71-2,0 mm						3,4
2,0-5,0 mm	4,5			4,5		87,9
5,0-8,0 mm	87,3	5,5		87,3	5,5	4,7
8,0-11,2 mm	4,2	87,4	4,1	4,2	87,4	
11,2-16,0mm		3,1	87,6		3,1	
16,0-22,4 mm			4,3			

Tabelle 2: Spezifikationen der in den Versuchen verwendeten Mischgutsorten und Schichtaufbauten

⁶⁴ Das Entwässerungsverhalten wird in dieser Arbeit nur randständig untersucht, es wird an dieser Stelle auf ergänzende Publikationen verwiesen (z.B. [186]).

Mischgut- sorte	Schichtaufbau, Schichtdicke	Verschmutzungs- grad	Modifizierung	Probe- körper Nr.
OPA 0/8	einlagig, 4 cm	480 g/m ²	unmodifiziert	1
		960 g/m ²		3
		1440 g/m ²		2
OPA 0/11	960 g/m ²	4		
ZWOPA 0/8_0/16	zweilagig, 7 cm obere Schicht 2,5 cm 0/8 untere Schicht 4,5 cm 0/16	480 g/m ²		6
		960 g/m ²		7
		1440 g/m ²		5
ZWOPA 0/5_0/11	zweilagig, 7 cm obere Schicht 2,5 cm 0/5 untere Schicht 4,5 cm 0/11	960 g/m ²		8
		keine Verschmutzung		17
OPA 0/8	einlagig, 4 cm	960 g/m ²		polymer- modifiziert
OPA 0/11			12	
ZWOPA 0/8_0/16			zweilagig, 7 cm obere Schicht 2,5 cm 0/8 untere Schicht 4,5 cm 0/16	beschichtet
	13			
	polymer- modifiziert			14
15				
		1440 g/m ²		

Tabelle 3: Systematik der beprobten OPA-Probekörper

5.1.2 Versuchsstand

In einem selbst konzipierten Versuchsstand, in dem 2,5 m² große OPA-Probekörper (s. Kap. 5.1.1) mit einer Neigung von 2,5 % gelagert werden können, wird die künstliche Verschmutzung in mehreren Einzelschritten durch automatische kontrollierte Beregnung mit definierten Wassermengen eingetragen. Zur realistischeren Simulation der Schmutzanlagerung an die Porenwandungen (s. auch Kap. 4.1.2) werden überdies Wärmebestrahlungen durchgeführt. Messtechnisch werden während den Beregnungen die aufgetragene Wassermenge und das Entwässerungsverhalten erfasst. Zusätzlich werden die ausgetragenen Schmutzmengen mit Hilfe von Laboranalysen durch Müller-BBM bestimmt.

Beregnung

Die OPA-Probekörper werden über insgesamt 6 Düsen aus einer Höhe von 1,40 m mit sauberem Wasser beregnet (s. Abbildung 16). Eine definierte Menge künstlich hergestellter Schmutz (s. Kap. 5.1.4) wird händisch vor jedem Verschmutzungsschritt gleichmäßig auf der Probekörperoberfläche verteilt. Durch die anschließende definierte Abfolge von Beregnungen (Beregnungsprogramme) wird der Schmutz nach und nach in die Poren eingespült (s. auch Abbildung 18).

Bei der Beregnung wird im Zulauf die verdünte Wassermenge gemessen (magnetisch-induktive Durchflussmessung). Aufgrund auftretender Verluste ist in Vorversuchen der Anteil des Wassers bestimmt worden, der bei Beregnung tatsächlich die OPA-Oberfläche erreicht und dort abläuft bzw. einsickert. Die eingesetzten Beregnungsprogramme zur Simulation des Lebenszyklus einer

Deckschicht werden von drei wesentlichen Eingangsüberlegungen bestimmt, die jedoch nicht komplett in Einklang gebracht werden können:

- möglichst realitätsnahe Regenereignisse hinsichtlich Intensität, Dauer und Niederschlagsmenge
- Simulation eines gesamten Lebenszyklus von mehreren Jahren im Zeitraffer von wenigen Tagen
- Quantitativer und qualitativer Nachweis der potentiellen Wirkungsweise der Modifizierung auf das Verschmutzungsverhalten

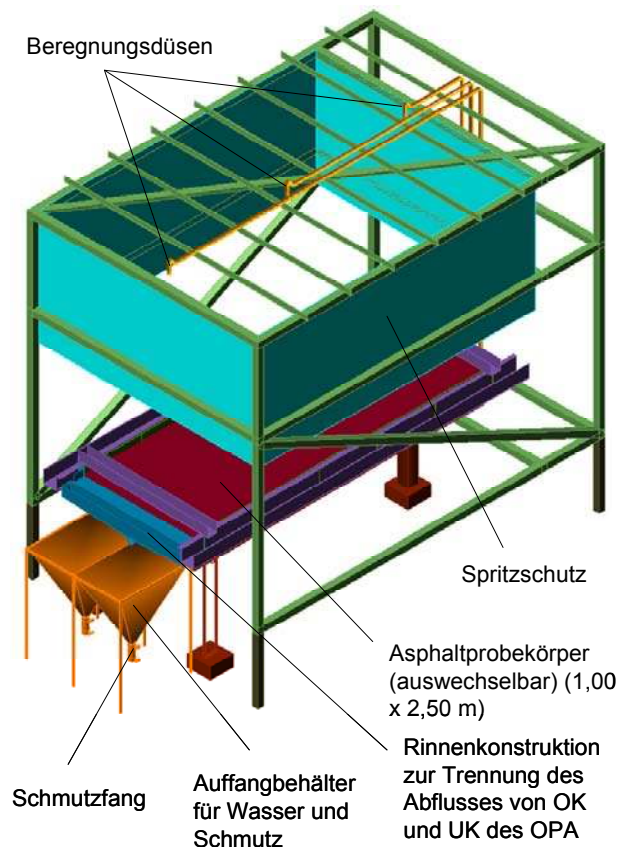


Abbildung 16: Versuchsstand zur Beregnung und Verschmutzung von OPA-Probekörpern

Auf diesen Überlegungen basieren die im Versuch angewendeten Beregnungsprogramme (s. Abbildung 17):

- Beregnungsprogramm 1 („Starkregenprogramm“): Simulation eines sehr starken Regenereignisses, das hohe Wasserdurchflüsse erzeugt und zu wesentlichen Teilen den Transport von Schmutzpartikeln durch die poröse Struktur bewirkt.
- Beregnungsprogramm 2 („Schwachregenprogramm“): Simulation einzelner schwächerer Regenereignisse⁶⁵ mit zeitlichem Abstand, um das Entwässerungsverhalten detaillierter beobachten zu können und dessen Charakteristika (z.B. Wasserrückhaltevermögen) bei geringerem Wasseranfall zu untersuchen.

⁶⁵ was in Realität trotzdem einem relativ starken Einzel-Regenereignis entspricht

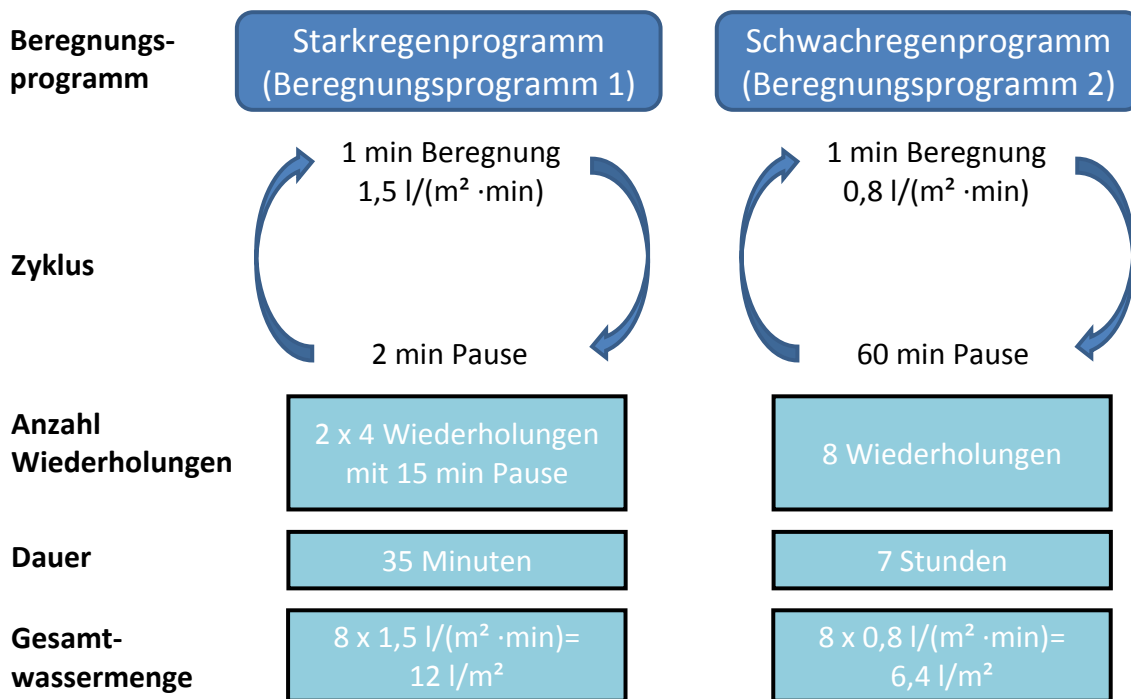


Abbildung 17: Ablaufschema der verschiedenen Berechnungsprogramme

Wärmebestrahlung

Die OPA-Probekörper werden durch Wärmestrahler, die zeitabhängig gesteuert werden, einem definierten Wärmeprogramm unterzogen. Im Versuchsablauf geschieht dies zeitlich gesehen nach der Beregnung sowie einem gewissen Trocknungszeitraum (s. Abbildung 18). Dadurch soll die Erwärmung der Deckschicht im Sommer und die damit (vermutlich) einhergehende verstärkte Verklebung von Schmutzpartikeln mit dem Bitumen nachempfunden werden (s. auch Kap. 4.1.2).

Schmutzauswaschung

Die OPA-Probekörper sind im Versuchsstand einem Gefälle von 2,5 % (Regelquerneigung im Straßenbau) ausgesetzt. Am tiefer liegenden Ende der Probekörper sind Rinnenabläufe angebracht, die das Wasser in zwei getrennte Auffangbehälter weiterleiten. Das anfallende Wasser wird dabei getrennt in einen oberflächlich abfließenden Teil und in den (komplementären) Teil, der in die Decke einsickert und durch den OPA bzw. an der Unterkante des OPA abläuft.

Die tetraedrischen Auffangbehälter besitzen jeweils einen Schmutzfang, in dem sich der ausgetragene Schmutz absetzen kann (s. Abbildung 16). Nach Abschluss eines jeden Verschmutzungsschritts wird der sedimentierte Schmutz bzw. das Schmutz-Wasser-Gemisch abgezogen und Müller-BBM für Laboruntersuchungen zur Massenbestimmung zur Verfügung gestellt. Zusätzlich wird nach jedem Verschmutzungsschritt aus dem aufgefangenen Schmutzwasser eine repräsentative Probe entnommen, um durch Filtrieren und Bestimmung des Filtrattrockenrückstands auch Schwebstoffe bestimmen zu können, die in einem gewissen Zeitraum nicht sedimentiert werden. Der Schmutzaustrag kann somit getrennt nach drei Hauptbestandteilen aufgeteilt werden:

- Sedimentierbare Schmutzpartikel (größere Korngrößen)
- Abfiltrierbare Schmutzpartikel („Schwebstoffe“, kleinere Korngrößen)

- Nicht filtrierbare Schmutzpartikel (sehr kleine Korngrößen und gelöste Stoffe)

Auf diese Weise kann eine Schmutzbilanzierung zwischen aufgetragenem und „ausgeschwemmtem“ Schmutz hinsichtlich der Masse angestellt werden.

Wasserabfluss

Über eine Drucksonde wird in dem Auffangbehälter, der das an der Unterkante des OPA abfließende Wasser fasst, das anfallende Wasservolumen in Abhängigkeit der Zeit sowie der kumulierte Wasserabfluss gemessen. Auf diese Weise kann das zeitabhängige Entwässerungsverhalten des OPA während und nach Abschluss eines Berechnungsprogramms erfasst und ausgewertet werden. Insbesondere können durch die Verschmutzung verursachte Änderungen des Drainagevermögens, des Rückhaltevermögens, der Wasserabflussraten und ggf. weiterer Parameter quantifiziert werden.

5.1.3 Simulation von Verschmutzungszyklen offenerporiger Asphalte

Ein kompletter Lebens- bzw. Verschmutzungszyklus setzt sich aus mehreren einzelnen Verschmutzungsschritten zusammen. Jeder Verschmutzungsschritt besteht chronologisch aus dem Schmutzauftrag, einem anschließenden Berechnungsprogramm (s. Kap. 5.1.2 und Abbildung 17), der Wärmebestrahlung und zusätzlichen Trocknungsphasen. Abbildung 18 zeigt schematisch den allgemeinen Ablauf eines Verschmutzungsschritts und die sich daraus ergebende Zusammensetzung des kompletten Verschmutzungszyklus eines Probekörpers.

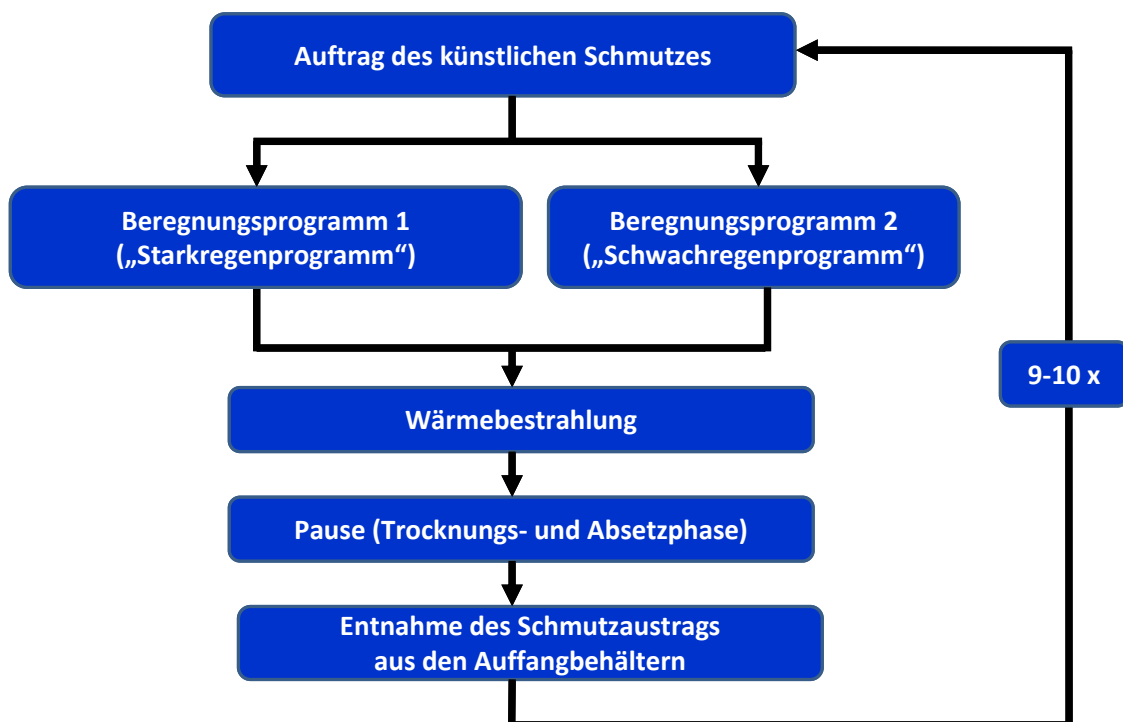


Abbildung 18: Allgemeines Ablaufschema eines Lebens- bzw. Verschmutzungszyklus

Die Versuchsparameter (Schmutzmenge, Berechnungsprogramme) der Lebenszyklussimulation eines Probekörpers unterscheiden sich für die unterschiedlichen Verschmutzungsgrade.

Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 480 g/m²

Abbildung 19 zeigt den (zeitlichen) Ablauf der neun Verschmutzungsschritte. Es werden in jedem Schritt 60 g/m² Schmutz auf den Probekörper aufgetragen. Die Beregnung setzt sich aus zwei Starkregenprogrammen und sieben Schwachregenprogrammen zusammen. Nach der Beregnung folgt in jedem Schritt die Wärmebestrahlung.

Verschm.- Schritt 1	Verschm.- Schritt 2	Verschm.- Schritt 3	Verschm.- Schritt 4	Verschm.- Schritt 5	Verschm.- Schritt 6	Verschm.- Schritt 7	Verschm.- Schritt 8	Verschm.- Schritt 9
Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²
Schwach- regen- programm	Schwach- regen- programm	Schwach- regen- programm	Starkregen- programm	Schwach- regen- programm	Schwach- regen- programm	Schwach- regen- programm	Schwach- regen- programm	Starkregen- programm
Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	
Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	
Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	

Abbildung 19: Ablauf des Verschmutzungszyklus für den Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 480 g/m²

Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 960 g/m²

Es kommen sechs Starkregenprogramme und drei Schwachregenprogramme zum Einsatz (s. Abbildung 20). Vor den Schwachregenprogrammen werden jeweils 60 g/m² Schmutz auf den Probekörper aufgetragen, vor den Starkregenprogrammen jeweils 140 g/m². Vor dem abschließenden Schwachregenprogramm wird kein weiterer Schmutz aufgetragen.

Verschm.- Schritt 1	Verschm.- Schritt 2	Verschm.- Schritt 3	Verschm.- Schritt 4	Verschm.- Schritt 5	Verschm.- Schritt 6	Verschm.- Schritt 7	Verschm.- Schritt 8	Verschm.- Schritt 9
Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 140 g/m ²	Schmutz- auftrag 140 g/m ²	Schmutz- auftrag 140 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 140 g/m ²	Schmutz- auftrag 140 g/m ²	Schmutz- auftrag 140 g/m ²	kein Schmutz- auftrag
Schwach- regen- programm	Starkregen- programm	Starkregen- programm	Starkregen- programm	Schwach- regen- programm	Starkregen- programm	Starkregen- programm	Starkregen- programm	Schwach- regen- programm
Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	
Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	
Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	

Abbildung 20: Ablauf des Verschmutzungszyklus für den Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 960 g/m²

Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 1440 g/m²

Im Verschmutzungszyklus, der zur stärksten simulierten Verschmutzung führt, werden sechs Starkregenprogramme und vier Schwachregenprogramme durchgeführt. Vor den Schwachregenprogrammen werden jeweils 60 g/m² Schmutz auf den Probekörper aufgetragen, vor den Starkregenprogrammen jeweils 210 g/m². Das abschließende Schwachregenprogramm wird ohne vorherigen Schmutzauftrag ausgeführt.

Verschm.- Schritt 1	Verschm.- Schritt 2	Verschm.- Schritt 3	Verschm.- Schritt 4	Verschm.- Schritt 5	Verschm.- Schritt 6	Verschm.- Schritt 7	Verschm.- Schritt 8	Verschm.- Schritt 9	Verschm.- Schritt 10
Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 210 g/m ²	Schmutz- auftrag 210 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 210 g/m ²	Schmutz- auftrag 210 g/m ²	Schmutz- auftrag 60 g/m ²	Schmutz- auftrag 210 g/m ²	Schmutz- auftrag 210 g/m ²	kein Schmutz- auftrag
Schwach- regen- programm	Starkregen- programm	Starkregen- programm	Schwach- regen- programm	Starkregen- programm	Starkregen- programm	Schwach- regen- programm	Starkregen- programm	Starkregen- programm	Schwach- regen- programm
Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	
Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	
Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	

Abbildung 21: Ablauf des Verschmutzungszyklus für den Verschmutzungszyklus mit End-Verschmutzungsgrad 1440 g/m²

5.1.4 Schmutzzusammensetzung

Die vorliegenden Korngrößenverteilungen von Bankettschälgut, Kehrgut, Nassreinigungsgut und direkt aus OPA-Schichten (s. Kap. 4.1.1) stammendem Schmutz bilden die Grundlage zur Herstellung des künstlichen Schmutzes für die Verschmutzungsversuche, die in Kap. 5.1 beschrieben werden.

Der künstliche Schmutz ist dabei im Vergleich zu den untersuchten realen Schmutzproben bewusst deutlich feiner zusammengesetzt worden (s. Abbildung 10). Damit wird berücksichtigt, dass der auf die Fahrbahnoberfläche gelangende Schmutz mehr Feinanteile besitzt als Schmutz, der durch Reinigung (in unterschiedlichsten Verfahrensweisen) von der Fahrbahnoberfläche zurückgewonnen wird. Als Begründung ist anzuführen, dass die Feinanteile (bei geschlossenen Deckschichten) mutmaßlich durch Regen im Gegensatz zu gröberen Bestandteilen verstärkt Richtung Bankett abtransportiert werden und daher in Reinigungsproben von der Fahrbahn (z.B. Kehrgut) unterrepräsentiert sind. Betrachtet man die Korngrößenverteilung von (feinem) Bankettschälgut in Abbildung 10, kann dies die vertretene These der vermehrten Abwaschung der Feinanteile von der Fahrbahnoberfläche zum Bankett hin bestätigen. Mit einer feineren Schmutzzusammensetzung kann zudem die Oberflächenwirkung der Modifizierung mutmaßlich deutlicher nachgewiesen werden.

Hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung des künstlichen Schmutzes kann anhand der Ergebnisse aus Kapitel 4.1.1 ein durchschnittlicher organischer Anteil von 8 M.-% angesetzt werden. Als Maßzahl für den organischen Anteil wird der Glühverlust verwendet. Von der Bundesanstalt für Straßenwesen ist zur Herstellung des künstlichen Schmutzes realer

Reifenabrieb aus einem Reifenteststand zur Verfügung gestellt worden. Dieser wurde durch Mörsern noch zerkleinert, um adäquate Korngrößen zu erhalten (der Organikanteil des Schmutzes findet sich hauptsächlich in sehr kleinen Korngrößen, s. Kap. 4.1.1). Der Reifenabrieb hat einen Glühverlust von 83,9 M.-% (bestimmt von Müller BBM) und ist daher nur zu diesem Prozentsatz bei der Mischung des künstlichen Schmutzes als organisch anrechenbar. Ein organischer Anteil von insgesamt 8 M.-% im künstlichen Schmutz konnte aufgrund zu geringer Mengen nicht allein mit dem Reifenabrieb erzielt werden. Aufgrund des relativ hohen TOC-Gehalts von realem Schmutz in OPA-Schichten und des Reifenabriebs wird reiner Kohlenstoff in Form von sehr feinem Kohlenstoffstaub (Glühverlust 100 %) als ergänzende organische Komponente des Schmutzes eingesetzt.

Der anorganische Anteil des künstlichen Schmutzes ist aus handelsüblichen Mineralstoffen auf Quarzbasis aus unterschiedlichen Lieferkörnungen hergestellt worden. Zum Einsatz kommen dabei Kristallquarzmehl (ca. 0 bis 0,2 mm), Quarzsand (ca. 0,1 bis 0,4 mm) und Flusssand 0/2 (ca. 0,1 bis 2 mm), von denen jeweils die Korngrößenverteilung durch Müller-BBM vorab ermittelt worden ist. Die Rezeptur des Schmutzes zeigt Tabelle 4, die daraus resultierende Korngrößenverteilung ist in Abbildung 10 dargestellt.

	Mineralstoffgemisch (Lieferkörnung)	mineralische Bestandteile [M.-%]	Gesamtrezeptur (mineralische und organische Bestandteile) [M.-%]	
mineralische Bestandteile	Kristallquarzmehl	40,0%	36,8%	92,0%
	Quarzsand	30,0%	27,6%	
	Flusssand 0/2	30,0%	27,6%	
organische Bestandteile	Reifenabrieb, Kohlenstoffstaub		8,0%	
Summe		100%	100%	

Tabelle 4: Zusammensetzung des künstlichen Schmutzes aus den Einzelkomponenten

5.2 Akustische Messverfahren und Ermittlung akustisch relevanter Parameter

Die vergleichende Messung von Schalldruckpegeln bzw. Bestimmung von Absorberparametern der Fahrbahnoberfläche (z.B. längenspezifischer Strömungswiderstand Ξ , Schallabsorptionsgrad α in situ) sind bei der Beurteilung des Grades der Verschmutzung zuverlässiger, sensitiver und vielseitiger als die häufig verwendeten (Wasser-) Durchlässigkeitsmessungen (ebenso wie beim Reinigungsnachweis, s. auch Kap. 4.2).

5.2.1 Messung des Strömungswiderstands in situ

Die Messung des Strömungswiderstands ist prinzipiell ebenfalls eine Durchlässigkeitsmessung. Da sie aber auf Luft und definierten Bedingungen (Druck bzw. Volumenstrom) basiert, sind Unterschiede sehr viel eindeutiger nachweisbar. Durch einfache Umrechnung des Messwertes mit Hilfe der Schichtdicke des OPA kann daraus der akustisch relevante Absorberparameter des längenspezifischen Strömungswiderstands Ξ bestimmt werden (s. auch Kap. 6.2.2).

Die Messung des Strömungswiderstands direkt an der Schicht in situ anstatt an Ausbauproben bzw. Bohrkernen hat bezüglich der hier durchgeführten Untersuchung insbesondere den Vorteil,

das durch die Probengewinnung (z.B. Kernbohrungen) der eingelagerte Schmutz nicht entfernt oder umgelagert werden kann und so der „Originalzustand“ gemessen wird.

Das Verfahren der Messung des spezifischen Strömungswiderstands in situ ist im Rahmen des Verbundprojekts „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahngeräusche“ in Anlehnung an das Verfahren für (Ausbau-)Proben nach DIN EN 29053 [196] von der Firma Müller-BBM entwickelt worden [38]. Es ist bisher nicht genormt oder in anderer Form standardisiert, aber durch zahlreiche Messungen validiert. Es lässt sich bei offenporigen Deckschichten eine Genauigkeit von etwa 15 % erreichen [38].

Das Messprinzip beruht auf der Einstellung eines konstanten Volumenstroms Q [m³/s], mit der die OPA-Schicht durchströmt wird. Messtechnisch wird der Druckunterschied zum Umgebungsdruck erfasst. Dazu wird durch eine auf die Fahrbahn aufgesetzte Messapparatur, die mit einer Masse belastet wird und an der Unterseite eine Schaumstoffauflage besitzt, der definierte Luftvolumenstrom in die Schicht eingeleitet. Aus der bestimmten Druckdifferenz Δp lässt sich mit Hilfe des Volumenstroms Q der Strömungswiderstand R wie folgt berechnen:

$$R = \frac{\Delta p}{Q} \quad (5.1).$$

Mit Hilfe der durchströmten Fläche wird daraus der spezifische Strömungswiderstand

$$R_s = R \cdot A = \frac{\Delta p}{Q} \cdot A = \frac{\Delta p}{v_s}, \quad (5.2)$$

worin v_s ⁶⁶ die (lineare) Strömungsgeschwindigkeit darstellt. Der spezifische Strömungswiderstand R_s wird durch Division mit der Schichtdicke d in den (akustisch relevanten) längenspezifischen Strömungswiderstand Ξ umgerechnet:

$$\Xi = \frac{R_s}{d} = \frac{R \cdot A}{d} = \frac{\Delta p}{Q \cdot d} \cdot A = \frac{\Delta p}{v_s \cdot d} \quad (5.3)$$

5.2.2 Messung des Schallabsorptionsgrads in situ

Die Bestimmung des frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrads an der Schicht in situ ermöglicht im Gegensatz zur Messung im Impedanzrohr [197] eine zerstörungsfreie Messung. Wie auch bei der Messung des Strömungswiderstands (s. Kap. 5.2.1) wird durch die Vermeidung von Kernbohrungen in der Schicht die Umlagerung bzw. Entfernung von Schmutz verhindert.

Die hier beschriebene Messung des Schallabsorptionsgrads von Straßenoberflächen in situ lehnt sich an das Verfahren nach DIN ISO 13472-1 [28] an; es bestehen jedoch Unterschiede bezüglich des Ortes und der Art der erfassten Messgrößen, aus denen der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad bestimmt wird. Es wurde grundlegend durch die Firma Müller-BBM im Rahmen der Projekte „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahngeräusche“ [38] und „ITARI – Integrated Tyre and Road Interaction“⁶⁷ entwickelt und in den Folgejahren weiterentwickelt.

⁶⁶ Strömungsgeschwindigkeit $v_s = Q/A$ (Volumenstrom/durchströmte Fläche)

⁶⁷ im Rahmen des 6. EU-Forschungsrahmenprogramm (abgeschlossen 2007) [198]

Das Messprinzip besteht in der Aussendung eines definierten Signals von einem Lautsprecher, der in einer Höhe d_L über der Fahrbahnoberfläche angebracht wird, und der Messung von Schalldruck und Schallschnelle (der Impulsantwort) mittels einer p-u-Sonde, die unmittelbar über der absorbierenden Fahrbahnoberfläche im Abstand d_M angeordnet ist (s. Abbildung 24). Die Impulsantwort besteht aus dem auf direktem Weg am Mikrofon ankommenden Schall und dem (zeitverzögerten) reflektierten Schall, der nach Durchlaufen der Schicht und Reflektion an der schallharten Unterlage am Mikrofon auftritt. Es ist durch die Zeitverzögerung möglich, diese beiden Impulsantworten voneinander zu trennen. Aus Schalldruck- und Schallschnelleverläufen von hin- und rücklaufender Schallwelle lässt sich analog Kap 6.2.1 (Gleichungen 6.17 und 6.18) der komplexe Reflexionsfaktor (nach Betrag und Phase) bestimmen, aus dem mit (6.19) und (6.20) der Schallabsorptionsgrad α in Abhängigkeit der Frequenz bestimmt werden kann. Der vermessene Frequenzbereich umfasst bei dem hier beschriebenen Verfahren den Bereich von 100 bis 4000 Hz.

