

Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 74

bast

Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“

Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche

Projektgruppe

„Leiser Straßenverkehr 2“

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbau Heft S 74

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9323
ISBN 978-3-86918-183-7

Bergisch Gladbach, Januar 2012

Print  kompensiert
Id-Nr. 1216053
www.bvdm-online.de

Kurzfassung – Abstract

Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“

Eine moderne Verkehrsinfrastruktur ist die Voraussetzung für Mobilität und wirtschaftliches Wachstum. Um in Zeiten der Globalisierung den Wirtschaftsstandort Deutschland zu sichern und auszubauen, gilt es, flexibel auf die sich rasant ändernden Rahmenbedingungen zu reagieren. Verkehr erzeugt jedoch Lärm, den die Bevölkerung mit steigender Sensibilität wahrnimmt. Leistung, Produktivität und Lebensqualität sind durch Lärm stark beeinträchtigt. Etwa 60 % der Bevölkerung in Deutschland fühlen sich durch den Straßenverkehrslärm belästigt. Die Auswirkungen des Lärms von der Beeinträchtigung der Konzentration und Kommunikation bis hin zur möglichen Schädigung der Gesundheit sind durch umfassende Studien des Umweltbundesamtes (UBA) belegt.

Im Dezember 2009 wurde nach vier Jahren Forschungsarbeit das durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderte Forschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ erfolgreich abgeschlossen. Insgesamt elf Partner aus Industrie und Forschung haben gemeinsam Lösungen erarbeitet, wie der Straßenverkehrslärm dauerhaft reduziert werden kann. Die Projektkosten wurden auf ca. 4,5 Mio. € veranschlagt und werden jeweils zu 50 % vom BMWi und den Forschungspartnern getragen. Der Bau der Erprobungsstrecken wird aus Baumitteln finanziert. Auf diese Weise unterstützt das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) das Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“.

Einen Schwerpunkt des Projektes stellte die Entwicklung eines leiseren Lkw-Reifens für die Antriebsachse dar. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Continental AG konnte im Frühjahr 2009 ein geräuschreduzierter Lkw-Reifen auf dem Markt eingeführt werden, der gegenüber dem Vorgängerprodukt um ca. 3,5 dB(A) leiser ist. Die Firma Continental AG plant, dieses neue leisere Reifenprofil auf andere Reifendimensionen zu übertragen.

Darüber hinaus wurde von der Technischen Universität Hamburg-Harburg, der Leibniz Universität Hannover und der Firma Continental AG ein Berechnungsmodell zur detaillierten Simulation eines rollenden Reifens auf einer Fahrbahn, der daraus resultierenden Reifenschwingungen und der damit

verbundenen Geräusche entwickelt. Erstmals steht ein derartiges Instrument für die Reifenoptimierung zur Verfügung.

Eine weitere Schallreduktion wurde im Projekt angestrebt, indem die akustische Lebensdauer von offenporigen Asphaltbelägen durch Vermeidung der Verschmutzung verlängert wird. Um dies zu erreichen, wurde ein modifiziertes Bitumen entwickelt, mit dem die Schmutzanhaftung an den Hohlraumwänden offenporiger Asphaltbeläge minimiert werden kann. Im Rahmen der Erprobung auf der Bundesautobahn A 24 bei Berlin wird derzeit geprüft, wie sich dieser modifizierte offenporige Asphalt in der Straßenbaupraxis bewährt.

Darüber hinaus wurden von der Firma Müller BBM Resonatoren entwickelt, die in die offenporige Deckschicht integriert werden und aufgrund ihrer speziellen Frequenzabstimmung ein breiteres Frequenzband zur Schallreduzierung abdecken sollen. Im Juli 2009 erfolgte in einem Testabschnitt auf der Erprobungsstrecke A 24 die bautechnische Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis.

Ein weiterer Schwerpunkt im Projekt war die akustische Optimierung von Lamellen-Fahrbahnübergängen für lange Brücken. Umfangreiche Untersuchungen wurden dabei im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der BASt durchgeführt. Im Juli 2009 wurden die neuen lärmarmen Oberflächen auf einem Fahrbahnübergang auf der A 10 bei Phoeben/Havelbrücke eingebaut und zeigten im Vergleich zum Lamellen-Fahrbahnübergang ohne Rautenelemente eine lärmreduzierende Wirkung von ca. 5 dB(A).

Insgesamt zeigen die Forschungsergebnisse Entwicklungspotenziale zur weiteren Schallreduktion auf. Ein zentrales Ziel weiterführender Forschungskonzepte wird es sein, neuartige lärmarme Fahrbahnbeläge zu entwickeln und technische Lösungen für die Anwendung in der Straßenbaupraxis zu finden. Darüber hinaus sollen die Simulationsmodelle erweitert und optimiert werden, damit unter Berücksichtigung verschiedener Einflüsse aus Reifen und Fahrbahn Geräuschprognosen schnell und zuverlässig möglich sind.

Project “Quiet Road Traffic 2”

A modern transport infrastructure is the precondition for mobility and economic growth. In order to maintain and to continuously develop Germany's competitiveness it is of significant importance to react in a flexible way to the rapidly changing conditions. However, traffic generates noise which is perceived with increasing sensibility by the population. Capability, productivity, and life-quality are highly affected. Around 60% of the population in Germany feel harassed by traffic noise. The effects of noise such as concentration and communication impairment as well as possible damages to health are verified by detailed studies of the Federal Environment Agency (UBA).

In December 2009, the project Quiet Road Traffic 2 was successfully concluded after four years of research financially supported by the Federal Ministry of Economics and Technology (BMW). In close collaboration, eleven associates from industry and research have developed solutions how traffic noise could permanently be reduced. The project budget was about 4.5 million Euro, in equal parts funded by the BMW and the project associates respectively. The realisation of test tracks was provided by construction funds. In this manner, the Federal Ministry of Transport, Building and Urban Development (BMVBS) supported the project.

One focus of the project was the development of a quieter truck tire for the driving axle. In cooperation with the company Continental AG, a noise-reduced truck tire could finally be put on the market in spring 2009. Compared to the predecessor this tire is approximately 3.5 dB(A) quieter. The company Continental AG is going to apply the new, quieter profile to other tire dimensions as well.

Additionally, the Technical University Hamburg-Harburg, the Leibniz University Hannover and the company Continental AG have developed a calculation model for the detailed simulation of a rolling tire on a road surface and the determination of the tire vibrations and the resulting noise emission. This is the first time that an instrument for the optimisation of tires is made available.

Further reduction of noise emission was tackled by increasing the acoustic life-time of porous asphalt which was done by preventing contamination of the pores. For this purpose, modified bitumen has been developed to minimise the adhesion at the cavity

walls in the porous asphalt. The modified asphalt is currently being tested on the Highway A 24 near Berlin.

Besides, the company Müller BBM has developed resonators which are integrated into the porous topping. They cover a broad frequency band for noise reduction due to their specific frequency tuning. The implementation in practice took place on the Highway A 24 in July 2009.

Furthermore, expansion joints for long bridges have been acoustically optimised. Therefore, detailed studies were carried out in the vehicle-pavement interaction test facility at the BAST. The new surfaces have been implemented on an expansion joint on the A 10 near Phoeben/Havelbrücke in July 2009. They showed a reduction of noise emission by approximately 5 dB(A) compared to the expansion joint without rhombus-elements.

In conclusion, the research results point out further potential for noise reduction. A central goal of future research will be to develop novel, silent road pavement and to find technical solutions for the adaption of the former in practice. Additionally, the simulation models have to be optimised in order to provide a fast and reliable tool for sound prognoses.

Das Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19U5002 A-E gefördert. Die Bundesanstalt für Straßenwesen war für das Projektmanagement verantwortlich. Der Bau der Erprobungsstrecken erfolgte aus Baumitteln. Auf diese Weise unterstützte das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung das Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“.

Bundesanstalt für Straßenwesen;
Bergisch Gladbach

Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr 2“:

Dr.-Ing. W. Bartholomaeus
Dr.-Ing. K.-P. Glaeser
Dr.-Ing. A. Hemmert-Halswick
Dipl.-Ing. B. Krieger
Dipl.-Ing. O. Ripke
Dr.-Ing. U. Stöckert
Dipl.-Ing. M. Zöllner

Folgende Firmen, Universitäten und Institute haben in dem Projekt zusammengearbeitet:

Bundesanstalt für Materialprüfung; Berlin
Dipl.-Ing. C. Recknagel

Continental AG; Hannover
Dipl.-Ing. H. Schmidt

Karlsruher Institut für Technologie, Institut für
Fahrzeugtechnik
Prof. Dr. rer. nat. F. Gauterin
Dipl.-Ing. S. Grollius

Leibniz Universität Hannover; Institut für
Baumechanik und Numerische Mechanik
Prof. Dr.-Ing. U. Nackenhorst,
Dr.-Ing. M. Brinkmeier
M. Sc. A. Suwannachit

Maurer und Söhne GmbH & Co; München
Dr.-Ing. H. Segerer

Müller BBM; Planegg
Dr.-Ing. T. Beckenbauer, Dipl.-Ing. M. Männel

RW Sollinger Hütte GmbH; Uslar
Dr.-Ing. J. Braun

Technische Universität Hamburg-Harburg;
Institut für Modellierung und Berechnung
Prof. Dr.-Ing. O. von Estorff
Dipl.-Ing. J. Biermann

Technische Universität München;
Fachgebiet Hydromechanik
Prof. Dr.-Ing. M. Manhart

Universität Stuttgart; Lehrstuhl für Straßenplanung
und Straßenbau
Prof. Dr.-Ing. W. Ressel, Dipl.-Ing. S. Alber,
Prof. Dr. rer. nat. C. D. Eisenbach
Dr. rer. nat. K. Dirnberger

Inhalt

Der vorliegende Schlussbericht wurde auf Grundlage der Originalberichte der Partner erstellt. Auf die Wiedergabe von Anhängen wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar.

1	Allgemeines	9	4	Ergebnisse zum Teilverbund „Leise Straßen“	121
1.1	Einleitung	9	4.1	Problemdarstellung	121
1.2	Stand der Technik	10	4.2	Teilprojekt „Polymer-Nanotechnologie zur Modifizierung der Poreninnenwandung von Offenporigen Asphalten“ (Universität Stuttgart)	123
1.3	Zielsetzung des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“	16	4.3	Teilprojekt „Strukturanalyse von Offenporigen Asphalten“ (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)	167
2	Übersicht des Projektes	19	4.4	Teilprojekt „Strömungsverhalten in Offenporigen Asphalten“ (Technische Universität München)	189
2.1	Teilverbund „Leise Reifen“	19	4.5	Teilprojekt „Verbesserung des Schallabsorptionsvermögens von offenporigen Fahrbahnbelägen“ (Firma Müller – BBM GmbH)	208
2.2	Teilverbund „Leise Straßen“	20	4.6	Teilprojekt „Akustische Optimierung von Lamellen-Fahrbahnübergängen für lange Brücken“	230
2.3	Teilverbund „Erfolgskontrolle“	20	4.6.1	Lärmmindernde Ausbildung der Fahrbahnanschlüsse (Firma RW Sollinger Hütte)	230
3	Ergebnisse zum Teilverbund „Leise Reifen“	21	4.6.2	Elastomerbeschichtete Dämpfungsabdeckungen (Bundesanstalt für Straßenwesen)	252
3.1	Problemdarstellung	21	4.6.3	Neue und optimierte Oberflächen (Firma Maurer Söhne GmbH & Co. KG)	256
3.2	Teilprojekt „Grundlagenuntersuchungen und Optimierung von Lkw-Reifen“ (Firma Continental AG)	23	4.7	Bewertung des Teilverbundes „Leise Straßen“	262
3.3	Teilprojekt „Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des Antriebsmoments auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“ (Karlsruher Institut für Technologie) ...	48	5	Teilverbund „Erfolgskontrolle“ (Bundesanstalt für Straßenwesen) ..	264
3.4	Teilprojekt „Entwicklung Simulationstool-Strukturmodell rollender Reifen“ (Leibniz-Universität Hannover)	68	5.1	Einleitung	264
3.5	Teilprojekt „Entwicklung Simulationstool – Akustikmodell“ (Technische Universität Hamburg-Harburg)	94	5.2	Erprobungsstrecken	266
3.6	Bewertung des Teilverbundes „Leise Reifen“	119	5.3	Bewertung des Teilverbundes „Erfolgskontrolle“	285
			6	Zusammenfassende Bewertung des Gesamtprojektes mit Ausblick	288

1 Allgemeines

1.1 Einleitung

Deutschland besitzt eines der leistungsfähigsten Verkehrssysteme in Europa. Dieses Verkehrssystem stellt die Voraussetzung für eine hohe Mobilität und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit dar. Jährlich werden über 10 Mrd. € in die Verkehrsinfrastruktur investiert. Um in Zeiten der Globalisierung den Wirtschaftsstandort Deutschland zu sichern und auszubauen, gilt es, flexibel auf die sich rasant ändernden Rahmenbedingungen zu reagieren. Ein Ziel der Bundesregierung ist deshalb die Sicherung und nachhaltige Entwicklung des Verkehrssystems, um eine effiziente, sichere sowie sozial- und umweltverträgliche Mobilität von Menschen und Gütern zu gewährleisten. Mit dem Verkehrsforschungsprogramm „Mobilität und Verkehrstechnologien“ werden wichtige Akzente in der Verkehrsforschung der nächsten Jahre gesetzt [9].

Verkehr erzeugt jedoch Lärm, den die Bevölkerung mit steigender Sensibilität wahrnimmt. Leistung, Produktivität und Lebensqualität sind durch Lärm stark beeinträchtigt. Etwa 60 % der Bevölkerung in Deutschland fühlen sich durch den Straßenverkehrslärm belästigt. Die Auswirkungen des Lärms von der Beeinträchtigung der Konzentration und Kommunikation bis hin zur möglichen Schädigung der Gesundheit sind durch umfassende Studien des Umweltbundesamtes belegt [2, 11].

Neben den diskutierten gesundheitlichen Beeinträchtigungen wurden in den letzten Jahren auch zunehmend negative Auswirkungen des Verkehrslärms auf eine gesunde, sozial ausgewogene Stadtentwicklung beobachtet. Die Zahl der Belästigten durch Verkehrslärm ist in Deutschland seit vielen Jahren konstant, obwohl die zulässigen Antriebsgeräusche der Fahrzeuge seit den 70er Jahren immer stärker begrenzt wurden. Ein Grund dafür sind die steigenden Verkehrsmengen. Neuere Studien prognostizieren einen Anstieg der Verkehrsleistungen im motorisierten Individualverkehr bis 2025 um 16 % und für den Straßengüterverkehr um 84 % [17].

Um hier Lösungen für eine dauerhafte Lärmreduzierung zu erarbeiten, haben Partner aus Wirtschaft und Forschung im Jahre 1999 unter Leitung des DLR den Forschungsverbund „Leiser Verkehr“ gegründet. Die Lärminderung an der Quelle war und ist Gegenstand der Forschungsarbeiten. Darüber

hinaus wird an Fragestellungen wie der Lärmwirkung und der Analyse geeigneter Mess- und Bewertungsverfahren gearbeitet. Die Forschungsprojekte werden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

In 2003 wurde das in den Forschungsverbund „Leiser Verkehr“ eingebettete Projekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ erfolgreich abgeschlossen [7]. Erstmals wurden die Komponenten Reifen, Fahrzeug, Fahrbahn sowie Fahrbahnübergänge von Brücken im Hinblick auf eine Reduzierung des geräuscherzeugenden Gesamtsystems entwickelt und erprobt. Parallel dazu wurden die Geräuschenstehungsmechanismen theoretisch betrachtet und in Modelle umgesetzt.

Im Jahr 2005 wurde mit der Bearbeitung des zweiten Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“ begonnen. Das vorhandene Netzwerk aus Industrie, Forschung und Verwaltung sollte aufbauend auf den Ergebnissen des Vorgängerprojektes die Entwicklungspotenziale weiter erschließen, um effektive Lösungen für eine dauerhafte Reduzierung des Straßenverkehrslärms zu erarbeiten.

Das Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“ ist in die drei Schwerpunkte „Leise Reifen“, „Leise Straßen“ und „Erfolgskontrolle“ gegliedert. Das Ziel des Teilprojektes Leise Reifen ist zum einen die Entwicklung eines leisen Lkw-Antriebsachsenreifens und zum anderen die Entwicklung eines Berechnungsmodells zur detaillierten Simulation eines rollenden Reifens auf einer Fahrbahn mit realer Textur und die Ermittlung der daraus resultierenden Reifenschwingungen mit damit verbundenen Geräuschen.

Den Schwerpunkt des Teilprojektes „Leise Straßen“ stellt die Verbesserung von offenporigen Asphaltdeckschichten (OPA) dar. Mit dem Einsatz von OPA wird der Straßenverkehrslärm direkt an der Quelle reduziert. Derzeit wird mit der Herstellung von Asphaltdeckschichten eine Lärmreduzierung von bis zu 5 dB(A) für die Nutzungsdauer von 8 Jahren erreicht. Durch die Zugabe von Polymeren soll die Verschmutzungsneigung von Offenporigen Asphalten minimiert und die Langzeitwirkung verbessert werden.

Der Schwerpunkt des Teilprojektes „Erfolgskontrolle“ ist die Erprobung der optimierten bzw. neu konzipierten Fahrbahnbeläge und -übergänge sowie die Bewertung der erzielten Ergebnisse. Das Verbundprojekt wurde im Dezember 2009 abgeschlossen.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Gesundheitsrisiken durch Lärm

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Studien und Untersuchungen zum Einfluss von Lärm auf die Gesundheit des Menschen durchgeführt. Die Ergebnisse belegen, dass Lärm krank machen kann und die durch Lärm verursachten Gesundheitsschäden sehr vielseitig sein können [2, 11].

In 2003 wurden Ergebnisse des Robert-Koch-Institutes zum Einfluss von Lärmstress auf das Immunsystem und die Entstehung psychischer Erkrankungen veröffentlicht. Die Untersuchung an 2.000 Probanden belegte, dass bei nächtlicher Dauerschallbelastung ein sechsfach erhöhtes Risiko besteht, an einem behandlungsbedürftigen Bluthochdruck zu erkranken. Es wurde darüber hinaus ein signifikanter Zusammenhang zwischen nächtlicher Schallbelastung und dem Entstehen psychischer Erkrankungen gefunden.

Aufgrund der Ergebnisse verschiedener wissenschaftlicher Studien wird befürchtet, dass Dauerbelastungen über etwa 65 dB(A) am Tag zu einem erhöhten Gesundheitsrisiko führen können. Nachgewiesen wurden Änderungen im Stoffwechsel und im Hormonhaushalt, Änderung der Gehirnstromaktivität, aber auch unruhiger Schlaf und Stresssymptome wie Hormonausschüttung. Langfristig kann dies zu hohem Blutdruck und Herzinfarkt führen.

Bild 1-1 zeigt Ergebnisse einer epidemiologischen Untersuchung [2] zum Zusammenhang zwischen Lärmbelastung hervorgerufen durch Straßenverkehrslärm und einem erhöhten Herzinfarktrisiko. Das Risiko, einen Herzinfarkt zu erleiden, steigt, wenn die betroffene Person längere Zeit in Gebie-

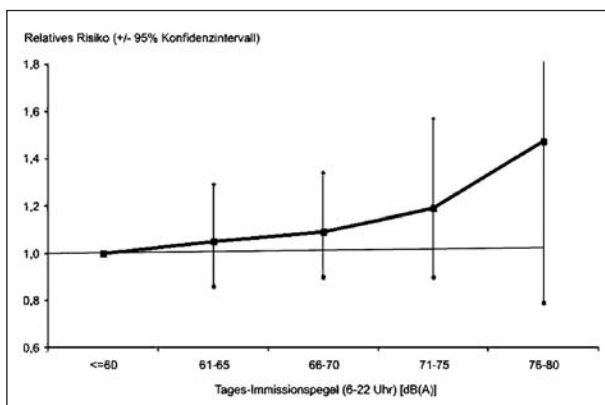


Bild 1-1: Dosis-Wirkungskurve für den Zusammenhang zwischen Straßenverkehrslärm und Herzinfarktrisiko [2]

ten mit Mittelungspegeln über 65 dB(A) am Tage wohnt.

Die beeinträchtigende Wirkung von Lärm auf die Gesundheit ist ein langer Prozess, der von zahlreichen anderen mitwirkenden Faktoren beeinflusst wird. Das Umweltbundesamt führt regelmäßig Studien zur Belästigung der Bevölkerung durch Luft-, Straßen-, Schienenverkehrslärm, Nachbarschaftslärm und Industrielärm durch. Die Ergebnisse belegen die aktuelle Bedeutung des Umweltproblems Lärm. Bild 1-2 zeigt die Ergebnisse der Befragung nach Lärmbelastung durch das Umweltbundesamt aus den Jahren 2000 bis 2008 [20].

Gemäß den Umfrageergebnissen aus dem Jahr 2008 gaben 59 % der Befragten an, sich in ihrem Wohnumfeld durch Straßenverkehr gestört oder belästigt zu fühlen.

Das Bild verdeutlicht, dass der Straßenverkehr die Hauptursache für eine Lärmbelästigung darstellt. Nach dem Straßenverkehr ist der Luftverkehr die bedeutendste verkehrsbedingte Ursache für Lärmbelästigungen in Deutschland: Bundesweit fühlt sich fast jeder Dritte durch Fluglärm belästigt. Durch Schienenverkehr fühlt sich etwa ein Viertel der Bevölkerung belästigt [20].

Die Bewertung der Ergebnisse über einen Zeitraum von 8 Jahren macht deutlich, dass die Belästigung der Bevölkerung durch den Lärm konstant geblieben ist. Einzelne Erfolge vor allem bei der Geräuschminderung an Fahrzeugen haben infolge der beträchtlichen Verkehrszuwächse in den letzten Jahrzehnten die Gesamtlage nur wenig verbessert. Es bestehen aber mittel- und langfristige Möglichkeiten, die Betroffenen wirksamer als bisher vor Verkehrslärm zu schützen.

Eine dauerhafte Reduzierung der Lärmbelastung lässt sich durch die Kombination und Weiterentwicklung verschiedener technischer und planerischer Lärmreduzierungsinstrumente erreichen.

An der Universität in Dortmund wurden Studien zur verkehrsrelevanten Lärmwirkungsforschung durchgeführt. Bei der Unterscheidung des Lärms in hoch- und tieffrequenten Lärm wurden deutliche Unterschiede in der Belästigung der Betroffenen festgestellt. So wird durch tieffrequenten Lärm eine intensivere Belästigung festgestellt als bei hochfrequentem Lärm.

In Deutschland sind ca. 50 % der Bevölkerung gesundheitsgefährdendem Lärm ausgesetzt, davon

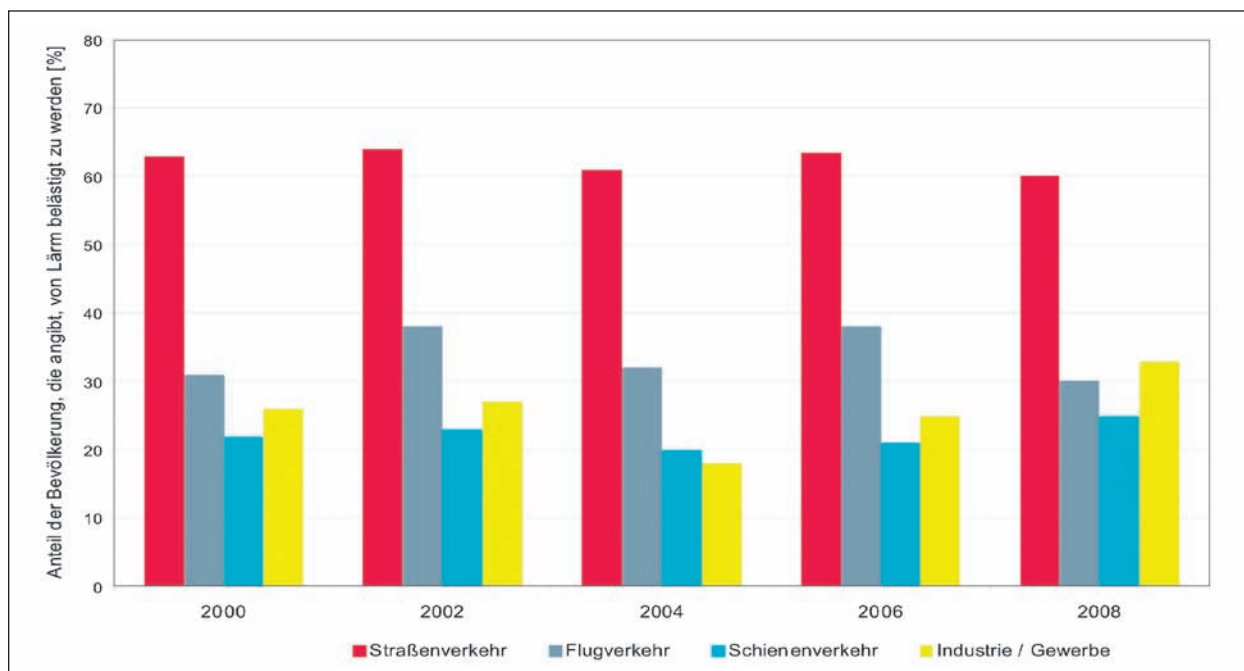


Bild 1-2: Anteil der Bevölkerung, die angibt, durch den Lärm belästigt zu werden [20]

ca. 16 % durch den Straßenverkehr. Diese Zahlen verdeutlichen die Problematik „Lärm“ und die Notwendigkeit, hier Lösungsansätze für einen effektiven Lärmschutz zu finden.

1.2.2 Entstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches

Die dominierende Quelle im Straßenverkehrsgeschall ist ab Geschwindigkeiten von ca. 40 km/h das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Bild 1-3 zeigt die Schallpegelanteile von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen (R/F-Geräusch) und Antriebsgeräusch am Gesamtgeräusch eines mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Pkw.

Mit Reifen-Fahrbahn-Geräusch wird der Schall bezeichnet, der durch den auf der Fahrbahnoberfläche abrollenden Reifen hervorgerufen wird und sich über die ihn umgebende Luft ausbreitet. Die Fahrbahneigenschaften spielen sowohl bei der Schallanregung und -abstrahlung als auch bei der Schallausbreitung eine Rolle.

Bei der Schallanregung werden prinzipiell zwei Mechanismen unterschieden:

- die Anregung mechanischer Schwingungen des Reifens und
- die Auslösung aerodynamischer Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn (Bild 1-4).

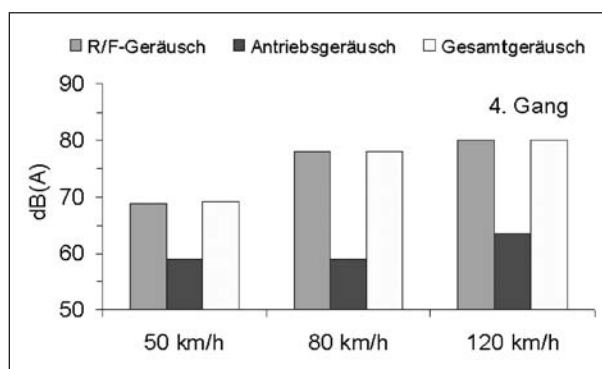


Bild 1-3: Schallpegelanteile von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen (R/F-Geräusch) und Antriebsgeräusch am Gesamtgeräusch eines mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Pkw [5]

Die mechanische Anregung erfolgt durch die dynamische Verformung des Reifens während des Rollvorganges und des Verzahnens von Rauheitselementen der Fahrbahnoberfläche in die Lauffläche. Die aerodynamische Anregung erfolgt durch das Medium Luft. Die Luft wird in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn bei hohem Staudruck in den Hohlräumen komprimiert. Mit dem Abrollen des Reifens kommen diese Hohlräume wieder frei und die eingeschlossene Luft wird entspannt. Dieser Prozess wird auch Airpumping genannt. Ein weiterer für die Entstehung des Reifen-Fahrbahngeräusches wichtiger Effekt ist der „Horneffekt“. Die gekrümmte Lauffläche des Reifens und die Fahrbahnoberfläche bilden im Ein- und Auslauf des Reifens einen so genannten Schalltrichter, der zu einer

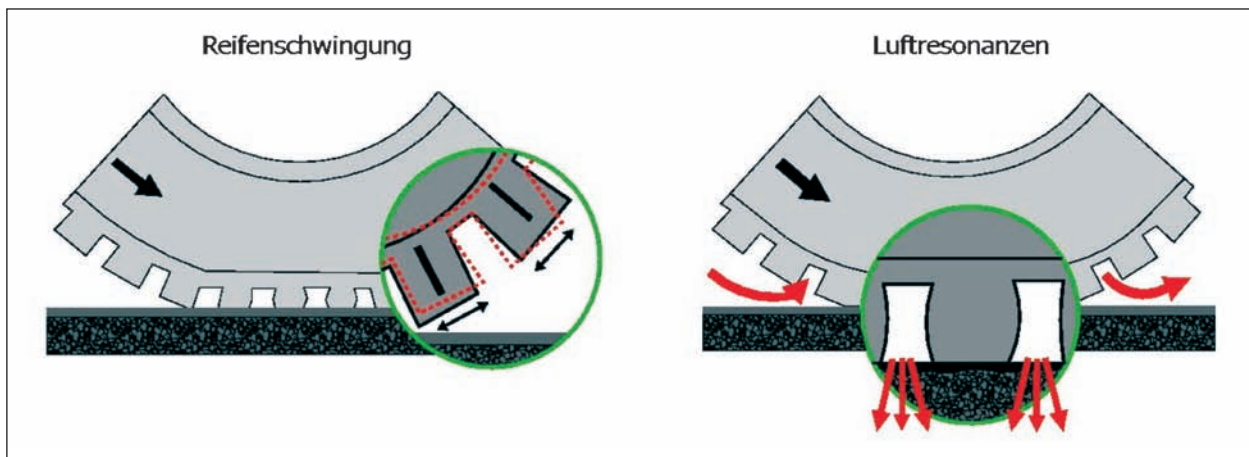


Bild 1-4: Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Geräusches

erheblichen Verstärkung der Schallabstrahlung führt.

Die Abstrahlung und Ausbreitung der in der Kontaktfläche entstehenden Geräusche wird maßgeblich durch die Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche bestimmt.

Maßnahmen zur Reduzierung von Straßenverkehrslärm müssen bei den Wechselwirkungen zwischen Reifen und Fahrbahn ansetzen.

1.2.3 Rechtlicher Rahmen

Straßenverkehrslärm setzt sich zusammen aus Motor- und Antriebsgeräuschen und den bereits beschriebenen Reifen-Fahrbahngeräuschen.

Im Stadtverkehr oder auf Steigungen an Bundesfernstraßen konnte ein Überwiegen von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen bei Pkw ab ca. 50 km/h und bei Lkw, abhängig von der Betriebsart, bereits ab ca. 40 km/h gemessen werden [5, 6]. Dem Anstieg des Lärmpegels in bebauten Gebieten versuchte man zunächst zu begegnen, indem die Entwicklung leiserer Fahrzeugkomponenten gefördert wurde. Seit 1970 schreibt die EU-Richtlinie 70/157/EWG Grenzwerte für die Antriebsgeräusche bei der Typprüfung von neuen Kraftfahrzeugen vor. Diese wurden in den letzten Jahrzehnten stufenweise herabgesetzt. Die bisher letzte Stufe, eine Absenkung auf 74 dB(A) bei Pkw und 80 dB(A) bei Lkw, ist in der Ergänzung 92/97/EWG zu o. g. Richtlinie geregelt.

In der Richtlinie 2001/43/EG, die 2003 eingeführt wurde, sind Grenzwerte für das Abrollgeräusch bei der Typprüfung von Neureifen verankert. Tabelle 1-1 und Tabelle 1-2 zeigen die Geräuschgrenzwerte für Pkw- und Lkw-Neureifen.

Reifenklasse	Nennbreite [mm]	Grenzwerte [dB(A)]
C1a	≤ 145	72
C1b	> 145 bis 165	73
C1c	> 165 bis 185	74
C1d	> 185 bis 215	75
C1e	> 215	76

Tab. 1-1: Geräuschgrenzwerte für Pkw-Neureifen (Klasse C1)

Verwendungsart der Reifenbreite		Grenzwerte [dB(A)]
Normal	C2	75
	C3	76
M+S	C2	77
	C3	78
Spezial	C2	78
	C3	79

Tab. 1-2: Geräuschgrenzwerte für Lkw-Neureifen (Klasse C2 und C3)

Zurzeit beinhaltet diese Richtlinie nur die Geräuschpegel von Neureifen. Die Prüfung erfolgt auf der nach ISO 10844 genormten Fahrbahnoberfläche aus Asphaltbeton 0/8 [9]. Diese Straßendeckschicht hat jedoch nur noch einen sehr geringen prozentualen Anteil im Bundesfernstraßennetz. Eine Reifenoptimierung nur hinsichtlich dieser Deckschichten kann demnach nicht zielführend sein. Daher sollte eine Optimierung der Reifenrollgeräusche im Hinblick auf die im Straßennetz standardisierten Fahrbahnoberflächen erfolgen.

Bei Planungen neuer Straßen lässt sich mit Hilfe verschiedener Daten die Lärmbelastung berechnen.

dustrieanlagen ausgehenden Geräuschemissionspegel durchgeführt. Anhand von Lärmkarten werden die besonders stark von Lärm betroffenen Gebiete sowie die Anzahl der Einwohner ermittelt. Bild 1-5 zeigt beispielhaft eine Übersichtskarte der Stadt Köln mit der mittleren Lärmbelastung über den ganzen Tag.

Die im Rahmen der Umsetzung der EG-Umgebungslärmrichtlinie zu erstellenden Lärmkarten und Aktionspläne ergänzen die bereits laufenden Lärmsanierungsprogramme (aktiver Lärmschutz durch Lärmschutzwände etc.). Dringender Handlungsbedarf besteht hinsichtlich der Festlegung der akustischen Eigenschaften von Straßenoberflächen im innerorts üblichen Geschwindigkeitsbereich [4].

1.2.4 Bisherige Forschungsaktivitäten

Im Rahmen nationaler und internationaler Forschungsaktivitäten wird die Thematik „Reduzierung des Verkehrslärms“ seit Jahren interdisziplinär bearbeitet. In den letzten Jahren ist es gelungen, die Wirkmechanismen der Lärmentstehung im Zusammenspiel Reifen-Fahrbahn zu beschreiben und Anforderungen für eine dauerhafte Lärmreduzierung zu formulieren.

Unter der Leitung der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wird im Rahmen des Teil-Forschungsverbundes „Leiser Straßenverkehr“ seit 10 Jahren intensiv an der Reduzierung des straßenverkehrsbedingten Lärms an der dominanten Lärmquelle der Kontaktstelle von Reifen und Fahrbahnbelag geforscht.

Erste Grundlagen wurden im Forschungsprojekt „Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“ [5] erarbeitet. Einen Schwerpunkt stellte die Erfassung der akustischen Eigenschaften unterschiedlicher Standard-Oberflächentexturen in Asphalt und Modell-Oberflächentexturen in Beton dar. Im Ergebnis zeigte sich, dass die Grenzen der akustischen Optimierung mit herkömmlichen Baustoffen und Bauweisen nahezu erreicht sind. Die Optimierung dichter Oberflächen, d. h. ohne nennenswerte Absorption, gestaltet sich als schwierig. Das bislang übliche Verfahren des „trial and error“ stößt an Grenzen und demzufolge kann eine weitere Reduzierung nur anhand von Vorhersagemodellen erfolgen. Als Abschluss dieses Forschungsprojektes stand im Jahr 1998 ein vereinfachtes Modell Statistical Physical Explanation of

Rolling Noise (SPERoN) zur Verfügung, mithilfe dessen grundsätzlich neuartige, leisere Fahrbahntexturen entworfen werden konnten. Da die Genauigkeit des Modells nicht zufrieden stellend war, wurde das Modell in den Jahren 1998 bis 2007 im Rahmen von BASt-internen, vom BMBF und von der EU geförderten und von der BASt koordinierten Projekten weiterentwickelt.

In den Jahren 2001-2004 haben Reifen- und Straßenbauunternehmen, Universitäten sowie die Straßenbauverwaltung das in den Forschungsverbund „Leiser Verkehr“ eingebettete Projekt „Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ begonnen [5].

Einen Schwerpunkt dieses Projektes stellte die Weiterentwicklung des Modells „SPERoN“ dar. In das Modell wurden u. a. die radialen Kontaktkräfte und ein einfaches Airpumping-Modell mit Hilfe der Parameter „akustische Impedanz“ und „Strömungswiderstand in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche“ implementiert. Nach der Erweiterung stand ein verfeinertes „SPERoN-Modell“ zur Verfügung, das in der Lage war, im Frequenzbereich von etwa 300 Hz bis 3 kHz Aussagen über die absoluten Schalldruckintensitäten von drei Teilschallquellen – mechanische Anregung, aerodynamische Anregung und Strömungsgeräusche an der Karosserie – zu machen. Die Abweichungen der Berechnungen zu den Messungen bei der Gesamtschallintensität betragen nur bis zu +/-2 dB und waren im tieffrequenten Bereich am höchsten. Die 2. Generation des „SPERoN-Modells“ stellte im Jahre 2003 ein wichtiges Werkzeug für die Entwicklung leiser Fahrbahnoberflächen dar; allerdings waren hierzu noch weitere Entwicklungsschritte, wie z. B. die Validierung, erforderlich [5].

Die Validierung und Erweiterung des „SPERoN-Modells“ wurden ab Februar 2004 im Rahmen eines vom BMWi geförderten deutsch-französischen Projektes „Prediction and Propagation of Rolling Noise (P2RN)“ [13] sowie eines europäischen Forschungsprojektes „Integrated Tyre And Road Interaction (ITARI)“ [15] fortgeführt. Ein Ziel des „P2RN-Projektes“ war, die 2. Generation des „SPERoN-Modells“ zu validieren, eine neuartige Oberflächenstruktur zu entwerfen und sie in der Asphaltbauweise zu realisieren. Das Hauptziel vom „ITARI-Projekt“ war es, die notwendigen Werkzeuge für Entwurf, Test und Messung neuer Straßenoberflächen zur Verfügung zu stellen. Diese Oberflächen sollten eine geringe Geräuschemission und einen niedrigen Rollwiderstand aufweisen, zugleich aber hohe

Anforderungen an die Griffigkeit erfüllen. Das „ITARI-Projekt“ konzentrierte sich auf die Interaktion des Reifens beziehungsweise Fahrzeugs mit der Straße und ihren Auswirkungen. Bild 1-6 zeigt die Prinzipskizze einer möglichen lärmoptimierten Straßenoberfläche mit hoher Griffigkeit und dem darüber abrollenden Reifen.

Als Ergebnis der beiden Projekte stehen ein validiertes und verbessertes „SPERoN-Modell“ der 3. Generation sowie eine designte Oberflächentextur (ITARI-Oberfläche, ITARI-Textur), die schätzungsweise 5 bis 6 dB(A) (für Pkw) leiser als die Referenzbauweise sein sollte, zur Verfügung. Diese ITARI-Textur wurde zunächst im Labor in eine Kunststoffoberfläche geprägt. Wie aus Bild 1-7 zu entnehmen ist, besteht die „ITARI-Oberfläche“ aus randomisiert angeordneten Rauten, deren Kantenlängen von 4 bis 6 mm variieren.

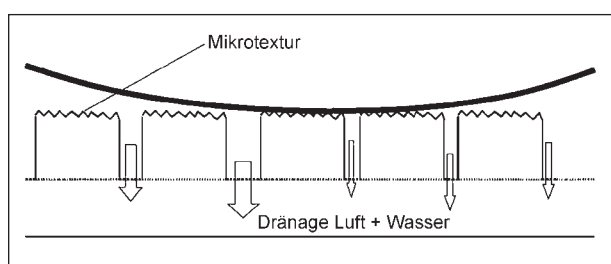


Bild 1-6: Prinzipskizze einer möglichen lärmoptimierten Straßenoberfläche mit hoher Griffigkeit und dem darüber rollenden Reifen [15]

Um die akustischen Eigenschaften derartiger Oberflächentexturen unter praxisnahen Bedingungen bestimmen zu können, wurde auf der Versuchsfläche in Sperenberg ein dünner mit der „ITARI-Textur“ versehener Belag aus Kunststoff aufgebracht. Die Ergebnisse der akustischen Untersuchungen zeigten eine Lärmreduzierung von ca. 4 dB(A) im Vergleich zum Referenzbelag „geriffelter Gussasphalt“.

Im Rahmen des „P2RN-Projektes“ [1] sollte u. a. die mit „SPERoN“ entworfene Textur zunächst im Labor in Asphalt-Bauweise realisiert werden. Dazu wurde eine Asphaltmischung mit hohem Bitumenanteil vorbereitet und eine Versuchsplatte hergestellt. Die Prägung der Oberflächentextur erfolgte mit einer Schablone (Bild 1-8) und einer Walze.

Die Ergebnisse der akustischen Untersuchungen zeigten eine Lärmreduzierung von ca. 4 dB(A) im Vergleich zum Referenzbelag „geriffelter Gussasphalt“.

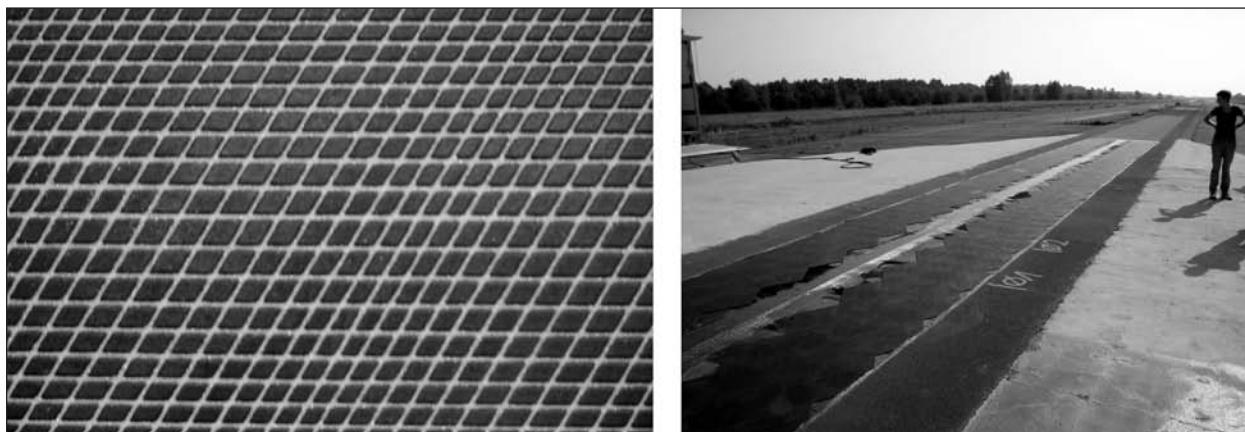


Bild 1-7: „ITARI-Oberfläche“ kreiert mit „SPERoN-Modell“ der 3. Generation [15]



Bild 1-8: Herstellung des „ITARI-Belags“ im Labor [1]



Bild 1-9: Einbau des „ITARI-Belags“ in Asphaltdeckschicht in Lyon [1]

Nach Abschluss der Laborversuche wurde dieser Asphaltbelag mit „ITARI-Fahrbahntextur“ auf einem Testgelände in Lyon über 50 m Länge in den Rollspuren eingebaut (Bild 1-9). Die Herstellung dieses Belages unter praktischen Verhältnissen hat sich als sehr schwierig erwiesen. Im Ergebnis konnte nicht die gewünschte Oberflächentextur hergestellt werden.

Trotz des Misserfolges wurden Messungen mittels CPB-Verfahrens durchgeführt. Sie haben einen Emissionspegel von 81,2 dB(A) ergeben. Dieses Ergebnis wurde zur Validierung des „SPERoN-Modells“ genutzt, indem die eingeprägte Textur mittels T3D-Messsystems aufgenommen und als Eingangsgrößen für das „SPERoN-Modell“ verwendet wurde. Die modellgestützte Vorhersage gab annähernd die Ergebnisse der akustischen Messungen auf der Teststrecke wieder. Auf diese Weise konnte nachgewiesen werden, dass die Vorhersage der akustischen Eigenschaften von Fahrbahnbelägen mittels „SPERoN“ zuverlässig ist. Bild 1-10 zeigt den Vergleich der CPB-Messungen vor Ort und die Simulationsergebnisse der tatsächlich hergestellten Textur mittels „SPERoN“. Es sind deutliche Übereinstimmungen erkennbar.

Die Ergebnisse der beiden Forschungsarbeiten „P2RN“ und „ITARI“ haben gezeigt, dass für die bautechnische Umsetzung dieser neuartigen leisen Oberflächentexturen neue Materialien und Einbautechniken gefunden werden müssen.

Neben der Entwicklung leiserer Fahrbahnoberflächen stellt auch die akustische Optimierung von Reifen einen Schwerpunkt in der Bekämpfung des Straßenverkehrslärms dar. Im Forschungsvorhaben „Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche (LeiStra 1)“ wurde ein neuer leiser Pkw-Reifen für die in Deutschland standardisierten Straßenbau-

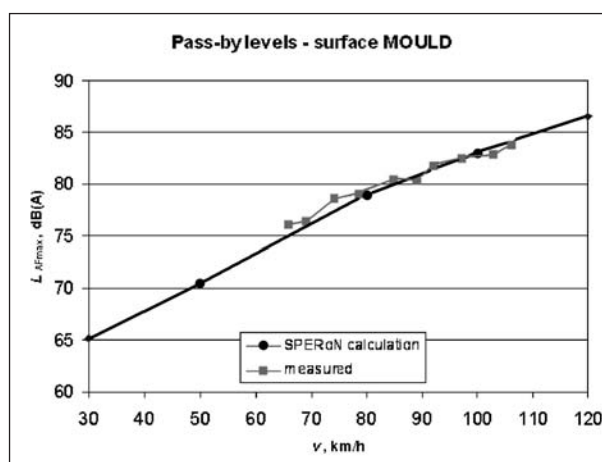


Bild 1-10: Vergleich der Geräuschmessungen in situ und Simulation mittels SPERoN [8]

weisen entwickelt [7]. Hierbei handelt es sich um einen „Self-Supporting-Runflat-Reifen (SSR-Reifen)“, bei dem u. a. die Seitenwände verstärkt wurden.

1.3 Zielsetzung des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“

Mobilität und Verkehrstechnologien sind von zentraler Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Eine negative Auswirkung dieser funktionierenden Mobilität ist jedoch der Straßenverkehrslärm. Im Rahmen nationaler und internationaler Forschungsarbeiten ist es in den letzten Jahren gelungen, die Wirkmechanismen der Lärm Entstehung im Zusammenspiel Reifen – Fahrbahn detailliert zu beschreiben und Anforderungen für eine dauerhafte Lärmreduzierung zu formulieren. Vorliegende Forschungsergebnisse zeigen, dass weitere Entwicklungspotenziale vorhanden sind. Das Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ hat sich als

zentrales Ziel gesetzt, aufbauend auf bisherigen Erkenntnissen den Straßenverkehrslärm an der Quelle zu reduzieren.

Ein Schwerpunkt in der Bekämpfung des Straßenverkehrslärms stellt die akustische Optimierung von Reifen dar. Im Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“ soll ein akustisch optimierter Lkw-Reifen für die Antriebsachse entwickelt werden, der im Fernverkehr eingesetzt wird.

Um künftig signifikante Rollgeräuschreduzierungen zu erreichen, sollen im Rahmen des Projektes ein Tool zur detaillierten Simulation eines rollenden Reifens auf einer Fahrbahn sowie die Ermittlung der daraus resultierenden Reifenschwingungen mit den damit verbundenen Geräuschen entwickelt und validiert werden. Ein derartiges Simulationswerkzeug steht weltweit bisher nicht zur Verfügung.

Neben der akustischen Optimierung leiserer Reifen stellt vor allem die Entwicklung von leiseren Fahrbahnoberflächen einen wesentlichen Beitrag zur signifikanten Lärmreduzierung dar. Die weitere Reduzierung von Rollgeräuschen wird in diesem Projekt angestrebt, indem die akustische Lebensdauer von Offenporigen Asphaltten durch Vermeidung der Verschmutzung verlängert wird. Um dies zu erreichen, soll ein modifiziertes Bitumen entwickelt werden, mit dem die Schmutzanhaftung an den Hohlraumwandungen Offenporiger Asphalte minimiert werden kann. Darüber hinaus sollen Möglichkeiten erforscht werden, wie die akustische Wirksamkeit Offenporiger Asphalte weiter verbessert werden kann.

Die vorhandene Technologie für Fahrbahnübergänge in Lamellenbauweise wurde in den vergangenen Jahren so verbessert, dass alle Anforderungen hinsichtlich der Tragsicherheit, Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit erfüllt werden. Trotz dieser Fortschritte stellen Fahrbahnübergänge immer noch eine Schallquelle dar, die von den Anwohnern als lästig bis störend empfunden wird. Im Rahmen des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“ sollen Fahrbahnübergangskonstruktionen hinsichtlich einer möglichen Lärmreduzierung untersucht werden. Dabei wird die Verwendung neuer Dämpfungsmaterialien untersucht sowie die Entwicklung neuer Oberflächen für Fahrbahnübergänge verfolgt.

Ein zentrales Ziel des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“ ist die Umsetzung der Ergebnisse in die Straßenbaupraxis.

Literatur

- [1] AUERBACH, M., DROSTE, B.: Prediction and Propagation of Rolling Noise (P2RN), Deufrako-Projekt, Schlussbericht, März 2009
- [2] BABISCH, W.: „Transportation Noise and Cardiovascular Risk. Review and Synthesis of Epidemiological Studies, Dose-effect Curve and Risk Estimation“, in: WaBoLu-Hefte 01/06, Dessau-Roßlau 2006
- [3] BARTHOLOMAEUS, W.: „Umsetzung der Europäischen Umgebungslärmrichtlinien in Deutsches Recht“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 155, Bergisch Gladbach, April 2007
- [4] BARTOLOMAEUS, W.: „Verkehrslärm – Neue Schutzkonzepte“, Vortrag auf dem Deutschen Straßen- und Verkehrskongress 2008 in Düsseldorf, Straße und Autobahn 3/2008, S. 140-147
- [5] BECKENBAUER, T.: „Reifen-Fahrbahn-Geräusche – Minderungspotenziale der Straßenoberfläche“, Müller BBM GmbH, Planegg
- [6] BECKENBAUER, T. et al.: „Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahngeräusch“, Schlussbericht zu FE 03.293/1995/ MRB. Planegg, Juni 2001
- [7] Bundesanstalt für Straßenwesen: „Leiser Straßenverkehr 1“ – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Februar 2004
- [8] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: „Statistik des Lärmschutzes 2008“, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Referat S 13, Druckerei des BMVBS
- [9] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Nationales Verkehrslärmschutzpaket II „Lärm vermeiden – vor Lärm schützen“, in: Straße und Autobahn, Heft 10, 2009
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Mobilität und Verkehrstechnologien; 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung
- [11] GIERING, K.: „Monetäre Bewertung des Straßenverkehrslärms für Deutschland“, Lärmbekämpfung, Band 4 (2009), Nr. 5 – September

- [12] Lärmsanierung an Bundesfernstraßen – Abgesenkte Auslösewerte, Schreiben des BMVBS an die Obersten Straßenbaubehörden der Länder vom 25.06.2010, AZ. StB 25/722.4/4-2/1204896
- [13] MASCHKE, C., WOLF, U., LEITMANN, T.: „Epidemiologische Untersuchungen zum Einfluss von Lärmstress auf das Immunsystem und die Entstehung von Arteriosklerose“, Report 298 62 515, WaBoLu-Hefte 01/03. Umweltbundesamt, Berlin 2003
- [14] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – Ausgabe 1990 – (RLS-90), 334 FGSV-Verlag, berechtigter Nachdruck Februar 2002
- [15] RIPKE, O.: „EU-Projekt ITARI (Integrated Tyre and Road Interaction)“, Tagungsband DAGA, Stuttgart 2007
- [16] Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung – 16. BImSchV) – in der Fassung der Bekanntmachung vom 12. Juni 1990, BGBl. I S. 1036, zuletzt geändert am 19. September 2006, BGBl. I S. 2148
- [17] Studie „Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025“, ITP/BVU, München/Freiburg, November 2007
- [18] Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung)“ (34. BImSchV) vom 6. März 2006 (BGBl. I S 516)“

Internetrecherche

[19] www.fv-leiserverkehr.de

[20] www.uba.de

2 Übersicht des Projektes

Im Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ haben elf Partner aus Industrie und Forschung zusammengearbeitet. Insgesamt wurden vier Ziele formuliert, um den Verkehrslärm an der Quelle zu reduzieren:

- Optimierung von Lkw-Reifen hinsichtlich der Geräuschemission,
- Entwicklung eines Simulationstools für die Reifenoptimierung,
- integrale Verbesserung Offenporiger Asphalte und Optimierung von Standardbelägen,
- akustische Optimierung von Lamellen-Fahrbahnübergängen für lange Brücken.

Die formulierten Ziele wurden den einzelnen Teilprojekten „Leise Reifen“, „Leise Straßen“ und „Erfolgskontrolle“ zugeordnet. Bild 2-1 zeigt die Projektstruktur.

2.1 Teilverbund „Leise Reifen“

Im Fernverkehr dominieren tagsüber schnellfahrende Pkw und nachts, in den Ruhe- und Erholungszeiten, schwere Lkw bzw. Lastzüge. Dies begründet die verstärkten Bemühungen, die durch den Lkw-Verkehr verursachte Geräuschemission möglichst schnell und signifikant zu reduzieren. Die Reifen von Antriebsachsen von schweren Lkw sind aufgrund ihrer Profilierung erheblich lauter als die Reifen von Lenkachsen oder Reifen von gezogenen Achsen. Deshalb wurde im Teilprojekt „Leise Reifen“ mit der Firma Continental AG das Ziel formuliert, einen leiseren Lkw-Antriebsachsenreifen der Serie 60 % für den Einsatz bei Volumentransportern im Fernverkehr zu entwickeln. Dabei durften andere Reifeneigenschaften nicht verschlechtert werden. Das Projekt wurde in verschiedene Entwicklungsstufen gegliedert: Ausgehend von einer Grundlagenuntersuchung mit Serie 80 % Reifen mit verschiedenen Pro-



Bild 2-1: Gliederung des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“

filvarianten als Schnitzreifen mit dazugehörigen Geräuschemessungen auf unterschiedlichen Fahrbahnoberflächen sollte eine Auswahl von Profilen für die Fertigung von Formreifen mit anschließender Fertigung erfolgen. Anschließend wurden mit den verschiedenen Formreifen Geräuschemissionsmessungen auf verschiedenen Fahrbahnoberflächen durchgeführt. Die für die spätere Vermarktung ebenso wichtigen sonstigen Reifeneigenschaften wie Nassgriff, Traktionsvermögen, Laufleistung, Rollwiderstand etc. wurden durch geeignete Messungen und Fahrversuche (Feldversuche) ermittelt. Es wurde angestrebt, einen akustisch optimierten Lkw-Antriebsachsenreifen zu entwickeln, der die geforderten Gebrauchseigenschaften aufweist, um eine spätere Vermarktung zu realisieren.

Darüber hinaus sollten im Teilprojekt „Leise Reifen“ von den Universitäten Hamburg-Harburg, Hannover und der Firma Continental AG ein Berechnungsmodell zur detaillierten Simulation eines rollenden Reifens auf einer Fahrbahn und die Ermittlung der daraus resultierenden Reifenschwingungen mit damit verbundenen Geräuschen entwickelt werden. Dieses Simulationstool sollte nach Fertigstellung bei der Firma Continental implementiert werden.

Für die Simulationsrechnungen zur Strukturodynamik rollender Reifen war eine computergerechte Beschreibung realer Reifen mit deren Schichten aus unterschiedlichen Materialien mit unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften zu erstellen. Hierfür benötigte Materialkennndaten wurden experimentell ermittelt. Durch den Vergleich mit Messungen an realen rollenden Reifen musste die in der Entwicklung befindliche Software validiert werden. Es wurde geprüft, ob die physikalischen Verhältnisse des Reifen-Fahrbahnkontaktes durch die Simulationsrechnungen richtig wiedergegeben werden.

Im Kontaktbereich des Reifens mit der Fahrbahn treten starke Deformationen auf. Diese können den Reifen zu Schwingungen anregen. Die Schwingungen können in die Umgebung abgestrahlt werden und sind dann dort als Schall wahrnehmbar. Für eine Minimierung dieser Schallabstrahlung ist daher u. a. die Kenntnis der Strukturodynamik eines rollenden Reifens auf der Fahrbahnoberfläche erforderlich. Diese soll durch die Simulationssoftware berechnet werden können. Die Oberflächenstruktur der Fahrbahn, die auf den Reifen einwirkt, und der Aufbau des Reifens sind dabei zu berücksichtigen.

Aus den dynamischen Deformationen der Reifenoberfläche, die aus den Berechnungen zur Strukturodynamik des rollenden Reifens im Kontakt mit der

Fahrbahn ermittelt werden, wurde der vom Reifen abgestrahlte Schall berechnet. Neben den Reifenschwingungen gibt es weitere Entstehungsmechanismen für das Reifen-/Fahrbahngeräusch, wie z. B. das so genannte Airpumping. Rollt ein profilierter Reifen auf einer geschlossenen Fahrbahnoberfläche ab, so wird die Luft im Profil durch die Deformation in der Kontaktfläche vorne aus dem Profil herausgepresst und hinten in das Profil hineingesogen. Zudem bildet der Reifen mit der Fahrbahnoberfläche einen Horneffekt. Dies sollte in der Simulationssoftware berücksichtigt werden. Die akustischen Eigenschaften der Fahrbahn, namentlich der Schallabsorptionsgrad, waren ebenso für die Berechnung des abgestrahlten Schalls zu berücksichtigen.

2.2 Teilverbund „Leise Straßen“

Den Schwerpunkt des Teilprojektes „Leise Straßen“ bildete die Verbesserung von OPA. OPA stellen eine sehr wirksame Maßnahme dar, das Reifen-Fahrbahn-Geräusch direkt am Ort der Entstehung zu reduzieren. Derzeit wird durch OPA eine Lärmreduzierung von bis zu 5 dB(A) erreicht. Die akustische Wirksamkeit kann derzeit jedoch nur für einen Zeitraum von 8 Jahren sichergestellt werden [1]. Ursache dafür ist die Verschmutzungsanfälligkeit dieser Bauweise. Durch den Einsatz von Polymer-Nanotechnologie zur Modifizierung der Hohlraumwandungen soll die Schmutzanhaftung verhindert und die Entwässerungsfähigkeit verbessert werden. Dieses Teilprojekt wurde von der Universität Stuttgart bearbeitet.

Die Optimierung von Reinigungsverfahren Offenporiger Asphalte sollte an der Universität München untersucht werden. Aufbauend auf den Ergebnissen zur Porenstrukturanalyse sollte ein Modell zur Simulation der Durchströmung in OPA entwickelt werden. Ziel war es, Grundlagen für die Formulierung von Empfehlungen für die Konzeption effektiver Reinigungsverfahren für derartige Asphalte zu erarbeiten.

In einem weiteren Forschungsansatz sollte die Verbesserung des Schallabsorptionsvermögens von OPA von der Firma Müller BBM untersucht werden. Die hohe lärmtechnische Wirksamkeit von OPA ist u. a. auf die Möglichkeit der Schallabsorption zurückzuführen. Im Rahmen einer Parameterstudie sollten bekannte Zusammenhänge aus der Theorie der Absorber auf die speziellen Verhältnisse von OPA übertragen werden. Vor allem die Erhöhung des Hohlraumgehaltes könnte zu einer Verbesse-

rung der absorbierenden Wirkung über ein breiteres Frequenzband führen. Die aus den momentan üblichen Baustoffen, d. h. Gesteinskörnungen und Bindemittel, hergestellten OPA nähern sich ihrer oberen Grenze im Hohlraumgehalt an. Dies führt jedoch immer noch zu einer maximalen Absorption in einem sehr engen Frequenzband. Im Rahmen dieses Projektes wird die weitere Verbesserung der absorbierenden Wirkung durch den Einsatz von reaktiven Absorbentien untersucht.

Im Rahmen des Teilprojektes „Leise Straßen“ sollten auch Fahrbahnübergangskonstruktionen hinsichtlich einer möglichen Lärmreduzierung untersucht werden. Die vorhandene Technologie für wasserdichte Fahrbahnübergänge in Lamellenbauweise wurde in den vergangenen zehn Jahren so verbessert, dass alle Anforderungen hinsichtlich der Tragsicherheit, Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit erfüllt werden. Trotz dieser partiellen Fortschritte stellen Fahrbahnübergänge immer noch eine Schallquelle dar, die von den Anwohnern als störend empfunden wird. Im Rahmen des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“ sollte der Einsatz neuer Dämpfungsmaterialien von der Firma Solinger Hütte erprobt und neue Oberflächen für Fahrbahnübergänge von der Firma Maurer Söhne entwickelt werden.

2.3 Teilverbund „Erfolgskontrolle“

Bevor eine innovative technische Idee in die Praxis umgesetzt werden kann, muss sie einen langen Forschungs- und Erprobungsweg erfolgreich durchlaufen. Im Bereich der Entwicklung von Fahrbahnen und Fahrbahnübergängen ist der Prozess der Überführung in die Praxis langwierig und kann nur schrittweise erfolgen.

Nach Abschluss der Laboruntersuchungen sollten die Ergebnisse aus dem Teilprojekt „Leise Straßen“ unter praktischen Gegebenheiten im Teilprojekt „Erfolgskontrolle“ erprobt werden. Der Bau der Erprobungsstrecken wurde durch die BASt wissenschaftlich begleitet und die akustischen Eigenschaften erfasst. Die Bewertung der akustischen Eigenschaften der neuen Fahrbahnbeläge erfolgte durch Messungen im Nahfeld (closed proximity – CPX) mit dem CPX-Verfahren und der Statistischen Vorbeifahrtmethode (SPB).

Der Bau der Erprobungsstrecken wurde aus Baumitteln finanziert. Auf diese Weise unterstützte und förderte das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung das Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“.

3 Ergebnisse zum Teilverbund „Leise Reifen“

Partner:

Continental AG, Hannover
 Karlsruher Institut für Technologie,
 Institut für Fahrzeugsystemtechnik
 Technische Universität Hamburg-Harburg;
 Institut für Modellierung und Berechnung,
 Leibniz Universität Hannover;
 Institut für Baumechanik und Numerische
 Mechanik
 Bundesanstalt für Straßenwesen,
 Bergisch Gladbach

3.1 Problemdarstellung

Dominierende Schallquelle im Straßenverkehr ist bei höheren Fahrgeschwindigkeiten das Reifen-Fahrbahngeräusch. Bei der Planung neuer Straßen ist eine angemessene räumliche Trennung zwischen Geräuschquellen und Wohngebieten anzustreben. Lassen sich Geräuscheinwirkungen nicht vermeiden, muss beim Neubau von Straßen vorrangig durch aktive Maßnahmen, insbesondere Lärmschutzwände und -wälle, erreicht werden, dass die Geräuschgrenzwerte der Verkehrslärmschutzverordnung eingehalten werden. Diese Möglichkeiten stoßen jedoch an Grenzen. Deshalb müssen auch Reifen und Straßenoberflächen einen Beitrag zur Lärminderung leisten.

Bild 3-1 zeigt am Beispiel einer Zählstelle auf der BAB 8 bei Leipheim typische Ergebnisse für den Geräuschemissionspegel in 25 m Entfernung von der Straße. Die schwarze Linie stellt den Emissionspegel für das gesamte Fahrzeugkollektiv dar, die blaue Linie für Pkw und leichte Lkw und die rote

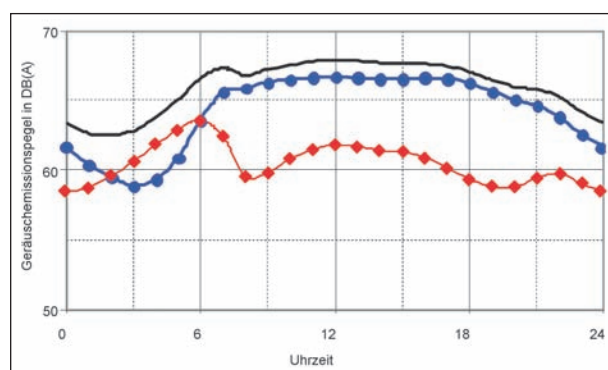


Bild 3-1: Geräuschemissionspegel in Abhängigkeit der Verkehrsstärke (Zählstelle bei Leipheim BAB 8)

Linie die Geräuschemissionspegel für schwere Lkw. Anhand dieser Abbildung wird deutlich, dass tagsüber schnell fahrende Pkw dominieren und nachts, in den Ruhe- und Erholungszeiten zwischen 2 und 6 Uhr, schwere Lkw bzw. Lastzüge. Deshalb ist ein Ziel des Projektes, einen wesentlichen Beitrag in der Reduzierung des durch den Lkw-Verkehr verursachten Lärms zu leisten.

Für eine signifikante Geräuschreduzierung schwerer Nutzfahrzeuge muss reifenseitig das Hauptaugenmerk auf die Antriebsachsenbereifung gelegt werden. Durch ihre spezielle Aufgabe, die Antriebskräfte auf die Straße zu übertragen, ergeben sich hohe Anforderungen an den Reifen, die insbesondere auf dessen Profilgestaltung Einfluss haben. So weisen Antriebsachsen je nach Einsatz unterschiedlich stark ausgeprägte Querrillen auf, um die nötige Traktion auch unter sehr ungünstigen Witterungs- und Straßenverhältnissen zu gewährleisten. Im Vergleich zu den Antriebsachsenreifen sind die spurführenden Lenkachsenreifen im Wesentlichen mit geräuscharmen Umfangsrillen ausgerüstet. Voruntersuchungen haben gezeigt [1], dass Antriebsachsenreifen um ca. 3 dB(A) lauter sind als Lenkachsenreifen.

Bild 3-2 zeigt die Ergebnisse der akustischen Vermessung für vier ausgewählte Antriebsachsenreifen auf verschiedenen Fahrbahnbelägen. Aus dem Diagramm ist ersichtlich dass je nach Belagstyp die Spannweite von 4,5 dB(A) auf dem ISO-Belag bis 1,5 dB(A) auf einem offenporigen Belag betragen kann. Die gemessene Spanne der Geräuschpegel weist auf mögliche Potenziale zur Geräuschemissionsminderung an Antriebsachsenreifen hin.

Bei der Entwicklung von Lkw-Reifen ist eine Vielzahl von Gebrauchseigenschaften zu erfüllen. Teilweise können hier auch Zielkonflikte entstehen. Für die spätere Vermarktung eines geräuschoptimierten Lkw-Reifens sind dessen sonstige Reifeneigenschaften wie Nassgriff, Traktionsvermögen, Laufleistung etc. von entscheidender Bedeutung.

Das Ziel der Firma Continental AG in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Straßenwesen war die Entwicklung eines leiseren Lkw-Antriebsachsenreifens der Serie 60 % für den Einsatz bei Volumentransportern im Fernverkehr.

Die Entwicklung neuer Reifen beginnt heute mit der Herstellung von Schnitzreifen per Hand nach den Angaben zur Profilierung durch den Entwicklungsingenieur (Bild 3-3).

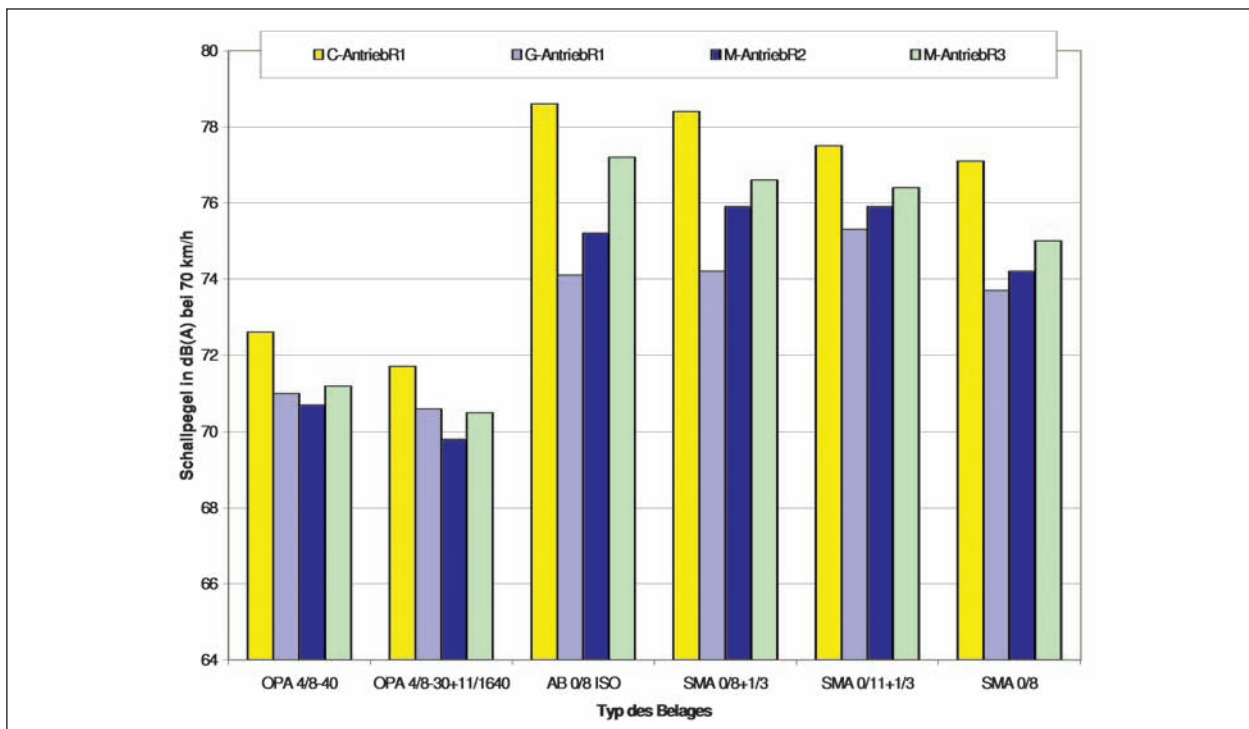


Bild 3-2: Schallpegel verschiedener Antriebsachsenreifen auf verschiedenen Fahrbahnbelägen [1]



Bild 3-3: Herstellung von Schnitzreifen für die Reifenentwicklung

Um hier künftig mittels Computersimulation schon in einem frühen Entwicklungsstadium Geräuschprognosen neuer Reifenprofile erstellen zu können, haben die Partner Continental AG, Universität Hannover und Universität Hamburg-Harburg die Aufgabe übernommen, im Teilprojekt „Leise Reifen“ ein Simulationstool für die Reifenoptimierung zu erarbeiten. Die Simulation eines rollenden Reifens auf einer Fahrbahn mit realer Textur und die Ermittlung der daraus resultierenden Geräusche stellen auch heute noch eine sehr anspruchsvolle Aufgabe dar.

Die Reifenparameter sollten durch die Firma Continental AG mit Hilfe Finiter Elemente modelliert und die Daten zur Berechnung der Strukturmechanik an die Universität Hannover übergeben werden. In

Hannover wurde die Schwingungsanregung des Reifens durch die Straßenoberfläche modelliert. Dabei war der komplexe Reifenaufbau, bestehend aus mehreren Schichten unterschiedlichen Materials, sowie die Struktur der Fahrbahnoberfläche zu berücksichtigen. Als Ergebnis der Berechnungen wurden die komplexen Schwingungen des Reifens ermittelt. Diese stellen Eingangsgrößen für die weiteren Berechnungen der Schallabstrahlung dar.

Das Teilmodell für die Schallabstrahlung wurde von der Technischen Universität Hamburg-Harburg erarbeitet. Neben den Reifenschwingungen gibt es weitere Entstehungsmechanismen für das Reifengeräusch, z. B. das Airpumping. Bei einem profilierten Reifen wird die Luft im Profil durch die Deformation in der Kontaktfläche im Einlauf aus dem Profil herausgedrückt und im Auslauf in das Profil hineingesogen. Zudem bildet der Reifen mit der Fahrbahnoberfläche einen Schalltrichter, der bei Akustikern als Horn bezeichnet wird. In diesem Schalltrichter wird der entstandene Schall verstärkt. Beides, Airpumping und Horneffekt, sollten in der Simulationssoftware berücksichtigt werden.

Literatur

- [1] GRAAFF, D. F.; PEETERS, A. A. A.; PEETERS, H. M.: „Tyre/road measurements of truck tyres“, report M+P. DWWW.03.71; 2004

3.2 Teilprojekt „Grundlagenuntersuchungen und Optimierung von Lkw-Reifen“

Dipl.-Ing. H. Schmidt
Continental AG

3.2.1 Zielsetzung

Der Schwerpunkt des Projektes „Grundlagenuntersuchungen und Optimierung von Lkw-Reifen“ war die geräuschkmäßige Optimierung von Lkw-Reifen für den Langstreckeneinsatz von Volumentransportern. Im Rahmen des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr – reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ wurde im Teilprojekt „Reifen“ eine Methode entwickelt, um die Geräuschemission von Pkw-Reifen zu berechnen. Im Rahmen der Fortführung des Projektes wurde die numerische Prozesskette hinsichtlich ihrer Vorhersagegüte optimiert, validiert und für die Anwendung zur Vorhersage der Geräuschemission von Lkw-Reifen weiterentwickelt. Die Ergebnisse sind in einem separaten Forschungsbericht dokumentiert.

Ein weiterer Schwerpunkt des Teilprojektes „Reifen“ war die Schaffung von Grundlagen zur Optimierung von Lkw-Reifen für den Langstreckeneinsatz und des Fahrbahnbelags von Autobahnen hinsichtlich der Geräuschemission. Dazu wurden Gestaltungsregeln entwickelt und angewandt, die unter Berücksichtigung anderer Gebrauchseigenschaften des Reifens eine Optimierung des Reifen-Fahrbahngeräusches ergeben. Neben dem standardisierten ISO-Belag wurden die Untersuchungen sowohl auf in Deutschland gebräuchlichen als auch auf neuartigen Autobahnbelägen durchgeführt, um die Relevanz der Geräuschkinderungsmaßnahmen am Reifen für die Verkehrslärmreduzierung zu erproben.

Bei der Continental AG wurden zur Erreichung dieser Ziele folgende Arbeiten durchgeführt:

- a) Entwicklung und Bau geräuscharmer serientauglicher Antriebsachs-Niederquerschnittsreifen für den Einsatz im Fernverkehr,
- b) Erprobung der Reifen zur Sicherstellung eines markttauglichen Eigenschaftsspektrums,
- c) Ableitung von Regeln und Prozeduren zur Auslegung geräuscharmer Nfz-Antriebsachsreifen.

Bei der Entwicklung von Lkw-Reifen ist eine Vielzahl von Gebrauchseigenschaften zu erfüllen, zwischen denen auch Zielkonflikte bestehen können. Um ein konkurrenzfähiges Produkt am Markt zu platzieren, müssen alle Anforderungen an den Reifen erfüllt werden. Nutzfahrzeugreifen unterliegen dabei gänzlich anderen Anforderungen als Pkw-Reifen. Während Pkw-Reifen etwa neben guten Aquaplaningeigenschaften ein präzises und agiles Fahrverhalten und einen guten Abrollkomfort ermöglichen sollen, sind die wichtigsten Anforderungen an einen Nutzfahrzeugreifen Wirtschaftlichkeit und Langlebigkeit. Für den Einsatz auf Autobahnen bedeutet dies, da ein hoher Anteil des Fahrzyklus unter gleich bleibenden Bedingungen zurückgelegt wird, dass der Reifen auf den Betriebszustand Geradeausfahrt bei konstanter Geschwindigkeit zu optimieren ist. Reibt der Reifen unter dieser Bedingung nicht völlig gleichmäßig ab, reduziert dies die Lebensdauer des Reifens empfindlich, und seine Wirtschaftlichkeit leidet massiv. Auch der leiseste Reifen würde mit diesem Nachteil am Markt nicht bestehen können, daher muss das Abriebverhalten bei der Entwicklung eines Nutzfahrzeugreifens stets mit optimiert werden.

Akustisch günstig, insbesondere hinsichtlich der Lästigkeit des Geräuschs, wirkt sich die Verwendung von in Umfangsrichtung ungleich langer Profilklotze aus. Bei Nutzfahrzeugreifen kann dies darüber hinaus eine deutliche Verringerung des Vorbeifahrgeräuschpegels bewirken, da eine hohe spektrale Leistungsdichte in den vom Reifen auf das Fahrwerk übertragenen Schwingungen vermieden wird. Die Gefahr, Strukturresonanzen des Fahrzeugrahmens anzuregen, die zu einer Erhöhung des Vorbeifahrpegels beitragen können, wird so vermindert. Diese Verunregelmäßigung der Profilklotze hat jedoch auch eine Verungleichmäßigung des Reifenabriebs zur Folge, weswegen bislang nur äußerst moderate Klotzlängenvariationen bei Nutzfahrzeugreifen Verwendung finden.

Durch die spezielle Aufgabe der Hinterachse, die Antriebskräfte auf die Straße zu übertragen, ergeben sich gegenüber dem Vorderachsreifen zusätzliche Anforderungen, die insbesondere auf die Profilstaltung deutliche Auswirkungen haben. Während der Vorderachsreifen im Wesentlichen mit geräuscharmen Umfangsrillen auskommt und gerade dadurch seine Aufgabe als spurführender Lenkachsreifen besonders gut wahrnehmen kann, braucht ein Antriebsachsreifen je nach Einsatzfall unterschiedlich ausgeprägte Querrillen, um auch

auf ungünstigem Untergrund, z. B. auf Schnee, die nötige Traktion zu erreichen.

Bislang wird die starke Traktion durch grobstollige Profilierungen erreicht. Dieser Ansatz hat aber nur abseits der Fahrbahn im Off-Road-Einsatz seine absolute Berechtigung. Für den Straßeneinsatz gibt es auch unter winterlichen Bedingungen erste Versuche zu gemäßigten Klotzprofilen oder gegliederten Rippenstrukturen. Auch für diesen Ansatz zur Geräuschreduzierung wurden Grundlagen erarbeitet, um die Verträglichkeit mit anderen wichtigen Gebrauchseigenschaften des Reifens bewerten zu können.

Weiterhin stellt die Umstellung des Fahrzeug-Typprüfverfahrens nach ISO 362 (2005) neue Herausforderungen an die Reifengeräuschoptimierung. Das Prüfverfahren verlangt zukünftig stark geänderte Betriebsbedingungen wie etwa ein beladenes Nutzfahrzeug und höhere Prüfgeschwindigkeit bei gleichzeitig gestiegener Torsionsbeanspruchung der Reifen. Bislang fehlen umfassende Erfahrungen, was die geplanten Änderungen für die Auswirkung einzelner Reifen-Designparameter auf die Geräuscharmheit bedeuten. Grundlagenuntersuchungen wurden durchgeführt, um die zukünftigen gesetzlichen Randbedingungen in der Entwicklung berücksichtigen zu können.

Aufgrund der vorgenannten Randbedingungen ist der Einfluss vieler Designparameter auf die Geräuschemission eines Nutzfahrzeugreifens nicht ausreichend bekannt.

Das Ziel dieses Teilprojektes war es daher, diese Wissenslücken zu schließen, geräuschkindernde Maßnahmen am Reifen zu ermitteln und in Balance mit anderen Reifeneigenschaften auf die Auslegung einer neuen 60%-(Querschnittsverhältnis-) Reifenlinie für den Fernverkehrseinsatz anzuwenden.

Die Arbeiten dazu erfolgten in zwei Schritten. Im ersten Teil wurde gezielt der Einfluss der Profilierung auf das Vorbeifahrgeräusch untersucht. Im zweiten Teil wurde zusätzlich die Reifenkontur betrachtet. Die Optimierung erfolgte zunächst durch Anwendung eines bislang im Wesentlichen für Pkw-Reifen verwendeten einfachen Profiloptimierungstools, das eine Vorauswahl von Profiltwürfen hinsichtlich des Geräuschcharakters erlaubte. Es wurden dann Schnitzreifen gefertigt und im Geräusch geprüft. Nach geeigneter Weiterentwicklung der Profiltwürfe und Auswahl der erfolgver-

sprechendsten Varianten wurden Formreifen erstellt und einer Prüfung aller entscheidenden Gebrauchseigenschaften unterzogen. Zur Beurteilung des Fahrbahneinflusses und des Reduzierungspotenzials durch Beläge wurden neben den üblichen Geräuschtests auf der Vorbeifahr-Geräuschmessstrecke nach ISO 10844 auch Untersuchungen auf üblichen und neuartigen Autobahnbelägen durch den Projektpartner BASt durchgeführt.

3.2.2 Grundlagen zur Entwicklung geräuschoptimierter Antriebsachsreifen

Für eine Geräuschreduzierung schwerer Nutzfahrzeuge über Maßnahmen an Reifen und Fahrbahnen muss reifenseitig das Hauptaugenmerk auf die Antriebsachsbereifung gelegt werden. Vorderachsreifen sind bereits ausgesprochen geräuscharm, Gleiches gilt für die meisten Trailerreifen. Ihr Rollgeräusch weist meist nur geringfügig höhere Schalldruckpegel als Glattreifen auf, bei denen die wichtigsten Geräuschenstehungsmechanismen Profilklotzaufschlag, Ausschnappen der Profilklotze aus der verspannten Bodenaufstandsfläche und Luftverdrängung aus Profilirillen entfallen. Eine weitere Geräuschminderung dieser Reifen wäre zum einen sehr aufwändig und würde andererseits keinen nennenswerten Beitrag zur Verkehrsgeräuschreduzierung liefern.

Die Traktion von Antriebsachsreifen lässt sich beeinflussen durch

- Lamellen – durch die Elastizität der Blockkanten,
- Profilstaltung – durch Schubverformung,
- Profilmischung – durch Mikroverzahnung und Adhäsion.

Die Wirkung dieser Maßnahmen auf die Schneetraktion ist in Bild 3.2-1 dargestellt. Die Wirkung der Lamellen nimmt mit abnehmender Profiltiefe bis 4 mm linear ab und sinkt bei kleiner Profiltiefe dramatisch. Profil und Profilmischung zeigen eine lineare Abnahme mit kleiner werdender Profiltiefe.

Lkw-Reifen werden hauptsächlich mit Profilmischungen aus Naturkautschuk hergestellt, die erst bei sehr tiefen Temperaturen (< -60 °C) verharren. Daher sind alle Lkw-Reifen zu einem gewissen Grade bereits durch die Mischung wintertauglich. Pkw-Sommerreifen hingegen enthalten einen

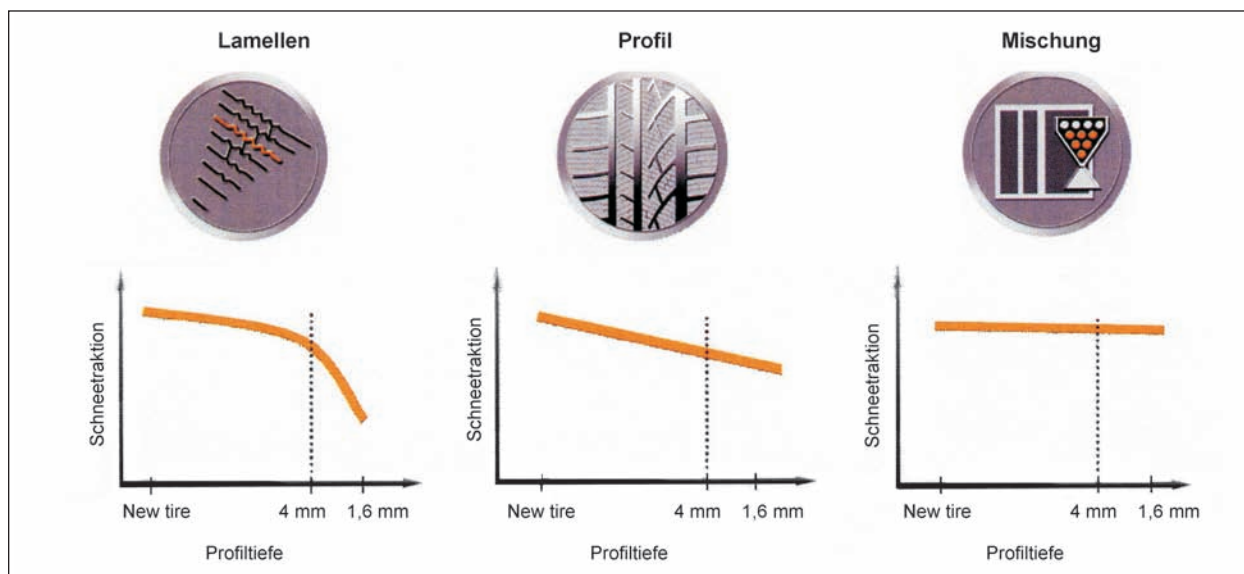


Bild 3.2-1: Abhängigkeit der Schneetraktion von der Profiltiefe

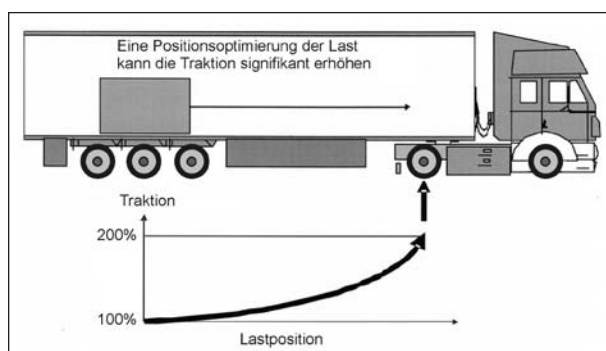


Bild 3.2-2: Möglichkeiten der Traktionserhöhung durch Lastverlagerung

großen Anteil synthetischen Kautschuk in der Laufstreifenmischung, der schon bei relativ hohen Temperaturen ($< 7\text{ }^{\circ}\text{C}$) verhärtet.

Neben den konstruktiven Möglichkeiten am Reifen bietet die richtige Positionierung der Ladung eine Verbesserung der Traktion um bis zu 100 % (siehe Bild 3.2-2).

Die Antriebsachsreifen für den Langstreckeneinsatz haben als Profilgeometrie eine Kombination aus Umfangsrillen und Blöcken, während die Antriebsachsreifen für den Regionalverkehr ein Profil haben, das nur aus Profilblöcken besteht.

Wie viel Traktion der Reifen aufweisen muss, hängt auch von der Verwendung ab. Die Traktion der Reifen für den Langstreckeneinsatz auf der Autobahn, die nur Steigungen bis 4 % aufweist, kann kleiner sein als die Traktion der Reifen im Regionalverkehr, die neben dem Einsatz auf Autobahnen auch auf innerörtlichen Straßen und manchmal auch abseits

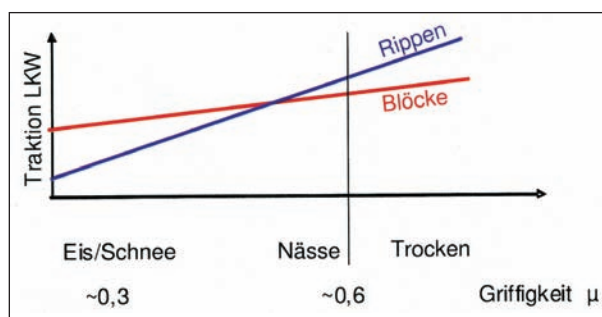


Bild 3.2-3: Abhängigkeit der Traktion von der Griffigkeit der Straße

der Straßen (Ladehöfe, Rampen, ...) die Kräfte auf die Straße bringen müssen.

Unglücklicherweise verändert sich das Traktionsverhalten von Rippen und Blockprofilen in Abhängigkeit von der Griffigkeit der Fahrbahn. In Bild 3.2-3 ist diese Abhängigkeit prinzipiell dargestellt. Auf trockener Straße oder einer Straße mit hoher Haftung ist ein Traktionsreifen mit Rippenprofil die bessere Lösung, auf nasser Straße bzw. einer Straße mit geringerer Haftung sollte ein Traktionsreifen ein Blockprofil haben, um die Kräfte übertragen zu können.

Mögliche Auswirkungen im Winter auf einer Straße mit geringer Griffigkeit ist in Bild 3.2-4 veranschaulicht. Dies kann sicher nicht das Entwicklungsziel eines Reifenherstellers sein. Andererseits ist aber bekannt, dass die Traktionsreifen mit Blockprofil eine höhere Schallabstrahlung haben. Wenn die Grenzwerte für Reifen (2008/316/EC) zu stark gesenkt werden, bleibt nur die Möglichkeit, im Winter den Lkw-Verkehr zu verbieten.

Hinsichtlich der Schallabstrahlung lassen sich die verschiedenen Reifenklassen eindeutig gruppieren. Die Lenkachs- und Trailerreifen mit einem Rippenprofil strahlen Schallpegel von 72-74 dB(A), gemessen nach UN ECE R117, ab. Die Long-Distance-Reifen, mit einer Profilkombination von Rippen und Blöcken strahlen einen Schallpegel von 74-77 dB(A) ab und die Regionalreifen mit einem reinen Blockprofil erreichen Schallpegel von 77-80 dB(A).

In Bild 3.2-5 sind die Messwerte für verschiedene Reifen (Continental und Mitbewerber) zusammengestellt. Gleichzeitig ist die Wirkung der geplanten Absenkung der Geräuschgrenzwerte nach 2008/316/EC eingezeichnet. Während alle Reifen die gegenwärtigen Grenzwerte einhalten, führt die geplante Absenkung der Grenzwerte dazu, dass in allen Reifenkategorien viele Reifen die Grenzwerte



Bild 3.2-4: Konsequenz bei Verwendung von Antriebsachsreifen ohne ausreichende Traktion

nicht mehr einhalten. Mit der geplanten Berücksichtigung der Abrundung des Messwertes und der Subtraktion von 1 dB für Messunsicherheiten wird es einige Lenkachs- und Trailerreifen geben, die die neue Vorschrift grenzwertig bis 2016 erfüllen. Die Traktionsreifen für den Langstreckeneinsatz können bis 2016 auch noch gerade eingesetzt werden. Die Traktionsreifen mit reinem Blockprofil hingegen liegen alle oberhalb der geplanten Grenzwerte und sind bei Einführung der neuen Richtlinie nicht mehr normgerecht. Hier kommt ein großes Problem auf die Reifenhersteller zu, das die Anwendung neuer Konzepte für diese Reifen erfordert.

Anforderungen an Reifen

Die Anforderungen an einen Lkw-Reifen sind vielfältig. Die Anforderungen aus Kundensicht sind in Bild 3.2-6 zusammengestellt. Die wichtigste Eigenschaft aus Sicht des Kunden ist die Laufleistung des Reifens, gefolgt vom Traktionsverhalten auf nasser Straße sowie der Schneetraction. Das Geräuschverhalten wird vom Kunden nicht als primäre Reifeneigenschaft angesehen, da der Fahrer in einer gut gekapselten Kabine sitzt, wo vielleicht das Schwingungsverhalten des Reifens zu spüren ist. Dagegen ist das Geräuschverhalten sehr wichtig für die Umwelt und die Anwohner der Straßen. Geräusch hatte bisher eine geringere Priorität bei den Kunden, aber das gestiegene Umweltbewusstsein und die verschärften Grenzwerte für Reifenlärm geben diesem Entwicklungsparameter eine größere Bedeutung. Die Anforderungen der

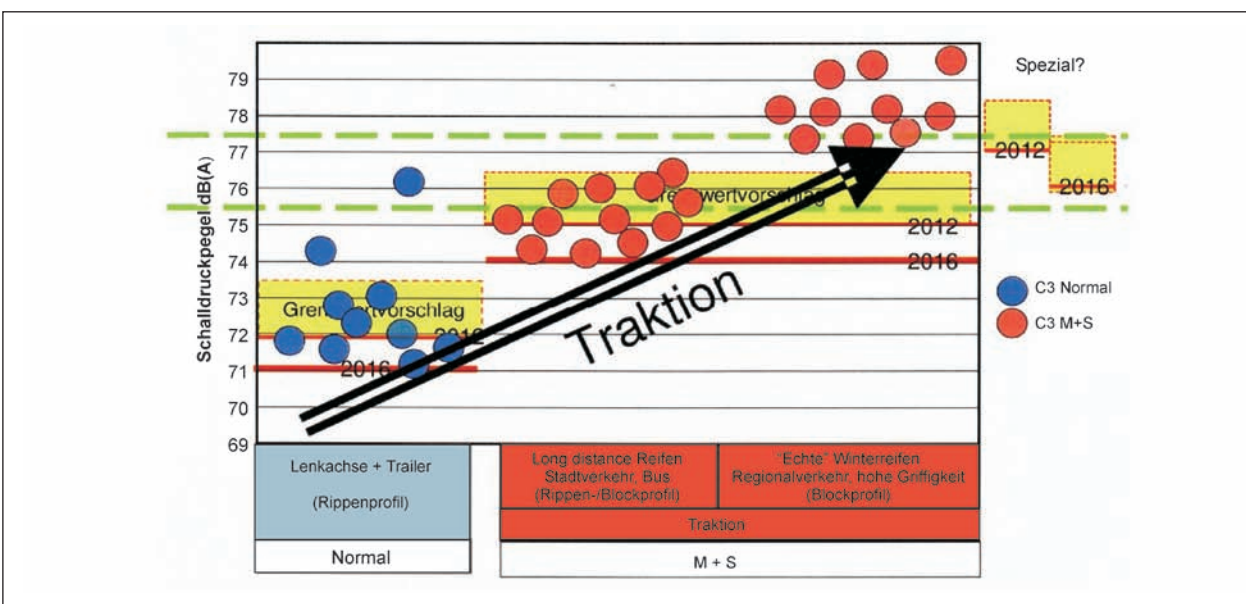


Bild 3.2-5: Schallpegel nach UN ECE R117 für unterschiedliche Reifenklassen

Kunden haben Auswirkungen auf mehrere Entwicklungsparameter, wie in Bild 3.2-6 gezeigt wird. Um z. B. das Geräusch zu verringern, ist die Aufstandsfläche zu verkleinern, die Steifigkeitsverteilung zu verändern, die Dämpfung im Laufstreifen zu erhöhen und das Profilblockdesign anzupassen.

Neben den Entwicklungsparametern in Bild 3.2-6 gibt es weitere wesentliche Anforderungen an einen Lkw-Reifen, die im Netzdiagramm zusammengestellt sind (Bild 3.2-7). Da bei der Neuentwicklung eines Reifens die Eigenschaften gegenüber den bestehenden Reifen verbessert werden sollen, wird der Stand der Technik Anforderungen vom Kunden als Mindestanforderung definiert und die Erfüllung der Eigenschaften als 100 % gewertet.

Die Skalierung ist so gemacht, dass Werte größer als 100 % eine Verbesserung der Eigenschaft gegenüber dem Ausgangszustand darstellen. Die blaue Linie zeigt das Eigenschaftsprofil eines neueren Antriebsreifens. Die wesentlichen Eigenschaften dieses Reifens konnten verbessert werden, was allerdings mit einer schlechteren Performance im Bremsen und beim Steinefangen erkauft wurde. Das Eigenschaftsprofil dieses Reifens ist sehr kritisch, da ein Reifen, welcher die Steine auf der Autobahn aufammelt und dann auf die nachfolgenden Pkw wirft, großes Gefährdungspotenzial birgt. Die Eigenschaft „Steine fangen“ sollte daher durch eine Profilmodifikation mindestens auf 100 % gebracht werden.

In Bild 3.2-8 sind unterschiedliche Anforderungsprofile für die verschiedenen Lkw Antriebsachs-Reifentypen zusammengestellt. Der Reifen (blau) mit einem Profil, das hauptsächlich aus Umfangsrippen besteht, zeigt bis auf das Traktionsverhalten die beste Gesamtpformance. Mit der Verbesserung des Traktionsverhaltens eines Antriebsachsreifens für den Langstreckenverkehr (rot) mit einem Profil, das aus Umfangsrillen und Blöcken besteht, geht ein Teil der Performance bei den anderen Eigenschaften verloren. Wird das Profil im Traktionsverhalten optimiert, sodass das Profil nur noch aus Profilblöcken zusammengesetzt ist (grün), geht die Performance bei den anderen Eigenschaften weiter zurück. Es ist daher bei der Definition eines neuen Reifens sehr wichtig, genau das Anforderungsprofil festzulegen. Es gibt bisher noch kein Konzept, alle Eigenschaften gleichzeitig zu verbessern. Es gilt auch hier, wie bei vielen Vorgängen in der Physik, dass die Summe der Eigenschaften ausgewogen ist.

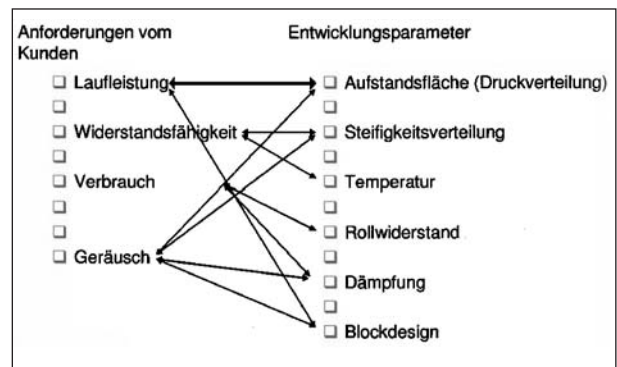


Bild 3.2-6: Wechselwirkungen unterschiedlicher Reifenparameter

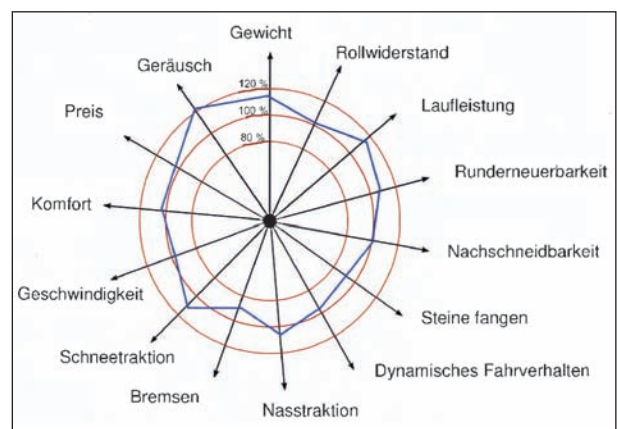


Bild 3.2-7: Anforderungsnetz für einen modernen Reifen

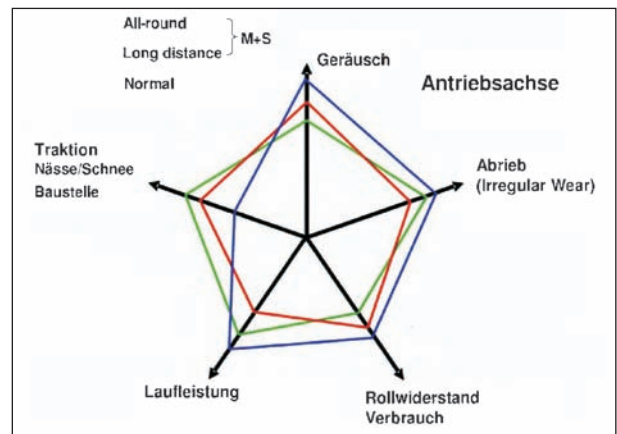


Bild 3.2-8: Anforderungsnetze für unterschiedliche Lkw-Reifen

Untersuchung der Geräuscentstehungsmechanismen bei Lkw-Reifen

Die beim rollenden Reifen entstehenden Geräusche basieren auf einer Kombination von verschiedenen physikalischen Mechanismen:

- Mechanische Stöße aus dem Aufschlagen der Profilblöcke auf die Fahrbahn erzeugen Schwingungen auf der Reifenoberfläche. Lufteinschlüs-

se in den Profiltrillen und Profiltuten werden beim Durchlauf durch die Aufstandsfläche komprimiert und erzeugen dadurch dynamische Luftdruckschwankungen. Ausgleichsbewegungen der Profilelemente beim Durchlauf durch die Aufstandsfläche.

- Akustische Impedanz (Absorption) der Fahrbahn hat einen Einfluss auf die Schallausbreitung.

Für mechanische Schwingungen ist der Prozess der Geräusentstehung im oberen Teil des Bildes 3.2-9 dargestellt. Die Reifenstruktur wird durch Ungleichförmigkeiten des Reifen-Fahrbahnkontaktes zu Schwingungen angeregt, welche dann als Luftschall abgestrahlt werden. Durch Verringerung der Anregungen oder der Schwingungen durch Kompensation und Absorption ist das abgestrahlte Geräusch beeinflussbar.

Der dynamische Prozess der Lufteinschlüsse (Air-pumping) im Profil ist im unteren Teil von Bild 3.2-9 dargestellt. Durch eine Verringerung des Druckgradienten, Abschattungen und Barrieren sowie durch Absorption ist die Schallabstrahlung beeinflussbar.

In Bild 3.2-10 sind die einzelnen Einflussgrößen und Mechanismen für das Reifen-Fahrbahn-

geräusch bildlich dargestellt. Bezeichnungen in schwarz beschreiben die Größen des Reifens, in Blau die der Fahrbahn, und die grünen Bezeichnungen beschreiben die Wechselwirkungen zwischen Fahrbahn und Reifen.

Eine Gewichtung der einzelnen Größen kann entsprechend der folgenden Reihe erfolgen. Es sei darauf hingewiesen, dass in der Literatur und in Fachkreisen hierüber keine vollständige Übereinstimmung besteht.

- Klotz- und Gürtelschwingungen,
- Horneffekt,
- Klotzaufschlag,
- Airpumping,
- Reibung,
- Seitenwandschwingungen,
- Rillen/Nutenresonanzen.

Reifenschwingungen werden durch den Kontakt der Reifenoberfläche mit den Fahrbahnebenheiten und durch Reifenverformungen im Ein- und Auslauf der Aufstandsfläche erzeugt. Die folgende Erläuterung des grundlegenden Mechanismus basiert auf der englischsprachigen Beschreibung von van KEULEN (2003) [1].

Die Schwingungsentstehung in einem rollenden Reifen hängt vom Design des Reifenprofils, dem Grad der Makrotextur (große Unebenheiten) der Fahrbahnoberfläche und der Haftreibung zwischen dem Reifen und der Fahrbahn ab. Zusätzlich kann die Stärke der von Klotzaufschlägen oder Aufschlägen von durch Fahrbahnebenheiten entstehenden Reifenschwingungen durch die Steifigkeit oder mechanische Impedanz der Fahrbahn beeinflusst werden. Reifengeräusche, die durch mechanische Schwingungen erzeugt werden, befinden sich am unteren Ende des Reifengeräusch-Spektrums (unterhalb 1.000 Hz), da der Reifen als Tiefpassfilter wirkt und die Abstrahlung der hohen Frequenzen blockiert.

Das mechanische Schwingungsverhalten eines Reifens ist in Bild 3.2-11 dargestellt. Im tieffrequenten Bereich bis ca. 350 Hz zeigt der Reifen ein ähnliches Verhalten wie ein Stab. Es werden hauptsächlich eindimensionale Schwingungen in der Umfangsrichtung beobachtet. Im höheren Frequenzbereich von 350 Hz bis ca. 2.000 Hz sind

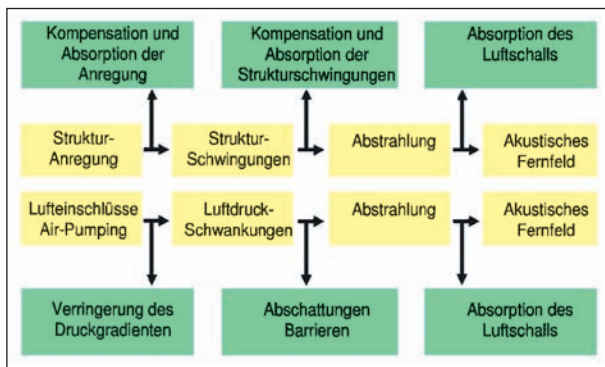


Bild 3.2-9: Geräusentstehungsprozesse am Reifen

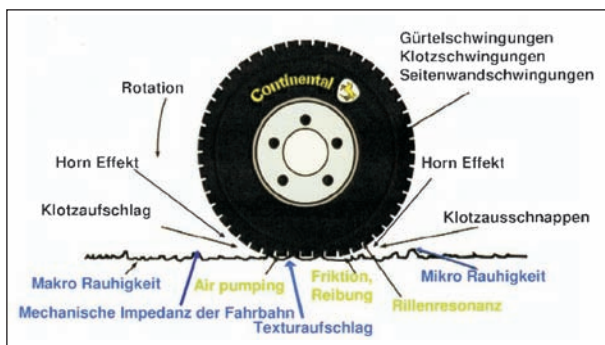


Bild 3.2-10: Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahn-geräusches durch Klotz- und Gürtelschwingungen

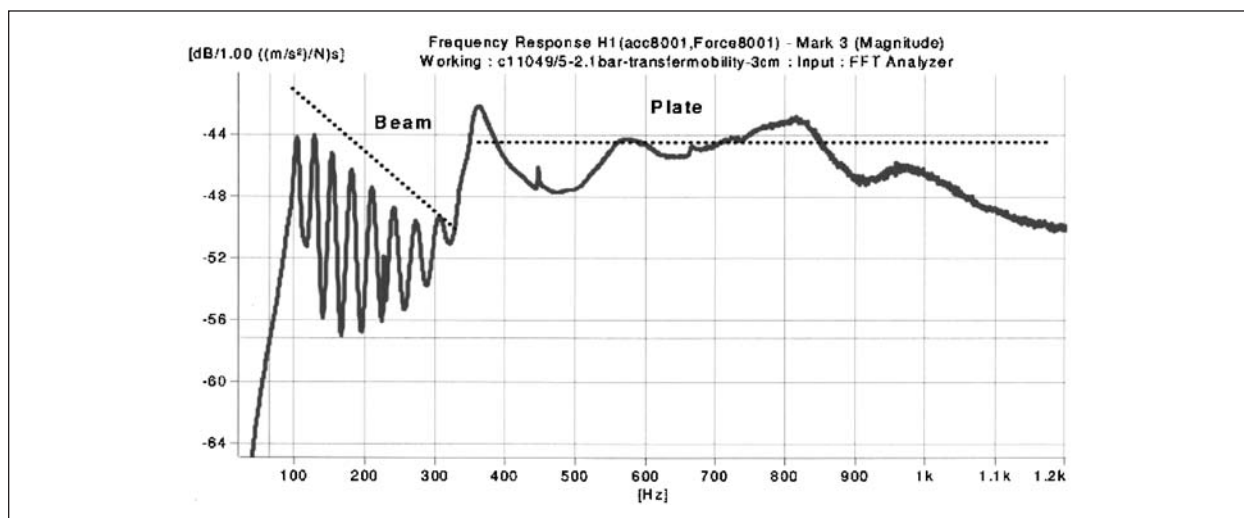


Bild 3.2-11: Schwingungsverhalten eines Reifens (Übertragungsfunktion)

zweidimensionale Schwingungen, wie bei einer Platte, vorhanden.

Horn-Effekt

Die Fahrbahn und der Reifen bilden für Geräuschquellen im Ein- und Auslauf der Aufstandsfläche ein Horn. Die Geräuschabstrahlung wird gebündelt und quasi verstärkt. Dieser Effekt ist im Frequenzbereich zwischen 1.000 Hz und 2.000 Hz am stärksten.

Klotzaufschlag

Die folgende Erläuterung des Klotzaufschlages basiert auf der englischsprachigen Beschreibung von van KEULEN (2003) [1].

Beim Aufschlag des Profilklotzes im Einlauf auf die Fahrbahn werden radiale Schwingungen in den Reifen eingeleitet. Im Auslauf entsteht ein ähnlicher Effekt – nur, dass hier die Klötze aus der Aufstandsfläche ausschnappen und schnell in ihre Ausgangslage des nicht verformten Reifens zurückschwingen. Es werden sowohl radiale als auch tangentielle Schwingungsmoden angeregt. Das Abplatten des Reifens in der Aufstandsfläche und die dadurch entstehenden kontinuierlichen Bewegungen verursachen tangentielle Kräfte zwischen dem Reifen und der Fahrbahn. Diese Kräfte wirken entgegen dem Reibwiderstand zwischen der Fahrbahnoberfläche und dem Reifenprofil. Wird der Haftreibungswiderstand überwunden, beginnen die Profilelemente zu rutschen und es werden weitere Reifenschwingungen überwiegend in tangentialer Richtung erzeugt.

Airpumping

Die genauen Zusammenhänge des Airpumping sind noch nicht vollständig bekannt und werden hier nur grob beschrieben. In der Aufstandsfläche des Reifens werden die Profilelemente komprimiert und vorhandene Nuten-, Rillen- und Lamellen-Volumina verringert. Die in diesen Volumina befindliche Luft wird im Einlauf der Aufstandsfläche ebenfalls komprimiert und erzeugt dadurch eine Luftströmung aus den Profilloffnungen heraus. Im Auslauf nehmen die komprimierten Profilelemente wieder ihre Ausgangslage ein und es wird die ausgepresste Luft wieder angesogen. Durch das Design des Profils und die Form der Fahrbahnoberflächen entstehen Schwankungen der Luftströmungen, die wiederum Luftdruckschwankungen und somit Geräusche erzeugen. Nach EJSMONT (1984) [4] und HAYDEN (1971) [3] wird das Airpumping Geräusch im Frequenzbereich zwischen 1-3 kHz angesiedelt.

Reibung¹

Schwingungen durch Reibung entstehen durch Haft-/Gleitreibungsübergänge und den entstehenden Reibungskräften in der Aufstandsfläche und der Fahrbahnoberfläche (NELSON, PHILIPS, 1997). Das Abplatten des Reifens in der Aufstandsfläche und die dadurch entstehenden kontinuierlichen Bewegungen verursachen tangentielle Kräfte zwischen dem Reifen und der Fahrbahn. Entgegen

¹ Diese Erläuterung basiert auf der englischsprachigen Beschreibung von van KEULEN (2003) [1].

diesen Kräften wirken der Reibungswiderstand, die Reifensteifigkeit und die verbleibende Reibung (Gleitreibungskraft), wenn der Reifen über die Fahrbahn rutscht. Die Reibung kann in Hysterese-reibung und Adhäsionsreibung unterschieden werden. Die Adhäsionsreibung wirkt auf der molekularen Ebene und wird stark von der Mikro-Rauigkeit oder Mikrostruktur der Fahrbahn beeinflusst. Beim relativen Rutschen der Profilelemente und der Fahrbahn sind die Adhäsionsbindungen unterbrochen. Der Reifen kann frei über die Fahrbahn rutschen. Die Adhäsionsbindung kann wieder aufgebaut werden, wenn die Gleitreibungskräfte überwiegen.

Die Hysterese-Kraft ist auf ein Kompressions-Phänomen zurückzuführen, das gleichzeitig auf die Gleitfläche wirkt. In der Kontaktzone drapiert sich das Laufflächengummi um die Unebenheiten in der Straßenoberfläche, und wenn kein Schlupf vorhanden ist, führt dies zu einer Druckverteilung um jede Unebenheit, die näherungsweise symmetrisch ist. Wenn Schlupf auftritt, wird das Laufflächengummi an den Vorderkanten der Unebenheiten angehäuft und der Kontakt beginnt am Gefälle des Oberflächenprofils zu reißen. Dies führt zu einer asymmetrischen Druckverteilung und einer Nettokraft, die gegen die Gleitbewegung wirkt. Bei hohen Geschwindigkeiten ist dieser Mechanismus weitgehend verantwortlich dafür, dass die Laufflächenelemente wieder Kontakt mit der Fahrbahnoberfläche erlangen. Die Hysterese-Komponente der Reifen- und Fahrbahn-Reibung ist weitgehend bestimmt von der Oberflächen-Makrostruktur der Straße, die die Wellenlängen entsprechend der

Größe der verwendeten Gesteinskörnung beinhaltet.

Natürlich ist die Schlupfanregung der Profilblöcke nicht der einzige Anlass zur Schwingungsanregung des Reifens. Es ist vielmehr die Kombination des Schlupfes der Profilblöcke, wenn die Adhäsion in der Aufstandsfläche verloren geht, und der Hysterese-Reibungskräfte die aus der Deformation des Profils entstehen. Diese Kräfte führen zu einem Gleit- und Haftprozess in der Aufstandsfläche und damit verbunden zur Schwingungsanregung des Reifens. Reifenvibrationen und damit Geräusche durch diesen Mechanismus wurden von NELSON, UNDERWOOD (1984) [6] in Zusammenhang mit der Schlupf-Geschwindigkeit der Laufflächenelemente gebracht. Die höchsten Geschwindigkeiten wurden von den Autoren auf der Rückseite der Kontaktfläche gefunden und können zum „Aus-schnapp-Effekt“ der Profilklotze beitragen.

Seitenwandschwingungen

Seitenwandschwingungen werden in der Literatur als dominante Schallquellen des Reifens angegeben. Messungen an der Seitenwand zeigen (Bild 3.2-12), dass diese Schwingungen existieren, aber die Amplituden viel geringer als auf dem Laufstreifen sind.

Weiter sind deutliche Seitenwandmoden nur im tiefen Frequenzbereich erkennbar. Im hohen Frequenzbereich sind Seitenwandschwingungen nur als Teil der zweidimensionalen Moden vorhanden.

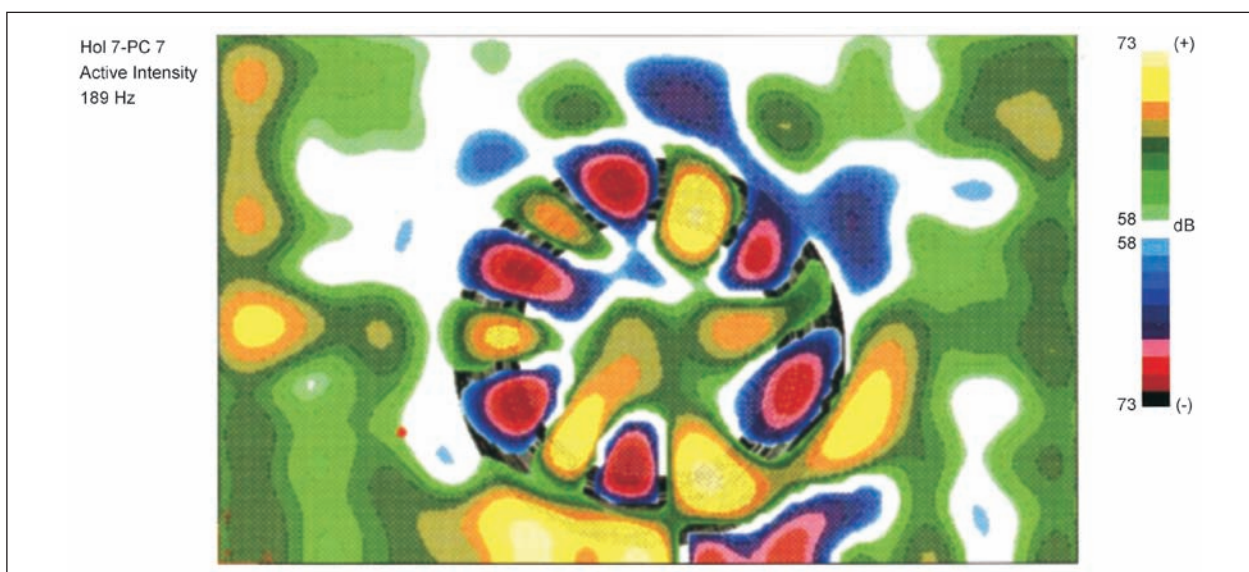


Bild 3.2-12: Kontur der Schallabstrahlung (Intensität) von der Seitenwand

Diese Moden gehen über den gesamten Reifen von Wulst zu Wulst und in Umfangsrichtung um den Reifen.

Nuten- und Rillenresonanzen

Rohrresonanzen entstehen durch stehende Wellen in Öffnungen und Rillen des Reifenprofils. Die Wellenlänge des entstehenden Geräusches hat die doppelte Länge des Rohres bei beidseitig offenen Enden. Beim einseitig offenen Ende beträgt die Wellenlänge die vierfache Länge des Rohres. Jeder profilierte Reifen bildet mit einer glatten Fahrbahnoberfläche ein System von Rohrresonatoren, deren Wellenlänge und Eigenfrequenzen ausschließlich von der Geometrie und nicht von der Geschwindigkeit abhängen. Diese Erläuterungen basieren auf den Beschreibungen von van KEULEN (2003) [1].

Dieser Effekt konnte nur durch Messungen auf sehr glatten Fahrbahnbelägen nachgewiesen werden. Die Begründung hierfür liegt darin, dass die Rohrresonatoren in der Aufstandsfläche durch die Profilrillen/Nuten und der Fahrbahn gebildet werden. Eine ausreichende Dichtigkeit der Rohre kann auf realen Fahrbahnbelägen nicht erreicht werden, da

zusätzliche Öffnungen zwischen den einzelnen Steinen des Belages und dem Reifen entstehen. In Bild 3.2-13 sind die Abdrücke der Aufstandsflächen von zwei Reifen auf unterschiedlichen Fahrbahnbelägen dargestellt. Auf der Stahlplatte und auf dem ISO-Belag (ähnlich SMA 0/6) sind die Profildetails deutlich erkennbar. Auf dem raueren Belag (SMA 0/11) sind die Profildetails kaum erkennbar und der Unterschied zum Glattreifen ist sehr gering. Die Begründung liegt in der geringen Anzahl der Kontaktpunkte, mit denen der Reifen auf der Fahrbahn steht.

3.2.3 Untersuchungsmethodik

Antriebsachsreifen für schwere Nutzfahrzeuge im Güterverkehr sind aus Traktionsgründen üblicherweise stark profiliert, weisen ausgeprägte Querrillen auf und regen daher beim Abrollen die Reifenstruktur sehr viel stärker zum Schwingen an. Maßnahmen zur Geräuschminderung müssen daher am Profil angreifen. Optimierungen der Konstruktion des Reifens, die das Schwingungsverhalten des Reifens und dessen Schallabstrahlungsverhalten beeinflussen, sind demgegenüber bei Antriebsachsreifen von untergeordneter Bedeutung.

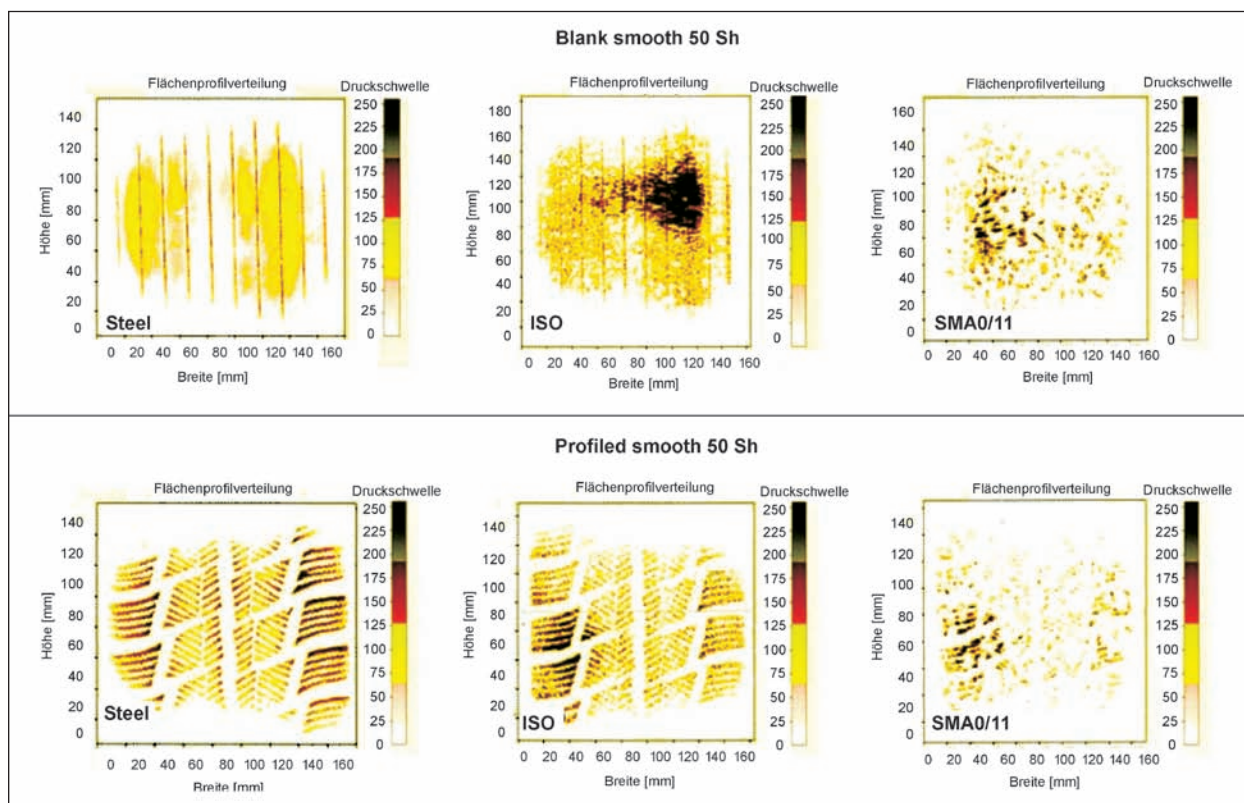


Bild 3.2-13: Vergleich der Druckverteilung auf unterschiedlichen Belägen

Neben der Selbsterregung des rollenden Reifens spielt die Fahrbahnoberfläche eine wichtige Rolle, deren Textur die Reifenoberfläche verformt und so Schwingungen im Reifen erzeugt. Auch die Griffigkeit der Fahrbahn, die die Schlupfverhältnisse und die Erzeugung von Slip-Stick-Vorgängen in der Bodenaufstandsfläche beeinflusst, die Makrostruktur der Oberfläche, die für die Luftverdrängung zwischen Reifen und Fahrbahn bedeutsam ist, und die Fähigkeit der Fahrbahn, Schall zu absorbieren, sind bedeutsame Fahrbahneigenschaften hinsichtlich der Geräuschentwicklung. Das Profil eines Reifens entsteht bei der Fertigung während des Heizprozesses des rohen Reifens in der Heizform. Da Heizformen insbesondere für Nutzfahrzeugreifen hohe Investitionsmittel benötigen, wird in der Findungsphase eines Profils vielfach ein anderes Herstellungsverfahren gewählt. Dazu werden Glattreifen produziert, in die anschließend mit speziellen Schneidwerkzeugen das Profilmuster eingeschnitzt wird. Wenngleich die Eigenschaften dieser Reifen aufgrund der fehlenden Fließvorgänge beim Einformen eines Reifens nicht völlig identisch mit Serienreifen sind, so wirkt sich dies eher auf das absolute Niveau und weniger auf die Unterschiede zwischen verschiedenen Prototypen aus.

Zusätzlich zu den messbaren Eigenschaften sind die Marktanforderungen für einen Traktionsreifen zu berücksichtigen. Es wird gefordert, dass der Reifen eine optische, subjektive Traktion hat. Wichtig dabei sind die Queranteile des Profils wie Lamellen und Rillen, die zusammen mit den Umfangsrillen eine Klotzstruktur bilden. Vom Design her muss dies unterstützt werden, wie zum Beispiel einer Amplitude der Umfangsrille (Zickzack-Form) und im Detail-Design, das die Klotzform hervorhebt. Große glatte Profillflächen müssen optisch vermieden werden. Aus diesen Gründen erfolgte die Entwicklung in diesem Projekt in zwei Schleifen: In der ersten Schleife wurden Glattreifen gebaut und unterschiedliche Profile manuell in den Reifen geschnitzt. Auf den Versuchsstrecken der BAST und der Continental AG wurden daraufhin die Vorbeifahrtgeräusche gemessen. Zusätzlich wurden Geräuschmessungen ebenfalls im Labor durchgeführt, um spätere kleinere Profilloptimierungen zu bewerten.

Basierend auf den Ergebnissen der ersten Schleife wurden dann vier Profilvarianten für die weiteren Untersuchungen ausgewählt und weiter optimiert. Für diese neuen Profile wurden nach der Optimierung die entsprechenden Formen gebaut. Die ge-

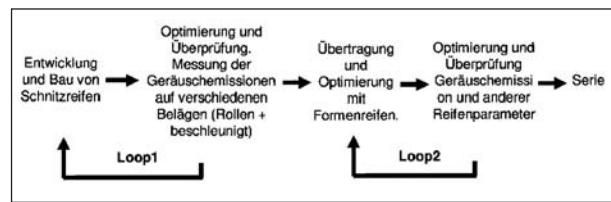


Bild 3.2-14: Untersuchungsmethodik – Ablaufschema

bauten Reifenvarianten wurden anschließend hinsichtlich ihrer Performance getestet und bewertet. Besonderes Augenmerk lag dabei auf den Zielkonflikten zwischen Vorbeifahrtgeräuschen und den anderen Zielgrößen. Ein seriennaher Lkw-Reifen muss natürlich alle weiteren Gebrauchsanforderungen, z. B. an die Dauerhaltbarkeit und den geringen Rollwiderstand usw., erfüllen. Hierin begründet sich die umfangreiche Erprobung der Lkw-Reifen auf der Straße und die Messung von nicht-akustischen Reifenparametern auf Maschinenprüfständen. Bild 3.2-14 zeigt den zeitlichen Verlauf der Arbeiten.

3.2.4 Ergebnisse

3.2.4.1 Entwurf, Konstruktion und Bau von Schnitzreifen

Für die Entwicklung der Lkw-Reifen wurde der aktuelle Kenntnisstand im Hinblick auf das abgestrahlte Geräusch zusammengetragen und analysiert. Eine Entwicklungsstrategie für leise Lkw-Reifen bei gleichzeitiger Berücksichtigung und Beibehaltung anderer Reifeneigenschaften (Rollwiderstand, Traktion usw.) wurde erarbeitet. Zusätzlich zu den messbaren Eigenschaften wurden die Marktanforderungen für einen Traktionsreifen berücksichtigt. Dies gilt insbesondere für die Profildgestaltung der Reifen. Es sind acht Profile entworfen und die zugehörigen Profilzeichnungen erstellt worden.

Für die Optimierung der Geräuschabstrahlungsstudie wurden auf diese Weise sieben verschiedene Profilmuster realisiert, zuzüglich eines geschnitzten Serienreifens als Referenz. Gemeinsam mit einem Glattreifen standen neun verschiedene Sätze in der Versuchsreifengröße 315/80 R 22,5 zur Verfügung (Bild 3.2-15).

Die Profilmuster wurden so ausgewählt, dass sich ein breites Spektrum unterschiedlicher Geometrien bei gleichzeitig möglichst attraktiver Optik ergab. Dabei wurden die Richtung der Hauptprofilrillen (in Umfangsrichtung oder diagonal), die Breite von Querrillen (keine, schmal, breit), die Größe der Profilklotze in mehreren Stufen und so genannte An-

bindungen, das sind lokal verringerte Rillentiefen zwischen den Profilklotzen, modifiziert.

- Profil 1 (Reifen 1), Glattreifen,
- Profil 2 (Reifen 2), Glattreifen mit umlaufenden Rillen,
- Profil 3 (Reifen 3), Klotzprofil,
- Profil 4 (Reifen 4), Klotzprofil in gebogener V-Anordnung,
- Profil 5 (Reifen 5), Lenkachsreifenprofil,
- Profil 6 (Reifen 6), Rippenprofil in V-Anordnung,
- Profil 7 (Reifen 7), Klotzprofil in diagonaler Anordnung,
- Profil 8 (Reifen 8), Klotzprofil in diagonaler Anordnung mit offener Schulter,
- Profil 9 (Reifen 9), Klotzprofil in gebogener Anordnung, Grobstruktur.

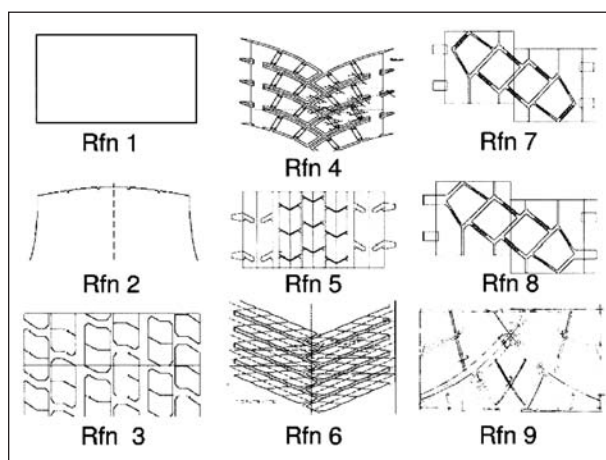


Bild 3.2-15: Profile der Schnitzreifen

3.2.4.2 Geräuschmessungen an Schnitzreifen

Die Reifen wurden zunächst eingefahren und anschließend auf fünf verschiedenen Fahrbahnoberflächen im Vorbeifahrgeräusch geprüft (siehe Tabelle 3.2-1).

Als Versuchsfahrzeug wurde ein 4x2 Lastkraftwagen mit 4,8 m Radstand und 340 kW Antriebsleistung genutzt. Das Fahrzeug ist zur besseren Differenzierung des Reifen/Fahrbahngeräuschs mit einem speziellen Geräuschminderungspaket für den Antriebsstrang versehen.

Die Radlast betrug rundherum jeweils 2.800 daN, Felgenreöße war 9.00 x 22.5, der Fülldruck wurde entsprechend 2001/43/EC eingestellt. Das Fahrzeug war an der Vorderachse mit Glattreifen, an der Hinterachse mit den Prüfreifen bestückt. Die bei der Reifen-Fahrbahngeräusch-Typprüfung nach 2001/43/EC bzw. ECE R 117 vorgeschriebene Einzelbereifung an der Hinterachse wurde auch bei der ebenfalls durchgeführten Prüfung der beschleunigten Vorbeifahrt beibehalten, wobei die Versuchsdurchführung in Anlehnung an die zukünftige Fahrzeuggeräusch-Typprüfung nach R51.03 gestaltet wurde. Durch die Verwendung von nur zwei Reifen an der Antriebsachse ergab sich dabei eine ge-

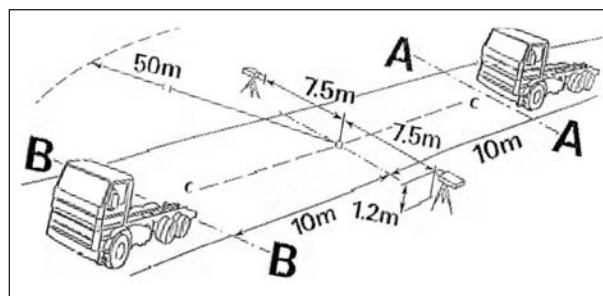


Bild 3.2-16: Aufbau der Messstrecke

Code	Fahrbahnbelag	Prüfgelände	Beschreibung
ISO	Asphaltbeton 0/8 entsprechend ISO 10844	Contidrom	Geringe Amplituden im Wellenlängen-Spektrum der Makrotextur, d. h. anregungsarme Strecke
SMA	Splitt-Mastix-Asphalt 0/8	Flughafen Sperenberg	Mittlere Amplituden im Wellenlängen-Spektrum der Makrotextur, mittlere Griffigkeit
GA5	Gussasphalt 2/3	Flughafen Sperenberg	Fein abgestreuter Belag, sehr geringe Amplituden im Wellenlängenspektrum, hohe Griffigkeit
AB08	Asphaltbeton 0/8	Flughafen Michelstadt	Sehr geringe Amplituden im Wellenlängen-Spektrum der Makrotextur, hohe Griffigkeit
OPA	Doppellagiger Offenporiger Asphalt	Flughafen Sperenberg	Mittlere Amplituden im Wellenlängen-Spektrum der Makrotextur, mittlere Griffigkeit

Tab. 3.2-1: Versuchsstrecken



Bild 3.2-17: Messfahrzeug bei der Einfahrt in die Messstrecke auf dem Testgelände in Sperenberg

genüber R51.03 etwas zu hohe Radlast bei gleichzeitig für die Antriebsleistung des Fahrzeugs etwas zu geringer Fahrzeuggesamtmasse. Dies wurde im Interesse eines überschaubaren Aufwandes bei der Herstellung der Schnitzreifen und bei der Versuchsdurchführung in Kauf genommen.

Die Vorbeirollmessungen wurden abgesehen von der Mischbereifung entsprechend der Richtlinie 2001/43/EC im Geschwindigkeitsbereich zwischen 60 und 80 km/h durchgeführt. Die beschleunigten Fahrten erfolgten im Gang 5L bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit des Referenzpunktes (Heck des Fahrzeuges) an der Linie BB (Bild 3.2-16 und Bild 3.2-17) von ca. 36 km/h und einer Motordrehzahl von 89 % der Nenndrehzahl.

Vorbeirollgeräusch, Ergebnisse

In Bild 3.2-18 sind die Ergebnisse der Vorbeifahrtmessung in Anlehnung an ECE R 117 (Vorbeirollen mit Glattreifen auf der Vorderachse und profilierten Reifen auf der Hinterachse) zusammengestellt. Die Messung mit Glattreifen (Rfn1) weist erwartungsgemäß einen sehr geringen Schallpegel auf. Auch wenn der Glattreifen mit fünf Umfangsrillen eine kleinere Bodenaufstandsfläche hat, ist der abgestrahlte Schallpegel nicht wesentlich geringer, entgegen der in der Literatur manchmal geäußerten Meinung.

Der Reifen 3 mit dem Blockprofil ist am lautesten. Das Klotzprofil in diagonaler Anordnung (Reifen 7

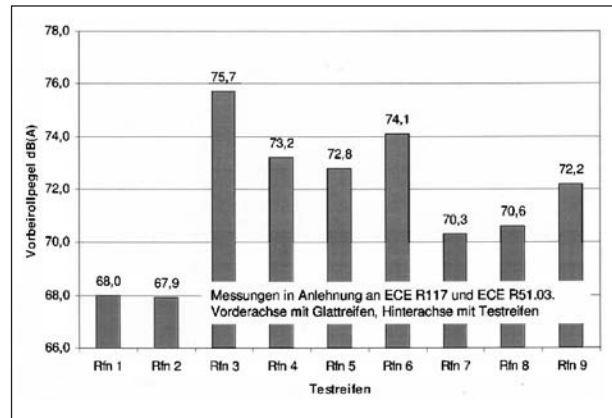


Bild 3.2-18: Vorbeirollpegel auf ISO-Belag, 70 km/h, VA-Glattreifen, HA-Testreifen

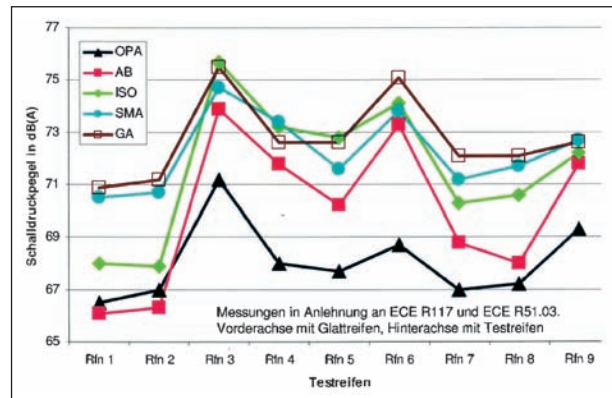


Bild 3.2-19: Rollgeräuschpegel bei 70 km/h auf unterschiedlichen Belägen

und Reifen 8) strahlt weniger Schall ab als das umfangsorientierte Vorderachsprofil (Reifen 5). Die offene Schulter des Reifen 8 erhöht den Pegel geringfügig gegenüber dem gleichen Profil mit geschlossener Schulter (Reifen 7). Die Änderung des Klotzprofils mit gebogener V-Anordnung (Reifen 4) in ein Klotzprofil mit gebogener Anordnung (Grobstruktur) führt zu einer Verringerung des abgestrahlten Schallpegels, jedoch ist dieser etwas höher als die Varianten Reifen 7 und Reifen 8.

Neben der Messung auf dem ISO-Belag wurden auch Messungen auf Gussasphalt, Splitt-Mastix-Asphalt, Asphaltbeton mit Jutetuch und einem Offenporigen Asphalt durchgeführt. Dabei zeigen die Reifen auf den verschiedenen Belägen auf den ersten Blick prinzipiell dasselbe Verhalten. Die geringsten Pegel wurden auf dem Offenporigen Asphalt gemessen und die höchsten Pegel auf dem Gussasphalt. Die Ergebnisse auf den anderen Belägen liegen dazwischen. Allerdings kommt es auch zu Rangfolgewechseln auf den verschiedenen Fahrbahnbelägen.

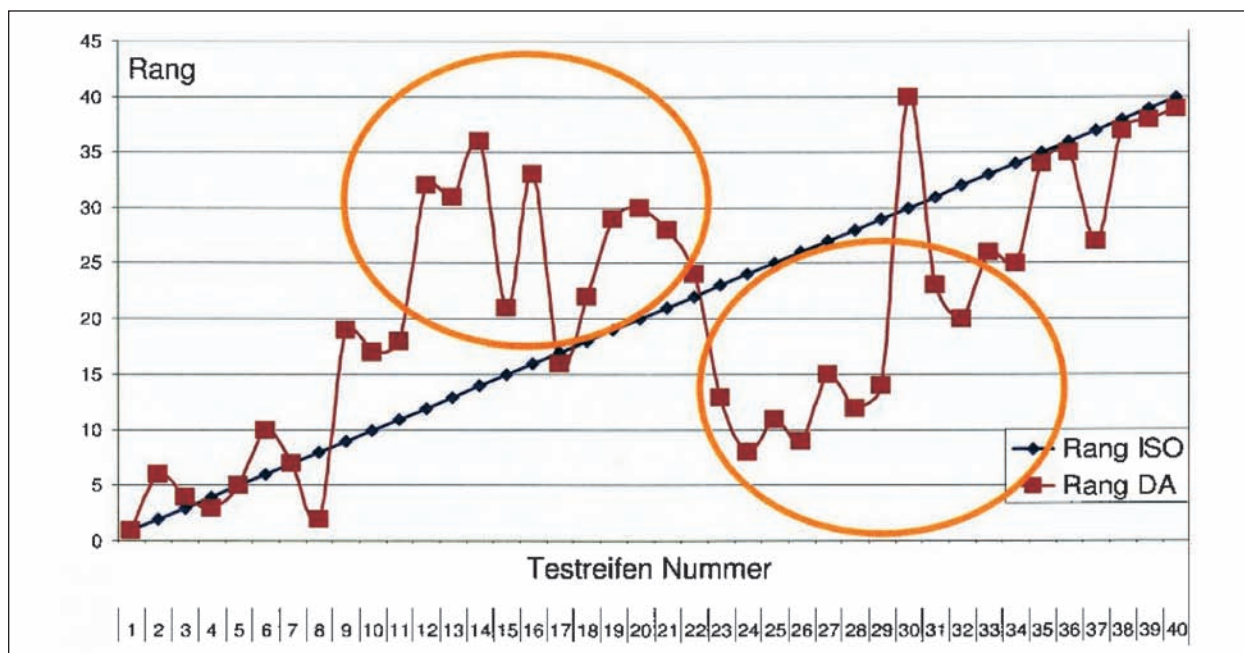


Bild 3.2-20: Veränderung der Reihenfolge bei unterschiedlichen Fahrbahn-Belägen

Dies konnte auch schon im ersten Teil des Projektes „Leiser Verkehr“ 1 beobachtet werden. Dort wurden 40 Reifen auf dem ISO-Belag und einem Drainasphalt gemessen. Wenn die Reifen geordnet nach dem Messergebnis auf dem ISO-Belag mit den Messergebnissen auf dem Drainasphalt verglichen werden, ergibt sich der in Bild 3.2-20 dargestellte Zusammenhang. Einige Reifen sind auf Drainasphalt lauter als auf dem ISO-Belag, andere sind leiser und einige haben den gleichen Rangplatz wie bei der Messung auf dem ISO-Belag. Auf Drainasphalt sind die Sommerprofile (Ausnahmen!) lauter als die Winterprofile, während auf dem ISO-Belag die Winterprofile lauter sind als die Sommerprofile.

Eine solche Auswertung mit den Lkw-Reifen im „Leisen Verkehr“ 2 bezogen auf das Ranking der Reifen auf dem Offenporigen Asphalt zeigt Bild 3.2-21. Der Trend ist nicht so deutlich zu erkennen wie bei den Pkw-Reifen, was zum einen darauf zurückzuführen ist, das die Lkw-Reifen sich vom Profilbild nicht so stark unterscheiden, wie dies bei den Pkw-Reifen der Fall war, und zum anderen ist die Geräuscentstehung bei Lkw-Traktionsreifen durch die grobe Blockstruktur nicht so abhängig von der Straßenoberfläche. Reifen 3 liegt auf allen Oberflächen auf Rang 9.

Die Reifen 1, 2, 4, 6 und 7 verschieben sich um einen Rang, Reifen 5 um zwei Ränge, und lediglich Reifen 9 zeigt einen deutlichen Einfluss der Straßenoberfläche.

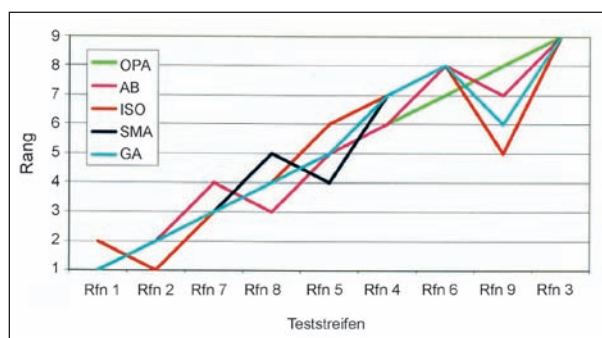


Bild 3.2-21: Einfluss des Belages auf die Rangfolge der Reifen

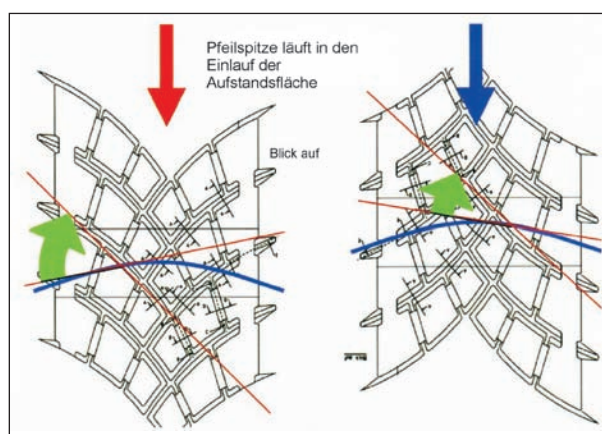


Bild 3.2-22: Profilgeometrie Reifen 4 im Verhältnis der Einlaufkontur

Auch die Laufrichtung des Reifens kann einen Einfluss auf die Geräuschabstrahlung haben. Reifen 4 zeigt dieses Verhalten deutlich. Rollt der Reifen in Richtung des blauen Pfeils (Bild 3.2-22), schlagen

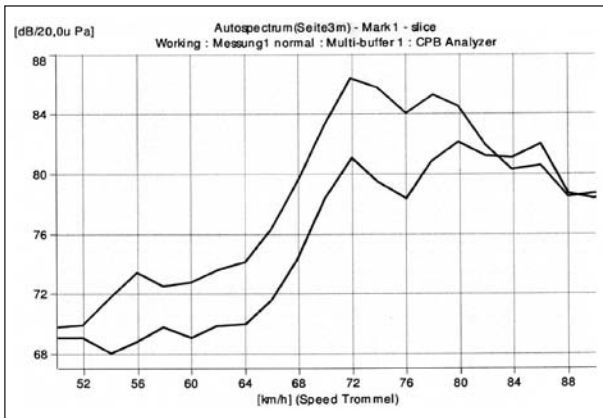


Bild 3.2-23: Vergleich der Geräuschabstrahlung unterschiedlicher Laufrichtung desselben Reifens

viele Profilblockkanten am Rande der Bodenaufstandsfläche gleichzeitig auf. Rollt der Reifen in Richtung des roten Pfeils, schlagen weniger Profilblockkanten gleichzeitig auf. Die Anregung des Reifens ist geringer und damit auch die Schallabstrahlung, wie in Bild 3.2-23 gezeigt.

Beschleunigte Vorbeifahrt, Ergebnisse

Das Gesamtgeräusch bei der beschleunigten Vorbeifahrt setzt sich aus dem Reifen/Fahrbahngeräusch (RFG) und dem Antriebsgeräusch (A) zusammen, wobei das RFG wiederum aus einem Rollanteil (R) und einem Momentanteil (M) besteht. Um das Reifen/Fahrbahngeräusch oder den Pegelzuwachs des Rollgeräuschs unter Antriebsmoment separat berechnen zu können, benötigt man das Antriebsgeräusch des Fahrzeugs ohne Reifen/Fahrbahngeräusch.

Üblicherweise geht man davon aus, dass Glattreifen unter Antriebsmoment nicht oder nur geringfügig lauter werden. Aus ausführlichen Messungen, bei denen das Antriebsgeräusch eines Lkw unabhängig von den Reifen-Fahrbahngeräuschen ermittelt wurde, lässt sich auf ISO-Asphalt eine momentabhängige Geräuscherhöhung des Glattreifens um ca. 1 dB ableiten (GAUTERIN (2005) [16]). Mit diesem Wert soll hier im Folgenden gearbeitet werden.

Für diese energetischen Betrachtungen und Berechnungen wird die Schallintensität als energetische Größe (Schalleistung pro Fläche) verwendet. Unter den gegebenen Bedingungen können die Werte des Schalldruckpegels und der Schallintensitätspegel gleichgesetzt werden. Allerdings sei auf einen Punkt hingewiesen: Die Schallintensitäten der Einzelquellen am Mikrophon sind abhängig vom

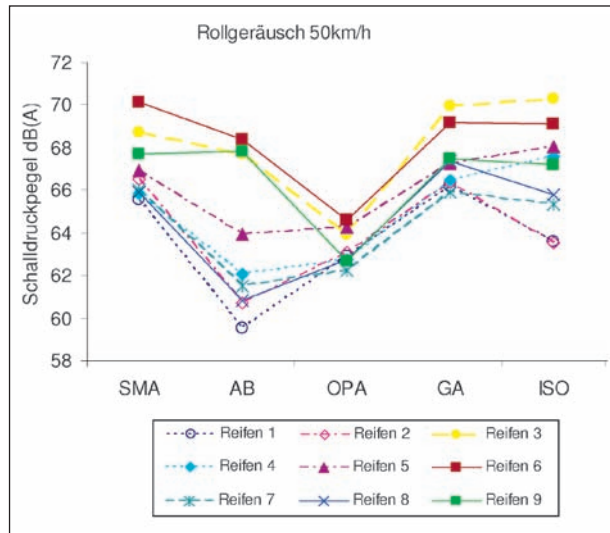


Bild 3.2-24: Vorbeirollpegel auf unterschiedlichen Belägen bei 50 km/h

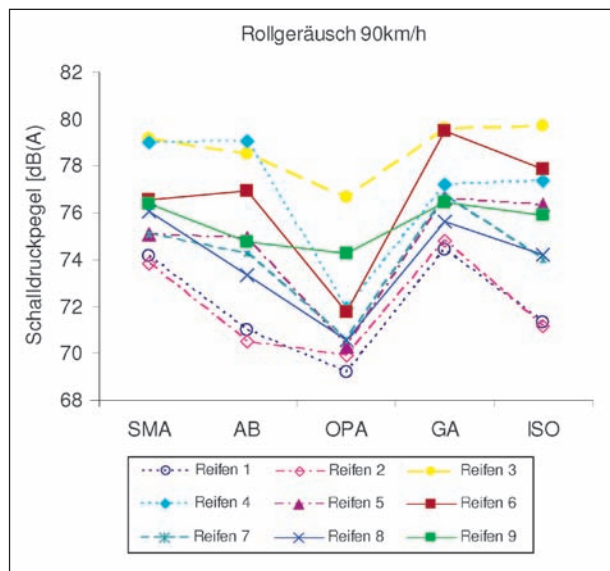


Bild 3.2-25: Vorbeirollpegel auf unterschiedlichen Bahnbelägen bei 90 km/h

aktuellen Ort des Fahrzeugs, da jede Quelle eine eigene Richtcharakteristik der Schallabstrahlung besitzt. Bei der Addition der Intensitäten muss dies genau genommen berücksichtigt werden. Da Trendaussagen auch auf Basis der gemessenen Pegelmaxima bei der Vorbeifahrt gewonnen werden können, soll hier zunächst die Ortsabhängigkeit vernachlässigt werden.

Die Maximalpegel des Vorbeirollgeräuschs sind für Geschwindigkeiten im innerstädtischen Bereich (50 km/h) und auf Autobahnen (90 km/h) in Bild 3.2-24 und Bild 3.2-25 dargestellt. Je nach Fahrbahnbelag ergeben sich Vorbeirollgeräuschpegel zwischen ca. 60 bis 70 dB(A) bei 50 km/h bzw. ca.

70 bis 80 dB(A) bei 90 km/h. Wie zu erwarten rollen die Reifen auf Offenporigem Asphalt durchweg sehr leise ab. Während bei innerstädtischer Geschwindigkeit sich die Reifen auf diesem Belag in ihrem Pegel wenig unterscheiden, spreizen die Werte bei Autobahngeschwindigkeit aufgrund unterschiedlicher Abhängigkeit der Reifen von der Rollgeschwindigkeit wesentlich weiter auf.

Interessanterweise gibt es für 50 km/h einige Reifenausführungen, die auf dem Asphaltbeton 0/8 leiser als auf Offenporigem Asphalt sind. Dies ist offensichtlich in einer geringeren Anregung dieser Reifen auf diesem Fahrbelag begründet. Dabei ist der Asphaltbeton nicht durchweg so anregungsarm: Reifen 3, 6 und 9, die breite und eher querorientierte Profilrillen aufweisen, sind zwar leiser als auf dem häufig verwendeten Splitt-Mastix-Asphalt und auf dem ISO-Asphalt, der Geräuschvorteil des Asphaltbetons 0/8 fällt hier jedoch deutlich geringer aus. Bei hoher Geschwindigkeit verliert der Asphaltbeton den Geräuschvorteil gegenüber dem Offenporigen Asphalt und liegt etwa auf einer Höhe mit Splitt-Mastix- und ISO-Asphalt. Einzig der Glattreifen (Reifen 1) sowie der Glattreifen mit umlaufenden Rillen (Reifen 2) blieben extrem leise. Die Geräuschzunahme deutlich querprofilierter Reifen über der Geschwindigkeit ist auf Asphaltbeton 0/8 sehr viel stärker als bei schwach querprofilierten Reifen. Asphaltbeton differenziert Geschwindigkeiten und Profilierungstyp des Reifens stärker, als es die anderen hier untersuchten Fahrbeläge tun. Nur der ISO-Asphalt erreicht die gleiche Pegelspreizung für unterschiedliche Reifenprofile, weist jedoch eine geringere Geschwindigkeitsabhängigkeit auf. Asphaltbeton 0/8 ist daher bezüglich des Geräusches eher für Bereiche mit geringer Fahrgeschwindigkeit geeignet. Wie sich zeigt, sollte der Verkehr dabei gleichmäßig fließen, da ein hohes Antriebsmoment das Reifen-Fahrbelaggeräusch deutlich querprofilierter Reifen insbesondere auf Asphaltbeton 0/8 stark anwachsen lässt (Bild 3.2-26). Gussasphalt mit der feinen Abstreuerung 2/3 ist stets laut, die Pegel ändern sich mit der Geschwindigkeit wenig und unterscheiden sich zwischen verschiedenen Reifen nicht sehr stark.

Splitt-Mastix-Asphalt weist im allgemeinen Vergleich mittlere, im Vergleich zu den hier getesteten Oberflächen eher höhere Geräuschpegel auf. SMA differenziert mittelstark zwischen verschiedenen Reifenprofilen und liefert einen mittleren Anstieg des Rollgeräusches über der Geschwindigkeit. Wie auch auf anderen Belägen sind stark querprofilierter

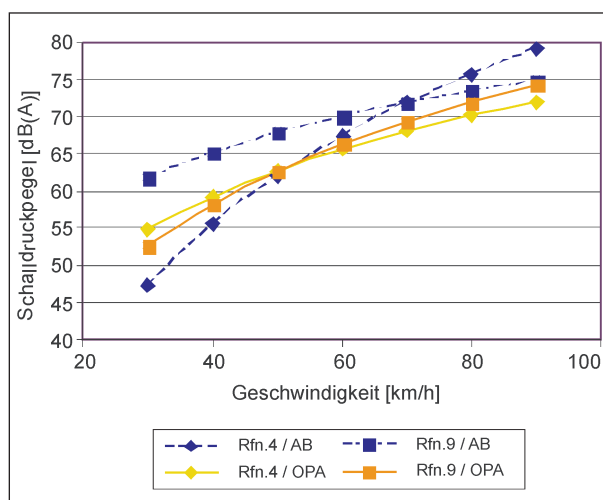


Bild 3.2-26: Einfluss der Geschwindigkeit auf den Rollgeräuschpegel

Reifen über den gesamten Geschwindigkeitsbereich lauter als umfangsorientierte Profile.

Bild 3.2-26 verdeutlicht, wie unterschiedlich der Einfluss der Geschwindigkeit ausfallen kann und dass Wechselwirkungen zwischen Reifenprofilierung und Fahrbelagoberfläche bestehen. Für Reifen 4 und 9 (Reifen, die sich in Anteil und Orientierung der Querrillen unterscheiden) ist jeweils auf Asphaltbeton 0/8 und auf Offenporigem Asphalt der Rollgeräuschpegel dargestellt. Während auf dem Offenporigen Asphalt Reifen 4 gegenüber Reifen 9 einen etwas schwächeren Anstieg des Pegels mit der Geschwindigkeit aufweist, steigt sein Pegel auf Asphaltbeton 0/8 deutlich stärker als bei Reifen 9 an.

Wie schon dargestellt hängt der Einfluss der Reifenprofilierung auf das Vorbeirrollgeräusch von der Fahrbelagoberfläche ab. Für 70 km/h ist aus Bild 3.2-27 ersichtlich, dass Gussasphalt, Splitt-Mastix-Asphalt und Offenporiger Asphalt zwar auf unterschiedlichem Niveau liegen, jedoch etwa gleich stark die Reifenprofile differenzieren. Demgegenüber ist der Einfluss der Profilierung auf den beiden Asphaltbeton-Strecken (Asphaltbeton 0/8 und ISO-Asphalt) deutlich größer. Auch erkennt man einzelne Rangfolgeumkehrungen bis etwa 3 dB zwischen den Reifen, zum Beispiel im Vergleich der ISO-Strecke mit Splitt-Mastix-Asphalt oder Offenporigem Asphalt, wenngleich über alle Reifen gesehen die Reihenfolge in etwa erhalten bleibt. Bei einer differenzierteren Betrachtung findet man, dass die Korrelation zwischen ISO-Asphalt und SMA mit einem Korrelationskoeffizient von $r = 0,47$ bis $0,88$ SMA nicht besonders gut ist. Die beste Korrelation

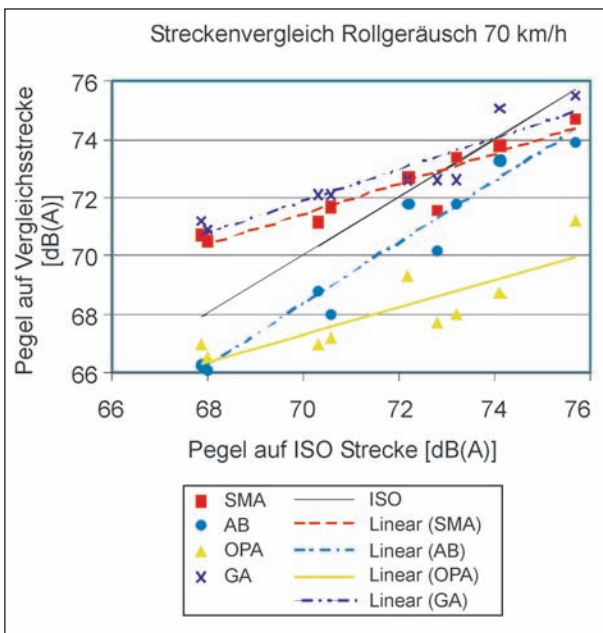


Bild 3.2-27: Rollgeräuschpegel bei 70 km/h im Vergleich zur Messung auf ISO-Asphalt

zum ISO-Asphalt ergab sich für alle Geschwindigkeiten erwartungsgemäß zum Asphaltbeton 0/8 ($r = 0,71$ bis $0,97$).

Um den Einfluss der Profilgestaltung auf den Vorbeirollpegel genauer zu untersuchen, wurde ein Profilgeometrie-Index entwickelt, der die Parameter Rillenzahl, Rillbreite, Rillenausrichtung, Klotzgröße und Anbindungen gewichtet und zu einem Einzahlwert zusammenfasst. Der kleinste Wert null ergibt sich für unprofilierte Reifen, große Werte erhält man bei einer starken Profilierung insbesondere auch in Querrichtung.

Der Profilgeometrie-Index 1 korreliert insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten relativ gut mit dem Vorbeirollgeräusch, die Korrelationskoeffizienten liegen bei 70 und 90 km/h zwischen 0,88 und 0,97 (s. Bild 3.2-28). Rollgeräusche auf Offenporigem Asphalt, SMA und Gussasphalt sind „robuster“, d. h. werden weniger von der Profilgestaltung beeinflusst als auf Asphaltbeton 0/8 und ISO-Asphalt. Diese eignen sich eher zu einer differenzierten akustischen Analyse von Reifenprofilen und sind hierfür als Teststrecken geeignet.

Hier ist allgemein der Einfluss der Profilgestaltung auf das Rollgeräusch größer.