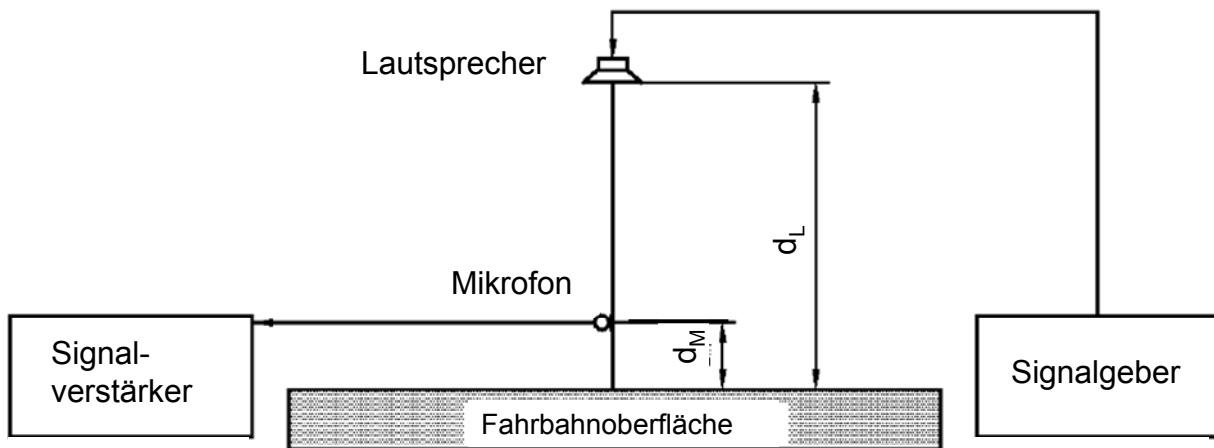


Abbildung 22: Messung des Schallabsorptionsgrads an Fahrbahnoberflächen in situ (Messprinzip) [28]

Bei der Interpretation und Weiterverarbeitung der Ergebnisse ist unbedingt zu beachten, dass es sich um den Schallabsorptionsgrad bezüglich einer Kugelwelle handelt (während die Messung des Absorptionsgrad im Impedanzrohr sowie die meisten Rechenmodelle, wie sie in Kap. 6.3 beschrieben werden, auf der Annahme von ebenen Wellen basieren). Bei der Messung werden breitbandigere Absorptionsgradverläufe ermittelt, was durch einen Umrechnungsfaktor zwischen den Modellberechnungen und den Messergebnissen berücksichtigt wird (s. auch Kap. 7.2). Allerdings können bei diesem In-Situ-Verfahren auch relativ kleine Absorptionsgrade (wie z.B. bei verschmutzten offenporigen Asphalten) zuverlässig mit großer Genauigkeit bestimmt werden [187].

6 Akustik von offenporigen Asphalten

6.1 Physikalische Grundlagen

Schall entsteht durch mechanische und aerodynamische Vorgänge in Folge des Reifen-Fahrbahnkontakts, wie sie in Kap 2.3 beschrieben sind. Im Folgenden sollen weniger die Entstehungsmechanismen betrachtet werden, sondern vielmehr, wie offenporige Deckschichten bereits emittierten Schall absorbieren und damit den Schallpegel mindern können⁶⁸.

6.1.1 Schallanregung

Schall entsteht durch Anregung eines Mediums zu Schwingungen. Diese Schwingungen werden in Form von (mechanischen) Wellen im Medium transportiert. Im Fall der Ausbreitung von Schall in Luft bilden sich Wellen, bei denen dem herrschenden (Atmosphären-)Druck Druckschwankungen überlagert werden. Für den eindimensionalen Fall lautet das hydromechanische Grundgesetz („Trägheitsgesetz der Akustik“)

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (6.1)$$

Darin wird der Zusammenhang zwischen dem räumlichen Druckgradienten und der Beschleunigung eines Luftvolumens festgehalten. Aus diesem Zusammenhang und dem Kompressionsgesetz (Kontinuitätsgleichung)

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (6.2)$$

geht durch Umformungen die allgemeine Wellengleichung⁶⁹ hervor, der jede Schallwelle genügen muss:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (6.3)$$

Die Lösungen dieser Differentialgleichung stellen (im harmonischen Schwingungsfall) trigonometrische Funktionen bzw. komplexwertige Exponentialfunktionen dar. Die Druckschwankungen im eindimensionalen Fall der Ausbreitung einer Schallwelle in x -Richtung werden durch

$$p(x, t) = p_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{c} \right) \right] = p_0 \cos(\omega t - kx) \quad (6.4)$$

mit der Kreisfrequenz ω und der Wellenzahl k beschrieben. Diese hängen wie folgt mit der Frequenz f , der Periodendauer T und der Wellenlänge λ zusammen:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \quad (6.5)$$

⁶⁸ Die dargestellten physikalischen Grundlagen (Kap. 6.1, 6.2 und 6.3) können, soweit nicht gesonderte Literaturquellen angegeben sind, zahlreichen einschlägigen Lehrbüchern zur Akustik entnommen werden.

⁶⁹ D' Alembert'sche Wellengleichung

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (6.6)$$

Dabei gilt weiterhin der grundlegende Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ und Frequenz f :

$$c = \lambda \cdot f. \quad (6.7)$$

Gleichung (6.4) kann auch in komplexer Schreibweise dargestellt werden. Darin ist die komplexe Amplitude des Schalldrucks⁷⁰

$$\underline{p} = p_0 \cdot e^{-ikx} = p_0 (\cos(kx) - i \cdot \sin(kx)). \quad (6.8)$$

Mit der sogenannten Zeitkonvention

$$p(x,t) = \operatorname{Re}\{\underline{p} \cdot e^{i\omega t}\} = \operatorname{Re}\{p_0 \cdot e^{i(\omega t - kx)}\} = p_0 \cdot \cos(\omega t - kx) \quad (6.9)$$

werden Wellen, die mit Hilfe komplexer Amplituden beschrieben werden, wieder auf reellwertige Orts- und Zeitbezüge wie in Gleichung (6.4) zurückgeführt. Die komplexe Darstellung stellt demnach lediglich ein Beschreibungswerkzeug für rein reellwertige Vorgänge dar, mit Hilfe dessen allerdings viele Phänomene in der Akustik erst adäquat dargestellt werden können.

Eine weitere wichtige Größe eines Schallfelds stellt die Schallschnelle v dar, die die Geschwindigkeit der durch den Schalldruck ausgelenkten infinitesimalen Volumenelemente eines Stoffes beschreibt. Sie hängt wie in (6.1) beschrieben direkt mit dem Schalldruck zusammen und ergibt bei einem Schalldruckverlauf wie in (6.8) angegeben, somit folgende komplexe Schallschnelleamplitude:

$$\underline{v} = i \frac{1}{\omega \rho} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (6.10)$$

6.1.2 Absorptionsdämpfung in einem porösen Absorber

Schallabsorption bedeutet die Umwandlung der mit der Schallwelle transportierten Energie, in Wärme (Dissipation, s. auch Kap. 6.3). Der Energieabbau geschieht in Folge der Umwandlung von Bewegungsenergie durch viskose Reibung. Die viskose Reibung und damit der Energieabbau ist umso größer, je schneller (hier: Schallschnelle) sich die Luftvolumina durch die Druckschwankungen bewegen. Dieser Vorgang lässt sich durch Ergänzung eines Reibungsterms in (6.1) unter Berücksichtigung des längenbezogenen Strömungswiderstands Ξ wie folgt beschreiben:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_L} \frac{\partial p}{\partial x} - \Xi v. \quad (6.11)$$

In einem schallabsorbierenden Medium (z.B. auch in Luft) wird der Schalldruck abhängig vom zurückgelegten Weg x in Ausbreitungsrichtung (exponentiell) gedämpft (Absorptionsdämpfung). Gleichung (6.8) geht damit über in

$$\underline{p} = p_0 \cdot e^{-ikx} \cdot e^{-k_i x}, \quad (6.12)$$

worin k_i den Dämpfungskoeffizienten darstellt. In anderer Schreibweise erhält man daraus

⁷⁰ Kennzeichnung durch einen Unterstrich, z.B. \underline{p}

$$\underline{p} = p_0 \cdot e^{-ik_r x} \cdot e^{-k_i x} = p_0 \cdot e^{-ik_a x}, \quad (6.13)$$

mit

$$k_a = k_r - ik_i. \quad (6.14)$$

k_a stellt die komplexe Absorberwellenzahl dar, mit Hilfe derer die Schallausbreitung in einem absorbierenden Medium beschrieben werden kann. Der Dämpfungskoeffizient ist der Imaginärteil der komplexen Absorberwellenzahl; er kann auch mit Hilfe geometrischer und materialspezifischer Absorberparametern beschrieben werden (s. Kap. 6.3, Gleichung (6.28)). Die komplexe Absorberwellenzahl kommt im Weiteren bei der Bildung von Modellen von porösen Absorbern zum Einsatz (s. Kap. 6.2 und 6.3).

6.2 Offenporiger Asphalt als poröser Absorber

6.2.1 Allgemeines

Damit ein poröser Absorber, wie OPA aus akustischer Sicht zu betrachten ist, dämpfend wirken kann, muss es den Schallwellen zunächst ermöglicht werden, in das poröse Material einzudringen. Eine charakteristische Größe für das Eindringvermögen stellt die Impedanz z dar. Sie ist definiert als Quotient aus dem Schalldruck p und der Schallschnelle v an jedem beliebigen Ort:

$$z = \frac{p}{v}. \quad (6.15)$$

Am Übergang zwischen Materialien verschiedener Kennimpedanzen (z.B. Luft und Absorbermaterial) ist das Verhältnis dieser Impedanzen entscheidend für den Grad der Reflexion bzw. der Absorption („Eindringung“) der Schallwelle.

Durch teilweise Reflexion und teilweise Absorption einer Schallwelle an einer beliebigen Oberfläche entsteht im Reflexionsbereich ein überlagertes Schallfeld von hinlaufendem und reflektiertem Anteil der Schallwelle. Wie hoch der reflektierte Anteil ist, wird durch den komplexwertigen Reflexionsfaktor r ($0 \leq |r| \leq 1$) angegeben. Gleichung (6.8) geht damit über in

$$\underline{p} = p_0 (e^{-ikx} + r e^{ikx}). \quad (6.16)$$

Die zugehörige komplexe Amplitude der Schallschnelle wird mit (6.10) zu:

$$\underline{v} = \frac{p_0}{\rho c} (e^{-ikx} - r e^{ikx}). \quad (6.17)$$

Mit dem Zusammenhang zwischen reellwertigem Schallabsorptionsgrad α und komplexem Reflexionsfaktor r

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (6.18)$$

und unter Verwendung von (6.15), (6.16) und (6.17) gilt dann:

$$z = \frac{p}{v} = \frac{1+r}{\frac{1}{\rho c}(1-r)} \Leftrightarrow r = \frac{\frac{z}{\rho c} - 1}{\frac{z}{\rho c} + 1}. \quad (6.19)$$

Mit (6.18) wird der Schallabsorptionsgrad α somit zu

$$\alpha = \frac{4 \operatorname{Re}\{z/\rho c\}}{[\operatorname{Re}\{z/\rho c\} + 1]^2 + [\operatorname{Im}\{z/\rho c\}]^2}. \quad (6.20)$$

Diesen Zusammenhang bezeichnet man auch als „Anpassungsgesetz“.

6.2.2 Geometrie- und Absorberparameter

Wie bereits beschrieben, ermöglicht die offenporige Geometrie des OPA zum einen eine Verhinderung der Entstehung von Schall durch Lufteinschlüsse, zum anderen wirkt OPA als poröser Schallabsorber (s. auch Kap. 2.3).

Zur Beschreibung der akustischen Absorptionseigenschaften verwenden verschiedene Modelle, die in Kap. 6.3 beschrieben werden, folgende (Absorber)parameter, die von der Geometrie und Zugänglichkeit des Porenraums des OPA abhängen:

- Porosität σ [-]
- längenbezogener Strömungswiderstand ε [Pa*s/m²]
- Strukturfaktor κ [-]
- Tortuosität τ [-]

Porosität σ

Die (Volumen-)Porosität σ beschreibt das Verhältnis von Luftporenvolumen im Absorber zum Gesamtvolumen des Absorbers. Bezogen auf den straßenbautechnischen Begriff des Hohlraumgehalts entspricht sie dem von außen zugänglichen Anteil des Hohlraumgehalts. Die Porosität ist demnach etwas kleiner anzusetzen als der volumetrisch bestimmte Hohlraumgehalt aus der straßenbautechnischen Eignungsprüfung. In dieser Arbeit werden beide Werte jedoch gleichwertig behandelt (s. Kap. 7.1) Durch Verschmutzungseintrag verringert sich der Hohlraumgehalt und damit die Porosität von offenporigen Asphalten, was sich auf die akustische Absorptionseigenschaften auswirkt (s. auch Kap. 4.1.2).

Strukturfaktor κ

Der Strukturfaktor κ beschreibt in abstrakter Weise die Porenstruktur eines porösen Absorbers. Er drückt aus, dass quer zur Ausbreitungsrichtung x einer senkrecht auf den Absorber auftreffenden Schallwelle liegende Porenkanäle oder Poren, die nicht über die gesamte Absorberdicke durchgehen, das Absorptionsverhalten beeinflussen. Sie tragen zwar wie andere Hohlräume zur Volumenporosität bei, jedoch nicht in gleichem Maße zum Absorptionsverhalten. Der Strukturfaktor ist dafür ein Ausgleichsfaktor. Bei unregelmäßigen Porenstrukturen, wie sie in offenporigen Asphalten vorliegen, kann der Strukturfaktor nicht gemessen und nicht direkt berechnet werden. Er kann nur aufgrund des akustischen Verhaltens des Absorbermaterials abgeleitet werden.

Es gibt verschiedene Ansätze, den Strukturfaktor aus geometrischen Zusammenhängen abzuleiten, so z.B. über das Verhältnis von Volumen- zur Flächenporosität [199].

$$\kappa = \frac{\sigma_V}{\sigma_F}. \quad (6.21)$$

Die Beschreibung über geometrische Größen gelingt für die unregelmäßige Struktur von OPA jedoch am anschaulichsten, wenn man den Strukturfaktor über das Verhältnis von beschleunigungsfähigem Volumen V_B und komprimierbarem Volumen V_K auffasst. Alle von außen zugänglichen Hohlräume können als komprimierbares Volumen V_K aufgefasst werden. Sind Porenräume in Ausbreitungsrichtung nicht (über die Absorberdicke) durchgehend, enden in „Toträumen“ oder sind quer zur Ausbreitungsrichtung angeordnet, kann das Volumen darin nur komprimiert, nicht aber (über die komplette Dicke des Absorbers) beschleunigt werden. Nur tatsächlich durch den Schalldruck beschleunigbare Luftteilchen können ihre durch die Beschleunigung erlangte Schnelle zur Impedanz bzw. Eindringung der Schallwelle in den Absorber beitragen (vgl. Glg. 6.19 und 6.20). Luftvolumen, die hingegen durch den Schalldruck nur komprimierbar sind, können wegen fehlender Beschleunigungsfähigkeit (in Ausbreitungsrichtung x) eine über die offenporige Oberfläche eingetragene Schallschnelle nicht weitertransportieren und somit keinen Beitrag zur Wandimpedanz der OPA-Oberfläche leisten (s. Abbildung 23). Darüber hinaus sind nur Luftvolumen, die eine Geschwindigkeit besitzen, fähig, durch viskose Reibung Energie abzubauen (Absorptionsdämpfung, vgl. Glg. 6.11).

Der Strukturfaktor kann also durch obenstehende Überlegungen wie folgt beschrieben werden

$$\kappa = \frac{V_K}{V_B} = \frac{\sigma \cdot V}{V_B} \geq 1. \quad (6.22)$$

Durch die Verschmutzung von Poren erfährt der Strukturfaktor durch die Erzeugung zusätzlicher „Toträume“ in der Porenstruktur eine Erhöhung (s. auch Kap. 4.1.2 und 7.2).

Tortuosität τ

Die (hydraulische) Tortuosität τ stellt nach der Definition von CARMAN [200] das Verhältnis von realer Länge l der Porenkanäle im Absorber im Verhältnis zur kürzesten Länge⁷¹ l_{\min} dar:

$$\tau = \frac{l}{l_{\min}} \geq 1. \quad (6.23)$$

Anschaulich kann dies als Windung der Kanäle oder Maß für die erzwungenen Richtungsänderungen, die die schwingenden Luftvolumen im Absorber erfahren, verstanden werden (s. Abbildung 23).

Die Tortuosität wird in manchen Absorbermodellen anstelle des oben definierten Strukturfaktors verwendet; sie beschreibt ebenfalls Eigenschaften der Porenstruktur, ist jedoch anders definiert.

Die Veränderung der Porenstruktur durch die Einlagerung von Schmutzpartikeln wirkt sich für gewöhnlich in einer Erhöhung der Tortuosität aus (Potentielle Erklärungen s. Kap. 4.1.2 und 7.2).

⁷¹ entspricht im allgemeinen der Schichtdicke d


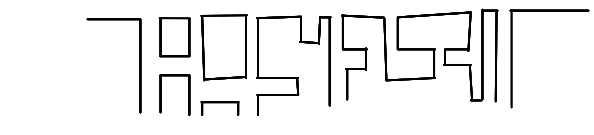
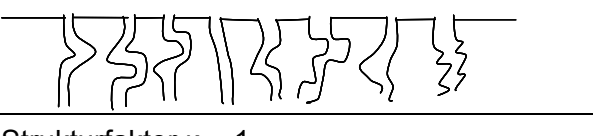
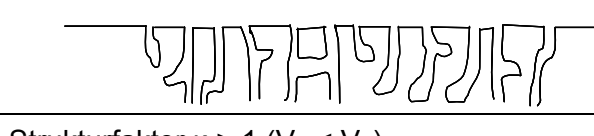
	
Strukturfaktor $\kappa = 1$ ($V_B = V_K$) Tortuosität $\tau = 1$ ($l = l_{\min}$)	Strukturfaktor $\kappa > 1$ ($V_B < V_K$) (Tortuosität $\tau = 1$ im idealen Falle, in Realität $\tau \neq 1$)
	
Strukturfaktor $\kappa = 1$ Tortuosität $\tau > 1$ ($l > l_{\min}$)	Strukturfaktor $\kappa > 1$ ($V_B < V_K$) Tortuosität $\tau > 1$ ($l > l_{\min}$)

Abbildung 23: Anschauliche Darstellung des Strukturfaktors κ und Tortuosität τ anhand von idealisierten Geometrien

Längenspezifischer Strömungswiderstand Ξ

Wird ein Absorber mit einer Dicke d von Luft durchströmt, erfährt die Strömung einen Widerstand, der sich in einer Druckdifferenz Δp vor und hinter dem Absorber bemerkbar macht. Bei bekanntem (Luft-)Volumenstrom V und durchströmter Querschnittsfläche A lässt sich daraus nach (5.2) der spezifische Strömungswiderstand R_s berechnen (s. auch Kap. 5.2.1). Durch Division mit der Schichtdicke erhält man daraus nach (5.3) den längenspezifischen Strömungswiderstand Ξ , der einen für die Modellbildung wichtigen akustischen Absorberparameter darstellt.

Mit dem Gesetz von Hagen-Poiseuille (s. Anhang B), das Strömungen durch einzelne zylindrische Porenkanäle mit dem Radius a beschreibt, wird Gleichung (5.3) zu:

$$\Xi = \frac{\Delta p}{Q \cdot d} \cdot A = \frac{8\eta}{Aa^2} \cdot A = \frac{8\eta}{a^2} \tag{6.24}$$

Betrachtet man an Stelle eines einzelnen Porenkanals einen größeren Ausschnitt eines porösen Stoffes, der sich idealisiert aus vielen dieser einzelnen Poren zusammensetzt, muss zusätzlich die Porosität σ und die Tortuosität τ eingehen [199]. Die Tortuosität stellt dabei eine virtuelle Vergrößerung der Schichtdicke dar, die Porosität berücksichtigt, dass sich nur ein Teil des gesamten porösen Körpers (die Hohlräume) an Strömungsprozessen beteiligen kann (vgl. auch Kap. 6.3.1, Gleichung 6.30). Es ergibt sich für den längenspezifischen Strömungswiderstand folgender Zusammenhang mit dem (durchschnittlichen) Porenkanalhalbmesser a (z.B. [199][201]):

$$\Xi = \frac{8\eta}{a^2} \cdot \frac{\tau}{\sigma} \Leftrightarrow a = \sqrt{\frac{8\eta\tau}{\Xi\sigma}} \tag{6.25}$$

Es besteht weiterhin ein einfacher Zusammenhang zwischen dem längenspezifischen Strömungswiderstand Ξ und der Permeabilität K (nach Darcy):

$$\Xi = \frac{\eta}{K} \tag{6.26}$$

so dass man die Permeabilität K auch in Abhängigkeit von Absorber- und Geometrieparametern als

$$K = \frac{\sigma \cdot a^2}{8\tau} \quad (6.27)$$

darstellen kann. Weitere Zusammenhänge zwischen Geometrie der Porenstruktur und längenspezifischem Strömungswiderstand liefert auch die Carman-Kozeny-Formel (z.B. [199]), auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird.

Dickere Schichtaufbauten und gröbere Körnungen bei offenporigen Asphaltsschichten vermindern den Strömungswiderstand, während er bereits durch geringe Verschmutzungen der Porenstruktur stark ansteigt (s. auch Kap. 4.1.2. und 7.1)

6.3 Modellvorstellungen von porösen Absorbern

Poröse Absorber bestehen aus unterschiedlichsten Materialien, die den Absorber entscheidend in seiner Form und Struktur bestimmen (z.B. granulare Absorber, Faserabsorber, Schaumstoffe) und ihm gleichzeitig auch charakteristische Absorberparameter verleihen. Offenporiger Asphalt kann als granularer poröser Absorber aufgefasst werden, der im Vergleich zu anderen typischerweise in der Akustik eingesetzten Stoffen (z.B. Faserstoffen) eine relativ niedrige Porosität aufweist, die sich aus der Notwendigkeit der Belastbarkeit mit erheblichen Lasten ergibt.

Die mikroskopische Betrachtung der Vorgänge in porösen Absorbern ist nur sehr schwer zu handhaben, da die Strukturparameter bzw. die Geometrie lokal stark schwanken. Deshalb wird in makroskopischen Modellen, die im folgenden behandelt werden, auf Ersatzparameter (s. Kap. 6.2.2) zurückgegriffen, die für den porösen Absorber global angesetzt werden (z.B. [199]).

Grundlage der Absorbertheorie bilden daher Überlegungen zu (Mehrfach-)Streuungen von Wellen in dem Gerüst des Absorbers, wobei davon ausgegangen wird, dass der Absorber eine Suspension aus Flüssig-⁷² und Feststoff darstellt und der Feststoff bzw. das Absorbermaterial „lediglich die Dämpfungseigenschaften des Fluids erhöht“ (Modellansatz des modifizierten Fluids) (z.B. [202]). Der Absorber als Ganzes wird demnach als homogenes Medium aufgefasst und nicht als getrenntes System aus Feststoff und Luft. Diese Annahme ist vor allem dann zutreffend, wenn die Dichte und Steifigkeit des (Feststoff-)Gerüsts sehr viel größer ist als die des sättigenden Fluids (Luft) [201]. In diesem Fall kann das Skelett als starr und bewegungslos angesehen werden. Bei dieser Modellvorstellung eines porösen Absorbers, wie sie für offenporige Asphalte zutreffend ist, ist nur eine Ausbreitungswelle zu berücksichtigen, was die Berechnungen erheblich vereinfacht.

Die Schallabsorption beruht auf der Umwandlung der kinetischen (Schall-)Energie in Wärme (Dissipation). Die Dissipation geschieht dabei zum einen durch *viskose Dissipation* bzw. Reibung, die direkt von der Schallschnelle abhängt (s. auch Kap. 6.1.2), zum anderen durch *thermische Dissipation*, die auf Temperaturgradienten durch Wärmeabgabe im Absorber beruht (z.B. [203]).

Aus dieser grundlegenden Modellvorstellung können zwei unterschiedliche Modellansätze abgeleitet werden. Der *phänomenologische* Ansatz verzichtet weitgehend auf eine mathematisch exakte, physikalisch bis in Detail fundierte Modellbildung, sondern bildet ein empirisch vorgefundenes typisches Verhalten, das auf verschiedene (Eingangs-)Parameter zurückzuführen

⁷² Luft wird in diesem Zusammenhang ebenfalls als Fluid behandelt.

ist, auf makroskopischer Ebene nach. Im Gegensatz dazu können *Mikrostrukturmodelle*⁷³ zur Anwendung kommen, die aufbauend auf einfachen geometrischen und strukturellen Annahmen der Porengestalt im Absorber das akustische Absorptionsverhalten physikalisch erklären und auf komplexere Geometrien übertragen. Im Hinblick auf poröse Absorbermodelle benötigen phänomenologische Modelle nur drei Eingangsparameter, Mikrostrukturmodelle dagegen üblicherweise vier bis fünf (z.B. [201][204]).

Aus der Grundüberlegung des modifizierten Fluids entwickelt sich eine sehr häufig angewandte grundlegende Modellvorstellung eines porösen Absorbers, die *Theorie des homogenen Mediums* (s. Kap. 6.3.1). Ein Vorteil dieses Ansatzes ist die sehr universelle Anwendbarkeit für verschiedenartige Absorbertypen und die Gültigkeit für große Wertebereiche der Absorberparameter. Die Theorie basiert auf dynamischen verlustbehafteten Kompressionsvorgängen von Luft im Absorber und wird aus der Leitungstheorie homogener Medien abgeleitet [199]. Es können aber, wie in dieser Arbeit geschehen, auch zusätzlich thermodynamische Effekte einbezogen werden. Das Absorbermodell beruht demnach sowohl auf viskosen als auch auf thermischen Dissipationsvorgängen, wie sie oben beschrieben sind. Hinsichtlich der Kategorisierung enthält es sowohl Elemente eines phänomenologischen Ansatzes (wie den Strukturfaktor im Bereich der viskosen Dissipation, der physikalisch nicht eindeutig beschreibbar ist) als auch Elemente von Mikrostrukturmodellen (bei der Beschreibung der thermischen Dissipation).

Es existieren weiterhin Mikrostrukturmodelle für idealisierte Geometrien wie z.B. Spalt- oder Kreiskapillaren sowie Kanal- bzw. Röhrchensysteme. Das Modell von RAYLEIGH [205] beruht auf solchen Annahmen, es geht von „parallelen kreiszylindrischen Kapillaren“ aus, ist also potentiell für die Anwendung an (idealisierten) granularen Absorbern geeignet. Es kann aber in seiner grundlegenden Formulierung dennoch das Absorberverhalten von OPA nur ungenügend abbilden und wird daher in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, obwohl es jedoch (in unterschiedlichem Umfang) wichtige Grundlagen für einige der im folgenden beschriebenen Theorien legt.

Das Modell von ATTENBOROUGH [201] (s. Kap. 6.3.2) basiert in den Grundzügen auf den Vorstellungen von RAYLEIGH, geht damit auch von idealisierten Geometrien (Annahme von regelmäßigen zylindrischen Poren in Ausbreitungsrichtung) sowie zusätzlich einem starren Absorbergerüst aus. Obwohl das Modell ursprünglich von der in der Modellvorstellung zugrunde gelegten Geometrie einem Röhrenmodell gleicht, eignet es sich dennoch auch zur Beschreibung von OPA mit eher granulearem Aufbau und kugelförmigen Poren.

BIOT entwickelte eine Theorie, die die Fortpflanzung mechanischer (Schall-)Wellen in einem fluidgesättigten porösen Feststoff (z.B. wassergesättigten Boden) beschreibt [206][207]. Prinzipiell ist das Modell in der Lage, zusätzlich zu den Kompressions- und Bewegungsvorgängen der im Absorber befindlichen Luft die (elastische Schwingungs-)Reaktion des nicht-starren, tragenden Gerüsts bei der Schallabsorption mit zu berücksichtigen. Die Anwendung dieses Modells in der Akustik mit Luft als sättigendem Medium wurde vor allem von ALLARD weiterentwickelt [208]. Das Modell wird für poröse Absorber mit Luft als sättigendem Medium in dieser Arbeit in vereinfachter Weise mit der Annahme eines starren Skeletts angewendet (s. Kap. 6.3.3).

⁷³ Trotz der Begrifflichkeit sind Mikrostrukturmodelle ebenfalls makroskopische Modellansätze für poröse Absorber

Sowohl der Ansatz nach BIOT/ALLARD als auch das ATTENBOROUGH-Modell sind der Kategorie der Mikrostrukturmodelle zuzuordnen. Sie gehen dabei von einfachen und gleichmäßigen Porenstrukturen aus und liefern streng genommen nur für diese Annahme exakte Lösungen. Für komplexere Geometrien, die in den Modellen mit Hilfe von unterschiedlichen Formfaktoren abgebildet werden, stellen beide nur Näherungen dar.

Mit diesem Wissen entwickelten CHAMPOUX und STINSON [208] den Ansatz von BIOT/ALLARD gezielt in Richtung der Porengeometrie von porösen Fahrbahndecken weiter, wobei von der Annahme eines starren Absorbergerüsts ausgegangen wird (s. Kap. 6.3.4). Es wird dabei versucht, die Aussagen für idealisierte Geometrien mit Hilfe von weiteren Form- bzw. Anpassungsfaktoren, die die viskosen und thermischen Zusammenhänge getrennt beschreiben sollen, auf die komplexere Porenstruktur von offenporigen Fahrbahndecken zu übertragen [204].

HAMET formuliert ein rein phänomenologisches Modell (s. Kap. 6.3.5) und führt Funktionen für die viskosen und thermischen Vorgänge und deren Zusammenhänge mit den Absorberparametern bzw. der Geometrie ein [204][209].