Aus dem Geräusch der beschleunigten Vorbeifahrt wurde nach dem o. g. Verfahren das Reifen-/Fahrbahngeräusch berechnet und in Bild 3.2-29 dargestellt (der Anteil des Antriebstranges ist nicht ent-

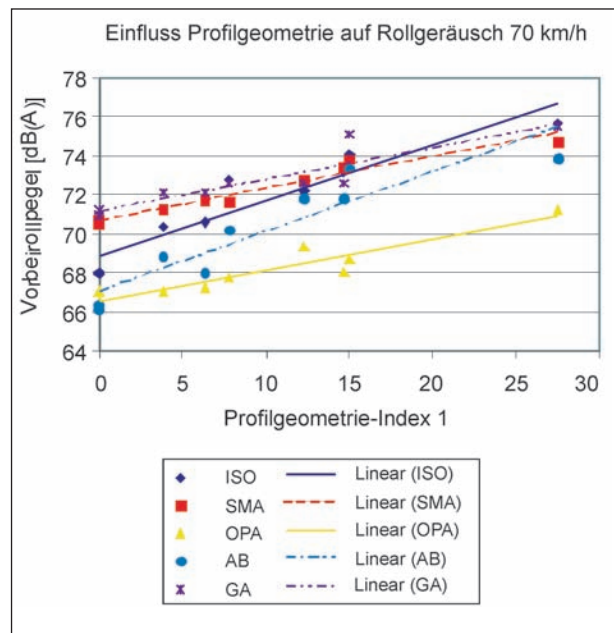


Bild 3.2-28: Profilgeometrie-Index und Rollgeräuschpegel bei 70 km/h

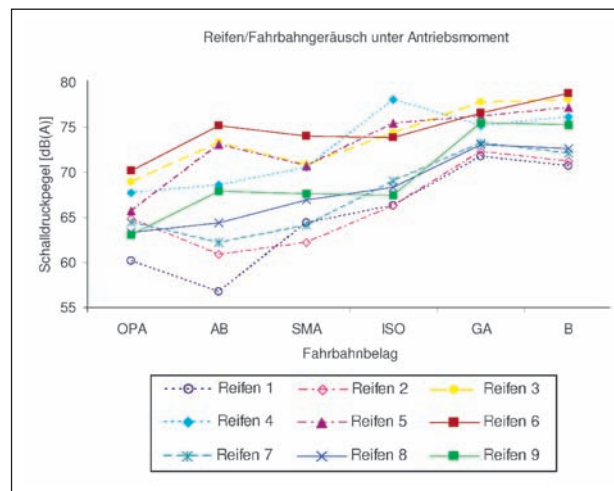


Bild 3.2-29: Reifen-Fahrbahngeräusch bei der beschleunigten Vorbeifahrt

halten). Kleinere Pegel sind aufgrund des Rechenverfahrens stärker fehlerbehaftet als hohe Pegel. Wie auch beim Vorbeirollgeräusch liefert der Offenporige Asphalt die niedrigsten Messwerte. Für stark profilierte Reifen mit deutlichem Querrillenanteil stellt Splitt-Mastix-Asphalt nach OPA akustisch die zweitbeste Wahl dar. Asphaltbeton 0/8 verträgt sich gut mit umfangsorientiert profilierten Reifen, diese Kombination kann ausgesprochen leise sein. ISO-Asphalt liegt im Mittelfeld der getesteten Beläge und führt zu einer Reihe von Rangfolgeumkehrungen gegenüber anderen Strecken. So werden die Reifen 3, 4, 5 und 7 auf ISO-Asphalt zu schlecht bewertet, Reifen 9 eher zu gut. Auf Gussasphalt sind

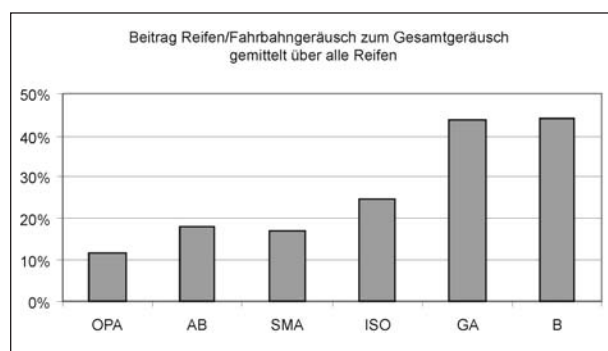


Bild 3.2-30: Anteil der Reifen bei der beschleunigten Vorbeifahrt – gemittelt über alle Reifen

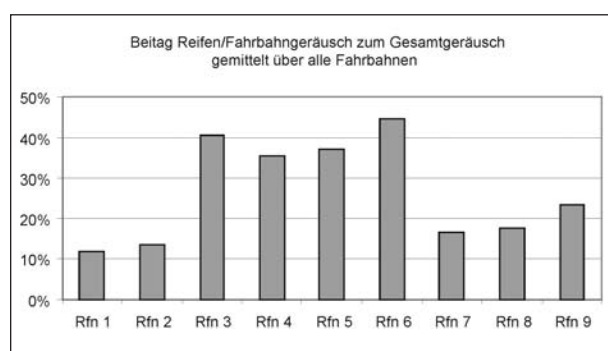


Bild 3.2-31: Anteil der Reifen bei der beschleunigten Vorbeifahrt – gemittelt über alle Fahrbahnen

alle Reifen laut und unterscheiden sich im Schalldruckpegel weniger als auf anderen Fahrbahnen. Der Einfluss von Fahrbahn und Reifen auf den Anteil des Reifen-Fahrbahngeräuschs am Gesamtgeräusch ist etwa gleich hoch. Er betrug an dem verwendeten Spezialfahrzeug mit deutlich geräuschreduziertem Antriebsstrang zwischen ca. 10 % und 50 % (s. Bild 3.2-30 und Bild 3.2-31). An einem Serienfahrzeug werden die Anteile des Reifen-/Fahrbahngeräuschs aufgrund des höheren Antriebsstranggeräuschs geringer ausfallen.

Der mit dem Vorbeiröllgeräusch korrelierende Profilgeometrie-Index 1 ist für die Vorhersage des Reifen-Fahrbahngeräuschs unter Antriebsmoment weniger gut geeignet. Es wurde daher ein weiterer Einzahlwert, der Profilgeometrie-Index 2, abgeleitet, der im Wesentlichen die Größe der Profilklötze berücksichtigt. Aus Bild 3.2-32 ist ersichtlich, dass ein Reifen mit hohem Profil-Index-2-Wert (große Profilblöcke, im Extremfall ein Glattreifen) deutlich günstiger im Geräusch ist. Dies deutet darauf hin, dass für die Geräuscherzeugung bei dem unter Antriebsmoment rollenden Reifen das Ausschlagen von Profilklötzen bedeutsamer ist als Reibeffekte größerer Reifen/Fahrbahn-Kontaktflächen. Der ge-

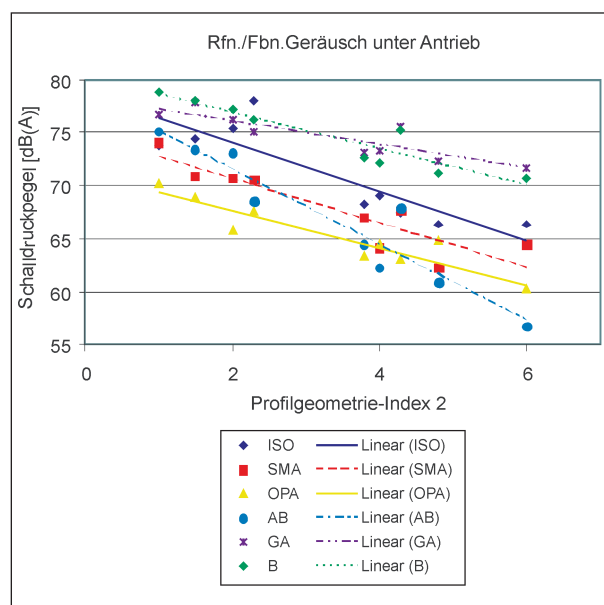


Bild 3.2-32: Profilgeometrie-Index 2 und das beschleunigte RFG

ringste Profileinfluss auf das Geräusch besteht auf Gussasphalt, der größte auf Asphaltbeton 0/8. Letzterer ist für geräuschoptimierte Profile sehr leise, für weniger optimierte Profile recht laut. SMA liegt mit einer mittleren Profilempfindlichkeit und einem recht niedrigen Geräuschniveau günstig und empfiehlt sich daher gerade, wenn mit dem Betrieb weniger geräuschoptimierter Reifen zu rechnen und Offenporiger Asphalt nicht verwendbar ist.

Die vorliegenden Messergebnisse zeigen den Offenporigen Asphalt sowohl im Rollen als auch in der beschleunigten Vorbeifahrt als leisesten der hier untersuchten Straßenbeläge. Günstig stellt sich auch der Asphaltbeton 0/8 insbesondere für eher umfangsorientierte Profile dar. Unter Antriebsmoment liegt auch der SMA-Belag geräuschniveau relativ günstig. Auf allen Belägen sind ein kleiner Profilgeometrie-Index 1 (wenig Querrillen) für geringes Rollgeräusch und ein großer Profilgeometrie-Index 2 (große Profilklötze) für geringes Reifen-Fahrbahn-Geräusch unter Antriebsmoment anzustreben. Weiterhin verringert eine weiche Laufstreifenmischung das Rollgeräusch und eine stärker dämpfende Mischung das Geräusch unter Antrieb deutlich (s. Bild 3.2-33).

Ein Reifen wird aus einer Reihe von Bauteilen aufgebaut, im Vulkanisationsprozess zu einem einzigen Teil zusammengefügt und muss im Betrieb die unterschiedlichsten Anforderungen an Sicherheit, Langlebigkeit, Rollwiderstandsarmut, Wirtschaftlichkeit etc. erfüllen. Es ist naheliegend, dass Ver-

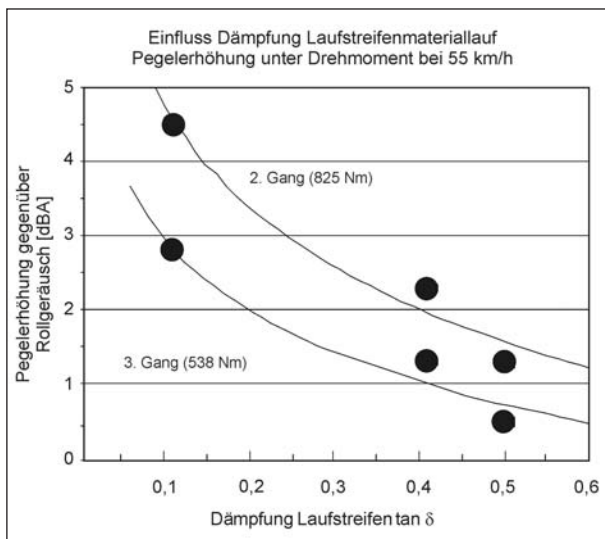


Bild 3.2-33: Materialdämpfung und Rollgeräusch bei Antriebsmoment

änderungen an dem einteiligen Produkt Reifen zugunsten einer dieser Eigenschaften stets Auswirkungen auf alle anderen Eigenschaften haben, leider meist nicht zu deren Vorteil. Das Lösen von Zielkonflikten ist daher eine der Hauptaufgaben der Reifenentwicklung.

So muss im Falle der Geräuschoptimierung von Reifen berücksichtigt werden, dass von Antriebsachsenreifen unter allen Witterungsbedingungen eine exzellente Traktion erwartet wird, die eine Querprofilierung erforderlich macht. Große Profilklotze neigen stark zum unregelmäßigen Abrieb und verringern dadurch die Lebensdauer des Reifens. Weiche Mischungen führen zu hohem Verschleiß und machen den Reifen damit unwirtschaftlich. Nfz-Reifen mit harter Laufstreifenmischung bremsen auf trockener und nasser Fahrbahn deutlich besser und führen zu einem besseren Fahrverhalten des Fahrzeugs. Schließlich ist die für geringeres Geräusch unter Antrieb günstige Laufstreifendämpfung kontraproduktiv für den in Zeiten hoher Energiepreise immer bedeutsamer werdenden Rollwiderstand. An den Schnitzreifen ist eine Bestimmung der nicht-akustischen Reifeneigenschaften aus Kostengründen nicht möglich. Alleine für den Dauerversuch werden über 100 Reifen von jedem Typ benötigt. Weiter sind einige Parameter mit Schnitzreifen nicht verlässlich ermittelbar. Daher werden aus diesen Gründen im nächsten Schritt Formreifen eingesetzt (vergleiche Bild 3.2-14 und deren Beschreibung). Es ist davon auszugehen, dass ein deutlicher Anteil des hier aus den Messdaten ableitbaren Geräuschpotenzials für die Abstimmung der Gesamteigenschaften der Reifen aufgezehrt

wird. Nur ein Reifen mit ausgewogenem Eigenschaftsmix hat im Markt eine Chance und nur ein Reifen, der im Markt ist, kann zur Geräuschminderung beitragen. Ziel muss es daher sein, die vorhandenen Zielkonflikte auf hohem Performance-Niveau zu lösen.

Das Schnitzreifenprogramm ergibt folgende Schlussfolgerungen:

- Die entworfenen Profile zeigen eine Reduzierung des Vorbeirollpegels von über 5 dB gegenüber den Referenzreifen.
- Die leisesten Reifenprofile sind „nur“ 2 dB lauter als Reifen ohne Profil (Glattreifen) gleicher Konstruktion.
- Die größten Pegeländerungen ergeben sich beim Verlassen der reinen Klotzstruktur in Richtung auf umfangsorientierte Profile. Hierbei müssen bei den Formreifen die erwarteten Einbußen in der Traktion besonders beachtet und minimiert werden.
- Ein Reifen, der auf dem ISO-Belag leise ist, muss nicht zwangsläufig leise auf einem anderen Belag sein.

3.2.5 Übertragung der Profile auf Formreifen und Ermittlung der nicht-akustischen Reifenparameter

Basierend auf den Kenntnissen aus den Schnitzreifenentwicklungen und den zugehörigen Messungen/Analysen sind vier Formreifen entwickelt und gebaut worden. Die Formreifen unterscheiden sich gegenüber den Schnitzreifen insbesondere in überarbeiteten und optimierten Profilen. Die Schnitzprofile 8 und 9 wurden durch Grundhebungen, Klotzverbindungen, Nutanpassungen sowie eine seitliche Profilöffnung akustisch und optisch optimiert. Zusätzlich sind zwei Klotzprofile mit einer optischen Querprofilierung, Klotzfasen und abgesenkten Bändern in den Schultern für dieses Programm entwickelt worden.

Als Referenz wurden für die Analysen und Messungen der Reifeneigenschaften wie Geräusch, Rollwiderstand, Haltbarkeit usw. zwei weitere handelsübliche Reifen eingesetzt. In Bild 3.2-35 sind die Geräuschergebnisse dargestellt. Wie bei den Schnitzreifen sind die Geräuschmessungen mit rollendem und beschleunigtem Fahrzeug auf den Testgeländen in Sperenberg, Michelstadt, und dem

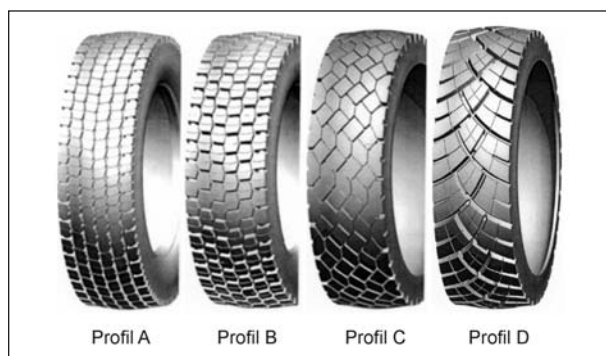


Bild 3.2-34: Profile der Formreifen

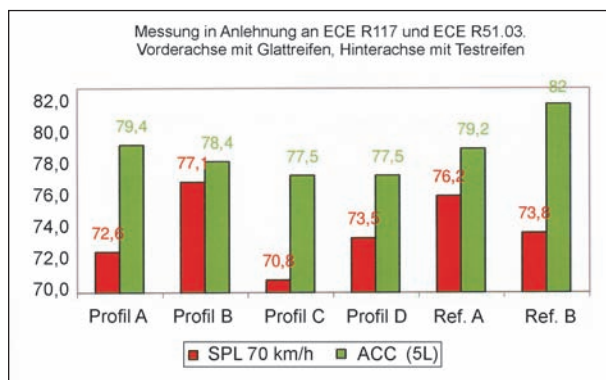


Bild 3.2-35: Rollende und beschleunigte Geräuschmessungen auf ISO-Belag in Anlehnung an ECE R117 und ECE R51.02

Contidrom in Jeverßen/Hannover durchgeführt worden. Auch sind die Geräuschpegel mit Glattreifen auf der Vorderachse und Testreifen auf der Hinterachse in Anlehnung an ECE R117 und ECE R51.02 ermittelt worden. Die Bereitstellung der Messgeräte und des Testfahrzeugs sowie die Messdurchführung erfolgten in enger Zusammenarbeit mit der BAST.

Die Übertragung der Profile aus dem ersten Schritt ist gut gelungen und die neuen Profile sind deutlich leiser als die Referenzreifen. Auf dem ISO-Belag ist das Profil C mit einem Vorbeirollpegel von 70,8 dB(A) und beschleunigten Pegel von 77,5 dB(A) (Schnitzreifen 70,2 dB(A) bzw. 77,4 dB(A)) wie bei den Schnitzreifen am leisesten. Die Werte sind innerhalb der Messtoleranz fast identisch. An der 2. Stelle liegt das neue Klotzprofil (Profil A) mit einem Vorbeirollpegel von 72,6 dB(A). Allerdings hat sich für die beschleunigte Vorbeifahrt keine Verbesserung ergeben.

Parallel zu den Geräuschmessungen erfolgte die Bestimmung der nicht-akustischen Reifenparameter im realen Einsatz auf der Straße, auf Testgeländen und auf Prüfständen. Die Straßentests zur Er-

mittlung von Haltbarkeit, Abrieb, Laufleistung usw. wurden in Zusammenarbeit mit mehreren Speditionen in Deutschland und im näheren europäischen Ausland durchgeführt. Insgesamt wurden über 600 Reifen (108 pro Profil und Referenzreifen) eingesetzt. In regelmäßigen Abständen wurden die gefahrenen Reifen im Reifenlabor vorgeführt, geprüft und vermessen. In der folgenden Liste sind die wesentlichen nicht-akustischen Parameter aufgeführt und beschrieben.

Nicht-akustische Reifenparameter

- **Rollwiderstand:**
Widerstand, der sich beim Abrollen des Reifens ergibt,
- **Laufleistung:**
Berechnete Laufleistung aus dem Abrieb- und Profiltiefenverlauf,
- **Abrieb:**
Abriebverhalten des Reifens,
- **Sägezahn:**
Ungleichmäßiger Abrieb einzelner Profilelemente, beispielsweise ungleichmäßiger Abrieb auf der Vorder- und Hinterseite eines Profilklotzes,
- **Rippenabsenkung:**
Ungleichmäßiger Abrieb über die Breite des Reifens,
- **Periodischer Abrieb:**
Ungleichmäßiger Abrieb auf dem Umfang des Reifens,
- **Schulterabrieb:**
Abrieb auf den Reifenseiten (Schultern),
- **Mittenabrieb:**
Abrieb in der Mitte des Reifens,
- **Schneetraktion:**
Traktionsverhalten auf sehr glatten (low μ) Oberflächen,
- **Beschleunigen auf Schnee,**
- **Bremsen auf Schnee,**
- **Steine fangen:**
Aufnahme und Freigabe von Steinen in Profilknoten und -rillen,
- **Traktion am Berg, nass:**
Traktionsverhalten auf nassen Oberflächen,

- Handling, trocken:
Rollverhalten der Reifen auf trockenen und ebenen Strecken,
- Geradeausfahrt
Kurstabilität bei Fahrt auf ebener Strecke,
- Längsrillenempfindlichkeit:
Spurtreue bei vorhandenen Längsrillen,
- Spurhaltung in Kurven,
- Spurhaltevermögen bei Kurvenfahrt,
- Spurwechsel:
Fahrverhalten beim zügigen Wechsel der Fahrspur,
- Lenk-Rückstellmoment:
Verhalten der Reifen beim Übergang von Kurvenfahrten,
- Kreisfahrt, nass:
Beurteilung der Quertraktion,
- ABS-Bremsen:
Profil Widerstandsfähigkeit
Resistenz des Profils gegenüber scharfen Ecken und Kanten,
- Profileinschnitte:
Neigung des Profils zu Einschnitten,
- Profilausbrechungen:
Profilabbrüche oder Profilkantenabbrüche,
- Nachschneidfähigkeit:
Eignung des Reifens zum Nachschneiden des Profils.

In Tabelle 3.2-2 sind die wichtigsten nicht-akustischen Reifenparameter aufgeführt, die zur Bewertung eines neu entwickelten Reifens geprüft werden müssen. Diese Parameter wurden durch objektive Messungen am Fahrzeug oder auf dafür optimierten Prüfständen ermittelt und als absolute oder relative Werte in % bezogen auf einen Referenzreifen (hier Referenzreifen A) angegeben. Dabei wird dem Referenzreifen der Wert 100 % zugeordnet und eine Verbesserung mit Werten mehr als 100 % angegeben.

Einige Reifeneigenschaften sind nur schwierig durch objektive Größen und Messungen bestimmbar. In diesen Fällen wird eine subjektive Bewertung durch den Fahrer oder die Testperson durchgeführt und mit einer Note dokumentiert. Die Schwierigkeit hierin besteht in der Reproduzierbar-

Notenskala	Klasse	Bewertung
10	A unrestricted recommendation	Without finding – ohne Befund
9		Beginning – beginnend
8		Very slight – sehr leicht
7	B conditional recommendation	Slight – leicht
6		Moderate – moderat
5		Medium – mittel
4	C no recommendation	Extensive – ausgeprägt
3		Strong – stark
2		Very strong – sehr stark
1		Extreme – extrem
0		Not evaluated – nicht bewertend

Tab. 3.2-2: Bewertungsschema

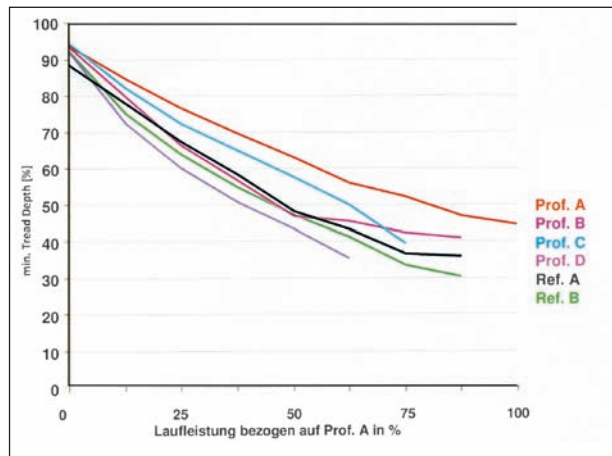


Bild 3.2-36: Restprofiltiefe über Laufleistung

keit der Bewertungsergebnisse, die nur durch ausreichend trainierte Personen erreicht werden kann. Die Testfahrer der Continental AG durchlaufen hierfür ein aufwändiges Schulungsprogramm und werden in regelmäßigen Abständen neu geschult. Ein hierfür verwendetes und übliches Bewertungsschema mit einer Notenskala von 1 bis 10 ist für die subjektive Beurteilung von Reifeneigenschaften in Tabelle 3.2-2 dargestellt.

Eine wesentliche Reifeneigenschaft stellt die Profiltiefe in Abhängigkeit der Laufleistung dar. In Bild 3.2-36 sind die Restprofiliefen aus den Dauerlaufversuchen mit den Speditionen für jeweils einen Testreifen dargestellt. Die Laufleistung ist auf den Reifen mit der höchsten Laufleistung (hier Profil A) bezogen. In Tabelle 3.2-3 sind dagegen die hochgerechneten Laufleistungen für alle 600 Testreifen enthalten. Die Stufen repräsentieren die jeweiligen Stufen der Reifen-Lebensläufe – also die Kilome-

Erwartete Laufleistung in % bezogen auf den Referenzreifen A						
Mess- stufe	Prof. A	Prof. B	Prof. C	Prof. D	Ref. A	Ref. B
1	158	82	122	88	100	94
2	141	102	113	88	100	111
3	140	95	110	93	100	97
4	143	101	108	86	100	106

Tab. 3.2-3: Berechnete Laufleistung



Bild 3.2-37: Periodischer Abrieb durch Einsatz der Retarder-Bremse

terleistung. Das Profil A zeigt hier eine überdurchschnittlich hohe Lebenserwartung im Vergleich mit den Referenzreifen.

In Bild 3.2-37 ist als weiteres Beispiel das Profilbild bei periodischem Abrieb dargestellt, wie er bei empfindlichen Reifen und Retardereinsatz entsteht. Dies führt bei der subjektiven Bewertung zu einer Abwertung auf eine Note 7. Bild 3.2-38 zeigt ein Reifenprofil mit Sägezahn im Anfangsstadium. Der Reifen hat noch fast die volle Profiltiefe, aber bei einem Reifen mit der Tendenz zur Sägezahnbildung verstärkt sich diese Tendenz und führt dann zu einer deutlichen Abwertung. Die Entwicklung einer Mittenabsenkung ist in Bild 3.2-39 aufgezeigt. Mit zunehmendem Abrieb wird der Abrieb in der Mitte größer als in Bereichen nahe der Seitenwand.

Die Nachschneidfähigkeit eines Reifens ist folgendermaßen definiert:

- Kategorie A (grün)-Nachschneidfähig für „long distance“
- Kategorie B (orange)-Nachschneidfähig für „regional traffic“
- Kategorie C (gelb)-Nachschneidfähig für „construction supplier“



Bild 3.2-38: Reifenabrieb mit Sägezahnausbildung

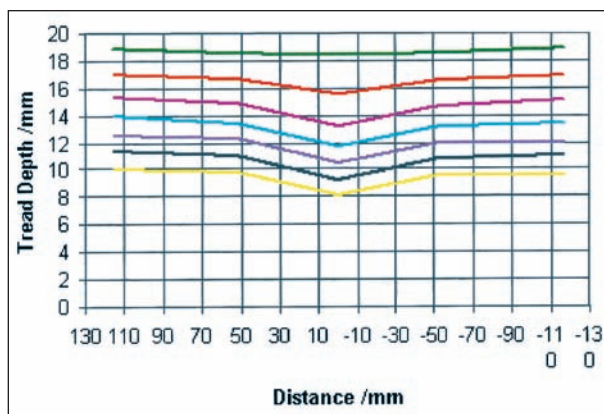


Bild 3.2-39: Abriebentwicklung, leichte Mittenabsenkung

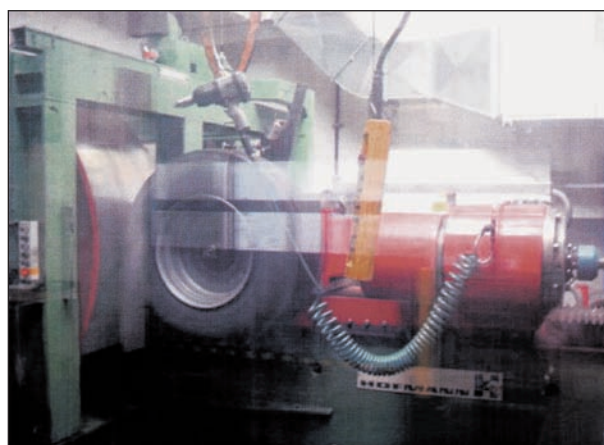


Bild 3.2-40: Trommelprüfstand zur Bestimmung des Rollwiderstandes

Bild 3.2-42 zeigt die Ergebnisse für die gebauten Varianten. Das Profil B zeigt die beste Gesamtnachschneidfähigkeit, während die Reifen C, D und der Referenzreifen A geringe Nachschneidfähigkeiten aufweisen. Allerdings ist die Verteilung in den Kategorien unterschiedlich. Die Mess-Strecke zur Ermittlung der Traktion am Berg ist in Bild 3.2-43 gezeigt und Bild 3.2-44 gibt einen Eindruck von den

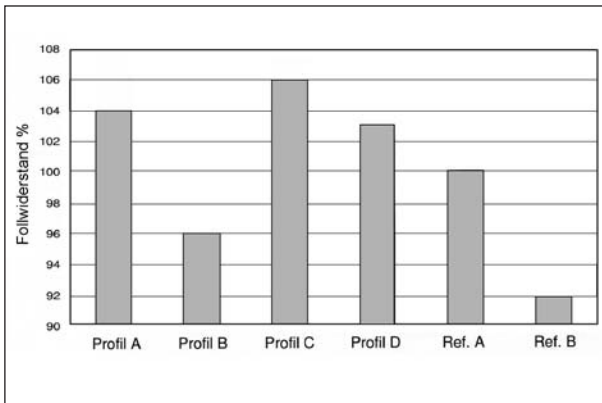


Bild 3.2.41: Rollwiderstand

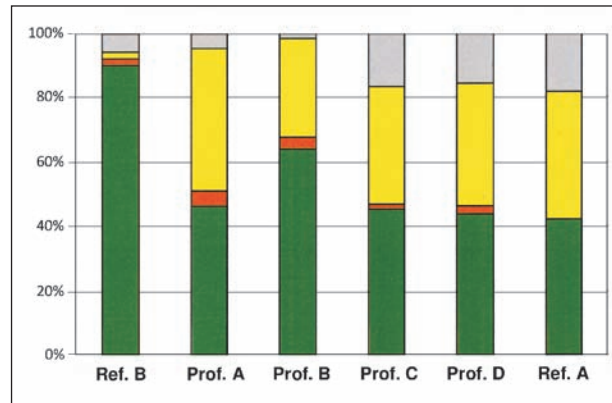


Bild 3.2.42: Nachschneidfähigkeit

Prüfung	Bewertung	Profil A	Profil B	Profil C	Profil D	Ref. A	Ref. B
Traktion am Berg 5%-Steigung, Nass	%	101		82,9		100	107
Traktion am Berg 7%-Steigung, nass	%	103		48,6		100	110
Geradeausfahrt	Note	6,5		5,5		6,5	6,5
Längsrillen-Empfindlichkeit	Note	7		6		7	7
Spurhalten in Kurven	Note	7		6,5		6,5	7
Spurwechsel	Note	6,5		6		6,5	6,5
Lenk-Rückstellmoment	Note	6		6		6	6
Kreisfahrt, u-Quer	%	101,2		102,9		100	100,7
ABS-Bremsen	%	100		97,3		100	102
Rollwiderstand	%	104	96	106	103	100	91,8
Laufleistung	%	143	95	110	86	100	106
Sägezahn	Note	7	5	3	3	6	8
Rippenabsenkung	Note	8	10	10	10	8	9
Periodischer Abrieb	Note	7	7	8	8	10	9
Schulterabrieb	Note	8	7	8	8	7	8
Schrägabrieb		10	9	10	10	8	7
Mittensabrieb	Note	9	8	9	7	7	10
Beschl. auf Schnee	%	102		80		100	102
Bremsen auf Schnee	%	94		89		100	101
Steinefang	Rang	1		4		2	3
Profil Widerstandsfähigkeit	Note	10	10	10	10	10	9
Nachschneidfähigkeit	%	94	96	82	83	81	90
Geräusch, VA: Glatt; HA: Teststreifen	dB	72,6	77,1	70,8	73,5	76,2	73,8

Tab. 3.2-4: Zusammenfassung der Ergebnisse

Winterfahrversuchen zur Ermittlung der Schneetraction. Alle Ergebnisse sind in Tabelle 3.2-4 zusammengestellt und in Signalfarben gekennzeichnet. Das Profil A erreicht als einziges eine positive Bewertung, bei der alle Eigenschaften besser als die Referenz oder auf gleichem Niveau sind. Das Profil B erreicht im Rollwiderstand, in der Laufleistung

und akustisch nicht das Niveau des Referenzreifens. Noch schlechter sieht es beim Profil C aus. Hier sind Traktion am Berg, ABS-Bremsen, Sägezahn und Beschleunigung auf Schnee schlechter als der Referenzreifen und zusätzlich Geradeausfahrt, Längsrillen-Empfindlichkeit, Spurwechsel, Kreisfahrt, Bremsen auf Schnee, Steine fangen und



Bild 3.2.43: Rampenauffahrt zur Bestimmung der Traktion am Berg



Bild 3.2.44: Winterfahrversuch, Ermittlung der Schneextraktion

Nachschneidbarkeit nur auf dem Niveau des Referenzreifens. Da die Reifen B und D in einigen wesentlichen Kriterien nicht das Niveau der Referenzreifen erreicht haben, wurden bei diesen Reifen nicht alle Prüfungen durchgeführt.

3.2.6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Schwerpunkt des Projektteils „Grundlagenuntersuchung und Optimierung von Lkw-Reifen“ war die geräuschnmäßige Optimierung von Lkw-Reifen für den Langstreckeneinsatz von Volumentransportern. Hierbei ging es um die Entwicklung, den Bau und die geräuschnmäßige Verbesserung von Niederquerschnittsreifen (60 %) (Höhen-/Breitenverhältnis des Reifens = 60 %) für Antriebsachsen von schweren Lkw. Bei der Entwicklung von Lkw-Reifen ist eine Vielzahl von Gebrauchseigenschaften zu erfüllen, zwischen denen Zielkonflikte bestehen. Um ein konkurrenzfähiges Produkt am Markt zu platzieren, müssen alle Anforderungen an den Reifen erfüllt werden. Nutzfahrzeugreifen unterliegen dabei gänzlich anderen Anforderungen als Pkw-Reifen.

Die Wirtschaftlichkeit eines Lkw-Reifens ist sehr wichtig. Dabei steht die Laufleistung im Vordergrund. Alle sicherheitsrelevanten Eigenschaften müssen dabei gegeben sein, besonders auch das Abriebverhalten soll gleichmäßig sein. Gerade für den Einsatz im Fernverkehr wird weniger Abrieb erzeugt, weil das Beschleunigen aus dem Stillstand (Antriebsachse) und das Abbremsen (alle Achsen) deutlich weniger auftreten. Daher wurde bei dem zu entwickelnden geräuschnarmen Antriebsachsreifen auch besonderes Augenmerk auf das Abriebverhalten gelegt. Durch die spezielle Aufgabe der Hinterachse, die Antriebskräfte auf die Straße zu übertragen, ergeben sich gegenüber dem Vorderachsreifen zusätzliche Anforderungen, die insbesondere auf die Profilstaltung deutliche Auswirkungen haben. Während der Vorderachsreifen im Wesentlichen mit geräuschnarmen Umfangsrillen auskommt und gerade dadurch seine Aufgabe als spurführender Lenkachsreifen besonders gut wahrnehmen kann, braucht ein Hinterachsreifen je nach Einsatzfall unterschiedlich ausgeprägte Querrillen, um auch auf ungünstigem Untergrund, z. B. auf Schnee und nassen nicht griffigen Fahrbahnen, die nötige Traktion zu erreichen. Aufgrund dieser Randbedingungen waren die Designparameter so zu wählen und Maßnahmen zur Geräuschnreduzierung am Reifen so anzuwenden, dass eine Balance mit anderen Reifeneigenschaften für die neuen 60%-Reifenlinie für den Fernverkehrseinsatz entstand.

Die Arbeiten dazu erfolgten in zwei Schritten. Im ersten Teil wurde gezielt der Einfluss der Profilierung auf das Vorbeifahrgeräuschn untersucht. Im zweiten Teil wurde dann zusätzlich die Reifenkontur betrachtet. Die Optimierung erfolgte zunächst durch Anwendung eines bislang im Wesentlichen für Pkw-Reifen verwendeten einfachen Profilloptimierungstools, das eine Vorauswahl von Profilentwürfen hinsichtlich des Geräuschncharakters erlaubt. Es wurden Schnitzreifen gefertigt und im Geräuschn geprüft. Nach geeigneter Weiterentwicklung der Profilentwürfe und Auswahl der erfolgversprechendsten Varianten wurden Formreifen erstellt und einer Prüfung aller entscheidenden Gebrauchseigenschaften unterzogen.

Zur Beurteilung des Fahrbahneinflusses und des Reduzierungspotenzials durch Beläge wurden neben den üblichen Geräuschntests auf der Vorbeifahrgeräuschnmessstrecke nach ISO 10844 auch Untersuchungen auf üblichen und neuartigen Autobahnbelägen durch den Projektpartner BAST durchgeführt.

Insgesamt kamen vier verschiedene Profile in den Testeinsatz und wurden mit zwei Referenzreifen verglichen. Bei den Akustiktests konnte ein Reifen mit einer Geräuschreduzierung von bis zu 5,4 dB(A) gegenüber dem Referenzreifen überzeugen.

Doch an einer Eigenschaft eines modernen Reifens Änderungen vorzunehmen heißt, viele andere Eigenschaften des Produktes mit zu beeinflussen. Ein Reifenprofil ist für eine Reihe sicherheitsrelevanter Eigenschaften verantwortlich. Ein Slick – also ein profiloser Reifen und damit das akustische Optimum – mag auf trockener Straße gute Eigenschaften haben, doch bei Regen, Schnee oder gar Glatteis ist eine Profilierung unerlässlich, um Brems- und Antriebskräfte zu übertragen und Seitenführung zu gewährleisten.

So kann zwar ein geräuscharmer Reifen produziert werden, doch erfüllt er nicht gleichzeitig die Anforderungen an alle wichtigen Gebrauchseigenschaften. Unter Berücksichtigung aller Kriterien ist nicht der leiseste Reifen Testsieger, sondern der im Gesamtpaket sicherste und um 3,8 dB(A) gegenüber dem aktuellen Produkt geräuschreduziertere Reifen. Die Markteinführung dieses Reifens hat im April 2009 erfolgreich stattgefunden.

Aber dies ist nur ein weiterer Schritt auf dem Weg zum „Leisen Verkehr“. Es sind weitere Schritte erforderlich, um das Ziel zu erreichen. Nach dem Green Paper der EU zur Future Noise Policy von 1996 [7] sind 20 % der Bevölkerung in der EU Geräuschpegeln von mehr als 65 dB(A) LAeq durch Verkehrslärm ausgesetzt, was aus wissenschaftlicher und besonders aus medizinischer Sicht nicht akzeptabel ist. Weitere 45 % der Bevölkerung sind noch als störend empfundenen Pegeln von mehr als 55 dB(A) LAeq ausgesetzt. Bei der Zunahme des Individual- und Lastverkehrs, die sich in den nächsten Jahren fortsetzen wird, müssen daher alle Ursachen für die Entstehung

von Reifen-Fahrbahngeräuschen ins Augenmerk genommen werden, um den Anforderungen von Anwohnern und Verkehrsteilnehmern gleichermaßen nachzukommen.

Der I-INCE Report: „Noise Emissions of Road Vehicles – Effect of Regulations“ [8] kommt zu dem Schluss, dass die von den Reifen während des „normalen“ Fahrens emittierten Geräusche wesentlich verringert werden müssen, da ansonsten Regelungen zur Minderung des Verkehrslärms unwirksam sind. Reifen-/Fahrbahngeräuschreduzierungen lassen sich danach durch Richtlinien wie die 2001/43/EC erreichen, die ab August 2003 in der EU stufenweise Geräuschgrenzwerte für Reifen festlegt, damit die 25 % lautesten Pkw- und Lkw-Reifen aus dem Markt genommen werden. Die gesamte Reifenpalette mit tausenden verschiedenen Produkten auf die gesetzlichen Forderungen in Entwicklung und Produktion abzustimmen sowie die notwendigen Zertifizierungen durchzuführen ist nicht von heute auf morgen möglich. Für die Umstellung älterer Reifenmodelle, die im Ersatzmarkt verkauft werden, lässt der oberste europäische Gesetzgeber den Reifenherstellern noch Zeit. Je nach Größe bleibt bis maximal Anfang Oktober 2011 Zeit, alle Produkte den neuen Grenzwerten anzupassen, bzw. die Fortsetzung von 21001/43/EC wird für das Rollgeräusch von Reifen neue Grenzwerte festlegen. Für die Reifenindustrie ist die Richtlinie 2001/43/EC bereits die zweite den Reifen betreffende gesetzliche Geräuschforderung, denn schon seit langem existiert die Geräuschtypprüfung für das Gesamtfahrzeug gemäß ISO 362, woraus sich ebenfalls Forderungen an den Reifen ableiten. Continental trägt ausdrücklich die Bemühungen des Gesetzgebers zur Reduzierung von Verkehrsgeräuschen mit. Sie stehen im Einklang mit den Unternehmenszielen, in denen die Umweltverträglichkeit der Produkte verankert ist. Die Arbeiten im Projekt „Leiser Verkehr“ sollten nicht eingestellt, sondern mit einem dritten Teil fortgesetzt werden, in dem u. a. Möglichkeiten zur Entwicklung lärmarmen Lkw-Reifen für den Regionalverkehr erarbeitet werden.



Bild 3.2-45: Entwicklung eines leiseren Antriebsachsenreifens

Literatur

- [1] van KEULE: Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise, w.03.dw.10.r.61, 2003
- [2] KROPP, W.: WP C.1 Simulation and Evaluation. Guideliness for Noise Reduction, SILENCE deliverable, 2006
- [3] HAYDEN, R. E.: "Roadside Noise from the Interaction of a Rolling Tire with the Road Surface", Purdue Noise Control Conference, 1971
- [4] EJSMONT, J., SANDBERG, J. U., TARYMA, S.: "Influence of Tread Pattern on Tire/Road Noise", SAE Paper 841238, 1984
- [5] NELSON, P. M.; PHILLIPS, S. M: "Quieter Road Surfaces", TRL Annual Review, 1997
- [6] NELSON, P.; UNDERWOOD, M.C.P.: "Lorry tyre noise", Proceedings of the conference on vehicle noise and vibration. Institute of Mechanical Engineers, Paper number C139/84, London, 1984
- [7] EU, „Future Noise Policy – European Commission Green Paper“ DG XI, European Commission, Brussels, 1996
- [8] SANDBERG, U.: Noise Emissions of road vehicles – effect of regulations, Final Report by the I-INCE Working Party on the effect of regulations on road vehicle noise, 2001 July in Noise/News International, pp. 150-206, Vol. 9, No. 3, 2001 September
- [9] KRIEGER, B.: Leise Straßenbeläge, NVH bei modernen Nutzfahrzeugen, HdT Essen, Juni 2006
- [10] Auto Jahresbericht 2004, VDA, Frankfurt, 2004
- [11] GAUTERIN, F.: Möglichkeiten zur Lärmreduzierung durch moderne Reifentechnik, ADAC Fachforum: Lärminderung in Städten und Gemeinden, Hamburg, 2005
- [12] STEVEN, H.: From hot spots to research needs in road transport noise, CALM workshop: Road maps for future research in environmental noise, Brüssel, 2006
- [13] WEIßENBERGER, W.: Einführung in den Schallschutz im Straßenverkehr, 2. Informationstage Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in der Praxis – zweilagige Offenporige Asphalte, Bayrisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, 2004
- [14] STEVEN, H.: Statistik realer Fahr- und Betriebszustände, Tagung Geräuschminderung bei Kraftfahrzeugen, H.-E. MEIER (Ltg.), März 2000
- [15] BECKENBAUER, I., et al.: Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahngeräusch, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 847, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (Hrsg.), Bonn, 2002
- [16] GAUTERIN, F.: Reifen/Fahrbahngeräusche: Wo geht es hin? VDA Technischer Kongress 2005, Ingolstadt, 2005
- [17] HAUG, G., HELFER, M.: Ursachen und Einflussfaktoren der Geräuschbildung Reifen-Fahrbahn bei unterschiedlichen Messverfahren, FKFS, Stuttgart, 1995
- [18] BRINKMEIER, M.; NACKENHORST, U.; BIERMANN, J.; von ESTORFF, O.; PETERSEN, S.: Simulation and Analysis of Tire Road Noise Using a Finite Element Approach, Euronoise 2006, Tempere, 2006
- [19] BSCHORR, O.: Reduktion von Reifenlärm, Automobil-Industrie 6/86, pp. 721-728

3.3 Teilprojekt „Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss des Antriebsmoments auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“

Prof. Dr. rer.nat. F. Gauterin
 Dipl.-Ing. S. Grollius
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
 Institut für Fahrzeugsystemtechnik
 Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

3.3.1 Zielsetzung

Ständig fortschreitende Technologien im Bereich des Kraftfahrzeugbaus lassen die Anforderungen an moderne Pkw immer größer werden. Dabei steht heute neben der Erhöhung von Sicherheit und Fahrkomfort vermehrt – auch durch das ständig steigende Verkehrsaufkommen bedingt – die Lärm- und Umweltbelastung im Vordergrund.

Da im Bereich der Lärmreduzierung das Antriebsgeräusch von Pkw in den vergangenen Jahren bedeutend reduziert werden konnte, hat das Reifen-Fahrbahn-Geräusch auch im Hinblick auf die Einhaltung von Typprüfvorschriften an Bedeutung gewonnen. Nach heute gültigen Prüfverfahren für das Außengeräusch erstreckt sich die Messstrecke über 20 m zuzüglich der Fahrzeuglänge, wobei sich die Messmikrofone seitlich 7,5 m von der Fahrzeuglängsachse entfernt befinden. Der Messaufbau ist schematisch in Bild 3.3-2 abgebildet.

Nach dem alten Verfahren wird mit 50 km/h Fahrzeuggeschwindigkeit im 2. und 3. Gang in die Messstrecke eingefahren und mit Volllast beschleunigt, dadurch werden eine sehr extreme Fahrsituation und die wirklichen Schallquellen nur unzureichend abgebildet. Durch das neue Verfahren wird das Reifen-Fahrbahn-Geräusch gegenüber den Antriebsgeräuschen hervorgehoben und der Tatsache Rechnung getragen, dass moderne Pkw teilweise über 7 bis zu 8 Gänge verfügen. Bei Nutzfahrzeugen liegt die wesentliche Änderung des neuen gegenüber dem alten Verfahren in der Anhebung der Radlast auf 75 % der Maximallast, einer auf 30 bis 40 km/h erhöhten Fahrgeschwindigkeit und einer auf 85 bis 89 % der Nenndrehzahl gesteigerten Motordrehzahl.

Um der geänderten Gesetzgebung Rechnung zu tragen, muss bei der Verkehrslärmreduzierung dem

Reifen-Fahrbahn-Geräusch verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet und, obwohl die Beschleunigungen der Pkw beim neuen Verfahren geringer ist, der Einfluss des Antriebsmomentes auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch bestimmt werden. Dies gilt insbesondere für schwere Nutzfahrzeuge, die nach wie vor unter hohem Antriebsmoment und erhöhter Radlast geprüft werden.

Der Reifen-Innentrommel-Prüfstand (IPS) des Instituts für Fahrzeugtechnik und Mobile Arbeitsmaschinen (IFFMA) der Universität Karlsruhe erlaubt derzeit keine Untersuchung von Reifen schwerer Nfz. Daher wurde für die spezielle Prüfumgebung am IPS zunächst ein geeignetes Akustikmessverfahren zur Analyse von Pkw-Reifen erarbeitet [1] und auf seine Anwendbarkeit hin untersucht [2]. Zukünftig wird am IFFMA ein nutzfahrzeugreifen-tauglicher Innentrommel-Prüfstand aufgebaut, der die Untersuchung von Nfz-Reifen erlaubt.

3.3.2 Messverfahren und Messumgebung

Innerhalb des Innentrommel-Prüfstands des Instituts für Fahrzeugtechnik und mobile Arbeitsmaschinen, in diesem Bericht als IPS bezeichnet, läuft der Reifen, wie aus Bild 3.3-1 links ersichtlich, durch eine entsprechende Radaufhängung geführt, auf der Innenseite einer zylindrischen Trommel mit 3,8 m Durchmesser. Am IPS ist die Einstellung der Radlast, des Schräglauf- und des Sturzwinkels mit Hilfe von hydraulischen Steuereinrichtungen möglich. Bei Umfangskraftmessungen wird das zu untersuchende Rad mittels eines Hydraulikmotors angetrieben oder gebremst, wobei die innerhalb dieses Berichts dargestellten Untersuchungen jeweils im angetriebenen Zustand durchgeführt wurden. Die am Rad angreifenden Kräfte und Momente werden mit einer 6-Komponenten-Messnabe gemessen, die zwischen Rad und Radlagerung angeordnet ist und deren Messsystem mit Raddrehzahl mit rotiert. Dadurch werden nur die am Rad angreifenden Kräfte und Momente ohne Beeinflussung durch die Antriebswelle gemessen. Weiterhin ist am IPS die Montage unterschiedlicher Fahrbahnbeläge möglich, für die innerhalb dieses Berichts vorgestellten Messungen wurde immer Safety-Walk als Fahrbahnoberfläche gewählt.

Basierend auf den Recherchen zum Stand der Technik zu Einflussgrößen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch und zur Messtechnik der Geräuscherfassung wurde innerhalb des Berichtszeitraums die Messumgebung definiert.

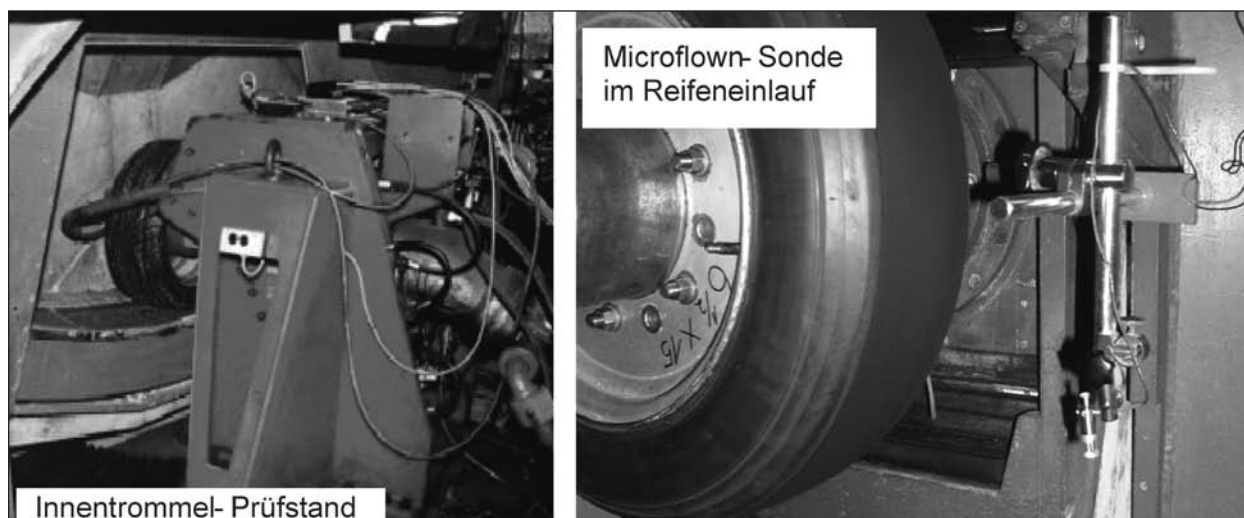


Bild 3.3-1: Innentrommel-Prüfstand (IPS) des Instituts für Fahrzeugtechnik (links) und mobile Arbeitsmaschinen und Position der Microflow-Sonde im Reifeneinlauf (rechts)

Als geeignete Sensoren zur Erfassung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche am IPS konnten die Schallintensitätssonde der Firma Microflow sowie zwei vorpolarisierte Kondensatormikrofone der Firma Brüel & Kjaer ermittelt werden. Zur Bestimmung des Geräuscheinflusses des Radantriebs bei Messungen unter Umfangskrafteinfluss wurden zwei 3-axiale Beschleunigungssensoren der Firma Brüel & Kjaer an großen schallabstrahlenden Flächen des Radmotors angebracht. Die im Reifeneinlauf zum Einsatz gekommene Microflow-Sonde ist in Bild 3.3-1 rechts abgebildet. Die Sonde zeichnet sich gegenüber gewöhnlichen Kondensatormikrofonen dadurch aus, dass zeitgleich Schalldruck und -schnelle gemessen werden können und somit die Schallintensität direkt berechnet werden kann. Dabei unterscheidet sich die Microflow-Sonde (PU-Sonde) von der verbreiteten Zweimikrofontechnik dadurch, dass die Schnelle direkt durch einen weiteren Sensor gemessen wird. Dieser Sensor besteht aus zwei dicht nebeneinander liegenden geheizten Drähten, deren Temperaturdifferenz bedingt durch konvektiven Wärmetransport proportional zu Schallschnelle ist. Damit liefert das so genannte Microflow-Element ebenfalls eine Information über die Strömungsrichtung [12]. Außerdem ist die Microflow-Sonde durch ihre wesentlich kleinere Bauform besser für den Einsatz innerhalb des begrenzten Einbauraums am IPS geeignet. Für die innerhalb dieses Berichts dargestellten Ergebnisse wurden allerdings nur die Signale des Mikrofon-Elements der Microflow-Sonde im Einlauf ausgewertet, um eine Vergleichbarkeit mit dem im Auslauf verwendeten Mikrofon zu gewährleisten.

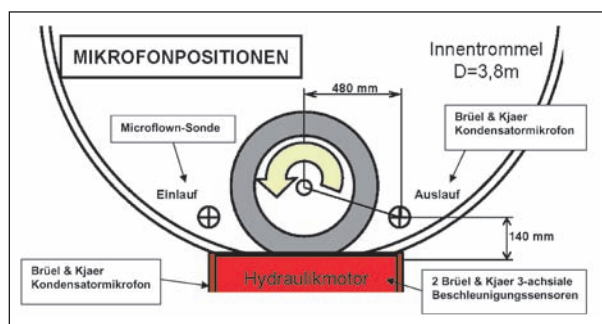


Bild 3.3-2: Messpositionen im Reifenein- und -auslauf sowie am Hydraulikmotor mit den je Position verwendeten Sensoren

Eine akustische Schalldämmung zur Minderung des Geräuscheinflusses des Radmotors durch Kapselung der Antriebseinheit konnte innerhalb des kurzzeitigen Projektzeitraums auch in Hinblick auf die fortwährende Nutzung des Prüfstandes für andere Messungen nicht realisiert werden. Vielmehr werden Frequenzbereiche, in denen das Antriebsgeräusch von untergeordneter Bedeutung ist, ermittelt und für die weitere Auswertung verwendet. Insgesamt kommt somit die in Bild 3.3-2 dargestellte Messsensorik zum Einsatz. Die Sensoren im Ein- bzw. Auslauf liegen bei diesen Messungen im Unterschied zu den Mikrofonpositionen nach dem ISO-Entwurf 11819-2 [13] auf der Mitte der Reifenbreite. Die Distanz der Sensoren zur Mittelachse des Reifens ist größer als nach ISO-Entwurf vorgesehen und liegt bei 480 mm. Die Positionen der Sensoren ergeben sich im Wesentlichen durch die eingeschränkte Messumgebung am IPS. Beispielsweise ist eine Höhe des Sensors über der Fahrbahn < 140 mm aufgrund der Fahrbahnkrümmung nicht realisierbar.

Insgesamt stehen damit für die Erfassung der akustischen Signale 9 Kanäle zur Auswertung zur Verfügung, die jeweils mit einer Abtastrate von $f_A = 16$ kHz abgetastet wurden. Zur parallelen Überwachung und Analyse der Kräfte und Momente am Reifen wurden diese mittels der 6-Komponenten-Messnabe des Innentrommel-Prüfstandes aufgezeichnet. Die Abtastrate betrug aufgrund der geringen Veränderlichkeit der Größen $f_A = 20$ Hz. Die Messzeit für jede Variation der Betriebsparameter wurde zu $t = 50$ Sekunden bestimmt.

3.3.3 Messprogramm

Zur Untersuchung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs unter Antriebsmoment wurden zunächst vier unterschiedlich profilierte Reifen verschiedener Hersteller unter Variation der Geschwindigkeit und der Umfangskraft ausgewählt (vgl. Bild 3.3-3, Spalten 1 bis 4). Es wurden ein Glattreifen, zwei Sommerreifen, die sich in der Profilierung sowie in der Materialhärte wenig unterschieden, und ein querprofilierter Versuchsreifen ausgewählt, der sich durch gleiche Blocklängen über dem Umfang auszeichnete. Die Materialhärte der Laufstreifen des

Glatt- und Querprofilreifens war etwa gleich und deutlich höher als bei den beiden Sommerreifen. Die Radlast wurde bei diesen Untersuchungen konstant auf 4.040 N sowie der Reifendruck auf 2 bar gehalten.

Da Beschleunigungsvorgänge mit hohen Zugkräften insbesondere bei Stadtfahrten auftreten, wurden die zu untersuchenden Geschwindigkeiten auf den Bereich 30-50 km/h festgelegt. Eine weitere Messung bei $v = 80$ km/h wurde ebenfalls vorgesehen, kam aber aufgrund zu starker Einflüsse des Radantriebsgeräuschs auf das Gesamtgeräusch nicht zur weiteren Auswertung. Die Geschwindigkeit wurde jeweils auf die Sollwerte 30, 40, 50 und 80 km/h gesteuert. Auswertungen der am Prüfstand aufgezeichneten tatsächlichen mittleren zeitlichen Trommelgeschwindigkeit ergaben beispielsweise bei einem Sollwert von 30 km/h eine Abweichung von -0,63 bis -1,91 km/h bei einer mittleren Standardabweichung vom tatsächlichen Mittelwert von 0,33 bis 0,44 km/h (Querprofilreifen).

Zur besseren Vergleichbarkeit der Untersuchungen bei unterschiedlichen Reifen wurde die Umfangskraft als Variationsparameter für jeden untersuch-






Glattreifen	Sommerreifen 1	Sommerreifen 2	Querprofilreifen	Lamellierter Reifen
				
195/65 R14	195/65 R15	195/65 R14	195/65 R14	205/55 R16
Li 89	Li 91	Li 89	Li 89	Li 91
78 Sh-A	781Sh-A	68 Sh-A	76 Sh-A	50 Sh-A

Bild 3.3-3: Zur Untersuchung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs verwendete Reifen mit Angaben zu Größe, Lastindex (LI) und Shorehärte des Laufstreifenmaterials

ten Reifen gewählt. Die Umfangskraft wurde dabei auf die Soll-Werte 0, 500, 1.000, 1.500 und 2.500 N in der angegebenen Reihenfolge eingestellt. Die dabei gemessenen Umfangskräfte wurden in Bild 3.3-4 über den gemessenen Antriebsschlupfwerten aufgetragen. Aus den dargestellten Umfangskraft-Schlupf-Kurven ist ersichtlich, dass die bei 2.500 N Umfangskraft erreichten Antriebsschlupfwerte auf Safety-Walk als Fahrbahnbelag bei ca. 1 % liegen. Als Referenzmessung wurde zusätzlich das Reifen-Fahrbahn-Geräusch bei frei rollendem Reifen (FR), das heißt ohne Radantrieb, jeweils vor und nach den Umfangskraftmessungen aufgenommen. Die Radlast blieb zunächst unverändert bei 4.040 N.

In einer weiteren Untersuchung wurden nur die in Bild 3.3-3, Spalte 4 und 5 dargestellten Reifen verglichen. Hierbei wurde die Geschwindigkeit konstant auf den Wert $v = 30$ km/h angesteuert. Untersucht wurden die Radlast 4.040 N und 6.000 N sowie die Reifenfülldrücke $P_{ref} = 2$ bar und $p = 3,3$ bar, wobei der erhöhte Reifendruck p dem angepassten Fülldruck bei erhöhter Radlast $F_Z = 6.000$ N mit der Referenzradlast F_{Zref} bei Referenzdruck P_{ref} entspricht

$$p = p_{ref} \cdot \left(\frac{F_Z}{F_{Z,ref}} \right)^{1,25} \quad (5-1)$$

Für diese Untersuchungen wurden zusätzlich höhere Umfangskräfte untersucht. Die Umfangskraft

wurde dabei auf die Soll-Werte 3.000, 3.500 und 4.000 N, die der Fortführung der ersten Umfangskraft-Untersuchung entsprechen, sowie 0, 740, 1.485, 2.230, 3.710, 4.450 und 5.200 N, die unter Beibehaltung des Umfangskraft-Radlast-Verhältnisses für die erhöhte Radlast ermittelt wurden. Wie aus Bild 3.3-4 ersichtlich erreichte der Antriebsschlupf bei einer Umfangskraft von 5.200 N Werte kleiner als 5 %.

Der Schlupf des Lamellenreifens lag aufgrund seiner extrem niedrigen Materialhärte sowie der geringen Struktursteifigkeit des Profils und des daraus resultierenden Formschlupfs erwartungsgemäß wesentlich höher als der Schlupf des querprofilierten Reifens.

Zusammengefasst ergaben die beschriebenen Variationen das in Tabelle 3.3-1 und Tabelle 3.3-2 dargestellte Messprogramm.

Die Messdaten wurden anhand des vorgestellten Messprogramms Teil 1 an drei aufeinander folgenden Tagen aufgenommen. Die zusätzlichen Messungen unter Variation der Radlast bzw. des Fülldrucks und bei höheren Umfangskraftwerten (Messprogramm Teil 2) wurden an weiteren zwei aufeinanderfolgenden Tagen im Projektverlauf vorgenommen.

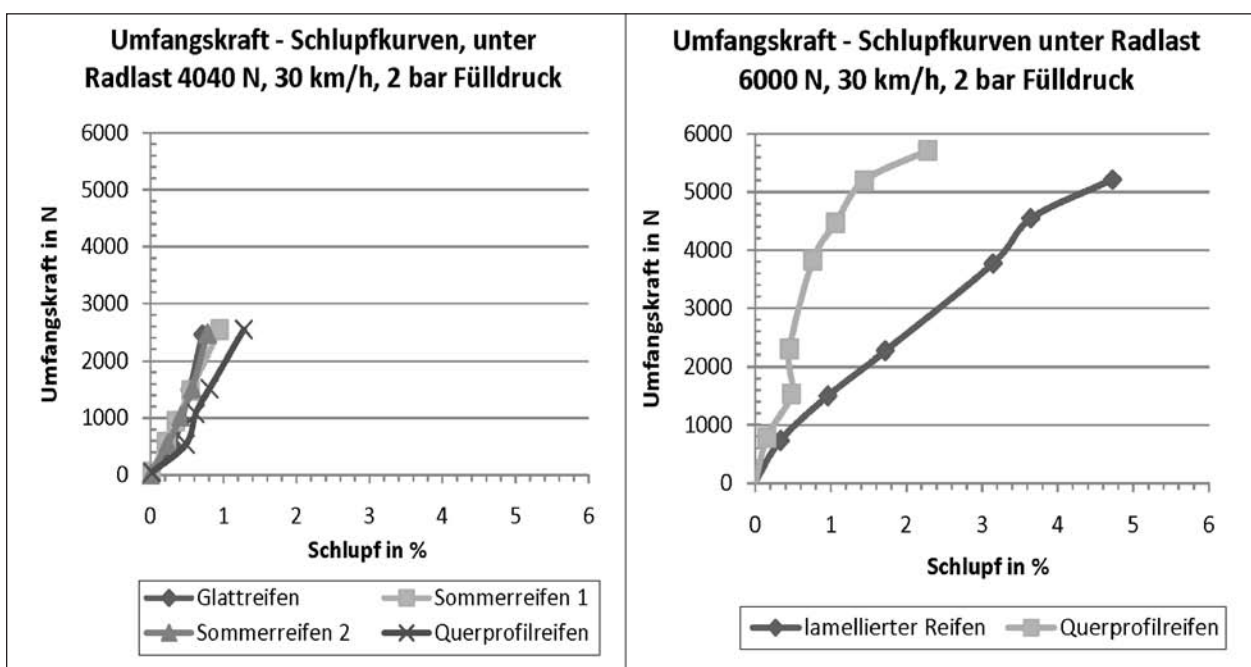


Bild 3.3-4: Mittlere Antriebsschlupfwerte aufgetragen über mittlerer Umfangskraft bei einer Sollgeschwindigkeit von $v = 30$ km/h und 2 bar Reifenfülldruck

Geschwindigkeit in km/h	30	40	50	80	
	30	40	50	80	
	30	40	50	80	
	30	40	50	80	
Umfangskraft Sollwert in N	Trommelantrieb eingeschaltet		Radantrieb eingeschaltet		Glattreifen Sommerreifen 1 Sommerreifen 2 Querprofilreifen
0 Freies Rollen, FR (Referenz)	Ja		Nein		
0	Ja		Ja		
500	Ja		Ja		
1.000	Ja		Ja		
1.500	Ja		Ja		
2.500	Ja		Ja		
0 FR (Referenz)	Ja		Nein		

Tab. 3.3-1: Messprogramm Teil 1 (Radlast konstant 4.040 N)

Umfangskraft Sollwert in N	Trommelantrieb eingeschaltet	Radantrieb eingeschaltet	Reifenfülldruck in bar		Radlast in N	Lamellierter Reifen Querprofilreifen
0 FR (Referenz)	Ja	Nein	2	3,3	4.040	
3.000	Ja	Ja	2	3,3	4.040	
3.500	Ja	Ja	2	3,3	4.040	
4.000	Ja	Ja	2	3,3	4.040	
0 FR (Referenz)	Ja	Nein	2	3,3	6.000	
0	Ja	Ja	2	3,3	6.000	
740	Ja	Ja	2	3,3	6.000	
1.485	Ja	Ja	2	3,3	6.000	
2.230	Ja	Ja	2	3,3	6.000	
3.710	Ja	Ja	2	3,3	6.000	
4.450	Ja	Ja	2	3,3	6.000	
5.200	Ja	Ja	2	3,3	6.000	
5.940	Ja	Ja	2	3,3	6.000	

Tab. 3.3-2: Messprogramm Teil 2 (Geschwindigkeit konstant v = 30 km/h)

3.3.4 Analyse der Messdaten

3.3.4.1 Ermittlung relevanter Frequenzbereiche

Die Auswertung der Signale der Beschleunigungsaufnehmer zeigte, dass zwei Frequenzbereiche ohne weitere Korrektur der Schallsignale zur Auswertung herangezogen werden können, da innerhalb dieser der Einfluss des Radmotorgeräuschs

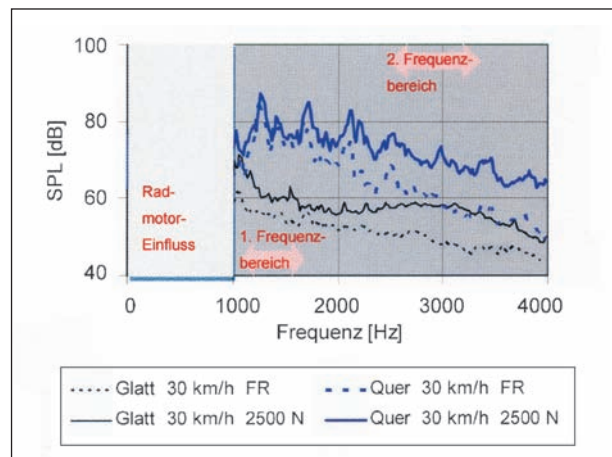


Bild 3.3-5: Schallspektren des Glatt- und Querprofilreifens im Vergleich zur Referenzmessung ohne Radantrieb (Freies Rollen, FR) und 2.500 N Umfangskraft (SPL = Sound Pressure Level, Schalldruckpegel)

marginal war. Bild 3.3-5 zeigt die Spektren des Schalldruckpegels, im Englischen als Sound Pressure Level (SPL) bezeichnet, des Glatt- und Querprofilreifens im Vergleich zur Referenzmessung ohne Radantrieb (Freies Rollen, FR) und den Höchstwert der untersuchten Umfangskräfte von 2.500 N. Die Spektren können im Frequenzbereich kleiner als 1 kHz aufgrund des Radantriebs nicht ausgewertet werden. Die zur Untersuchung herangezogenen Frequenzbereiche liegen zwischen 1.250-1.550 Hz (im Folgenden erster Frequenzbereich genannt) und zwischen 2.500-3.400 Hz (im Folgenden zweiter Frequenzbereich genannt). Diese Bereiche können als relevant angesehen werden, da sie in den Bereich höchster Pegel im Spektrum des Vorbeifahrgeräuschs fallen.

3.3.4.2 Anregung durch das Reifenprofil

Die Reifenprofilierung ist im Allgemeinen eng mit der Geräuschenstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs verbunden. Bekannte Phänomene sind das Aufschlagen und Ausschlagen der Profilelemente, die Eigenschwingungen der Profilelemente sowie die Luftverdrängung. Die Anzahl der Profilklötze auf dem Reifenumfang führt insbesondere bei äquidistanter Profilierung zu charakteristischen Geräuschfrequenzen und erzwungenen Schwingungen. Dabei haben niedrige Reifenordnungen (ca. 1.-3.) den höchsten Profileräuschpegel, sie fallen innerhalb der in diesem Bericht vorgestellten Untersuchungen in den ersten ausgewerteten Frequenzbereich zwischen 1.250-1.550 Hz. In den zweiten ausgewerteten Frequenzbereich (2.500-

Profilgeräusch		Klotzeinlauffrequenzen		Frequenzfenster 1.250-1.550 Hz								Frequenzfenster 2.500-3.400 Hz				
Reifen		Größen	Umfang	Klotzanzahl	Frequenz der jeweiligen Profilklotzordnung bei 30 km/h											
				auf Umfang	Radanordnung											
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Glattreifen	G	195/65 R 14	1,86	1	4	9	13	18	22	27	31	36	40	45	49	54
Sommerreifen 1	So1	195/65 R 15	1,935	66	284	568	853	1.137	1.421	1.705	1.990	2.274	2.558	2.842	3.127	3.411
Sommerreifen 2	S02	195/65 R 14	1,86	70	314	627	941	1.254	1.568	1.882	2.195	2.509	2.833	3.136	3.450	3.763
Querprofilreifen	Q	195/65 R 14	1,86	93	417	833	1.250	1.667	2.083	2.500	2.917	3.333	3.750	4.167	4.583	5.000
Lammelierte Reifen	L	205/55 R 16	2,015	60	248	496	744	993	1.241	1.489	1.737	1.985	2.233	2.481	2.730	2.978
Reifen		Größen	Umfang	Klotzanzahl	Frequenz der jeweiligen Profilklotzordnung bei 50 km/h											
				auf Umfang	Radanordnung											
					1	2	3	4	5	6	7	8				
Glattreifen	G	195/65 R 14	1,86	1	7	15	22	30	37	45	52	60				
Sommerreifen 1	So1	195/65 R 15	1,935	66	474	947	1.421	1.895	2.369	2.842	3.316	3.790				
Sommerreifen 2	S02	195/65 R 14	1,86	70	523	1.045	1.568	2.091	2.614	3.136	3.659	4.182				
Querprofilreifen	Q	195/65 R 14	1,86	93	694	1.389	3.083	2.778	3.472	4.167	4.861	5.556				

Tab. 3.3-3: Anregung durch das Reifenprofil (Werte berechnet aus Klotzanzahl und Reifenumfangsgeschwindigkeit)

3.400 Hz) fallen höhere Reifenordnungen (4.-12.), welche geringere Pegel aufweisen. Ein Sonderfall stellt der lammelierte Reifen dar, der pro Profilklotz neben einer Rille zusätzlich über vier äquidistante Lamellen verfügt. Damit sind neben der ersten auch die vierte und fünfte Ordnung der Klotzeinlauffrequenz geräuschlich deutlich ausgeprägt. Für die unterschiedlichen untersuchten Reifen wurden in Tabelle 3.3-3 die Frequenzen aufgelistet, die sich bei der jeweiligen Profilklotzordnung und den angegebenen Reifenumfangsgeschwindigkeiten durch das Aufsetzen der einzelnen Profilklotze rechnerisch ergeben. Zur besseren Übersicht wurden die in die untersuchten Frequenzbereiche fallenden Reifenordnungen grau hinterlegt.

3.3.4.3 Einfluss der Umfangskraft

In Bild 3.3-5 ist für den querprofilierten Reifen das massive Profilgeräusch auch in hohen Reifenordnungen erkennbar, was auf die äquidistante Teilung zurückzuführen ist, die beim Abrollen bei einer gegebenen Geschwindigkeit die Schalleistung in schmale Frequenzbereiche um die Profilklotzordnungen konzentriert. Im Vergleich zum freien Rollen steigt der Profilgeräuschpegel im Bereich niedriger Reifenordnungen nur wenig mit der Umfangs-

kraft an. Eine deutliche Pegelerhöhung tritt allerdings im Bereich um 3.000 Hz auf.

Bild 3.3-6 zeigt die Schallspektren des Glattreifens im Vergleich mit den untersuchten Sommerreifen 1 und 2. Dargestellt sind hier die Spektren der Referenzmessung ohne Radantrieb FR und der Messung unter Umfangskraft 2.500 N, jeweils nur für die relevanten ersten und zweiten Frequenzbereiche. Für den durch den schwarzen Kurvenverlauf dargestellten Glattreifen wird hier deutlich, dass der Pegel um 3.000 Hz unter Umfangskraft stark ansteigt (mittlerer Anstieg im zweiten Frequenzbereich 9,1 dB) und im Vergleich mit den Sommerreifen die höchsten Werte erreicht.

Auch hier ist wieder für die niedrigen Reifenordnungen ein geringer Anstieg des Profilgeräuschs mit der Umfangskraft erkennbar (5,5 dB für den Glattreifen). Die Pegelerhöhung des Sommerreifens liegt im Vergleich dazu für den ersten Frequenzbereich bei 2,5 und für den zweiten Frequenzbereich bei 2,7 dB.

In Bild 3.3-7 sind die Spektren der Sommerreifen 1 und 2 im Vergleich mit dem Glattreifen ebenfalls für FR und 2.500 N Umfangskraft aufgenommen bei einer Geschwindigkeit von $v = 50$ km/h dargestellt.

Im Vergleich zu Bild 3.3-6 zeigt sich eine Pegelerhöhung über dem gesamten untersuchten Frequenzbereich für alle Spektren. Für den Sommerreifen 1 betrug die Pegelerhöhung im Mittel 5,3 dB für den ersten Frequenzbereich und 13,2 dB für den zweiten Frequenzbereich. Beim untersuchten Glattreifen fiel die Pegelerhöhung mit 8,8 dB bzw. 15,6 dB im ersten bzw. zweiten Frequenzbereich noch deutlicher aus. Für den hier nicht dargestellten Querprofilreifen ergab sich innerhalb des ersten Frequenzbereichs eine geringe Pegelerhöhung von rd. 1 dB.

Die Pegelerhöhung im zweiten Frequenzbereich lag bei 7,8 dB. Die jeweils ermittelten Pegeldiffe-

renzen zwischen der Untersuchung des FR und der Umfangskraftmessung von 2.500 N können der Tabelle 3.3-4 entnommen werden. Durch Farbe und Schriftstärke hervorgehoben wurden jeweils die höchsten und niedrigsten Pegeldifferenzen.

Bild 3.3-8 zeigt links den mittleren Schalldruckpegel im ersten Frequenzbereich um 1,4 kHz aufgetragen über der Umfangskraft für die unterschiedlichen Reifen. Die Geräuschsignale wurden bei einer Geschwindigkeit von $v = 30 \text{ km/h}$ aufgenommen. Es zeigt sich für den Querprofilreifen sowie für die beiden Sommerreifen nur ein geringer Anstieg des Pegels mit der Umfangskraft. Für den Querprofilreifen fallen keine Blockharmonischen in diesen Fre-

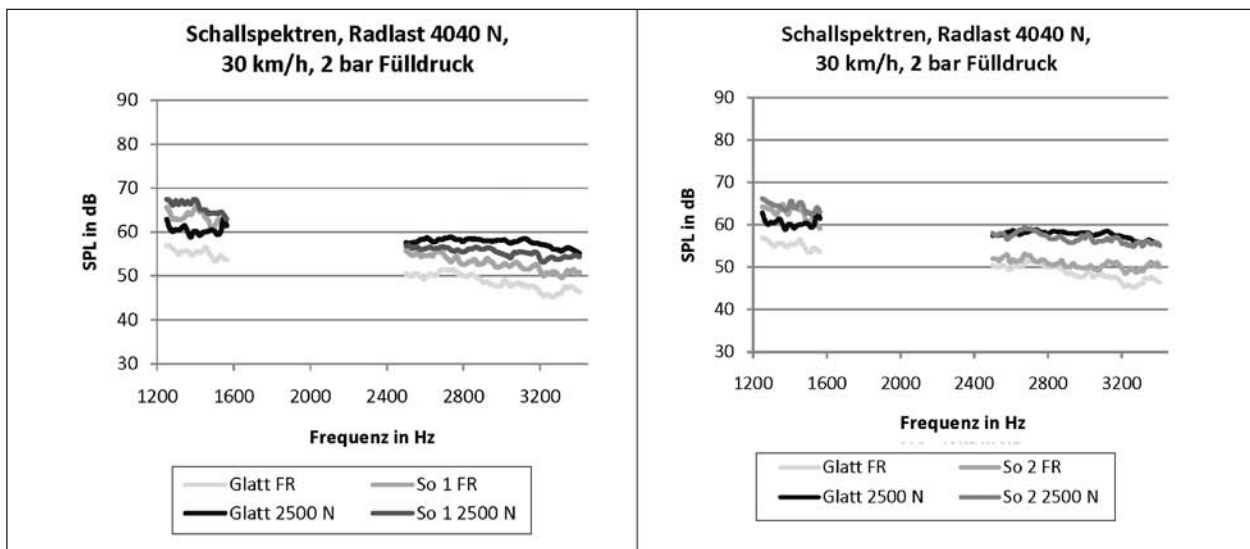


Bild 3.3-6: Schallspektren der untersuchten Sommerreifen 1 und 2 im Vergleich mit dem untersuchten Glattreifen für die Referenzmessung ohne Radantrieb (FR) und 2.500 N Umfangskraft aufgenommen im Reifeneinlauf bei 30 km/h

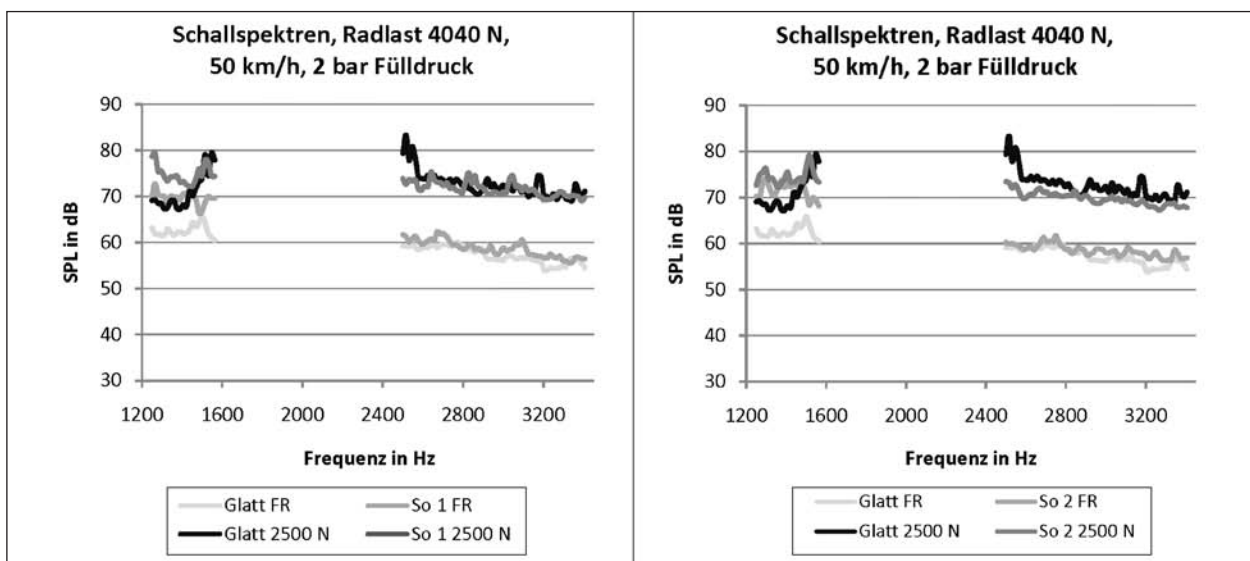


Bild 3.3-7: Schallspektren der untersuchten Sommerreifen 1 im Vergleich mit dem untersuchten Glattreifen für die Referenzmessung ohne Radantrieb (FR) und 2.500 N Umfangskraft aufgenommen im Reifeneinlauf bei 50 km/h

quenzbereich. Der Glattreifen weist eine Geräusch-
erhöhung mit zunehmender Umfangskraft auf, so-
dass sich bei hohen Umfangskraftwerten (2.500 N)
der Geräuschvorteil gegenüber den Sommerreifen
verringert.

Pegelerhöhung in dB zwischen FR und 2.500 N Umfangskraft, unterteilt in ersten Frequenzbereich und zweiten Frequenzbereich				
Frequenzbereich	30 km/h		50 km/h	
	1.250- 1.550 Hz	2.500- 3.400 Hz	1.250- 1.550 Hz	2.500- 3.400 Hz
Glattreifen	5,5	9,1	8,8	15,6
Sommerreifen 1	2,5	2,7	5,3	13,2
Sommerreifen 2	1,5	6,2	3	11,5
Querprofilreifen	2,3	10,8	<1	7,8

Tab. 3.3-4: Pegelerhöhung bei Umfangskraft von 2.500 N im
Vergleich zu FR aufgeteilt auf 2 relevante Fre-
quenzbereiche

Bild 3.3-8 zeigt rechts den Schalldruckpegel des
Reifen-Fahrbahn-Geräuschs innerhalb des zweiten
Frequenzbereichs. Es ist allgemein ein stärkerer
Anstieg des Geräuschpegels durch die Umfangs-
kraft zu erkennen. Besonders deutlich wird der stär-
kere Anstieg bei kleinen Werten der Umfangskraft.
Die Werte liegen z. B. für den Querprofilreifen bei
5 dB/kN.

In Bild 3.3-9 links ist der mittlere Schalldruckpegel
des ersten Frequenzbereichs aufgetragen über der
Umfangskraft für die Messung unter 4.040 N Rad-
last und bei $v = 50$ km/h. Der Querprofilreifen zeigt
in diesem Bereich keinen Pegelanstieg mit der Umf-
fangskraft. Bei 50 km/h Geschwindigkeit fällt in die-
sem Frequenzbereich die 2. Radordnung, dies weist
darauf hin, dass das Profilgeräusch kaum Umf-
fangskrafteinfluss zeigt. Für den Glattreifen zeigt
sich die bereits für $v = 30$ km/h beobachtete Pegel-
erhöhung durch Umfangskrafteinfluss. Wie schon
bei $v = 30$ km/h weisen die beiden Sommerreifen
auch bei $v = 50$ km/h nur einen geringen Pegelan-
stieg mit der Umfangskraft auf.

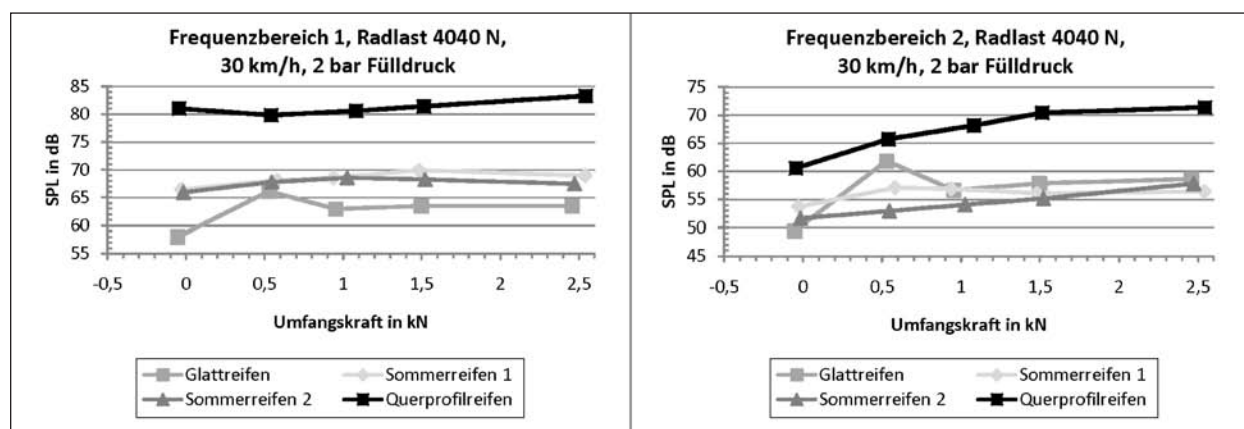


Bild 3.3-8: Mittlerer Schalldruckpegel (Sound Pressure Level, SPL) links im ersten Frequenzbereich und rechts im zweiten Fre-
quenzbereich aufgetragen über der Umfangskraft für die untersuchten Reifen bei 30 km/h

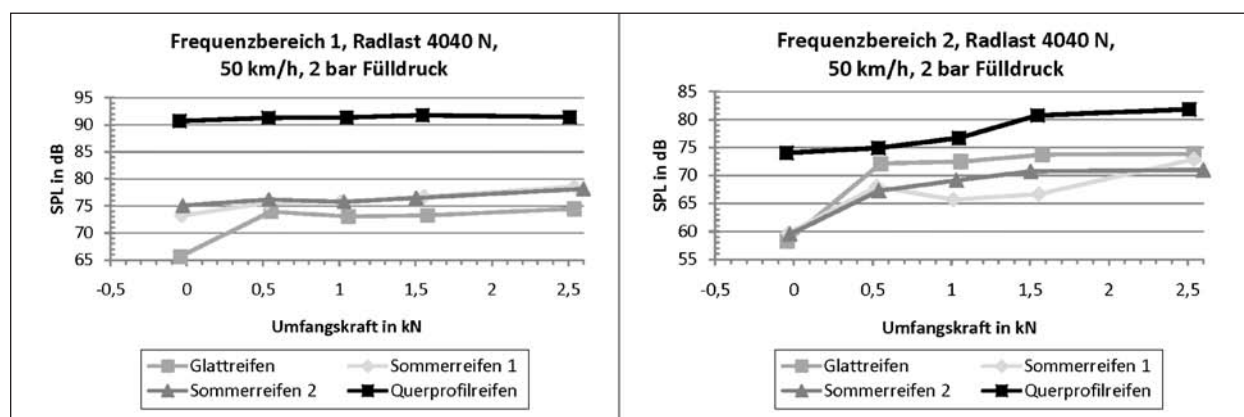


Bild 3.3-9: Mittlerer Schalldruckpegel (Sound Pressure Level, SPL) links im ersten Frequenzbereich und rechts im zweiten Fre-
quenzbereich aufgetragen über der Umfangskraft für die untersuchten Reifen bei 50 km/h

Bild 3.3-9 zeigt rechts den mittleren Schalldruckpegel des zweiten Frequenzbereichs über der Umfangskraft. Auch hier zeigen sich der schon bei 30 km/h beobachtete allgemein starke Anstieg des Pegels mit der Umfangskraft und der stärkere Anstieg bei kleinen Werten der Umfangskraft. Besonders deutlich tritt hier der stärkere Anstieg beim Glattreifen im Vergleich zu den Sommerreifen hervor.

Unter Verwendung der einfachen linearen Regression wird unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs aus den gemessenen Schalldruckpegelwerten Y_i bei den jeweils anliegenden Umfangskräften X_i der Geräuschgradient m berechnet.

Bild 3.3-10 zeigt den auf diese Weise ermittelten Geräuschgradienten m für den ersten und zweiten Frequenzbereich getrennt. Im Vergleich der Gradienten für die beiden Geschwindigkeiten 30 und 50 km/h zeigt sich ein größerer Pegelanstieg mit der Umfangskraft bei höherer Geschwindigkeit. Deutlich wird auch unter fast allen Bedingungen, dass der Glattreifen den größten Pegelanstieg aufweist. Der Pegelanstieg des Querprofilreifens hingegen ist vergleichsweise gering und nimmt zu höheren Geschwindigkeiten hin ab. Dadurch ergibt sich die Hypothese, dass das Profilgeräusch unter Antriebsmoment weniger stark ansteigt. Darüber hinaus zeigt sich bei allen Reifen, dass der Pegelanstieg bei hohen Frequenzen stärker ausfällt.

Beim Einlaufen der in Umfangs- und Querrichtung gekrümmten Oberfläche des Reifens in die Ebene der Fahrbahn entstehen Scherkräfte. Profilklötze,

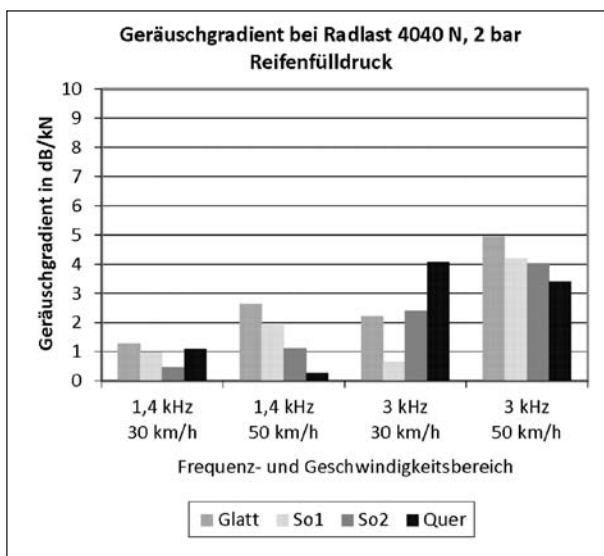


Bild 3.3-10: Geräuschgradient bei 30 bzw. 50 km/h im Vergleich, unterteilt in ersten und zweiten Frequenzbereich

die durch einen geringen Elastizitätsmodul des Laufstreifenmaterials oder durch eine geringe Klotzlänge in Umfangsrichtung scherweich sind, verformen sich in Umfangsrichtung deutlicher als umfangssteife Profilklötze. Sie sind in der Lage, die Verformung des Reifentorus gegenüber der Fahrbahnoberfläche zu einem gewissen Grade durch eigene Scherverformung auszugleichen. Diesen Vorgang nennt man Formschlupf. Erst bei hoher Scherspannung werden die Kräfte größer als die Haftreibung und der Klotz beginnt zu gleiten (Gleitschlupf).

Unter Antriebsmoment geht der Anteil der Bodenaufstandsfläche, in dem der Reifen auf der Fahrbahn haftet und die Oberflächengeschwindigkeiten von Reifen und Fahrbahn gleich groß sind, gegenüber dem Flächenanteil, in dem der Reifen gleitet, zurück, da nun höhere Scherkräfte auf die Profilstollen wirken. Bei allen Reifen nimmt insbesondere bei höheren Frequenzen der Pegel unter Antriebsmoment zu. Dies lässt den Schluss zu, dass die Gleitvorgänge in der Bodenaufstandsfläche vorzugsweise hochfrequente Geräuschanteile hervorrufen. Gerade bei einem Glattreifen, der aufgrund fehlender Querprofilierung über einen besonders schersteifen Laufstreifen verfügt, sollte der Anstieg der Gleitzone gegenüber der Haftzone deutlich sein. Hier wird ein besonders starker Anstieg des Schalldruckpegels bei hohen Frequenzen beobachtet, was die genannte Hypothese stützt.

Da die Gleitzone mit steigender Umfangskraft größer wird, sollten die mit dem Gleiten verbundenen Geräusche mit der Umfangskraft steigen. Auch dies wurde beobachtet.

Im tieffrequenteren ersten Frequenzbereich gibt es zwar auch eine Erhöhung des Schalldruckpegels, allerdings fällt diese geringer aus. Dies deutet einerseits darauf hin, dass die Geräuschentwicklung beim Gleiten vorzugsweise im höherfrequenten Bereich erfolgt und andererseits die mit der Periodizität des Profilmusters ablaufenden Geräuschentstehungsmechanismen durch Umfangskräfte weniger stark beeinflusst werden. Hierzu gehört insbesondere das Auftreffen der Profilklötze auf die Fahrbahn. Das Ausschlagen der verspannten Profilklötze aus der Bodenaufstandsfläche wird zwar einerseits durch die höheren Scherkräfte begünstigt, andererseits können durch den früheren Übergang in das Gleiten noch in der Bodenaufstandsfläche Verspannungen der Profilklötze wieder abgebaut werden.

Dies ist möglicherweise die Ursache dafür, dass der querprofilierter Reifen im ersten Frequenzbereich fast keine Geräuscherhöhung durch Umfangkräfte zeigt. Dieser Reifen hat eine sehr hohe Anzahl von Profilklotzen, ist also in Umfangsrichtung deutlich scherweicher als der Glattreifen. Er kann Relativgeschwindigkeiten zwischen Reifenunterbau und Fahrbahnoberfläche durch Profilklotzverformung besser ausgleichen und gleitet daher vermutlich weniger stark. Durch seine über den gesamten Querschnitt führenden Querrillen findet, das Berühren der Fahrbahn durch die Klotzkanten und das Auslaufen der Klötze aus der Bodenaufstandsfläche über weite Bereiche gleichzeitig statt, was die Anregung für den Reifenaufbau verstärkt und zu hohen Schwingungsamplituden führt. Gleiches gilt für die Verdrängung der Luft aus den Profilirillen. Die profilsynchronen Anteile des Geräuschs sind demnach bei diesem Reifen bereits sehr hoch, eine Zunahme durch zusätzliche Gleitvorgänge unter Antriebsmoment wird daher in der Summe wenig ins Gewicht fallen. Auch die Luftverdrängung aus den vergleichsweise breiten Profilirillen ändert sich unter Moment bei diesem Reifen vermutlich weniger als bei schmalen Rillen oder Lamellen, bei denen es unter Antriebsmoment zur Berührung gegenüberliegender Rillenflanken und damit zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten beim Austritt der verdrängten Luft kommt.

Beim Gleiten der Reifenoberfläche auf der Textur der Fahrbahn erfolgt die Kraftübertragung im Wesentlichen durch die beiden Phänomene der Adhäsion und der Hysteresereibung [14]. Die Adhäsion beruht auf molekularen Wechselwirkungskräften, den Van-der-Waals-Kräften, die dazu führen, dass das hochelastische Gummimaterial in kleine Vertiefungen der Fahrbahnoberfläche, die im Sub-Mikrometerbereich liegen, hineingezogen wird und dort einen vollflächigen Kontakt herstellt. Dies kann bei umso mehr Vertiefungen geschehen, je ebener die Fahrbahntextur auf dem Skalenbereich oberhalb etwa eines Mikrometers ist, und dann umso stärker zu der Gesamtkraft beitragen. Diese Bedingung ist auf den mit dem Reifen in Berührung gelangenden polierten Spitzen der Körnung der Fahrbahn gegeben. Gleitet die Elastomeroberfläche weiter, so steigt die Spannung und der lokale Kontakt löst sich wieder. Es findet so eine Folge von Haft- und Lösevorgängen statt, die dann zu einer hohen Kraftübertragung führt, wenn die Frequenz dieser Vorgänge derjenigen der maximalen inneren Dämp-

fung des Elastomers entspricht. Diese Frequenz liegt bei Raumtemperatur typisch bei 0,1 MHz. Das Eindringen des Elastomers in die kleinskaligen Vertiefungen der Fahrbahnoberfläche kann nur bei geringer Gleitgeschwindigkeit erfolgen, da die Verformung des Elastomers Zeit benötigt. Mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit nimmt die durch Adhäsion übertragbare Kraft also ab. In der Praxis wird damit Adhäsion begünstigt durch geringe Gleitgeschwindigkeit, typisch um 1 mm/s, geringen Speichermodule des Elastomers, hohe Temperatur und großflächige, ebene und polierte Oberflächen in der Fahrbahn.

Bei höherer Gleitgeschwindigkeit (bei Raumtemperatur typisch oberhalb 1 m/s) gewinnt die Verformung des Elastomers durch die gröbere Textur der Fahrbahn im Mikrometer- und Millimeterbereich für die Kraftübertragung an Bedeutung. Die Verformung führt zu viskoser Reibung im Material und damit zu Dämpfungskräften. Um wieder eine Verformungsfrequenz bei der Frequenz maximaler innerer Materialdämpfung zu erreichen, ist nun eine höhere Gleitgeschwindigkeit (bei Raumtemperatur etwa 10 m/s bis 100 m/s) erforderlich.

Bei Gleitgeschwindigkeiten zwischen dem Maximum der Adhäsion und unterhalb des Maximums der Hysteresereibung ist die Materialdämpfung geringer. Eigenschwingungen im Laufstreifen des Reifens, die in unterschiedlichen Modenformen als Biege-, Scher- oder Kompressionsschwingungen auftreten, können daher höhere Amplituden erreichen. Bei den hier durchgeführten Messungen lagen der Gesamtschlupf bei max. 1 % bis ca. 5 % und die Rollgeschwindigkeit bei 30 bzw. 50 km/h. Damit betrug die Gleitgeschwindigkeit zumindest im Mittel maximal 0,5 m/s und fällt damit in den o. g. Geschwindigkeitsbereich. Da die Verformungsleistung, die in den Reifen über die Fahrbahntextur eingeleitet wird, mit steigender Gleitgeschwindigkeit zunimmt, sollte in diesem Gleitgeschwindigkeitsbereich auch die Geräuscentwicklung mit der Gleitgeschwindigkeit zunehmen. Da bei höherer Rollgeschwindigkeit einerseits durch die Versteifung des Elastomers bei höheren Deformationsfrequenzen und andererseits durch die geringere Verweilzeit eines Oberflächenelements in der Bodenaufstandsfläche das Eindringen des Gummis in die Textur der Fahrbahn herabgesetzt wird, sollten dann auch die Gleitgeschwindigkeit und damit die Geräuscentwicklung steigen. Dies stimmt mit den Versuchsergebnissen überein.

Sofern geringe Gleitgeschwindigkeiten oberhalb des Adhäsionsmaximums vorliegen, führt eine Zunahme der Gleitgeschwindigkeit zu einer Abnahme des Reibbeiwerts und begünstigt damit die Ausbildung selbsterregter Schwingungen durch Stick-Slip-Effekte.

Oberhalb bestimmter Gleitgeschwindigkeiten treten an der Oberfläche des Elastomers Instabilitäten auf, die zur Wellenbildung quer zur Gleitrichtung führen, den so genannten Schallamach-Wellen [15]. Sie verhindern durch eine periodische Verformung der Gummioberfläche die ungestörte Berührung von Elastomer- und Fahrbahnoberfläche. Es ist anzunehmen, dass dieser Effekt ebenfalls zur Geräuscentstehung unter Antriebsmoment beiträgt.

Damit wird insgesamt plausibel, dass die Geräuscentwicklung bei Gleitvorgängen bevorzugt bei hohen Frequenzen erfolgt.

Zur Ermittlung der Bedeutung der beiden untersuchten Frequenzbereiche für das Gesamtgeräusch wurde für das FR und die Messung unter 2.500 N Umfangskraft die Pegeldifferenz zwischen dem mittleren Geräuschpegel von erstem und zweitem Frequenzbereich gebildet.

Bild 3.3-11 zeigt links die ermittelten Pegeldifferenzen für die untersuchten Reifen für FR und 2.500 N Umfangskraft bei $v = 30$ km/h und rechts für $v = 50$ km/h. Wie schon zuvor wird durch positive Differenzen deutlich, dass der zweite Frequenzbereich die geringeren Geräuschpegel aufweist. Mit geringer werdenden Pegeldifferenzen steigt die Bedeutung des zweiten Frequenzbereichs gegenüber dem ersten Bereich. Besonders deutlich wird dies für den Glattreifen bei $v = 50$ km/h. Dort tragen bei 2.500 N Umfangskraft beide Bereiche nahezu gleich stark

zum Gesamtgeräusch bei (vgl. Pfeilsymbol im rechten Bildteil).

Zusammenfassend legen die bisherigen Untersuchungen also die Hypothese nahe, dass der Pegelanstieg mit der Umfangskraft durch Gleiteffekte verursacht wird. Gleitprozesse treten eher im hochfrequenten Bereich auf. Die dargestellten Untersuchungen zeigen in den Bildern 3.3-13 bis 3.3-15 einen stärkeren Pegelanstieg mit der Umfangskraft im zweiten Frequenzbereich. Darüber hinaus zeigt sich ein stärkerer Anstieg bei höherer Geschwindigkeit. Die Ergebnisdarstellung in Bild 3.3-11 stärkt die Hypothese der Gleiteffekte als Ursache des Pegelanstiegs, da unter hohen Umfangskräften die Bedeutung des zweiten Frequenzbereichs für das Gesamtgeräusch zunimmt.

3.3.4.4 Einfluss der Radlast und des Reifenfülldrucks

Wie in Kapitel 3.3.3 innerhalb des Messprogramms dargestellt, wurden während des Projektzeitraums Messungen unter Variation der Radlast für zwei unterschiedlich profilierte Reifen durchgeführt. Ausgehend von gleichen ausgenutzten Umfangskraft- bzw. Kraftschlussbeiwerten $\mu_{X,W}$, die sich aus dem Quotienten von Umfangskraft F_U und Radlast F_Z ergeben, wurde die Radlast erhöht. Entsprechend wurden für die Messreihen unter erhöhter Radlast die Umfangskräfte mit gleichem ausgenutztem Kraftschlussbeiwert $\mu_{X,W}$ berechnet. Der Luftdruck blieb zunächst konstant bei 2 bar.

Bild 3.3-12 links zeigt die Spektren des untersuchten lamellierten und querprofilierten Reifens bei FR, $v = 30$ km/h und $p = 2$ bar Fülldruck. Die Erhöhung der Radlast bewirkt bei beiden Reifen eine Er-

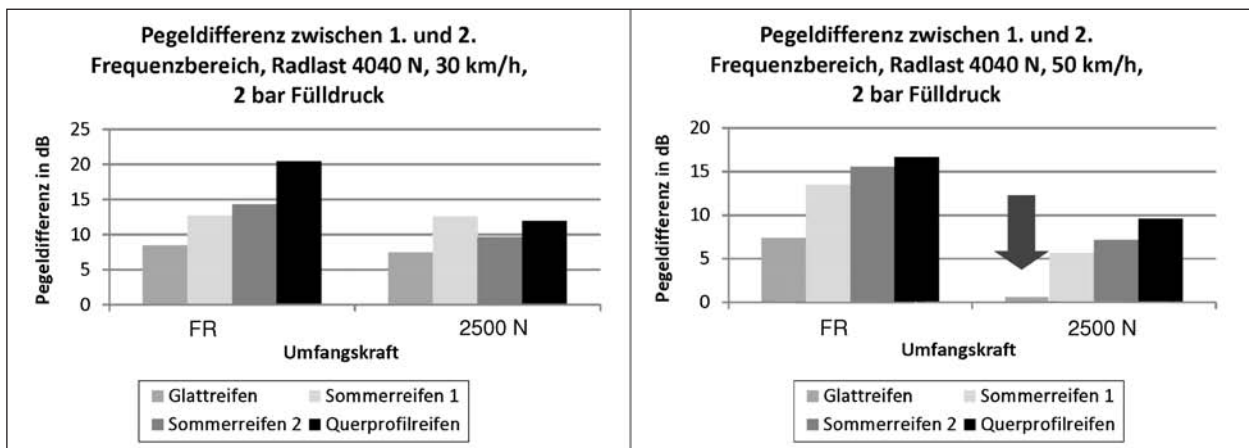


Bild 3.3-11: Pegeldifferenz zwischen erstem und zweitem Frequenzbereich

höhung des Geräuschpegels, wobei die Erhöhung für den lamellierten Reifen stärker ausfällt als für den querprofilierten Reifen. Außerdem zeigt sich für den lamellierten Reifen ein stärkerer Anstieg des Pegels im ersten Frequenzbereich, wohingegen der Pegel des Querprofilreifens eher im zweiten Frequenzbereich den größeren Pegelanstieg aufweist. Dies deutet darauf hin, dass beim lamellierten Reifen aufgrund des sehr viel weichen Laufstreifenmaterials und der durch die Lamellierung geringen Schersteifigkeit der Profilklotze starke Verformungen der Klötze und damit deutliches Airpumping aus den schmalen Lamellen auftraten, das bei Erhöhung der Radlast stark zunahm. Auch das Ausschlagen der durch höhere Radlast stärker deformierten Profilklotze dürfte eine Ursache für den Geräuschanstieg des lamellierten Reifens sein. Beide Effekte treten mit der Frequenz des Profilklotzeinlaufs auf. Da der Reifen pro Klotz außer einer Rille zusätzlich über vier Lamellen verfügt, tragen auch die vierte und die fünfte Profilklotzordnung deutlich zum Abrollgeräusch bei. Bei 30 km/h fällt die fünfte Ordnung in den Frequenzbereich 1 hinein, was ein weiterer Grund sein dürfte, dass sich die auf das Profilgeräusch einwirkende Radlastserhöhung beim lamellierten Reifen besonders deutlich auswirkt.

Die beobachtete Pegelzunahme beider Reifen bei Radlastserhöhung muss auch auf dem Hintergrund der Überlastung der Reifen auf 120 bis 125 % der Tragfähigkeit gesehen werden. Es kommt zu einer

starken Deformation der gesamten Reifenstruktur, die sämtliche Geräuschenstehungsmechanismen verstärkt.

In Bild 3.3-12 rechts dargestellt sind die Spektren der beiden Reifen unter Umfangskraft von 3.000 bzw. 4.450 N (gleicher Kraftschlussbeiwert) bei 30 km/h und 2 bar Fülldruck. Die Erhöhung der Radlast bewirkt auch unter Umfangskraftereinfluss einen Anstieg des Geräuschpegels, allerdings fällt dieser für den lamellierten Reifen weniger stark aus als bei FR. Für den Querprofilreifen hingegen ist der Pegelanstieg im Vergleich zur FR-Messung leicht erhöht. Die Umfangskraft lässt bei beiden Reifen das Reifen-Fahrbahn-Geräusch deutlich ansteigen, insbesondere im höheren Frequenzbereich, was auf erhöhtes Gleiten hindeutet. Bemerkenswert ist, dass im unteren Frequenzbereich der Lamellenreifen jetzt lauter ist als der Querprofilreifen. Offenbar bewirkt das Umfangsmoment einen erneuten Anstieg von Airpumping und Klotzausschlagen. Die Pegelanstiege liegen hierbei für beide Frequenzbereiche bei rd. 4 dB. Die mittleren Pegeldifferenzen sind getrennt für die beiden Frequenzbereiche in Bild 3.3-12 dargestellt.

In Bild 3.3-13 sind die Spektren der beiden Reifen unter den gleichen Kraft- und Prüfstandsparametern, allerdings bei 3,3 bar Reifenfülldruck abgebildet. Für den Querprofilreifen ergeben sich verschwindend geringe Pegeldifferenzen zwischen 4.040 N und 6.000 N Radlast, wobei im ersten Fre-

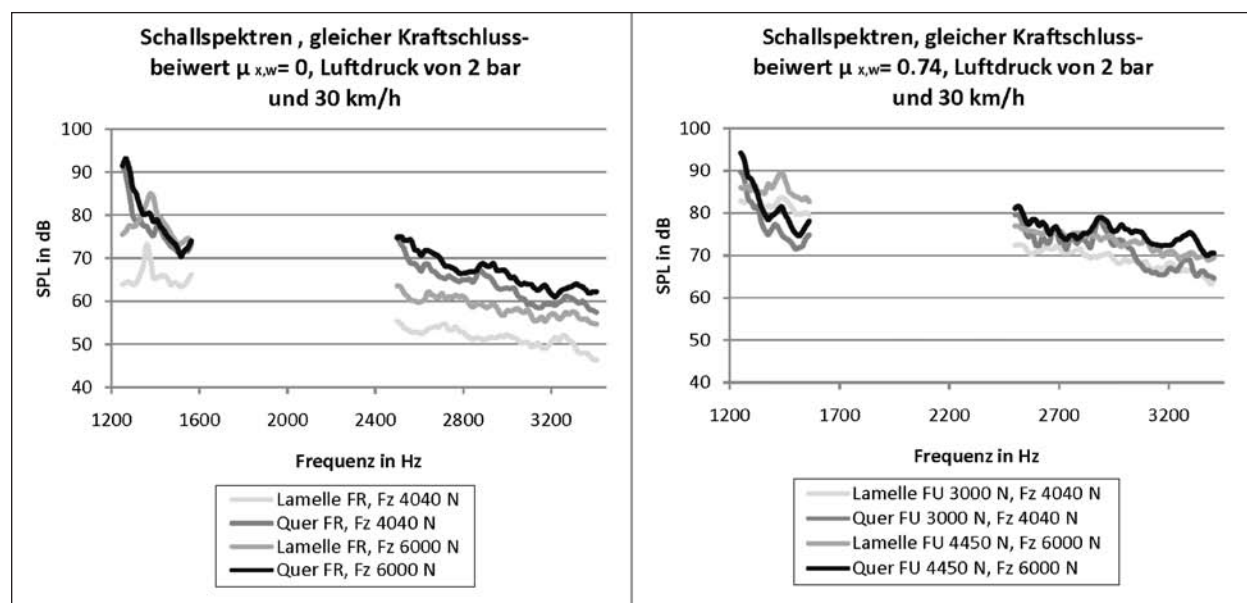


Bild 3.3-12: Schallspektren des lamellierten Reifens im Vergleich mit querprofiliertem Reifen für die Referenzmessung ohne Radantrieb (links) und mit konstantem Kraftschlussbeiwert $\mu_{x,w} = 0,74$ (rechts) bei Erhöhung der Radlast jeweils bei 30 km/h und 2 bar Fülldruck

quenzbereich eher eine Pegelminderung mit steigender Radlast und im zweiten Frequenzbereich eher eine Pegelerhöhung mit steigender Radlast zu erkennen sind. Bei geringer Radlast sind beide Reifen nur zu etwa 55 % ausgelastet, wodurch die Deformation des Reifenaufbaus relativ gering ist. Durch den hohen Fülldruck ist die Bodenaufstandsfläche jedoch klein, die Flächenpressung hoch, die Profilstollen werden stärker deformiert, der Reibbeiwert sinkt, und unter Umfangskraft kommt es zu stärkerem Gleiten. Nach Erhöhung der Radlast entspricht dies einer typischen Auslastung von 80 % bis 85 %, für die die Reifen konstruiert sind. Unter dieser Bedingung verfügen sie über eine gleichmäßigere Kontaktdruckverteilung, was sich günstig auf Klotzdeformation und Gleitvorgänge auswirkt. In der Folge ergibt sich insgesamt durch die Radlasterhöhung kaum eine Geräuschänderung.

Die ermittelten mittleren Pegeldifferenzen zwischen den Messungen unter 4.040 N und 6.000 N Radlast sind in Bild 3.3-13 zusammengefasst. Grundsätz-

lich lässt sich sagen, dass für beide untersuchten Reifen bei 2 bar Reifenfülldruck eine Pegelerhöhung mit der Erhöhung der Radlast einhergeht.

Für 3,3 bar Reifenfülldruck unterscheiden sich die Pegel des Querprofilreifens bei beiden Radlastwerten nur marginal. Bei dem untersuchten lamellierten Reifen tritt sogar im zweiten Frequenzbereich eine Pegelverringerng auf.

Allgemein kann daher die Aussage getroffen werden, dass eine Radlasterhöhung eine Pegelerhöhung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs bewirkt, die auch unter höherer Umfangskraft für niedrige Reifendrücke größer ausfällt als für den an die Radlast angepassten Druck. Somit steht also die aus Gründen der Lebensdauererhöhung empfohlene Luftdruckerhöhung nicht im Widerspruch zu diesem Sachverhalt. Allerdings kann der an nur zwei Reifen belegte Sachverhalt nicht als gemeingültig angesehen werden. Hier empfehlen sich weitere Untersuchungen mit mehreren unterschiedlich profilierten Reifen.

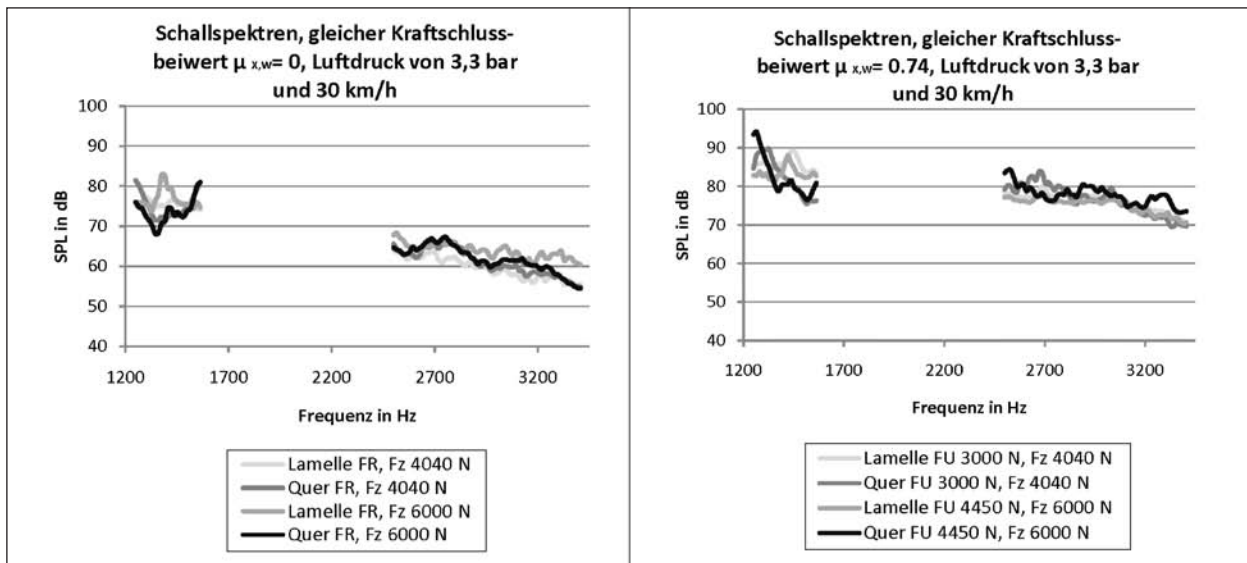


Bild 3.3-13: Schallspektren des lamellierten Reifens im Vergleich mit querprofilierem Reifen für die Referenzmessung ohne Radantrieb (links) und mit konstantem Kraftschlussbeiwert $\mu_{x,w} = 0,74$ (rechts) bei Erhöhung der Radlast jeweils bei 30 km/h und 3,3 bar Fülldruck

Pegeldifferenz in dB zwischen 4.040 N und 6.000 N Radlast und konstantem Kraftschlussbeiwert, unterteilt in ersten Frequenzbereich und zweiten Frequenzbereich				
ausgenutzter Kraftschlussbeiwert	0		0,74	
	1	2	1	2
Querprofilreifen, 2 bar	2,3	3,1	4	4
Lamellierter Reifen, 2 bar	12	7,1	4	4,3
Querprofilreifen, 3,3 bar	-1,5	<1	≈ 0	1,3
Lamellierter Reifen, 3,3 bar	1,3	4,3	-2,3	-1,1

Tab. 3.3-5: Pegeldifferenz bei Erhöhung der Radlast aufgeteilt auf zwei relevante Frequenzbereiche, $v = 30$ km/h

In Tabelle 3.3-6 ist die Pegeldifferenz unterteilt in ersten und zweiten Frequenzbereich zwischen den Messungen mit 2 und 3,3 bar Fülldruck nach folgender Formel dargestellt:

$$\Delta L_P = L_{3,3\text{bar}} - L_{2\text{bar}}$$

Die Erhöhung des Fülldrucks bedeutet für den Querprofilreifen bei FR unter beiden untersuchten Radlasten eine Verringerung des Schalldruckpegels in beiden Frequenzbereichen. Durch die höhere Flächenpressung sinkt der Reibbeiwert und es kommt vermehrt zu Gleiten. Dies trägt möglicherweise zu einem Ausgleich der Verspannungen der Profilklotze bei und reduziert so das Ausschlagen der Profilklotze beim Austritt aus der Aufstandsfläche. Durch den höheren Fülldruck kommt es weiterhin zu einer geringeren Verformung des Reifenaufbaus und damit zu einer geringeren Verspannung der Profilklotze. Für den lamellierten Reifen bedeutet die Erhöhung des Luftdrucks unter FR

eher eine Pegelerhöhung. Dies könnte seinen Grund in der höheren Flächenpressung haben, die zu einer stärkeren Verformung der weichen Klötze führt und damit zu vermehrtem Airpumping. Unter Umfangskraft hingegen bedeutet die Erhöhung des Luftdrucks für beide Reifen in beiden Frequenzbereichen unter beiden Radlasten eine Erhöhung des Schalldruckpegels. Die Ursache wird in dem über die erhöhte Flächenpressung reduzierten Reibbeiwert und dem daraus resultierenden stärkeren Gleiten gesehen. Einzig unter 6.000 N Radlast zeigt sich für den lamellierten Reifen eine Verringerung des Schalldrucks im ersten Frequenzbereich. Dies ist vermutlich eine Folge davon, dass bei hoher Radlast und geringem Fülldruck der Reifen um ca. 20 % überlastet ist und sich sehr stark verformt, was durch einen erhöhten Fülldruck reduziert wird.

Bild 3.3-14 zeigt den mittleren Schallpegel des ersten Frequenzbereichs links und des zweiten Frequenzbereichs rechts aufgetragen über dem aus-

Pegeldifferenz in dB zwischen 2 bar und 3,3 bar Fülldruck und konstantem Kraftschlussbeiwert, unterteilt in ersten Frequenzbereich und zweiten Frequenzbereich				
Kraftschlussbeiwert	0		0,74	
	1	2	1	2
Querprofilreifen, 4.040 N	-1,9	-2,6	5,1	5,3
Lamellierter Reifen, 4.040 N	9,8	8	4	7,6
Querprofilreifen, 6.000 N	-5,7	-5	1	2,5
Lamellierter Reifen, 6.000 N	-0,9	5,2	-2,2	1,9

Tab. 3.3-6: Pegeldifferenz bei Erhöhung des Fülldrucks aufgeteilt auf zwei relevante Frequenzbereiche, $v = 30 \text{ km/h}$

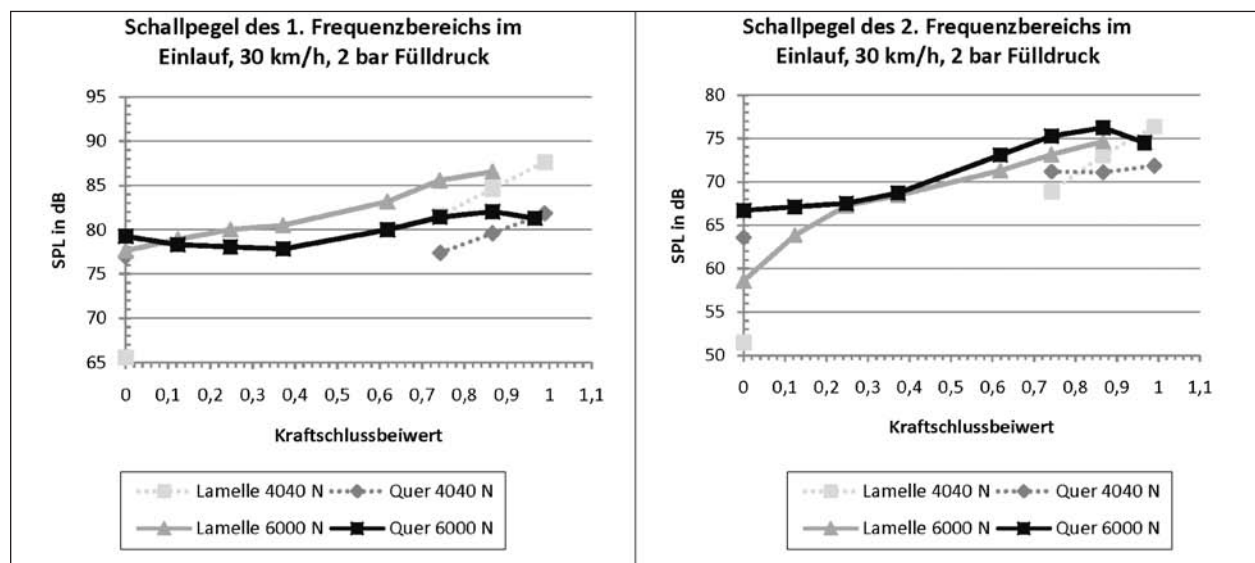


Bild 3.3-14: Schallpegel des lamellierten Reifens im Vergleich mit querprofilierem Reifen in Abhängigkeit des Kraftschlussbeiwerts bei beiden untersuchten Radlasten (4.040 N und 6.000 N) für 2 bar Reifenfülldruck (entspricht Standardauslastung von 80 bis 85 % und einer Überauslastung von 120 bis 125 % der Tragfähigkeit bei diesem Fülldruck). Gemäß Bild 3.3-4 treten die gemessenen Kraftschlussbeiwerte im Antriebsschlupf-Bereich von 0-5 % auf.

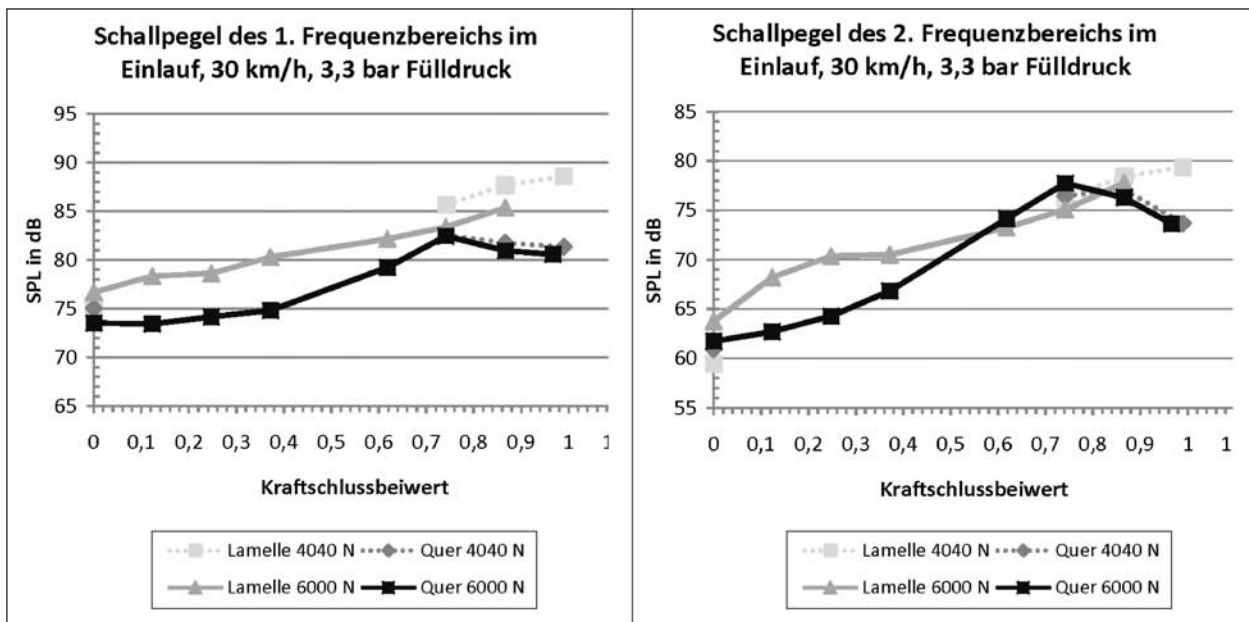


Bild 3.3-15: Schallpegel des lamellierten Reifens im Vergleich mit querprofilierem Reifen in Abhängigkeit des Kraftschlussbeiwerts bei beiden untersuchten Radlasten (4.040 N und 6.000 N) für 3,3 bar Reifenfülldruck (entspricht Auslastung von ca. 55 % bzw. 80 – 85 % der Tragfähigkeit bei diesem Fülldruck). Gemäß Bild 3.3-4 treten die gemessenen Kraftschlussbeiwerte im Antriebsschlupf-Bereich von 0-5 % auf.

genutzten Kraftschlussbeiwert. Die durchgezogenen Linien verbinden die Messpunkte, die unter erhöhter Radlast aufgenommen wurden, wohingegen die gestrichelten Linien die 4.040-N-Radlast-Messpunkte verbinden. Allgemein nimmt der Schallpegel in beiden Frequenzbereichen mit dem ausgenutzten Kraftschlussbeiwert (entspricht der Umfangskraft) zu. Innerhalb des ersten Frequenzbereichs übersteigt der Pegel des Querprofilreifens den Pegel des lamellierten Reifens für das FR und die Messung unter 0 N Umfangskraft, was an der ausgeprägten Querprofilierung und der viel steiferen Laufstreifenmischung liegt. Für die übrigen Messungen übersteigt der Pegel des lamellierten Reifens den Pegel des Querprofilreifens. Dieser stärkere Anstieg des Pegels mit der Umfangskraft liegt zum einen in dem allgemein durch die Umfangskraft bewirkten Pegelanstieg, die bei dem lamellierten Reifen zu deutlich höheren Schlupfwerten führt als beim Querprofilreifen. Damit dürfte eine starke Erwärmung der Reifenoberfläche einhergehen, die den Speichermodul der ohnehin schon sehr weichen Mischung noch weiter absenkt. Damit befand sich der Reifen möglicherweise im Gleitgeschwindigkeitsbereich der abfallenden Adhäsionsreibung, was selbsterregte Schwingungen begünstigt. Möglicherweise war der Pegelanstieg aber auch durch eine verstärkte Abnutzung des lamellierten Profils begründet. Dieser ausgeprägte Verschleiß des Profils während der Messreihe wurde nur bei diesem Reifen beobachtet.

Im zweiten Frequenzbereich übersteigt der Pegel des Querprofils bei hoher Radlast den Pegel des lamellierten Reifens bei vergleichbarer Zunahmerate. Die liegt daran, dass durch die äquidistante Profilierung des Reifens auch hohe Profilklotzordnungen noch ungewöhnlich hohe Schalldruckpegel aufweisen. Bei der für diesen Fülldruck angemessenen Radlast von 4.040 N weist bei hoher Umfangskraft der lamellierte Reifen den höheren Pegel auf.

In Bild 3.3-15 sind die Pegel der Messreihen bei 3,3 bar, Reifenfülldruck bei ansonsten gleichen Parametern wie in Bild 3.3-14 dargestellt. Der Anstieg des Pegels verläuft hierbei für den lamellierten Reifen vergleichsweise zur Messung bei 2 bar und liegt bei ca. 10 dB. Für den querprofilierten Reifen ist zunächst nur eine geringe Pegelzunahme mit zunehmendem Kraftschlussbeiwert zu verzeichnen. Erst ab Kraftschlussbeiwerten zwischen 0,4 und 0,5 steigt der Pegel kräftig an, um bei hohen Umfangskräften und weiter gestiegenem Schlupf wieder abzusinken. Hier könnte, wie bereits erwähnt, ein Abbau von Verspannungen in den Profilelementen durch stärkeres Gleiten die Ursache sein. Demgegenüber steigt der Pegel des lamellierten Reifens mit der Umfangskraft bzw. dem Schlupf kontinuierlich an. Mögliche Gründe dafür wurden bereits genannt.

Bild 3.3-16 und Bild 3.3-17 zeigen die berechneten Pegeldifferenzen des ersten und zweiten Frequenzbereichs jeweils für den Zustand des FR und die

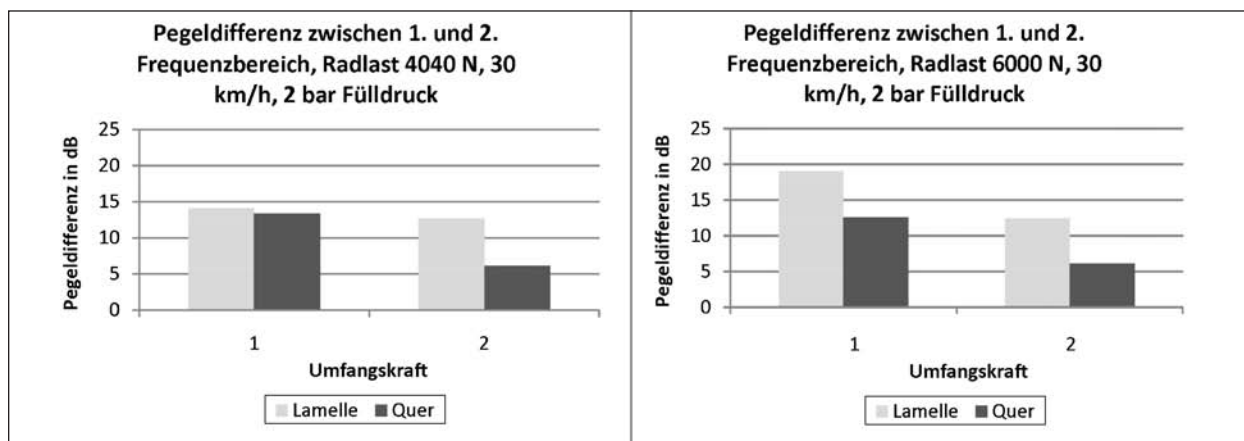


Bild 3.3-16: Pegeldifferenz zwischen erstem und zweitem Frequenzbereich bei 30 km/h und 2 bar

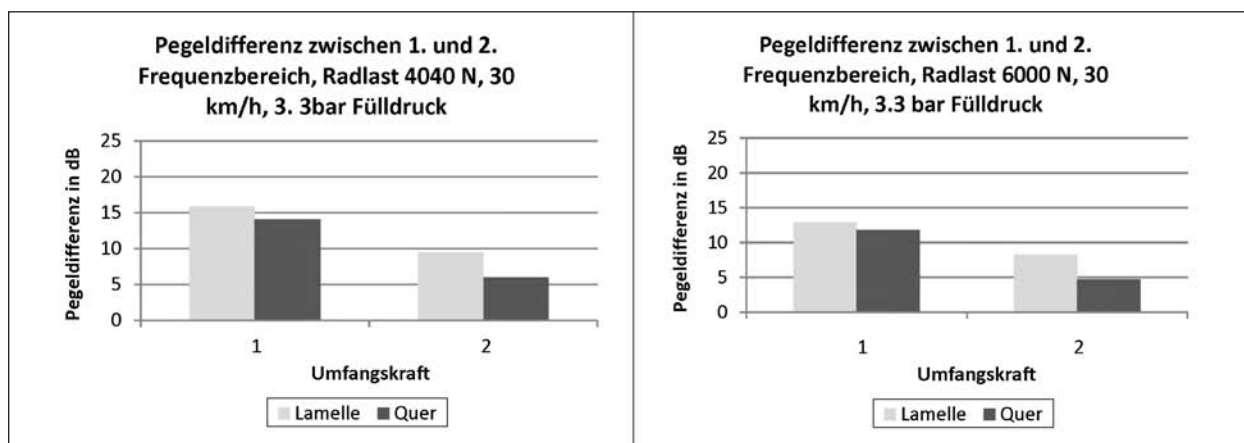


Bild 3.3-17: Pegeldifferenz zwischen erstem und zweitem Frequenzbereich bei 30 km/h und 3,3 bar

Umfangskraft 3.000 bzw. 4.450 N, was dem Kraftschlussbeiwert von $\mu_{X,W} = 0,74$ entspricht. Mit steigender Umfangskraft steigt auch die Bedeutung des zweiten Frequenzbereichs, was auf erhöhten Schlupf und damit stärkeres Gleiten zurückzuführen ist. In beiden Bildern wird dies durch sinkende Pegeldifferenzen bei den Messungen unter Umfangskraft deutlich. Für den Vergleich zwischen den unterschiedlichen Radlasten zeigen sich für die Messungen bei 2 bar Fülldruck (Bild 3.3-16) unter gleichem Kraftschlussbeiwert von 0,74 kaum unterschiedliche Pegeldifferenzen für beide Reifen. Bei der FR-Messung steigt die Bedeutung des ersten Frequenzbereichs mit der Erhöhung der Radlast für den lamellierten Reifen um ca. 5 dB, vermutlich durch stärkere Klotzdeformation und dadurch erhöhtes Airpumping und Klotzausschnappen. Für die Messung bei 3,3 bar Fülldruck sinkt die Bedeutung des ersten Frequenzbereichs mit ansteigender Umfangskraft, da nun durch die höhere Flächenpressung stärkeres Gleiten einsetzt. In die gleiche Richtung wirkt die Erhöhung der Radlast, die zu einer Vergleichmäßigung der Bodendruckverteilung führt.

Bild 3.3-18 und Bild 3.3-19 zeigen den ermittelten Geräuschgradienten m unter Radlast 4.040 N. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Gradient in Bild 3.3-18 (anders als bei Bild 3.3-19) allein aus den Schallpegeln bei erhöhten Umfangskraftwerten 3.000, 3.500 und 4.000 N berechnet wurde. Bild 3.3-18 zeigt, dass der Pegel des Querprofilreifengeräuschs bei derart hohen Umfangskraftwerten bei erhöhtem Reifendruck abnimmt, was, wie bereits erwähnt, auf einem Abbau der Verspannung in den Profilelementen durch stärkeres Gleiten infolge des verringerten Reibbeiwerts beruhen könnte. Außer für den Querprofilreifen bei 2 bar Fülldruck bei 4.040 N Radlast wurden unter allen Bedingungen, vermutlich durch verstärktes Gleiten, für den Geräuschgradient im zweiten Frequenzbereich höhere Werte als im ersten Frequenzbereich ermittelt. Dabei fallen die Geräuschgradienten für die Messungen unter erhöhter Radlast generell geringer aus. Letzteres liegt daran, dass der Geräuschgradient nicht in dB pro F_U/F_Z , sondern in dB pro F_U angegeben ist und damit die Reibwertbeanspruchung bei höherer Radlast kleiner ist.

Für den Vergleich der Gradienten unter 2 und 3,3 bar Fülldruck lässt sich feststellen, dass der Gradient bei 4.040 N Radlast für den erhöhten Fülldruck geringer ausfällt. Dies könnte seine Ursache darin haben, dass die unter höherem Fülldruck und damit höherer Flächenpressung bereits erhöhte Profilklotzdeformation durch eine zusätzliche Umfangskraft weniger stark zunimmt. Bei der Messung unter 6.000 N Radlast ist dieser Sachverhalt nicht feststellbar, vermutlich weil bei geringem Fülldruck durch die Überauslastung des Reifens die Deformation des Reifenaufbaus besonders groß ausfällt und durch die Fülldruckerhöhung die reduzierte Reifenaufbaudeformation die erhöhte Profilklotzdeformation teilweise kompensiert und damit wieder eine erhöhte Deformation durch Umfangskraft ermöglicht. Bei dem Querprofilreifen lässt sich sogar ein Anstieg des Gradienten mit ansteigendem Füll-

druck feststellen. Hier dürfte aufgrund der steiferen Bettung der Profilklotze bei 3,3 bar (73 dB) durch eine Umfangskraft eine größere Einflussmöglichkeit auf das Ausschlagen der Profilklotze gegeben sein als bei 2 bar, wo sich durch die Überauslastung des Reifens mit 6.000 N Radlast das Profilausschlagen bereits auf einem hohen Niveau (79 dB) befindet.

3.3.4.5 Einfluss des Profilverleißes

Nach den Messungen mit dem lamellierten Reifen wurde mit bloßem Auge sichtbar ein starker Profilverleiß festgestellt (vgl. Bild 3.3-20). Zur Ermittlung des Einflusses des starken Verschleißes auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch wurden daher die Referenzmessungen (FR) und jeweils eine Umfangskraftmessung im Anschluss an die Messungen wiederholt.

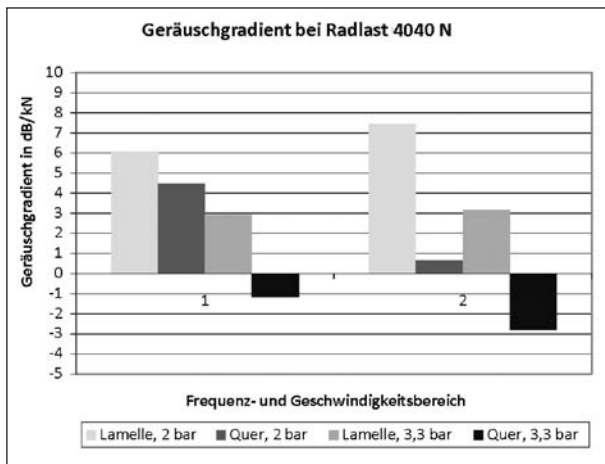


Bild 3.3-18: Geräuschgradient bei 4.040 N Radlast und hoher Umfangskraft (75-100 % der Normalkraft), aufgeteilt in die untersuchten Frequenzbereiche

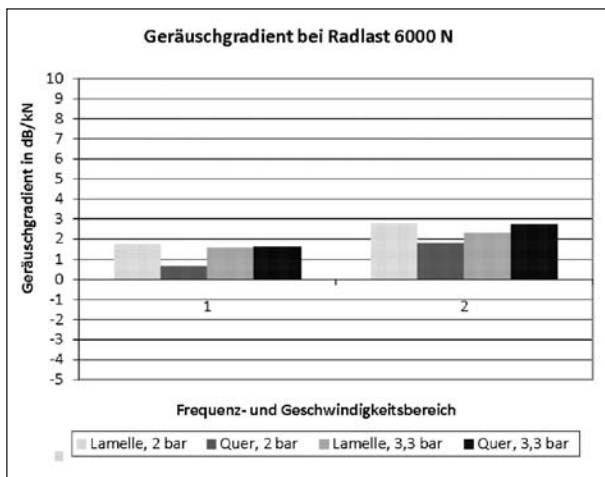


Bild 3.3-19: Geräuschgradient bei 6.000 N Radlast, bestimmt mit Umfangskräften von 0-100 % der Normalkraft, aufgeteilt in die untersuchten Frequenzbereiche

Bild 3.3-21 zeigt im Diagramm auf der linken Seite den Vergleich der zu Beginn der Messreihe und zum Ende der Messreihe aufgenommenen Schallspektren hier beispielhaft für den Reifeneinlauf. Hierbei ist unter Messreihe die aufeinanderfolgende Untersuchung der einzelnen Umfangskräfte 3.000, 3.500 und 4.000 N bei einer Radlast von 4.040 N, der Umfangskräfte 0, 740, 1.485, 2.230, 3.710 und 4.450 N bei einer Radlast von 6.000 N jeweils bei 2 bar Reifenfülldruck sowie der gleichen Umfangskräfte und Radlasten bei einem Reifenfülldruck von 3,3 bar zu verstehen. Für die im Einlauf ermittelten Spektren sind für das FR ein mittlerer Geräuschpegelanstieg von 7,3-12,4 dB und für die Aufnahme unter Umfangskraft von 3.000 N ein mittlerer Geräuschpegelanstieg von 2-6,2 dB zu erkennen.

Es ist davon auszugehen, dass der Profilverleiß durch die höheren Umfangskraftwerte und damit verbunden erhöhten Schlupf verursacht wurde und

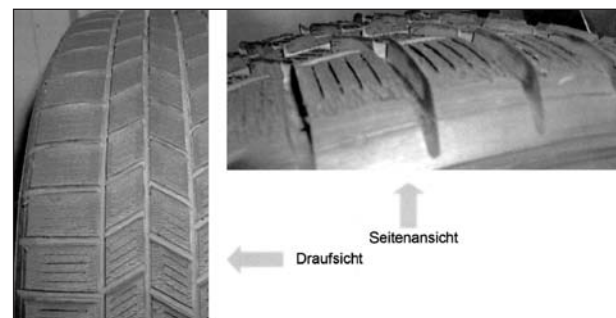


Bild 3.3-20: Starker Profilverleiß bei lamelliertem Reifen nach Aufnahme der Messreihe

aufgrund der vergleichsweise weichen Mischung des Reifengummis derart stark ausfiel. Bei der ersten Messung ohne Umfangskraft (FR) wurde der Reifen vergleichsweise wenig verschlissen, sodass für die erste Messung bei FR die Pegeldifferenz im Vergleich zur abschließenden FR-Messung besonders stark ausfällt.

Bild 3.3-21 zeigt rechts einen Vergleich von innerhalb der Messreihe und im Anschluss an die Messreihe aufgenommenen Schallspektren für den Reifeneinlauf. Hier werden somit Messungen, die nach ca. 75 % der Messreihe durchgeführt wurden, mit im Anschluss an die Messreihe durchgeführten Messungen verglichen. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Reifen bereits erste Verschleißerscheinungen aufwies. Die mittleren Schalldruckpegel des ersten Frequenzbereichs fallen nach der Messung für FR und für die 0-N-Umfangskraft-Messung um rd. 5 dB (Geräuschreduktion). Demgegenüber steigen die Pegel im 2. Frequenzbereich um 5,6 dB bei FR und um ca. 1 dB bei 0 N Umfangskraft (Geräuscherhöhung).

Für den innerhalb der hier vorgestellten Untersuchung verwendeten lamellierten Reifen bedeutete der unter hohen Umfangskräften aufgetretene Verschleiß (Verminderung der Profilhöhe sowie Verformung der Profilblöcke) zunächst eine deutliche Pegelsteigerung. Die beschriebene Geräuschreduktion innerhalb des ersten Frequenzbereichs trat für den Vergleich nach ca. 75 % der Messreihe und nach 100 % der Messreihe auf. Es ist aus Abriebläufen im Fahrversuch mit begleitender Geräuschprüfung bekannt, dass insbesondere das mit

dem Reifenprofil in Zusammenhang stehende Abrollgeräusch zunächst über der Laufstrecke des Reifens zunimmt, nach etwa einem Viertel des Reifenlebens ein Maximum erreicht und anschließend wieder abfällt. Durch die scharfe Beanspruchung des Reifens wurde offenbar während der Messreihe das Maximum bereits überschritten. Die innerhalb des Berichtszeitraums durchgeführten Untersuchungen erlauben allerdings keine generellen Aussagen zur Geräuschentwicklung bei Verschleiß, da dieser lediglich für einen untersuchten Reifen derart ausgeprägt beobachtet und auch in den innerhalb dieses Berichts dargestellten Experimenten nicht explizit untersucht wurde.

3.3.5 Zusammenfassung und Ausblick

Mittels Einsatzes eines (geräuschgekapselten) Retarders könnten die Störgeräusche des Radmotors des Innentrommel-Prüfstands im belasteten Zustand ohne das Reifen-Fahrbahn-Geräusch erfasst werden. Das bedeutet eine Erfassung der Störgeräusche ohne das interessierende „Nutzgeräusch“. Durch anschließende Messung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs am IPS (Nutz- und Störgeräusch) und Differenzbildung der aufgenommenen Pegel könnte das exakte Reifen-Fahrbahn-Geräusch am IPS ermittelt werden. Auf diese Weise wäre auch eine Ausdehnung der Untersuchungen auf breitere Frequenzbereiche und höhere Geschwindigkeiten möglich. Weitere Vergrößerungen des Nutz-/Störgeräuschabstandes am IPS versprechen schalldämmende Maßnahmen, beispielsweise durch das Einbringen von absorbierendem Material zwischen Radmotor und Reifen.

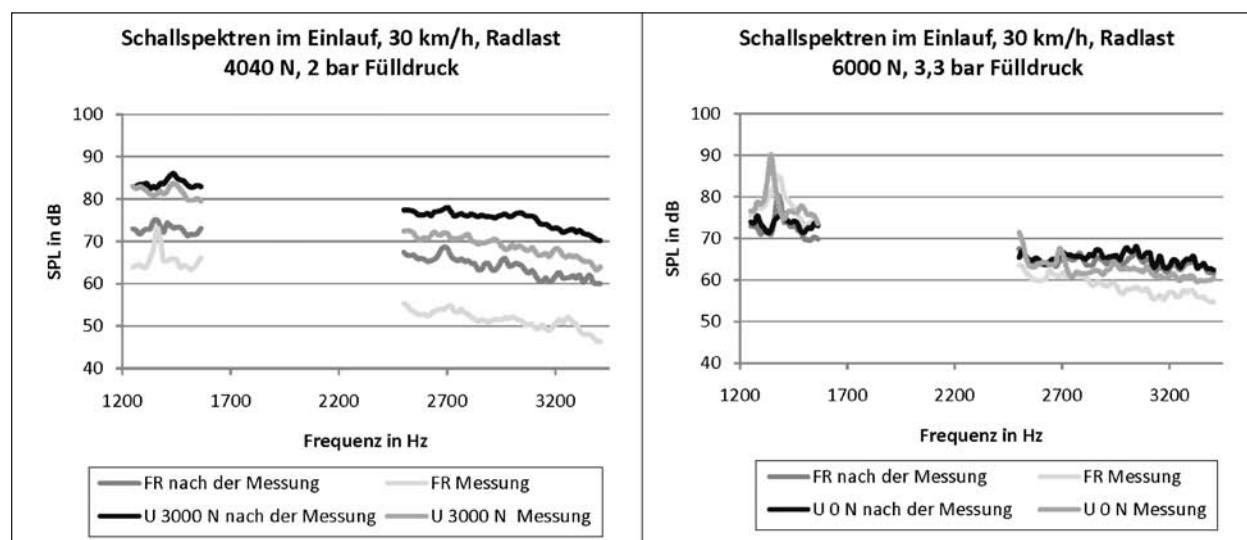


Bild 3.3-21: Schallspektren unter Einfluss des starken Profilverschleißes des lamellierten Reifens

Durch den Einsatz mehrerer Schallintensitätssensoren am IPS könnten die Schalleistungspegel (nach ISO 9614) unterschiedlicher Reifen unter variierenden Bedingungen erfasst werden. Zusätzlich sind dazu konstruktive Erweiterungen des Prüfstandes erforderlich, da die Schallquelle nach der Norm auf einer umhüllenden Fläche abgetastet werden muss [2].

Weiterhin liefern die Ergebnisse Hinweise auf die geräuscharme Auslegung von Reifen auch unter Antriebsmoment. Dabei ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand, wie in Bild 3.3-8 und Bild 3.3-9 dargestellt, eine grobe Querprofilierung zu unterlassen. Die Klasse der Reifen mit umlaufenden Rillen ist aufgrund ihres geringen Rollgeräuschs auch unter Antriebskräften geräuscharm. Für diese Klasse ist eine leichte Querprofilierung möglich (Sommerreifen 1 und 2), um einen zu steilen Pegelanstieg bei höheren Frequenzen zu vermeiden. Diese Querprofilierung sollte, wie allgemein bekannt, unter einem möglichst spitzen Winkel zur Berandung der Bodenaufstandsfläche verlaufen. Eine zu intensive Lamellierung sollte unterbleiben. Da Adhäsion durch Nässe stark reduziert wird, ist im Interesse einer möglichst witterungsunabhängigen Griffigkeit diese vor allem durch Hysteresereibung zu erreichen. Eine dünne, nicht zu niedermodulige Elastomerschicht an der Oberfläche des Reifens verringert Adhäsion, erhöht durch die damit einhergehende höhere Materialdämpfung die Hysteresereibung und begünstigt den Abbau von Klotzverspannungen durch lokales Gleiten. Das darunterliegende Laufstreifenmaterial sollte einen möglichst niedrigen Elastizitätsmodul haben, um den Kraftaufbau bei der Verformung des Reifens durch die Mikrotextur der Fahrbahn gering zu halten und Schwingungen vom Reifenaufbau zu entkoppeln. Die Reifenkontur sollte für eine gleichmäßige Bodendruckverteilung und geringe Verformung des Reifenaufbaus unter Antriebsmoment ausgelegt sein. Aus dem gleichen Grund sollte der Fülldruck nicht zu gering und nicht zu hoch gewählt werden, um dadurch sowohl im Rollen als auch unter Umfangskraft die Profilklotzdeformation nicht zu groß werden zu lassen, was sich positiv auf den Profileräuschanteil auswirken sollte. Es wird dadurch zwar das Reibgeräusch etwas angehoben, dieses ist aber meist geringer als das Profilgeräusch, zumindest wenn die Umfangskräfte moderat bleiben. Weiterhin wirkt sich ein etwas höherer Fülldruck positiv auf den Rollwiderstand aus. Der Komfortnachteil wird durch den weicheren Laufstreifen kompen-

siert. Dieser Reifen wird ungünstige Handlingeigenschaften aufweisen. Hierfür wäre eine weiche Deckschicht für hohen Grip durch starke Adhäsion auf trockener Straße und darunterliegendem hartem Laufstreifen für schnelles Ansprechen günstig. Um weitergehende Aussagen über die geräuscharme Gestaltung von Reifen unter Antriebsmoment treffen zu können, ist die Messung an systematisch variierten Profilmustern erforderlich. Ebenfalls sind weitere Messungen zu empfehlen, um den Einfluss von Radlasterhöhung und Reifenfülldruckänderungen zu untersuchen. Dazu wurden innerhalb dieses Berichts nur zwei unterschiedliche Profilierungen analysiert.

Weitere interessante Forschungsarbeiten ergeben sich aus dem Abgleich der am Reifen-Innentrommel-Prüfstand im Nahfeld gewonnenen Erkenntnisse zu Einflussfaktoren auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch mit Fernfeldmessungen. Diese waren für das innerhalb dieses Berichts vorgestellte Projekt „Experimentelle Untersuchung zum Einfluss des Antriebsmoments auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“ nicht vorgesehen. Außerdem sollte der Einfluss der Fahrbahn auf die Pegelerhöhung unter Antriebsmoment in weiteren Forschungsarbeiten analysiert werden.

Die hier durchgeführten Arbeiten und Interpretationen legen zunächst folgende Aussagen für eine günstige Fahrbahngestaltung nahe: Zur Reduzierung des Einflusses der witterungsabhängigen Adhäsion sind glatte Gesteinsoberflächen zu vermeiden. Auch sollte im Bereich der Mikrotextur eine möglichst gleich bleibende Amplitude im räumlichen Wellenlängenspektrum erreicht werden, um dem Abfall des Reibbeiwerts über der Gleitgeschwindigkeit oberhalb des Adhäsionsmaximums und damit dem Auftreten selbsterregter Schwingungen aus Stick-Slip-Vorgängen entgegenzuwirken. Dies könnte durch eine geeignete Sieblinie sowie polierresistente Gesteinsarten unterstützt werden, die idealerweise bei starker mechanischer Beanspruchung an der Oberfläche fraktal aufbrechen und sich dadurch selbst nachschärfen.

Literatur

- [1] ROBENS, G.: Konzeption einer Akustikmess-einrichtung zur Messung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Karlsruhe: nicht veröffentlichte Diplomarbeit am IFFMA, 2007. Bde. Nr.: 07-F-0002

-
- [2] STIER, Ch.: Untersuchung der akustischen Eigenschaften eines Innentrommel-Prüfstands. Karlsruhe: Nicht veröffentlichte Diplomarbeit am IFFMA, 2007. Bde. Nr.: 07-F-0003
- [3] GAUTERIN, F., GROLLIUS, S.: Geräusch- und Schwingungskomfort von Kraftfahrzeugen. Reifen-Fahrbahn-Geräusche unter Antriebsmoment. München: Haus der Technik, 2008
- [4] GAUTERIN, F.: Reifen/Fahrbahngeräusch – der leise Reifen, Geräuschminderungspotenziale in der Reifenkonstruktion. Augsburg: Tagung Geräuschmindernde Fahrbahnbeläge in der Praxis, 2004
- [5] ESSERS, U.: VDI Berichte. Maßnahmen zur Verminderung der Geräuschemission von Kraftfahrzeugen. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1975. Bd. 238
- [6] STEVEN, H., PAULS, H.: VDI Berichte. Untersuchungen zu einem Meßverfahren für das Reifen-Fahrbahn-Geräusch von Pkw. Düsseldorf: Verlag des Vereins Deutscher Ingenieure, 1989. Bd. 778
- [7] RIMONDI, G.: VDI Fortschritt-Berichte. 14 Internationales Wiener Motorensymposium 6.-7. Mai 1993. Tyre Contribution To External Noise. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993, Bd. 1, Reihe 12, Nr. 182
- [8] HAUG, G.: Verfahren zur Bestimmung der Antriebsgeräusche und der zugkraftabhängigen Reifen-Fahrbahn-Geräusche von schweren Nutzfahrzeugen. Stuttgart: Expert Verlag, 1999
- [9] GAUTERIN, F.: Möglichkeiten zur Lärmreduzierung durch moderne Reifentechnik. Hamburg: ADAC Fachforum „Lärminderung in Städten und Gemeinden“, 2005
- [10] GAUTERIN, F., SCHMIDT, H.: Einflussparameter auf das Reifen/Fahrbahngeräusch bei schweren Nutzfahrzeugen. Stuttgart: ATZ/MTZ Akustik Kongress, 2006
- [11] EHINGER, P., GROßMANN, H., PILGRIM, R.: Fahrzeug-Verkehrsgeräusche – Mess-, Analyse- und Prognoseverfahren bei Porsche. Automobiltechnische Zeitschrift. 1990, Bd. 92
- [12] BREE, H.-E. de.: An overview of Microflown Technologies. s. l.: Acta Acustica. 2003, Vol. 89
- [13] BAST: Jahresbericht 2005. Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2006
- [14] PEARSSON, B. N. J.: Sliding Friction. Berlin: Springer-Verlag, 2000
- [15] BARQUINS'I, M., ROBERTS, A. D.: Rubber friction variation with rate and temperature: some new observations. J. Phys. D: Appl. Phys. 1986, Vol. 19, pp. 547-563

3.4 Teilprojekt „Entwicklung Simulationstool – Strukturdynamik rollender Reifen“

Prof. Dr.-Ing. U. Nackenhorst
 Dr.-Ing. Maik Brinkmeier
 M. Sc. Anuwat Suwannachit
 Institut für Baumechanik und Numerische
 Mechanik, Leibniz-Universität Hannover

3.4.1 Zielsetzung

Auf der Grundlage der im Rahmen des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 1“ entwickelten numerischen Methoden zur Eigenwertberechnung rollender Reifen sollten in diesem Teilprojekt die Berechnungsmethoden hinsichtlich der validen Prognose der Auswirkung konstruktiver Details auf die Rollgeräusentwicklung rollender Reifen auf verschiedenen Fahrbahnbelägen weiter entwickelt werden: die Validierung und zielgerichtete Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle, die Erprobung der Berechnungsverfahren zur Reifenoptimierung im Rahmen von Parameterstudien und die Extrapolation der Anwendbarkeit auf Lkw-Reifen. Neben gut definierbaren Arbeiten musste in anderen Arbeitspunkten wissenschaftliches Neuland betreten werden, deren Fortschritte a priori schwer planbar waren. Der ursprüngliche Arbeitsplan wurde im weiteren Verlauf des Projektes nach dem jeweiligen Kenntnisstand stetig fortgeschrieben.

3.4.2 Finite-Element-Modellierung rollender Reifen

Die im Forschungsverbund „Leiser Straßenverkehr 1“ entwickelten Berechnungsmethoden und Berechnungsmodelle sind zielgerichtet für die valide Prognose des transient dynamischen Verhaltens rollender Reifen weiter entwickelt worden. Nachdem die physikalische Konsistenz der Methoden, z. B. anhand Vergleichen mit analytischen Lösungen für geometrisch einfache Modellprobleme, sichergestellt war, wurden detaillierte Reifenmodelle aufgebaut, die numerische Effizienz der Algorithmen verbessert und Validierungsprozeduren entwickelt. Berechnungsmethoden, Berechnungsmodelle, Auswertemethoden und Experimente für den Validierungsprozess wurden dabei kontinuierlich an den aktuellen Kenntnisstand adaptiert.

3.4.2.1 Berechnungsstrategie und Modellierung

Mit diesen Forschungen wird die physikalisch motivierte Modellbildung zur Berechnung der Rollgeräusche von Reifen mit der Finite-Element-Methode erstmals etabliert. Während bis dato rein beobachtende Wissenschaften durch statistische Auswertung gemessener Vorbeifahrpegel etc. bestenfalls Aussagen über die akustischen Eigenschaften von Fahrbahnen ermöglichten und die so genannten hybriden Modelle auf sehr vereinfachten strukturmechanischen Modellen basieren, deren Parameter nur anhand eines größeren gemessenen Reifenkollektivs bestimmt werden können, ermöglicht dieser Modellierungsweg das Studium von Einflüssen der Reifenkonstruktion im Detail. Eingabedaten sind dabei physikalische Parameter wie Materialeigenschaften und der konstruktive Aufbau, nicht jedoch die vorher gemessene Strukturantwort. Letztere wird dazu verwendet, die Berechnungsmodelle zu validieren. Gleichzeitig erlaubt die detaillierte räumliche Diskretisierung der Reifenstruktur völlig neue, durch messtechnische Verfahren kaum erschließbare Einblicke in die physikalischen Wirkungsketten und Detailmechanismen. Dafür wurde eine mehrstufige Berechnungsstrategie entwickelt.

Im ersten Schritt wird der stationäre Rollvorgang in einer gemischten Eulerschen-Lagrangeschen (Arbitrary Lagrangian Eulerian) Beschreibung berechnet [1]. Bei dieser ALE-Beschreibung wird ein raumfestes Netz zugrunde gelegt, mit den Vorteilen, dass stationäres Rollen zeitunabhängig beschrieben ist und die später berechneten Schwingungen der Reifenstruktur unmittelbar als räumliche Größen für die Schallabstrahlungsberechnung vorliegen. Beim stationären Rollen werden alle Nichtlinearitäten, wie große elastische Deformation, nichtlineare Materialeigenschaften und der Rollkontakt, im Detail berücksichtigt, allerdings erfordert die Simulation inelastischer Materialeigenschaften und des Tangentialkontaktes zusätzlichen Aufwand, siehe [2]. Die Erstellung der Finite-Element-Modelle und die Berechnung des stationären Rollvorgangs wurden mit dem Inhouse-Code bei der Continental AG durchgeführt, wobei inelastische Materialeigenschaften, wie z. B. der Mullins-Effekt, im Rahmen dieser Arbeiten nicht berücksichtigt wurden. Diese Berechnungsergebnisse wurden an das IBNM übertragen.

In einem zweiten Schritt erfolgte die Berechnung der transienten Dynamik rollender Reifenmodelle

am IBNM mittels modaler Superposition. Dieser Berechnungsschritt setzt die Annahme einer linearen Strukturantwort voraus, es werden also kleine Schwingamplituden um die stationäre Gleichgewichtslage angenommen, wobei der Kontaktzustand eingefroren wird. Begründet wird diese Annahme mit energetischen Überlegungen, bei den relevanten hohen Frequenzen können gar keine großen Schwingantworten angeregt werden. Selbst bei der Überfahrt von Schlagleisten oder Fahrbahnübergängen konnte anhand von Vergleichsberechnungen nachgewiesen werden, dass oberhalb von 200 Hz die Annahme der Linearität zutreffend ist. Die modale Superposition untergliedert sich wiederum in zwei Teilschritte: 1. die Eigenwertanalyse und 2. die modale Anregung und Berechnung der Betriebsschwingungen.

Eine wissenschaftliche Herausforderung war dabei zunächst, die Eigenwertberechnung für diese Problemstellung einer numerischen Lösung zugänglich zu machen. Die Eigendynamik rotierender und somit auch rollender Systeme wird durch gyroskopische Effekte messbar beeinflusst, siehe [3] und [4]. Dies resultiert in quadratische Eigenwertprobleme mit unsymmetrischen Matrizen, welche auf komplexwertige Eigenvektoren führen. Vor dem Hintergrund, dass für Reifenmodelle in dem hier relevanten Frequenzbereich bis zu 1,5 kHz mehrere 1.000 Eigenpaare extrahiert werden müssen, wobei eine komplexe Gleitkommazahl-Arithmetik erforderlich ist, musste dafür Pionierarbeit geleistet werden.

Für den zweiten Aspekt, die modale Superposition, stand die Analyse der Anregungsmechanismen durch den Reifen-Fahrbahn-Kontakt im Zentrum dieser Forschung. Für diese grundlegenden Untersuchungen wurden dem IBNM die Ergebnisse der Texturmessungen für die Beläge auf den Außentrommelprüfständen im Labor der Continental AG (Glattasphalt und Rauasphalt) bereitgestellt. In einem ersten Schritt mussten dabei Methoden entwickelt werden, offensichtliche Artefakte in dem überlieferten Datenmaterial zu korrigieren. Als weitere schwierige Aufgabe erwies sich dabei die Bestimmung der Anregungsfunktion auf Grundlage der Texturbeschreibung, zumal diesbezüglich eine besondere Sensibilität des Reifen-Fahrbahn-Systems herausgearbeitet werden konnte. Es wurden verschiedene Ansätze untersucht, die in diesem Bericht beschrieben sind. Angemerkt sei aber bereits hier, dass dieser Aspekt im Rahmen dieses Projektes nicht abschließend behandelt werden konnte. Es konnte deutlich herausgearbeitet wer-

den, dass die wirklichen Anregungsmechanismen messtechnisch mit den derzeit verfügbaren Techniken nicht erfassbar sind und darum nur Methoden der mikromechanischen Modellierung und skalenübergreifenden Simulation zu einem vertiefenden Verständnis beitragen können.