Neben der unterschiedlichen Anzahl und Art von Eingangsparametern (Absorberparameter und Struktur- bzw. Anpassungsparameter) ist jedoch allen Modellen gemeinsam die Wahl sogenannter Absorberkennwerte. In dieser Arbeit wird das Kennwertpaar aus komplexer Absorberwellenzahl k_a und Impedanz z verwendet. Es ist aber auch durchaus möglich und üblich, andere Kennwertpaare wie z.B. die komplexe dynamische Dichte und die komplexe dynamische Kompressibilität zu verwenden. Sie stammen aus den beschriebenen getrennten Betrachtungsweisen von viskosen und thermischen Dissipationsvorgängen. Die viskosen Effekte werden durch die komplexe Dichtefunktion $\rho_a(\omega)$ und thermische Effekte durch die komplexe Kompressibilitätsfunktion $K_a(\omega)$ beschrieben. Die beiden Absorberkennwerte K_a und ρ_a können auf einfache Weise in das Kennwertpaar $(k_a; z)$ umgerechnet werden (z.B. [199][204]):

$$k_a = \omega \sqrt{\frac{\rho_a}{K_a}}, \quad (6.28)$$

$$z = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\rho_a \cdot K_a}. \quad (6.29)$$

6.3.1 Theorie der homogenen Medien

Modelltheorie

Beim Übergang einer Schallwelle in ein absorbierendes Medium, muss aufgrund der Energieerhaltung für die auftretenden Schallschnellen außerhalb des Absorbers (v) und innerhalb des Absorbers (v_i) zunächst folgender Zusammenhang mit der Porosität σ und dem Strukturfaktor κ gelten:

$$v = \frac{\sigma}{\kappa} v_i. \quad (6.30)$$

Hierin wird über die Porosität berücksichtigt, dass die Schallschnellen im Absorber durch Verringerung des zur Verfügung stehenden Ausbreitungsvolumens größer werden müssen (Impulserhaltung). Weiterhin werden Volumina, die aufgrund mangelnden Beschleunigungsvermögens keine Schallschnellen weiterleiten können, durch die

Berücksichtigung des Strukturfaktors κ nicht in die Schallausbreitung im Absorber mit einbezogen (s. auch Kap. 6.2.2). Mit Gleichung (6.11) ergibt sich daraus

$$\frac{\kappa \rho_L}{\sigma} \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} - \Xi v. \quad (6.31)$$

Daraus lässt sich mit (6.3) die Wellengleichung im porösen Medium herleiten:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + k_L^2 \left(\kappa - i \frac{\Xi \sigma}{\omega \rho_L} \right) p = 0. \quad (6.32)$$

Daraus folgt für den Schalldruckverlauf p nach (6.13), dass die komplexe Absorberwellenzahl k_a wie folgt von den geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften des absorbierenden Materials abhängt:

$$k_a = k_L \sqrt{\kappa \cdot \gamma_{eff}} \cdot \sqrt{1 - i \frac{\Xi \sigma}{\omega \rho_L \kappa}}. \quad (6.33)$$

Darin wird weiterhin berücksichtigt, dass an den Wänden des porösen Absorbers durch die Entstehung von Wärme Temperaturänderungen der im Absorber befindlichen Luft bedingt werden. Wegen dieser Wärmeentstehung bzw. -ableitung kann nicht unbedingt von einem isothermen Vorgang bei der Weiterleitung der Schalldrücke ausgegangen werden. Vielmehr finden Relaxationsprozesse statt. Berücksichtigt man dieses Phänomen (viele Autoren verzichten darauf), ist ein adiabatischer Ansatz zu wählen, der mit Hilfe eines Parameter γ_{eff} , der auf dem Adiabatenkoeffizienten γ basiert, Eingang findet. Bei Betrachtung eines rein isothermen Vorgangs ist $\gamma_{eff} = 1$. Sonst gilt (mit t_{rel} als Relaxationszeit):

$$\gamma_{eff} = 1 + \frac{\gamma - 1}{1 + i \omega t_{rel}}, \text{ woraus folgt: } 1 \leq \gamma_{eff} \leq \gamma = 1,402. \quad (6.34)$$

Der Dämpfungskoeffizient k_i der Absorptionsdämpfung geht nach (6.14) als Imaginärteil aus (6.33) hervor (s. Kap. 6.1.2).

Die Schallschnelle im Absorber lässt sich in Abhängigkeit der komplexen Absorberwellenzahl unter Berücksichtigung von (6.10) wie folgt darstellen:

$$v = i \frac{\sigma k_L}{\rho_L c k_a^2} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (6.35)$$

Betrachtet man zunächst einen Absorber mit unendlicher Dicke und ausschließlich senkrechten Schalleinfall auf denselben, ist die Kennimpedanz z_a des porösen Mediums unter Berücksichtigung von (6.13) und (6.35)

$$z_a = \frac{p}{v} = \frac{p_0 \cdot e^{-ik_a x}}{\frac{i \sigma k_L}{\rho_L c k_a^2} \frac{\partial p}{\partial x}} = \frac{p_0 \cdot e^{-ik_a x}}{\frac{i \sigma k_L}{\rho_L c k_a^2} \cdot (-ik_a) p_0 \cdot e^{-ik_a x}} = \frac{\rho c k_a}{\sigma k_L}. \quad (6.36)$$

An der Grenzfläche zwischen Luft und Absorber müssen aus Gleichgewichtsgründen, Drücke und Schallschnellen in der Luft und im Absorber gleich groß sein [199]. Daraus folgt, dass die Wandimpedanz z_∞ (am Übergang zum unendlich dicken Absorber) gleich der Kennimpedanz im porösen Absorber sein muss. Mit (6.33) und (6.36) ist somit:

$$z_{\infty} = z_a = \frac{\rho c}{\sigma} \frac{k_a}{k_L} = \rho c \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\kappa}{\gamma_{\text{eff}}}} \sqrt{1 - i \frac{\Xi \sigma}{\omega \rho \kappa}}. \quad (6.37)$$

Im Folgenden sollen aus den Überlegungen für den unendlich dicken Absorber die Zusammenhänge für den Fall einer porösen Schicht endlicher Dicke vor einer schallharten Wand hergeleitet werden.

An der schallharten (Rück-)Wand des porösen Absorbers mit der Dicke d wird (in der Modellvorstellung) eine hinlaufende Welle total reflektiert (Reflexionsfaktor $r = 1$), so dass aus der Überlagerung mit der rücklaufenden Welle eine stehende Welle entsteht. Setzt man an der Trennfläche von Luft und Absorber⁷⁴ $x = 0$ an, so gilt für das Schalldruckfeld in der Absorberschicht mit (6.16):

$$\underline{p} = p_0 \left(e^{-ik_a(x-d)} + e^{ik_a(x-d)} \right). \quad (6.38)$$

Das zugehörige Schallschnellefeld leitet sich aus (6.35) ab:

$$\underline{v} = \frac{\sigma}{\rho c} \frac{k_L}{k_a} p_0 \left(e^{-ik_a(x-d)} - e^{ik_a(x-d)} \right). \quad (6.39)$$

Aus (6.38) und (6.39) lässt sich die Wandimpedanz z (für $x = 0$) an der Grenzfläche von Luft und Absorber berechnen und mit (6.37) wie folgt vereinfachen:

$$\begin{aligned} z = \frac{\underline{p}}{\underline{v}} &= \frac{p_0 \left(e^{-ik_a d} + e^{ik_a d} \right)}{\frac{\sigma}{\rho c} \frac{k_L}{k_a} p_0 \left(e^{-ik_a d} - e^{ik_a d} \right)} = \frac{\rho c}{\sigma} \frac{k_a}{k_L} \frac{2 \cos(k_a d)}{i \cdot 2 \sin(k_a d)} = -i \frac{\rho c}{\sigma} \frac{k_a}{k} \cot(k_a d) \\ &= -iz_{\infty} \cot(k_a d) = z_{\infty} \frac{1 + e^{-i2k_a d}}{1 - e^{-i2k_a d}}. \end{aligned} \quad (6.40)$$

Mit den Gleichungen (6.18) bis (6.20) lassen sich daraus frequenzabhängige Schallabsorptionsgrade berechnen.

Anschauliche Darstellung

Aus der Modellvorstellung des porösen Absorbers vor einer schallharten Wand (Unterlage des OPA) ergibt sich, dass die Schallenergie immer dann gut abgebaut werden kann, wenn Bereiche großer Schallschnellen im Schallfeld innerhalb der Absorberdicke liegen und diese gedämpft werden können. Je höher die Schallschnellen im Absorber sind, desto größer wird die viskose Reibung (vgl. Kap. 6.1.2 und Glg. 6.11), die Schallenergie abbauen kann. Bei idealer Reflexion einer senkrecht auftreffenden eindimensionalen Welle ($r = 1$) an der schallharten Unterlage entsteht eine stehende Welle mit einem Schnelleknoten an der Wand. Maxima der Absorption werden demnach erreicht, wenn ein Schnellebauch (maximale Amplituden der Schnellen) im Abstand der Dicke des porösen Absorbers auftritt (s. Abbildung 24). Dies ist der Fall, wenn

$$d = (2n+1) \frac{\lambda}{4} \Rightarrow d = \frac{\lambda}{4}; \frac{3\lambda}{4}; \dots \Leftrightarrow \lambda = \frac{4}{2n+1} d \Rightarrow f = \frac{(2n+1) \cdot c}{4} d. \quad (6.41)$$

⁷⁴ hier: Oberfläche des OPA

Bei gegebener Schichtdicke d des porösen Absorbers treten also bei bestimmten Frequenzen Absorptionsmaxima auf. Zwischen den Maxima treten Minima der Absorption, da die Schnelleknoten außerhalb des Absorbers liegen und er dadurch uneffektiv ausgenutzt wird (s. Abbildung 24). Daraus ergeben sich die charakteristischen Absorptionsgradverläufe von offenporigen Asphalten unterschiedlicher Dicke (s. Kap. 3.3.1 und 7.1) Die anschauliche Begründung der Lage der Maxima lässt sich auch durch Einsetzen dieses Spezialfalls in obigen Herleitungen rechnerisch nachvollziehen.

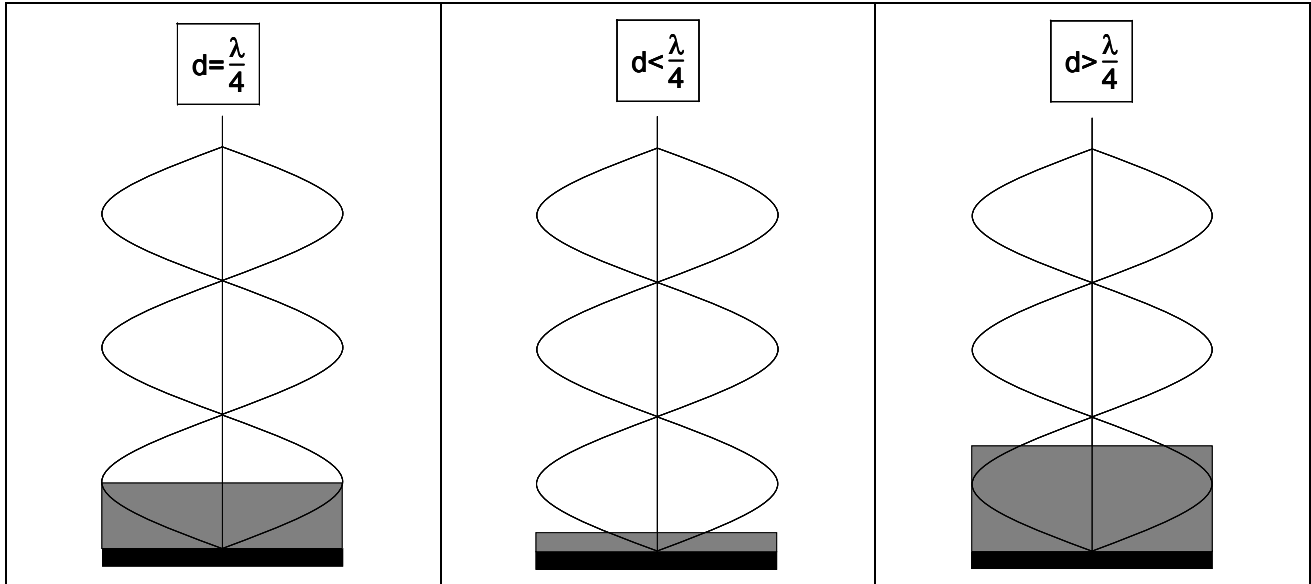


Abbildung 24: Anschauliche Erklärung der Absorptionsmaxima in Abhängigkeit der Frequenz bzw. der Schichtdicke des porösen Absorbers

6.3.2 Modell nach ATTENBOROUGH

Ausgehend von der Vorstellung der Schallausbreitung in einer einzelnen Pore schließt ATTENBOROUGH auf ein Medium mit vielen solcher Poren, die parallel angeordnet sind [201]. Viskose und thermische Effekte werden dabei getrennt erfasst, wobei nach ZWIKKER/KOSTEN [210] die viskosen Effekte mit Hilfe einer komplexen Dichtefunktion ρ_a und die thermischen Effekte mit Hilfe einer dynamische Kompressibilitätsfunktion K_a ausgedrückt werden. In einer zylindrischen Pore ist die komplexe dynamische Dichte nach ZWIKKER/KOSTEN [210]:

$$\rho_{a,p}(\omega) = \frac{\rho_L}{1 - 2 \frac{J_{1,0}(\lambda_p \sqrt{-i})}{\lambda_p \sqrt{-i}}} \quad (6.42)$$

mit dem dimensionslosen Parameter

$$\lambda_p = a \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} = \sqrt{\frac{8\tau^2 \rho_L \omega}{\Xi \sigma}} \quad (6.43)$$

$J_{1,0}(z)$ stellt dabei den Quotienten aus den Funktionswerten der Besselfunktionen erster und nullter Ordnung $J_1(z)/J_0(z)$ des komplexen Arguments z dar. Die Umformung von (6.43) basiert auf

Gleichung (6.25), und dem Zusammenhang zwischen dynamischer Viskosität η , Dichte ρ und kinematischer Viskosität ν

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (6.44)$$

Die Übertragung der Einzelpore auf den porösen Absorber, der sich aus vielen dieser Einzelporen zusammensetzt, geschieht durch einen Faktor, der die Tortuosität τ und die Porosität σ des Absorbers berücksichtigt (vgl. auch Gleichung (6.30)). Aus (6.42) wird demnach

$$\rho_a(\omega) = \frac{\tau^2}{\sigma} \cdot \frac{\rho_L}{1 - 2 \frac{J_{1,0}(\lambda\sqrt{-i})}{\lambda\sqrt{-i}}}. \quad (6.45)$$

Die Porosität wird im folgenden vernachlässigt, weil in den zugrunde liegenden Überlegungen (vgl. Kap. 6.3.1, Glg. 6.30) bereits die innere Schallschnelle ν_i berücksichtigt wurde, während ATTENBOROUGH die Korrektur der Schnellen über die Porosität in seinem Gedankenmodell erst beim Übergang von Einzelporen zum gesamten porösen Absorber durchführt [201]. (6.45) geht deshalb über in

$$\rho_a(\omega) = \tau^2 \cdot \frac{\rho_L}{1 - 2 \frac{J_{1,0}(\lambda\sqrt{-i})}{\lambda\sqrt{-i}}}. \quad (6.46)$$

Weiterhin gehen Betrachtungen zur Porenform in Form des dynamischen Formfaktors n und des statischen Formfaktors s in den Parameter λ ein [201]:

$$\lambda = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{8s\tau^2\rho_0\omega}{\Xi\sigma}} = \frac{\sqrt{s}}{n} \sqrt{\frac{8\tau^2\rho_0\omega}{\Xi\sigma}} = \frac{\sqrt{s}}{n} \lambda_p. \quad (6.47)$$

Der Quotient $f_{n,s} = n/\sqrt{s}$ wird als Formfaktoren-Verhältnis bezeichnet. Für ideale zylindrische Porenstrukturen gilt hierbei beispielsweise $n = s = 1$, für andersartige Porenformen weichen die Formfaktoren von 1 ab. Durch Vergleiche von Messungen und Modellrechnungen wird für granulare Absorber, wie es OPA darstellt, ein Formfaktoren-Verhältnis von $0,5 \leq f_{n,s} \leq 1,0$ und ein Regelwert von 0,75 angegeben [201].

Somit geht in das Mikrostrukturmodell nach ATTENBOROUGH neben der Porosität, dem längenspezifischen Strömungswiderstand und der Tortuosität das Formfaktorenverhältnis $f_{n,s}$ als vierter Parameter ein, das sich aus zwei separaten (jedoch nicht gänzlich unabhängigen) Formfaktoren zusammensetzt.

Die thermischen Effekte werden im Modell zusätzlich durch die komplexe dynamische Kompressibilität K_a berücksichtigt, welche mit Hilfe des von ZWIKKER/KOSTEN [201] entwickelten Ansatzes berechnet wird:

$$K_a(\omega) = \gamma \cdot p_0 \left(1 + \frac{2(\gamma-1)}{\text{Pr}^{1/2} \cdot \lambda\sqrt{-i}} \cdot J_{1,0}(\text{Pr}^{1/2} \cdot \lambda\sqrt{-i}) \right). \quad (6.48)$$

Aus den beiden Kennwerten ρ_a und K_a werden mit (6.28) und 6.29) die komplexe Absorberwellenzahl k_a und die Kennimpedanz z des porösen Absorbers berechnet, woraus

wiederum (mit (6.18) bis (6.20)) frequenzabhängige Schallabsorptionsgrade bestimmt werden können.

6.3.3 Theorie nach BIOT und Modellerweiterung nach ALLARD

Die Theorie nach BIOT, die ursprünglich für die Ausbreitung von Stoßwellen in wassergesättigten Böden entwickelt wurde, geht von der Ausbreitung der Schalldruckwellen sowohl im sättigenden Medium als auch im (elastischen) Skelett aus [206][207]. Bei der Anwendung der Modellvorstellung auf poröse Absorbermaterialien wurde häufig festgestellt, dass die Kopplung des Skeletts mit der eingeschlossenen Luft nur schwach ausgeprägt und überdies die Absorbermatrix nur schwer anzuregen ist, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Schallwellen nur in den luftgefüllten Poren ausbreiten. ALLARD verwendete diese Annahme eines starren Absorberskeletts, das sich nicht am Transport der Schallwellen beteiligt, zur Weiterentwicklung des BIOTschen Ansatzes für poröse Absorber in der Akustik [208].

BIOT gibt grundlegende Gleichungen für Spannungs-Dehnungs- und Bewegungsvorgänge an [206][207]. Daraus kann man unter Elimination der Bewegungs- und Spannungs-Dehnungsvorgänge nur die Bewegung der Luft mit Hilfe der Parameter komplexe dynamische Dichte und komplexe dynamische Kompressibilität darstellen. Insgesamt sind für die Modellberechnungen sieben Parameter notwendig, die sich nach Annahme eines starren Skeletts auf vier verringern [199]. Als Absorberparameter gehen die Porosität, der längenspezifische Strömungswiderstand und die Tortuosität in das Modell ein (s. auch Kap. 6.2.2). Als vierter Parameter kommt der Formfaktor c_B hinzu.

Die komplexe dynamische Dichte ρ_a als Absorberkennwert wird unter den getroffenen Annahmen nach der BIOTschen Theorie wie folgt berechnet :

$$\rho_a(\omega) = \rho_L \cdot \tau^2 - i \frac{\Xi \sigma}{\omega} \cdot F(\omega). \quad (6.49)$$

$F(\omega)$ stellt einen frequenzabhängigen Faktor dar, der den Übergang von parabolischen Strömungsprofilen bei niedrigen Frequenzen zu annähernd rechteckigen Strömungsprofilen bei höheren Frequenzen berücksichtigt. BIOT formuliert den Faktor wie folgt:

$$F(\omega) = -\frac{1}{4} \frac{c_B k_v a \cdot J_{1,0}(c_B k_v a)}{1 - 2 \frac{J_{1,0}(c_B k_v a)}{c_B k_v a}}. \quad (6.50)$$

Mit dem Porenradius a aus Gleichung (6.25), der Wellenzahl k_v der Zähigkeitswelle

$$k_v = \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \cdot \sqrt{-i} \quad (6.51)$$

und dem Zusammenhang zwischen kinematischer und dynamischer Viskosität aus (6.44), kann (6.50) wie folgt umformuliert werden zu:

$$F(\omega) = -\frac{1}{4} \frac{\lambda \sqrt{-i} \cdot J_{1,0}(\lambda \sqrt{-i})}{1 - 2 \frac{J_{1,0}(\lambda \sqrt{-i})}{\lambda \sqrt{-i}}}, \quad (6.52)$$

worin

$$\lambda = c_B \cdot \sqrt{\frac{8\tau^2 \rho_L \omega}{\Xi \sigma}} \quad (6.53)$$

ist.

c_B ist darin ein (Form-)Faktor, der in Abhängigkeit der Porengeometrie bzw. Struktur des Absorbers gewählt werden muss. Für gleichmäßig angeordnete zylindrische Poren, die untereinander nicht verbunden sind, gilt $c_B = 1$, für spaltförmige Poren $c_B = (4/3)^{1/2}$. In diesem Wertebereich bewegt sich c auch für andere komplexere Geometrien. Nur für den Fall geometrisch genau definierter Poren liefert das Modell von BIOT/ALLARD auch eine exakte Lösung, für unregelmäßige Geometrien und Verbindungen der Poren untereinander, wie es im OPA vorliegt, ist c_B ein Anpassungsfaktor, mit Hilfe dessen das Modell eine Näherungslösung liefert. In dieser Arbeit wird der Formfaktor c_B vereinfacht zu 1 angenommen.

Als Komplementär des Kennwertpaares muss zusätzlich zur komplexen dynamischen Dichte ρ_a die komplexe dynamische Kompressibilität K_a bestimmt werden. Dies geschieht mit Hilfe des folgenden von ZWIKKER/KOSTEN entwickelten Ansatzes [210]:

$$K_a(\omega) = \gamma \cdot p_0 \left(1 + \frac{2(\gamma - 1)}{\text{Pr}^{1/2} \cdot \lambda \sqrt{-i}} \cdot J_{1,0}(\text{Pr}^{1/2} \cdot \lambda \sqrt{-i}) \right). \quad (6.54)$$

Aus dem Kennwertpaar (ρ_a, K_a) können mit Hilfe von (6.28) und 6.29) die komplexe Absorberwellenzahl k_a und die Kennimpedanz z des absorbierenden Mediums berechnet werden. Hieraus lassen sich mit (6.20) frequenzabhängige Schallabsorptionsgrade bestimmen.

Die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Ansatz nach BIOT/ALLARD und dem ATTENBOROUGH-Modell stellen die unterschiedliche Ableitung der Formfaktoren und die verschiedenen Funktionen für die komplexe dynamische Dichte dar. Beide Modellansätze gehen von einfachen, gleichmäßigen und gerichteten Porenstrukturen aus und liefern nur für die Annahme dieser idealen Geometrie exakte Lösungen. Für komplexere Geometrien werden mit Hilfe der Variation der Formfaktoren Näherungen abgeleitet. Die Formfaktoren können dabei nicht analytisch aus der Geometrie abgeleitet werden sondern erst im Vergleich von Messungen und Modellrechnungen.

6.3.4 Modell nach CHAMPOUX und STINSON

Das Mikrostrukturmodell nach CHAMPOUX und STINSON ist eng an das Modell von BIOT/ALLARD angelehnt und stellt gewissermaßen eine Weiterentwicklung dar, die sich aus der Kritik an der Verwendung nur eines einzelnen Formfaktors zur Beschreibung der beiden Dissipationsvorgänge (viskos und thermisch) herleitet. Daher wird vorgeschlagen, zwei unterschiedliche Anpassungsfaktoren c_ρ und c_K zu verwenden, was damit begründet wird, dass die komplexe dynamische Dichte und die komplexe dynamische Kompressibilität von unterschiedlichen Aspekten der Porengeometrie abhängen und daher unterschiedliche Formfaktoren benötigt werden [208].

Die zugrunde liegende Vorstellung der Porengeometrie ist bei CHAMPOUX/STINSON komplexer als in anderen Modellen (wie ATTENBOROUGH und BIOT/ALLARD). Ausgangspunkt der Modellbildung ist die Bestimmung von Absorberparametern aus der exakten Porengeometrie. Es

werden dabei keine so starken Vereinfachungen vorgenommen wie beispielsweise bei ATTENBOROUGH oder auch BIOT/ALLARD. Die Poren setzen sich gedanklich aus einer Abfolge von Abschnitten unterschiedlicher Länge mit konstanten Querschnitten zusammen, aus denen dann durch Aufsummation die Absorberparameter Strömungswiderstand, Porosität und Tortuosität bestimmt werden können. Dementsprechend sind auch die Formfaktoren c_ρ und c_K direkt aus geometrischen Gegebenheiten ableitbar. Trotz Berücksichtigung wesentlich komplexerer Geometrien ist in der Modellierung die Überschneidung von Poren und deren Verbindung untereinander, wie es in Realität in OPA vorkommt, nicht vorgesehen.

Das eigentliche akustische Modell nach CHAMPOUX und STINSON geht ebenfalls von der Annahme eines starren Absorbergerüsts aus. Der Hauptunterschied besteht darin, dass zwei (c_ρ, c_K) anstatt nur eines Anpassungsfaktors (c_B) wie im Ansatz von BIOT/ALLARD verwendet werden. Begründet wird dies damit, dass die komplexe dynamische Dichte und die komplexe dynamische Kompressibilität von unterschiedlichen Aspekten der Porengeometrie abhängen und daher für die beiden Kennwerte jeweils unterschiedliche Anpassungsfaktoren c_ρ und c_K benötigt werden. Folgender Ansatz wird angegeben [201]:

$$\lambda_\rho = c_\rho \cdot \left(\frac{8\tau^2 \rho_L \omega}{\Xi \sigma} \right)^{1/2}, \quad (6.55)$$

$$\lambda_K = c_K \cdot \left(\frac{8\tau^2 \rho_L \omega}{\Xi \sigma} \right)^{1/2}. \quad (6.56)$$

Die Anpassungsfaktoren lassen sich nach CHAMPOUX/STINSON wie folgt aus der Geometrie bzw. durch abschnittsweise Betrachtung der Poren herleiten. Für Porengeometrien mit n betrachteten Abschnitten gilt durch Aufsummation:

$$c_\rho = \left(\frac{\tau^2}{\sigma} \right)^{1/2} \frac{\sum_n s_n \sigma_n^{1/2} \frac{l_n}{A_n}}{\sigma^{1/2} \cdot \sum_n \frac{l_n}{A_n}}, \quad (6.57)$$

$$\frac{1}{c_K} = \left(\frac{\tau^2}{\sigma} \right)^{1/2} \frac{\sum_n s_n \sigma_n^{1/2} A_n l_n}{\sigma^{1/2} \sum_n A_n l_n}. \quad (6.58)$$

Nach Erfahrungen in der Anwendung des Modells [208] wird in dieser Arbeit der Formfaktor $c_\rho = 1$ gesetzt (analog wie c_B im BIOT-Modell, s. Kap. 6.3.3). Der Faktor c_K , der die thermischen Effekte im Gegensatz zum BIOT-Modell gesondert berücksichtigen soll, wird durch Ausgleichsrechnung von Modellrechnung und Messdaten bestimmt (s. Kap. 7.2).

Die Gleichungen für die komplexe dynamische Dichte und die komplexe dynamische Kompressibilität aus dem BIOT/ALLARD-Ansatz (Gleichungen 6.49 und 6.54) gehen über in:

$$\rho_a(\omega) = \rho_L \cdot \tau^2 - i \frac{\Xi \sigma}{\omega} \cdot F_\rho(\omega) \quad (6.59)$$

mit

$$F_\rho(\omega) = -\frac{1}{4} \frac{\lambda_\rho \sqrt{-i} \cdot J_{1,0}(\lambda_\rho \sqrt{-i})}{1 - 2 \frac{J_{1,0}(\lambda_\rho \sqrt{-i})}{\lambda_\rho \sqrt{-i}}} \quad (6.60)$$

und

$$K_a(\omega) = \gamma \cdot p_0 \left(1 + \frac{2(\gamma-1)}{\text{Pr}^{1/2} \cdot \lambda_K \sqrt{i}} \cdot J_{1,0}(\text{Pr}^{1/2} \cdot \lambda_K \sqrt{-i}) \right). \quad (6.61)$$

Aus den Absorberkennwerten ρ_a und K_a lassen sich mit Hilfe des Zwischenschritts der Umrechnung in komplexe Wellenzahl k_a und Kennimpedanz z Schallabsorptionsgrade in Abhängigkeit der Frequenz bestimmen (Gleichungen (6.20), (6.28) und (6.29)).

6.3.5 Phänomenologisches Modell nach HAMET

Im Gegensatz zu den vorgestellten Mikrostrukturmodellen wählt HAMET einen phänomenologischen Ansatz für sein Modell [209]. Somit ist die Kenntnis der genauen Porengeometrie (und auch die Verwendung von Formfaktoren) obsolet; vielmehr wird zur Herleitung das beobachtete akustische Verhalten des porösen Absorbers mit makroskopischen Material- bzw. Absorberparameter verknüpft.

In früheren phänomenologischen Modellen zur Beschreibung von porösen Absorbern vor einer schallharten Wand im allgemeinen und offenporigen Asphaltschichten im speziellen weichen die berechneten Ergebnisse vom beobachteten Verhalten vor allem in der Gestalt ab, dass sich höhere Schallabsorptionsgrade einstellen als anhand der Absorberparameter (Porosität und Strömungswiderstand) zu erwarten wäre. Zurückgeführt wird dies darauf, dass allein viskose Effekte des Absorptionsvorgangs berücksichtigt werden, während die thermischen Vorgänge vernachlässigt werden [209].

Analog des längenspezifischen Strömungswiderstands Ξ , von dem die viskose Reibung in porösen Absorbern direkt abhängt, wird ein zusätzlicher Parameter Ξ_T definiert, der in gleicher Weise wie ein Strömungswiderstand die thermischen Effekte bei der Absorption berücksichtigt: Es ist

$$\Xi_T = \frac{1}{\text{Pr}} \Xi. \quad (6.62)$$

Die Prandtl-Zahl Pr stellt dabei den Zusammenhang zwischen mechanischen (viskosen) und thermischen Vorgängen dar. Die Vorgänge erfolgen in ähnlicher Weise. Mit der Prandtl-Zahl werden in der Thermodynamik die unterschiedlichen Diffusionszeiten der mechanischen bzw. thermischen Prozesse berücksichtigt.

Mit Hilfe dieses Zusammenhangs für die thermischen Effekte und unter Berücksichtigung der Überlegungen von (6.30) für die viskosen Effekte definiert HAMET frequenzabhängige Funktionen f_η und f_θ , die entsprechend mit den viskosen bzw. den thermischen Vorgängen in Verbindung gebracht werden:

$$f_\eta = \frac{\Xi \sigma}{\omega \rho_L \tau^2}, \quad (6.63)$$

$$f_{\theta} = \frac{\Xi}{\omega \rho_L \text{Pr}}. \quad (6.64)$$

Daraus bestimmen sich die Kennwerte komplexe dynamische Dichte und komplexe dynamische Kompressibilität wie folgt:

$$\rho_a(\omega) = \rho_L \tau^2 (1 - i f_{\eta}). \quad (6.65)$$

Dies entspricht dem von BIOT formulierten Zusammenhang für die komplexe dynamische Dichte (vgl. Glg. 6.49), allerdings unter Vernachlässigung des Korrekturterms $F(\omega)$. Weiterhin ist

$$K_a = \gamma \cdot p_0 \left(\frac{1 - i f_{\theta}}{1 - i \gamma \cdot f_{\theta}} \right). \quad (6.66)$$

Mit Hilfe der Zusammenhänge in (6.28) und (6.29) können daraus die Kennimpedanz und die komplexe Absorberwellenzahl berechnet werden, womit wiederum mit (6.20) Schallabsorptionsgrade in Abhängigkeit der Frequenz ermittelt werden können.

7 Veränderung des akustischen Verhaltens durch Verschmutzung

7.1 Entwicklung der messtechnisch bestimmten (Absorber-)Parameter mit zunehmender Verschmutzung

Neben anderen Ursachen (z.B. Textur, Oberflächenschäden, Kornumlagerungen bzw. Verformungen aufsteigendes Bindemittel, s. auch Kap. 3.3.1) ist der Eintrag und die Deposition von Schmutz in den Poren von OPA einer der wesentlichen auslösenden Faktoren, dass die lärmindernde Wirkung über die Jahre abnimmt (s. Kap. 4.1.2). Durch das Verstopfen (oberflächlicher) Poren können einerseits die aerodynamischen Entstehungsmechanismen der Reifen-Fahrbahn-Geräusche in der Rollspur nicht mehr so effektiv gemindert werden. Andererseits bewirkt der eingelagerte Schmutz eine Veränderung verschiedener Absorberparameter des OPA, die das Schallabsorptionsverhalten auf der gesamten Fahrbahnfläche beeinflussen. Die Porosität bzw. der zugängliche Hohlraumgehalt wird geringer, der Strömungswiderstand wird größer (s. auch Kap. 4.1.2); die Absorberparameter Tortuosität und Strukturfaktor ändern sich ebenfalls mit zunehmender Verschmutzung (s. Kap. 7.2).

Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens durch Verschmutzung

Wie Messungen des Schallabsorptionsgrads in situ (s. Kap. 5.2.2) zeigen, wirkt sich die Veränderung dieser Parameter derart aus, dass der Schallabsorptionsgrad α wegen des zurückgehenden zugänglichen Hohlraumgehalts insgesamt verringert wird, vor allem die ausgeprägten Absorptionsmaxima bzw. Peaks werden deutlich kleiner; durch die Erhöhung des Strömungswiderstands ist zudem eine Verbreiterung der Peaks zu beobachten. Bei sehr starker Verschmutzung verliert der OPA seine schallabsorbierenden Eigenschaften fast vollständig.

Weiterhin ist durch die Verschmutzung eine Änderung der porösen Struktur festzustellen, so dass sich die Lage der Absorptionsmaxima im Frequenzspektrum verschieben. Lagert sich der Schmutz hauptsächlich am Boden ab, wirkt dies wie die Verringerung der wirksamen Schichtdicke; das Absorptionsmaximum wandert hin zu höheren Frequenzen⁷⁵. Auch der gegenteilige Effekt einer Verschiebung zu niedrigeren Frequenzen kann beobachtet werden. Als Ursache ist hier eine virtuelle Erhöhung der Schichtdicke durch die Vergrößerung der Tortuosität verantwortlich. Die Windungen im Porengerüst werden durch Schmutzablagerungen erhöht, der Weg der Schalldruckwelle durch die OPA-Schicht verlängert sich, was sich wie eine Erhöhung der Schichtdicke im Schallabsorptionsverhalten auswirkt (s. auch Kap. 4.1.2 und 7.2). Die Verschiebungen der Maxima zu höheren und tieferen Frequenzen durch Verschmutzungseintrag sind demnach gegenläufig und können sich dadurch auch aufheben, so dass der jeweilige Einfluss der beiden Mechanismen auf die Schallabsorption im Einzelfall nicht klar ausgemacht werden kann.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche können aufgrund der relativ geringen aufgetragenen Schmutzmengen keine nennenswerte Verringerung der Schichtdicke bewirken, so dass die Verschiebung der Frequenzmaxima in vollem Umfang auf die Erhöhung der Tortuosität

⁷⁵ Dieser Effekt kann auch durch aufsteigendes Bindemittel hervorgerufen werden.

zurückgeführt werden kann. Diese Auswirkung der Verschmutzung auf den gemessenen Frequenzgang des Absorptionsgrads ist schematisch in Abbildung 25 dargestellt. Die an den künstlich verschmutzten Probekörpern (s. Kap. 5.1) konkret aufgetretenen Veränderungen des Schallabsorptionsverhaltens werden in Abbildung 26 veranschaulicht. Folgendes ist zu erkennen:

- Die Lage des ersten Maximums im Frequenzspektrum verschiebt sich durch die künstlich eingebrachte Verschmutzung hin zu niedrigeren Frequenzen.
- Die Schallabsorptionsgrade α in diesem ersten Maximum werden durch den Schmutzeintrag geringer.
- Die genannten Auswirkungen der Verschmutzung sind bei den feinkörnigeren und einlagigen Aufbauten tendenziell stärker ausgeprägt als bei größerem Größtkorn und zweilagigem Aufbau.
- Die Verschiebung des ersten Maximums zu niedrigeren Frequenzen ist bei einlagigen Aufbauten deutlicher ausgeprägt als bei zweilagigen.
- Die Abnahme des Schallabsorptionsgrads im ersten Maximum ist umso stärker, je feiner die obere Schicht ist. Die Schichtdicke und die Körnung der unteren Schicht spielen eine untergeordnete Rolle.
- Durch die Polymermodifizierung bzw. die Beschichtung des OPA (s. Kap. 4.3) werden im Vergleich zum unmodifizierten Fall geringere Auswirkungen der Verschmutzung auf den Absorptionsgrad ausgemacht.

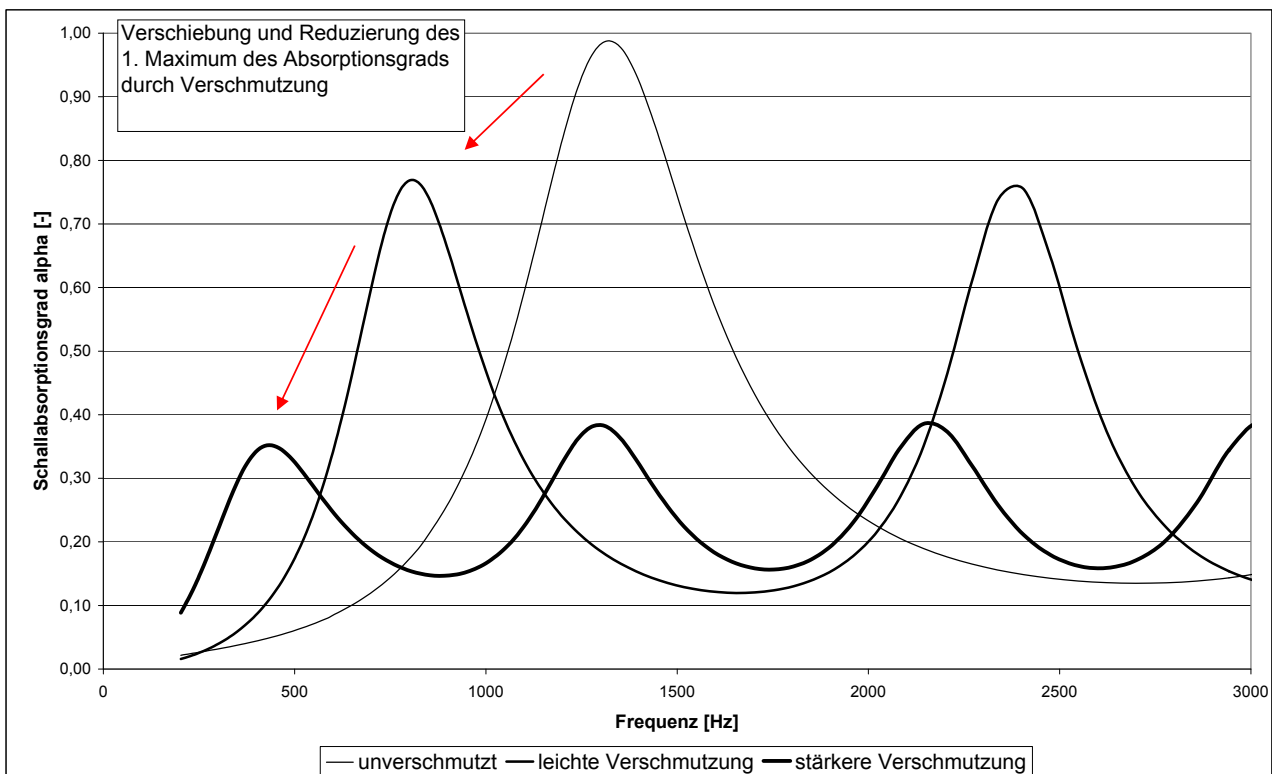


Abbildung 25: Veränderung des Schallabsorptionsgrads (Lage und Höhe des 1. Maximums) durch Verschmutzung (schematische Darstellung)

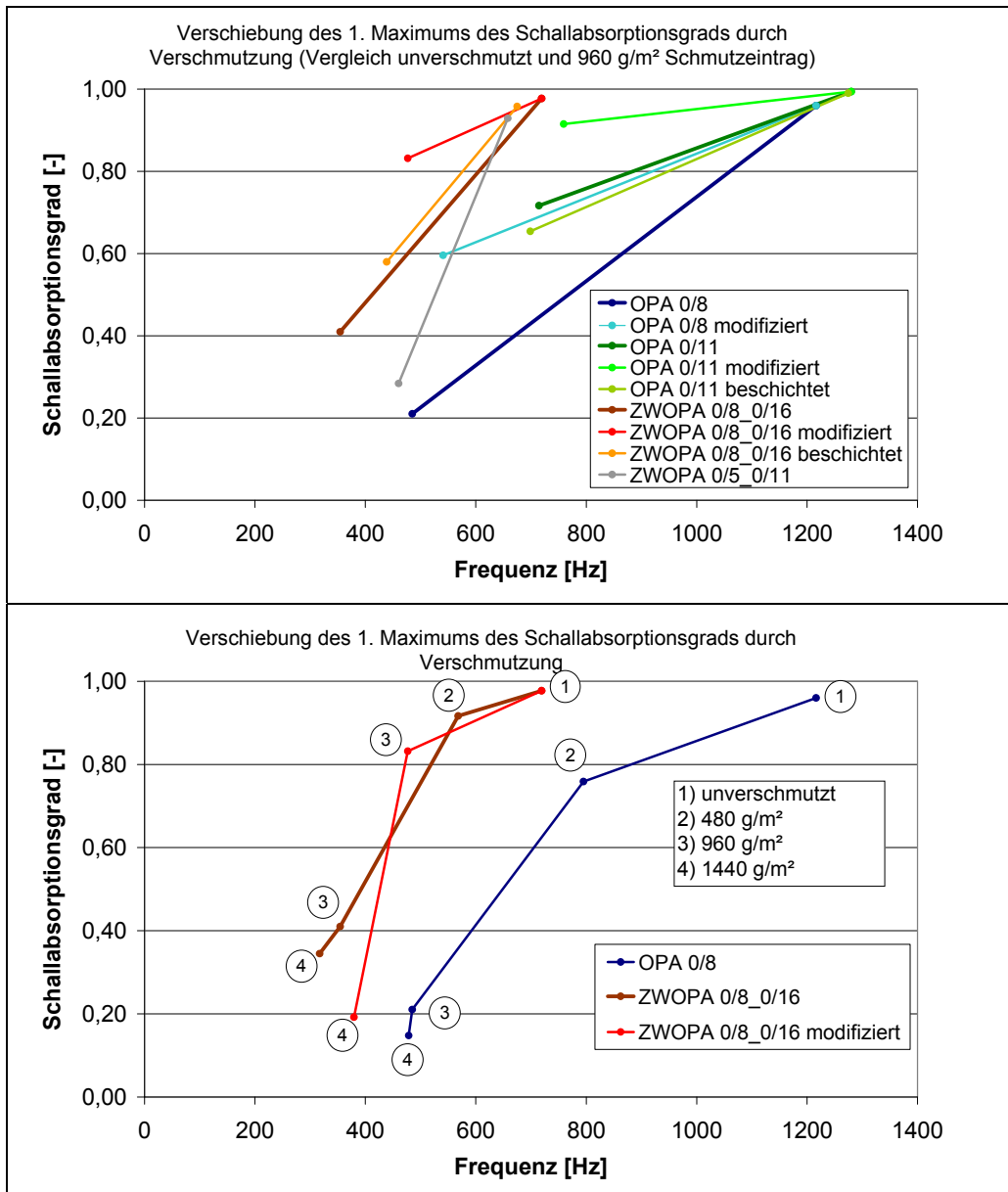


Abbildung 26: Auswirkung des (künstlichen) Verschmutzungseintrags auf das Schallabsorptionsverhalten der OPA-Probekörper; oben: Vergleich zwischen unverschmutztem Zustand und 960 g/m² Schmutzeintrag; unten: OPA 0/8 und ZWOPA 0/8_0/16 in verschiedenen Verschmutzungsstadien

Veränderung des Strömungswiderstands durch Verschmutzung

Der Schmutzeintrag in das Porengerüst von offenporigen Asphalten bewirkt eine Erhöhung des längenspezifischen Strömungswiderstands. Die Mechanismen, die zur Erhöhung dieses Absorberkennwerts führen, sind in Kapitel 4.1.2 beschrieben, die messtechnische Erfassung des Strömungswiderstands in Kapitel 5.2.1. Bei den durch die künstliche Verschmutzung hervorgerufenen Änderungen des Strömungswiderstands der OPA-Probekörper sind folgende Auffälligkeiten zu bemerken (s. Abbildung 27 und Abbildung 28⁷⁶):

⁷⁶ Zur besseren Lesbarkeit sind die Hochachsen zur Darstellung des sehr sensitiven Parameters Strömungswiderstand in den Diagrammen unterschiedlich skaliert

- Die Erhöhung des Strömungswiderstands ist bei feinkörnigeren und einlagigen Aufbauten stärker ausgeprägt als bei grobkörnigeren und zweilagigen Aufbauten.
- Durch die Modifizierung bzw. Beschichtung der Probekörper fällt die Erhöhung des Strömungswiderstands im Vergleich zum unmodifizierten Fall geringer aus.

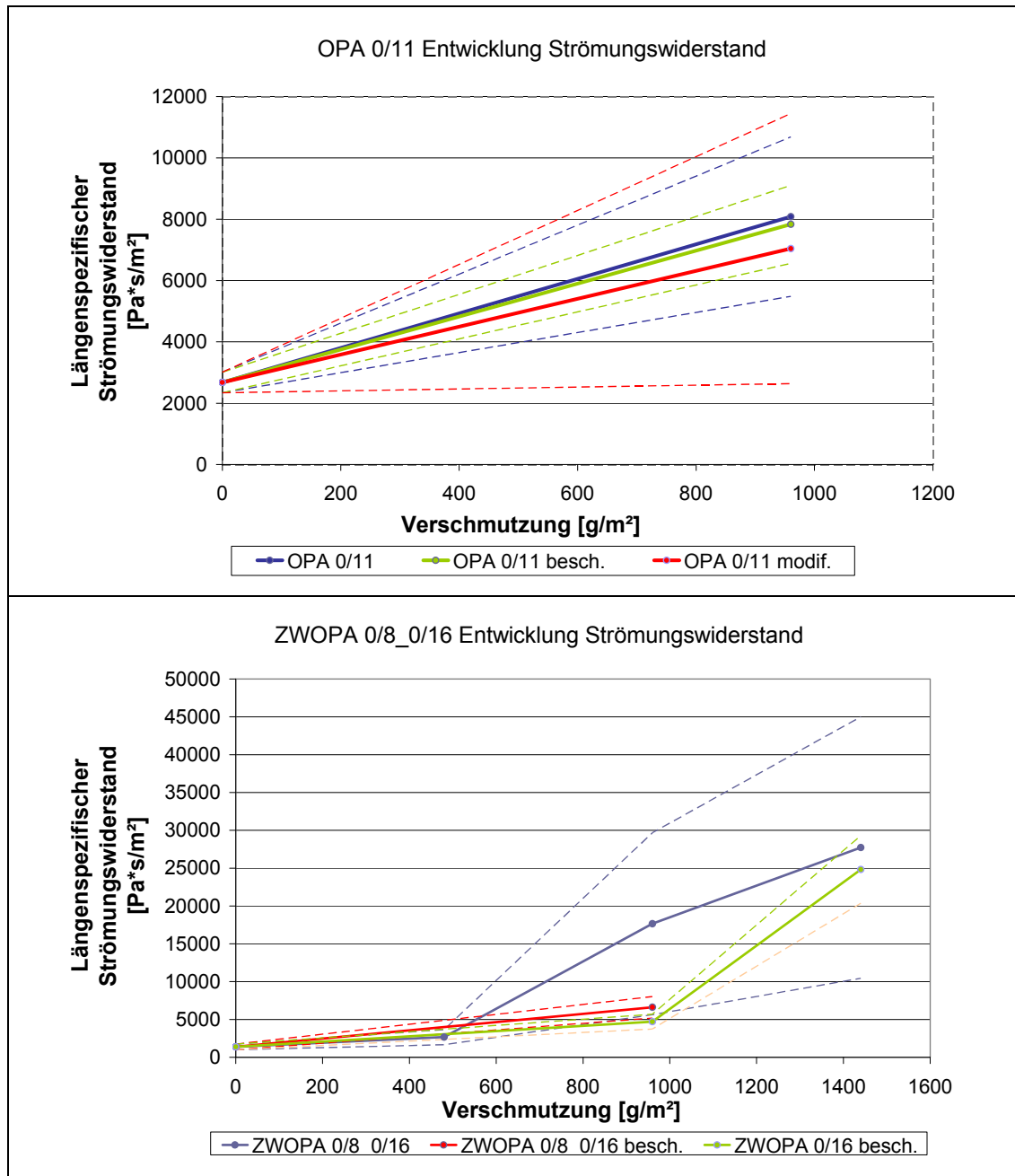


Abbildung 27: Entwicklung des längenspezifischen Strömungswiderstands an unterschiedlichen künstlich verschmutzten OPA-Probekörpern (gestrichelt sind die Standardabweichungen dargestellt)

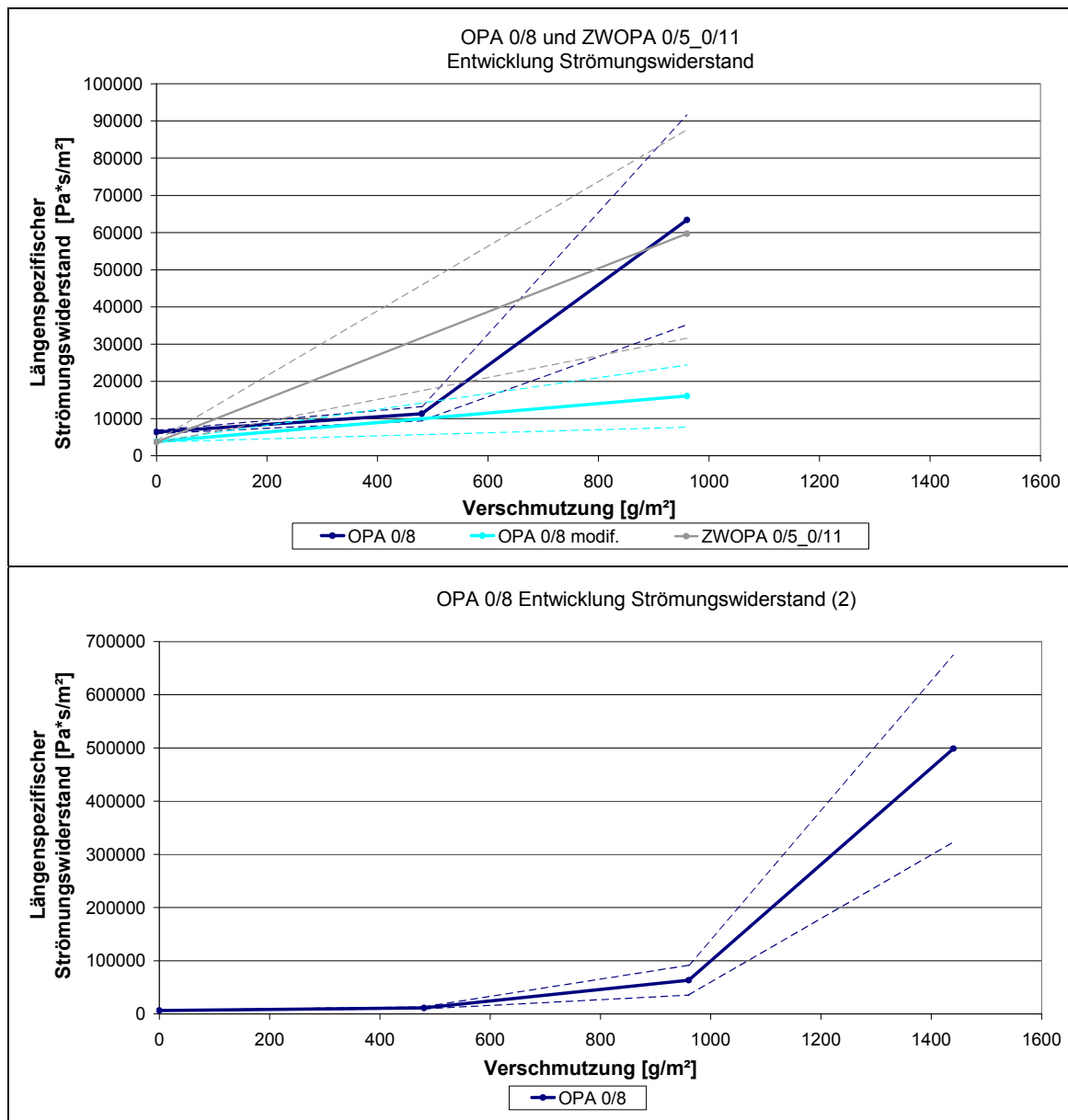


Abbildung 28: Entwicklung des längenspezifischen Strömungswiderstands an unterschiedlichen künstlich verschmutzten OPA-Probekörpern (gestrichelt sind die Standardabweichungen dargestellt)

Veränderung der Porosität durch Verschmutzung

Die akustisch relevante Porosität σ stellt den zugänglichen Teil des Hohlraumgehalts dar, der rechnerisch in der straßenbautechnischen Eignungsprüfung ermittelt wird.

Messtechnisch ermittelt werden kann die Porosität mit Hilfe von computertomographischen Untersuchungen von Bohrkernen, wie sie im Rahmen des Verbundprojekts „Leiser Straßenverkehr 2“ bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) für ausgewählte Fälle durchgeführt wurde (s. Tabelle 5, Spalten (6)-(8)) [186]. In den Spalten (3) bis (5) werden die aus der Eignungsprüfung ermittelten Hohlraumgehalte angegeben (s. auch Kap. 5.1.1)

Für den verschmutzten Zustand lassen sich durch die Annahme einer durchschnittlichen Lagerungsdichte des Schmutzes in den Hohlräumen für verschiedene Schmutzmengen (Spalte (2)) durch Subtraktion des mit Schmutz verfüllten Hohlraumgehalts vom Hohlraumgehalt im sauberen Zustand (Spalte (5)) theoretische (Rest-) Hohlraumgehalte nach Verschmutzung berechnen (Spalte (9)). Die ausgewaschene Schmutzmenge, die in etwa 1 bis 2 % des aufgetragenen Schmutzes beträgt, ist so gering, dass sie bei der Ermittlung des Resthohlraumgehalt nach Verschmutzung entfallen kann.

Aus Messungen an Marshallprobekörpern werden in [126] Anteile des zugänglichen Hohlraums am Gesamthohlraumgehalt von ca. 80 % bei 15 % Gesamthohlraumgehalt, 90 % bei 20 % Gesamthohlraumgehalt und 100 % bei 25 % Gesamthohlraumgehalt angegeben. Aus den Ergebnissen der CT-Untersuchungen kann ebenfalls gefolgert werden, dass die Porosität je nach gewähltem Schichtaufbau und Größtkorn in allgemeinen Modellrechnungen (s. Kap. 7.3.3) als Anteil von ca. 80-100 % des Hohlraumgehalts angesetzt werden kann.

Aufgrund dieser Erkenntnisse, der geringen Datenbasis und der Inkonsistenzen der Ergebnisse der CT-Untersuchungen wird für die Modellrechnungen zur Ermittlung von Tortuositäten (s. Kap. 7.2) der berechnete Resthohlraumgehalt (Spalte (9)) nach Verschmutzung bzw. der Hohlraumgehalt aus der Eignungsprüfung (Spalte (5)) als (akustisch relevante) Porosität σ angesetzt (s. auch Kap. 5.1.1).

	Schmutz- menge [g/m ²]	Hohlraumgehalt laut Eignungsprüfung			CT-Untersuchung			berechneter Resthohl- raumgehalt nach Verschm. [%]	
		obere Schicht [%]	untere Schicht [%]	gesamt [%]	obere Schicht [%]	untere Schicht [%]	gesamt [%]		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
OPA 0/8 *	0	25,3		25,3	25,2		25,2		
					25,1		25,1		
	480				22,1		22,1	24,6	
	960							24,0	
	1440				18,2		18,2	23,3	
				21,7		21,7			
OPA 0/11 *	0	27,2		27,2					
	960							25,9	
ZWOPA 0/8_0/16 *	0	25,3	27,7	26,8	27,2	20,6	23,0		
					26,2	20,1	22,3		
	480				23,2	19,9	21,1	26,5	
	960							26,1	
	1440					25,1	21,4	22,7	25,7
						24,1	20,1	21,5	
					26,1	22,5	23,8		
					26,6	19,9	22,3		
ZWOPA 0/5_0/11 *		25,1	27,2	26,5					
	960							25,7	

*) Bezeichnung und Spezifikationen nach Kapitel 5.1.1, Tabelle 2

Tabelle 5: Hohlraumgehalte der Probekörper aus Eignungsprüfungen und CT-Untersuchungen und berechneter Resthohlraumgehalt nach Verschmutzung

Zusammengefasst ergeben sich für die jeweiligen Probekörper und Verschmutzungsstadien die in Tabelle 6 angegebenen Veränderungen des messtechnisch erfassten Schallabsorptionsverlaufs $\alpha_M(f_M)$ sowie der Absorberparameter (Porosität σ und längenspezifischer Strömungswiderstand Ξ_M) durch den Verschmutzungseintrag.

Mischgut- sorte	Schicht- dicke [m]	Modi- fizierung	Schmutz- menge [g/m ²]	Porosität σ [-]	Strömungs- widerstand Ξ_M [Pa*s/m ²]	Standardab- weichung von Ξ_M [Pa*s/m ²]	Schallabsorptionsgrad im 1. Maximum		Probe- körper Nr.
							Frequenz f_M [Hz]	Schallabsor- ptionsgrad α_M bei f_M [-]	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
OPA 0/8	0,04	-	0	0,253	6360	655	1301	0,96	1
					6340	318	1180	0,96	2
					6490	400	1168	0,96	3
			480	0,246	11300	1919	795	0,76	1
			960	0,240	63390	28147	485	0,21	3
		1440	0,233	499010	175321	478	0,15	2	
		modif.	0	0,253	3830	115	n.b.	n.b.	10
			960	0,240	16060	8373	541	0,60	
OPA 0/11	0,04	-	0	0,272	2890	258	1286	1,00	4
			960	0,259	8080	2600	695	0,62	
		besch.	0	0,272	2810	166	1274	0,99	
			960	0,259	7830	1271	699	0,65	9
		modif.	0	0,272	2670	469	n.b.	n.b.	
			960	0,259	7040	4403	759	0,92	12
ZWOPA 0/8_0/16	0,07	-	0	0,268	890	650	780	0,98	5
					1540	98	723	0,98	6
					1620	121	655	0,97	7
			480	0,265	2670	999	568	0,92	6
			960	0,261	17660	12024	355	0,41	7
			1440	0,257	27730	17270	317	0,34	5
		besch.	0	0,268	1640	291	675	0,96	
			960	0,261	6620	1425	439	0,58	13
		modif.	0	0,268	1140	73	n.b.	n.b.	
			960	0,261	4720	976	477	0,83	14
		modif.	0	0,268	1620	215	n.b.	n.b.	
			1440	0,257	24830	4465	379	0,19	15
ZWOPA 0/5_0/11	0,07	-	0	0,265	3480	253	683	0,93	8
					3950	513	633	0,93	17
			960	0,257	59690	28086	460	0,28	8

Tabelle 6: Zusammenfassung der Veränderung der messtechnisch erfassten Absorberparameter und des Schallabsorptionsverhaltens

7.2 Ermittlung der Tortuosität in Abhängigkeit der Verschmutzung

Eingangsparameter

Zur empirischen Ermittlung der Tortuosität bzw. des Strukturfaktors mit Hilfe der Modellvorstellung des porösen Absorbers vor einer schallharten Wand und entsprechender Rechenmodelle (vgl. Kap. 6.2 und 6.3) sind unterschiedliche Eingangswerte notwendig. In den Modellrechnungen werden jeweils folgende Parameter, die sich aus Messung oder aus den Modellansätzen ergeben, angesetzt:

- Schallabsorptionsgrad $\alpha(f)$: Der Schallabsorptionsgrad in situ wird analog zu Kap. 5.2.2 messtechnisch bestimmt. Die Veränderungen des Schallabsorptionsgrads der OPA-Probekörper durch den Schmutzeintrag werden in Kap. 7.1 behandelt.
- Schichtdicke d : Als Ausgangswert dient die nominale Soll-Schichtdicke, die durch Nachmessen an verschiedenen Punkten der OPA-Probekörper verifiziert wurde. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch am Boden abgelagerten Schmutz die Schichtdicke nicht

reduziert ist. Für nennenswerte (akustisch wirksame) Ablagerungen am Boden ist die aufgebrauchte Schmutzmenge zu gering. Weiterhin zeigen die Reduzierungen des Hohlraums, die mit den CT-Untersuchungen nachgewiesen werden, dass der Schmutz zu größten Teilen in der Schicht und nicht am Boden abgelagert wird. Die Verschiebung des Absorptionsfrequenzspektrums wird in Realität sowohl von der Abnahme der Schichtdicke als auch der Zunahme der Tortuosität der Porenstruktur gegenläufig beeinflusst. Durch den künstlichen Verschmutzungsprozess, wie er in dieser Arbeit durchgeführt wird, wird nur eine Änderung der Tortuosität hervorgerufen (s. auch Kap. 7.1). Die Schichtdicke wird demnach in den Modellrechnungen im verschmutzten wie im unverschmutzten Fall als identisch betrachtet.