Die mittels modaler Superposition berechneten Betriebsschwingungsformen an der Reifenoberfläche wurden an die Kooperationspartner an der TU Hamburg-Harburg übergeben. Zur Datenkompression wurden die individuellen Reifenmodelle jeweils mit einem Oberflächen-Netz und einem Modell für die Felge aufbereitet.

Die physikalische Konsistenz des gewählten Modellansatzes konnte im Rahmen der Modellverifikation zweifelsfrei dargestellt werden. Als sensitiver Faktor bei der Validierung der Modelle wurde die konstitutive Beschreibung der Materialeigenschaften des Gummis insbesondere für den Aspekt der dynamischen Kontaktmodellierung herausgearbeitet.

3.4.2.2 Finite-Element-Modelle für Pkw-Glattreifen

Nach dem bisherigen Kenntnisstand orientiert sich die Elemententeilung im Reifenquerschnitt an dem Kompositaufbau und der Erfahrung validierter Berechnungsmodelle für das stationäre Rollen. Für den Querschnitt sind somit mindestens 15 verschiedene Materialgruppen vorzusehen, die eine entsprechend feine Finite-Element-Diskretisierung erforderlich machen. Während für stationäre Rollvorgänge bei einer geeigneten relativkinematischen Beschreibung in Umfangsrichtung eine feine Diskretisierung auf den Kontaktbereich beschränkt werden kann, diesbezüglich sei auf die grundlegenden Arbeiten [1, 2] verwiesen, muss für die transiente Dynamik in dem hier relevanten Frequenzbereich eine entsprechend feine Ortsauflösung über den gesamten Umfang und auch in azimuthaler Richtung vorgenommen werden, um die kurzen Wellenlängen abbilden zu können. Dazu wurden systematische Konvergenzstudien zur Frequenzauflösung der räumlichen Diskretisierung der Pkw-Glattreifenmodelle durchgeführt. Ein bis zu 1-1,5 kHz geeignetes Pkw-Glattreifenmodell beinhaltet zwischen 100.000 und 200.000 Freiheitsgrade. Beispielhaft ist in Bild 3.4-1 die Diskretisierung eines Reifenmodells dargestellt. Dieses Reifenmodell ist mit 80.000 Finiten Elementen diskretisiert und durch 200.000 Freiheitsgrade beschrieben. Dabei

wurden im Querschnitt 16 verschiedene Materialgruppen beschrieben.

Entsprechend hoch ist der numerische Aufwand. Die Berechnung aller Eigenvektoren bis 1.500 Hz (bis zu 3.500 Eigenwerte) bei fünf verschiedenen Geschwindigkeiten dauert ca. 5 Tage auf einem 2-Prozessor AMD Dual-Core 270 System. Dabei werden bis zu 12 GB Kernspeicher adressiert, die Berechnungsergebnisse nehmen einen Speicherplatz von 30 GB ein. Zu diesem Zweck wurden eigens für dieses Projekt geeignete Rechner installiert und die Berechnungssoftware für das Parallelcomputing optimiert. Neben der Rechenzeitanalyse und -optimierung der entwickelten Software auf diesen innovativen Hardwareplattformen wurden u. a. „State of the art“ Eigenwert- und Gleichungslöser

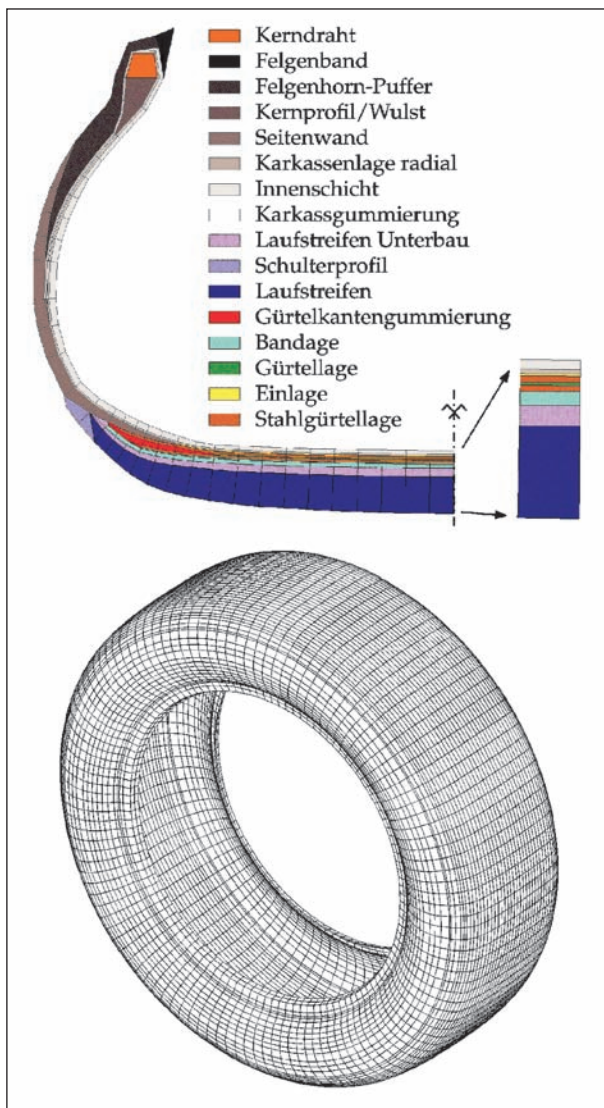


Bild 3.4-1: Finite Element Modell eines Pkw-Glattreifens, oben: Querschnittsmodell mit 16 verschiedenen Baugruppen, unten: Oberflächendiskretisierung

hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und Skalierbarkeit analysiert und bewertet. Für die numerische Berechnung der unsymmetrischen Eigenwertprobleme erwies sich ein Lanczos-Verfahren in Kombination mit einem direkten Gleichungslöser als optimal, dafür wurden die weit entwickelten Programmbibliotheken „ARPACK“ in Kombination mit dem direkten Gleichungslöser „PARDISO“ erschlossen. Über die formale Programmierung der entsprechenden Schnittstellen hinaus wurde ein ausgeklügelter hierarchischer Algorithmus entwickelt, der eine Berechnung für die vorliegenden Problemstellung erstmals ermöglicht [11].

3.4.2.3 Grundlegende Untersuchungen zur physikalischen Konsistenz

Eine erste Kernaufgabe bei der Simulation rollender Reifen bestand darin, das physikalische Verhalten korrekt abzubilden. Die physikalische Plausibilität der Berechnungsmodelle konnte z. B. am geschwindigkeitsabhängigen Aufspalten der Eigenmoden frei rotierender Reifenmodelle nachgewiesen werden. In Bild 3.4-2 ist ein typischer Gürtelbiegemode gezeigt, für das nicht rotierende Reifenmodell wird die in Bildmitte skizzierte stehende Schwingung berechnet. Rotiert der Reifen, spalten sich diese Moden in eine gegenläufige und eine mitläufige Welle auf, die durch die zugehörigen komplexen Eigenvektoren beschrieben werden. Bezüglich der theoretischen Grundlagen und weitergehender Detailuntersuchungen sei auf [3] verwiesen, hier sei nur festgestellt, dass mit der ge-

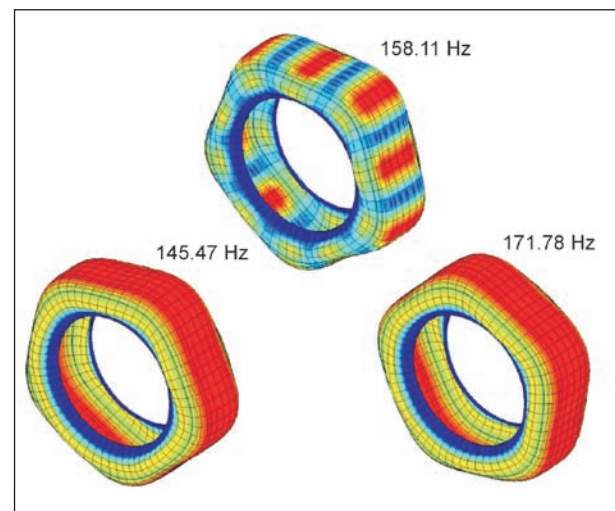


Bild 3.4-2: Aufspaltung der Eigenmoden in gegenläufige Wellen beim frei rotierenden Reifen. Aufgetragen ist das Verschiebungsmuster der komplexen Eigenvektoren und farbkodiert ist der Betrag der komplexen Knotenpunktverschiebung dargestellt

wählten Implementierung auch die gyroskopischen Effekte korrekt abgebildet werden. Angemerkt sei ferner, dass beim Rollkontakt in der Regel die Wellenbewegung aufgrund der gestörten Symmetrie behindert wird, sodass einfache Wellenformen i. Allg. nicht mehr beobachtbar sind, siehe [3].

Das Eigenwertspektrum eines Glattreifens (hier des Referenzreifens) bei verschiedenen Geschwindigkeiten auf dem Rollenprüfstand ist in Bild 3.4-3 dargestellt. Für dieses Reifenmodell wurden bis zur Frequenz von 1,5 kHz ca. 3.500 Eigenvektoren berechnet. Mit steigender Geschwindigkeit werden die Frequenzen bei Moden über 500 Hz moderat reduziert, ein Resultat der gyroskopischen Effekte und Masseneinflüsse [11]. In erster Näherung lässt sich der Verlauf der Kurven durch drei Geraden approximieren, eine Anfangstangente bis ca. 300 Hz, eine Sekante im Bereich zwischen 300 und 700 Hz und eine Tangente bei höheren Frequenzen. Daraus ist zu schließen, dass das prinzipielle Schwingungsverhalten des rollenden Reifens nach Frequenzbereichen eingeteilt werden kann.

In der Tat findet man im Bereich bis 300 Hz vorwiegend Gürtelbiegemoden, zwischen 300 und 700 Hz bekommt die Seitenwand eine größere Dominanz, und bei höheren Frequenzen treten lokale Moden auf. Beispielhaft sind in Bild 3.4-4 drei typische Moden aus diesen drei Frequenzbereichen herausgegriffen.

Da eine Bewertung der Strukturodynamik hinsichtlich der Reifenoptimierung auf Basis dieser globalen Darstellung kaum möglich ist, die Detailanalyse der 3.500 berechneten Eigenmoden aber ebenso

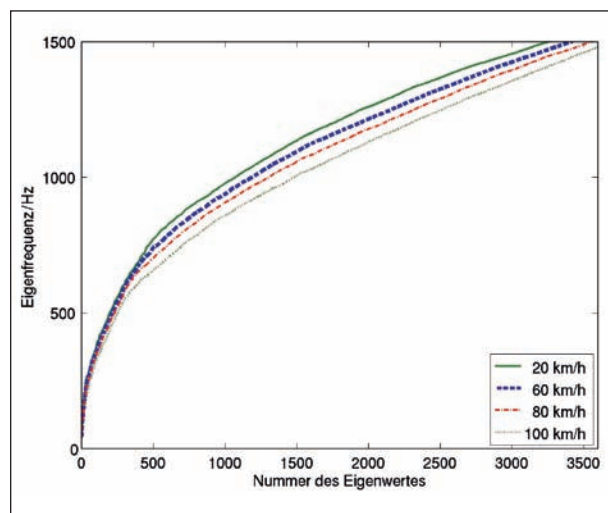


Bild 3.4-3: Eigenwertspektrum eines rollenden Glattreifens bei verschiedenen Geschwindigkeiten

wenig zielführend erscheint, wurde eine Methode zur Bewertung der modalen Partialenergie einzelner Baugruppen entwickelt, siehe [4]. Beispielhaft ist in Bild 3.4-5 die anteilige modale Energie gemittelt für die Baugruppen Gürtel, Seitenwand, Laufstreifen und äußere Oberfläche dargestellt.

Diese Darstellung bestätigt die auf Basis von Bild 3.4-3 getroffenen Aussagen; bis zu Frequenzen von 300 Hz weist die Gürtel-/Laufstreifen-Gruppe die größte modale Partialenergie auf, zwischen 300 und 700 Hz ist die Seitenwandgruppe dominant und darüber hinaus entwickelt der Laufstreifen eine Eigendynamik. Erwähnt sei, dass damit

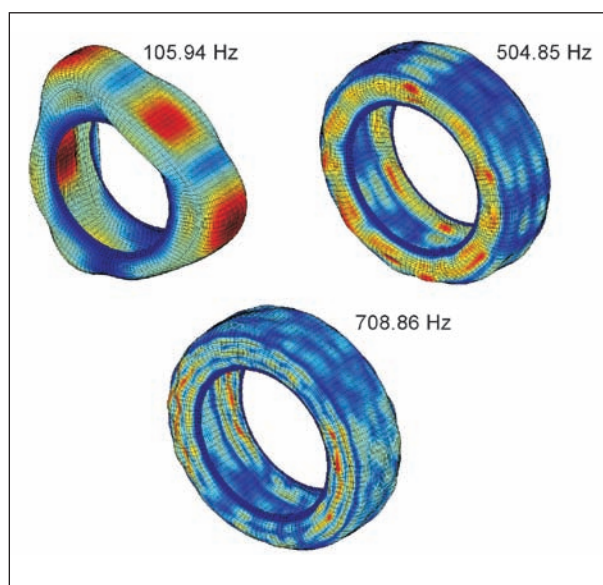


Bild 3.4-4: Typische Gürtelbiege-, Seitenwand- und lokale Moden

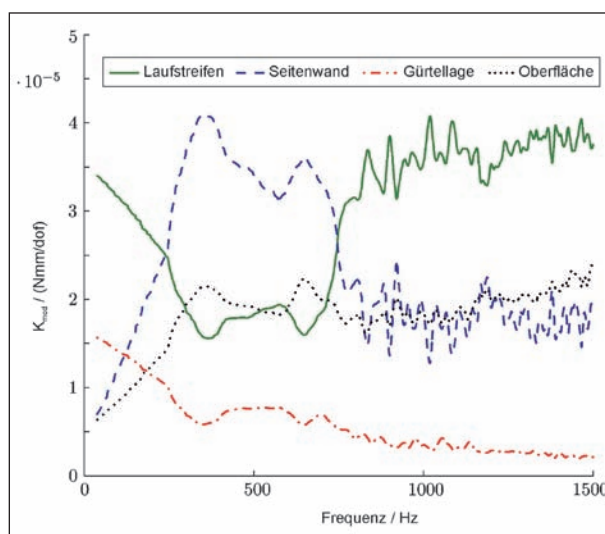


Bild 3.4-5: Modale Partialenergie einzelner Baugruppen aus der Eigenwertanalyse eines rollenden Reifenmodells

ein Analysewerkzeug zur Verfügung gestellt wird, mit dem eine Bewertung der strukturdynamischen Eigenschaften rollender Reifenkonstruktionen unabhängig von der Anregungsfunktion (Fahrbahneigenschaften) vorgenommen werden kann. Diese Darstellung ermöglicht einen schnellen Einblick in das Systemverhalten, Details können dann zielgerichtet aus den Berechnungsergebnissen rekonstruiert werden. Exemplarisch ist in Bild 3.4-6 die Momentaufnahme einer Eigenschwingung im Reifen-Querschnitt dargestellt, in diesem Fall bewegt sich z. B. der Laufstreifen weitestgehend entkoppelt von der Gürtelgruppe. Die entwickelten Simulationsmethoden ermöglichen somit einen vertiefenden Einblick in das physikalische Verhalten rollenden Reifen.

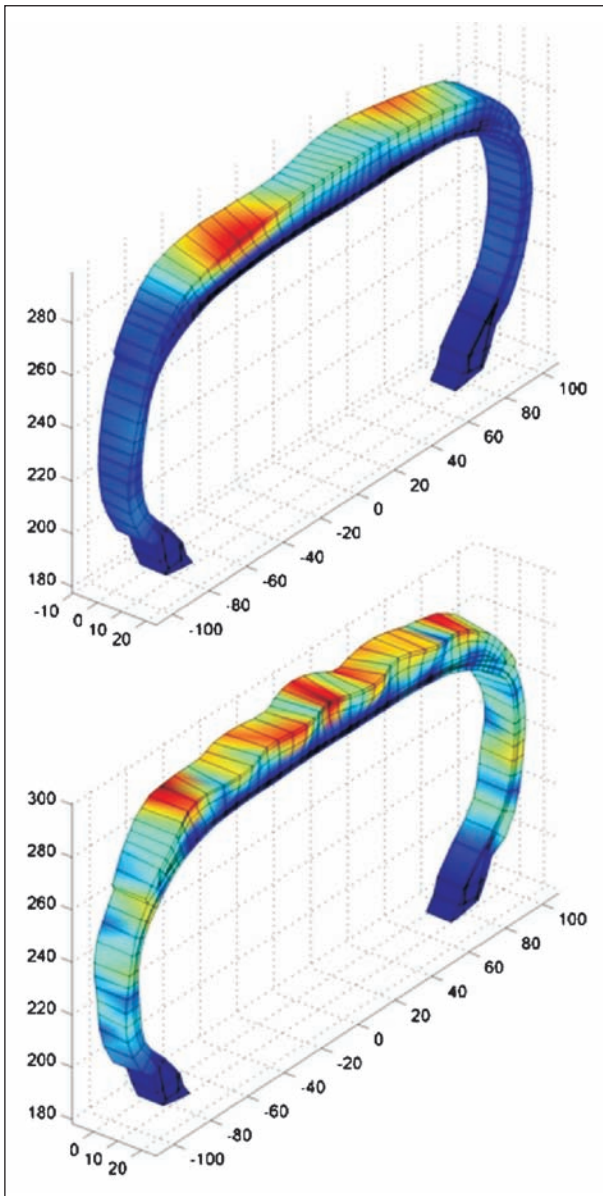


Bild 3.4-6: Details einer Eigenschwingung

3.4.2.4 Anregungsfunktion der Fahrbahntextur

Die beiden Beläge auf den Trommelprüfständen der Continental AG wurden vermessen. Auf der Grundlage der von der BAST bereitgestellten Daten wurden die Texturen analysiert und charakterisiert. Die Frequenzspektren beider Beläge sind in Bild 3.4-8 dargestellt, das höhere Anregungspotenzial des Rauasphalts ist deutlich erkennbar. Weiter-



Bild 3.4-7: Trommeltexturen, links: Glattasphalt, rechts: Mira-Textur

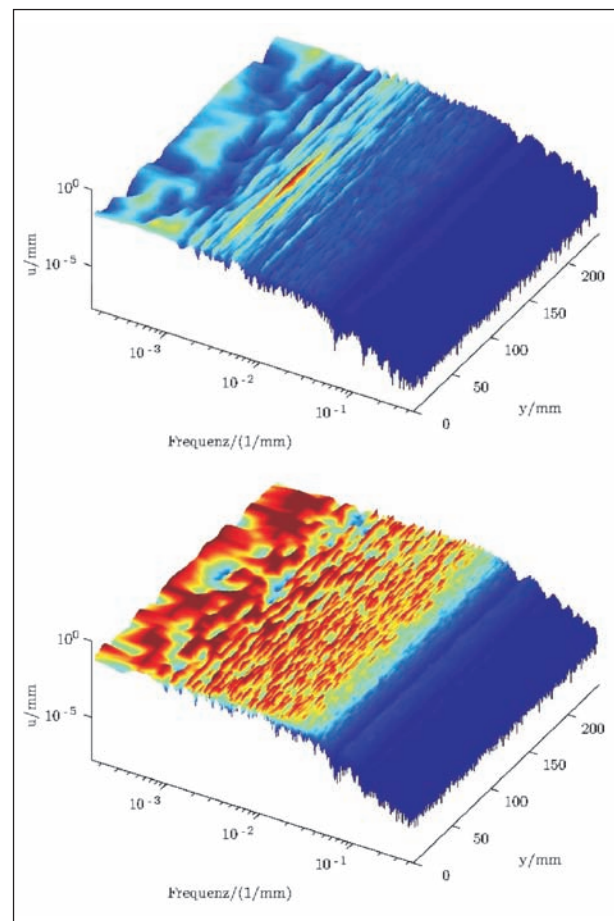


Bild 3.4-8: Frequenzspektren der Trommelprüfstände mit Glattasphalt und Mira-Textur

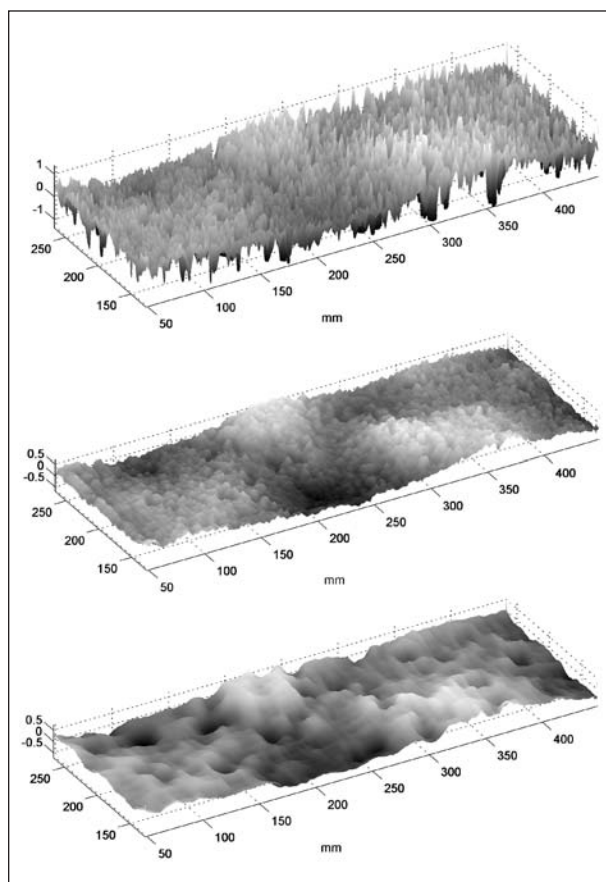


Bild 3.4-9: Gemessene Fahrbahntextur für den Glattasphaltbelag auf dem Continental-Trommelprüfstand (oben), Textur gemessen an einer überrollten Aluminiumfolie (Mitte) und berechnete Einhüllende (unten).

führende Arbeiten wurden hinsichtlich der Filterung dieser Daten für eine aussagekräftige Anregungsfunktion durchgeführt. Da der Reifen nicht in alle Kavitäten der Fahrbahnoberfläche eindringt, wurde zunächst der Versuch des langsamen Überrollens einer Aluminiumfolie durchgeführt.

Daran angelehnt wurde eine Filterfunktion entwickelt, siehe Bild 3.4-9. Gleichzeitig wurde, um den viskoelastischen Eigenschaften des Laufstreifengummis Rechnung zu tragen, eine konstante Amplitudendämpfung vorgenommen. Weiterführende Arbeiten betreffen die physikalisch motivierte mikromechanische Modellierung der Einhüllenden für die Fahrbahnoberflächen.

3.4.2.5 Probleme bei der „Materialmodellierung“

Bei den ersten Eigenwertberechnungen mit den von der Continental AG bereitgestellten Reifenmodellen trat bei höheren Frequenzen eine Vielzahl unphysikalischer Lösungen (so genannte „hour-

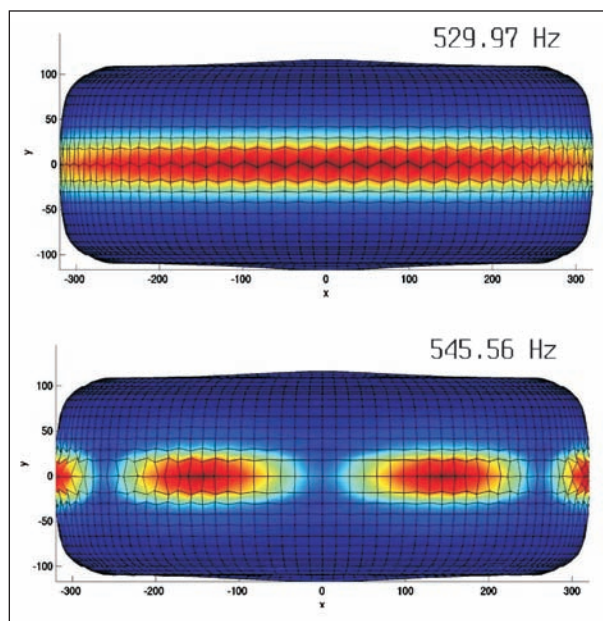


Bild 3.4-10: Beispiele zu den Hourglass-Moden

glass modes“, siehe Bild 3.4-10) auf. In der Fachliteratur waren diesbezüglich wenige Erkenntnisse bekannt geworden. Als ein Lösungsvorschlag wurde z. B. die gezielte Bedämpfung der „spurious modes“ recherchiert. Da auf diese Weise die Moden aber nicht grundsätzlich unterdrückt werden können, wurden alternative Lösungswege untersucht. Die Erhöhung der Ansatzordnung für die Ortsdiskretisierung von linearen auf quadratische Funktionen war zwar prinzipiell erfolgreich, die unphysikalischen Moden treten dabei nicht mehr auf, allerdings kann das von der Continental AG eingesetzte Programmsystem zur Berechnung des stationären Rollvorgangs das Kontaktproblem damit nicht berechnen. Als zufrieden stellende, wenngleich vom numerischen Aufwand nicht optimale Lösung wurde die Diskretisierung mit linearen Ansatzfunktionen bei Verwendung einer konsistenten Massenmatrix herausgearbeitet. Auf diese Weise konnten die unphysikalischen Moden eliminiert und die Anzahl der zu berechnenden Eigenpaare auf etwa ein Drittel reduziert werden.

Nach den ersten Vergleichen der Berechnungsergebnisse mit den in den Laboren der Continental AG gewonnenen experimentellen Ergebnissen wurde eine besondere Sensibilität des mechanischen Teilmodells hinsichtlich der Materialmodellierung herausgearbeitet. Die dynamische Versteifung des Gummis bei zunehmender Anregungsfrequenz sowie das Dämpfungsverhalten haben einen großen Einfluss auf die Prognosegenauigkeit der Berechnungsmodelle. Darum wurde dieser Teilas-

pekt als wichtigste Aufgabe bei der Modellverfeinerung deklariert. Obgleich die Fachliteratur unzählige Arbeiten zur Modellierung und Simulation der Materialeigenschaften von Gummi beinhaltet und auch kommerzielle Programmsysteme entsprechende Optionen zur Verfügung stellen, muss dieses Problem als wissenschaftlich ungelöst eingestuft werden. Auf der Basis umfassender Literaturrecherchen und zweier am IBNM durchgeführter Masterarbeiten [5, 6] wurde bilanziert, dass bis dato schlichtweg keine konsistente Theorie zur frequenzbereichsübergreifenden Finite-Element-Modellierung des mechanischen Verhaltens gefüllter Elastomerwerkstoffe existiert. Dieses Teilprojekt wurde darum um einen Punkt „Materialmodellierung“ aufgestockt. Damit wurde das Programm zur Modellverfeinerung und Modellvalidierung erweitert, und es wurden neue experimentelle Untersuchungen zur Identifikation der Materialparameter definiert. Die in diesem Teilprojekt erzielten Forschungsergebnisse sind unter Kapitel 3.4.4 beschrieben.

3.4.3 Modellvalidierung

Die Computersimulation der Schallabstrahlung besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Schritten: a) Berechnung der Strukturschwingungen rollender Reifen (dieses Teilprojekt) und b) Berechnung der Schallabstrahlung auf Grundlage der unter a) ermittelten Oberflächendynamik des Reifenmodells (TP 3212-4). Eine Validierung auf der Grundlage integraler Daten, wie z. B. standardisierte Messungen des Vorbeifahrt-Schalldruckpegels, ist aus zweierlei Gründen ungeeignet: 1. geben solche Daten keinen Aufschluss über die physikalischen Details der Wirkmechanismen, und 2. kann nur die



Bild 3.4-11: Reifenprüfstand im Continental-Labor

gesamte Simulationskette als Ganzes bewertet werden. Eine Modellverfeinerung kann damit nicht zielgerichtet erfolgen. In diesem Projekt wurden darum Laborexperimente auf dem Trommelprüfstand der Continental AG (TP 3212-2) als experimentelle Basis für eine Modellvalidierung verabreitet. Mit Mikrofonen wird an verschiedenen Raumpositionen der Schalldruck gemessen, den definierte Reifen auf zwei verschiedenen deterministisch beschriebenen Fahrbahnbelägen emittieren. Dabei sei betont, dass auch diese Experimente nur zur Validierung der gesamten Simulationskette dienlich sind, experimentelle Techniken zur Schwingungsanalyse am rotierenden System sind für hier vorliegende Randbedingungen (Frequenzbereich von 50 bis 1.500 Hz) heute nicht verfügbar.

3.4.3.1 Validierung des Strukturdynamik-Modells auf dem Shaker-Versuchsstand

Für die differenzierte Bewertung der Teilmodelle (Strukturmechanik und Akustik) wurden darum weitere Versuchsaufbauten definiert, die im TP 3212-2 realisiert wurde. In Bild 3.4-12 ist die Prinzipskizze eines rein mechanischen Versuchs dargestellt, ein Reifen unter Innendruckbelastung wird mit einem Shaker angeregt und die Beschleunigungsantwort wird an verschiedenen Punkten gemessen.

Aus den gemessenen Größen wird die Übertragungsfunktion berechnet und mit den berechneten

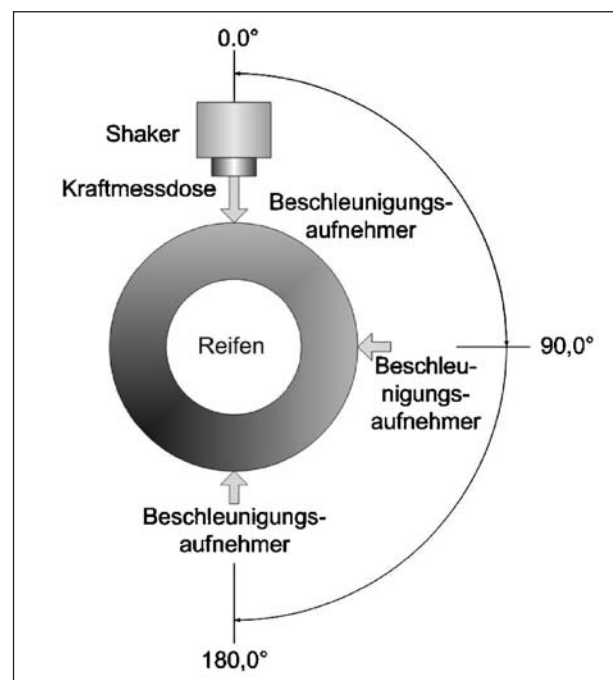


Bild 3.4-12: Versuchsaufbau für die rein mechanische Prüfung von Reifen

Daten verglichen, siehe Bild 3.4-13. Daraus ist ersichtlich, dass mit den Modellen das gemessene Verhalten qualitativ und quantitativ bereits recht gut reflektiert wird. Lediglich die deutlich ersichtlichen Eigenfrequenzen liegen bei dem Berechnungsmodell etwas niedriger, welches auf die unzulängliche Modellierung der Materialeigenschaften zurückgeführt wird. Das Gummi versteift in Abhängigkeit von der Frequenz.

Ein weiterer Versuchsaufbau ist in Bild 3.4-14 skizziert. Der Reifen wird dabei in einer Aufspannvorrichtung mit den Randbedingungen Innendruck und Radlast gegen eine starre Kontaktfläche gedrückt und mit einem elektrodynamischen Shaker zu

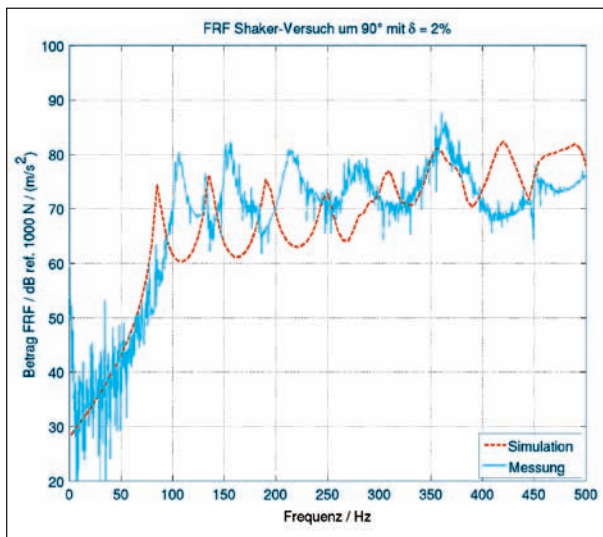


Bild 3.4-13: Vergleich der gemessenen und berechneten Übertragungsfunktion

Schwingungen angeregt. Mit einem Laser-Vibrometer werden die Schwingungen auf der Oberfläche des Reifens auf konzentrischen Ringen vermessen, wobei simultan mit Mikrofonen an definierten Raumpositionen der emittierte Schalldruck aufgezeichnet wird. Betont sei an dieser Stelle, dass mit diesem Szenario die wichtigen dynamischen Effekte infolge der Rotation nicht nachgestellt werden können.

Aus den am stehenden Reifen gemessenen Oberflächengeschwindigkeiten werden Übertragungsfunktionen berechnet, die exemplarisch in Bild 3.4-15 dargestellt sind. Aufgetragen ist in der linken Hälfte farbcodiert die Amplitude über dem Umfangswinkel und der Frequenz, in der rechten Hälfte entsprechend der Phasenwinkel. Für niedrige Frequenzen können aus diesen Bildern auch die typischen Schwingungsformen abgelesen werden. Diese Ergebnisse werden den berechneten Daten in Bild 4.3-16 gegenübergestellt. Aus der globalen Übereinstimmung dieser Bilder ist ersichtlich, dass die Physik mit dem Reifenmodell korrekt widergespiegelt wird. In den Details sind jedoch gewisse Unterschiede zu erkennen, so finden sich die ersten Moden in der Simulation bei kleineren Frequenzen, wie bereits mit den vorherigen Untersuchungen aufgezeigt wurde. Bei Frequenzen über 300 Hz werden die Amplituden mit der Simulation überschätzt. Als Grund dafür wurde die unzureichende Modellierung der dynamischen Materialeigenschaften herausgearbeitet, in Bild 4.3-17 z. B. sind die Simulationsergebnisse mit einem modalen

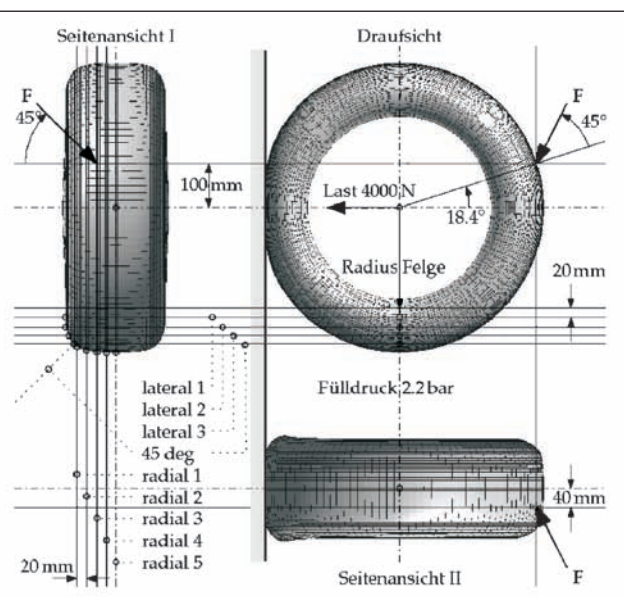


Bild 3.4-14: Versuchsaufbau und Prinzipskizze des Shaker-Versuchsstands

Dämpfungswert von $\delta = 5\%$ dargestellt, wobei das hochfrequente Schwingungsverhalten deutlich besser approximiert wird, während die niederfrequenten Moden zu stark gedämpft repräsentiert werden.

Bezüglich der Ergebnisse der akustischen Untersuchungen an diesem Versuchsaufbau sei auf den Bericht der Partner der TU Hamburg-Harburg (Kapitel 3.5) verwiesen.

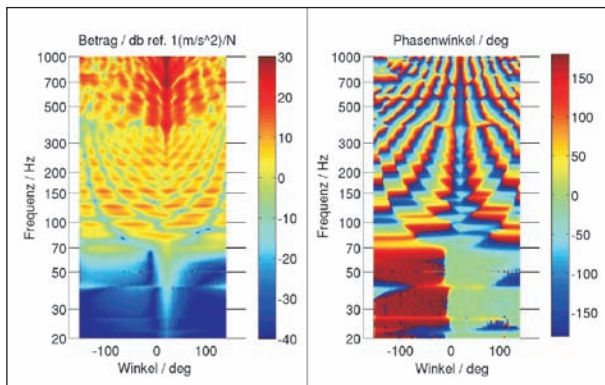


Bild 3.4-15: Gemessene Übertragungsfunktion

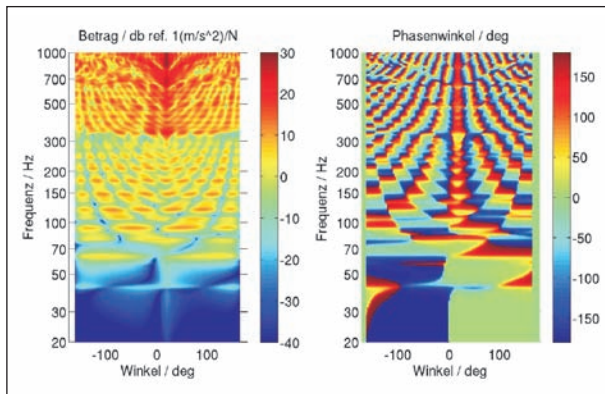


Bild 3.4-16: Berechnete Übertragungsfunktion (modale Dämpfung $\delta = 3\%$)

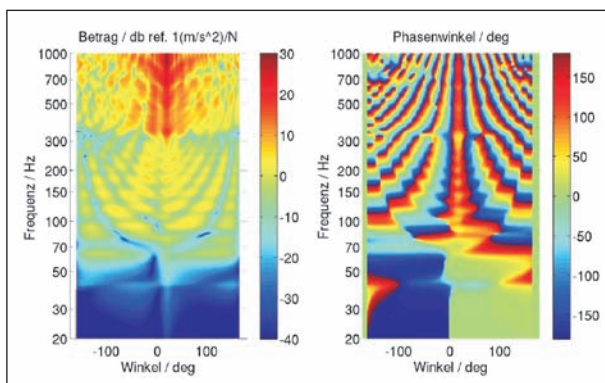


Bild 3.4-17: Berechnete Übertragungsfunktion (modale Dämpfung $\delta = 5\%$)

3.4.3.2 Achskräfte beim Überrollen von Schlagleisten

Als dritte Versuchsanordnung für die Modellvalidierung wurde eine auf der Prüftrommel angebrachte Schlagleiste überrollt und die dabei auftretenden dynamischen Achskräfte gemessen. In Bild 4.3-18 sind für die Anordnungen der Schlagleiste mit 90° bzw. 45° zur Fahrtrichtung die gemessenen Zeitschriebe und Kraftspektren dargestellt. Das Ausschwingverhalten des Reifens ist sehr gut zu erkennen. Der Einfluss des Schlagleistenwinkels wird bei dem Zeitschrieb der Kraft in y-Richtung besonders deutlich, denn durch die schräge Anregung schwingt das System in axialer Richtung. Dieser Effekt ist bei der 90° Leiste geringer. In den Spektren steigen mit der 45° Leiste die Amplituden im niederfrequenten Bereich an. Die Ursache dafür ist die Ereignisdauer im Zeitbereich, denn bei schräger Leiste dauert die Überfahrt länger.

Für die Schlagleisten wurde wiederum eine Anregungsfunktion formuliert und das auf einer glatten

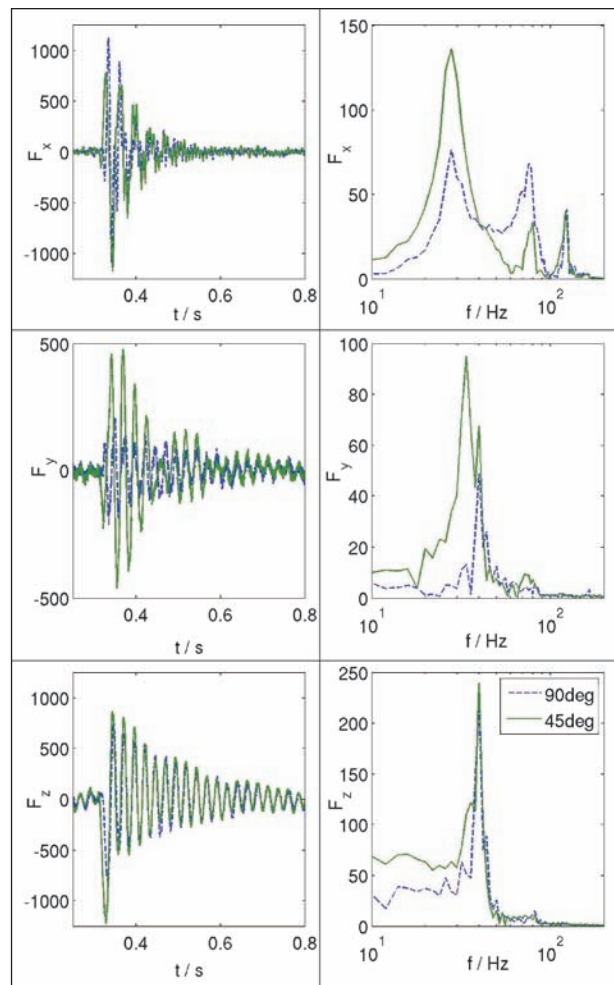


Bild 3.4-18: Gemessene Zeitverläufe und Spektren der Achskräfte bei Schlagleistenüberfahrt

Trommel rollende Reifenmodell angeregt. Die Simulationsdaten sind zum Vergleich in Bild 3.4-19 aufgetragen, die Ergebnisse sind denen der Messung prinzipiell ähnlich. Abweichungen liegen in den Maximalwerten und im Abklingverhalten (Dämpfung). Man beachte dabei, dass die Trommel in der Realität imperfekt ist und einen Belag hat, in der Simulation dagegen bis auf die Schlagleisten perfekt glatt gestaltet ist, da eine Texturvermessung des Safety-walk-Belags nicht erfolgt ist. Im Frequenzbereich befinden sich die Resonanzen bei höheren Frequenzen, da die Materialdaten der Reifenmodelle für eine einzige Frequenz bestimmt werden und damit nicht von der Frequenz abhängen. Auch an dieser Stelle wird klar, dass für eine quantitative Abbildung genauere Materialmodelle entwickelt werden müssen, die das frequenzabhängige Verhalten von Steifigkeit und Dämpfung simulieren können. Trotzdem zeigen die Ergebnisse der Schlagleistenüberfahrt, dass das qualitative Verhalten abgebildet werden kann.

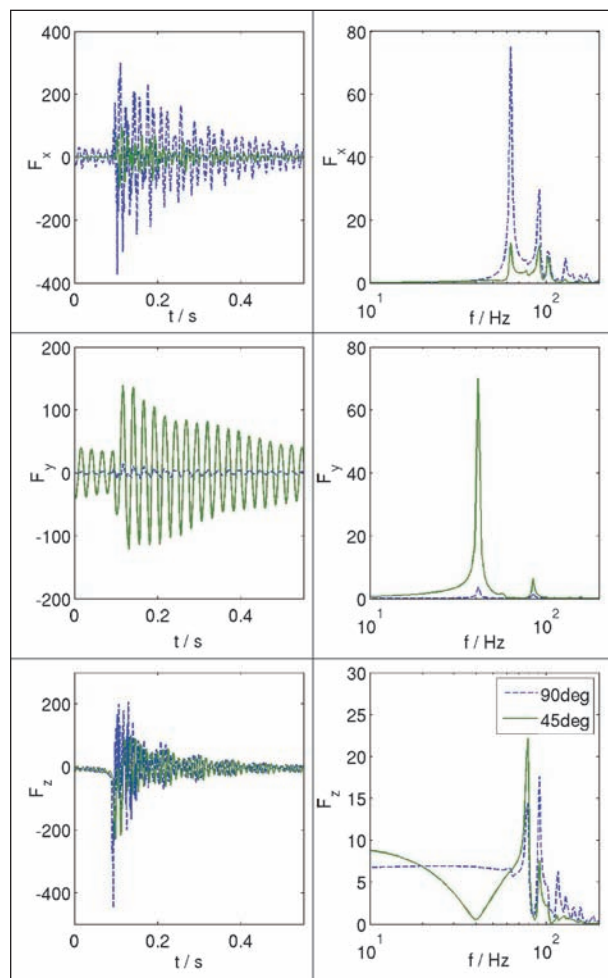


Bild 3.4-19: Zeitverläufe und Spektren der Achskräfte berechnet für die Schlagleistenüberfahrt

Die Frage, inwiefern das Überrollen einer 5 mm hohen Schlagleiste mittels linearer modaler Superposition abgebildet werden kann, wurde unlängst im Rahmen einer Abschlussarbeit [7] untersucht. In Bild 3.4-20 ist das Spektrum der vertikalen Kraftantwort berechnet mit der linearen modalen Superposition einer vollständig nichtlinearen transienten Analyse gegenübergestellt. Zum Vergleich ist zusätzlich das gemessene Spektrum eingetragen. Die Abweichungen in den Antwortfrequenzen lassen sich aus dem untersuchten Reifenmodell begründen, für diese grundlegenden Untersuchungen wurde ein vereinfachtes Reifenmodell mit lediglich 40.000 Freiheitsgraden herangezogen, da die nichtlineare Analyse ausgesprochen rechenintensiv

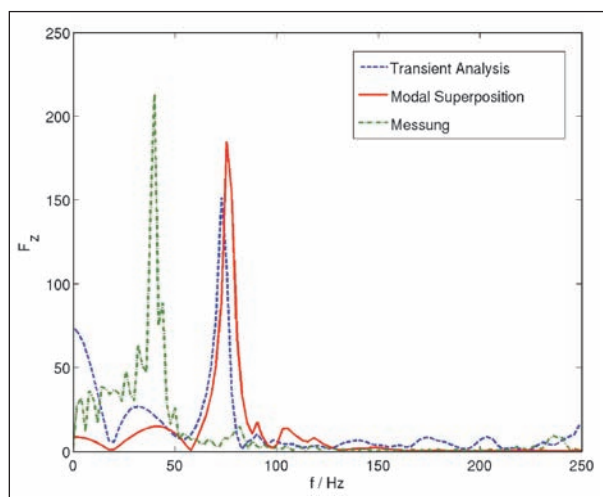


Bild 3.4-20: Gemessenes Kraftspektrum bei Überfahrt einer Schlagleiste und mit einem vereinfachten Reifenmodell berechnete Kraftspektren, Vergleich zwischen linearer modaler Superposition und nichtlinearer transienter Berechnung

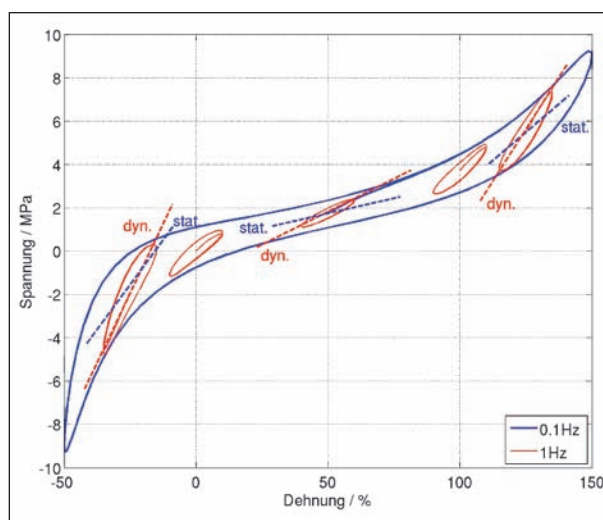


Bild 3.4-21: Berechnete quasistatische Hysterese und dynamische Hysteresen bei kleinen Schwingungen um stationäre Betriebspunkte

ist. Das prinzipielle Antwortverhalten wird aber sehr gut wiedergegeben, im Wesentlichen wird nur der erste vertikale Gürtelbiegemode angeregt. Die Amplituden werden mit der linearen Analyse allerdings unterschätzt. Oberhalb von 100 Hz sind allerdings keine nennenswerten Unterschiede festzustellen, sodass für die hier im Vordergrund stehenden akustischen Fragestellungen der Zugang mittels modaler Superposition mit guten Argumenten untermauert ist.

3.4.4 Modellverbesserung

3.4.4.1 Materialmodellierung

Bereits anhand der experimentellen Untersuchungen am stehenden Reifen (Shaker-Versuchsaufbau) konnten Defizite in der Materialbeschreibung aufgezeigt werden. Die dynamische Versteifung des Gummis und die frequenzabhängige Dämpfung wurden nicht korrekt abgebildet. Dafür wurden die in der Literatur beschriebenen Materialmodelle analysiert und bewertet. Ein Materialmodell wurde ausgewählt, für die spezifischen Ansprüche der frequenzbereichsübergreifenden Beschreibung modifiziert, in die Finite-Element-Umgebung des IBNM implementiert und umfassend erprobt. Das Materialmodell basiert auf einer thermodynamisch konsistenten Konstitutivformulierung. Für den nichtlinear elastischen Anteil wurden verschiedene Optionen implementiert: Neo-Hooke, Mooney-Rivlin und das mikromechanisch motivierte Röhrenmodell nach HEINRICH und KALISKE [12]. Die viskosen Anteile wurden durch eine innere Variablen-Formulierung nach SIMO [13] implementiert. In gleicher Weise wurde das Modell um eine Schädigungsformulierung ergänzt, um z. B. den Mullins-Effekt (die so genannte Spannungserweichung) und den Pain-Effekt (Amplitudenabhängigkeit der dynamischen Materialantwort). Für alle Anteile wurde die konsistente Tangente implementiert, sodass im Rahmen eines Newton-Verfahrens quadratisches Konvergenzverhalten sichergestellt ist. Exemplarisch sei anhand von Bild 4.3-21 dokumentiert, dass dieses Materialmodell sowohl die quasistatische Hysterese bei großen Deformationen als auch die dynamische Versteifung bei kleinen Schwingamplituden um einen stationären Betriebspunkt qualitativ abbilden kann.

Angemerkt sei ferner, dass auch die inertialen Konditionierungsmechanismen eines jungfräulichen Materials (Mullins-Effekt) mit diesem Materialmodell korrekt abgebildet werden. In Bild 3.4-22

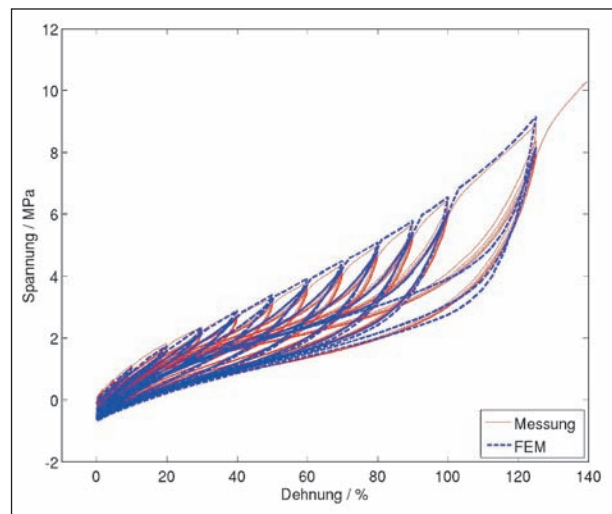


Bild 3.4-22: Quasistatische Hysterese einer Gummimischung, experimentelle Ergebnisse und Simulation mit dem modifizierten Materialmodell

sind die an experimentell ermittelten Last-Verformungs-Kurven für die zyklische Beanspruchung angepassten Simulationsergebnisse dargestellt. In diesen Versuchen wurde ein neuer Hantelprüfkörper mit wohl definierter Materialzusammensetzung in schrittweise aufsteigender Lastfolge zyklisch so lange beansprucht, bis sich eine stationäre Hysteresekurve eingestellt hat [8]. Die gemessenen Kurven werden von dem hier gewählten Materialmodell in guter Übereinstimmung nachgebildet. Obgleich diese Einspieleffekte auf den ersten Blick keinen direkten Bezug zu der hier vorliegenden Fragestellung zur hochfrequenten Antwort eingelaufener Reifen nahelegen, sei angemerkt, dass bei einem Reifen wegen des inhomogenen Aufbaus im Querschnitt stets ein inhomogener Beanspruchungszustand mit bereichsweise großen und kleinen Maximalspannungen vorliegt. Neben der rein geometrischen Aufteilung in einzelne Baugruppen für die Basismodellierung des stationären Rollens wäre es darum auch für die hier hinterfragten akustischen Eigenschaften zielgerichtet, die beanspruchungsabhängige materielle Heterogenität zu berücksichtigen. Die dafür erforderlichen Berechnungsmethoden, Materialmodelle und experimentellen Methoden sind heute verfügbar, für Details sei auf die unlängst am IBNM entstandenen Dissertationen [8, 9] verwiesen.

3.4.4.2 Mikromechanisches Kontaktmodell

Nachdem die physikalische Konsistenz der Simulationsmethoden nachgewiesen war, zeigten erste direkte Vergleiche mit den Labormessungen, dass

mit der Berechnung die Schalldruckpegel deutlich überschätzt werden, vergl. Kapitel 3.4.5.1. Als ursächlich dafür wurde eine deutliche Überschätzung der mechanischen Anregung durch das Modell für die Fahrbahntextur herausgearbeitet. Erste pragmatische Ansätze bestanden darin, die Eindringtiefe des Laufstreifengummis experimentell mittels Überrollens von Aluminiumfolien zu erfassen und basierend darauf Filterfunktionen für die gemessenen Fahrbahntexturen zu entwickeln, siehe Kapitel 3.4.2.4. Darüber hinaus wurde eine lokale Gewichtung mit der Kontaktdruckverteilung vorgenommen und die viskoelastischen Eigenschaften des Laufstreifengummis durch einen globalen Dämpfungsparameter beschrieben. Durch beide Maßnahmen konnten die Simulationsergebnisse näher an die experimentellen Ergebnisse herangeführt werden, hinsichtlich des Anspruchs einer praktikablen und im Detail physikalisch korrekten Modellbildung war dieser Lösungszugang dennoch unbefriedigend. Einerseits waren die Messergebnisse mit den Folien recht ungenau, es stellten sich Artefakte oder gar Risse infolge der mechanischen Eigenschaften des Folienmaterials ein. Zudem konnten diese Versuche nur bei sehr kleinen Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Ferner erwies sich die Wahl des Dämpfungsparameters als abhängig von der Geschwindigkeit und der Fahrbahntextur. Ein weiterer Kritikpunkt lag in der rein heuristischen Gewichtung der Anregungsfunktion mit der lokalen Kontaktdruckverteilung.

Aus diesen Gründen wurde in dem Arbeitspaket Materialmodellierung, nachdem geeignete Materialmodelle implementiert und erprobt waren, der Fokus auf die mikromechanische Analyse des Laufstreifengummis mit der Fahrbahntextur gelegt. Dazu wurde ein Bereich des Laufstreifengummis sehr detailliert diskretisiert und mit der digitalisierten Beschreibung der Fahrbahnoberfläche in Kon-

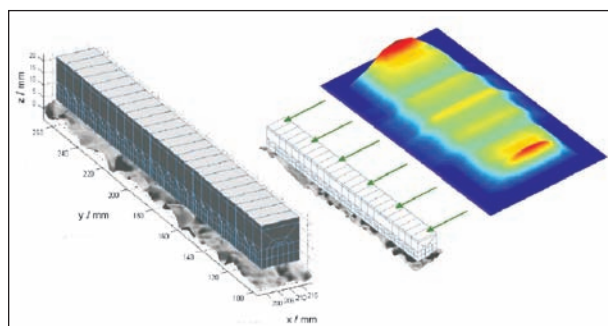


Bild 3.4-23: Finite-Element-Modell für die mikromechanische Analyse der Reifen-Fahrbahn-Kontaktes zur verbesserten Bestimmung der Texturanregung

takt gebracht. Die aus dem stationären Rollvorgang berechnete Kontaktdruckverteilung wurde mit der entsprechenden Fahrgeschwindigkeit über dieses Modell bewegt, siehe Bild 3.4-23. Der Kontakt wurde dabei transient dynamisch berechnet.

Bestimmung der Materialparameter

Zur Bestimmung der dabei relevanten Materialeigenschaften wurde im Hause Continental AG ein neuer Versuchsaufbau realisiert, bei dem ein harter kugelförmiger Prüfkörper periodisch mit definierter Tiefe in eine Gummiprobe (definierte Laufstreifenmischung, 30 mm Durchmesser und 10 mm Dicke) eindringt, Bild 3.4-24. In Bild 3.4-25 sind der Wegverlauf des Pendels und darunter die Kraftantwort dargestellt. Auffallend sind die negativen Kräfte, die als Adhäsion interpretiert werden.

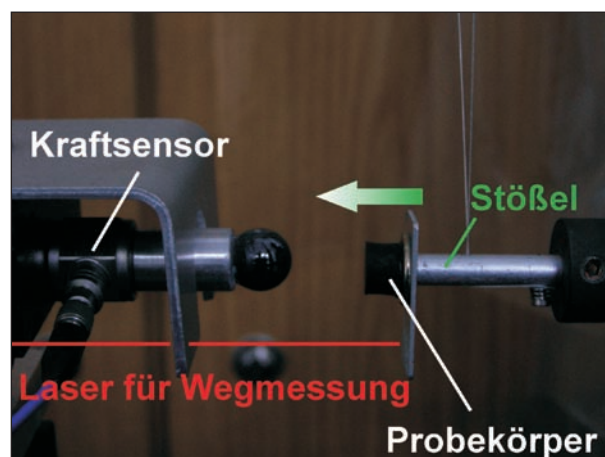


Bild 3.4-24: Versuchsaufbau für die Materialprüfung

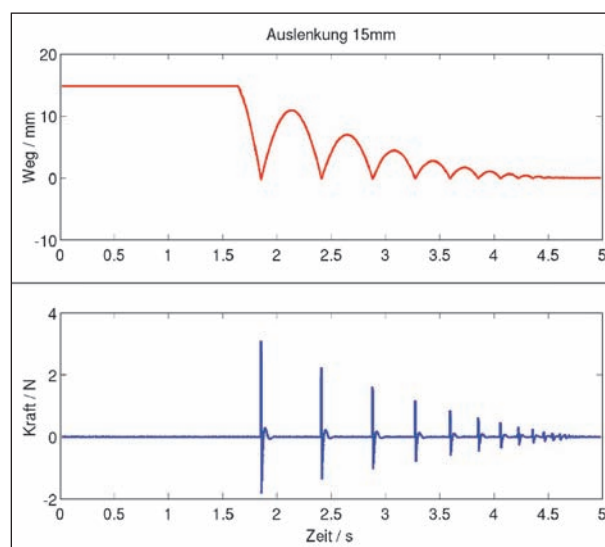


Bild 3.4-25: Gemessene Eindringungs- und Kraftverläufe

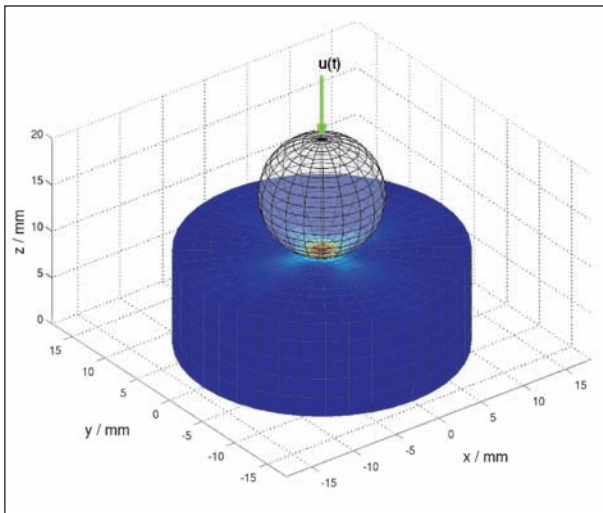


Bild 3.4-26: Finite-Element-Modell zur Identifikation der Materialparameter aus dem Eindringversuch

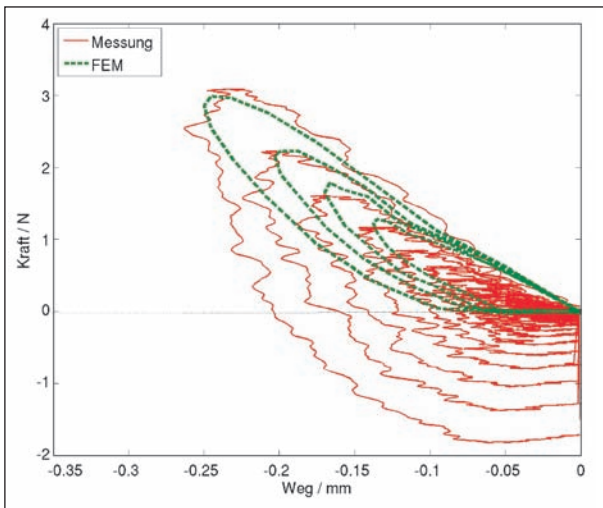


Bild 3.4-27: Gemessene und berechnete Hysteresekurven für den Eindringversuch

Dieser Versuchsaufbau wurde zur Identifikation der relevanten Materialparameter mit einem Finite-Element-Modell nachgestellt, siehe Bild 3.4-26.

Die identifizierten Hysteresekurven sind in Bild 3.4-27 im Vergleich mit den gemessenen Daten gegenübergestellt. Da auf rauen Fahrbahnen wegen des immer vorhandenen Staubbelaags nur eine geringfügige Adhäsion vorliegt, wurde auf deren Modellierung verzichtet. Angemerkt sei, dass durch den Versuchsaufbau bedingt nur relativ kleine Verformungen realisiert werden konnten.

Simulationsergebnisse

Mit diesen Materialdaten wurden schließlich die in Bild 3.4-28 dargestellten Einhüllenden auf dem

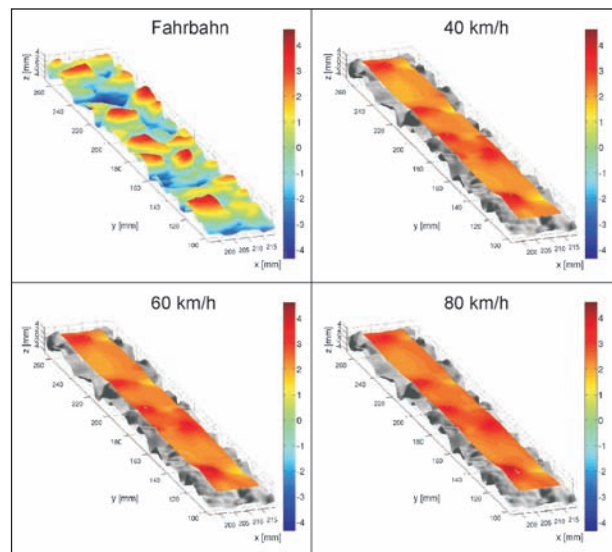


Bild 3.4-28: Mikromechanische Analyse des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes

Mira-Belag berechnet. Diese Berechnungen werden transient dynamisch durchgeführt, wobei, wie in Bild 3.4-23 angedeutet, die aus der stationären Rollsimulation resultierende Kontaktdruckverteilung mit der Fahrgeschwindigkeit über das Laufstreifengummi hinwegbewegt wird. Im Vergleich mit der ursprünglichen Fahrbahntextur ist deutlich zu erkennen, dass nur die höchsten Berge in das Gummi eindringen. Der Einfluss der Geschwindigkeit ist relativ gering, aber dennoch erkennbar.

Bei höheren Geschwindigkeiten dringt das Gummi infolge der viskoelastischen Eigenschaften nicht so tief in die Täler ein wie tendenziell an den gelben Bereichen abzulesen ist. Für die Simulation der Schalldruckpegel wird eine Filterfunktion für den gesamten Fahrbahnbelag auf dem Trommelprüfstand berechnet. Da die transient dynamische Simulation für die gesamte Trommel zu aufwändig ist, wurde diese exemplarisch für verschiedene Positionen in der Fahrspur der Reifen vorgenommen und auf deren Basis eine mittlere Filterfunktion abgebildet.

Exemplarisch sind in Bild 3.4-29 die Rohdaten, die simulierte Einhüllende und die mit der gemittelten Filterfunktion berechnete Einhüllende für den Rauspflaster bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h dargestellt. Eine vergleichende Detailauswertung ist in Bild 3.4-30 zu sehen, in dem die Tragflächenkurven der Originaltextur, der simulierten und der durch Filterung gewonnenen Einhüllenden verglichen werden. Die hinreichende Übereinstimmung von transient dynamischer Simulation und vereinfachter Filterung ist deutlich erkennbar.

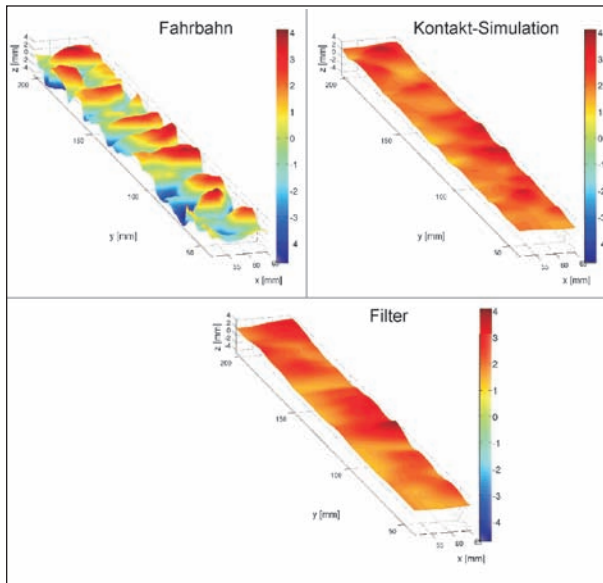


Bild 3.4-29: Originale Fahrbahnstruktur, mittels transient dynamischer Simulation berechnete Einhüllende und mittels der gewonnenen Filterfunktion erzeugte Einhüllende

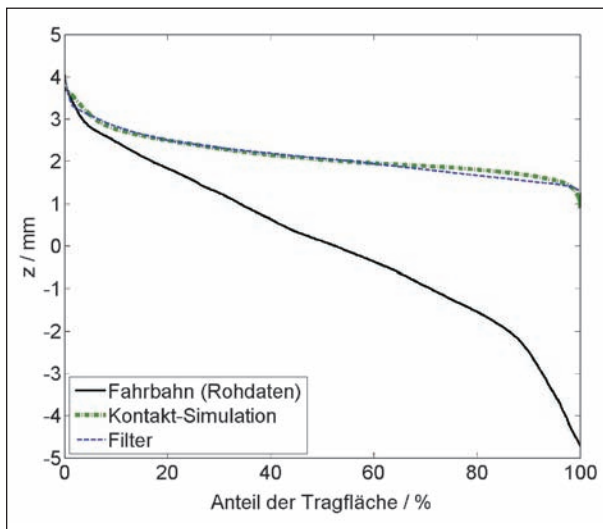


Bild 3.4-30: Tragflächenkurven von den Rohdaten und die entsprechenden Einhüllenden

Mit diesen Anregungsfunktionen wurden exemplarisch Simulationen mit dem Komplementärreifen (VO40482) auf der rauen Prüftrommel bei 80 km/h durchgeführt. Unter Verwendung der neu gemittelten Filterfunktion wird die Einhüllende für die Fahrbahnoberfläche berechnet und mittels Fourier-Transformation die Anregungsfunktion berechnet. Zum Vergleich sind in Bild 3.4-31 die Fourier-Transformationen der Anregungsfunktionen aus der Originalstruktur, der aus der Folienüberrollung gewonnenen Filterfunktion und der durch diese physikalisch motivierten mikromechanischen Analysen ermittelten Filterfunktion für eine Fahrspur aufgetragen.

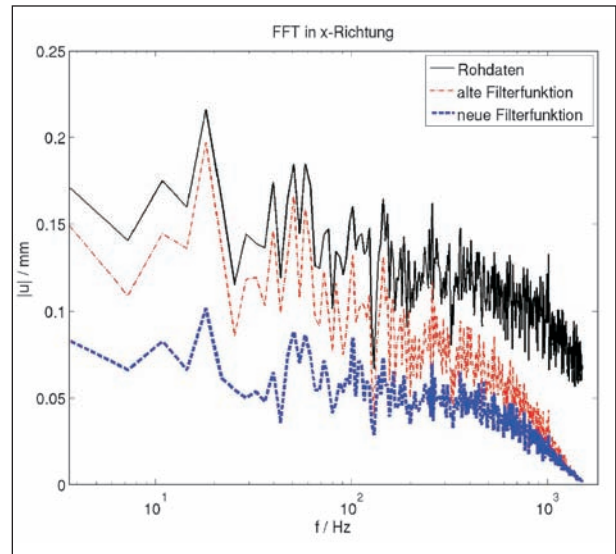


Bild 3.4-31: Frequenzspektren der Trommelstrukturen, Mittelwert aller Umfangsspuren

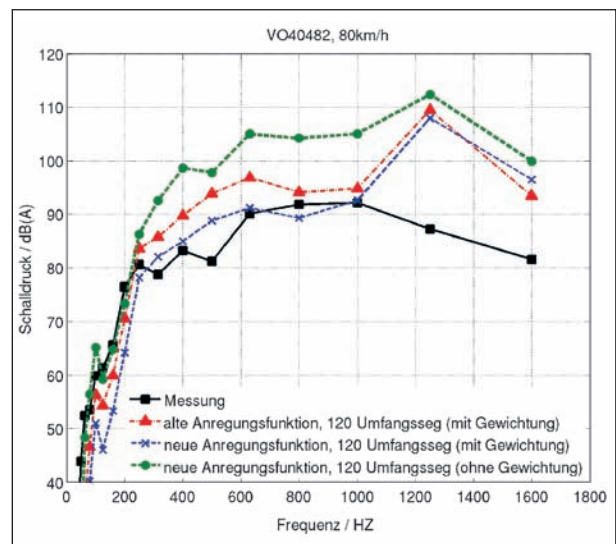


Bild 3.4-32: Vergleich der gemessenen und berechneten Terzspektren für verschiedene Anregungsfunktionen (Komplementärreifen auf Mira-Textur bei 80 km/h)

Die Abminderung des Anregungspotenzials durch den gewählten physikalisch motivierten mikromechanischen Ansatz ist klar ersichtlich.

Im Vorgriff auf den Bericht der Kollegen von der TU Hamburg-Harburg seien an dieser Stelle die Auswirkungen dieser Modellverfeinerung auf das akustische Antwortverhalten der Reifenmodelle kurz diskutiert.

In Bild 3.4-32 ist der Effekt der neuen Anregungsfunktion für das Modell des Komplementärreifens mit einer Diskretisierung, die mit 120 Elementen in Umfangsrichtung (ca. 100.000 Freiheitsgrade) ausgeführt ist, dokumentiert. Verglichen werden die ge-

messenen Schalldruckpegel mit den Ergebnissen der Simulationen, wobei die Anregungsfunktionen der aus der Folienüberfahrt gewonnenen „alten“ Filterfunktion und der mittels mikromechanischer Methoden berechneten „neuen“ Filterfunktion aufgetragen sind, hier exemplarisch für eine Mikrofonposition. Zusätzlich ist der Einfluss der Gewichtung durch die Kontaktdruckverteilung dargestellt. Ohne diese Gewichtung wird das Anregungspotenzial offensichtlich deutlich überschätzt. Mit der mikromechanisch berechneten Filterfunktion schmiegen sich die Simulationsergebnisse im Frequenzbereich zwischen 200 und 1.000 Hz bereits sehr gut an die gemessene Kurve an. Die deutlichen Abweichungen oberhalb von 1 kHz bleiben durch diese Maßnahme nahezu unbeeinflusst.

3.4.4.3 Konvergenzstudien

Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Diskretisierung sind in Bild 3.4-33 zusammengefasst. Verglichen sind hier die Berechnungsergebnisse der gewählten Basis-Diskretisierung (120 Elemente in Umfangsrichtung) mit einem verfeinerten Modell (180 Elemente in Umfangsrichtung) mit den Messergebnissen als Referenz. Mit dieser Darstellung wird deutlich, dass oberhalb von 1.000 Hz die Diskretisierung der Reifenmodelle in Umfangsrichtung an Bedeutung gewinnt, wobei bislang nicht geklärt ist, ob diese Sensibilität dem strukturellen, dem akustischen oder beiden Modellen zuzuordnen ist.

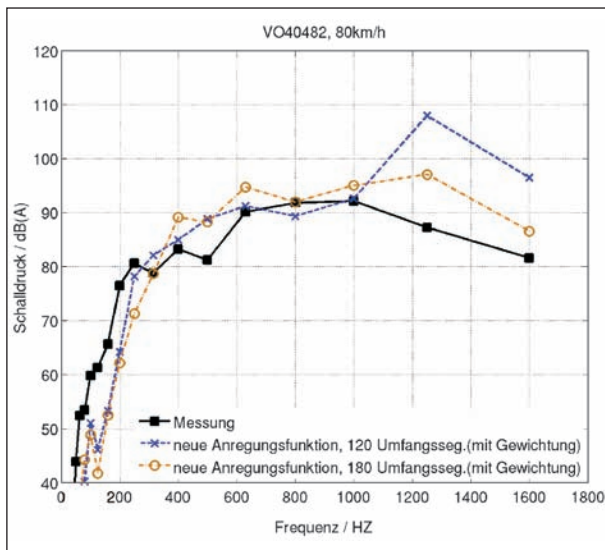


Bild 3.4-33: Vergleich der gemessenen und berechneten Terzspektren für verschiedene Diskretisierungsdichten (Komplementärreifen auf Mira-Textur bei 80 km/h)

3.4.4.4 Prognosegenauigkeit

In Bild 3.4-34 sind schließlich Vergleichsberechnungen zwischen zwei prinzipiell baugleichen Glattreifen mit verschiedener Laufflächenmischung (Sommer/Winter) dargestellt. Diese Ergebnisse wurden wiederum mit der aus mikromechanischen Betrachtungen gewonnenen Anregungsfunktion, allerdings ohne Gewichtung mit der Kontaktdruckverteilung mit dem gröber diskretisierten Reifenmodell berechnet. Das Antwortniveau wird dabei im Mittel um ca. 15 dB überschätzt, vergleiche Bild 3.4-32. Dennoch beeindruckt die tendenzielle Detailtreue, mit der die Simulation die gemessenen Kurven widerspiegelt: die Stufe bei ca. 100 Hz, eine Spitze zwischen 200 und 300 Hz und der bauchige Verlauf der Kurven darüber hinaus. Auch diese Ergebnisse belegen nachweislich, dass die Modelle die Physik korrekt beschreiben. Hinsichtlich der quantitativen Abweichungen ist auch hier eine verbesserte Beschreibung der Materialeigenschaften, insbesondere das Design neuer Experimente, mit denen die wirkliche Beanspruchung des Laufstreifengummis realitätsnah nachgestellt werden kann. Die derzei-

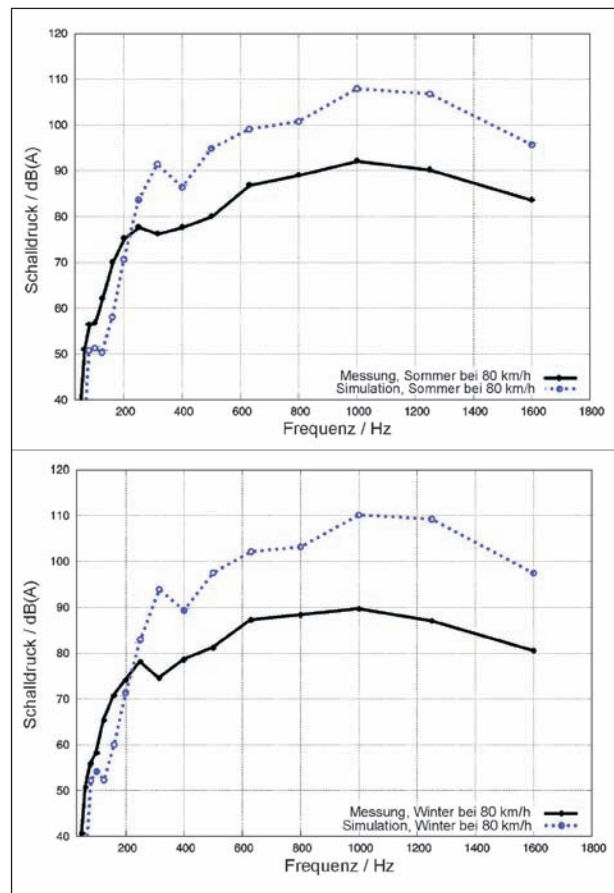


Bild 3.4-34: Vergleich der gemessenen und berechneten Terzspektren vom Sommer- (oben) und Winterreifen (unten) mit der neuen Anregungsfunktion

tig verfügbare Technik ist dafür unzureichend, weil viel zu kleine Deformationen aufgebracht werden. Die experimentelle Einrichtung ermöglicht Eindringungen bis zu 0.25 mm, die simulierte Eindringtiefe des Laufstreifengummis von bis zu 4 mm ist um den Faktor 16 größer. Das mechanische Verhalten von Gummi bei diesen dynamischen Deformationsamplituden ist bislang unerforscht, diesbezüglich werden weitergehende experimentelle Untersuchungen angeregt.

3.4.5 Parameterstudien zur Reifenoptimierung

3.4.5.1 Ranking

Im Rahmen eines Rankings sollte ungeachtet der bekannten Überschätzung der absoluten Schalldruckpegel untersucht werden, ob die Simulationsmodelle eine grundsätzlich richtige Trendprognose bezüglich der Auswirkungen konstruktiver Veränderungen auf das Rollgeräusch liefern. Dazu wurden von der Continental AG sieben Reifenmodelle definiert, gebaut und auf dem Reifenprüfstand auf zwei verschiedenen Belägen bei fünf verschiedenen Geschwindigkeiten vermessen. Für jeden Reifen wurde ebenfalls im Hause Continental ein Finite-Element-Modell erstellt, die Berechnungen für den stationären Rollvorgang durchgeführt und die Systemmatrizen für die transient dynamische Analyse exportiert.

Diese sieben Glattreifen sind in Tabelle 3.4-1 beschrieben.

Bei dieser Studie wurden als Basis siebzig Einzelberechnungen (sieben Reifenmodelle mal zwei Fahrbahnbeläge mal fünf Geschwindigkeiten) durchgeführt. Darüber hinaus wurden zahlreiche weitere Berechnungen im Rahmen der Modellopti-

ID	Dimension	Beschreibung
VO27517	205/55 R16	Referenzreifen
VO40482	205/55 R16	Komplementärreifen, konstruktive Veränderungen im Unterbau
VO42177	235/45 R17	Sommerreifen
VO42179	235/45 R17	Winterreifen, gleicher Unterbau wie VO42177, weiche Laufstreifenmischung
VO27683	175/65 R14	Kleine Dimension
VO31172	225/45 R17	Dicker Laufstreifen
VO39738	225/45 R17	Dünnere Laufstreifen, gleicher Unterbau wie VO31172

Tab. 3.4-1: Beschreibung der Reifenmodelle für das Ranking

mierung durchgeführt, deren Anzahl noch einmal die gleiche Größenordnung beträgt. Die Berechnungsergebnisse im Umfang von jeweils ca. 30 GB wurden aufbereitet und für die akustischen Berechnungen an Hamburg-Harburg weitergegeben.

Das Eigenwertspektrum von fünf typischen Reifenmodellen ist in Bild 3.4-35 dargestellt. Dabei fällt auf, dass der ursprünglich definierte Referenzreifen eine deutlich höhere Modendichte aufweist. In der Detailanalyse wurde festgestellt, dass dafür insbesondere die lokalen Moden des Laufstreifens verantwortlich sind. Eine schlüssige und abschließend befriedigende Erklärung für dieses scheinbar untypische Verhalten konnte im Rahmen dieses Projektes jedoch nicht herausgearbeitet werden, selbst ein akribischer Vergleich der numerischen Eingabedatensätze könnte keine schlüssigen Hinweise liefern. Dabei sei angemerkt, dass sich dieses untypische Eigenwertspektrum nicht erkennbar in dem gemessenen und simulierten Schallabstrahlungsverhalten abzeichnet. Offensichtlich wird die Anregungsenergie entsprechend auf die eng benachbarten Moden verteilt, welches ein weiteres Argument für die zielgerichtete Weiterverfolgung dieses wichtigen Aspektes darstellt.

Einen Eindruck für das berechnete Schwingungsverhalten von fünf Testreifen vermöge Bild 3.4-36 vermitteln. Hier sind für fünf Reifenmodelle auf dem Rauasphalt Zeitaufnahmen des Schwingungsverhaltens dargestellt.

Exemplarisch sind in Tabelle 3.4-2 die Schalldruckpegel bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h für das Mikrofon in 1 m Entfernung zur Seitenwand

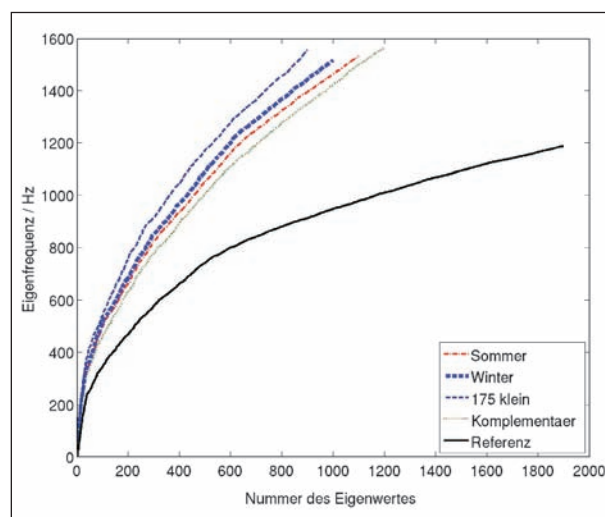


Bild 3.4-35: Vergleich der Eigenwertspektren der untersuchten Pkw-Glattreifen bei 100 km/h



Bild 3.4-36: Betriebsschwingungen bei 100 km/h auf der Trommel mit Mira-Textur, Referenz, Komplementär, Sommer, Winter, Klein. Zeitverlauf von oben nach unten mit Schrittweite 0,42 ms. Rot in der Farbskala entspricht 0,5 mm, effektive Amplitude

Reifen	Messung dB(A)		Simulation dB(A)	
	Glattasphalt	Rauasphalt	Glattasphalt	Rauasphalt
Referenz	84,2	95,8	97,3	114,1
Komplementär	84,9	93,8	96,8	111,0
Sommer	84,0	93,9	95,6	109,7
Winter	84,6	93,2	97,4	111,9
Kleine Dimension	83,2	93,2	89,1	103,1
Dicker Laufstreifen	84,7	94,7	97,5	111,9
Dünnere Laufstreifen	84,6	94,5	97,2	111,6

Tab. 3.4-2: Vergleich gemessener und simulierter Schalldruckpegel

verglichen. Hier sind die Berechnungsergebnisse der ersten Modellreihe eingetragen, für die weiterführenden Untersuchungen sei auf den Bericht der TU Hamburg-Harburg verwiesen.

Tendenziell gibt die Simulation mit den ersten Reifenmodellen das Messergebnis korrekt wieder, so liegen die Unterschiede in den Schalldruckpegeln zwischen Glattasphalt und Rauasphalt in der Messung zwischen 9 und 11 dB, in der Berechnung zwischen 10 und 14 dB. Auch das Ranking, also die Reihenfolge der Reifen hinsichtlich der Lärmwirkung, wird tendenziell richtig berechnet. Die absoluten Schalldruckpegel werden allerdings mit bis zu 18 % überschätzt. Die Ursachen für diese quantitative Überschätzung der absoluten Schalldruckpegel in der Simulation wurden unzweifelhaft in der Modellierung der Anregungsfunktion herausgearbeitet. Mikromechanische Modelle, neue Experimente und weiter verfeinerte Simulationstechniken sind hier die Lösung.

3.4.5.2 Vergleich Sommerreifen/Winterreifen

Für die beiden Reifenmodelle VO42177 (Sommer) und VO42179 (Winter), die sich nur in der Laufstreifenmischung unterschieden, wurden Shaker-Tests durchgeführt und simuliert. Die gemessenen Übertragungsfunktionen sind in Bild 4.3-37 darge-

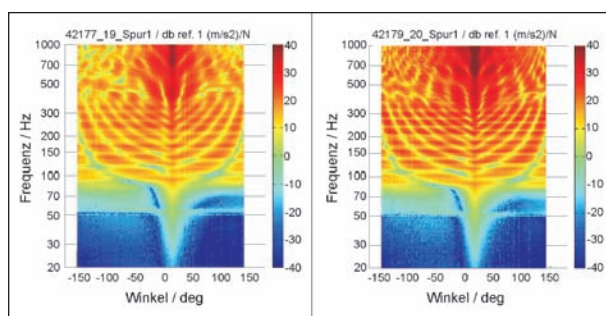


Bild 3.4-37: Gemessene Übertragungsfunktionen für den Sommerreifen (links) und den Winterreifen (rechts)

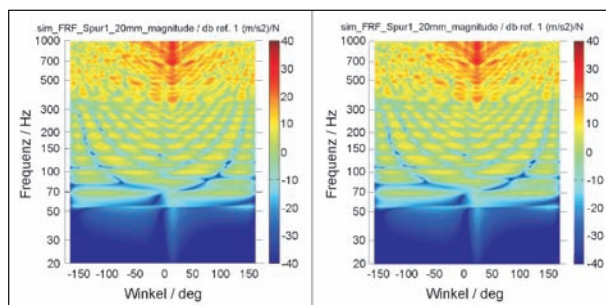


Bild 3.4-38: Berechnete Übertragungsfunktionen für den Sommerreifen (links) und den Winterreifen (rechts)

stellt. Tendenziell zeichnen sich beim Winterreifen größere Antwortamplituden ab, das weichere Laufstreifengummi wird offenbar etwas stärker zu Schwingungen angeregt.

In der Simulation, siehe Bild 3.4-38, konnte dieser Effekt nicht wiedergegeben werden, weil keine experimentellen Daten für die spezifischen Laufflächenmischungen verfügbar waren.

Im Weiteren wurden weitere Berechnungen mit diesen beiden Reifenmodellen durchgeführt, vgl. auch Bild 3.4-34. Insbesondere wurden diese mit der neuen Anregungsfunktion analysiert. Bezüglich Details dieser Untersuchungen sei auf Kapitel 3.5 „Akustikmodell“ der TU Hamburg-Harburg verwiesen. An dieser Stelle sei aber bereits vorweg genommen, dass aufgrund fehlender Materialdaten die gemessenen Schalldruckpegel durch die Simulation nur begrenzt wiedergegeben werden können. Für die Beschreibung der Anregungsfunktion sind, wie bereits oben beschrieben, neue Experimente zu designen.

3.4.5.3 Rillenreifen

Unter diesem Arbeitspunkt sollte der Frage nachgegangen werden, welchen Einfluss Umfangsrillen auf das Rollgeräusch von Pkw-Reifen haben, da hierbei zwei konkurrierende Effekte vermutet wurden, der aero-akustische Effekt der Luftverdrängung und die veränderten Anregungsmechanismen infolge der veränderten Kontaktfläche. In Bild 3.4-39 ist deutlich die wegen des kleineren Kontaktgebietes höhere Kontaktpressung beim Rillenreifen zu erkennen. Die scheinbaren Artefakte im oberen Bild und die leichte Unsymmetrie der gezeigten Kontaktdruckverteilung sind auf numerische Grenzen in der Genauigkeit der diskreten Kontaktberechnung und auf einen leicht unsymmetrischen Reifenaufbau (Fadenrichtungen) zurückzuführen.

Diese Berechnungen wurden für das Reifenmodell basierend auf dem Komplementärreifen mit vier verschiedenen breiten Umfangsrillen (3, 8, 15 und 31 mm) durchgeführt und die Daten für die akustische Analyse aufbereitet. Parallel wurden diese Reifen auf dem Prüfstand vermessen. Angemerkt sei, dass bezüglich des strukturellen Verhaltens, mit Ausnahme der zuvor erwähnten Änderung der Anregung, keine auffälligen Veränderungen festgestellt werden konnten. Die Eigenwertspektren liefern für alle fünf Reifen nahezu deckungsgleiche Kurven, siehe Bild 3.4-40.

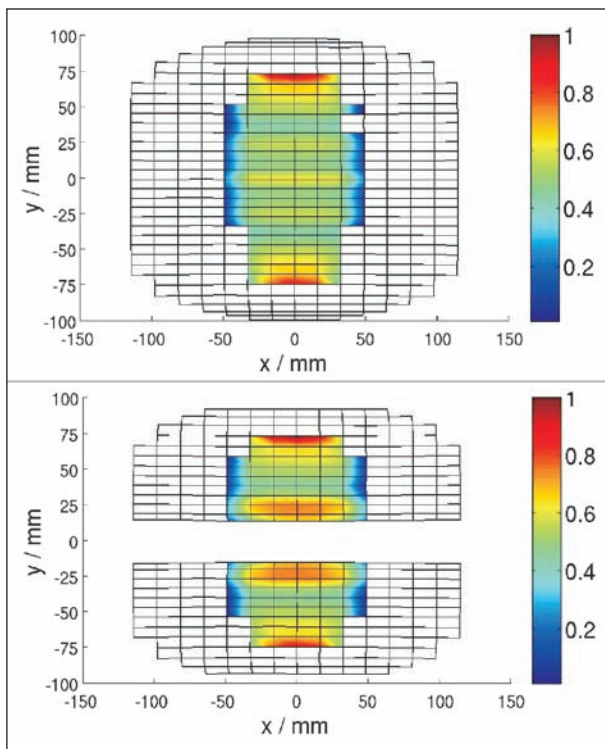


Bild 3.4-39: Kontaktdruckverteilung beim Glattreifen und einem Reifen mit einer 31 mm breiten Umfangsrille. Die Farbkodierung gibt ausgehend vom maximalen Kontaktdruck die Gewichtung der Anregungsfunktion wieder

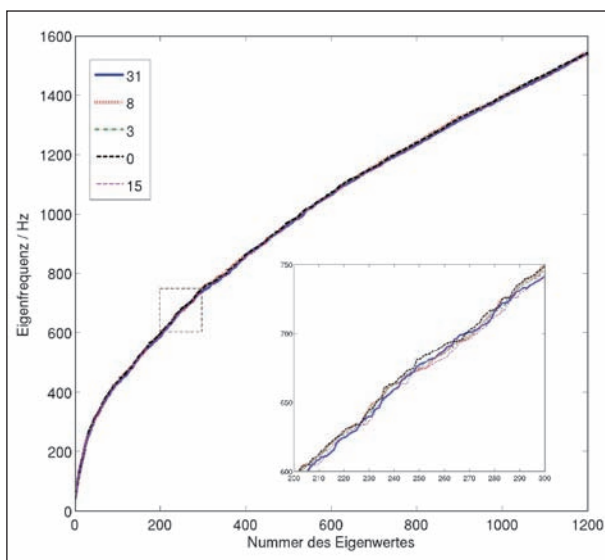


Bild 3.4-40: Vergleich der Eigenwertverteilung bei den Rillenreifen

3.4.5.4 Optimierter Glattreifen

Die Tauglichkeit der Berechnungsmethoden für die zielgerichtete Reifenoptimierung sollte in einem so genannten blind ranking unter Beweis gestellt werden. Dazu wurde bei der Continental AG ein bezüglich des Abrollgeräuschs optimierter Glattreifen

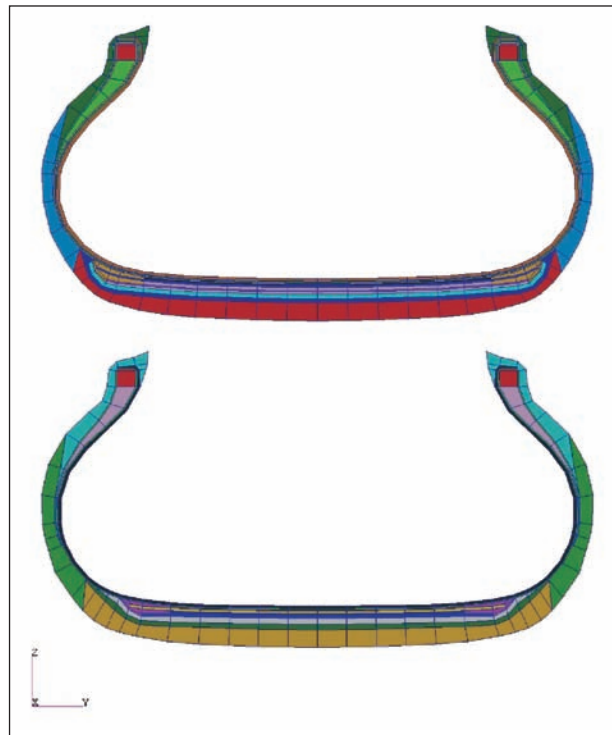


Bild 3.4-41: Profilquerschnitte des Basisreifens und des optimierten Glattreifens

definiert, gebaut und auf dem Prüfstand vermessen und verglichen. Die Reifenmodelle wurden diesem Teilprojekt ohne Zuordnung übergeben. In Bild 3.4-41 ist die Diskretisierung der Querschnitte für beide Modelle dargestellt. Bei annähernd gleicher Kontur sind im inneren Aufbau zahlreiche konstruktive Veränderungen erkennbar, wie z. B. die Anzahl der Textileinlagen, Breite des Gürtels, Materialparameter etc.

Diese konstruktiven Änderungen führen zu einem veränderten strukturdynamischen Verhalten, wie anhand Bild 3.4-42 klar ersichtlich wird. Der optimierte Glattreifen verhält sich in der globalen Betrachtung weicher und weist gegenüber dem Basisreifen mehr Eigenwerte auf.

Eine detailliertere Analyse wurde wiederum unter Heranziehung des Kriteriums der modalen Energie der einzelnen Baugruppen durchgeführt. In Bild 3.4-43 sind die geglätteten Modalenergien der Baugruppen für beide Reifenmodelle vergleichend gegenübergestellt. Im Vergleich haben die Gürtelgruppen des Opt1-Modells im unteren Frequenzbereich einen größeren Energieanteil, während ab ca. 400 Hz die Seitenwandgruppe recht auffällig dominiert. Auch die Einteilung des Frequenzspektrums in Gürtel-, Seitenwand und lokale Moden ist wiederum ersichtlich, wobei der Übergang zu den lo-

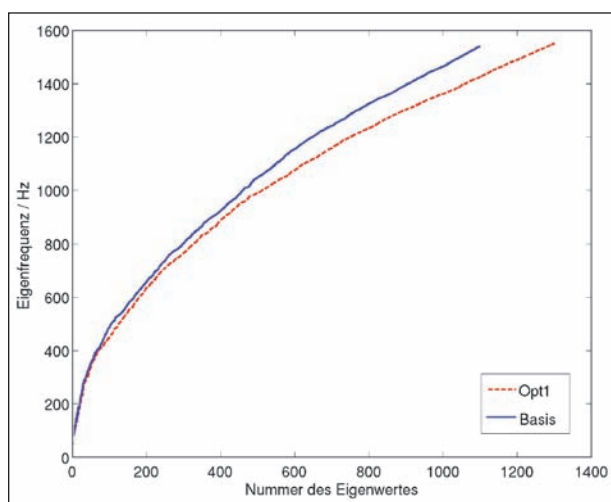


Bild 3.4-42: Eigenwertspektrum des optimierten Glattreifens im Vergleich mit dem Basisreifen

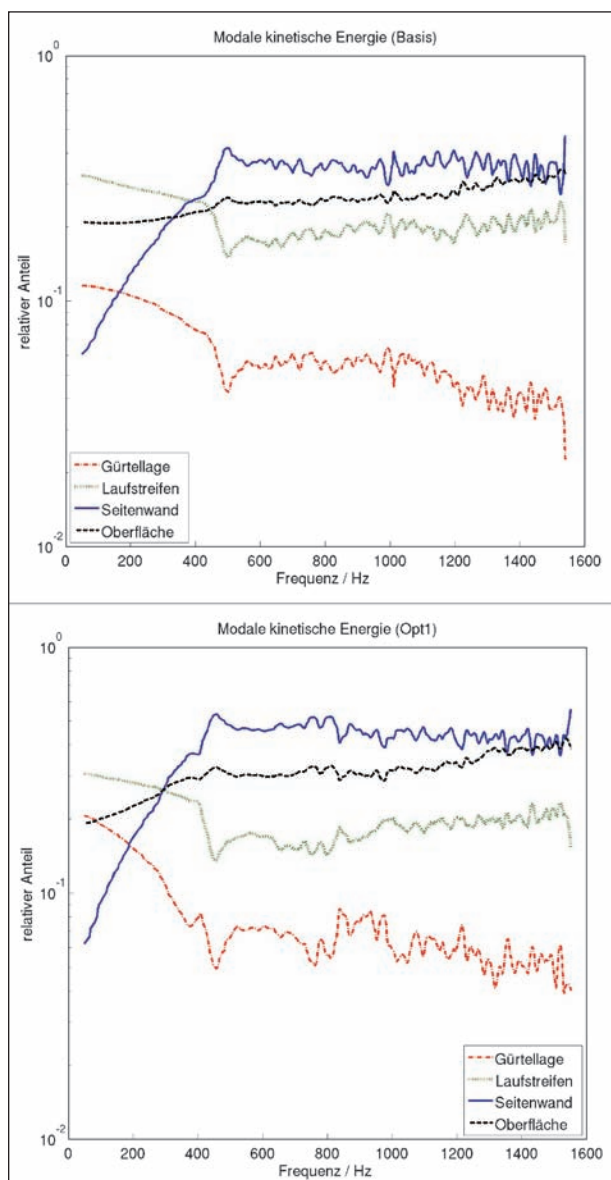


Bild 3.4-43: Modale Partialenergie für Basisreifen (oben) und optimierten Glattreifen (unten)

kalen Moden beim optimierten Glattreifen bereits bei ca. 900 Hz stattfindet, beim Basismodell bei ca. 1.000 Hz. Die Beobachtung kann wiederum mit der geringeren Steifigkeit des optimierten Glattreifens erklärt werden, denn dadurch steigen bei Annahme gleicher Massenverteilung die relativen Schwingamplituden in diesen Baugruppen.

Die mechanischen Strukturantworten infolge der Texturanregung wurden auf der glatten und rauen Prüftrommel berechnet und für die akustische Bewertung an die Projektpartner in Hamburg-Harburg übertragen.

3.4.5.5 Profiltreifen

In einer bereits fortgeschrittenen Phase des Projektes wurden seitens der Continental AG neue Erkenntnisse zur Bedeutung des Profileinflusses auf glatten und rauen Fahrbahnen bekannt gemacht. Während auf rauen Fahrbahnoberflächen der Einfluss des Laufstreifengummis dominiert, überwiegt hinsichtlich der Abrollgeräusche auf eher glatten

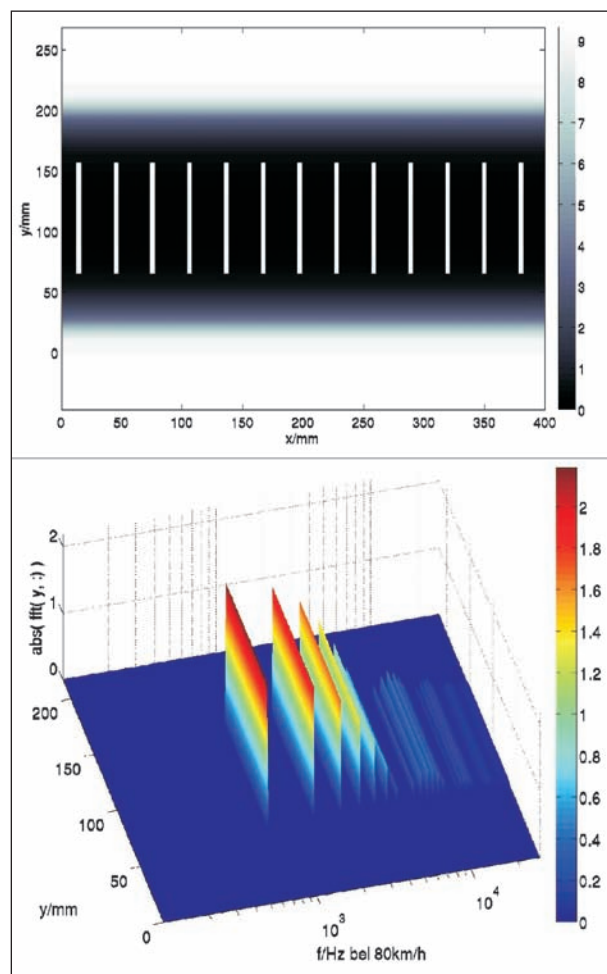


Bild 3.4-44: Querprofil mit 66 Profilstollen und berechnete Anregungsspektren

Fahrbahnen der Einfluss des Profils. Der Arbeitsplan wurde darum um den Punkt Profilanregung ergänzt. Der transient dynamische Profilstolleneingriff wird dabei approximativ durch eine überlagerte Anregungsfunktion beschrieben, die auf Basis der von der Continental AG übermittelten Profilschans berechnet wird. Dabei wurden zwei sog. simple pattern, wie exemplarisch in Bild 3.4-44 gezeigt, analysiert und modelliert. Der Frequenzinhalt der resultierenden Anregungsspektren ist unten in Bild 3.4-44 dargestellt.

Diese Berechnungen wurden für zwei Profile mit 66 und 132 Profilstollen in Umfangsrichtung durchgeführt. Allerdings erfährt der Reifen in Realität die in Bild 3.4-44 dargestellten Anregungsamplituden nicht. Außerdem ist die Eindringtiefe von den Profilstollen in den Reifen nur schwer zu messen. Aus diesem Grund wurde der Einfluss von der Eindringtiefe untersucht. Die Betriebsschwingung vom Glattreifen durch die reine Profilanregung mit 66 Profilstollen wird in Bild 4.3-45 dargestellt, wobei die Eindringtiefen von 0,2 und 0,5 mm gewählt werden. Speziell bei der größeren Eindringtiefe zeichnet sich die streng periodische Anregung in der Strukturantwort ab.

Der gemessene und berechnete Schalldruckpegel werden in Bild 3.4-46 verglichen. In dieser Darstellung werden die gemessenen Terzspektren offenbar unterschätzt, allerdings wurde die Messung auf einem Safety-Walk-Belag durchgeführt, die Simulation jedoch auf einer ideal glatten Trommel. Die Grundanregung durch den rauen Belag wurde also bei der Simulation vernachlässigt, weil keine gemessenen Texturdaten zur Verfügung standen. Dieses zeichnet sich im niederfrequenten Antwortspektrum ab. Der gemessene peak bei 800 Hz wird jedoch von beiden Simulationen exakt wiedergege-

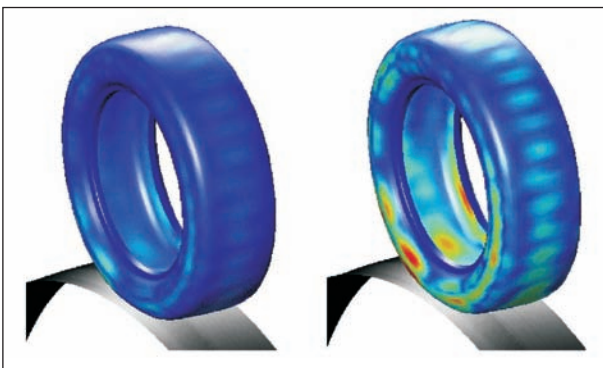


Bild 3.4-45 : Betriebsschwingungen vom Querprofilreifen mit 66 Querrillen unter reiner Profilanregung, (links) Rillentiefe 0,2 mm (rechts) 0,5 mm

ben. Die Überhöhung bei ca. 1.300 Hz kann durch die zu grobe Diskretisierung erklärt werden, wie anhand der Diskretisierungsstudien nachgewiesen wurde, vgl. Bild 3.4-33. Die entwickelten Berechnungsmethoden sind universell und auch auf kompliziertere Profilgeometrien anwendbar, wie z. B. in Bild 3.4-47 skizziert.

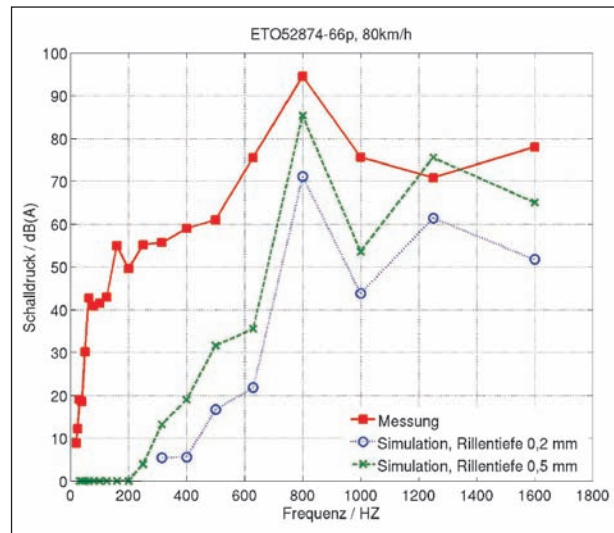


Bild 3.4-46: Vergleich der gemessenen und berechneten Terzspektren von Querprofilreifen mit 66 Querrillen

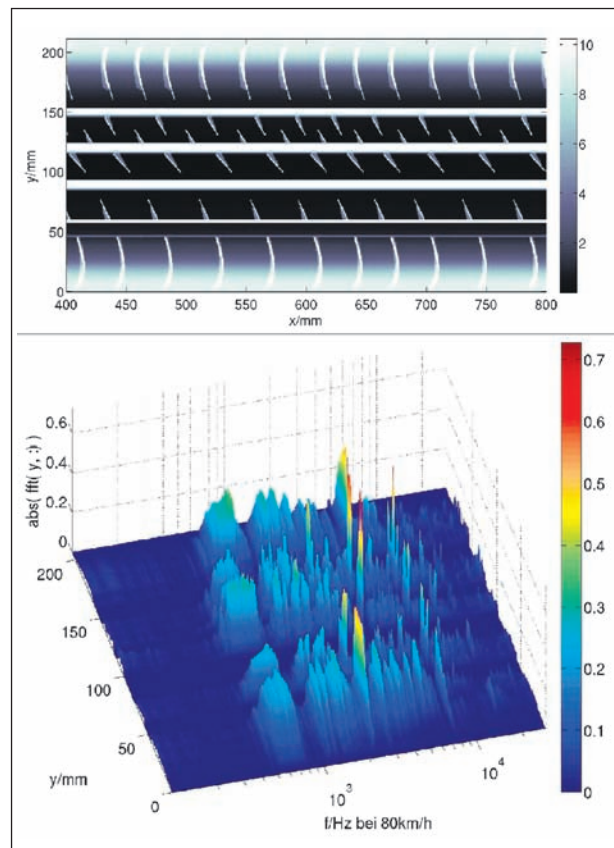


Bild 3.4-47: Beschreibung der Profilgeometrie mittels portable gray map data (oben) und berechnetes Anregungsspektrum (unten)

3.4.5.6 Fahrbahnübergänge

Die im Teilprojekt 3222 entwickelten Rautenbleche zur Reduzierung der mechanischen Anregung bei der Überfahrt von Fahrbahnübergängen wurden mit bereitgestellten Topologiedaten, siehe Bild 3.4-48, digitalisiert und periodisch für Modelle eines vollständigen Fahrbahnübergangs erweitert. Dabei wurden Modelle für Sommer- und Winterstellung generiert, wobei der lichte Raum zwischen den einzelnen Rauten in Fahrtrichtung variiert wurde. Die berechneten Anregungsspektren sind rechts in Bild 3.4-48 dargestellt, deutlich erkennbar ist die streng harmonische Anregung, die mit der Rautenlänge und dem Lochabstand korreliert. Auf Basis der rein mechanischen Analyse wird der Vorschlag unterbreitet, analog zum pitching des Reifenprofils das monofrequente Anregungspotenzial durch ungleiche Geometrie der Segmente zu reduzieren. Diese Anregungsfunktion wurde zunächst rein virtuell in die Glattasphalttrommel des Continental-Prüfstands eingebaut. Die Modelle für die Prüftrommeln sind in Bild 3.4-49 dargestellt, wobei sehr deutlich der Unterschied zwischen der Sommer- und der Winterstellung ersichtlich ist. Auch bei diesen Berechnungen muss die Eindringtiefe des Laufstrei-

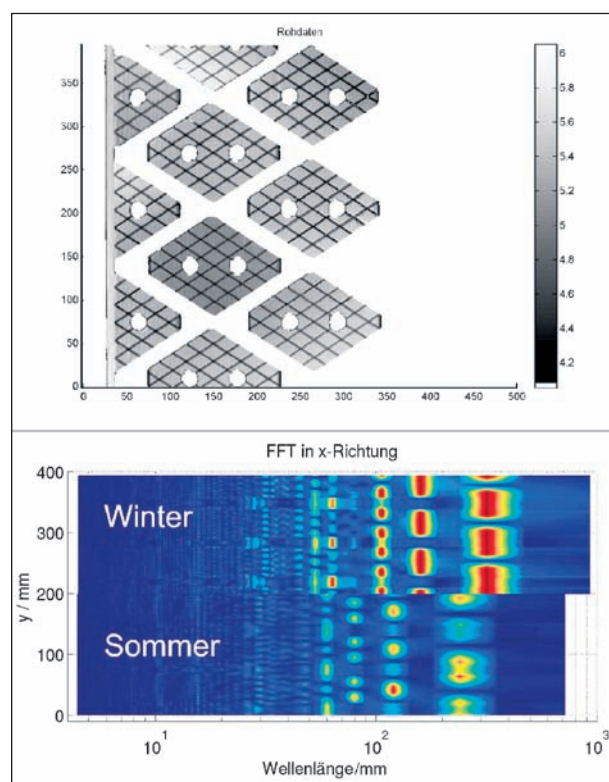


Bild 3.4-48: Rautenbleche zur Geräuschminderung an Fahrbahnübergängen. Oben: digitalisierte Topologie, unten: Anregungsspektrum in Sommer- und Winterstellung

fengummis in die Hohlräume der Rautenbleche geschätzt werden, da diesbezüglich keine Messergebnisse vorliegen. Damit wurde der Referenzreifen berechnet und die Daten für die akustische Analyse aufbereitet.

Erwähnt sei in diesem Zusammenhang auch, dass im Rahmen einer Studienarbeit numerische Experimente mit dem kommerziellen Programmsystem Abaqus für das Überrollen der Rautenbleche mittels transient dynamischer Simulation durchgeführt wurden, siehe Bild 3.4-50. Die Ergebnisse führten

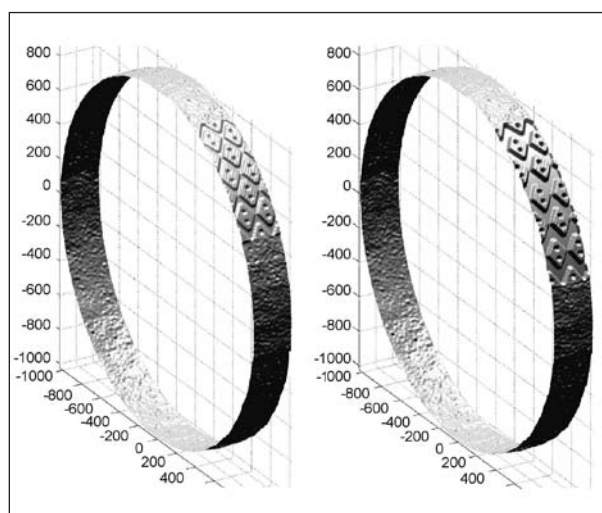


Bild 3.4-49: Modelle der Prüftrommel für die Anregung durch die Fahrbahnübergänge in Sommerstellung (links) und Winterstellung (rechts)

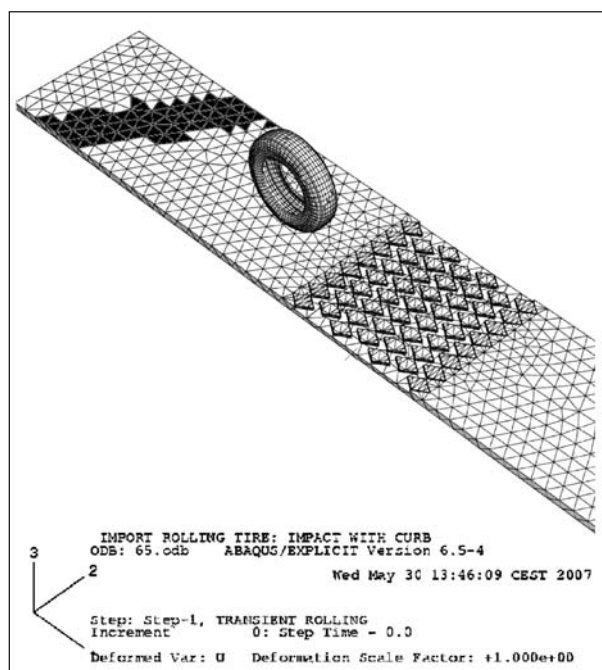


Bild 3.4-50: Abaqus-Modell zur transient dynamischen Analyse des Überrollens der Rautenblech-Fahrbahnübergänge

zu einer ernüchternden Bewertung, da aus den berechneten Verformungsfeldern die für die Schallabstrahlung interessanten hochfrequenten Anteile nicht mehr extrahiert werden konnten. Wegen der enormen Rechenzeiten wurden diese Analysen mit einem stark vereinfachten Reifenmodell durchgeführt. Auch diese Argumente bestätigen den in diesem Projekt gewählten Modellansatz.

3.4.5.7 Lkw-Reifen

Im Rahmen dieser Untersuchungen sollte die unmittelbare Übertragbarkeit der Simulationen auf Lkw-Reifen nachgewiesen werden. Dazu wurden bei der Continental AG Finite-Element-Modelle für je einen Glattreifen und einen Rillenreifen erstellt. Erste Schwierigkeiten ergaben sich dabei, ähnlich wie bei den optimierten Glattreifen, dass sich die für dieses Projekt generierten Finite-Element-Datensätze für die Dynamik-Berechnung als nicht lauffähig erwiesen. Durch Vergleichsberechnung mit alternativen Datensätzen als auch Vorstudien, die im Rahmen des LeiStra-I-Projektes durchgeführt wurden, wurde jedoch die grundsätzliche Funktionstüchtigkeit der Methoden auch an Lkw-Reifen nachgewiesen. Nach sorgfältiger Neudiskretisierung und entsprechenden Parameterstudien zur Netzverfeinerung konnten schließlich lauffähige Finite-Element-Modelle für die in diesem Projekt zu untersuchenden Lkw-Reifen erzeugt werden. Es handelt sich dabei nicht um einen grundsätzlichen Fehler im Modellierungsansatz, sondern um elementare Ausführungsfehler in der Generierung der Finite-Element-Modelle, die offensichtlich auf der

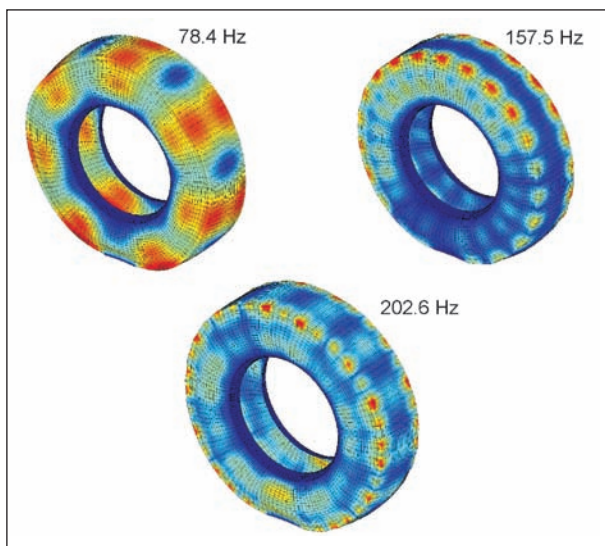


Bild 3.4-51: Typische Eigenmoden des Lkw-Glattreifenmodells

Tatsache basieren, dass die damit beauftragten Stellen für diese Forschungen nicht adäquat ausgebildet oder motiviert sind.

Exemplarisch sind in Bild 3.4-51 drei berechnete Eigenmoden eines Lkw-Glattreifens dargestellt. Das physikalische Verhalten unterscheidet sich von den Pkw-Reifen insbesondere infolge der grundsätzlich unterschiedlichen Massen- und Steifigkeitsverteilung. Die Lkw-Reifenmodelle zeichnen sich durch eine deutlich höhere Modendichte aus, in diesem Beispiel wurden ca. 150.00 Eigenpaare bis 1,5 kHz extrahiert. Das geht mit einem ungleich höheren Berechnungsaufwand einher.

In den Bildern 3.4-52 und 3.4-53 sind die Verteilungen der modalen Energien für den Lkw-Rillenreifen und den Lkw-Glattreifen dargestellt. Das Spektrum sieht für beide Reifen relativ ähnlich aus: Während der Einfluss der Gürtelbiegemoden ab ca. 200 Hz deutlich zurückgeht, dominiert die modale Energie der Laufstreifen die Spektren, wobei ausdrücklich auf die logarithmische Auftragung hingewiesen sei. Dies ist eine unmittelbare Folge der im Vergleich zum Pkw-Reifen verhältnismäßig großen Masse der Laufstreifen. Die modale Energie der Seitenwände liegt in beiden Modellen konstant auf mittlerem Niveau.

Die Betriebsschwingungsform eines Rillen-Lkw-Reifens auf dem Trommelprüfstand ist in Bild 3.4-54 dargestellt. Im Vergleich zu den Pkw-Reifen zeichnet sich dabei eine deutliche Dominanz der

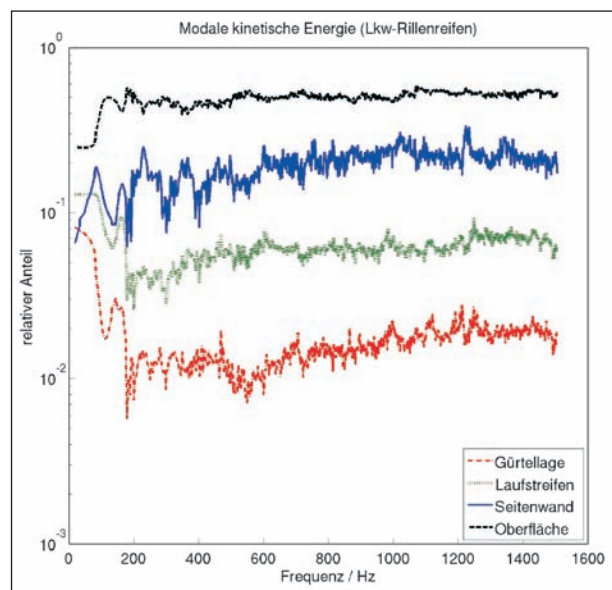


Bild 3.5-52: Spektren der modalen kinetischen Energie des Lkw-Rillenreifens

Laufstreifenschultern ab. Obgleich die gleichen physikalischen Mechanismen wirksam sind, hat der prinzipielle strukturelle Aufbau einen entscheidenden Einfluss auf die transiente Dynamik.

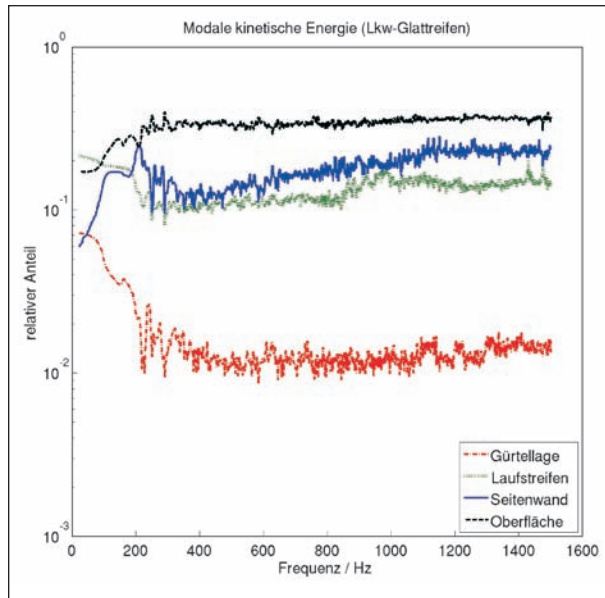


Bild 3.5-53: Spektren der modalen kinetischen Energie des Lkw-Glattreifens

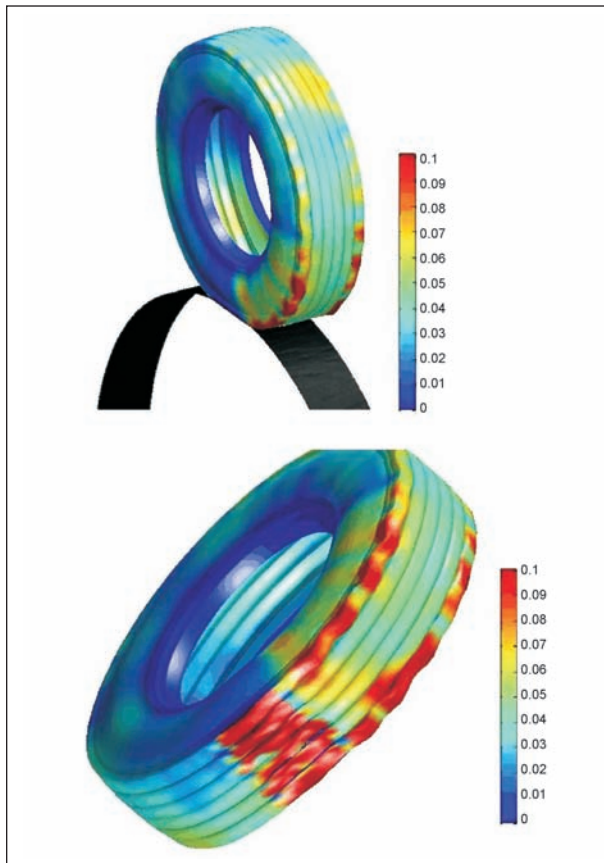


Bild 3.5-54: Betriebsschwingungsformen eines Lkw-Rillenreifens

3.4.6 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Teilprojekt wurden numerische Berechnungsverfahren für die Simulation des transient dynamischen Verhaltens rollender Reifen entwickelt und für die praktische Anwendung zur Optimierung lärmarmere Reifen erprobt. Die numerischen Methoden und die Modellbildung wurden dabei entsprechend dem fortschreitenden Erkenntnisstand auf Basis dieser Untersuchungen und den kooperativ bei der Continental AG durchgeführten experimentellen Untersuchungen zielgerichtet vorangetrieben.

Die in diesem Projekt entwickelten Simulationen markieren den internationalen Standard, sowohl im Bereich der „computational mechanics“ als auch in der „international tire society“, belegt durch zahlreiche Einladungen zu Vorträgen auf internationalen Fachkonferenzen sowie Weiterbildungsprogrammen für Doktoranden und in der Industrie tätige Ingenieure, „peer reviewed“ Publikationen in renommierten Fachzeitschriften und nicht zuletzt durch den unlängst zugesprochenen „tire manufacturing and design innovation award“.

Diese Erfolge basieren darauf, dass mit diesen Forschungsarbeiten erstmals die physikalisch konsistente Modellierung der transienten Dynamik rollender Räder mittels detaillierter Finite-Element-Modelle der Reifen nachgewiesen werden konnte. Die wesentlichsten wissenschaftlichen Errungenschaften waren dabei:

1. Die Bereitstellung von Algorithmen zur effizienten numerischen Lösung der komplexen Eigendynamik rotierender Strukturen mit gleichzeitigem Nachweis der physikalischen Konsistenz.
2. Die Ausarbeitung von Methoden zur Auswertung und Interpretation der anfallenden Datenmengen.
3. Der Nachweis zur zwingenden Notwendigkeit einer skalenübergreifenden Beschreibung der Kontaktmodellierung.

Im derzeitigen Stadium ermöglichen die entwickelten Berechnungsmethoden qualitative Prognosen, zum Beispiel wie sich konstruktive Änderungen des Reifenunterbaus hinsichtlich der Rollgeräuschemission auswirken. Die Wirkungsketten werden dabei physikalisch korrekt mit zum Teil bemerkenswerter Detailtreue abgebildet (vgl. Bild 4.3-33). Mit den heute verfügbaren Computern, Diskretisierungstechniken und numerischen Algorithmen sind

Reifenschwingungen bis zu Frequenzen von 1,5 kHz zuverlässig zu prognostizieren. Hinsichtlich der quantitativen Abweichungen, bis dato werden mit der Simulation die gemessenen Schalldruckpegel deutlich überschätzt, wurden Unzulänglichkeiten in der mathematischen Beschreibung des durchaus komplizierten Materialverhaltens des Reifenwerkstoffs Gummi herausgearbeitet. Diesbezüglich wurden thermodynamisch konsistente Materialmodelle systematisch erprobt, bewertet und für die hier vorliegenden Aufgabenstellungen weiterentwickelt. Die Implementierung dieser Materialmodelle in den in-house-code der Continental AG, mit dem vereinbarungsgemäß die Systemmatrizen für die Eigenwertberechnung auf der Grundlage einer stationären Rollkontaktsimulation berechnet werden, konnte im Rahmen dieses Projektes nicht vorgenommen werden. So sind in den Berechnungsmodellen bislang weder die materielle Heterogenität infolge der beanspruchungsabhängigen Konditionierung von gefülltem Gummi noch die dynamische Versteifung und das Dämpfungsverhalten bei höheren Frequenzen enthalten. Für die quantitativ richtige Prognose der Schallabstrahlung rollender Reifen wurde die Modellierung der Anregung durch den Kontakt des Laufstreifengummis mit der rauen Fahrbahnoberfläche als essentielle Aufgabe herausgearbeitet. Experimentelle Technologien für die messtechnische Erfassung des geschwindigkeitsabhängigen Eindringverhaltens des Laufstreifengummis in die Kavitäten der rauen Fahrbahnoberflächen zur zuverlässigen Beschreibung einer Anregungsfunktion sind heute nicht verfügbar. Auch dafür wurden, basierend auf einem mikromechanischen Modellansatz, neue Lösungswege beschritten. Die vorliegende Problemstellung kann damit auch als Vorzeigebeispiel für die in der wissenschaftlichen Gesellschaft seit einigen Jahren diskutierte Notwendigkeit zur skalenübergreifenden Modellierung herangezogen werden: Während die numerische Lösung der Feldgleichungen (partielle Differentialgleichungen im Inneren des Gebiets) weitestgehend verstanden ist, besteht in der Formulierung der Randbedingungen (dynamische Lasteinwirkungen etc.) noch ein großer Forschungsbedarf. Dass dafür skalenübergreifende Modellansätze, sowohl im Raum als auch in der Zeit, notwendig sind, wurde auch in diesem Projekt dokumentiert. Aber auch diesen Aspekt betreffend wurden bestehende Defizite in der Charakterisierung der Materialeigenschaften herausgearbeitet, diesbezüglich sind insbesondere neue Experimente zur realitätsnahen Beschreibung des Laufstrei-

fengummis im Kontakt mit der rauen Fahrbahnoberfläche zu entwerfen. Die entwickelten Materialmodelle erscheinen nach dem derzeitigen Kenntnisstand für die hier relevanten Längenskalen hinreichend, es mangelt lediglich an geeigneten Messergebnissen zur Bestimmung der konstitutiven Parameter.

Darüber hinaus liefern die entwickelten Simulationen einen sehr detaillierten Einblick in die physikalischen Wirkungsketten und -mechanismen. Zu deren Visualisierung wurden zahlreiche Animationstechniken entwickelt.

Literatur

- [1] NACKENHORST, U.: "The ALE-Formulation of Bodies in Rolling Contact – Theoretical Foundations and Finite Element Approach", *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 193 (39-41) 2004, 4299-4322
- [2] ZIEFLE, M., NACKENHORST, U.: "Numerical Techniques for Rolling Rubber Wheels – Treatment of Inelastic Material Properties and Frictional Contact", *Computational Mechanics*, 42, 2008, 337-356
- [3] NACKENHORST, U., BRINKMEIER, M.: "On the dynamics of rotating and rolling structures", *Archives of Applied Mechanics*, 78, 2008, 477-488
- [4] BRINKMEIER, M., NACKENHORST, U.: "An Approach for large scale gyroscopic eigenvalue problems with applications to high frequency response of rolling tires". *Computational Mechanics*, 41, 2008, 503-515
- [5] KARP, S.: „Numerische Untersuchungen zum inelastischen Materialverhalten von Gummi“, Masterarbeit, Leibniz-Universität Hannover, 2006
- [6] LI, XUAN: "Theoretical and Numerical Investigation on the Rolling Contact", Masterarbeit, Leibniz-Universität Hannover, 2006
- [7] CHIARELLO, R.: „Skalenübergreifende Modellierung des transient-dynamischen Rollkontakts“, Masterarbeit, Leibniz-Universität Hannover, 2008
- [8] DÄMGEN, M.: „Experimentelle Untersuchungen zum elastischen und inelastischen Verhal-

-
- ten elastomerer Werkstoffe“, Dissertationsschrift, Leibniz-Universität Hannover, 2007
- [9] ZIEFLE, M.: „Numerische Konzepte zur Behandlung inelastischer Effekte beim reibungsbehafteten Rollkontakt“, Dissertationsschrift, Leibniz-Universität Hannover, 2007
- [10] SANDBERG, U. and E. J. ERZY, A.: “Tire/Road Noise Reference Book”, Informex, 2002
- [11] Forschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ – Abschlussbericht TP 3212 – Teil 3
- [12] BRINKMEIER, M.: „Modellierung und Simulation der hochfrequenten Dynamik rollender Reifen“, Dissertationsschrift, Leibniz-Universität Hannover, 2007
- [13] HEINRICH, G., KALISKE, M.: „Theoretical and numerical formulation of a molecular based constitutive tube-model of rubber elasticity“, Computational and theoretical polymer science, 1998, 227-241

3.5 Teilprojekt „Entwicklung Simulationstool – Akustikmodell“

Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff
 Dipl.-Ing. Jan Biermann
 Institut für Modellierung und Berechnung
 Technische Universität Hamburg-Harburg

3.5.1 Zielsetzung

Nachdem das strukturdynamische Verhalten des Reifens zunächst mit Hilfe von detaillierten Finite-Elemente-Modellen untersucht wurde, wird unter Verwendung der ermittelten Strukturrandbedingungen das akustische Verhalten des Reifen-Fahrbahnsystems analysiert. Das dazu erforderliche akustische Berechnungsmodell basiert auf der Finite/Infinite-Elemente-Methode (FEM/IFEM), wobei die Schallabstrahlung mit Hilfe spezieller halbunendlicher Elemente berücksichtigt wird.

Aus den vorangegangenen Arbeiten lag für die akustischen Berechnungen ein Finite-Elemente-Programm vor, das es ermöglicht, die Schallabstrahlung der Reifenschwingungen aus den Strukturuntersuchungen der Projektpartner zu bestimmen. Hierbei wurde bisher lediglich die Schallabstrahlung einzelner charakteristischer Eigenformen von Reifen untersucht. Das Ziel der nachfolgend dokumentierten Entwicklungen war es, dass den Projektpartnern ein umfangreiches Finite-Elemente-Programm zur Verfügung gestellt werden sollte, das auf spezielle Berechnungen der Reifenakustik für verschiedene Rollzustände abgestimmt ist und wirkungsvoll im Rahmen einer kostengünstigen Entwicklung lärmreduzierter Reifen-Fahrbahnsysteme eingesetzt werden kann. Im Einzelnen waren die Schwerpunkte die Entwicklung geeigneter Methoden und Modelle, zum anderen die Anwendung dieser Methoden auf realitätsnahe Reifenmodelle und die entsprechenden Vergleiche mit Messungen. Die Vergleiche zwischen Simulation und Messung dienten sowohl der Validierung der gesamten Simulationskette als auch der Untersuchung von Einflussgrößen.

In dem hier vorliegenden Bericht wird zunächst das Berechnungsmodell kurz beschrieben und die eingesetzten akustischen Berechnungsmethoden in knapper Form zusammengestellt. Anschließend wird das Verfahren an repräsentativen Berechnungsbeispielen genauer dargestellt und diskutiert.

Hierbei wird die Schallabstrahlung für einen Testreifen auf zwei unterschiedlichen Fahrbahnen untersucht. Abschließend werden in einem Ausblick Möglichkeiten zur Erweiterung des bestehenden Modells vorgeschlagen.

3.5.2 Physikalische Grundlage

Alle im Folgenden beschriebenen Simulationen des Schallausbreitungsphänomens basieren auf der Lösung der Helmholtzgleichung. Um die Interpretierbarkeit der Ergebnisse zu verbessern, soll in diesem Kapitel kurz die Physik der Schallausbreitung beschrieben werden und auf die vereinfachenden Annahmen eingegangen werden, die auf die Helmholtzgleichung als problembeschreibende Differentialgleichung führen.

Thermodynamik in Schallfeldern

Es sei herausgestellt, dass die lokalen Schwingungsvorgänge und die daraus resultierenden sich fortpflanzenden Druckschwankungen keinen Massetransport, sondern einen reinen Energietransport bewirken. Dadurch ist leicht verständlich, weshalb thermodynamische Überlegungen bei der Schallausbreitung angestellt werden müssen. Diese Betrachtungen können sehr komplex werden, weshalb in aller Regel vereinfachende Annahmen zugrunde gelegt werden.

Eine erste Vereinfachung ist die Annahme des Ausbreitungsmediums Luft als ideales Gas. Es gilt daher für den Gesamtdruck p_g

$$p_g = \frac{R_{gas}}{M_{mol}} \rho_g T_g$$

mit der allgemeinen Gaskonstanten R_g , der molaren Masse M_{mol} , der Gesamtdichte ρ_g und Temperatur T_g . Ein Blick auf die maßgeblichen Frequenzen zeigt, dass Schallfelder sehr raschen zeitlichen Wechsels unterliegen. Hierauf basiert auch die zweite vereinfachende Annahme, dass die Zustandsänderungen in Schallfeldern als adiabat angesehen werden können. Die Zustandsgleichung,

$$\frac{p_g}{p_0} = \left(\frac{\rho_g}{\rho_0} \right)^\kappa$$

mit dem Adiabatenkoeffizienten κ , beschreibt nun den Zusammenhang zwischen den Zustandsgrößen Druck und Dichte, wobei p_0 und ρ_0 der Be-

zugsdruck bzw. die Bezugsdichte sind. Wie bereits erwähnt, sind die akustischen Größen sehr kleine, den Ruhegrößen überlagerte, zeitliche (und örtliche) Änderungen.

Stellt man nun die Gesamtgrößen als Summe eines statischen und eines Wechselanteils (akustischen Anteils) dar, ergeben sich weitere Vereinfachungen. Die Linearisierung der Zustandsänderung um den Ruhepunkt ist daher eine sehr gute Näherung. Durch diese dritte Vereinfachung bekommt obige Gleichung die Form

$$\frac{P_g}{p_0} = \kappa \frac{\rho_g}{\rho_0}.$$

Fasst man in dieser Gleichung alle Ruheanteile in einer Größe zusammen, ergibt sich der sehr einfache Ausdruck

$$\rho = \frac{P}{c^2} \quad \text{mit} \quad c = \sqrt{\kappa \frac{p_0}{\rho_0}}.$$

Diese Gleichung kann nun in den weiteren Betrachtungen dazu genutzt werden, die nur schwer messbare Dichte durch die messtechnisch weitaus besser zu erfassende Schallfeldgröße Druck zu ersetzen. Erstaunlich ist, dass die bis hier nur rein formell definierte Größe c eine physikalische Interpretation und sogar große Wichtigkeit besitzt. Es handelt sich hierbei um die Schallwellengeschwindigkeit. Durch Einsetzen obiger Gleichung in die ideale Gasgleichung,

$$c = \sqrt{\kappa \frac{R_{gas}}{M_{mol}} T_0},$$

wird die Material- und Temperaturabhängigkeit dieser Kenngröße deutlich. Zusammenfassend ist an dieser Stelle festzustellen, dass die Zustandsgrößen Schalldruck p , Schalldichte ρ und die Schalltemperatur T das Schallfeld aus thermodynamischer Sicht beschreiben.

Mathematische Beschreibung des Schallausbreitungsphänomens

An dieser Stelle soll nun skizziert werden, wie zu einer Formulierung gelangt werden kann, welche das Schallausbreitungsphänomen mathematisch beschreibt.

Die Dynamik entsteht aus der Tatsache, dass das Ausbreitungsmedium elastisch und massebehaftet,

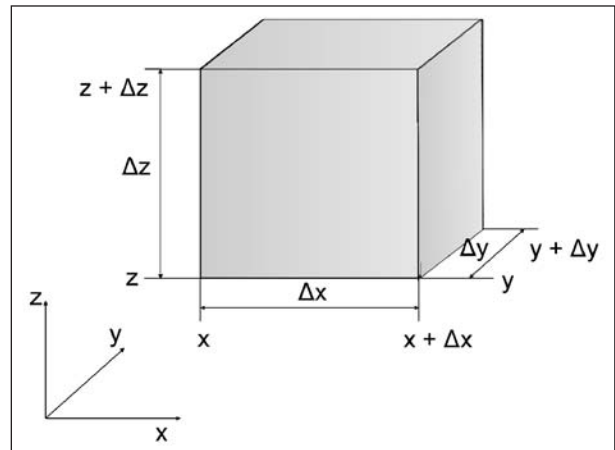


Bild 3.5-1: Ein Luftvolumen, welches einer Deformation in allen drei Raumrichtungen unterliegt

also träge, ist. Für die dynamische Beschreibung wird von einem kleinen kontinuierlichen Luftvolumen V mit $V = \Delta x \Delta y \Delta z$ gemäß Bild 3.5-1 ausgegangen.

Dieses Luftvolumen unterliegt einer Deformation ζ mit den Komponenten ζ_x , ζ_y , ζ_z in den jeweiligen Koordinatenrichtungen eines kartesischen Koordinatensystems.

Unter Beachtung des Prinzips der Massenerhaltung und des Übergangs zu einem infinitesimalen Volumen zeigt sich schnell, dass die relative Schalldichte gleich der negativen Dehnung ist,

$$\frac{\rho}{\rho_0} = - \frac{\partial \zeta_x}{\partial x} - \frac{\partial \zeta_y}{\partial y} - \frac{\partial \zeta_z}{\partial z}$$

wodurch die elastische Eigeneschaft des Mediums beschrieben wird. Um eine Darstellung mit den allgemein üblichen Größen Schallschnelle und -druck zu erhalten, wird diese Gleichung nach der Zeit abgeleitet, sodass sich unter der Verwendung von Gleichung für die adiabate Zustandsänderung

$$- \frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \text{div } \mathbf{v}$$

ergibt. An dieser Stelle ist klar, wie sich der Druck in Abhängigkeit von der Verschiebung der Gasteilchen ändert. Unklar bleibt jedoch, mit welchen Bewegungen die Gasteilchen auf äußere Kräfte reagieren. Dazu lässt sich das Newton'schen Trägheitsgesetzes in allen drei unabhängigen Raumrichtungen formulieren. Hier sei es exemplarisch nur an der x-Richtung demonstriert,

$$\frac{\partial^2 \zeta_x}{\partial t^2} = - \frac{1}{\rho_0} \frac{p(x + \Delta x) - p(x)}{\Delta x}.$$

Lässt man nun das betrachtete Volumen unendlich klein werden, geht die rechte Seite obiger Gleichung in den Differentialquotienten über. Die Trägheitseigenschaft des Luftvolumens in x-Richtung lässt sich nun durch

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}$$

beschreiben. Die Erweiterung auf alle Raumrichtungen und Vernachlässigung der Schwerkraft liefert die zweite Grundgleichung:

$$\operatorname{grad} p = -\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t}.$$

Aus den Gleichungen kann die Geschwindigkeit v eliminiert werden. Dazu werden die Trägheitsgleichung nochmals nach der jeweiligen Raumkoordinate und die Kontinuitätsgleichung nach der Zeit abgeleitet. Die Ergebnisse werden ineinander eingesetzt und es ergibt sich folgende einfache Formulierung für die Beschreibung der Schallausbreitung (siehe [17]):

$$\Delta p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}.$$

Das Symbol Δ stellt den Laplace-Operator dar. Die gewonnene Gleichung beschreibt eine Wellengleichung, die von allen Schallereignissen erfüllt werden muss. Sie verdeutlicht, dass das Schallfeld vollständig durch eine skalare Funktion $p = p(\mathbf{x}, t)$ beschrieben werden kann. Allgemein sind beliebige Funktionen, deren Argument lediglich von $(t + x/c)$ oder $(t - x/c)$ abhängt,

$$p(\mathbf{x}, t) = f(t \pm x/c)$$

Lösungen der Wellengleichung, wenn x die Wellenausbreitungsrichtung ist. In der Akustik betrachtet man jedoch ausschließlich die spezielle Lösung der harmonischen Welle. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen hat die harmonische Welle die anschauliche Bedeutung der Ausbreitung eines „reinen Tones“. Außerdem wurde bereits darauf hingewiesen, wie klein die Schallfeldgrößen gegenüber den statischen Größen sind, weshalb das Prinzip der linearen Superposition anwendbar ist. Es sind daher beliebige Schallsignale durch die modale Superposition der monofrequenten harmonischen Lösungen darstellbar. Man unterliegt also bei der alleinigen Berücksichtigung harmonischer Wellen keiner Einschränkung.

Die Lösung der Wellengleichung hat folglich allgemein die Gestalt

$$p(x, t) = p_{\max} \cos(\omega t - k x)$$

mit der Winkelgeschwindigkeit ω und der Wellenzahl k ,

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Bei einer Darstellung der Wellenfunktion durch einen komplexen Zeiger ergeben sich bei Berechnungen einfachere Verhältnisse. Deshalb ist diese Darstellung,

$$p(x, t) = \operatorname{Re} \{ p_{\max} \exp j(\omega t - k x) \}$$

allgemein üblich. Durch die Annahme einer harmonischen Lösung der Wellengleichung gelangt man zu einer äquivalenten Formulierung,

$$\Delta p + k^2 p = 0,$$

die als die Grundgleichung in der Akustik angesehen werden kann. Die so genannte Helmholtz-Gleichung gilt es auf einem gewissen Gebiet, unter gewissen Randbedingungen zu lösen, wenn akustische Fragestellungen beantwortet werden sollen. Es sei daran erinnert, dass selbst bei exakter Lösbarkeit der Gleichung (was nur in den allerseltensten Fällen zutrifft) die Lösung aufgrund der in die Herleitung eingeflossenen Vereinfachungen dennoch nur eine Approximation der Realität darstellt. Zudem fand bis hierher die Dämpfung des Ausbreitungsmediums keine Berücksichtigung, die jedoch in der Realität zu beobachten ist.

3.5.3 Optimierung des Rechenmodells

Die Berechnung der Schallabstrahlung von Reifen stellt mathematisch ein Randwertproblem dar, dessen Lösung sowohl mit der Boundary-Elemente-Methode (BEM) als auch mit einer kombinierten Finite/Infinite-Elemente-Methode (IFEM) möglich ist. Im Rahmen des LeiStra-1-Projektes wurde sich für die IFEM entschieden, da sich diese in Hinblick auf mögliche Modellerweiterungen und Rechenzeiteffizienz als günstiger erweist. Für eine allgemeine Beschreibung der Methode sei auf [1, 2] verwiesen.

Die entstehenden Gleichungssysteme müssen für jede im Texturspektrum enthaltene Frequenz gelöst werden. Eine energieselektive Filterung seitens der Uni Hannover, d. h. eine Berücksichtigung nur der Anregungsfrequenzen mit dem größten Energiegehalt, bewirkt zwar eine erhebliche Reduktion der Anzahl der zu lösenden Gleichungssysteme,

schlussendlich bleibt jedoch ein numerischer Aufwand von zwischen 300- und 500-maligem Lösen sehr großer Gleichungssysteme. Da der Aufwand der Modellerstellung und Vernetzung erheblich ist, wurde ein und dasselbe Finite-Elemente-Modell für alle Frequenzen gewählt. Bei der Wahl der Diskretisierung wurde dabei berücksichtigt, dass zur Vermeidung von Dispersionsfehlern im höheren Frequenzbereich auf Verfahren höherer Ordnung zurückgegriffen werden muss. Somit ergab sich eine verhältnismäßig grobe Elementierung, was wiederum dazu führte, dass im unteren Frequenzbereich Freiheitsgrade und somit Rechenzeit gespart werden konnten. Es wurden verschiedene Maßnahmen ergriffen, um die Lösungszeiten zu minimieren. Diese sollen nachfolgend kurz dargelegt werden.

3.5.3.1 Numerische Lösungsverfahren

Bild 3.5-2 zeigt die Diskretisierung des den Reifen umgebenden Halbraumes mit akustischen finiten (in der direkten Umgebung des Reifens) und unendlichen Elementen (an die finiten Elemente anschließend). Trotzdem diese Elemente nur einen Freiheitsgrad pro Knoten besitzen, nämlich den Druck, haben die entstehenden Gleichungssysteme eine Größe von ca. 0,5 Mio Unbekannten, was für das Lösungsverfahren eine erhebliche Herausforderung bedeutet. Bei derart großen Systemen sind direkte Lösungsverfahren aus Speicherplatz- und Rechenzeitgründen nicht mehr sinnvoll anwendbar. Deshalb kommen iterative Krylov-Unterraumverfahren zum Einsatz. Aber auch hier stellt die sich aus der Diskretisierung der schwachen Form der Helmholtzgleichung ergebende Systemklasse, die der indefiniten unsymmetrischen komplexen Matrizen, eine Herausforderung dar, da kein Verfahren a priori Konvergenzaussagen geben kann.

Es wurden numerische Untersuchungen durchgeführt, um für das spezielle Problem der Reifenrollgeräuschsimulation die effizienteste Löser/Präkonditionierer-Kombination zu finden. Die iterativen Gleichungslöser, die für die genannte Problemklasse infrage kommen, sind TFQMR, GMRES, BICGSTAB (siehe [3]). Es stellte sich heraus, dass die Kombination BICGSTAB/ASM zu Rechenzeitsparungen um einen Faktor drei gegenüber dem Standardverfahren GMRES/BlockJacobi (siehe Bild 3.5-3) führt. Es zeigte sich jedoch auch, dass die Eigenschaften Konvergenzgeschwindigkeit und Robustheit teilweise in Konkurrenz zueinander ste-

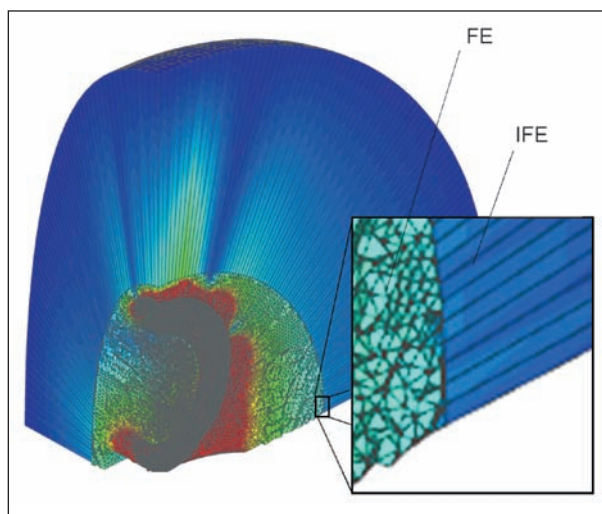


Bild 3.5-2: Darstellung eines Viertels des diskretisierten Berechnungsgebietes. Der vergrößerte Ausschnitt zeigt die Schnittstelle zwischen den Finiten Elementen (FE) und Unendlichen Elementen (IFE)

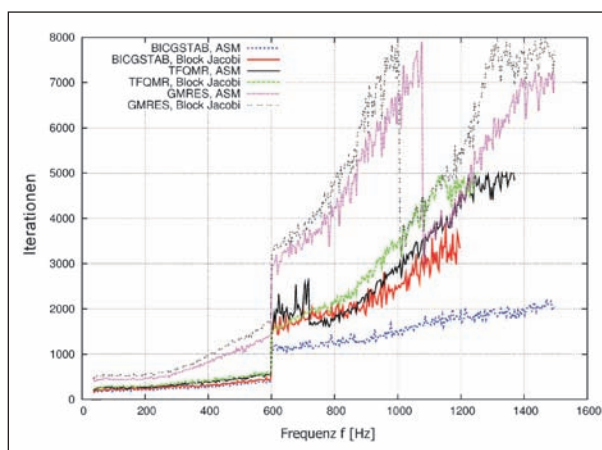


Bild 3.5-3: Vergleich der Rechenzeiten für das Reifenmodell unter Verwendung verschiedener Löser/Präkonditionierer-Kombinationen

hen. Deshalb wurde im Modell ein Algorithmus realisiert, der standardmäßig den schnellsten Löser verwendet, die Konvergenz prüft und im Fehlerfall sukzessiv auf robustere, aber langsamere Varianten zurückgreift. Weitere Untersuchungen zu einer noch gezielteren Anpassung der Präkonditionierungsstrategie sind derzeit in Bearbeitung, da sich hier die größten Einsparungen an Rechenzeit erwartet werden können.

3.5.3.2 Elementformulierung

Ein weiterer Parameter zur Beschleunigung des Berechnungsverfahrens ist die Wahl einer geeigneten Elementformulierung. Standardmäßig kommen heute Lagrange-Elemente zum Einsatz. Die Wahl des Elementtyps hat jedoch großen Einfluss auf die

spektralen Eigenschaften der Systemmatrizen und diese wiederum auf die Konvergenz und Robustheit der iterativen Gleichungslöser. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes spezielle akustische Finite Elemente entwickelt und in die FE-Bibliothek LibMesh [4] implementiert. Diese bewirken, dass die Systemmatrizen des diskretisierten akustischen Problems eben diese für den Löser positiven spektralen Eigenschaften aufweisen.

Numerische Tests führten zu einer erheblichen Einsparung von Rechenzeit. So bringt der Einsatz spezieller Bernstein-Elemente bei der konkreten Berechnung des Schallabstrahlungsproblems des Reifens eine Rechenzeitreduzierung um den Faktor 1,5 bis 2,5 mit sich, je nach betrachteter Frequenz (siehe Bild 3.5-4). Die allgemein hervorragenden Eigenschaften dieser Elemente in Bezug auf die Anwendung auf akustische Fragestellungen wurden in diversen wissenschaftlichen Veröffentlichungen dargestellt ([5, 6, 7, 8]).

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden ebenfalls finite Elemente auf Basis von integrierten Legendre-Polynomen und infinite Elemente mit entsprechender Basisapproximation implementiert und getestet [9]. Es zeigte sich, dass diese Elementtypen zwar im Allgemeinen den Bernstein-Elementen unterlegen sind, jedoch unter bestimmten Voraussetzungen bezüglich der Elementgeometrie, Elementordnung und zu untersuchender Frequenz Rechenzeitvorteile mit sich bringen (siehe Bild 3.5-5). Dies wurde im Rechenmodell berücksichtigt, indem frequenzselektiv die Elementfamilie gewählt werden kann. Auf diese Weise konnte bezüglich der Gesamtrechenzeit eine weitere Einsparung von 7 % erreicht werden.

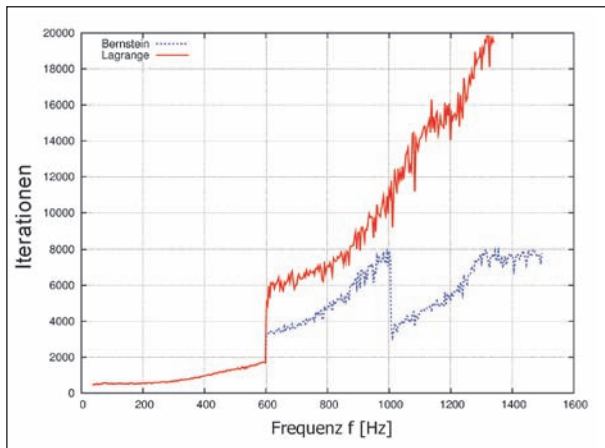


Bild 3.5-4: Vergleich der Rechenzeiten des Reifenmodells unter Verwendung des Standardverfahrens mit Lagrange-Elementen und mit Bernstein-Elementen (beide mit GMRES)

Nachdem sowohl der Aspekt des numerischen Lösungsverfahrens als auch der Elementformulierung einzeln dargestellt wurden, ist in Bild 3.5-6 die Auswirkung des Zusammenspiels beider Effekte aufgezeigt. Hierbei ist die erhebliche Rechenzeit als Ausgangssituation erkennbar. Die positiven Eigenschaften des Modells werden umso dominanter, je höher der betrachtete Frequenzbereich ist. Dieser Effekt wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass mit steigender Frequenz die Dichte der Anregungsfrequenzen zunimmt.

In Bild 3.5-6 sind die zur Lösung benötigten Iterationen verglichen, welche direkt proportional zur benötigten Rechenzeit sind. Diese kann je nach Rechnerarchitektur und verwendeter Anzahl an Prozessoren unterschiedlich sein. Um jedoch ein Gefühl für die erreichte Einsparung zu erhalten, hier

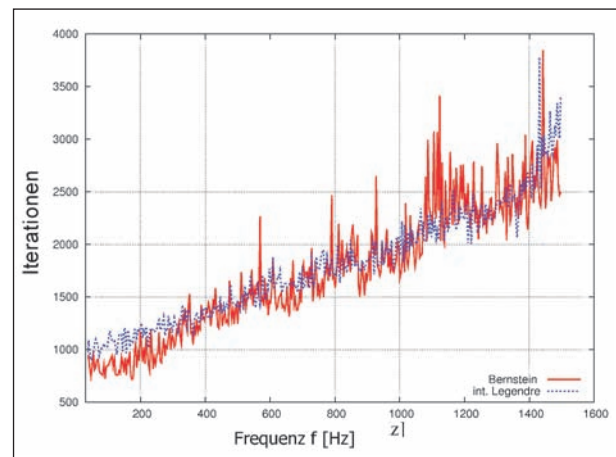


Bild 3.5-5: Vergleich der erforderlichen Iterationen im Falle von Bernstein- und integrierten Legendre-Elementen bei einem Reifenmodell mit 120 Umfangssegmenten

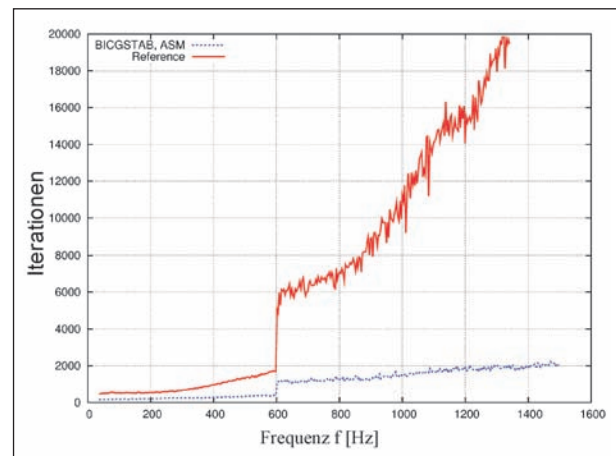


Bild 3.5-6: Vergleich der erforderlichen Iterationen zur Lösung des Reifenproblems zwischen dem Standardverfahren als Referenz (Lagrange-Elemente mit GMRES/BlockJacobi) und dem verbesserten Modell (Bernstein-Elemente mit BICGSTAB/ASM)

sind auch die oben genannten 7 % Einsparung gemessen in absoluter Rechenzeit durchaus relevant, sei angemerkt, dass die Gesamtrechenzeit des Komplementärreifens mit 400 Anregungsfrequenzen nach allen Modellverbesserungen (blaue Linie in Bild 3.5-6) auf einem Linux-Cluster mit 24 Prozessoren (16 AMD Opteron 260 (2,6 GHz) und 8 AMD Opteron 240 (2,4 GHz)) 33 Stunden dauert.

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass das akustische Modell bei einer definierten Anregung die Schalldrücke richtig wiedergibt (s. Bild 3.5-8). Die Simulation mit den Schnellerandbedingungen aus den strukturdynamischen Berechnungen der Universität Hannover wiesen speziell im höherfrequenten Bereich etwas zu große Amplituden auf, was primär auf die Materialmodellierung zurückzuführen war. Es bleibt zu erwähnen, dass dieser Versuch mit nicht drehendem Reifen zwar eine Vereinfachung hinsichtlich der Strukturdynamik darstellt, nicht aber für die akustischen Berechnungen, da auch bei der späteren Simulation des Rollenprüfstandversuches das akustische Medium als ruhend angenommen wird.

3.5.3.3 Numerische Untersuchungen am rollenden Reifen

Im nächsten Schritt wurden die Untersuchungen am rollenden Reifen vorgenommen. Erste Vergleiche zwischen Messung und Rechnung zeigten zwar qualitativ eine gute Übereinstimmung, die simulierten Schalldruckamplituden waren jedoch deutlich zu groß.

Um dies zu verbessern, folgten Berechnungen, um die akustische Auswirkung diverser Maßnahmen seitens des Strukturmodells zu untersuchen. Dazu zählen unter anderem die Veränderung der Anregungsfunktion, die aus einer Fouriertransformation der Prüftrummeltextur hervorgeht, eine Gewichtung auf Basis der Kontaktdruckverteilung und die Modifikation des Parameters der modalen. Für eine detaillierte Beschreibung dieser Modellparameter sei an dieser Stelle auf den Bericht des Projektpartners der Universität Hannover verwiesen.