- Porosität σ : Die Ergebnisse, die mit Hilfe von CT-Untersuchungen ermittelt wurden, werden wegen der insgesamt geringen Datenbasis bei hoher Streuung und zusätzlicher Inkonsistenzen der Ergebnisse im Vergleich von unverschmutztem und verschmutztem Zustand nicht für die Modellrechnungen herangezogen. Stattdessen wird der Hohlraumgehalt aus der Eignungsprüfung bzw. der berechnete Resthohlraumgehalt, der durch den eingetragenen Schmutz bei einer Lagerungsdichte von $1,8 \text{ g/cm}^3$ entsteht, als Porosität angesetzt (s. Kap. 7.1, Tabelle 5).
- Längenspezifischer Strömungswiderstand \mathcal{E} : Die Messung des Strömungswiderstands an den Probekörpern wird wie in Kap. 5.2.1 beschrieben durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen an den OPA-Probekörpern sind in Kap. 7.1 dargestellt.
- Korrekturfaktoren aus der Porengeometrie: Aus den Modellansätzen und den dort getroffenen Annahmen (s. Kap. 6.3), werden aufgrund der granularen Struktur und den daraus entstehendem Netzwerk aus gedrungenen und röhrenförmigen Poren des offenporigen Asphalts die Korrekturfaktoren wie folgt gewählt:
 - Modell nach ATTENBOROUGH: für granuläre Absorber $f_{n,s} = 0,75$
 - Modell nach BIOT und ALLARD: $c = 1,0$
 - Modell nach CHAMPOUX/STINSON: $c_p = 1,0$

Im einzelnen sind damit die in Tabelle 7 angegebenen Eingangparameter für die Modellrechnungen nach Kap. 6.3.1 bis 6.3.5 verwendet worden.

Mischgut- sorte	Schicht- dicke [m]	Modi- fizierung	Schmutz- menge [g/m ²]	Porosität σ [-]	Strömungs- widerstand Ξ_m [Pa*s/m ²]	Probe- körper Nr.	Korrekturfaktoren [-]		
							Attenborough $f_{n,s}$	Biot/ Allard c	Champoux/ Stinson c_p
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
OPA 0/8	0,04	-	0	0,253	6360	1	0,75	1,00	1,00
					6340	2			
					6490	3			
			480	0,246	11300	1			
			960	0,240	63390	3			
		1440	0,233	499010	2				
		modif.	0	0,253	3830	10			
		960	0,240	16060					
OPA 0/11	0,04	-	0	0,272	2890	4	0,75	1,00	1,00
			960	0,259	8080				
		besch.	0	0,272	2810	9			
			960	0,259	7830				
		modif.	0	0,272	2670	12			
			960	0,259	7040				
ZWOPA 0/8_0/16	0,07	-	0	0,268	890	5	0,75	1,00	1,00
					1540	6			
					1620	7			
			480	0,265	2670	6			
			960	0,261	17660	7			
		1440	0,257	27730	5				
		besch.	0	0,268	1640	13			
			960	0,261	6620				
		modif.	0	0,268	1140	14			
			960	0,261	4720				
		modif.	0	0,268	1620	15			
			1440	0,257	24830				
ZWOPA 0/5_0/11	0,07	-	0	0,265	3480	8	0,75	1,00	1,00
					3950	17			
			960	0,257	59690	8			

Tabelle 7: Modelleingangsparameter aus Messungen und Korrekturfaktoren für die Modellrechnungen

Ausgleichsrechnung

Die aus den Modellen berechneten Verläufe des frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrads werden mit Hilfe der Ausgleichsrechnung den Messwerten in der Weise angenähert, dass die Summe der Quadrate der Abweichungen minimal wird (Methode der kleinsten Quadrate⁷⁷). Der betrachtete Frequenzbereich beschränkt sich im wesentlichen auf den Bereich des ersten Maximums im Verlauf des Schallabsorptionsgrads und dessen unmittelbar angrenzenden Bereiche. Begründet wird dies damit, dass die Messung des Schallabsorptionsgrads bei höheren Frequenzen einen stark schwankenden Verlauf aufweist, was die Ausgleichsrechnung wesentlich erschwert. Die für die Ausgleichsrechnung betrachteten Frequenzbereiche umfassen deshalb im Einzelnen:

- $f < 2000$ Hz für unverschmutzten einlagigen OPA (Schichtdicke 0,04 m)
- $f < 1500$ Hz für unverschmutzten zweilagigen ZWOPA (Schichtdicke 0,07 m)
- $f < 1500$ Hz für verschmutzten OPA und ZWOPA bei Verschmutzungsgrad 480 g/m²

⁷⁷ Least Square Fit -Methode

- $f < 1000$ Hz für verschmutzten OPA und ZWOPA, außer Verschmutzungsgrad 480 g/m²

Die Variablen zum Ansatz der Ausgleichsrechnung (für alle Modelle) sind demnach:

- Strukturfaktor κ (Theorie der homogenen Medien) bzw. Tortuosität τ (alle anderen beschriebenen Modelle)
- Korrekturfaktoren c_{ε} , mit denen die gemessenen Strömungswiderstände aus Kap. 7.1 in den Modellen angepasst werden. Auf diese Weise wird berücksichtigt, dass in den Modellen mit ebenen Schallwellen gerechnet wird, während die Messung des Schallabsorptionsgrads auf kugelförmigen Ausbreitungsmechanismen basiert (s. Kap. 5.2.2). Die Korrekturwerte c_{ε} werden an den unverschmutzten Fällen durch Ausgleichsrechnung bestimmt. Daraus werden für jede Mischgutsorte bzw. jeden Schichtaufbau jeweils Mittelwerte der Korrekturfaktoren c_{ε} berechnet und für die verschmutzten Fälle übernommen (s. auch Tabelle 9). In den Modellen werden demnach die gemessenen Werte des Strömungswiderstands ε_M aus Tabelle 7 wie folgt korrigiert:

$$\varepsilon_{\text{korrr}} = c_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_M \quad (7.1)$$

Bei Anwendung der Theorie der homogenen Medien und der Modellvorstellung nach CHAMPOUX/STINSON sind die folgenden zusätzlichen (veränderlichen) Eingangsgrößen notwendig:

- effektiver Adiabatenkoeffizient γ_{eff} (Theorie der homogenen Medien)
- Korrekturfaktor c_K (Modell nach CHAMPOUX/STINSON)

Somit wird durch Ausgleichsrechnung anhand von jeweils 5 Einzelmessungen des frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrads $\alpha(f)$ pro Probekörper und Verschmutzungsgrad der Strukturfaktor κ bzw. die Tortuosität τ der OPA-Schicht im jeweiligen Zustand ermittelt. Zusätzlich werden ergänzend die weiteren veränderlichen Koeffizienten bzw. Korrekturfaktoren bestimmt.

Konkret ergeben sich statistisch die in Tabelle 8 angegebenen Mittelwerte mit den zugehörigen Standardabweichungen für den Strukturfaktor κ und die Tortuosität τ für die verschiedenen Modellansätze und Fälle. Die berechneten Werte werden zusätzlich in Abbildung 29 bis Abbildung 32 veranschaulicht.

Tabelle 9 gibt darüber hinaus die berechneten effektiven Adiabatenkoeffizienten γ_{eff} und die Korrekturfaktoren c_K wieder. Die darin enthaltenen Korrekturfaktoren für den Strömungswiderstand c_{ε} werden für den unverschmutzten Fall berechnet und dienen für den verschmutzten Fall nicht mehr als Variable sondern als Modelleingangsparameter und stellen quasi eine zusätzliche Material- bzw. Schichtaufbaukonstante dar (s. oben). Tabelle 10 gibt zusätzlich für den Strömungswiderstand (vgl. Tabelle 6) und die ermittelten Korrekturfaktoren des Strömungswiderstands die Standardabweichungen an. Zur Beurteilung der Qualität und Eignung der Modelle zur Darstellung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten insbesondere bei zunehmender Verschmutzung sind in Tabelle 11 jeweils die durchschnittlichen Summen der Fehlerquadrate, die sich bei der Ausgleichsrechnung ergeben, angegeben.

Veränderung des akustischen Verhaltens durch Verschmutzung

Mischgutsorte	Modifizierung	Schmutzmenge [g/m ²]	Probekörper Nr.	Strukturfaktor κ [-]	Standardabweichung aus den Einzelmessungen	Tortuosität [-]					Standardabw. aus den Einzelmessungen
						Attenborough	Biot/Allard	Champoux/Stinson	Hamet	Mittel der Modelle	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
OPA 0/8	-	0	1	2,31	0,33	2,87	2,86	2,66	2,90	2,82	0,19
			2	2,52	0,28	3,11	3,11	2,86	3,16	3,06	0,20
			3	2,68	0,29	3,18	3,18	2,97	3,19	3,13	0,22
		480	1	5,38	1,06	4,58	4,58	4,05	4,51	4,43	0,45
		960	3	21,54	5,90	7,19	7,19	7,65	7,91	7,49	1,08
		1440	2	58,31	17,27	9,18	9,18	8,81	10,28	9,36	1,29
modif.	0	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
	960	10	12,16	3,73	6,71	6,71	6,16	6,82	6,60	1,02	
OPA 0/11	-	0	4	2,76	0,27	2,95	2,96	2,82	2,93	2,91	0,17
			960	9,61	3,95	5,58	5,59	5,10	5,38	5,41	0,91
	besch.	0	9	2,83	0,71	3,05	3,05	2,95	3,06	3,03	0,30
		960	7,53	3,35	5,56	5,56	4,94	5,23	5,32	0,98	
	modif.	0	12	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		960	6,20	2,59	5,11	5,11	4,45	4,90	4,89	0,84	
ZWOPA 0/8_0/16	-	0	5	2,10	0,33	2,72	2,72	2,54	2,78	2,69	0,18
			6	2,29	0,16	2,90	2,91	2,61	2,95	2,84	0,18
			7	2,82	0,10	3,21	3,21	2,97	3,22	3,16	0,13
		480	6	3,50	0,20	3,46	3,46	3,26	3,54	3,43	0,22
		960	7	9,84	4,01	5,18	5,19	5,36	5,34	5,27	1,36
		1440	5	17,11	8,42	5,31	5,31	5,69	5,84	5,53	1,13
	besch.	0	13	2,57	0,22	3,13	3,13	2,93	3,17	3,09	0,19
		960	7,20	1,13	4,35	4,35	4,37	4,42	4,37	0,31	
	modif.	0	14	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		960	4,88	0,98	4,06	4,06	3,96	4,16	4,06	0,41	
	modif.	0	15	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		1440	27,47	23,35	5,26	6,31	5,35	5,56	5,62	1,22	
ZWOPA 0/5_0/11	-	0	8	2,36	0,20	2,93	2,93	2,70	3,10	2,92	0,21
			17	2,63	0,22	3,07	3,07	2,83	3,30	3,07	0,20
		960	8	12,38	3,97	5,39	5,39	7,37	5,59	5,94	2,05

Tabelle 8: Berechnete Tortuositäten τ bzw. Strukturfaktoren κ (aus den verschiedenen Modellansätzen)

Mischgutsorte	Modifizierung	Schmutzmenge [g/m ²]	Probekörper Nr.	Strömungswiderstand Ξ [Pa*s/m ²]	Korrekturfaktoren c_{Ξ} [-]					effektiver Adiabatenkoeff. γ_{eff}	Korrekturfaktor c_K (Champoux/Stinson)
					Theorie der homogenen Medien	Attenborough	Biot/Allard	Champoux/Stinson	Hamet		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
OPA 0/8	-	0	1	6360	3,13	13,19	7,43	2,86	1,31	1,20	0,20
			2	6340	3,22	14,63	8,13	2,97	1,18	1,30	0,19
			3	6490	2,90	12,22	6,96	2,92	1,18	1,24	0,21
		480	1	11300	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22	1,35	0,15
		960	3	63390	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22	1,08	0,71
		1440	2	499010	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22	1,40	0,40
modif.	0	10	3830	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
	960	10	16060	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22	1,32	0,17	
OPA 0/11	-	0	4	2890	6,84	21,36	12,03	4,87	3,21	1,01	0,24
			960	8080	6,47	21,63	12,15	4,88	2,86	1,17	0,20
	besch.	0	9	2810	6,11	21,90	12,27	4,89	2,51	1,07	0,28
		960	7830	6,47	21,63	12,15	4,88	2,86	1,28	0,15	
	modif.	0	12	2670	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		960	7040	6,47	21,63	12,15	4,88	2,86	1,40	0,16	
ZWOPA 0/8_0/16	-	0	5	890	12,86	58,27	32,90	16,99	5,68	1,24	0,25
			6	1540	7,48	33,80	18,67	8,92	3,08	1,27	0,19
			7	1620	7,14	28,56	15,97	9,97	2,76	1,22	0,28
		480	6	2670	7,15	31,22	17,45	9,34	2,86	1,24	0,26
		960	7	17660	7,15	31,22	17,45	9,34	2,86	1,15	0,72
		1440	5	27730	7,15	31,22	17,45	9,34	2,86	1,10	0,35
	besch.	0	13	1640	6,82	31,30	17,72	9,12	2,73	1,30	0,26
		960	6620	7,15	31,22	17,45	9,34	2,86	1,10	0,48	
	modif.	0	14	1140	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		960	4720	7,15	31,22	17,45	9,34	2,86	1,39	0,34	
	modif.	0	15	1620	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
		1440	24830	7,15	31,22	17,45	9,34	2,86	1,20	1,80	
ZWOPA 0/5_0/11	-	0	8	3480	4,47	22,62	12,63	6,17	1,22	1,37	0,21
			17	3950	5,08	23,53	13,31	6,53	1,01	1,40	0,21
		960	8	59690	4,78	23,08	12,97	6,35	1,12	1,27	0,41

Tabelle 9: Korrekturfaktoren des längenspezifischen Strömungswiderstands c_{Ξ} (aus den verschiedenen Modellansätzen), effektive Adiabatenkoeffizienten γ_{eff} (Theorie der homogenen Medien) und Korrekturfaktor c_K (Modell nach CHAMPOUX/STINSON)

Veränderung des akustischen Verhaltens durch Verschmutzung

Mischgutsorte	Modifizierung	Schmutzmenge [g/m ²]	Probekörper Nr.	Standardabweichungen						
				Strömungswiderstand Ξ_M [Pa*s/m ²]	Korrekturfaktoren c_{Ξ} [-]					
					Theorie der homogenen Medien	Attenborough	Biot/Allard	Champoux/Stinson	Hamet	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	
OPA 0/8	-	0	1	655	0,24	1,61	0,93	0,31	0,18	
			2	318	0,01	1,12	0,73	0,55	0,08	
			3	400	0,52	1,12	0,71	0,29	0,05	
	-	-	480	1	1919	-	-	-	-	-
			960	3	28147	-	-	-	-	-
			1440	2	175321	-	-	-	-	-
			0	10	115	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
960	8373	-	-		-	-	-			
OPA 0/11	-	0	4	258	0,35	1,59	0,91	0,81	0,36	
				960	2600	-	-	-	-	-
	besch.	0	9	166	1,62	3,76	2,07	0,97	0,57	
				960	1271	-	-	-	-	-
	modif.	0	12	469	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
				960	4403	-	-	-	-	-
ZWOPA 0/8_0/16	-	0	5	650	0,63	8,49	5,06	5,97	0,45	
			6	98	0,18	1,85	1,14	1,48	0,22	
			7	121	0,01	1,89	1,04	1,29	0,03	
		480	6	999	-	-	-	-	-	
	-	-	960	7	12024	-	-	-	-	-
			1440	5	17270	-	-	-	-	-
			0	13	291	0,76	3,10	1,81	1,92	0,15
	960	1425	-		-	-	-	-		
	modif.	0	14	73	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
				960	976	-	-	-	-	-
	modif.	0	15	215	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
1440				4465	-	-	-	-	-	
ZWOPA 0/5_0/11	-	0	8	253	0,31	1,44	0,58	3,22	0,08	
			17	513	0,77	2,46	1,30	4,20	0,05	
		960	8	28086	-	-	-	-	-	

Tabelle 10: Standardabweichungen des Strömungswiderstands Ξ_M (Absolutwerte vgl. Tabelle 6) und der Korrekturfaktoren c_{Ξ}

Mischgut- sorte	Modi- fizierung	Schmutz- menge [g/m ²]	Probe- körper Nr.	Struktur- faktor κ [-]	Tortuosität [-]				
					Attenborough	Biot/ Allard	Champoux/ Stinson	Hamet	
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	
OPA 0/8	-	0	1	0,56	1,36	1,36	0,86	1,19	
			2	0,51	1,60	1,60	0,92	1,40	
			3	0,42	1,19	1,20	0,73	0,95	
		480	1	0,67	1,71	1,71	0,68	2,48	
		960	3	0,45	0,26	0,26	0,41	1,88	
		1440	2	0,40	0,58	0,58	0,29	0,26	
	modif.	0	10	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
		960		1,05	2,29	2,29	1,32	2,81	
OPA 0/11	-	0	4	0,83	1,29	1,29	1,05	1,07	
		960		0,95	1,59	1,59	0,86	2,67	
	besch.	0	9	0,26	0,55	0,55	0,40	0,39	
		960		1,06	1,63	1,63	0,63	1,69	
	modif.	0	12	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
		960		0,52	2,77	2,77	1,47	3,36	
	ZWOPA 0/8_0/16	-	0	5	0,58	1,64	1,64	0,94	1,58
				6	0,95	2,23	2,22	1,05	2,09
7				0,97	2,06	2,06	1,48	1,80	
480			6	1,22	3,20	3,20	2,26	3,45	
960			7	1,23	1,75	1,74	1,21	2,76	
1440			5	0,97	1,40	1,40	0,92	2,14	
besch.		0	13	0,89	2,03	2,03	1,35	1,87	
		960		2,20	1,89	1,89	1,67	4,41	
modif.		0	14	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
		960		0,69	3,85	3,85	3,08	5,64	
modif.		0	15	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
		1440		0,41	0,20	0,18	0,24	2,06	
ZWOPA 0/5_0/11		-	0	8	0,60	2,55	2,55	1,30	2,86
				17	0,41	3,05	3,04	1,61	3,52
	960		8	1,42	1,34	1,34	0,88	2,46	

Tabelle 11: Durchschnittliche Summen der Fehlerquadrate zur Beurteilung der Qualität und Eignung der Modelle zur Beschreibung des Schallabsorptionsverhaltens von (verschmutztem) offenporigem Asphalt

Folgendes ist bei der Betrachtung der Ergebnisse festzustellen:

- Durch zunehmende Verschmutzung steigt die Tortuosität bzw. der Strukturfaktor der offenporigen Asphaltsschichten. Dies ist für alle betrachteten Mischgutsorten bzw. Schichtaufbauten und die verschiedenen Modelle durchgängig der Fall (s. Abbildung 29 bis Abbildung 32). Durch die in Kapitel 4.1.2 dargestellten Verschmutzungsmechanismen der Porenstruktur kann die Erhöhung der Tortuosität τ erklärt werden. Schmutzanlagerungen an den Porenwänden und Verengungen bzw. Verstopfungen von Porenkanälen führen zu zusätzlichen Verwindungen in den Poren und erhöhen dadurch den Weg durch die Porenstruktur und somit in virtueller Weise die Schichtdicke. Die Erhöhung des Strukturfaktors κ kann durch eine Vergrößerung des nicht beschleunigbaren Luftvolumenanteils („Totraum“) aufgrund von Verstopfungen von Poren und Porenverbindungen erklärt werden (Veranschaulichung s. Abbildung 33).

- Bei feinkörnigen Mischgutsorten sowie dünnerem Schichtaufbau ist die Zunahme von Tortuosität bzw. Strukturfaktor (und auch des Strömungswiderstands) durch die eingebrachte Verschmutzung stärker. Dies liegt darin begründet, dass Porenverschlüsse durch Schmutz in grobkörnigeren Strukturen aufgrund größerer Porenradien unwahrscheinlicher sind bzw. die Porenverengungen durch Schmutzanlagerungen an den Porenwandungen weniger stark ausfallen. Die Erhöhung von Tortuosität bzw. Strukturfaktor (und Strömungswiderstand) ist daher bei grobkörnigeren und zweilagigem Schichtaufbau geringer (siehe auch Abbildung 33).
- Die durch die unterschiedlichen Modellansätze ermittelten Tortuositäten zeigen bezüglich des Werts nur geringe Unterschiede. Die Modelle von ATTENBOROUGH und BIOT/ALLARD weisen sogar nahezu identische Werte für die Tortuosität auf.
- Bei zunehmender Verschmutzung sind die Unsicherheiten in den ermittelten Tortuositäten und Strukturfaktoren größer als im unverschmutzten Zustand (s. Standardabweichungen in Tabelle 8). Die ermittelten Strukturfaktoren weisen im verschmutzten Zustand wesentlich größere Standardabweichungen auf als die Tortuositäten.
- Durch die Materialmodifizierung der Porenwandungen sind die Anstiege der Tortuositäten und Strukturfaktoren durch die eingebrachte Verschmutzung geringer als im Vergleichsfall ohne Modifizierung (einzige Ausnahme bildet dabei der Fall ZWOPA 0/8_0/16 bei 1440 g/m² Gesamtverschmutzung)
- Die ermittelten Korrekturfaktoren des Strömungswiderstands c_{ε} sind für die angewendeten Modellansätze unterschiedlich. Auch für die verschiedenen Mischgutsorten und Schichtaufbauten ergeben sich unterschiedliche Korrekturwerte (s. Tabelle 9). Die Zuverlässigkeit der Werte ist bei Standardabweichungen von ca. 10-20 % des Mittelwerts jedoch als hoch einzuschätzen (s. Tabelle 10).
- Der effektive Adiabatenkoeffizient γ_{eff} zeigt weder hinsichtlich Mischgutsorte/Schichtaufbau noch hinsichtlich Verschmutzungseintrag eine eindeutige Tendenz (s. Tabelle 9).
- Der Korrekturfaktor c_K im Modellansatz nach CHAMPOUX/STINSON bewegt sich von wenigen Ausnahmen abgesehen in einem Wertebereich von ungefähr $0,15 \leq c_K \leq 0,45$. Dieser Wertebereich scheint demnach für die Porengeometrie von offenporigen Asphalten typisch zu sein (s. Tabelle 9).

Zur Beurteilung der Qualität und Eignung der Modelle zur Darstellung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten sind in Tabelle 11 jeweils die durchschnittlichen Fehlerquadratsummen, die sich bei der Ausgleichsrechnung ergeben, angegeben. Dabei ist folgendes festzustellen:

- Alle Modelle weisen eine hohe Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenwerten auf. Die Qualität des Modells nach der Theorie der homogenen Medien weist nahezu durchgehend die geringsten Fehlerquadrate und damit die höchste Qualität auf.
- Im unverschmutzten Fall sind die Fehlerquadrate geringer, was aber nicht allein auf die Anpassungsfähigkeit Modelle zurückzuführen ist, sondern vielmehr auf die stärkeren Unterschiede in den Messwerten des Schallabsorptionsgrads im verschmutzten Zustand.
- Die höchsten Fehlerquadrate im unverschmutzten Fall weisen die Modelle nach ATTENBOROUGH, BIOT/ALLARD (die beiden Modelle liefern nahezu identische Werte) und

HAMET auf. Der Ansatz nach CHAMPOUX/STINSON ist im Vergleich zum BIOT/ALLARD-Modell durch den zusätzlichen Korrekturfaktor c_K durch geringere Unterschiede zwischen Messung und Modellrechnung gekennzeichnet. Im verschmutzten Zustand tauchen bei der Anwendung des Modells nach HAMET die größten Abweichungen zwischen Mess- und Rechenwerten auf. Dies liegt wohl darin begründet, dass der phänomenologische Ansatz die Abnahme des Schallabsorptionsgrads in diesem Zusammenhang nur unzureichend abbilden kann.

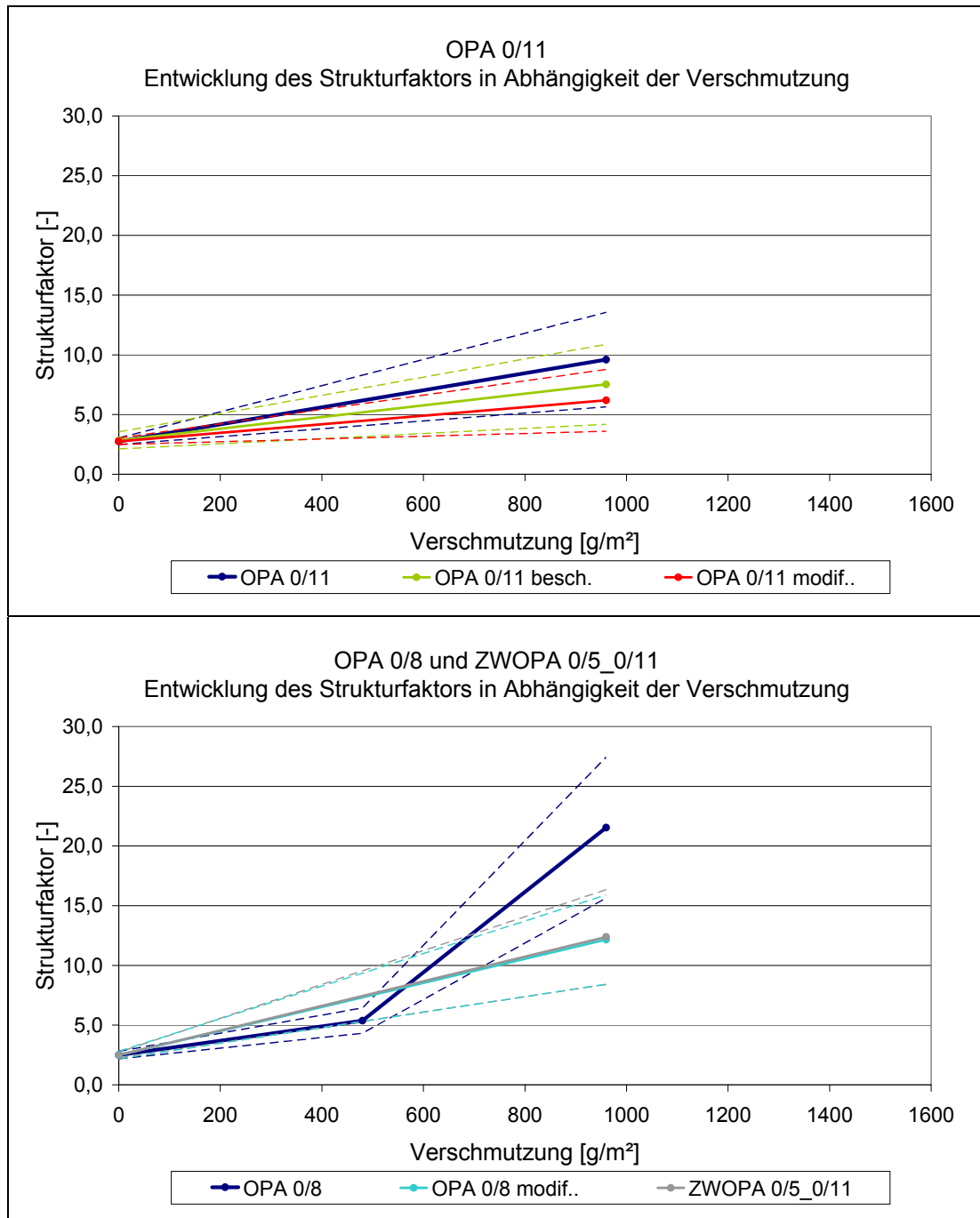


Abbildung 29: Entwicklung des Strukturfaktors von offenporigen Asphalten mit zunehmender Verschmutzung bei unterschiedlichen Mischgutsorten und Schichtaufbauten

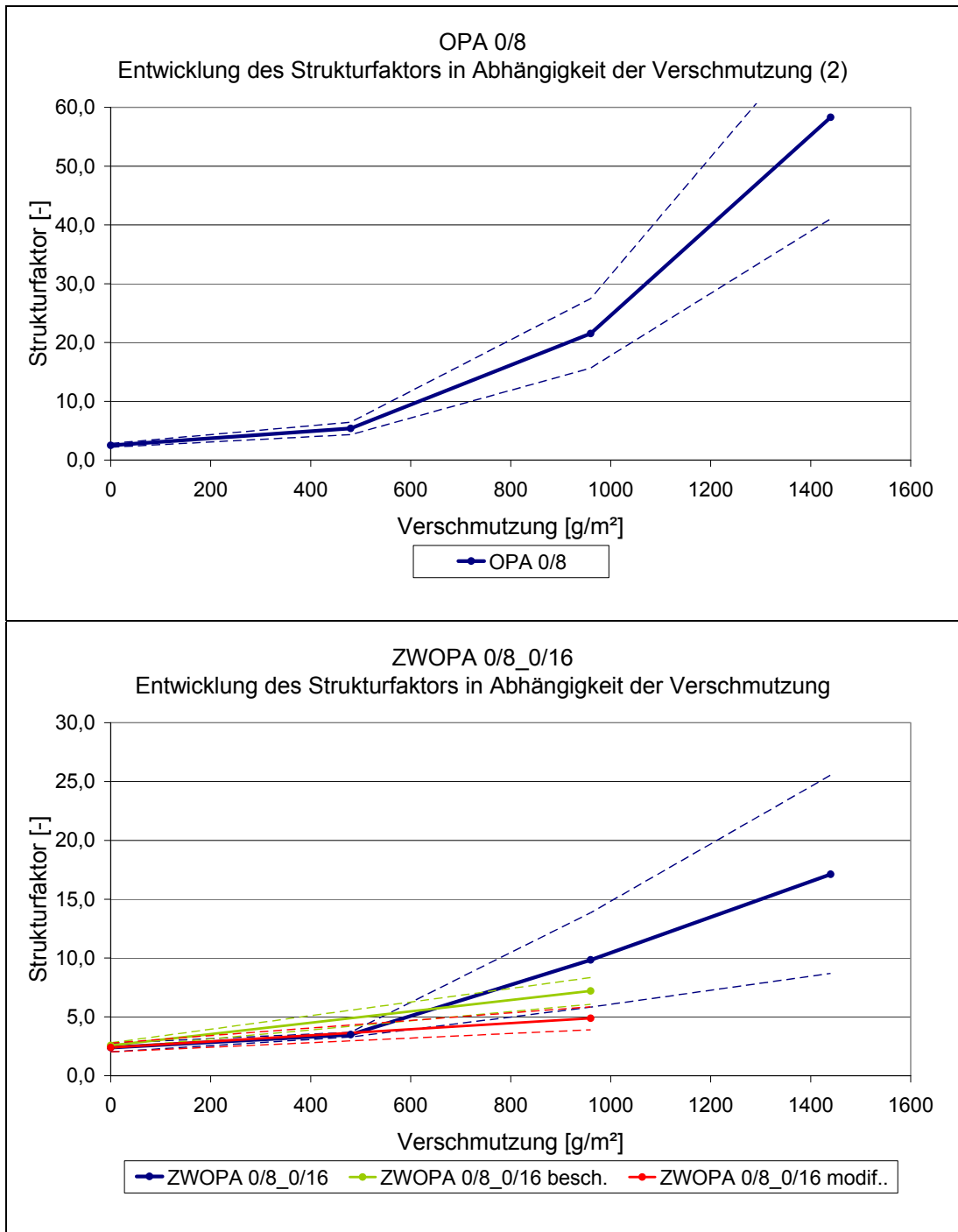


Abbildung 30: Entwicklung des Strukturfaktors von offenporigen Asphalten mit zunehmender Verschmutzung bei unterschiedlichen Mischgutsorten und Schichtaufbauten