Beide Maßnahmen führten zu einer quantitativen Verbesserung der Ergebnisse, jedoch nicht zu einer

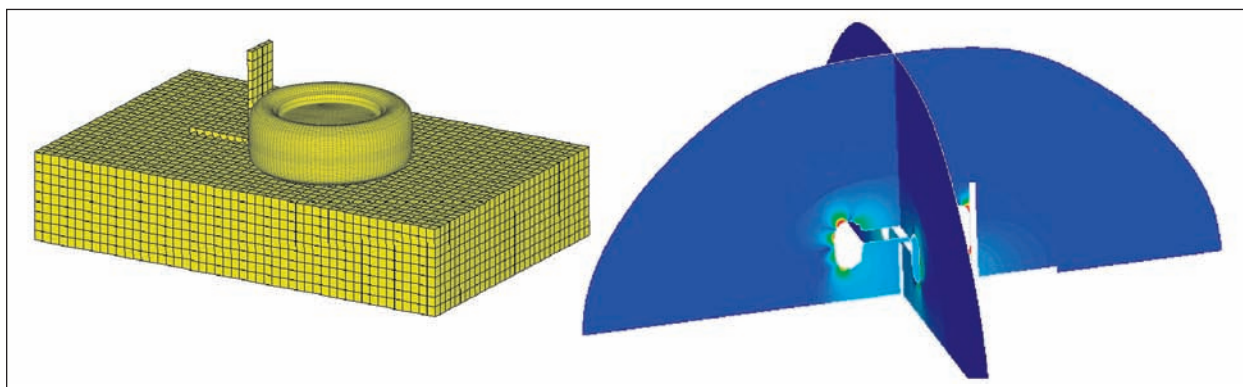


Bild 3.5-7: Diskretisierung für den Shakerversuch (links) und Schalldruckverteilung auf zwei senkrechten Schnitten durch das Berechnungsgebiet (Luftraum) bei 400 Hz

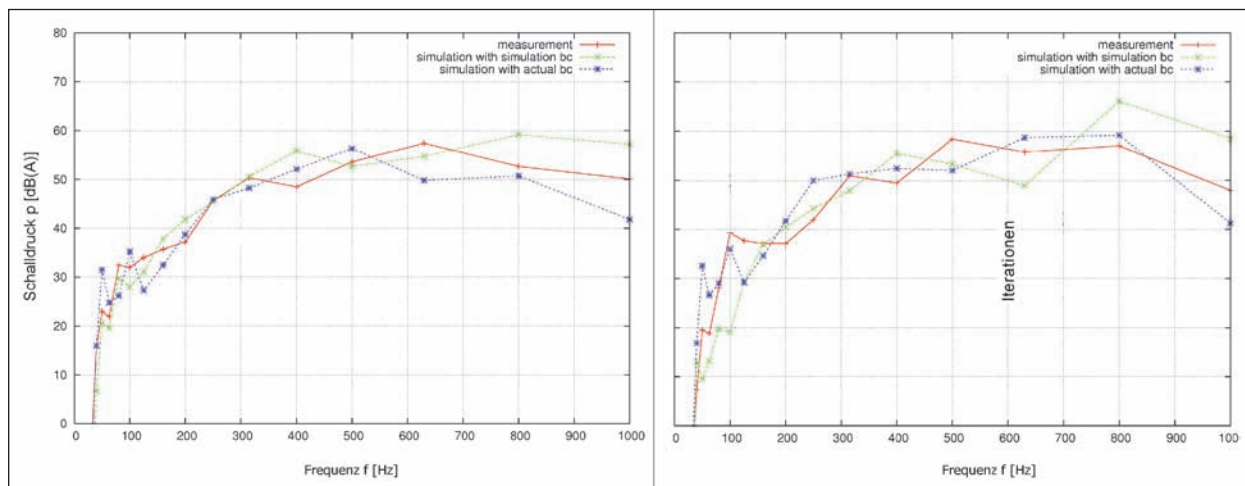


Bild 3.5-8: Vergleich der Amplituden der Schalldrücke beim Shakerversuch zwischen Messung, Simulation mit berechneten Schnellerandbedingungen und Simulation mit gemessenen Randbedingungen (an zwei Mikrofonpositionen)



Bild 3.5-9: Rollenprüfstand der Continental AG (links), diskretisierter Reifen mit Fahrbahntextur (Mitte) und akustisches Modell mit finiten/infiniten Elementen (rechts)

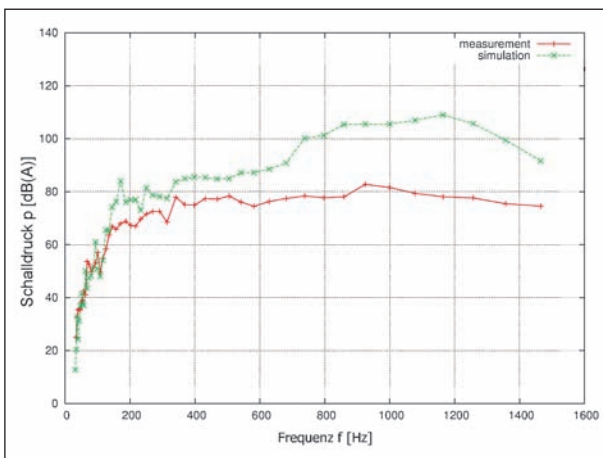


Bild 3.5-10: Vergleich der gemessenen und simulierten Drittel-Terzen der Schalldruckamplitude beim Referenzreifen und 60 km/h Rollgeschwindigkeit

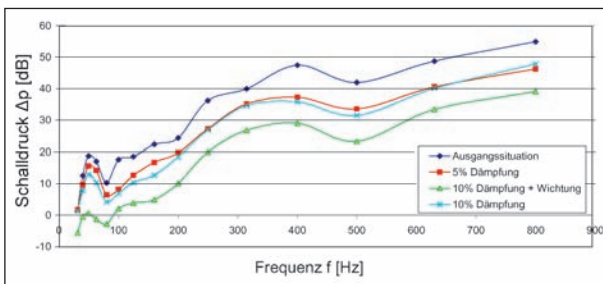


Bild 3.5-11: Einfluss von Modellparametern auf die Schalldruckdifferenz zwischen Messung und Berechnung bei 20 km/h Rollgeschwindigkeit

endgültigen Schließung der Lücke zwischen Messung und Rechnung. Infolgedessen wurde der Frage nachgegangen, ob die Amplitude der Anregung korrekt in der Simulation berücksichtigt wird, da die hohen simulierten Schalldruckamplituden auf einen zu großen Energieeintrag in das System deuten. Dazu wurden die tatsächlichen Eindringtiefen der Textur mittels Überrollens einer Folie gemessen. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden dann eine Textur-Filterfunktion und ein neues Anregungsspektrum des Reifens entwickelt. Für Details sei an dieser

Stelle wiederum auf den Bericht des Projektpartners der Universität Hannover verwiesen. Die sich daraus ergebenden Ergebnisse sind in Bild 3.5-12 mit denen der ursprünglichen Anregungsfunktion verglichen. Hier zeigt sich, dass die Vorstellung einer vollständig in den Laufstreifen eindringenden Textur nicht angemessen war. Aber auch mit der verbesserten Anregung blieb im hochfrequenten Bereich eine merkbare Differenz zwischen Messung und Simulation.

In einem nächsten Schritt wurde versucht, auf phänomenologischer Basis zu prüfen, inwiefern die bisherige Vernachlässigung viskoelastischer Effekte in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktzone einen Einfluss auf das akustische Verhalten hat. Dazu wurde eine frequenzabhängige Amplitudendämpfung $D = e^{-\zeta\omega}$ eingeführt¹ und der Dämpfungsparameter ζ durch Minimierung der Differenz der Flächen unter den A-bewerteten Terzspektren des Schalldrucks von Messung und Simulation mit

$$\min \left| \int_{30\text{Hz}}^{1500\text{Hz}} p_{\text{Messung}} df - \int_{30\text{Hz}}^{1500\text{Hz}} p_{\text{Simulation}}(\zeta) df \right|$$

bestimmt. Dies geschah an den Sommer-/Winterreifen, da für deren Laufstreifenmischung jeweils dynamische Materialdaten zur Verfügung standen. Der Versuch, eine direkte Korrelation zwischen diesen Werten und den gemessenen dynamischen Materialkennwerten Speichermodul E' und Verlustmodul E'' zu finden, führte nicht zum Erfolg. Relativ entsprach die Größenordnung des ζ -Verhältnisses

¹ Es sei angemerkt, dass das Strukturmodell um den Betriebspunkt ein linear elastisches Verhalten annimmt. Somit kann von einer frequenzselektiven Verminderung der Anregungsamplitude direkt auf die Verminderung der Oberflächenschnelle geschlossen werden, was im Akustikmodell berücksichtigt werden kann.

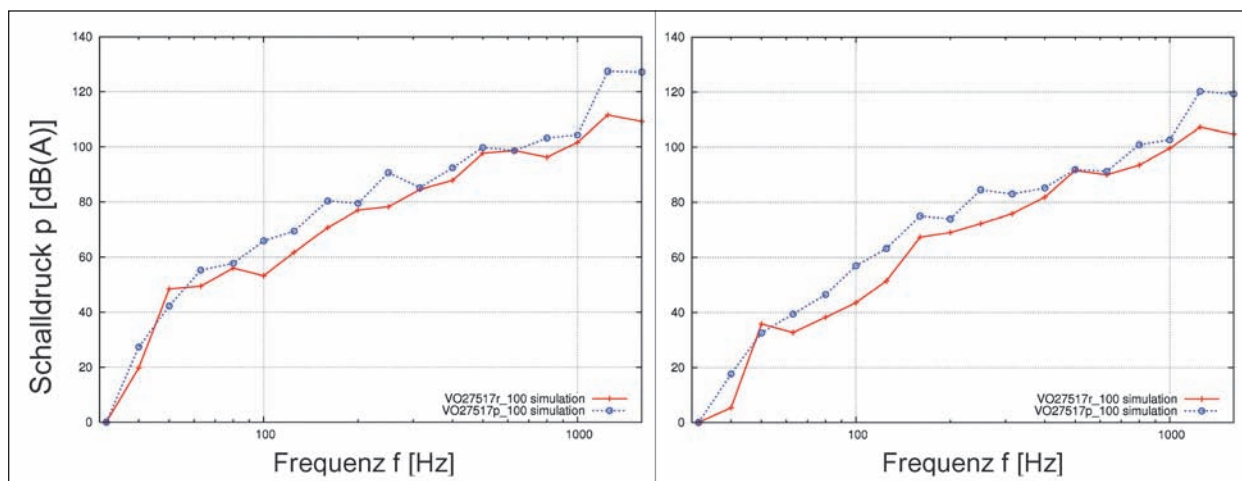


Bild 3.5-12: Vergleich der Schalldruckamplituden für direkte (blau) und gefilterte (rot) Anregungsfunktion für Referenzreifen an zwei verschiedenen Mikrofonpositionen (links – 1 m neben dem Reifen, rechts – 1 m im Auslauf)

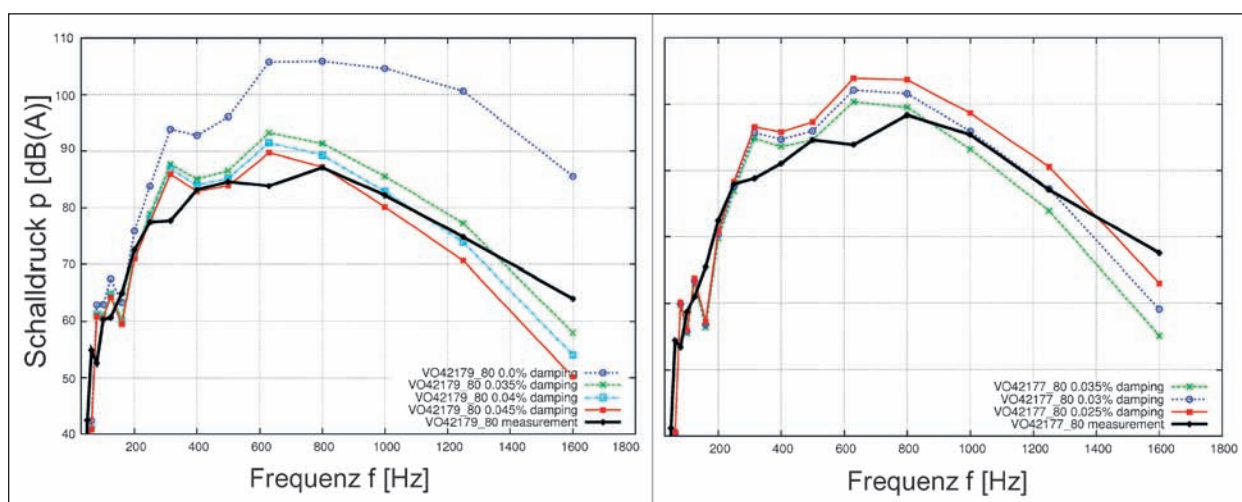


Bild 3.5-13: Vergleich von gemessenen und simulierten Schalldruck-Terzspektren bei variierender Anregungsdämpfung ζ für Rauasphalt am Feldpunkt 1 m lateral (Winterreifen – links, Sommerreifen – rechts)

der beiden Reifen jedoch dem des Verhältnisses der Verlustmoduln:

$$\frac{\zeta_{Sommer}}{\zeta_{Winter}} = 0,75 \quad ; \quad \frac{\delta_{Sommer}(1000\text{Hz})}{\delta_{Winter}(1000\text{Hz})} = 0.799$$

mit $\delta = \frac{E''}{E'}$.

Des Weiteren zeigten die Messungen für den Winterreifen eine höhere dynamische Steifigkeit als für den Sommerreifen. Dies stimmte qualitativ mit dem höheren Wert der bestimmten Anregungsdämpfung überein, was wiederum zeigte, dass die Berücksichtigung der dynamischen Vorgänge in der Kontaktzone phänomenologisch gerechtfertigt ist. Quantitativ zeigte sich, dass das akustische System bezüglich der Anregungsamplituden sehr sensitiv ist (siehe Bild 3.5-13). Weitere numerische Untersuchungen ergaben, dass dieser Parameter ζ für die beiden be-

trachteten Texturen unterschiedlich ist, was auf Nichtlinearitäten im Kontakt hindeutet. Diese Effekte müssen nicht allein im Material begründet sein. So kann der Kontakt, der durch das sukzessives Eindringen einzelner Rauigkeitsspitzen in den Reifen inherent nichtlinear ist, aufgrund stark unterschiedlicher Texturtopologien einen großen Einfluss auf das Gesamtphänomen haben. Ebenso können nichtlineare Effekte bei der lokalen Reibung zwischen Straßenrauigkeitsspitzen und Reifenmaterial einen nicht vernachlässigbaren Einfluss haben. Somit gilt als Fazit, dass ζ keine universelle, laufstreifenmischungsspezifische Konstante ist, wodurch im Bereich des Kontaktes und der Systemanregung noch weiterführende Arbeiten notwendig sind.

Außerdem wurde untersucht, wie stark der Einfluss der gewählten dynamischen Steifigkeit des Reifenmodells ist. Dazu wurde jeweils die dynamische

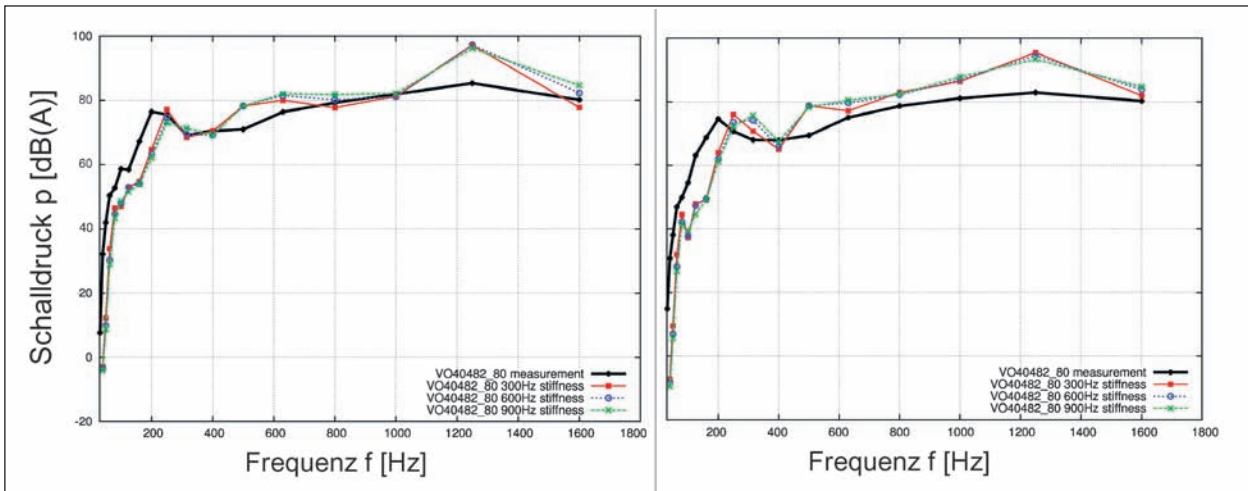


Bild 3.5-14: Einfluss verschiedener dynamischer Steifigkeiten auf die akustischen Simulationsergebnisse 1 m vor dem Einlauf (links) und 1 m hinter dem Auslauf (rechts)

Steifigkeit bei 300, 600 und 900 Hz gemessen und zur Bestimmung der Reifenschwingungen zunächst über den gesamten Frequenzbereich bis 1.500 Hz verwendet. Die Ergebnisse sind in Bild 3.5-14 dargestellt und zeigen, dass durch Veränderungen dieses Parameters Schwankungen in der Schalldruckamplitude um die 2 dB entstehen. Im Verhältnis zu den Auswirkungen der Anregungsamplitudendämpfung ist dies jedoch sehr gering, weshalb dieser Ansatz vorerst nicht weiter verfolgt wurde.

3.5.3.4 Weiterführende Untersuchungen zur Berücksichtigung viskoelastischer Materialeigenschaften der Laufstreifenmischung

Im vorangegangenen Kapitel wurden Maßnahmen aufgezeigt, die darauf abzielten qualitative und quantitative Diskrepanzen zwischen Berechnung und Messung aufzulösen. Ein Resultat war, dass die mechanische Anregung des Systems verbessert werden muss. In diesem Zusammenhang wurden seitens der Universität Hannover Anstrengungen unternommen, viskoelastische Materialeigenschaften in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktzone und somit in der Anregung zu berücksichtigen. Hierzu wurde ein entsprechendes Materialmodell implementiert und mittels transientscher Berechnungen eine verbesserte Texturfilterfunktion bestimmt. Für detaillierte Ausführungen zu diesem Thema sei auf den Bericht des Projektpartners aus Hannover verwiesen.

Die Auswirkungen dieser Maßnahme auf das akustische System seien zunächst am Beispiel des Komplementärreifens (VO40482) bei 80 km/h Roll-

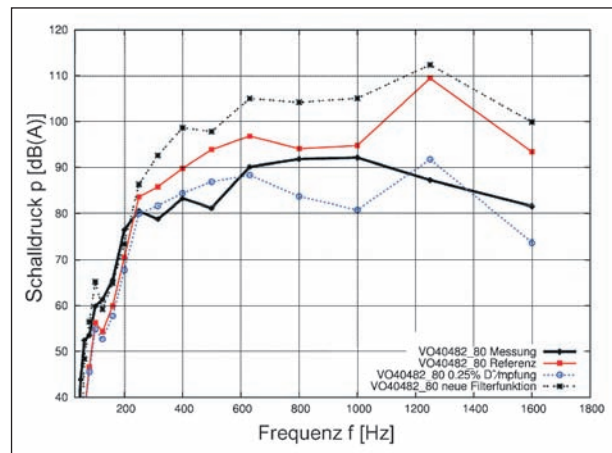


Bild 3.5-15: Gegenüberstellung der Wirkung verschiedener Maßnahmen zur Berücksichtigung viskoelastischer Effekte in der Anregung auf die Schalldruckamplitude

geschwindigkeit am Mikrofonpunkt 1 m vor dem Auslauf erläutert. Zunächst wurde die neue Filterfunktion angewendet, ohne auf die bislang zusätzlich verwendete heuristische Gewichtung der Anregungsfunktion mit der lokalen Kontaktdruckverteilung zurückzugreifen. Dieses Ergebnis zeigt Bild 3.5-15, wobei die Messung, die Ausgangssituation (Kontaktdruckgewichtung ohne Anregungsdämpfung) als Referenz und die Simulation unter Berücksichtigung des beschriebenen Dämpfungsparameters gegenübergestellt werden. Es ist zu erkennen, dass die alleinige Anwendung der neuen Filterfunktion nicht das gewünschte Ergebnis liefert. Die Schalldruckpegel wurden erheblich überschätzt, wobei die Ergebnisse noch über der Ausgangssituation lagen. Daraufhin wurde die Kontaktdruckgewichtung auch auf die neue Filterfunktion angewendet; das Resultat zeigt Bild 3.5-16.

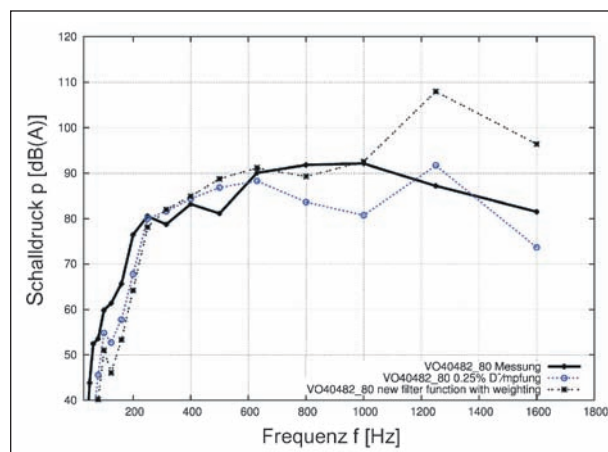


Bild 3.5-16: Darstellung der Wirkung von neuer Anregungsfunktion zusammen mit Kontaktdruckgewichtung auf die Schalldruckamplitude (zum Vergleich die Messung und die phänomenologisch basierte Anregungsdämpfung)

Hierbei konnte eine gute Übereinstimmung zwischen 200 Hz und 1 kHz erzielt werden, aber das ursprüngliche Ziel, die erhebliche Überschätzung im Bereich zwischen 1 kHz und 1,5 kHz zu beseitigen, konnte durch diese Maßnahmen noch nicht erreicht werden. Es bleibt jedoch herauszustellen, dass die neue Filterfunktion insgesamt eine erhebliche Verbesserung der Ergebnisse mit sich bringt.

Aus diesem Grund wurde untersucht, wie groß der Einfluss einer weiteren Verfeinerung des Strukturmodells und demzufolge auch des akustischen Modells ist. Dies war nicht ohne weiteres möglich, da seitens der Continental AG Anpassungen der verwendeten Software nötig waren (bzgl. der Dateiformate), um derart große Modelle zu berechnen. Schließlich wurde der Komplementärreifen mit einer Diskretisierung von 180 statt 120 Umfangsegmenten berechnet. Die Ergebnisse zeigt Bild 3.5-17.

Vergleicht man die Kurven mit und ohne neue Filterfunktion, jedoch beide mit feiner Diskretisierung, so sieht man, dass die neue Filterfunktion die Pegel senkt und somit dichter an die Messung bringt. Dieser Einfluss nimmt aber mit steigender Frequenz ab und verschwindet letztlich. Ein Vergleich zwischen der Diskretisierung mit 180 und mit 120 Umfangsegmenten, jedoch beide mit alter Filterfunktion, zeigt deutlich, dass eine qualitative und quantitative Verbesserung der Ergebnisse im hohen Frequenzbereich oberhalb 1 kHz nahezu ausschließlich durch eine feinere Vernetzung erzielt wird. Zudem kann beobachtet werden, dass das feinere Netz auch im unteren Frequenzbereich zwischen 300 Hz

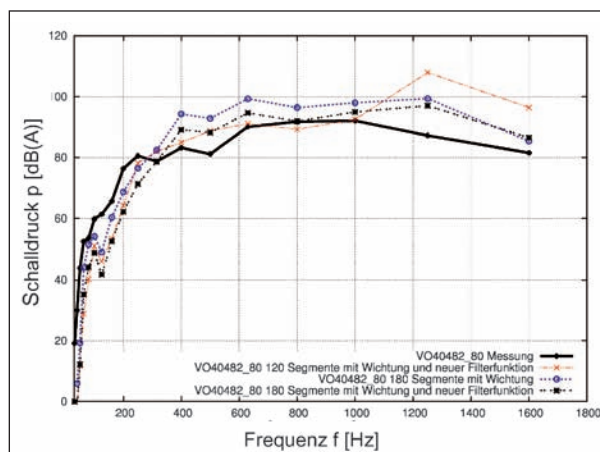


Bild 3.5-17: Darstellung des Einflusses der Strukturdiskretisierung auf den Schalldruckpegel (hier 1 m vor dem Einlauf)

	Schalldruckbreitbandpegel [dB(A)]
Messung	97,65
Referenz	110,144
Neue Filterfunktion	114,6
Neue Filterfunktion mit Wichtung	108,63
Feinere Diskretisierung	105,115
Feinere Diskretisierung, Wichtung, neue Filterfunktion	101,66

Tab. 3.5-1: Übersicht über die Wirkung verschiedener Maßnahmen zur Modellverbesserung auf den Breitbandpegel des Schalldrucks

und 700 Hz die Qualität der Ergebnisse erheblich verbessert. So wird nun der Kurvenverlauf der Messung in diesem Bereich sehr gut nachgebildet. Die Auswirkungen der einzelnen Maßnahmen auf den Breitbandpegel des Schalldrucks sind in Tabelle 3.5-1 zusammengefasst.

Es kann also geschlussfolgert werden, dass beide Maßnahmen zusammen, Verfeinerung der Diskretisierung und Anwendung der neuen Filterfunktion, zu sehr guten Ergebnissen führen. Es blieb jedoch zu untersuchen, ob der Diskretisierungseinfluss, der in Bild 3.5-18 noch mal hervorgehoben ist, allein aus der Akustik oder aus der Struktur herrührt, da bisher das Strukturflächen- und Akustiknetz konform waren. Dazu wurde dem Modell die Option hinzugefügt, dass Strukturrandbedingungen auf einem groben Reifennetz auf ein feineres, nicht konformes Akustiknetz übertragen werden können. Eine derartige Simulation wurde durchgeführt und das Ergebnis zeigt Bild 3.5-19. Es ist zu erkennen,

dass eine alleinige Erhöhung der Feinheit des Akustiknetzes faktisch keine Veränderung mit sich bringt. Die marginalen Unterschiede im hohen Frequenzbereich resultieren aus der Übertragung der

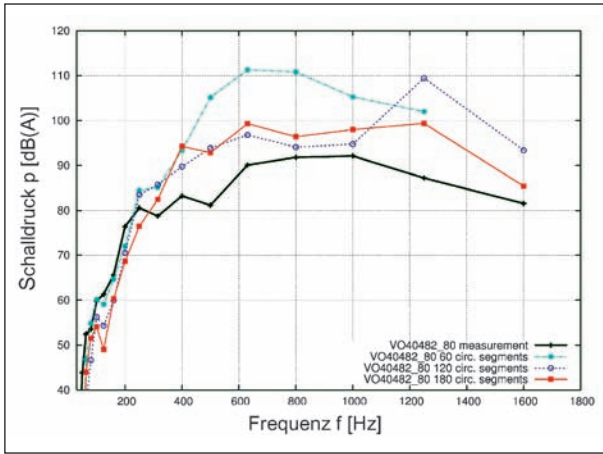


Bild 3.5-18: Schalldruckpegel 1 m vor dem Einlauf für den Komplementärreifen für verschiedene Diskretisierungen (60, 120, 180 Umfangssegmente) im Vergleich zur Messung

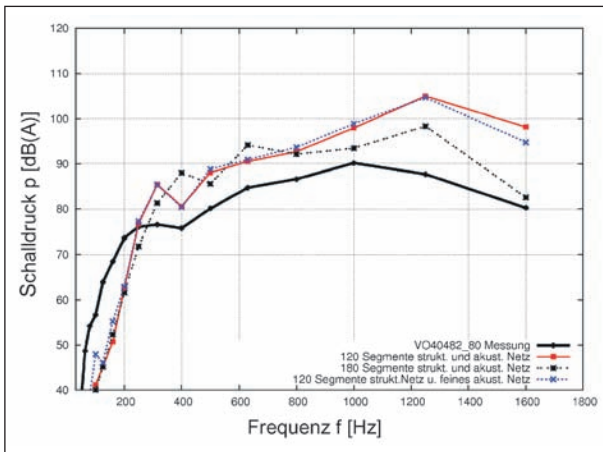


Bild 3.5-19: Vergleich der gemessenen und berechneten Schalldruckpegel mit unterschiedlichen Kombinationen der Netzfeinheit des Struktur-/Akustiknetzes

Strukturrandbedingungen auf das nichtkonforme Netz, da hierbei nichtlineare Gleichungen für das inverse Mapping gelöst werden müssen, was gewisse numerische Fehler mit sich bringt. Es kann hieraus geschlossen werden, dass die positive Veränderung des Simulationsergebnisses bei verfeinerter Diskretisierung in einer verbesserten Repräsentation der Strukturmechanik begründet ist.

Es bleibt jedoch zu erwähnen, dass die Erkenntnisse bezüglich der Diskretisierung erst nahe dem Projektende gewonnen wurden, weshalb diese in alle im Folgenden beschriebenen Berechnungen nicht eingeflossen sind.

3.5.4 Parameterstudien zur Reifenoptimierung

3.5.4.1 Ranking

Wie eingangs bereits beschrieben, war es ein Ziel des Projektes, ein gemessenes Ranking zwischen den in Tabelle 3.5-1 genannten Reifen mit der Simulation zu reproduzieren. Das Ergebnis der ersten Modellreihe für eine Mikrofonposition 1 m seitlich des Reifens und ohne Berücksichtigung von Anregungsdämpfung ($\zeta = 0$) ist in Tabelle 3.5-2 gezeigt. Es ist erkennbar, dass die Pegel insgesamt überschätzt werden, die Differenz zwischen Glatt- und Rauasphalt jedoch gut reproduziert wird. Ein Vergleich der verschiedenen Reifen untereinander wird nur bedingt richtig wiedergegeben, was angesichts der erlangten Erkenntnisse bezüglich des Einflusses der dynamischen Materialeigenschaften des Laufstreifens plausibel ist, denn es besitzen lediglich die Reifen VO31172 und VO39738 dasselbe Laufstreifenmaterial. Somit ist ein Vergleich in vertikaler Richtung von Tabelle 3.5-3 ebenfalls nur für dieses Reifenpaar zulässig. Da sich diese beiden Reifen konstruktiv aber nur durch die Dicke des Laufstreifens unterscheiden, sind die Differenzen

Reifen ID	Messung dB(A)		Simulation dB(A)	
	Glattasphalt	Rauasphalt	Glattasphalt	Rauasphalt
VO27517	84,2	95,8	97,3	114,1
VO40482	84,9	93,8	96,8	111,0
VO42177	84,0	93,9	95,6	109,7
VO42179	84,6	93,2	97,4	111,9
VO27683	83,2	93,2	89,1	103,1
VO31172	84,7	94,7	98,4	112,9
VO39738	84,6	94,5	98,0	112,5

Tab. 3.5-2: Vergleich der gemessenen und simulierten Breitbandpegel und einer Mikrofonposition 1 m lateral zum Reifen

sehr klein. Deshalb ist es umso bemerkenswerter, dass hier der Trend korrekt wiedergegeben wird. Es bleibt jedoch zu bemerken, dass bereits die Messungenauigkeit 0,5 dB beträgt und dass die aus den Simulationen gewonnenen räumlichen Gradienten der Schalldruckamplitude eine Größe haben, bei der eine Abweichung in der Position des Mikrofons von weniger als 0,01 m eine Veränderung der Schalldruckamplitude in der Größenordnung der gemessenen Differenz zur Folge hat.

Trotzdem sollen die Simulationsergebnisse genutzt werden, um Wirkungsketten und Möglichkeiten des Berechnungsmodells aufzuzeigen. Hierzu sei exemplarisch für die Reifen VO42177 und VO42179 der modale Abstrahlgrad bestimmt. Dieser integrale Parameter setzt die abgegebene Schalleistung P_{out} ins Verhältnis zur in den Strahler gesteckten Leistung P_{in} und bewertet somit die Wirksamkeit des Strahlers. Der Abstrahlgrad ist definiert als

$$\sigma = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\frac{1}{2} \cdot \Re \left\{ \int_S p \cdot v^{conj} dS \right\}}{\rho c S v^2},$$

wobei S die Fläche des Strahlers ist. Diese Größe wurde für jeden Strukturmode ausgewertet, wodurch bewertet werden kann, wie stark die akustische Wirkung dieses Modes ist. Die Ergebnisse sind in Bild 3.5-20 und Bild 3.5-21 zu sehen. Bild 3.5-22 zeigt den Vergleich beider Reifen. Es ist deutlich ein unterschiedliches Verhalten zu erkennen. Auch wenn Formen der Strukturmoden ähnlich sind, so bewirkt eine Frequenzverschiebung, z. B. bedingt durch veränderte Steifigkeiten, ein unter Umständen erheblich

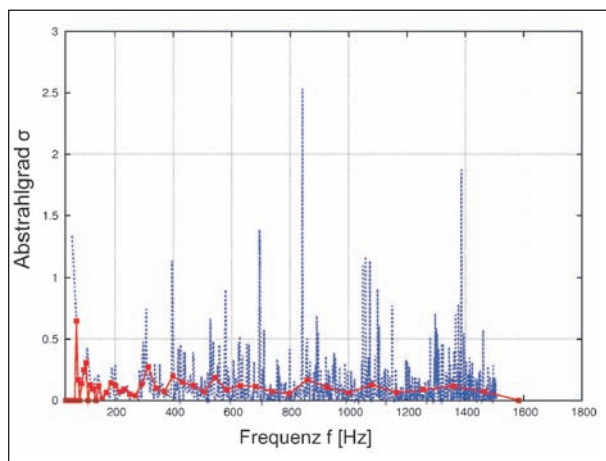


Bild 3.5-20: Modaler Abstrahlgrad für den Reifen VO42177 (blau) und über Drittel-Terzbänder gemittelte Werte (rot)

verändertes Verhalten in Bezug auf die Interaktion mit dem akustischen System.

Dies wird unter anderem deutlich, wenn man den Normalanteil der Strukturmoden betrachtet, da nur dieser Anteil einen Beitrag zur Anregung des akustischen Fluids leistet:

$$\frac{\partial p}{\partial \mathbf{n}} = -i\omega \rho v_n.$$

Dies wurde wiederum für beide betrachtete Reifen getan; Bild 3.5-23 sowie Bild 3.5-24 zeigen jeweils das Verhältnis der Quadrate der Normalschnellen zum Betragsquadrat der Gesamtoberflächenschnelle als Maß dafür, wie groß der Anteil der kinetischen Energie der schallabstrahlenden Strukturoberfläche ist, der als akustische Anregung wirksam ist.

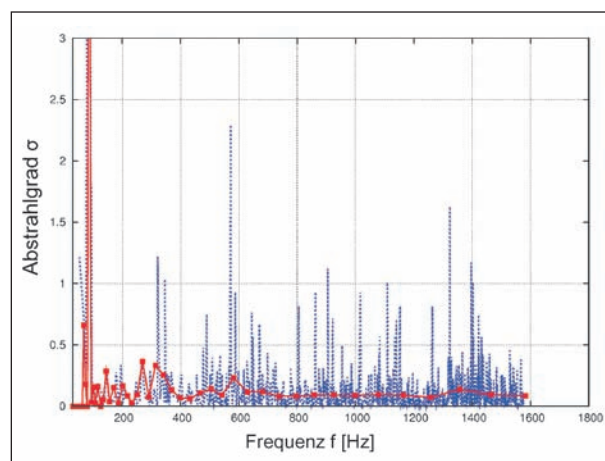


Bild 3.5-21: Modaler Abstrahlgrad für den Reifen VO42179 (blau) und über Drittel-Terzbänder gemittelte Werte (rot)

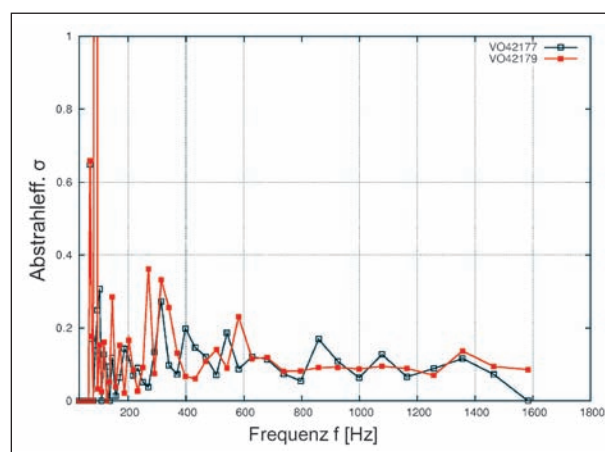


Bild 3.5-22: Vergleich des über Drittel-Terzbänder gemittelten Abstrahlgrades von Reifen VO42177 und VO42179

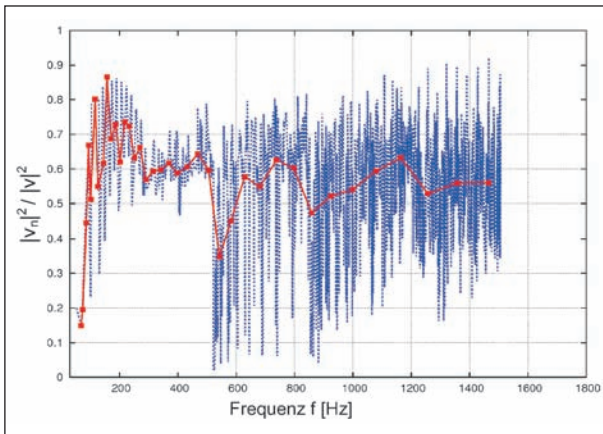


Bild 3.5-23: Modales Verhältnis der Quadrate der Normalschnellen zur Gesamtschnelle für den Reifen VO42177 (blau) und über Drittel-Terzbänder gemittelte Werte (rot)

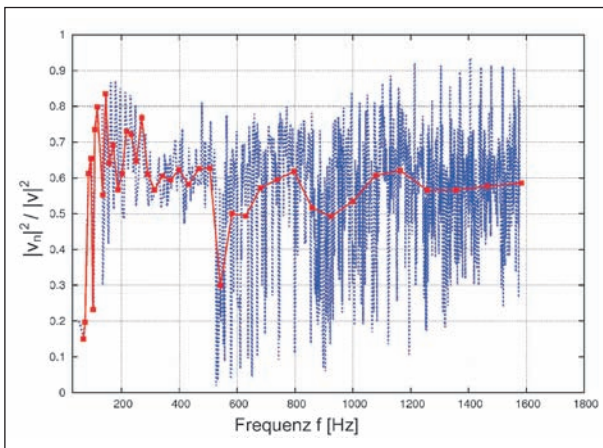


Bild 3.5-24: Modales Verhältnis der Quadrate der Normalschnellen zur Gesamtschnelle für den Reifen VO42179 (blau) und über Drittel-Terzbänder gemittelte Werte (rot)

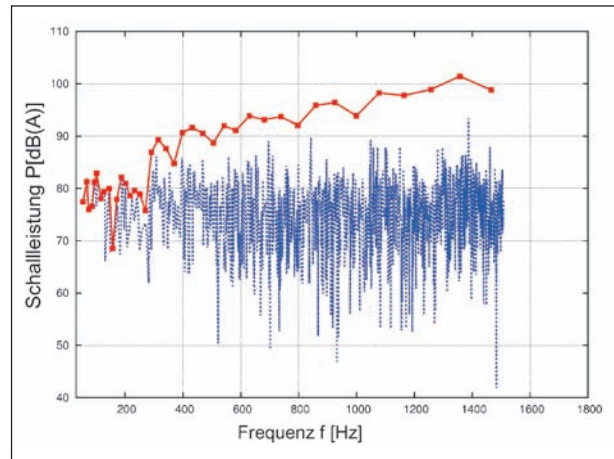


Bild 3.5-25: Schalleistungsspektrum der Strukturmoden für den Reifen VO42177 (Schmalband-blau, Drittelterzen – rot)

	841,082 Hz	841,97 Hz	842,415 Hz
Abstrahleffektivität σ	0,760226	2,53599	0,165686
Normalschnellenverhältnis $ v_n ^2 / v ^2$	0,816	0,569716	0,624295
Schalleistung P	87,213	89,722	81,3896

Tab. 3.5-3: Gegenüberstellung von Schalleistungen benachbarter Moden sowie entsprechend verschiedener Bewertungsgrößen für den Reifen VO42177

Vergleicht man nun diese beiden Größen mit dem modalen akustischen Leistungsspektrum (siehe Bild 3.5-25), so erkennt man, dass eine alleinige Betrachtung der Normalschnellen als Maß für eine akustische Bewertung unzureichend ist und immer das Gesamtsystem zur Beurteilung herangezogen werden muss. Ein Beispiel zeigt Tabelle 3.5-4, in der beide Bewertungsgrößen sowie die modale Schalleistung für ein Mode des Reifens VO42177 mit einer sehr großen Abstrahleffektivität sowie zwei benachbarte Modes gegenübergestellt sind.

Es ist erkennbar, dass der Strukturmode bei 841,97 Hz den geringsten Energieeintrag in das akustische System liefert, im Vergleich jedoch die größte akustische Wirkleistung erzeugt. Dies ist in der hier auftretenden hohen Abstrahleffektivität zu begründen. Somit zeigt sich, dass zur akustischen Bewertung des Systems die gesamte Wirkungsket-

te berücksichtigt werden muss und die modale Abstrahleffektivität ein geeignetes Bewertungsmaß darstellt, welches die gezielte Reifenoptimierung unterstützen kann. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass zur Erstellung dieses Bewertungsmaßes das akustische System für jeden Strukturmode berechnet werden muss, in diesem Fall 1.100-mal, wodurch die hohe Recheneffizienz des Modells noch stärker ins Gewicht fällt.

3.5.4.2 Profilierte Reifen

Neben den bisher beschriebenen Parameteruntersuchungen und dem Ranking wurden Simulationen durchgeführt, die den Einfluss des Profils herausstellen sollen. Hierbei wurden Längs- und Querprofile getrennt betrachtet.

Untersuchung von Reifen mit Längsprofilen

Diese Art von Profil, wie sie in Bild 3.5-26 zu sehen ist, konnte direkt mit den bestehenden Methoden untersucht werden, da die für die ALE-Betrachtungsweise [10] nötige Rotationssymmetrie erhalten bleibt. Es wurde jeweils Reifen mit 31 mm, 15 mm, 8 mm und 3 mm Umfangsrille bei einer

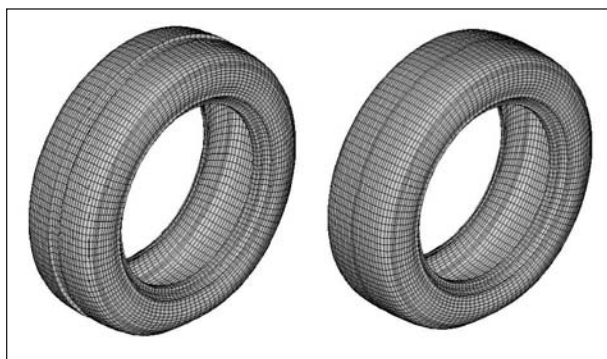


Bild 3.5-26: Zwei Beispiele für Strukturmodelle von untersuchten Reifen mit Umfangsrille (31 mm, 3 mm)

Rollgeschwindigkeit von 80 km/h akustisch vermessen und simuliert.

Die Ergebnisse des Einflusses verschiedener Rillenbreiten sind in Bild 3.5-29 dargestellt. Die Übereinstimmungen sind als sehr gut zu bewerten, insbesondere wenn berücksichtigt wird, dass die gemessenen Differenzen gegenüber der Messfehlertoleranz von 0,5 dB klein sind. Zudem berücksichtigt das akustische Modell beispielsweise nicht die Textur, welche die Geometrie und somit die akustischen Eigenschaften des durch die Rille zwischen Reifen und Fahrbahn gebildeten Volumens beeinflusst.

Des Weiteren fand eine Untersuchung des akustischen Effektes der Rille statt. Hierbei wurden die strukturdynamischen Randbedingungen des Rillenreifens auf das Rechengelände des Fluids ohne Rille übertragen und mit den Ergebnissen verglichen, die sich bei einer akustischen Berücksichtigung der Rille ergeben. Dies ist eine einzigartige Möglichkeit, die verschiedenen Ursachen des akustisch veränderten Gesamtverhaltens eines Rillenreifens zu untersuchen. Im Rahmen von Messungen kann nur versucht werden, beispielsweise Schaum in die Rille einzufügen, um diese akustisch „auszuschalten“. Hierbei kann jedoch nicht verhindert werden, dass die Dynamik des Reifens ebenfalls verändert wird. Diese Nachteile können erstmalig durch die Verwendung des neuen Berechnungsmodells überwunden werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung für den Reifen mit 15 mm Rillenbreite sind exemplarisch in Bild 3.5-27 und Bild 3.5-28 dargestellt. Bild 3.5-27 zeigt dabei die Differenz der Schalldrücke zwischen der Lösung des akustischen Problems unter Berücksichtigung der Strukturrandbedingungen mit Rille, jedoch ohne akustische Wirkung der Rille und der Lösung des Ausgangsmodells ohne jegliche Berücksichtigung der Rille.

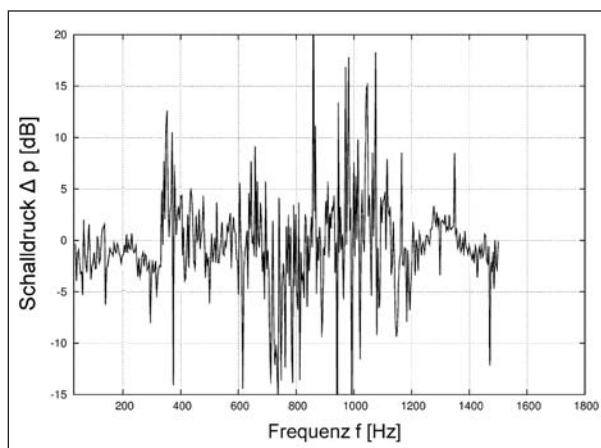


Bild 3.5-27: Auswirkung des durch die Profilirille veränderten strukturdynamischen Verhaltens auf das akustische System

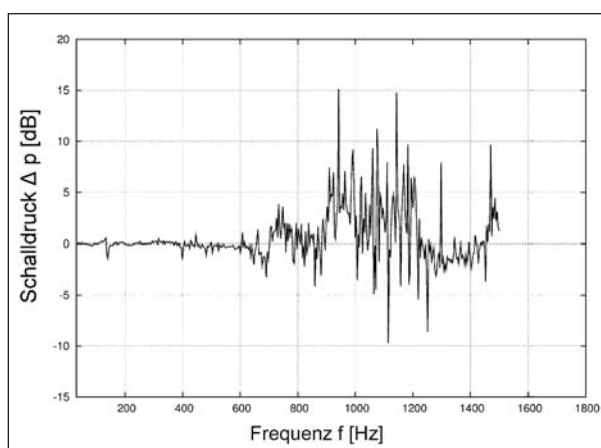


Bild 3.5-28: Auswirkung des durch die Profilirille veränderten akustischen Verhaltens des Systems

Somit spiegelt diese Darstellung die rein strukturdynamische Wirkung der Rille auf das akustische Verhalten wider. Bild 3.5-28 stellt hingegen die akustische Wirkung der Rille dar, indem die Differenz zwischen den Lösungen mit und ohne akustische Berücksichtigung der Rille, jedoch in beiden Fällen mit den Strukturrandbedingungen des Rillenreifens, abgebildet ist. Beide Diagramme sind derart interpretierbar, dass positive Werte eine Erhöhung des Schallpegels durch den jeweiligen Effekt (strukturdynamische/akustische Rillenwirkung) bedeuten.

Die Untersuchung zeigte, dass im Frequenzbereich bis ca. 700 Hz die veränderten akustischen Eigenschaften des Rillenreifens im Wesentlichen durch die veränderte Eigendynamik verursacht werden. Darüber hinaus setzt merklich eine rein akustische Wirkung der Rille ein, wobei sich im Frequenzbereich um 1.000 Hz die Effekte mit gleichem Vorzeichen addieren. Es wurde ebenfalls ermittelt, dass

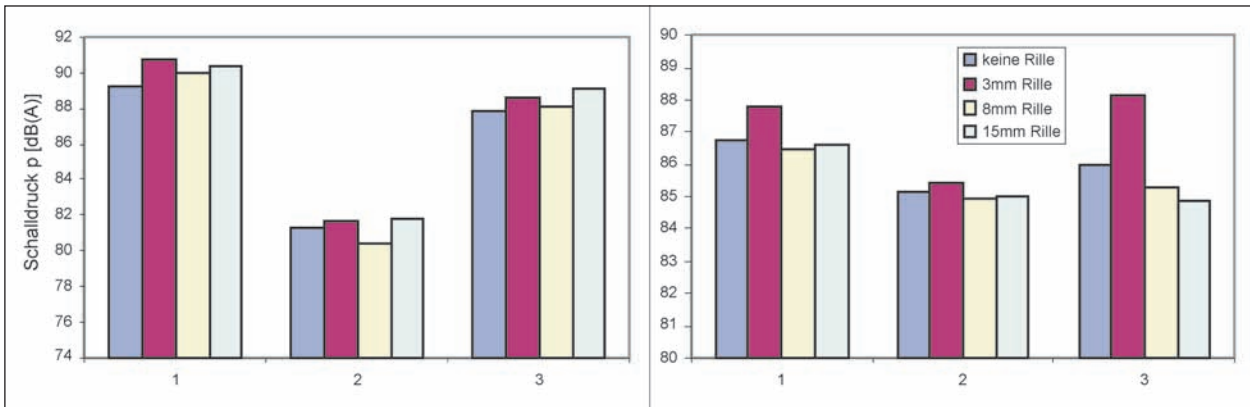


Bild 3.5-29: Vergleich der gemessenen (links) und simulierten Breitbandpegel (rechts) für drei verschiedene Mikrofonpositionen (1-1 m vorm Einlauf, 2-1 m in lateraler Richtung, 3-1 m im Auslauf) und verschiedene Rillenbreiten

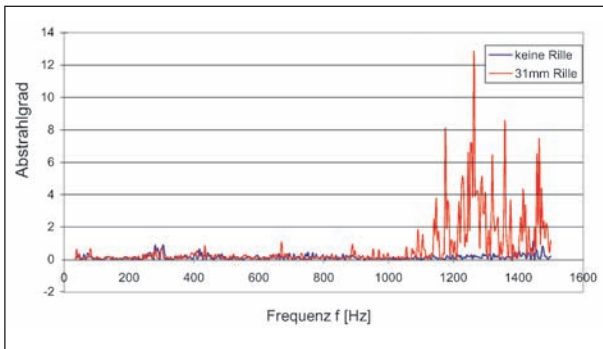


Bild 3.5-30: Abstrahleffektivitäten für Komplementärreifen ohne und mit 31 mm Umfangsrille

die akustische Rillenwirkung hauptsächlich im Einlauf und Auslauf registriert wird, also eine distinkte Richtcharakteristik aufweist.

Die Ergebnisse für den Reifen mit 31 mm Umfangsrille sind in obiger Diskussion nicht enthalten, da dabei numerische Probleme auftraten. Wie in Bild 3.5-33 zu sehen ist, waren in diesem Fall ab 1.100 Hz zu große Schalldrücke und dem entsprechend zu große Abstrahlgrade zu beobachten. Hierbei wurde vermutet, dass es sich um ein Resonanzphänomen der durch die Straße und Rille gebildeten Kavität handelt. Aus diesem Grund wurden die Eigenfrequenzen des Systems durch Lösen des quadratischen Eigenwertproblems nach vorangegangener Modellreduktion mittels des Second Order Arnoldi Algorithm (SOAR) bestimmt. Hierbei wurde für die Modellreduktion der Entwicklungspunkt 1.200 Hz gewählt und die Dimension des reduzierten Raumes auf 1.000 begrenzt. Daraufhin wurden 1.000 Eigenfrequenzen berechnet. Es konnte beobachtet werden, dass bei dem Reifen mit 31 mm Umfangsrille die Eigenfrequenzen sehr dicht bei den Anregungsfrequenzen liegen, was zu sehr großer Abstrahlung führt. Beispielhaft seien

Anregungsfrequenz [Hz]	Eigenfreq. ohne Rille [Hz]	Eigenfreq. 8 mm Rille [Hz]	Eigenfreq. 31 mm Rille [Hz]
1263.42	1242.2	1250.8	1245.5
	1257.1	1267	1265.6
	1272.8	1272.2	1274.6

Tab. 3.5-4: Eigenfrequenzen verschiedener Reifen im Bereich einer spezifischen Anregungsfrequenz

die Eigenfrequenzen genannt, die um die Anregungsfrequenz von 1.263,42 Hz liegen (siehe Tabelle 3.5-5). Diese Anregung führt bei dem 31-mm-Rillenreifen zu einem Abstrahlgrad von 12,84, während der Reifen mit 8 mm Umfangsrille lediglich den Wert von 0,22 aufweist.

Dies kann noch nicht als die das Phänomen erschließende Untersuchung des Problems angesehen werden, ist jedoch ein Hinweis darauf, welcher Natur die Probleme sein könnten, die bei dieser Art von Berechnungen auftreten. Weitere Untersuchungen wurden an dieser Stelle noch nicht unternommen, da zum einen dieses Problem bei einer Konfiguration auftrat, die wenig praxisrelevant ist, und zum anderen diese Fragestellung nicht Gegenstand des Projektes war.

Untersuchung von Reifen mit Querprofilen

Diese Art des Profils ist mit der bisherigen Methode nicht direkt behandelbar, da die Struktur mit Querprofil nicht rotationssymmetrisch ist. Um dieses Problem zu umgehen, wird das Profil in der Anregungsfunktion berücksichtigt. Für detailliertere Beschreibungen der Vorgehensweise sei auf den Bericht des Projektpartners Universität Hannover verwiesen.

Zum Nachweis, dass dieses Vorgehen möglich ist, wurden akustische Berechnungen durchgeführt, bei denen ein Glattreifen mit der Anregungsfunktion beaufschlagt wurde, die der eines einfachen Querprofils mit 66 bzw. 132 Querstollen auf dem Umfang entspricht. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Anregung lediglich aus dem Profil besteht und keine Fahrbahn-Textur berücksichtigt wurde, was anschaulich bedeutet, dass der Glattreifen über eine Fahrbahn fährt, die das Profil eingepägt hat. Hierbei stellt sich, ebenso wie bei der normalen Textur, die Frage, wie weit diese „Profiltextrur“ in den Reifen eindringt. Hierfür stehen keine Messdaten zur Verfügung, weshalb in einem ersten Versuch 0,2 mm angenommen wurden. Der Vergleich zwischen dieser Rechnung und der entsprechenden Messung (Bild 3.5-31) zeigt erhebliche Unterschiede, wobei die Simulation die Messung unterschätzt. Zum einen ist dies dadurch zu erklären, dass das gemessene Signal auch Anregungsanteile aus dem Tommeltextrur (Safty-Walk) enthält. Dies blieb in der Simulation, wie bereits erwähnt, unberücksichtigt. Der ausgeprägte Peak bei 800 Hz wird sehr gut getroffen, wenn gleich die Amplitude auch unterschätzt wird. Dies hängt mit der erwähnten Ungewissheit der Amplitude der Anregung zusammen, weshalb exemplarisch eine zweite Rechnung mit 0,5 mm Profileindringtiefe durchgeführt wurde. Dieses Ergebnis liegt deutlich näher an der Messung. Im Bereich über 1 kHz ist die Differenz zwischen Messung und Rechnung sehr viel geringer und die qualitative Übereinstimmung unzureichend. Dies hängt mit dem bereits beschriebenen Diskretisierungsfehler zusammen, da auch bei dieser Simulation Reifenmodelle mit 120 Umfangssegmenten verwendet wurden.

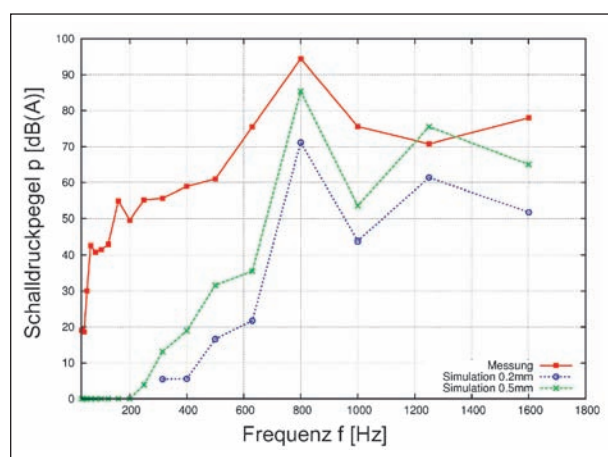


Bild 3.5-31: Vergleich gemessener und simulierter Schalldruckpegel für einen querprofilierten Reifen mit 66 Stollen auf dem Umfang

Des Weiteren wurde festgestellt, dass von den 424 im Anregungsspektrum enthaltenen Frequenzen nur etwa jede neunte einen tatsächlichen akustischen Beitrag leistet. Bei den weiteren war die Anregungsamplitude derart klein, dass die akustische Wirkung vernachlässigbar war. Dies bedeutet dass an dieser Stelle Potenzial zu einer deutlichen Minderung des numerischen Aufwandes seitens der akustischen Berechnungen steckt, z. B. durch eine entsprechende Filterung der Eingangsdaten. Dieser Idee wurde jedoch nicht weiter nachgegangen. Bis hierher wurde bereits nachgewiesen, dass die Methoden auch auf nicht rotationssymmetrische Profilgeometrien angewendet werden können.

3.5.4.3 Optimierter Glattreifen

Die Tauglichkeit der Berechnungsmethoden für die zielgerichtete Reifenoptimierung sollte in einem so genannten „blind ranking“ unter Beweis gestellt werden. Dazu wurde bei der Continental AG auf Basis der bisher gewonnenen Erkenntnisse ein bezüglich des Abrollgeräuschs optimierter Glattreifen definiert, gebaut, auf dem Prüfstand vermessen und verglichen. Die Reifenmodelle wurden diesem Teilprojekt ohne Zuordnung übergeben. Die akustischen Berechnungen wurden mangels besserer Informationen ohne Anregungsdämpfung durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.5-5 dargestellt.

Es ist erkennbar, dass die simulierten Pegel erheblich über den gemessenen liegen, was aber wiederum durch die vernachlässigte Anregungsdämpfung erklärt wird. Betrachtet man die Differenzen der beiden Reifenkombinationen, dann unterschätzt die Simulation zwar die gemessenen Werte, aber der Trend wird richtig prognostiziert. Ein Grund für die unterschiedlichen Differenzen wird vermutlich wiederum in der Anregung liegen,

Messung	p [dB(A)] glatt	(Seite 3 m) rau
BasisET054707	63.5	85.8
VarET052880	61.0	81.5
Basis-Var	2.5	4.3
Simulation		
OPT A	81.9	96.6
OPT B	81.8	95.7
OPT A-OPTB	0.2	0.9

Tab. 3.5-5: Vergleich der Breitbandpegel von Messung und Simulation für verschiedene Reifenvarianten und deren Differenz (grau hinterlegt)

die mangels der Erfassung der laufstreifenspezifischen viskoelastischen Materialeigenschaften nicht genau genug erfasst wurde.

3.5.4.4 Lkw-Reifen

Zu diesem Projektteil ist anzumerken, dass aufgrund von Problemen seitens der strukturdynamischen Berechnungen erst Ende August 2008 begonnen werden konnte. Bezüglich der Ursachen dieser Verzögerung sei auf die Berichte der Partner aus Hannover verwiesen. Aufgrund der während des Projektzeitraums aufgestockten Rechnerkapazität konnten die Arbeiten jedoch trotzdem fristgerecht abgeschlossen werden.

Insgesamt wurden drei verschiedene Modelle berechnet und damit insgesamt fünf verschiedene Simulationen durchgeführt, ein Lenkreifen jeweils mit Längsprofil und profillos sowie ein Antriebsreifen ebenfalls profillos unter drei verschiedenen Anregungssituationen bei jeweils 80 km/h (Glattasphalt, Querprofilanregung mit 2 und 5 mm Eindringtiefe). Alle Simulationen wurden ohne Anregungsdämpfung oder Ähnlichem gerechnet, da hierfür keine Informationen vorhanden waren. Messdaten der Schalldrücke standen nur für den längsprofilierten Lenkreifen zur Verfügung, weshalb nur für diese Konfiguration quantitative Vergleiche möglich waren.

Allgemein ist zu bemerken, dass die entwickelten Methoden auf diese Problemstellung direkt übertragbar waren. Die erhöhte Modellgröße führt jedoch dazu, dass die im Rahmen des Projektes erzielten Steigerungen der numerischen Effizienz noch stärker in den Vordergrund rückten. Eine Herausforderung stellte dabei die Datenmenge dar. So wurden seitens der Universität Hannover ca. 15.000 Eigenmoden bis zu 1.500 Hz berechnet, welche eine Datenmenge von ca. 12 GB darstellen. Dieses Datenvolumen musste zum einen übertragen werden und zum anderen für die Berechnung der akustischen Randbedingungen verarbeitet werden. Es sei angemerkt, dass alle Eigenmoden für die Berechnung jeder Anregungsfrequenz verwendet werden, was entweder erhebliche Anforderungen an den Hauptspeicher stellt (wenn alle Moden darin vorgehalten werden) oder die Randbedingungsgenerierung stark verlangsamt, falls jedes Mal ein erneutes Einlesen nötig ist. Darüber hinaus ist der numerische Aufwand bei den akustischen Berechnungen nicht in gleichem Maße gestiegen wie auf der strukturdynamischen Seite und die Berechnungen konnten in ähnlicher Berechnungszeit

durchgeführt werden wie bei Pkw-Reifen (Pkw-Reifen: ca. 500.000 dof, Lkw-Reifen: ca. 655.000 dof).

Schwieriger war die Erstellung des akustischen FE-Netzes im Falle der längsprofilierten Reifen. Durch die hohen Achslasten kommt es zu starken Deformationen im Straßen-Fahrbahn-Kontakt. Da im Strukturmodell zur Berechnung des stationären Rollvorgangs kein Selbstkontakt berücksichtigt wurde, kam es zu Selbstdurchdringungen von Elementen (siehe Bild 3.5-32). Die entstandene Topologie des Oberflächennetzes ermöglichte keine direkte, darauf aufsetzende Erstellung des akustischen Netzes, was nur durch zeitintensive Handarbeit behoben werden konnte.

Die Ergebnisse für den längsprofilierten Lenkreifen sind in Bild 3.5-33 und Bild 3.5-34 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Schallpegel bis 400 Hz in der Simulation unterschätzt werden. Die Charakteristik der Kurven stimmt jedoch. Darüber hinaus überschätzt die Rechnung die gemessenen Werte deutlich. Hierfür sind zwei mögliche Ursachen zu nennen. Zum einen wurde bei der Anregung der Lkw-Reifen davon ausgegangen, dass durch die hohe Achslast und somit hohen Kontaktdruck das Laufstreifenmaterial vollständig in die Fahrbahntextur eindringt. Deshalb wurde keine Filterfunktion zur Berechnung einer Einhüllenden verwendet, sondern das ursprüngliche Texturspektrum zur Anregung genutzt.

Dadurch ergeben sich unter anderem erhöhte Anregungsamplituden, die sich natürlich auf die akus-

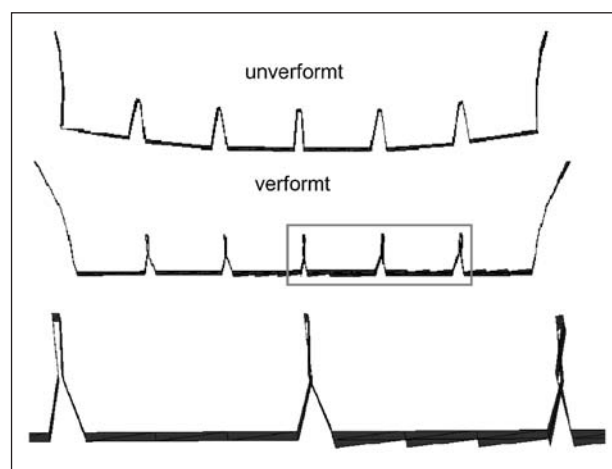


Bild 3.5-32: Schnitt durch das Strukturmodell des Lkw-Lenkreifens mit Längsprofil. Oben: unverformter Profilbereich, Mitte: Schnitt durch das Profil in der Aufstandsfläche, unten: Vergrößerung des im mittleren Bild hervorgehobenen Bereichs mit Elementen mit Selbstdurchdringung

tische Antwort des Systems auswirken. Da für die Lkw-Reifen keine Folien-Überroll-Messungen zur Verfügung standen, konnte die getroffene Annahme nicht verifiziert werden. Auch wurde in diesem Zusammenhang, wie bereits erwähnt, die viskoelastische Laufstreifenmaterialeigenschaft nicht berücksichtigt. Als zweite Ursache für die überhöhten Schalldruckpegel wird derselbe Grund wie schon vermutet, nämlich eine zu grobe Diskretisierung der Reifenstruktur, dafür spricht zum einen das Ausmaß der Überhöhung als auch der ausgeprägte Peak bei 800 Hz.

Trotz der beschriebenen quantitativen Abweichung muss jedoch herausgestellt werden, dass der qualitative Vergleich der einzelnen Messpunkte durch das Modell richtig wiedergegeben wird. So sind im Bereich zwischen 800 Hz und 1.250 Hz die Schalldrücke im Ein- und Auslauf (FP1 und FP3)

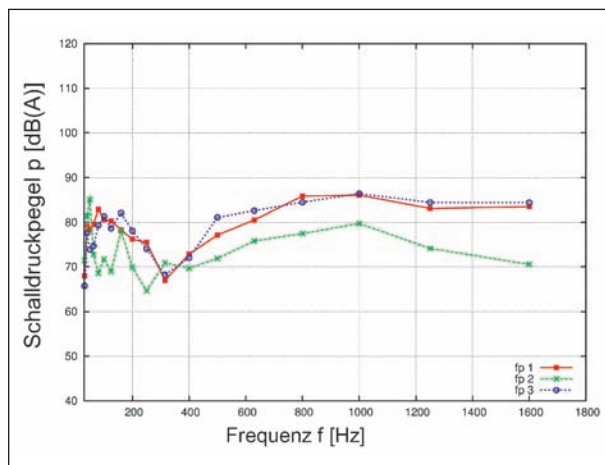


Bild 3.5-33: Gemessene Terzen des Schalldrucks an verschiedenen Mikrofonpositionen für den Lenkreifen mit Umfangsrillen bei 80 km/h auf Glattasphalt

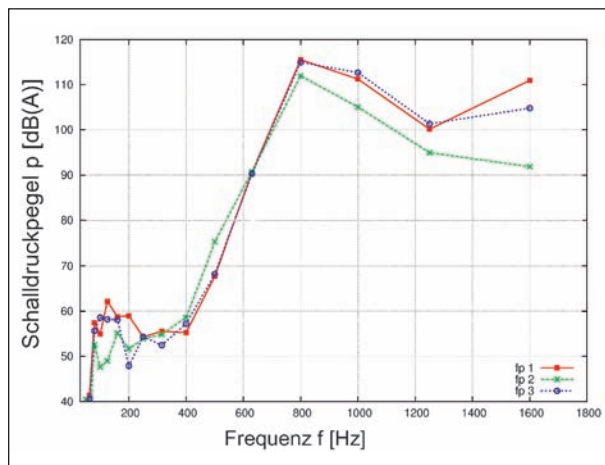


Bild 3.5-34: Simulierte Terzen des Schalldrucks an verschiedenen Mikrofonpositionen für den Lenkreifen mit Umfangsrillen bei 80 km/h auf Glattasphalt

nahezu identisch und der laterale Messpunkt weist über diesen Bereich einen nahezu konstant verminderten Schalldruck auf (parallele Kurven). Ab 1.250 Hz tritt eine zunehmende Spreizung der Schalldrücke zwischen den Messpunkten in Fahrtrichtung und 90° dazu versetzt auf. Diese Charakteristik ist sowohl in der Messung als auch in der Simulation zu erkennen.

Wie eingangs bereits erwähnt wurde das Konzept der Querprofilanregung auch auf einen Lkw-Antriebsreifen angewendet. Hierbei wurden zwei Profileindringtiefen (2 mm, 5 mm) verwendet, jedoch standen hierzu keine Messdaten zur Verfügung. Die Ergebnisse sind exemplarisch für die Mikrofonposition FP1 (1 m vor dem Einlauf) in Bild 3.5-35 zu sehen.

Die Berechnungen sind deshalb von besonderem Interesse, da die realistische Profilgeometrie durch die gegenüber dem Pkw-Reifen größere Dimension eine kleinere grundharmonische Frequenz (hier ca. 345 Hz bei 80 km/h) erzeugt und somit in dem betrachteten Frequenzbereich bis 1.500 Hz auch die ersten drei Harmonischen beobachtet werden können. Die Auswirkung der unterschiedlichen Eindringtiefen des Profils sind in Bild 3.5-36 dargestellt, in dem die Differenz der Schalldrücke über der Frequenz abgebildet ist.

Es ist erkennbar, dass eine größere Eindringtiefe im Mittel auch eine Anhebung der Schalldruckpegel zur Folge hat (Breitbandpegeldifferenz ca. 8 dB), aber das Anregungsspektrum derart verändert wird, dass die akustische Systemantwort sich teilweise auch qualitativ erheblich unterscheidet.

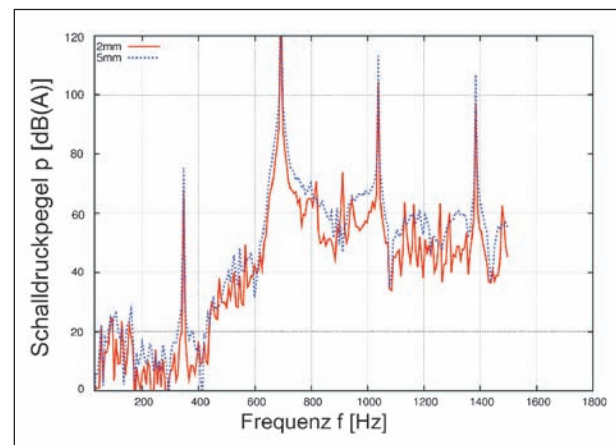


Bild 3.5-35: Schmalbandspektrum des Schalldrucks 1 m vor dem Einlauf für die Simulation eines Lkw-Antriebsreifens mit Querprofilanregung unterschiedlicher Eindringtiefen (2 mm – rot/5 mm – blau)

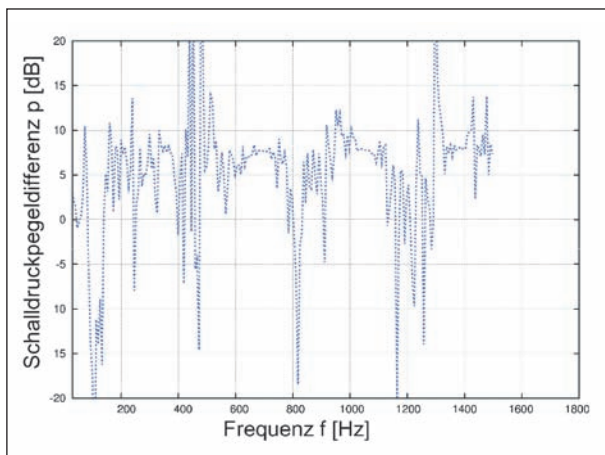


Bild 3.5-36: Differenz der Schalldruckpegel zwischen der Simulation von 5 mm und 2 mm Eindringtiefe des Querprofils eines Lkw-Antriebsreifens am Feldpunkt 1 m vor dem Einlauf

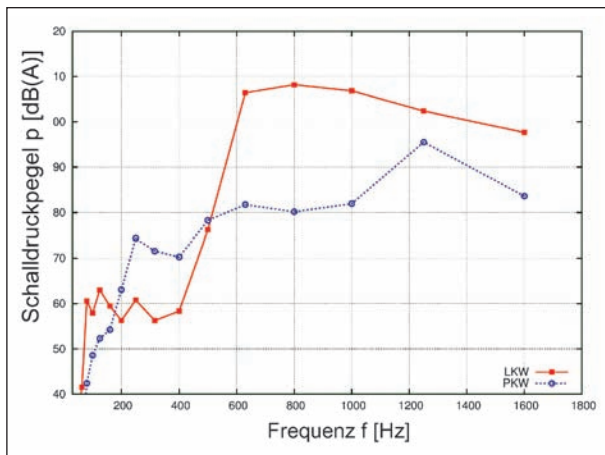


Bild 3.5-37: Vergleich der auf Glattasphalt erzeugten Schalldruckpegel eines Lkw- und eines Pkw-Reifens (1 m vor dem Einlauf)

Die berechneten Schalldruckpegel für den Antriebsreifen mit dem gleichen strukturellen Aufbau, jedoch mit der Anregung des Glattasphalts, sind in Bild 3.5-37 dargestellt. Messdaten lagen hierfür ebenfalls nicht vor, die Abbildung zeigt aber zum Vergleich die entsprechende Kurve eines Pkw-Reifens (Komplementärreifen). Man sieht, dass im unteren Frequenzbereich der Pkw-Reifen höhere Schalldruckamplituden erzeugt, jedoch hat der Lkw-Reifen in dem für das menschliche Hörempfinden kritischen Bereich zwischen 800 Hz und 1.200 Hz sein Maximum und ist dort erheblich lauter.

3.5.4.5 Weitere Anwendungen

In diesem Kapitel werden Anwendungsmöglichkeiten des akustischen Simulationsmodells gezeigt, die über die Optimierung des Reifens hinausgehen.

Der Schwerpunkt liegt dabei auf der prinzipiellen Anwendbarkeit und weniger auf der Durchführung detaillierter Studien.

Untersuchung von schallabsorbierenden Radkästen

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde ein Modell entwickelt, das es zulässt, die Wirksamkeit von schallabsorbierenden Radkastenauskleidungen zu überprüfen. Für dieses Modell galt es, spezielle infinite Elemente mit zwei Quellpunkten zu implementieren, um die Geometrie des Berechnungsgebietes (siehe Bild 3.5-38 (rechts)) nachbilden zu können. Auf den verschiedenen Rändern des Berechnungsgebietes wurden unterschiedliche Absorptionskoeffizienten aufgebracht (siehe Bild 3.5-38 (links)), welche frequenzunabhängig waren. Die in Bild 3.5-38 mit Blau markierten Gebiete (Fahrzeugunterboden, Kotflügel und Straße) wurden als schallhart angenommen und im grünen Bereich (Radkasten) wurde der Absorptionskoeffizient zwischen 0,0 und 0,7 variiert. Es wurde dann ein kompletter Simulationsdurchlauf, d. h. für alle Anregungsfrequenzen, mit einem konstanten Parametersatz durchgeführt. Dies entsprach nicht der Simulation unter Berücksichtigung der Wirkung eines realen Absorptionsmaterials, welches frequenzabhängige Absorptionseigenschaften hätte (wobei dies mit dem Modell möglich wäre), sondern der Identifizierung der frequenzabhängigen Wirksamkeit absorbierender Randbedingungen gewissen Ausmaßes im Bereich des Radkastens auf die Schallabstrahlungseigenschaften des Gesamtsystems.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen, dass die Wirksamkeit absorbierender Radkastenauskleidungen in bestimmten Bereichen mehr und in anderen weniger stark ausgeprägt ist. So bewirkt beispielsweise eine Erhöhung des Absorptionskoeffizienten um 1.000 Hz die größte Reduktion des emittierten Schalldruckpegels. Dieses Verhalten kann durch das modale Verhalten der Kavität des Radkastens erklärt werden. In Bereichen hoher Wirksamkeit treten große Schallamplituden im Bereich des Radkastens auf, während im Bereich geringer Sensitivität gegenüber der Radkastenabsorption die größten Amplituden lokal im Bereich der Radaufstandsfläche festzustellen sind (siehe Bild 3.5-40). Die Untersuchungen zeigen, dass das Modell dazu verwendet werden kann, das Schallminderungspotenzial solcher Maßnahmen abzuschätzen und der

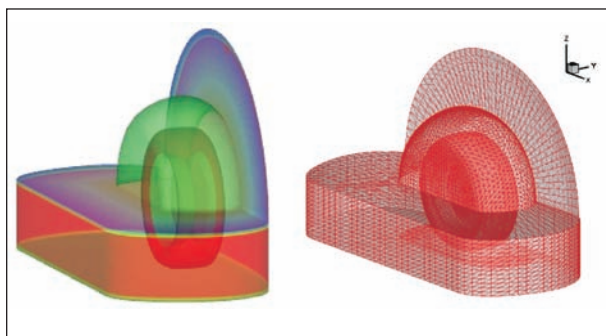


Bild 3.5-38: Akustisches Modell eines Reifens mit Radkasten: Berechnungsgebiet mit Diskretisierung (rechts), Kennzeichnung der Ränder des Gebietes mit unterschiedlichen Absorptionskoeffizienten (links)

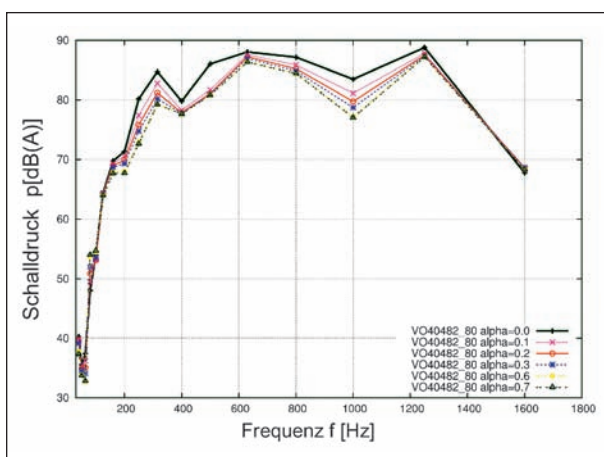


Bild 3.5-39: Terzspektrum der Schalldruckamplituden in 1 m Entfernung vom Reifen für das Reifenmodell mit Radkasten für variierende Absorptionskoeffizienten

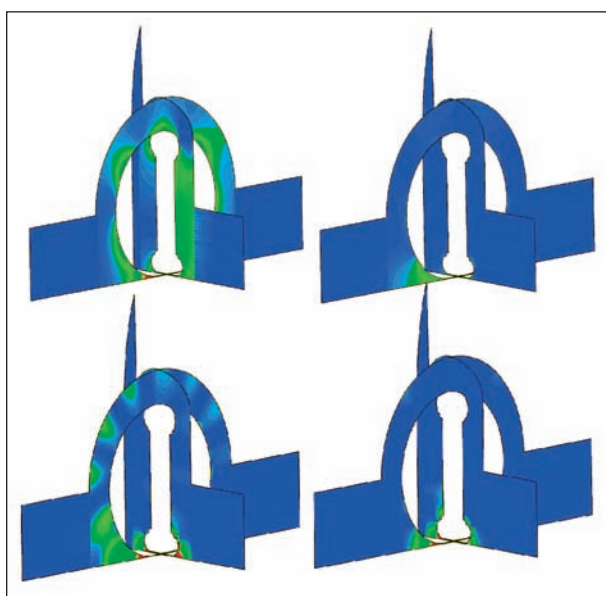


Bild 3.5-40: Schalldruckamplituden auf zwei senkrechten Schnitten für 289 Hz (oben links), 579 Hz (oben rechts), 1.014 Hz (unten links), 1.304 Hz (unten links)

spezifischen Radkastengeometrie angepasste Schallabsorber zu entwickeln.

Untersuchung des Einflusses des Absorptionskoeffizienten von Straßenoberflächen

Ähnlich wie bereits beschrieben, wurde das akustische Reifenmodell dazu verwendet den Einfluss des Absorptionskoeffizienten der Straßenoberfläche auf die abgestrahlte Schalleistung zu untersuchen. Dazu wurde das akustische Reifen-Fahrbahn-System für 32 Frequenzen zwischen 100 und 800 Hz gelöst und die Schalleistung bestimmt, die durch eine Halbkugel mit 7,5m Durchmesser mit dem Reifen im Mittelpunkt hindurchtritt. Bild 3.5-41 zeigt den Verlauf der Schalleistung über dem Absorptionskoeffizienten und es ist erkennbar, dass dieser bei verschiedenen Frequenzen sehr unterschiedliche Auswirkungen hat. Eine Erhöhung des Absorptionskoeffizienten führt nicht zwangsläufig zur Reduktion der Schalleistung. Dies ist durch Überlagerung der abgestrahlten und reflektierten (Straße, Reifen) Schallwellen zu erklären und zeigt die Komplexität des Phänomens. Damit erschließt sich eine weitere Anwendungsmöglichkeit des numerischen neuen Modells.

Fahrbahnübergänge

Abschließend seien die Untersuchungen zu Fahrbahnübergängen bei Brücken erwähnt. Hierbei sollte gezeigt werden, ob akustische Vorgänge bei der Überfahrt mit dem Berechnungsmodell erfassbar sind. Dazu wurden Fahrbahnübergangsrauten in die bisher verwendete Textur sowohl in Sommer- als auch in Winterstellung integriert. Für detaillierte-

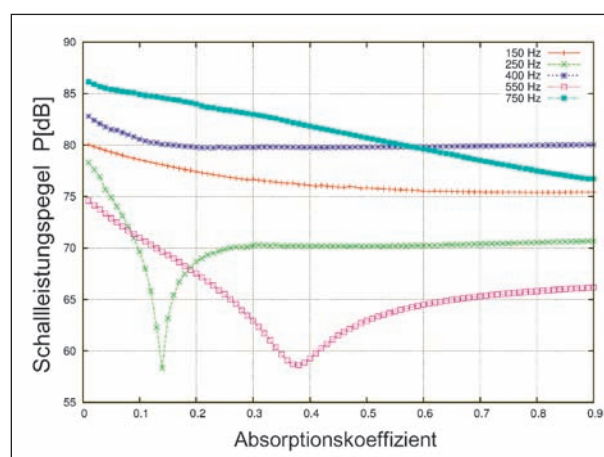


Bild 3.5-41: Verlauf der Schalleistung über dem Absorptionskoeffizienten für selektierte Frequenzen

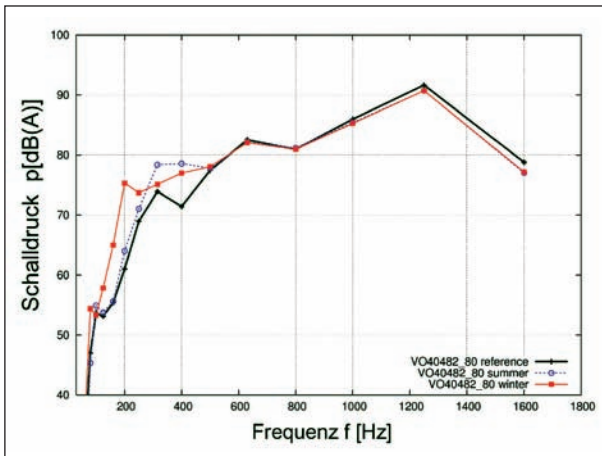


Bild 3.5-42: Terzspektrum des Schalldrucks für eine Überfahrt von Fahrbahnübergangsrauten in Sommer- und Winterstellung sowie ohne Übergangsrauten und die Mikrofonposition F2 (1 m Seite)

re Beschreibungen der Vorgehensweise sei wiederum auf den entsprechenden Bericht der Universität Hannover verwiesen. Bild 3.5-42 zeigt das Terzspektrum des Schalldrucks für die beschriebenen Konfigurationen. Es ist ersichtlich, dass durch Einführung der Rauten das Spektrum niederfrequent erheblich angehoben wird. Zudem zeigt der Vergleich von Sommer- zu Winterstellung (Vergrößerung des Rautenabstandes), dass die Winterstellung im tieferen Frequenzbereich hohe Schalldrücke generiert. Die Plausibilität dieser Ergebnisse unterstreicht, dass das Berechnungsmodell zur Analyse derartiger Fragestellungen gut geeignet ist.

3.5.5 Berücksichtigung von Airpumping

Die durch die Reifenschwingungen verursachte Schallemission stellt nach einhelliger Expertenmeinung die Hauptlärmquelle dar. Bezüglich des Airpumpings herrscht Einigkeit darüber, dass dies die zweitwichtigste Lärmquelle ist. Bei einer Erklärung der prinzipiellen Ursachen sowie einer Quantifizierung des Lärmbeitrages stellt sich die Situation jedoch diffus dar. So soll an dieser Stelle zunächst eine Einteilung des Airpumpings bezüglich der Ursache des Geräusches erfolgen. Es seien unterschieden:

- Volumenänderungen durch Eindringen des Reifens in die raue Straßenoberfläche,
- Volumenänderungen innerhalb der Profilzwischenräume.

Bei den in diesem Projekt untersuchten Reifen handelte es sich hauptsächlich um Glattreifen, weshalb

das Hauptaugenmerk auf dem ersten Punkt liegt. Bei der Beantwortung der Frage nach dem eigentlichen Mechanismus des Airpumpings herrscht in der Literatur, die allgemein zu diesem Thema wenig umfangreich ist, Uneinigkeit. Ursprünglich galt die Meinung, dass Schall durch das Herausdrücken der Luft im Einlauf und wieder einströmende Luft im Auslauf generiert wird [11]. Die derzeit herrschende Meinung ist jedoch, dass die Deformation des Reifens im Einlauf Luft herausdrückt, ein Teil in der Kontaktzone komprimiert wird und diese dann im Auslauf ausströmt. Diese Prozesse zusammen erzeugen aerodynamischen Schall [12]. Der Frequenzbereich, in dem dieser Prozess relevante Lärmbeiträge leistet, wird zwischen 1-3 kHz angegeben.

Bei der Modellierung des Phänomens wird in der Regel die Monopoltheorie verwendet, d. h., die zeitliche Änderung der Volumenströme ist die Ursache des Geräusches [13, 11]. Allein GAGEN [14] sieht die Annahmen der linearen Theorie verletzt und erweiterte sie dementsprechend. Die Anwendung dieser erweiterten Theorie liegt jedoch in der Berücksichtigung des Airpumpings von Profilrillen und auch hier wird die Relevanz der nichtlinearen Effekte auf bestimmte Rillengeometrien gewisser Größe beschränkt. Diese Annahmen treffen jedoch nicht zwingend auf die Betrachtung des texturinduzierten Airpumpings zu, weshalb auch hier der linearen akustischen Theorie der Monopolquellen gefolgt wird. Diese erzeugen einen Schalldruck p in einem Abstand r von der Quelle entsprechend der Beziehung

$$p = A \frac{e^{-ikr}}{r}$$

wobei k die Wellenzahl ist. Die Quellstärke A des Monopols steht wiederum über

$$Q = \frac{4\pi A}{i\rho c k}$$

in Beziehung mit der Volumengeschwindigkeit Q , der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c . Zu der Bestimmung der Volumengeschwindigkeiten existieren unterschiedliche Herangehensweisen. HAYDEN [11] leitet diese allein aus der Geometrie der Kavitäten der Textur her. GERRETSEN [13] betrachtet hingegen die Reifenschwingungen, die zeitlich den Abstand zwischen Reifen und Straße und somit das dazwischenliegende Volumen verändern, als Quellmechanismus, während WULLENS [15] die lokalen Deformationen des Reifens im

Kontaktbereich berücksichtigt und daraus verschiedene Ansätze für das Airpumping vorschlägt.

Man kann hieran erkennen, dass es trotz des scheinbar trivialen Modellierungsansatzes diverse nichttriviale Fragen zu beantworten gilt. Möchte man den einfachste Ansatz nach HAYDEN verfolgen, d. h. nur die Texturinformation berücksichtigen, was der Vorstellung eines vollständig in die Textur eindringenden Laufstreifens entspricht (siehe Bild 3.5-43 oben), bleibt beispielsweise die Frage offen, was als veränderliches Volumen interpretiert wird. Es ist denkbar, dass dies das Volumen der Texturrauigkeitsspitzen ist, das in den Reifen eindringt (siehe schraffierten Bereich in Bild 3.5-43 links). Ebenso denkbar ist, dass es der Anteil ist, um den sich das durch den Reifen und Fahrbahn gebildete Volumen verändert, wenn der Reifen weiter in die Textur eindringt (siehe schraffierten Bereich in Bild 3.5-43 rechts).

Wie gezeigt wurde ist eben genannte Annahme zumindest für den Pkw-Reifen nicht richtig und neben

den Texturdaten muss ebenfalls die Information über die lokale Verformung des Reifens zur Verfügung stehen. Die Frage nach der Identifikation der Volumina, die bei der Berechnung der Monopolquellstärke berücksichtigt werden, ist jedoch ganz ähnlich und in Bild 3.5-44 dargestellt.

Im Rahmen des Projektes wurde zunächst in das bisher entwickelte Reifenmodell die Berücksichtigung beliebig angeordneter Monopolschallquellen implementiert, womit die prinzipielle Berücksichtigung des Airpumping-Effektes umgesetzt ist. Bei der Identifikation der Quellstärken wird sowohl vom gemessenen Texturspektrum als auch von der berechneten Filterfunktion ausgegangen (Bild 3.5-45).

Hieraus wird, entsprechend der in Bild 3.5-44 unten rechts dargestellten Situation, die räumliche Verteilung der eingeschlossenen Volumina bestimmt (siehe Bild 3.5-46 links). Aus dieser Verteilung gilt es zunächst die zeitabhängige Volumenänderung dV/dt an diskreten Orten im Ein- und Auslauf und daraus die frequenzabhängige Monopolquellstärke zu be-

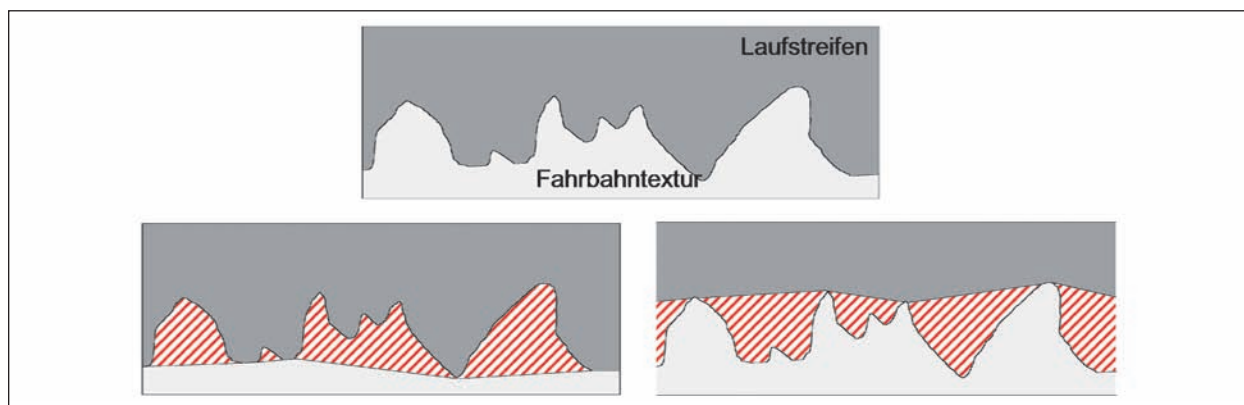


Bild 3.5-43: Veranschaulichung der Situation eines vollständig in die Textur eindringenden Laufstreifenmaterials (oben). Darstellung zwei unterschiedlicher Szenarien zur Identifizierung von Volumina, die bei der Bestimmung von Monopolschallquellenstärken berücksichtigt werden können

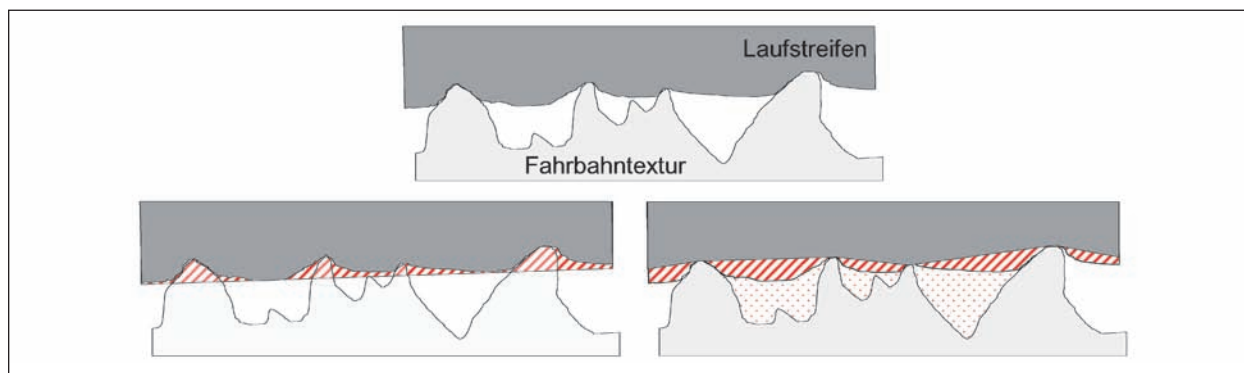


Bild 3.5-44: Darstellung der Situation des teilweisen Reifen-Fahrbahn-Kontaktes (oben). Unterschiedliche Möglichkeiten zur Bestimmung der zeitveränderlichen Volumina zur Bestimmung der Monopolquellstärke. Links: Abweichung des deformierten Zustandes von der Ausgangskonfiguration des Reifens; rechts: Anteil des Reifens, der in die Texturkavität eindringt

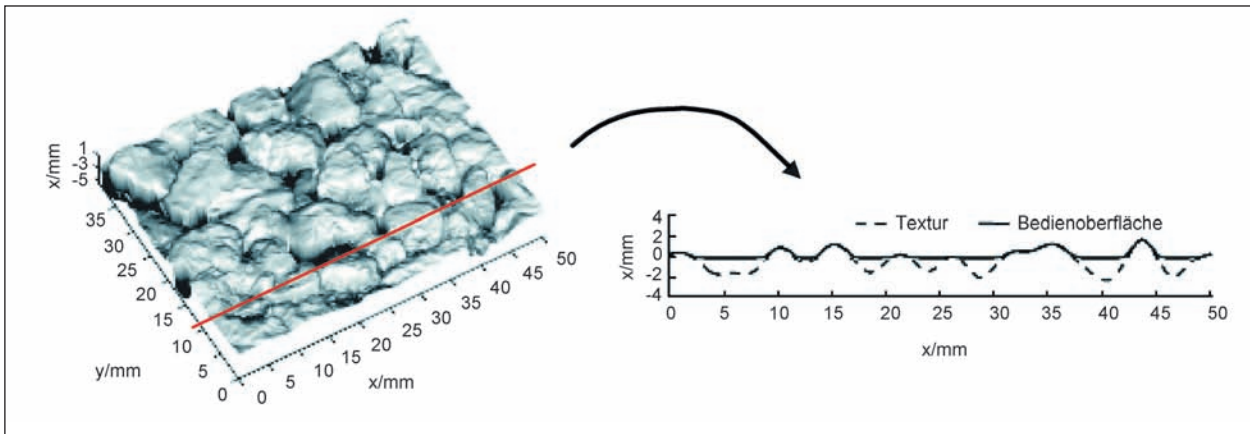


Bild 3.5-45: Veranschaulichung der Eingangsdaten zur Bestimmung der Monopolquellstärken

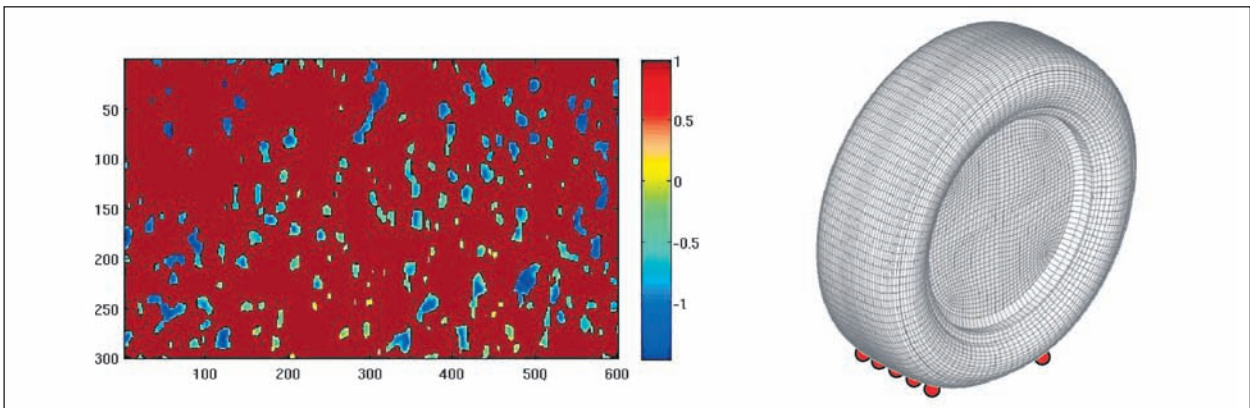


Bild 3.5-46: Beispiel einer errechneten räumlichen Verteilung von im Kontaktpatch eingeschlossenen Luftvolumina (links). Schematische Darstellung von im Kontaktpatch platzierten Monopolschallquellen

stimmen. Bei den beiden letztgenannten Schritten gibt es diverse offene Fragen, zum Beispiel: Wie viele Quellen sind im Ein- und Auslauf nötig? Wie erfolgt die Zuordnung der Volumina zu den diskreten Quellen (wenn sich beispielsweise das zugrunde liegende Volumen räumlich über mehrere Quellen ausdehnt)? Wie sensitiv ist das System bezüglich der räumlichen Platzierung der Quellen?

Neben diesen Fragen, die sich auf die Generierung der Randbedingungen des akustischen Randwertproblems beziehen, gibt es weitere Fragestellungen, die sich aus den Herausforderungen ergeben, wenn der bisher betrachtete Frequenzbereich auf 2 kHz bis 2,5 kHz erweitert wird. All diese Punkte waren nicht Bestandteil dieses Projektes, könnten aber in einem evtl. Folgeprojekt Berücksichtigung finden. An dieser Stelle können noch keine weiteren Ergebnisse präsentiert werden.

Es soll nur kurz umrissen werden, welche weiteren Arbeiten bereits initiiert wurden, um die Gültigkeit des gewählten Modellierungsansatzes zu untermauern.

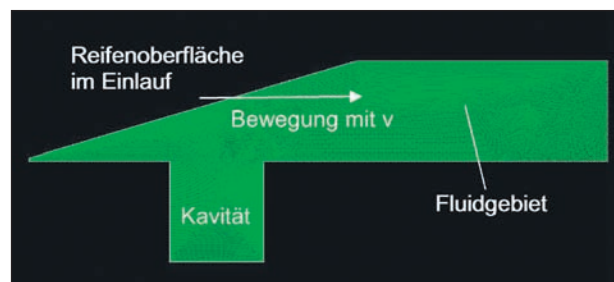


Bild 3.5-47: Darstellung des verwendeten CFD Modells zur Untersuchung des Airpumpingeffektes

Der Modellansatz mit Monopolschallquellen beinhaltet, dass Turbulenz in der Strömung keinen Lärmbeitrag leistet (diese würde mittels Quadropolquellen berücksichtigt). Um die Richtigkeit dieser Annahme zu prüfen, wird derzeit mittels der CFD-Software Fluent ein entsprechendes Modell entwickelt. Dieses Modell bildet eine einzelne Kavität mit einer einfachen Geometrie (siehe Bild 3.5-47) ab und die Strömung wird mittels RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) durchgeführt. Für die Turbulenzmodellierung wird das $k-\omega$ -Turbulenzmodell verwendet und die akustische Systemantwort wird

mittels der akustischen Analogie von FLOWCS WILLIAMS und HAWKINGS [16] bestimmt. Da bei dieser Art von Rechnung die Diskretisierung sehr fein ist (beispielsweise hat die Kavität in Bild 3.5-47 eine Ausdehnung von 3 mm) und diverse Parameterstudien (z. B. bzgl. Kavitätengröße, Kavitätenform, Rollgeschwindigkeit usw.) durchgeführt werden sollen, wurde die Modellierung zunächst auf 2-D beschränkt, um vertretbare Rechenzeiten zu erhalten. Die Geometrie ist verhältnismäßig einfach, da bereits hierbei die Berücksichtigung von bewegten Rändern eine Herausforderung darstellt. Erste Ergebnisse mit diesem Modell deuten darauf hin, dass bei diesem Problem die in der Turbulenz enthaltene Energie nicht groß genug ist, um einen signifikanten akustischen Beitrag zu leisten. Die Arbeiten dauern jedoch noch an und die Ergebnisse werden erst in der Zukunft veröffentlicht werden können.

Die Probleme, die sich aus dem Zusammenhang mit großen Starkkörperbewegungen und der Verwendung der Finite-Volumen-Methode ergeben (starke Netzdeformationen etc.), lassen sich durch eine Modellierung des Problems in der ALE-Betrachtungsweise lösen. Hierfür bietet der kommerzielle explizite Code LS-DYNA eine entsprechende Umgebung. Jedoch werden hier die Navier-Stokes-Gleichungen nur für den laminaren Fall gelöst, weshalb die vorher beschriebenen Berechnungen notwendig sind, um diese Annahme zu verifizieren. Mit diesem Modellansatz ist es prinzipiell möglich, den gesamten Zyklus des Schließens einer Pore, die Kompression und der Wiederöffnung im Zeitbereich zu simulieren. Hierbei wird die gesamte Reifengeometrie mit berücksichtigt. Dieses Modell und dessen Weiterentwicklung sollen dazu dienen, mittels einfacher Texturgeometrien die eingangs gemachte Annahme der Verwendbarkeit von Monopolschallquellen zu prüfen.

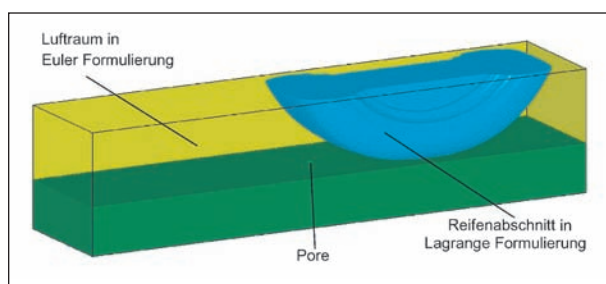


Bild 3.5-48: Darstellung des LS-DYNA Modells in der ALE-Betrachtungsweise zur Untersuchung des Airpumpings

3.5.6 Zusammenfassung und Ausblick

In dem vorliegenden Projekt wurden numerische Berechnungsverfahren für die Simulation der Schallabstrahlung von rollenden Reifen entwickelt und erfolgreich angewendet. Diese Verfahren stellen eine erhebliche Effizienzsteigerung bezüglich der Rechenzeit und der Robustheit gegenüber herkömmlichen Verfahren dar und ermöglichen somit einen Einsatz für praxisrelevante Fragestellungen. Wenn auch die Anwendung der gesamten Simulationskette noch nicht ganz das sehr hochgesteckte Ziel erreichte, so wurden doch tiefere Einblicke in die Wirkungsmechanismen des Reifenrollgeräusches gewonnen. Dadurch konnten weitere Maßnahmen abgeleitet werden, wie beispielsweise die Notwendigkeit der genaueren Abbildung des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes mittels einer Materialformulierung, die viskoelastische Effekte berücksichtigt.

Da ein solches Modell derzeit noch nicht verfügbar ist, konnte der direkte Vergleich zwischen Messung und Simulation noch keine erschöpfenden Aussagen über die Gesamtgenauigkeit liefern. Das durchgeführte Ranking verschiedener Reifen zeigte jedoch, dass das Modell schon jetzt relative Veränderungen sehr genau wiedergibt. Damit lässt es sich auch im jetzigen Stadium schon zur Reifenoptimierung einsetzen.

Weiterhin wurde erfolgreich die Anwendbarkeit des Modells bezüglich Fragestellungen gezeigt, deren messtechnische Untersuchung zuvor nur mit sehr hohem Aufwand möglich war. Hierbei seien die Wirksamkeit von Radkastenauskleidungen oder die Wirkung von Fahrbahn-Brücken-Übergängen als Beispiele genannt. Zudem war es erstmals möglich, gezielt Aussagen zu den Einflüssen eines Reifenprofils auf die Schallabstrahlung zu machen.

Des Weiteren wurde eine Literaturrecherche bezüglich des Airpumping-Effektes durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurde das numerische Modell dahingehend erweitert, dass Monopolschallquellen zur Modellierung des Airpumpings beliebig im Bereich der Reifenaufstandsfläche platziert werden können. Zuletzt wurden offene Fragestellungen in diesem Zusammenhang, die über das Projektziel hinausgehen, diskutiert. Teilweise bereits begonnene Arbeiten in dieser Richtung wurden vorgestellt, z. B. zur Ermittlung der Monopolquellstärken aus der Texturinformation und Reifendeformation zur Verifizierung des Modellansatzes.

Die Erweiterung des jetzt vorliegenden Modells um eine zuverlässige Modellierung des Airpumpings wird derzeit als eine der wichtigsten Fragestellungen angesehen. Hier würde sich eine Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen eines Anschlussprojektes anbieten.

Literatur

- [1] BIERMANN, J., ESTORFF, O. V., PETERSEN, S., SCHMIDT, S.: A computational model to investigate the sound radiation from rolling tires, *Tire Sci. and Technol.*, Volume 35, Issue 3, pp. 209-225 (September 2007)
- [2] BRINKMEIER, M., NACKENHORST, U., PETERSEN, S., V. ESTORFF, O.: A Finite Element Approach for the Simulation of Tire Rolling Noise, *Journal of Sound and Vibration*, Volume 309, Issues 1-2, 8, (p. 20-39) January 2008
- [3] SATISH BALAY and KRIS BUSCHELMAN, ET.AL.: *PetSc Users Manual*, ANL-95/11 – Revision 2.1.5, Argonne National Laboratory, 2004
- [4] B. S. KIRK, J. W. PETERSON: *libMesh* (2004). URL <http://libmesh.sourceforge.net>
- [5] D. DREYER, O. V. ESTORFF: Improved conditioning of infinite elements for exterior acoustics, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 58 (2003) 933-953
- [6] D. DREYER, S. PETERSEN, O. V. ESTORFF: Effectiveness and robustness of improved infinite elements for exterior acoustics, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 195 (2006) 3591-3607
- [7] S. PETERSEN, D. DREYER, O. V. ESTORFF: Assessment of finite and spectral element shape functions for efficient iterative simulations of interior acoustics, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 195 (2006) 6463-6478
- [8] S. PERTERSEN: *Adaptive finite und infinite Elementemethoden in der Akustik*, Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 2006
- [9] J. BIERMANN, O. V. ESTORFF, S. PETERSEN, C. WENTERODT: *Higher Order Finite and Infinite Elements for the Solution of Helmholtz Problems*, CMAME, (submitted)
- [10] NACKENHORST, U.: The ALE-formulation of bodies in rolling contact – Theoretical foundations and finite element approach. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 193:4299-4322, 2004
- [11] HAYDEN, R. E. R.: *Roadside Noise from the Interaction of a Rolling Tire with the Road Surface*, Proceedings of the Purdue Noise Control Conference, Purdue University, West Lafayette, 1971, IN pp. 62-67
- [12] U. SANDBERG, J. A. EIJSBOM: *Tyre/road noise*, reference book, Informex. ISBN 91-631-2610-9. (2002)
- [13] E. GERRETSEN and E. H. MULDER: *TRIAS: a comprehensive tyre-road. noise model and its validation*, TNO-report, HAG-RPT-000121a
- [14] GAGEN, M. J.: Novel acoustic sources from squeezed cavities in car tires, *Journal of the acoustic Society of America* 106 (2), 794-801, 1999
- [15] F. WULLENS: Modelling of the local deformation at the tyre/road contact for the prediction of forced tyre vibrations and air pumping. In: *Proceedings of the Euronoise 2003*, Naples, 2003
- [16] FLOWCS WILLIAMS, J. E., HAWKINGS, D. L.: *Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion*. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Vol. A264, Nr. 1151, 1969, S. 321-342
- [17] MÖSER, M.: *Technische Akustik*. Springer, 6. Auflage, 2005

3.6 Bewertung des Teilverbundes „Leise Reifen“

Die Bedeutung des Güterverkehrs in Deutschland wächst rasant. Jährlich werden ca. 470 Mrd. t km mit Lkw befördert [1], ca. 45 % aller Waren werden auf der Straße transportiert. Neue Studien prognostizieren bis 2025 einen Anstieg der Verkehrsleistungen für den Straßengüterverkehr um 84 % [2]. Vor diesem Hintergrund ist die Bekämpfung des Straßenverkehrslärms an der Quelle ohne Einschränkung der Mobilität eine zentrale Aufgabe für Industrie und Forschung.

Geräusche haben unterschiedliche Ursachen: Motor, Antriebsstrang, Abrollgeräusch der Reifen auf der Fahrbahn, Umströmung des Fahrzeugs etc. Das bedeutet, nicht ein Element allein ist für den Geräuschpegel eines Fahrzeuges bei der Vorbeifahrt verantwortlich, erst das Zusammenspiel aller Faktoren erzeugt das Verkehrsgeräusch. Eine dauerhafte Lärmreduzierung setzt voraus, dass die Wechselwirkung aller Komponenten untersucht und in den Lösungsansätzen berücksichtigt wird. Dieser interdisziplinäre Ansatz wurde im Forschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ im Rahmen der Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung des Straßenverkehrslärms erfolgreich verfolgt.

Am Institut für Fahrzeugtechnik und mobile Arbeitsmaschinen (IFFMA) des Karlsruher Institutes für Technologie wurde im Rahmen des Projektes „Leiser Straßenverkehr 2“ der Einfluss des Antriebsmomentes auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch untersucht. Das Institut verfügt über einen Reifen-Innentrommelprüfstand, der dazu geeignet ist, Reifen unter Schlupf bzw. Umfangskraft zu untersuchen. Erste Ergebnisse zeigten, dass eine Radlasterrhöhung eine Pegelerhöhung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs bewirkt, die auch unter höherer Umfangskraft für niedrige Reifendrucke größer ausfällt als für den an die Radlast angepassten Druck. Hier sind weiterführende Untersuchungen geplant.

Die Firma Continental AG führte in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern diverse Reifentests mit neu entwickelten Reifenprofilen durch. Nach umfangreichen Untersuchungen im akustischen Labor der Firma Continental AG kamen vier verschiedene Profile in den Testeinsatz und wurden mit zwei Referenzreifen verglichen. Bei den Untersuchungen zu den akustischen Eigenschaften auf verschiedenen Fahrbahnbelägen konnte auf dem ISO-Belag ein Reifen mit einer Geräuschreduzierung von bis

zu 5,4 dB(A) gegenüber dem Referenzreifen überzeugen. Neben der Prüfung der akustischen Eigenschaften wurden in einem sehr umfangreichen Prüfprogramm alle sicherheitsrelevanten Reifeneigenschaften wie das Bremsen auf Schnee, Spurhalten in der Kurve, Steinefang etc. untersucht. Änderungen an einer Eigenschaft eines modernen Reifens vorzunehmen heißt, viele andere Eigenschaften des Produktes mit zu beeinflussen. Nach Auswertung aller Prüfergebnisse stellte sich heraus, dass der zuvor leiseste Antriebsachsenreifen deutliche Defizite bei anderen Gebrauchseigenschaften aufwies. Unter Berücksichtigung aller Kriterien ist nicht der leiseste Reifen Testsieger geworden, sondern der im Gesamtpaket sicherste und um ca. 3,5 dB(A) gegenüber dem aktuellen Produkt geräuschreduzierte Reifen. Für die Continental AG hat diese Forschungsarbeit zur Entwicklung des neuen Antriebsachsreifen HDL 2 geführt – ein besonders geräuscharmer Reifen, der im April 2009 auf dem Markt eingeführt wurde. Es ist vorgesehen, dieses neu entwickelte Reifenprofil auch auf andere Reifendimensionen zu übertragen. Die Umsetzung von Forschungsergebnissen in ein marktfähiges Produkt und dessen Markteinführung sind i. d. R. ein sehr langwieriger Prozess und konnten hier bereits innerhalb von vier Jahren realisiert werden.

Parallel zu der Entwicklung eines neuen leiseren Antriebsachsreifens wurde von den Projektpartnern Continental AG und den Universitäten Hannover und Hamburg-Harburg ein Simulationstool für die Reifenoptimierung entwickelt.

Im Kontaktbereich des Reifens mit der Fahrbahn treten starke Deformationen auf, die Reifen zu Schwingungen anregen. Diese Schwingungen werden in die Umgebung abgestrahlt und sind dort als Schall wahrnehmbar. Für eine Reduzierung dieser Schallabstrahlung ist die Kenntnis der Strukturdynamik eines rollenden Reifens auf der Fahrbahnoberfläche erforderlich.

Die Computersimulation der Schallabstrahlung besteht aus zwei aufeinanderfolgenden Schritten: Im ersten Schritt werden die Strukturschwingungen rollender Reifen berechnet. In der Erstellung der Modelle waren der komplexe Reifenaufbau, bestehend aus mehreren Schichten unterschiedlichen Materials, sowie die Struktur der Fahrbahnoberfläche in Form der von der BASt gemessenen Textur zu berücksichtigen. Im zweiten Schritt wird auf Grundlage der ermittelten Oberflächendynamik des

Reifenmodells die Schallabstrahlung berechnet. Die Modellvalidierung erfolgte mit Hilfe von Laborexperimenten auf dem Trommelprüfstand der Firma Continental AG.

Das entwickelte Modell basiert auf der Finite-Elemente-Methode. Während der rollende Reifen mit Hilfe einer Arbitrary-Lagrange-Euler-Formulierung (AEL) in Kombination mit einer Überlagerung komplexer Moden abgebildet wurde, erfolgte die Modellierung der Akustik mit Hilfe von akustischen Finiten Elementen. Die Schallabstrahlung der Reifen in das Fernfeld wurde dabei mit halbunendlichen Elementen realisiert.

Nach ersten Vergleichen der Berechnungsergebnisse mit den im Labor der Continental AG gewonnenen experimentellen Ergebnissen zeigte sich eine besondere Sensibilität des mechanischen Teilmodells hinsichtlich der Materialmodellierung. Die dynamische Versteifung des Gummis bei zunehmender Anregungsfrequenz sowie das Dämpfungsverhalten zeigten einen großen Einfluss auf die Prognosegenauigkeit der Berechnungsmodelle. Das Programm zur Materialmodellierung wurde erweitert, um hier größere Genauigkeiten zu erzielen.

Das im Forschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ entwickelte Simulationsmodell zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften des Reifen-Fahrbahn-Systems aus und konnte für verschiedene Fragestellungen bereits erfolgreich eingesetzt werden.

Neben den Reifenschwingungen gibt es weitere Entstehungsmechanismen für das Reifen-/Fahrbahngeräusch, wie zum Beispiel das so genannte Airpumping. Hier wurden für die Modellierung erste physikalische Grundlagen zur Umsetzung erarbeitet. Die Erweiterung des Modells um eine zuverlässige Modellierung des Airpumpings wird eine Herausforderung in weiterführenden Forschungsprojekten sein.

Im Ergebnis dieses Teilprojektes steht erstmals ein Simulationsmodell zur Verfügung, mit dem das Rollen eines Reifens auf einer Fahrbahn mit realer Textur simuliert und die daraus resultierenden Geräusche prognostiziert werden können. Mit der Entwicklung des Simulationsmodells wurden tiefe Einblicke in die Wirkmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes gewonnen. Erstmals ist es möglich, Aussagen zu Einflüssen eines Reifenprofils auf die Schallabstrahlung zu machen. Darüber hinaus

fand das Modell Anwendung bei speziellen Fragestellungen (Wirksamkeit von Radkastenauskleidungen, Fahrbahnübergängen), die bisher nur mit großem messtechnischem Untersuchungsaufwand geklärt werden konnten.

Das Simulationsmodell wurde im Oktober 2008 bei der Firma Continental AG implementiert und wird für Forschungsarbeiten bei der lärmtechnischen Optimierung von Lkw-Reifen eingesetzt. Da der Zeitaufwand für die Berechnungen jedoch noch erheblich ist, ist eine Nutzung des Modells derzeit noch nicht wirtschaftlich. Um ein derartiges Simulationsmodell als Standardwerkzeug für die Optimierung von Reifen einsetzen zu können, ist hier weitere Forschungsarbeit notwendig.

Für die Erarbeitung des Modells wurde Herr Dr. Maik Brinkmeier von der Leibniz-Universität Hannover auf der internationalen Reifen Konferenz-Messe „Tire Technology Expo 2008“ mit dem 1. Preis für „Tire Manufacturing and Design of the Year“ ausgezeichnet.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Verkehr in Zahlen 2009/2010
- [2] Studie „Prognose der deutschlandweiten Verkehrsverflechtungen 2025; ITP/BVU, München/Freiburg, November 2007

4 Ergebnisse zum Teilverbund „Leise Straßen“

Partner:

Müller BBM, Planegg

Maurer und Söhne GmbH & Co, München

RW Sollinger Hütte GmbH, Uslar

Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Straßenplanung und Straßenbau

Technische Universität München, Fachgebiet

Hydromechanik

Bundesanstalt für Materialprüfung, Berlin

Bundesanstalt für Straßenwesen,

Bergisch Gladbach

4.1 Problemdarstellung

Das Straßennetz der Bundesrepublik Deutschland besteht zum überwiegenden Teil aus Asphaltstraßen. Der Anteil von Asphaltbefestigungen an allen öffentlichen Straßen beträgt ca. 98 %, bei Bundesautobahnen über 70 %. Diese große Bedeutung der Bauweise macht es notwendig, der Lärmoptimierung der Straßenoberflächen aus Asphalt besonders hohe Aufmerksamkeit zu schenken.

Eine Möglichkeit, das Reifen-Fahrbahn-Geräusch an der Quelle deutlich zu reduzieren, ist der Bau von OPA. Die Entwicklung dieser Bauweise begann in Deutschland vor 24 Jahren mit dem Beginn der systematischen Erprobung im Jahr 1986. Anfangs wurden geringe Hohlraumgehalte eingestellt und Straßenbaubitumen eingesetzt. Die Erfahrungen zeigten relativ schnell, dass polymermodifiziertes Bitumen (PmB) und Hohlraumgehalte < 22 Vol.-% notwendig waren. Inzwischen wird die 3. Generation Offenporiger Asphaltbeläge in Deutschland gebaut. Im letzten Jahr wurde das 2. Statuspapier [1] veröffentlicht, in dem die Zusicherung der lärmindernden Wirkung dieser Bauweise aufgrund umfangreicher Langzeituntersuchungen von 5 auf 8 Jahre erhöht werden konnte.

Um diese lärmindernde Wirkung von -5dB(A) gemäß RLS-90 über 8 Jahre zusichern zu können, muss bei Offenporigen Asphaltbelägen ein Vorhaltemaß vorgesehen werden. Ursache ist die Verschmutzungsanfälligkeit dieser Bauweise, was mit einer Reduzierung der lärmindernden Wirkung verbunden ist. Dieser Sachverhalt ist schematisch¹ in Bild 4.1-1 dargestellt.

Im Neuzustand weisen OPA eine Pegelminderung von ca. -8 dB(A) auf, d. h., das Niveau der Lärminderung im Neuzustand liegt wesentlich höher als die D_{StrO} -Korrektur von -5 dB(A).

Im Teilprojekt „Integrale Verbesserung von offenporigen Fahrbahndecken“ hatten sich die Partner Müller BBM, die Universitäten in Stuttgart und München, die Bundesanstalt für Materialprüfung und die Bundesanstalt für Straßenwesen das Ziel gesetzt, hier Lösungsansätze zur Verbesserung von OPA zu erarbeiten. Durch den Einsatz von Polymer-Nanotechnologie zur Modifizierung der Hohlraumwandungen sollte die Schmutzanhafung verhindert, die Entwässerungsfähigkeit verbessert und die Reinigungskraft erhöht werden. Die Bundesanstalt für Materialprüfung hat mit Hilfe der Röntgenanalyse detaillierte Untersuchungen zur Porenstruktur und dem Ablauf von Verschmutzungsmechanismen von Offenporigen Asphalten vorgenommen.

Aufbauend auf den Ergebnissen zur Porenstrukturanalyse hatte die Universität München die Aufgabe, ein Modell zur Simulation der Durchströmung in OPA zu entwickeln, um u. a. Reinigungsverfahren für derartige Asphalte effektiver konstruieren zu können.

In einem weiteren Teilprojekt wurde die Verbesserung des Schallabsorptionsvermögens von OPA untersucht. Die hohe lärmtechnische Wirksamkeit von OPA ist u. a. auf die Möglichkeit der Schallabsorption zurückzuführen. Im Rahmen einer Parameterstudie wurden bekannte Zusammenhänge aus der Absorbertheorie auf die speziellen Verhältnisse der

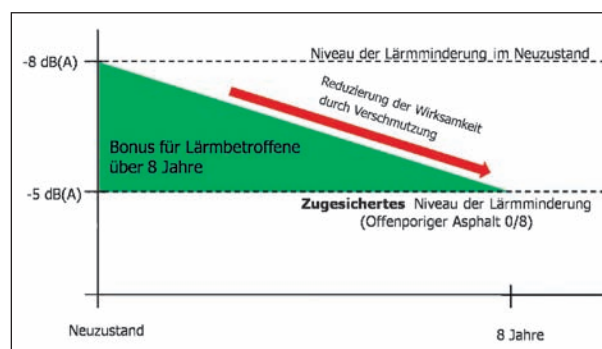


Bild 4.1-1: Niveau der Lärminderung bei Offenporigen Asphalten über einen Nutzungszeitraum von 8 Jahren [2]

¹ Die zeitliche Abnahme der Pegelminderung bei OPA ist hier idealisiert als linearer Zusammenhang dargestellt. Messungen in situ deuten auf einen exponentiellen Verlauf hin.

Offenporigen Asphaltdeckschichten übertragen. Es zeigte sich, dass vor allem die Erhöhung des Hohlraumgehaltes zu einer Verbesserung der absorbierenden Wirkung über ein breiteres Frequenzband führen könnte. Die aus den momentan üblichen Baustoffen, d. h. Gesteinskörnungen und Bindemittel, hergestellten OPA nähern sich ihrer oberen Grenze im Hohlraumgehalt an. Dies führt jedoch immer noch zu einer maximalen Absorption in einem sehr engen Frequenzband. Im Rahmen dieses Projektes wurde die weitere Verbesserung der absorbierenden Wirkung durch den Einsatz von reaktiven Absorbentien untersucht.

Eine weitere Geräuschquelle im Straßennetz stellen die Fahrbahnübergänge zwischen den Brückenbauwerken und den Straßen dar. Fahrbahnübergänge sind notwendig, um Längenänderungen der Brücke infolge von Temperaturänderungen und Verkehrsbelastung auszugleichen.

Eine Ursache für die stoßartige Geräuschemission von Fahrbahnübergangskonstruktionen sind die verwendeten Materialien mit geringer Dämpfungswirkung im Fahrbahnübergang selbst, im Anschlussbereich des Fahrbahnübergangs sowie beim Überbau und im Widerlager. Die Radlasten werden vom Reifen unmittelbar und ungedämpft in den Fahrbahnübergang eingeleitet.

Für lange Brückenbauwerke werden in Deutschland Fahrbahnübergänge mit Lamellenstruktur verwendet. Die Lamellen-Bauart hat sich in der Praxis aufgrund ihrer Funktionstüchtigkeit und langen Nutzungsdauer bewährt. Im Teilprojekt „Leise Straßen“ sollten speziell diese Fahrbahnübergangskonstruktionen hinsichtlich einer möglichen Lärmreduzierung untersucht werden. Dabei sollten die Einbautechnologien hinsichtlich möglicher Verbesserungen und der Verwendung neuer Dämpfungsmaterialien analysiert werden. Einen weiteren Schwerpunkt stellte die Entwicklung neuer Oberflächen für Fahrbahnübergänge dar. In diesem Projekt arbeiteten die Firmen RW Sollinger Hütte und Maurer und Söhne GmbH & Co mit der Bundesanstalt für Straßenwesen als Partner zusammen.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: „Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90 – Fahrbahnoberflächen-Korrekturwert D_{StrO} für Offenporigen Asphalt“, Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 3/2009 vom 31.03.2009
- [2] REICHELT, P.: Lärminderung – das Thema der Zukunft. In: asphalt 4/2010

4.2 Teilprojekt „Polymer-Nanotechnologie zur Modifizierung der Poreinnenwandungen – Entwicklung von Materialien zur Herstellung von verbessertem Asphaltmischgut für offenporige Deckschichten

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Ressel
Dipl.-Ing. S. Alber
Universität Stuttgart,
Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Eisenbach
Dr. rer. nat. Klaus Dirnberger
Universität Stuttgart,
Forschungsinstitut für Pigmente und Lacke

4.2.1 Zielsetzung

Im Teilprojekt „Polymertechnologie zur Modifizierung von Poreinnenwandungen – Entwicklung von Materialien zur Herstellung von verbessertem Asphaltmischgut für offenporige Deckschichten“ sollen Lösungen entwickelt werden, um die Schmutzanlagerung in der offenporigen Decke möglichst von Anfang an zu vermeiden. Hier wird der Einsatz von Polymer-Nanotechnologie zur Modifizierung der Hohlraumwandungen untersucht, die ein Anhaften der Schmutzpartikel verhindern soll. Dabei werden prinzipiell zwei Lösungswege verfolgt. Zum einen ist eine Modifizierung des Bindemittels Bitumen mit einem Additiv denkbar, zum anderen die nachträgliche Beschichtung der Hohlräume der offenporigen Schicht. Um die verminderte Verschmutzungsanfälligkeit im Labor nachweisen zu können, wurde in der Universität Stuttgart ein Prüfstand konzipiert, der die Simulation der Verschmutzung an praxisnah hergestellten Probekörpern ermöglicht. Als Grundlage für die Zusammensetzung des künstlichen Schmutzes für die Verschmutzungsversuche dienen Analysen an Schmutzproben aus Bohrkernen, die aus offenporigen Deckschichten entnommen wurden. Parallel dazu wurden Schmutzproben aus Reinigungsfahrzeugen entnommen, deren chemische Bestandteile bestimmt sowie die Sieblinien der anorganischen Hauptbestandteile ermittelt wurden.

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.

2. Beschichtungen, die schmutzabweisende Oberflächeneigenschaften erzeugen und dadurch die Schmutzanhaftung an den Porenwandungen 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. Bild 4.2-1, links).

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 so genannten „Lotuseffekt“ (s. Bild 4.2-1, rechts). Wasser kann die Porenwandungen 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 mikrorauere 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 aufneh-

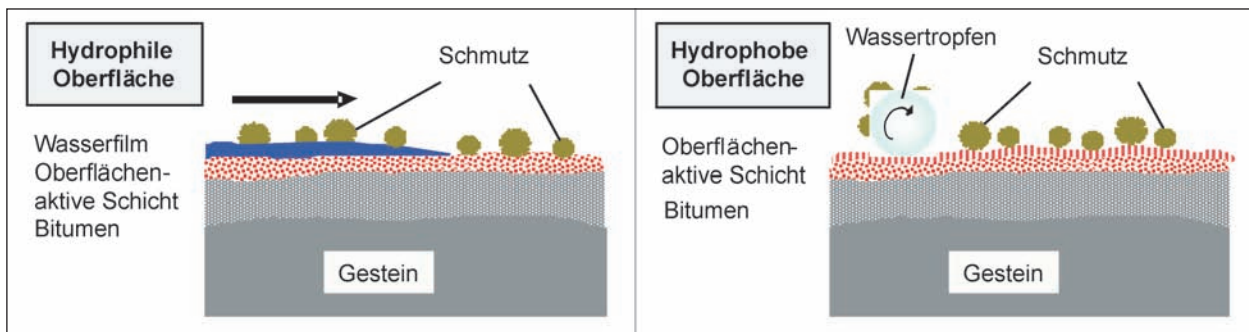


Bild 4.2-1: Schmutzabweisende Oberflächen in den OPA-Poren; links: sehr hydrophile Oberfläche, rechts: hydrophobe, mikrorauhe Oberfläche („Lotuseffekt“)

men bzw. an sich binden und von der Porenoberfläche abspülen.

Bei den vorgestellten Beschichtungsverfahren (Strategie 1 und 2) wird das Beschichtungsmaterial in flüssiger Form¹ grundsätzlich nachträglich in die fertig eingebaute Asphaltdecke eingebracht. Die Beschichtungen müssen hinsichtlich grundsätzlicher Anforderungen wie Haftfähigkeit, Verträglichkeit mit dem Bitumen und Wirksamkeit sowohl materialseitig 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. Ablaufen 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.

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.

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 Erkaltens der Asphaltdecke bzw. des Bitumenfilms durch kontrollierte Entmischung aus dem Bitumen an die Grenzfläche zur Luft auf (selbst-stratifizierender Effekt, s. Bild 4.2-2) und bilden dort eine Polymerschicht, die der Oberfläche schmutzabweisende Charakteristika verleiht. Bei dieser Art der Erzeugung der gewünschten Oberflächeneigenschaften entfällt zudem der zusätzliche Arbeitsschritt der nachträglichen Beschichtung.

Die Zugabe von stratifizierenden Polymeren mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften wird hinsichtlich notwendiger Zugabemenge und Mischvorgangs (Temperatur und Mischzeit), Auftretens des stratifizierenden Effekts durch Oberflächenanalytik (Kontaktwinkelmessung) sowie schmutzabweisen-

¹ Suspension aus Trägerflüssigkeit (Wasser), festen Beschichtungspartikeln und ggf. weiteren Zusätzen

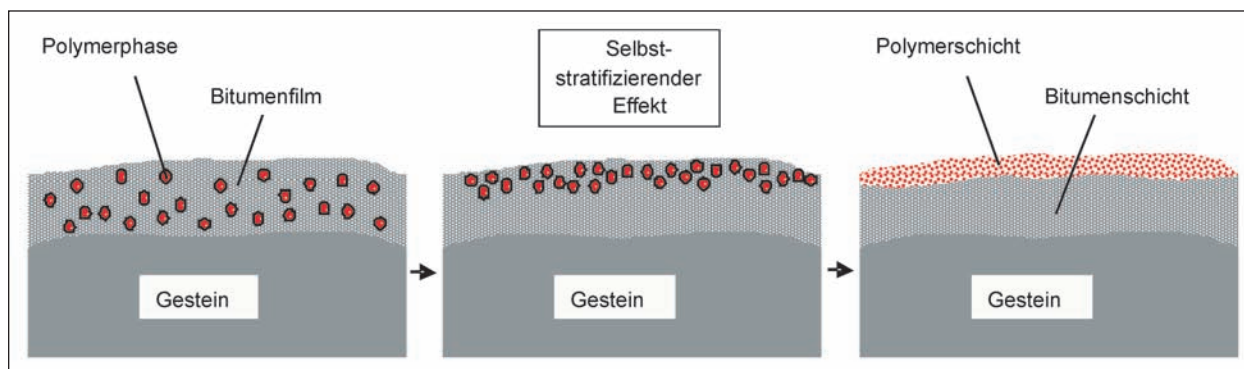


Bild 4.2-2: Entmischung von Polymer- und Bitumenphase während der Abkühlung (selbst-stratifizierender Effekt)

der Wirkung untersucht. Die Ermittlung von sich typischerweise in Offenporigen Asphalten einstellenden (mittleren) Bitumenfilmdicken auf den Mineralstoffen dient der Abschätzung, inwieweit sich der erwartete selbststratifizierende Effekt einstellen kann.

4.2.2 Untersuchungsmethodik

Für die Untersuchungen werden je nach Versuchsanforderung im Wesentlichen drei verschiedene Probekörper eingesetzt:

- Bitumenprobekörper/Bitumenfilme: Bitumen wird auf ca. 120 °C erhitzt, sodass seine Viskosität sinkt und es gießfähig wird. Durch Ausgießen bzw. Rakeln des Bitumens und Erkalten an der Luft werden flache Bitumenprobekörper bzw. Bitumenfilme unterschiedlicher Dicke erzeugt. Dem Bitumen werden dabei im richtigen Verhältnis Füller und Zellulosefasern zugegeben [9].
- Kleine Asphaltprobekörper (Probepplatten aus dem Walzsegmentverdichter² 26 x 32 cm²): Da die Untersuchung des Bitumens bzw. seiner Oberfläche allein die Realitäten im Baustoff Asphalt, der außer Bitumen zu einem (weit größeren) Teil auch aus Mineralstoffen besteht, nur unzureichend wiedergibt, werden kleine Asphaltprobekörper mit unterschiedlichem Größtkorn und in unterschiedlichen Schichtdicken und Schichtsystemen hergestellt, mit deren Hilfe die Wirkungsweise des beschichteten bzw. modifizierten Bitumens im Verbundbaustoff Asphalt untersucht werden soll.
- Große Asphaltprobekörper (1,00 x 2,50 m² in Stahlwannen): Zur Untersuchung des Ver-

schmutzungsmechanismus und der Wirkungsweise der geplanten Maßnahmen (Beschichtung und Modifizierung) zur Verminderung der Verschmutzungsneigung werden große Asphaltprobekörper eingesetzt, die kontrolliert verschmutzt und beregnet werden können. Die Stahlwannen, in die das jeweilige Mischgut eingebaut wird, sind auch im Versuchsstand des Teilpakets TT 3221-2 einsetzbar, sodass hier ein Austausch der Proben stattfinden kann.

Für alle Probekörper wird im gesamten Projekt polymermodifiziertes Bitumen PmB 45 A (Olexobit 45 der Firma BP AG) einer Liefercharge verwendet, um Verzerrungen der Untersuchungsergebnisse zu vermeiden. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich Bitumen unterschiedlicher Lieferchargen und Provenienzen trotz gleicher Produktbezeichnung und damit einhergehender Anforderungen in manchen physikalischen und chemischen Eigenschaften stark unterscheiden können.

In Bild 4.2-3 wird die geplante Untersuchungsmethodik dargestellt. Von links nach rechts werden im Diagramm die beiden möglichen Lösungswege der Verschmutzungsproblematik aufgezeigt (4a und 4b). Von oben nach unten kann die logische Abfolge der Untersuchungsschritte nachvollzogen werden. Im Folgenden sollen die Untersuchungsmethodik und einzelne Schritte näher erläutert werden.

Vor der Beschichtung von Asphalt (4a) müssen zahlreiche Voruntersuchungen vorgenommen werden, um eine adäquate Beschichtung vornehmen zu können. Die (Mikro-)Rauheit der Poren, auf denen die Beschichtung aufgebracht werden soll, muss bekannt sein. Es soll mit unterschiedlichen Untersuchungsansätzen (Computertomografie, Licht- und Rasterelektronenmikroskopie sowie mit Schnitten durch mit Epoxydharz verfüllte OPA-Probekörper (Dünnschliffe)) versucht werden, diese

² Nach TP Asphalt-StB, Teil 33

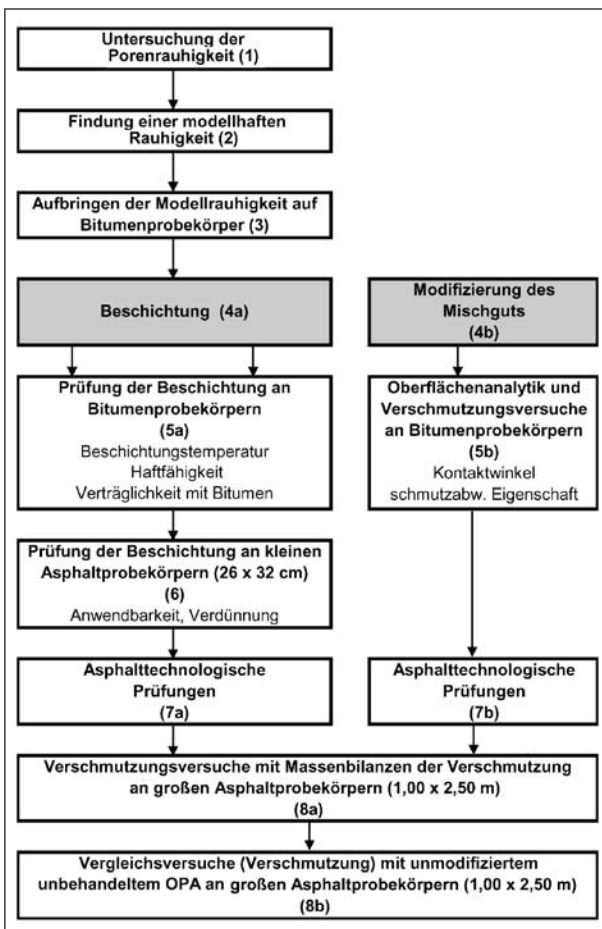


Bild 4.2-3: Untersuchungsmethodik des Projekts; grau unterlegt: potenzielle Lösungsansätze

Rauheit zu quantifizieren (1). Die für die Beschichtungstechnik interessanten Bereiche sind in den Größenordnungen zu erwarten, die im Straßenbau als Mikrorauheit (Wellenlängen $< 0,5$ mm) bezeichnet werden. Dementsprechend werden mutmaßlich verschiedene Merkmale der Mikrorauheit diese Rauheit charakterisieren können. Untersuchungen werden in vergleichender Weise an Bohrkernen aus realen Straßen und an labormäßig hergestellten kleinen Asphaltprobekörpern durchgeführt. Auf diese Weise war geplant, eine Modellrauigkeit zu ermitteln (2), die mit Hilfe geeigneter Stempel oder Sandpapier auf Bitumenprobekörper übertragen werden kann (3), um so einen möglichst realitätsnahen Untergrund für die Beschichtungen künstlich herstellen zu können. Die Untersuchungen der Rauheit in den Poren haben jedoch gezeigt, dass sich eine einheitliche, quantifizierbare Rauheitsstruktur nicht ermitteln lässt und somit auch ihre Übertragung auf Bitumenfilme mit Hilfe von Stempeln nicht möglich ist. Dennoch ist wegen der Realitätsnähe bei der Herstellung der Bitumenprobekörper darauf zu achten, dass die im Asphalt ge-

fundenen Rauheitsphänomene auch in den künstlich hergestellten Bitumenprobekörpern auftreten. Die verschiedenen Beschichtungssysteme werden an den Bitumenprobekörpern Tests zur Haftfähigkeit, zur optimalen Beschichtungstemperatur, zur Verträglichkeit mit dem Bitumenuntergrund und zur Wirksamkeit unterzogen (5a). An kleinen Asphaltprobekörpern soll untersucht werden, ob die Beschichtung durch Flutung die Hohlräume bzw. die Poren ausreichend erreicht und die Poren somit überhaupt beschichtet werden können (6). Hinsichtlich der Materialeigenschaften ist bei Einsatz einer Beschichtung vor allem die Griffigkeit von Interesse. Der Beschichtungsfilm wird jedoch an der unmittelbaren Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn ähnlich schnell abgerieben werden wie ein reiner Bitumenfilm, sodass hinsichtlich der Anfangsgriffigkeit keine wesentlichen zusätzlichen Probleme zu erwarten sind. Festigkeitsparameter und weitere Gebrauchseigenschaften der Deckschicht werden durch die Einbringung einer Beschichtung auf Wasserbasis nicht beeinflusst (7a).

In einem anderen Lösungsansatz soll durch Zugabe von Polymeren in das Bindemittel (PmB 45 A³) und deren Anreicherung (Stratifizierung) an der Oberfläche der Poren ebenfalls eine verminderte Schmutzanhaftung erzielt werden (4b). Die Kenntnis der in den Poren auf den Mineralstoffen anzutreffenden Bitumenfilmdicke ist dabei eine wichtige Eingangsgröße. Nach Zugabe/Beimischung der Polymere soll durch geeignete Analysen der Oberflächen von Bitumenprobekörpern (Kontaktwinkelmessung) ermittelt werden, ob und in welchem Umfang der erwartete stratifizierende Effekt eingetreten ist. Erste Wirksamkeitsuntersuchungen hinsichtlich der Verschmutzungsneigung werden am Bitumenprobekörper vorgenommen (5b). Die asphalt- und bitumentechnologischen Prüfungen sind im Gegensatz zu den Beschichtungssystemen bei der Modifizierung des Bindemittels von sehr viel größerer Bedeutung (7b). Die Modifizierung kann Einfluss auf die Stabilität, die Steifigkeit, das Temperaturverhalten und das Ermüdungsverhalten des Asphalts, die Alterung und Versprödung des Bitumens sowie auf die Adhäsion zwischen Mineralstoff und Bitumen haben. Diese Nachweise sind z. B. durch standardmäßige Prüfung von Marshallprobekörpern (Stabilität und Fließwert nach TP Asphalt, Teil 34) möglich, die um Versuche zum Ge-

³ Nach TL PmB, Ausgabe 2001 (inzwischen durch TL Bitumen-StB, Ausgabe 2007 ersetzt)

Bezeichnung	OPA		ZWOPA 0/8_0/16		ZWOPA 0/5_0/11	
	0/8	0/11	0/8	0/16	0/11	0/5
Schichtaufbau, Schichtdicke	einlagig, 4 cm	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.-%] ⁵⁵	25,3	27,2	27,7	25,3	27,2	25,1
Bindemittelgehalt [M.-%] ⁵⁵	6,3	6,3	6,1	6,3	6,3	6,6
Kornverteilung des Mineralstoffgemischs [Anteile M.-%]⁵⁵						
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	
11,2-16,0 mm		3,1	87,6		3,1	
16,0-22,4 mm			4,3			

Tab. 4.2-1: Bezeichnungen und Spezifikationen der Mischgutsorten und Schichtaufbauten für die großen und kleinen Asphaltprobekörper laut Eignungsprüfung der TPA GmbH

brauchsverhalten (Spaltzugversuche und Spurbildungsversuche⁴ ergänzt werden können. Neben der Prüfung durch vergleichende Spaltzugversuche (mit/ohne vorherige Wasserlagerung; Versuchsdurchführung nach TP Asphalt, Teil 12) kann die Affinität zwischen Bitumen und Mineralstoff mit Hilfe des Rolling-Bottle-Versuchs (TP Asphalt, Teil 11) prüftechnisch angesprochen werden. Weitere Eigenschaften des modifizierten Bitumens wie das Temperaturverhalten können durch die Anwendung des Dynamic Shear Rheometer-Tests (DSR) ermittelt werden. Zum Einsatz kommen zusätzlich die Standardparameter von Bitumen (Nadelpenetration und Erweichungspunkt Ring und Kugel) sowie Versuche zur Kraftduktilität. Die asphalttechnologischen Prüfungen werden durch die TPA GmbH Köln und die BASt durchgeführt und die Ergebnisse zur Verfügung gestellt.

An großen Asphaltprobekörpern soll der Verschmutzungsmechanismus im Vergleich von modifiziertem/beschichtetem (8a) und unmodifiziertem (8b) Offenporigem Asphalt realitätsnah simuliert werden. In Zeitrafferversuchen soll ein Lebenszyklus einer offenporigen Deckschicht hinsichtlich Ver-

schmutzung und Regeneriebnissen nachempfunden werden. Es wird wiederholt kontrolliert eine definierte Menge „Schmutz“ mit einer definierten Korngrößenverteilung und chemischen Zusammensetzung auf die Fahrbahnoberfläche aufgebracht. Diese Verschmutzung wird mit Hilfe einer Beregnungsvorrichtung, mit der Regeneriebnisse unterschiedlicher Dauer, Stärke und Häufigkeit nachempfunden werden können, in die OPA-Deckschicht eingetragen.

Im Folgenden werden die untersuchten Materialien und Schichtsysteme aufgeführt. Darunter sind sowohl einlagige Systeme als auch zweilagige Systeme mit unterschiedlichem Größtkorn und unterschiedlichen Schichtdicken. Im Einzelnen werden sie in Tabelle 4.2-1 untersucht. Im weiteren Verlauf des Berichts werden für die Mischgutsorten und Schichtaufbauten die im Tabellenkopf verwendeten Bezeichnungen verwendet.

Die grundsätzlichen Kombinationsmöglichkeiten von Mischgut und Verfahrensweise zur Modifikation des OPA können aus Tabelle 4.2-2 abgelesen werden. Die darin enthaltenen Ziffern bedeuten die im Rahmen der Untersuchung der Wirksamkeit zum Einsatz kommende Anzahl großer Asphaltprobekörper.

⁴ TP Asphalt Teil 23

Schichtsysteme	Herkömmliches Mischgut (Referenzfall)	Nachträglich beschichtetes Mischgut	Polymermodifiziertes Mischgut
OPA 0/8, einlagig, 4 cm	3	0	2
OPA 0/11, einlagig, 4 cm	1	1	1
ZWOPA 0/8_0/16 unt. Schicht 0/16: 4,5 cm ob. Schicht 0/8: 2,5 cm	3	1	2
ZWOPA 0/5_0/11 unt. Schicht 0/11: 4,5 cm ob. Schicht 0/5: 2,5 cm	1	0	1
Summe der Probekörper	8	2	6
Gesamtsumme	16		

Tab. 4.2-2: Systematik und Anzahl der zu untersuchenden großen Asphaltprobekörper

4.2.2.1 Versuchsstand zur Verschmutzung von großen Asphaltprobekörpern

An einem weiter entwickelten Versuchsstand zur Berechnung von Fahrbahnoberflächen (s. Bild 4.2-4) sollen Schmutzpartikel in den OPA eingeschwemmt (und teilweise wieder ausgeschwemmt) werden. Hiermit soll der „natürliche“ Prozess der Verschmutzung des OPA in definierten Verschmutzungs- bzw. Lebenszyklen, die jeweils aus mehreren einzelnen Verschmutzungsschritten bestehen, möglichst realitätsnah im Zeitraffer nachgebildet werden. Die Verschmutzungszyklen werden für unterschiedlich große Asphaltprobekörper dabei so variiert, dass drei unterschiedliche Verschmutzungsgrade erreicht werden:

- schwach (insgesamt 480 g/m² Schmutzauftrag),
- mittel (insgesamt 960 g/m² Schmutzauftrag),
- stark (insgesamt 1.440 g/m² Schmutzauftrag).

Damit sollen (angenähert) unterschiedliche Liegedauern von OPA-Decken nachempfunden werden. Insgesamt werden auf diese Weise 14 große Asphaltprobekörper untersucht, die sich in Modifizierung, Schichtaufbau und -dicke sowie Verschmutzungsgrad unterscheiden (s. Tabelle 4.2-2, Tabelle 4.2-3 und Tabelle 4.2-4). Fließender Verkehr, der durch Druckimpulse der Reifen in den Poren tendenziell reinigende Wirkung hat, kann in diesen Versuchen nicht untersucht werden. Simuliert wird demnach eine typische Standstreifensituation, nicht die Situation in der Rollspur eines Fahrstreifens. Aus der Literatur ist bekannt, dass der Standstreifen eine höhere Verschmutzungsneigung aufweist als die Fahrstreifen, sodass die Versuche in dieser Hinsicht auf der „sicheren Seite“ liegen.

Aus diesen Versuchsreihen sollen vergleichend u. a. die folgenden Fragestellungen geklärt werden:

- Welcher Teil des aufgetragenen Schmutzes (Menge und ggf. Korngrößen) verbleibt in der OPA-Schicht, welcher Teil wird mit Regen wieder ausgeschwemmt (Massenbilanz des Schmutzes)?
- Welcher Teil des aufgetragenen Tausalzes verbleibt in der OPA-Schicht, welcher Teil wird mit Regen wieder ausgeschwemmt?
- Welcher Teil der Wasservolumina wird durch die Deckschicht abgeführt (Drainagevermögen), welcher Teil fließt oberflächlich ab, welcher Teil verbleibt nach Ende des Regens in der Deckschicht und verdunstet von dort (Retentionsvermögen)? Wie groß sind die auftretenden Abflussraten? Wie verändert sich dieses (zeitabhängige) Abflussverhalten durch die eingebrachte Verschmutzung?

Aus dem Vergleich dieser Kenngrößen und Parameter des Verschmutzungsverhaltens sollen vor allem folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Wie ändern sich alle oben genannten Kenngrößen/Kennwerte durch die Modifizierung des offenporigen Asphalts?
- Wie hängen die genannten Kenngrößen von der Mischgutsorte, vom Größtkorn und vom Schichtaufbau des OPA (einlagig, zweilagig) ab?
- Welche Mischgutsorte ist (vom Wirkungsgrad gegen Verschmutzung gesehen) potenziell am besten für die Modifizierung geeignet?

Beregnung

Der Asphaltprobekörper wird über insgesamt 6 Düsen aus einer Höhe von 1,40 m mit sauberem Wasser beregnet (s. Bild 4.2-4). Eine definierte Menge künstlich hergestellter Schmutz wird händisch vor jedem Verschmutzungsschritt gleichmäßig auf der OPA-Oberfläche verteilt. In einigen Verschmutzungsschritten wird zusätzlich Tausalz (hier NaCl) in definierten Mengen auf den Probekörper aufgebracht. Durch die anschließende Beregnung wird der Schmutz nach und nach in die Poren eingespült (s. auch Bild 4.2-6).

Während der Beregnung wird im Zulauf die verdünte Wassermenge gemessen (magnetisch-induktive Durchflussmessung in 1-Sekunden-Intervallen). Durch die Verdüsung des Wassers entstehen Verluste, sodass in einem Vorversuch der Anteil des Wassers bestimmt worden ist, der bei Beregnung tatsächlich die OPA-Oberfläche erreicht und dort abläuft oder einsickert. Dieser Wert bildet ein wichtiges Vergleichskriterium für Parameter des zeitabhängigen Abflussverhaltens des Probekörpers. Die eingesetzten Beregnungsprogramme zur

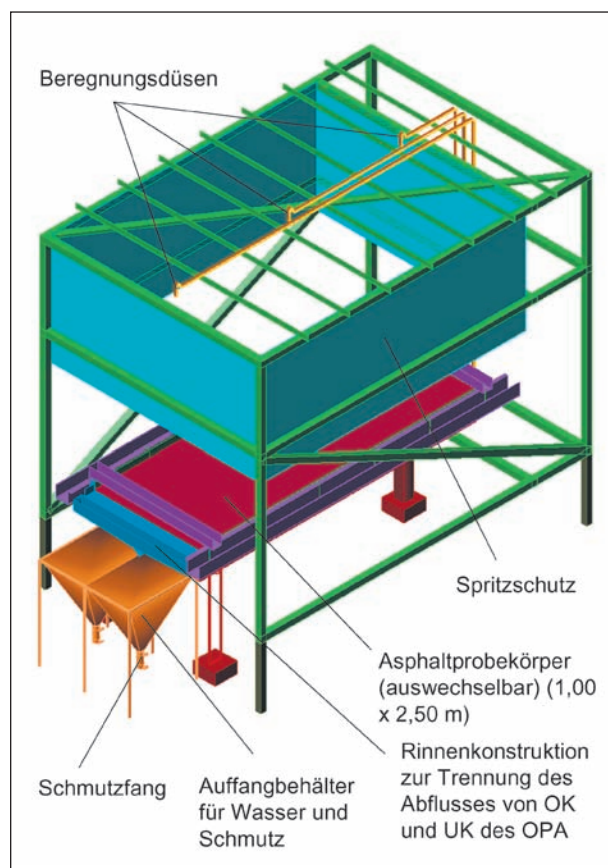


Bild 4.2-4: Versuchsstand zur Beregnung und Verschmutzung großer Asphaltprobekörper

Simulation des Lebenszyklus einer Deckschicht werden von zwei wesentlichen Eingangsüberlegungen bestimmt:

Einerseits sind Niederschlagsdaten (10-min-Werte) der letzten 10 Jahre von 5 Wetterstationen in Deutschland ausgewertet worden, woraus sich typische Regenintensitäten und -mengen sowie Dauern von Trockenphasen ergeben. Andererseits sollen diese realen Daten so abgewandelt werden, dass die Lebenszyklus-Simulation im Zeitraffer ablaufen kann, d. h., dass mehrere Jahre in der Realität im Versuchstand innerhalb von wenigen Tagen nachempfunden werden können. Darüber hinaus sollen durch die Simulation die erzielten Effekte durch die Modifikation des OPA nachweisbar sein. Auf diesen Überlegungen basieren die im Versuch angewendeten Beregnungsprogramme (der Ablauf der Beregnungsprogramme wird in Bild 4.2-5 veranschaulicht):

- Schwachregenprogramm (Beregnungsprogramm 1)
Während insgesamt 7 Stunden werden in 8 Beregnungen je $0,8 \text{ l/m}^2$ Wasser auf den Probekörper aufgebracht. Insgesamt werden auf diese Weise $16,0 \text{ l}$ Wasser auf den OPA aufgetragen. Die Dauer der Beregnung ist jeweils 1 Minute, sodass sich eine Regenintensität von $0,8 \text{ mm/min}$ ergibt. Die Pause zwischen den einzelnen Beregnungen beträgt jeweils 59 Minuten. Simuliert werden dadurch acht einzelne, sehr kurze, relativ starke Regenereignisse („Schauer“), denen Regenpausen von jeweils einer Stunde folgen (siehe Bild 4.2-5).
- Starkregenprogramm (Beregnungsprogramm 2)
Während 35 Minuten werden in 2×4 Beregnungen (mit kurzen Regenpausen von jeweils 2 Minuten sowie einer langen Pause von 15 Minuten) je $1,5 \text{ l/m}^2$ Wasser aufgetragen, das entspricht einer Gesamtwassermenge von $30,0 \text{ l}$. Die Dauer der Beregnung ist jeweils 1 Minute, sodass sich eine Regenintensität von $1,5 \text{ mm/min}$ ergibt (s. Bild 4.2-5). Dies entspricht einem sehr starken Regenereignis („Gewitterregen“), wie es eigentlich nur in kurzen Schauern auftritt und nicht in halbstündigen Ereignissen wie in diesem Fall. Dieses Beregnungsprogramm ist demnach eher unrealistisch stark. Es dient der stärkeren Einspülung und Auswaschung des eingebrachten Schmutzes und der Beobachtung des Drainageverhaltens bei sehr starkem Wasseranfall.

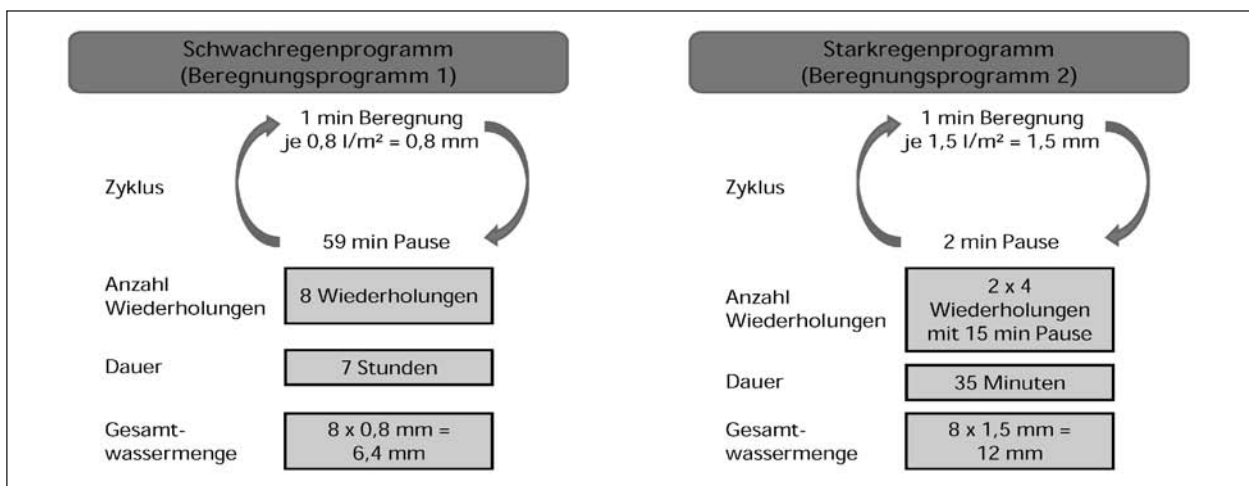


Bild 4.2-5: Ablaufschema der Beregnungsprogramme

Wärmeeinfluss

Die großen Asphaltprobekörper werden zusätzlich durch Wärmestrahler, die zeitabhängig gesteuert werden, einem definierten Wärmeprogramm unterzogen. Im Versuchsablauf geschieht dies zeitlich gesehen nach der Beregnung sowie einem gewissen Trocknungszeitraum (vgl. Bild 4.2-6) Dadurch sollen die Erwärmung der Deckschicht im Sommer und die damit (vermutlich) einhergehende verstärkte Verklebung von Schmutzpartikeln mit dem Bitumen nachempfunden werden. Durch die Wärmeabstrahlung werden an der Oberfläche Temperaturen von max. $55 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht.

Wasserabfluss und Schmutzauswaschung

Die großen Asphaltprobekörper sind im Versuchszustand einem Gefälle von $2,5 \%$ (Regelquerneigung im Straßenbau) ausgesetzt. Am Fuß dieses Gefälles sind Rinnenabläufe angebracht, die das Wasser in zwei getrennte Auffangbehälter weiterleiten. Das anfallende Wasser wird dabei getrennt in den Teil, der oberflächlich auf dem OPA abläuft, und in den Teil, der in die Decke einsickert und durch den OPA bzw. an der Unterkante des OPA (auf der Dichtungsschicht) abläuft. Im unteren Bereich der beiden Auffangbehälter ist ein Schmutzfang (Fassungsvermögen je ca. 60 ml) vorgesehen, in dem sich der ausgetragene Schmutz absetzen kann (s. Bild 4.2-4). Nach Abschluss eines jeden Verschmutzungsschritts werden diese 60 ml Schmutz-Wasser-Gemische abgezogen und Orgalab (TP 3221-3) für Laboruntersuchungen zur Massenbestimmung zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise können sedimentierte Schmutzpartikel erfasst werden. Zusätzlich wird nach jedem Verschmutzungsschritt

aus dem aufgefangenen Schmutzwasser eine repräsentative Probe ($1,0 \text{ l}$) entnommen, um auch Schwebstoffe bzw. abfiltrierbare Anteile (nicht absetzbare Bestandteile) bestimmen zu können (Erkenntnis aus [21]). Nach der Filtrierung wird der Filtratrückstand bestimmt, um darüber hinaus die löslichen Bestandteile massenmäßig erfassen zu können. Der Schmutzaustrag umfasst demnach drei Hauptbestandteile:

- 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 und ggf. der Korngrößenverteilung angestellt werden. Zu beachten sind hierbei (zunächst nur durch visuelle Prüfung) auch mögliche Abriebserscheinungen von Bindemittel, Mineralstoffen und Fasern.

Durch Messung des Salzgehalts (Leitfähigkeitsmessung) kann eine Tausalzbilanzierung durchgeführt werden. Auf diese Weise soll ein potenzieller Beitrag des Winterdienstes bzw. des Tausalzeinsatzes zur Verschmutzung untersucht werden. Das im Winterdienst verwendete Steinsalz hat nicht unerhebliche (feine) mineralische Verschmutzungen, die auf jeden Fall zur Verschmutzung beitragen; darüber hinaus kann Salz durch Bildung stabiler Kristallgitter den Schmutz regelrecht zu Agglomeraten „verklumpen“. In den Versuchen an den großen Asphaltprobekörpern wird kein Steinsalz, sondern

Probekörper Nr.	Mischgutsorte/Schichtenaufbau	Verschmutzungsgrad	Modifizierung des Asphalts
Unmodifizierte Probekörper			
1	OPA 0/8, einlagig, 4 cm	schwach (480 g/m ²)	unmodifiziert
2	OPA 0/8, einlagig, 4 cm	stark (1.440 g/m ²)	unmodifiziert
3	OPA 0/8, einlagig, 4 cm	mittel (960 g/m ²)	unmodifiziert
4	OPA 0/11, einlagig, 4 cm	mittel	unmodifiziert
5	ZWOPA 0/8_0/16, zweilagig, 7 cm	stark	unmodifiziert
6	ZWOPA 0/8_0/16, zweilagig, 7 cm	schwach	unmodifiziert
7	ZWOPA 0/8_0/16, zweilagig, 7 cm	mittel	unmodifiziert
8	ZWOPA 0/5_0/11, zweilagig, 7 cm	mittel	unmodifiziert
Beschichtete und polymermodifizierte Probekörper			
9	OPA 0/11, einlagig, 4 cm	mittel	beschichtet
10	OPA 0/8, einlagig, 4 cm	mittel	polymermodifiziert
12	OPA 0/11, einlagig, 4 cm	mittel	polymermodifiziert
13	ZWOPA 0/8_0/16, zweilagig, 7 cm	stark	beschichtet
14	ZWOPA 0/8_0/16, zweilagig, 7 cm	mittel	polymermodifiziert
15	ZWOPA 0/8_0/16, zweilagig, 7 cm	stark	polymermodifiziert

Tab. 4.2-3: Übersicht über die Systematik der zu beprobenden großen Asphaltprobekörper (s. auch Tabelle 4.2-2)

Natriumchlorid (NaCl) in kristalliner feinkörniger Form verwendet, um potenzielle Fehler durch mineralische Anteile im Steinsalz zu vermeiden.

Über eine Drucksonde wird in dem Auffangbehälter, der das an der Unterkante des OPA (auf der Dichtungsschicht) abfließende Wasser fasst, der kumulierte Wasserabfluss bzw. das anfallende Wasservolumen in Abhängigkeit der Zeit gemessen. Auf diese Weise kann das zeitabhängige Entwässerungsverhalten des OPA (in Abhängigkeit der aktuellen Verschmutzung) nach einem definierten Regenereignis erfasst und ausgewertet werden. Insbesondere können durch die Verschmutzung verursachte Änderungen des Drainagevermögens, des Retentionsvermögens, der Wasserabflussraten und ggf. weiterer Parameter quantifiziert werden.

Die Firma Müller BBM begleitet die Versuche zur Verschmutzung der großen Asphaltprobekörper durch akustische Messungen (Schallabsorptionsgrad und Strömungswiderstand) jeweils nach Abschluss des kompletten Verschmutzungszyklus eines Probekörpers. Diese Daten liefern Erkenntnisse über die Beeinflussung des akustischen Verhaltens durch eine mengenmäßig definierte Verschmutzung.

Den Probekörpern werden nach Abschluss eines simulierten „Lebenszyklus“ Bohrkerne entnommen,

um die Ablagerungs- und Transportmechanismen des Schmutzes mit Hilfe visueller Kontrollen untersuchen zu können. Zusätzlich werden diese Bohrkerne des verschmutzten OPA der Bundesanstalt für Materialprüfung für Untersuchungen mittels Computertomografie zur Verfügung gestellt.

Anhand der Laborergebnisse können erste Rückschlüsse über die erreichten Verbesserungen hinsichtlich der Verschmutzungsneigung von Offenporigen Asphalten gezogen werden.

Eine Übersicht der zu untersuchenden großen Asphaltprobekörper (1,00 m x 2,50 m) ist in Tabelle 4.2-3 gegenübergestellt.

Der Lebens- bzw. Verschmutzungszyklus eines großen Asphaltprobekörpers setzt sich aus mehreren Verschmutzungsschritten zusammen. Jeder Verschmutzungsschritt besteht aus dem Auftragen von Schmutz, einem anschließenden Beregnungsprogramm, einem Wärmeprogramm und Trocknungsphasen. Bild 4.2-6 zeigt schematisch den allgemeinen Ablauf eines Verschmutzungsschritts und die sich daraus ergebende Zusammensetzung des kompletten Verschmutzungszyklus eines Probekörpers. Einem Verschmutzungsschritt entspricht im Versuchsablauf ein Tag (24 Stunden). Die Versuchsparameter (Schmutzmenge, Beregnungsprogramm) der Lebenszyklussimulation eines Pro-

bekörpers unterscheiden sich hinsichtlich der gewählten Verschmutzungsgrade.

Im Folgenden soll beispielhaft der Verschmutzungszyklus für den Verschmutzungsgrad „schwach“ erläutert werden. Bild 4.2-7 zeigt den (zeitlichen) Ablauf der neun Verschmutzungsschritte (Dauer 9 Tage). Es werden in jedem Schritt 60 g/m² Schmutz auf den Probekörper aufgetragen. In Schritt 2, 4 und 6 werden zusätzlich 20 g/m² Tausalz (NaCl) aufgebracht. Für die „Einregnung“ von Schmutz (und Salz) kommen sieben Schwachregenprogramme und zwei Starkregenprogramme zum Einsatz. Diese Programme sind in Bild 4.2-5 veranschaulicht. Das Wärmeprogramm ist unabhängig vom eingesetzten Beregnungsprogramm in jedem der acht Verschmutzungsschritte gleich.

Zur Beurteilung, wie stark die damit erreichte Verschmutzung ist, wurden akustische Messungen von

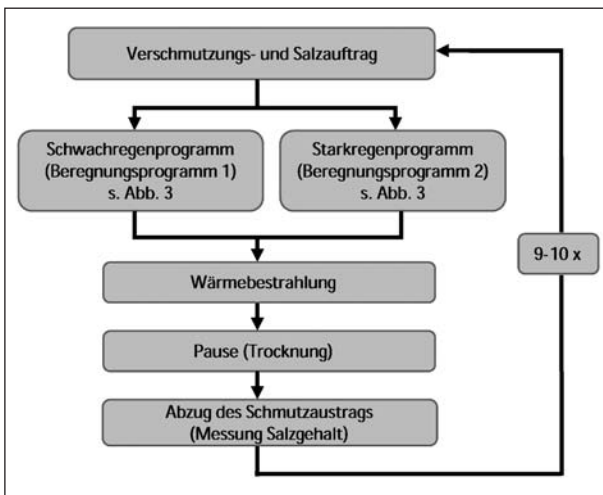


Bild 4.2-6: Allgemeines Ablaufschema eines Lebens- bzw. Verschmutzungszyklus

Müller BBM herangezogen, die im Juli 2007 an den zu Beginn der Versuchsreihe beprobten Probekörpern 1 und 6 durchgeführt wurden. Die Verschmutzungszyklen (Schmutzmenge, Beregnungsprogramme) für die weiteren Verschmutzungsgrade sind entsprechend den Ergebnissen aus diesen akustischen Messungen den Erkenntnissen aus [21] angepasst worden.

Die detaillierten Festlegungen für die Verschmutzungsgrade „mittel“ (960 g/m²) und „stark“ (1.440g/m²) können dem Schlussbericht entnommen werden.

4.2.2.2 Verschmutzungsversuche an kleinen Asphaltprobekörpern

Um die Versuche an großen Asphaltprobekörpern vorzubereiten und generelle Fragen zum Verschmutzungsverhalten von offenporigen Deckschichten zu untersuchen, werden in einer Diplomarbeit [11] Verschmutzungsversuche an kleinen Asphaltprobekörpern (Walzsegmentplatten OPA 0/8 nach Tabelle 4.2-1) durchgeführt. Die kleinen Asphaltprobekörper sind jeweils noch geviertelt worden, sodass die in diesem Kapitel beschriebenen Probekörper eine Größe von 13 x 16 cm bei einer Schichtdicke von 4 cm haben.

Aus den Untersuchungen in [11] sollen erste Erkenntnisse über Verschmutzungsprozesse, Ablagevorgänge von Schmutz, Auswaschvorgänge von Schmutz bei „normalen“ und extremen Regenereignissen und die Rolle von Tausalz bei der Verschmutzung von offenporigen Asphaltdecken gewonnen werden.

Als künstlicher Schmutz kommt in diesen Versuchen eine vergleichsweise geringfügig unterschied-

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 60 g/m ²	Schmutz 60 g/m ² Salz 20 g/m ²	Schmutz 60 g/m ²	Schmutz 60 g/m ² Salz 20 g/m ²	Schmutz 60 g/m ²	Schmutz 60 g/m ² Salz 20 g/m ²	Schmutz 60 g/m ²	Schmutz 60 g/m ²	kein Schmutz-auftrag
Schwachregenprogramm	Schwachregenprogramm	Schwachregenprogramm	Starkregenprogramm	Schwachregenprogramm	Schwachregenprogramm	Schwachregenprogramm	Schwachregenprogramm	Starkregenprogramm
Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	
Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	Wärme	
Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	Pause	

Bild 4.2-7: Ablauf des Verschmutzungszyklus für Verschmutzungsgrad „schwach“ (480 g/m²) (nach [21])

liche Schmutzzusammensetzung zum Einsatz. Neben organischen Beimengungen werden dafür verschiedene Körnungen aus stark quarzhaltigen Gesteinen verwendet. Es ist dabei zu bemerken, dass Quarzgestein eine eher niedrige Affinität zu Bitumen hat. Der Schmutz besteht aus

- 32 M.-% Kristallquarzmehl (0/0,2),
- 42 M.-% Quarzsand (0,1/0,5),
- 21 M.-% Flusssand (0/2) und
- 5 M.-% organischem Anteil aus getrocknetem und fein gemörsertem Humus.

Der Schmutz wird in Chargen von 3 g mit jeweils 50 g Wasser in die OPA-Probekörper eingespült. Auf diese Weise ist eine Gesamtschmutzmenge von 114 g Schmutz auf jeden Probekörper (entspricht ca. 5,5 kg/m²) aufgetragen worden. Die Wassermenge entspricht 2,4 l/m² in kurzer Zeit, was einem relativ starken Regenereignis entspricht. Der zeitliche Abstand der einzelnen Verschmutzungsschritte beträgt ca. 2-4 Stunden (teilweise auch etwas länger). Der Trocknungsvorgang der Probekörper ist durch ein Luftgebläse beschleunigt worden.

Einige Probekörper werden zusätzlich zur künstlichen Verschmutzung noch mit Tausalz behandelt. Dazu wird in jedem Verschmutzungsschritt eine Feuchtsalzmischung, wie sie in der Realität eingesetzt wird, mit Wasser verdünnt und auf den Probekörper aufgesprüht. Die Feuchtsalzmischung besteht zu 70 M.-% aus Natriumchlorid (in Form von Steinsalz) und zu 30 M.-% aus Sole (20%ige Calciumchloridlösung). Dieses Feuchtsalz wird mit Wasser so weit verdünnt, dass die pro Verschmutzungsschritt aufgetragenen 6 ml der Lösung 1 g aufgetragenem NaCl entsprechen. Auf diese Weise werden pro Verschmutzungsschritt ca. 48 g/m² NaCl aufgebracht, was einer für OPA üblichen Menge einer Einzelstreuung entspricht⁵. Insgesamt sind auf diese Weise umgerechnet 2,35 kg/m² NaCl aufgetragen worden.

⁵ Pro Streuvorgang werden bei Schnee auf OPA ca. 60 g/m² Feuchtsalz aufgebracht, was ungefähr dem 3fachen der herkömmlichen Menge entspricht. Dazu kommen Vorsorgestreuerungen mit geringeren flächenspezifischen Mengen. In einer Wintersaison werden auf diese Weise durchschnittlich zwischen 600 und 6.000 g/m² Tausalz auf den Offenporigen Asphalt aufgetragen.

Einige Probekörper werden darüber hinaus zusätzlich mit Wärme behandelt. Dadurch soll die Erwärmung der Deckschicht im Sommer nachempfunden werden, die eine Verringerung der Viskosität von Bitumen zur Folge hat. Die Probekörper werden mit einer Rotlichtlampe (150 W) im Abstand von 30 cm 30 Minuten bestrahlt. Dabei stellt sich nach 5 min eine Temperaturerhöhung der Probekörperoberfläche auf 45-50 °C ein, die bis zum Ende der Bestrahlung konstant bleibt.

Eine Systematik der Verschmutzung und Behandlung der insgesamt zwölf untersuchten Probekörper zeigt Tabelle 4.2-4.

Die Probekörper sind nach abgeschlossener Verschmutzung mit Hilfe des Dünnschliffverfahrens am Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen „aufgeschnitten“ worden, um die Verschmutzungsmechanismen mittels Polarisationsmikroskopie beobachten und interpretieren zu können [11].

Mit Hilfe dieser Versuche sollen u. a. folgende Hypothesen überprüft werden:

- Es wird vermutet, dass der Winterdienst durch die Aufbringung von Tausalzen (NaCl und CaCl₂) den Offenporigen Asphalt zusätzlich verschmutzt bzw. die Verschmutzung durch hygroskopische Effekte verstärkt. Es könnten potenziell „Verklumpungen“ entstehen, die den Verschmutzungsprozess beschleunigen.

Probekörper Nr.	Verschmutzung	Tausalz	Wärme
1	x		
2	x		
3	x		
4	x		
5	x	x	
6	x	x	
7	x	x	
8	x	x	
9	x	x	
10	x	x	
11	x	x	x
12	x	x	x

Tab. 4.2-4: Systematik der in [11] untersuchten OPA-Probekörper; Material: OPA 0/8

- Durch intensive Sonneneinstrahlung können sich die Fahrbahnoberfläche und damit auch das Bitumen stark erwärmen. Der in die OPA-Decke eingetragene Schmutz kann sich auf diese Weise einfacher an das durch die Temperaturerhöhung „weichere“ Bitumen anlagern.

Herstellung des künstlichen Schmutzes

Bild 4.2-8 zeigt eine übersichtliche Darstellung der Korngrößenverteilungen der oben beschriebenen „Schmutzarten“. Weiterhin ist eine Auswertung von Reinigungsgut aus einer OPA-Strecke, die im Rahmen von TT 3221-3 untersucht wurde, ebenfalls zum Vergleich im Diagramm enthalten. Diese vorliegenden Sieblinien bilden die Grundlage zur Herstellung des künstlichen Schmutzes für die Verschmutzungsversuche an großen Asphaltprobekörpern. Diese Kurve ist ebenfalls in Bild 4.2-8 eingezeichnet. Der künstliche Schmutz ist feiner gewählt worden, da damit zu rechnen ist, dass der auf die Fahrbahnoberfläche gelangende Schmutz mehr Feinanteile besitzt als Schmutz, der durch Reinigung von der Fahrbahnoberfläche zurückgewonnen wird. Die Feinanteile werden eher (durch Regen) zur Seite (Richtung Bankett) abtransportiert und tauchen daher in Reinigungsgütern von der

Fahrbahn (Kehrgut, Nassreinigungsgut) nicht mehr auf. Betrachtet man die Korngrößenverteilung von (feinem) Bankettschälgut in Bild 4.2-8, stützt dies die These der Abwaschung der Feinanteile von der Fahrbahnoberfläche zum Bankett hin.

Aus den Untersuchungen im Teilprojekt TT 3221-3 liegen ebenfalls Angaben zum organischen Gehalt des gewonnenen OPA-Schmutzes vor: Als durchschnittlicher Wert für die Herstellung von künstlichem Schmutz kann ein organischer Anteil von Gew.-8 % angesetzt werden. Als Parameter für den organischen Anteil wird der Glühverlust (GV) angesetzt. Von der BAST ist zur Herstellung des künstlichen Schmutzes realer Reifenabrieb aus einem Reifenteststand zur Verfügung gestellt worden. Dieser wurde durch Mörsern noch etwas zerkleinert, um adäquate Korngrößen zu erhalten (der Organikanteil des Schmutzes findet sich hauptsächlich in sehr kleinen Korngrößen, s. oben). Der Reifenabrieb hat einen Glühverlust (GV) von 83 M.-% (bestimmt von Orgalab GmbH, TT 3221-3) und ist daher nur zu diesem Prozentsatz bei der Mischung des künstlichen Schmutzes als organisch anrechenbar. Der organische Anteil von 8 % im künstlichen Schmutz konnte aufgrund zu geringer vorhandener Mengen nicht allein mit dem Reifenabrieb er-

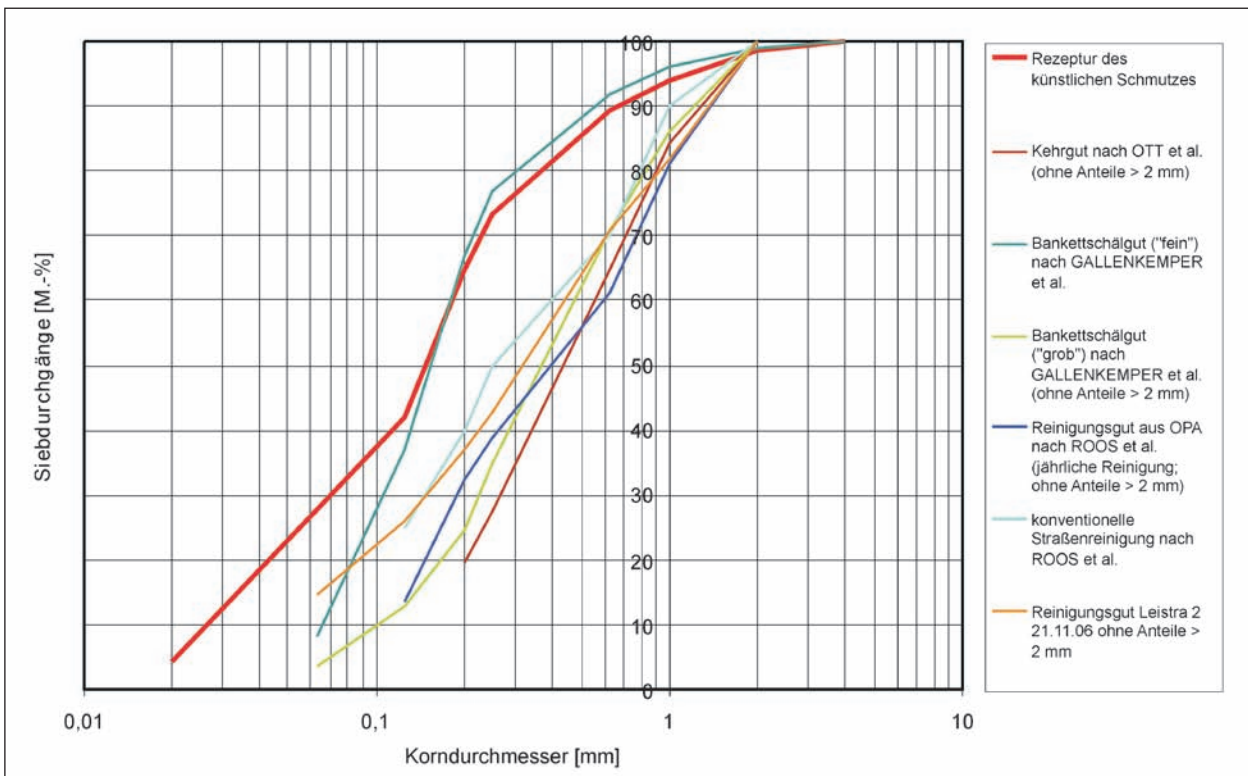


Bild 4.2-8: Übersicht über Korngrößenverteilungen von Straßenschmutz unterschiedlicher Herkunft und von künstlich hergestelltem Straßenschmutz

zielt werden. Aufgrund des relativ hohen TOC-Gehalts des Reifenabriebs ist in Absprache mit TT 3221-3 elementarer Kohlenstoff in Form von sehr feinem Kohlenstoffstaub (GV 100 %) als ergänzende organische Komponente eingesetzt worden.

Der anorganische Anteil des künstlichen Schmutzes ist aus handelsüblichen Mineralstoffen (hauptsächlich auf Quarzbasis) unterschiedlicher Körnung hergestellt worden. Zum Einsatz kommen dabei Kristallquarzmehl, Quarzsand und Flusssand 0/2, von denen jeweils die Korngrößenverteilung bekannt ist. Die Gesamtzusammensetzung des künstlichen Schmutzes zeigt Tabelle 4.2-5.

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

Tab. 4.2-5: Zusammensetzung des künstlichen Schmutzes aus den Einzelkomponenten

4.2.3 Ergebnisse von Untersuchungen an kleinen Asphaltprobekörpern

4.2.3.1 Vorversuche mit Bitumenprobekörpern

In Vorversuchen ist die geeignete Herstellungsart für Bitumenprobekörper ermittelt worden. Dabei haben Messungen der Kontaktwinkel (s. Bild 4.2-9 und Tabelle 4.2-6) mit Wasser an der Bitumenoberfläche gezeigt, dass sich durch Pressen von Bitumen unter Druck und hoher Temperatur andere Oberflächeneigenschaften als beim Gießen und anschließenden Erkalten an der Luft ergeben. Allein schon durch Augenschein konnte festgestellt werden, dass das an der Luft erkaltete Bitumen wesentlich glänzender aussieht. Die Messungen haben die daraus vermutete größere Hydrophobie der Oberfläche bestätigt.

In weiteren Vorversuchen ist ein Bitumenprobekörper aus B 30/45 mit handelsüblicher schmutzabweisender Fassadenfarbe mit Lotuseffekt beschichtet und die Kontaktwinkel gemessen worden (s. Tabelle 4.2-6). Erwartungsgemäß haben sich für die beschichtete „Lotuseffekt“-Oberfläche wesentlich höhere Kontaktwinkel und damit eine größere Hydrophobie ergeben.

Erste Haftfähigkeitsversuche durch Gitterschnitte haben ergeben, dass die Haftfähigkeit relativ hoch ist, zum Teil kommt es sogar zu Kohäsionsbrüchen des Bitumens, bevor die Adhäsion der Beschich-

Substrat	Kontaktwinkel [°]	Oberflächenenergie [mN/m]
Bitumen B 30/45 mit Lotuseffekt	143,69 ± 1,3	2,36
Bitumen B 30/45 ohne Lotuseffekt	95,65 ± 0,9	25,72
Bitumenoberfläche an der Luft erkaltet	100,57 ± 3,2	22,69
Bitumenoberfläche gepresst	85,43 ± 1,4	32,08

Tab. 4.2-6: Gemessene Kontaktwinkel und Oberflächenenergien

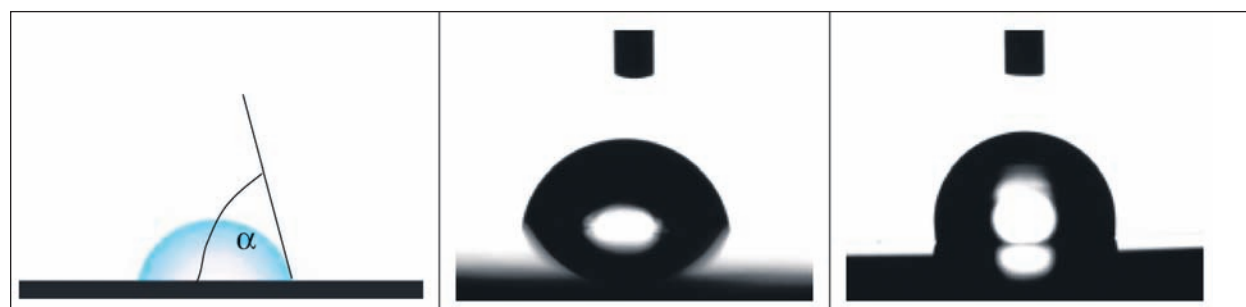


Bild 4.2-9: Messung von Kontaktwinkeln; Prinzip (links); Messung an gepresster Bitumenoberfläche (Mitte); Messung an Bitumenoberfläche, die an der Luft erkaltet ist (rechts)

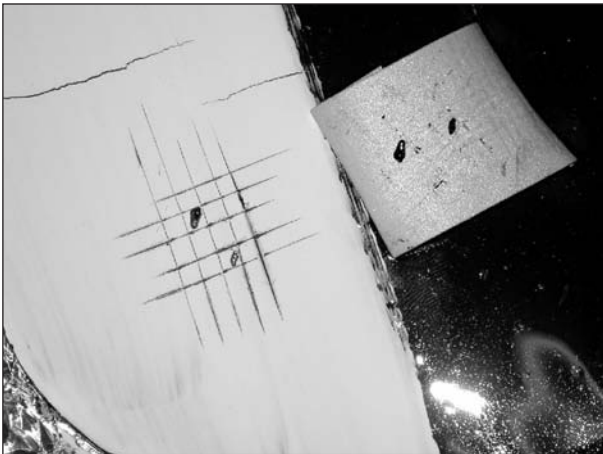


Bild 4.2-10: Haftfähigkeitsversuch von Fassadenfarbe mit Lotuseffekt auf einer Bitumenoberfläche mit Hilfe eines Gitterschnitts

ung versagt (siehe schwarze Stellen nach Abziehen des Klebebands in Bild 4.2-10).

4.2.3.2 Porenrauheit und Porenstruktur

Anhand detaillierter Strukturanalysen mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden Rauheiten von Porenrinnenwänden im Offenporigen Asphalt untersucht, um Rückschlüsse auf adäquates Beschichtungsmaterial und Verschmutzungsmechanismen zu ziehen. Die Untersuchungen wurden an Bohrkernen aus eingebauten Decken (neu und gebraucht) und labormäßig hergestellten Probekörpern durchgeführt. Am verschmutzten Probekörper können neben der Rauheit auch Verschmutzungsphänomene beobachtet werden.

Die in Bild 4.2-11 dargestellten Rasterelektronenmikroskopaufnahmen unterschiedlicher Auflösung zeigen Porenrinnenwänden von OPA 0/8 einer „realen“ neuen Decke, die auf der BAB 96 eingebaut worden ist.

Das obere Bild zeigt verschiedene Rauheitsstrukturen. Markiert sind beispielhaft Rauheitselemente, wie sie von Füllerpartikeln unterschiedlicher Größe erzeugt werden (2, 5, 6, 7). Darüber hinaus ist eine freiliegende Mineralstoffoberfläche zu erkennen (1). Zwischen den singulären Rauheitserhebungen liegen Bereiche, in denen die Oberflächenrauheit nur durch das „reine“ Bitumen erzeugt wird (3, 4). Im Bereich (8) können sich Rauheitsstrukturen des Mineralstoffs abzeichnen, die der Bitumenfilm nicht vollständig ausgleicht. Dies ist auf Grund der typischen Form zu vermuten, mangels Vergleichsaufnahmen des reinen Mineralstoffs aber nicht zu verifizieren. Des Weiteren sind auch einzelne sehr klei-

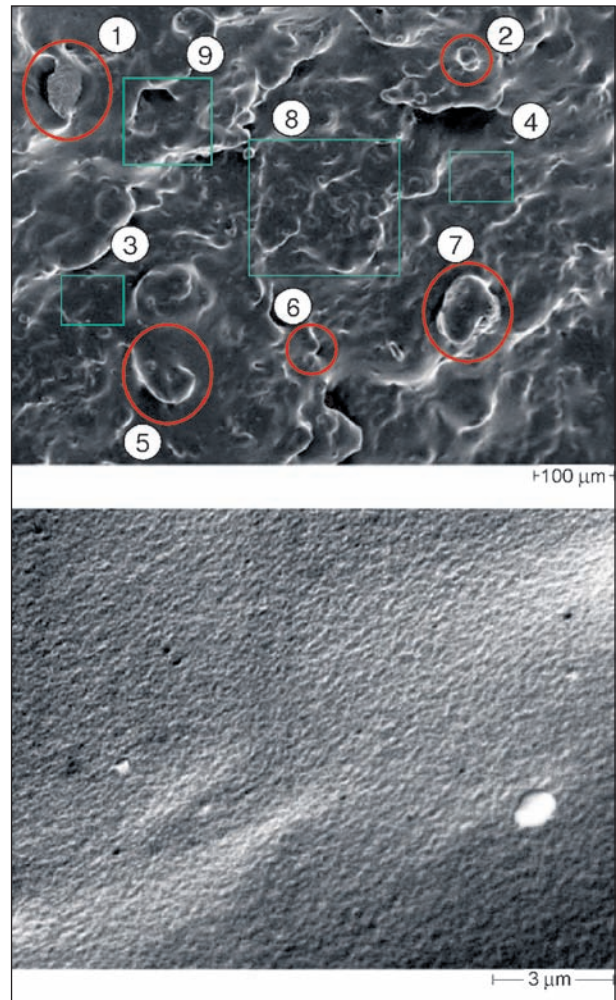


Bild 4.2-11: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Porenrinnenwänden in unterschiedlichen Auflösungen (reale OPA-Decke 0/8)

ne Poren ($< 0,1 \text{ mm}$) im Bitumenfilm zu erkennen, die im Folgenden als „Mikroporen“ bezeichnet werden sollen (9).

In Bild 4.2-11 unten ist eine stark vergrößerte „reine“ Bitumenoberfläche dargestellt. Auf diesem Bitumenfilm sind sehr feine, homogene Rauheitsstrukturen mit Wellenlängen $< 1 \text{ µm}$ zu erkennen, deren Herkunft nicht eindeutig geklärt werden konnte. Catana-Phasen („bienenartige“ Rauheitsstrukturen) sind in diesem Fall jedoch nicht zu erkennen.

In einer Diplomarbeit [18] sind in Zusammenarbeit mit dem Geologischen Zentrum der Universität Göttingen weitere Rasterelektronenmikroskopaufnahmen angefertigt worden. Im Unterschied zum oben beschriebenen Fall sind diese Aufnahmen an einem Laborprobekörper OPA 0/8 (Mineralstoff: Rhyolith, Bitumen PmB 45 A, Zellulosefasern als Bindemittelträger), der im Walzsegmentverdichter

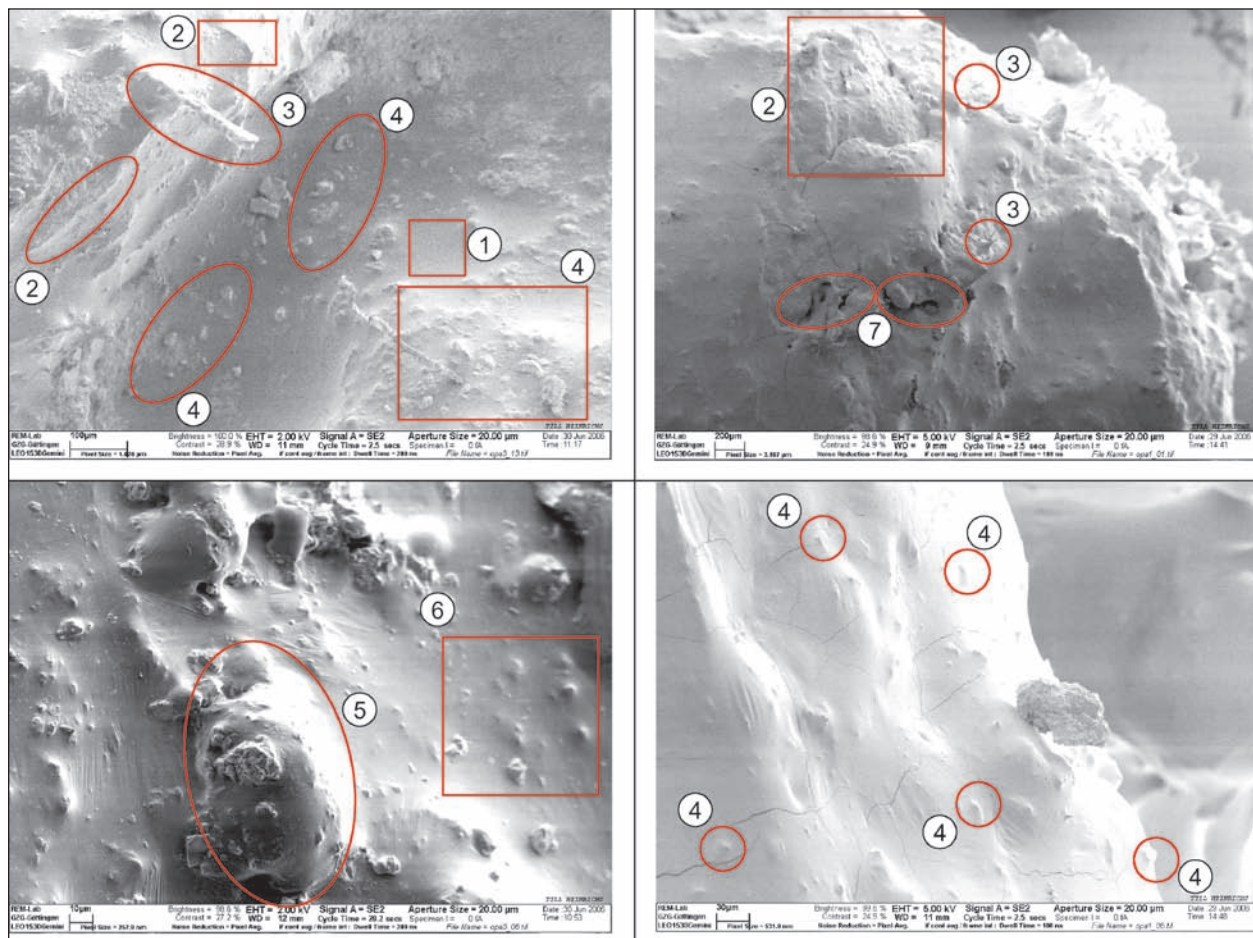


Bild 4.2-12: Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von Poreinnenwänden in unterschiedlichen Auflösungen (OPA-0/8-Laborprobekörper) [18]

hergestellt wurde, entstanden. Zusätzlich sind in [18] auch Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von „real“ verschmutztem OPA (Bohrkern aus einer Radspur von der BAB 3 bei Siegburg, zweilagig 11/16 und 2/5, Alter ca. 2,5 Jahre) angefertigt worden. Diese sind in Bild 4.2-12 nicht abgebildet, die hier beschriebenen Rauheitsphänomene sind aber prinzipiell auch auf diese Proben übertragbar und in den entsprechenden Aufnahmen (z. B. [11] und [18]) auch sichtbar.

Die untersuchten labormäßig hergestellten Probekörper zeigen die gleichen Rauheitsphänomene wie die oben beschriebenen Bohrkerne aus realen Fahrbahneinbauten. Bild 4.2-12 zeigt quasi glatte Bitumenfilme (1), freiliegende bzw. sich abzeichnende Rauheiten des Mineralstoffs (2) und Zellulosefasern (3) als Rauheitsbildner. Füllerpartikel (4) spielen eine gewichtige Rolle bei der Entstehung der Mikrorauheit der Porenwänden. Sie treten in sehr unterschiedlichen Größen auf (5, 6). Des Weiteren sind auch bei diesen Proben sehr kleine Mikroporen in der Bitumenfilmoberfläche zu erkennen (7).

Unterschiedliche Mechanismen, wie die Rauheit in den Poren zustande kommt, werden in Bild 4.2-13 zusammenfassend in Form von Prinzipskizzen dargestellt. Darin stellt Fall 1 eine Rauheitsstruktur dar, wie sie von einem „reinen“ Bitumenfilm erzeugt wird; in Fall 2 wird die Rauheit durch die Mikrorauheit des Mineralstoffs gebildet. Fall 3 stellt die Bildung von Rauheitselementen durch Füllerpartikel und/ oder Zellulosefasern dar. Bei den Fällen 2 und 3 ist zu unterscheiden, ob sich die Rauheiten durch den Bitumenfilm „abzeichnen“ oder tatsächlich freiliegen, d. h. nicht mehr mit Bitumen bedeckt sind. Fall 4 ist eine Kombination der Fälle 1, 2 und 3 und entspricht der in den Untersuchungen vorgefundenen Realität auf den Porenoberflächen. Darüber hinaus treten Mikroporen im Bitumenfilm auf, die unter anderem durch entsprechende Anordnungen von Füllerpartikeln/Zellulosefasern entstehen können.

Die Mikrorauheit kann zusammenfassend als sehr inhomogen charakterisiert werden; regelmäßige Strukturen, von denen sich Parameter wie Rautie-

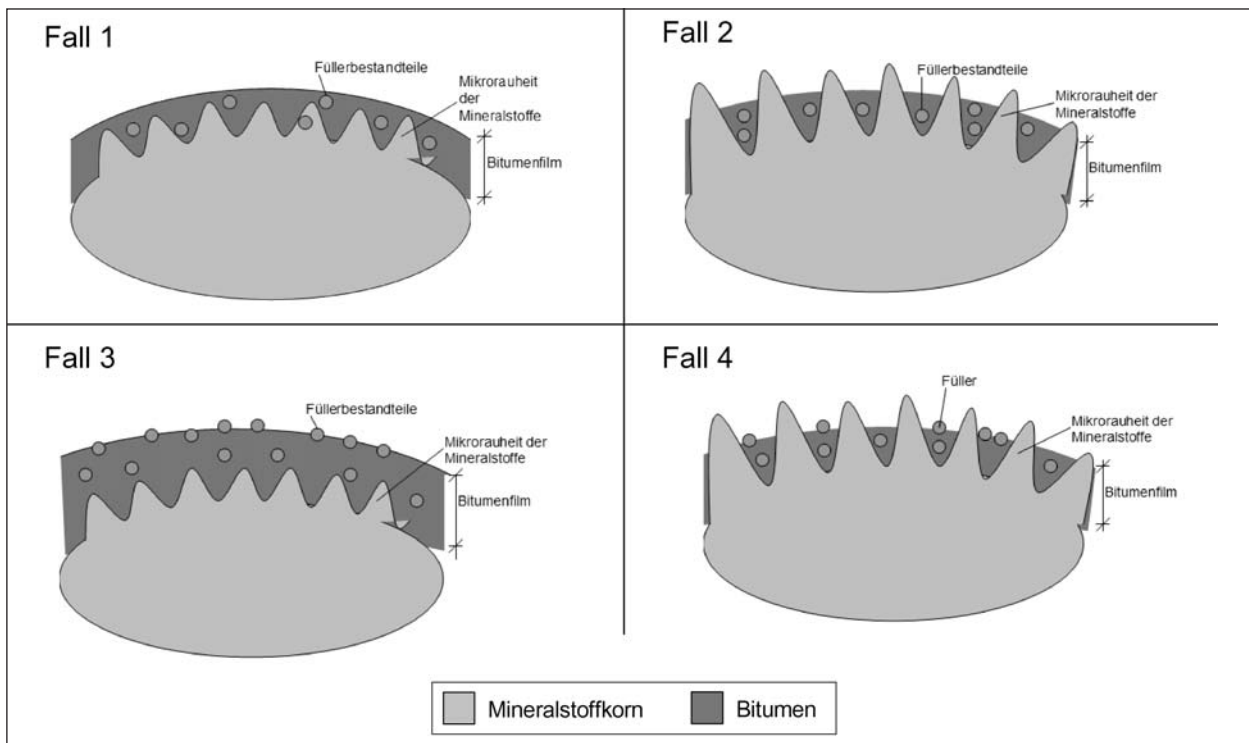


Bild 4.2-13: Mechanismen der Entstehung der Porenrauheit im OPA; Bitumenfilm (Fall 1); Bitumenfilm mit Rauheiten des Mineralstoffs (Fall 2); Bitumenfilm mit Füllerpartikeln als Rauheitselemente (Fall 3); Bitumenfilm mit Rauheitsspitzen des Mineralstoffs und Füllerpartikel als Rauheitselemente (Fall 4)

fen oder Spitzenabstände ableiten lassen, sind nicht zu erkennen. Beschreiben lässt sich das Rauheitsbild durch einzelne, unregelmäßige Rauheitsspitzen, die durch Füllerpartikel verursacht werden, und dazwischenliegende ausgeprägte Rauheitstäler. Hier finden sich neben Rauheiten, die sich durch einen dünnen Bitumenfilm abzeichnen (z. B. durch Mineralstoffe), hauptsächlich „reine“ Bitumenoberflächen. Ein Unterschied hinsichtlich der Porenrauigkeiten zwischen im Feld eingebauten Decken und labormäßig hergestellten Probekörpern ist nicht festzustellen.

Da keine einheitliche Rauheit der Porenwandungen festgestellt werden konnte, ist die Wahl einer geeigneten Beschichtung, die den reinen Ausgleich dieser Rauheit als Ziel hat, als schwierig einzuschätzen. Um alle auftretenden Phänomene mit einer Beschichtung abdecken zu können müssten lokal unterschiedlich starke Beschichtungsfilme aufgetragen werden, was anwendungstechnisch unmöglich erscheint. Somit muss eine Beschichtung, die (annähernd) gleiche Filmstärken erzeugt, unverhältnismäßig dick aufgetragen werden, um auch die großen Rauheitselemente „schlucken“ zu können. Es ist zu erwarten, dass auch die Haftbedingungen auf diesen sehr unterschiedlich rauen Oberflächen lokal unterschiedlich sein werden.

4.2.3.3 Verschmutzungsmechanismen

Mit Hilfe der Dünnschlifftechnik sind aus labormäßig verschmutzten Probekörpern Polarisationsmikroskopieaufnahmen angefertigt worden, die verschiedene typische Verschmutzungsmechanismen von offenporigen Asphaltdecken zeigen [11]. Weiterhin sind in diesem Zusammenhang auch Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen von „real“ verschmutztem OPA (Bohrkern aus einer Radspur von der BAB 3 bei Siegburg, zweilagig 11/16 und 2/5, Alter ca. 2,5 Jahre) angefertigt worden, an denen auch „typische“ Verschmutzungsphänomene sichtbar gemacht werden können [18]. Diese Aufnahmen aus einer „realen“ Decke sind in Bild 4.2-14 mit „R“ gekennzeichnet.

In Bild 4.2-14 werden die verschiedenen typischen Verschmutzungsmechanismen veranschaulicht (die folgende Nummerierung entspricht der Beschriftung in Bild 4.2-14):

- Aus dem OPA bzw. dem Bitumenfilm, der die Mineralstoffe umhüllt, brechen kleine Bitumenpartikel, Füller- und Faserpartikel (teilweise mit Bitumen umhüllt) und kleinere Mineralstoffkörner aus. Dies geschieht bereits rein durch die drucklose Durchströmung mit Wasser. Das Phänomen, das hier bei „neuen“ OPA-Probekörpern

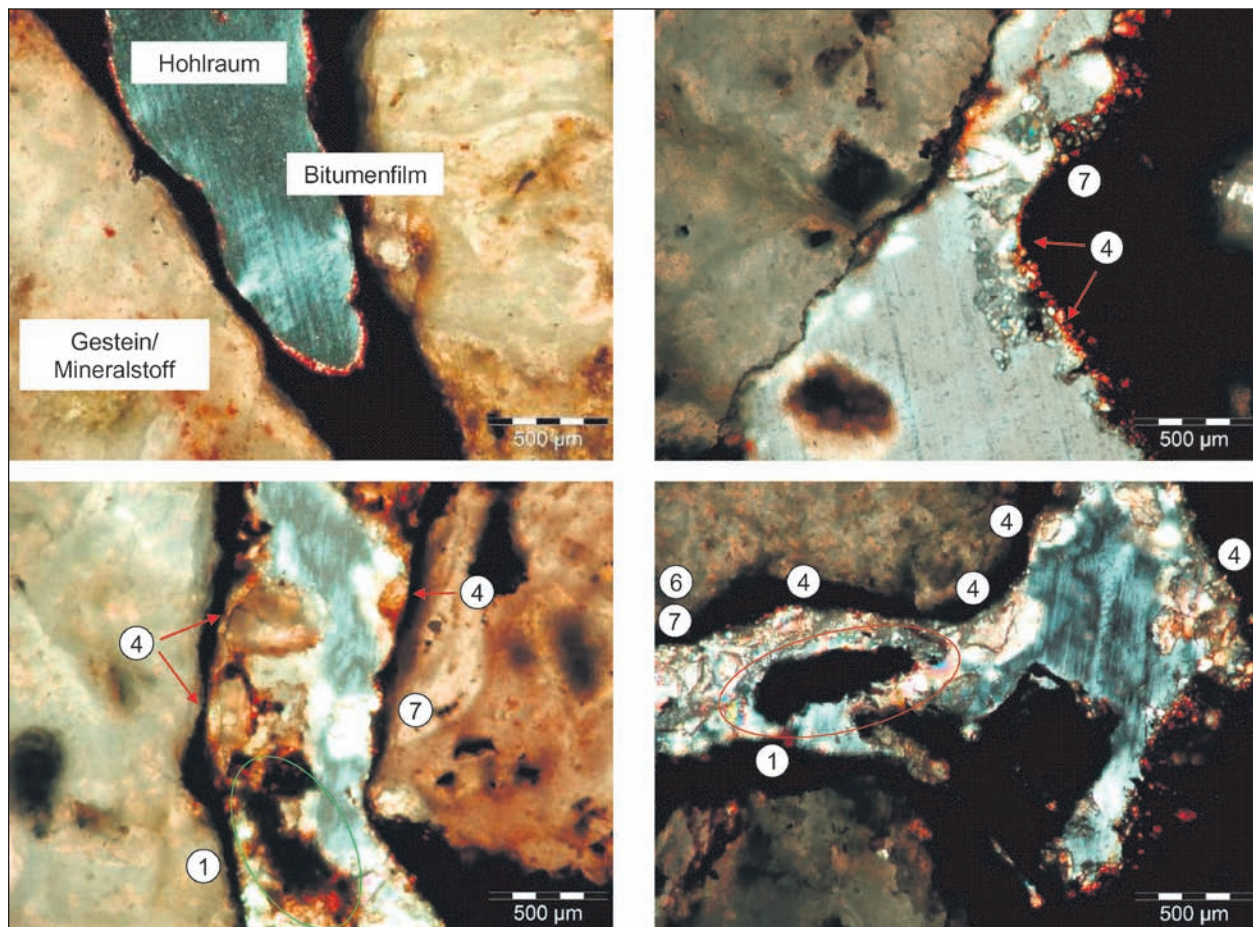


Bild 4.2-14 (1): Verschmutzungsmechanismen von Offenporigem Asphalt, Dünnschliffe, Polarisationsmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie [11, 18]

auftritt, ist auch bei älteren, „realen“ Decken bereits beobachtet worden. Hier handelt es sich bei den Ausbrüchen um gealtertes Bitumen bzw. hochmolekulare Bestandteile daraus. Die herausgebrochenen Partikel wandern durch Sedimentation in untere Schichten des OPA bzw. in Poren, die nur einseitig offen sind. Auch im ausgeschwemmten Schmutz sind mit bloßem Auge kleine Bitumenpartikel, mit Bitumen umhüllte kleine Mineralstoffkörner und Faserausbrüche zu erkennen (s. Bild 4.2-14) (1).

- Während des Misch- und Herstellungsprozesses des OPA bilden sich an manchen Stellen im grobkörnigen Gerüst des OPA Ansammlungen von feineren Mineralkörnern, vorzugsweise Füllpartikeln. Die Porenräume des Offenporigen Asphalts werden demnach schon bei der Herstellung durch diese Ansammlungen zumindest teilweise verfüllt. Aus diesen nur schwach verklebten Fülleransammlungen können überdies leicht Bitumen- oder Füllpartikel ausbrechen, die weiter zur Verschmutzung, wie sie unter Punkt (1) beschrieben ist, beitragen (2).

Die Phänomene (1) und (2) können zusammenfassend als „Eigenverschmutzung“ des Offenporigen Asphalts bezeichnet werden.

- Kleine Bitumenpartikel, die aus (1) stammen, können die mineralischen Schmutzpartikel untereinander verkleben, dies wird insbesondere durch Erwärmung noch begünstigt (3).
- Tausalz kann zu Verklumpungen der mineralischen Schmutzstoffe führen. Die Schmutzstoffe werden dabei in ein stabiles Kristallgitter, das NaCl und CaCl_2 beim Auskristallisieren bilden, regelrecht eingeschlossen und dadurch zusammengehalten (3a).
- Schmutzpartikel lagern sich an den Porenwänden durch Adhäsion an (4).
- Mit der Zeit und/oder durch den Einfluss von Wärme lagern sich die Schmutzpartikel nicht nur an der Oberfläche an, sondern betten sich regelrecht in den Bitumenfilm ein (5).
- Schmutz sammelt sich in einseitig in offenen Poren oder in Poren bzw. Porenkanälen, die

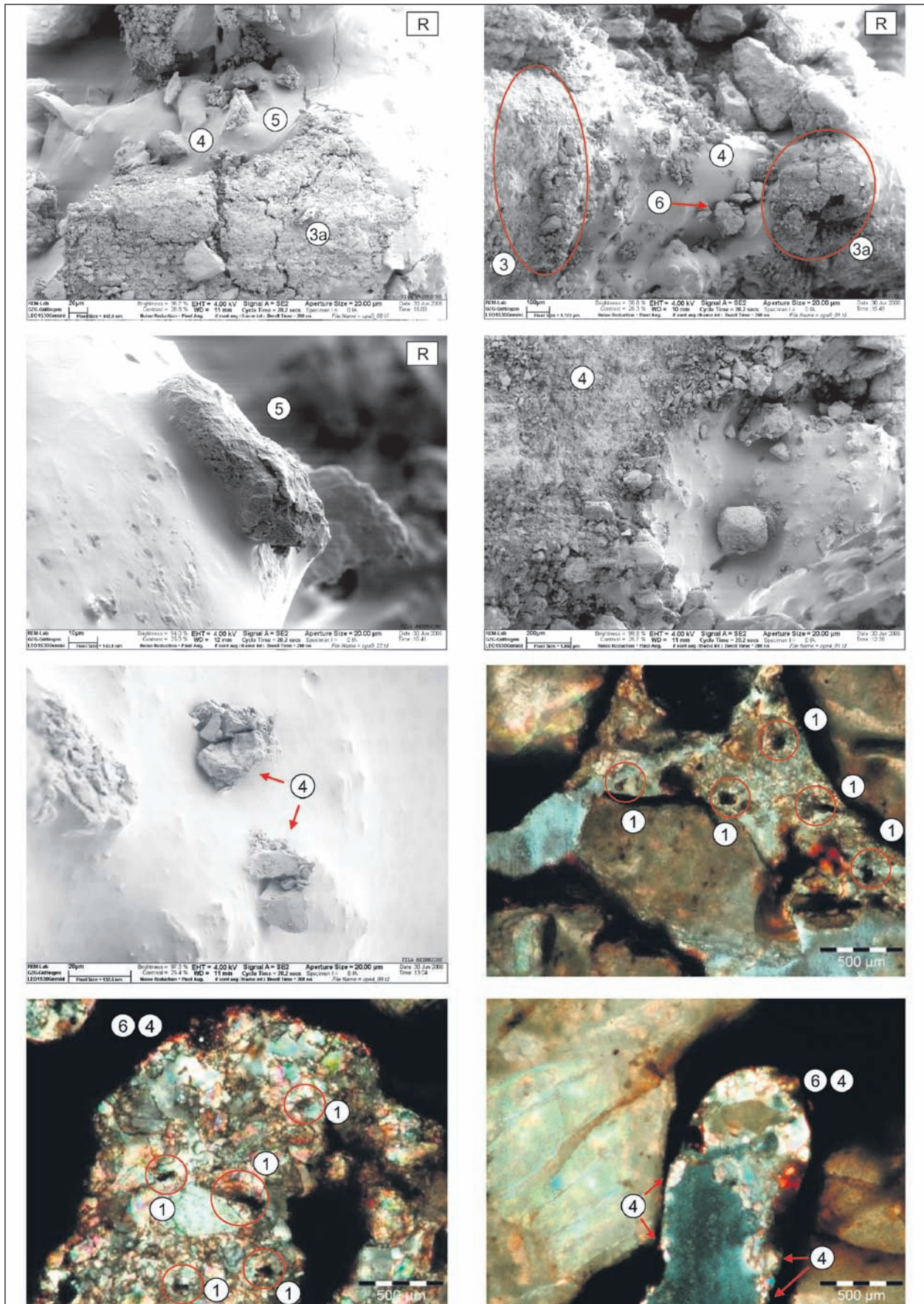


Bild 4.2-14 (2): Verschmutzungsmechanismen von Offenporigem Asphalt (Dünnschliffe, Polarisationsmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie [11, 18])

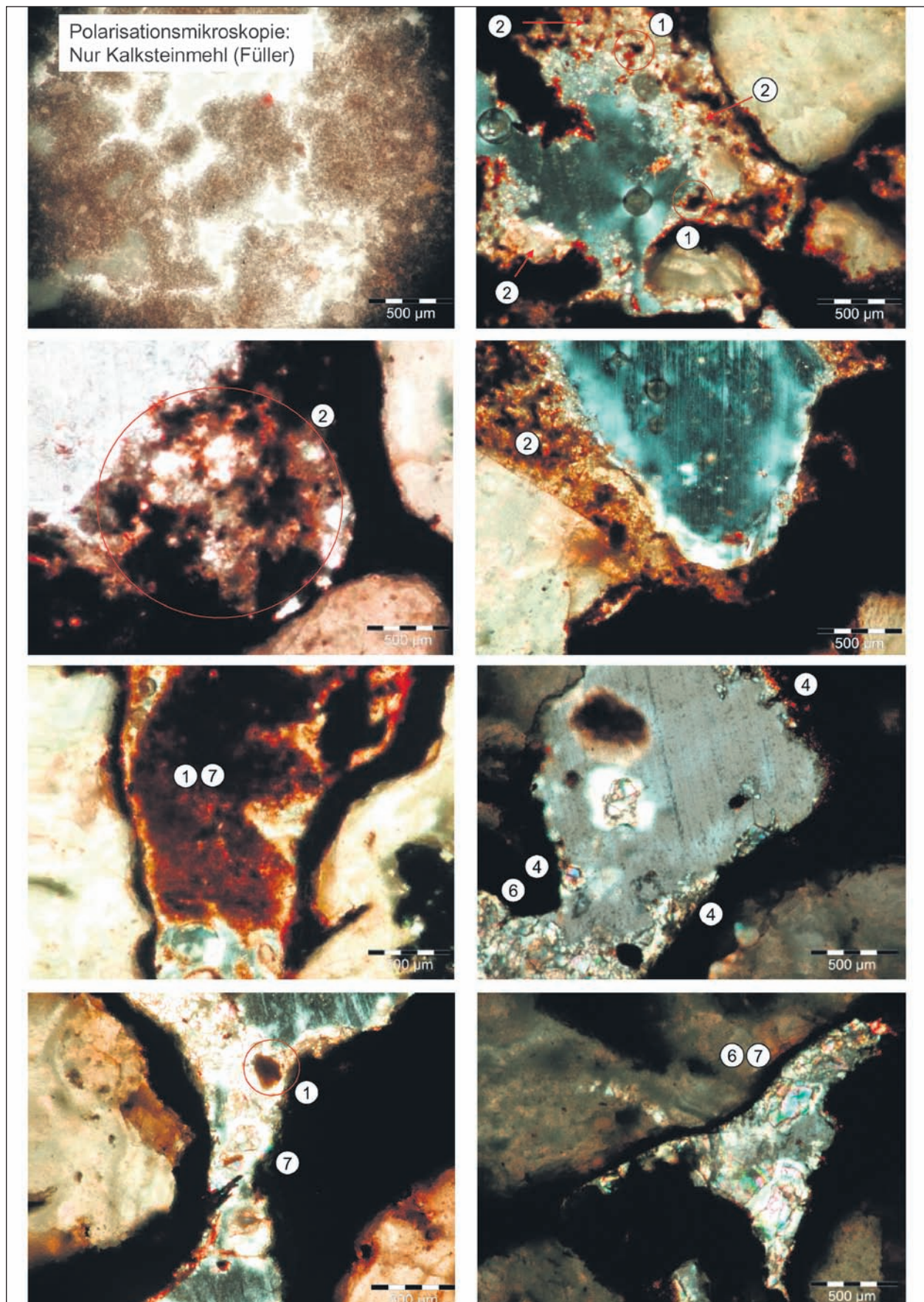


Bild 4.2-14 (3): Verschmutzungsmechanismen von Offenporigem Asphalt (Dünnschliffe, Polarisationsmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie)

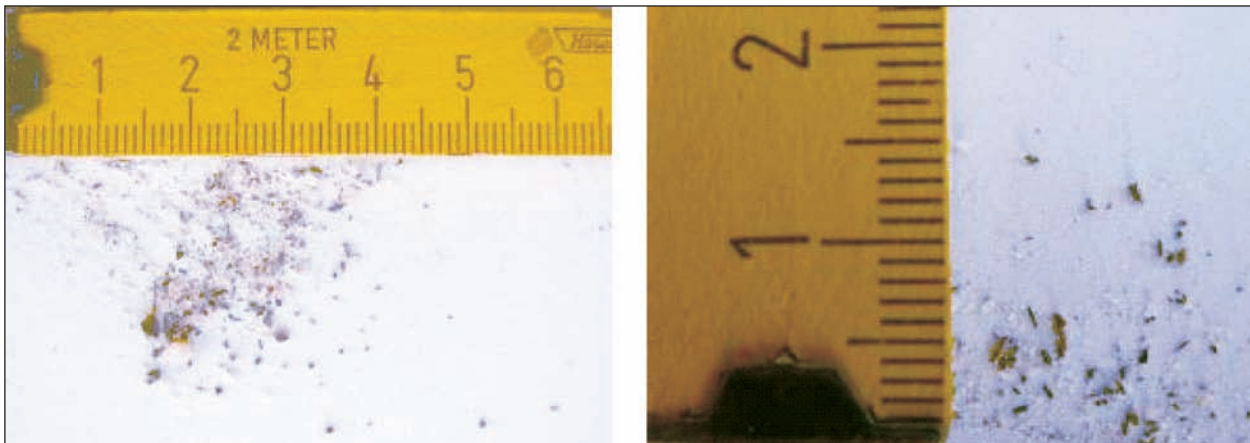


Bild 4.2-15: Bitumenpartikel, Korn- und Faserausbrüche im ausgeschwemmten Schmutz

durch größere Schmutzpartikel bereits verschlossen sind. Die Poren werden dadurch schrittweise immer weiter verfüllt, da ein Weitertransport des Schmutzes nicht mehr stattfindet. Es sind unterschiedlich dichte Packungen solcher Schmutzansammlungen zu beobachten (6).

- Schmutzpartikel verstopfen Poren bzw. Verbindungen zwischen den Poren (7).

Ein Einfluss des Tausalzes auf den Verschmutzungsprozess konnte in den Verschmutzungsversuchen mit den kleinen Asphaltprobekörpern tendenziell nachgewiesen werden. Vorher-Nachher-Wägungen der verschmutzten Probekörper haben gezeigt, dass in den zusätzlich mit Salz behandelten Probekörpern mehr (mineralischer) Schmutz in den Probekörpern verbleibt als in den nur mit Schmutz behandelten. Durch die Wärmebehandlungen wird die Tendenz, dass mehr Schmutz im Probekörper verbleibt, noch etwas verstärkt.

Hierbei ist zu beachten, dass diese Versuche keine statistisch abgesicherte Aussage liefern können, es handelt sich um eine erste Schätzung. Genauere Daten werden in weiteren Versuchen an großen Asphaltprobekörpern gewonnen.

Im Hinblick auf die Strategie, die Verschmutzungsneigung des OPA durch gezielte Veränderung (Beschichtung/stratifizierende Polymere) der Porenwänden herabzusetzen, ergeben sich aus den beobachteten Phänomenen einige Folgerungen. Der Adhäsion an den Porenwänden (4) soll durch die Veränderung der Oberfläche gezielt entgegengewirkt werden. Dadurch, dass der Schmutz nicht in der gleichen Weise wie auf dem unbehandelten Bitumenfilm anhaften kann, soll darüber hi-

naus auch die Einbettung des Schmutzes (5) in das Bitumen verhindert werden. Durch die Verminderung dieser Mechanismen sollen, wenn auch nur indirekt, die anderen Verschmutzungsphänomene in unterschiedlich starker Form ebenfalls abgeschwächt werden.

4.2.3.4 Kapillare Wasseraufnahmefähigkeit und Trocknungsverhalten von Offenporigem Asphalt, Theorie der Mikroporen und abgeleitete Thesen

Im Rahmen einer Diplomarbeit [11] sind Versuche zur kapillaren Wasseraufnahme von kleinen Asphaltprobekörpern (OPA 0/8; zugeschnitten auf 13 x 16 x 4 cm) sowie Trocknungsversuche durchgeführt worden. Dabei wird durch einseitige Wasserlagerung einer geschnittenen Fläche (16 x 4 cm) die Wasseraufnahme des Probekörpers über die Zeit aufgezeichnet.

Bild 4.2-16 zeigt, dass der Probekörper erwartungsgemäß in kurzer Zeit eine gewisse Wassermenge aufnehmen kann (0,5 kg/m² Wasser in weniger als 1 Stunde, das entspricht 3,2 g). Im weiteren Verlauf schwächt sich die Wasseraufnahmerate (Steigung des Graphen) ab, die Wasseraufnahme ist aber selbst nach 36 Stunden noch nicht beendet, eine, wenn auch schwache, Wasseraufnahme ist auch zu diesem Zeitpunkt noch vorhanden. Am Ende der Messung nach 36 Stunden hat der Probekörper ungefähr 10,9 g (entspr. ca. 1,7 kg/m²) Wasser aufgenommen. Diese sehr lange andauernde Wasseraufnahme deutet auf die Existenz kleiner kapillar wirksamer Poren (Mikroporen) in nennenswertem Umfang hin, in die auch nach vielen Stunden noch Wasser durch Kapillarkräfte „hineingesaugt“ werden kann.

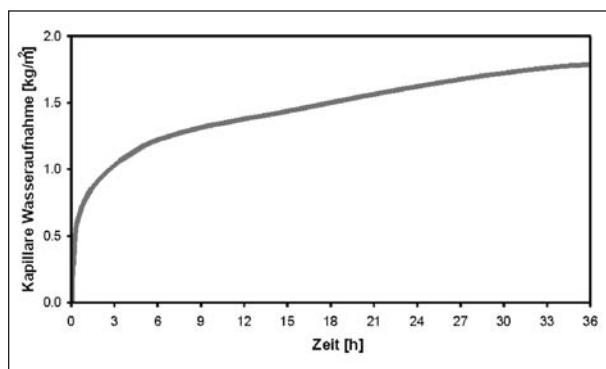


Bild 4.2-16: Kapillares Wasseraufnahmeverhalten eines OPA-0/8-Probekörpers [11]

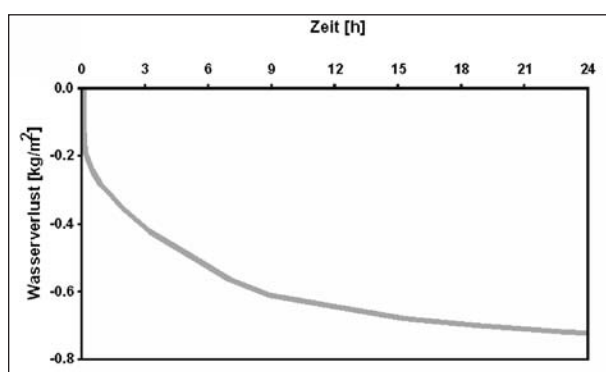


Bild 4.2-17: Trocknungsverhalten eines OPA-0/8-Probekörpers

Das Trocknungsverhalten ist an einem Probekörper gleicher Maße und gleichen Materials wie oben bei Raumbedingungen (20 °C, 50 % rel. Luftfeuchte, sehr geringe Luftbewegung) durchgeführt worden. Bild 4.2-17 zeigt die Wasserabgabe eines zu Beginn wassergesättigten Probekörpers. Am Anfang ist ein initialer Wasserverlust zu verzeichnen, das Wasser fließt aus den gefüllten Poren ab. Nach dieser Spontanentwässerung, die mengenmäßig hier gar nicht komplett erfasst werden kann, verbleiben aber noch erhebliche Wassermengen im Probekörper, die in der Folge nur langsam, zu Beginn noch durch Herausfließen, später nur noch durch Verdunstung, wieder abgegeben werden. Auch nach 24 h (Ende der Messung) ist die Trocknung noch nicht abgeschlossen, d. h., es ist immer noch Wasser im Probekörper vorhanden. Das Wasser wird aus diesen Poren nur durch Verdunstung wieder aus dem Probekörper abgegeben. Eventuell mitgetragener Schmutz (und/oder Salz) bleibt in diesem Fall im Offenporigen Asphalt zurück. Dieses „langfristige“ Wasserspeichervermögen gibt einen weiteren Hinweis auf die Existenz sehr kleiner kapillar wirksamer Poren (Mikroporen), in denen die Kapillarkräfte größer sind als die Gewichtskräfte, die das Wasser zum Abfließen bringen könnten.

Weitere Versuche an OPA-0/8-Probekörpern (13 x 16 x 4 cm) weisen in die gleiche Richtung: Die Proben werden mit 50 g Wasser gleichmäßig besprüht und durch Wägung der Proben in bestimmten Zeitintervallen die Masse des im Probekörper verbliebenen Wassers bestimmt. Es zeigt sich ein typisches Wasserabgabeverhalten, das auch bei Wiederholungsmessungen bestätigt werden konnte. Bei einem Verlust von ca. 10 g Wasser während des Versuchs wird ein Teil des Wassers spontan wieder abgegeben (Spontanentwässerung, ca. 20 g Wasser), der andere Teil (ca. 20 g) verbleibt zunächst im Probekörper und entweicht nur langsam über einen Zeitraum von mehr als 24 h durch Verdunstung.

Die Mikroporen, auf die die Versuchsergebnisse der Wasseraufnahme und der Trocknung hindeuten, sind auch in den Rasterelektronenmikroskop-aufnahmen und den Mikroskopiebildern der Dünnschliffe zu erkennen. Sie weisen sehr unterschiedliche Größen auf. Mikroporen sind teilweise abgeschlossene Systeme (nur einseitig offene Poren), teilweise bilden sie aber auch die Verbindung zwischen zwei größeren Poren (s. Bild 4.2-18).

Das Phänomen ist auch bei „realen“ Decken zu beobachten (hier: Bohrkern aus einer Radspur von der BAB 3 bei Siegburg, zweilagig 11/16 und 2/5, Alter ca. 2,5 Jahre). Diese Aufnahmen aus einer „realen“ Decke sind in Bild 4.2-18 mit „R“ gekennzeichnet.

Das Phänomen der Mikroporen ist auch in Computertomografie-Aufnahmen, die von der Bundesanstalt für Materialprüfung in Berlin (BAM) angefertigt worden sind, in Form von Verbindungen zwischen Poren zu beobachten. In Bild 4.2-19 ist ein horizontaler Schnitt durch eine OPA-0/8-Probe dargestellt. Zu erkennen (in diesem Fall allerdings nur in einer ebenen 2D-Darstellung) sind Zusammenhänge von Poren, die aufgrund ihrer Größe als Mikroporen bezeichnet werden können. Dargestellt und farblich gekennzeichnet sind außerdem Poren mit verschiedenen Schnittflächeninhalten (F) und Umfängen (U) in der Schnittebene. Aussagen zu typischen Porenformen und Porengrößen können bei entsprechendem Untersuchungsumfang daraus abgeleitet werden [18]. Diese Untersuchung ist allerdings nicht weitergeführt worden.

Aus der Existenz der beschriebenen Mikroporen ergeben sich einige Folgerungen bzw. Thesen.

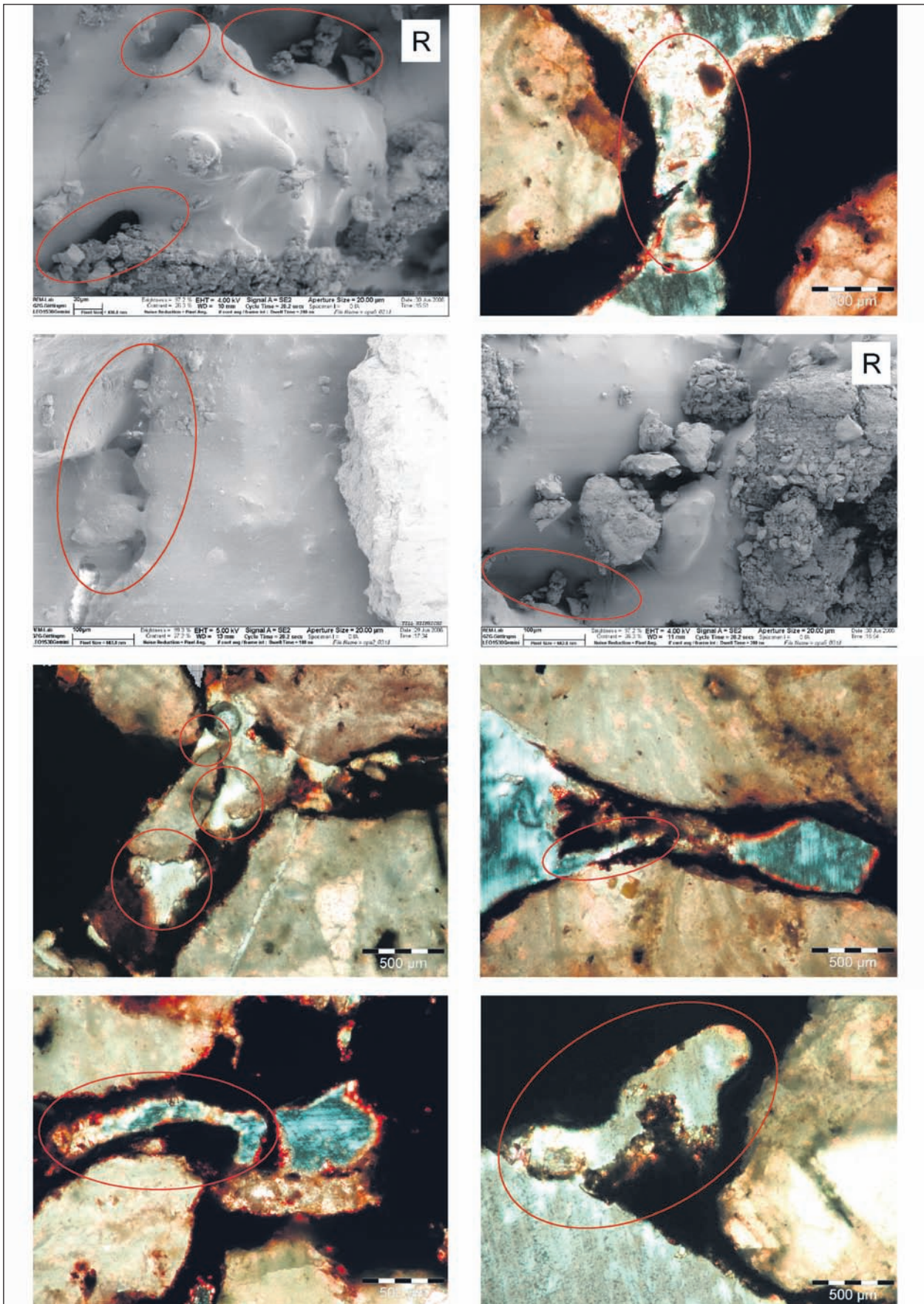


Bild 4.2-18: Mikroporen im Bitumenfilm der OPA-Poren eines OPA-0/8-Probekörpers und eines OPA-0/8-Bohrkerns (gekennzeichnet mit „R“) [11] [18]

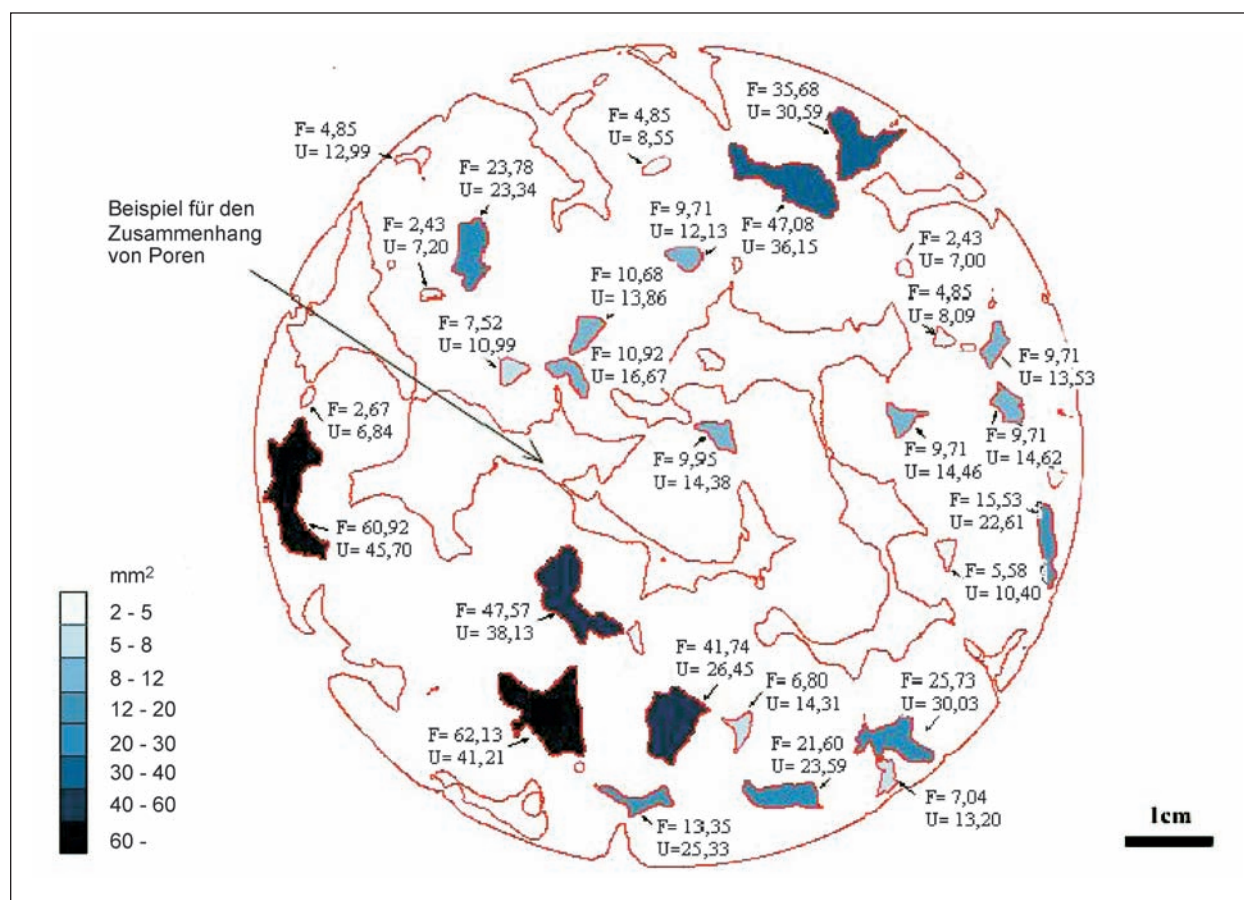


Bild 4.3-19: Horizontaler Schnitt durch eine OPA-0/8-Probe (Bild: BAM, Berlin; Auswertung: [18])

Die Mikroporen sind ein geradezu idealer Ablagerungsort für Schmutz. Wasser mit Schmutzfracht kann durch kapillare Kräfte in diese Poren „hineingesaugt“ werden, fließt von dort aber nicht mehr ab, sondern verdunstet und lässt den Schmutz zurück. Auch im Wasser gelöste Tausalz kann in diesen sehr kleinen Poren auskristallisieren und die Verschmutzung noch verstärken. Es ist zu mutmaßen, dass in den Mikroporen (unter normalen Umständen, Reinigungsvorgänge ausgenommen) keine Strömungen entstehen können, die stark genug wären, den Schmutz von dort wieder abzutransportieren. Mikroporen, die als Verbindung zwischen Poren dienen, werden zudem leicht zu Verstopfungen neigen. Dadurch können die Haupteigenschaften des OPA, die Drainwirkung und die lärmindernde Wirkung, auch schon durch kleine Schmutzmengen stark herabgesetzt werden.

Hieraus ergibt sich eine weitere These: Die Schmutzmengen, die aus dem OPA herausgereinigt werden können, machen volumenmäßig nur einen Bruchteil des vorhandenen Hohlraumgehalts aus. Das könnte bedeuten, dass der eingetragene

Schmutz nicht durch Verringerung des Hohlraumgehalts die Funktionen Entwässerung und Lärminderung herabsetzt, sondern dass die Verstopfung der Porenverbindungen (und hier hauptsächlich der kleinen Mikroporen) zum Verlust der Haupteigenschaften Lärminderung und Entwässerung führt.

Darüber hinaus können die Mikroporen auf Grund ihrer langfristigen Wasserspeicherkapazität im Winter verstärkte Reifbildung auf der OPA-Fahrbahnoberfläche durch aufsteigende und gefrierende Feuchte begünstigen.

Bei einer Beschichtung der OPA-Poren ist bezüglich der Mikroporen Folgendes zu beachten: Eine Beschichtung könnte die Mikroporen verfüllen, sowohl die nur einseitig offenen Poren als auch Porenverbindungen. Vor allem der letztgenannte Punkt ist als sehr kritisch für die Eigenschaften des OPA zu bewerten. Bei den Beschichtungsversuchen sind diese genannten Phänomene daher unbedingt begleitend zu beobachten.

4.2.4 Ergebnisse der Untersuchungen zu Beschichtung und Stratifizierung des OPA mittels Polymertechnologie

4.2.4.1 Beschichtungsversuche von Bitumen mit hydrophobisierender Dispersionsfarbe (Lotusan)

Ein Anhaltspunkt für die schmutzabweisenden, d. h. mit Wasser selbstreinigenden Eigenschaften einer Beschichtung ist die Hydrophobie der Beschichtungsoberfläche. Unter Verwendung einer kommerziellen schmutzabweisenden Dispersionsfarbe (Lotusan) wurde eine Verdünnungsreihe in Wasser angefertigt und die Hydrophobie der erhaltenen Beschichtung in Abhängigkeit von der Verdünnung untersucht. Mit diesen Experimenten sollte überprüft werden, inwieweit eine im Handel erhältliche und als „schmutzabweisender“ Fassadenanstrich verwendete Dispersionsfarbe verdünnt werden kann, um als Beschichtung auf Bitumen noch eine – im Vergleich zur reinen Bitumenoberfläche – hydrophobere Beschichtung zu ergeben.

Kontaktwinkelmessungen an auf die Beschichtung aufgetragenen Wassertropfen ergaben bis zu einer Verdünnung von 90 % einen konstanten Wert von ca. 133°; erst bei höherer Verdünnung wurde eine Abnahme des Kontaktwinkels beobachtet (s. Bild 4.2-20); im Vergleich dazu beträgt der H₂O-Kontaktwinkel auf Bitumen 98°. Dies zeigt, dass das Aufbringen einer geeigneten wässrigen Dispersionsfarbe in relativ hoher Verdünnung ausreicht, um eine im Vergleich zur Bitumenoberfläche signifikant erhöhte Oberflächenhydrophobie zu erzielen. Erst bei Verdünnungen deutlich > 90 % nimmt der hydrophobierende Effekt ab. Dieser Befund wird auch visuell bestätigt, wie die in Bild 4.2-20 wiedergegebenen Photographien der Beschichtung zeigen.

Diese an der freien Oberfläche einer flachen Bitumenschicht erhaltenen Befunde lassen sich nur bedingt auf die Bitumenoberfläche der Poreninnenwandungen übertragen; dies haben Untersuchungen von OPA-Platten nach dem Durchlaufen verdünnter Dispersionen gezeigt: Die Poreninnenwandungen der mit einer 90 % verdünnten Dispersionsfarbe behandelten OPA-Platte scheinen auf den ersten Blick weniger gut mit Dispersionsfarbe beschichtet zu sein (geringerer Weißgrad) als nach Behandlung mit einer nur 10 % verdünnten Dispersionsfarbe, wie an den Bruchflächen zu sehen ist (s. Bild 4.2-21); dies deutet auf unterschiedliche Benetzung hin. Auf der anderen Seite zeigt der mit der

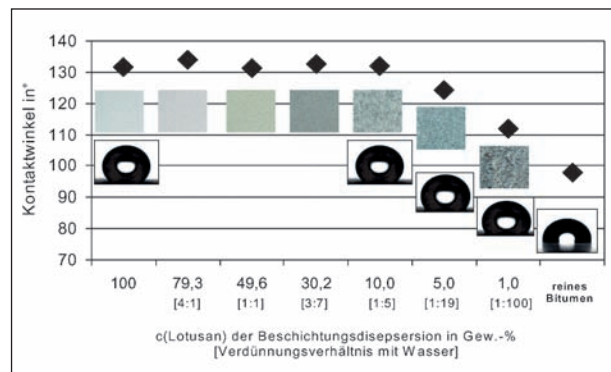


Bild 4.2-20: Abhängigkeit des Kontaktwinkels eines Wassertropfens vom Verdünnungsverhältnis der Dispersionsfarbe auf der Oberfläche

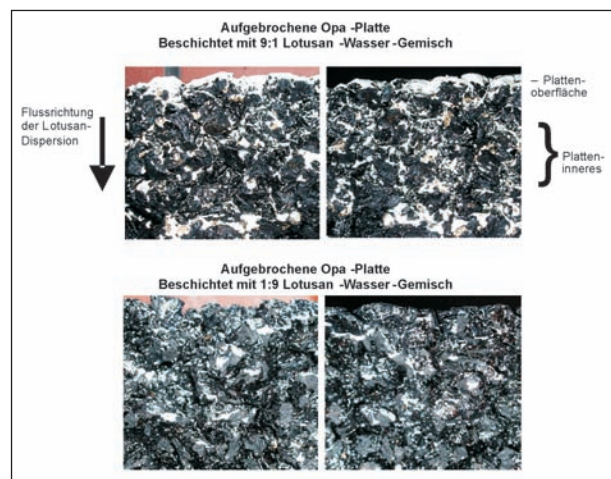


Bild 4.2-21: Mit Lotusan beschichtete und aufgebrochene OPA-Platten

konzentrierten Dispersion behandelte OPA aber auch „Beschichtungsnerster“, was auf Porenverstopfung hinweist.

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit der Ergebnisse der Benetzungsfähigkeit von flachen Substraten auf die Poreninnenwandungen in Offenporigen Asphalten sind zwei OPA-Probekörper beschichtet worden.

4.2.4.2 Stratifizierungsuntersuchungen

Im Rahmen der Untersuchungen zur Stratifizierung von Polymeradditiven im Bitumen (PmB 45 A nach TL PmB 2001) zur Hydrophilierung und Hydrophobierung der Oberfläche wurden verschiedene Mischungsreihen mit unterschiedlichen Konzentrationen von amphipolaren Blockcopolymeren hergestellt. Zum einen wurden Polymere mit hydrophilen Polyethylenoxid- und hydrophoben Poly(propylenoxid) – sowie Poly(ethylenblöcken) verwendet, zum anderen Block- und Pfropfcopolymere auf Polydi-

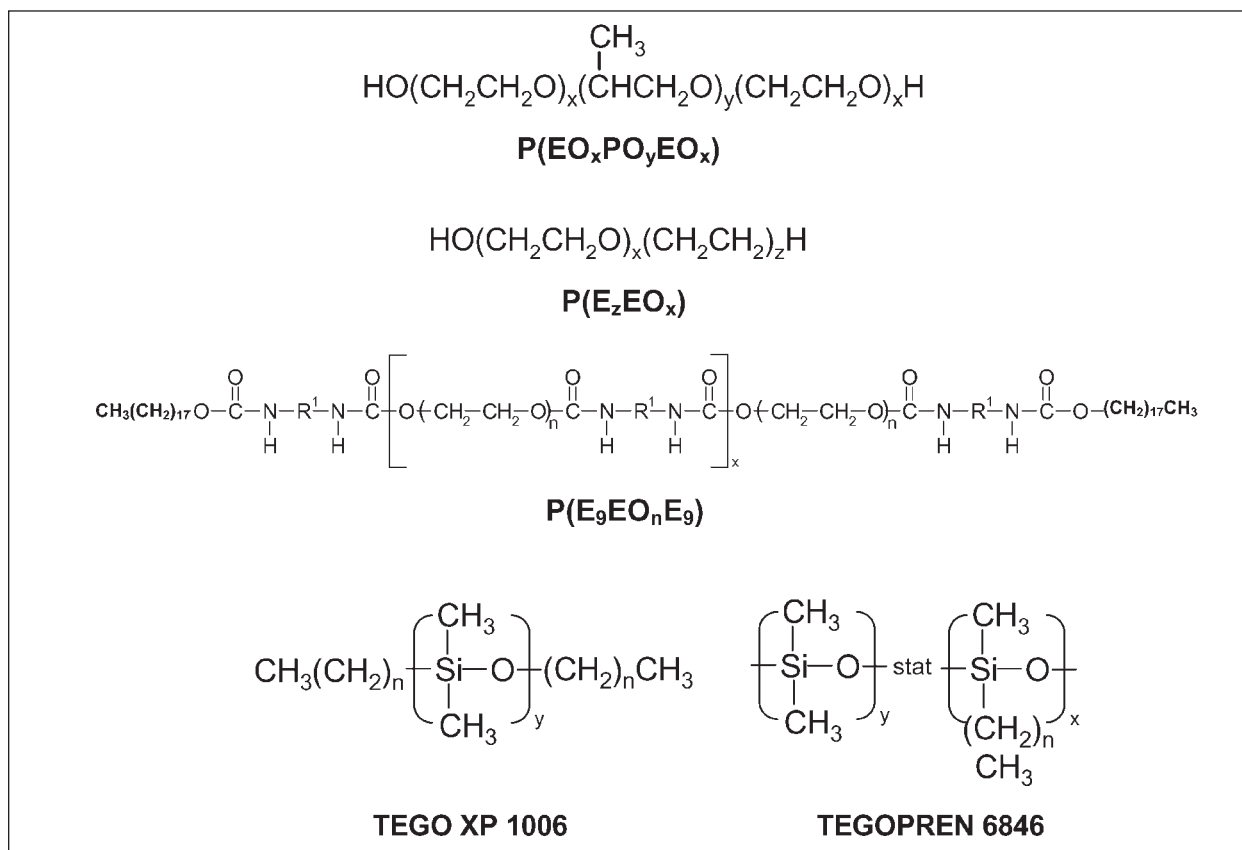


Bild 4.2-22: Strukturformeln der verwendeten amphipolaren Blockcopolymeren zur Herstellung der Bitumen/Polymer-Mischungen

methylsiloxanbasis (TEGO XP 1006 bzw. TEGOPREN 6848; Firma Evonik Goldschmidt GmbH). Die Strukturformeln der verwendeten Polymere sind in Bild 4.2-22 zusammengefasst.

Zur Herstellung einer homogenen Mischung wurde das Bitumen 30 Minuten bei 180 °C unter Rühren mittels eines Flügelrührers aufgeschmolzen. Anschließend wurde die jeweilige Menge an Polymer zugegeben und erneut 30 Minuten bei 180 °C gerührt. Die zähflüssige Bitumen-Polymer-Mischung wurde mittels einer Rakel (Spaltöffnung 100 µm) auf eine auf 180 °C vorgeheizte Metallplatte appliziert. Die Metallplatte wurde anschließend nach der in der Literatur beschriebenen Abkühlgeschwindigkeit [22] und in Bild 4.2-23 wiedergegebenen Temperatur-Zeit-Kurve abgekühlt. Die Kurve 1 (T₁) beschreibt die direkt auf der Metalloberfläche gemessene Temperatur, während die Kurve 2 (T₂) den Temperaturverlauf auf der Bitumenoberfläche angibt (s. Bild 4.2-23). Durch dieses Vorgehen soll sichergestellt werden, dass den Praxisbedingungen ähnliche Versuchsbedingungen vorliegen, da bekannt ist, dass Entmischungsprozesse stark temperatur- und zeitabhängig sind.

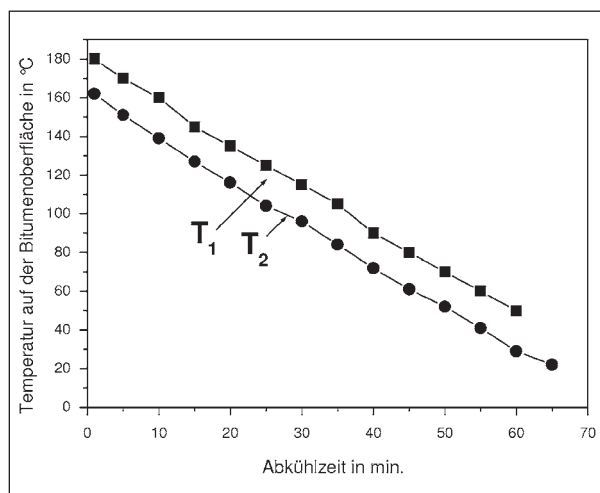


Bild 4.2-23: Temperatur-Zeit-Abkühlkurve zur Herstellung eines Bitumen-Polymerfilms nach Literatur [22]; T₁: Temperaturverlauf auf der Metallplattenoberfläche; T₂: Temperaturverlauf auf der Bitumenoberfläche

Bild 4.2-24 zeigt die Abhängigkeit des Kontaktwinkels von der zugesetzten Blockcopolymerkonzentration für die verschiedenen Polymer-Bitumen-Mischungen im Konzentrationsbereich bis 8 M.-% (vgl. auch Bild 4.2-22). Die Kontaktwinkelmessungen wurden an Proben vorgenommen, die entspre-

chend der in Bild 4.2-23 wiedergegebenen Abkühlung entstanden sind.

Während für die Blockcopolymeren des Typs $P(EO_xPO_yEO_x)$ und $P(E_9EO_nE_9)$ keine nennenswerte Änderung des Kontaktwinkels mit zunehmender Polymerkonzentration gefunden wird, zeigt das amphipolare Blockcopolymer $P(E_{16}EO_{40})$ eine deutliche Erniedrigung des Kontaktwinkels von 95° bei 2 M.-% auf 53° bei 8 M.-% Polymeranteil in der Bitumen/Polymer-Mischung. Diese Hydrophilierung der Bitumenfilmoberfläche ist auf eine ausgeprägte Stratifizierung des Polymeren im Bitumen zurückzuführen.

Im Vergleich dazu findet man für die organisch modifizierten Polydimethylsiloxane (PDMS) eine Hydrophobierung der Bitumenoberfläche, was sich in der Erhöhung des Kontaktwinkels auf 102° für TEGO XP 1006 bzw. 107° für TEGOPREN 6846 widerspiegelt (s. Bild 4.2-24). Im Gegensatz zu der im Falle des $P(E_{16}EO_{40})$ ausgeprägten Abhängigkeit des Kontaktwinkels vom Additivgehalt im Bitumen findet man für die PDMS-Derivate im untersuchten Konzentrationsbereich keine Änderung des Kontaktwinkels mit der zugesetzten Menge an Polymer.

In einer einfachen Versuchsanordnung/-führung wurde die Verschmutzungsneigung von reinen und mit den o. g. Polymeradditiven versetzten Bitumenfilmen untersucht. Hierfür wurden Filme gleicher Oberflächengröße aus reinem Bitumen (PmB 45 A) als Referenz sowie Bitumen/Polymer-Mischungen mit standardisiertem Schmutz, der auch für die Verschmutzungsversuche eingesetzt wird, bestreut und danach mit 200 ml Wasser abgespült. Die Filme wurden zum besseren Abfließen des Was-

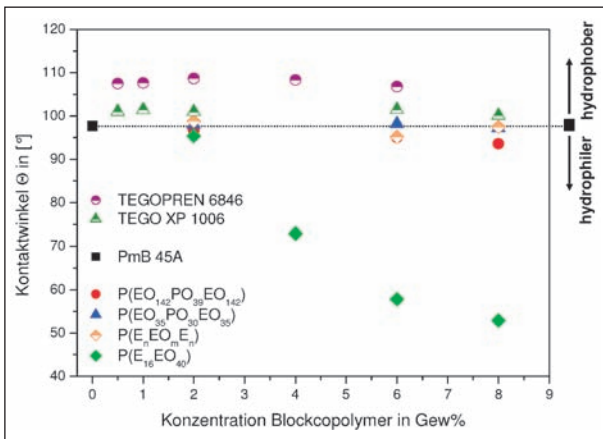


Bild 4.2-24: Kontaktwinkel von Wasser auf einer stratifizierten Bitumenoberfläche in Abhängigkeit von der Konzentration verschiedener amphipolarer Blockcopolymeren in Gew.-%

sers in einem Winkel von 30° zur Oberfläche positioniert. Durch Differenzwägung wird der Anteil an Schmutz bestimmt, der nach dem Spülvorgang auf der Oberfläche verbleibt.

Aus Bild 4.2-25 geht qualitativ hervor, dass auf dem Film mit dem Blockcopolymer $P(E_{16}EO_{40})$ (6 Gew.-%) und einem Kontaktwinkel von 57° lediglich 2 % des anfänglich aufgetragenen Schmutzes verbleiben, während im Falle des $P(E_{142}PO_{39}EO_{142})$ (6 Gew.-%) 12 % (Kontaktwinkel 95°) und beim reinen Bitumenfilm (Kontaktwinkel 97°) 18 % gemessen werden. Die deutlich höhere Hydrophilie der Bitumen/ $P(E_{16}EO_{40})$ -Mischung bedingt die bessere schmutzabweisende Wirkung der Oberfläche.

Die Bitumenfilme mit der hydrophobierten Oberfläche zeigen bei gleichem Additivgehalt einen ähnlich geringen Anteil an verbleibendem Schmutz wie die $P(E_{16}EO_{40})$ /Bitumen-Mischung. Während bei TEGO XP 1006 4 M.-% an Schmutzpartikeln auf der Oberfläche verbleiben, findet man für die 6 M.-%ige Mischung mit TEGOPREN 6846 einen vernachlässigbar kleinen Rückstand (vgl. Bild 4.2-25).

Untersuchungen zur schmutzabweisenden Wirkung von mit Polydimethylsiloxanderivaten versetzten Bitumen mit einem deutlich geringeren Polymeradditivgehalt von 0,5 Gew.-% sind in Bild 4.2-26 wiedergegeben. Hier findet man für das TEGO XP 1006 nach Abspülen mit Wasser 11 Gew.-% Restschmutz im Vergleich zu 4 Gew.-% bei einem Anteil von

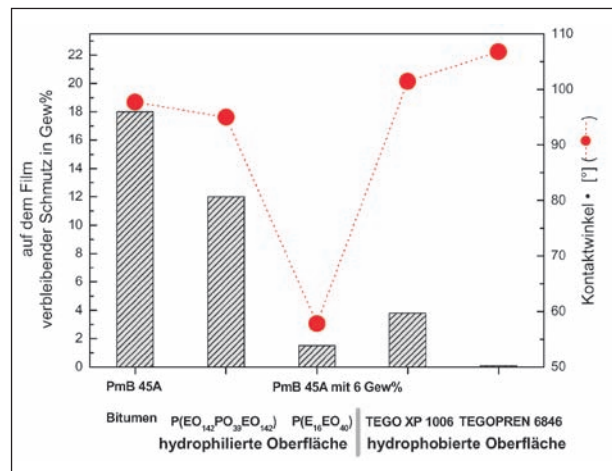


Bild 4.2-25: Restschmutzanteil sowie Kontaktwinkel von Wasser auf der Bitumenoberfläche für die Bitumen/Blockcopolymer-Mischungen $P(E_{142}PO_{39}EO_{142})$ bzw. $P(E_{16}EO_{40})$ und TEGO XP 1006 bzw. TEGOPREN 6846 (6 M.-% Polymeranteil) im Vergleich zu reinem Bitumen PmB 45 A

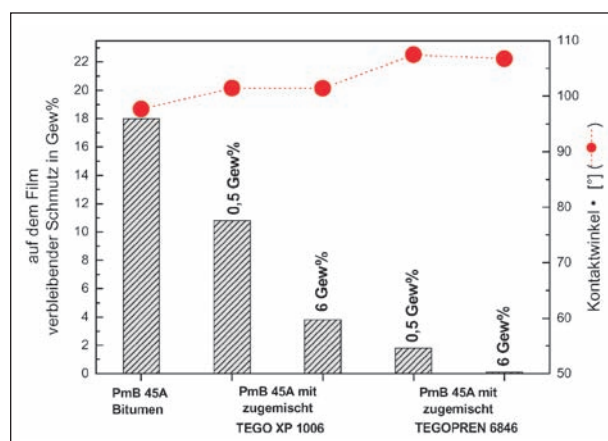


Bild 4.2-26: Restschmutzanteil sowie Kontaktwinkel von Wasser auf der Bitumenoberfläche für die Bitumen/Blockcopolymer-Mischungen TEGO XP 1006 bzw. TEGOPREN 6846 (0,5 und 6 Gew.-% Polymeranteil) im Vergleich zu reinem Bitumen PmB 45A

6 Gew % im Bitumen (vgl. Bild 4.2-25). Für das TEGOPREN 6846 hingegen ergeben sich 2-Gew.-% im Vergleich zu 0 Gew.-% bei höherem Additivanteil.

4.2.5 Asphalttechnologische Untersuchungen an modifiziertem Asphalt

4.2.5.1 Haftfähigkeit zwischen modifiziertem Bitumen und Mineralstoff (Rolling-Bottle-Test)

Zur sondierenden Beurteilung der Beeinflussung des Bitumens durch das zugesetzte Polymer an den zur Herstellung der offenporigen Asphalt-schichten verwendeten mineralischen Gesteinen wurde in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) der Rolling-Bottle-Test nach DIN EN 12697-11 bzw. TP Asphalt-StB, Teil 11 durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden die Blockcopolymeren $P(E_{16}EO_{40})$ und TEGOPREN 6846 untersucht, da diese nach obigen Ergebnissen aufgrund der ausgeprägten Hydrophilie-rung und Hydrophobierung der Bitumenoberfläche und der damit einhergehenden schmutzabweisenden Wirkung als besonders geeignete Additive erscheinen. Als mineralische Gesteine wurden der saure Granit und die basische Grauwacke verwendet.

Bild 4.2-27 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchungen. Für das Blockcopolymer $P(E_{16}EO_{40})$ wird unabhängig von den zugesetzten Anteilen (6 Gew.-% bzw. 8 Gew.-%) an Polymer und der Gesteinsart (Grauwacke bzw. Granit) eine extrem schlechte Haftung des Bitumens am Gestein beobachtet. Dies spiegelt sich in dem sehr geringen

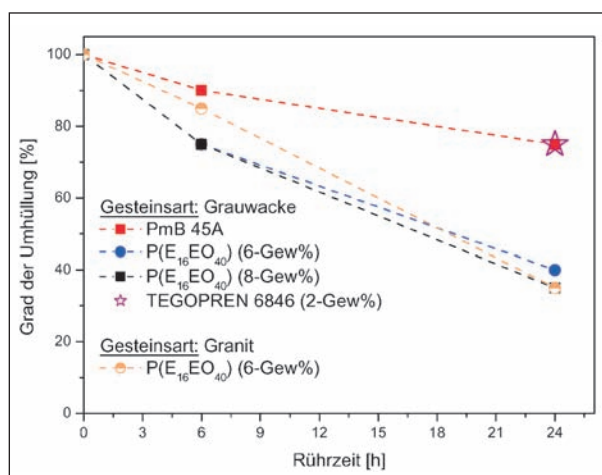


Bild 4.2-27: Grad der Umhüllung von verschiedenen Gesteinen mit Bitumen/Blockcopolymer-Mischungen $P(E_{16}EO_{40})$ und TEGOPREN 6846 im Vergleich zu reinem Bitumen PmB 45A bestimmt mittels des Rolling-Bottles-Tests (DIN EN 12697-11)

Grad der Umhüllung mit Bitumen von ca. 40 % im Vergleich zu unmodifiziertem Bitumen von ca. 75 % wider. Im Gegensatz dazu findet man für das TEGOPREN 6846 (Anteil im Bitumen 2 Gew.-%) einen Umhüllungsgrad von 75 %, der dem des reinen Bitumen entspricht. Dies bedeutet, dass im Falle des TEGOPREN 6846 keine Beeinflussung der Haftung des Bitumens am Gestein stattfindet.

4.2.5.2 Zusätzliche asphalttechnologische Prüfungen

Aufgrund der schlechten Haftfähigkeit der Bitumen/ $P(E_{16}EO_{40})$ -Mischung am Gestein ist lediglich das TEGOPREN 6846 einer weiteren asphalttechnologischen Prüfung unterzogen worden. Die grundsätzliche Beimischbarkeit des Polymers TEGOPREN 6846, das in Form von Pellets vorliegt, wurde an einem Mischer im Labor überprüft (50-kg-Mischungen). Das Polymer lässt sich aufgrund seiner Konsistenz und der Größe der Pellets gut einmischen, wird augenscheinlich vollständig aufgeschmolzen und verteilt sich gleichmäßig im Mischgut, sodass die Voraussetzungen für den stratifizierenden Effekt nach Einbau einer OPA-Schicht prinzipiell gegeben sind. Eine Übertragung dieses Versuchs auf großtechnische Asphaltmischanlagen ist nicht ohne weiteres möglich (Scherkräfte, Mischzeit etc.), die Laborversuche deuten jedoch darauf hin, dass auch in großtechnischem Maßstab eine gleichmäßige Beimischung und ein vollständiges Aufschmelzen des Polymers erreicht werden können. Inwieweit der stratifizierende Effekt in der eingebauten Schicht tatsächlich eintritt, kann nicht in einfa-

cher Weise oberflächenanalytisch geprüft werden; hierzu sind Wirkungsuntersuchungen mittels kontrollierte Verschmutzungsversuche notwendig.

Es gilt weiterhin zu prüfen, ob sich die Beimischung des Polymers negativ auf bestimmte Eigenschaften des Bitumens und des Asphalts auswirkt. Insbesondere ist auf das Temperaturverhalten, die Plastizität sowie die Affinität des modifizierten Bindemittels zum Gestein zu achten. Bezüglich der Asphalteeigenschaften ist das Augenmerk besonders auf Festigkeitsparameter zu richten. Die TPA Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation mbH, Köln, hat die Versuche durchgeführt bzw. entsprechende Parameter bestimmt.

Folgendes ist bezüglich des rückgewonnenen modifizierten Bitumens festzuhalten:

- Die Bitumenparameter Nadelpenetration (DIN EN 1426), Erweichungspunkt Ring und Kugel (DIN EN 1427) und Duktilität bei 25 °C (DIN 52013) zeigen keine signifikanten Veränderungen durch die Polymerzugabe. Allerdings ist anzumerken, dass sich durch die Rückgewinnung des Bindemittels aus dem modifizierten OPA die Verteilung des Polymers im Bitumen gegenüber der eingebauten OPA-Schicht ändern kann.
- Wenn die Stratifizierung gelingt, sollten die Phasen Bitumen und Polymer weitgehend entmischt sein. Dies sollte bei der Interpretation der o. g. Bitumenparameter berücksichtigt werden.
- Die Homogenität nach Heißlagerung des modifizierten Bitumens nach TL PmB und die Prüfung des Unterschieds der Erweichungspunkte Ring und Kugel zum Nachweis der Lagerungsstabilität zeigen keine Auffälligkeiten.

Hinsichtlich der Asphalteeigenschaften sind folgende Prüfungen durchgeführt und Ergebnisse bestimmt worden:

- Der Spaltzugversuch (TP Asphalt-StB, Teil 23) zeigt keine auffälligen Änderungen im Trockenzustand (indirekte Zugfestigkeit 0,484 N/mm² unmodifiziert gegenüber 0,496 N/mm² modifiziert), ebenso beim Versuch nach Wasserlagerung. Die Wasserempfindlichkeit gemäß TP Asphalt-StB, Teil 12 nachgewiesen am ITSR-Wert beträgt im modifizierten Fall 71 %, im unmodifizierten 64 %. Es zeigt sich somit eine etwas erhöhte Wasserempfindlichkeit im modifizierten Fall. Der Spaltzugversuch und insbesondere die Prüfung nach TP Asphalt-StB, Teil 12 ist neben

dem Rolling-Bottle-Test ein weiterer Parameter zur Beurteilung der Affinität des Bitumens zum Gestein.

- Die Spurbildung nach TP Asphalt-StB, Teil 22 (Bestimmung der Spurrinnentiefe im Wasserbad) ist im modifizierten Fall gegenüber dem unmodifizierten leicht erhöht (3,44 mm modifiziert gegenüber 3,08 mm unmodifiziert). Der Spurbildungsversuch bei Offenporigen Asphalten wird aufgrund der geringen Verformungsneigung von OPA und der dadurch kaum zu ermittelnden Unterschiede allerdings als kritisch bzw. wenig aussagekräftig betrachtet.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass durch die Polymermodifizierung mit TEGOPREN 6846 (Zugabemenge 0,5 Gew.-%) keine auffälligen Änderungen der Asphalt- und Bitumeneigenschaften (geprüft am rückgewonnenen Bindemittel) hervorgerufen werden.

4.2.6 Durchführung der Asphalt-Beschichtung

Die Ergebnisse der Vorversuche mit Beschichtungsmaterial auf Basis der handelsüblichen Dispersionsfarbe Lotusan® der Fa. Sto sollen mit Hilfe eines Versuchs an zwei großen Asphaltprobekörpern verifiziert und auf ihre Wirksamkeit hin untersucht werden.

Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Art der Applizierung der Farbe in den OPA und sein Verhalten im Rahmen der kontrollierten Beregnungs- und Verschmutzungsversuche gerichtet.

Die Beschichtung wird wie in den Vorversuchen in einer Verdünnung von 90 % auf zwei große Asphaltprobekörper aufgebracht (Probekörper 9 und 13 nach Tabelle 4.2-3). Dabei werden zwei grobkörnigere OPA-Varianten (OPA 0/11 und ZWOPA 0/8_0/16) für die Beschichtungsversuche ausgewählt, um Verstopfungsphänomenen durch Ablagerungen des Beschichtungsmaterials von vornherein weitgehend vorzubeugen.

Die Lotusan-Verdünnung wird in einer Menge von 2 x 1,6 l/m² gleichmäßig auf den mit 2,5 % Neigung gelagerten Probekörper aufgegossen. Der zeitliche Abstand zwischen den beiden Beschichtungsgängen ist 20 Minuten. Die Beschichtung 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, ist aber



Bild 4.2-28: Händisches Aufgießen der Beschichtung (links oben), Abfließen der überschüssigen Beschichtung aus dem OPA 0/11 (rechts oben), ZWOPA 0/8_0/16 unmittelbar nach Beschichtungsauftrag (links unten) und nach Einsickern und Abtrocknen der Beschichtung (rechts unten)

auch nicht angestrebt. Die Poren werden dadurch nicht vollflächig verkleidet (s. auch Bild 4.2-28), die Beschichtung lagert sich aber durch das Verfahren hauptsächlich an Stellen ab, an denen vergleichsweise geringe Strömungsgeschwindigkeiten vorherrschen und die dadurch besonders verschmutzungsanfällig (durch Ablagerungen) sind. Eine nachträgliche Absaugung nach dem Eintrag der Beschichtung findet ebenfalls nicht statt, um das Verfahren reproduzierbar und im Hinblick auf eine Anwendung in großtechnischem Maßstab möglichst einfach zu halten. Die überschüssige Beschichtung fließt, an der Unterkante des OPA in Richtung der Neigung, nach und nach ab. Auf diese Weise fließen beim OPA 0/11 45,5 %, beim ZWOPA 0/8_0/16 51,5 % der aufgetragenen Beschichtung wieder ab (s. Bild 4.2-28), der andere Teil verbleibt in der Porenstruktur, trocknet dort aus und bildet in den Poren Beschichtungsfilme.

Da die Beschichtung nicht nur die Porenoberflächen benetzt, sondern auch die Fahrbahnoberfläche und damit die Kontaktflächen zwischen Rei-

fen und Fahrbahn ungewollt mitbeschichtet werden, sollten mögliche negative Auswirkungen der Beschichtung auf die Griffigkeit bei einer Anwendung in situ weitgehend ausgeschlossen werden, z. B. durch SKM-Messungen. Sollte sich daraus eine niedrige Anfangsgriffigkeit ergeben, ist dennoch zu erwarten, dass der Beschichtungsfilm (ebenso wie der Bitumenfilm im Falle ohne Beschichtung) durch Überfahrungen schnell abgerieben wird und sich eine zum unbeschichteten Fall vergleichbare Griffigkeit einstellt.

4.2.7 Ergebnisse der kontrollierten Berechnungs- und Verschmutzungsversuche an großen Asphaltprobekörpern (Wirkungsuntersuchungen)

4.2.7.1 Allgemeines

Es werden die Ergebnisse der Berechnungs- und Verschmutzungsversuche an den insgesamt sechs modifizierten Probekörpern (zwei beschichtete, vier mit Beimischung des Polymers in das Mischgut) mit

denen der unmodifizierten Probekörper verglichen, um die Wirksamkeit und Wirkungsweise der Modifizierung zu untersuchen.

Generell werden verschiedene Parameter und Verhaltensweisen des OPA im Rahmen der Beregnungs- und Verschmutzungsversuche ermittelt und untersucht. Dazu gehören der Schmutztransport bzw. die Schmutzbilanzierung (Orgalab, TP 3221-3), die Tausalzauswaschung, das Abflussverhalten (insbesondere dessen Änderung durch Verschmutzung), die räumliche Verschmutzungsdeposition sowie die Ableitung von Strukturkennwerten des OPA (CT-Untersuchungen, BAM) und das akustische Verhalten in Abhängigkeit der Verschmutzung als maßgebender (Ziel-)Parameter (Müller BBM, TP 3221-4).

Das Abflussverhalten lässt sich dabei mit verschiedenen Parametern, die sich aus den Abflussmessungen während der Beregnungsprogramme bestimmen lassen, charakterisieren:

Das Drainagevermögen [%] ist der Anteil des aufgetragenen Wassers, das der OPA zu einem bestimmten Zeitpunkt durch seine Porenstruktur hindurch an der Unterkante der OPA-Schicht abgeführt hat.

Der oberflächliche Abfluss [%] ist der Anteil des aufgetragenen Wasser, das der OPA zu einem bestimmten Zeitpunkt oberflächlich abgeführt hat.

Als Komplementärwert ist das Retentions- bzw. Speichervermögen [%] ein Maß dafür, welchen Anteil des aufgetragenen Wassers der OPA zurückhalten bzw. nicht abführen kann.

Die Addition von Drainagevermögen, oberflächlichem Abfluss und Retentionsvermögen ergibt demnach immer 100 %.

Darüber hinaus können zu jedem Zeitpunkt (momentane) Abflussraten [l/min] des OPA bestimmt werden; diese entsprechen mathematisch der ersten Ableitung der Abfluss-Zeit-Kurven nach der Zeit. Besonders interessant erscheinen in diesem Zusammenhang die nach einer Beregnung sich einstellenden Spitzenabflüsse zu sein. Betrachtet werden hierbei zunächst ausschließlich die Abflussraten des an der Unterkante des OPA abfließenden „drainierten“ Wassers (ohne oberflächlichen Abfluss).

Interessant sind vor allem die Entwicklung dieser Parameter mit zunehmender Verschmutzung und der Vergleich verschiedener Mischgutsorten hinsichtlich des Abflussverhaltens (in unterschiedli-

chen Verschmutzungsstadien). Insbesondere ist der Vergleich zwischen unmodifiziertem und modifiziertem/beschichtetem Fall als Maß der „Wirksamkeit“ der Modifizierung von großem Interesse (s. auch Bild 4.2-3, Arbeitsschritt 8).

4.2.7.2 Schmutzaustrag

Das Schmutzaustragsverhalten ist ein wichtiger Vergleichsparameter für die Beurteilung der schmutzabweisenden Wirkung der Beschichtung.

Bild 4.2-29 zeigt den kumuliert angefallenen Schmutzaustrag während des gesamten Verschmutzungszyklus im Vergleich von unmodifizierten und beschichteten bzw. modifizierten Probekörpern mit unterschiedlichen Verschmutzungsgraden; farblich hervorgehoben sind dabei die jeweils direkt vergleichbaren OPA 0/11 (blau), OPA 0/8 (grün) und ZWOPA 0/8_0/16 (rot). Betrachtet wird hierbei nur der Schmutzaustrag, der durch den Wasserabfluss an der Unterkante des OPA anfällt, nicht der durch oberflächlichen Abfluss zustande kommende Schmutzaustrag. Unterteilt werden die Schmutzmengen in sedimentierbare und abfiltrierbare Bestandteile sowie einen nicht abfiltrierbaren Anteil („Filtrattrockenrückstand“). Diese Unterteilung liefert Aufschlüsse über die Größe der ausgetragenen Schmutzpartikel.

Folgende Schlussfolgerungen können festgehalten werden:

- Der Schmutzaustrag bezogen auf die Menge des aufgetragenen Schmutzes ist relativ gering Er beträgt für alle untersuchten Fälle lediglich 1 bis 2 % des aufgetragenen/eingetragenen Schmutzes.
- Mit zunehmendem Verschmutzungsgrad lässt sich absolut mehr Schmutz auswaschen, relativ zur aufgetragenen Schmutzmenge bleibt der Schmutzaustrag für alle Deckschichtarten und Verschmutzungsgrade konstant.
- Bei höheren Verschmutzungsgraden („mittel“ und „stark“) werden vermehrt auch gröbere Schmutzpartikel (absetzbare und abfiltrierbare Bestandteile) ausgetragen. Dies liegt vermutlich aber auch an der höheren Anzahl der Starkregenprogramme (sechs) in den Verschmutzungszyklen „mittel“ und „stark“. Im Verschmutzungszyklus „leicht“ werden hingegen lediglich zwei Starkregenprogramme gefahren. Durch die Starkregenprogramme wird also ein erheblich

höherer Austrag an größeren Schmutzpartikeln provoziert.

- Hinsichtlich des relativen Gesamtschmutzaustrags kann kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Mischgutsorte, Größtkorn sowie Aufbau des OPA (einlagig-zweilagig) einerseits und dem Gesamtschmutzaustrag andererseits festgestellt werden. Betrachtet man nur die abfiltrierbaren und sedimentierbaren Bestandteile („grobe“ Bestandteile), lassen sich jedoch folgende Auffälligkeiten beobachten:
- OPA 0/11 hat vermutlich aufgrund seiner größeren Porenstruktur höhere Austragsraten an „groben“ Bestandteilen als OPA 0/8.
- ZWOPA 0/8_0/16 haben gegenüber vergleichbaren OPA 0/8 ebenfalls höhere Austragsraten hinsichtlich „grober“ Bestandteile.
- Bei den modifizierten Probekörpern ist gegenüber den unbeschichteten Vergleichsfällen gleicher Körnung (jeweils farblich gekennzeichnet) ein geringfügig erhöhter Schmutzaustrag festzustellen. Bezogen auf den Gesamtschmutzauftrag bleibt der Schmutzaustrag jedoch auch im modifizierten Zustand mit 1 bis 2 % sehr gering.

- Der erhöhte Schmutzaustrag im modifizierten Fall setzt sich hauptsächlich aus der vermehrten Austragung von sehr feinen (Filtrattrockenrückstand) und groben Partikeln (sedimentierbare Bestandteile) zusammen.

4.2.7.3 Tausalzaustrag

Die Fragestellung, ob eine teilweise oder komplette (Wieder-)Entfernung des eingebrachten Salzes aus dem OPA möglich ist, kann Hinweise liefern über den potenziellen Beitrag des Tausalzes zur Verschmutzung. Tausalz (hier nur NaCl) ist ein sehr gut wasserlöslicher Stoff, es müssten demnach hohe Austragsraten zu erwarten sein.

Bild 4.2-30 zeigt die Tausalzausträge (absolut und relativ zur insgesamt während des Verschmutzungszyklus in mehreren Schritten aufgetragenen Menge von 150 g NaCl) vier verschiedener unmodifizierter Probekörper (Probekörper Nr. 1, 2, 5, 6 nach Tabelle 4.2-3), die sich in Mischgutsorte (OPA 0/8 und ZWOPA 0/8_0/16) und Verschmutzungsgrad (480 g/m² und 1.440 g/m²) unterscheiden.

Folgendes lässt sich anhand von Bild 4.2-30 feststellen:

- Es treten unabhängig von Mischgutsorte/Schichtenaufbau und Verschmutzungsgrad sehr

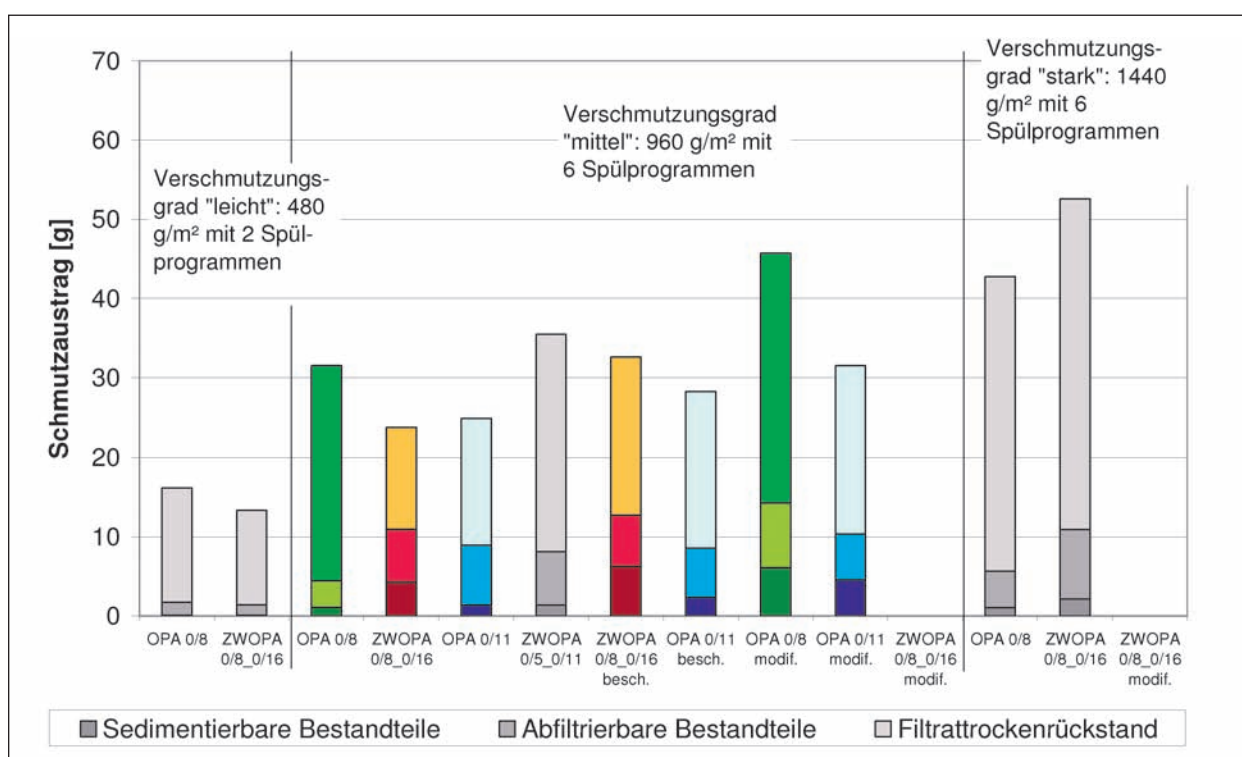


Bild 4.2-29: Gesamtschmutzaustrag nach Abschluss des Verschmutzungszyklus

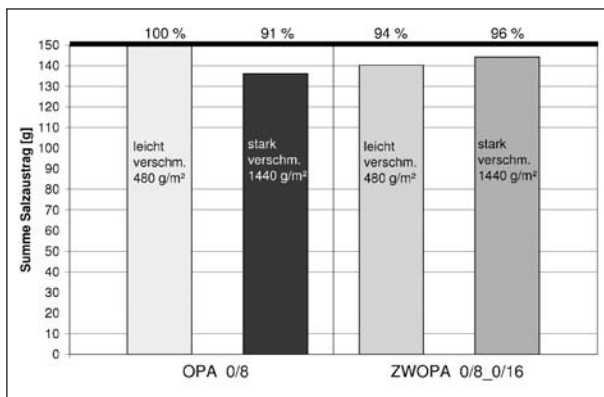


Bild 4.2-30: Gesamter Tausalzaustrag nach Abschluss des Verschmutzungszyklus

hohe Austragsraten zwischen 91 und 100 % auf, was aufgrund der sehr guten Löslichkeit von NaCl in Wasser plausibel ist. Jedoch gilt es auch zu bedenken, dass in manchen Fällen somit auch Rückstände von ca. 5-10 % nach Abschluss des Verschmutzungszyklus im OPA verbleiben. Zur Klärung, inwieweit diese Rückstände unter fortgesetzter Beregnung noch ausgetragen werden könnten, enthält Bild 4.2-31 einige Anhaltspunkte.

- Ein Zusammenhang von Mischgutsorte, Schichtaufbau und Verschmutzungsgrad einerseits und dem Gesamtsalzaustrag kann nicht abgeleitet werden.

Betrachtet man die Salzaustragsraten [%] eines jeden Verschmutzungsschritts und trägt diese über den im Probekörper (vor der Beregnung) vorhandenen NaCl-Rückstand und dem aktuellen Verschmutzungszustand auf, zeigen sich in Bild 4.2-31 folgende Tendenzen:

- Mit zunehmendem Verschmutzungszustand des OPA nehmen die relativen Salzausträge (Verhältnis zwischen ausgetragenen Salz und im Probekörper vor der Auswaschung durch Beregnung vorhandenem Salz) ab. Je stärker die Verschmutzung, desto stärker kann das Tausalz im OPA zurückgehalten werden.
- Mit abnehmendem Rückstand von Tausalz im OPA („im OPA vorhandenes NaCl“) nehmen die relativen Salzausträge ebenfalls ab. Je weniger Salz im Probekörper vorhanden ist, desto „schwerer“ lässt es sich wieder austragen. Dies könnte darauf hindeuten, dass eine komplette Wiederauswaschung nicht möglich ist und ein gewisser Rückstand Tausalz auch bei weiteren

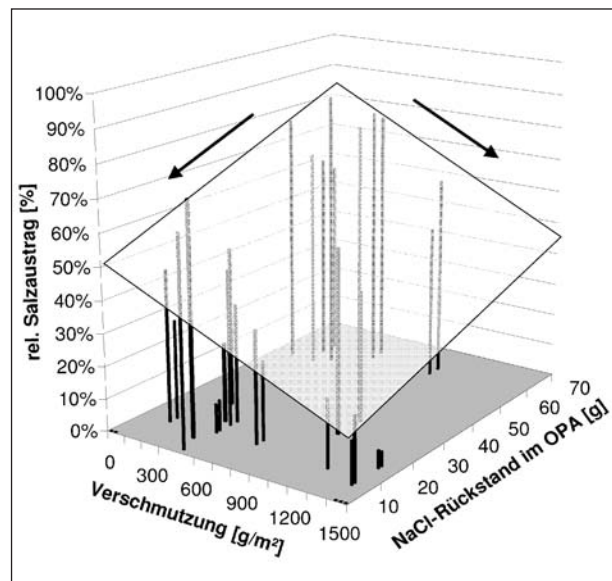


Bild 4.2-31: Relative Salzaustragsraten in Abhängigkeit der NaCl-Rückstände im Probekörper und des Verschmutzungszustands

Auswaschversuchen durch Beregnung im OPA verbleiben würde.

Die hier beschriebenen Tendenzen sollen in Bild 4.2-31 durch die eingezeichnete schiefe Ebene verdeutlicht werden.

4.2.7.4 Abflussverhalten hinsichtlich Drainagevermögen, oberflächlichen Abflusses und Retentionsvermögen

Das unterschiedliche Abflussverhalten von OPA soll im Folgenden in Abhängigkeit von Mischgutsorte/Größtkorn bzw. Schichtaufbau untersucht werden. Weiterhin interessiert die Änderung des Abflussverhaltens durch zunehmende Verschmutzung und durch Polymer-Modifizierung des Bindemittels oder Beschichtung des OPA. Zur näheren Charakterisierung werden dazu die Parameter oberflächlicher Abfluss, Drainagevermögen, Retentionsvermögen sowie die Abflussraten betrachtet.

Oberflächlicher Abfluss tritt bei Schwachregenprogrammen nicht auf, bei Starkregenprogrammen nur in den folgenden Fällen:

- bei Probekörper 2 und 3 ab einer Verschmutzung von ca. 750 g/m² (im vergleichbaren modifizierten Probekörper 10 tritt kein oberflächlicher Abfluss auf),
- bei ZWOPA 0/5_0/11 immer, unabhängig von der Verschmutzung.

Der Anteil des oberflächlichen Abflusses liegt bei den OPA 0/8 im oben angegebenen Verschmutzungsbereich bei ca. 1-15 %, beim ZWOPA 0/5_0/11 bei ca. 20-25 % des aufgetragenen Wassers. Insgesamt lässt sich jedoch bemerken, dass Offenporiger Asphalt große Wassermengen in kurzer Zeit durch seine Porenstruktur ableiten kann. Oberflächlicher Abfluss tritt selbst bei großen Wassermengen (Starkregenprogramm) nur bei relativ feinkörniger Oberfläche (ZWOPA 0/5_0/11) sowie bei zunehmender Verschmutzung bei OPA 0/8 auf. ZWOPA 0/8_0/16 und OPA 0/11 zeigen aufgrund ihres Größtkorns bzw. ihrer grobkörnigen Struktur überhaupt keinen oberflächlichen Abfluss.

Hinsichtlich des Drainagevermögens (Abfluss von Wasser durch die Porenstruktur/an der Unterkante des OPA) werden folgende Fälle untersucht:

- (End-)Drainagevermögen im Vergleich von unverschmutztem Zustand und nach „erstmaliger Verschmutzung“ (60 g/m²),
- nach Abschluss eines Schwachregenprogramms, 180 Minuten nach der letzten Beregnung,
- (End-)Drainagevermögen im Vergleich zwischen schwacher und starker Verschmutzung,
- nach Abschluss eines Schwachregenprogramms, 180 Minuten nach der letzten Beregnung,
- nach Abschluss eines Starkregenprogramms, 60 Minuten nach der letzten Beregnung.

Drainagevermögen im Vergleich von unverschmutztem Zustand und dem Zustand „erstmalige Verschmutzung“ (60 g/m²) nach einem Schwachregenprogramm, 180 Minuten nach der letzten Beregnung

Betrachtet wird das kumulierte (End-)Drainagevermögen nach Abschluss eines Schwachregenprogramms, im Vergleich des unverschmutzten und des schwach verschmutzten Zustands („erstmalige Verschmutzung“; 60 g/m²).

In Bild 4.2-32 ist zu erkennen, dass das Drainagevermögen im verschmutzten Fall (60 g/m²) für alle Mischgutsorten/Schichtaufbauten (mit/ohne Modifizierung oder Beschichtung) höher als beim unverschmutzten Fall ist. Eine Ausnahme bilden dabei die Probekörper 4 und 9, beide OPA 0/11). Erklär-

bare Unterschiede zwischen den Mischgutsorten bezüglich der Größe des Drainagevermögens im unverschmutzten Fall sind nicht festzustellen. Es ist jedoch auffällig, dass im unverschmutzten Fall große Unterschiede zwischen den Mischgutsorten bzw. Schichtaufbauten bestehen, welche sich nach erstmaligem Schmutzeintrag weitgehend egalisieren.

Erklärungsansätze für die Zunahme des Drainagevermögens bei erstmaligem Schmutzeintrag können sein:

- Die Porenwandungen des OPA bestehen im unverschmutzten Zustand aus Bitumenoberflächen, die apolar sind. Wassermoleküle hingegen sind polar. Es ergibt sich daraus, dass das Wasser hohe Kontaktwinkel mit den Bitumenoberflächen bildet, das Wasser wird aufgrund dieser hohen Oberflächenspannung bei der Durchströmung der Poren bzw. beim Abfließen behindert. Durch Schmutzwassereintrag werden die Bitumenoberflächen mit einer feinen Schmutzschicht überzogen, wodurch sich die Benetzungseigenschaften der Porenwandungen ändern. Der eingetragene Schmutz ist zum größten Teil mineralisch, die apolaren Eigenschaften der Porenwandungen bzw. des Bitumens gehen dadurch zumindest teilweise verloren. Der Kontaktwinkel des Wassers mit den Porenwandungen wird dadurch kleiner, die Durchströmung der Poren und das Abfließen des Wassers erleichtert.
- Die durch Beschichtung bzw. Modifizierung erzielte zusätzliche Hydrophobie bzw. Apolarität der Porenwandungen ist im unverschmutzten Fall allerdings aus Bild 4.2-32 nicht ersichtlich. Im Zustand der Anfangsver Verschmutzung ist die zusätzliche Hydrophobie beim beschichteten Fall in den Ergebnissen zu erkennen (s. auch Bild 4.2-33); im modifizierten Fall gelingt dieser Nachweis jedoch nicht.
- Ein weiterer Erklärungsansatz könnte sein, dass sich der Kontaktwinkel des Wassers mit der Porenwandung nach Schmutzeintrag dadurch verkleinert, dass die Porenoberflächen durch eine feine mineralische Schmutzschicht rauer werden.
- Möglicherweise spielt auch die Verfüllung von Mikroporen durch den ersten Schmutzeintrag eine Rolle. Das Wasser kann in den kapillar wirksamen Mikroporen im unverschmutzten Zu-

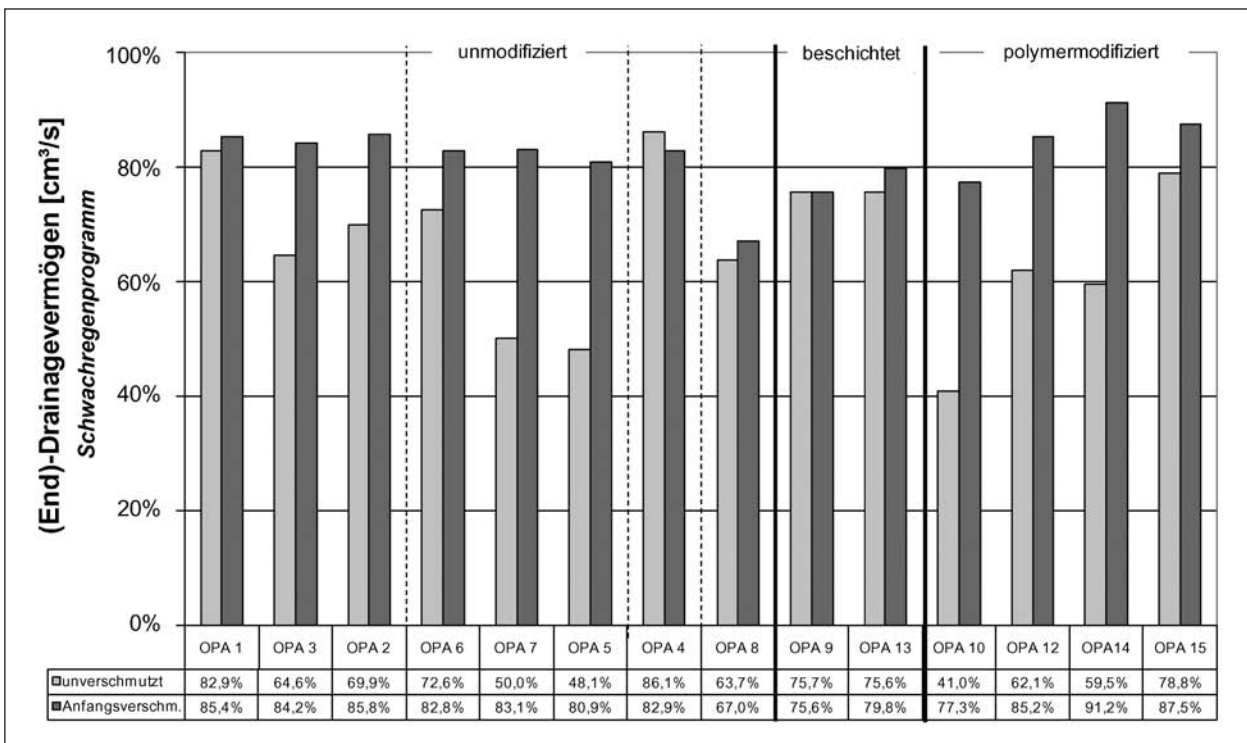


Bild 4.2-32: Drainagevermögen im Vergleich von unverschmutztem Zustand und „erstmaliger Verschmutzung“ (60 g/m²) nach Schwachregenprogramm

stand zurückgehalten und am Abfließen gehindert werden. Durch Verfüllung eines Teils der Mikroporen durch erstmaligen Schmutzeintrag entfallen diese kapillaren Wasserrückhalte-mechanismen, wodurch mehr Wasserabfluss als im unverschmutzten Fall stattfinden kann.

Drainagevermögen mit zunehmender Verschmutzung nach einem Schwachregenprogramm, 180 Minuten nach der letzten Beregnung

Untersucht wird in diesem Fall das kumulierte (End-) Drainagevermögen nach Abschluss eines Beregnungsprogramms, in diesem Fall des Schwachregenprogramms.

Bild 4.2-33 zeigt für die untersuchten Mischgutsorten bzw. Schichtaufbauten (modifiziert/unmodifiziert) und Verschmutzungsgrade den Vergleich des Drainagevermögens zwischen dem Zustand einer schwachen Verschmutzung (60 g/m²) und dem Zustand der „maximalen Verschmutzung“ (480, 960 bzw. 1.440 g/m²).

Folgendes ist dabei im Vergleich der Mischgutsorten/Schichtaufbauten festzustellen (s. Bild 4.2-33):

- Es ist zu beobachten, dass sich insgesamt nur sehr geringe Unterschiede der Mischgutsorten/Schichtaufbauten hinsichtlich des Drainagevermögens zeigen. Der ZWOPA 0/5_0/11 stellt (vermutlich aufgrund seines starken oberflächlichen Abflusses) eine Ausnahme dar.

Bezüglich der Veränderung des Drainagevermögens durch die Verschmutzung und die Modifizierung bzw. Beschichtung ist Folgendes zu erkennen (s. Bild 4.2-33):

- In den meisten Fällen ist eine Abnahme des Drainagevermögens im Vergleich von schwacher (60 g/m²) Verschmutzung und „maximaler Verschmutzung“ (480, 960 bzw. 1.440 g/m²) zu beobachten; Ausnahmen bilden die Probekörper 4, 10, 14 und 15; nur sehr schwach ausgeprägt ist das Phänomen bei ZWOPA 0/8_0/16. Zurückgeführt wird der Rückgang der Drainagefähigkeit auf die Behinderung des Wasserabflusses durch die Verschmutzung. Überdies kann das Anhaften des Wassers an Schmutzpartikeln/Schmutzansammlungen zu dem beobachteten erhöhten Retentionsvermögen bzw. dem verminderten Drainagevermögen führen
- Im Verschmutzungsgrad „stark“ zeigen sich keine nennenswert höheren Rückgänge des

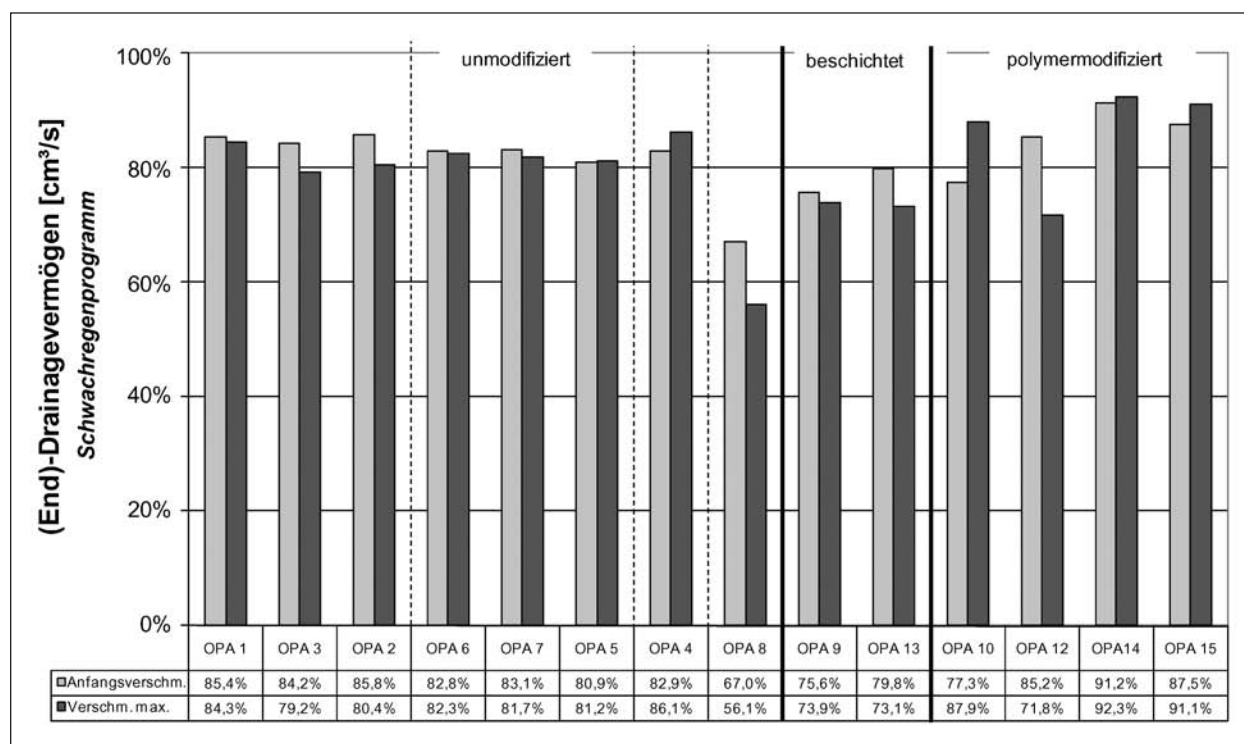


Bild 4.2-33: Drainagevermögen im Vergleich von schwach und maximal verschmutztem OPA-Probekörper nach Schwachregenprogramm

Drainagevermögens gegenüber den schwächeren Verschmutzungsgraden „schwach“ und „mittel“. Die Stärke der Verschmutzung lässt sich also mit dem hier dargestellten Parameter nicht nachweisen.

- Feinkörnigere Mischgutsorten bzw. Schichtaufbauten zeigen deutlichere Rückgänge im Drainagevermögen als ZWOPA 0/8_0/16.
- Durch die Beschichtung ist im Vergleich mit den entsprechenden unmodifizierten Fällen ein Rückgang des Enddrainagevermögens zu beobachten. Dies könnte auf die Erhöhung der Hydrophobie der Porenwandungen hinweisen. Das geringere Drainagevermögen lässt sich auf veränderte Benetzungseigenschaften der Porenwandungen infolge der erhöhten Hydrophobie zurückführen. Eindringendes Wasser bildet mit den Porenwandungen große Kontaktwinkel, aufgrund dieser erhöhten Oberflächenspannung wird das Wasser am Abfließen gehindert und verbleibt zu größeren Teilen im OPA als im unbeschichteten Fall.
- In den polymermodifizierten Fällen ist ein abnehmendes Enddrainagevermögen nicht festzustellen.

Drainagevermögen mit zunehmender Verschmutzung nach einem Starkregenprogramm, 60 Minuten nach der letzten Beregnung

Im Folgenden soll betrachtet werden, wie die Verschmutzung und die Modifizierung bzw. Beschichtung das Drainagevermögen im Falle des Ableitens von größeren Wassermengen (Starkregenprogramm) beeinflussen. Es wird deshalb das (End-) Drainagevermögen nach Abschluss eines Starkregenprogramms betrachtet.

Bild 4.2-34 zeigt für die untersuchten Mischgutsorten/Schichtaufbauten und die Verschmutzungsgrade „mittel“ und „stark“ den Vergleich des Drainagevermögens zwischen dem Zustand einer schwachen Verschmutzung/Anfangsverschmutzung (200 bzw. 270 g/m²) und dem Zustand der „maximalen Verschmutzung“ (960 bzw. 1.440 g/m²). Im Verschmutzungsgrad „leicht“ sind leicht abweichende Starkregenprogramme durchgeführt worden, weshalb die Daten nicht ohne weiteres vergleichbar sind; sie sind deshalb in Bild 4.2-34 nicht aufgeführt.

Vergleicht man die Mischgutsorten/Schichtaufbauten, ist folgendes zu beobachten.

- Bei den hier auftretenden größeren Wassermengen zeigen der ZWOPA 0/8_0/16 und der

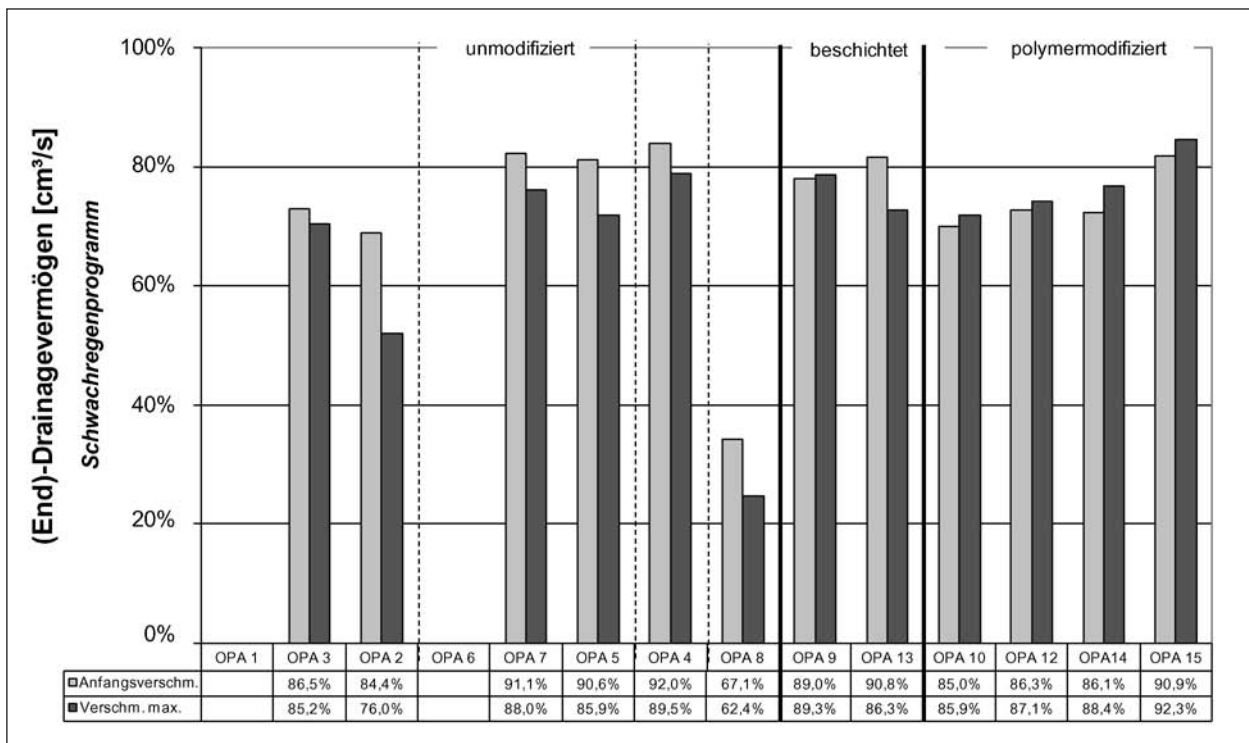


Bild 4.2-34: Drainagevermögen im Vergleich von schwach und maximal verschmutztem OPA-Probekörper nach Starkregenprogramm

OPA 0/11 ein höheres Drainagevermögen im Zustand der Anfangsverschmutzung als der OPA 0/8; im Durchschnitt 90,7 % bei ZWOPA 0/8_0/16 gegenüber 85,1 % bei OPA 0/8. Dies ist mutmaßlich durch die gröbere Mischgutszusammensetzung (in der unteren Schicht) und den einhergehenden größeren Porendurchmesser begründet. Bei kleineren Wassermengen (Schwachregenprogramm) hat hingegen OPA 0/8 ein höheres Drainagevermögen als ZWOPA 0/8_0/16 (vgl. auch Bild 4.2-33).

- ZWOPA 0/8_0/16 zeigt bei größeren Wassermengen ein deutlich gesteigertes Drainagevermögen (bei schwacher Verschmutzung) als bei kleineren Wassermengen; 90,7 % bei Starkregenprogrammen, 82,8 % bei Schwachregenprogrammen.
- ZWOPA 0/5_0/11 zeigt auch bei großen Wassermengen ein im Vergleich zu den anderen Mischgutsorten deutlich unterentwickeltes Drainagevermögen, was vermutlich auch im starken oberflächlichen Abfluss begründet liegt.

Die Veränderung des Drainagevermögens durch die Verschmutzung und die Beschichtung/Modifizierung zeigt folgende Auffälligkeiten (s. Bild 4.2-34):

- Das Drainagevermögen im Zustand der Anfangsverschmutzung ist im modifizierten Fall geringer als im unmodifizierten Fall. Das geringere Drainagevermögen lässt sich als Indiz verstehen, dass sich die Benetzungseigenschaften der Porenwänden infolge der durch Modifizierung erhöhten Hydrophobie verändert haben. Eindringendes Wasser bildet mit den Porenwänden große Kontaktwinkel, aufgrund dieser erhöhten Oberflächenspannung wird das Wasser am Abfließen gehindert und verbleibt zu größeren Teilen im OPA als im unmodifizierten Fall (vgl. auch Drainagevermögen im Vergleich von unverschmutztem Zustand und erstmaliger Verschmutzung).
- Die Abnahme des Drainagevermögens im Vergleich von Anfangsverschmutzung und maximaler Verschmutzung ist im unmodifizierten Fall bei höheren Wassermengen (Starkregenprogramm) bei allen untersuchten Mischgutsorten zu beobachten. Zurückgeführt wird dies auf die Behinderung des Wasserabflusses durch die Verschmutzung.
- Im Gegensatz dazu erhöht sich bei den polymermodifizierten Probekörpern mit zunehmender Verschmutzung das Drainagevermögen; für die beschichteten Probekörper ist kein eindeutiger

Trend festzustellen. Eine Erklärung für diesen gegenläufigen Trend liegt nicht vor. Es ist jedoch festzustellen, dass das Drainagevermögen im Fall der Anfangsvermischung für die modifizierten Probekörper auf einem niedrigeren Niveau liegt als im Vergleichsfall ohne Modifizierung und im Zustand maximaler Vermischung ähnliche Größenordnungen des Drainagevermögens für den unmodifizierten und den modifizierten Fall festgestellt werden können (Ausnahme Probekörper 15).

- ZWOPA 0/8_0/16 zeigt im Gegensatz zum Schwachregenprogramm für das Starkregenprogramm deutlichere Rückgänge des Drainagevermögens im Vergleich von Anfangs- und maximaler Vermischung. Auch der OPA 0/11 zeigt bei höheren Wassermengen Rückgänge im Drainagevermögen, die im Schwachregenfall nicht auftreten. Bei hohem Wasserdurchsatz zeigt sich demnach bei diesen „grobkörnigen“ Mischgutsorten/Schichtaufbauten ein Effekt der Behinderung des Wasserabflusses, der sich bei geringem Wasserdurchsatz nicht bemerkbar macht.

4.2.7.5 Abflussraten

Das unterschiedliche Abflussverhalten von OPA in Abhängigkeit von Mischgutsorte/Größtkorn bzw. Schichtaufbau wird nachfolgend bezüglich der auf-

tretenden Abflussraten [l/min] und Abflussspitzen nach Beregnung untersucht. Weiterhin werden Änderungen dieser Abflussparameter durch zunehmende Vermischung und durch Polymermodifizierung des Bindemittels bzw. Beschichtung untersucht. Zur näheren Charakterisierung wird dazu der Parameter Spitzenabflussrate [cm³/s] kurz nach erfolgter Beregnung näher betrachtet.

Die Spitzenabflussrate ermittelt sich beim Schwachregenprogramm als Mittelwert aus den 5 größten Spitzenabflussraten, die jeweils nach den Beregnungen auftreten. Beim Starkregenprogramm berechnet sie sich aus dem Abflussratenmaxima nach der vierten Beregnung.

Abflussraten Schwachregenprogramm

Bild 4.2-35 zeigt für die untersuchten Mischgutsorten/Schichtaufbauten und Verschmutzungsgrade den Vergleich der Spitzenabflussraten bei Beregnung mit einem Schwachregenprogramm zwischen dem Zustand einer schwachen Vermischung (60 g/m²) und dem Zustand der maximalen Vermischung (480, 960 bzw. 1.440 g/m²).

Dabei ist im Vergleich der Mischgutsorten/Schichtaufbauten Folgendes zu erkennen (s. Bild 4.2-35):

- Im schwach verschmutzten Zustand (60 g/m²) hat ZWOPA 0/8_0/16 geringfügig höhere Spit-

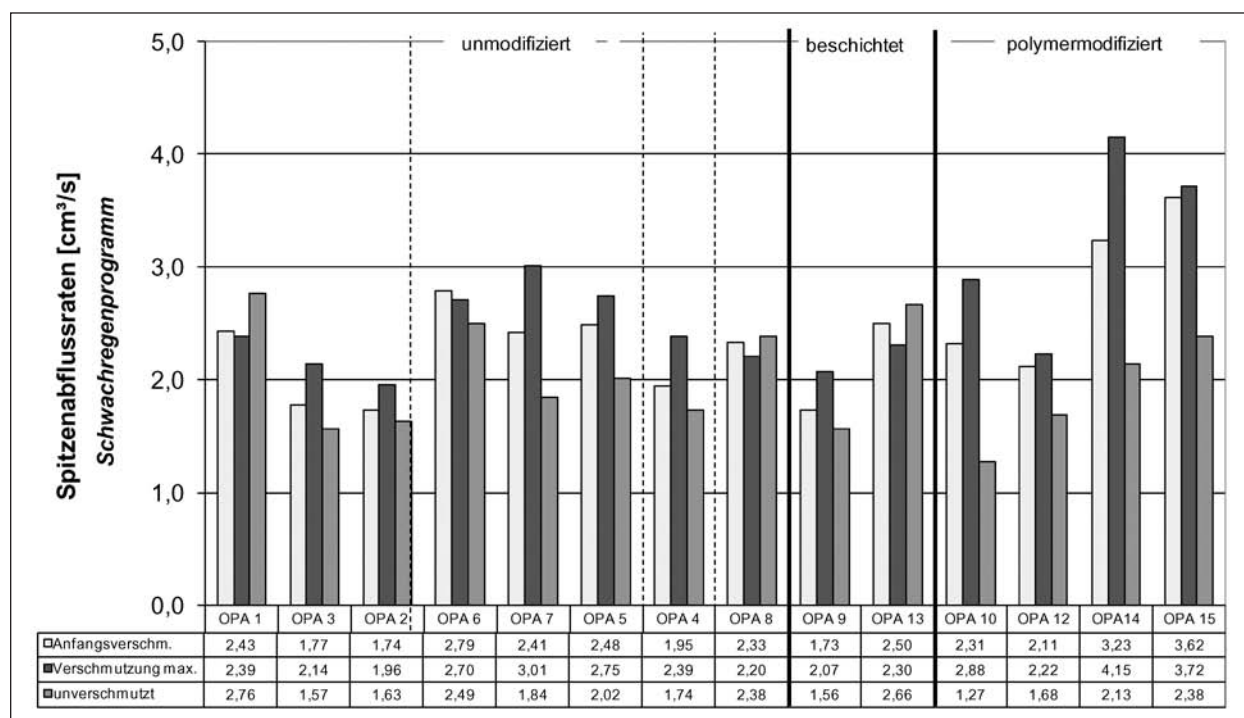


Bild 4.2-35: Spitzenabflussraten Schwachregenprogramm

zenabflussraten als OPA 0/8. In der Gesamtsicht sind die Unterschiede jedoch sehr gering.

Bezüglich der Veränderung der Spitzenabflussraten durch die Verschmutzung und durch die Modifizierung bzw. Beschichtung ergibt sich folgendes Bild (s. Bild 4.2-35):

- Es sind sowohl Zunahmen als auch Abnahmen der Spitzenabflussraten im Vergleich der beiden Zustände Anfangsver Verschmutzung und maximale Verschmutzung für die verschiedenen Mischgutsorten/Schichtaufbauten und Verschmutzungsgrade zu beobachten. Eine Tendenz bzw. ein typisches Verhalten ist nicht zu erkennen.
- Die Spitzenabflussraten unmittelbar nach Be regnung sind im modifizierten Fall größer als im unmodifizierten Zustand. Dies gilt für den unverschmutzten und den leicht verschmutzten Fall (Anfangsver Verschmutzung).
- Die Spitzenabflussraten sind im unverschmutzten Fall jeweils am kleinsten (hydrophobe Wirkung der unverschmutzten Porenwandungen).
- Im modifizierten Fall zeigt sich durchgehend eine Zunahme der Spitzenabflussraten mit zunehmender Verschmutzung (ebenso wie die Zunahme des Drainagevermögens). Eine Erklärung für die Verbesserung der Drainagefähigkeit

keit bei zunehmender Verschmutzung kann nicht auf die Abnahme der Hydrophobie der Porenwandungen zurückgeführt werden, sonst müsste dieser Effekt auch im unmodifizierten Fall auftreten. Hier zeigt sich hingegen teilweise eine Abnahme der Drainagefähigkeit, was mit der Behinderung des Abflusses durch Verschmutzung erklärt werden kann.

Abflussraten Starkregenprogramm

Bild 4.2-36 zeigt für die untersuchten Mischgutsorten/Schichtaufbauten und Verschmutzungsgrade den Vergleich der Spitzenabflussraten bei einem Starkregenprogramm zwischen dem Zustand einer Anfangsver Verschmutzung (200 bzw. 270 g/m²) und dem Zustand der „maximalen Verschmutzung“ (960 bzw. 1.440 g/m²). Im Verschmutzungsgrad „leicht“ sind leicht abweichende Starkregenprogramme durchgeführt worden, weshalb die Daten nicht ohne weiteres vergleichbar sind, sie sind deshalb in Bild 4.2-36 nicht aufgeführt.

Im Vergleich der Mischgutsorten/Schichtaufbauten im Zustand der Anfangsver Verschmutzung ist Folgendes zu erkennen (s. Bild 4.2-36):

- ZWOPA 0/8_0/16 zeigt deutlich höhere Spitzenabflüsse als OPA 0/8; bei ZWOPA 0/5_0/11 treten Spitzenabflussraten auf, die ungefähr auf

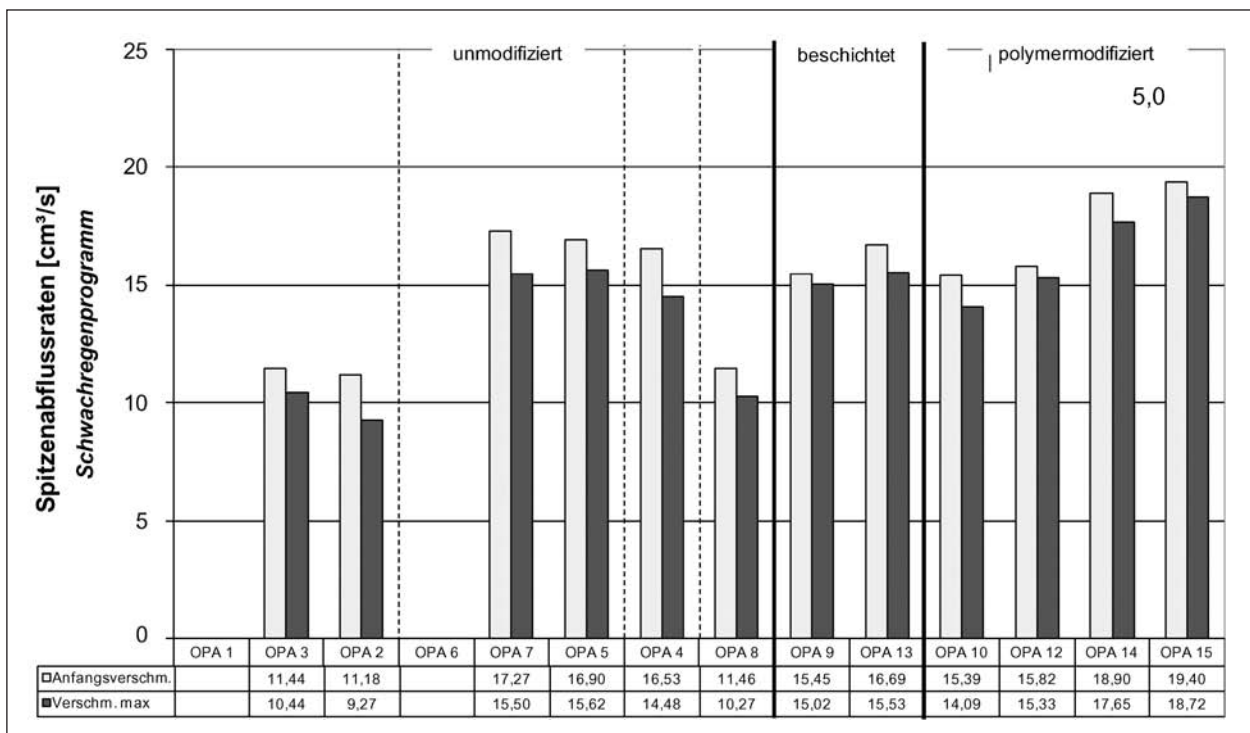


Bild 4.2-36: Spitzenabflussraten Starkregenprogramm

dem Niveau von OPA 0/8 liegen. OPA 0/11 zeigt höhere Spitzenabflüsse als OPA 0/8, aber niedrigere als ZWOPA 0/8_0/16.

- Diese „Rangfolge“ bleibt auch im maximal verschmutzten Zustand bestehen.

Bezüglich der Veränderung der Spitzenabflussraten durch die Verschmutzung und die Modifizierung bzw. Beschichtung ergibt sich folgendes Bild (s. Bild 4.2-36):

- Mit zunehmender Verschmutzung weisen alle Probekörper abnehmende Spitzenabflussraten auf, was auf die Abflussbehinderung durch die Verschmutzung zurückzuführen ist.
- Tendenziell sind für den modifizierten Fall höhere Spitzenabflussraten (sowohl bei starker als auch bei schwacher Verschmutzung) zu beobachten. Eine ähnliche Entwicklung ist auch bei geringerem Wasseranfall (Schwachregenprogramm, s. oben) zu beobachten.
- Es sind keine Auffälligkeiten bezüglich des Ausmaßes des Rückgangs der Spitzenabflussraten im Vergleich von modifiziertem und unmodifiziertem Fall zu beobachten.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die quantitativen Veränderungen der Spitzenabflussraten durch Verschmutzung eher gering sind.

4.2.7.6 Strukturkennwerte

Für Betrachtungen zum Einfluss von Beschichtungen und Verschmutzungen auf die Hohlraumstruktur von OPA werden mittels Röntgen-Computer-Tomografie folgende Strukturkennwerte durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) bestimmt (s. auch Teilprojekt „Strukturkennzeichnung von Offenporigen Asphalt“):

- Hohlraumgehalt und Verlauf des Hohlraumgehalts über die Schichtdicke,
- innere Oberfläche,
- Porenradienverteilungen.

Zur Untersuchung des Einflusses der Beschichtung auf die Hohlraumstruktur und die genannten Parameter sind der BAM Asphaltbohrkerne zur Verfügung gestellt worden. Um Fehlereinflüsse weitgehend auszuschalten, wurde ein und derselbe Bohrkern vor und nach Beschichtung vermessen. Zur besseren Kontrastbildung wurde nach ersten Erfah-

rungen dem Beschichtungsmaterial Bariumsulfat als Kontrastmittel beigegeben. Die Deposition der Beschichtung sowie möglicherweise entstandene Filmdicken der Beschichtung konnten im Rahmen der Untersuchungen selbst mit Hilfe hochauflösender CT-Technologie nicht sichtbar gemacht werden.

4.2.7.7 Akustische Kennwerte

Akustische Kennwerte stellen die Hauptzielgrößen der Betrachtungen zum Verschmutzungsverhalten im Vergleich von beschichtetem und unbeschichtetem Fall dar. Die Firma Müller BBM begleitet daher die Verschmutzungsversuche durch Messung von Parametern nach Abschluss des jeweiligen Verschmutzungszyklus, die direkt das akustische Verhalten wiedergeben oder Einfluss auf das akustische Verhalten haben (s. auch Teilprojekt TP 3221-4). Es sind dies der Schallabsorptionsgrad in situ nach DIN ISO 13472-1 und der Strömungswiderstand in situ in Anlehnung an DIN EN 29053.

Akustische Wirkung des Einbringens der Beschichtung

Zunächst interessiert, ob durch Einbringen der Beschichtung die akustische Wirkung negativ beeinflusst wird (z. B. durch Verstopfen von Poren).

In Bild 4.2-37 sind die Strömungswiderstände der bisher untersuchten Probekörper, darunter auch der Strömungswiderstand der beiden beschichteten Probekörper (Nr. 9 und 13) vor und nach Beschichtung, wiedergegeben. Es ist zu erkennen, dass der üblicherweise sehr empfindlich auf Verstopfung und Verschmutzung ansprechende Parameter Strömungswiderstand durch die Beschichtung nicht negativ beeinflusst wird. Es scheinen demnach kaum (akustisch wirksame) Poren oder Porenzusammenhänge (zusammenhängender Hohlraum) durch Einbringung der Beschichtung verstopft worden zu sein. Die Befürchtung, den OPA durch die Beschichtung akustisch negativ zu beeinflussen, hat sich demnach nicht bestätigt.