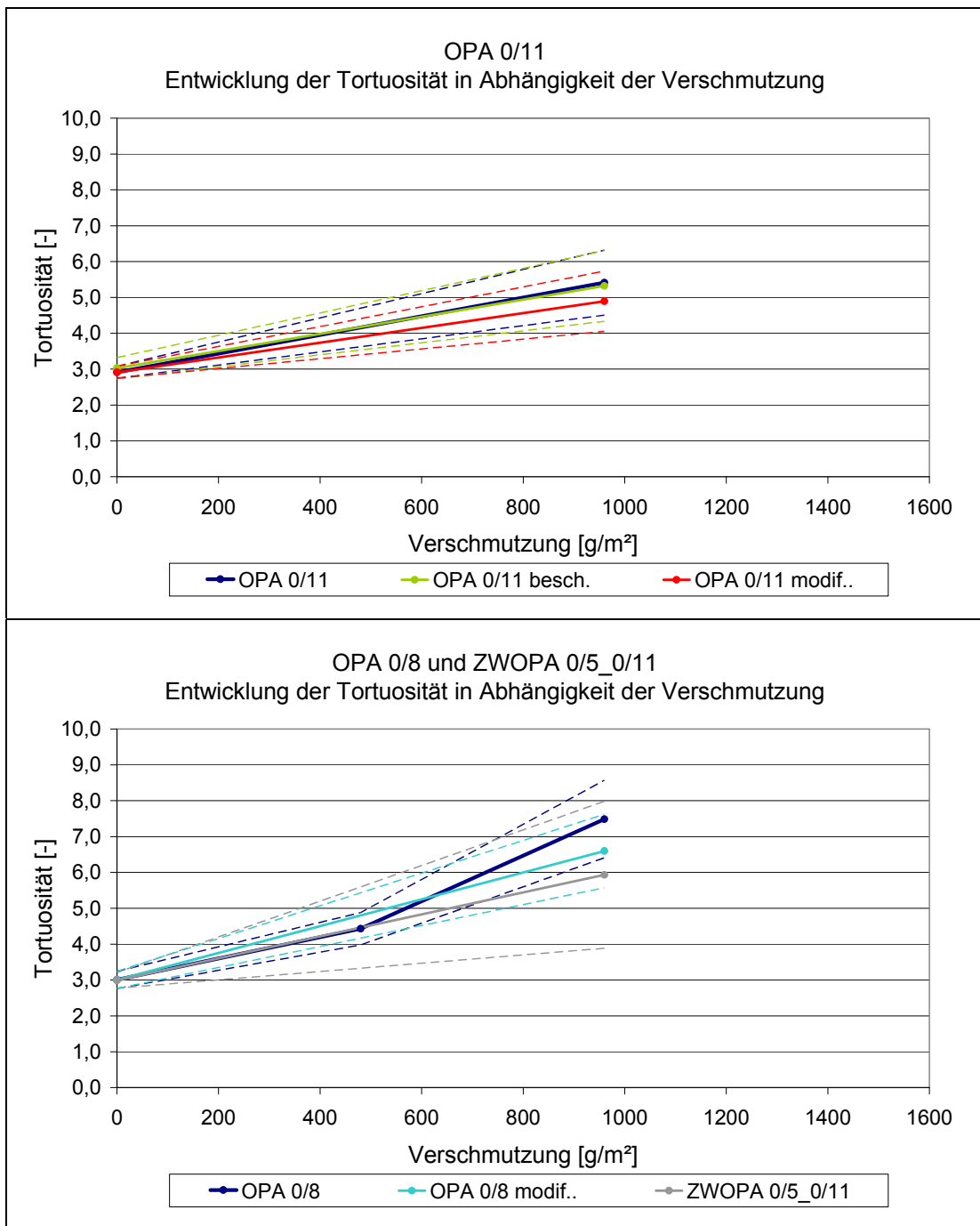


Abbildung 31: Entwicklung der Tortuosität von offenporigen Asphalten mit zunehmender Verschmutzung bei unterschiedlichen Mischgutsorten und Schichtaufbauten

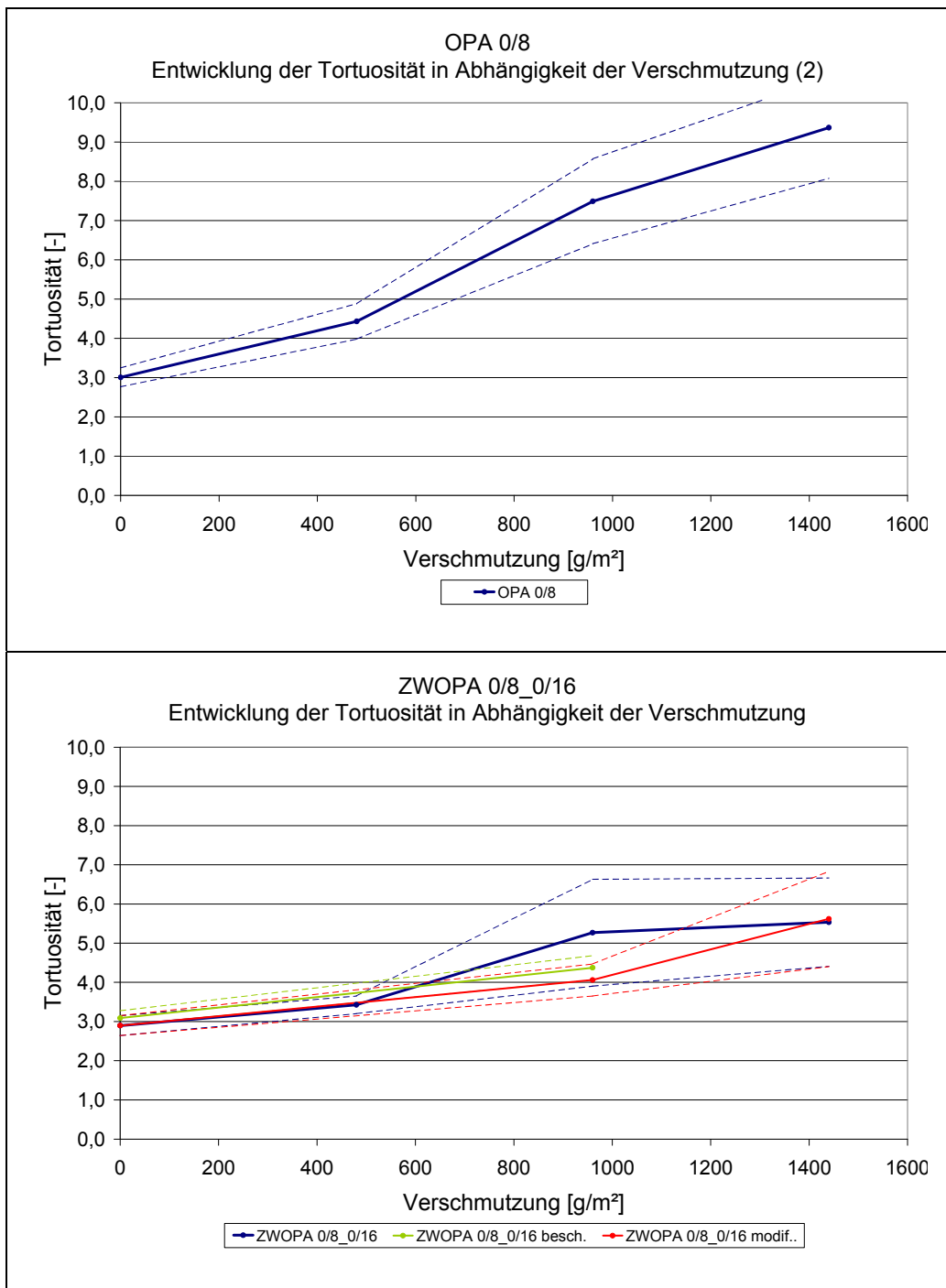


Abbildung 32: Entwicklung der Tortuosität von offenporigen Asphalten mit zunehmender Verschmutzung bei unterschiedlichen Mischgutsorten und Schichtaufbauten

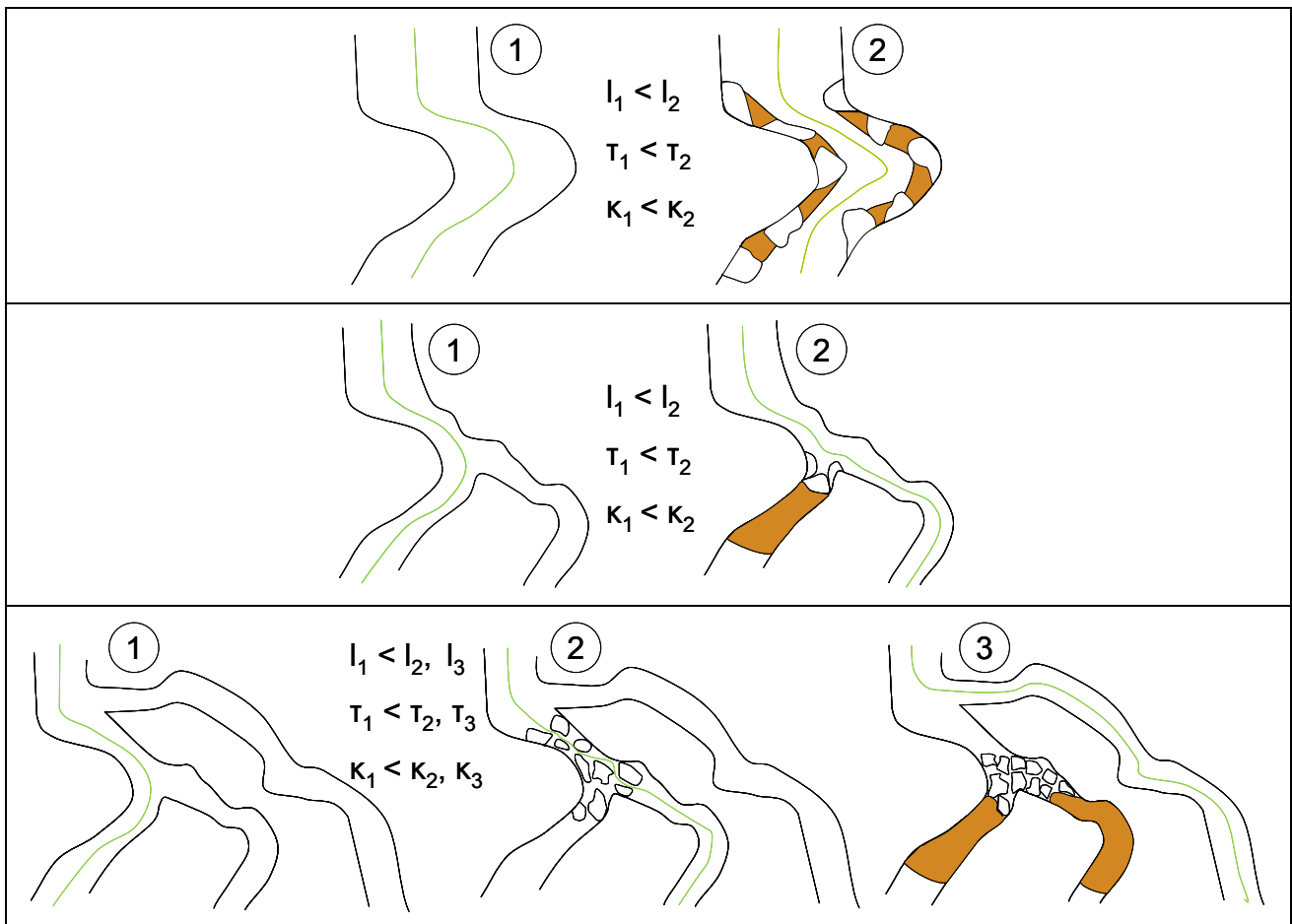


Abbildung 33 Schematische Darstellung der Auswirkung von Verschmutzungen in den Poren von offenporigen Asphalten auf die Länge der gewundenen Porenkanäle (l), die Tortuosität τ , zusätzliches nicht beschleunigbares („Totraum“-)Volumen (gefärbte Flächen) und den Strukturfaktor κ

7.3 Modelle zur Darstellung der Auswirkung der Verschmutzung auf das akustische Verhalten

7.3.1 Anwendung der Modelle

Im Rahmen dieser Arbeit wird erstmals der quantitative Zusammenhang zwischen der Masse bzw. des Volumens des eingelagerten Schmutzes und den Absorberparametern bzw. folglich auch des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten hergestellt⁷⁸.

Mit den Messwerten aus Kap. 7.1 und den Ergebnissen der Ausgleichsrechnungen aus Kap. 7.2 lassen sich die verschiedenen Modelle aus Kapitel 6.3 in der Weise kalibrieren, dass für beliebige Fälle hinsichtlich Schichtaufbau, Größtkorn und Modifizierung der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit des Verschmutzungsgrads bzw. der Schmutzmenge berechnet werden kann.

In Tabelle 12 sind **bei Kenntnis der Schmutzmenge** Standardwerte der Absorberparameter (Porosität, längenspezifischer Strömungswiderstand, Strukturfaktor, Tortuosität) zur Anwendung in den Modellen angegeben; weiterhin sind dort ergänzende Parameter (effektiver Adiabatenkoeffizient) und Korrekturfaktoren (Strömungswiderstandskorrektur) angegeben. Überdies sollen folgende Korrekturfaktoren angewendet werden:

- Modell nach ATTENBOROUGH: $f_{n,s} = 0,75$
- Modell nach BIOT und ALLARD: $c = 1,0$
- Modell nach CHAMPOUX/STINSON: $c_p = 1,0$
- Modell nach CHAMPOUX/STINSON: $c_k = 0,35$ (Mittelwert der Ausgleichsrechnung nach Kap. 7.2)

Die Modellbildung bietet aber auch alternative Herangehensweisen.

So kann **bei bekannten (durch Messung bestimmten) Absorberparametern** auf die im OPA befindliche Schmutzmenge rückgeschlossen werden (vorausgesetzt der Schmutz setzt sich nicht am Boden ab, sondern lagert sich vollständig im Porengerüst ab und verändert damit nur die Tortuosität, siehe hierzu auch Modellerweiterungen in Kapitel 7.3.3).

Wenn **einzelne Absorberparameter** (z.B. Strömungswiderstand) messtechnisch bestimmt wurden, können die fehlenden (nicht gemessenen) Parameter aus Tabelle 8 bestimmt werden.

Zwischenwerte der Porosität, des Strukturfaktors und der Tortuositäten können dabei in Abhängigkeit der Schmutzmenge näherungsweise linear interpoliert werden. Eine Interpolation des längenspezifischen Strömungswiderstands sollte nur mit Hilfe des korrigierten Wertes Ξ_{kor} (s. Gleichung 7.1) vorgenommen werden. Die Entwicklung des Strömungswiderstands mit zunehmender Verschmutzung geschieht näherungsweise in exponentieller Weise, weshalb eine lineare Interpolation nicht zielführend ist (s. Abbildung 27 und Abbildung 28). Die Berechnung von Zwischenwerten kann daher mit angenäherten Exponentialfunktionen vorgenommen werden.

⁷⁸ unter der Annahme, dass der gesamte Schmutz auf die Tortuosität der Schicht wirkt (keine Abnahme der Schichtdicke), s. auch Kap. 7.1.

Bei Extrapolation der Modellrechnungen auf höhere Verschmutzungsmengen sollten darüber hinaus nicht nur lineare Verläufe des Strukturfaktors und der Tortuositäten unterstellt werden, sondern (insbesondere hinsichtlich des Strukturfaktors) alternativ auch exponentielle Verläufe (wie beim längenspezifischen Strömungswiderstand) betrachtet werden. Anzeichen, die auf diesen extrapolierten Verlauf hindeuten, sind in Abbildung 29 bis Abbildung 32 zu erkennen.

Mischgut- sorte	Schicht- dicke [m]	Modi- fizierung	Schmutz- menge [g/m ²]	Porosität σ [-]	statist. Wert	Strömungs- widerstand Ξ_m [Pa*s/m ²]	Struktur- faktor κ [-]	Tortuosität τ [-]	effektiver Adiabat- koeff. γ_{eff}	Korrekturfaktoren c_{\pm} [-]						
										Theorie der homogenen Medien	Atten- borough	Biot/ Allard	Champoux/ Stinson	Hamet		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)		
OPA 0/8	0,04	-	0	0,253	Mittelw.	6398	2,50	3,00	1,24	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22		
					St.abw.	422	0,32	0,24	-	0,34	1,58	0,89	0,37	0,12		
			480	0,246	Mittelw.	11301	5,38	4,43	1,35	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22		
					St.abw.	1919	1,06	0,45	-	0,34	1,58	0,89	0,37	0,12		
		960	0,24	Mittelw.	63392	21,54	7,49	1,08	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22			
				St.abw.	28147	5,90	1,08	-	0,34	1,58	0,89	0,37	0,12			
		1440	0,233	Mittelw.	499008	58,31	9,36	1,40	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22			
				St.abw.	175321	17,27	1,29	-	0,34	1,58	0,89	0,37	0,12			
		modif.	960	0,24	Mittelw.	16060	12,16	6,60	1,32	3,09	13,35	7,51	2,92	1,22		
					St.abw.	8373	3,73	1,02	-	0,34	1,58	0,89	0,37	0,12		
OPA 0/11	0,04	-	0	0,272	Mittelw.	2676	2,80	2,97	1,04	6,47	21,63	12,15	4,88	2,86		
					St.abw.	334	0,51	0,24	-	1,17	2,74	1,51	0,84	0,58		
			960	0,259	Mittelw.	8083	9,61	5,41	1,17	6,47	21,63	12,15	4,88	2,86		
					St.abw.	2600	3,95	0,91	-	1,17	2,74	1,51	0,84	0,58		
		besch.	960	0,259	Mittelw.	7833	7,53	5,32	1,28	6,47	21,63	12,15	4,88	2,86		
					St.abw.	1271	3,35	0,98	-	1,17	2,74	1,51	0,84	0,58		
		modif.	960	0,259	Mittelw.	7042	6,20	4,89	1,40	6,47	21,63	12,15	4,88	2,86		
					St.abw.	4403	2,59	0,84	-	1,17	2,74	1,51	0,84	0,58		
		ZWOPA 0/8_0/16	0,07	-	0	0,268	Mittelw.	1385	2,44	2,94	1,26	8,58	37,98	21,31	11,25	3,56
							St.abw.	377	0,35	0,25	-	0,50	3,11	1,72	1,54	0,22
480	0,265				Mittelw.	2668	3,50	3,43	1,24	8,58	37,98	21,31	11,25	3,56		
					St.abw.	999	0,20	0,22	-	0,50	3,11	1,72	1,54	0,22		
960	0,261				Mittelw.	17657	9,84	5,27	1,15	8,58	37,98	21,31	11,25	3,56		
					St.abw.	12024	4,01	1,36	-	0,50	3,11	1,72	1,54	0,22		
1440	0,257				Mittelw.	27729	17,11	5,53	1,10	8,58	37,98	21,31	11,25	3,56		
					St.abw.	17270	8,42	1,13	-	0,50	3,11	1,72	1,54	0,22		
besch.	960			0,261	Mittelw.	6619	7,20	4,37	1,10	8,58	37,98	21,31	11,25	3,56		
					St.abw.	1425	1,13	0,31	-	0,50	3,11	1,72	1,54	0,22		
modif.	960			0,261	Mittelw.	4719	4,88	4,06	1,39	8,58	37,98	21,31	11,25	3,56		
					St.abw.	976	0,98	0,41	-	0,50	3,11	1,72	1,54	0,22		
1440	0,257			Mittelw.	24829	27,47	5,62	1,20	8,58	37,98	21,31	11,25	3,56			
				St.abw.	4465	23,35	1,22	-	0,50	3,11	1,72	1,54	0,22			
ZWOPA 0/5_0/11	0,07	-	0	0,265	Mittelw.	3713	2,50	2,99	1,38	4,78	23,08	12,97	6,35	1,12		
					St.abw.	331	0,25	0,22	-	0,64	1,96	1,02	3,54	0,13		
			960	0,257	Mittelw.	59686	12,38	5,94	1,27	4,78	23,08	12,97	6,35	1,12		
					St.abw.	28086	3,97	2,05	-	0,64	1,96	1,02	3,54	0,13		

Tabelle 12: Eingangswerte von Kennwerten und Korrekturfaktoren (und deren Standardabweichungen) für die Absorbermodelle nach Kap. 6.3 zur Bestimmung des Schallabsorptionsverhaltens von OPA im unverschmutzten und verschmutzten Zustand

7.3.2 Sensitivitätsanalyse

Um die Genauigkeit der angewendeten Modelle bzw. die Auswirkungen von Variationen der Eingangsparameter zu untersuchen, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Angabe einer einfachen prozentualen Abweichung eines Zielparameters zur Einordnung der Sensitivität ist wegen der Art der Ergebnisse der Modellrechnungen (Schallabsorptionsgrad in Abhängigkeit der Frequenz) nicht zweckmäßig. Zur Beurteilung, wie stark das jeweilige Modell auf eine Änderung der Eingangsparameter reagiert, dient deshalb die Summe der quadratischen Abweichungen vom Standardfall (für $f < 2000$ Hz); für den Standardfall werden für alle Parameter die Mittelwerte aus Tabelle 12 herangezogen. Folgende Parametervariationen sind betrachtet worden:

- Längenspezifischer Strömungswiderstand ε_M : Zu den Mittelwerten der Strömungswiderstände aus Tabelle 12 werden die zugehörigen 2-fachen Standardabweichungen addiert bzw. subtrahiert.
- Tortuosität τ und Strukturfaktor κ : Zu den Mittelwerten aus Tabelle 12 werden die zugehörigen 2-fachen Standardabweichungen addiert bzw. subtrahiert. Ergibt sich daraus ein negativer Wert, wird nur die einfache Standardabweichung subtrahiert.
- Korrekturfaktoren c_{ε} : Zu den Mittelwerten aus Tabelle 12 werden die zugehörigen 2-fachen Standardabweichungen addiert bzw. subtrahiert. Ergibt sich daraus ein negativer Wert wird nur die einfache Standardabweichung subtrahiert.
- kombinierte Fälle

Durch die Addition bzw. Subtraktion der 2-fachen Standardabweichung liegen (bei Annahme einer Normalverteilung) die Werte der Eingangsparameter im 95 %-Konfidenzintervall. Wenn nur die einfache Standardabweichung subtrahiert werden kann, liegt das Konfidenzintervall bei 68,3 %.

Folgendes ist festzustellen und bei der Anwendung der Modelle bzw. der Interpretation der Ergebnisse in Betracht zu ziehen:

- Die Änderung des Strömungswiderstands in den angegebenen Bereichen erzeugt Fehlerquadrate, die im Vergleich zur Änderung der Tortuosität bzw. des Strukturfaktors wesentlich kleiner sind. Dies kann dadurch begründet werden, dass Letzteres zu einer Verschiebung der Absorptionsmaxima und dadurch zu größeren Fehlern führt, während bei der Änderung des Strömungswiderstands keine bzw. nur geringe Frequenzverschiebungen der Kurven auftreten.
- Die Variation der Korrekturfaktoren für die Strömungswiderstände erhöht ebenfalls die auftretenden Abweichungen, allerdings auch im Vergleich zu Änderungen der Tortuositäten (ähnlich wie der Strömungswiderstand selbst) in eher geringerem Umfang.
- Die Änderung des Strömungswiderstands hin zu niedrigeren Werten erzeugt höhere Fehler als bei einer Variation hin zu höheren Werten.
- Die Abweichung der Tortuosität hin zu niedrigeren Werten provoziert bei einlagigen Schichtaufbauten tendenziell niedrigere Fehler als bei einer Abweichung der Tortuosität hin zu höheren Werten. Bei höheren Schichtdicken (zweilagige Schichtaufbauten) ist diese Tendenz nicht zu beobachten.
- Die Fehler sind bei höheren Verschmutzungen größer (bedingt auch durch die größeren Standardabweichungen der Eingangsparameter), bei den höchsten hier betrachteten Schmutzmengen werden hingegen kleinere Fehler beobachtet, was auf den Rückgang des Schallabsorptionsgrads („Abflachen“ der Kurven) zurückgeführt werden kann.
- Die fehlerträchtigsten Fälle sind die betrachteten Kombinationen der Extremwerte von Strömungswiderstand (inklusive zugehörigen Korrekturfaktoren) und Tortuositäten bzw. Strukturfaktoren. Sie sind jedoch gegenüber dem Fall der Variation der Tortuosität bzw. des Strukturfaktors bei Belassen des Standardwerts für den Strömungswiderstand nur geringfügig erhöht. Der ungünstigere Fall wird bei Verwendung der unteren statt der oberen Extremwerte erreicht; dieser Fall liefert gleichzeitig im Vergleich zu den anderen betrachteten Variationen absolut die höchsten Fehler.

7.3.3 Fakultative Modellerweiterungen

Die Anwendung des Modells in Kap. 7.3.1 unterstellt, dass der gesamte Schmutz in der Porenstruktur abgelagert wird und keine (relevanten) Schmutzablagerungen an der Unterkante der OPA-Schicht auftreten. Der Schmutzeintrag wirkt sich damit lediglich auf die Absorberparameter Porosität, Strömungswiderstand und Tortuosität aus, während keine Reduzierung der (akustischen) Schichtdicke durch Ablagerungen des Schmutzes an der Unterkante des OPA berücksichtigt wird.

Die Modelle bzw. die Eingangsparameter können aber in der Weise verändert werden, dass sich der Schmutz teilweise in der Porenstruktur der Schicht und teilweise am Boden abgelagert. Die Gesamtschmutzmasse ist dabei wie folgt zu unterteilen:

$$M_{ges} = M_{Schicht} + M_{Unterkante} \quad (7.2)$$

Die Absorberparameter Porosität σ , Strömungswiderstand Ξ und Tortuosität τ werden in Abhängigkeit der in der Porenstruktur eingelagerten Schmutzmenge $M_{Schicht}$ durch Interpolation aus Tabelle 12 zu $\sigma(M_{Schicht})$, $\Xi(M_{Schicht})$ und $\tau(M_{Schicht})$ bestimmt. Die (akustische) Schichtdicke d_τ kann wie folgt bestimmt werden und im Modell angesetzt werden:

$$d_\tau(M_{Unterkante}) = d - \frac{M_{Unterkante}}{\rho_d \cdot \sigma(M_{Schicht})} \quad (7.3)$$

Darin ist ρ_d die Lagerungsdichte⁷⁹ des Schmutzes in der Schicht.

Gleichung (7.2) kann auch mit Hilfe eines Anteils b ($0 \leq b \leq 1$) des in der Porenstruktur der Schicht abgelagerten Schmutzes wie folgt formuliert werden:

$$M_{ges} = M_{Schicht} + M_{Unterkante} = b \cdot M_{ges} + (1-b) \cdot M_{ges} \quad (7.4)$$

Für Strecken, die nicht direkt Verkehr bzw. Überrollungen ausgesetzt sind (z.B. Standstreifen), tendiert b gegen 1. Je stärker der Schmutz durch die Verkehrsbelastung (Rütteln, Pumpbewegungen) in der Schicht bewegt wird, desto eher wird mutmaßlich der Schmutz in tiefere Bereiche der Schicht transportiert und desto kleiner wird demnach b .

⁷⁹ Die Lagerungsdichte kann je nach Verschmutzung variieren, der in dieser Arbeit verwendete künstliche Schmutz hat beispielsweise eine durchschnittliche Lagerungsdichte von 1,8 g/cm³

8 Zusammenfassung

Straßenverkehrslärm ist ein allgegenwärtiges Problem in modernen Gesellschaften. Zur Minderung von Lärmimmissionen sind neben verkehrlichen Maßnahmen bei Kenntnis der typischen Entstehungsmechanismen von Straßenverkehrslärm auch technische Maßnahmen an Fahrzeugen und Fahrbahn möglich. Es existieren unterschiedliche Ansätze und (theoretische sowie praktische) Realisierungsmöglichkeiten lärmindernder Fahrbahnkonstruktionen bzw. Deckschichten (s. Kap. 2).

Offenporige Asphaltdeckschichten (OPA) sind aufgrund ihrer bautechnischen Eigenschaften (vor allem aufgrund des hohen Hohlraumgehalts) geeignet, Lärm bereits an der Quelle zu reduzieren. Unter den lärmindernden Fahrbahndeckenkonstruktionen haben sie das größte Lärminderungspotenzial. Sie werden bereits seit mehreren Jahrzehnten weltweit in unterschiedlichem Umfang eingesetzt. Wegen des hohen Hohlraumgehalts, der aus akustischen Erwägungen in der Entwicklung stetig gesteigert wurde, sind bautechnische sowie betriebliche Schwierigkeiten aufgetreten, denen es zu begegnen gilt (s. Kap. 3). Ein ungelöstes Problem stellt dabei die mit zunehmender Liegedauer abnehmende lärmindernde Wirkung dar.

Das Nachlassen der lärmindernden Wirkung von offenporigen Asphalten mit zunehmender Liegedauer wird zu wesentlichen Teilen der Verschmutzung und nachfolgenden Verstopfungen der porösen Struktur zugeschrieben. Externe Faktoren bestimmen die Verschmutzung in maßgeblichem Umfang, so dass sehr unterschiedliche Schmutzeintragsraten auftreten. Darüber hinaus laufen unterschiedliche Verschmutzungsprozesse parallel ab und beeinflussen bzw. verstärken sich gegenseitig; andere Mechanismen (z.B. Verkehr) wirken der Verschmutzung entgegen. Reinigungsversuche von offenporigen Asphalten zeigen bisher relativ wenig Erfolg, weshalb in Laborversuchen untersucht wird, inwieweit eine Modifikation des Materials bzw. der Porenoberflächen der offenporigen Struktur schmutzabweisende Eigenschaften zu verleihen, wirksam sein kann (s. Kap. 4).

In den in dieser Arbeit dargestellten Versuchen (s. Kap. 5) wird versucht, durch den Eintrag einer definierten (künstlichen) Schmutzmenge mit Hilfe kontrollierter Berechnungen unter wiederholbaren Bedingungen, den Verschmutzungsprozess von offenporigen Asphalten möglichst realitätsnah zu simulieren. Das grundlegende Verständnis der Verschmutzungsprozesse und seiner Auswirkungen auf das Schallabsorptionsverhalten (s. Kap. 4) ist dabei Voraussetzung für die Konzipierung der Versuche, der Anwendung der Modelle und der Interpretation der Mess- sowie der Berechnungsergebnisse.