Entwicklung des längenspezifischen Strömungswiderstands mit zunehmender Verschmutzung

Der Schmutzeintrag in das Porengerüst von Offenporigen Asphalt bewirkt eine Erhöhung des längenspezifischen Strömungswiderstands. Bei denen durch die künstliche Verschmutzung hervorgerufe-

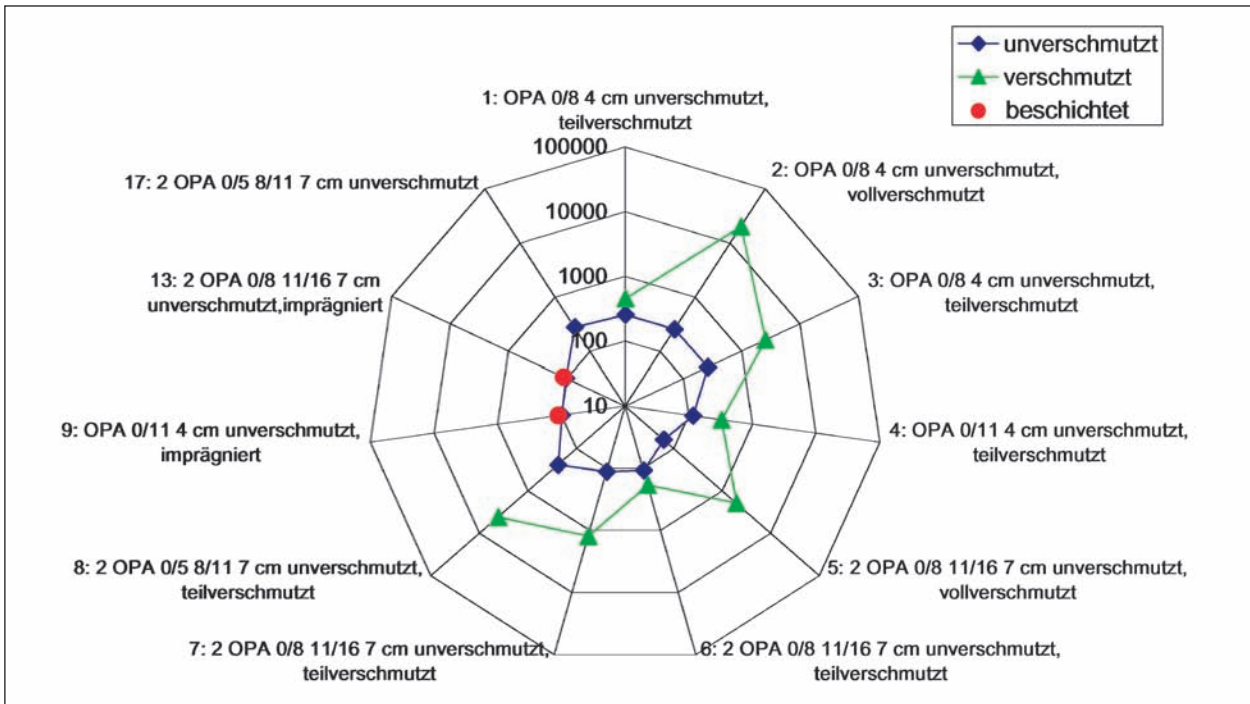


Bild 4.2-37: Strömungswiderstand in situ an verschiedenen Probekörpern (beschichtete Probekörper Nr. 9 und 13)

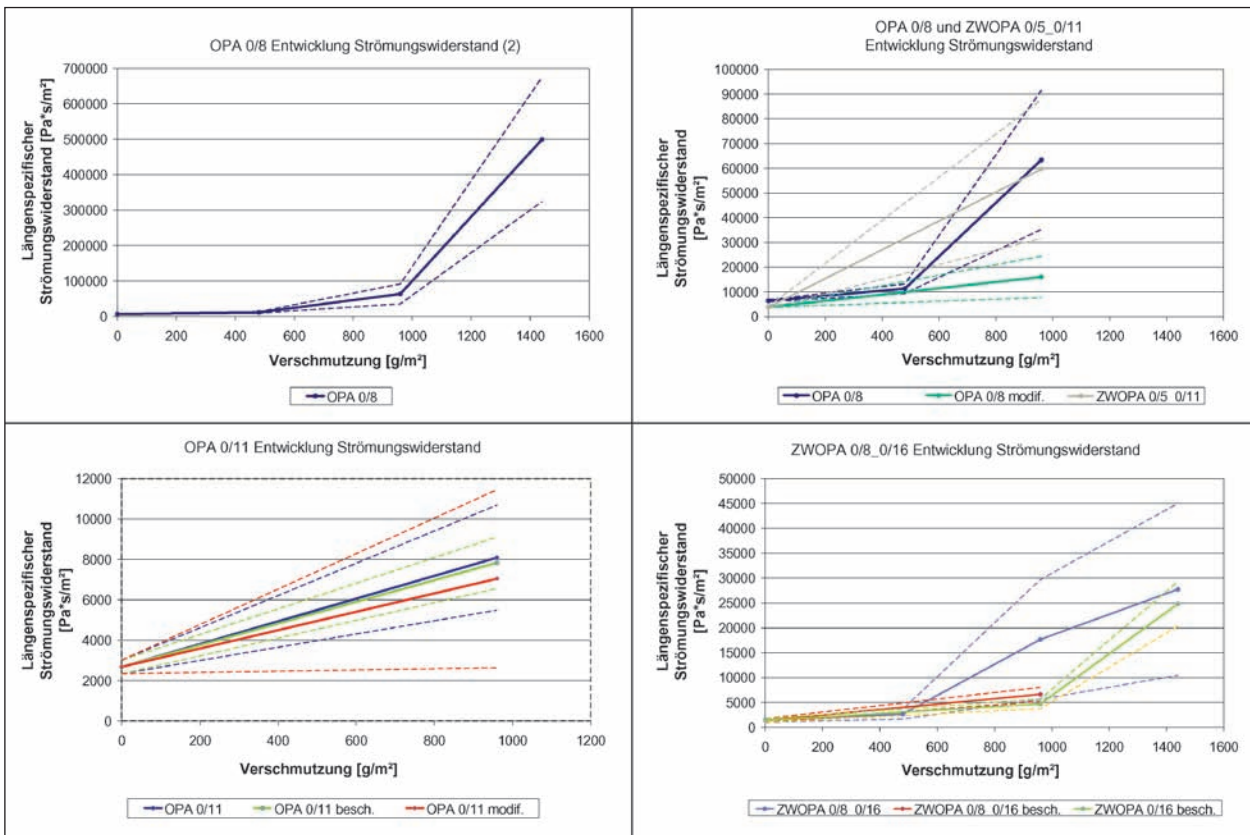


Bild 4.2-38: Entwicklung des längenspezifischen Strömungswiderstands mit zunehmender Verschmutzung

nen Änderungen des Strömungswiderstands der OPA-Probekörper sind folgende Auffälligkeiten zu bemerken (s. Bild 4.2-38):

- Die Erhöhung des Strömungswiderstands ist bei feinkörnigeren Porenstrukturen stärker ausgeprägt.

- Durch die Modifizierung bzw. Beschichtung der Probekörper fällt die Erhöhung des Strömungswiderstands im Vergleich zum unmodifizierten Fall geringer aus.

Entwicklung des Schallabsorptionsgrads in situ mit zunehmender Verschmutzung

Der Schallabsorptionsgrad wird durch die Verschmutzung insgesamt verringert, vor allem die ausgeprägten Absorptionsmaxima bzw. Peaks werden deutlich kleiner. Bei sehr starker Verschmutzung verliert der OPA seine schallabsorbierenden Eigenschaften fast vollständig.

Weiterhin ist durch die Verschmutzung eine Änderung der porösen Struktur festzustellen, sodass sich die Lage der Absorptionsmaxima im Frequenzspektrum verschiebt. Lagert sich der Schmutz hauptsächlich am Boden ab, wirkt dies wie die Verringerung der wirksamen Schichtdicke, das Absorptionsmaximum wandert hin zu höheren Frequenzen. 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 Verschiebungen der Maxima zu höheren und tieferen Frequenzen durch Verschmutzungseintrag sind demnach gegenläufig und können sich dadurch auch aufheben, sodass der jeweilige Einfluss der beiden Mechanismen auf

die Schallabsorption im Einzelfall nicht klar ausgemacht werden kann.

Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Versuche können aufgrund der relativ geringen aufgetragenen Schmutzmengen keine nennenswerte Verringerung der Schichtdicke (durch Ablagerungen am Boden) bewirken, sodass die Verschiebung der Frequenzmaxima in vollem Umfang auf die Erhöhung der Tortuosität zurückgeführt werden kann. Diese Auswirkung der Verschmutzung auf den gemessenen Frequenzgang des Absorptionsgrads ist schematisch in Bild 4.2-39 dargestellt. Die konkret aufgetretenen Veränderungen des Schallabsorptionsverhaltens werden in Bild 4.2-40 veranschaulicht. Folgendes ist zu erkennen:

- Die Lage des ersten Maximums im Frequenzspektrum verschiebt sich durch den Schmutzeintrag hin zu niedrigeren Frequenzen.
- Die Schallabsorptionsgrade α in diesem ersten Maximum werden mit zunehmender Verschmutzung geringer.
- Die genannten Auswirkungen der Verschmutzung sind bei den feinkörnigeren und einlagigen Aufbauten stärker ausgeprägt als bei größerem Größtkorn und zweilagigem Aufbau.
- Durch die Polymermodifizierung bzw. die Beschichtung werden im Vergleich zum unmodifizierten Fall geringere Auswirkungen der Ver-

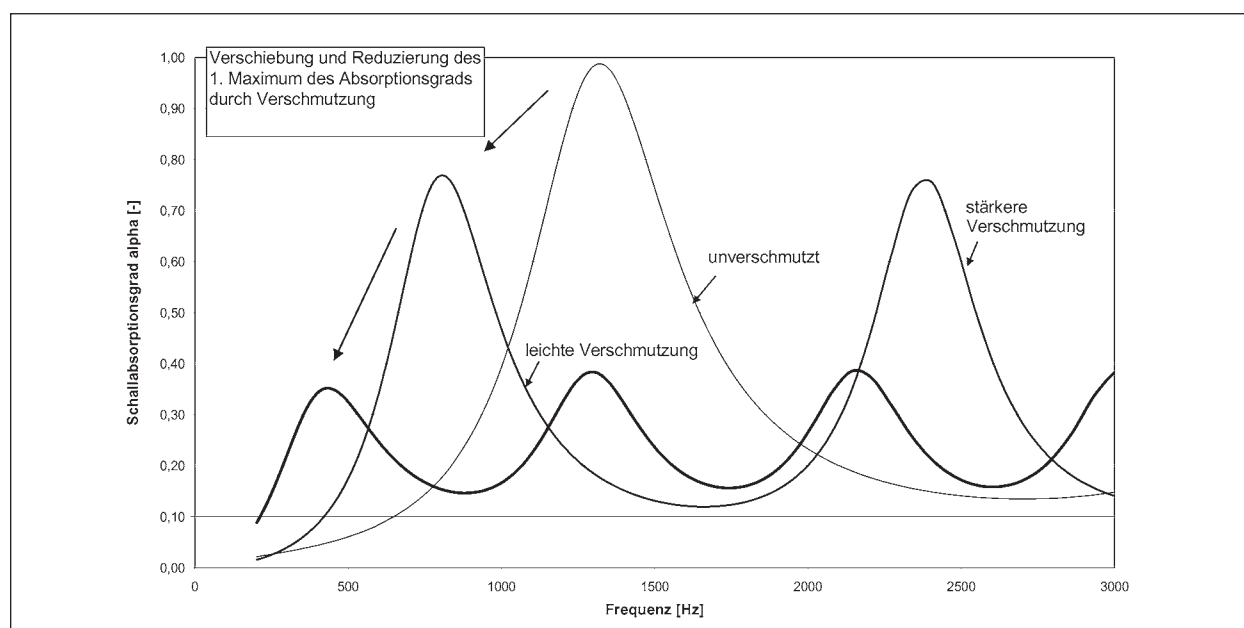


Bild 4.2-39: Veränderung des Schallabsorptionsgrads (Lage und Höhe des 1. Maximums) durch Verschmutzung (schematische Darstellung)

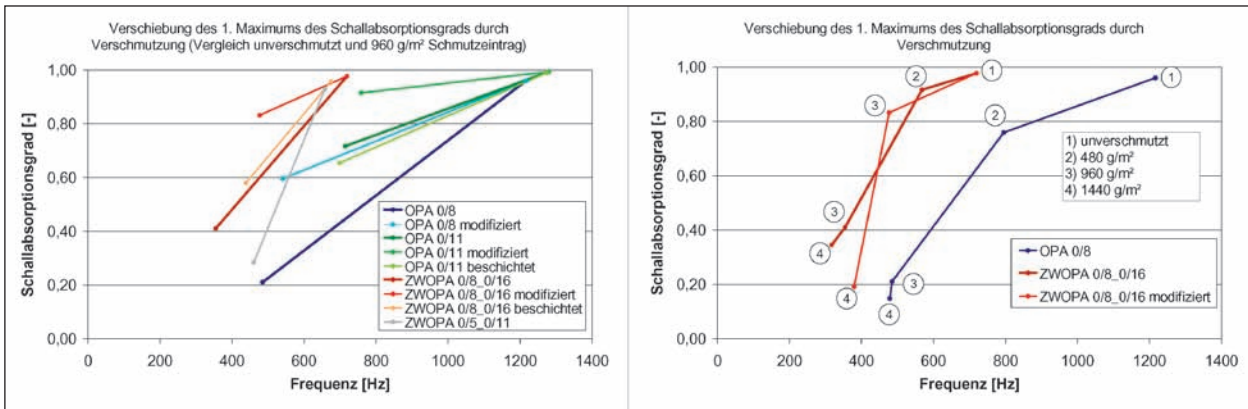


Bild 4.2-40: Auswirkung des (künstlichen) Verschmutzungseintrags auf das Schallabsorptionsverhalten der OPA-Probekörper; links Vergleich zwischen unverschmutztem Zustand und 960 g/m² Schmutzeintrag; rechts: OPA 0/8 und ZWOPA 0/8_0/16 in verschiedenen Verschmutzungsstadien

schmutzung auf den Schallabsorptionsgrad ausgemacht.

4.2.8 Zusammenfassung

In einer Gesamtschau der kombinierten Berechnungs- und Verschmutzungsversuche am unmodifizierten Material lässt sich bisher Folgendes zusammenfassend festhalten. Hinsichtlich des Schmutz- und Tausalzaustrags durch Beregnung zeigt sich:

- Der relative Schmutzaustrag bezogen auf die Menge des aufgetragenen Schmutzes ist gering. Er beträgt für alle Mischgutsorten/Schichtaufbauten (modifiziert/unmodifiziert) auch für unterschiedlich starke Verschmutzungsgrade lediglich 1,0 bis 1,5 % des aufgetragenen/eingetragenen Schmutzes.
- Bei höheren Verschmutzungsgraden und stärkerem Wasserabfluss werden zunehmend auch größere Schmutzpartikel ausgetragen. Grobkörnigere Mischgutstrukturen (z. B. ZWOPA 0/8_0/16) scheinen diesen Effekt zusätzlich zu begünstigen.
- Die Modifizierung bzw. Beschichtung erhöht den Schmutzaustrag.
- Unabhängig von Mischgutsorte/Schichtaufbau treten aufgrund der guten Löslichkeit sehr hohe Gesamttausalzaustragsraten zwischen 91 und 100 % auf. Mit zunehmendem Verschmutzungsgrad und abnehmendem Rückstand von Tausalz im OPA nehmen die relativen Tausalzausträge (Verhältnis zwischen ausgetragenen Tausalz und im Probekörper vor der Beregnung vorhandenem Tausalzrückstand) ab.

- Das im Winterdienst zusätzlich verwendete CaCl₂ ist hier nicht untersucht worden, jedoch beim Verschmutzungsprozess, wie er in situ stattfindet, ebenfalls zu berücksichtigen.

Hinsichtlich des Wasserabflussverhaltens nach Beregnung ist folgendes zu beobachten:

- Oberflächlicher Abfluss tritt nur in wenigen Fällen (bei zunehmend verschmutzten feinkörnigen Mischgutsorten) auf; Offenporiger Asphalt kann generell (selbst bei „starker“ Verschmutzung noch) große Wassermengen pro Zeiteinheit durch seine Porenstruktur hindurch an der Unterkante des OPA ableiten.
- Quantitativ sind die Änderungen des Drainagevermögens und der Spitzenabflussraten im Vergleich von schwacher und „maximaler“ Verschmutzung eher gering, es zeigen sich jedoch Tendenzen. Im Vergleich von schwacher und „maximaler“ Verschmutzung ist eine Abnahme der Spitzenabflussraten zu beobachten. Der Schmutz scheint den Wasserabfluss im Zustand „maximaler Verschmutzung“ regelrecht zu behindern. Bei größeren Wassermengen tritt dieses Phänomen deutlicher in Erscheinung als bei geringen Wassermengen.
- Das Drainagevermögen ist für alle Mischgutsorten/Schichtaufbauten nach „erstmaliger“ Verschmutzung höher als im unverschmutzten Zustand. Als Erklärung ist möglicherweise die Veränderung der Benetzungseigenschaften der Porenoberflächen im OPA durch den erstmaligen Schmutzeintrag anzuführen. Unter Umständen spielen auch die Verfüllung von Mikroporen und das Entfallen kapillarer Effekte eine Rolle.

- Grobkörnigere Mischgutsorten/Schichtaufbauten (ZWOPA 0/8_0/16 und OPA 0/11) zeigen sowohl bei schwacher als auch bei „maximaler“ Verschmutzung höhere Spitzenabflussraten als feinkörnigere (ZWOPA 0/5_0/11 und OPA 0/8). Besonders deutlich tritt dieser Unterschied zwischen den Mischgutsorten/Schichtaufbauten bei höheren Wassermengen zutage.
- Der Einfluss der Modifizierung und der Beschichtung ist mit Hilfe der hier betrachteten Wasserabflussparameter nur teilweise möglich. Teilweise zeigt sich die an den Porenwandungen zusätzlich erzeugte Hydrophobie durch im Vergleich geringere Drainagevermögen; dieser Effekt kann jedoch nicht durchgehend nachgewiesen werden bzw. ist teilweise schwach ausgeprägt.
- Im Falle der Polymermodifizierung tritt im Gegensatz zu den unmodifizierten (und auch beschichteten) Fällen mit zunehmender Verschmutzung eine Verbesserung der Drainagefähigkeit (höhere Spitzenabflussraten und Drainagevermögen) auf. Hierfür liegt keine schlüssige Erklärung vor.

Hinsichtlich der Veränderung des akustischen Verhaltens durch Verschmutzung ist Folgendes zu beobachten:

- Der Schmutzeintrag in das Porengerüst von Offenporigen Asphalt bewirkt eine Erhöhung des längenspezifischen Strömungswiderstands.
- Die Erhöhung des Strömungswiderstands ist bei feinkörnigeren Porenstrukturen stärker ausgeprägt.
- Durch die Modifizierung bzw. Beschichtung der Probekörper fällt die Erhöhung des Strömungswiderstands im Vergleich zum unmodifizierten Fall geringer aus.
- Die Schallabsorptionsgrade α werden mit zunehmender Verschmutzung geringer. Dies kann vor allem an der Verringerung der Absorptionsgradmaxima gezeigt werden.
- Die Lage des ersten Absorptionsgradmaximums im Frequenzspektrum verschiebt sich durch den Schmutzeintrag hin zu niedrigeren Frequenzen.
- Die beiden genannten Auswirkungen der Verschmutzung auf den Schallabsorptionsgrad sind bei den feinkörnigeren und einlagigen Aufbauten

stärker ausgeprägt als bei größerem Größtkorn und zweilagigem Aufbau.

- Durch die Polymermodifizierung bzw. die Beschichtung werden im Vergleich zum unmodifizierten Fall geringere Auswirkungen der Verschmutzung auf den Schallabsorptionsgrad ausgemacht.

Literatur

- [1] WAANDERS, G.; ELS, H.: Splittmastixasphalt und Dränasphalt in den Niederlanden, in: Asphalt, Nr. 4 (1995), S. 8-17
- [2] SUSS, G.: Erfahrungen mit der Anwendung von Dränasphalt in Europa, in: Straße und Autobahn, Nr.4 (1990), S. 159-165
- [3] DURTH, W.: Stand der Forschung zum Winterdienst auf offenporigen Deckschichten, in: Straße und Autobahn, Nr. 10 (1994), S. 581-586
- [4] Bundesministerium für Verkehr: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 5/2002, betr.: Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS 90; Fahrbahnoberflächen-Korrekturwerte D_{StrO} für Offenporigen Asphalt
- [5] HOLLDORB, C.; ROOS, R.: Reinigung offenporiger Asphaltdeckschichten, in: Straße und Autobahn, Nr. 1 (1996), S. 27-31
- [6] N. N.: Hinweise zur Asphaltbauweise, Veröffentlichung des Deutschen Asphaltverbands (DAV), 2004, 36 S.
- [7] N. N.: Offenporige Asphaltdeckschichten auf Außerortsstraßen, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Reihe Straßenbau, Heft S 12, 1996
- [8] BECKENBAUER, T. et al.: Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahngeräusch, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 847, Bundesministerium für Verkehr, 2002
- [9] N. N.: Merkblatt für den Bau offenporiger Asphaltdeckschichten, Forschungsgesellschaft für Straßenwesen (FGSV), Köln, 1998
- [10] ROOS, R.; HOLLDORB, C.: Erhaltung der Funktionen Lärminderung und Entwässerung

- offenporiger Asphaltdecken, Schlussbericht FE 03.237 R90L, unveröffentlicht, Darmstadt, 1997
- [11] KUTI, H.: Verschmutzungsprozess von offenporigen Asphaltdecken, Diplomarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (mit Unterstützung des Geologischen Zentrums der Universität Göttingen), Universität Stuttgart, 2006
- [12] OTT, C.; JAGER, J.: Aufbereitung von Straßenkehrschicht von Außerortsstraßen, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 911, Bundesministerium für Verkehr, Bonn, 2005
- [13] GALLENKEMPER, B.; FRITSCH, M.; BECKER, G.: Schadstoffgehalte von Bankettschäl- und Kehrgut und deren umweltverträgliche Beseitigung, Bundesministerium für Verkehr, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 664, Bonn, 1993
- [14] BALD, S., WELLNER, F. et al.: Optimierung der Zusammensetzung wasserdurchlässiger Asphaltbefestigungen, Forschungsauftrag des DAV, Schlussbericht, Darmstadt, 2005
- [15] WEYRINGER, H. W.: Drainasphalt – Ein innovatives Produkt des Asphaltstraßenbaus, in: Straße und Autobahn Nr. 11, S. 634-640, 1991
- [16] MASSON, J.-F.; LEBLOND, V.; MARGESON, J.: Bitumen morphologies by phase-detection atomic force microscopy, in: Journal of Microscopy Nr. 1, S. 17-29, 2006
- [17] SUSS, G. et al.: Untersuchung der Eignung von Gesteinsmehlen als Füller zur Herstellung von Asphaltbetondeckschichten, Bundesministerium für Verkehr, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 360, Bonn, 1982
- [18] MARÓTHY, E.: Untersuchung der Rauheit von Poreninnenwandungen in Offenporigen Asphalten, Diplomarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen (mit Unterstützung des Geologischen Zentrums der Universität Göttingen), Universität Stuttgart, 2006
- [19] KANDHAL, P. S.; FOO, K. Y.; MALLICK, R. B.: A critical review of VMA requirements in Superpave, National Center for Asphalt Technology, NCAT Report 98-1, Auburn University (USA), Auburn, 1998
- [20] HIRSCH, V.: Vortrag zum Thema „Verschmutzung von Offenporigen Asphalten“ aus einem BAST-Forschungsprojekt, Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch Gladbach, 24.10.2006
- [21] HÄMMERLING, M.: Verschmutzungs- und Entwässerungsverhalten von Offenporigen Asphalten, Diplomarbeit, Institut für Straßen- und Verkehrswesen Universität Stuttgart, 2007
- [22] SCHELLENBERGER, W.: Einbau von Asphaltbeton und der Einfluss der Witterungsbedingungen, in: Asphalt 7-8, 29-34, 1997
- [23] Forschungsgesellschaft für Straßenwesen (FGSV): Merkblatt Offenporige Asphaltdeckschichten (M OPA), Entwurf Stand 10/2007, bislang nicht veröffentlicht

4.3 Teilprojekt „Strukturanalyse von Offenporigen Asphalten“

Dipl.-Ing. Christoph Recknagel
 Bundesanstalt für Materialforschung und
 -prüfung, BAM
 Berlin

4.3.1 Zielsetzung

Neben den Stoffeigenschaften der einzelnen Ausgangsmaterialien (Mischungsbestandteilen) bestimmt vor allem die Struktur eines daraus zusammengesetzten Materialverbundes (Komposit-Material) dessen Gebrauchsverhalten. Diese einfache Weisheit ist Motivation für die ständige Weiterentwicklung des Untersuchungsinstrumentariums zur Gefügekennzeichnung auch im Bereich der Baustoffe. Nachdem die Gefügekennzeichnung insbesondere bei mineralischen Baustoffen bereits integrierter Bestandteil der Baustoffcharakterisierung ist, erfordern auch die zunehmende Spezialisierung und Weiterentwicklung der Asphaltbaustoffe im Zusammenhang mit der Forderung nach gebrauchsgerechtem Leistungsnachweis methodische Fortentwicklung bei der Strukturkennzeichnung. Derzeit ist es nach wie vor Stand der Technik, Aussagen über die verschiedenen Bestandteile des Asphaltens (Bindemittel, Mineralstoffe und Luft) durch eine lösende – und damit zerstörende – Auftrennung des Mehrphasensystems Asphalt zu gewinnen. Dabei gehen jedoch wertvolle Informationen über den realen inneren Aufbau verloren und man erhält lediglich integrierte Werte über die Phasenverteilung. Da viele Leistungseigenschaften nicht nur vom Gesamthohlraumgehalt, son-

dern vielmehr von Art und Verteilung der Hohlräume, aber auch der Art und internen Verteilung fester Stoffbestandteile (Phasenhomogenität) bestimmt werden, kann eine Visualisierung und orts aufgelöste Kennzeichnung der inneren Struktur einen wichtigen zusätzlichen Beitrag für eine leistungsbezogene Bewertung des Baustoffs Asphalt leisten. Um Korrelationen zwischen Veränderungen des Gebrauchsverhaltens zu beanspruchungsbedingten Struktur-Artefakten zu untersuchen und somit ein Verständnis über die kausalen Zusammenhänge zwischen Gebrauchseigenschaften wie z. B. Dichtigkeit, Geräuschemission, Kontaktverhalten bei Nässe, Standfestigkeit, Dauerhaftigkeit etc. und Stoffaufbau zu erarbeiten, erscheint eine derartige Charakterisierung nahezu unumgänglich.

Konsequenterweise kann deshalb ein Übergang bei der Asphaltkennzeichnung von den begrenzten Aussagemöglichkeiten einer extrahierenden zu einer entsprechend spezialisierten und detaillierter auflösenden nicht zerstörenden Strukturkennzeichnung erforderlich werden. Diese Erkenntnis ist nicht neu. Entsprechende Ansätze zur Separation der Hohlraumstruktur von Asphaltens sind beispielsweise bereits Ende der 70er Jahren mittels Vakuum-Druck-Imprägnierung [1] unternommen worden. Dabei wurden Hohlräume scheibenförmiger Probestücke mit Hilfe eines fluoreszierenden Flüssigkunststoffes unter Anlegen eines Vakuumgradienten und nachfolgendem Überdruck gefüllt. Nach dem Aushärten des Kunstharzes konnten visuelle Begutachtungen zur flächenhaften Hohlraumverteilung erfolgen. Örtlich begrenzte dreidimensionale Informationen ließen sich nach Auflösung der Asphaltstruktur aus der „separierten“ Hohlraumstruktur gewinnen (siehe Bild 4.3-1).

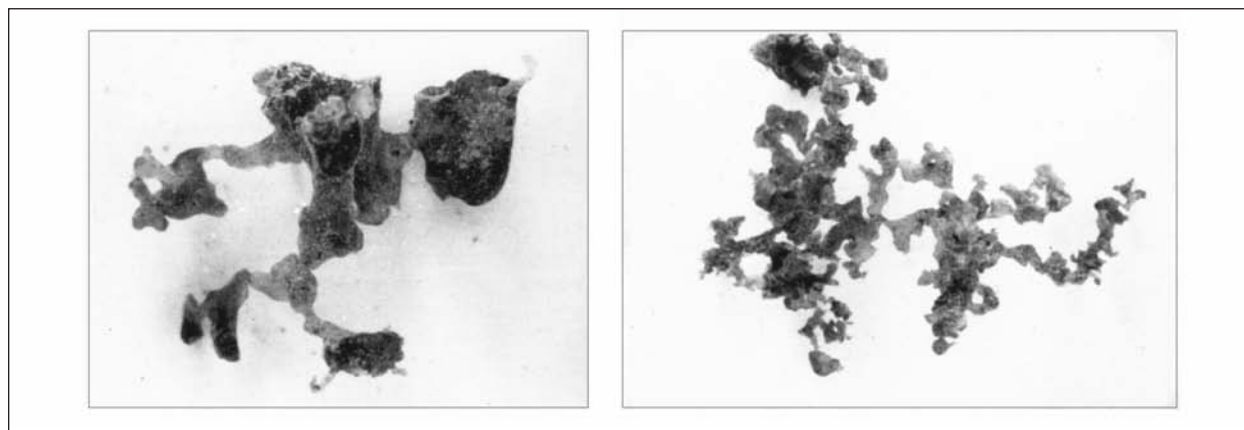


Bild 4.3-1: Mit EP-Harz geflutete Asphalt-Hohlräume nach Separierung mittels Extraktion [1]

Aber auch schon recht bald erfolgten Versuche, durchstrahlende Untersuchungsverfahren auf verfahrenstypisch kreissymmetrische Probekörper des Baustoffes Asphalt zu adaptieren. Eine derartige Herangehensweise zur orts aufgelösten Kennzeichnung der inneren Struktur stellte die Dichteauflösung im Ergebnis schichtweiser Durchstrahlung dar. Die in [2] zusammengefassten Erfahrungen mit der radiologischen Messeinrichtung der BAST aus den 90er Jahren berichten von einer Auflösung der „Dichte als Funktion der Zylinderachse in Schritten von 1 cm“. Dabei wurde unter Bezug auf Kalibrierkörper von der erfassten Zählrate radioaktiver Teilchen als Dichteäquivalent noch recht grob aufgelöst auf die innere Struktur der Probe geschlossen.

Jedoch erst die Möglichkeiten der modernen Datenverarbeitung lassen eine reproduzierbare visuelle Erfassung der Struktur mit hoher Ortsauflösung zu. Besondere Optionen zur tiefenaufgelösten und zerstörungsfreien räumlichen Visualisierung des Gefüges bietet das Verfahren der Computertomografie (tome – Schnitt; grafi – „Schrift“-Bild) mit Röntgenstrahlen, von dessen Adaption und Anwendung auf bitumenhaltige Baustoffe in [3], [4] und in zunehmendem Maße auch in der internationalen Literatur – z. B. in [4] bis [9] – unter verschiedenen Fragestellungen berichtet wird. Dieser Trend wird erst recht verständlich, wenn man die Möglichkeiten berücksichtigt, die sich aus der digitalen Bildbearbeitung ergeben. Generell erwachsen neben der dreidimensionalen Visualisierung der Struktur mittels computergestützter Bildbearbeitung (Digital Imaging) völlig neue räumlich visuelle, aber auch numerische Auswertemöglichkeiten oder auch anschließende Simulationsmöglichkeiten, deren Leistungsfähigkeit in Analogie zur Computertechnik in kurzen Zeitabschnitten rasant zunimmt. Beispielsweise erscheint es möglich, auf Grundlage einer digitalisierten Nachbildung der inneren Struktur durch ein Netzwerk Finiter Elemente realitätsnahe Simulationen von Transportphänomenen durchzuführen oder mit Hilfe spezieller Segmentierungswerkzeuge offene Hohlräume von lokal separierten abgeschlossenen Poren unterscheiden zu können. Im diesem Beitrag soll über diese in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung seit Mitte der 90er Jahre sukzessiv gewachsenen Erfahrungen bei der Anwendung der dreidimensionalen Röntgen-Computertomografie (im Weiteren abgekürzt als 3D-CT bezeichnet) auf bitumenhaltige Baustoffe berichtet werden. Insbesondere die Fortschritte der letzten Jahre, die im Zusammenhang mit der erforderlichen Strukturauflösung of-

fenporiger Fahrbahnbeläge erreicht wurden, sind Anlass, ein breiteres Publikum auf die Möglichkeiten dieser Untersuchungsmethodik aufmerksam zu machen.

4.3.2 Funktionsweise der Röntgen-Computertomografie

Bei diesem – im Allgemeinen mit der Medizintechnik verbundenen – Verfahren der Röntgen-Computertomografie durchdringen Röntgenstrahlen (elektromagnetische Strahlen im Wellenlängenbereich 10^{-8} bis 10^{-12} m) mit einer bekannten Ausgangsstrahlungsintensität I_0 das zu kennzeichnende Objekt. Dabei wird ein Teil der emittierten Strahlung durch die Stoffstruktur des Objektes gemäß Absorptionsgesetz

$$I = I_0 \cdot e^{-\sum \mu_{i,n} \cdot d_{i,n}}$$

mit I = gemessene Strahlungsintensität

I_0 = Ausgangsstrahlungsintensität

d = Weglänge bzw. Probendicke

μ = Absorptionskoeffizient

i = Voxel

n = Winkelposition

absorbiert und die ausgesandte Strahlung auf eine Intensität I abgeschwächt. Der Anteil der jeweils absorbierten Strahlung – ausgedrückt durch den Absorptionskoeffizienten μ – ist für die hier zu kennzeichnenden Materialien proportional abhängig von der Dichte. Zur Untersuchung befindet sich das zu kennzeichnende Objekt (vorzugsweise kreissymmetrischer Geometrie) im Strahlkegel eines Röntgenstrahlers vor einem Flächendetektor. Die Pixelauflösung der Detektormatrix definiert die Unterteilung des Objektes in virtuelle Volumenelemente, so genannte Voxel. Sowohl die technische Auflösung der Detektormatrix (Anzahl der Pixel) als auch die lokale Anordnung des Objektes im Strahlkegel (Gesetzmäßigkeiten der Optik) bestimmen dabei das Auflösungsvermögen der Messung.

Die bei der Durchstrahlung in jedem Detektorpixel je Objektposition und Zeiteinheit gemessene abgeschwächte kurzwellige Strahlung (Strahlungsintensität I) wird nicht nur über eine Zählratenverteilung beschrieben, sondern – und das ist der große Vorteil der Computertomografie – darüber hinaus in langwellige sichtbare Lichtstrahlung transformiert

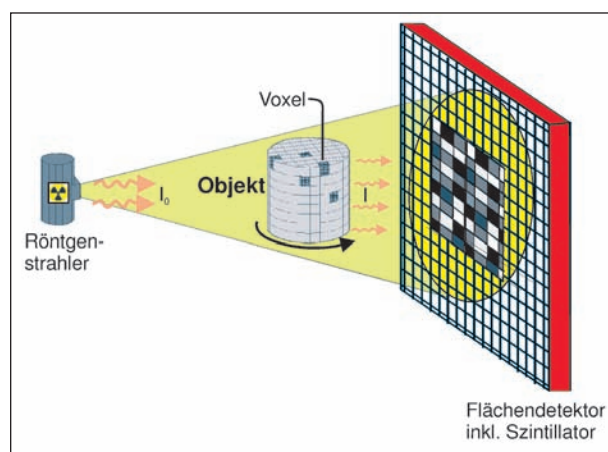


Bild 4.3-2: Schematische Darstellung des Untersuchungsprinzips

und digital abgespeichert. Auf diese Art und Weise wird mit jedem Bildpunkt die mittlere aufsummierte Dichte entlang eines Röntgenstrahles in dieser Strahlposition in verschiedenen Grauwerten sichtbar (visualisiert) wiedergeben und quasi ein „Abbild“ der Dichteverteilung unter dem jeweiligen Betrachtungswinkel erzeugt. Nun wird das Objekt in n-fachen Winkelschritten um insgesamt 360° rotierend bewegt und in jeder der Winkelpositionen die Strahlungsabschwächung bei Durchlaufen des Objektes als jeweils weiteres „Schattenbild“ erfasst. Im Ergebnis der Durchstrahlung liegt ein n-faches Gleichungssystem über die durch Absorption abgeschwächten Strahlungsintensitäten vor. Unter Nutzung der Computertechnik kann aus den vorhandenen digitalisierten Daten der zweidimensionalen Schnittbilder nun gemäß einem mathematischen Verfahren nach Radon ein dreidimensionaler Volumendatensatz erstellt werden. Im Ergebnis dieses Transformationsprozesses wird jedem Voxel genau ein mittlerer Absorptionskoeffizient – d. h. eine mittlere Dichte – eindeutig zugeordnet. Normiert auf 256 Grauwerte kann dann mit diesem Volumendatensatz die räumliche Struktur des Objektes visualisiert werden – wobei mit zunehmender Dichte die Objektteile heller dargestellt werden. Darüber hinaus können die digitalisierten Daten für weitere geometrische oder statistische Auswertungen z. B. zur Phasenverteilung herangezogen werden. Dazu wird die Dichteverteilung des Untersuchungsgegenstandes in Form eines Histogramms der im Volumen gefundenen Grauwertverteilung ausgewertet.

In der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM, sind mehrere spezielle computer-tomografische Anlagen vorhanden, deren erfolgreicher Einsatz von einer kulturhistorischen bis indu-

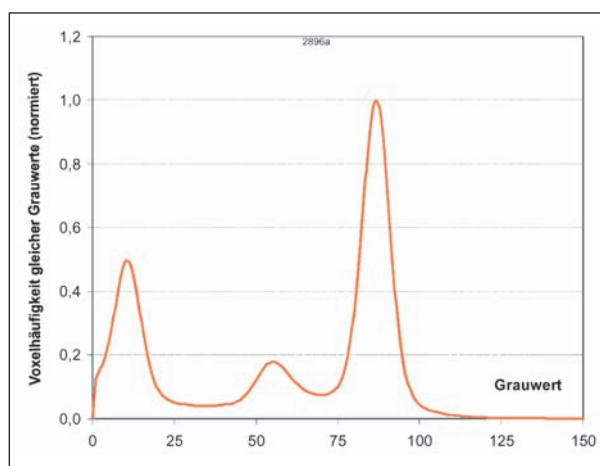


Bild 4.3-3: Schematische Darstellung eines Grauwert-Histogramms für eine Asphaltprobe

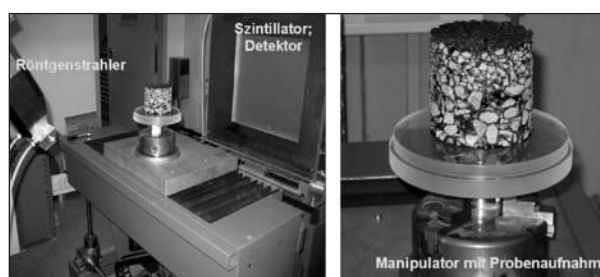


Bild 4.3-4: Messkonfiguration zur Untersuchung von Proben bis maximal Ø 150 mm (Mikro-CT-Anlage mit 225-kV-Röntgenstrahler)



Bild 4.3-5: Messkonfiguration zur Untersuchung größerer Proben bis zu einer Diagonale von maximal 50 cm (Makro-CT-Anlage mit 450-kV-Röntgenstrahler)

striellen Anwendungen zur Gütekontrolle reicht. Erste Erfahrungen mit einer Adaption des Verfahrens an die Probleme des Straßenbaus wurden bei der Kennzeichnung der Verarbeitungstechnologie spezieller Dicht- und Dehnkonstruktionen aus Asphalt gesammelt. Motiviert durch die Ergebnisse wurden in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung weitere interne Untersuchungen durchgeführt, in denen zusätzliche Möglichkeiten der 3D-CT an Asphalten prinzipiell angetestet wurden.

Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sind ermutigend genug, um mit der Vorstellung einzelner Ergebnisse in diesem Beitrag ein größeres Fachpublikum auf die Potenziale der Röntgen-Computertomografie bei der Strukturkennzeichnung von Asphalten aufmerksam zu machen und die bereits bekannten Erfahrungsberichte zu ergänzen.

4.3.3 Untersuchungen zum Eignungsnachweis der 3-D-Röntgen-Computertomografie bei der Strukturaufklärung von Asphalt

Aus den in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung vorhandenen apparativen Möglichkeiten (siehe Bild 4.3-4) wurden für die bisherigen computertomografischen Untersuchungen an Asphaltprobekörpern je nach Probengeometrie und gewünschter Auflösung insgesamt 4 Messkonfigurationen adaptiert und erprobt:

- für Kleinproben und kreiszylindrische Probekörper bis 150 mm Durchmesser:
 - a) Mikro-CT 1: Mikrofokusröntgenröhre als Strahlungsquelle mit 225 kV Röntgenenergie und Flächendetektor mit einem Auflösungsvermögen von 2.048 x 2.048 Pixel,
 - b) Mikro-CT 2: Mikrofokusröntgenröhre als Strahlungsquelle mit 320 kV

Röntgenenergie und Flächendetektor mit einem Auflösungsvermögen von 1.024 x 1.024 Pixel,

- für plattenförmige Probekörper bis 1.000 mm Durchstrahllänge:
 - a) Mikro-CT 1: Röntgenröhre mit 450 kV Röntgenenergie und Flächendetektor mit einem Auflösungsvermögen von 512 x 512 Pixel,
 - b) Mikro-CT 2: Linearbeschleuniger mit 12 MeV Röntgenenergie und bis zu 20 Einzeldetektoren oder Flächendetektor mit einem Auflösungsvermögen von 512 x 512 Pixel.

Dabei umspannten die bisherigen Validierungstests von der Begutachtung eines Bindemittelfilmes (10 x 10 mm) eines gefüllten PmB mit einer Ortsauflösung von 0,006 mm über die Untersuchung von Asphaltprismen (4 x 4 x 16 cm) oder Bohrkernen (Durchmesser 50; 100 und 150 mm) mit Ortsauflösungen von 0,03 mm bis 0,15 mm oder plattenförmigen Proben (Abmessungen: 130 x 160 mm und 260 x 320 mm) bis zu Bauartproben eines Dehn- und Abdichtungssystems aus Asphalt (Abmessung: 520 x 250 mm) mit Ortsauflösungen von 0,75 mm eine Vielzahl von Messanwendungen.

Die nachfolgenden Ausführungen sollen jedoch auf die bisher erreichten Ergebnisse bei der Validierung

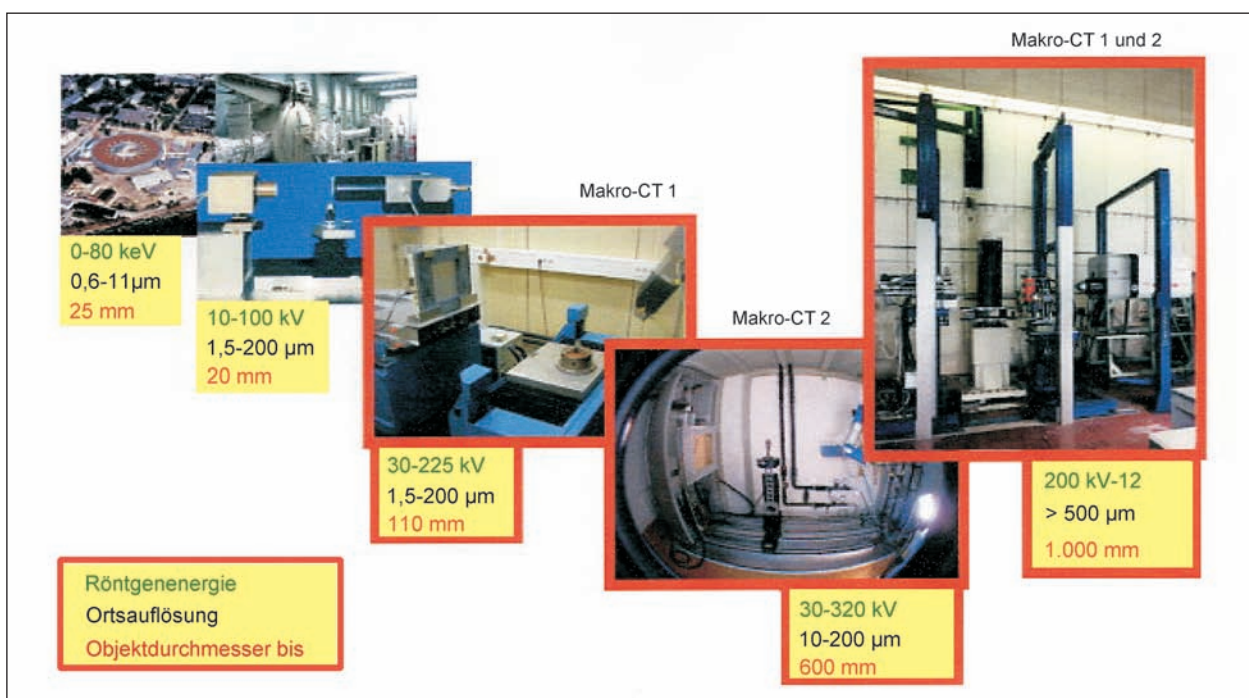


Bild 4.3-6: Durchstrahlungseinrichtungen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und ihre Leistungsparameter

der 3D-CT an überwiegend kreiszylindrischen Probekörpern unterschiedlicher Asphalte begrenzt sein. Neben eigenen Rückstellproben standen dankenswerterweise Rückstellproben unterschiedlicher Offenporiger Asphalte aus dem Bestand der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zur Verfügung. In das zusammengestellte Untersuchungsmaterial waren unbeanspruchte Proben für eine Kennzeichnung der tatsächlichen Ausgangsstruktur als auch Versuchsmaterial nach speziellen Beanspruchungen eingeschlossen. Sowohl die Auswahl der Proben (Untersuchungsgegenstand) sowie deren Vorgeschichte (Beanspruchungsstatus), die jeweils aufzuklärende Fragestellung (Untersuchungsziel) und damit auch die jeweilige versuchstechnische Vorgehensweise (Variation der CT-Anlageparameter) sowie die zeitliche Abfolge der Untersuchungen entsprechen nicht der Vorgehensweise einer systematischen Studie von Materialphänomenen oder Messkonfigurationen. Im Vordergrund standen vielmehr immer die Verfahrensadaptation der 3D-CT und die Ableitung möglichst verallgemeinerbarer Erfahrungen über die prinzipielle Eignung und Leistungsmöglichkeiten bezüglich einer speziellen Hohlraum- und Phasenanalyse von Asphalt. Oftmals gaben Ergebnisse einer Messprobe, die unter einer bestimmten Fragestellung untersucht und ausgewertet wurde, zufallsbedingte Anregungen für weitere Untersuchungen unter einer neuen Fragestellung. Mit Hilfe der dadurch gegebenen „Zufälligkeit“ besitzt jedoch die Evaluierung der Untersuchungsmethode (Eignungsnachweis) eine Aussagekraft mit großer Aussagebreite. Stellvertretend für einen ganzen Katalog von interessierenden Fragestellungen wurde versucht, auf folgende Problemkategorien einzugehen:

Kategorie 1: Hohlraumkennzeichnung

- Ist z. B. der Hohlraumgehalt quantifizierbar und die Art der Porenstruktur qualifizierbar?
- Kann die erfasste Hohlraumstruktur reproduzierbar abgebildet werden?

Kategorie 2: Kennzeichnung des inneren stofflichen Aufbaus/Phasenkennzeichnung

- Kann man beispielsweise Informationen zum stofflichen Aufbau des Asphalts, zur lokalen Phasenverteilung sowie zur Homogenität der einzelnen Stoffphasen des untersuchten Asphaltgewinnes gewinnen?

- Sind Detailauflösungen z. B. des Mineralgerüsts oder von Verbundebenen möglich?

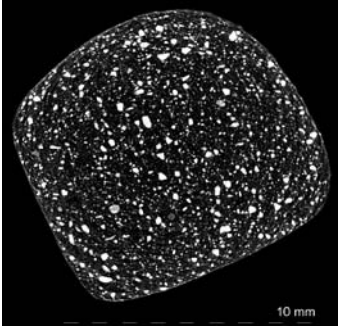
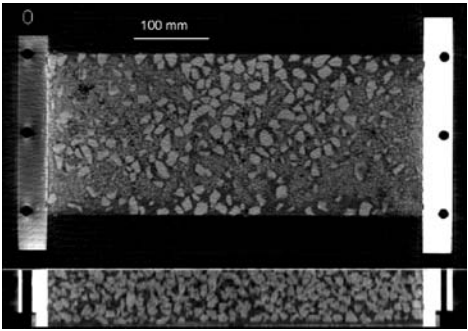
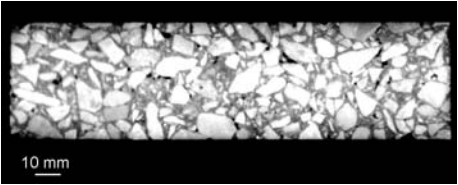
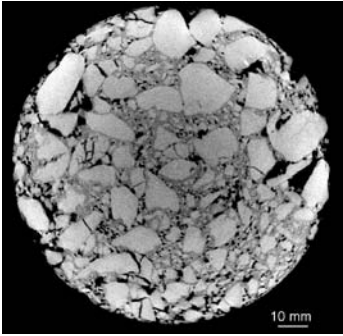
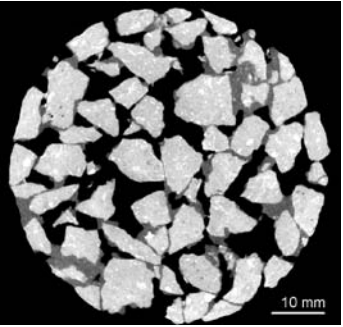
Kategorie 3: Kennzeichnung struktureller Artefakte infolge Beanspruchung

- Kann man beanspruchungsbedingte Änderungen der Struktur detektieren?

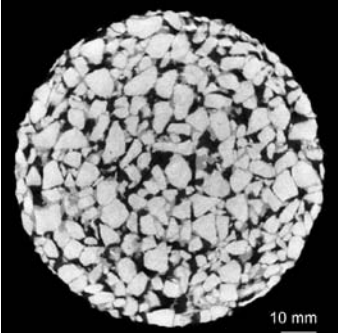
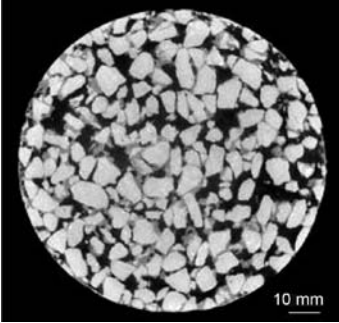
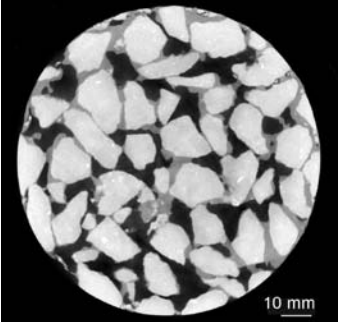
Die bisher vorliegenden Ergebnisse sollen anhand nachfolgend diskutierter Untersuchungsbeispiele präsentiert werden.

4.3.3.1 Hohlraumanalyse

Aus den im Ergebnis der Durchstrahlung gemessenen Zählraten und der daraus abgeleiteten Grauwertverteilung des Volumens eines Probekörpers, kann die Phase Luft – die mit „Hohlraum“ gleichgesetzt wird – mittels Schwellwertsetzung separiert und quantitativ ausgewertet werden. In Abhängigkeit von der Größe des Objektes und natürlich von den Durchstrahlbedingungen (geometrische Lage im Strahlkegel; Röntgenenergie; Anzahl der Winkelpositionen) und den Detektoreigenschaften (Anzahl der Pixel) wird das mögliche Auflösungsvermögen bestimmt. Ist dies feiner bzw. mindestens der Größenordnung der Poren entsprechend, liefert die Integration des Grauwerte-Histogramms für die Phase Luft innerhalb der entsprechenden Schwellwertgrenzen einen zusammengefassten Wert für den Hohlraumanteil. Bei der Untersuchung von kreiszylindrischen Asphaltproben in den beschriebenen Mikro-CT-Messkonfigurationen wird unter Berücksichtigung des Größtkornes (d. h. Probendurchmesser zwischen 150 und 50 mm) eine Volumenauflösung von $0,15 \times 0,15 \times 0,15 \text{ mm}^3$ bis $0,03 \times 0,03 \times 0,03 \text{ mm}^3$ erreicht, womit die Erfassung der für das Gebrauchsverhalten maßgeblichen Hohlräume gegeben ist. In Tabelle 4.3-1 sind Untersuchungsergebnisse zur inneren Struktur verschiedener Asphalte, die mittels CT-Durchstrahlungsuntersuchung ermittelt wurden, aufgeführt. Diese stellen einerseits den Nachweis der Anwendbarkeit bei Variation von Mischgutart und Hohlraumgehalt dar. Darüber hinaus ist mit Hilfe eines Schnittbildes – im Rahmen dieses Beitrages leider nur in 2D-Darstellung – eine visualisierte Darstellung der jeweiligen inneren Struktur aufgeführt. Zusätzlich wurde diesen Ergebnissen vergleichend auch die in der Eignungsprüfung (EP) bzw. durch Untersuchung an Ausbauproben (Bk) konventionell ermittelten volumenbezogenen Hohlraum- bzw. Feststoffgehalte gegenübergestellt.

Probe	Quantitatives Ergebnis			Visuelles Ergebnis
		CT [Vol.-%]	EP bzw. Bk [Vol.-%]	
Bindemittelfilm (Laborprobe) Probe: 10 x 10 mm	Hohlraum: Feststoffe:	0 100		
Asphalt 11/16 (spezielles Dicht- und Dehnelement) Probe: 500 x 200 x 70 mm	Hohlraum: Feststoffe:	0,2 99,8	EP: 0,7 EP: 99,3	
SMA 0/11 (Laborprobe) Probe: 160 x 40 x 40 mm	Hohlraum: Feststoffe:	1,3 98,7	EP: 1,4 Bk: 1,3 EP 98,6 Bk: 98,7	
ABi 0/16S (Laborprobe) Probe: Ø 100 mm; h: 65 mm	Hohlraum: Feststoffe:	7,2 92,8		
OPA 0/8 (Laborprobe Stuttgart) Probe: Ø 50 mm; h: 45 mm	Hohlraum: Feststoffe:	23,8 76,2	EP: 26,1 Bk: 27,5 EP: 73,9 Bk: 72,5	
EP: Ergebnis der Eignungsprüfung		Bk: Ergebnis von Bohrkernuntersuchungen		

Tab. 4.3-1: Untersuchungsergebnisse zur Kennzeichnung der inneren Struktur

Probe	Quantitatives Ergebnis			Visuelles Ergebnis
		CT [Vol.-%]	EP bzw. Bk [Vol.-%]	
OPA 0/8 Ausbauprobe A 61 Probe: Ø 100 mm; h: 40 mm	Hohlraum: Feststoffe:	23,8 76,2	EP: 25,0 EP: 75,0	
ZWOPA 0/8_0/16 Ausbauprobe A 30 Obere Schicht 0/8 Untere Schicht 0/16 Probe: Ø 100 mm; h: 70 mm	Hohlraum: Feststoffe Hohlraum: Feststoffe:	25,0 75,0 24,0 76,0	EP: 26,0 Bk: 27,2 EP: 74,0 Bk: 72,8 EP: 26,1 Bk: 25,7 EP: 73,9 Bk: 74,3	 
EP: Ergebnis der Eignungsprüfung		Bk: Ergebnis von Bohrkernuntersuchungen		

Tab. 4.3-1: Fortsetzung

Aus den exemplarisch aufgeführten Beispielen ist ersichtlich, dass es mit Hilfe der CT-Untersuchungs- und Auswertekonfiguration möglich ist, den Hohlraumgehalt unterschiedlichster Asphalte mit verschiedensten Porengehalten (hier: 0 bis 30 Vol.-%) sicher zu bestimmen. Bei der Auswahl bzw. Zusammenstellung der geeigneten Untersuchungskonfiguration ist zu berücksichtigen, dass eine Optimierung zwischen Probengröße und notwendigem Auflösungsvermögen zur Erfassung der Hohlräume vonnöten ist. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Ermittlung des Hohlraumgehaltes unter Lösung dieser Optimierungsaufgabe an Probekörpern möglich ist, deren Abmessungen unter Berücksichtigung des Größtkornes baupraktischen

Anforderungen genügen können. Bei einem Vergleich der gemäß 3D-CT bzw. gemäß konventionellem Verfahren im Verlauf der Eignungsprüfung (EP) oder an Ausbauproben (Bk) bestimmten Hohlraumgehalte fällt für die hohlraumreichen Proben auf, dass die entsprechend Vorschrift durch Ausmessung und Wägung ermittelten Ergebnisse in der Tendenz höhere Volumenanteile für den Hohlraum (bis nahezu 4 Vol.-%) ausweisen. Diese erwartungsgemäße Beobachtung ist darauf zurückzuführen, dass das zur quantitativen Auswertung im Ergebnis der Durchstrahlungsmessungen betrachtete Volumen unter Ausschluss von Randbereichen der zu beurteilenden Asphaltsschicht virtuell aus dem Untersuchungsvolumen herausgezogen

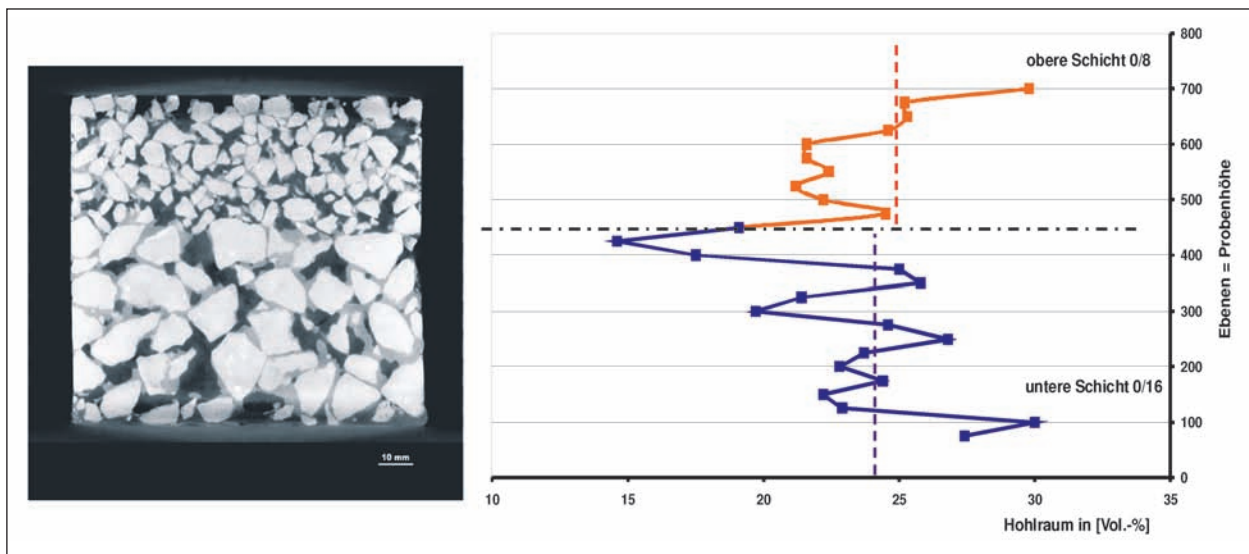


Bild 4.3-7: Hohlräumverteilung über die Probekörperhöhe (orts aufgelöste Hohlräumverteilung)

wurde. Dadurch ist sichergestellt, dass der mit den konventionellen Ergebnissen verbundene „Oberflächenfehler“ eliminiert wird.

Durch die dreidimensionale Erfassung der inneren Struktur kann nicht nur eine integrierte Erfassung des Gesamthohlraumgehaltes aus dem untersuchten Probenvolumens erfolgen, sondern vielmehr werden auch eine orts aufgelöste Auswertung und Beschreibung des Porenverlaufs ermöglicht. Insbesondere zur Beurteilung von technologischen Einflüssen (Verdichtung), aber auch beanspruchungsbedingten Effekten (z. B. Nachverdichtung unter Verkehr; Schmutzeintrag etc.) kann dies ein wirksames Hilfsmittel sein.

Aus den vorliegenden Voxeldaten der untersuchten Probenstruktur erwächst mit Hilfe neuer computergestützter Bildnachbearbeitung (Digital Imaging) unter anderem auch die Möglichkeit, die erfasste Hohlräumstruktur durch ein Netz kleinster geometrischer Elemente (z. B. Dreiecke) realitätsnah nachzubilden. Damit ist die Möglichkeit gegeben, weiterführende numerische Auswertemöglichkeiten zu entwickeln. Vorstellbar sind hierbei die Entwicklung von Auswertemöglichkeiten für eine Ableitung von Korngrößenverteilungen oder sogar von Porenradien und deren Verteilung in der Hohlräumstruktur.

Eine Möglichkeit weiterer Aussagen bezüglich einer Beschreibung der Porenstruktur könnte aber auch beispielsweise in der Erfassung und Beschreibung der Hohlräumoberfläche, also der Grenzfläche zwischen Luft- und Feststoffphase, liegen. Dazu erfolgten Untersuchungen und Auswertungen an of-

fenporigen Asphaltproben ohne und nach Verschmutzungseinwirkung. Die Ergebnisse deuten auf signifikante Veränderungen der inneren Oberfläche an den Porenwänden infolge Verschmutzung hin.

Die Darstellung einer auf der Basis von CT-Messungen und -Auswertungen reproduzierten Hohlräumstruktur entspricht einer Datengröße von etwa 170 MB und ist für das menschliche Auge allein nicht mehr auswertbar. Anschaulich soll damit jedoch dargestellt werden, wie fein die innere Struktur mit Hilfe geometrischer Elemente (hier: $9,3 \times 10^6$ Dreiecke repräsentieren eine innere Oberfläche der Hohlräumstruktur von 24.870 mm^2 , die ein Hohlräumvolumen von 6.784 mm^3 begrenzt) aufgelöst werden kann. Darüber hinaus eröffnet sich durch diese hohe Elementauflösung auch die Möglichkeit, Analysen und Simulationsrechnungen mit Hilfe Finiter Elemente zur Anwendung zu bringen. Derartige Aktivitäten z. B. zur Simulation von Transport- und Durchströmungsvorgängen finden bereits an der TU München statt und eröffnen neue Wege einer gebrauchorientierten Materialkennzeichnung (siehe Bilder 4.3-8 und 4.3-9).

Wichtig zur Beurteilung der mit der Hohlräumstruktur verbundenen Gebrauchseigenschaften wie z. B. Dichtigkeit bzw. Durchströmungsvermögen sind jedoch nicht nur die Erfassung und Beschreibung des quantitativen Volumenanteiles allein, sondern auch die Frage nach dessen Qualität. Darunter fallen Fragestellungen nach der Art, in der die Hohlräume im untersuchten Volumen angeordnet sind, nach deren örtlicher Verteilung, ob es Verbindungen für

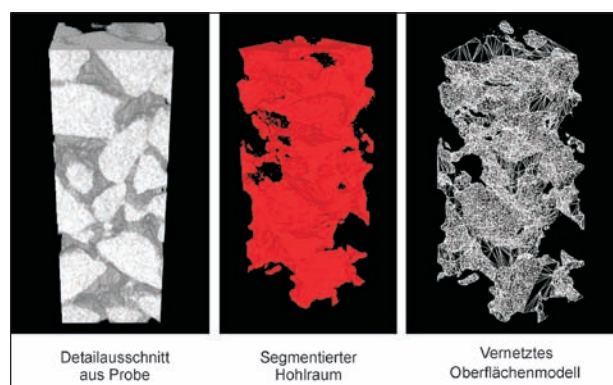


Bild 4.3-8: Schematische Darstellung der Separation des Hohlraumes aus einem Probenausschnitt



Bild 4.3-9: Beispielhafte Darstellung der reproduzierten Hohlraumstruktur für einen Ausschnitt von 30 x 30 x 30 mm eines Offenporigen Asphalt

Wechselwirkungen zwischen den detektierten Hohlräumen gibt oder auch nach der Rauigkeit der inneren Oberfläche. Antworten dazu kann die im Ergebnis der Durchstrahlungsuntersuchungen visualisierte Hohlraumstruktur liefern. Eine vergleichende Gegenüberstellung verschiedenartiger visualisierter Hohlraumstrukturen ist in Bild 4.3-10 dargestellt. Obwohl in diesem Beitrag nicht auf die überzeugend selbsterklärenden Vorzüge einer animierten Darstellung der Hohlraumstruktur zurückgegriffen werden kann, weisen die Bilder doch auf die mittels 3D-CT herausgearbeiteten qualitativen Unterschiede hin.

In der oberen linken Darstellung der inneren Struktur eines Splittmastixasphaltes (Bild 4.3-10) kann von einer ausgebildeten Porenstruktur nicht die Rede sein. Für den untersuchten Probekörper wer-

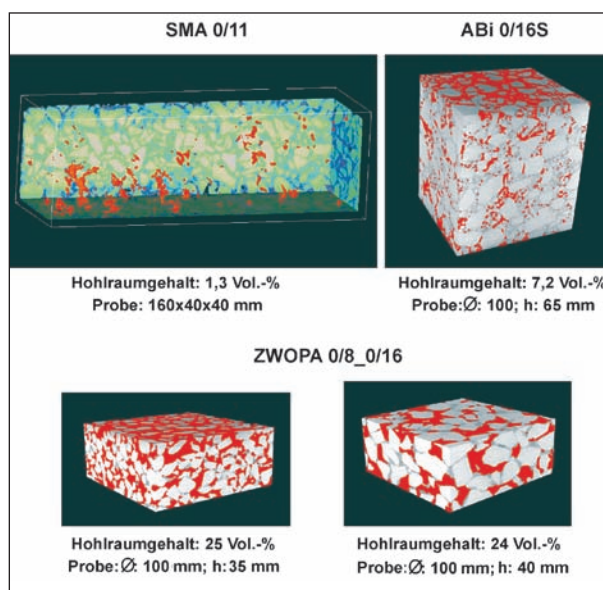


Bild 4.3-10: Vergleichende Gegenüberstellung unterschiedlicher Hohlraumstrukturen (Hohlraum jeweils rot eingefärbt)

den zwar einzelne Hohlräume detektiert, die jedoch im Volumen separiert und voneinander isoliert vorliegen, sodass man von geschlossenenporigen Hohlräumen ausgehen kann.

Anders dagegen der in der Bilderleiste oben rechts dargestellte Ausschnitt eines Asphaltbinders. Der dargestellte Porenraum liegt sowohl lokal separiert, teilweise aber auch über feine Kapillaren miteinander verbunden vor. Deutlich wird eine filigrane Porenstruktur, die stark verästelt ist (siehe auch Bild 4.3-11). Hier wird eine teilweise offenporig ausgebildete Hohlraumstruktur angezeigt, die unter Beanspruchung auf Wechselwirkungen im Gefüge schließen lässt. Ganz besonders deutlich bzw. zur vorherrschenden Qualitätseigenschaft der Hohlraumstruktur wird diese Offenporigkeit hingegen bei der Porenstruktur des Offenporigen Asphalt. Die detektierten Hohlräume erscheinen mit größerem Durchmesser, sie sind gleichmäßig über das Untersuchungsvolumen verteilt. Alle Hohlräume sind untereinander und zu den Außenseiten verbunden und stehen für Wechselwirkungen zur Verfügung. Isolierte Hohlraumbereiche sind nicht erkennbar. Noch deutlicher wird diese Hohlraum-Qualität in der Detaildarstellung (Bild 4.3-11), in der die Hohlraumstruktur zur besseren Übersichtlichkeit quasi von den umgebenden Feststoffen freigestellt wurde.

Besonders wichtig wird eine qualitative Beschreibung der Hohlraumstruktur (Hohlraumanalyse), wenn es darum geht, Gebrauchseigenschaften wie Lärmreduzierung, Durchströmungsverhalten oder

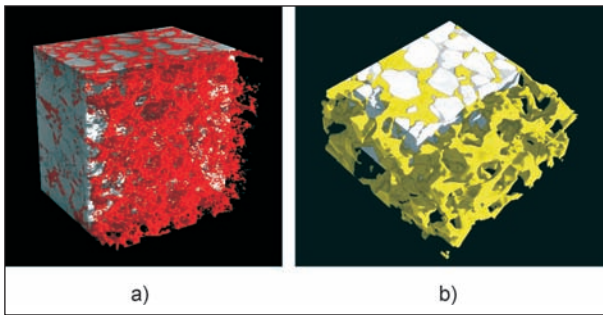


Bild 4.3-11: Segmentierte Hohlraumstrukturen:
a) ABI 0/16S (Hohlräume rot eingefärbt),
b) ZWOPA, untere Schicht 0/16 (Hohlräume gelb eingefärbt)

auch mechanisches Verhalten auf die Struktureigenschaften zurückzuführen bzw. aber auch nutzungsbedingte Änderungen von Gebrauchseigenschaften im Sinne einer Performance-orientierten Herangehensweise zu untersuchen. Die dargestellten Ergebnisse machen deutlich, dass die 3D-CT ein Instrumentarium bietet, mit dem nach wie vor offene Fragestellungen sowohl zur wechselseitigen Abhängigkeit zwischen Struktur und Verhalten, aber auch zwischen Rezeptur bzw. Herstelltechnologie und Struktur ergründet werden können. Besonders Erfolg versprechend erscheint dabei eine methodische Vorgehensweise, bei der gezielt Untersuchungen zur Beeinflussung oder qualitativen Veränderungen der Hohlraumstruktur an begleitende Performance-bezogene Untersuchungen angekoppelt werden.

4.3.3.2 Kennzeichnung des inneren stofflichen Aufbaus/Phasenseparation

Über eine reine Hohlraumauflärung hinaus bietet die 3D-CT auch Möglichkeiten, quantitative bzw. qualitative Aussagen über die an der Zusammensetzung des Probekörpers beteiligten stofflichen Phasen zu liefern. Für eine Separation der einzelnen Phasen und deren quantitative Auswertung lassen sich bei einer vorhandenen Differenz der Dichte der einzelnen Bestandteile die im Grauwert-Histogramm zusammengefassten Informationen über den Probekörper nutzen. Bei Asphalt sind die Dichteverteilungen der Bestandteile Luft, Bitumen und Gestein im Allgemeinen derartig abgestuft bzw. gespreizt, dass eine solche Analyse der quantitativen stofflichen Zusammensetzung möglich ist (siehe Bilder 4.3-12 und 4.3-13). Die Phasenseparation selbst erfolgt durch das Setzen von Schwellwertgrenzen im differenziellen Grauwertverlauf, wozu automatisierte und reproduzierbare Software-

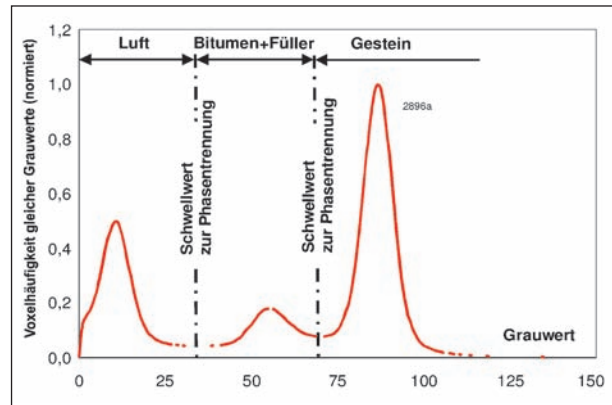


Bild 4.3-12: Schwellwertsetzung im Histogramm zur Phasenseparation mit anschließender quantitativer Auswertung

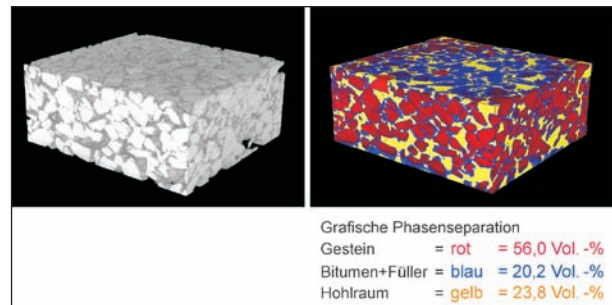


Bild 4.3-13: Visuelle Phasenseparation

Tools eingesetzt werden. Da im Regelfall unter Berücksichtigung von baupraktisch relevanten Probenabmessungen ein Auflösungsvermögen der Volumenelemente nicht unterhalb 0,1 mm gewählt wird, ist die Füllerphase nicht mehr vom Bitumen zu separieren, sondern wird als gemeinsamer Bitumen + Füller-Peak detektiert.

Im Ergebnis einer solchen Separation und Auswertung kann die volumenbezogene stoffliche Zusammensetzung der Asphaltprobe sowohl visualisiert als auch quantitativ angegeben werden.

Einige Auswertbeispiele sind in Tabelle 4.3-2 aufgeführt.

Bei einem Vergleich mit den aus der Eignungsprüfung bzw. der Mischungsrezeptur abgeleiteten Werten zeigt sich eine grundsätzlich plausible Übereinstimmung. In den festzustellenden Abweichungen spiegeln sich einerseits die Differenz zwischen Rezepturentwurf im Labor im Rahmen der Eignungsprüfung und Ausführung auf der Baustelle, aber auch die Ungenauigkeiten der jeweiligen Bestimmungsverfahren. Hier besteht prinzipieller Bedarf nach einer Abschätzung der jeweiligen Verfahrensunsicherheiten.

Für eine Auswertung der Untersuchungsergebnisse zur lokalen Verteilung von Stoffphasen sind bei Anpassung der Versuchsparameter weiterhin Informationen zu einzelnen Stoffphasen, z. B. einer genaueren Beschreibung des Mineralgerüsts, möglich. Hier erscheinen Erkenntnisse zur Kennzeichnung des tragenden Gesteinsgerüsts von besonderer Wichtigkeit. In Bild 4.3-14 ist beispielhaft eine mögliche Beurteilung des Gesteinsgerüsts bezüglich der gegebenen Kornform (Fehlförmigkeit) und Kornausrichtung dargestellt. Eigene Versuche zei-

gen weiterhin, dass auch Angaben zur Korngrößenverteilung Offenporiger Asphalte möglich sind.

Auch unter Fragestellungen zur Beurteilung von technologischen Vorgängen oder speziellen konstruktiven Erfordernissen kann die 3D-CT Beiträge leisten. Wichtig kann dies beispielsweise zur Beurteilung von Verbundebenen bei mehrschichtigem Belagsaufbau sein. In Bild 4.3-15 ist beispielhaft die visuelle Aufklärung der Wirksamkeit einer Verbundschicht für den Einbau einer offenporigen Deckschicht dargestellt. Deutlich wird, dass ein wirksamer Verbund zustande gekommen ist. Im Ergebnis der Einbautechnologie wird eine gleichmäßige Schichtdickenausbildung von im Mittel etwa 5 mm erreicht. Die sich aus den empfohlenen Aufgabemengen ergebende Mindestschichtdicke von etwa 3 mm ist gewährleistet, womit auch die geforderte abdichtende Funktion dieser Schicht als gegeben gewertet werden muss. Eine lokale Aufkonzentration ist nicht feststellbar.

Beispiel	Ergebnis CT-Auswertung [Vol.-%]	Ergebnis Eignungsprüfung [Vol.-%]
OPA 0/8 (Uni Stuttgart)		
Hohlraum	23,8	26,1
Gestein	61,4	58,6
Bitumen + Füller	14,8	15,3
SMA 0/11		
Hohlraum	1,3	1,4
Gestein	62,8	66,2
Bitumen + Füller	35,9	32,4
ZWOPA 0/8_0/16		
Obere Schicht 0/8		
Hohlraum	25,0	26,0
Gestein	63,0	-
Bitumen + Füller	12,0	-
Untere Schicht 0/16		
Hohlraum	24,0	26,1
Gestein	61,0	-
Bitumen + Füller	15,0	-

Tab. 4.3-2: Angaben zur Asphaltzusammensetzung im Ergebnis der Phasenseparation

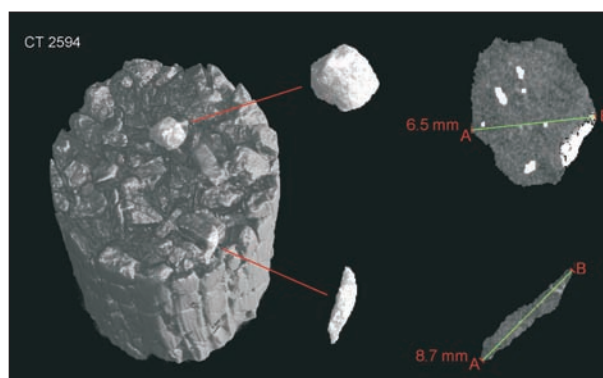


Bild 4.3-14: Beurteilung einer Asphaltprobe bezüglich der Qualität des Mineralgerüsts

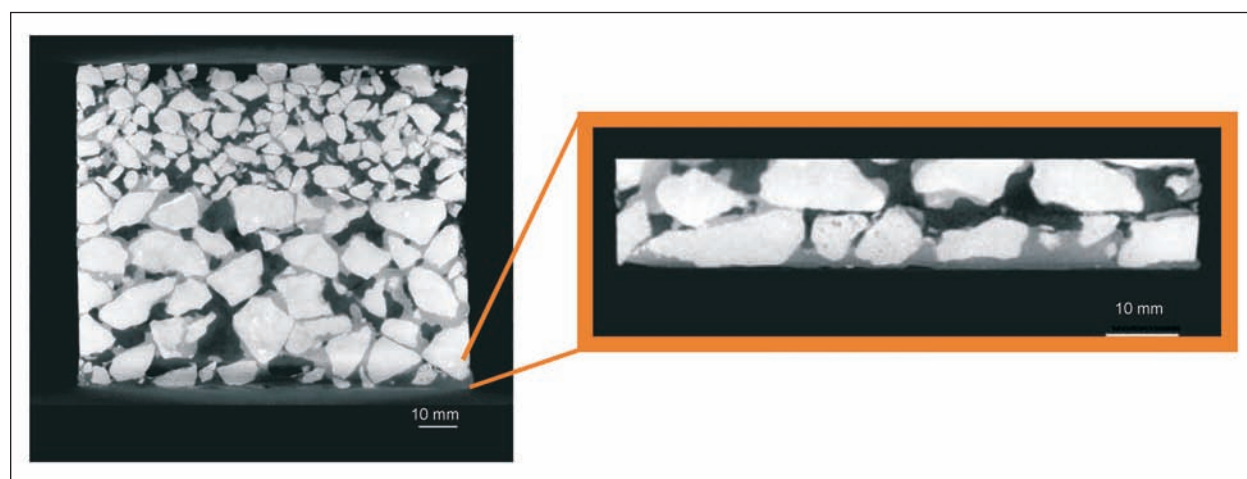


Bild 4.3-15: Visualisierung einer Verbindungsschicht zur nachfolgenden OPA-Deckschicht

4.3.3.3 Kennzeichnung struktureller Artefakte nach Beanspruchung

Wenn man die Möglichkeit hat, die innere Struktur von Asphaltprobekörpern aufzuklären, so stellt sich auch die Frage, ob es möglich ist, beanspruchungsbedingte Veränderungen zu detektieren. Eigene diesbezügliche Untersuchungen wurden insbesondere von der Fragestellung initiiert, Auswirkungen von Schmutzeinwirkungen auf die Hohlraumstruktur offenporiger Deckschichten zu untersuchen. Die Auswertung einer CT-Untersuchung an einem OPA-Ausbaukörper nach mehr als 10-jähriger Nutzung ergab eine anschauliche Vorstellung von den Auswirkungen der im Straßenbetrieb auftretenden Feinstteilchen.

Von der einstmals offenporigen und miteinander wechselwirkenden Porenstruktur ist nichts mehr erkennbar. Feinste Staub-, Gummi- und andere Partikel haben den zugänglichen Hohlraum gefüllt und verstopft und somit eine vollständige qualitative Veränderung bewirkt. Die ursprünglich gemäß Eignungsprüfung mit einem Hohlraumgehalt von 25,4 Vol.-% konzipierte OPA-Deckschicht stellt sich im Ergebnis der CT-Untersuchung mit einem verbliebenen Hohlraumgehalt von 8,5 Vol.-% dar. Aus Bild 4.3.-16 ist zu sehen, dass diese Hohlräume in lokal isolierten Bereichen vorliegen, die untereinander keine Verbindung zeigen. Im Ergebnis von Simulationsuntersuchungen, die die äußere Zugänglichkeit plausibel nachstellen sollten (rot eingefärbt sind die Bereiche oberhalb der Deckschichtoberfläche bzw. die zur Oberfläche offenen verbundenen Hohlräume in der Deckschicht), ist nur an einer Stelle ein Eindringvermögen von etwa

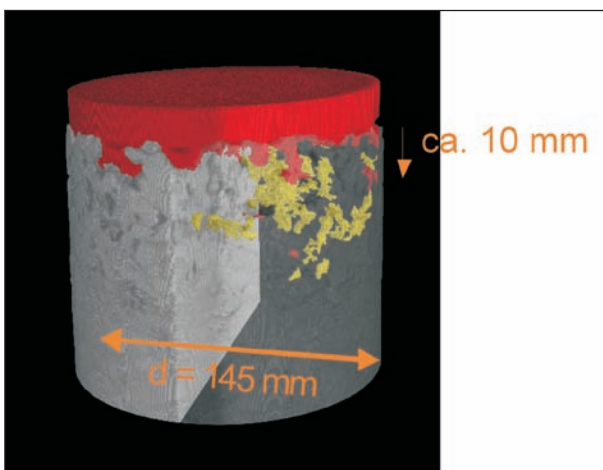


Bild 4.3-16: Separierte Hohlraumstruktur eines OPA-Ausbaukörper nach mehr als 10-jähriger Nutzung

10 mm gegeben. Deshalb muss man im Ergebnis der 3D-CT zu der Schlussfolgerung kommen, dass die hier gefundenen Hohlräume weder von der Oberfläche aus zugänglich sind noch untereinander „kommunizieren“ können – also für eine qualitativ geschlossenenporige Hohlraumstruktur stehen. Ein derartiger Belag kann zwar unter Umständen noch in der Lage sein, Lasten aufzunehmen und abzutragen, wird aber seiner speziellen Gebrauchseigenschaft der Lärminderung nicht mehr gerecht.

Detailauflösungen erster Untersuchungen zur Dynamik des Verschmutzungsvorganges zeigen bei einer Ortsauflösung von 0,03 mm die Phasengrenze Luft zu Feststoff. Deutlich werden in der rechten Abbildung die Schmutzablagerungen an den Bindemitteloberflächen. Diese visuell gewonnene Erkenntnis war Auslöser für eine Quantifizierung der inneren Oberfläche am Übergang Hohlraum (Luft) zum Feststoffpartikel als kennzeichnenden Hohlraumparameter.

Andere Fragestellungen betreffen die mechanisch bedingten Veränderungen. Hier wurden beispielhaft Voruntersuchungen zur Detektion von Veränderungen des Mineralgerüsts infolge erhöhter Verdichtungsarbeit durchgeführt.

Aber auch die Änderungen der inneren Struktur (z. B. Aufklärung von Versagensebenen und Rissverläufen) nach quasi statischer bzw. dynamischer Versuchsbeanspruchung (z. B. bei indirekter Zugbeanspruchung) können mit Hilfe der 3D-CT näher gekennzeichnet werden.

4.3.3.4 Zusammenfassung und Ausblick

Um ein fundiertes Verständnis über Materialeigenschaften und -verhalten aber auch über deren Steuerung durch technologische Einflüsse zu entwickeln, ist die Aufklärung des inneren Aufbaus bzw. Gefüges (Strukturaufklärung) erforderlich. Aufgrund der spezifischen Eigenschaften besteht insbesondere für Asphalte diesbezüglich nach wie vor großer Erkenntnisbedarf. Mit dem vorliegenden Beitrag werden Untersuchungsergebnisse der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, BAM, bezüglich der Möglichkeiten einer Strukturaufklärung von Asphalt mit Hilfe der 3-D-Computertomografie und nachgeordneter digitaler Bildauswertung (Digital Imaging) vorgestellt. Es wird gezeigt, dass neben einer visualisierten qualitativen

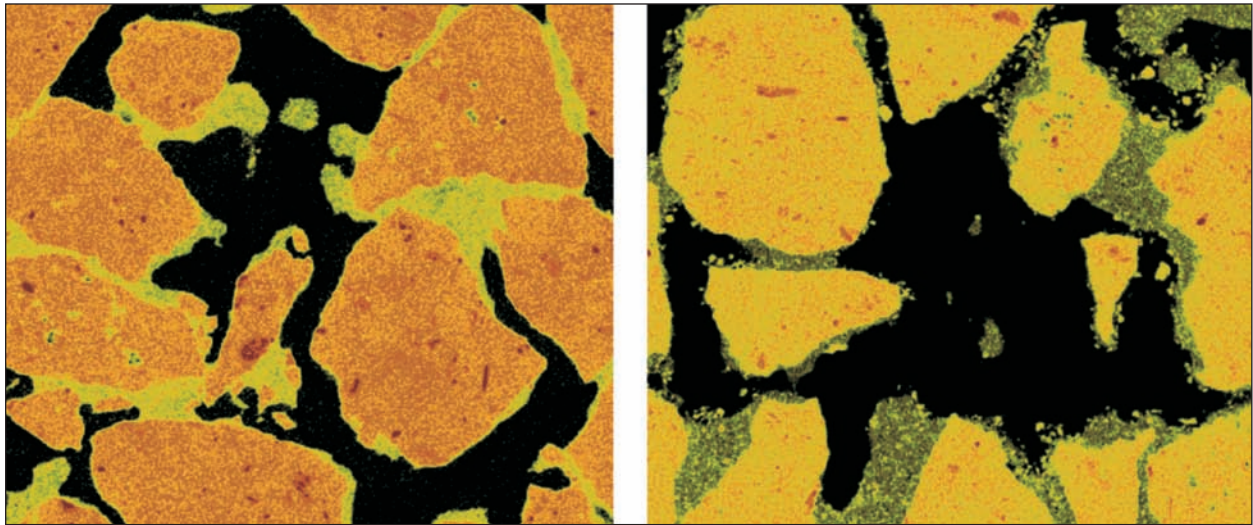


Bild 4.3-17: Detaildarstellungen unverschmutzter (links) und verschmutzter (rechts) Hohlraumbereiche

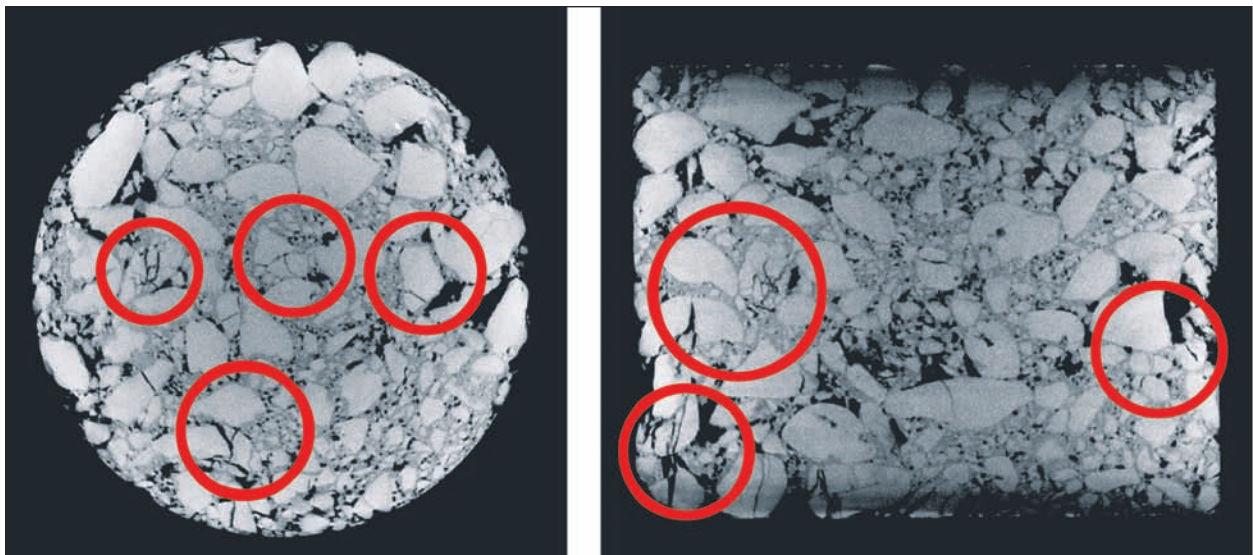


Bild 4.3-18: Schnittbilder eines durch Kornzertrümmerung geschädigten Asphalttes



Bild 4.3-19: Detailaufklärung von Rissverläufen

Darstellung von Hohlraum und Feststoffphasen auch quantitative Auswertungen unter Vermeidung präparatorisch bedingter Beeinträchtigungen an

Proben mit praktisch relevanten Abmessungen möglich sind. Mit den exemplarisch angeführten Ergebnissen wird aber gleichzeitig auch auf die nach

wie vor offenen Fragestellungen nach den o. a. Zusammenhängen zwischen Technologie und Struktur sowie Struktur und Gebrauchsverhalten in der Asphalttechnologie hingewiesen. Deshalb machen notwendige zukünftige Untersuchungen die Ankopplung an begleitende Performance-bezogene Materialkennzeichnungen erforderlich.

Darüber hinaus ermöglichen es die Mittel der modernen computergestützten Auswertung, die erfassten Strukturen digital zu reproduzieren und weiteren numerischen Simulationsanalysen (z. B. FEM) oder Auswertungen zu unterziehen. Dabei geben die vorgestellten Möglichkeiten lediglich einen ersten Eindruck über die vielfältigen Auswertoptionen, die es ebenfalls durch Forschungstätigkeit zu erweitern gilt.

4.3.4 Untersuchungen an unmodifizierten Bezugsproben verschiedenartiger neuartiger bzw. modifizierter Offenporiger Asphalte in unterschiedlichen Beanspruchungszuständen

Nach der Entwicklung und grundsätzlichen Evaluierung von Mess- und Auswertemethodik stellte die Kennzeichnung von Vorzugsdeckschichtmaterialien mit und ohne Modifizierung sowie in verschiedenen Beanspruchungszuständen nach künstlicher Verschmutzung, die durch die spezialisierten Projektpartner erfolgte, einen maßgeblichen Arbeitsschwerpunkt dar. Mit Hilfe einer Auswertungsmaske werden alle maßgeblichen Informationen zur Hohlraumstruktur sowie zum Mess- und Auswertevorgang im Ergebnis der CT-Untersuchungen für die jeweilige Probe in Tabellenform festgehalten. Darin enthalten sind folgende Angaben:

- verbale Beschreibung der Probe,
- Fotodarstellung,
- Parameter der CT-Untersuchungskonfiguration,
- Histogramm der ermittelten Grauwertverteilung,
- Visualisierung der Struktur mittels CT-Datensatzes durch Vertikalschnitt und Horizontalschnitt (Schnittebene jeweils durch den Probenschwerpunkt),
- schichtweise numerische Auswertung (Hohlraumgehalt; Gesamtvolumen),
- Darstellung der Hohlraumverteilung über die Probenhöhe,

- in ausgewählten Fällen: digitalisierte Reproduktion der Hohlraumstruktur und deren numerische Auswertung, (innere Oberfläche; Verhältnis innere Oberfläche zu Hohlraumgehalt).

Im Einzelnen sind in der Anlage die per Stand 30. Oktober 2008 an den bis dato zur Untersuchung bereitgestellten Proben ermittelten Ergebnisse aufgeführt.

Insgesamt erfolgte eine Strukturkennzeichnung an 5 OPA-Proben und 7 ZWOPA-Proben. Diese Anzahl setzt sich zusammen aus jeweils einer Untersuchung, die exemplarisch die Hohlraumstruktur für einen der folgenden Beanspruchungszuständen darstellen soll (unbeansprucht = sauber; Verschmutzungsgrad 1 mit 480 g/m² Schmutzbeaufschlagung; Verschmutzungsgrad 3 mit 1.440 g/m² Schmutzbeaufschlagung) kennzeichnen soll. Die Repräsentativität der Ergebnisse und des abgeleiteten Verhaltens wurde durch zusätzliche Plausibilitätsuntersuchungen sichergestellt.

Im Einzelnen stellen sich die gefundenen Aussagen bezüglich der Kennzeichnung von einlagig aufgebauten Belägen mit Offenporigem Asphalt OPA 0/8 mm wie folgt dar:

Anhand der Ergebnisse eines kreiszylindrischen Probekörpers Bk 4 aus der Platte 1 wird ein Hohlraumgehalt für einen sauberen und unbeanspruchten OPA 0/8 mm von 25,2, Vol.-% festgestellt. Der Hohlraum des untersuchten Volumens beträgt 28.404 mm³ und besitzt eine innere Oberfläche (Kontaktfläche) zu den angrenzenden Feststoffen von etwa 31.826 mm³. Das Verhältnis Hohlraumoberfläche zu Hohlraumvolumen beträgt 1,1:1. Aus der Analyse der höhenbezogenen Hohlraumverteilung ist eine nahezu symmetrische Streuung um den o. a. Mittelwert abzulesen.

Nach Beanspruchung durch eine Schmutzbeaufschlagung entsprechend Verschmutzungsgrad 1 reduziert sich der mittlere Hohlraumgehalt um etwa 3 Vol.-% auf 22,1 Vol.-%. Die parallel laufende Auswertung der digitalisierten Hohlraumstruktur mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente ergab eine Vergrößerung der inneren Oberfläche (Kontaktfläche) auf 33.118 mm² bei einer gleichzeitigen Verringerung des erfassbaren Hohlraumvolumens auf 24.809 mm³. Das Verhältnis Hohlraumoberfläche zu Hohlraumvolumen steigt an auf nunmehr 1, 3:1. Insgesamt werden damit Effekte angezeigt, wie sie infolge einer Verschmutzung zu erwarten sind. Der Verlauf der höhenbe-

Platten	Proben	Beanspruchung	Hohlraumgehalt in Vol.-%	Verhältnis Hohlraumoberfläche zu Hohlraumvolumen
1	4	sauber	25,2	1,1:1
1	8	Verschmutzungsgrad 1	22,1	1,3:1
2	3	Verschmutzungsgrad 1	18,2	4,1:1
2	1	sauber	25,1	-
2	5	Verschmutzungsgrad 3	21,7	-

Tab. 4.3-3: Zusammenfassung der hohlraumkennzeichnenden Ergebnisse der CT-Untersuchung an OPA-Proben

zogenen Hohlraumverteilung um den ermittelten mittleren Hohlraumgehalt des Untersuchungsvolumens zeigt keine signifikanten Auswirkungen der künstlichen Verschmutzung auf das Höhenprofil an.

Nach maximalem künstlichem Schmutzeintrag von 1.440 g/m^2 nimmt der Hohlraumgehalt weiter ab auf 18,2 Vol.-%. Die Kontaktfläche Hohlraum zu Feststoff wird rauer, da das Verhältnis der inneren Hohlraumoberfläche zum Hohlraumvolumen auf 4, 1:1 ansteigt. Aus der Verteilung der höhenbezogenen Hohlraumgehalte um den Mittelwert des untersuchten Probenvolumens herum wird deutlich, dass Orte vermehrter Schmutzanlagerung nicht signifikant detektiert werden können. Jedoch wird die Spannweite der erfassten Hohlraumgehalte wesentlich größer, was auf verschmutzungsbedingte Effekte hinweist.

Trägt man die wesentlichen Strukturinformationen über einen zunehmenden Schmutzeintrag auf, so stellen sich ein abnehmender Hohlraumgehalt und eine Zunahme der Rauigkeit der inneren Oberfläche als erwartungsgemäße Effekte ein.

Neben dem Verlauf des generellen Hohlraumgehaltes ist vor allem dessen Konsequenz auf die Hohlraumstruktur von besonderer Bedeutung für die akustische Leistungsfähigkeit. Zu diesem Zweck erfolgt – neben der Kennzeichnung der inneren Rauigkeit der Kontaktfläche zwischen Hohlraum und Feststoff – eine weiterführende Aufklärung der Hohlraumstruktur bezüglich der Größe der Porenradien und deren Verteilung sowie deren Veränderungen infolge Verschmutzung. Da eine höhenbezogene Aufklärung der Hohlraumverteilung aufgrund der strikten orthogonalen Schnittführung keine signifikanten Rückschlüsse zulässt, kommen zu diesem Zweck abgeleitete Tools aus dem Gebiet der morphologischen Bildverarbeitung, deren Adaption auf unser spezielles Anwendungsgebiet näher erläutert wird, zur Anwendung.

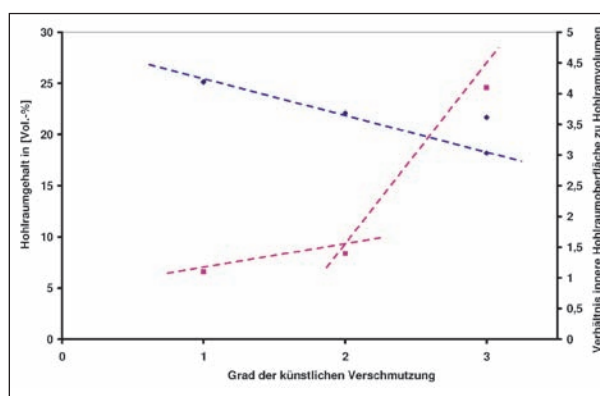


Bild 4.3-20: Auswirkungen einer künstlichen Verschmutzung auf Hohlraumgehalt und Rauigkeit der inneren Oberfläche für einen OPA 0/8 mm

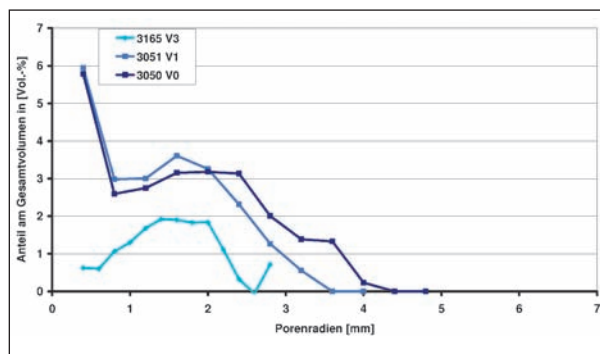


Bild 4.3-21: Maßgebende Größe der Porenradien und deren Verteilung in Abhängigkeit vom künstlichen Schmutzeintrag

Aus der Darstellung der differentiellen Porenradienverteilung in Bild 4.3-21 wird deutlich, dass der weitaus überwiegende Anteil des Hohlraumvolumens eines OPA 0/8 mm von Poren mit einer Radienspannweite zwischen 1 und 4 mm gebildet wird. Im Ergebnis eines künstlichen Schmutzeintrages verringert sich nicht nur der verbleibende Anteil an Hohlraumvolumen, sondern es ist auch eine Verschiebung zu kleineren Porenradien festzustellen. Die Signifikanz dieser detaillierten Strukturaussage mittels softwaregestützter Verfahren der mathematischen Morphologie wurde mit Hilfe des Rückschlusses auf den Gesamthohlraumgehalt

nachgewiesen. Demnach ergibt der mittels Integration der Fläche unterhalb der Porenradienverteilungskurve ermittelte Gesamthohlraumgehalt eine sehr gute Übereinstimmung zu dem aus der Histogrammauswertung der CT-Analyse ermittelten Wert. Das bedeutet einerseits, dass sich der überwiegende Anteil des Hohlraumvolumens in der o. a. Radienspannweite klassifizieren lässt. Andererseits stellen die derzeitig noch aus computertechnischen Limitierungen notwendigen Vergrößerungen und Vereinfachungen offensichtlich akzeptable Beeinflussungen des Ergebnisses dar.

Was aber bedeuten diese Veränderungen jedoch bezüglich der Qualität der Hohlraumstruktur? Wirken sich die Verschmutzungsbeanspruchungen derart aus, dass ein Umschlag der ursprünglich offenen und durchgängig verbundenen Hohlraumqualität zu signifikant veränderten Gebrauchseigenschaften (z. B. Akustik) führt? Zur Beantwortung dieser Frage wurden Untersuchungen mit Hilfe spezieller Bildauswertesoftware durchgeführt. Durch die Anwendung des Tools „Region Selection“ der Software „VG Studio Max Version 2.0“ werden die miteinander verbundenen Bereiche eines Untersuchungsvolumens detektiert. Wählt man den Startpunkt der Analyse außerhalb des Untersuchungsvolumens und definiert die dem Hohlraum bzw. der Luftphase zuzuordnenden Grauwerte als Selektionskriterium, erhält man im Ergebnis das von außen zugängliche bzw. akustisch wirksame Hohlraumvolumen. Im Gegensatz zu diesen akustisch effektiven Hohlräumen sind auch lokal separierte bzw. abgeschlossene Hohlraumanteile detektierbar. Nach Durchführung der „Region Selection“ an Proben nach maximaler künstlicher Schmutzbeaufschlagung des Verschmutzungsgrades 3 wurde lediglich eine Verringerung des effektiven Hohlraum-

volumens um etwa 0,5 Vol.-% festgestellt. Nach diesen Ergebnissen bedeutet dies, dass die künstliche Verschmutzung zwar den Hohlraumanteil um etwa 30 % verringert, aber nach wie vor ein offenes miteinander „kommunizierendes“ – mithin also akustisch leistungsfähiges – Hohlraumvolumen vorliegt.

Lediglich etwa 0,5 Vol.-% werden demnach durch Schmutzpartikel „verstopft“. Diese Aussage steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen aus den akustischen Messungen zum entsprechenden Schalldämpfungsvermögen (siehe Ergebnisse Müller BBM). Um diesen scheinbaren Widerspruch aufzuklären, wurden gezielt insbesondere die oberflächennahe Bereiche bezüglich der Zugänglichkeit des inneren Hohlraumvolumens untersucht. Anlass für diese Vorgehensweise war das optische Erscheinungsbild der Probenoberfläche im Verschmutzungsgrad 3.

Die Aufnahmen zeigen eine ausgeprägte Schmutzkonzentration in den oberflächennahen Hohlräumen an. Unter Berücksichtigung eines zufällig bzw. ungeordnet verspringenden Verlaufes der Hohlräume (welcher durch eine rein horizontale oder verti-

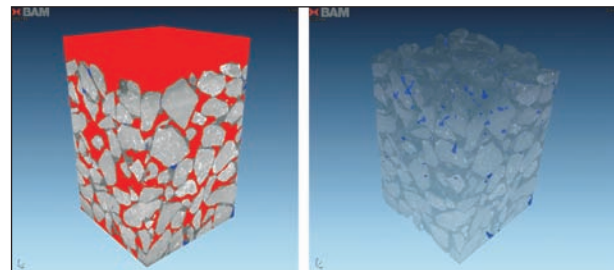


Bild 4.3-22: Darstellung des akustisch separierten Hohlraumvolumens nach Schmutzbeanspruchung entsprechend Verschmutzungsgrad 3
 Rot = miteinander verbundene Hohlräume
 Blau = lokal separierte Hohlräume

Probe	Hohlraumgehalt aus Histogrammanalyse in [Vol.-%]	Hohlraumgehalt aus Flächenintegral der differenziellen Porenradienverteilung in [Vol.-%]
3050 (sauber)	25,2	25,6
3051 (V 1)	22,1	22,9
3165 (V 3)	18,2	17,5

Tab. 4.3-4: Gegenüberstellung von Hohlraumgehalten aus Histogrammanalyse und morphologischer Bildverarbeitung für einen OPA 0/8 mm in verschiedenen Beanspruchungszuständen



Bild 4.3-23: Probenoberflächen von OPA- bzw. ZWOPA-Proben nach künstlicher Verschmutzung im Verschmutzungsgrad 3

kale Auswertung nicht erfassbar ist), wurden die obersten Bereiche einer künstlich stark verschmutzten OPA-0/8 mm-Probe bezüglich deren Durchgängigkeit/Durchlässigkeit optisch charakterisiert.

Eine Gegenüberstellung von Ausgangszustand und Verschmutzungsgrad 3 zeigt deutlich die durch die künstliche Verschmutzung verstopften oberflächennahen Hohlräume und die damit einhergehende blockierte Zugänglichkeit zum inneren Hohlraumvolumen.

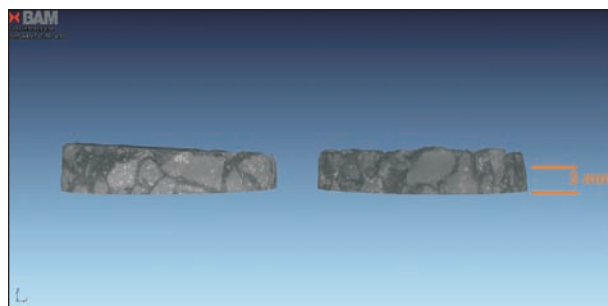


Bild 4.3-24: Untersuchungsbereich zur Charakterisierung der Durchgängigkeit

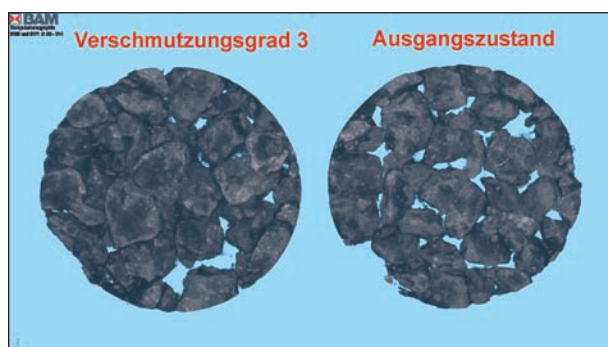


Bild 4.3-25: Reduzierte Zugänglichkeit infolge künstlicher Verschmutzung

Somit sind die scheinbar widersprüchlichen Aussagen eines nahezu aufgehobenen Lärmdämpfungsvermögens aus den akustischen Messungen nicht im Gegensatz zur nach wie vor im Volumen gegebenen offenen – und damit auch akustisch leistungsfähigen – Hohlraumstruktur. Vielmehr liefert diese Erkenntnis hilfreiche Ansatzpunkte für eine realistische Bewertung der simulierten Clogging-Effekte.

Die Untersuchungen zu den verschmutzungsbedingten Effekten bei zweilagigen offenporigen Asphaltkonstruktionen lieferte folgende Ergebnisse:

Das im Ausgangszustand ermittelte Hohlraumvolumen der Deckschicht (27,2 Vol.-%) als auch der unteren Schicht (20,6 Vol.-%) verringert sich nach Schmutzbeaufschlagung entsprechend Verschmutzungsgrad 1 auf 23,2 Vol.-% (obere Schicht) bzw. 19,9 Vol.-% (untere Schicht). Gleichzeitig deuten die Ergebnisse der numerischen Analyse der inneren Oberfläche auf eine zunehmende Rauheit der Kontaktfläche Hohlraum zu fester Phase in der unteren Schicht hin. Eine weitere Verschmutzung mit dem maximalen Schmutzauftrag entsprechend Verschmutzungsgrad 3 ergab jedoch überraschenderweise eine Zunahme des schichtbezogenen Hohlraumgehaltes (obere Schicht: 25,1 Vol.-% und untere Schicht 21,4 Vol.-%). Auch das Verhältnis von hohlraumbegrenzender Oberfläche zu Hohlraumvolumen zeigte keine Erhöhung der inneren Rauheit an. Ebenso ergeben sich aus dem Vergleich der höhenbezogenen Hohlraumverteilung keine signifikanten Aussagen über Veränderungen infolge künstlicher Verschmutzung.

Aufgrund dieser Ergebnisse kann geschlussfolgert werden, dass sich der Schmutzeintrag nicht im

Platten	Proben	Beanspruchung	Hohlraumgehalt in Vol.-%	Verhältnis Hohlraumoberfläche zu Hohlraumvolumen
6	1	sauber	27,2	2,8:1
			20,6	2,2:1
6	2	Verschmutzungsgrad 1	23,2	3,3:1
			19,9	2,4:1
5	4	Verschmutzungsgrad 3	25,1	3,3:1
			21,4	2,3:1
5	1	sauber	26,2	-
			20,1	-
2	5	Verschmutzungsgrad 3	26,6	-
			19,9	-

Tab. 4.3-5: Zusammenfassung der hohlraumkennzeichnenden Ergebnisse der CT-Untersuchung an ZWOPA-Proben



Bild 4.3-26: Ansammlungen von Schmutzpartikeln auf der Probenunterlage

Höhenprofil niederschlägt. Demnach bleibt als Erklärung nur die bereits bei den OPA-Proben festgestellte oberflächennahe Ablagerung der Schmutzpartikel. Des Weiteren ist aus der bei Verschmutzungsgrad 3 deutlich höheren Fließrate (nahezu doppelte Menge an Wassereintrag in wesentlich kürzerer Zeiteinheit) zu schließen, dass sich für die eingetragenen Schmutzpartikel aufgrund des höheren Spüleffektes keine Anlagerungsmöglichkeiten ergeben und diese bis auf die Unterlage der Asphaltproben transportiert werden. Diese Hypothese wird durch Beobachtungen gestützt, wonach beim Ausbauprozess der Probekörper für die CT-Untersuchungen Ansammlungen der eingetragenen Schmutzpartikel auf der Unterlage festgestellt wurden.

4.3.4.1 Digitalisierte Nachbildung der Hohlraumstrukturen für weiterführende Untersuchungen und Interpretationen durch die Forschungspartner

Aus den Erfahrungen der vergangenen Bearbeitungszeiträume hat sich herausgestellt, dass die digitalisierte Nachbildung der mittels CT-Untersuchungen vorgefundenen Hohlraumstruktur eine geeignete Grundlage für nachfolgende Simulationsrechnungen der Forschungspartner liefern kann. Insbesondere die numerischen Simulationsrechnungen der TU München zum hydrodynamischen Verhalten Offenporiger Asphaltbeläge erfolgen auf Grundlage der durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung digitalisierten Nachbildung der gegebenen Hohlraumstruktur.

Dazu wurden im Berichtszeitraum in Form von STL-Dateien digitalisierte Modellausschnitte untersuch-

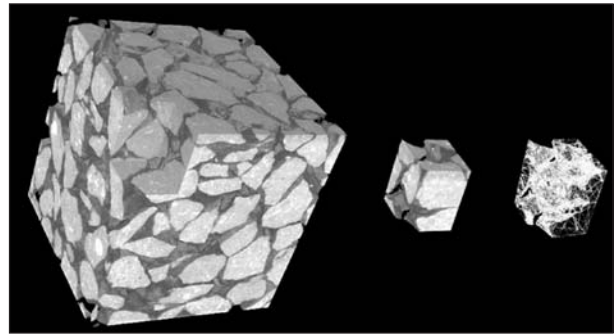


Bild 4.3-27: Schematische Darstellung der Hohlraumdigitalisierung



Bild 4.3-28: FEM-Modellierung der Hohlraumstruktur eines OPA-Probekörpers

ter OPA-Proben in den Beanspruchungsstufen sauber, Verschmutzungsgrad 1 und Verschmutzungsgrad 3 zur Verfügung gestellt. Aus Gründen begrenzter Rechnerkapazitäten sind diese Ausschnitte derzeit noch auf eine Größe von 31 x 31 x 33 mm beschränkt.

4.3.4.2 Untersuchungen zum Nachweis modifizierender innerer Beschichtungen

Ein Lösungsansatz für einen verbesserten Offenporigen Asphalt mit verringerter Verschmutzungsneigung besteht in der Erhöhung der Reinigungsfähigkeit/Selbstreinigungsfähigkeit. Zu diesem Zweck wurde durch die Partner der Universität Stuttgart eine Beschichtung der inneren Oberfläche als modifizierter OPA entwickelt. Begleitend bestand die

Aufgabe der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung darin, mittels CT-Untersuchungen zu versuchen, einen visuellen Nachweis über den Grad und die Qualität der erreichten inneren Beschichtung zu erbringen. Dazu wurde zunächst eine plattenförmige Probe eines derart modifizierten OPA 0/8 mm untersucht. Die aufgrund der Probenabmessung erreichbare Ortsauflösung konnte keine entsprechenden Aussagen liefern. Aus diesem Grunde wurde mittels Hochdruckwasserstrahlens ein kreiszylindrischer Probekörper \varnothing 50 mm aus dieser modifizierten OPA-Platte gewonnen und unter Beachtung aller Randbedingungen höchstauflösend untersucht. Aus der visualisierten Ebenendarstellung konnte jedoch kein Hinweis auf die Beschichtung abgeleitet werden. Ursache hierfür sind die sich aus nahezu simultanen Dichteverhältnissen ergebenden gleichartigen Grauwertverteilungen im Histogramm.

Konsequenterweise wurde die Beigabe eines speziellen Tracers mit deutlich höherer Dichte zum Be-

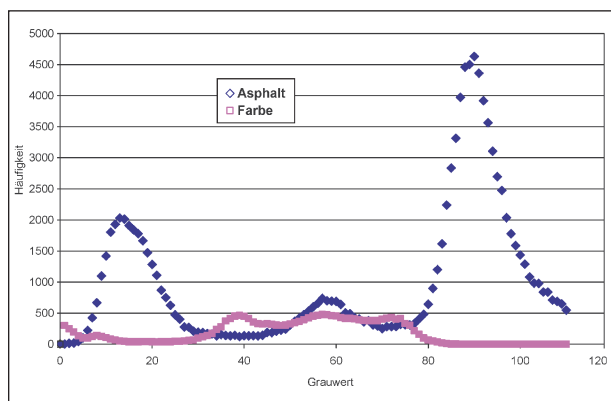


Bild 4.3-29: Grauwert-Histogramme für eine OPA-Probe und das Beschichtungsmaterial

schichtungsmaterial vereinbart. Jedoch konnte nach erneuter Messung unter maximal optimierter Ortsauflösung kein visueller Nachweis der Beschichtungsqualität erreicht werden. Als letzte Möglichkeit wurde versucht, aus der höhenaufgelösten Grauwertverteilung eines identischen Probekörpers vor und nach Beschichtung entsprechende Nachweiskriterien abzuleiten.

Aus den Darstellungen in Bild 4.3-30 muss man schlussfolgern, dass aufgrund der Verdünnung der Oberflächenbeschichtung und des äußerst geringen Traceranteils ein signifikanter Nachweis der erreichten Beschichtungsqualität mittels CT-Analyse nicht möglich ist. Lediglich im oberflächennahen Bereich deutet ein sehr schwach ausgebildetes lokales Maximum im Bereich der Grauwertspanne 65-70 auf das Vorhandensein eines entsprechenden Beschichtungsfilmes hin.

4.3.4.3 Untersuchungen zur Ableitung von quantifizierenden Strukturkennwerten zur Beschreibung von Porengröße und Porengrößenverteilung

Die Kennzeichnung der inneren Struktur von mineralischen Baustoffen wie Zementleim, Mörtel oder Beton bezüglich der vorhandenen Porengrößen und der Porenradienverteilung ist spätestens seit Einführung der Quecksilberdruckporosimetrie ein anerkanntes und mittlerweile genormtes Verfahren zur Rückführung von Struktureigenschaften auf das Gebrauchsverhalten. Eine derartige Beschreibung ist insbesondere unter den Problemstellungen des leisen Straßenverkehrs eine offene Fragestellung, deren Beantwortung einen starken Impuls für ein besseres Verständnis erwarten lässt. Aus diesem

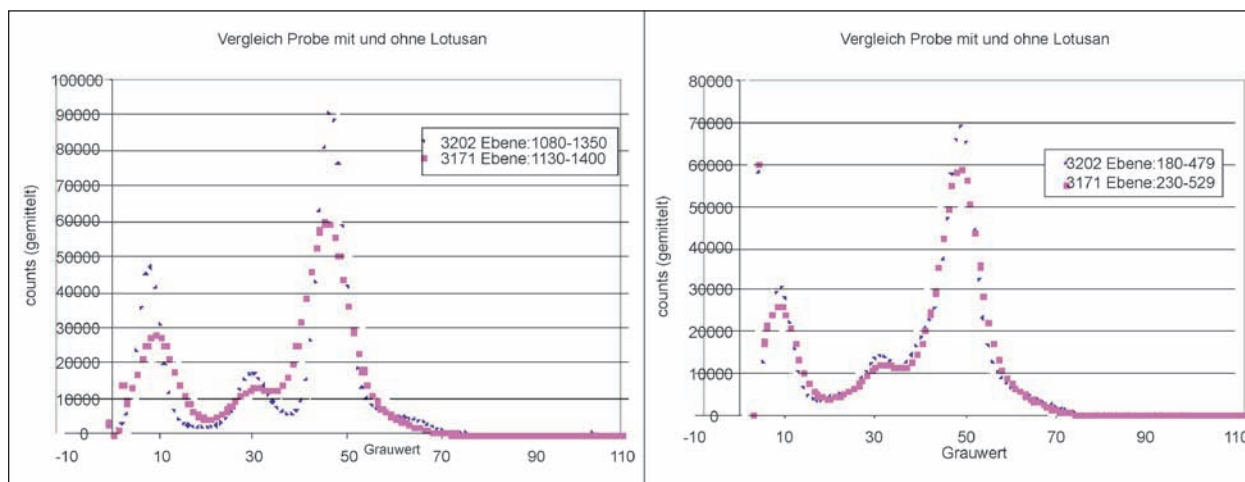


Bild 4.3-30: Vergleich der Grauwert-Histogramme einer Probe mit Lotusan-Beschichtung (blau) und ohne Lotusan-Beschichtung (rot) in verschiedenen Höhenlagen (links: Probenoberfläche; rechts: in Volumenmitte)

Grunde wurden Anstrengungen unternommen, Informationen zur Porenradiengröße und deren Verteilung im untersuchten Volumen aus den Messdatensätzen im Ergebnis der CT-Untersuchung abzuleiten.

Ein Ansatz zur Problemlösung besteht in der Anwendung von in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung weiterentwickelten Verfahren der morphologischen Bildverarbeitung (mathematische Morphologie). Als Plattform für diese Entwicklungen wurde das modular aufgebaute Softwareprogramm „Advanced Visual System Version 5.5“ genutzt. Mittels Durchführung einer OPENING-Operation erfolgt eine schrittweise Porengrößenanalyse von „fein“ nach „grob“. Dabei wird in einem ersten Programmschritt an dem mittels Schwellwertsetzung vom Untersuchungsvolumen separierten Hohlraumvolumen umlaufend zunächst ein Volumenstreifen der Elementanzahl 1 Voxel (insgesamt 2 x 1 Voxel in der Ebenendarstellung) vom gesamten Volumen abgetragen und von der Struktur

gelöscht. Damit verschwinden die Hohlräume, die kleiner als 2 x Elementanzahl sind. Diese mathematische Operation wird als „EROSION“ bezeichnet. Anschließend erfolgt mit Hilfe der „DILATATION“-Operation die Nachbildung bzw. der Wiederaufbau des ungelöschten Hohlraumes in Originalgröße mit gleichmäßigen künstlichen Strukturelementen. Diese Kombination von „EROSION“ und anschließender „DILATATION“ wird schrittweise mit aufsteigender Elementstärke (Anzahl Voxel von n = 1 bis n = x) durchgeführt. Der Volumenanteil des in 2xn-Voxeln Elementanzahl durch „EROSION“ abgetrennten Hohlraumes ergibt sich zu:

$$V_{(2 \times n\text{-Voxel})} = V_{\text{gesamt}} - V_{\text{dilatiertes Porenraum}} - V_{(2 \times n-1 \text{ Voxel})}$$

und wird einem Hohlraumradius von n-Voxeln zugeordnet. Im Ergebnis dieser mathematischen Operationen wurden erstmals für einen ZWOPA 0/8_0/16 mm die in Bild 4.3-31 dargestellten Porenradiengrößen und deren Verteilung ermittelt.

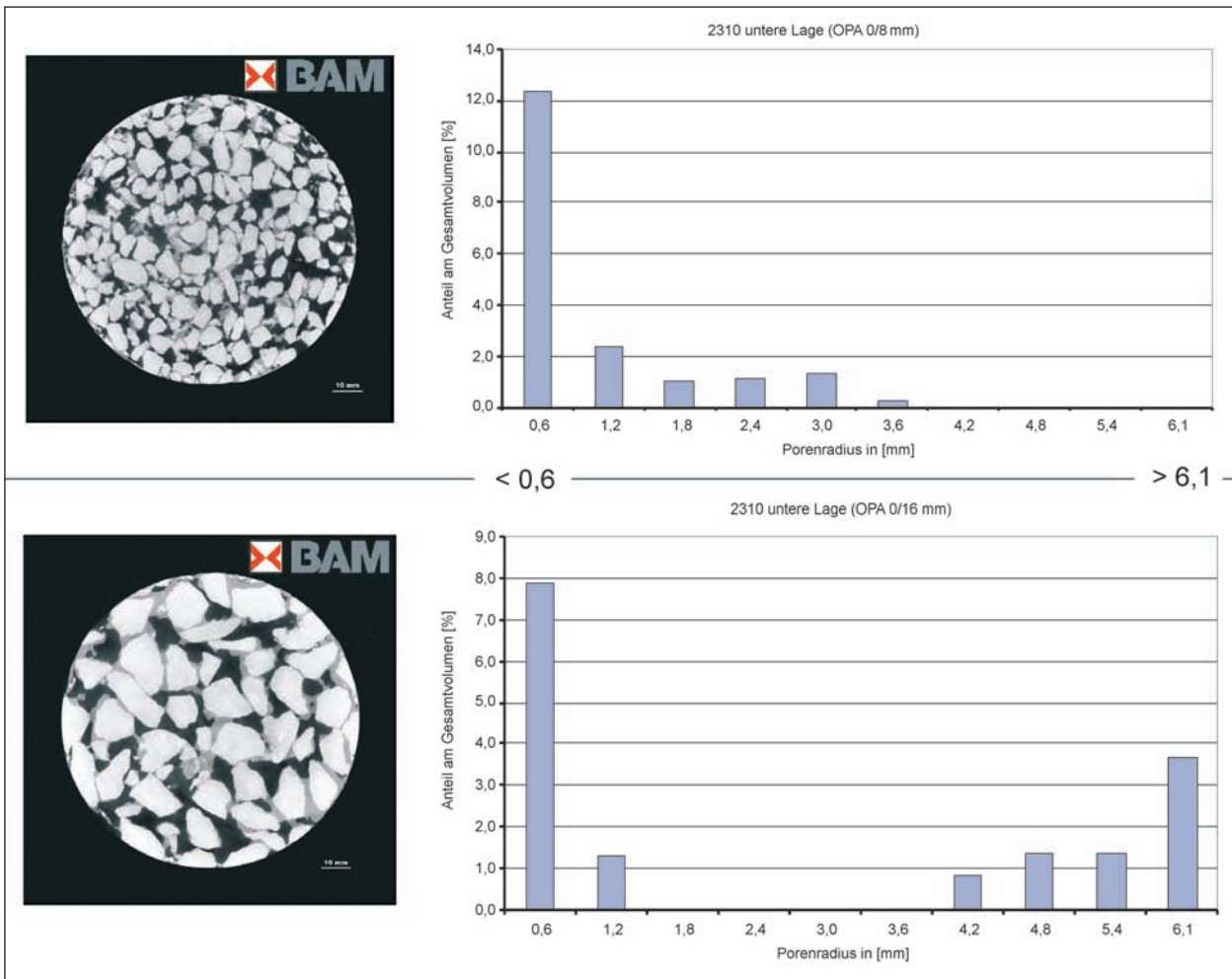


Bild 4.3-31: Porenradienverteilung der oberen und unteren Lage eines ZWOPA 0/8_0/16 mm

Für das Verfahren sind aufgrund rechentechnisch bedingter Beschränkungen Vereinfachungen bzw. Vergrößerungen derzeit noch unerlässlich. Trotzdem erscheint es nunmehr auch in der Asphalttechnologie möglich, mit Hilfe der CT-Methode und nachgeordneter Bildverarbeitung wertvolle Informationen über die Größenordnung der Hohlräume bzw. über deren Verteilung und zum anderen relative Auswirkungen der Verschmutzungen auf das Gefüge und die Porenradialverteilung zu gewinnen.

4.3.5 Fazit

Die zur Adaption des CT-Verfahrens als Ertüchtigung für eine Untersuchung der Hohlraumstruktur von offenporigen Deckschichten des Straßenbaus erforderlichen mess- und auswertetechnischen Voraussetzungen und Routinen stehen zur Verfügung. In Abhängigkeit von der geforderten Auflösung sowie der Probengröße stehen insgesamt 4 Messkonfigurationen zur Verfügung. Eine visuelle und quantitative sowie qualitative Aufklärung der Feststoffphasen, aber auch der Hohlraumstruktur ist bis zu Auflösungen von 0,03 mm Voxel-Kantenlänge möglich. Mittels entwickelter Auswertelgorithmen ist die Hohlraumstruktur durch Kennwerte zu beschreiben. Für weiterführende numerische Untersuchungen ist die erfasste Hohlraumstruktur digital reproduzierbar.

Die Diskussion der Leistungsmöglichkeiten der Computertomografie mit nachgeordneter Datenauswertung durch Digital Imaging zur Strukturaufklärung und möglichen Beiträgen zu weiteren funktionsorientierten Untersuchungen durch die Forschungspartner zeigt den weiteren Bedarf für derartige Untersuchungen insbesondere an Asphaltbaustoffen. Die entwickelten Mess- und Auswertemethoden sind ein Beitrag für eine Performance-bezogene Bewertung von Bauweisen mit besonderen Leistungsanforderungen. Sie eröffnen die bisher stark eingeschränkte Möglichkeit, das Leistungsvermögen und die Dauerhaftigkeit von lärmindernden Straßenbelägen auf die Eigenschaften der Hohlraumstruktur zurückzuführen.

Aufgrund der eingetretenen zeitlichen Verschiebungen im Bearbeitungsstand der verschiedenen Projektpartner konnten die Untersuchungen und Auswertungen des Hohlraumgehaltes unterschiedlich modifizierter Asphaltproben in Abhängigkeit von Verschmutzungsbeanspruchungen

nicht umfänglich abgeschlossen werden. Hierbei geht es insbesondere darum, eine Reduzierung des Clogging-Effektes durch innere Beschichtungen oder Nano-Stratifizierung der Bitumenoberfläche nachzuweisen. Darüber sind nunmehr die Untersuchungsmöglichkeiten gegeben, auch die mittels modifizierter Reinigungstechnologien zu erreichenden Effekte verlängerter Funktionsfähigkeit lärmindernder Straßenbeläge zu erfassen. Auch diese technologischen Fragen konnten innerhalb der der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit wegen des noch nicht verfügbaren durch die Partner zu konditionierenden Probenmaterials nicht befriedigend beantwortet werden. Da das erforderliche Untersuchungs-Know-how zur Kennzeichnung des inneren Aufbaus und der Struktur lärmindernder Belagsaufbauten grundsätzlich zur Verfügung steht, sollten diese Fragestellungen im Zusammenhang mit einer möglichen Ausdehnung der Fragestellung auf die entsprechenden Problemstellungen des kommunalen Straßenbaus bearbeitet werden.

Literatur

- [1] ANGST, C.: Bitumen 3/1983; Seite 117 bis 126
- [2] Mitteilungen der Bundesanstalt für Straßenwesen: Radiometrisches Dichtemessverfahren für Bohrkerne, Zeitschrift: „Straße + Autobahn“; Heft 12/1980; Seite 562 bis 563
- [3] GOEBBELS; ILLERHAUS; RECKNAGEL; JASUNIENE; WEIDEMANN: Quantitative Porosimetrie mittels Röntgencomputertomografie 2000; D-A-CH Jahrestagung der DGFFP 2000; 29.-31.5.2000 Innsbruck
- [4] GOEBBELS; RECKNAGEL; MEINEL: Analysis of morphology and composition with computed tomography exemplified at porous asphalt 2007; International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography DIR 2007; 25.-27.6.2007, Lyon
- [5] MASAD, E.: X-ray computed tomography of aggregates and asphalt mixes; Zeitschrift: „Materials evaluation“; 2004; Vol. 62; Seite 775-783; ISSN 0025-5327
- [6] KETCHAM, R.; CARLSON, W.: Quantitative characterization of asphalt concretes using

high-resolution X-ray computed tomography; NCHRP-IDEA Program Project Final Report (report No.: NCHRP-IDEA Project 64); veröffentlicht durch Transportation Research Board; 12/2000; 31 Seiten

[7] NIELSEN, C.: The patient's name: Scanning porous pavements in a CT-scanner; Zeitschrift: Nordic Road and Transportation Research; ISSN 1101-5179; Vol. 2/3 2005; Seite 16-17

[8] TASHMAN; WANG; THYAGARAJAN: Microstructure Characterization for Modelling HMA Behaviour using Imaging Technology; Zeitschrift: Road Materials and Pavement Design; Volume 8; 2/2007; S. 207-238

[9] PARTL; FLISCH; JÖNSSON: Comparison of Laboratory Compaction Methods using X-ray Computer Tomography 2002; EMPA-Forschungsreport 113/12; ISBN 3-905594-31-5; 81 Seiten

4.4 Teilprojekt „Strömungsverhalten in offenporigen Asphalten“

Prof. Dr.-Ing. M. Mahnhart
Technische Universität München
Fachgebiet Hydromechanik

4.4.1 Zielsetzung

Offenporige Asphalte (OPA) werden in der Praxis häufig für die Lärminderung und zur Verringerung von Sprühfahnen bei Regen eingesetzt. Wie bereits in den anderen Teilprojekten von LeiStra 2 angesprochen, verlieren diese Asphalte schon nach einigen Jahren aufgrund der Einlagerung von Schmutzpartikeln ihre schallreduzierenden Eigenschaften. Im vorliegenden Projekt werden Strategien untersucht, um die schallreduzierenden Eigenschaften des OPA entweder durch Reinigung wieder herzustellen oder eine Verschmutzung von vornherein durch gezielte Strukturgebung zu verhindern. Somit wird ein detailliertes Verständnis für die Mechanismen der Verschmutzung notwendig. Aufgrund dessen und um effiziente Reinigungsstrategien zu entwickeln, wurden die Strömungsverhältnisse in der offenporigen Asphaltenschicht für unterschiedliche Szenarien, wie z. B. bei Regen, bei Befahrung und in gängigen Reinigungsverfahren, untersucht. Bei den Untersuchungen wurden sowohl numerische als auch experimentelle Methoden angewandt.

In einem ersten Schritt wurden Durchflussmessungen an Proben durchgeführt, um das Widerstandsverhalten des Asphalts gegenüber Fluiden wie Luft oder Wasser zu ermitteln. Diese Ergebnisse werden benutzt, um realistische Eingangswerte für numerische Simulationen zu erhalten. Damit werden die großräumige Durchströmung und die Drainagewirkung der Asphaltenschicht bei Dauerregen ermittelt.

Eine treibende Kraft für die Verschmutzung bzw. für die Reinigung von porösen Asphaltenschichten ist der rollende Verkehr. Um die großräumigen Strömungsfelder in der Asphaltenschicht bei Überfahrung zu ermitteln, wurden Simulationen mit homogenisiertem Porenraum durchgeführt (makroskopische Simulation). Die Überfahrung eines Fahrzeuges stellt ein instationäres Phänomen dar, welches aufwändig zu simulieren ist. Durch eine Koordinatentransformation kann dieses jedoch in ein stationäres Problem umgewandelt werden. Die Ergebnisse

müssen lediglich rücktransformiert werden, um auf die realen Verhältnisse zu schließen.

Im Rahmen des Projektes wurden von der Bundesanstalt für Materialforschung Röntgenanalysen an Probekörpern gemacht. Aus den daraus gewonnenen Geometrien wurden dreidimensionale Netze erstellt. Mit Hilfe dieser Netze wurde die Strömung schließlich in der aufgelösten Porenstruktur (mikroskopische Simulation) berechnet und Rückschlüsse auf Transportvorgänge im Asphalt gezogen.

Neben den Verschmutzungsmechanismen wurden aktuelle Reinigungsverfahren untersucht und in der Folge Vorschläge für Verbesserungen erarbeitet. Hierfür wurde ein Laborversuch geplant und aufgebaut, der es ermöglicht, mit Hilfe eines fahrbaren Schlittens verschiedene Reinigungsverfahren auf Wirksamkeit zu untersuchen. Es wurden unterschiedliche Ansätze getestet und die Ursachen für die bisherigen schlechten Reinigungsergebnisse identifiziert.

4.4.2 Großräumige Durchströmung

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen beschrieben, die zur Analyse der Verschmutzungsmechanismen auf der Makroskala durchgeführt wurden. Die Bestimmung der großräumigen Durchströmung der Asphaltdeckschicht kann auf Grund der Komplexität des Porenraumes nur bei Betrachtung des porösen Mediums als Kontinuum erfolgen. In diesem Kapitel wird zunächst die Durchströmung poröser Medien nach DARCY und zugehöriger Simulationsstrategien kurz vorgestellt. Die zugehörigen Durchlässigkeitsbeiwerte werden experimentell ermittelt und für die numerische und analytische Beschreibung großräumiger Fluidbewegungen in porösen Asphaltdeckschichten verwendet.

4.4.2.1 Beschreibung der Durchströmung poröser Medien

Das erste Ziel des hier dokumentierten Projekts war es, den Strömungswiderstand des Offenporigen Asphalts zu bestimmen. Hierzu wurden Versuche nach DARCY durchgeführt.

Theorie nach DARCY

Offenporige Asphaltdecken stellen in ihrer Struktur ein poröses Medium dar. Um die Strömung durch diese Deckschicht in großem Maßstab zu bestimm-

men, wird das poröse Material als Kontinuum betrachtet und die beschreibenden Parameter durch eine Homogenisierung über eine große Anzahl einzelner Porenräume ermittelt. Die sich dadurch ergebende Filtergeschwindigkeit steht mit dem hydraulischen Gradienten $h = z + p/\rho g$ über die verallgemeinerte Darcy-Gleichung (DARCY 1856, BEAR 1978) in Beziehung

$$u_{f,i} = -k_{f,ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \quad (1)$$

Darin stellt $u_{f,i}$ die so genannte Filtergeschwindigkeit, das heißt den Durchfluss Q durch die durchströmte Fläche A dar. Der Tensor $k_{f,ij}$ stellt die Durchlässigkeit des Materials dar. Falls der Durchfluss in Richtung des hydraulischen Gradienten zeigt, reduziert sich dieser Tensor auf einen Diagonaltensor. Im Falle eines isotropen Materials reduziert er sich auf einen skalaren Durchlässigkeits- bzw. Darcy-Koeffizienten k_f [m/s]. Bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten ist die Beziehung zwischen Energieverlust und Strömungsgeschwindigkeit linear. Das liegt an der Tatsache, dass bei kleinen Geschwindigkeiten (falls die Reynoldszahl in den Poren kleiner als eins ist) eine „kriechende Strömung“ vorliegt und der nichtlineare konvektive Term der zugrunde liegenden Navier-Stokes-Gleichung vernachlässigbar ist. Falls diese Voraussetzung nicht mehr erfüllt ist, d. h. bei größeren Geschwindigkeiten oder großen Poren, beobachtet man einen quadratischen Zusammenhang zwischen Energieverlust und Strömungsgeschwindigkeit.

$$\frac{-\partial p}{\partial x_j} = C_1 u_i + C_2 |u_i| u_i \quad (2)$$

Hierbei stellen C_1 und C_2 zwei Konstanten dar, die durch geeignete Experimente ermittelt werden können.

Numerische Simulation der Durchströmung poröser Medien

Zur numerischen Simulation poröser Medien auf der homogenisierten Skala gibt es zwei Möglichkeiten. Die klassische Methode ist die numerische Lösung der Darcy-Gleichung (1) zusammen mit der Kontinuitätsbedingung. Eine zweite Möglichkeit besteht in der Berücksichtigung des Druckverlustes innerhalb der Porenmatrix mit Hilfe einer Permeabilität S_{ij} in der Navier-Stokes-Gleichung.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + g_i + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + S_{ij} \quad (3)$$

Dabei stellt im Falle $S_{ij} = 0$ die Geschwindigkeit u_j die Strömungsgeschwindigkeit in Wasser oder Luft dar und im Falle $S_{ij} \neq 0$ die Filtergeschwindigkeit. Im Falle großer S_{ij} werden die klassischen Terme der Navier-Stokes-Gleichung klein und es bleiben nur der Druckgradient sowie der Permeabilitätsterm übrig. In diesem Fall reduziert sich Gleichung (3) zur klassischen Darcy-Gleichung (1). Der Vorteil dieser Formulierung liegt darin, dass man mit diesem Ansatz poröse Medien direkt mit frei durchströmten Bereichen koppeln kann. Diese Methode ist in dem kommerziellen Strömungslöser Ansys-CFX implementiert.

4.4.2.2 Experimentelle Ermittlung der Durchlässigkeit von Offenporigem Asphalt

Um die Durchlässigkeit von Offenporigem Asphalt zu ermitteln, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt (Bild 4.4-1). In einem verschließbaren zylindrischen Behälter werden Asphaltbohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm eingebracht und mit Hilfe einer Gummierung an den Wänden abgedichtet. Oberhalb und unterhalb der Probe befinden sich zwei Druckanschlüsse. Im Zulauf kann der Durchfluss mit einem magneto-induktiven Durchflussmessgerät (MID) gemessen werden. Die Asphaltprobe wird vertikal von unten nach oben mit Wasser durchströmt.

Mit Hilfe der gemessenen Druck- und Durchflusswerte wird der Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und der Geschwindigkeit nach Gleichung (2) aufgestellt und die entsprechenden Beiwerte für die im Verbund betrachteten Asphaltproben bestimmt.

Bei den Versuchen wurden von allen zu untersuchenden Asphalten jeweils sechs Bohrkerne untersucht. Diese wurden aus im Labor hergestellten Probepplatten 20 x 30 cm gewonnen, wobei aus einer Platte jeweils zwei Bohrkerne gezogen wurden.

Bei der Versuchsdurchführung ergab sich für jeden Bohrkern ein parabolisches Widerstandsverhalten (siehe Bild 4.4-2). Die Ergebnisse der einzelnen Versuche wurden in Diagrammen aufgetragen. Zur numerischen Ermittlung der Widerstandsparameter wurde schließlich eine Trendlinie nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate eingefügt, deren



Bild 4.4-1: Versuchsaufbau nach DARCY zur Ermittlung der Durchlässigkeitsparameter von porösen Asphalten. Die Probe wird mittels einer aufblasbaren Gummidichtung fixiert und abgedichtet

Funktion eine Parabel beschreibt. In Bild 4.4-2 wird diese Auswertung exemplarisch für einen OPA 0/8 der Dicke 6 cm aufgetragen. Es ist klar eine Streuung des Widerstandsverhaltens der einzelnen Bohrkern zu erkennen.

Die Koeffizienten der Ausgleichsparabel nach Gleichung (2) lauten $C_1 = 0,0253$ und $C_2 = 0,0084$. Für Geschwindigkeiten unter ca. 2 mm/s kann der quadratische Anteil vernachlässigt werden und man erhält als Darcy-Koeffizienten

$$k_{f,OPA0/8} = 53 \frac{mm}{s}$$

Mit diesem Beiwert kann die Durchströmung der Asphaltdeckschicht bei Geschwindigkeiten unter 2 mm/s im Rahmen der klassischen Potenzialtheorie berechnet werden.

Nach der Durchführung der Versuche von allen porösen Asphalten werden die ermittelten Trendlinien für die einzelnen Asphalte abschließend in einem einzigen Diagramm aufgetragen (Bild 4.4-3). Es ist zum einen zu erkennen, dass das Widerstandsverhalten bei Verkleinerung der Korngröße zunimmt.

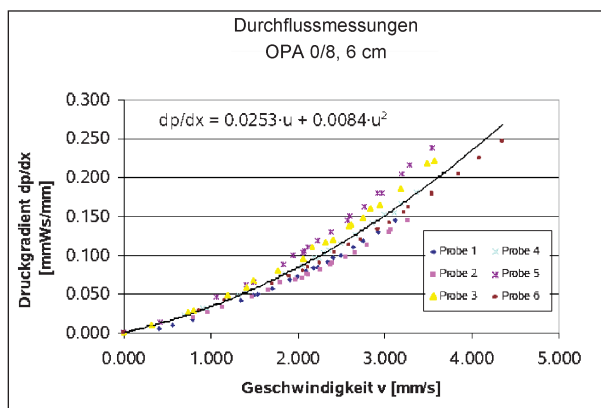


Bild 4.4-2: Druckverlust als Funktion der Durchströmgeschwindigkeit für sechs Bohrkern OPA 0/8 der Dicke 6 cm

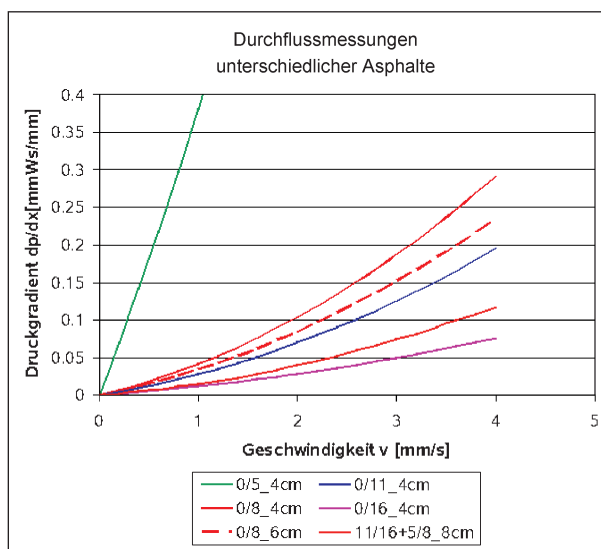


Bild 4.4-3: Druckverlust als Funktion der Durchströmgeschwindigkeit für unterschiedliche OPA

Dies ist auf die Verkleinerung der Porendurchmesser im OPA zurückzuführen. Zum anderen ist zu erkennen, dass der relative Strömungswiderstand bei Erhöhung der Dicke des Asphaltes abnimmt. Dies könnte auf den geringeren Einfluss der oberflächlichen Verdichtung zurückzuführen sein. Beim Vorgang des Verdichtens kommt es vor allem an der Oberfläche zu großräumigen Kornumlagerungen, die in größeren Tiefen nicht mehr möglich sind.

4.4.2.3 Experimentelle Untersuchungen der großräumigen Durchströmung

Gleichmäßige horizontale Durchströmung

Um die Strömungsvorgänge im OPA zu untersuchen, wurden Asphaltplatten der Maße 2,5 x 1,0 m bei einer Neigung von 2,5 % gleichmäßig durchströmt. Hierzu wurde am oberen Abschluss der

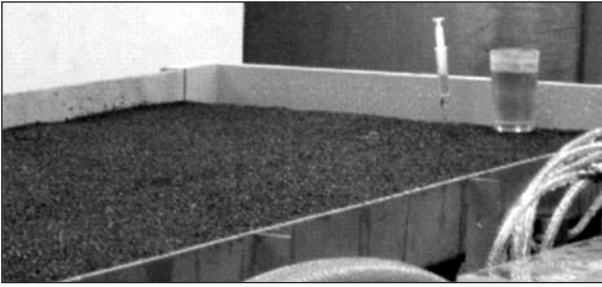


Bild 4.4-4: Punktförmige und instantane Einbringung eines Tracers in die Asphaltplatte

Platte der Wasserspiegel auf Höhe der Oberkante des Asphaltes konstant gehalten. Es ergab sich bei einem OPA 0/8 der Dicke 4 cm ein maximaler Durchfluss von 0,09 l/s, was einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von etwa 2,25 mm/s entspricht. Damit lässt sich ein Durchlässigkeitsbeiwert nach DARCY von

$$k_f = \frac{u_f}{\partial h / \partial x} = 90 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

ermitteln. Dieser Wert ist erheblich größer als der Wert, der in den Darcy-Versuchen ermittelt werden konnte. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in den Darcy-Versuchen die Asphaltprobe in vertikaler Richtung, in den Tracerversuchen jedoch horizontal durchströmt wurde. Dies deutet auf eine anisotrope, d. h. richtungsabhängige Durchlässigkeit hin, die später auf numerischem Wege noch eingehender studiert werden wird.

Am unteren Abschluss der Platte ist ein Auslauf angeordnet, der den Durchfluss aufgrund von Durchsickerung getrennt vom oberflächlich abfließenden Wasser erfasst. Der oben genannte maximale Durchfluss von 0,09 l/s gilt für nicht überströmten Asphalt. Bei einer weiteren Erhöhung des Volumenstroms wurde die Asphaltdecke überströmt. Das führt jedoch zu einem wesentlich geringeren Volumenstrom innerhalb der Asphaltdecke. Falls also der maximal innerhalb der Asphaltdecke transportierbare Volumenstrom überschritten wird, wird der größte Teil oberflächlich abgeführt. Diesen Effekt kann man sich mit der Änderung der Druckrandbedingung an der Auslaufseite der Asphaltdecke erklären.

Tracer-Experimente

Um die Strömungsbedingungen im OPA besser beurteilen zu können, wurde am Auslauf eine elektrische Leitfähigkeitsmessung angebracht. Diese ermöglicht bei Zugabe einer Salzlösung die Messung

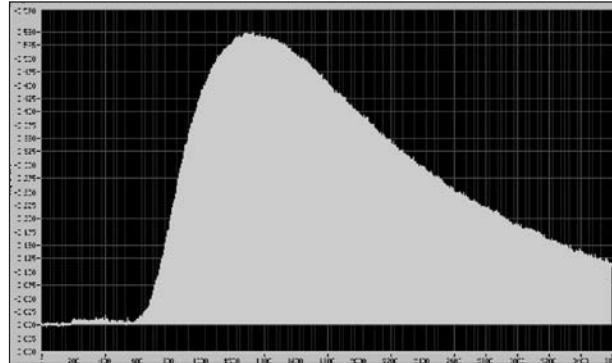


Bild 4.4-5: Typischer Verlauf der Salzkonzentrationen über die Zeit

der zeitlichen Variation der Salzkonzentration im ablaufenden Sickerwasser. Für die Beurteilung der elektrischen Leitfähigkeit wurde der Effektivwert des Spannungsabfalls an einem in Serie zur Leitfähigkeitsmessung geschalteten 20-k Ω -Widerstand gemessen.

Zunächst wurde die Platte gleichmäßig mit 0,09 l/s durchströmt. Nachdem sich ein gleichförmiger Durchfluss eingestellt hatte, wurden auf der Oberseite der Platte, etwa 5 cm vom Rand, an 3 Stellen insgesamt 20 ml einer gesättigten Kochsalzlösung instantan als Tracer hinzugegeben. Zur visuellen Kontrolle der Salzverteilung wurde dem Tracer noch Fluoreszin (Bild 4.4-4) beigegeben. Die Salzkonzentrationsmessung im Auslauf ergab einen typischen Verlauf einer Durchbruchkurve, wie er in Bild 4.4-5 abgebildet ist. Nach etwa 4-5 Minuten ist der Tracer im Auslauf nachweisbar. Das Maximum der Konzentration tritt bei etwa 17 Minuten auf. Es lassen sich daraus folgende Strömungsgeschwindigkeiten ableiten: Die maximale Abstandsgeschwindigkeit liegt bei etwa 9 mm/s. Dies lässt sich mit einer Porosität von 25 % in eine mittlere Filtergeschwindigkeit von 2,3 mm/s umrechnen. Das entspricht in guter Näherung der über Q/A bestimmten Filtergeschwindigkeit von 2,25 mm/s. Die mittlere Geschwindigkeit in der Platte lässt sich über den Schwerpunkt der Tracerkurve abschätzen.

Bei der Versuchsdurchführung ist aufgefallen, dass sich bei längerem stationärem Durchströmen der Platte Luftblasen an den Oberflächen bilden, die mit der Zeit wachsen. Der Strömungswiderstand in der Platte nahm dabei deutlich zu, sodass der Durchfluss bei gleicher Versuchsdurchführung von 0,13 l/s auf 0,09 l/s sank. Dies entspricht einer Steigerung des Strömungswiderstandes um etwa 50 %.

4.4.2.4 Numerische Untersuchungen der großräumigen Durchströmung

Mit Hilfe der experimentell gewonnenen Werte für die Durchlässigkeit poröser Asphaltdeckschichten lassen sich unterschiedliche Szenarien der Durchströmung numerisch untersuchen. Hier wurde der numerische Ansatz gewählt, da im Experiment die Messung lokaler Strömungsgeschwindigkeiten nur unter größtem Aufwand möglich wäre. Dabei wurden folgende Szenarien betrachtet: Dauerregen und Befahrung durch einen Pkw. Die Durchströmung der Asphaltdeckschicht bei Dauerregen wurde sowohl analytisch als auch numerisch untersucht. Die durch Befahrung im Asphalt induzierte Strömung wurde numerisch mit Hilfe des kommerziellen Strömungscodes CFX analysiert.

Dauerregen

Die Durchströmung der Asphaltdeckschicht bei Dauerregen wurde sowohl analytisch durch Lösung der Darcy-Gleichung als auch numerisch untersucht. Dabei wurden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet. Szenario 1 ging von einer Sättigung der Asphaltdeckschicht mit Wasser aus, Szenario 2 von einem teilgesättigten Ablauf.

Szenario 1, d. h. die Durchströmung der Asphaltdeckschicht im gesättigten Fall, wurde numerisch mit Hilfe eines 2D-Schnitts durch eine Asphaltplatte betrachtet – mit den Abmessungen 10 cm x 10 m. Dabei hat sich gezeigt, dass die numerische Lösung dieses Problems durch das große Längen/Seitenverhältnis (100/1) erheblich erschwert wird. In ersten Versuchen mit dem kommerziellen Löser CFX konnte keine befriedigende Konvergenz erzielt werden. Deshalb wurde die Laplace-Gleichung für das hydraulische Potenzial mit Hilfe eines Finite-Differenzen-Verfahrens gelöst, das in MatLab implementiert wurde. Als Randbedingung wurde eine gleichmäßige Überdeckung der Asphaltplatte mit Wasser angenommen, sodass sich als treibender hydraulischer Gradient die horizontale Neigung der Platte von 2,5 % einstellt. Diese Simulationen haben gezeigt, dass der Einfluss der Ränder auf die Verteilung der Filtergeschwindigkeit in der Platte bis maximal einen Meter vom Rand weg sichtbar ist. Im Bereich der Fahrspuren ist also der Randeinfluss bei der Durchströmung vernachlässigbar. Weiterhin zeigten diese Simulationen, dass bei komplettem Einstau der Asphaltdeckschicht im Kernbereich keine nennenswerten Geschwindigkeiten auftreten, was mit den

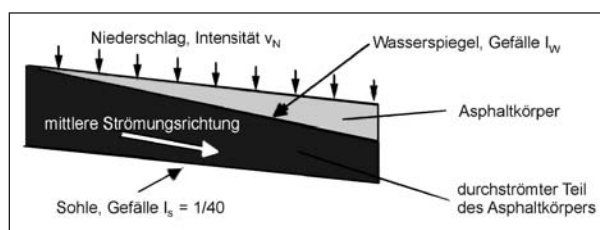


Bild 4.4-6: Konfiguration einer ungesättigten porösen Schicht bei Durchströmung und Zusickerung

Beobachtungen im oben beschriebenen Experiment übereinstimmt. Dieser Fall ist also für eine eventuelle Reinigungswirksamkeit nicht relevant.

Die analytische Beschreibung der Durchströmung der Asphaltplatte im teilgesättigten Bereich (Szenario 2) basiert auf der Theorie poröser Medien nach DARCY. Dabei wird angenommen, dass die Asphaltplatte nicht vollständig mit Wasser gesättigt ist, sondern nur bis zu einer bestimmten Höhe y (Bild 4.4-6). $I_S = 0,025$ ist das Gefälle der Sohle, v die Strömungsgeschwindigkeit und I_W der hydraulische Gradient. v_N stellt die Zusickerung durch einen Niederschlag dar und k den Durchlässigkeitsbeiwert. Die Dupuit-Annahmen (BEAR 1978) werden erfüllt, sodass der hydraulische Gradient dem Gefälle des Wasserspiegels entspricht

$$\frac{dh}{dx} = I_W = I_S + \frac{dy}{dx} \quad (4)$$

Durch Einsetzen der Darcy-Gleichung (1) in die Kontinuitätsbedingung ergibt sich die Dupuit-Forchheimer-Gleichung, die hier einmal in x integriert werden kann, sodass sich folgende Differentialgleichung für die Entwicklung der Fließtiefe im Asphalt ergibt:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = -I_S - \frac{v_n}{k} \frac{x}{y} \quad (5)$$

Diese Differentialgleichung kennt zwei unterschiedliche Lösungen. Falls ein bestimmter kritischer Niederschlag nicht überschritten wird, so existiert eine lineare Lösung nach dem Ansatz $y = Ax + B$. Das Gefälle des Wasserspiegels ergibt sich dabei zu

$$I_W = \frac{1}{2} \left(I_S \pm \sqrt{I_S^2 - 4 \frac{v_n}{k_f}} \right) \quad (6)$$

Die maximale Zuströmgeschwindigkeit wird für diese lineare Lösung zu

$$v_{N,krit} = \frac{1}{4} I_S^2 k_f \quad (7)$$

In diesem Falle ist der hydraulische Gradient gleich der Hälfte des Sohlengradienten ($I_W = 1/2 I_S$). Falls $v_N = 0$ kann die Asphaltdeckungsfläche entweder leer sein ($I_W = I_S$) oder gefüllt und eingestaut ($I_W = 0$). Dieser lineare Fall ist durch eine konstante Abflussgeschwindigkeit gekennzeichnet und tritt bei Zuflüssen kleiner als dem kritischen Zufluss auf. Eine weitere Schranke ergibt sich durch die Randbedingung, dass die Fließtiefe im durchströmten Teil des Asphalts nicht tiefer als die Dicke $D = 10$ cm des Asphalts sein kann. Mit der Breite L der Asphaltdeckungsfläche lässt sich daraus eine weitere Schranke für $v_{N,krit,2}$ ableiten:

$$v_{n,krit,2} \leq -\frac{k_f}{4} \left(\left(I_S - 2 \frac{D}{L} \right)^2 - I_S^2 \right) \quad (8)$$

Mit folgenden Annahmen lassen sich diese beiden Schranken für den Niederschlag v_N ermitteln (s. Tabelle 4.4-1).

Die Breite der Platte begrenzt also den maximalen Niederschlag, bei dem die Platte gerade nicht überströmt wird, auf 22,6 mm/h. Diese Intensität entspricht Starkregen (DIEM 1967). Als konstante Abflussgeschwindigkeit ergibt sich bei diesem Niederschlag eine Filtergeschwindigkeit von $v_f = 0,64$ mm/s, bei der die getroffene Annahme eines linearen Darcy-Koeffizienten gerechtfertigt ist.

Die zweite Lösung der Differentialgleichung (5) tritt für Zuströmgeschwindigkeiten $v_N > v_{N,krit}$ auf. Sie kann nur durch eine numerische Integration ermittelt werden. Dazu kann man folgende Überlegungen treffen. Für $x = 0$ ergibt sich $I_W = 0$, das ist also der Punkt der Wasserscheide. Die maximale Dicke y_0 der gesättigten Schicht ergibt sich aus $\partial y / \partial x = 0$ bei

$$x_0 = -I_S \frac{k_f}{v_N} y_0$$

Von diesem Punkt aus fällt die Fließtiefe nach beiden Seiten hin ab und endet jeweils mit einer senkrechten Tangente an zwei Nulldurchgängen auf der linken und der rechten Seite. Eine numerische Integration der Gleichung (5) kann also an der Wasserscheide beginnen und nach beiden Seiten, also in

L	D	I _s	K _f	v _{n,krit}	v _{n,krit,2}
[m]	[mm]	[%]	[mm/s]	[mm/h]	[mm/h]
15	10	2,5	50	28,1	22,6

Tab. 4.4-1: Annahmen zur Ermittlung kritischer Zuströmgeschwindigkeiten (Niederschlag)

	v _{n,krit}	v _{n,krit,2}	v _{n,krit,3}
Niederschlagsmenge [mm/h]	22,6	28,1	44,6
Plattenbreite [m]	26	21,8	15

Tab. 4.4-2: Kritische Niederschlagsmengen und zugehörige Plattenbreiten aus numerischer Lösung der Gleichung (5)

positiver und negativer x-Richtung, erfolgen. Damit ergeben sich die in Tabelle 4.4-2 angegebenen maximalen Plattenbreiten bei zugehörigen Niederschlagsmengen. Die nach dieser Lösung ermittelte Maximalgeschwindigkeit für eine 15 m breite Platte ist $v_{N,krit,3} = 44,6$ mm.

Einfluss des Verkehrs

Aus praktischen Erfahrungen mit OPA ist bekannt, dass der laufende Verkehr eine Selbstreinigungswirkung besitzt. Nicht befahrene Fahrstreifen verschmutzen wesentlich schneller als befahrene. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde diese Selbstreinigungswirkung des rollenden Verkehrs mit numerischen Methoden untersucht. Dazu wurde die Umströmung eines rollenden Reifens mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h auf regennasser Fahrbahn (Dicke des Wasserfilms 3 mm) simuliert. Der Ursprung des Koordinatensystems wurde in die Achse des Reifens gelegt, sodass sich das Koordinatensystem mit der Achse mitbewegt. Der Reifen wurde durch ein FE-Modell, das der Projektpartner Continental zur Verfügung gestellt hat, approximiert (Bild 4.4-7). Dabei wird die Oberfläche des Reifens mit einer konstanten Umfangsgeschwindigkeit belegt. Die Asphaltdeckungsfläche bewegt sich in dem bewegten Koordinatensystem mit der negativen Geschwindigkeit des rollenden Reifens. Die Parameter des OPA (Porosität) wurden mit Hilfe einer Galileo-Transformation modifiziert, um die Bewegung der Asphaltdeckungsfläche einzuführen (Bild 4.4-8).

Die Ergebnisse der Simulation werden anhand von Vergleichen mit Fotos (Bild 4.4-9) auf Plausibilität überprüft.

Die numerische Simulation wurde mit ANSYS CFX durchgeführt. Die Ergebnisse werden in den Bildern 4.4-10 und 4.4-11 abgebildet. Bei Darstellung der Wasseroberfläche ist im Nachlauf des Reifens zum einen eine Sprühfahne zu erkennen (roter Bereich). Zum Zweiten verdrängt der Reifen den Wasserfilm von der Straße (grauer Bereich). Die Fahrspur des Reifens ist im Nachlauf zu erkennen. Diese Beobachtungen decken sich sehr gut mit den Fotos (Bild 4.4-9).

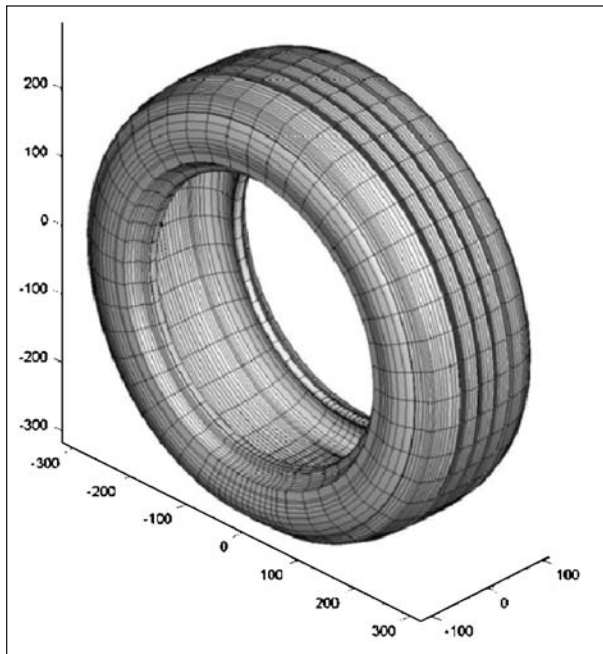


Bild 4.4-7: FE-Modell des rollenden Reifens

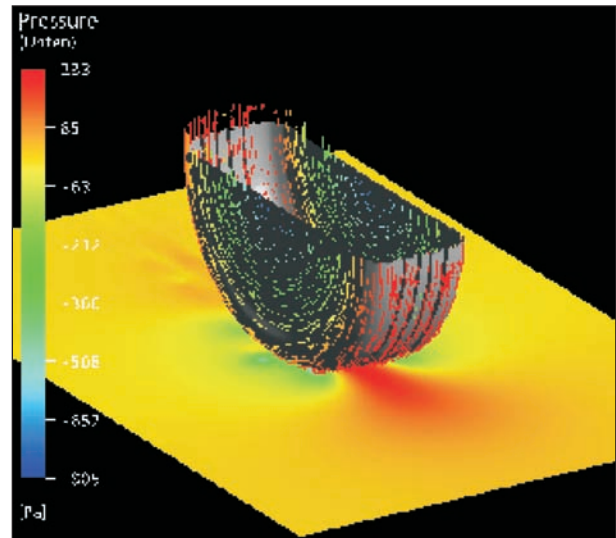


Bild 4.4-10: Simulation eines rollenden Reifens auf regennasser Fahrbahn (wassergesättigte Asphaltmatrix) und einem Wasserfilm auf der Fahrbahn von 3 mm. Druckverteilung auf der Oberfläche der Asphaltdeckschicht

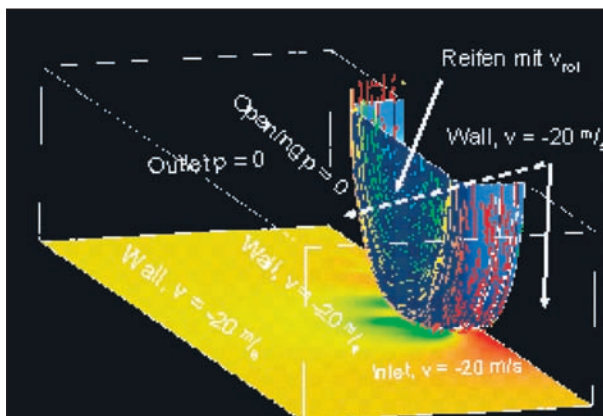


Bild 4.4-8: Randbedingungen bei der Simulation eines rollenden Reifens mit Durchströmung der Asphaltdeckschicht

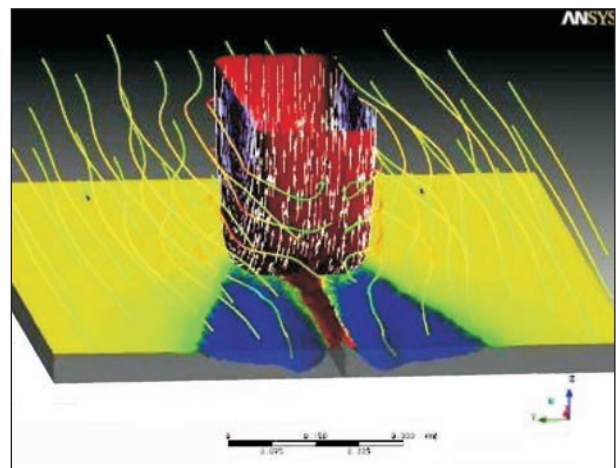


Bild 4.4-11: Isofläche des Unterdrucks von ca. -0,132 bar im Nachlauf des Reifens



Bild 4.4-9: Sprühhahn im Nachlauf eines Reifens auf regennasser Fahrbahn

In der Simulation wurde der Asphalt mit den in den Durchströmversuchen ermittelten Widerstandsparmetern beschrieben. Bei Darstellung der Wasseroberfläche im Asphalt (Bild 4.4-11) sieht man, dass der Reifen beim Überrollvorgang das Wasser aus der Asphaltmatrix aus einer Tiefe von bis zu 3 cm austrägt. Dazu muss das Wasser sehr stark beschleunigt werden. Durch diese Beschleunigung kommt es lokal zu großen Geschwindigkeiten, die die Selbstreinigungswirkung des rollenden Verkehrs erklären könnten.

Abschließend wurde das sich einstellende Druckfeld analysiert. Dazu wurde das Drucksignal geplottet, das sich an unterschiedlichen Positionen beim Überfahren mit dem Reifen ergeben würde (Rück-

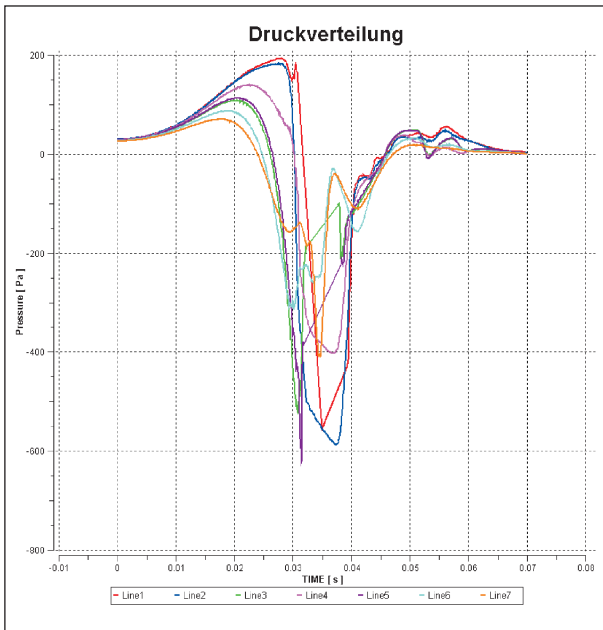


Bild 4.4-12: Druckverläufe in der Asphaltdeckschicht während einer Überführung

transformation in ortsfestes Koordinatensystem) (Bild 4.4-12). Es sind klar der Staudruck vor und der Unterdruck unter und seitlich des Reifens zu sehen. Je nach Position wechselt der Druck innerhalb von 40 ms vom Überdruck (bis zu 200 Pa) zum Unterdruck (bis zu -600 Pa). Es liegt nahe, dies als Ursache für den so genannten Air-Pumping-Effekt anzusehen, da diese Drücke natürlich eine Durchströmung der Asphaltdecke verursachen. Um abzuschätzen, ob Partikel in der Asphaltdecke auf dieser kurzen Zeitskala überhaupt einer induzierten Strömung folgen können, wurden die Zeitkonstanten von Partikeln abgeschätzt. Massebehaftete Partikel bewegen sich in einem Strömungsfeld aufgrund von Kräften, die auf die Differenzgeschwindigkeit zwischen Partikeln (Widerstand), auf Druckgradienten, auf Gravitation (Auftrieb), auf mitgenommener Masse (Massenzuschlag) und History-Effekten beruhen (MAXEY & RILEY 1983). Die Widerstandskraft ist bei starken Beschleunigungen dominant. Dabei können Partikel innerhalb einer Zeitkonstanten t_p auf die Strömung reagieren, die mit

$$t_p = \frac{\rho_p}{\rho_f} d^2 \frac{1}{18\nu} \quad (9)$$

gegeben ist. Diese Zeitkonstante wird in Bild 4.4-13 für Wasser und Luft bei einer angenommenen Dichte von $\rho_p = 2,4 \text{ kg/dm}^3$ dargestellt.

Bei einer Fahrgeschwindigkeit von 20 m/s können Partikel der Dichte $2,4 \text{ kg/dm}^3$ in Wasser mit einem

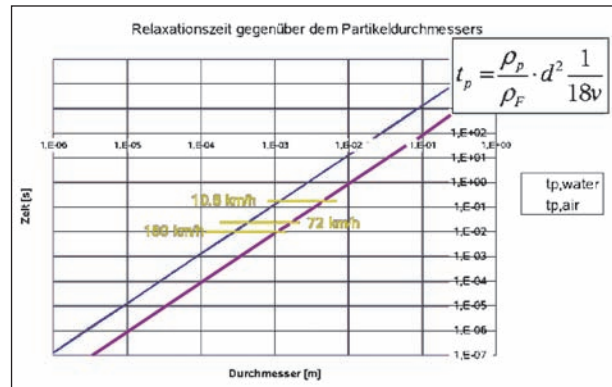


Bild 4.4-13: Zeitkonstanten von Partikeln in Wasser und Luft in Abhängigkeit des Partikeldurchmessers

Durchmesser kleiner als ca. 2 mm und in Luft mit einem Durchmesser kleiner als ca. 0,4 mm auf die Strömung reagieren, die aus einer Überführung resultiert. Zu erwähnen sei noch die starke Sogwirkung im Unterdruckbereich, der die Partikel aus der Asphaltdecke saugen könnte. Es kommt bei der Befahrung von 80 km/h zu einem Unterdruckbereich im Nachlauf des Reifens, der bis zu -0.2 bar beträgt (Bild 4.4-12).

4.4.3 Simulationen auf der Porenskala

Um die Strömung durch eine poröse Asphaltdeckenschicht im Detail analysieren zu können, wurden numerische Strömungssimulationen auf der Porenskala durchgeführt. Mit Hilfe dieser Simulationen wurden folgende Fragestellungen untersucht, die auf experimentellem Wege nicht geklärt werden können. Zum einen ergaben sich in den unterschiedlichen Experimenten unterschiedliche Leitfähigkeiten (Darcy-Koeffizienten), die die Frage nach einem anisotropen Material aufwarfen. Diese Frage kann in einer numerischen Simulation der Durchströmung auf der Porenskala beantwortet werden. Die zweite Fragestellung geht den Geschwindigkeitsverteilungen innerhalb des Porenraumes nach, die inhärent mit der Kapazität der Strömung zum Partikeltransport im Porenraum verknüpft ist. Als dritte Fragestellung wird der Partikeltransport im Porenraum direkt untersucht.

4.4.3.1 Numerische Simulationen im Korngerüst

Um repräsentative Ergebnisse zu erhalten, wurde ein Probekörper der Maße 30 x 30 x 30 mm analysiert, der genügend einzelne Poren enthält. Die Geometrie wurde von der Bundesanstalt für Materialforschung mittels CT-Scans gewonnen und für die

Simulationen zur Verfügung gestellt. In Bild 4.4-14 ist die Struktur des Probekörpers abgebildet.

In einem ersten Versuch wurde die Durchströmung der Asphaltprobe mit dem kommerziellen Löser Ansys-CFX simuliert. Dies konnte für einen kleineren Würfel mit 10 x 10 x 10 mm erfolgreich durchgeführt werden. Bei der Vernetzung des Würfels mit den Abmessungen 30 x 30 x 30 mm kam es jedoch zu internen Fehlern des Gittergenerators. Diese wurden auf die geometrische Komplexität des Porenraumes zurückgeführt. Selbst nach einer Kontaktaufnahme mit der Entwicklungsabteilung der Firma Ansys GmbH ergab sich keine Möglichkeit, ein qualitativ hochwertiges Tetraedernetz für den Probekörper zu entwickeln.

Um die Strömungsvorgänge im Probekörper dennoch numerisch untersuchen zu können, wurde der am Fachgebiet Hydromechanik entwickelte Strömungscodex MGLLET verwendet. Der Code basiert auf einem klassischen Finite-Volumen-Verfahren für inkompressible Strömungen auf einem Kartesischen Gitter. Die räumliche Approximation der Flüsse geschieht mit zentralen Differenzen zweiter Ordnung. Ein explizites Runge-Kutta-Verfahren dritter Ordnung wird für die Zeitintegration verwendet. Die Geometrie des Porenraumes wird in dem Kartesischen Gitter durch eine Immersed-Boundary-Methode dargestellt (PELLER et al. 2006).

Als erster Schritt erfolgt im Rahmen der Immersed-Boundary-Methode die Markierung der nicht durchströmten Zellen. In einem zweiten Schritt werden aus den Schnittpunkten der Geometrie mit den Kartesischen Gitterzellen Randapproximationen zweiter Ordnung hergeleitet, die im Rahmen der Flussapproximation eingesetzt werden. Damit erhält man insgesamt eine Approximation der Oberfläche mit Konvergenz zweiter Ordnung im Raum und dritter Ordnung in der Zeit.

Nach der Vernetzung mit 256 x 256 x 256 Zellen wurde in einem ersten Schritt die Homogenität der Porenverteilung untersucht. Es wurden hierzu normal zu den Hauptkoordinatenrichtungen Schnitte durch die Porenstruktur gelegt und der Porenanteil an unterschiedlichen Positionen ermittelt. Es ergaben sich die in Bild 4.4-15 dargestellten Verläufe des Porenanteils. Der Porenanteil normal zur X- und Y-Achse ist dabei relativ homogen verteilt und liegt bei etwa 22 Volumenprozent. Die Schwankungen können durch die Körnung 0/8 erklärt werden, was immerhin fast 25 % der Abmessungen des

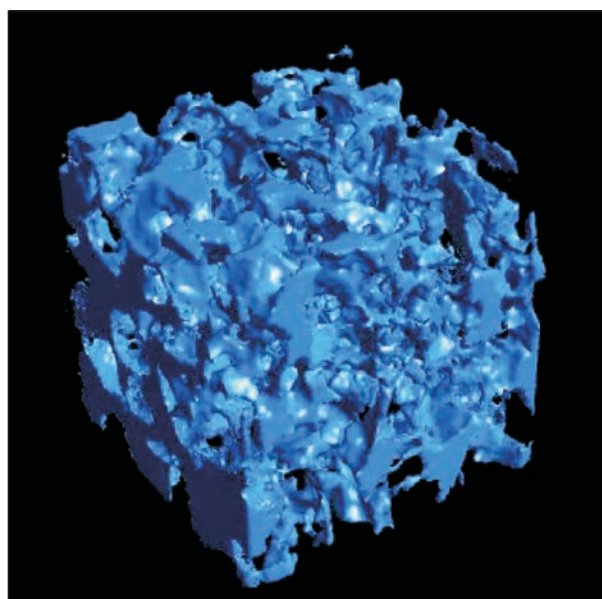


Bild 4.4-14: Porenstruktur eines Probekörpers OPA 0/8 mit 30 x 30 x 30 mm

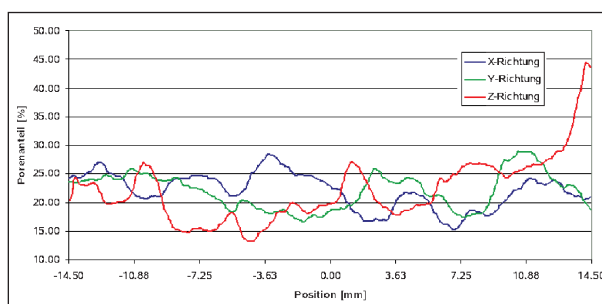


Bild 4.4-15: Porenanteil im Probekörper bei Schnitten normal zu den Koordinatenrichtungen

Probekörpers entspricht. In Richtung der Z-Achse ergab sich eine inhomogene Verteilung des Porenraums. Die Analyse des Verlaufs des Porenanteils über die Z-Achse veranlasst zu der Annahme, dass die negative Z-Koordinate die Oberseite des OPA markiert und der angesprochene Verlauf durch den eindimensionalen Verdichtungsprozess erklärt werden kann. An der Oberseite kommt es bei der Herstellung von OPA zu den größten Kornumlagerungen und Verdichtungsprozessen, sodass der Porenanteil auf unter 15 Vol.-% fällt. In größeren Tiefen reicht die Verdichtung nicht mehr aus, um großräumige Kornumlagerungen auszulösen, was zu einem Ansteigen des Porenanteils führt.

Um die Strömungsverhältnisse auf der Porenskala numerisch zu untersuchen, wurde die Probe jeweils entlang der drei Hauptkoordinatenrichtungen durchströmt. Die Strömung wurde dabei jeweils durch einen Druckunterschied von 10 Pa zwischen Ober- und Unterseite angetrieben.

Das sich einstellende Strömungsfeld spiegelt die Komplexität des Porenraumes wider (Bild 4.4-16). Sowohl die Richtung des lokalen Strömungsvektors als auch seine Größe variieren sehr stark.

Im Rahmen der Simulationen sollte die Isotropie des Strömungswiderstandes untersucht werden. Die Filtergeschwindigkeit v_f , die sich aus dem Verhältnis aus Durchfluss und Querschnittsfläche ergibt (Tabelle 4.4-3), zeigt deutlich, dass der Strömungswiderstand in vertikaler Richtung deutlich höher ist als in horizontaler Richtung. Die errechneten Werte stellen zwar nur eine Stichprobe dar und müssten durch weitere Simulationen verifiziert und bestätigt werden. Sie stehen allerdings im Einklang mit den Beobachtungen aus dem Experiment, nach denen die horizontale Leitfähigkeit erheblich größer ist als die vertikale.

Eine detaillierte Information über die Struktur der Strömung ergibt sich aus der Verteilung der Geschwindigkeiten im Porenraum. In etwa 40 % des Porenraumes herrschen Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 1 mm/s, in mehr als 40 % jedoch Strömungsgeschwindigkeiten unter 0.05 mm.

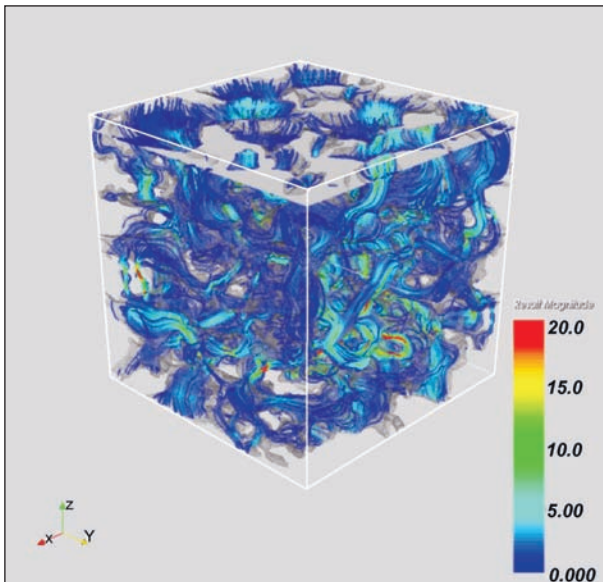


Bild 4.4-16: Stromlinien des bei Durchströmung des Probekörpers sich entwickelnden Geschwindigkeitsfeldes in [mm/s]

Strömungsrichtung	Filtergeschwindigkeit
x	1,098
y	0,762
z	0,348

Tab. 4.4-3: Resultierende Filtergeschwindigkeiten bei Durchströmung der Asphaltprobe in unterschiedlichen Raumrichtungen bei gleichem Druckgradienten

Man kann erwarten, dass sich Schmutzpartikel vornehmlich in diesen Bereichen ablagern, die zum großen Teil abgeschlossene 'Kavernen' darstellen, die nicht zum durchflusswirksamen Porenraum gezählt werden können.

In einer weiteren Untersuchung wurde ein verschmutzter mit einem unverschmutztem Asphalt verglichen. Die Geometrie von 30 x 30 x 30 mm wurde erneut von der Bundesanstalt für Materialforschung mittels CT-Scans gewonnen und für die Simulationen zur Verfügung gestellt. Es handelt sich um zwei Probekörper aus OPA 0/8, wobei der eine Probekörper verschmutzt und der andere unverschmutzt war. In den Bildern 4.4-17 und 4.4-18 sind die beiden Probekörper sowie Detailaufnahmen der jeweiligen Poreinnenwandungen dargestellt.

Nach der Vernetzung mit 256 x 256 x 256 Zellen wurde in einem ersten Schritt die Porenstruktur der beiden Probekörper untersucht. Wie Tabelle 4.4-4 zu entnehmen ist, unterscheidet sich die Porosität der beiden Probekörper grundlegend. Während im unverschmutzten Zustand ein Porenanteil von etwa 22 % vorliegt, sinkt dieser im verschmutzten Zustand um 5 % auf etwa 17 %. Bei näherer Betrachtung der inneren Porenstruktur sieht man, dass die Verschmutzung zu einer Verkleinerung der Porenkanäle bis hin zum Verstopfen von einzelnen Kanälen führt. Diese Verstopfung ist schließlich dafür verantwortlich, dass der zusammenhängende durchströmte Porenraum abnimmt. Der gesamte Porenraum im verschmutzten OPA ist demnach um einige Prozentanteile höher als der durchflusswirksame Porenraum, da einige Teilbereiche durch die Ablagerungen komplett abgeschnitten wurden.

Neben der Porosität wurden die Wandanteile der beiden Probekörper ausgewertet. Der gesamte Wandanteil, d. h. der prozentuale Anteil der von Wänden geschnittenen Zellen, bleibt in etwa gleich bei etwa 3,5 %. Bezieht man den Wandanteil jedoch auf den Porenanteil des Probekörpers, so kann ein Ansteigen des Wandanteils im ver-

	unverschmutzt	verschmutzt
Porosität des Probewürfels 30 x 30 x 30 mm	22,03 %	17,19 %
Wandanteil des Probekörpers	3,86 %	3,43 %
Wandanteil des Porenraumes	17,51 %	19,94 %

Tab. 4.4-4: Porositäten und Wandanteile von unverschmutztem und verschmutztem OPA 0/8g

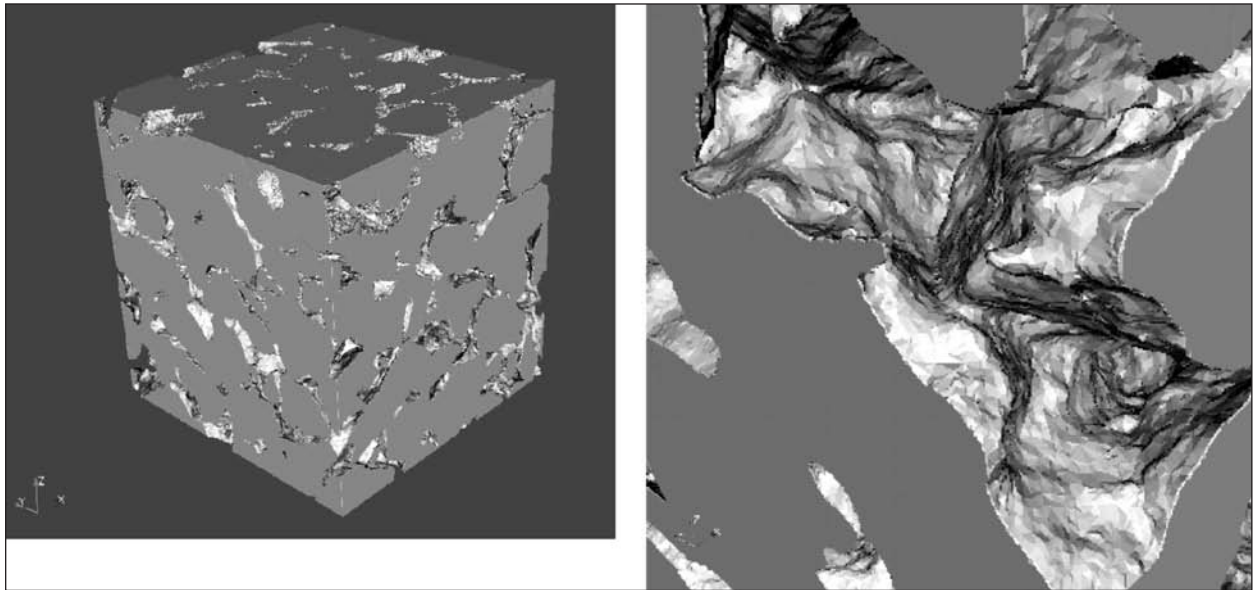


Bild 4.4-17: Darstellung der unverschmutzten Probekörper (links) mit Detailaufnahme der Poreninnenwand (rechts)

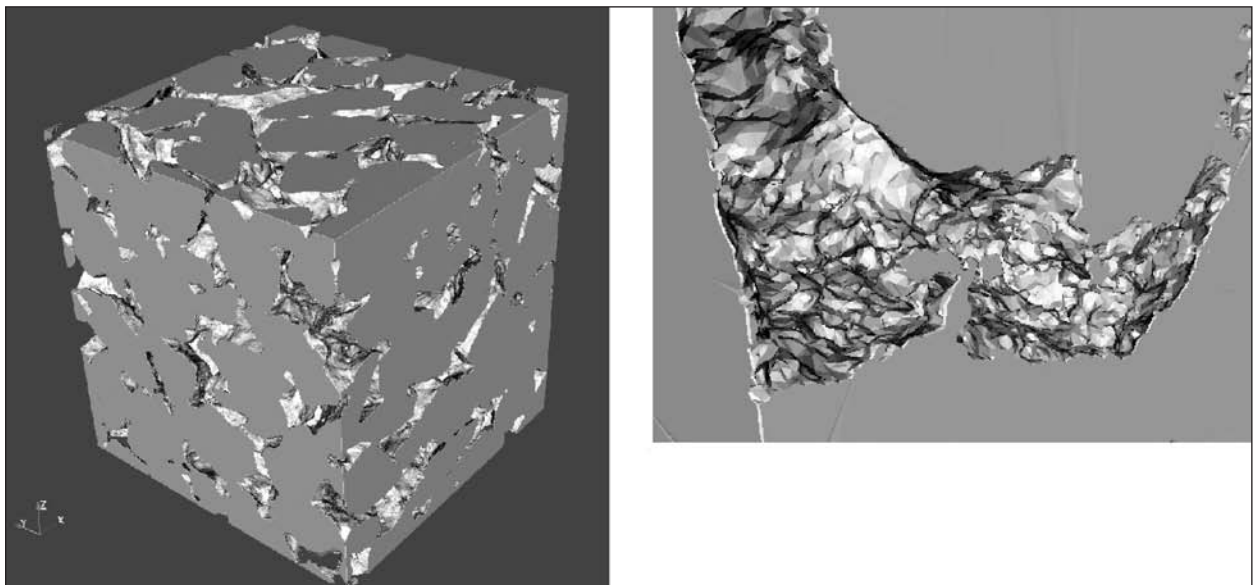


Bild 4.4-18: Darstellung der verschmutzten Probekörper mit Detailaufnahme der Poreninnenwand

schmutzten Probekörper beobachtet werden. Dies bedeutet zum einen, dass die Strömungskanäle enger werden. Zum anderen kann ein Ansteigen der Rauheit der Innenwandungen des OPA visuell beobachtet werden (Bild 4.4-19).

Die Durchströmung wurde wie in der ersten Probe jeweils in den drei Raumrichtungen mit einem konstanten Druckgradienten simuliert. Damit konnten Aussagen über den Strömungswiderstand und dessen Isotropie gewonnen werden. Die Filtergeschwindigkeit v_f , die sich aus dem Verhältnis aus Durchfluss und Querschnittsfläche ergibt (Tabelle 4.4-5), zeigt, dass der Strömungswiderstand beim unverschmutzten Probekörper in allen drei Raum-

Strömungsrichtung	Filtergeschwindigkeit unverschmutzt	Filtergeschwindigkeit verschmutzt
x	1,181	0,491
y	1,081	0,434
z	1,069	0,248

Tab. 4.4-5: Filtergeschwindigkeit im unverschmutzten und verschmutzten OPA 0/8 bei Durchströmung in unterschiedlichen Raumrichtungen

richtungen in etwa gleich groß ist. Im Gegensatz zu dem ersten Probekörper kann man keine Anisotropie beobachten. Die Leitfähigkeit ist hier in allen drei Raumrichtungen gleich. Man muss bei diesen Untersuchungen also mit erheblichen statistischen

Schwankungen in den Materialeigenschaften rechnen.

Im verschmutzten Zustand steigt der vertikale Strömungswiderstand um den Faktor 4 an, während der horizontale Strömungswiderstand um den Faktor 2 ansteigt. Die Verschmutzung sorgt demnach insgesamt für kleinere horizontale Strömungsgeschwindigkeiten, was einen verminderten Schmutzpartikeltransport und eine verminderte Drainfähigkeit des OPA bedeutet. Zum anderen wird durch den stark ansteigenden vertikalen Strömungswiderstand der Schmutzpartikeltransport derart vermindert, dass von einer Beschleunigung der Verschmutzung auszugehen ist.

Neben den Filtergeschwindigkeiten wurden die Verteilungen der Geschwindigkeiten im Porenraum untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 4.4-19 im Rahmen von Summenlinien aufgetragen. Wie in der Abbildung zu sehen ist, liegen die Summenlinien der Strömungsgeschwindigkeiten des unverschmutzten Probekörpers in etwa übereinander, d. h., die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten ist in den drei Raumrichtungen ähnlich. Bei Betrachtung der Summenlinien des verschmutzten Probekörpers kann man jedoch deutlich die unterschiedliche horizontale und vertikale Durchströmung erkennen. Wo bei Vergleich der drei Linien die Anteile der Geschwindigkeiten unter 0,3 mm in etwa gleich groß sind, verschiebt sich die Summenlinie der vertikalen Durchströmung nach links, also zu geringeren Geschwindigkeiten. Dies wirkt sich negativ auf die Transportmöglichkeiten von Schmutzpartikeln aus.

Vergleicht man die Summenlinien des verschmutzten und unverschmutzten Probekörpers, so sieht

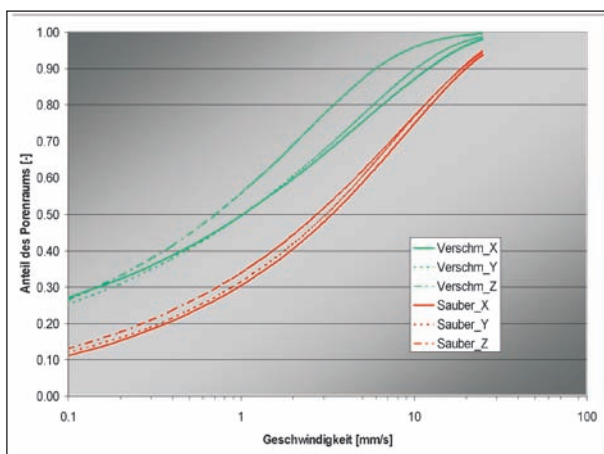


Bild 4.4-19: Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung in unverschmutztem und verschmutztem OPA 0/8

man, dass sich der Anteil sehr kleiner Geschwindigkeiten deutlich unterscheidet. Ist der Anteil des Porenraumes mit Geschwindigkeiten kleiner als 0,1 mm/s beim unverschmutzten Probekörper in einer Größenordnung von 10-12 %, so steigt dieser auf etwa 27 % beim verschmutzten OPA, was mehr als eine Verdopplung darstellt.

Die Verteilung der Anteile der Geschwindigkeiten zwischen 0,1 und etwa 3 mm/s ist bei allen Probekörpern in etwa gleich, was an etwa gleichen Gradienten der Summenlinien zu sehen ist. Bei Vergleich der Anteile mit hohen Geschwindigkeiten sieht man jedoch, dass diese beim verschmutzten OPA wesentlich geringer sind als beim unverschmutzten OPA.

4.4.3.2 Simulation des Partikeltransports im Porenraum

Für die Bestimmung von Reinigungsintervallen sowie für die Optimierung von Reinigungsverfahren ist es hilfreich, eine Vorhersage zu treffen, in welchem Maße sich Schmutz im Asphalt sammeln wird und welcher Anteil der verschmutzenden Stoffe bei Regen ausgespült wird. Diese Fragestellung soll mittels numerischer Simulation untersucht werden.

Theoretische Grundlagen

Ablagerung von Partikeln in Strömungen und Wiedereintrag tritt in verschiedenen Anwendungen auf. Ein typischer Ansatz zur Prognose von Ablagerungen basiert auf der Wandschubspannung. Die Wandschubspannung spiegelt die Kraftübertragung des strömenden Wassers auf den Kontaktkörper (hier: Asphaltkörper) bzw. die anhaftenden Partikel wider. Zum Beispiel wird zur Abschätzung von Sedimentationsvorgängen in Gerinnen aus empirischen Daten ein kritischer Wert für die Wandschubspannung geschätzt. Sobald der kritische Wert überschritten wird, wird davon ausgegangen, dass das Sediment in Bewegung ist. Es stellt sich ein dynamischer Prozess zwischen Ablagerung und Wiedereintrag ein. Bei Unterschreitung der kritischen Wandschubspannung ist das Sediment in Ruhe.

Für die Berechnung der Ablagerungen im Asphaltkörper ist nicht klar, ob diese Methode geeignet ist. Die Methode basiert auf der Annahme, dass der Partikeleintrag maßgeblich durch Liftkräfte (SAFFMAN 1962, WANG et al. 1997) bestimmt wird. Liftkräfte entstehen aus dem Gradienten der Fluidgeschwindigkeit an der Wand. Daher lässt sich ein Zu-

sammenhang zwischen Wandschubspannung und Partikeleintrag herleiten.

Um Sedimentation und Wiedereintrag zu berechnen, müssen alle Kräfte berücksichtigt werden, die auf Schmutzpartikel im Asphalt wirken. Für kleine kugelförmige Partikel liefert die Partikeltransportgleichung von MAXEY und RILEY (1983) eine gültige Beschreibung dieser Kräfte auf ein Einzelkorn:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \underbrace{\frac{c_D \operatorname{Re}_p}{24 t_p} (\mathbf{u} - \mathbf{v})}_{\text{Stokesche Widerstandskraft}} + \underbrace{\frac{\rho_F}{\rho_p} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \mathbf{u} \mathbf{u} \right)}_{\text{Fluidbeschleunigungskraft}} + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{\rho_F}{\rho_p} \frac{d(\mathbf{u} - \mathbf{v})}{dt}}_{\text{Massenzuschlagskraft}} + \underbrace{\left(1 - \frac{\rho_F}{\rho_p} \right)}_{\text{Gravitation}} \mathbf{g} + \mathbf{F}_B$$

In dieser Gleichung sind \mathbf{v} die Geschwindigkeit eines einzelnen Partikels, \mathbf{u} die Geschwindigkeit des Fluids an der Partikelposition, ρ_F die Dichte des Fluids, ρ_p die Stoffdichte des Partikels, c_D der Stokesche Widerstandsbeiwert, Re_p die aus dem Partikeldurchmesser d gebildete Partikel Reynoldszahl, t_p die Partikelrelaxationszeit und g die Gravitation. \mathbf{F}_B ist die Bassetkraft (s. u.).

Die Stokesche Widerstandskraft beschreibt die Kraft, die ein träges Partikel in einer konstanten Stokeschen Strömung (d. h. viskosen Strömungen) erfährt. Für transiente Stokesche Strömungen muss zusätzlich die Fluidbeschleunigungskraft berücksichtigt werden. Das ist die Beschleunigung, die ein Fluidpartikel erfahren würde, das den Platz des betrachteten Partikels einnimmt. Die Massenzuschlagskraft berücksichtigt, dass, wenn das Partikel beschleunigt wird, auch das umgebende Fluid eine Beschleunigung erfährt. Der Bassetterm drückt schließlich den Einfluss vorhergehender Beschleunigungen aus und kann in der Regel vernachlässigt werden.

Untersuchte Konfiguration

Es ist klar, dass die Ablagerungsrate und Reinigung durch Niederschlag von der Niederschlagsintensität (d. h. Niederschlagsmenge pro Zeit, gemessen in mm/h) abhängen. Bei starkem Regen ist zu erwarten, dass der Asphaltkörper teilweise gereinigt wird. Für die numerische Vorhersage der Verschmutzung ist es sinnvoll, sich auf starken, aber typischen Niederschlag zu konzentrieren.

Die Berechnung der Ablagerungen wurde bei der kritischen Niederschlagsintensität durchgeführt, d. h. der Intensität, bei der die maximale Drainageleistung erreicht wird und es noch nicht zur Überflutung kommt. Diese kritische Niederschlagsintensität wurde in Kapitel 4.4.2.4 bestimmt.

Numerische Berechnung der Ablagerungen

Für die Berechnung der Ablagerungen im Asphaltkörper wurde die oben spezifizierte Strömung bestimmt und die Maxey-Riley-Gleichung für 200.000 Partikel gelöst. An den Wänden werden die Partikel elastisch reflektiert. Der Asphaltkörper wird horizontal durchströmt.

Die Rechenzeiten für die Simulation der partikelbeladenen Strömung sind sehr hoch. Für diese Simulationen wurde auf Hochleistungsrechner des Leibniz-Rechenzentrums zurückgegriffen.

Im Zwischenbericht 1/2007 zeigte das Institut für Straßen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart eine Sieblinie der relevanten Schmutzmischungen. In der vorliegenden Untersuchung wurden, basierend auf diesen Ergebnissen, die Partikeldynamik für die Dichte $\rho_p = 1,8 \text{ kg/l}$ und Durchmesser d zwischen 0,06 mm und 6 mm analysiert. Nach der gegebenen Sieblinie stellen die Partikel mit dem kleinsten Durchmesser zwar einen geringen Massenanteil dar, allerdings können nur kleine Partikel durch Regen ausgespült werden, große Partikel sind nur mittels gezielter Reinigung zu entfernen. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse für die Fraktionen mit Dichte $\rho_p = 1,8 \text{ kg/l}$ und Durchmesser $d = 0,06 \text{ mm}$ sowie $d = 0,076 \text{ mm}$ gezeigt. Um die Partikel sichtbar zu machen, sind sie in allen Abbildungen mit dreifachem Durchmesser dargestellt.

Um einen Eindruck für die Anzahl der Partikel zu erhalten, sind in Bild 4.4-21 alle Partikel dieser beiden Fraktionen dargestellt. Die Hauptströmungsrichtung zeigt von links nach rechts, der Körper wird horizontal durchströmt. Der Asphaltkörper ist ausgeblendet. In Bild 4.4-20 ist ein dünner Schnitt durch den gleichen Probekörper mit einigen wenigen Partikeln zu sehen. Außerdem ist farblich ein zugehöriger Schnitt durch den Körper dargestellt. Blaue Farbe kennzeichnet Fluid, rote Farbe kennzeichnet soliden Körper. An einigen Stellen wirkt es, als ob Partikel den Körper durchdringen würden. Das ist allerdings nur durch die Darstellung bedingt: Der farblich gekennzeichnete Schnitt durch den

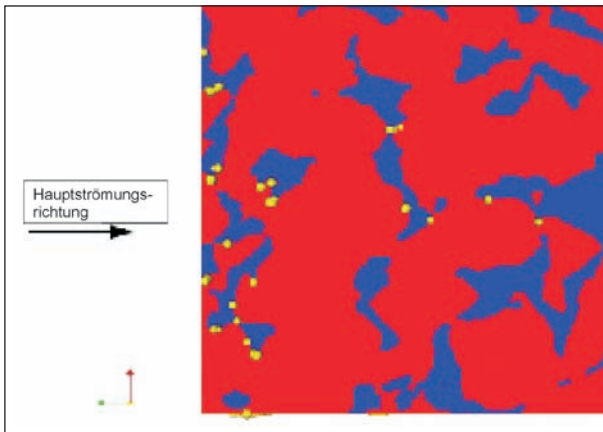


Bild 4.4-20: Schnitt durch den Körper. Partikel mit Dichte 1,8 kg/l und Durchmesser 0,06 mm bzw. 0,076 mm. Rot: solider Asphaltkörper, blau: Fluid. Partikel sind zur besseren Sichtbarkeit mit dreifachem Durchmesser dargestellt

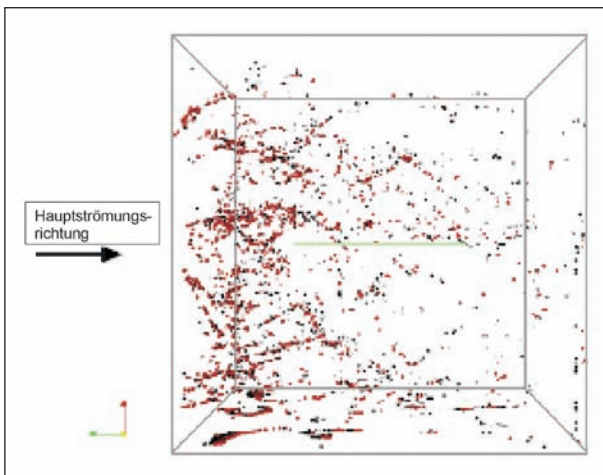


Bild 4.4-21: Partikel mit Dichte 1,8 kg/l im durchströmten Probekörper (Körper nicht dargestellt). Schwarz: Durchmesser 0,06 mm, rot: Durchmesser 0,076 mm. Hauptströmungsrichtung

Körper besitzt die Dicke 0, die Schicht, aus der die Partikel gewählt wurden, besitzt eine endliche Dicke. Deshalb befinden sich nicht alle Partikel exakt in der Ebene, die farblich gekennzeichnet ist. Aufgrund der Dreidimensionalität können im Fluid befindliche Partikel in der Abbildung auf rotem Grund erscheinen.

Wie zu erwarten war, ist im Bild zu erkennen, dass sich die Partikel bevorzugt in Senken und Ecken des durchströmten Gebiets ablagern.

Die dargestellten Ergebnisse sind vorläufig in dem Sinne, dass sich für die Partikel noch kein stationärer Zustand eingestellt hat. Viele von den dargestellten Partikeln sind noch in Bewegung und werden eventuell den Auslass erreichen. Erst sobald

alle Partikel in Ruhe sind oder den Auslass erreicht haben, kann angegeben werden, welcher Anteil der Partikel durch Regen ausgespült wird. Diese Simulationen konnten während der Projektlaufzeit leider nicht zu Ende geführt werden.

4.4.4 Reinigungsansätze

4.4.4.1 Beschreibung der Laborexperimente

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden neben den Verschmutzungsmechanismen aktuelle Reinigungsverfahren untersucht und ein Vorschlag für ein effizienteres Verfahren erarbeitet. Hierfür wurde ein Laborversuch geplant und aufgebaut, der es ermöglichte verschiedene Reinigungsverfahren auf Wirksamkeit zu untersuchen. Dazu wurden zum einen Absaugversuche als auch Düsenstrahlversuche durchgeführt.

Um verschiedene Reinigungsverfahren zu untersuchen, wurde der Unterbau der Laborversuche mit den Probepplatten 2,5 x 1,0 m baulich erweitert. Mit Hilfe eines in der Längsachse der Probepplatte fahrbaren Schlittens können verschiedenste Apparaturen befestigt und mit einer konstanten Geschwindigkeit über die Probepplatte bewegt werden (Bild 4.4-22).

An der Unterseite der Probepplatte wurden an unterschiedlichen Orten Druckanschlüsse angebracht. Über den Druckverlauf an der Unterseite der Platte kann auf die Durchströmung der Probepplatte während der Reinigung geschlossen werden. Die Druckanschlüsse konnten dabei gleichzeitig mit Hilfe einer automatisierten Datenaufnahme ausgewertet werden.

Um die nötigen Durchflüsse bei entsprechenden Drücken bzw. Unterdrücken zu erzeugen, wurde mit zwei Industriepartnern zusammengearbeitet. Die Firma Reinex Hochdrucktechnik GmbH stellte ein Reinigungsfahrzeug zur Verfügung.

In den derzeit angewendeten Reinigungsverfahren werden so genannte Hochdruckwasserstrahlen verwendet. Die Reinigung mit diesen Verfahren stellt die ursprüngliche Oberflächentextur wieder her. Akustische Messungen haben jedoch ergeben, dass sie die Schmutzpartikel nur oberflächennah entfernen und es mit ihnen nicht möglich ist, die Asphaltmatrix in tieferen Schichten zu reinigen.

Um die Tiefenwirkung von Hochdruckwasserstrahlen zu klären, wurden Versuche mit unterschiedlichen

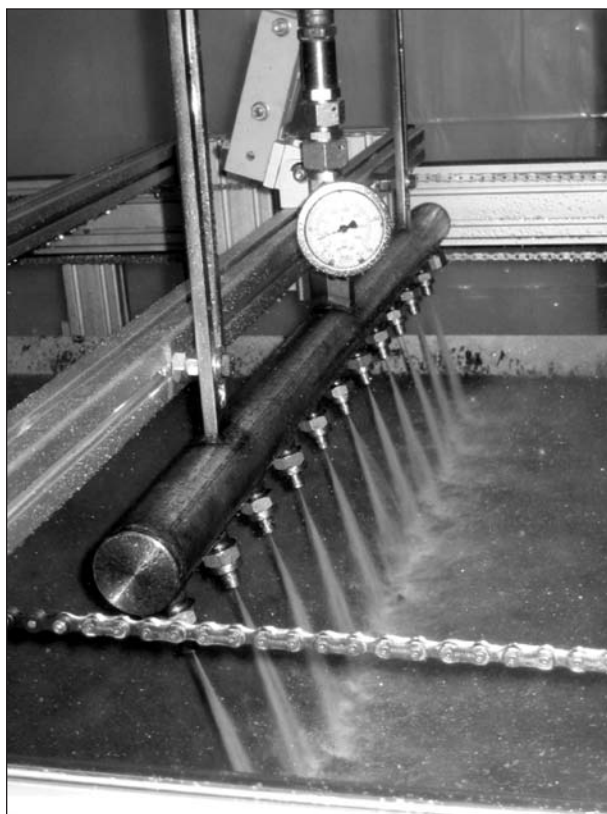


Bild 4.4-22: Reinigungsversuch mit Düsen

Düsen, unterschiedlichen Reinigungsdrücken und unterschiedlichen Anstellwinkeln der Düsen durchgeführt. Dazu wurden an den Schlitten des Versuchsaufbaus sowohl eine Düsenlanze befestigt, um die Wirkung einer einzelnen Düse zu ermitteln als auch ein Düsenbalken, um die Wirkung mehrerer nebeneinanderliegender Düsen zu ermitteln (Bild 4.4-22). Die Düsenträger wurden an das bereits erwähnte Reinigungsfahrzeug angeschlossen, um die Drücke und Volumenströme möglichst realitätsnah nachzubilden. Die Düsenlanze wurde in dem Betrieb über den Druckanschlüssen der Platte hin und her bewegt und der sich an der Unterseite der Asphaltplatte ergebende Druck aufgezeichnet. Im Einzelnen wurden folgende Düsen verwendet (vergleiche auch Bild 4.4-23):

- Nadeldüsen,
- Pendeldüsen,
- Rotationsdüsen,
- Fächerdüsen,
- Punktdüsen.

Exemplarische Ergebnisse der Versuche mit Einzeldüsen sind in Bild 4.4-24 dargestellt. Beim Ver-



Bild 4.4-23: Verwendete Düsen im Reinigungsversuch

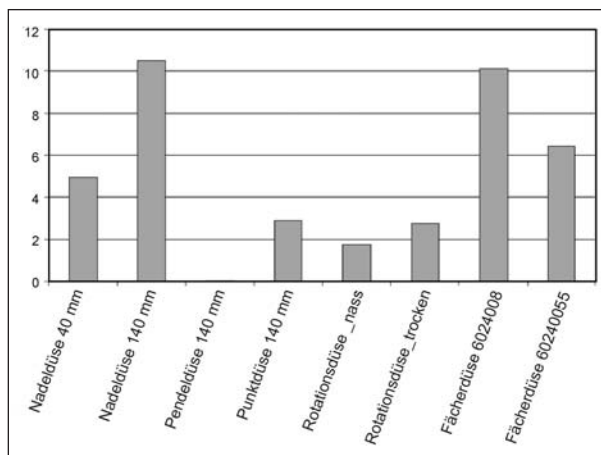


Bild 4.4-24: Druck an der Unterseite des Asphalts beim Reinigen mit unterschiedlichen Düsen

gleich der einzelnen Düsen kann man sehen, dass die Fächerdüsen den stärksten Druck an der Unterseite der Platte verursachen, d. h. die beste Tiefenwirkung haben. In den aktuellen Reinigungsverfahren werden häufig Rotationsdüsen verwendet, die aus rotierenden Nadeldüsen bestehen. In Oberflächennähe ergibt sich mit dieser Art Düsen ein gutes Reinigungsergebnis, da sich die Winkel, in denen die Strahlen auf die Oberfläche treffen, bei einer Bewegung des Reinigungsfahrzeugs ständig ändern. Wie in dem Bild zu sehen ist, hat diese Art der Düsen jedoch die schlechteste Tiefenwirkung.

Neben den Düsenarten wurde auch der Abstand der Düsen von der Oberfläche variiert. Ist der Abstand der Düsen größer, so ist aufgrund der Aufweitung des Strahls die beaufschlagte Fläche größer, was die Tiefenwirkung erhöht. Es fällt abschließend auf, dass die Nadeldüsen, d. h. ein einziger dünner Wasserstrahl, die gleiche Tiefenwirkung zu haben scheinen wie die Fächerdüsen. Dies ist jedoch nur richtig, sofern in der Achse des

Strahls gemessen wird. Liegt die Druckmessung jedoch ein wenig neben der Achse der Druckmessung, so fällt der gemessene Druck stark ab. Abschließend kann ausgesagt werden, dass die Fächerdüsen das beste Ergebnis lieferten.

Zum Schluss wurde der Düsendruck variiert, um zu klären, ab welchen Drücken die oberste Schicht der Asphaltmatrix zerstört wird. Es wurde beobachtet, dass bei Drücken ab 150 bar erste Körner aus der Asphaltmatrix herausgelöst werden. Um eine gewisse Sicherheit zu gewährleisten, sollte der Düsendruck 120 bar nicht überschreiten.

Nach der Klärung der besten Düsenart wurde in einem weitergehenden Versuch ein Düsenbalken erstellt, wie er in Bild 4.4-22 abgebildet ist, um ein für die Praxis verwendbares Reinigungsverfahren zu entwickeln. An einem Verteilerrohr sind im jeweiligen Abstand von 8 cm baugleiche Düsen angebracht. Für die Versuche wurde der Balken erneut an ein Reinigungsfahrzeug angeschlossen.

Im Rahmen der Versuche wurden zum einen der Anstellwinkel α , der Düsenwinkel β sowie der Düsendurchmesser variiert. Der Düsendruck wurde bei etwa 90-100 bar eingestellt. Insgesamt muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass von diesem Druck im Maximum nur etwa 25 mbar Druckerhöhung an der Unterseite der Platte ankamen, was nur etwa 25 cm Wasserdruck entspricht. Der Großteil des Drucks wird durch Reflektion an den Körnern des OPA abgebaut.

Als Erstes wurde die Auswirkung des Anstellwinkels α auf den gemessenen Druck untersucht. Der Anstellwinkel scheint keinen nennenswerten Einfluss auf die Tiefenwirkung zu haben, sofern er klein ist. Die Variation des Düsendurchmessers und des Düsenwinkels β erbrachte, dass die beaufschlagte Fläche des Strahls möglichst groß sein sollte, um die Tiefenwirkung zu maximieren. Demnach steigt der gemessene Druck sowohl bei Vergrößerung des Durchmessers als auch bei Vergrößerung des Düsenwinkels.

Absaugversuche

Die derzeit angewandten und bis jetzt untersuchten Reinigungsmethoden wurden von herkömmlichen Straßenreinigungsverfahren abgeleitet. Diese Untersuchungen haben ergeben, dass mit den Düsenpülverfahren zwar die Oberfläche augenscheinlich wieder hergestellt wird, das akustische

Absorptionsvermögen jedoch nur zu einem Teil wieder hergestellt wird. Das Düsenpülverfahren ist somit nicht geeignet, poröse Strukturen im Porenraum zu reinigen.

Um ein effizientes Reinigungsverfahren zu entwickeln, wurde ein Versuchsaufbau entwickelt, um die vorhandenen Versuchsplatten nach vorheriger Verschmutzung zu reinigen. Der Reinigungsaufbau wird auf einem Schlitten über den Versuchsplatten aufgesetzt, um die Platten in Längsrichtung bei einer Schrittgeschwindigkeit von 3,6 km/h zu reinigen (Bild 4.4-25).

In den ersten Reinigungsversuchen wurden lediglich die Absaugung und deren Ausgestaltung untersucht. Da es sich bei den Probestplatten um unverschmutzten OPA handelt, sollten Möglichkeiten erarbeitet werden, wie kleinere Schmutzpartikel mittels Absaugung aus der Asphaltmatrix entfernt werden können. Zu diesem Zweck wurden an einer Düse zwei Unterdrucksauger der Firma Kärcher GmbH angeschlossen und die induzierte Strömung sowohl bei wassergesättigtem Asphalt als auch bei ausschließlicher Absaugung von Luft untersucht.

Nach dem Einbringen von Wasser muss dieses nach dem Reinigen wieder entfernt werden. In Vorversuchen wurde untersucht, wie ein Absaugverfahren beschaffen sein muss, um das Wasser aus einer Tiefe von etwa 4-5 cm abzusaugen. Zu diesem Zweck wurden, wie in Bild 4.4-25 dargestellt, am Schlauch eines Nasssaugers verschiedene Aufsätze getestet. Die Versuche ergaben, dass ein Aufsatz von etwa 10 cm Breite nötig ist, um das Wasser aus der Platte zu entfernen. Bei einer ge-

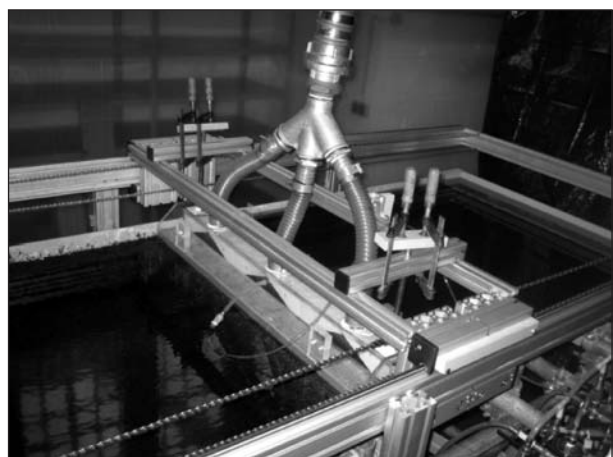


Bild 4.4-25: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Strömungsbedingungen bei großflächiger Durchströmung

ringeren Breite blieb auch nach langem Absaugen ein Wasserstand von bis zu 2,5 cm in der Platte zurück.

Ein Problem bei der Absaugung entsteht durch den Spalt zwischen der Berandung der Absaugdüse und der Asphaltoberseite. Um eine Bewegung des Schlittens zu ermöglichen, muss gewährleistet werden, dass der Schlitten nicht komplett an den Asphalt angesaugt wird. Dadurch wird eine Leckströmung in diesem Spalt zugelassen, die die Effizienz des Verfahrens reduziert.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass keines der anfänglich untersuchten Verfahren mit Unterdrucksaugern oder Hochdruckwasserstrahlen in der Lage war, eine nennenswerte Strömung in größeren Tiefen der Asphaltmatrix auszulösen, um Schmutzpartikel aus dem OPA heraus zu transportieren.

Überdruckversuche

Da die Unterdruckversuche zu unbefriedigenden Ergebnissen geführt haben, wurde in einem zweiten Schritt überlegt, die Strömungsrichtung umzukehren und statt mit Unterdrücken mit Überdrücken zu arbeiten (Bild 4.4-26).

Der Vorteil von Überdruck im Vergleich zu Unterdruck ist zum einen, dass die Druckdifferenz nicht auf 0,5 bar beschränkt ist. Zum anderen werden das Ansaugen der Düse und damit eine immense Steigerung des Fahrwiderstandes ausgeschlossen.

Ein weiterer Vorteil der Verwendung von Überdrücken ist, dass bei der Verwendung von entsprechenden Luftverdichtern wesentlich höhere Volumenströme realisiert werden können. Das sich ent-

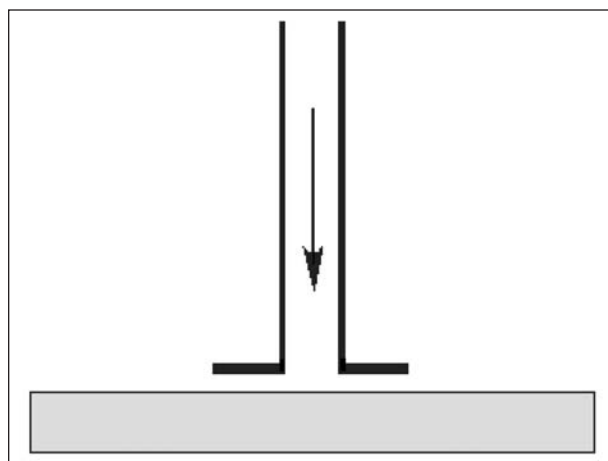


Bild 4.4-26: Prinzipskizze der Überdruckversuche

wickelnde Reinigungsverfahren ist nun in zwei Phasen unterteilt. Durch den Überdruck wird in der OPA Matrix eine Luftströmung induziert. Mit dem Verlassen der eingepressten Luft werden Schmutzpartikel aus der Asphaltmatrix ausgetragen, die in einem zweiten Schritt mit einer konventionellen Kehrmaschine von der OPA-Oberfläche entfernt werden können.

4.4.4.2 Numerische Untersuchungen

Bei den Überdruckversuchen wird die Düse wie in den Absaugversuchen lotrecht auf die OPA-Oberfläche aufgesetzt. Um eine Parallelströmung im OPA zu erzeugen und damit eine Kurzschlussströmung an der Oberfläche zu vermeiden, muss seitlich an die Düse eine Abdeckplatte der Länge L angebracht werden (Bild 4.4-26). Um die sich dabei ergebende Strömung zu untersuchen, wurden Simulationen mit dem Strömungslöser Ansys CFX durchgeführt. Ein beispielhaftes Ergebnis wird in Bild 4.4-27 gezeigt. Hier sieht man deutlich, dass die Abdeckplatte eine Führung der Strömung in der Asphaltplatte bewirkt. Das hat zur Folge, dass unterhalb der Abdeckplatte senkrechte Potenziallinien entstehen. Diese führen dazu, dass sich die Strömung über die gesamte Dicke der Asphaltplatte einstellt und damit auch im unteren Bereich des OPA ankommt. Dafür ist es prinzipiell unerheblich, ob die Platte mit Wasser oder Luft durchspült wird.

In einer numerischen Parameterstudie wurde der sich einstellende Volumenstrom in Abhängigkeit der Plattenlänge L untersucht. Der sich ergebende Volumenstrom (Bild 4.4-28) sinkt mit der Länge der Abdeckplatte, da der Druckgradient $\Delta p/L$ abnimmt. Bei der Analyse der Geschwindigkeitsprofile im

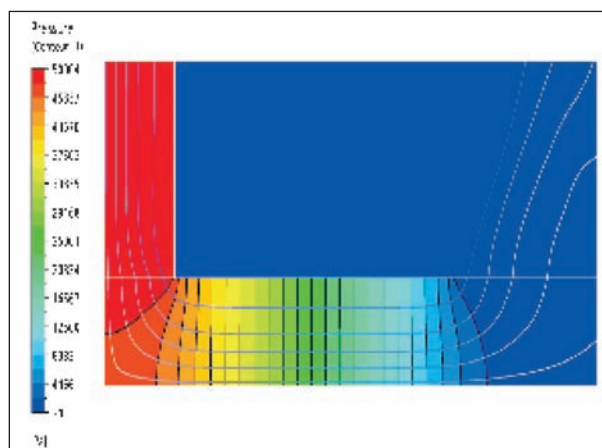


Bild 4.4-27: Druckfeld und Stromlinien bei Durchströmung der Asphaltmatrix nach Bild 4.4-26

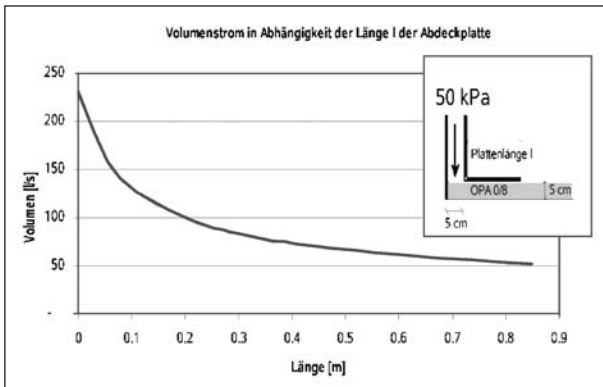


Bild 4.4-28: Volumenstrom in Abhängigkeit der Länge der Abdeckplatte

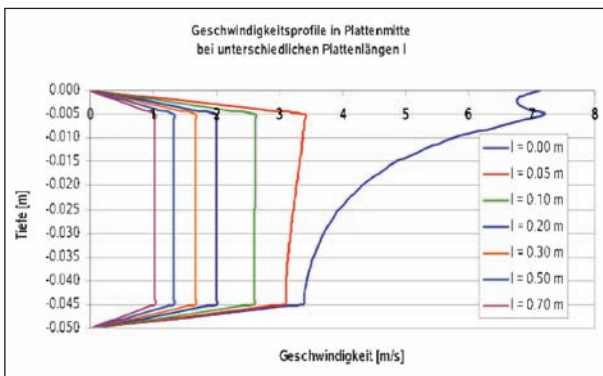


Bild 4.4-29: Geschwindigkeitsprofile unter dem Zentrum der Abdeckplatte bei unterschiedlichen Längen

OPA in der jeweiligen Mitte der Abdeckplatten (Bild 4.4-29) stellt man fest, dass zum einen mit zunehmendem L die Geschwindigkeiten im OPA kleiner werden. Weiterhin kann man in der Abbildung erkennen, dass es ab einer Plattenlänge L von etwa 10 cm zu einer gleichförmigen Parallelströmung kommt. Auf diese Weise wird eine Kurzschlussströmung an der Oberfläche des OPA vermieden und höhere Geschwindigkeiten auch in größeren Tiefen des OPA induziert.

4.4.5 Zusammenfassung

In dem hier dokumentierten Projekt wurden die Durchströmung von offenporigen Asphaltdeckschichten und mögliche Reinigungsverfahren analysiert. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien betrachtet. Es kamen sowohl experimentelle als auch numerische und theoretische Methoden zum Einsatz. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen werden hier noch einmal kurz zusammengefasst.

Offenporiger Asphalt kann auf der Makroskala als poröses Medium beschrieben werden. Um die Durchlässigkeit zu bestimmen, wurden mehrere

Zugänge gewählt. In Experimenten nach DARCY wurde festgestellt, dass ab einer Filtergeschwindigkeit von etwa 2 mm das nichtlineare Widerstandsverhalten sichtbar wird. In einem großräumigen Durchströmversuch an einer Asphaltplatte wurde für ein für Autobahnen übliches Gefälle eine Filtergeschwindigkeit von ca. 2,3 mm ermittelt. Die Versuche deuten auf eine anisotrope Durchlässigkeit hin, d. h., in horizontaler Richtung ist die Durchlässigkeit fast doppelt so groß wie in vertikaler Richtung. Dieselbe Beobachtung konnte durch numerische Simulation an einem Probekörper bestätigt werden. Dabei muss man allerdings die große Streuung der Porositäten zwischen den unterschiedlichen Proben berücksichtigen. Die Durchlässigkeitsbeiwerte nach DARCY betragen für OPA 0/8 etwa 50 mm/s in vertikaler und 90 mm/s in horizontaler Richtung mit großer Streuung.

Mit den angegebenen Porositäten kann man Aussagen über die Drainagewirkung von OPA treffen. Durch Lösung der partiellen Differentialgleichung, die die Strömung in einer teilgesättigten Asphalt-schicht beschreibt, konnte für eine Dicke von 10 mm und eine Länge der Deckschicht von 15 m, einem Gefälle von 2,5 % und einem Durchlässigkeitsbeiwert von 50 mm/s ein maximaler Dauerniederschlag von 22,6 mm/s ermittelt werden, der gerade noch durch die Asphalt-schicht abgeführt werden kann. Dabei stellt sich eine maximale horizontale Filtergeschwindigkeit von 0,64 mm/s ein.

Der rollende Verkehr verringert die Verschmutzung der Asphalt-schicht. Dieser Effekt konnte durch numerische Simulationen erklärt werden. Diese zeigen, dass beim Überrollen durch einen Reifen vor dem Reifen eine Zone mit Überdruck und hinter dem Reifen eine mit Unterdruck entstehen. Damit entstehen in der Asphalt-schicht starke Druckschwankungen von bis zu 600 Pa. Der Unterdruck hinter dem Reifen saugt Luft (oder Wasser bei Regen) aus der Asphalt-schicht ab. Dieser Vorgang läuft zwar in einer extrem kurzen Zeitspanne ab, durch Abschätzen der Zeitkonstanten für Schmutzpartikel kann jedoch gezeigt werden, dass diese Zeitspanne ausreicht, die meisten Partikel zu bewegen, falls sie nicht an der Porenwandung anhaften.

Durch numerische Simulationen der Durchströmung der Asphalt-schicht auf der Porenskala konnten folgende Ergebnisse erarbeitet werden. Die Porenstruktur ist inhomogen, d. h., die Durchlässigkeiten sind in horizontaler größer als in vertikaler Rich-

tung. An der Oberfläche des Asphalts ergibt sich eine höhere Verdichtung als in der Tiefe. Die Porengeschwindigkeiten weisen enorme Schwankungsbreiten und Richtungsunterschiede auf. Im Vergleich zu einer unverschmutzten Probe sanken die Filtergeschwindigkeiten bei gleichem Druckgradienten auf unter die Hälfte ab. Es bilden sich viele 'Kavernen' in denen die Geschwindigkeiten verschwindend klein sind. Der Anteil dieser Kavernen am gesamten Porenraum nimmt mit zunehmender Verschmutzung zu. Erste Ansätze zur Simulation des Partikeltransports im Porenraum zeigen, dass sich die Partikel genau in diesen Kavernen sammeln.

Die Versuche zur Reinigung der Asphaltdeckschicht mit Hochdruckwasserstrahlen verliefen wenig erfolgreich. Es konnten keine nennenswerten Strömungen an der Unterseite der Probeplatte induziert werden. Damit ist klar, dass mit Düsenstrahlverfahren keine Reinigung mit Tiefenwirkung erzielt werden kann. Der Ansatz, die Asphalttschicht durch Absaugen zu reinigen, erscheint nicht zielführend. Zum einen ist beim Absaugen die erzielbare Druckdifferenz durch den Atmosphärendruck begrenzt, was die maximale Durchströmgeschwindigkeit nach oben begrenzt. Zum anderen benötigt man, um Leckströmungen zu vermeiden, eine Abdichtung, die jedoch eine Bewegung des Reinigungsaufsatzes über der Asphalttschicht verhindern würde. Die Versuche mit Absaugen haben gezeigt, dass die Wirkung in jedem Falle begrenzt bleibt.

Als einzig erfolgversprechende Strategie wurde die Reinigung mit großräumiger Durchspülung (bzw. Durchlüftung) der Asphalttschicht identifiziert. Dabei wird ein Reinigungsaufsatz aufgebracht, der zu den Seiten hin großflächig abgedeckt sein muss. Durch diese Abdeckung wird die Strömung in der Asphaltdeckschicht so geleitet, dass sie in die Tiefe wirkt. Die Wirksamkeit dieses Konzeptes konnte im Rahmen der hier durchgeführten Laborversuche jedoch nicht quantifiziert werden, da keine realitätsnah verschmutzten Asphaltproben zur Verfügung standen. Nach Ansicht des Autors wären jedoch der Bau eines Prototyps und dessen Einsatz im Feldversuch viel versprechend.

Literatur

- ARMENIO, V., FIOROTTO, V.: The importance of the forces acting on particles in turbulent flows. *Physics of Fluids*, 13 (8):2437-2440, 2001
- BEAR, J.: *Dynamics of flow in porous media* (2. Aufl.); American Elsevier, New York 1978
- CLIFT, R., GRACE, J. R., WEBER, M. E.: *BUBBLES, Drops and Particles*, Academic Press, New York, 1978
- DARCY, H.: *Les fontaine publique de la ville de Dijon expositon et application des principes a suivre et des formules a employer dans les questions de distribution d'eau*. Dalmon, Paris 1856
- DIEM, M.: Zur Struktur der Niederschläge. I. *Theoretical and Applied Climatology*, 15 (1-2):39-51, 1967
- KUBIK, A., KLEISER, L.: Forces acting on particles in seperated wall-bounded shear flow. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 4:512-513, 2004
- MAXEY, M. R. and RILEY, J. J.: Equation of motion for a small rigid sphere in a nonuniform flow. *Physics of Fluids*, 26 (4):883-889, 1983
- PELLER, N., Le DUC, A., TREMBLAY, F., MANHART, M.: High-order stable interpolations for immersed boundary methods; *Int. J. Num. Methods in Fluids*, 52, pp. 1175-1193, 2006
- SAFFMAN, P.G.: On the stability of laminar flow of a dusty gas. *Journal of Fluid Mechanics*, 13:120-128, 1962
- WANG, Q., SQUIRES, K. D., CHEN, M., Mc LAUGHLIN, J. B.: On the role of the lift force in turbulence simulations of particle deposition. *International Journal of Multiphase Flow*, 23 (4):749-763, 1997

4.5 Teilprojekt „Verbesserung des Schallabsorptionsvermögens von offenporigen Fahrbahnbelägen“

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer
Dipl.-Ing. Manuel Männel
Müller BBM GmbH

4.5.1 Zielsetzung

Dem Stand der Technik entsprechende offenporige Asphaltdeckschichten weisen in ihrem Absorptionsfrequenzgang ausgeprägte Maxima und Minima auf und wirken somit frequenzselektiv. Das zu dämpfende von Kraftfahrzeugen erzeugte Rollgeräusch hingegen ist breitbandig. Die spektrale Zusammensetzung ist von der Art der Kraftfahrzeuge (Pkw oder Lkw) sowie von deren Geschwindigkeit abhängig. Demnach würde eine breitbandige absorbierende Wirkung Offenporiger Asphalte helfen, den Rollgeräuschpegel noch weiter zu senken. Der Vergleich der schallabsorbierenden Wirkung herkömmlicher Offenporiger Asphalte und des Rollgeräuschspektrums ist in Bild 4.5-1 dargestellt.

Reaktive Absorber beziehen, im Gegensatz zu passiven Absorbern ihre schallabsorbierende Wirkung aus der Wechselwirkung des anliegenden Schallfeldes mit dem Absorber selbst. Reaktive Absorber wirken grundsätzlich frequenzselektiv. Daher wurden Ansätze untersucht, die Minima im Absorptionsfrequenzgang offenporiger Deckschichten durch Ergänzung dieses passiven Absorbers mit reaktiven Absorbern anzuheben.

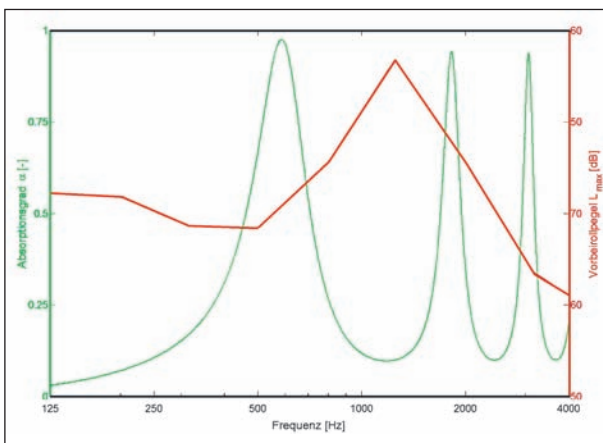


Bild 4.5-1: Schmalbandiges Absorptionsspektrum des Offenporigen Asphalts und breitbandiges Reifen-Fahrbahngeräusch

Im BRITE-EURAM-Projekt SIRUUS (Silent Roads for Urban and Extra-Urban Use, abgeschlossen) und im Wettbewerb „Wegen naar de toekomst – Modulair wegdek“¹ in den Niederlanden (abgeschlossen) wurden bereits Ansätze zur Realisierung von reaktiven Absorbern in Form von in den Fahrbahnbelag eingebauten Helmholtzresonatoren verfolgt. Helmholtzresonatoren stellen ein schwingungsfähiges Masse-Feder-System dar, wobei die Masse durch die in einer Engstelle („Flaschenhals“) bewegte Luft und die Feder durch ein an die Engstelle angekoppeltes geschlossenes Luftvolumen („Flaschenbauch“) gebildet werden. Eine Schwäche dieser Ansätze bestand bislang in der Ausbildung des angekoppelten Luftvolumens als durchgehende Querschlitze und der Gefahr eines Verschlusses des Luftvolumens durch Verschmutzung aufgrund der hinterschnittenen Hohlraumstruktur. Die sich über den gesamten Querschnitt erstreckenden Absorberstrukturen wurden zur Abführung von Wasser, das in die Deckschicht eindringt, genutzt, haben aber dazu geführt, dass die im Labor an kleinen, in allseitig abgeschlossenen Kammern geprüften Probekörpern nachgewiesenen hohen Schallabsorptionsgrade am praktisch ausgeführten Fahrbahnbelag nicht mehr gefunden werden konnten. Im vorliegenden Teilprojekt sollen diese Nachteile behoben werden.

4.5.2 Rechnerische Auslegung

Im Folgenden ist die rechnerische Auslegung von Helmholtzresonatoren dargestellt.

4.5.2.1 Rechnerische Ermittlung der Resonanzfrequenz

Aufgrund der geringen Öffnungsgröße kann der Einfluss der Mündungskorrektur der Helmholtzresonatoren nicht vernachlässigt werden.

Dieser ergibt sich für z. B. runde Öffnungen in Kugeln zu:

$$\frac{\Delta l}{a} = \frac{1 + \cos \vartheta}{2(1 + (k_0 a)^2)}$$

¹ HOFMAN, R. and van der KOOIJ, J.: „Results from the Dutch Noise Innovation Program Road traffic (IPG) and Roads to the Future Program (WnT)“, proc. inter noise 2003, Korea, paper no. N1003

mit:

a = Innenradius der Kugel

k_0 = Wellenzahl

$a \sin$ = Öffnungsradius

und ist demnach frequenzabhängig.

Bei gegebenen Hohlkörpereigenschaften erster Versuchskörper (Innenvolumen: $12,37 \text{ cm}^3$, Wandstärke: $2,5 \text{ mm}$) ergibt sich die Resonanzfrequenz in Abhängigkeit vom Öffnungsradius mit und ohne Mündungskorrektur zu den in Bild 4.5-2 grafisch dargestellten Werten.

Die Ergebnisse konnten durch Messungen validiert werden. Hierzu wurden Messungen im Impedanz-

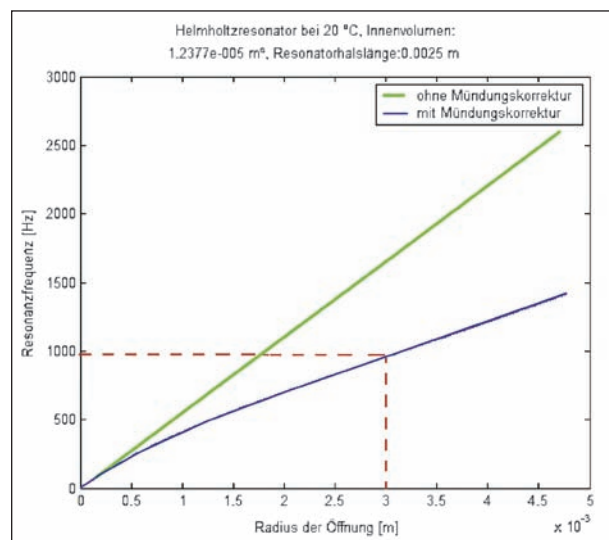


Bild 4.5-2: Ergebnisse der Berechnung der Resonanzfrequenz

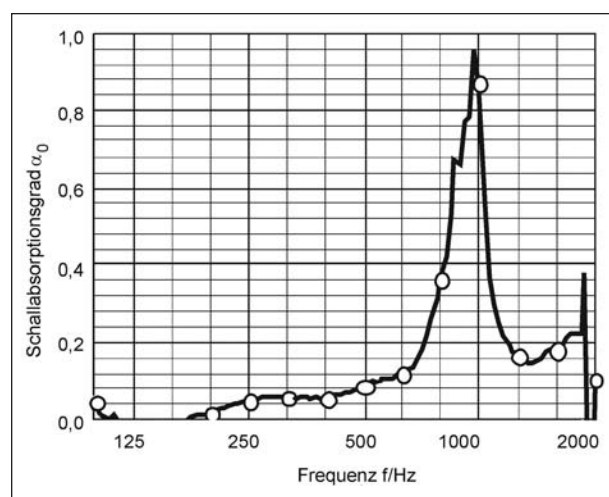


Bild 4.5-3: Ergebnis der Impedanzrohrmessung von 10 Helmholtzresonatoren, geschichtet, Öffnungsrichtung zufällig

rohr nach DIN EN ISO 10534-2 durchgeführt. Die Grundfläche des verwendeten Impedanzrohres hat eine Fläche von $78,5 \text{ cm}^2$.

Es wurden 10 neben- und aufeinander geschichtete Hohlkörper mit einem Innenvolumen von je $12,37 \text{ cm}^3$, einer Wandstärke von $2,5 \text{ mm}$ und einem Öffnungsradius von 3 mm im Impedanzrohr untersucht. Das Ergebnis der Messung kann Bild 4.5-3 entnommen werden.

Die Resonanzfrequenz wurde messtechnisch zu 985 Hz bestimmt (rechnerisch: 958 Hz). Somit liegt der Fehler im akzeptablen Bereich zwischen 2% und 3% .

Anschließend wurde untersucht, welchen akustischen Einfluss das Einbringen der verwendeten Hohlkörper auf die Wirkungsweise von offenporigen Asphalten am Beispiel offenporiger Schüttungen aus Diabasgestein $5/8$ hat. Es kann festgehalten werden, dass sich bei einer Mischung von 10 der oben beschriebenen, aber geschlossenen Hohlkörper (also ohne Bohrung) und Diabasgestein im Mischungsverhältnis von ca. $3:1$ und einer Füllhöhe von 10 cm kein Einfluss auf den Frequenzverlauf des Absorptionsgrades ergibt (Bild 4.5-4).

Weiterhin wurden Messungen aus lockeren Mischungen von Diabas- $5/8$ -Gestein mit Hohlkörpern (ebenfalls bei einem Mischungsverhältnis von ca. $3:1$ und einer Füllhöhe von 10 cm) mit und ohne Öffnung miteinander verglichen, um die Auswirkungen der Integration der Helmholtzresonatoren in die offenporige Schicht zu untersuchen. In Bild 4.5-4 sind die Ergebnisse der Impedanzrohrmessungen mit und ohne Öffnung der Hohlkörper dargestellt.

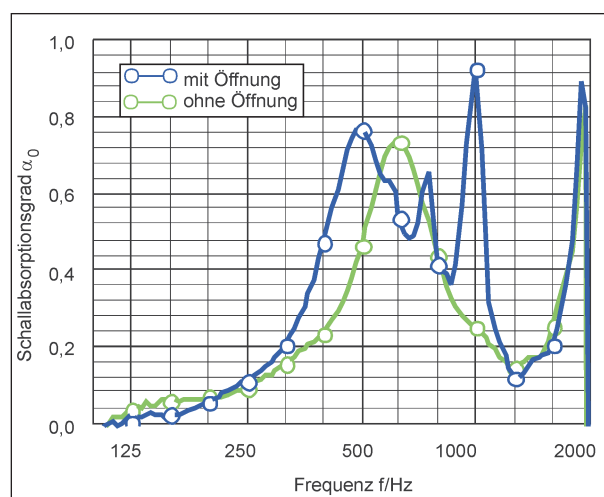


Bild 4.5-4: Vergleich der Ergebnisse der Impedanzrohrmessungen von Gemischen aus Diabasgestein mit Metallhohlkugeln mit und ohne Öffnung

Die Maxima des $\lambda/4$ -Resonators, bestehend aus der offenporigen Gesteinsschüttung, unterscheiden sich in ihrer Lage und Höhe leicht, was lediglich auf eine unterschiedliche Befüllung (und damit veränderten Strukturfaktor des Gemisches) des Probenhalters im Impedanzrohr zurückzuführen ist. Das Maximum der Helmholtzresonatoren liegt auch hier im eingebauten Zustand bei ca. 1.010 Hz. Damit hat sich dessen Lage im Vergleich zur Messung ohne Gesteinsschüttung leicht verschoben. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Gesteinsschüttung direkt vor der Öffnung liegt und somit das bewegte Luftvolumen vor der Öffnung verringert. Dadurch wird die anzusetzende Mündungskorrektur geringer als in der Berechnung angenommen.

4.5.2.2 Räumliche Anordnung und räumliche Dichte

Die notwendige räumliche Dichte der Helmholtzresonatoren hängt je nach gewünschter flächenhafter Verbesserung der absorbierenden Wirkung des Gesamtaufbaus zuerst von deren äquivalenter Schallabsorptionsfläche ab. Soll ein breiter Frequenzbereich abgedeckt werden – wozu Resonatoren bei verschiedenen Resonanzfrequenzen verwendet werden –, muss auch deren wirksame Frequenzbandbreite in die Überlegungen zur räumlichen Dichte einbezogen werden. Die äquivalente Schallabsorptionsfläche eines Helmholtzresonators hängt vom Verhältnis des inneren Verlustwiderstands R_i zum Realteil der Strahlungsimpedanz R_a ab. Wird die Resonanzfrequenz f_0 ausreichend genau bestimmt und der innere Verlustwiderstand R_i des Resonators berechnet, so ergibt sich die äquivalente Schallabsorptionsfläche A_0 für frei aufgehängte Resonatoren bei der Resonanzwellenlänge λ_0 zu:

$$A_0 = \frac{\lambda_0^2}{\pi} \frac{R_i/R_a}{(1 + R_i/R_a)^2} \text{ [m}^2\text{]}$$

Bei Einbau in eine schallharte Wand bzw. um $\Delta d \ll \lambda_0/4$ vor einer schallharten Wand, ergibt sich aufgrund der Schalldruckverdoppelung eine Verdoppelung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche. So kann die resultierende äquivalente Schallabsorptionsfläche für beliebige Paare von Mündungsdurchmessern und Halslängen der Resonatoren bei konstanter Resonanzfrequenz wie in Bild 4.5-5 dargestellt werden. Um die Resonanzfrequenz f_0 konstant zu halten ist das eingeschlossene Luftvo-

lumen des Resonators dabei auf die Abmessungen des Resonatorhalses entsprechend abgestimmt.

Für die Planung der Resonatordichte muss neben der äquivalenten Schallabsorptionsfläche eines einzelnen Resonators dessen wirksame Bandbreite bestimmt werden. Dabei zeigt sich, wie in Bild 4.5-6 dargestellt, dass die resultierende Bandbreite in Abhängigkeit von der Doppelverstimmung

$$\phi = (f/f_0) - (f_0/f) \text{ [-]}$$

für ungedämpfte Resonatoren sehr klein ausfällt, also deren Resonanzgüte sehr hoch ist. Demnach wäre für eine breitbandig absorbierende Wirkung eine Vielzahl gegeneinander verstimmter Resona-

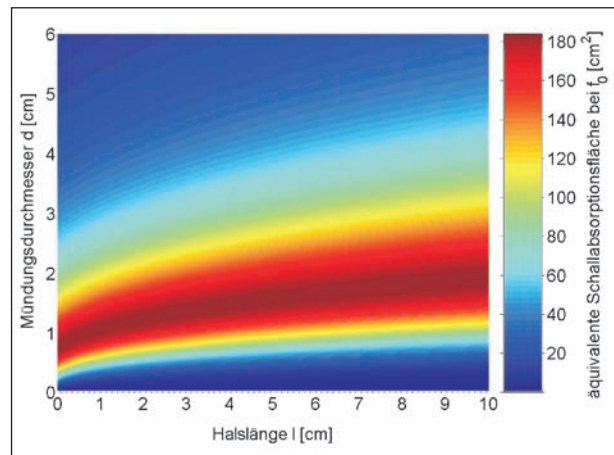


Bild 4.5-5: Abhängigkeit der äquivalenten Schallabsorptionsfläche ungedämpfter Helmholtzresonatoren ($f_0 = 1$ kHz) von deren Halslänge l und Mündungsdurchmesser d

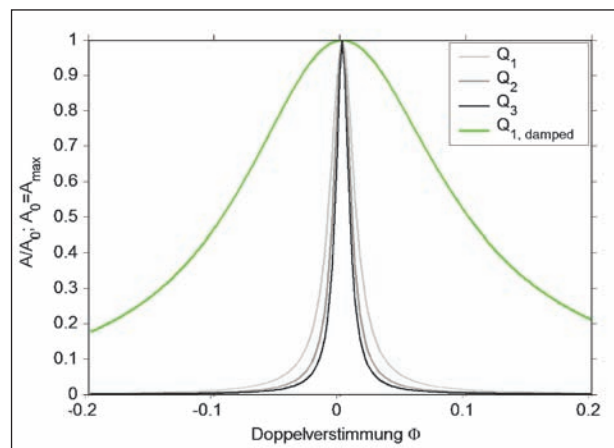


Bild 4.5-6: Zu A_0 relative maximale äquivalente Absorptionsfläche in Abhängigkeit von der Doppelverstimmung Φ bei einer Resonanzfrequenz $f_0 = 1$ kHz für ungedämpfte Resonatoren bei verschiedenen Öffnungslängen (Q_1 ($l = 1$ cm), Q_2 ($l = 5$ cm), Q_3 ($l = 9$ cm)) und einem Resonator ($Q_{1,damped}$ ($l = 1$ cm)) mit einer ausfüllenden Volumenbedämpfung ($\Xi = 100$ Pa s/m²)

toren pro Flächeneinheit notwendig, wohingegen mit einer das Resonatorvolumen schwach ausfüllenden Bedämpfung mit einem Strömungswiderstand von $\Xi = 100 \text{ Pa s/m}^2$ die Resonanzgüte bereits deutlich verringert und damit die Bandbreite deutlich vergrößert werden kann. Somit kann bereits mit einem Resonatortyp eine bedeutend größere Bandbreite abgedeckt werden (Bild 4.5-6). Allerdings sind die veränderten geometrischen Verhältnisse zu beachten, da sich mit der zusätzlichen Bedämpfung der innere Verlustwiderstand R_i erhöht. In Bild 4.5-7 ist die äquivalente Absorptionsfläche in Abhängigkeit von den geänderten Parametern dargestellt. Es zeigt sich, dass die Zunahme des Mündungsdurchmessers d mit einer Zunahme der Halslänge l im Maximum der äquivalenten Schallabsorptionsfläche A_0 im bedämpften Zustand weniger stark ausgeprägt ist, da der innere Verlustwiderstand nun maßgeblich durch die Bedämpfung

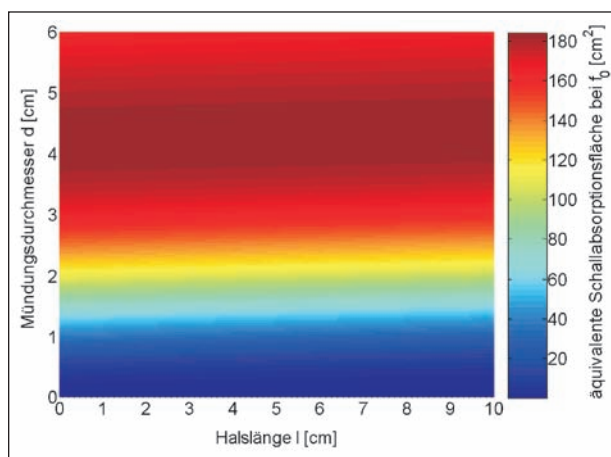


Bild 4.5-7: Abhängigkeit der äquivalenten Schallabsorptionsfläche bedämpfter Helmholtzresonatoren ($\Xi = 100 \text{ Pa s/m}^2$; $f_0 = 1 \text{ kHz}$) von deren Halslänge l und Mündungsdurchmesser d

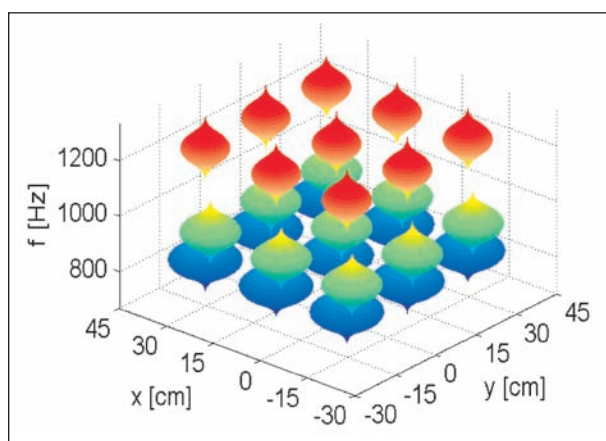


Bild 4.5-8: Anordnung von 3 verschiedenen Helmholtzresonatoren (bezüglich der Resonanzfrequenz durch die farbliche Kennzeichnung zu unterscheiden)

des Innenvolumens bestimmt wird, die von der Öffnungsgeometrie unabhängig ist.

Durch Umrechnung der Relativgröße Doppelverstimmung Φ in Frequenzen und der relativen äquivalenten Absorptionsfläche in absolute Werte kann ein Rotationskörper mit der Frequenzachse als Rotationsachse über einer Fläche mit den Dimensionen Länge x und Breite y gebildet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Doppelverstimmung nicht proportional zur Frequenz ist und somit der entstehende Körper keine planparallele Symmetrieebene zur x - y -Ebene besitzt. Somit kann eine Verteilung der Resonatoren in der Fläche bezogen auf deren äquivalente Schallabsorptionsfläche bei und neben ihrer Resonanzfrequenz für eine oder mehrere Arten von Resonatoren dargestellt werden. Die Querschnittsfläche der Raumkörper über der Frequenz f entspricht der äquivalenten Absorptionsfläche des Resonators bei der Frequenz f . In Bild 4.5-8 ist die Verteilung von je neun Helmholtzresonatoren bei drei verschiedenen Resonanzfrequenzen f_0 (800 Hz, 1.000 Hz und 1.200 Hz) in Anlehnung an die tetragonal-raumzentrierte Einheitszelle eines Bravais-Gitters dargestellt. In dem dargestellten Fall überdecken sich die einzelnen äquivalenten Schallabsorptionsflächen nicht, wodurch sich die Resonatoren nicht gegenseitig beeinflussen können, der Raum ist allerdings auch nicht vollständig ausgefüllt – es wird sich also ein mittlerer Absorptionsgrad kleiner 1 einstellen. Je höher die Resonanzfrequenz der Resonatoren liegt, desto geringer ist deren maximale äquivalente Schallabsorptionsfläche.

4.5.3 Laboruntersuchungen und bautechnische Optimierung

Es wurden erste akustisch funktionsfähige Prototypen von Helmholtzresonatoren für den Einsatz im Straßenbau hergestellt, bei denen bereits auf möglichst geringe Bauhöhe geachtet wurde. In Bild 4.5-9 ist eine dreidimensionale Skizze der Elemente dargestellt.

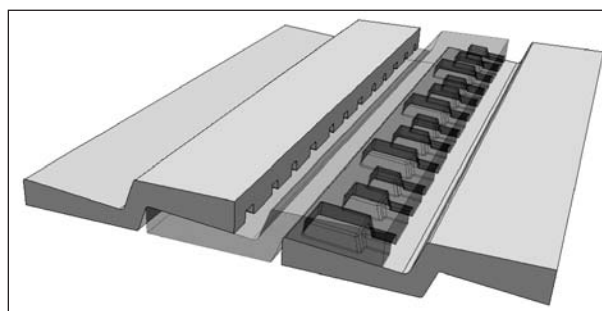


Bild 4.5-9: Dreidimensionale Darstellung erster Prototypen

Hier sind drei leistenförmige Resonatorelemente dargestellt, die sich gegenseitig überlappen. Durch die Überlappung von je zwei Resonatorelementen bilden sich horizontal angeordnete Helmholtzresonatoren (in dem transparent dargestellten mittleren Element erkennbar). Die akustische Auslegung der Resonatoren sieht in diesem Fall vor, die Resonatoren mit insgesamt 7 cm Offenporigem Asphalt in zwei Schichten zu überbauen. Um die Richtigkeit der akustischen Auslegung zu überprüfen und die gegenseitige Beeinflussung der Resonatoren und des Offenporigen Asphalts bezüglich der akustischen Wirkung zu untersuchen, wurden die Resonatorelemente in einer Hallkabinen eingebaut und mit 7 cm überbaut. Die Überbauung der Resonatoren fand mit losem Diabas-Gestein der Korngrößenverteilung 0/11 (untere Schicht) bzw. 0/8 (obere Schicht) statt.

In Bild 4.5-10 ist das Ergebnis der akustischen Messung dargestellt.

Dem Messergebnis kann entnommen werden, dass sich die Helmholtzresonatoren und der Offenporige Asphalt in der gewünschten Weise ergänzen – der ermittelte Schallabsorptionsgrad ist breitbandig und weist Werte größer als 0,8 in einem Frequenzbereich über zwei Oktaven von 800 Hz bis 3,15 kHz Terzmittenfrequenz auf.

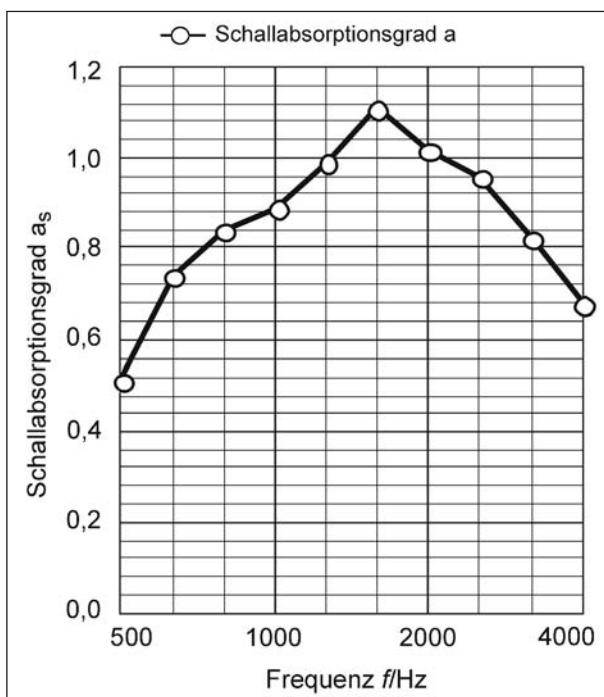


Bild 4.5-10: Messergebnis zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades in der Hallkabinen. Helmholtzresonatoren überbaut mit Diabas-Gestein

Neben der weiteren akustischen Untersuchung der Wirkungsweise der Kombination von Offenporigem Asphalt mit Helmholtzresonatoren fand eine intensive Weiterentwicklung des Konzepts bezüglich der bautechnischen Umsetzbarkeit und Belastbarkeit statt. In diesem Zusammenhang wurden unter anderem Gespräche mit der Bundesanstalt für Straßenwesen, der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Bau von Landverkehrswegen, und der TPA – Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation geführt.

Die Ergebnisse dieser Gespräche sind nachfolgend aufgeführt:

1. Vereinzelt Resonatorkörper sind aus bautechnischer Sicht den vollflächig zu verlegenden leistenförmigen Resonatoren vorzuziehen, da mit einzelnen Resonatorelementen die Offenporige Asphaltdeckschicht bis zur Binderschicht durchgreifen kann und so der notwendige Schichtenverbund gewährleistet werden kann.
2. Die Schichtdicke von Offenporigem Asphalt ist bautechnisch begrenzt und muss folgende Bedingung erfüllen:

$$2,5 \cdot \text{Größtkorn} < \text{Schichtdicke} < 5,5 \cdot \text{Größtkorn}$$
3. Die vereinzelt Resonatorelemente sollen aus bautechnischer Sicht mit Abständen zwischen 4 cm und 8 cm zueinander eingebaut werden. Daraus ergibt sich die bautechnisch mögliche Flächendichte. Diese liegt im Bereich der akustisch notwendigen und geplanten Flächendichte. Die Flächendichte ergibt sich anhand der beschriebenen Zusammenhänge zwischen äquivalenter Schallabsorptionsfläche, räumlicher Anordnung und räumlicher Dichte der Einzelresonatoren unter Zugrundelegung von unbedämpften Resonatorhohlräumen.
4. Die Zwischenräume zwischen den Resonatoren werden mit Offenporigem Asphalt aufgefüllt.
5. Geplant ist ein Schichtaufbau wie in Bild 4.5-11 dargestellt.

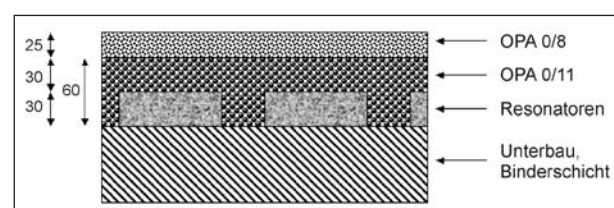


Bild 4.5-11: Schichtenaufbau. Alle Angaben in mm

6. Für den Einbau der unteren Schicht sind zwei Konzepte denkbar:

- a. Einbau der kompletten Schichtdicke in einem Arbeitsgang. Hierbei wird die inhomogene – mit Resonatoren durchsetzte Schicht – im Gesamtaufbau verdichtet. Dies führt zu unterschiedlichen Verdichtungsgraden in den Teilflächen mit Resonator im Vergleich zu den Teilflächen ohne Resonator. Dies führt potenziell zu ortsabhängigen Schwachstellen.
- b. Die untere OPA-Schicht wird in zwei Schritten eingebaut. Dazu werden auf die eingebauten Resonatorelemente ebene, mit den Resonatoren abschließende Platten mit einer Plattenstärke von ca. 5 mm aufgelegt. Dann wird eine Lage OPA 0/11 so eingebaut, dass die aufgelegten Platten bündig mit der noch nicht gewalzten, d. h. noch nicht fertig verdichteten OPA-Schicht abschließen, und die Platten anschließend entfernt. So ergeben sich um 5 mm gegenüber den Resonatoren erhöhte OPA-Stege zwischen den Resonatoren. Diese werden anschließend fertig verdichtet, sodass die OPA-Schicht mit den Resonatoren bündig abschließt. Im Anschluss daran wird eine zweite Lage OPA 0/11 eingebaut, um die untere Lage zu komplettieren. Mit diesem sehr viel aufwändigeren Verfahren wird eine homogenere Verdichtung erzeugt, die perspektivisch zu einer besseren bautechnischen Haltbarkeit führt.

Es ist vorgesehen, für die sich in der nächsten Projektphase anschließenden Prüfstandsversuche grundsätzlich die Variante a zu bevorzugen. Sollte sich zeigen, dass die erzeugten Inhomogenitäten in der Verdichtung zu einer nicht hinnehmbaren Verminderung der Tragfähigkeit führen, kann auf Variante b ausgewichen werden.

7. Es ist eine Verklebung der Resonatoren mit dem Unterbau vorzusehen. Aus akustischer Sicht ist diese notwendig, um das abgeschlossene akustische Federluftvolumen zu erzeugen. Demnach sollte die Verklebung möglichst luftdicht ausgeführt sein. Aus bautechnischer Sicht dient die Verklebung der örtlichen Stabilisierung der Resonatoren beim Einbau und des kompletten Schichtaufbaus im Betrieb. Demnach muss die Verklebung vor allem Scherkräfte aufnehmen und ableiten können. Die akustischen und bautechnischen Anforderungen stehen in einer

komplementären Zielbeziehung zueinander. Je nach Beschaffenheit des Untergrundes wird die Verklebung deshalb unterschiedlich realisiert.

- a. Beim Neubau von Verkehrswegen soll die Binderschicht möglichst eben mit konkaver Makrotextur eingebaut werden. Diese wird mit einer Bitumenemulsion mit einer fertigen Schichtdicke von 1-2 mm besprüht. Eine Abstreuerung der Bitumenemulsion ist nicht vorzusehen. In die noch nicht abgebundene Bitumenemulsion werden die Resonatorelemente gesetzt. Die Resonatorelemente sinken in die Bitumenemulsion ein, weshalb ein entsprechendes Vorhaltemaß von 1-2 mm bei der Herstellung der Resonatoren zu berücksichtigen ist.
- b. Bei der Instandsetzung eines Verkehrsweges werden die oberen Schichten des Fahrbahnbelages abgefräst, wodurch sich konvexe Fräsrillen bilden, die die oben beschriebene Verklebung nicht zulassen. In diesem Fall ist eine dünne 2 bis 3 cm starke Schicht aus Gussasphalt ohne Abstreuerung als Ausgleichs- und Dichtungsschicht vorzusehen. Die Resonatorelemente werden auf die heiße plastische Gussasphaltschicht aufgelegt und eingedrückt. Hierzu ist ein Vorhaltemaß von ca. 5 mm resonatorseitig vorzusehen.

8. Die Verlegeanordnung wird so optimiert, dass

- Spurrinnenbildung im Betrieb möglichst vermieden wird,
- sich quer zur Fahrtrichtung bildende Spannungen aufgrund von Temperatureinflüssen möglichst nicht an durchgehenden Kanten linienhaft angeordneter Resonatorelemente abbauen können. Dies entspricht einer Verminderung isotroper Eigenschaften in Fahrtrichtung und quer zur Fahrtrichtung.

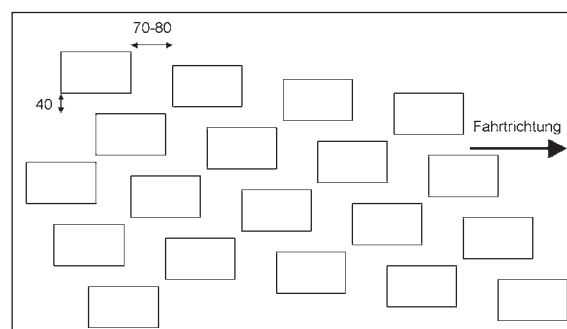


Bild 4.5-12: Verlegeanordnung. Alle Angaben in mm

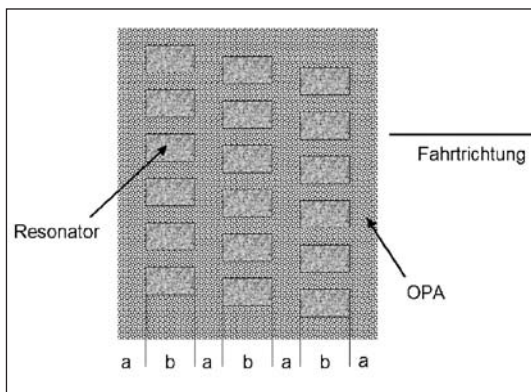


Bild 4.5-13: Zu vermeidende Anordnung

In Bild 4.5-13 ist der entsprechende Fall einer zu vermeidenden isotropen Anordnung dargestellt.

So angeordnet würden sich zwei streifenförmige Bereiche (im Bild durch a und b gekennzeichnet) bilden, die quer zur Fahrtrichtung entweder nur aus OPA bestehen, oder aus einer Kombination von OPA mit Resonatorelementen mit konstantem OPA-Resonator-Verhältnis. Für beide Bereiche würden sich unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten ergeben, wodurch sich im Jahresgang Spannungen in der unteren OPA-Schicht bilden, die sich bautechnisch negativ auswirken könnten.

9. Die Unterseite und Oberseite der Elemente sollen texturiert werden, um eine bessere Verzahnung mit dem Untergrund bzw. dem OPA zu gewährleisten. Die Texturierung der Unterseite wird mit kleinen Rauigkeitstiefen (MPD = 0,1-0,3 mm) ausgeführt. An der Oberseite werden größere Rauigkeitstiefen (MPD = 0,5-1 mm) angestrebt.
10. Die Resonatoren werden vor dem Einbau nicht beschichtet.
11. Die Resonatoren sollen soweit möglich abgerundete Außenkanten aufweisen, um auftretenden Scherkräften keine Abrisskanten zu bieten.

Die Resonatoren sollten optimalerweise aus einem Material gefertigt werden, dessen Wärmeausdehnungskoeffizient dem von OPA gleicht. Hier käme Gussasphalt in Betracht. Eine Möglichkeit, Resonatoren aus Gussasphalt zu fertigen, wird darin gesehen, spritzgegossene hülsenartige Kunststoffformen mit Gussasphalt aufzufüllen. Neben dem Vorteil ähnlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten wäre mit Gussasphaltresonatoren das spätere

Recycling des Schichtenaufbaus leichter möglich. Es wird beschlossen, erste Versuche mit Polymerbetonkörpern durchzuführen und in späteren Entwicklungsschritten die Umsetzung mit Gussasphalt zu planen.

Als nächster Schritt wurde eine Stahlwanne zur Aufnahme der Resonatoren und der zweilagigen offenporigen Asphaltdeckenschicht für einen Probekörper angefertigt. In diese Stahlwanne wurden nach der in Bild 4.5-12 dargelegten Verlegeanordnung die Resonatoren eingebracht. Die Resonatoren wurden mit einer zweilagigen offenporigen Asphaltdeckenschicht gemäß Bild 4.5-11 überbaut.

Die in Bild 4.5-11 dargestellte Binderschicht entfiel in dem Versuch – die Resonatoren wurden auf eine Aluminiumtrennschicht auf dem Boden der Stahlwanne bituminös aufgeklebt. Während der Herstellung des Probekörpers wurde besonders darauf geachtet, den Schnittstellen zwischen den Resonatorelementen und dem Mischgut des Offenporigen Asphalts keine unzureichend hohe und bei der späteren Umsetzung nicht realisierbare Beachtung zu schenken.

Parallel zur Herstellung des Probekörpers wurden Resonatorelemente einzeln ohne Mischgutüberdeckung auf ihren Absorptionsgrad in der Hallkabine untersucht. In Bild 4.5-14 sind die in die Hallkabine eingebauten Elemente und das Messergebnis der Schallabsorptionsgradmessung dargestellt.

Das Resonanzmaximum des Schallabsorptionsgrades liegt – wie vorausberechnet – bei 800 bis 1.000 Hz. Somit liegt der Bereich, innerhalb dessen die Resonatoren ihre schallabsorbierende Wirkung entfalten, in dem Bereich, in dem zweilagige offenporige Asphaltdeckenschichten minimale schallabsorbierende Eigenschaften aufweisen.

Nach Fertigstellung des Probekörpers wurde dieser ebenfalls in der Hallkabine vermessen. In Bild 4.5-15 ist der in die Hallkabine eingebaute Probekörper dargestellt.

In Bild 4.5-16 ist das Ergebnis der Messung dargestellt

Das Messergebnis zeigt die erwartete breitbandige absorbierende Wirkung der Kombination aus Offenporigem Asphalt und Resonatoren. Die Tatsache, dass die einzelnen Absorptionsmaxima des Offenporigen Asphalts und der Resonatoren nicht klar voneinander getrennt identifiziert werden können,

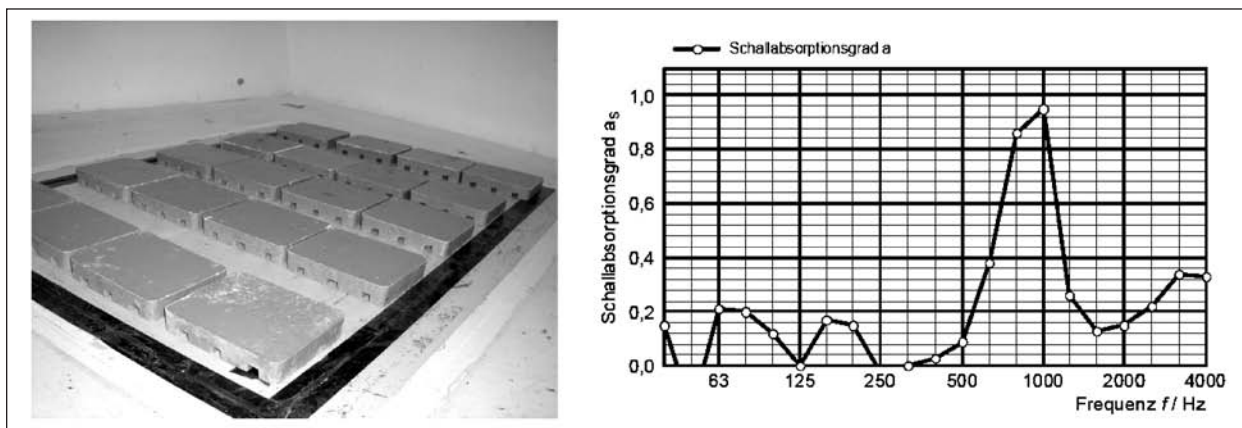


Bild 4.5-14: Eingebaute Resonatorelemente ohne Mischgutüberdeckung



Bild 4.5-15: In die Hallkabinen eingebauter Probekörper

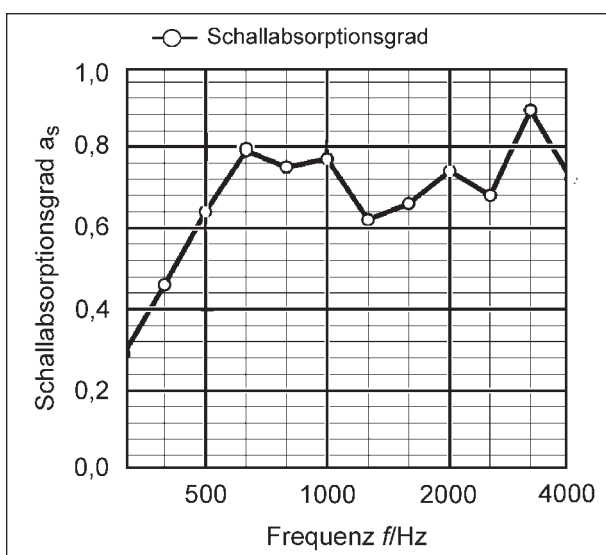


Bild 4.5-16: Messergebnis der Schallabsorptionsgradmessung des Probekörpers

liegt daran, dass das Messergebnis in Terzbandbreite angegeben ist. Dennoch sind das erste Maximum des Offenporigen Asphalts bei 630 Hz und

dessen zweites Maximum bei 2.000 Hz zu erkennen. Dazwischen liegt das durch die Resonatorelemente erzeugte Maximum bei 1.000 Hz. Dieses liegt allerdings nicht wie prognostiziert bei einem Schallabsorptionsgrad von 1,0 sondern bei 0,8. Dennoch konnte durch den Versuch die akustische Funktionsfähigkeit des Konzeptes nachgewiesen werden. Auf den geringeren Absorptionsgrad der Resonatorelemente im Vergleich zur Prognose wird an späterer Stelle in diesem Bericht gesondert eingegangen.

Neben dem akustischen Versuch in der Hallkabinen konnte durch den hergestellten Probekörper zusätzlich geklärt werden, wie die Resonatoren auf den Einbauprozess des Offenporigen Asphalts reagieren. Insbesondere stellten sich hierbei folgende Fragen:

- Füllen sich die Resonatoröffnungen mit Mischgut?
- Reicht die bituminöse Verklebung der Resonatoren auf dem Untergrund aus, sodass keine örtlichen Verschiebungen der Resonatoren auftreten?
- Schwimmen die Resonatoren während des Einbauprozesses auf?
- Füllen sich die rechtwinkligen Übergangsbereiche der Resonatorelemente zur Unterlage vollständig mit Mischgut, sodass keine Schwachstellen entstehen?

Zur Klärung dieser Fragestellungen wurde der Probekörper aus der Stahlwanne gestürzt, wie in Bild 4.5-17 dargestellt.

Erkennbar ist die noch fast vollständig am Probekörper haftende Trennschicht aus Aluminiumfo-



Bild 4.5-17: Gestürzter Probekörper

lie. An einigen Stellen des Probekörpers in Bild 4.5-17 wurde diese entfernt, sodass die Unterseite des Probekörpers sichtbar ist. In Bild 4.5-18 ist ein repräsentativer Ausschnitt der Unterseite des Probekörpers dargestellt.

Augenscheinlich ist, dass die Probekörper nicht, wie vorgesehen, vollflächig mit der Unterlage verklebt, sondern lediglich jeweils in deren Mitte durch einen Bitumenklebepunkt fixiert wurden. Dies führt zu einem in nicht allen Fällen sichergestellten luftdichten Abschluss der Elemente, was zu Performanceeinbußen der einzelnen Resonatoren führt. Darüber hinaus sind die Resonatorelemente mit 2 mm Vorhaltemaß produziert worden. Dieses Vorhaltemaß dient dazu, dass die Resonatoren ihre volle Leistungsfähigkeit (die sich durch die maximal erzielbare äquivalente Schallabsorptionsfläche ausdrückt) erst dann erreichen, wenn diese in eine 2 mm starke Bitumenemulsion eingebaut werden. Dies führt zu dem etwas geringeren gemessenen Schallabsorptionsgrad der Resonatorelemente des Probekörpers im Vergleich zur Prognose.

Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass die Resonatorelemente während des Einbaus nicht aufgeschwommen sind oder ihre Lage verändert haben – die Abstände sind auch nach Einbau des Offenporigen Asphalts konstant.

Die Resonatoren wurden vollständig mit Offenporigem Asphalt umschlossen, sodass sich keine Hohl-

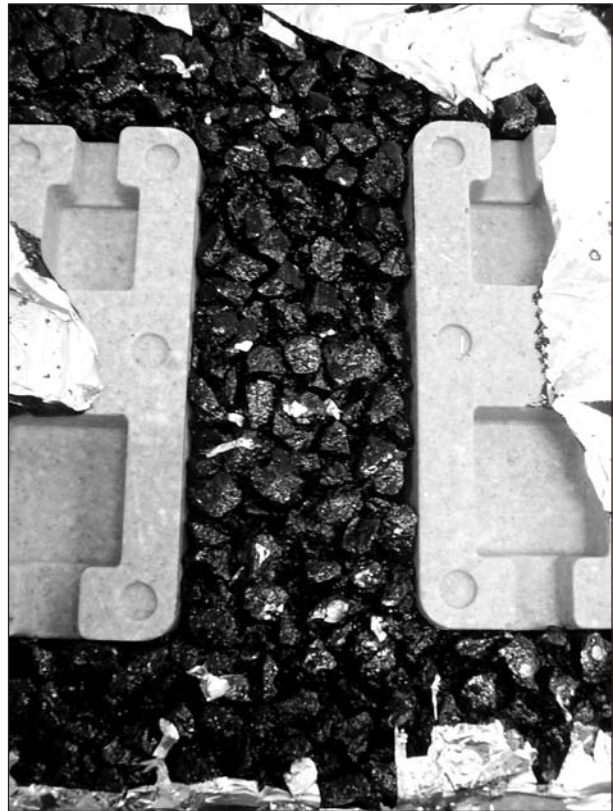


Bild 4.5-18: Repräsentative Nahaufnahme der Unterseite des Probekörpers

stellen gebildet haben, die als Schwachstellen die mechanische Haltbarkeit der Deckschicht beeinflussen könnten.

Die Öffnungen der Resonatoren sind frei von Mischgut. Somit bleibt die Zugänglichkeit der Resonatoren erhalten.

4.5.4 Bautechnische Versuche

4.5.4.1 Dynamischer Belastungsversuch

Zur Untersuchung im Hinblick auf Widerstand gegen Ermüdung unter dynamisch zyklischer Belastung wurde an der Universität Kassel im Fachgebiet Bau und Erhaltung von Verkehrswegen ein dynamischer Belastungsversuch des geplanten Gesamtaufbaus Offenporiger Asphalt mit eingebetteten Resonatorelementen (i. F. OPAR) durchgeführt. Dafür stand ein Versuchsstand mit einer Fußplatte von ca. 6,0 x 3,5 m², auf der ein Belastungsrahmen angeordnet ist, zur Verfügung. Mit Hilfe einer servohydraulischen Presse konnten zyklische Belastungen bis 500 kN mit Frequenzen bis 5 Hz aufgebracht werden. Bild 4.5-19 zeigt eine Prinzipskizze des Versuchsstandes.

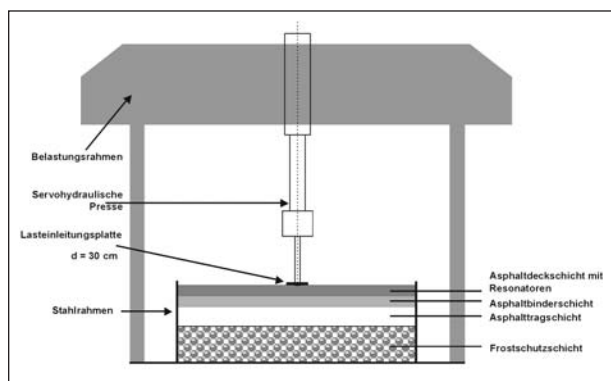


Bild 4.5-19: Schematischer Aufbau des Prüfstandes an der Universität Kassel

Da der Versuchsstand nicht vollständig verfügbar war, wurde auf einer effektiven Grundfläche von ca. 2,5 m x 2,5 m folgender Versuchsaufbau, entsprechend Bauklasse II, realisiert:

- ca. 30 cm Frostschutzschicht,
- ca. 14 cm Asphalttragschicht 0/22 C (Bindemittel Bitumen 50/70),
- ca. 8,5 cm Asphaltbinderschicht 0/16 S (Bindemittel CARIBIT 45),
- 8,5 cm zweischichtiger Offenporiger Asphalt mit Resonatorelementen,

darin: 6 cm OPA 0/11 (Bindemittel CARIBIT 45)
2,5 cm OPA 0/8 (Bindemittel CARIBIT 45)

In Bild 4.5-20 ist der Versuchsstand mit den verlegten Resonatorelementen vor der Überbauung mit Offenporigem Asphalt dargestellt.

Um eine zeitraffende Ermüdung zu erhalten, wurde die Konstruktion mit den Beanspruchungen entsprechend Bauklasse SV belastet. Bei der Versuchsdurchführung, die ca. 3 Tage dauerte, wurde eine Belastung mit einer Frequenz von ca. 5 Hz sinusförmig mit etwa 1 Mio. Lastwechseln aufgebracht. Als Abbruchkriterien wurden vor Versuchsdurchführung festgelegt:

- sichtbarer Bruch bzw. Riss einer oder mehrerer Schichten,
- Einsenkung von 5 cm,
- Erreichen von 1 Mio. Lastwechseln.

Als nach 1,25 Mio. Lastwechseln keine Anzeichen von Materialermüdung zu erkennen waren und sich lediglich 2 cm als verbleibende Verformung der Konstruktion einstellten, wurde der Versuch abge-



Bild 4.5.20: Eingebaute Resonatorelemente im Prüfstand



Bild 4.5.21: Bohrkern nach Versuchsdurchführung

brochen. Anschließend wurden Bohrkern, wie in Bild 4.5-21, entnommen und untersucht.

Es ist ersichtlich, dass das exemplarisch dargestellte Resonatorelement die im Versuch realisierten Lasten aufnehmen konnte und nicht gebrochen ist. Ferner lässt sich erkennen, dass der angeschnittene Baukörper kraftschlüssig mit der Binderschicht

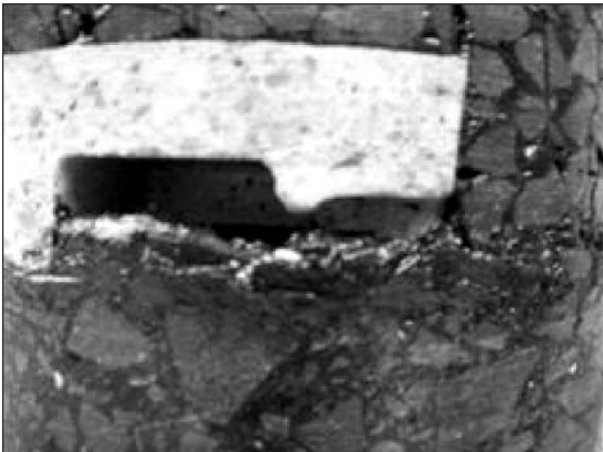


Bild 4.5-22: Nahaufnahme des Bohrkerns

verklebt ist und die für die schallabsorbierende Wirkung notwendigen Kammern nicht verschlossen sind. Aus Bild 4.5-22 wird deutlich, dass die Hohlraumöffnungen nicht durch eindringendes Mischgut verschlossen sind.

Durch den Vergleich mit einem Referenzversuch aus herkömmlichem Offenporigem Asphalt wurde festgestellt, dass der Aufbau mit Resonatoren eine höhere Tragfähigkeit und Standfestigkeit aufweist. Abschließend konnte die Aussage getroffen werden, dass durch den Einbau der Resonatoren keine nachteilige Beeinträchtigung des Ermüdungsverhaltens bei zyklischer Belastung auftritt.

4.5.4.2 Vorversuche zum Einbau eines Resonatorenfeldes als Teststrecke

Vor dem geplanten Bau einer Teststrecke wurden verschiedene bautechnische Vorversuche durchgeführt. Dabei sollten folgende Fragen geklärt werden:

1. Mit welcher Bruttomenge an Bitumenemulsion muss die Unterlage zum Verkleben der Resonatoren angespritzt werden, um eine kraftschlüssige und luftdichte Verbindung der Resonatoren herzustellen? Welchen Einfluss hat die Textur der Unterlage auf die notwendige Bruttomenge an Bitumenemulsion?
2. Welchen Einfluss hat die Schichtdicke der Bitumenemulsion auf die maximalen Scherkräfte, die die Verbindung aufnehmen kann?
3. Werden die Resonatorelemente beim Einbau vollständig mit Mischgut umschlossen, sodass sich keine Fehlstellen bilden?

4. Welchen Einfluss hat die geometrische Anordnung der Resonatoren im Verhältnis zur Querneigung bezüglich Regenwassereintrag in die Resonatorelemente?

Die zur Beantwortung o. g. Fragestellungen durchgeführten bautechnischen Versuche lieferten folgende Ergebnisse:

1. Die Bruttomenge soll auch im Hinblick auf die zu erwartende Textur der Unterlage auf 2,5 mm eingestellt werden. Bei dieser Menge ergibt sich eine Nettoschichtdicke von ca. 1,5 mm. Darüber hinausgehende Mengen sind aufgrund der Gefahr von aufsteigendem Bitumen in die später einzubauende OPA-Schicht zu vermeiden.
2. Eine zusätzliche Schichtdicke an Bitumenemulsion hat ab der Menge, bei der die Resonatorelemente vollflächig verklebt sind, keinen Einfluss auf die Scherkräfte. Ein Einsinken der Resonatoren in sehr dicke Bitumenfilme führt zu keiner Steigerung der maximal aufnehmbaren Scherkräfte, da die Verbindung offensichtlich hauptsächlich aufgrund adhäsiver Effekte des Bitumens und der Resonatorelemente zustande kommt.
3. Durch die Herstellung eines Probekörpers mit einem Walzsektorverdichter konnte gezeigt werden, dass die Resonatorelemente gut mit Mischgut umschlossen werden. Es bilden sich keine Fehlstellen. Es dringt kein Mischgut in die Resonatoren selbst ein. In Bild 4.5-23 sind Schnitte durch einen Teil des Probekörpers dargestellt, der diese Untersuchungsergebnisse belegt.

Es wurden Bemessungsregen und Starkregen simuliert. Die geometrische Anordnung der Resonatoren hat einen Einfluss auf den Wassereintrag bei Regenereignissen. Allerdings ist die Wassereintragsmenge grundsätzlich sehr gering – die Innenoberfläche der Resonatoren wird zwar mit Feuchtigkeit benetzt, es bildet sich aber kein stehendes Wasser in den Resonatoren.

Die geometrische Anordnung der Resonatoren, bei der deren Öffnungen senkrecht zur Fließrichtung des Wassers stehen, ist vorzuziehen.

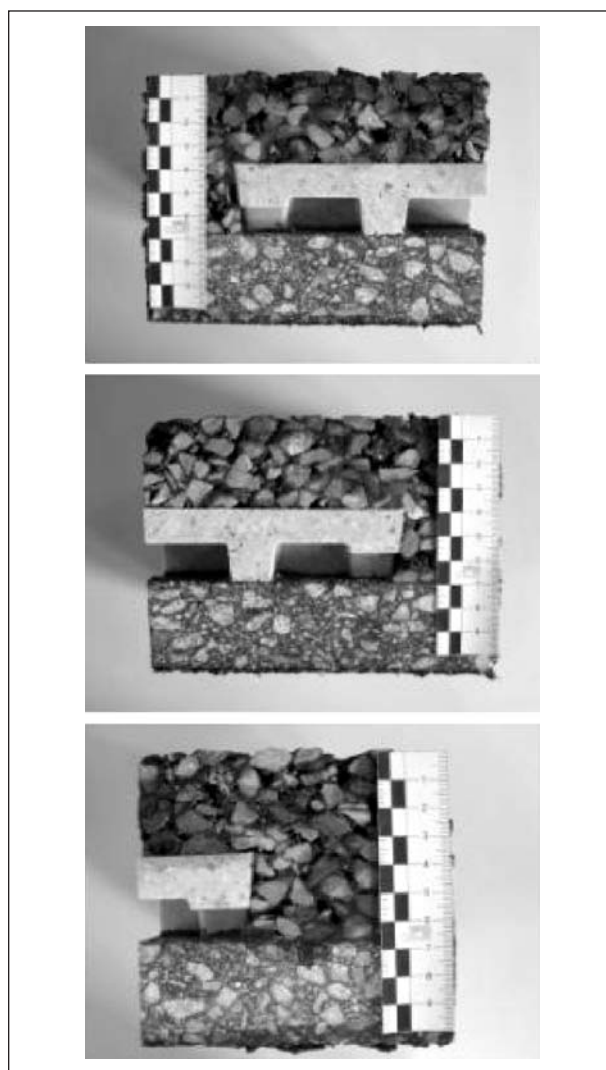


Bild 4.5-23: Schnitte durch den Probekörper

4.5.5 Einbau der Testfelder in Sperenberg

4.5.5.1 Hintergrund

Die akustische Wirkungsweise der Resonatoren konnte im Labor in verschiedenen Entwicklungsstadien nachgewiesen werden. Weiterhin wurde die Optimierung derart vorgenommen, dass die bautechnischen Anforderungen für einen dauerhaften Fahrbahnoberbau sichergestellt werden können. Die letztendliche Anwendbarkeit des Resonatorenkonzepts konnte letztlich allerdings nur durch einen praktischen und großskaligen Einbauversuch demonstriert werden. Ziel dieses Versuches war es deshalb einerseits, die Interaktion herkömmlicher Straßenbautechnik (Fertiger, Walzen usw.) mit dem Unterbau aus Resonatoren zu untersuchen und andererseits akustische Versuche auf dem Resonatorfeld durchzuführen.

4.5.5.2 Örtliche Gegebenheiten und Lage der Testfelder

Für den Bau der Testfelder standen Teile der Start- und Landebahn des stillgelegten Militärflugplatzes in Sperenberg, Brandenburg (ca. 50 km südlich von Berlin), bestehend aus Betonplatten, zur Verfügung. Aus vorherigen Forschungsprojekten waren bereits Testfelder auf diesem Gelände vorhanden. Es wurde ein OPAR-Testfeld (zweischichtiger Offenporiger Asphalt mit Resonatoren) und, zu direkten Vergleichszwecken, ein ZWOPA-Testfeld (zweischichtiger Offenporiger Asphalt) gleicher Misch-

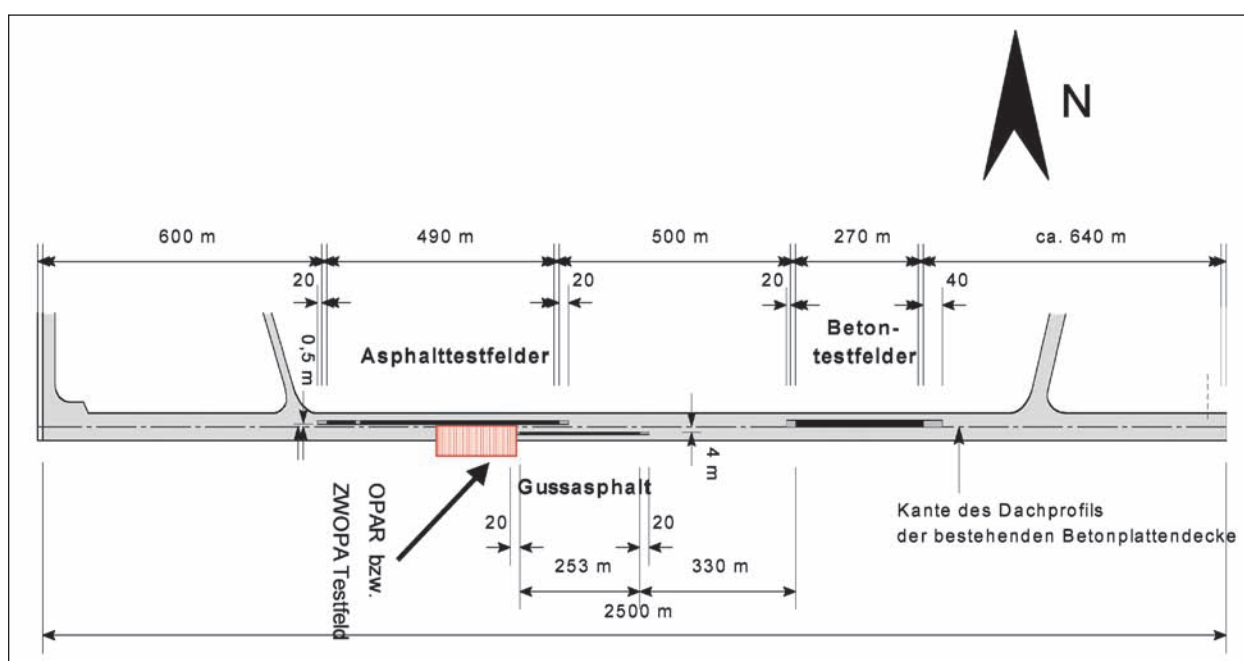


Bild 4.5-24: Übersichtplan des Versuchsgeländes (südliche Start- und Landebahn)

gutzusammensetzung mit jeweils 8,5 cm Schichtdicke eingebaut.

In Bild 4.5-24 ist ein Übersichtsplan der südlichen Start- und Landebahn mit den vorhandenen Testfeldern dargestellt. Farblich markiert ist zusätzlich die Lage der OPAR- bzw. ZWOPA-Testfelder.

Wie aus dem Plan ersichtlich wird, schließen die OPAR- und ZWOPA-Testfelder direkt an die bestehenden Gussasphalttestfelder in Richtung Westen an.

4.5.5.3 Aufbau der Testfelder

Der Aufbau der Testfelder lässt sich in folgendem Längsschnitt (beginnend mit den bestehenden Gussasphaltfeldern) in Bild 4.5-25 erkennen.

Das bereits bestehende Gussasphalttestfeld setzt sich aus 7 cm dickem Asphaltbinder und 4 cm dicken Gussasphalt zusammen. Um die beiden neuen Testfelder (OPAR und ZWOPA) direkt an die Gussasphaltfelder anschließen zu können, war es notwendig, die bereits bestehende Zufahrtsrampe

(in Bild 4.5-25 gestrichelt dargestellt) zu entfernen. Die Höhe des Aufbaus der Testfelder wurde dem der bestehenden Gussasphaltfelder angepasst. Daraus ergab sich ein Schichtenaufbau mit 2,5 cm Gussasphalt als Ebenheitslage, auf der der Offenerporige Asphalt mit Resonatorelementen (OPAR) bzw. der zweischichtige Offenerporige Asphalt (ZWOPA) mit einer Gesamtstärke von 8,5 cm aufbaut. Bei dem zweischichtigen Aufbau wurden die untere Schicht als offenerporige Asphalt-schicht 0/11 mit einer Dicke von 6 cm, die obere Schicht der Körnung 0/8 mit einer Dicke von 2,5 cm ausgeführt. Bei dem Testfeld mit Resonatorelementen wurden diese in die untere Schicht eingebaut und entsprechend ihrer Höhe (3 cm) mit lediglich 3 cm Mischgut überbaut, sodass sich eine Gesamthöhe der unteren OPA-Schicht von 6 cm einstellte. Im Anschluss an die beiden Testfelder wurde aus fahrdynamischen Gründen sowie zum Höhenausgleich zwischen Testfeld und Untergrund erneut eine Rampe erstellt.

Die Testfelder wurden mit einer Länge von 40 m erstellt.

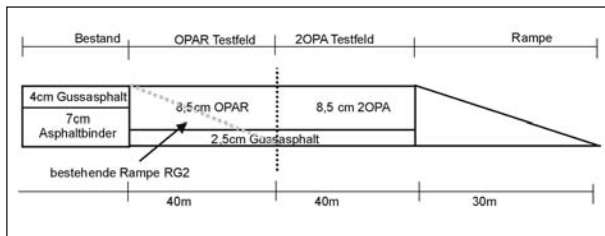


Bild 4.5-25: Längsschnitt der Testfelder (Ost-West orientiert)

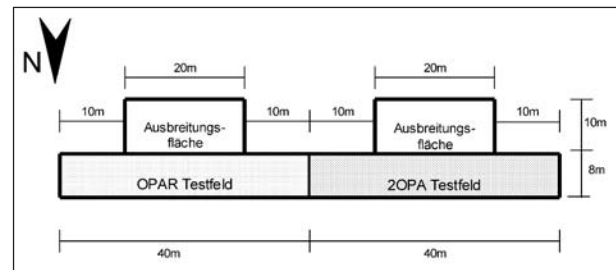


Bild 4.5-26: Draufsicht der beiden Testfelder

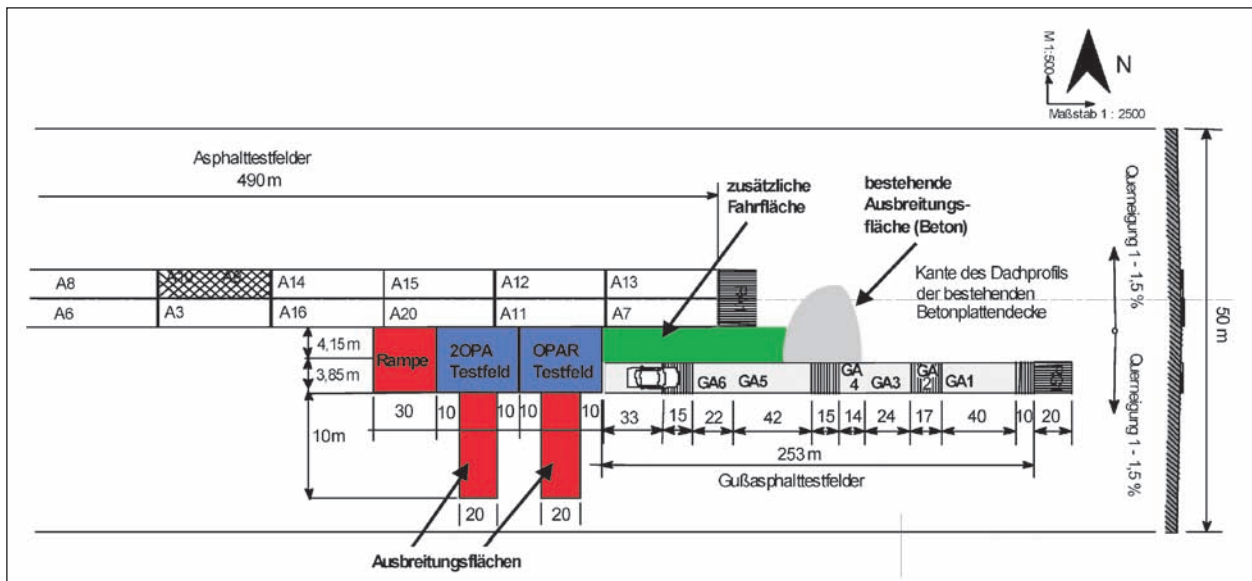


Bild 4.5-27: Lage und Anordnung der Testfelder; Rot: Ausbreitungsflächen und Rampe – neu hergestellt; Blau: OPAR- und ZWOPA-Testfeld – neu hergestellt; Grün: zusätzliche Fahrfläche – neu hergestellt; Grau: Ausbreitungsfläche – Bestand

Des Weiteren wurden die Testfelder in nördlicher Richtung an die nebenliegenden Asphalttestfelder angeschlossen, um einen möglicherweise akustisch störenden Randeffekt auszuschließen. Daraus ergab sich eine Breite der Testfelder von 7,85 m. Diese Breite ermöglicht es, bei der Messung der kontrollierten Vorbeifahrt zwei Fahrstreifen zu simulieren. Die Abmessungen der beiden Testfelder sind in der Draufsicht in Bild 4.5-26 dargestellt.

Die im Bild dargestellten Ausbreitungsflächen sind bei der Messung der kontrollierten Vorbeifahrt gefordert und dienen dem Höhenausgleich der Fläche, über die sich die Reifen-Fahrbahn-Geräusche ausbreiten. Sie wurden aus dichtem Asphaltbinder ohne Abstreuerung hergestellt.

In Bild 4.5-27 sind nochmals alle Flächen übersichtlich dargestellt und die neu gebauten Flächen farbig gekennzeichnet.

Aus dem Bild geht hervor, dass Testfelder und Zufahrtsrampe, wie bereits beschrieben, direkt an die bestehenden Gussasphaltfelder anschließen, wobei die neuen Testfelder in einer größeren Breite ausgeführt wurden. Die Ausbreitungsflächen wurden südlich der Testfelder erstellt.

Nördlich zu den Gussasphaltfeldern wurde parallel und in entsprechender Höhe über die Länge von 110 m eine zusätzliche Fahrfläche aus Asphaltbinder zur Beschleunigung erstellt, die an die schon vorhandene Ausbreitungsfläche früherer Versuche anschließt.

4.5.5.4 Mischgutzusammensetzung für die Testfelder

Die Mischgutzusammensetzung wurde im Vorfeld für den geplanten Verwendungszweck festgelegt und einer Eignungsprüfung unterzogen. Das Mischgut sollte einen Hohlraumgehalt von mindestens 25 Vol.-% (berechneter Wert), der Mineralstoffanteil ca. 64 Vol.-% und der Bindemittelgehalt ca. 10 Vol.-% aufweisen. Als Bindemittel war Bitumen PmB 45A vorgesehen, dessen Gehalt 5,8 M.-% betragen sollte. Durch Zugabe von Zellulosefasern

sollte ein Abfließen des Bindemittels vom Mineralstoffgemisch verhindert werden.

In Tabelle 4.5-1 ist die Kornzusammensetzung des Mineralstoffgemisches getrennt für beide Schichten aufgelistet.

4.5.5.5 Hinweise zur Entwässerung

Die Entwässerung der Testfelder erfolgt aufgrund der Querneigung der Startbahn zu den Ausbreitungsflächen hin. Da diese im direkten Anschluss an die Testfelder geplant waren, war es notwendig, stehendes Wasser in den OPA-Schichten zu vermeiden. In Bild 4.5-28 ist der Aufbau der realisierten Lösung in einem Querschnitt dargestellt.

Gussasphalt- sowie OPA-0/11-Schicht wurden um 0,5 m breiter eingebaut als die Testfelder. Die Ausbreitungsfläche aus Asphaltbinder wurde über einen Anschlussstreifen direkt an das Testfeld geschlossen und überdeckt die Gussasphalt- und OPA-0/11-Schicht. Eine solche Ausführung ist zwar straßenbautechnisch ungewöhnlich, allerdings war es für den Versuch zweckmäßig, die Entwässerung in dieser Weise zu gewährleisten bzw. stehendes Wasser in der Kante zwischen Testfeld und Ausbreitungsfläche zu vermeiden.

4.5.5.6 Vorbereitende Arbeiten

Es war notwendig vor Baustart die Fläche vorzubereiten. Daher wurden, wie geplant, am 02. Oktober 2008 die bestehende Rampe im Anschluss an die bestehenden Gussasphaltfelder und die Betonoberfläche abgefräst.

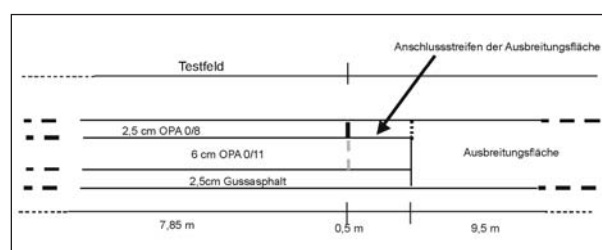


Bild 4.5-28: Querschnitt im Bereich des Anschlusses der Ausbreitungsflächen

		OPA 0/11		OPA 0/8	
Splitt	Grauwacke	Grobe GK 8/11	91 M.-%	Grobe GK 5/8	91,5 M.-%
Sand	Grauwacke	Feine GK 0/2	6 M.-%	Feine GK 0/2	6 M.-%
Füller (< 0,09)	Kalkstein	Füller 0/9,009	3 M.-%	Füller 0/9,009	2,5 M.-%

Tab. 4.5-1: Kornzusammensetzung des Mineralstoffgemisches

4.5.5.7 Einbau der Gussasphaltschicht

Entsprechend den Planungen wurde am 06. Oktober 2008, bei trockener Witterung, von der Firma Strabag über die gesamte Länge beider Testfelder (80 m) eine 2,5 cm starke Gussasphaltschicht eingebaut. Aufgrund der vorangegangenen Niederschläge war es notwendig, stehendes Wasser von

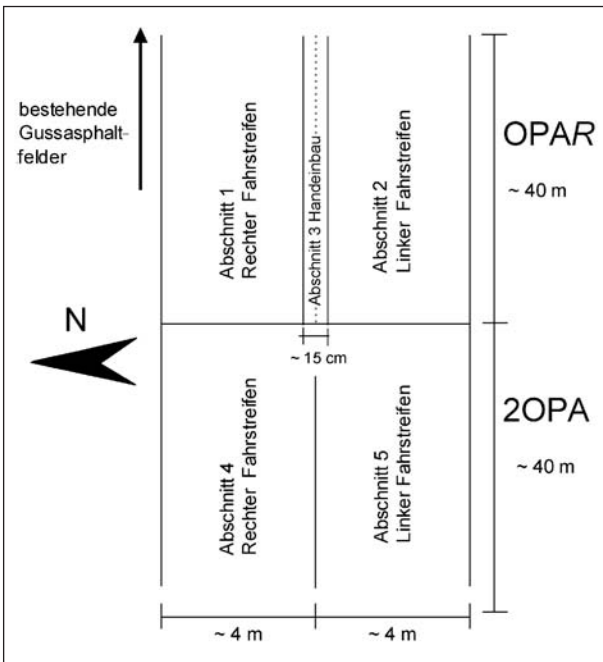


Bild 4.5-29: Fertigungsabschnitte zur Herstellung der Gussasphaltschicht



Bild 4.5-30: Herstellung der Gussasphaltschicht mit einer Einbaubohle



Bild 4.5-31: Aufnahmen der hergestellten Gussasphaltschicht

der Oberfläche abzukehren. Um das restliche Wasser in den Rillen der abgefrästen Oberfläche abzusperren, wurde die Fläche mit Glasvlies abgedeckt, damit die noch vorhandene Feuchtigkeit nicht mit dem heißen Gussasphalt in Kontakt gelangt und damit die Gefahr der Blasenbildung vermindert wird.

Der Einbau des Gussasphalts wurde in vier Teilabschnitten, jeweils für den rechten und linken Fahrstreifen für beide Testfelder getrennt, durchgeführt. Dazu wurde der Gussasphalt vor eine Einbaubohle auf die Fläche aufgebracht. Die nachfolgende Bohle stellte die vorgegebene Schichtdicke von 2,5 cm sowie deren Ebenheit her. Beim Einbau des Gussasphaltes auf dem OPAR-Testfeld wurde ein Streifen zwischen den beiden Fahrstreifen per Handeinbau hergestellt. Auf dem ZWOPA-Testfeld wurden die beiden Fahrstreifen bündig gefertigt. In Bild 4.5-29 und Bild 4.5-30 sind die einzelnen Abschnitte zur Herstellung der Gussasphaltschicht sowie der Einbau mit der Bohle dargestellt.

Anschließend wurde die fertige Gussasphaltschicht entgegen den eigentlichen Planungen mit Sand abgestreut und abgerieben. Dieser Schritt war notwendig geworden, da die Oberfläche nicht ausreichend glatt hergestellt werden konnte. Dies war jedoch notwendig, um eine vollflächige Verklebung der Resonatorelemente zu ermöglichen. Durch das Abstreuen und Verreiben des Sandes auf der Oberfläche konnte die Oberflächengüte verbessert werden. Bild 4.5-31 zeigt die fertige Gussasphaltschicht.

Im ersten Bild (von links) ist eine Übersicht über die gesamte Gussasphaltschicht dargestellt. Im zweiten Bild lassen sich deutliche Unebenheiten erkennen, die durch aufsteigenden Wasserdampf entstanden sind. Diese konnten durch das Abreiben der Oberfläche mit Sand (drittes Bild) deutlich reduziert werden. Das vierte Bild zeigt eine Draufsicht auf die abgestreute Oberfläche.

4.5.5.8 Einbau der Resonatorelemente

Durch Probleme bei der Fertigung und daraus resultierende veränderte Liefertermine der Resonatorelemente wurde beschlossen, diese in zwei Teilen anliefern zu lassen und an zwei Terminen einzubauen. In Tabelle 4.5-2 sind die Einbautermine und die Witterung an diesen Tagen festgehalten.

Die Elemente konnten nicht wie geplant sofort eingebaut werden, sondern mussten aufgrund der Niederschläge an den vorherigen Tagen erst getrocknet und mit Wärmeplatten erwärmt werden. Die Bitumenemulsion wurde mit Hilfe einer Spritzrampe nach einigen Probeläufen in einer flächenbezogenen Menge von ca. 2,5 l/m² in Bahnen quer zur Fahrtrichtung auf einer Breite von ca. 2,50 m aufgebracht. Die Resonatorelemente wurden mit Hilfe von entsprechend gefertigten Schablonen auf der Bitumenbahn verklebt. In den Bildern 4.5-32 Bild 4.5-33 sind die Spritzrampe sowie der Einbau der Elemente mit Hilfe der Schablonen dargestellt.

Die einzelnen Elemente wurden bzgl. ihrer Orientierung alle einheitlich verlegt, sodass der Hohlraum, der eine Resonanzfrequenz von 700 Hz aufweist in Richtung Osten zeigt (in Bild 4.5-33 nach



Bild 4.5-32: Spritzrampe zum Aufbringen der Bitumenemulsion

rechts). Aufgrund der Tatsache, dass die Baukörper getrocknet werden mussten, sowie der regelmäßig auftretenden Niederschläge konnten an diesem Tag nur ca. 1.000 Resonatorelemente verlegt werden.

Der zweite Teil der Resonatorelemente wurde am 21. Oktober 2008 verlegt. Aufgrund der niederschlagsfreien Witterung in den Tagen zuvor konnte auf das Trocknen der Elemente verzichtet werden. Die Elemente wurden wie beim ersten Einbau mit Hilfe von Schablonen verlegt und die Bitumenemulsion ebenfalls in 2,50 m breiten Bahnen aufgebracht. Durch die günstigere Witterung ohne Niederschläge und die Zeitersparnis infolge der nicht mehr notwendigen Trocknung der Elemente konnten an diesem Einbautag alle restlichen Resonatorelemente (ca. 5.200 Stück) verlegt werden.

Das Testfeld nach Einbau der Resonatorelemente ist aus den Bildern in Bild 4.5-34 ersichtlich.

Zusätzlich war geplant, mit Hilfe eines Endoskops Einblicke in die Hohlräume der Resonatorelemente zu erhalten und somit weitere Erkenntnisse über das Verhalten von Mischgut und Bitumen an den Resonatorhalsöffnungen und das Eindringen von Wasser zu sammeln. Hierzu wurden Führungsrohre für ein Endoskop verlegt, die in den Hohlräumen einzelner Resonatorelemente endeten. Die Führungsrohre wurden gegen Ende des Testfeldes bei ca. 38 m eingebaut, indem Aussparungen für

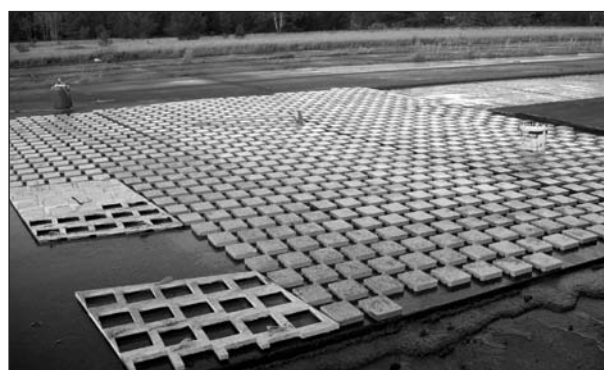


Bild 4.5-33: Verlegung der Resonatorelemente mit entsprechend gefertigten Schablonen

Datum	Witterung	Lufttemperatur	Wind
17.10.2008	bedeckt mit Regenschauer, böiger Wind	9 – 12 °C	4 – 9 m/s
21.10.2008	sonnig, böiger Wind, abends Regen	14 – 22 °C	1 – 4 m/s
22.10.2008	bedeckt	9 – 12 °C	bis 1 m/s

Tab. 4.5-2: Einbautermine und Witterungsverhältnisse zum Einbau der Resonatorelemente

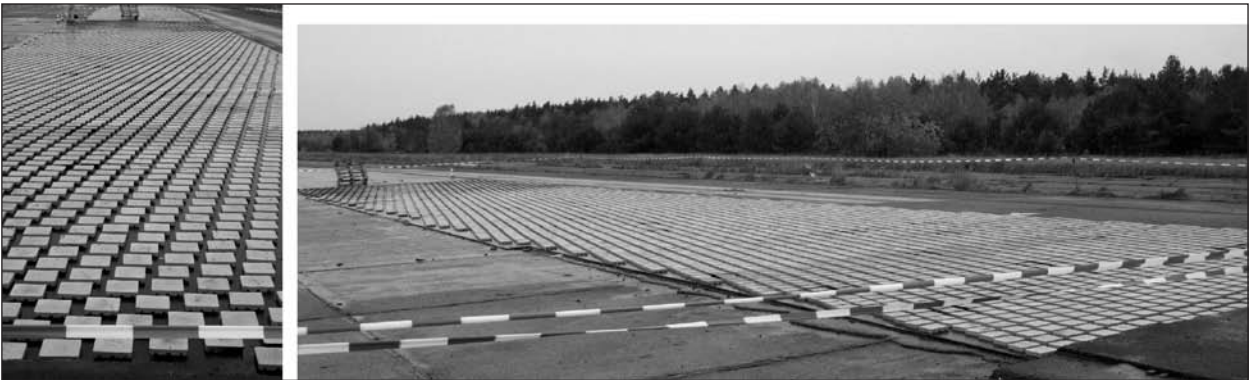


Bild 4.5-34: OPAR-Testfeld nach Einbau der Resonatorelemente

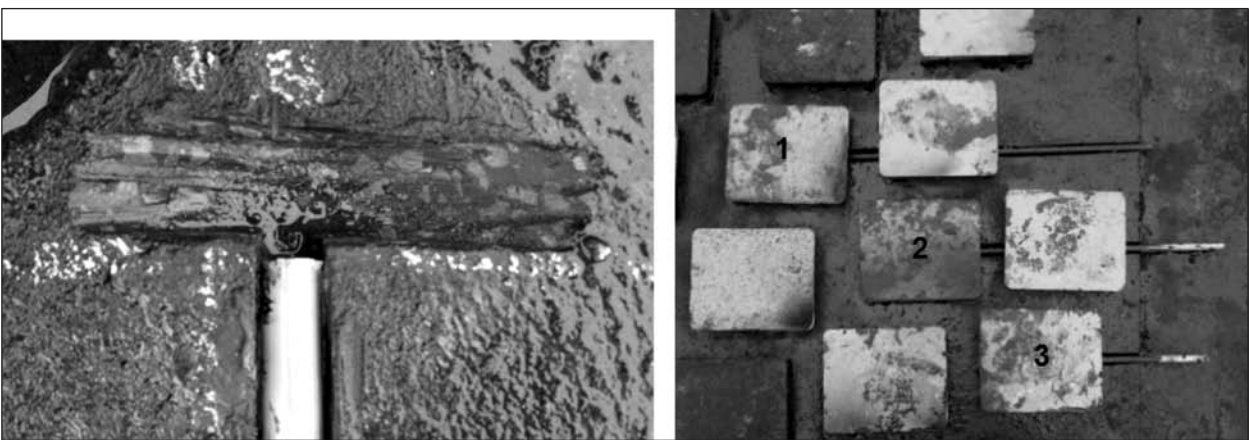


Bild 4.5-35: Aussparung (links) und Lage der Führungsrohre (rechts)

die Rohre in die Gussasphaltschicht eingefräst und die Rohre darin eingebettet wurden. Die dazu vorbereiteten Resonatorelemente, bei denen die Mittelstege entfernt wurden, um den Zugang mit dem Endoskop zu ermöglichen, wurden an den Enden der Rohre so aufgeklebt, dass diese in die Hohlräume münden. Zusätzlich wurden an den Enden der Rohre größere Aussparungen in die Gussasphaltschicht eingefräst, um bei der Endoskopie die Möglichkeit zu bieten, den Sensorkopf in beide Richtungen abzuwinkeln und so die Öffnungen von beiden Hohlräumen betrachten zu können. In Bild 4.5-35 sind die Aussparung am Ende der Rohre sowie die Lage der Rohre und Resonatorelemente im eingebauten Zustand dargestellt.

4.5.5.9 Einbau des zweischichtigen Offenporigen Asphalts sowie der Zusatzflächen

Aufgrund der Verzögerung, die durch die Schwierigkeiten bei der Fertigung der Resonatorelemente entstanden sind, konnte der geplante Terminplan seitens der Firma Strabag aufgrund einer hohen Auslastung des Mischwerkes nicht realisiert werden. Als nächstmöglicher Termin für den Einbau der

Datum	Witterung	Lufttemperatur	Wind
03.11.2008	neblig, bedeckt	6 – 7 °C	1 – 4 m/s
04.11.2008	neblig, bedeckt	7 – 9 °C	-

Tab. 4.5-3: Einbautermine und Witterungsverhältnisse zum Einbau der Offenporigen Asphaltsschichten sowie Ausbreitungs- und Zusatzflächen



Bild 4.5-36: Beschickung des Straßenfertigers mit Mischgut

offenporigen Schichten sowie der restlichen Flächen standen der 3. und 4. November 2008 zur Verfügung.

Die gesamten Flächen wurden mit einem Straßenfertiger, wie in Bild 4.5-36 dargestellt, hergestellt.

Zur Optimierung der erforderlichen Verdichtungsarbeit bei den offenporigen Schichten wurde zu Beginn der Arbeiten eine Testfläche abseits der Testfelder hergestellt und die notwendigen Walzübergänge ermittelt, indem der erreichte Verdichtungsgrad direkt vor Ort mit Hilfe einer Troxler-Sonde bestimmt wurde.

Die offenporige Schicht der Körnung 0/11 wurde über beide Testfelder in zwei Abschnitten mit jeweils 4 m Breite (rechter und linker Fahrstreifen) und 6 cm Höhe gefertigt. Dabei wurden OPAR- und ZWOPA-Testfeld in einem Arbeitsgang gefertigt. Jeweils am Beginn einer Bahn (ca. 0,5 m) musste das Mischgut im Handeinbau verteilt werden, bis der Fertiger die Höhe einstellen konnte und die restliche Bahn maschinell gefertigt wurde. Am Übergang vom OPAR- auf das ZWOPA-Testfeld war es notwendig, die Höhe neu einzustellen, da die homogene Schicht (ZWOPA) mehr Mischgut benötigt, um dieselbe Höhe zu erreichen wie die inhomogene Schicht (OPAR). Die Verdichtung erfolgte direkt im Anschluss an den Einbau der Schicht mit einer Glattmantelwalze. In Bild 4.5-37 ist der Einbauvorgang zur Fertigung der unteren OPA-Schicht des



Bild 4.5-37: Einbau der unteren Lage auf dem OPAR-Testfeld

ersten Fahrstreifens auf dem OPAR-Testfeld dargestellt.

Die obere Schicht des Offenporigen Asphalt (Körnung 0/8) wurde am 04. November 2008 in gleicher Weise hergestellt. Anschließend wurden die zusätzliche Fahrfläche, die Zufahrtsrampe sowie beide Ausbreitungsflächen aus Asphaltbinder gefertigt. Die Zufahrtsrampe wurde ebenfalls in zwei Abschnitten mit einer Breite von 4 m hergestellt, ebenso wie die Ausbreitungsflächen.

Für den Einbau der unteren Schicht des OPAR-Feldes war es notwendig, dass sowohl Straßenfertiger als auch Lkw die Resonatorelemente befahren. Der Lkw musste rückwärts an den Straßenfertiger heranfahren, um das Mischgut in den Aufgabebehälter kippen zu können. Dabei war zu erkennen, dass sich zwischen den Elementen und der Unterlage ein guter Verbund eingestellt hat, da selbst beim Abrollen der Lkw-Reifen am Ende des OPAR-Testfeldes und somit bei einer äußerst hohen Belastung der Kanten die Elemente in ihrer Lage fixiert blieben.

Des Weiteren wurde ersichtlich, dass das Mischgut die Zwischenräume zwischen den einzelnen Elementen sehr gut ausfüllte und somit mit einem guten Schichtenverbund zu rechnen war. In Bild 4.5-38 sind einige Bilder vom Einbau dargestellt.

4.5.6 Messungen am Resonatorenfeld in Sperenberg

An den Testfeldern wurden Messungen nach der Methode der kontrollierten Vorbeifahrt durchgeführt. Die Messungen wurden sowohl auf dem Südfahrstreifen (Schallausbreitung über dichter Fläche) wie auch auf dem Nordfahrstreifen (Schallausbreitung über absorbierender Fläche) durchgeführt (vgl. Bild 4.5-27). Die Messungen wurden mit einem Fahrzeug vom Typ VW Passat mit ausgeschaltetem Motor durchgeführt. Auf dem Fahrzeug wurden



Bild 4.5-38: Lkw-Reifen bei der Überfahrt über die Resonatorelemente und Verteilung des Mischguts in den Zwischenräumen

nacheinander 4 Reifensätze folgender Reifentypen montiert:

- Continental ContiPremiumContact (195/65R15); im Folgenden: CPC,
- Vredestein Hi-Trac (195/65R15); im Folgenden: HTV,
- Michelin Energy E3A (195/65R15); im Folgenden: ME,
- Vredestein Snowtrac 2 (195/65R15); im Folgenden: STV.

Die Messungen wurden in einem Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 km/h und 120 km/h

durchgeführt. Es wurden 4 nominale Messgeschwindigkeiten (50 km/h, 80 km/h, 100 km/h und 120 km/h) festgelegt und je Reifen-Geschwindigkeits-Kombination mindestens 5 gültige Überfahrten gemessen. Die meteorologischen Bedingungen waren während der Messungen und in den Tagen zuvor günstig (kein Niederschlag, Temperaturen über 10 °C und unter 25 °C). Die Messungen wurden auf dem Resoantorenfeld (OPAR) und dem angrenzenden ZWOPA-Feld durchgeführt.