Auf diese Weise ist es erstmals möglich, Zusammenhänge von Schmutzmengen bzw. Verschmutzungsstadien und Absorberparametern (Hohlraumgehalt bzw. Porosität, Strömungswiderstand, Strukturfaktor bzw. Tortuosität) herzustellen und somit die abnehmende lärmindernde Wirkung durch die verschmutzungsbedingten Veränderungen im Schallabsorptionsverhalten präzisieren zu können. Für unterschiedliche Schichtaufbauten und Modifizierungen zur Schmutzabweisung können aus den Versuchsergebnissen abhängig von der jeweiligen Schmutzmenge typische (sich aus der Verschmutzung ergebende) Absorberparameter angegeben werden (s. Kap. 7.1).

Hierbei ist generell festzustellen, dass Verschmutzungsvorgänge bei grobkörnigeren und zweilagigen Schichtaufbauten weniger Auswirkungen auf das Absorptionsverhalten bzw. die

lärmmindernde Wirkung zeigen. Auch die untersuchten Materialmodifizierungen vermindern durch die schmutzabweisenden Eigenschaften die Auswirkungen der Verschmutzung auf das akustische Verhalten des offenporigen Asphalts.

Bereits existierende akustische Modelle (s. Kap. 6) zur Beschreibung von offenporigen Asphaltdeckschichten als poröser Absorber vor einer schallharten Wand beschränken sich bisher auf die Beschreibung des Absorptionsverhalten von offenporigen Asphalten im *unverschmutzten* Zustand.

Mit den aus den Versuchen ermittelten Absorberparametern (im verschmutzten Zustand) sind die Modelle mittels Ausgleichsrechnung zwischen Mess- und Rechenergebnissen des Schallabsorptionsgrads auf ihre Eignung hinsichtlich der Übertragbarkeit auf *verschmutzte* Zustände untersucht worden (s. Kap. 7). Die betrachteten Modelle sind aufgrund ihrer zugrundeliegenden theoretischen Annahmen und Voraussetzungen unterschiedlich gut geeignet, den Verschmutzungsprozess wiederzugeben.

Aus den Modell- bzw. Ausgleichsrechnungen können für unterschiedliche Verschmutzungsstadien für die Berechnung des Schallabsorptionsgrads typische Eingangsparameter (Absorberparameter und Modellparameter) in Abhängigkeit von Mischgutsorte, Schichtaufbau, (schmutzabweisender) Materialmodifizierung und vor allem eingetragener Schmutzmenge angegeben werden (s. Kap. 7).

Es ist damit möglich, das Schallabsorptionsverhalten von offenporigen Asphalten über die Liegedauer zu prognostizieren. Dabei sind sinnvolle Annahmen über anfallende Schmutzmengen in Abhängigkeit der Liegedauer zu treffen. Die hier untersuchten Modelle betrachten den Verschmutzungsvorgang in vereinfachter Weise. Potentielle Erweiterungen der Modellvorstellung und Ansätze zu weitergehenden Betrachtungen (z.B. Extrapolationen, andere Umfeldbedingungen, verschiedene Verschmutzungsmechanismen) können jedoch in die untersuchten Modelle zusätzlich integriert werden (s. Kap. 7.3).

9 Literaturverzeichnis

- [1] Griefahn, B. (2006): Wirkungen des Verkehrslärms. In: Seminar „Verkehrslärm in Ballungsräumen“, Veranstaltung des Forschungsverbundes 'Leiser Verkehr', 16.11.2006, Köln.
- [2] Öhrström, E.; Skånberg, A.; Svensson, H.; Gidlöf-Gunnarsson, A. (2006): Effects of road traffic noise and the benefit of access to quietness. In: *Journal of Sound and Vibration*, Jg. 295, H. 1-2 (August 2006), S. 40–59.
- [3] Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2004): *Lärmbelästigung in Baden-Württemberg, Ergebnisse sozialwissenschaftlicher Untersuchungen*, Karlsruhe.
- [4] Maschke, C.; Rupp, T.; Hecht, K. (2000): The influence of stressors on biochemical reactions - a review of present scientific findings with noise. In: *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 203, S. 45–53.
- [5] Fyhri, A.; Klæboe, R. (2009): Road traffic noise, sensitivity, annoyance and self-reported health—A structural equation model exercise. In: *Environment International*, Vol. 35, Issue 1, S. 91–97.
- [6] Guski, R. (2006): Aktuelle Erkenntnisse der Lärmwirkungsforschung – psychologische und medizinische Aspekte. In: *Lärmkongress Baden-Württemberg 2006, 12.-13.07.2006, Leinfelden-Echterdingen*.
- [7] Öhrström, E.; Hadzibajramovic, E.; Holmes, M.; Svensson, H. (2006): Effects of road traffic noise on sleep: Studies on children and adults. In: *Journal of Environmental Psychology*, Jg. 26, H. 2 (Juni 2006), S. 116–126.
- [8] Babisch, W. (2004): *Die NaRoMI-Studie (Noise and Risk of Myocardial Infarction). Auswertung, Bewertung und vertiefende Analysen zum Verkehrslärm*. Herausgegeben von Umweltbundesamt (UBA), WaBoLu-Hefte 02/04, Berlin.
- [9] 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Verkehrslärmschutzverordnung - 16. BImSchV, 12. Juni 1990.
- [10] Bundesminister für Verkehr (1990): *Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen*, Ausgabe 1990 (RLS-90).
- [11] Probst, W. (2006): Von der Lärmkartierung über die Bewertung zur Aktionsplanung In: *Lärmkongress Baden-Württemberg 2006, 12.-13.07.2006, Leinfelden-Echterdingen*.
- [12] Bruening, H. (2006): *Lärminderungsplanung Norderstedt*. In: *Lärmkongress Baden-Württemberg 2006, 12.-13.07.2006, Leinfelden-Echterdingen*.
- [13] Raggama, R.B.; Cik, M.; Höldrich, R.R.; Fallast, K.; Gallasch, E.; Fend, M. et al. (2007): Personal noise ranking of road traffic: Subjective estimation versus physiological parameters under laboratory conditions. In: *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 210, Issue 2, S. 97–105.
- [14] Rossberg, S.; Guidati, S. (2008): Neue Methoden für die psychoakustische Bewertung von Verkehrsgeräuschen. In: *Zeitschrift für Lärmbekämpfung (ZfL)*, H. 1/2008, S. 26–32.

- [15] Steven, H. (2006): Geräuschquellen im Verkehr und ihre relative Bedeutung für das Gesamtgeschehen heute und morgen In: Seminar „Verkehrslärm in Ballungsräumen“, Veranstaltung des Forschungsverbundes 'Leiser Verkehr', 16.11.2006, Köln.
- [16] Betz, E.; Beckenbauer, T. (2005): Lärminderung von Pkw und Lkw durch offenporige Asphalte. In: Straße und Autobahn, H. 6/2005, S. 327–331.
- [17] Berengier, M.C.; Anfosso-Ledee, F. (1998): State-of-the-Art prediction and control of road traffic noise in France. In: Transportation Research Record, Vol. 1626 (Environmental and Social Effects of Transportation). Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [18] Sandberg, U.; Ejsmont, J.-A. (2002): Tyre /Road Noise Reference Book. Informex, Ejsmont & Sandberg Handelsbolag, Kisa, Schweden.
- [19] Beckenbauer, T.; Spiegler, P.; Blokland, G.; Kuijpers, A.; Reinink, F.; Huschek, S. et al. (2002): Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahngeräusch. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FSS), H. 847, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- [20] Grolimund, H.J.; Pestalozzi, H.; Angst, C. (2004): Lärmarme Straßenbeläge innerorts. Statusbericht 2003. Bundesamt für Straßen (ASTRA), Bern.
- [21] Hewitt, A. P.; Abbott, P.G.; Nelson, P.M. (1997): Alternative textures for concrete roads. Results of M18 and A50 trials. TRL Report, H. 291, Transportation Research Laboratory (TRL), Crowthorne (GB).
- [22] Huschek, S.; Springborn, M. (1988): Zur Bewertung der akustischen Eigenschaften von Straßenoberflächen. In: Straßen und Verkehr 2000 - Internationale Straßen- und Verkehrskonferenz, Tagungsunterlagen Band 5 Verkehrsökologie, S. 135–140, 6.-9.09.1988, Berlin.
- [23] Anfosso-Ledee, F.; Do, M.H. (2002): Geometric descriptors of road surface texture in relation to tire-road noise. In: Transportation Research Record, Vol. 1806 (Assessing and Evaluating Pavements 2002). Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [24] Sotil, A.; Kaloush, K.E.; Biligiri, K. P.; Golden, J. S. (2006): Dynamic Complex Modulus (E^*) Test as Potential Indicator for Asphalt Mixture Tire-Road Noise Characteristics. In: Transportation Research Board Annual Meeting 2006. Paper #06-0135, 06-3088, Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [25] Graf, R. A. G.; Kuo, C. Y.; Dowling, A. P.; Graham, W. R. (2002): On the horn effect of a tyre/road interface, part 1: experiment and computation. In: Journal of Sound and Vibration, Vol. 256, Issue 3, S. 417–431.
- [26] Ronneberger, D. et al (1984): Rolling noise of tyres. Fluctuation of pressure and flow velocity in the vicinity of the contact area. In: Publ. Wiss. Film Sect. Techn. Wiss./Naturw., Vol. 8, Issue 25/C1503.
- [27] DIN ISO 13473-2: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen, Juli 2004

-
- [28] DIN ISO 13472-1: Akustik - Messung der Schallabsorptionseigenschaften von Straßenoberflächen vor Ort - Teil 1: Freifeldverfahren, April 2004.
- [29] Schellenberger, M.; Scheuer, S. (2007): Lärmtechnisch optimierte Splittmastixasphalte. In: Straße und Autobahn, H. 8/2007, S. 425–432.
- [30] Gärtner, K.; Graf, K.; Meyer, D. (2006): Lärmtechnisch optimierte Splittmastixasphaltdeckschichten. In: Straße und Autobahn, Jg. 12, H. 12/2006, S. 744–750.
- [31] Haberl, J.; Litzka, J. (2006): Near-field noise emissions on Austrian road surface courses. In: Acta Acustica united with Acustica, Vol. 92, Suppl. May-June 2006.
- [32] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2009): Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen - Asphaltbauweisen (ZTV BEA-StB 09), Ausgabe 2009, Köln.
- [33] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2003): Merkblatt Dünne Schichten im Heißeinbau auf Versiegelung (M DSH-V), Ausgabe 2003, Köln
- [34] Schellenberger, M. (2004): Praxiserfahrungen - Einsatz von Dünnen Schichten im Heißeinbau. In: Bitumen, Jg. 66, H. 3, S. 109-111.
- [35] Bendtsen, H.; Andersen, B.; Thomsen, S. (2007): Optimized thin layers for highways. DRI Report, 153), Danish Road Institute.
- [36] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007) Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt (ZTV Asphalt-StB) Ausgabe 2007, Köln.
- [37] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2000): Hinweise für die Herstellung von Gussasphaltdeckschichten mit lärmtechnisch verbesserten Eigenschaften, Ausgabe 2000, Köln.
- [38] Bundesanstalt für Straßenwesen (2004): Verbundprojekt 'Leiser Straßenverkehr - Reduzierte Reifen-Fahrbahngeräusche', Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Straßenbau, Heft S 37).
- [39] Sadzulewsky, S. (2007): Lärm mindernder Gussasphalt. In: Asphalt, H. 1/2007, S. 23–28.
- [40] Ullrich, S. (1996): Akustische Erfahrungen mit lärm mindernden Texturen - eine Zwischenbilanz. In: Straße und Autobahn, H. 8/1996, S. 432–435.
- [41] Krieger, B.; Sulten, P. (1999): Stand der Entwicklung von lärmarmen Betondecken. In: Straße und Autobahn, H. 9/1999, S. 479–486.
- [42] Krieger, B.; Kunz, K.; Sulten, P. (2000): Dauerhaft griffige und geräuscharme Betonfahrbahnen - Stand der Entwicklung. In: Straße und Autobahn, H. 12/2000, S. 753–759.
- [43] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007) Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton-StB 07), Ausgabe 2007, Köln.
- [44] Bundesministerium für Verkehr (2006): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 14/2006. Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberflächen, Bonn.
-

- [45] Sulten, P.; Wolf, T. (2006): Waschbeton - Eine alternative Betonoberfläche. In: Straße und Autobahn, H. 4/2006, S. 210–218.
- [46] Bundesministerium für Verkehr (2006): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/2006. Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberflächen, Bonn.
- [47] Eickschen, E.; Siebel, E.: Dauerhaftigkeit von Dränbeton für Betonfahrbahndecken. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FSS), H. 764, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- [48] Felsch, K.; Böhme, K.; Schwenninger, D. (2002): Lärmindernder Straßenbeläge - Dränbeton am Hockenheimring. In: Straße und Autobahn, H. 9/2002, S. 515–520.
- [49] Blab, R.; Wistuba, M. (2006): Gummiprodukte aus dem Altreifenrecycling in hochstandfesten und lärmindernden Deckschichtasphalten. In: Straße und Autobahn, H. 6/2006, S. 349–356.
- [50] Schinkinger, T. (2004): Gummiasphalt. In: Gestrata Journal – das Asphaltmagazin, H. 105 (Juli 2004), S. 11-16.
- [51] Schwarz, A. (2002): Gummiasphalt in Mecklenburg-Vorpommern. Beginn eines Pilotprojekts. In: Asphalt, H. 5/2002, S. 33.
- [52] Meiarashi, S. (2006): Noise reduction effect of equivalent continuous A-weighted sound pressure levels by porous elastic road surface and drainage asphalt pavement. In: Transportation Research Board Annual Meeting 2006. Paper #06-0135, Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [53] Kraemer, Carlos (1997): Porous Asphalt: Past and Present. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 37–43, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [54] Watson, D.E.; Moore, K. A.; Williams, K.; La Cooley (2003): Refinement of new-generation open-graded friction course mix design In: Transportation Research Record, Vol. 1832 (Bituminous paving mixtures 2003). Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [55] Watson, D.E.; Johnson, A.; Jared, D. (1998): Georgia Department of Transportation's progress in open-graded friction course development. In: Transportation Research Record, Vol. 1616. Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [56] Federal Highway Administration (1990): Open-graded friction courses FHWA Mix Design Method, Technical Advisory, T5040.31. Federal Highway Administration information (FHWA). Washington D.C.
- [57] Kandhal, P. (2002): Design, Construction and Maintenance of open-graded asphalt friction course. National Asphalt Pavement Association, Information series, H. 115, Lanham, MD (USA).
- [58] Alvarez, A.E.; Martin, A.E.; Estakhri, C.K.; Button, J.W.; Glover, C.J.; Jung, S.H. (2006): Synthesis of current practice on the design, construction and maintenance of porous friction courses. Optimizing the Design of Permeable Friction Courses (PFC). Texas Department of Transportation, Report 0-5262-1, College Station, TX (USA).

-
- [59] Williams, W.L.; Kay, R.A.; Stephens, J.K. (1975): Noise produced by open-graded asphalt friction courses. In: Public roads, Vol. 39, Issue 1, S. 16–20.
- [60] Study Centre for Road Construction, Netherlands (Hg.): International Symposium on Porous Asphalt. Proceedings. 31.05.-02.06.1976, Amsterdam.
- [61] Menzies, I. (1992): Von Friction Course zu Dränasphalt - eine Betrachtung aus britischer Sicht. In: Bitumen, H. 4/1992, S. 179.
- [62] Szatkowski, S.; Brown, J.R. (1976): The design and performance of previous surfacings for roads in Britain 1967-76. In: Proceedings of the International Symposium on Porous Asphalt. SCW Record 2 Proceedings, S. 30–40, Amsterdam.
- [63] Nicholls, J.C. (1997): Review of UK porous asphalt trials. TRL Report, H. 291, Transportation Research Laboratory (TRL), Crowthorne (GB).
- [64] Colwill, D. M.; Bowskill, G. J.; Nicholls, J. C.; Daines, M. E. (1993): Porous asphalt trials in the United Kingdom. In: Transportation Research Record, Vol. 1427 (Pavement Surface Courses, Stone Mastic Asphalt Pavements, and Asphalt Concrete Recycling), S. 13–21. Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [65] Bowskill, Graham J.; Colwill, Douglas M. (1997): Experience with porous asphalt in the United Kingdom. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1091–1129, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [66] Waanders, G.; Els, H. (1995): Splittmastixasphalt und Dränasphalt in den Niederlanden. Erfahrungen und Untersuchungen in der Provinz Overijssel. In: Asphalt, H. 4/1995, S. 8–17.
- [67] Swart, J.H. (1997): Experience with porous asphalt in the netherlands. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1021–1035, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [68] Bonnot, J. (1997): French experience of porous asphalt. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1175–1199, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [69] Brosseaud, Y.; Roche, J.P. (1997): Evaluation of the experimental site of porous asphalt on motorway A63 after 8 years of traffic. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1217, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [70] Sainton, A. (1990): Advantages of asphalt rubber binder for porous asphalt concrete. In: Transportation Research Record, Vol. 1265 (Porous Asphalt Pavements: An International Perspective 1990), S. 69-81. Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [71] Greby, E. (1976): Drainage asphalt in Denmark. In: Proceedings of the International Symposium on Porous Asphalt. SCW Record 2 Proceedings, Amsterdam.
- [72] Raaberg, J.; Schmidt, B.; Bendtsen, H. (2001): Technical performance and long-term noise reduction of porous asphalt pavements. DRI Report, 112, Danish Road Institute.
- [73] Rivara, M. (1997): Pavimentazione drenante fonoassorbente. In: Strade, Vol. 99, Issue 1330, S. 629–633.
- [74] Khalid, H.; Perez Jimenez, F.K. (1996): Performance assessment of spanish and british porous asphalts. In: Symposium Performance and durability of bituminous materials, University of Leeds, März 1994, S. 137–157, Leeds (GB).
-

- [75] Ruiz, A.; Alberola, R.; Perez, F.; Sanchez, B. (1990): Porous asphalt mixtures in Spain. In: Transportation Research Record, Vol. 1265 (Porous Asphalt Pavements: An International Perspective 1990), S. 87–94. Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [76] Rocha, D.M. (1997): Experiencia en Espana. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1255–1273, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [77] Lefebvre, Guy (1997): La situation en Belgique. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1009–1017, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [78] Decoene, Y.; Descornet, G. (1988): Les enrobés drainants: expériences et perspectives. In: Straße und Verkehr, Jg. 74, H. 3, S. 117–126.
- [79] Luis, Antonio Serafim (1997): Experience in Portugal. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1057–1083, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [80] Dumont, A.G. (1997): Experience Suisse sur les enrobes drainantes. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1133–1143, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [81] Kocherhans, R.; Hirt, T.; Graf, B. (2006): Offenporiger Asphalt in der Schweiz. Lärmsanierung mit Dränasphalt im Urner Reusstal. In: Asphalt, H. 2/2006, S. 46–50.
- [82] Litzka, J.; Haberl, J. (2006): Drainbeläge in Österreich. Ein Neubeginn nach schlechten Erfahrungen. In: 3. Informationstage Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in der Praxis - Stand der Technik, 25.-26.4.06, Planegg.
- [83] Pippich, J. (1997): Asphalts with special acoustic properties austrian experiences. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 708–717, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [84] Patrick, J.E.; Cook, G. (2003): Results of a trial of high void content open graded porous asphalt. In: 12th AAPA International Flexible Pavements Conference. Australian Asphalt Pavement Association (AAPA), 05.-08.10.2003, Victoria, Australien.
- [85] Nakajima, A. (1976): Some problems with porous asphalt in Japan. In: Proceedings of the International Symposium on Porous Asphalt. SCW Record 2 Proceedings, Amsterdam.
- [86] Motomatsu, S.; Takahashi, S.; Uesaka, K.; Ouki, H. (2004): How the property and performance of polymer-modified bitumen should be evaluated in porous asphalt mix. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, Paper 58, 12.-14.05.2004, Wien.
- [87] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1983): Richtlinie für Dränasphaltschichten auf Flugplätzen.
- [88] Peffekoven, W. (1974): Wasserdurchlässige Makadam-Deckschichten. In: Bitumen, H. 1/1974, S. 19–20.
- [89] Neumann, G.; Roggenbuck, H. (1978): Einbau von Dränasphalt auf einer Bundesautobahn. In: Bitumen, H. 6/1978, S. 184–187.
- [90] Halfmann, U. (1982): Erprobung von Deckschichten aus Dränasphalt und Asphaltbeton auf dem Nürburgring. In: Teerbau Veröffentlichungen, H. 28, S. 22–31.
- [91] N.N. (1982): Beitrag der Asphaltdeckschichten zur Minderung des Rollgeräusches. Stellungnahme der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. In: Straße und Autobahn, H. 9/1982, S. 354–357.

-
- [92] Canisius, P. (1989): Lärmindernde Straßendecken. Erkenntnisstand und Erwartungen. In: Straße und Autobahn, H. 7/1989, S. 258–261.
- [93] Kurth, N.; Rode, F. (1990): Lärmindernde Deckschichten - Erfahrungen aus der Praxis. In: Bitumen, H. 4/1990, S. 146–152.
- [94] Ripke, O. (2004): Reducing traffic noise by optimising hot-mix asphalt surface courses. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, S. 1–7, 12.-14.05.2004, Wien.
- [95] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1991): Merkblatt für den Bau offenporiger Asphaltdeckschichten, Ausgabe 1991, Köln.
- [96] Bundesministerium für Verkehr (1991): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 14/1991. RLS 90 - Fahrbahnoberflächen - Korrekturwerte DStrO für offenporigen Asphalt (OPA), Bonn.
- [97] Bühler, B. (1996): Realisierung eines geräuschabsorbierenden Asphaltüberbaus unter Einführung der Kennwertsynthese als multikriteriale Entscheidungshilfe. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Karlsruhe.
- [98] Renken, P.; Schäfer, V. (1999): Offenporige Asphaltdeckschichten. Forschungsergebnisse und aktuelle baupraktische Erfahrungen am Beispiel der BAB A 2 in Niedersachsen - Teil 1. In: Straße und Autobahn, H. 1/1999, S. 15–21, Teil 2. In: Straße und Autobahn, H. 2/1999, S. 74–80.
- [99] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1998): Merkblatt für den Bau offenporiger Asphaltdeckschichten, Ausgabe 1998, Köln.
- [100] Bundesministerium für Verkehr (2002): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/2002. RLS 90 - Fahrbahnoberflächen - Korrekturwerte DStrO für offenporigen Asphalt incl. Statuspapier der Bundesanstalt für Straßenwesen Offenporige Asphaltdeckschichten vom 18. Oktober 2001 (OPA), Bonn.
- [101] Bundesministerium für Verkehr (2004): Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 8/2004. Verwendung von offenporigem Asphalt auf Bundesfernstraßen, Bonn.
- [102] van Bochove, G.G.; van Gorkum, F. (1997): Two layered porous asphalt - a new concept civil technical properties and experiences. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 250–269, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [103] Battiato, G. (1996): DDL (Double draining layer): A new generation of porous asphalt pavements developed by autovie venete. DDL (Double draining layer). In: Eurasphalt & Eurobitume Conference, 07.-10.05.1996, Straßburg.
- [104] Kragh, J. (2006): Traffic noise at two-layer porous asphalt. DRI Technical Note, 46, Danish Road Institute.
- [105] Schäfer, Volker (2004): Compact asphalt and twin-layer porous asphalt laid by the compact module paver. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, 12.-14.05.2004, Wien.
- [106] Beckenbauer, T. (2006): Lärminderung mit Flüsterasphalten. In: Lärmkongress Baden-Württemberg 2006, 12.-13.07.2006, Leinfelden-Echterdingen.
-

- [107] Abbott, P.; Watts, G. (2005): Correlating statistical pass-by (SPB) and close proximity (CPX) noise levels. In: INTERNOISE 2005, 07.-10.08.2005, Rio de Janeiro.
- [108] Anfosso-Ledee, F. (2005): The propagation filter between CPX and CPB measurements, SILVIA Project Report, SILVIA-LCPC-006-01-WP2-300404.
- [109] DIN EN ISO 11819-1: Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren, Mai 2002
- [110] Bundesministerium für Verkehr (1992): GEstro-92. Verfahren zur Messung der Geräuschemissionen von Straßenoberflächen, Ausgabe 1992.
- [111] DIN ISO 10844: Anforderungen an Prüfstrecken zur Geräuschmessung an Straßenfahrzeugen, Mai 1997
- [112] N.N. (2006): Sustainable road surfaces for traffic noise control. Guidance Manual for the Implementation of low-noise road surfaces, EU-Projekt SILVIA, FEHRL Report 2006/02.
- [113] Rodehack, Gernot; Beckenbauer, T. (2007): Möglichkeiten und Grenzen von offenporigen Asphaltdeckschichten. In: Straße und Autobahn, H. 04/2007, S. 185-189.
- [114] Meiarashi, S.; Ishida, M.; Nakashiba, F.; Niimi, H.; Hasebe, M.; Nakatsuji, T. (1996): Improvement in the effect of drainage asphalt road surface on noise reduction. In: Applied Acoustics, Vol. 47, Issue 3, S. 189–204.
- [115] Fujiwara, T.; Meirashi, S.; Namikawa, Y.; Hasebe, M. (2005): Reduction of equivalent continuous A-weighted sound pressure levels by porous elastic road surfaces. In: Applied Acoustics, Vol. 66, Issue 7, S. 766–778.
- [116] Bowskill, Graham J.; Colwill, Douglas M. (1997): Experience with porous asphalt in the United Kingdom. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1091–1129, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [117] Brosseaud, Y. (2004): Surface pavements with low rolling noise level and high adherence evaluation of the French researches, development of the products. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, S. 1–11, 12.-14.05.2004, Wien.
- [118] Woodside, A.R.; Woodward, W.D.H.; Anderson, G.A.L. (1997): Noise measurements of porous asphalt. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 823–843, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [119] Andersen, B.; Bendtsen, H.; Larsen, L.E. (2005): Acoustic performance of low noise road pavements. SILVIA Project Report, SILVIA-DTF-DRI-010-02-WP4-290605.
- [120] Hanig, D. (2004): Überbauung einer Betonautobahn mit offenporigem Asphalt - Reduzierung des Verkehrslärms im Urteil der Anwohner. In: Bitumen, H. 3/2004, S. 120–122.
- [121] Golebiewski, R.; Makarewicz, R.; Nowak, M.; Preis, A. (2003): Traffic noise reduction due to the porous road surface. In: Applied Acoustics, Vol. 64, Issue 5, S. 481–494.
- [122] Kragh, J. (2007): Ageing of porous pavements: Acoustical effects. DRI Technical Note, 56, Danish Road Institute.
- [123] DIN EN 1793-3: Lärmschutzeinrichtungen an Straßen, Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften, Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum, November 1997.

-
- [124] Beckenbauer, T. (2001): Akustische Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen. In: Straße und Autobahn, H. 10/2001, S. 553–561.
- [125] Hanson, D.I.; James, R.S.; Nesmith, C. (2004): Tire/pavement noise study. NCAT Report 04-02. National Center for Asphalt Technology (NCAT), Auburn (USA).
- [126] Bundesanstalt für Straßenwesen (1996): Offenporige Asphaltdeckschichten auf Außerortsstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Reihe Straßenbau, Heft S 12.
- [127] Bendtsen, H.; Andersen, B. (2005): Noise reducing pavements. State of the art in Denmark: DRI Report 141, Danish Road Institute.
- [128] Schulte, W. (2004): Offenporiger Asphalt. Lärmschutzwirkung, -bedingungen und -dauer. In: Asphalt, H. 2/2004, S. 1–6.
- [129] Roos, R.; Holldorb, C. (1997): Erhaltung der Funktionen Lärminderung und Entwässerung offener Asphaltdecken. Schlussbericht (unveröffentlicht); Forschungsauftrag FE 03.237 R90L des Bundesministeriums für Verkehr, Karlsruhe.
- [130] Springborn, M. (1993): Langzeiterfahrungen mit zwei Drainasphaltversuchsstrecken im Zuge der BAB A 103 in Berlin. In: Straße und Autobahn, H. 4/1993, S. 202–212.
- [131] Shojaati, M.; Blötz, A.; Horat, M.; Caprez, M. (2000): Lärmverhalten verschiedener Belagsoberflächen in der Schweiz. Bundesamt für Straßen (ASTRA), ASTRA Bericht 462, Bern.
- [132] Graf, B.; Simond, E. (2005): Erfahrungen mit Drainasphaltbelägen im Kanton Waadt. In: Straße und Verkehr, H. 4/2005, S. 12–15.
- [133] Ranzo, A.; Di Mascio, P.; d'Andrea, A. (2000): Absorption coefficients of asphalt pavements. In: 2nd Eurasphalt & Eurobitume Conference, S. 891–902, 20.-22.09.2000, Barcelona.
- [134] Weißenberger, W. et al (2006): Weiterentwicklung offener Asphalte. Schalltechnische und bautechnische Untersuchung an den realisierten Strecken in Bayern. Schlussbericht der Müller-BBM GmbH.
- [135] Nielsen, C.B. (2006): Durability of porous asphalt. International experience. DRI Technical Note, 41, Danish Road Institute.
- [136] Dunn, K.D.; Hicks, R.G.; Gower, J. (1997): Performance factors and quality control/quality assurance for porous pavements. In: Transportation Research Record, Vol. 1575 (Flexible Pavements, Bridges, Quality, and Management), S. 10–17. Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [137] Graf, K. (2006): Offenporige Asphaltdeckschichten. In: Straße und Autobahn, H. 1/2006, S. 10–15.
- [138] Nielsen, C.B. (2007): Ravelling of porous pavement. Assessment of test sections. DRI Technical Note, 48, Danish Road Institute.
- [139] Renken, P. (2004): Noise reducing asphalt pavements (porous asphalt) – optimal composition, prediction of material properties and experience with long term performance. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, 12.-14.05.2004, Wien.
-

- [140] Lenk, G.; Loibl, A.; Mocker (2004): Long term ageing properties of polymermodified binders, theory and experience. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, 12.-14.05.2004, Wien.
- [141] Voskuilen, J.L.M.; Tolman, F.; Rutten, E. (2004): Do modified porous asphalt mixtures have a longer service life? In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, 12.-14.05.2004, Wien.
- [142] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Ausgabe 2007, Teil 17, Kornverlust von Probekörpern aus offenporigem Asphalt, Köln.
- [143] DIN EN 1097-2: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstands gegen Zertrümmerung, September 2006.
- [144] Hamzah, M.; Samat, M.; Joon, K.; Muniandy, R. (2004): Modification of aggregate grading porous asphalt. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, 12.-14.05.2004, Wien.
- [145] Renken, P. (1999): Optimierung und Qualitätssicherung offenporiger Asphaltdeckschichten. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FSS), H. 765, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- [146] Poulidakos, L.D.; Gubler, R.; Partl, M.N. (2006): Mechanische Eigenschaften von offenporigem Asphalt. Empfehlungen für die Normierung. VSS (Schweizerischer Verband der Straßen- und Verkehrsfachleute), H. 1185, Bundesamt für Straßen (ASTRA), Bern.
- [147] Pérez-Jimenez, Félix; Miro Recasens, Rodrigo (1997): Execution control of porous asphalt. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 1091–1129, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [148] Hassan, H.F.; Al-Jabri, K.S. (2005): Effect of organic fibers on open-graded friction course mixture properties. In: International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, Issue 1, S. 67–75.
- [149] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Ausgabe 2007, Teil 11, Haftverhalten zwischen Gestein und Bitumen, Köln.
- [150] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Ausgabe 2007, Teil 23, Spaltzugfestigkeit von Asphalt-Probekörpern, Köln.
- [151] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB) Ausgabe 2007, Teil 12, Wasserempfindlichkeit von Asphalt-Probekörpern, Köln.
- [152] Watson, D.E.; La Cooley; Moore, K. A.; Williams, K. (2004): Laboratory performance testing of open-graded friction course mixtures: In: Transportation Research Record, Vol. 1891. Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [153] Sanches, F. (2000): Entfernen von Öl auf offenporigen Asphalt mit Reinigungsmitteln und dessen Auswirkungen. In: 2nd Eurasphalt & Eurobitume Conference, 20.-22.09.2000, Barcelona.
- [154] Peffekoven, W. (1975): Dränfähige Deckschichten zur Erhöhung der Verkehrssicherheit bei Nässe. In: Straßen- und Tiefbau, H. 12/1975, S. 13–16.

-
- [155] Renken, P. (2006): Optimierung und Qualitätssicherung offenporiger Asphaltdeckschichten, Teil 2: Veränderungen der Eigenschaften nach längerer Liegezeit. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FSS), H. 951, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- [156] Watson, D.E.; Masad, E.; Moore, K.A.; Williams, K.; Cooley, L.A. (2004): Verification of voids in coarse aggregate testing: Determining stone-on-stone contact of hot-mix asphalt mixtures. In: Transportation Research Record, Vol. 1891. Transportation Research Board (TRB), Washington D.C.
- [157] Drüschner, L.; Stephan, F. (2004): Porous asphalt – a contribution to skid resistance. In: 3rd Eurasphalt & Eurobitume Conference, 12.-14.05.2004, Wien.
- [158] DIN EN 1097-8 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 8: Bestimmung des Polierwerts, Januar 2000.
- [159] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), TP Griff StB-SKM, Ausgabe 2007, Köln
- [160] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2004) Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Messverfahren SRT, TP Griff StB-SRT, Ausgabe 2004, Köln
- [161] Zwan, J.; Eikelboom, J.; Bennis, T. (1997): Skidding and Texture. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 847–881, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [162] Jutte, R.H.; Siskens, C.A.M. (1997): A material technological approach to the low initial skid resistance of porous asphalt roads. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 917–927, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [163] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07), Ausgabe 2007, Köln.
- [164] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2004): Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04), Ausgabe 2004, Fassung 2007, Köln
- [165] DIN EN 933-4 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl, Dezember 1999
- [166] Halbe, K. (2006): Offenporiger Asphalt auf der A 7. In: Asphalt, H. 5/2006, S. 26–32.
- [167] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2004): Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen (TL Bitumen-StB), Ausgabe 2007.
- [168] DIN EN 13108-7 Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen - Offenporiger Asphalt, August 2006.
- [169] DIN EN 12697-17 Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 17: Kornverlust von Probekörpern aus offenporigem Asphalt, Oktober 2007.
-

- [170] Durth, W. (1994): Stand der Forschung zum Winterdienst auf offenporigen Deckschichten. In: Straße und Autobahn, H. 10/1994, S. 581–586.
- [171] Schmitt, E. (1994): Winterdienst auf Drainasphalt. In: Asphalt, H. 8/1994.
- [172] N.N. (1996): La viabilité hivernale des enrobes drainants. In: Bulletin (CRR), Jg. 26 (1996), S. 1–9.
- [173] Hernandez, J.A.; Verburg, D.J. (1997): Winter maintenance on porous asphalt. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 529–542, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [174] Larsen, L.E. (2005): Cost-benefit analysis on noise reducing pavements: DRI Report, 153, Danish Road Institute.
- [175] Ott, C.; Jager, J. (2005): Aufbereitung von Straßenkehricht von Außerortsstraßen. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FSS), H. 911, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- [176] Gallenkemper, B.; Fritsche, M.; Becker, G. (1993): Schadstoffgehalte von Bankettschäl- und Kehrgut und deren umweltverträgliche Beseitigung. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (FSS), H. 664, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- [177] N.N. (2007): Leiser Straßenverkehr 2, Zwischenbericht II/2006.
- [178] Bald, S.; Wellner, F.; Böhm, S.; Root, V. (2005): Optimierung der Zusammensetzung wasserdurchlässiger Asphaltbefestigungen, Darmstadt.
- [179] Weyringer, H.W. (1991): Drainasphalt - Ein innovatives Produkt des Asphaltstraßenbaus. Ein Bericht über Erfahrungen mit Drainasphalt aus der Sicht einer österreichischen Straßenbausondergesellschaft. In: Straße und Autobahn, H. 11/1991, S. 634–640.
- [180] Nielsen, C.B. (2007): Assessment of porous pavements. How to look inside. DRI Report, 157, Danish Road Institute.
- [181] Bendtsen, H.; Raaberg, J. (2007): Clogging of porous pavements. International experiences. DRI Technical Note, 55, Danish Road Institute.
- [182] Kutí, H.: Verschmutzungsprozess von offenporigen Asphaltdecken, Diplomarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (mit Unterstützung des Geologischen Zentrums der Universität Göttingen), Universität Stuttgart, 2006.
- [183] Maróthy, E.: Untersuchung der Rauheit von Poreninnenwandungen in offenporigen Asphalt, Diplomarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (mit Unterstützung des Geologischen Zentrums der Universität Göttingen), Universität Stuttgart, 2006.
- [184] Hirsch, V.: Lernen von den Straßen – Zweilagige offenporige Asphalte, FGSV Asphaltstraßentagung 2007, 8.-9. Mai 2007, Stuttgart.
- [185] van Leest, A.J.; Crielaard, H.J. Gruis H.J.A.J.; van Gorkum, F.; Heerkens, J.C.P.; Nugteren, H.P. (1997): Guidelines for determining the cleaning effect on porous asphalt. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 637–647, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [186] N.N. (2008): Leiser Straßenverkehr 2, Zwischenbericht I/2008.
- [187] N.N. (2008): Leiser Straßenverkehr 2, Zwischenbericht II/2007.

-
- [188] Jansen, R.; van Venn, C.J. de (1997): A new method for cleaning and removing porous asphalt. In: European Conference on Porous Asphalt, S. 698–705, 12.-14.03.1997, Madrid.
- [189] Sandberg, U. (2005): Japanese machines for laying and cleaning of double layer porous asphalt – Observations from a study tour, Report prepared for the Dutch IPG programme, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), Linköping, Schweden.
- [190] Abe, T.; Kishi, Y. (2002): Development of Low-Noise Pavement Function-Recovery-Machine. In: 9th International Conference on Asphalt Pavements, International Society for Asphalt Pavements (ISAP), 17.-22.08.2002, Kopenhagen.
- [191] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2007): Technische Prüfvorschriften für Asphalt (TP Asphalt-StB), Ausgabe 2007, Teil 22: Spurbildungsversuch, Köln.
- [192] DIN EN 1426 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, Bestimmung der Nadelpenetration, Dezember 1999.
- [193] DIN EN 1427 Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel, Bestimmung des Erweichungspunktes, Ring und Kugel-Verfahren, Oktober 2005.
- [194] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2001): Technische Lieferbedingungen für gebrauchsfertige polymermodifizierte Bitumen (TL PmB), Ausgabe 2001, Köln (zurückgezogen).
- [195] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2004): Technische Lieferbedingungen für Straßenbaubitumen und gebrauchsfertige Polymermodifizierte Bitumen (TL Bitumen-StB), Ausgabe 2007.
- [196] DIN EN 29053 Material für akustische Anwendungen, Bestimmung des Strömungswiderstands, Mai 1993.
- [197] DIN EN ISO 10534-1: Bestimmung des Schallabsorptionsgrads und der Impedanz in Impedanzrohren, Teil 1: Verfahren mit Stehwellenverhältnis, Oktober 2001.
- [198] Ripke, O. (2006): Das europäische Projekt ITARI - Ganzheitliche Erforschung des Reifen-Fahrbahn-Kontakts. In: Straße und Autobahn, H. 8/2006, S. 475–477.
- [199] Mechel, F.P. (1989, 1995, 1998): Schallabsorber, Teil 1 bis 3, Hirzel-Verlag, Stuttgart.
- [200] Carman, P.: Fluid flow through a granular bed. In: Trans. Inst. Chem. Eng. London 15 (1937), S. 150-156.
- [201] Attenborough, K. (1983): Acoustical characteristics of rigid fibrous absorbents and granular materials. In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 73, S. 785–799.
- [202] Attenborough, K. (1971): Scattering theory for sound absorption in fibrous media. In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 49, S. 1331–1338.
- [203] Berengier M.C.; Stinson M.R.; Daigle, G.A.; Hamet, J.F. (1997): Porous road pavements: acoustical characterization and propagation effects. In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 101, H. 1, S. 155–162.
-

- [204] Hübelt, J. (2006): Charakterisierung der akustischen Eigenschaften offenporiger Straßenbeläge. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Verkehrstechnik, Heft V 133.
- [205] Lord Rayleigh: Theory of Sound, Vol. II, 2. Ausgabe, 319-326, Macmillan Company, London, 1896.
- [206] Biot, M. A. (1956): Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. Low-Frequency Range. In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 28, S. 168–178.
- [207] Biot, M. A. (1956): Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. High-Frequency Range. In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 28, S. 179–191.
- [208] Champoux, Y.; Stinson, M. (1992): On acoustical models for sound propagation in rigid frame porous materials and the influence of shape factors. In: Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 82, S. 1120–1131.
- [209] Hamet, J.F.; Berengier, M. (1993): Acoustical characteristics of porous pavements: a new phenomenological model. In: International Congress on Noise Control Engineering, Proceedings S. 641–646, 24.-26.08. 1993, Leuven, Belgien.
- [210] Zwikker, C.; Kosten, C.W.: Sound Absorbing Materials, Elsevier, New York, 1949.

Anhang A

Übersicht über Lärminderungspotentiale von offenporigen Asphalten

Untersuchung (Jahr)	Alter [Jahre]	Schichtdicke [cm]	Größtkorn/Körnung [mm]	Messmethode	Referenzbelag	Pegelminderung gegenüber Referenz	Bemerkung	
Bendtsen et al. (2007), Kragh (2006) [104] [181]	neu	2,5 4,5	0/8 0/16	SPBI nach DIN ISO 11819-1	Asphaltbeton 0/8 Deckschicht nach DIN ISO 10844	4,6 dB(A)		
		2,0 3,5	0/5 0/16			4,9 dB(A)		
		2,5 6,5	0/5 0/22			6 dB(A)		
	1	2,5 4,5	0/8 0/16			4,5 dB(A)		-0,1 dB(A) gegenüber Neuzustand
		2,0 3,5	0/5 0/16			3,5 dB(A)		-1,4 dB(A) gegenüber Neuzustand
		2,5 6,5	0/5 0/22			3,8 dB(A)		-2,2 dB(A) gegenüber Neuzustand
Kragh(2007) [122]	neu	n.a.	n.a.	SPB-Messung Pkw	dichter Asphaltbeton 0/11	5-6 dB(A)		
				SPB-Messung Lkw		5 dB(A)		
	11			SPB-Messung Pkw		1 dB(A)		"-4-5 dB(A) gegenüber Neuzustand
				SPB-Messung Lkw		2-3 dB(A)		"-2-3 dB(A) gegenüber Neuzustand
Haberl et al. (2006) [31]	neu	n.a.	0/11	n.a. (vermutlich SPB)	Asphaltbeton 0/11	ca. 5 dB(A)		
	5					ca. 0 dB(A)		
Alvarez et al. (2006) [58]	neu	n.a.	n.a.	n.a.	Beton Portland Cement Concrete (PCC), USA	2,3-7,8 dB(A), in Einzelfällen bis 14 dB(A)		
					Asphalt Dense-Graded Hot-Mix Asphalt (DGHMA), USA	3-6 dB(A)		
Andersen et al. (2005) [119]	unterschiedlich (30 % 0-1 Jahr 60 % < 10 Jahre)	unterschiedlich	unterschiedlich	SPB Pkw 50 km/h	glatt -texturierte Asphaltbeton-decke mit einem maximalen Korndurchmesser von 11 bis 16 mm nach DIN ISO 11819-1	durchschn. 1,2 dB(A) max. 4,4 dB(A)	Resultat aus mehreren europäischen Strecken unterschiedlichsten Aufbaus und Alters (SILVIA-Projekt)	
				SPB Pkw 80 km/h		durchschn. 2,4 dB(A) max. 6,6 dB(A)		
				SPB Pkw 110 km/h		durchschn. 2,6 dB(A) max. 6,1 dB(A)		
				SPB leichte Nutzfahrzeuge 85 km/h		durchschn. 3,4 dB(A) max. 6,1 dB(A)		
				SPB schwere Nutzfahrzeuge 85 km/h		durchschn. 3,7 dB(A) max. 7,6 dB(A)		
				SPB Pkw 50 km/h		durchschn. 4,5 dB(A) max. 8,3 dB(A)		
				SPB Pkw 80 km/h		durchschn. 5,5 dB(A) max. 10,1 dB(A)		
				SPB Pkw 110 km/h		durchschn. 3,3 dB(A) max. 5,9 dB(A)		
				SPB leichte Nutzfahrzeuge 85 km/h		durchschn. 3,6 dB(A) max. 5,8 dB(A)		
				SPB schwere Nutzfahrzeuge 85 km/h		durchschn. 4,7 dB(A) max. 7,5 dB(A)		

Anhang A

Übersicht über Lärminderungspotentiale von offenporigen Asphalten

Untersuchung (Jahr)	Alter [Jahre]	Schichtdicke [cm]	Größtkorn/Körnung [mm]	Messmethode	Referenzbelag	Pegelminderung gegenüber Referenz	Bemerkung	
Betz, Beckenbauer (2005) [16]	neu	4	0/8	SPB-Messung Pkw 120 km/h	Referenzbelag RLS 90: nicht geriffelter Gussasphalt	6,5 dB(A)		
				SPB-Messung leichte (20 %, 120 km/h) und schwere Nutzfahrzeuge (80 %, 80 km/h)	Referenzbelag RLS 90: nicht geriffelter Gussasphalt	4,5 dB(A)		
				Pkw 40 km/h		ca. 4 dB(A)	Vorbeifahrtpegel abweichend von ISO 11819-1 (d = 2,8 m; h = 1,5 m)	
				Pkw 60 km/h		ca. 5 dB(A)		
				Lkw 40 km/h		ca. 3 dB(A)		
				Lkw 60 km/h		ca. 5 dB(A)		
				äq. Dauerschallpegel		ca. 4 dB(A)		
					Pkw 40 km/h			ca. 6 dB(A)
					Pkw 60 km/h			ca. 7 dB(A)
					Lkw 40 km/h			ca. 2 dB(A)
					Lkw 60 km/h			ca. 5 dB(A)
					äq. Dauerschallpegel			ca. 5 dB(A)
Sandberg (2005) zitiert nach [112]	neu	n.a.	0/11 0/16	CPX-Messung, 80 km/h	"SMA 0/16"	5,5 dB(A)	Untersuchung Schweden E18	
	1					4,5 dB(A)		
	2					3,5 - 4 dB(A)		
	neu					SPB-Messung, Pkw 110 km/h		9 dB(A)
	2					SPB-Messung, Lkw 85 km/h		6 dB(A)
						SPB-Messung, Pkw 110 km/h		6,5 dB(A)
Brosseaud (2004) [117]	neu		0/6	CPB-Messung Pkw 90 km/h	Asphaltbeton 0/10	6,6 dB(A)	Mittelwerte aus Messungen an verschiedenen Strecken	
			0/10			3 dB(A)		
			0/14			1,2 dB(A)		
Ripke (2004) [94]	neu	n.a.	0/8 (Hohlr. 15-18 %)	SPB 120 km/h Pkw	Asphaltbeton	3,8-5,8 dB(A)		
			0/8 (Hohlr. 17-20 %)			4,7-6,7 dB(A)		
			0/8 (Hohlr. > 22 %)			7,3-9,3 dB(A)		
		n.a.	n.a.			5,8-7,8 dB(A)		
N.N. (Bericht Leistra 1, 2004) [38]	neu	3,6	0/8	Vorbeifahrtpegel Pkw	nicht geriffelter Gussasphalt nach RLS-90	5 dB(A)		
		5,2	0/8			9 dB(A)		
		3,6	0/8	Vorbeifahrtpegel Lkw (80 km/h)		ca. 2 dB(A)		
		5,2	0/8	ca. 4 dB(A)				
Beckenbauer et al. (2002) [19]	neu	4,0	0/8	Vorbeifahrtpegel (wie kontrollierte Vorbeifahrt (CPB), nur ausgekuppelt)		ca. 4 dB(A)	Pkw-Reifen und Lkw-Reifen (80 km/h)	
		ca. 6 dB(A)						
	2,5 4,5	0/8 0/16	ca. 6 dB(A)			nur Pkw-Reifen (80 km/h) -2 dB(A) gegenüber Neuzustand		
	4,0	0/8	ca. 2 dB(A)					
	neu	4,0	0/8			50 km/h	2,4 dB(A)	CPX-Messung mit Messreifen nach GESTR-92
						80 km/h	3,7 dB(A)	
						110 km/h	5 dB(A)	
						50 km/h	3,3 dB(A)	
						80 km/h	4,6 dB(A)	
						110 km/h	4,6 dB(A)	

Übersicht über Lärminderungspotentiale von offenporigen Asphalten

Untersuchung (Jahr)	Alter [Jahre]	Schichtdicke [cm]	Größtkorn/Körnung [mm]	Messmethode	Referenzbelag	Pegelminderung gegenüber Referenz	Bemerkung					
Raaberg (2000) [72]	neu	n.a.	0/8 (Hohlr. 18-22 %)	SPBI nach ISO 11819-1 (80 km/h)	Asphaltbeton 0/12	ca. 4 dB(A)						
			0/8 (Hohlr. > 22 %)			ca. 4 dB(A)						
			0/12			ca. 2 dB(A)						
	7		0/8 (Hohlr. 18-22 %)			ca. 0 dB(A)						
			0/8 (Hohlr. > 22 %)			ca. 0 dB(A)						
			0/12			ca. 0,5 dB(A) lauter als Ref.belag						
Bonnot (1997) [68]	< 1	n.a.	0/10	MFA-VM (Vorbeifahrtmessung bei 90 km/h)	Asphaltbeton 0/10 mit hohem Mineralstoffanteil	2,9						
					Dünnschicht- Asphaltbeton 0/10	4,1						
					Asphaltbeton 0/14 mit hohem Mineralstoffanteil	6,3						
Woodside et al. (1997) [118]	neu	n.a.	0/20	SPB-Messung (d= 10m, h = 1,5m), trocken	Hot rolled asphalt	4,2 dB(A)						
			0/14			2,6 dB(A)						
			0/10			4,9 dB(A)						
			0/20			2,7 dB(A)						
			0/14			3,2 dB(A)						
			0/10			0,2 dB(A)						
Bowskill (1997) [65]	neu	5-5,5	0/20 (Trial 1 und 2)	SPB 90 km/h Pkw (d = 5 m)	Asphaltbeton 0/20	4,5 dB(A)						
			0/10 (Trial 3)			5,4 dB(A)						
			0/14 (Trial 4)			4,1 dB(A)						
			0/16 (Trial 5)			4,7 dB(A)						
			4			0/20 (Trial 1 und 2)		4,1 dB(A)				
						0/10 (Trial 3)		k.A.				
	0/14 (Trial 4)			4,7 dB(A)								
	0/16 (Trial 5)			5,6 dB(A)								
	neu			0/20 (Trial 1 und 2)		3,8 dB(A)						
				0/10 (Trial 3)		4,6 dB(A)						
			0/14 (Trial 4)	3 dB(A)								
			0/16 (Trial 5)	3,7 dB(A)								
			4	0/20 (Trial 1 und 2)		3,2 dB(A)						
				0/10 (Trial 3)		k.A.						
	0/14 (Trial 4)			3,6 dB(A)								
	0/16 (Trial 5)			3,7 dB(A)								
	Battiato (1996) [103]			neu		3,0		0/12 n.a.	n.a.	"Beläge mit Größtkorn 20 mm"	2 bis 2,5 dB(A)	DDL (Double Draining Layer)
						1,5						

Anhang A

Übersicht über Lärminderungspotentiale von offenporigen Asphalten

Untersuchung (Jahr)	Alter [Jahre]	Schichtdicke [cm]	Größtkorn/Körnung [mm]	Messmethode	Referenzbelag	Pegelminderung gegenüber Referenz	Bemerkung
N.N. (BAST-Bericht, 1996) [120]	neu	verschieden	0/8 0/11	SPBI nach DIN ISO 11819-1	Asphaltbeton 0/11	5,4 dB(A) 3,2 dB(A)	einbahnige Außerortsstraßen
	5		0/8	SPBI nach DIN ISO 11819-1	Asphaltbeton 0/11	3,3 dB(A)	- 2,1 dB(A) gegenüber Neuzustand einb. Außer-ortsstraßen
	5		0/11		Asphaltbeton 0/11	0,1 dB(A)	- 3,1 dB(A) gegenüber Neuzustand einb. Außer-ortsstraßen
	neu		0/8 0/11	SPBI nach ISO 11819-1	Asphaltbeton 0/11	5,0 dB(A) 3,1 dB(A)	Autobahnen
	2,5-3,5		0/8	SPBI nach DIN ISO 11819-1	Asphaltbeton 0/11	2,2 dB(A)	- 2,8 dB(A) gegenüber Neuzustand Autobahnen
	2,5-3,5		0/11		Asphaltbeton 0/11	1,2 dB(A)	- 1,9 dB(A) gegenüber Neuzustand Autobahnen
Meiarashi (1996) [114]	neu	5	5/10	SPB-Messung Pkw, 80 km/h	dichter Asphaltbeton	ca. 7 dB(A)	
				SPB-Messung leichtes Nutzfahrzeug, 80 km/h		ca. 8 dB(A)	
				SPB-Messung schweres Nutzfahrzeug, 80 km/h		ca. 9 dB(A)	
		5	10/13	SPB-Messung Pkw, 80 km/h		ca. 4 dB(A)	
				SPB-Messung leichtes Nutzfahrzeug, 80 km/h		ca. 4 dB(A)	
				SPB-Messung schweres Nutzfahrzeug, 80 km/h		ca. 6 dB(A)	
		5	13/20	SPB-Messung Pkw, 80 km/h		ca. 1 dB(A)	
				SPB-Messung leichtes Nutzfahrzeug, 80 km/h		ca. 3 dB(A)	
				SPB-Messung schweres Nutzfahrzeug, 80 km/h		ca. 3 dB(A)	
		8	10/13	SPB-Messung Pkw, 80 km/h		ca. 5 dB(A)	
				SPB-Messung leichtes Nutzfahrzeug, 80 km/h		ca. 5 dB(A)	
				SPB-Messung schweres Nutzfahrzeug, 80 km/h		ca. 7 dB(A)	
3	10/13	SPB-Messung Pkw, 80 km/h	ca. 3 dB(A)				
		SPB-Messung leichtes Nutzfahrzeug, 80 km/h	ca. 4 dB(A)				
		SPB-Messung schweres Nutzfahrzeug, 80 km/h	ca. 6 dB(A)				
Waanders et al. (1995) [66]	neu	n.a.	0/16	SPB-Messung alle Fz-Typen 60 km/h	SMA 0/11	1,2 dB(A)	
				SPB-Messung alle Fz-Typen 80 km/h		1,6 dB(A)	
				SPB-Messung alle Fz-Typen 100 km/h		1,9 dB(A)	
Canisius (1989) [92]	neu	unterschiedlich	unterschiedlich	SPB, innerorts, Durchschn.geschw. 40-60 km/h)	Asphaltbeton 0/11	2-3 dB(A)	OPA 1. Generation
				SPB, innerorts, Durchschn.geschw. 60-120 km/h)		4-5 dB(A)	

Anhang B

Gesetz von Hagen-Poiseuille

Das Gesetz von Hagen-Poiseuille wird anhand von Betrachtungen der Strömungsverhältnisse an rohrförmigen Querschnitten aus den für die Hydromechanik grundlegenden Navier-Stokes-Gleichungen hergeleitet. Betrachtet man eine einzelne zylindrische Pore mit dem Porenradius a , die senkrecht zur Oberfläche eines porösen Körpers der Dicke d verläuft, so gilt für den Volumenstrom (Gas oder Flüssigkeit):

$$Q = \frac{\pi a^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{d} = \frac{A a^2}{8\eta} \frac{\Delta p}{d}$$

Schriftenreihe des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen

Heft 1	1. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1986	9/1987
Heft 2	2. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1988	4/1989
Heft 3	Arbeiten aus dem Institut für Straßen-und Verkehrswesen	7/1989
Heft 4	Beiträge zum Ruhenden Verkehr	8/1989
Heft 5	Festkolloquium anlässlich der Vollendung des 60.Lebensjahres von Prof. Dr.-Ing. Gerd Steierwald	5/1990
Heft 6	3. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1990	4/1991
Heft 7	Wolfgang Hertkorn Veränderungen des Kraftstoffverbrauchs und der Abgasbelastungen durch Geschwindigkeitsreduktion in untergeordneten städtischen Straßennetzen	2/1992
Heft 8	City Stuttgart - attraktive Innenstadt im Zentrum einer Agglomeration (Autofreie Innenstadt = Attraktive City?)	3/1992
Heft 9	Arbeiten aus dem Institut für Straßen-und Verkehrswesen	4/1992
Heft 10	Reinhard Unkhoff Der Einfluß des Schwerverkehrs auf Geschwindigkeitsverhalten und Pulkbildung auf Autobahnen	6/1992
Heft 11	Stefanos Bazis Interaktiver Straßenentwurf mit Hilfe der EDV	7/1992
Heft 12	Jiann-Sheng Wu Stochastische Simulation des Überholverhaltens auf zweistreifigen Landstraßen	7/1992

Heft 13	4. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1992	5/1993
Heft 14	Stephan Herkt Abstimmung der Leistungsfähigkeit von Knotenpunkten mit Lichtsignalanlage und knotenpunktfreien Strecken an innerörtlichen Hauptverkehrsstraßen	4/1994
Heft 15	Von den Anfängen bis zur Gegenwart -Straßen- und Verkehrswesen an der Universität Stuttgart	9/1994
Heft 16	Ashraf Hamed Abwicklung des Lieferverkehrs innerörtlichen Hauptstraßen	10/1994
Heft 17	5. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1994	3/1995
Heft 18	Chronik und Retrospektive - Gerd Steierwald und das Institut für Straßen- und Verkehrswesen	10/1995
Heft 19	Heiko Tempel Zusammenhänge zwischen Verkehrsablauf, Kraftstoffverbrauch und Schadstoffemissionen im städtischen Busverkehr	11/1995
Heft 20	Volker Mörgenthaler Strategien zur Verminderung der Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen des Nutzfahrzeugverkehrs in Ballungsgebieten	2/1996
Heft 21	Martin Schmid Auswirkungen der Kraftstoffbesteuerung auf die Pkw-Fahrleistungen im Freizeitverkehr	11/1996
Heft 22	Burkhard Flasche Fahrraubewirtschaftung mit Sonderfahrstreifen für ausgewählte Stadtverkehre	2/1998
Heft 23	Szabolcs Törgyeges Ableitung spezifischer Abgas-Emissionsfaktoren für Kraftfahrzeugkollektive anhand von Konzentrationsmessungen in einem städtischen Straßentunnel	3/1998

Heft 24	Konrad von Kirchbach Zur Entwicklung der Straßen in Württemberg zwischen 1700 bis 1918	3/2000
Heft 25	6. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 1999	3/2009
Heft 26	Symposium Stadt und Verkehr – Mobile Konferenz	11/1999
Heft 27	„Institut 21“ Aufbruch in Forschung und Lehre (nicht erschienen)	
Heft 28	Arbeiten aus dem Institut für Straßen-und Verkehrswesen	7/2001
Heft 29	Stefan Denzinger Auswirkungen alternierender Telearbeit auf das Verkehrsverhalten	4/2001
Heft 30	7. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2001	3/2009
Heft 31	Prof. Elisabeth Deakin Changing Importance of Central Cities	8/2002
Heft 32	Walter Vogt, Matthias Lenz, Henrik Schwarz, Wilhelm Glaser, Margrit Glaser, Thomas Kuder Verkehrliche Auswirkungen von Teleshopping und Telecommerce auf die Mobilität privater Haushalte	6/2002
Heft 33	Christoph Hecht Modellierung des Zeitwahlverhaltens im Personenverkehr	2/2005
Heft 34	Henrik Schwarz Vergleich von Schallimmissionsmessungen bei Straßenverkehrslärm mit Standardisierten und Binauralen Geräten	11/2002
Heft 35	Peter Schick Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses	6/2003

Heft 36	Volker Schmid Reaktivierte Nebenbahnen und alternative Buskonzepte Vergleich von ökologischen Wirkungen	7/2003
Heft 37	8. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2003	3/2009
Heft 38	Matthias Lenz Auswirkungen des Ausbaus der verkehrlichen Infrastruktur auf das regionale Fernpendleraufkommen	2/2005
Heft 39	Steffen R. Herrmann Simulationsmodell zum Wasserabfluss- und Aquaplaningverhalten auf Fahrbahnoberflächen	2/2008
Heft 40	Manuel Galster Modellierung von Anbindungen in Verkehrsplanungsmodellen	8/2009
Heft 41	10. Fachkolloquium Straße und Verkehr - Stuttgart 2008	8/2009
Heft 42	Johannes Schlaich Nutzung von Mobilfunkdaten für die Analyse der Routenwahl	6/2010
Heft 43	Florian Bitzer Mikroskopische Modellierung und Simulation des Fußgängerverkehrs	9/2010
Heft 44	Eileen Mandir Potential of Traffic Information to optimize Route and Departure Time Choice	7/2012
Heft 45	Anne Wolff Simulation of Pavement Surface Runoff using the Depth-Averaged Shallow Water Equations	3/2013
Heft 46	Stefan Alber Veränderung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Asphalten durch Verschmutzung	3/2013