In Bild 4.5-39 sind die Messergebnisse für den Südfahrstreifen und in Bild 4.5-40 die für den Nordfahrstreifen zusammengefasst. Alle Ergebnisse sind temperaturkorrigiert.

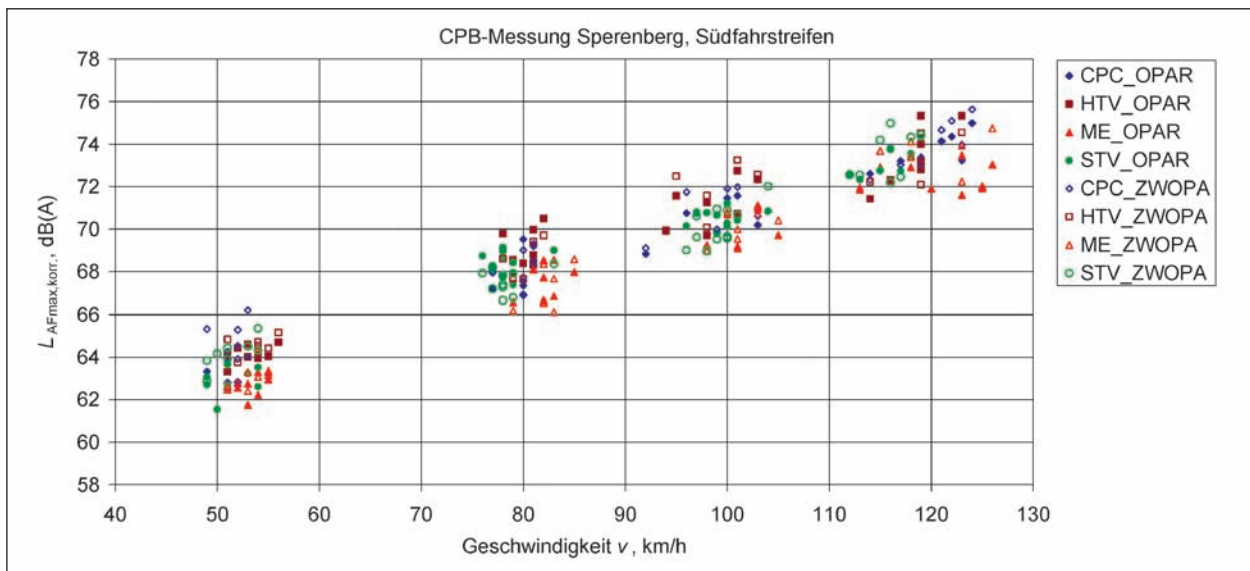


Bild 4.5-39: Zusammengefasste Messergebnisse für den Südfahrstreifen

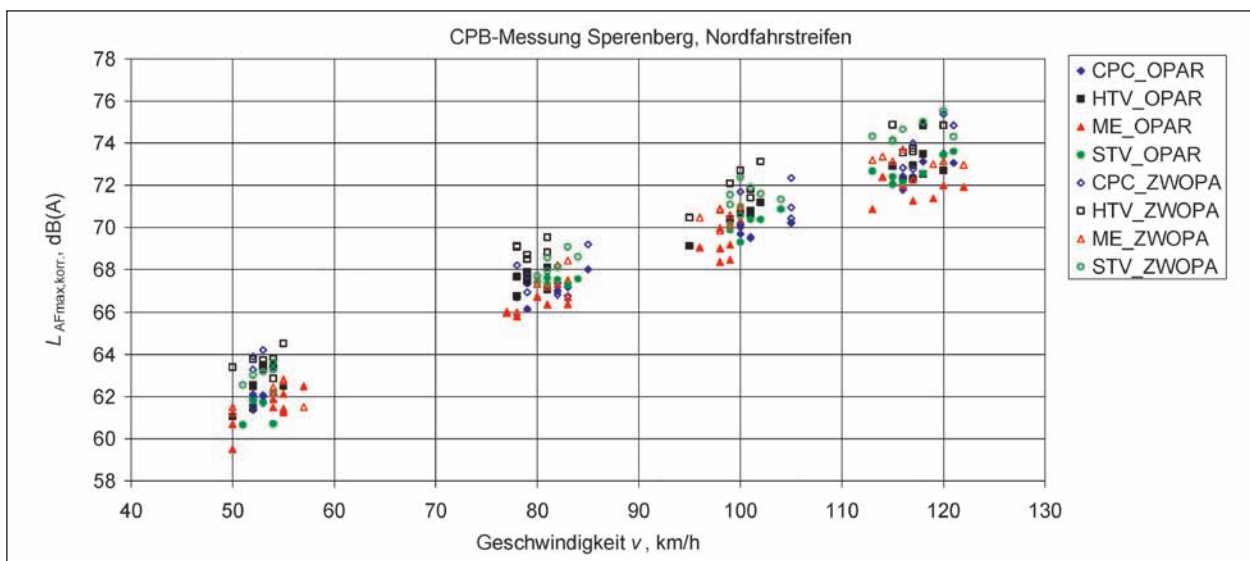


Bild 4.5-40: Zusammengefasste Messergebnisse für den Nordfahrstreifen

Es zeigt sich, dass die Messergebnisse für den Nordfahrstreifen (mit Schallausbreitung über der absorbierenden Oberfläche) systematisch unter denen des Südfahrstreifens (mit Schallausbreitung über der reflektierenden Oberfläche) liegen. Weiterhin lässt sich erkennen, dass die ermittelten maximalen Schalldruckpegel der einzelnen Messfahrten mit dem gleichen Reifen für das OPAR-Feld für den Nordfahrstreifen systematisch unter denen des ZWOPA-Feldes liegen. In Bild 4.5-41 und Bild 4.5-42, in denen die Ergebnisse aller Testreifen nach Testfeldern unterschieden aufgeführt sind, ist dies nochmals verdeutlicht dargestellt.

Somit ergibt sich für den Nordfahrstreifen eine Verbesserung durch die Resonatoren von 1,5 dB bis 2 dB. Auf dem Südfahrstreifen kann durch den Einsatz der Resonatoren keine nennenswerte Verbesserung festgestellt werden.

In Bild 4.5-43 sind zusätzlich die spektralen Auswertungen der Vorbeifahrten auf der Nordfahrbahn dargestellt. Die Ergebnisse stellen Mittelwerte über alle Reifen dar. Das obere linke Diagramm gilt für 50 km/h, das oben rechts für 80 km/h; die unteren Diagramme links für 100 km/h und rechts für 120 km/h.

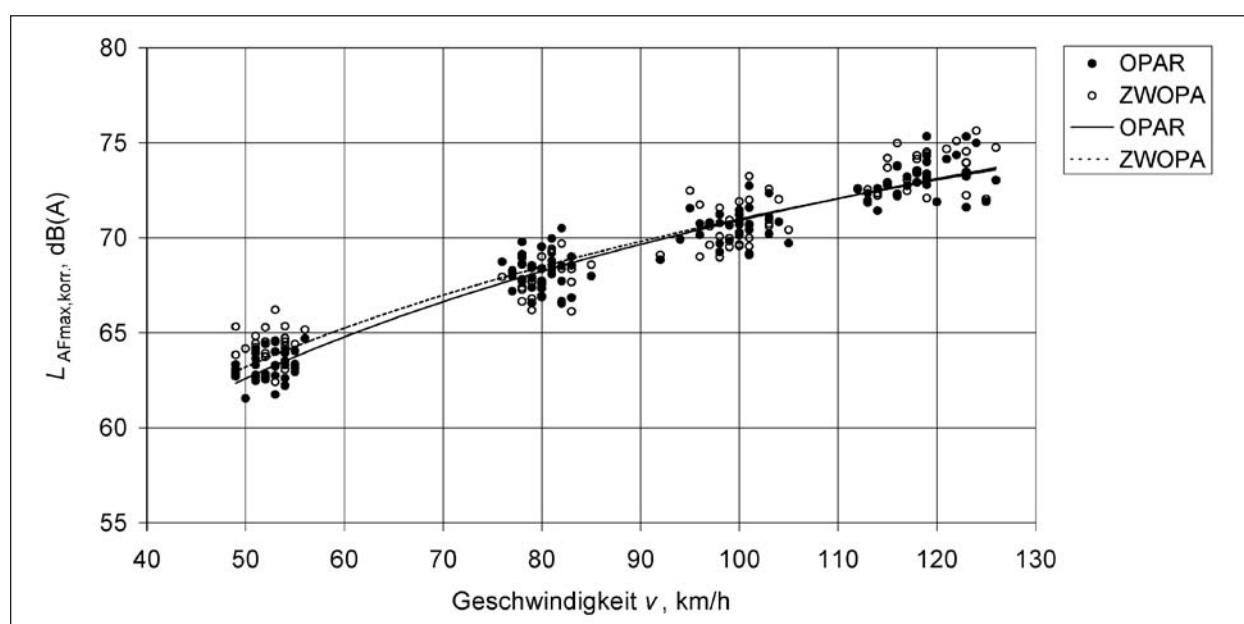


Bild 4.5-41: Messergebnisse aller Messreifen für den Südfahrstreifen

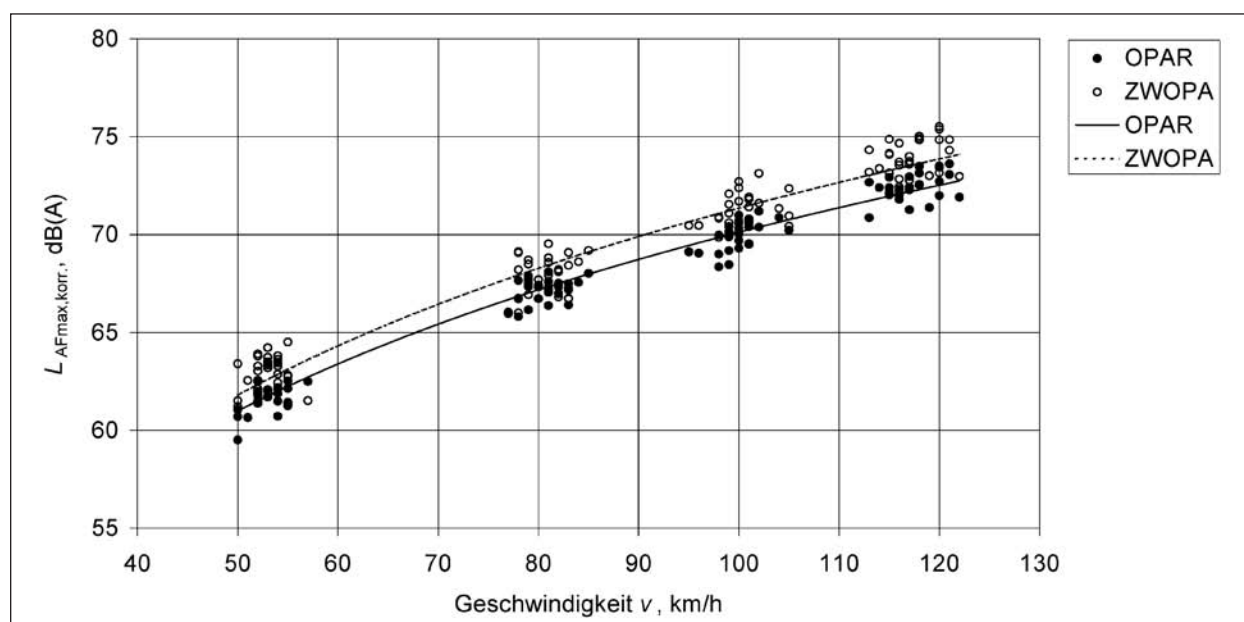


Bild 4.5-42: Messergebnisse aller Messreifen für den Nordfahrstreifen

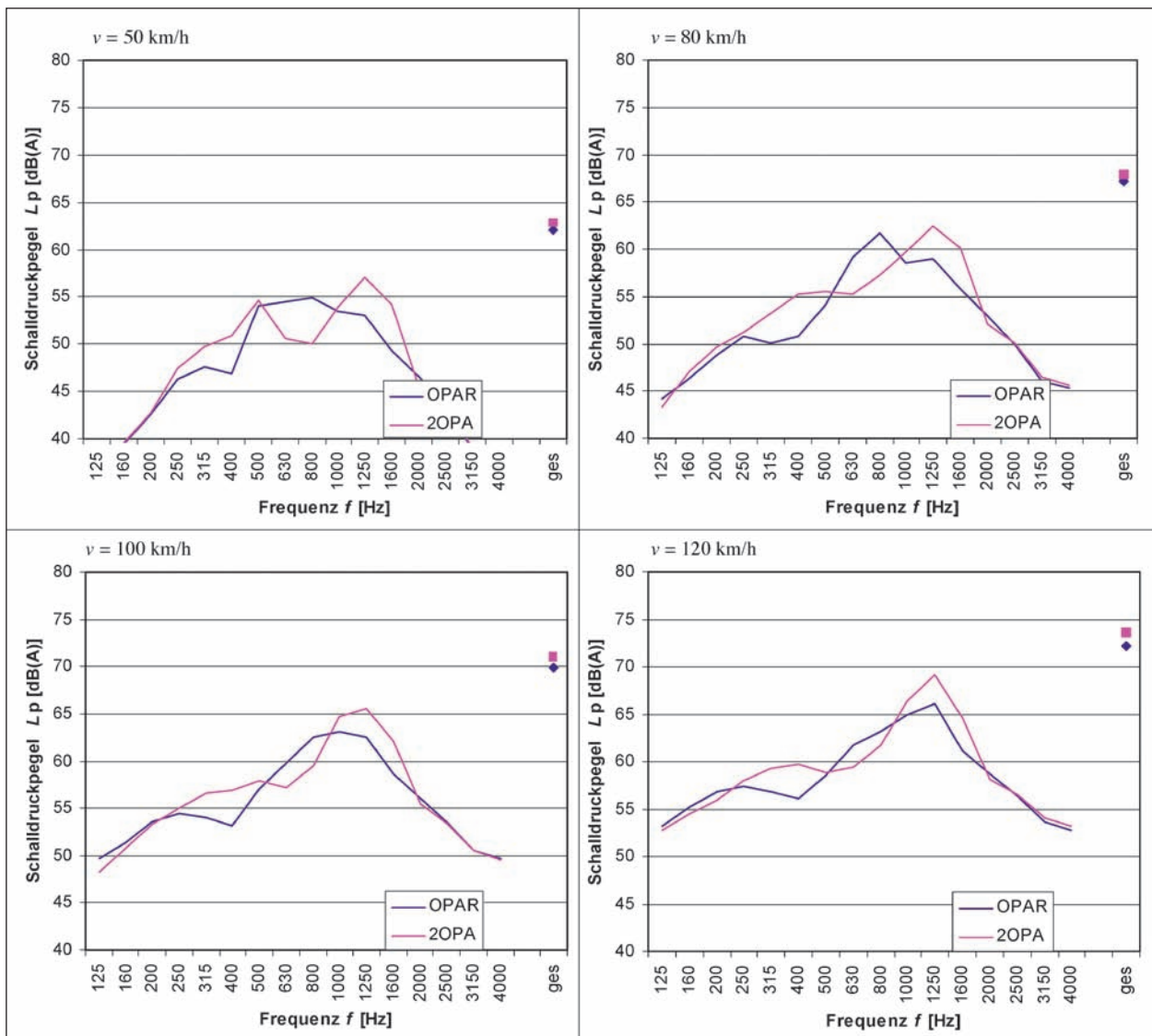


Bild 4.5-43: Spektrale Darstellung der Vorbeifahrtpegel für unterschiedliche Geschwindigkeiten; Nordfahrstreifen

Durch die spektralen Darstellungen kann der Einfluss der Resonatoren gut nachgewiesen werden. Im Frequenzbereich zwischen 1.000 Hz und 1.600 Hz, auf den die Resonatoren abgestimmt sind, liegen die Schalldruckpegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche auf dem Resonatorenfeld für jede Geschwindigkeit unter denen des Referenzfelds (ZWOPA). Es fallen jedoch noch zwei weitere erhebliche Unterschiede auf. In den Terzbändern von 500 bis 800 Hz sind auf dem Resonatorenfeld für jede Geschwindigkeit höhere Schalldruckpegel festzustellen als auf dem ZWOPA-Testfeld. In diesem Frequenzbereich liegt eigentlich die Wirkung des offenporigen Absorbers ZWOPA mit einer Schichtdicke von 8,5 cm. Die Wirkung dieses Absorbers, der bei dem Resonatorenfeld einen Teilabsorber dar-

stellt, lässt in der Kombination mit den Resonatorelementen offenbar nach. Dies hat offenbar mit der deutlich geringeren Fläche des 8,5 cm dicken offenporigen Teilabsorbers im Resonatorenfeld zu tun.

Das Resonatorenfeld setzt sich aus drei Teilabsorbieren zusammen:

- offenporiger (poröser) Absorber mit 8,5 cm Schichtdicke:

Dies ist der Teilabsorber, der sich aus den Teilflächen zusammensetzt, in denen die Lücken zwischen den Resonatorelementen mit 8,5 cm dickem OPA-Mischgut aufgefüllt sind. Die Teilfläche macht rund 50 % der Gesamtfläche aus.

- offenporiger (poröser) Absorber mit 5,5 cm Schichtdicke:

Dies ist der Teilabsorber, der sich aus den Teilflächen zusammensetzt, in denen die Resonatorelemente mit 5,5 cm (3 cm + 2,5 cm) dickem OPA-Mischgut überdeckt sind. Diese Teilfläche macht ebenfalls rund 50 % der Gesamtfläche aus.

- Gesamtheit der Resonatoren.

Betrachtet man die Fläche der porösen Absorber, wird die durchgehend 8,5 cm dicke Schicht des zweischichtigen Offenporigen Asphalt durch eine um 50 % kleinere Schicht mit 8,5 cm Schichtdicke und eine Schicht mit 5,5 cm Dicke ersetzt. Die äquivalente Absorptionsfläche des 8,5 cm dicken Absorbers wird also halbiert und durch eine ebenso große Fläche eines 5,5 cm dicken Absorbers mit einem aufgrund der geringeren Schichtdicke höherfrequenten Absorptionsmaximum ergänzt. Dies könnte die Zunahme des Schalldruckpegels im Frequenzbereich zwischen 500 und 800 Hz für das Resonatorenfeld erklären.

Der zweite Unterschied besteht in einer im Vergleich zum ZWOPA-Testfeld deutlich größeren Wirksamkeit des Resonatorenfelds für die Vorbeifahrgeräusche im Frequenzbereich zwischen 250 und 400 Hz. Die Pegelunterschiede betragen zwischen 3 und 5 dB. Die physikalische Ursache für diesen Effekt kann noch nicht erklärt werden und bedarf weiterer Untersuchungen. Sollte sich dieser Effekt reproduzierbar nachweisen lassen, könnte sich ein weiterer Vorteil des Resonatorenfelds bestätigen. Offenporiger Asphalt mit Resonatoren wäre bei den im Hinblick auf die Übertragung von Verkehrsgeräuschen über große Entfernungen wichtigen tiefen Frequenzen ebenfalls wirksamer als vergleichbare reine Offenporige Asphalte.

4.6 Teilprojekt „Akustische Optimierung von Lamellen-Fahrbahnübergängen für lange Brücken“

4.6.1 Lärmindernde Ausbildung der Fahrbahnanschlüsse

Dr. Joachim Braun
Firma RW Sollinger Hütte
Uslar

4.6.1.1 Zielsetzung

Unser modernes Verständnis von Umweltschutz schließt den Schutz vor Lärm ein, besonders den Schutz vor Verkehrslärm. Eine Lärmquelle sind die Fahrbahnübergänge in Lamellenbauweise für Straßenbrücken.

Fahrbahnübergänge zwischen Straßen und Brücken sind notwendig, um Längenänderungen der Brücke als Folge von Temperaturänderungen und Verkehrsbelastungen auszugleichen. Von den ca. 35.000 Brücken der Bundesfernstraßen haben ca. 5.800 eine Länge über 30 m. Für diese Bauwerke eignen sich Fahrbahnübergänge mit Lamellenstruktur. Schätzungsweise 5 %, also ca. 300, dieser Brücken befinden sich in der Nähe von Besiedlungen.

Werden Fahrbahnübergänge zwischen Brücken und Straßen von Kraftfahrzeugen überrollt, entstehen besonders bei solchen Fahrbahnübergängen in wasserdichter Lamellenbauart nach [1] Überfahrgeräusche (Vorbeirollgeräusche), die Anlieger oft als Störung empfinden. Seit ca. 30 Jahren werden bevorzugt diese Fahrbahnübergänge in Lamellenbauweise verwendet, deren Querorientierung der Lamellen in der Fahrbahnoberfläche Lärm verursacht (Waschbretteffekt). Bei dem Lärm handelt es sich um pulshaltige, schlagartige Geräusche, die sich von den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen stark abheben.

Ursachen dafür liegen sowohl in der Konstruktion der Fahrbahnübergänge als auch im Einbauverfahren. Im Forschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ sollten die Möglichkeiten einer verbesserten Einbautechnologie für Fahrbahnübergänge und die Möglichkeiten der inneren und äußeren Dämpfung des Lärms beim Überfahren eines Fahrbahnübergangs durch die Firma RW Sollinger Hütte untersucht werden.

Dazu gehörten auch die Untersuchungen über die Weiterentwicklung eines Fahrbahnübergangs mit einem speziell konstruierten extrudierten Elastomerprofil und mit Komponenten aus geräuschdämpfenden Materialien. Das neu entwickelte Elastomerprofil soll mehrere Funktionen erfüllen: Neben der bekannten Dichtungsfunktion (wasserdichte Oberfläche) kann das Profil eine ebene Oberfläche des Lamellenübergangs bewirken und ist geeignet, die Spaltöffnungen zwischen den Mittel- und Randprofilen zu steuern.

Geräuschdämmende Materialien sind sowohl Elastomerelemente, die an den Kontaktstellen zwischen den tragenden Stahlkomponenten eingebaut werden, als auch tragende Komponenten aus speziellen Kunststoffen.

Die neue Einbautechnologie soll bewirken, dass an den Übergangsstellen vom Fahrbahnübergang zur Straßenoberfläche größtmögliche Ebenheit erzielt wird. Die ebene Oberfläche ist eine der wichtigsten Voraussetzungen, um den Lärm zu reduzieren, der durch das Überrollen durch Pkw und Lkw verursacht wird.

Da die Lamellen-Bauart nach langjährigen aufwändigen Entwicklungen ein sehr hohes Niveau hinsichtlich Funktionstüchtigkeit und Lebensdauer erreicht hat und vielfach im konkreten Fall die einzige sinnvolle technische Lösung darstellt, sollen im Rahmen des Fördervorhabens „Leiser Straßenverkehr 2 (LeiStra 2)“ akustische Verbesserungen der Lamellenbauart in dem Sinn erreicht werden, dass deren Schallemission nicht wesentlich über denjenigen der angrenzenden Straßenoberfläche liegt.

Dazu sollte an die Erfahrungen aus Forschungsvorhaben LeiStra 1 angeknüpft werden.

Gegenstand der Untersuchungen durch die RWSH waren:

- Dämpfung der Wirkung dynamischer Belastung im Hinblick auf die Lärminderung,
- lärmindernde Ausbildung der Fahrbahnanschlüsse.

4.6.1.2 Ausgangssituation

Es sind bereits vor Beginn des Förderprojektes durch verschiedene Hersteller, darunter RW Sollinger Hütte, GmbH Anstrengungen zur Lärminderung an den Lamellen-Fahrbahnübergängen unter-

Joint type	Correlation: $L/\log(v)$ in dB(A)	Sound level in dB(A)		
		60 km/h	80 km/h	100 km/h
Lamella joint (reference)	$L = 15,0 + 39,0 \cdot \log(v)$	84,3	89,2	93,0
Lamella joint with sinus surface	$L = 17,1 + 35,1 \cdot \log(v)$	80,1	84,5	87,9
Lamella joint with gap filling elastomeric profile	$L = 11,4 + 38,2 \cdot \log(v)$	79,3	84,1	87,8
T-Mat joint T40	$L = 2,2 + 43,0 \cdot \log(v)$	78,7	84,0	88,2
T-Mat joint T90	$L = 0,4 + 43,6 \cdot \log(v)$	77,9	83,4	87,6

Tab. 4.6.1-1: Vorbeirollpegel mit der Korrelation $L = f(\log(v))$

nommen worden. Umfassende Untersuchungen dazu sind u. a. in [3] bis [6] dargestellt.

Zur lärmtechnischen Verbesserung von Lamellen-Übergängen wurden z. B. so genannte Wellen- oder Rautenbleche mit Schweißnähten oder mit vorgespannten Schraubenverbindungen auf den Obergurten der Mittel- und Randprofile dieser Fahrbahnübergänge befestigt. Diese Lösung brachte gute Erfolge. Insgesamt aber werden solche Konstruktionslösungen hinsichtlich der Unterhaltsarbeiten an Fahrbahnübergängen (Verschmutzung durch eingeschränkten Selbstreinigungseffekt) als nicht vorteilhaft beurteilt, d. h., die Gebrauchstauglichkeit ist eingeschränkt. Diese Konstruktionslösungen müssen verbessert oder durch andere Konzeptionen ersetzt werden. Dabei spielt neben der statischen Tragfähigkeit auch die Betriebsfestigkeit eine Rolle.

Die RWSH hat im Zeitraum 2000 bis 2001 bei der BAST Messungen der Geräuschemission an einfachen Modellen von Fahrbahnübergangsbauarten durchführen lassen [2]. Dieses Projekt kann als ein direktes Vorläuferprojekt zum TV 3170 betrachtet werden, dessen Ergebnisse zu weiteren Aktionen in dieser Richtung ermutigten. In Tabelle 4.6.1-1 und Bild 4.6.1-1 sind die Ergebnisse des Projektes zusammenfassend dargestellt. Gemessen wurde nach dem Verfahren „Kontrollierte Vorbeifahrt“. Gemäß „Verfahren zur Messung der Geräuschemissionen von Straßenoberflächen – GESTrO-92“ kam die Kontrollierte Vorbeifahrtmethode zum Einsatz.

L	Lamellenübergang, Grundkonstruktion,
S	Lamellenübergang mit Sinusblechen,
Gs	Lamellenübergang mit fugenfüllendem Profil,
Gm, Gb	Mattenübergänge mit verschiedenen breiten Elastomermatten (T40, T80).

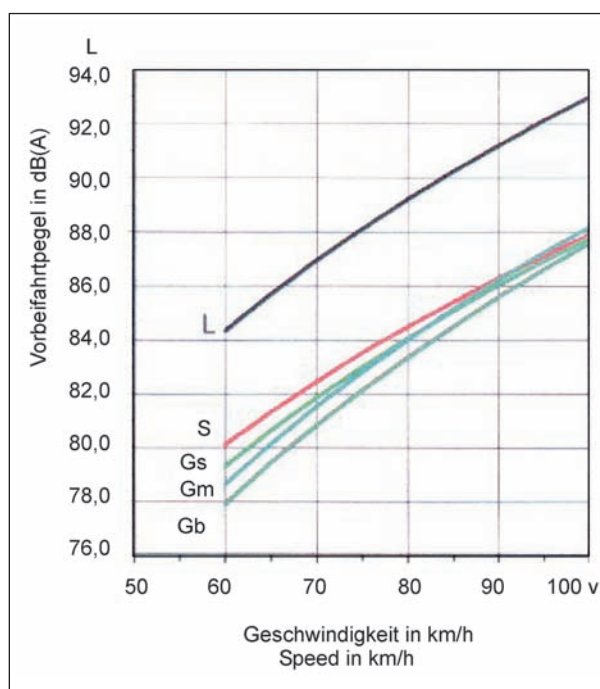


Bild 4.6.1-1: Abhängigkeit der Vorbeirollpegel von der Rollgeschwindigkeit

Bild 4.6.1-8 zeigt, dass bei Verwendung eines fugenfüllenden Elastomerprofils eine Pegelreduzierung von ca. 5 dB(A) gegenüber der Grundkonstruktion des Lamellenübergangs erreicht wurde.

4.6.1.3 Methodik

Nachdem an der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) bereits Versuche mit sehr einfachen Modellen von Fahrbahnübergangsbauarten [2] und das Forschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ Teilprojekt TP 3171 – Fahrbahnübergänge [3] erfolgreich abgeschlossen waren, sollte an die positiven Erfahrungen aus [3] angeknüpft werden in dem Sinn, dass Messungen der Vorbeirollgeräusche unter praxisnahen Bedingungen durchgeführt werden können. Dazu gehörten:

- Fahrbahnen im Freien mit Oberflächen ähnlich denen im öffentlichen Straßenbau, ausreichender Fahrbahnlänge und -breite und eine praxisrelevante Fahrzeugauswahl,
- realitätsnahe Versuchskörper der zu prüfenden Fahrbahnübergänge und entsprechende Einbaubedingungen (Bilder 4.6.1-2 und 4.6.1-3).

Planung und Ablauf des Vorhabens

Es sollten die

- die lärmindernde Ausbildung der Fahrbahnanschlüsse und
- die Dämpfung der Wirkung dynamischer Belastung im Hinblick auf die Lärminderung

sowohl ingenieurtheoretisch (soweit möglich) als auch versuchstechnisch realitätsnah im Freien und bei Bedarf auch im Prüfstand der BAST untersucht werden.

Für die Messung der Vorbeirollgeräusche an den Fahrbahnübergängen in Lamellenbauweise stand zunächst das Versuchsgelände Sperenberg zur

Verfügung. Es handelt sich um einen aufgelassenen Militärflugplatz, dessen Rollbahnen sich für die Messungen eigneten.

Als Versuchskörper wurden der Lamellenübergang aus dem ersten Forschungsprojekt wiederverwendet und für das Projekt LeiStra 2 mehrfach umgebaut und angepasst.

Das gilt auch für die Nutzung der speziell präparierten Vertiefung in der Rollbahn zur Aufnahme der Fahrbahnübergänge, quer zur Fahrtrichtung mit einer Länge von ca. sieben Metern, Querschnitt gemäß Bild 4.6.1-2.

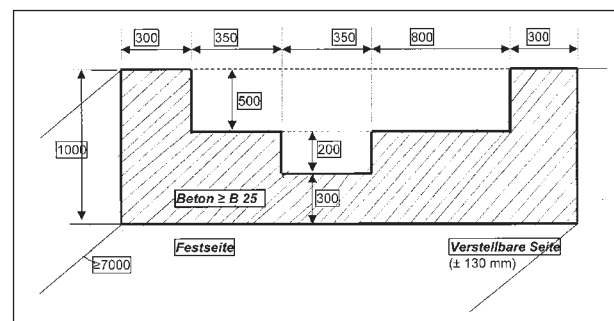


Bild 4.6.1-2 Querschnitt der Vertiefung in der Rollbahn (Maße in mm)



Bild 4.6.1-3: Einbausituationen in Sperenberg

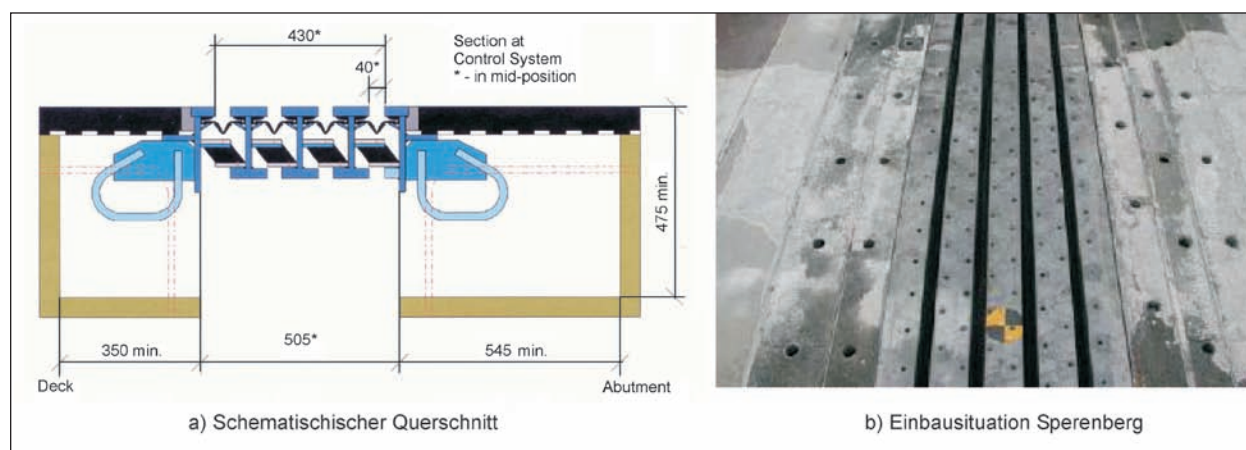


Bild 4.6.1-4: Versuchskörper Lärmindernde Ausbildung der Fahrbahnanschlüsse

Konstruktion der Versuchskörper

Die Versuchskörper nach Bild 4.6.1-4 bis 4.6.1-6 wurden unter Berücksichtigung der speziellen Bedingungen im Versuchsfeld Sperenberg mit denselben Verfahren und Hilfsmitteln (CAD-Systemen) konstruiert wie Auftragskonstruktionen. Damit konnte auf bekannte Konstruktionsverfahren zugegriffen werden.

Neben den Versuchskörpern sind Adapter und Unterkonstruktionen berechnet und konstruiert worden, die eine schnelle Umstellung auf unterschiedliche Öffnungsweiten der Fahrbahnübergänge und Umrüsten der einzelnen Versuchskörper erleichterten. Dadurch konnten vor allem die Anwesenheit des Messteams im Versuchsfeld und dessen An- und Abreiseaufwendungen minimiert werden. Mit der Konstruktion der Versuchskörper wurde unmittelbar nach Projektbeginn gestartet.

An- und Abtransport, Ein-, Um- und Ausbau der Versuchskörper und die Bereitstellung geeigneter Hebezeuge in Kooperation mit einem in der Nähe von Sperenberg ansässigen Unternehmen wurden mit der Messdurchführung genau abgestimmt, nicht zuletzt wegen der hohen Kosten für Transport und Hebezeuge. Die Versuchskörper wurden durch Mitarbeiter des Bereiches Außenmontage der Fa. RW Sollinger Hütte ein- und ausgebaut und umgerüstet. Außerdem waren während der Messfahrten immer zwei Monteure mit Montagewagen anwesend.

Daraus ergab sich die spezielle Ablaufplanung nach Tabelle 4.6.1-2.

Messprogramme

Das Messprogramm ist in Abstimmung mit dem Messteam der BAST festgelegt worden. Eine detail-



Bild 4.6.1-5: Versuchskörper Dämpfung der Wirkung dynamischer Belastung

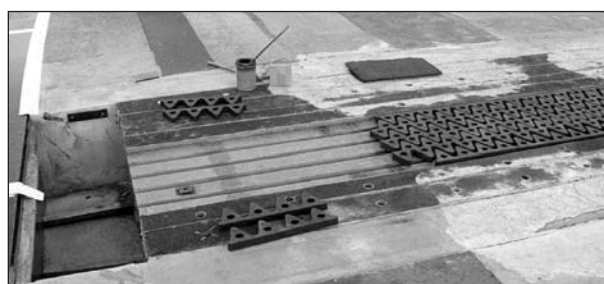


Bild 4.6.1-6: Vorbereitung des Versuchskörpers für die Dämpfung der Wirkung dynamischer Belastung

lierte Beschreibung enthalten die Kapitel 4.6.1.4 und 4.6.1.5.

Es wurden Messfahrten und Messungen wie folgt durchgeführt:

- Fahrbahnübergänge in drei Öffnungsstellungen (größte, kleinste und mittlere Öffnung),
- Versuchskörper wurden in jeder Öffnungsstellung auf zwei verschiedenen Fahrspuren befahren (in Abhängigkeit von der Stützträgerposition),

- Versuchskörper wurden in jeder Öffnungsstellung und Fahrspur mit drei Geschwindigkeiten befahren.

4.6.1.4 Projektteil: „Dämpfung der Wirkung dynamischer Belastung im Hinblick auf die Lärminderung“

Dämpfungen sollen erreicht werden durch

- Veränderungen an den internen Verbindungen,
- Verwendung dämpfender Materialien für die Last abtragenden Elemente,
- die akustische Entkopplung des Fahrbahnübergangs vor allem von der (Stahl-)Brücke.

Vorbereitende Untersuchungen zur Dämpfung dynamischer Belastung

Forderungen und Festlegungen in relevanten Normen und anderen technischen Regeln sind nicht bekannt.

Zunächst wurde der aktuelle Stand zur Dämpfung dynamischer Belastung bei Fahrbahnübergängen analysiert mit folgenden Schwerpunkten:

a) Vorbemerkungen

Als eine Lösung zur Reduzierung der Schallemissionen wird die Verbesserung der Dämpfungseigenschaften wie folgt untersucht:

- Einbau von Dämpfungselementen im Fahrbahnübergang,

- Verwendung von Materialien mit guter Dämpfungscharakteristik für die Haupttragelemente.

b) Möglichkeiten zum Einbau von Dämpfungselementen im Fahrbahnübergang

Es wird untersucht, ob durch die Verwendung dämpfender Elemente in den Verbindungen zwischen den einzelnen Komponenten eines Fahrbahnübergangs in Lamellenbauweise die Schallemission beim Überfahren verringert werden kann.

Die Bilder 4.6.1-8a und b zeigen die Möglichkeiten zum Einbau von Dämpfungselementen an den Lamellenübergängen des Typs WSG.

c) Materialspezifikation

Zunächst wurden verfügbare Elastomerlager verschiedener Hersteller untersucht. Bild 4.6.1-7 zeigt ein unbewehrtes Lager mit Noppenausbildung und ein textilbewehrtes Lager.

Diese Lager erwiesen sich als ungeeignet, weil die aufnehmbaren Druckspannungen bis etwa 5 N/mm^2 für den Einsatzzweck im Fahrbahnübergang viel zu klein waren.

Bild 4.6.1-9 zeigt den Zusammenhang zwischen Druckspannung und Einfederung, abhängig von der Lagerdicke. Diese Einfederungen sind zu groß für die Anwendung in den Schnittstellen des Lamellenübergangs.

Im Zusammenhang mit anderen Entwicklungen wurde der Kunststoff UHMWPE (Polyethylen mit ultra-hoher molekularer Masse (Ultra-High

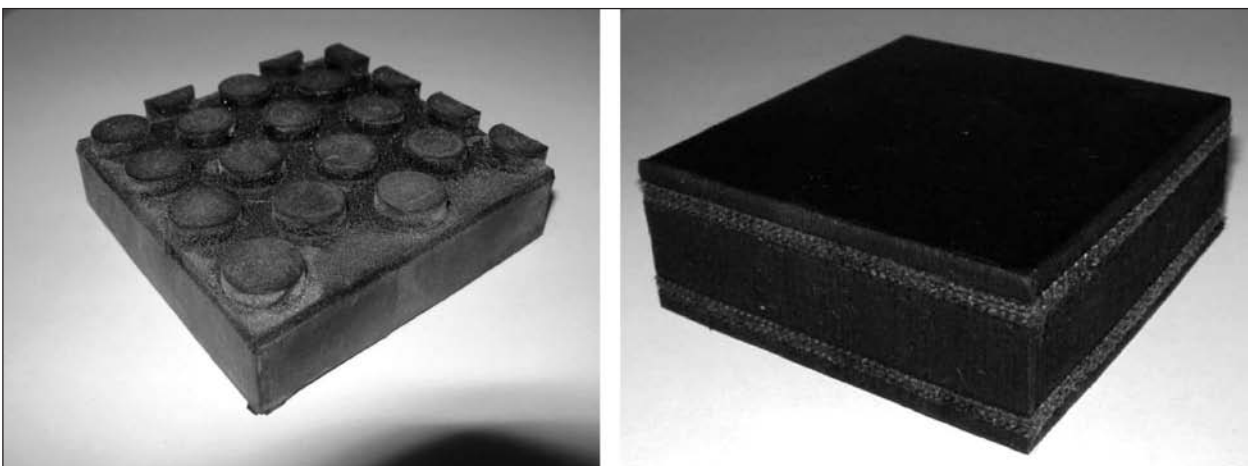


Bild 4.6.1-7: Spezielle Dämpfungselemente

Molecular Weight Poly Ethylene) gefunden, der sich u. a. durch hervorragende Dämpfungseigenschaften auszeichnet.

Mit diesem Kunststoff gibt es international bereits gute Einsatzerfahrungen. An der staatlichen Materialprüfungsanstalt Stuttgart (MPAS) sind 1998 Gleitreibungsversuche mit Brückenlagerkomponen-

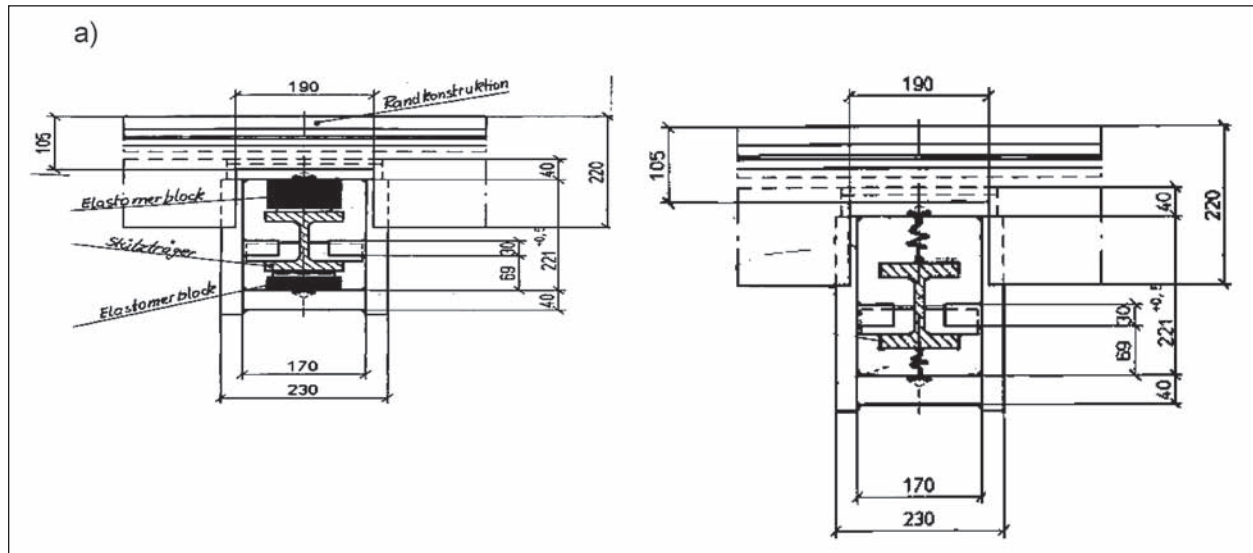


Bild 4.6.1-8a: Einbau der Dämpfungselemente und Rechenmodell

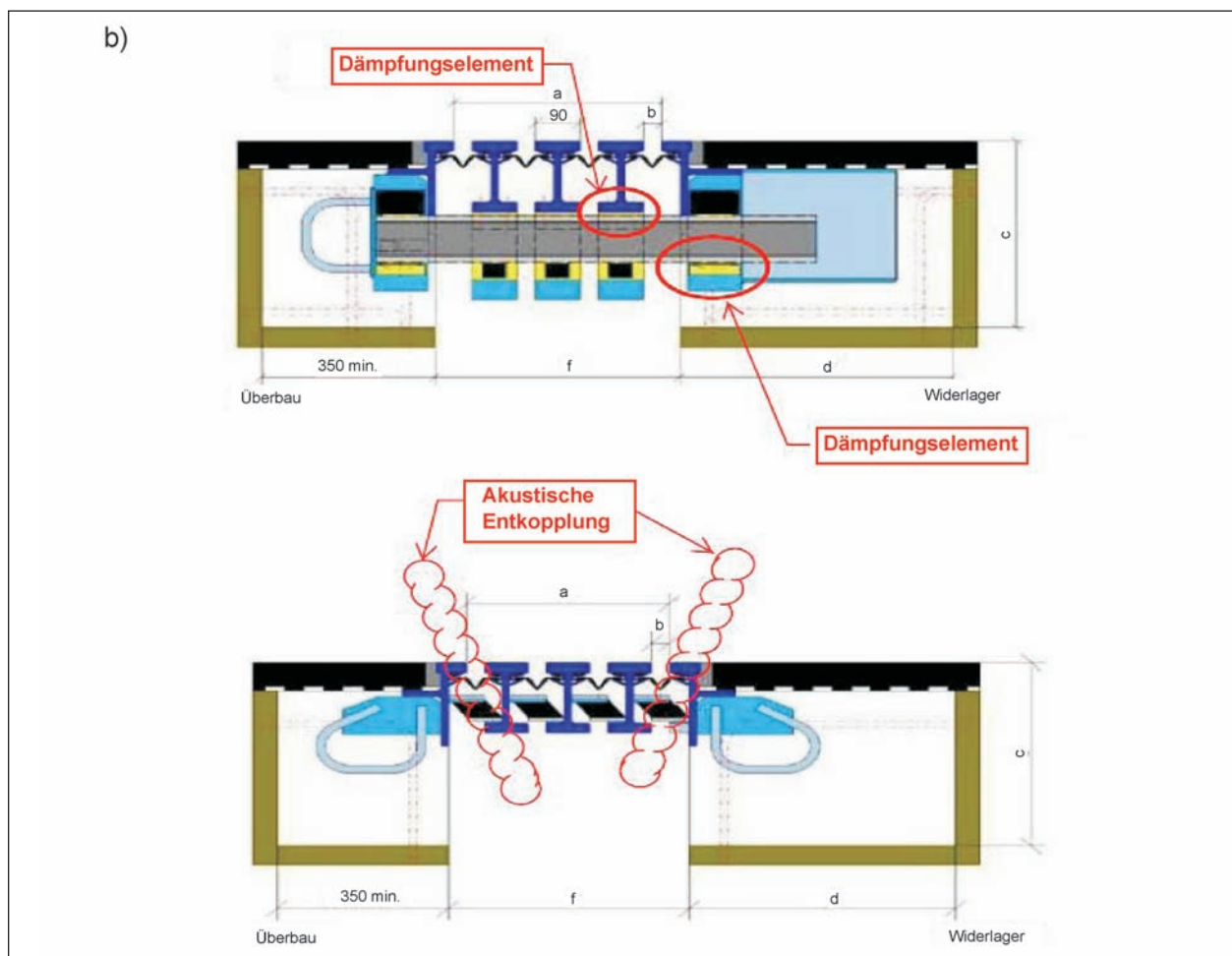


Bild 4.6.1-8b: Einbau der Dämpfungselemente und Rechenmodell

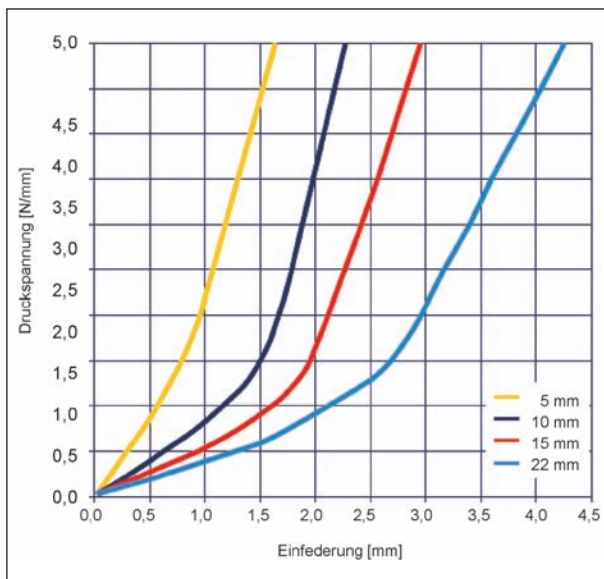


Bild 4.6.1-9: Kennlinie Druckspannung und Einfeldung

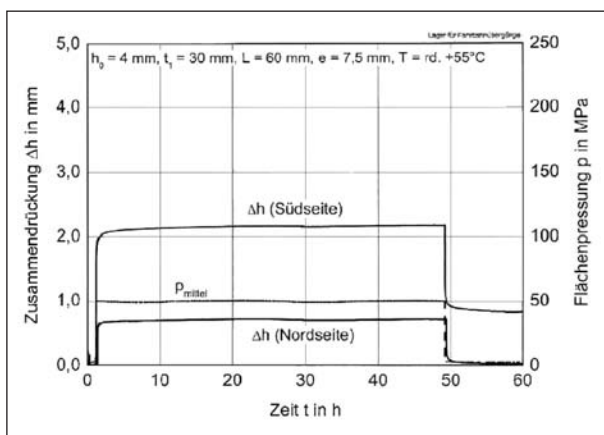


Bild 4.6.1-10: MPE-Kennlinie Druckspannung und Einfeldung – zeitabhängig

ten im Auftrag von Rijkswaterstaat Bouwdienst, Amsterdam, durchgeführt worden [9].

Generell zeichnet sich UHMWPE durch eine hohe Verschleißfestigkeit, hohe Kerbschlagzähigkeit, sehr gute Dämpfungseigenschaften und eine geringe Gleitreibung aus. Deshalb findet dieser Werkstoff u. a. Einsatz in der Fördertechnik (Führungsleisten), im Schüttguthandling (Auskleidung), in der Papierindustrie (Entwässerungselemente) sowie beim Hafenaufbau (Fender) und bei Offshore-Anlagen. Zwischenzeitlich sind auch Führungen von Brückenlagern als Gleitkombination mit UHMWPE ausgestattet worden.

Die Versuchsergebnisse wurden unter Versuchsbedingungen erzielt, die denen bei der Verwendung von UHMWPE-Elementen in Fahrbahnübergängen nahekommen.

Allerdings sind die Dämpfungseigenschaften bisher nicht explizit untersucht worden, weil sie für die o. g. Einsatzzwecke noch keine besondere Rolle spielen.

Zunächst sind folgende geometrischen und mechanischen Eigenschaften untersucht worden:

- Zusammendrückbarkeit,
- statische Beanspruchbarkeit auf Druck.

Als Versuchskörper sind entsprechend den geplanten zukünftigen Einsatzbedingungen UHMWPE-Scheiben mit einem Durchmesser von $D = 70$ mm und einer Dicke von $t = 28$ mm verwendet worden, die Kammerungstiefe betrug 24 mm. Der Kunststoff ragte also um 4 mm über den Rand der Fassung hinaus.

d) Versuchsergebnisse

Ein Ergebnis der Druckverformung zeigt das Bild 4.6.1-10.

Folgende Bedingungen sind nach Empfehlung der MPAS aus Erkenntnissen von statischen Vorversuchen dabei einzuhalten:

- Druckspannung: zul $\sigma \leq 50$ N/mm² (altes Bemessungskonzept),
- Gleitspalt: $h \leq 4$ mm (unbelasteter Zustand) und
- Kammerungstiefe ca. 26 mm.

Das Material ist genau zu spezifizieren.

e) Weitere Untersuchungen

Die Zielsetzung weiterer Komponentenversuche ist die Bestimmung der Tragfähigkeiten und der Gebrauchstauglichkeit nach vier Kriterien:

- Ermittlung der dynamischen Traglast der Stützlager (Dauerschwellversuch),
- Ermittlung der statischen Traglast der Stützlager,
- Ermittlung der Reibbeiwerte und des Abriebs,
- Ermittlung eines Dämpfungskoeffizienten.

Ergebnisse der Analyse zur Dämpfung dynamischer Belastung

a) Analyse

Es liegen mehrere Veröffentlichungen vor, die vor allem auf Schallpegelmessungen beim Überfahren

von Fahrbahnübergängen beruhen, z. B. Messungen in Sperenberg im Rahmen von LeiStra 1.

Direkte analytische Aussagen über Dämpfungseigenschaften lassen sich daraus nicht herleiten.

Öffentlich zugängliche analytische Untersuchungen zu diesem Thema sind – bis auf die Angaben in b) – nicht bekannt.

Wie die Messungen an einem Lamellenübergang mit Fugen füllendem Profil im Rahmen von LeiStra 1 zeigten, ist z. B. die starke interne Verspannung der Lamellen untereinander und gegen die Randprofile allein nicht ausreichend, um die Überfahrgeräusche zufrieden stellend zu dämpfen.

Die interne horizontale Vorspannkraft betrug ca. 30 bis 40 kN pro Meter Länge des Fahrbahnübergangs, insgesamt also ca. 210 bis 280 kN.



Bild 4.6.1-11: Dämpfung durch Fugen füllende Dichtprofile aus LeiStra 1

Die Dämpfung wird mathematisch so beschrieben, dass man zur Differentialgleichung der ungedämpften harmonischen Schwingung eines Oszillators einen Dämpfungsterm hinzugefügt:

Die Gleichung beschreibt den ungedämpften harmonischen Oszillator, dessen Lösung harmonische Funktionen sind.

Die Dämpfung ist im einfachsten Fall eine geschwindigkeitsabhängige Größe. Darin ist k die Dämpfungskonstante.

Für die analytische Untersuchung der Dämpfung des kompletten Fahrbahnübergangs werden grundsätzlich die skizzierten Federmodelle verwendet.

Vorrang für die analytische Untersuchung der Dämpfung des kompletten Fahrbahnübergangs hat zunächst das Federmodell mit der vertikalen Belastung.

Zwei interne Verbindungen wurden dabei als Erfolg versprechend untersucht und werden im Rahmen des gesamten Dämpfungskonzeptes auch für die Versuche in Sperenberg entsprechend vorbereitet:

- Auflagerpunkte der Stützträger in den Randkonstruktionen und
- Verbindung zwischen Lamelle und Stützträger.

Die Dämpfung in den Auflagerpunkten der Stützträger in den Randkonstruktionen kann dabei vor allem einen Beitrag zur akustischen Entkoppelung des Fahrbahnübergangs vom Bauwerk leisten.

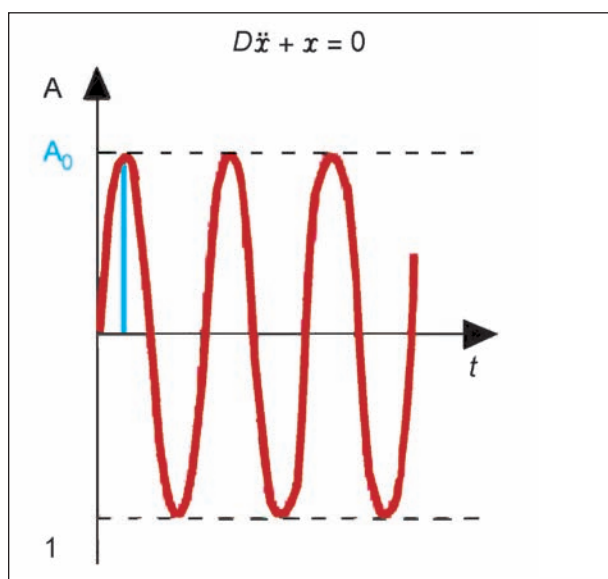


Bild 4.6.1-12: Ungedämpfte harmonische Schwingung

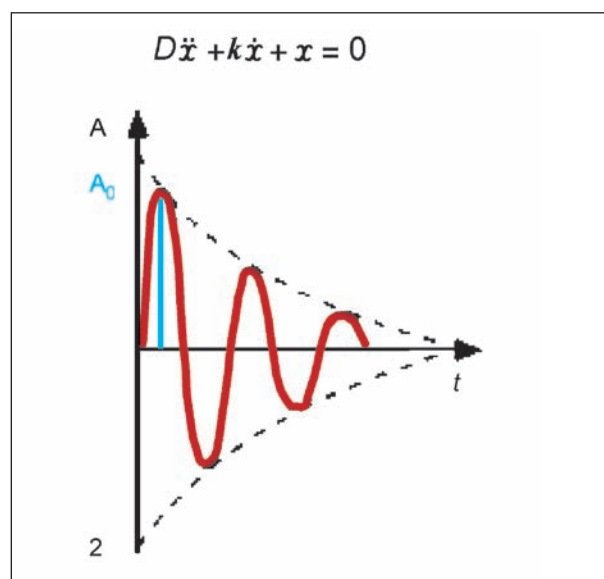


Bild 4.6.1-13: Gedämpfte harmonische Schwingung

b) Erarbeitung eines Gesamt- Dämpfungskonzeptes

Mit der Bearbeitung wurde im Februar 2006 planmäßig begonnen.

- Als erster Teil des Dämpfungskonzeptes wurde der Einsatz dämpfender Materialien für interne Verbindungen der tragenden Komponenten näher untersucht. Dieses Konzept entsprach der bisher üblichen Vorgehensweise zur Dämpfung bei der Konstruktion von Fahrbahnübergängen mit Lamellenstruktur.
- Als zweiter Teil des Dämpfungskonzeptes wurde die weitgehende akustische Entkoppe-

lung des Fahrbahnübergangs von der Brücke untersucht. Dazu wurden die Abstützungselemente des Fahrbahnübergangs im Endquerträger der Brücke mit Hilfe dämpfender Elemente gelagert.

Die geeignete Dämpfungscharakteristik solcher Elemente musste im Versuch bestimmt werden, weil die numerische Simulation vorerst nicht zur Verfügung stand.

Beim Projekttreffen am 9. Mai 2006 in der BAST wurden Gespräche darüber geführt, wie man die interne Dämpfung im PFF simulieren kann. Als problematisch stellte sich die Begrenzung der maxi-

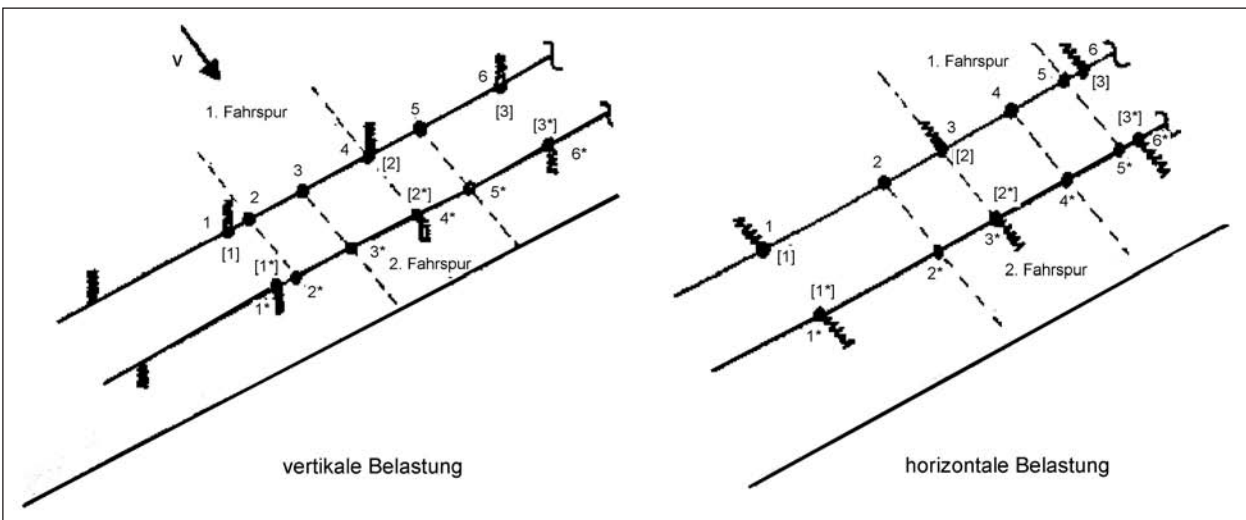


Bild 4.6.1-14: Vertikale und horizontale Schwingungsdämpfung im Fahrbahnübergang

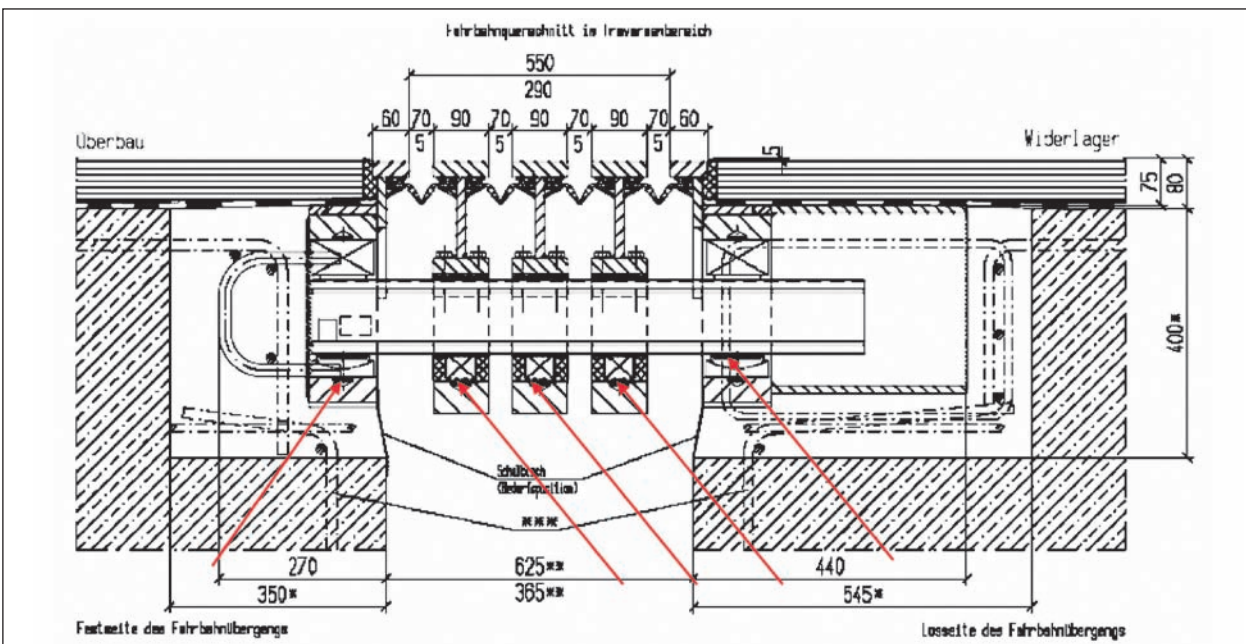


Bild 4.6.1-15: Beispiel für die Dämpfung in den Auflagerpunkten der Stützträger in den Randkonstruktionen

malen Schichtdicke durch die Standardkassetten des PFF heraus.

Es wurde deshalb entschieden, solche Messungen

- an Einzelementen im Labor und
- am kompletten Fahrbahnübergang im Versuchsgelände in Sperenberg

durchzuführen.

Die Einzelemente werden im Labor der Bauhaus-Universität Weimar bestimmt.

Für die Messungen in Sperenberg wurden die in Tabelle 4.6.1-2 dargestellten vier Dämpfungskonzepte in Abstimmung mit der BAST festgelegt.

Die Messungen erforderten einen häufigen Umbau des Fahrbahnübergangs, für den noch keine Erfahrungen vorlagen. Ein Ablaufplan wurde zwischen der BAST und RWSH abgestimmt.

Durchführung der Messungen in Sperenberg [7]

Nach mehrmaliger Verschiebung wegen ungünstiger Witterung wurde im September 2008 der Messplan umgesetzt.

Gemessen wurden in insgesamt vier Messserien, davon

- eine Messserie mit Dämpfungsabdeckung bei konstantem Fugenspalt von 35 mm, je 12 Überfahrten mit vier Geschwindigkeiten,

	Rechnerische Vertikalverschiebungen in mm bei der Überfahrt		
	Vertikal am Auflager des Stützträgers	Vertikal am Auflager des Mittelprofils auf dem Stützträger	Vertikal auf Auflager des Randprofils auf dem Adapter
1. Dämpfungskonzept 1	0,5	0,5	0
2. Dämpfungskonzept 2	1,0	2,0	0
3. Dämpfungskonzept 3	3,0	1,5	0
4. Dämpfungskonzept 4	3,0	1,5	3,0

Tab. 4.6.1-2: Vorgaben für die vertikale Verschiebung der Dämpfungspunkte



Bild 4.6.1-16: Beispiel für den Einbau der Dämpfungsabdeckung in Sperenberg

- eine Messserie ohne Dämpfungselemente,
- eine Messserie Vergleichsmessungen mit Beton-Feld B2 ohne FÜ und Abbau.

Die 2. Messserie mit Lärmschutzelementen ohne Elastomerbeschichtung konnte aus technischen Gründen nicht realisiert werden.

Der auf dem Testgelände Sperenberg im Feld B17 bereits früher eingebaute Lamellen-Fahrbahnübergang WSG 320 (5 Lamellen, 4 Fugen) wurde ausgebaut, im Werk umgebaut und mit Dämpfungsabdeckungen umgerüstet. Danach wurde der Fahrbahnübergang mit einer Fugenöffnung von 35 mm wieder im Feld B17 eingesetzt und an die umgebende Fahrbahn angepasst. Später wurden die Dämpfungsabdeckungen wieder entfernt und der Fahrbahnübergang auf Fahrbahnniveau angehoben.

Die Messungen wurden in Anlehnung an die Vorschriften zur Messung der Reifen-/Fahrbahngeräusch-Emission durchgeführt.

Das angewandte Messprinzip beruht auf dem Verfahren zur Messung des von Reifen verursachten Abrollgeräuschs (Methode der Vorbeifahrt im Leerlauf; Coast-By-Method; Anhang V, Anlage 1 der 2001/43/EG bzw. Annex 3 der ECE-R117). Dabei wird der maximale Schalldruckpegel (A-bewertet, fast: L_{AFmax}) bei einzelnen Überrollvorgängen eines Messfahrzeugs über den eingebauten Fahrbahnübergang gemessen. Neben dem Schalldruckpegel wird die Geschwindigkeit, die das Fahrzeug auf Höhe des Fahrbahnübergangs besitzt, mit erfasst.

Abweichend von den üblichen Verfahren wurden die Fahrten nicht im vorgeschriebenen Geschwindigkeitsintervall von ± 10 km/h um die jeweilige Referenzgeschwindigkeit v_{Ref} (80 km/h bei Pkw-Reifen) mit jeweils 4 Messungen unterhalb und 4 Messungen oberhalb der Referenzgeschwindigkeit durchgeführt. Stattdessen wurden bei vier verschiedenen Referenzgeschwindigkeiten (60, 80, 100, 120 km/h) jeweils 4 Messungen durchgeführt. Eine lineare Regression aus den Wertepaaren $L_{AFmax, i}$ und $\log_{10}(v_i/v_{Ref})$ konnte aufgrund des fahrerischen Könnens des Testfahrers und der damit verbundenen sehr guten Einhaltung der Referenzgeschwindigkeit auf Höhe des Fahrbahnübergangs entfallen. Sie dient normalerweise zur Berechnung des Überrollgeräuschpegels bei der jeweiligen Referenzgeschwindigkeit.

Das Testfahrzeug wurde auf der Teststrecke auf eine bestimmte Geschwindigkeit beschleunigt, in

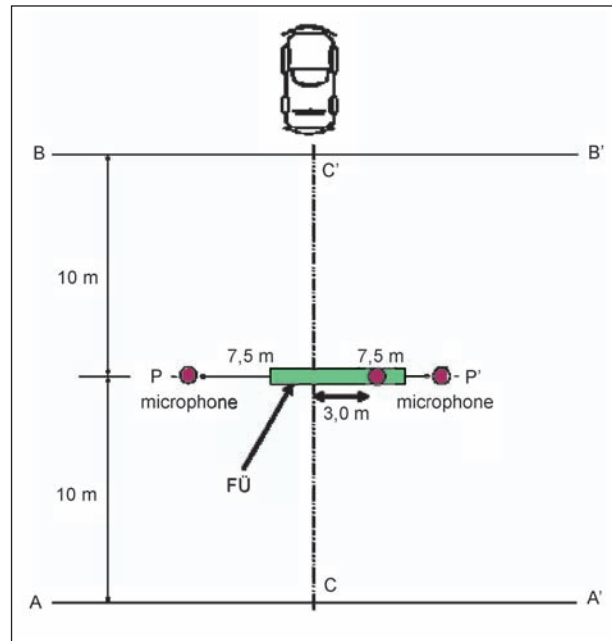


Bild 4.6.1-17: Mikrofonposition



Bild 4.6.1-18: Testfeld B17 mit vorbereitetem Fahrbahnübergang/dämpfende Abdeckung

ausreichender Entfernung zum 20 m langen Beton-Testfeld (mit mittig eingebautem Fahrbahnübergang) der Gangwahlhebel in Leerlaufstellung gebracht und der Motor abgeschaltet.

Bei der Überfahrt über den Fahrbahnübergang wurde die Geschwindigkeit gemessen.

Für die Messungen wurde das gleiche Fahrzeug wie bei den früheren Messungen von 2007 eingesetzt. Es handelte sich hierbei um einen VW Passat Variant 1.9 TDi mit manuellem Schaltgetriebe, Leergewicht 1.440 kg, zul. Gesamtgewicht 1.960 kg und zulässigen Achslasten vorn 1.030 kg, hinten 1.060 kg.

Die Anregung des Fahrbahnübergangs wird dadurch erreicht, dass das Messfahrzeug mit entsprechender Geschwindigkeit am Punkt PP' (Bild 4.6.1-17) in Fahrbahnmitte des Messfahrstreifens (Linie CC') über den zu untersuchenden Fahrbahnübergang rollt. Pro Referenzgeschwindigkeit wurde aus vier Überrollvorgängen der maximale A-bewertete Schalldruckpegel L_{AFmax} an den geforderten Mikrofonpositionen gemessen. Für die beidseitige Messung in 7,5 m Entfernung ist das Ergebnis der Mittelwert aus 8 Einzelwerten, für die einseitige Messung in 3 m Entfernung der Mittelwert aus 4 Einzelwerten. Sobald das Prüffahrzeug mit der Vorderkante den Beginn des Testfeldes erreicht hatte (Linie AA'), wurden die Messungen automatisch über eine Lichtschranke gestartet.

Die Aufstellung der Mikrofone erfolgte nach 2001/43 EWG bzw. ECE-R117 beidseitig in einem Abstand von 7,5 m von der Bezugslinie CC' der Fahrbahn (Bild 4.6.1-17) und in einer Höhe von 1,2 m über dem Boden der Fahrbahn (nicht gegenüber der tieferliegenden Landebahn). Zusätzlich wurde wie be-



Bild 4.6.1-19: Mikrofonposition im Testfeld B17

Ein- und Umbau des Versuchskörpers WSG 320						
Oberflächendämpfung durch elastomerbeschichtete Dämpfungsabdeckungen – Spaltöffnung 35 mm/Durchführung der Messungen im Versuchsfeld Flughafen Sperenberg im Zeitraum 10. bis 17. September 2008 (Stand 28. Aug. 2008)						
Messfahrzeug Pkw						
Eine Messserie besteht aus 12 Überfahren wie folgt:						
Vier Geschwindigkeiten 60/80/100/120 km/h, mit jeder Geschwindigkeit werden drei Überfahrten durchgeführt. Zeitaufwand ca. 3 bis 4h/Messserie						
Lfd. Nr.	Datum	Aktionen	zugehörige Unterlagen	beteiligte Personen und Firmen	Fahrzeuge, Maschinen	Anmerkungen
1	15. Aug.	<ul style="list-style-type: none"> Ausbau des vorhandenen Fahrbahnübergangs und Transport in das Werk Uslar 	Zeichnung Nr. 5	Montageteam RWSH	<ul style="list-style-type: none"> Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Mobilbagger mit Haken 	<ul style="list-style-type: none"> Ausbau des WSG und Verladen Transport ins Werk Uslar Sicherung der Messstelle
2	20. Aug. bis 08. Sept.	<ul style="list-style-type: none"> Umbau des WSG und Ausrüstung mit Dämpfungs-Abdeckungen 	Zeichnung Nr. 31	Werkstattteam RWSH		<ul style="list-style-type: none"> Einstellung der Fugen-spalte auf 5 mm Adapter in Sperenberg sind entsprechend vorbereitet
3	09. Sept.	<ul style="list-style-type: none"> Antransport und Einbau WSG mit Dämpfungs-Abdeckungen Fugenöffnung 35 mm 	Zeichnung Nr. 31	Werkstatt/ Montage RWSH	<ul style="list-style-type: none"> Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Mobilbagger mit Haken 	<ul style="list-style-type: none"> Beseitigung der Unfall-schäden Verbesserung Oberflächenqualität der angrenzenden Fahrbahn-beläge
4	10. Sept.	<p>Fertigstellung Einbau</p> <ul style="list-style-type: none"> Richten der Ausgleichsprofile Glättung der Oberfläche in der Umgebung des Fahrbahnübergangs <p>1. Messserie</p> <ul style="list-style-type: none"> Fugenöffnung 35 mm Mit aufgeschraubten Dämpfungs-abdeckungen 	Zeichnung Nr. 31	<p>Montageteam RWSH</p> <p>Messteam BAST</p>	<ul style="list-style-type: none"> Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Mobilbagger mit Haken Messfahrzeug Pkw 	<ul style="list-style-type: none"> Messungen mit aufgeschraubten Dämpfungs-Abdeckungen
5	11. Sept.	<p>Forts./Abschluss 1. Messserie</p> <p>1. Umbau</p> <ul style="list-style-type: none"> Demontage der Dämpfungs-Abdeckungen Montage Lärmschutzabdeckung ohne Elastomerdämpfung Einstellung der Fugenöffnung bleibt bei 35 mm 	<p>Zeichnung Nr. 31</p> <p>Zeichnung Nr. 32</p>	<p>Messteam BAST</p> <p>Montageteam RWSH</p>	<ul style="list-style-type: none"> Messfahrzeug Pkw Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 	<ul style="list-style-type: none"> Messungen mit aufgeschraubten Dämpfungs-Abdeckungen

Bild 4-6-1-20: Ablaufplan für die Messungen

Ein- und Umbau des Versuchskörpers WSG 320 Oberflächendämpfung durch elastomerbeschichtete Dämpfungsabdeckungen – Spaltöffnung 35 mm/Durchführung der Messungen im Versuchsfeld Flughafen Sperenberg im Zeitraum 10. bis 17. September 2008 (Stand 28. Aug. 2008)						
Messfahrzeug Pkw Eine Messserie besteht aus 12 Überfahren wie folgt: Vier Geschwindigkeiten 60/80/100/120 km/h, mit jeder Geschwindigkeit werden drei Überfahrten durchgeführt. Zeitaufwand ca. 3 bis 4h/Messserie						
Lfd. Nr.	Datum	Aktionen	zugehörige Unterlagen	beteiligte Personen und Firmen	Fahrzeuge, Maschinen	Anmerkungen
6	12. Sept.	Forts./Abschluss 1. Umbau 2. Messserie • Fugenöffnung 35 mm • Mit Lärmschutzabdeckung ohne Elastomerdämpfung 2. Umbau • Demontage der Lärmschutzabdeckungen	Zeichnung Nr. 32 Zeichnung Nr. 33	Messteam BAST Montageteam RWSH	• Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 • Messfahrzeug Pkw • Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102	• Messungen mit aufgeschraubten Lärmschutzabdeckungen ohne Elastomerdämpfung zum Vergleich
7	13. Sept. (Sonntag)	Fortsetzung 2. Umbau • Demontage der Lärmschutzabdeckungen • Ausbau des Fahrbahnübergangs • Entfernen der 20 mm dicken Distanzbleche zwischen WSG und Adapter • Einbau des WSG, Fugenöffnung 35 mm bleibt	Zeichnung Nr. 33	Montageteam RWSH	• Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 • Mobilbagger mit Haken	
8	15. Sept.	3. Messserie • Fugenöffnung 35 mm • Ohne Lärmschutzabdeckung	Zeichnung Nr. 33	Messteam BAST	• Messfahrzeug Pkw	• Messungen ohne Abdeckungen zum Vergleich
9	16. Sept.	4. Messserie • Vergleichsmessungen Beton-Feld B2 ohne FÜ und Abbau Beton-Feld B2 ohne FÜ und Abbau		Messteam BAST	• Messfahrzeug Pkw	• Vergleichsmessungen Betonfahrbahn

Bild 4.6.1-20: Fortsetzung

Lfd. Nr.	Datum	Aktionen	zugehörige Unterlagen	beteiligte Personen und Firmen	Fahrzeuge, Maschinen FMSH	Anmerkungen
1	Montag	• Anreise Sperenberg RWSH • Umbau des Fahrbahnübergangs auf Dämpfungskonzept 1	Zeichnung Nr. 5	Montageteam RWSH	Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Mobilbagger mit Haken	
2	Dienstagvorm.	• Fertigstellung des Umbaus des Fahrbahnübergangs • Anreise Messteam	Zeichnung Nr. 5	Montageteam RWSH	Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Mobilbagger mit Haken	
3	Dienstagnachm.	1. Messserie Dämpfungskonzept 1	Messprogramm	Messteam BAST	Messfahrzeug Pkw	• Fahrbahnübergang ist ohne Höhenversatz an den Fahrbahnbelag angeschlossen • Messzeit ca. 4 h
4	Dienstagnachm./abends/nachts	Umbau des Fahrbahnübergangs auf Dämpfungskonzept 2	Zeichnung Nr. 6	Montageteam RWSH	Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Mobilbagger mit Haken	Umbauzeit ca. 8 h

Bild 4.6.1-21: Ein- und Umbau des Versuchskörpers WSG 320 mit Spaltöffnung 35 mm/Durchführung der Messungen im Versuchsfeld Flughafen Sperenberg im Zeitraum Sept./Okt. 2007 (Stand 30. März 2007)

Lfd. Nr.	Datum	Aktionen	zugehörige Unterlagen	beteiligte Personen und Firmen	Fahrzeuge, Maschinen FMSH	Ergebnisse Bewertung Anmerkungen
5	Mittwochvorm.	2. Messserie Dämpfungskonzept 2	Messprogramm	Messteam BAST	Messfahrzeug Pkw	<ul style="list-style-type: none"> Fahrbahnübergang ist ohne Höhenversatz an beiden Seiten an den Fahrbahnbelag angeschlossen Messzeit ca. 4 h
6	Mittwochnachm./ abends/ nachts	Umbau des Fahrbahnübergangs auf Dämpfungskonzept 3	Zeichnung Nr. 7	Montageteam RWSH	Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Mobilbagger mit Haken	Umbau ca. 8 h
7	Donnerstagvorm.	3. Messserie Dämpfungskonzept 3	Messprogramm	Messteam BAST	Messfahrzeug Pkw	<ul style="list-style-type: none"> Fahrbahnübergang ist ohne Höhenversatz an beiden Seiten an den Fahrbahnbelag angeschlossen Messzeit ca. 4 h
8	Donnerstagnachm./ abends/ nachts	Umbau des Fahrbahnübergangs auf Dämpfungskonzept 4	Zeichnung Nr. 8	Montageteam RWSH	Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Mobilbagger mit Haken	Umbauzeit ca. 5 h
9	Freitagvorm.	4. Messserie Dämpfungskonzept 4	Messprogramm	Messteam BAST	Messfahrzeug Pkw	<ul style="list-style-type: none"> Fahrbahnübergang ist ohne Höhenversatz an beiden Seiten an den Fahrbahnbelag angeschlossen Messzeit ca. 4 h
10	Freitagnachm.	Abschluss der zweiten Messkampagne Abreise der Teams		Messteam BAST		Fahrbahnübergang bleibt mit Höhenversatz $\Delta h_1 = +5$ mm bis zur nächsten Messkampagne liegen

Bild 4-6-1-21: Fortsetzung

reits bei den früheren Messungen von 2007 ein Mikrofon einseitig im Abstand von 3 m aufgestellt.

Aufgrund der mittlerweile fortschreitenden Zerstörung der Testfelder durch Witterungseinflüsse und unerlaubter Überfahrten sowie noch vorhandener Klebereste der früher aufgeklebten Schmirgelleinen auf der Betonfahrbahn konnte der Fahrbahnübergang nur außermittig überfahren werden. Zu diesem Zweck wurde eine nur 2,2 m breite Gasse aus Pylonen aufgestellt, die den Testfahrer bis zu einer Geschwindigkeit von 120 km/h zielgerichtet über die noch intakte Fahrbahnoberfläche geführt hat.

Messfahrzeug Pkw

Eine Messserie besteht aus 12 Überfahrten wie folgt: vier Geschwindigkeiten 60/80/100/120 km/h, mit jeder Geschwindigkeit werden drei Überfahrten durchgeführt. Zeitaufwand ca. 3 bis 4h/Messserie.

Ergebnisse der Messungen in Spereberg

Von allen Überrollvorgängen wurde der zeitliche Verlauf der A-frequenzbewerteten Schallpegel auf-

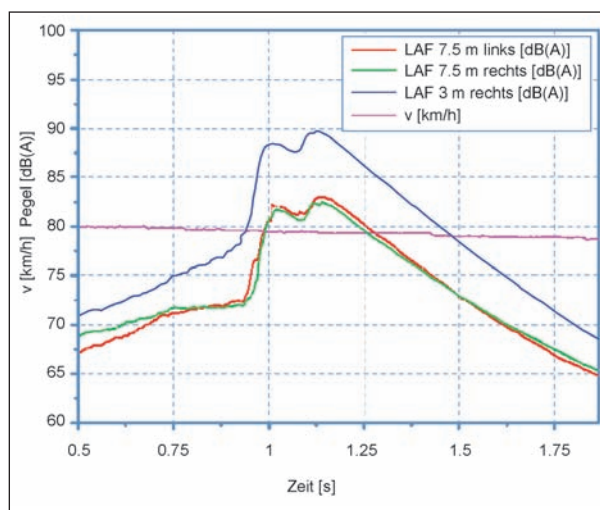


Bild 4.6.1-22: Pegelverlauf bei 80 km/h – dämpfende Abdeckung (Seiten in Fahrtrichtung)

gezeichnet („fast“ – Zeitbewertung mit Zeitkonstante von 125 ms). Bild 4.6.1-22 zeigt beispielhaft den zeitlichen Pegelverlauf einer Überrollung. Gut zu erkennen sind die beiden Maxima, bei denen das Prüffahrzeug zuerst mit der Vorder- und dann mit der Hinterachse den Fahrbahnübergang anregt.

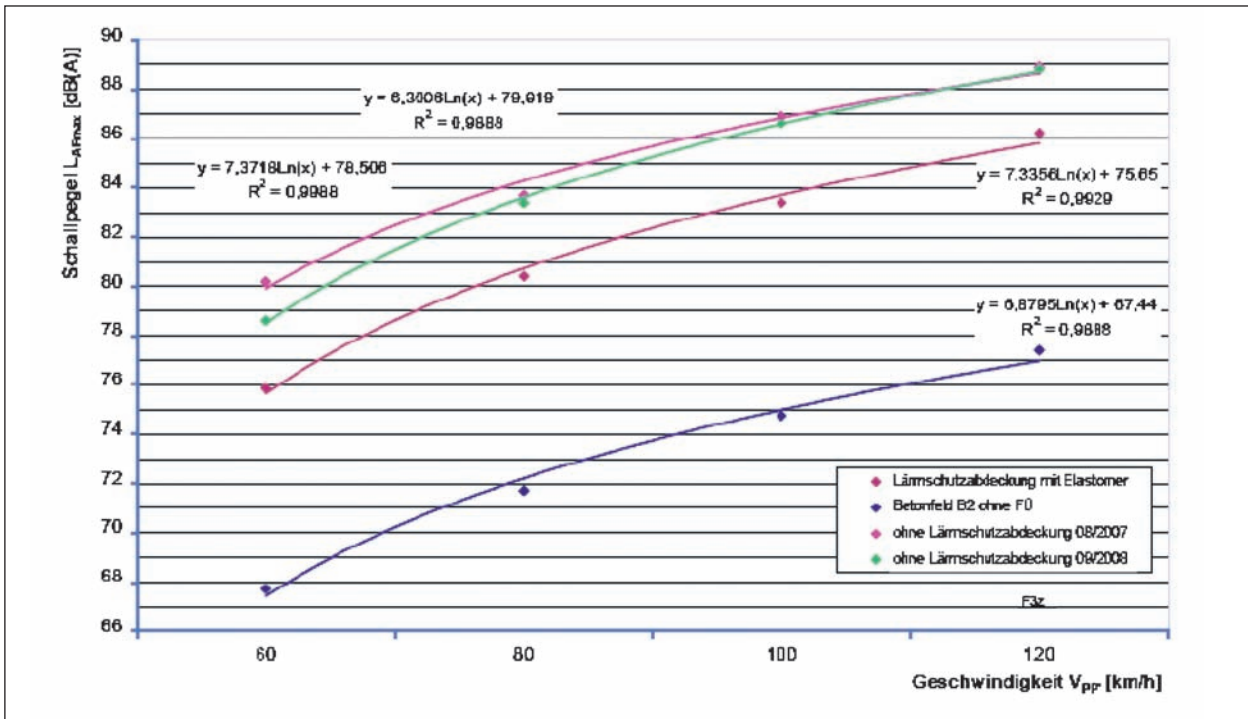


Bild 4.6.1-23: Schallpegelvergleich bei Mikrofonposition 7,5 m (Messungen beidseitig, siehe Bild 4.6.1-17)

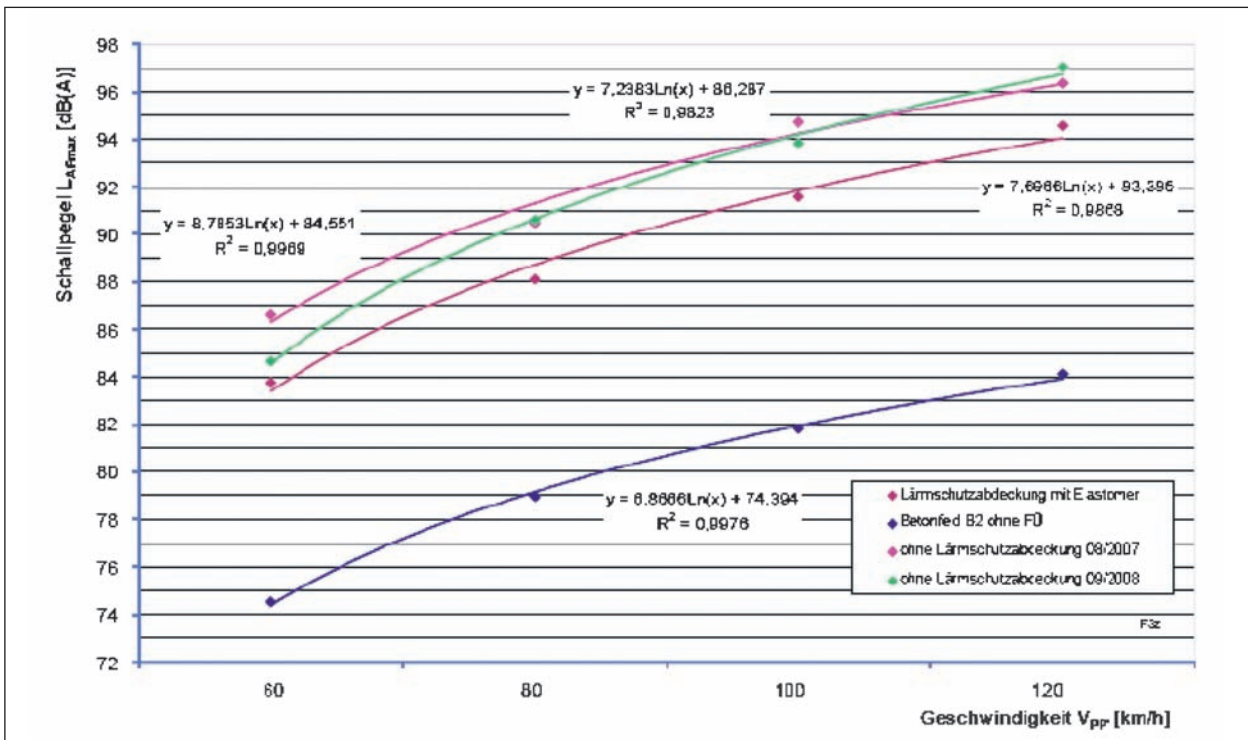


Bild 4.6.1-24: Schallpegelvergleich bei Mikrofonposition 3 m (Messungen einseitig, siehe Bild 4.6.1-17)

Bild 4.6.1-23 zeigt die Mittelwerte der gemessenen Schallpegel L_{AFmax} je Geschwindigkeit bei der beidseitigen Messung in 7,5 m Entfernung zur Fahrspurmitte, Bild 4.6.1-24 die Mittelwerte in 3 m Entfernung zur Fahrspurmitte.

Zum Vergleich sind in beiden Diagrammen jeweils die Referenzmessungen des Fahrbahnübergangs ohne Lärmschutzabdeckung und ohne Höhenversatz von 2007 und 2008 sowie die Messung ohne Fahrbahnübergang auf dem Betontestfeld B2 mit aufgeführt.

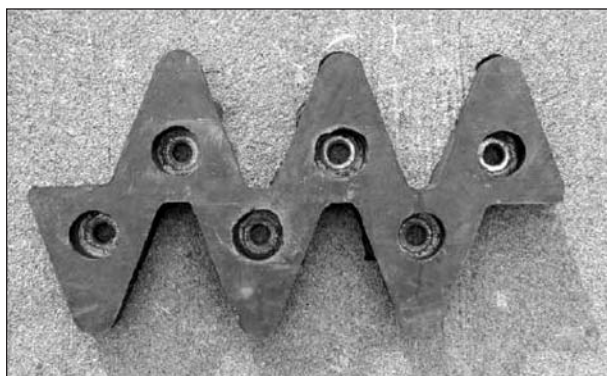


Bild 4.6.1-25: Elastomerbeschichtete Dämpfungsabdeckung (Prototyp)

Zu jeder Messreihe sind ebenfalls die Gleichungen der logarithmischen Regressionen und deren Bestimmtheitsmaß angegeben.

Zusammenfassung

Aus den Bildern 4.6.1-23 und 4.6.1-24 ist ersichtlich [7], dass ein in einer Betonfahrbahn eingebauter Lamellen-Fahrbahnübergang (Typ WSG 320), der auf eine Fugenöffnung von 35 mm eingestellt und mit elastomerbeschichteten Dämpfungsabdeckungen (Bild 4.6.1-9) bestückt ist, je nach Geschwindigkeit in einer Entfernung von 7,5 m zur Fahrbahnmitte ca. 3 dB(A) leiser ist als ein Fahrbahnübergang gleichen Typs ohne Lärmschutzabdeckung und mit gleicher Fugenbreite.

In einer Entfernung von 3 m zur Fahrbahnmitte verringert sich dieser Unterschied je nach Geschwindigkeit auf ca. 2 dB(A). Ein Vergleich mit einem Fahrbahnübergang mit Lärmschutzabdeckungen ohne Elastomerbeschichtung konnte aufgrund von fehlendem Material nicht durchgeführt werden.

Im Vergleich zu einer reinen Betonfahrbahn ohne eingebauten Fahrbahnübergang vom Typ WSG 320 ohne Lärmschutzabdeckung ergibt sich je nach Geschwindigkeit in 7,5 m und 3 m Entfernung zur Fahrbahnmitte ein Unterschied von ca. 11-12 dB(A).

Der Unterschied zu einem Fahrbahnübergang WSG 320 mit elastomerbeschichteten Lärmschutzabdeckungen verringert sich je nach Geschwindigkeit in 7,5 m Entfernung auf ca. 8-9 dB(A) und auf ca. 9-10 dB(A) in 3 m Entfernung.

Fortsetzung der Untersuchungen nach Abschluss von LeiStra 2

Im Rahmen des Forschungsprojektes LeiStra 2 konnte nur ein Prototyp der dämpfenden Lärm-

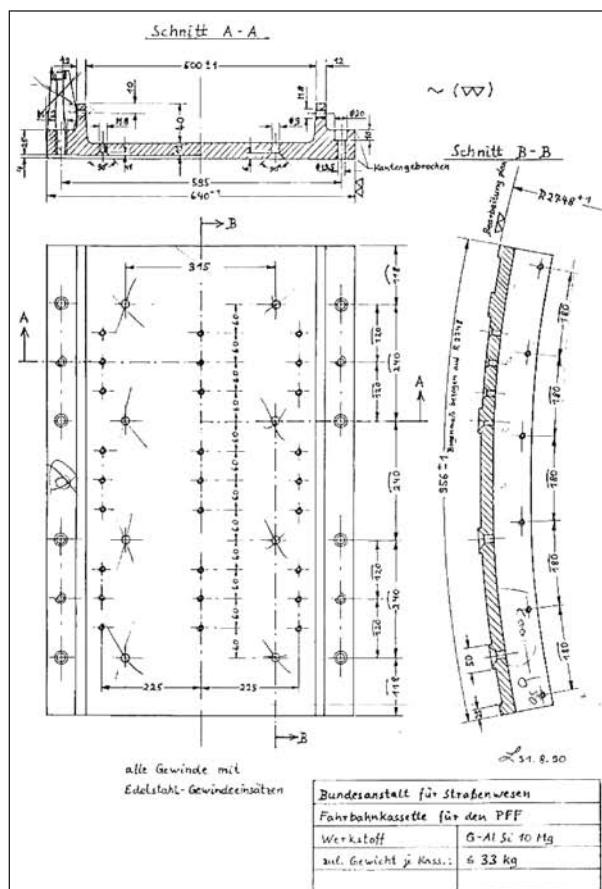


Bild 4.6.1-26: Kassette als Adapter für den Großversuchsstand und bestückte Kassette (hier mit stählernen Lärmschutzelementen)

schutzabdeckungen untersucht werden. Die Herstellung der aus den Untersuchungen abgeleiteten Serienelemente erwies sich als sehr kompliziert und konnte im Rahmen des Projektes nicht mehr realisiert werden.

Deshalb wurde mit der BAST vereinbart, Vergleichsmessungen im Großversuchsstand durchzuführen und im Rahmen dieser Messungen Vergleichs- und Absolutwerte der Lärminderung von reinen Stahl-

Lärmschutzelementen und von elastomerbeschichteten dämpfenden Lärmschutzelementen zu ermitteln.

Die Untersuchungsergebnisse werden in Kapitel 4.6.2 vorgestellt und diskutiert.

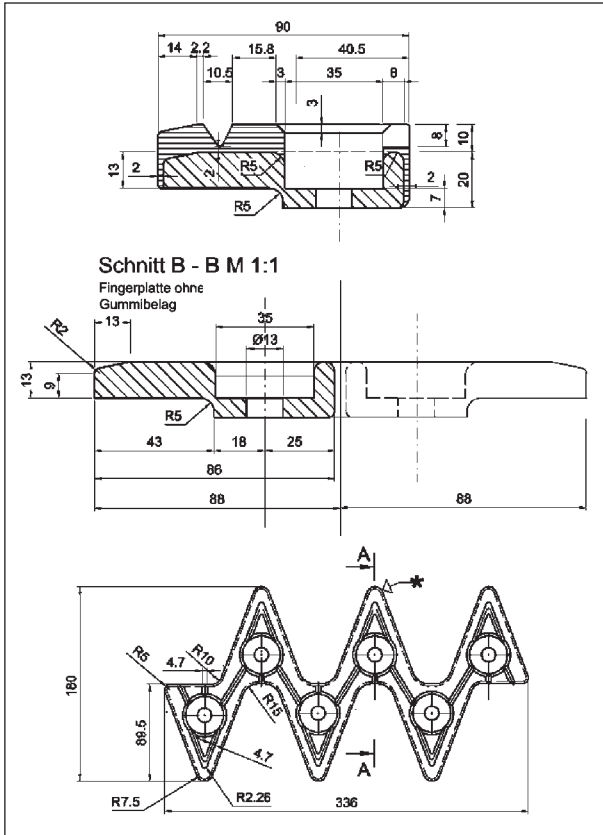


Bild 4.6.1-27: Elastomerbeschichtetes dämpfendes Lärmschutzelement (ED-LSE)

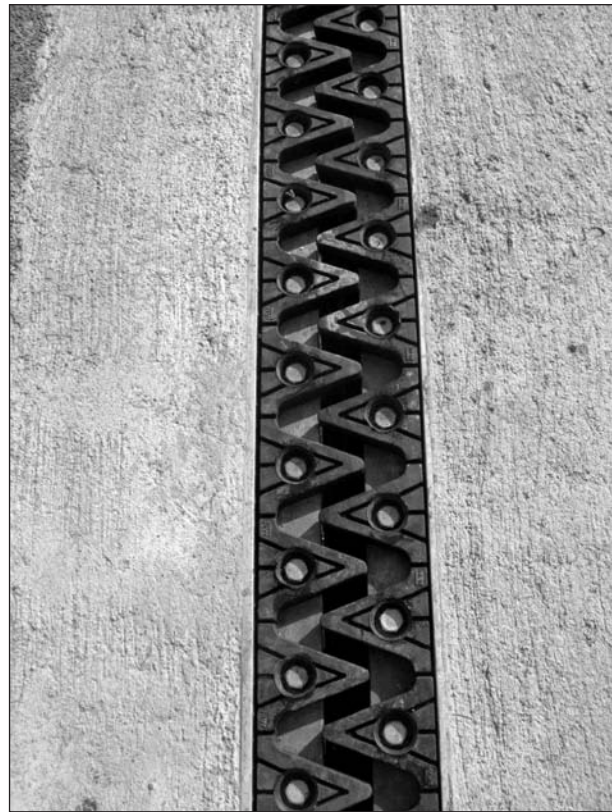


Bild 4.6.1-29: Einprofiliger Übergang mit ED-LSE (Harderwijk, NL) 5 Teilverbund 3230, Fahrbahnübergänge

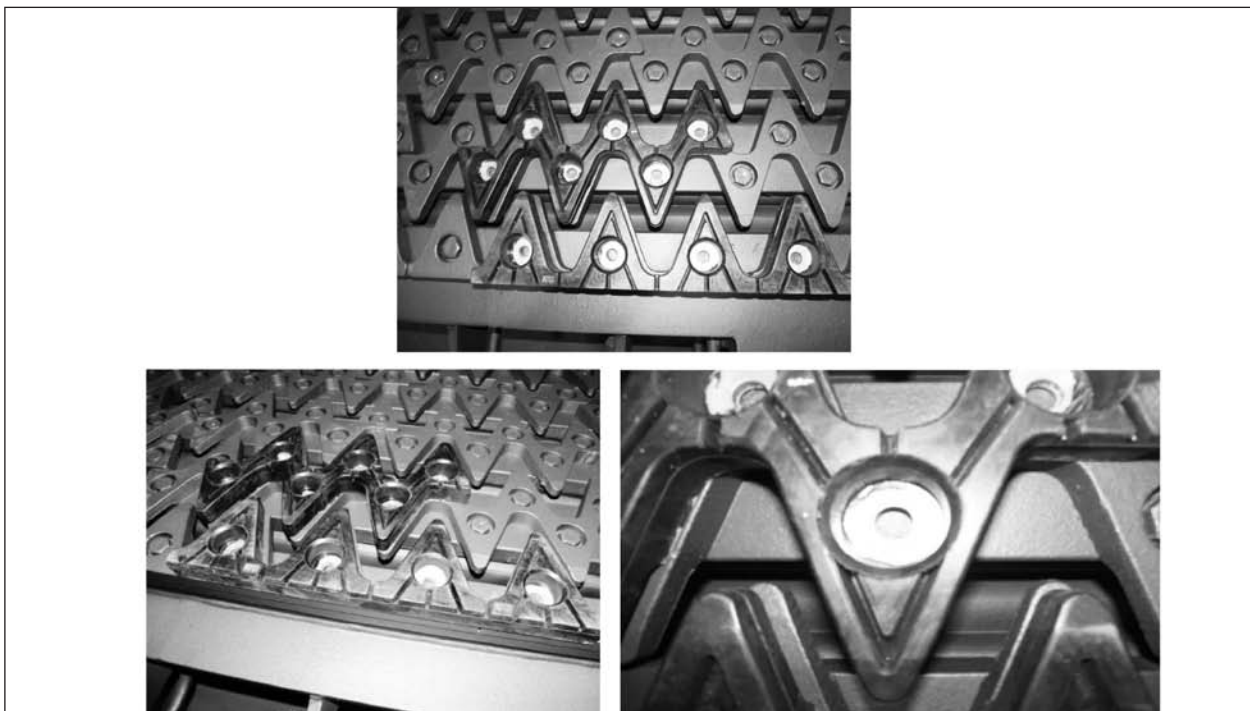


Bild 4.6.1-28: Einbau von ED-LSE

4.6.1.5 Projektteil: „Lärmindernde Ausbildung der Fahrbahnanschlüsse

Lärmindernde Fahrbahnanschlüsse sollen erreicht werden durch

- Ebenheit der Fahrbahnübergangsanschlüsse an die Fahrbahnoberflächen,
- verbesserte Einbaumethoden,
- Aussteifungen der Fahrbahnübergänge in der Umgebung der Fahrbahnübergänge.

Vorbereitende Untersuchungen zur Ebenheit der Anschlüsse

Dazu wurde zunächst der aktuelle Stand der Fahrbahnanschlüsse bei Fahrbahnübergängen analysiert mit folgenden Schwerpunkten:

- Forderungen und Festlegungen in relevanten Normen und anderen technischen Regeln,
- Spurrinnenbildung,
- bekannte Folgen des Höhenversatzes zwischen Fahrbahnoberfläche und Oberfläche des Fahrbahnübergangs,
- Anforderungen an einen niveaugleichen Übergang von der Fahrbahnoberfläche auf die Oberfläche des Fahrbahnübergangs,
- Ausführungspraxis von Fahrbahnanschlüssen,
- Ausbildung der angrenzenden Fahrbahnoberfläche.

Ergebnisse der Analyse zur Ebenheit der Fahrbahnübergangsanschlüsse

a) Sichtung vorhandener Anschlüsse (Bild 4.6.1-30)

Die Untersuchungen konzentrieren sich seit Dezember 2005 auf folgende Schwerpunkte:

- Ausführungspraxis von Fahrbahnanschlüssen,
- Ausbildung der angrenzenden Fahrbahnoberfläche.

Ergebnisse

- Auf den Ausführungsplänen werden in den meisten Fällen die in der ZTV-ING geforderten Höhenversätze beachtet.

- In der Bauausführung wird häufig kein Höhenversatz hergestellt, wobei die Qualität der Anschlüsse generell stark verbesserungsbedürftig ist.

Die angrenzende Fahrbahnoberfläche wird einzeln aus einem speziellen Material hergestellt (Kunstharzbeton o. Ä.), der keine Spurrillenbildung aufweist und eine hohe Qualität der Anschlüsse gewährleistet. Allerdings erscheint die Breite der Streifen mit dem speziellen Fahrbahnbelag unter Berücksichtigung der akustischen Verbesserung der Einbausituation mit durchschnittlich 500 mm als zu gering.

b) Vorhandene Untersuchungen und Regelungen der Höhenversätze

- Forderungen und Festlegungen in relevanten Normen und anderen technischen Regeln,
- Spurrillenbildung,
- Bekannte Folgen des Höhenversatzes zwischen Fahrbahnoberfläche und Oberfläche des Fahrbahnübergangs,
- Anforderungen an einen niveaugleichen Übergang von der Fahrbahnoberfläche auf die Oberfläche des Fahrbahnübergangs.
- Obwohl seit vielen Jahren über diese Lärmquelle diskutiert wird, wurden keine verwertbaren Messergebnisse über den Einfluss der Fahrbahnanschlüsse an den Fahrbahnübergang auf dessen akustisches Verhalten gefunden.

- In der aktuellen ZTV-ING, Teil 8, Abs. 1 (9) wird der Höhenversatz immer noch wie folgt gefordert:

„Die Oberkanten der Randprofile dürfen nicht aus dem Fahrbahnbelag herausragen, sondern müssen 3 mm bis 5 mm unter der Oberfläche liegen.“

c) Messungen der Auswirkungen der Höhenversätze in Sperenberg

Die erste Messkampagne in der 19. KW 2007 musste witterungsbedingt abgebrochen werden. Die Messungen wurden in der 32. KW erneut aufgebaut und erfolgreich abgeschlossen.

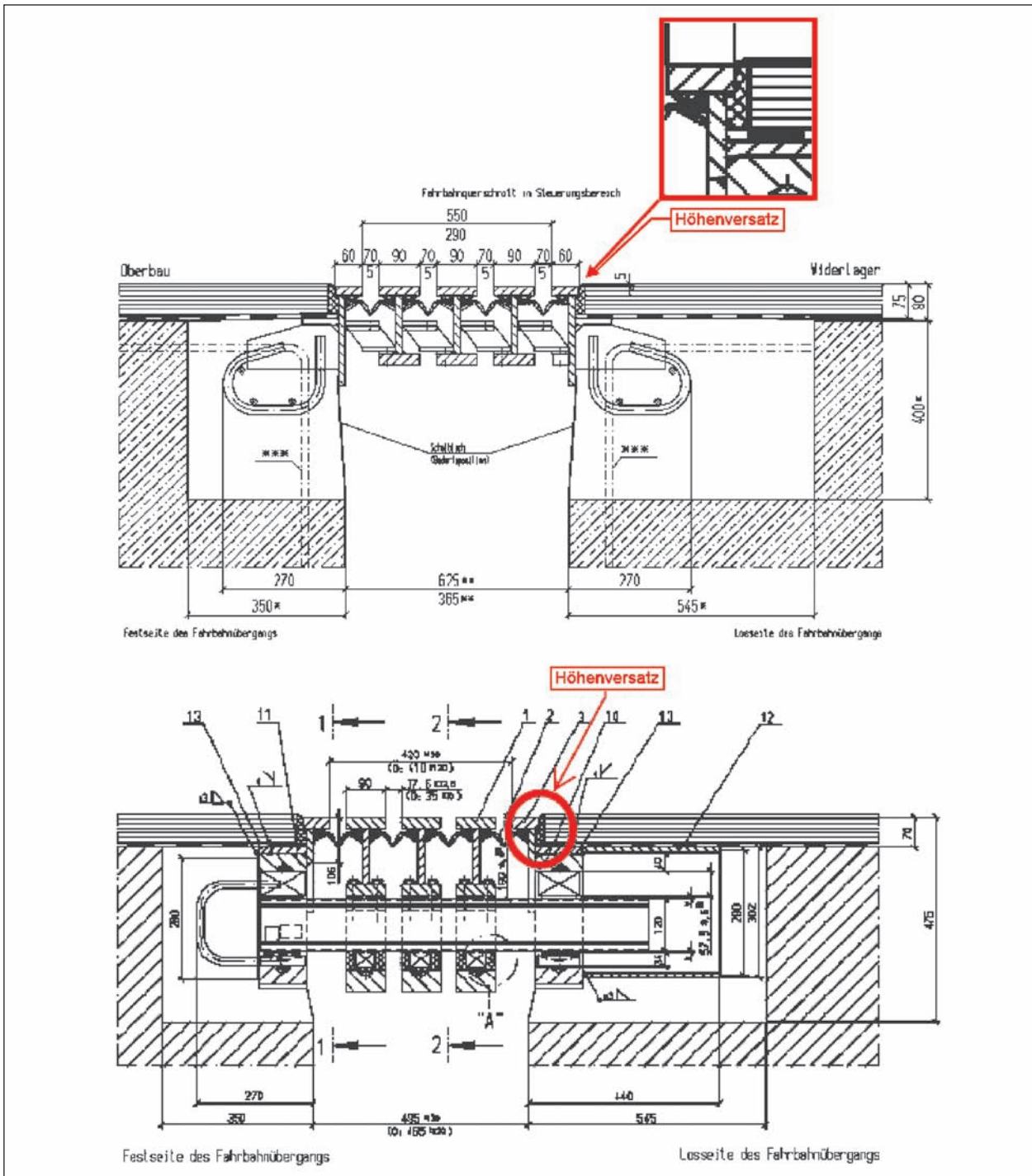


Bild 4.6.1-30: Höhenversatz zwischen Randprofil und angrenzendem Belag

Durchführung der Messungen in Sperenberg

Gemessen wurden die Schallpegel für vier Höhenlagen des Fahrbahnübergangs Typ WSG, Baugröße 320, relativ zur Straßenoberfläche (siehe auch Bild 4.6.1-31):

- $\Delta h_1 = 0 \text{ mm}$, • $\Delta h_2 = +5 \text{ mm}$,
- $\Delta h_3 = -5 \text{ mm}$, • $\Delta h_4 = -10 \text{ mm}$.

Ergebnisse der Messungen in Sperenberg

Aus dem Pegel-Zeit-Verlauf (siehe Bild 4.6.1-32) folgt eindeutig, dass der maximale Pegel L_{AFmax} beim Überfahren des Fahrbahnübergangs entsteht.

Deshalb ist es berechtigt, diesen Pegel für die Bewertung der Schallemissionen bei den unterschiedlichen Höhenlagen des Fahrbahnübergangs zu verwenden.

Lfd.	Datum	Aktionen	zugehörige Unterlagen	beteiligte Personen und Firmen	Ergebnisse Bewertung Anmerkungen
1	06. August	<ul style="list-style-type: none"> • Anreise Messteam bis nachmittags • Verbesserung des Fahrbahnanschlusses 	Zeichnung Nr. 1	Bauteam BAST Montageteam RWSH	Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Evtl. Fahrzeuge BAST für Arbeiten am Anschluss
2	07. August vorm.	<ul style="list-style-type: none"> • Anreise Montageteam RWSH in Sperenberg bis 10:00 Uhr 	Zeichnung Nr. 1	Montageteam RWSH Messteam BAST	Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102
3	07. August vorm.	1. Messserie Höhenversatz $\Delta h_0 = 0$	Messprogramm	Messteam BAST	Messfahrzeug Pkw
4	07. August nachm. und abends	Umbau Fahrbahnübergang auf Höhenversatz $\Delta h_1 = -5$ mm	Zeichnung Nr. 2	Montageteam RWSH	Montagefahrzeug mit Kran (2,4 t), SH 102 Evtl. ohne Kraneinsatz Mobilbagger mit Haken

Bild 4.6.1-31 : Auszug aus dem Messplan

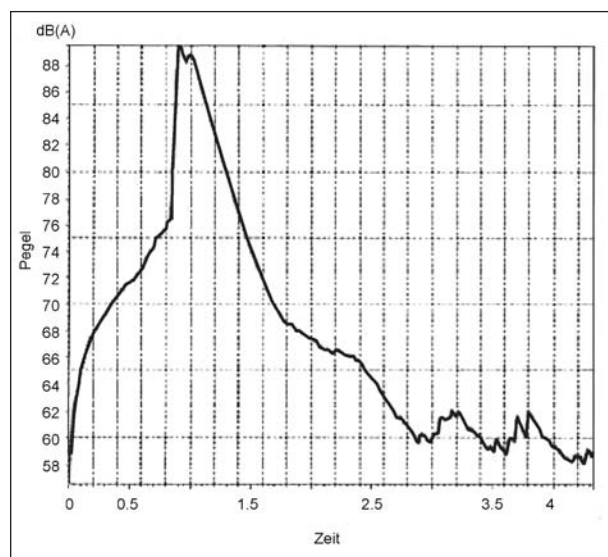


Bild 4.6.1-32: Pegel-Zeit-Verlauf

Gefahren wurde mit vier Geschwindigkeiten $v = 60, 80, 100$ und 120 km/h.

Die Messergebnisse belegen, dass durch den Einbau des Fahrbahnübergangs abweichend von einer niveaugleichen Lage zum Straßenbelag die Schallpegel zunehmen.

Bei einer Geschwindigkeit von $v = 80$ km/h und einer Höhendifferenz von $\Delta h_3 = -5$ mm, die nach ZTV-ING, Teil 8, Abs. 1 (9) vorgeschrieben ist, erhöht sich der Pegel um

$$1,6 \text{ dB(A)} \text{ von } L_{AFmax} = 83,7 \text{ dB(A)} \\ \text{auf } L_{AFmax} = 85,3 \text{ dB(A).}$$

Die größte gemessene Pegelzunahme betrug ca. $2,5$ dB(A).

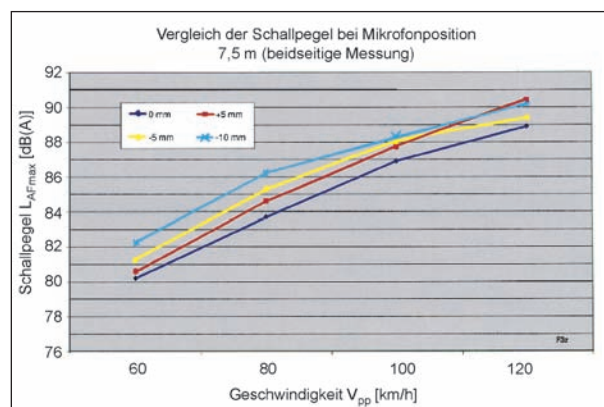


Bild 4.6.1-33: Pegel in Abhängigkeit vom Höhenversatz und von der Überfahrgeschwindigkeit

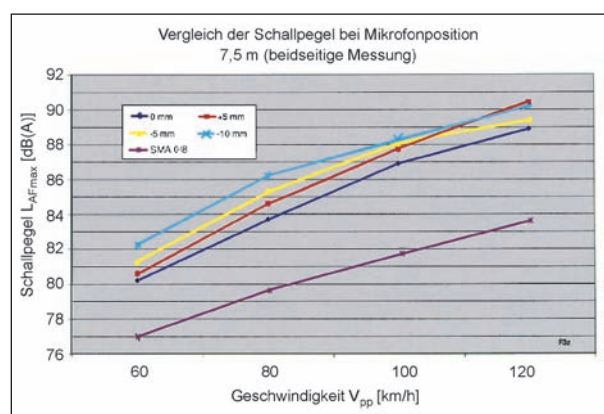


Bild 4.6.1-34: Pegel in Abhängigkeit vom Höhenversatz und von der Überfahrgeschwindigkeit im Vergleich zum Splittmastixasphalt (SMA 08)

Im Messbericht wurde noch der Vergleich zu einer Vorbeifahrermessung ohne Fahrbahnübergang hergestellt. Die Pegeldifferenz wächst im ungünstigen Fall auf $3,2$ bis $6,5$ dB(A) an und kann bei akustisch optimierten Straßenbelägen noch höher werden.

Schlussfolgerungen

Die Messungen zeigen, dass die Abweichungen vom niveaugleichen Einbau des Fahrbahnübergangs zu deutlich höheren Schallemissionen im Vergleich zum niveaugleichen Einbau führen.

Deshalb sollte die Forderung ZTVING nach einem 3 bis 5 mm tieferen Einbau der Fahrbahnübergänge bei der anstehenden Überarbeitung aufgegeben



Bild 4.6.1-35: Vorbereitung des Fahrbahnübergangs im Messfeld B17



Bild 4.6.1-36: Durchführung der Messungen

und durch die Forderung nach niveaugleichem Einbau ersetzt werden.

Die durchgeführten Messungen dienen als Nullmessung für die anschließenden Messungen der Dämpfung [8].

Zusammenfassung und Ausblick

Fahrbahnübergänge zwischen Straßen und Brücken sind erforderlich, um die Längenänderungen der Brücke infolge von Temperaturänderungen und Verkehrsbelastungen auszugleichen.

Beim Überrollen von diesen Fahrbahnübergängen entstehen pulsartige, schlagartige Geräusche, die sich von den Reifen-/Fahrbahngeräuschen stark abheben und von Anwohnern oft als sehr störend empfunden werden.

Da Lamellenfahrbahnübergänge hinsichtlich ihrer Nutzungsdauer und Funktionstüchtigkeit sehr hohen Anforderungen entsprechen, sollte im Forschungsprojekt LeiStra 2 speziell dieser Konstruktionsstyp hinsichtlich seiner akustischen Eigenschaften optimiert werden. In umfangreichen Untersuchungen wurde der Einsatz geräuschkämpfender Materialien erprobt und die Einbautechnologie hinsichtlich möglicher Verbesserungen analysiert.

Die Arbeiten am Forschungsprojekt LeiStra 2 haben akustische Verbesserungsmöglichkeiten an Fahrbahnübergängen in Lamellenbauweise wie folgt ergeben:

- planebener Einbau der Fahrbahnübergänge, verbunden mit der Überarbeitung der ZTV-ING,
- Verwendung elastomerbeschichteter dämpfender Lärmschutzelemente.

Als Empfehlung für die Praxis sollten die Erkenntnisse aus dem Verbundprojekt hinsichtlich der Einbauregeln in die Überarbeitung der ZTVING für Fahrbahnübergänge einfließen und entsprechend geändert werden.

Literatur

- [1] TL/TP-FÜ: Technische Liefer- und Prüfvorschriften für wasserundichte Fahrbahnübergänge in Lamellenbauweise und Fingerübergänge mit Entwässerung von Straßen- und Wegbrücken. Ausgabe 03/05. Verkehrsblatt- Sammlung-Nr. S5241
- [2] ULLRICH, S., GLAESER, K.-P.: Versuchsbericht „Messungen der Geräuschemissionen lärmgeminderter Lamellen-Fahrbahn-Übergänge der Firma Federal-Mogul Sollinger Hütte GmbH, Bundesanstalt für Straßenwesen, Mai 2001
- [3] Forschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“, Teilprojekt Tp 3171 – Fahrbahnübergänge, 2004
- [4] Untersuchungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn an Fahrbahnübergängen zur Lärmminde- rung. Zwischenbericht AP 96 221-2/V3, Schluss- bericht AP 97 530/F3 Bundesanstalt für Stra- ßenwesen, März 1999
- [5] Beurteilung der Geräusche von Fahrbahnüber- gängen, Bericht Nr. 37 843/1, Untersuchung im Auftrag der VHFL, Müller BBM, 21. April 1999
- [6] Schlussbericht Teilprojekt TP 3184, Müller BBM, 2003
- [7] ZÖLLER, M.: Schalltechnische Messungen am Fahrbahnübergang des Projektes „LeiStra 2“, Testgelände Sperenberg (Messbericht)
- [8] HEMMERT-HALSWICK, A., LORENZEN, A.: Bundesanstalt für Straßenwesen, Messbericht über die Geräuschmessung beim Überfahren eines Lamellenübergangs vom 31.10.2007
- [9] GERBER, BEYER: UHMWPE als Gleitmaterial in Brückenlagern, Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart, 1998, unveröffentlicht

4.6.2 Elastomerbeschichtete Dämpfungsabdeckungen

Dipl.-Ing. G. Schwalbe
Dr.-Ing. K. Glaeser
Bundesanstalt für Straßenwesen

4.6.2.1 Zielsetzung

Fahrbahnübergänge bilden das verschiebliche Bindeglied zwischen Festland und Brücke. Sie dienen dem Ausgleich der temperaturbedingten Längenänderung einer Brücke in den verschiedenen Jahreszeiten. Derzeitiger Standard sind quer zur Fahrbahn eingebaute Lamellenfahrbahnübergänge. Beim Überfahren dieser Fahrbahnübergänge treten kurzzeitige, impulshaltige Geräuschüberhöhungen auf, die auf Anrainer störend wirken. Die Geräuschüberhöhung entsteht durch die unstetige Fahrbahnoberfläche der Lamellenfahrbahnübergänge. Die Reifen stoßen nahezu rechtwinklig an die Kanten der quer zur Fahrtrichtung eingebauten Lamellen der Fahrbahnübergänge.

Um die Geräuschemission zu verringern, können auf der Oberseite von Lamellenfahrbahnübergängen speziell ausgeführte Schallminderungselemente (SME) wie rauten- oder wellenförmige Elemente o. Ä. angebracht werden. Diese sind dafür geeignet, für den Reifen eine kontinuierliche, höhenkonstante Oberfläche zu bilden, und bieten damit eine Möglichkeit der Schallminderung. Dennoch wird die Beweglichkeit des Fahrbahnüberganges für den Längenausgleich einer Brücke unter Temperatureinwirkung nicht beeinträchtigt.

Im Großversuchsstand wurden Schallmessungen an geräuschemissionsoptimierten Fahrbahnübergängen mit wellenförmigen Elementen der Fa. RW Sollinger Hütte GmbH durchgeführt. Ermittelt werden soll die Lärminderung von Elementen aus reinem Stahl und elastomerbeschichteten dämpfenden Lärmschutzelementen.

4.6.2.2 Methodik

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit der Auswertung von Schallmessungen am BAST-eigenen Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (PFF) von geräuschemissionsoptimierten Fahrbahnübergängen. Die Geräuschemissionsoptimierung wurde mit zwei sich in der Oberflächenbeschaffenheit unterscheidenden SME erreicht. Diese wurden auf den

Standardlamellen ähnlichen Ersatzkörpern aufgeschraubt und auf ihr Schallabstrahlungsverhalten bei Überrollung mit einem Pkw-Reifen untersucht. Es waren zum einen wellenförmige Elemente, die eine glatte metallische Oberfläche hatten, zum anderen elastomerbeschichtete Dämpfungsabdeckungen. Es wurden Messungen sowohl in der so genannten „Sommerstellung“ als auch in der „Winterstellung“ des Fahrbahnübergangs simuliert. Dazu wurden die Abdeckungen auf den Standardlamellen ähnlichen Ersatzkörpern aufgeschraubt und der Abstand zwischen den Ersatzkörpern für die Sommerstellung auf 25 mm und für die Winterstellung auf 90 mm eingestellt.

Um die Wirkung der SME darstellen zu können, wurden die SME direkt miteinander und mit den Ersatzkörpern für die derzeit standardmäßig verbauten Lamellen verglichen. Zu diesem Zweck wurde der Ring des PFF in drei Sektionen unterteilt. Jede Sektion bestand aus fünf Kassetten mit dem jeweiligen Fahrbahnübergangstyp. Zwischen den Sektionen wurde jeweils eine Fahrbahnkassette eingebaut, die mit Belag nach ISO 10844 bestückt war. Insgesamt stand für jeden Fahrbahnübergang eine Gesamtlänge von 4,80 m zur Verfügung. Die Versuche wurden mit vier unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt, 60, 80, 100 und 120 km/h. Als Messreifen diente ein handelsüblicher eingefahrener Pkw-Reifen in der Dimension 195/65R15, der mit zwei unterschiedlichen Radlasten und Fülldrücken gefahren wurde.

4.6.2.3 Versuchsaufbau

Der Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (PFF) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)

Im Wesentlichen besteht der Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (Bild 4.6.2-1) aus einer einseitig offenen Trommel mit einem Innendurchmesser von 5,5 m. In diese Innentrommel können verschiedene Fahrbahnen mittels Kassetten eingebaut werden. Das Spektrum reicht von künstlichen Fahrbahnbelägen über verschiedenste Asphaltdeckschichten bis hin zu Betonfahrbahndeckschichten, auf denen der Prüfreifen abrollen kann. Die Maximalgeschwindigkeit mit einem Pkw-Reifen beträgt 270 km/h, mit einem Lkw-Reifen 120 km/h. Im Fokus der Untersuchungen stehen am PFF neben Schnell- und Dauerlauffestigkeitstests der Reifen vor allem Geräusch- und Rollwiderstandsmessungen von Pkw- und Lkw-Reifen. Die Radlast kann stufenlos bis 6.500 kg eingestellt werden.

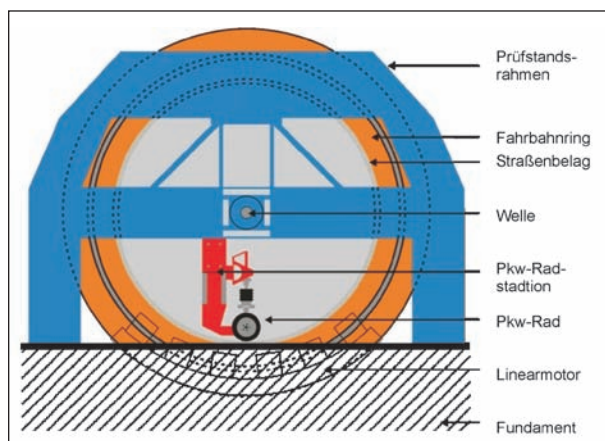


Bild 4.6.2-1: Prinzipskizze des PFF (Quelle: BAST)

Für die beschriebene Messaufgabe wurden die Fahrbahnkassetten des PFF mit eigens angefertigten Ersatzkörpern für derzeitige Standardlamellen eines Fahrbahnübergangs bestückt. Auf diese Ersatzkörper wurden im Anschluss die SME aufgeschraubt, wie es im Praxiseinsatz auch vorgesehen ist.

Die Messungen wurden mit den genannten Geschwindigkeiten unternommen und die Abrollgeräusche des Reifens auf den schallemissionsoptimierten Fahrbahnübergängen mit Mikrofonen aufgenommen, die an drei unterschiedlichen Positionen aufgestellt waren.

Versuchsbeschreibung

Um die unterschiedlichen Fahrbahnübergänge direkt miteinander vergleichen zu können und damit die Einflussnahme durch wechselnde Versuchsbedingungen möglichst gering zu halten, wurden alle drei unterschiedlichen Fahrbahnübergänge gleichzeitig gemessen. Das wurde durch eine Dreiteilung des Fahrbahnringes des PFF realisiert. In jedem Drittel des Fahrbahnringes befand sich ein Fahrbahnübergangstyp, bestehend aus fünf aneinander angrenzenden Kassetten. Zwischen den Abschnitten wurde eine Kassette mit ISO-10844-Belag eingebaut.

Die wellenförmigen SME für Fahrbahnübergänge wurden auf Ersatzkörper in Kassetten des PFF eingebaut und sowohl im Nah- als auch im Fernfeld einer Geräuschemessung bei Überrollgeschwindigkeiten zwischen 60 und 120 km/h unterzogen. Dabei wurde als Prüfreifen ein handelsüblicher eingefahrener Reifen benutzt. Als Radlast und Reifenfülldruck wurden zwei unterschiedliche Parameter-

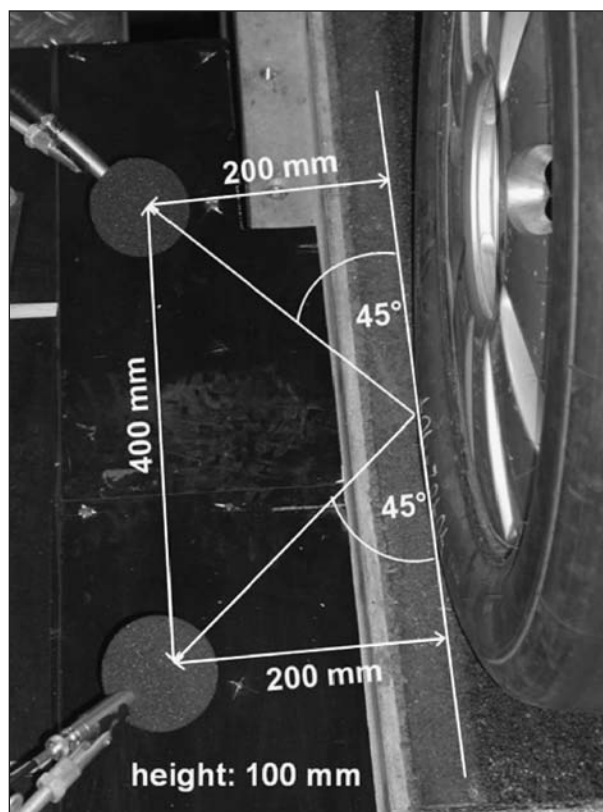


Bild 4.6.2-2: Mikrofonposition Nahfeld



Bild 4.6.2-3: Mikrofonposition Fernfeld

paare gewählt, die einerseits die Vorderachs-situation, andererseits die Situation an der Hinterachse eines Mittelklassewagens repräsentieren.

Es wurden drei Mikrofone in unterschiedlichen Positionen verwendet, zwei in der Nahfeld- (Bild 4.6.2-2) und eines in der Fernfeldposition (Bild 4.6.2-3). Eines der beiden Nahfeldmikrofone war an der einlaufenden und das andere an der auslaufenden Seite des Reifens positioniert. Tabelle 4.6.2-1 gibt eine Übersicht über die Versuchsparameter.

Die Mikrofonpositionen sind den jeweiligen Normen/Richtlinien für die Messung der Schallabstrahlung eines Reifens im Nahfeld mittels CPX-Metho-

Durchmesser der Trommel des PFF	5,5 m
Breite der Fahrbahnkassetten	0,6 m
Gesamtanzahl Fahrbahnkassetten	18 Stück
Anzahl Kassetten pro Fahrbahnübergang	5 Stück
Bogenlänge an der Kassettenoberseite	0,97 m
Überrollgeschwindigkeiten	60, 80, 100, 120 km/h
Prüfkörper	<ul style="list-style-type: none"> • wellenförmige SME mit blanker, metallischer Oberfläche • wellenförmige SME mit aufvulkanisierter Gummischicht • Ersatzkörper für Standardlamellen
Abstand Mikrofon-Reifen (Fernfeld)	6,80 m
Höhe Mikrofon-Boden (Fernfeld)	1,20 m
Abstand Mikrofon-Reifen (Nahfeld)	200 mm
Abstand Mikrofon-Mikrofon (Nahfeld)	400 mm
Abstand Mikrofon-Boden (Nahfeld)	100 mm
Abstand der Lamellen in Sommerstellung	25 mm
Abstand der Lamellen in Winterstellung	90 mm
Versuchsreifen	Firestone Firehawk 195/65 R15 91H
Profiltiefe des Versuchsreifens	rundum 6,2 mm
Shore-Härte des Versuchsreifens	72 SHA bei 18°C
Radlast	3,19 kN („niedrig“); 4,35 kN („hoch“)
Reifenfülldruck	190 kPa („niedrig“); 210 kPa („hoch“)
Reifenfüllmedium	Luft

Tab. 4.6.2-1: Versuchsparameter der akustischen Messungen von SME

de und für die Messung im Fernfeld angelehnt an die CPB-Messung in 7,5 m Abstand von Mikrofon zu Fahrzeugmitte entnommen. Daher wurde die Hälfte der durchschnittlichen Spurbreite eines Pkw von den 7,5 m abgezogen und der Abstand des Mikrofons zum Reifen auf 6,80 m eingestellt. Die Mikrofonhöhe betrug 1,20 m.

Beschreibung der unterschiedlichen Schallminderungselemente

Die beiden untersuchten Schallminderungselemente unterscheiden sich in der Beschaffenheit der Oberfläche. Eine der beiden Ausführungen hat eine

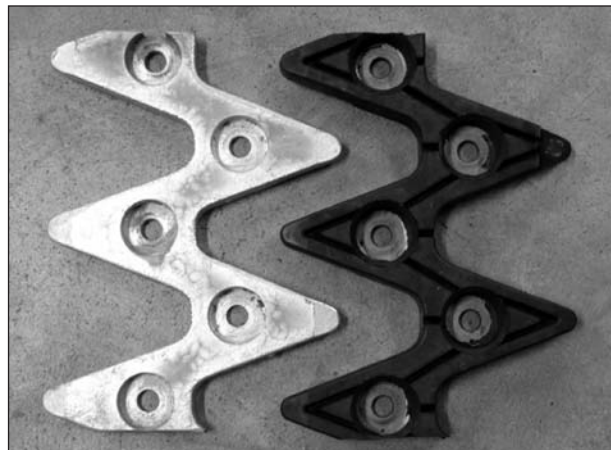


Bild 4.6.2-4: Links das Lärmschutzelement aus reinem Stahl, rechts die elastomerbeschichtete Dämpfungsabdeckung

blanke metallische Oberfläche, die andere ist mit einer Elastomerschicht überzogen. Bild 4.6.2-4 zeigt die beiden getesteten Schallminderungselemente der Fa. RW Sollinger Hütte GmbH.

4.6.2.4 Ergebnisse der Untersuchung

In den Bildern 4.6.2-5 und 4.6.2-6 sind die Ergebnisse der Fernfeldmessung (Sommerstellung: Bild 4.6.2-5; Winterstellung: Bild 4.6.2-6) mit geringer Radlast und geringem Fülldruck abgebildet.

Allgemein wurde beobachtet, dass bei den Versuchen in Winterstellung immer ein lauterer Abstrahlgeräusch gemessen wurde. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass bei Anhebung der Radlast bei gleichzeitiger Anpassung des Reifenfülldrucks von den Parametern der Hinterachse auf die der Vorderachse eine Anhebung des Lautstärkepegels von bis zu 3 dB(A) verzeichnet wurde. Durch Verwendung der wellenförmigen Schallminderungselemente konnte bei den meisten Versuchen bei Überrollung bis zu 100 km/h mit dem Prüfreifen in Sommer- und Winterstellung eine Verringerung der Lautstärke des Abstrahlgeräuschs erzielt werden.

Die Ergebnisse stehen im Einklang mit der Prüfung elastomerbeschichteter Dämpfungsabdeckungen im Rahmen eines Freifeldversuchs in Sperenberg im September 2008 (siehe Kapitel 4.6.1). Der Abstand zwischen den Lamellen des Fahrbahnübergangs wurde damals auf 35 mm eingestellt. Bei diesen Versuchen konnte bei allen Radlasten und allen Geschwindigkeiten (ebenfalls 60, 80, 100 und 120 km/h) eine Verringerung des Geräuschniveaus bei Überfahung mit einem Testfahrzeug verzeichnet werden.

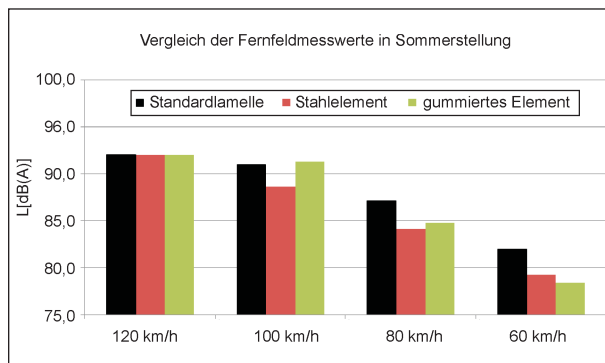


Bild 4.6.2-5: Ergebnisse Pegelmessung der Fahrbahnübergänge in Sommerstellung

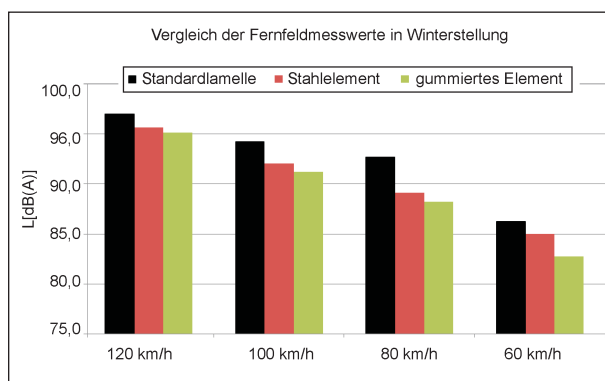


Bild 4.6.2-6: Ergebnisse der Pegelmessung der Fahrbahnübergänge in Winterstellung

4.6.3 Akustische Optimierung von Lamellen-Fahrbahnübergängen für lange Brücken – neue und optimierte Oberflächen

Dr.-Ing. Hans Segerer
Maurer Söhne GmbH & Co. KG
München

4.6.3.1 Zielsetzung

Beim Überfahren insbesondere von mehrprofiligen Lamellen-Fahrbahnübergängen, angeordnet zwischen Tragwerk und Widerlager von Brückenbauten, werden impulsartige Lärmemissionen hervorgerufen, die aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik gegenüber dem Schallbild, das beim Befahren der angrenzenden Fahrbahnflächen auftritt, vom menschlichen Gehörempfinden als störend wahrgenommen werden. Durch eine verbesserte geometrische und strukturelle Ausbildung der Übergangsoberfläche und ihrer Umgebung können diese Lärmemissionen vermindert bzw. gedämpft und dem Geräuschbild der umgebenden Fahrbahn spektral angenähert werden, sodass idealerweise das Überfahren von Lamellen-Fahrbahnübergängen vom menschlichen Gehörempfinden nicht mehr als störend wahrgenommen werden.

Auf Lamellen-Fahrbahnübergängen angebrachte, speziell ausgeführte geometrische Schallminimierungselemente (SME) wie Rautenkörper, Sinuselemente, Dreiecksleisten o. Ä. sind auch wirtschaftlich geeignet, für den überfahrenden Reifen eine kontinuierliche höhenkonstante Oberfläche zu bilden, und stellen damit eine vorrangige Möglichkeit der Schallminimierung dar. Unterschiedliche Formen und Ausführungen wirken sich verschieden auf das subjektive Geräuschempfinden aus und waren

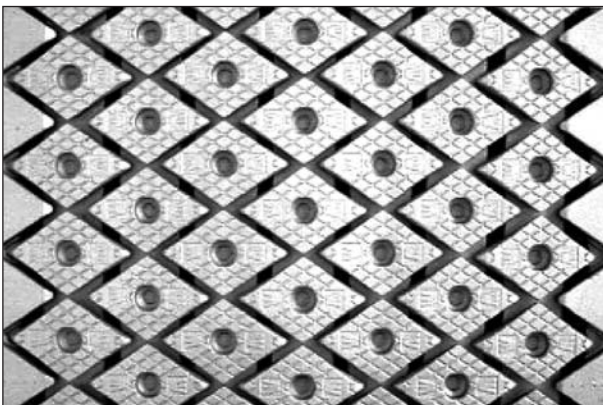


Bild 4.6.3-1: Aufgeschweißte Rauten zum Überdecken von Fahrbahnübergangsspalten

deshalb zu prüfen – ebenso wie unterschiedliche Oberflächenstrukturen, die sich in bestimmten Grenzen an die umgebende Fahrbahnbeschaffenheit akustisch angleichen lassen.

4.6.3.2 Entwurf und Herstellung verschiedener SME-Typen

Randbedingungen für die konstruktive Auswahl

Geometrische und konstruktive Vorgaben

Die geometrischen Möglichkeiten werden bestimmt durch minimale und maximale Spaltweiten zwischen den Lamellen, durch die Lamellenbreite und durch Einbauwinkel und Bewegungsrichtung des Überganges. Die entsprechenden Werte sind in staatlichen Regelwerken und/oder in den jeweiligen Übergangs-Regelprüfungen festgeschrieben und somit (zunächst) nicht veränderbar. Frei wählbar waren deshalb nur SME-Form, -Breite und das Teilungsmaß.

Die ebenfalls in den einschlägigen Regelwerken vorgegebenen Lastmodell-Ansätze bestimmten in Abhängigkeit von der gewählten Geometrie die festigkeitsmäßige Ausführung der SMEs und bildeten damit eine „untere“ Ausführungsgrenze.

Befestigungsmöglichkeiten der SMEs

Aus wirtschaftlichen Gründen beschränkt sich das Verbinden von SMEs und Lamellen (Mittelträger) auf Aufschweißen oder Aufschrauben. Beide Verfahren bieten den Vorteil, dass auch bestehende Übergänge nachgerüstet werden können. Ein mit dem Aufschrauben verbundener Nachteil besteht allerdings darin, dass die Lamellen durch das Einschneiden von Gewindebohrungen in den Obergurt dynamisch geschwächt werden. Um festzustellen, inwieweit dieser Einfluss von praktischer Bedeutung ist, wurde eine entsprechende 1:1-Lamelle mit aufgeschraubten SMEs in einem Dauerschwingversuch untersucht. Dessen Auswertung ergab, dass die Ermüdungsfestigkeit sonst identischer Lamellen durch das Einschneiden von Gewindebohrungen (M12) zum Festschrauben von SMEs im Vergleich zu Lamellen mit aufgeschweißten SMEs um etwas mehr als 10 % vermindert wird. Um mit gleichen Elementen und gleichen Methoden sowohl Neukonstruktionen als auch bestehende Übergänge (ohne Beeinträchtigung der Lebensdauer) mit SMEs ausrüsten zu können, wurden deshalb die

Untersuchungen im Rahmen des Projektes mit dem Typ eines aufgeschweißten SMEs durchgeführt – zumal nicht zu erwarten ist, dass durch die unterschiedlichen Befestigungsmethoden nennenswerte akustische Effekte entstehen, was durch einen entsprechenden Vergleichsversuch auf dem BAST-Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn bestätigt wurde.

Auswahl der untersuchten SME-Versuchsmuster

Ausgehend von den heute auf dem deutschen Markt verfügbaren Schallminderungssystemen mit SMEs wurde als Vergleichsbasis das am weitesten verbreitete System MAURER gewählt, das aus einzelnen geometrisch definierten Rauten mit einem Anfahrwinkel von etwa 60° und mit einer Mittelbohrung von ca. 40 mm Durchmesser (zum Aufschweißen auf die Lamellenoberfläche) besteht (siehe Bild 4.6.3-2). Sie sind mit verschränkten Seitenflächen ausgebildet, um zum einen ein völliges Schließen der rautenbelegten Üko-Oberfläche zu ermöglichen, zum anderen aber im geöffneten Zustand keine durchgehenden, Radfahrer-gefährdenden Spalte zu bilden. Sie sind aufgrund der geometrisch exakten Einzelrautenform eine günstige Ausgangssituation für Variationsüberlegungen ebenso wie für schalltechnische Vergleichsmessungen.

Basis-Element

Der PFF-Verhältnisse insbesondere hinsichtlich der Befestigungsmöglichkeiten und einer einigermaßen wirtschaftlichen Herstellbarkeit der Versuchsmuster wegen wurde von dieser MAURER-Raute das Basis-Element abgeleitet: Anstelle der Schweißbohrung erhielt es zwei Bohrungen zum Aufschrauben und auf das MAURER-Logo wurde des Herstellungsverfahrens wegen verzichtet (die Serienrauten sind Schmiedeteile, die Versuchselemente wurden gefräst). Dass diese Änderungen keine signifikanten akustischen Unterschiede bewirken, wurde am PFF nachgewiesen (siehe Bild 4.6.3-3).

Spaltweiten-Unterschiede

Früher durchgeführte Schallmessungen haben bestätigt, dass sich unterschiedliche Spaltweiten (Lamellenabstände) in verschiedenen Geräuschbildern auswirken (siehe Bild 4.6.3-4). Diesem Effekt wurde bei den PFF-Versuchen dadurch Rechnung getragen, dass ansonsten gleiche SMEs jeweils in



Bild 4.6.3-2: MAURER-Rauten mit 2 Spaltweiten in einer PFF-Kassette

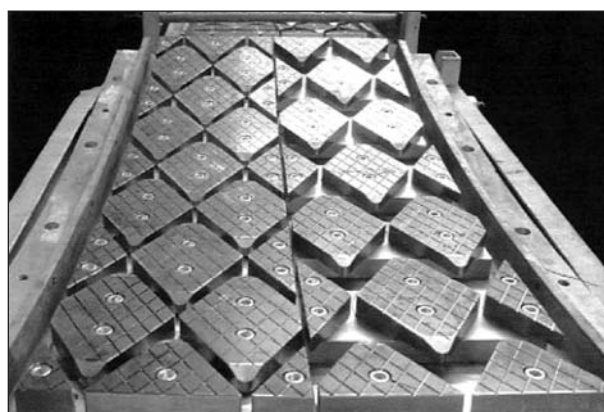


Bild 4.6.3-3: Basis-Versuchselemente mit 2 Spaltweiten in einer PFF-Kassette

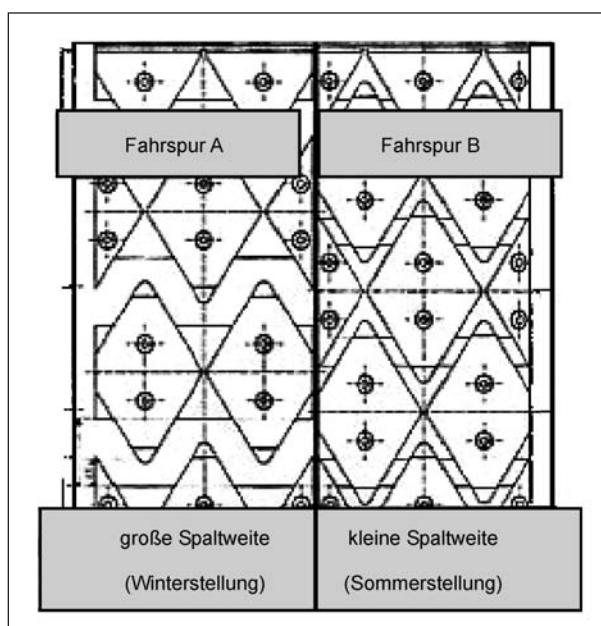


Bild 4.6.3-4: Unterschiedliche Lamellenabstände aufgrund unterschiedlicher (temperaturbedingter) Längendehnungen des Brückenüberbaues

zwei verschiedenen Spaltweiten-Anordnungen untersucht wurden: mit einer relativ geringen Öffnung

von ca. 27 mm und mit einem verhältnismäßig großen Abstand von etwa 65 mm (die exakten Werte dieser eher willkürlich wirkenden Maße ergeben sich aus der Forderung einer gleichmäßigen Anordnung der SMEs in Verbindung mit der Größe der PFF-Kassetten). In den BAST-Unterlagen wurden diese unterschiedlichen Spaltweiten mit „Sommer“- bzw. „Winter“-Stellung bezeichnet.

Oberflächen-Ausführungen

Entgegen den ursprünglichen Planungen wurde aufgrund verschiedener Gespräche insbesondere mit Fachleuten der BAST festgelegt, dass, bevor unterschiedliche Rautenformen schallemissionsmäßig untersucht wurden, zunächst der Geräuscheffekt auszuschließen ist, der möglicherweise beim Ablösen des Reifengummis von einer sehr glatten Oberfläche entsteht und wegen seiner spektralen Zusammensetzung dominieren könnte gegenüber den zu untersuchenden Geräuscheffekten.

Dazu wurden zusätzlich zur realen MAURER-Raute zwei verschiedene Varianten von Basis-SMEs hergestellt und ihr Geräuschverhalten erfasst: zum einen mit einer glatten metallischen Oberfläche, die mit weitgehend kantenparallelen gefrästen Rillen überzogen war wie die der realen MAURER-Rauten (jedoch ohne Schweißbohrung), zum anderen mit einer glatten Oberfläche mit einer Sand-Abstreuerung (eingebunden in der Korrosionsschutzbeschichtung) (Bild 4.6.3-5a bis 4.6.3-5c).

Form-Varianten

Die Winkelvarianten entstehen aus den gleichen geometrischen Grundkörpern wie die Basis-Rauten, unterscheiden sich aber hinsichtlich des Anfahrwinkels: Während das Basis-SME einen Winkel von etwa 60° aufweist, werden hier Abweichungen von $+20^\circ$ bzw. -20° gewählt, also Anfahrwinkel von 40° bzw. 80° (Bilder 4.6.3-6a und -6b).

Ausgehend von der Forderung nach kleinstmöglichen Öffnungen zwischen den Rauten im geöffneten Zustand des Überganges ergibt sich die Notwendigkeit, die SME-Form so zu wählen, dass im geschlossenen Zustand keine Zwischenräume zwischen den SMEs auftreten. Das bedeutet, dass jede SME-Kantenform gleichsam als „Komplementär“-Kante des entsprechenden Nachbar-Elementes betrachtet werden muss. Solange man sich bei der Kantenform auf Geraden (\rightarrow Raute) beschränkt, ist das unerheblich. In allen anderen Fällen führt dies zwangsläufig zu Formen, die nur mehr über eine Symmetrieachse verfügen, d. h., sie sind nur mehr in einer Stellung verwendbar. Man könnte nun anstelle von einer „Raute“ von einem „Tropfen“ sprechen (Bild 4.6.3-7). Eine derartige SME-Variante wurde gefertigt und mit abgestreuter Oberfläche für die PFF-Versuche zur Verfügung gestellt.

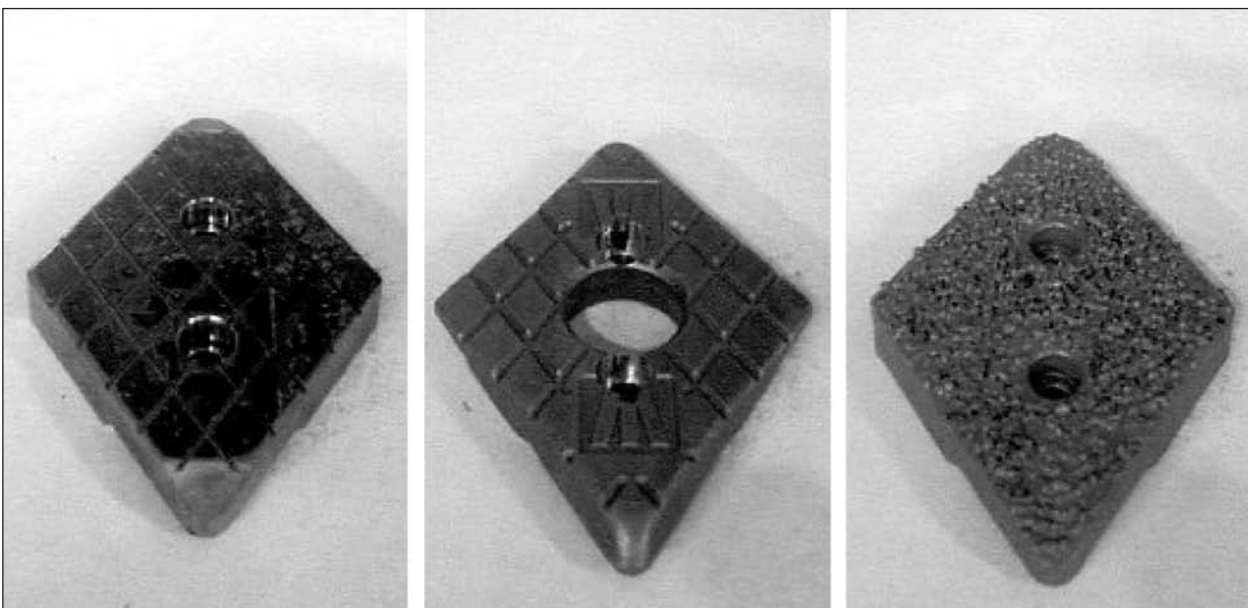


Bild 4.6.3-5a: Gefrästes Rauten-SME

Bild 4.6.3-5b: Geschmiedetes Rauten-SME

Bild 4.6.3-5c: Glattes Rauten-SME mit abgestreuter Oberfläche

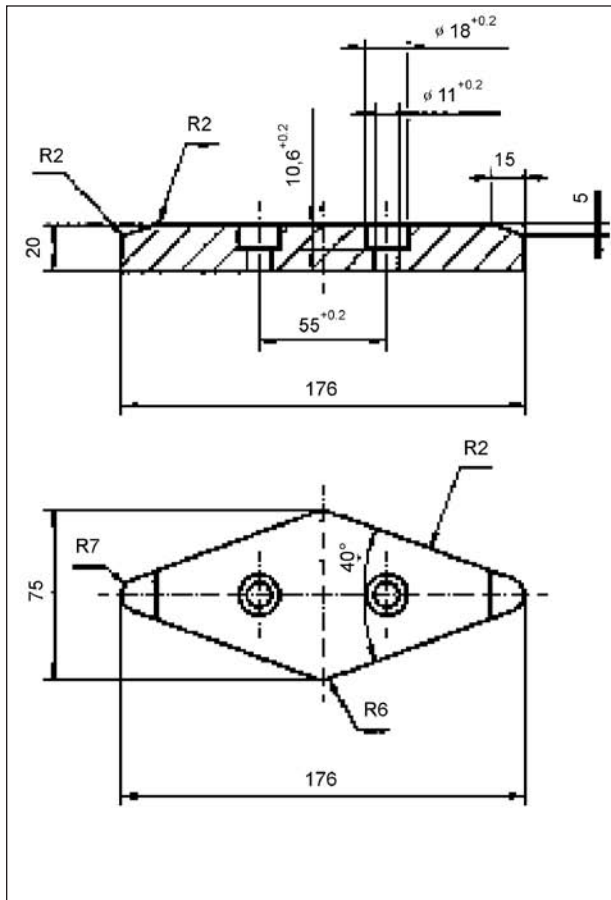


Bild 4.6.3-6a: 40°-Raute

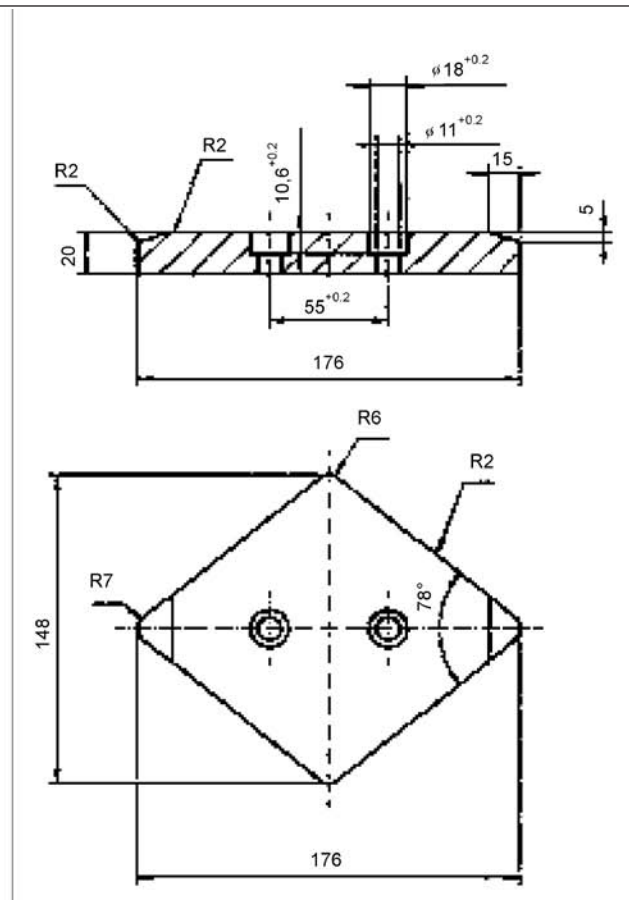


Bild 4.6.3-6b: 80°-Raute

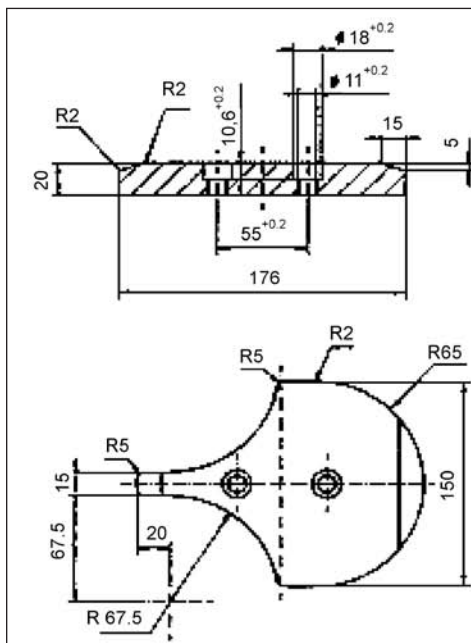
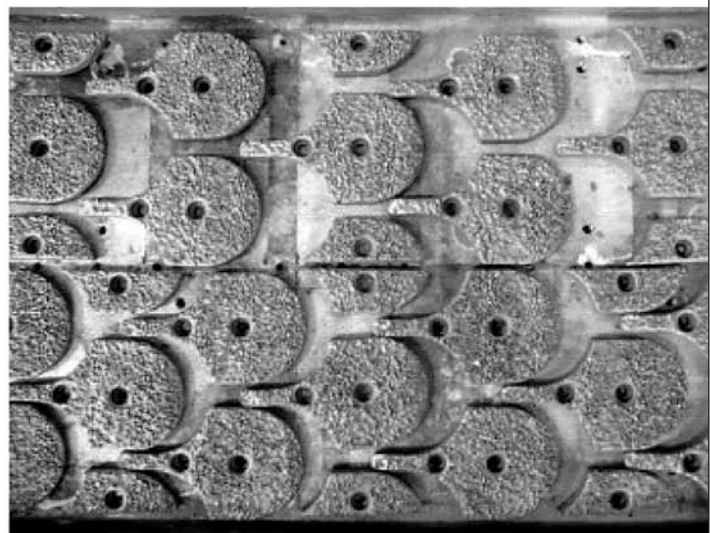


Bild 4.6.3-7: Tropfen-SME



Versuchsdurchführung

Die schalltechnischen Untersuchungen wurden am Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der BAST in Bergisch

Gladbach durchgeführt. Da hierzu ein eigener Bericht existiert (Klaus-Jürgen SCHENKER; Gernot SCHWALBE; Jens STEINHEUER: Akustische Optimierung von Fahrbahnübergängen für lange

Brücken mit SME-Mustern der Fa. Maurer Söhne, München), werden hier nur die wichtigsten Details genannt.

CPB-Messung (Fernfeldstellung)

- Akustische Messung des Reifenabrollgeräuschs im Fernfeld in Anlehnung an ECE-R51 (dort: Abstand Mikrofon – Fahrzeuglängsachse: 7,50 m; hier: 6,80 m wegen Abzug einer durchschnittlichen halben Fahrzeugbreite),
- Abstand Mikrofon zum Fußboden: 1,20 m,
- Abstand Mikrofon zum Reifen: 6,80 m.

CPX-Messung (Nahfeldstellung)

- Akustische Nahfeldmessung in Anlehnung an ISO/CD 11819-2,
- Abstand der Mikrofone zueinander: 400 mm,
- Abstand der Mikrofone vom Reifen: 200 mm,
- Winkel zwischen Mikrofonen und Mittelpunkt der Reifenaufstandsfläche (Latsch): 45°,
- Höhe der Mikrofone vom Boden: 100 mm.

Messergebnisse

Einzelerggebnisse (entnommen aus BAST-Bericht):

- Die Lautstärke der Schallabstrahlung wächst mit der Geschwindigkeit.
- Je größer der Abstand der Lamellen ist (Sommer- und Winterstellung), desto lauter die Schallabstrahlung.
- Die Reihenfolge des Schallminderungspotenzials der SME in Sommerstellung unterscheidet sich von der Reihung der SME in Winterstellung.
- Die Verwendung von SME reduziert die Lautstärke der Schallabstrahlung der Fahrbahnübergänge in Sommerstellung um minimal 1,5 und maximal 9 dB(A).
- In Winterstellung betrug die minimale Reduktion des Schallereignisses bei mit SME ausgerüsteten Fahrbahnübergängen 1 und die maximale Reduktion 5 dB(A).

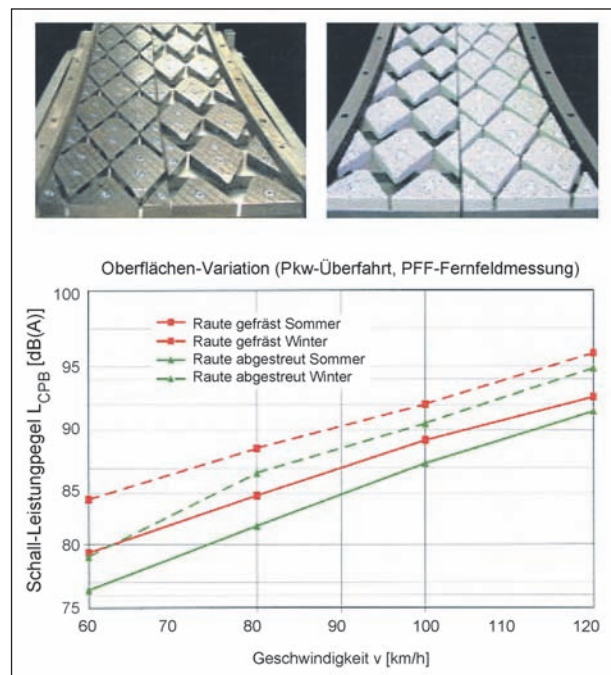


Bild 4.6.3-8: Schall-Leistungspegel bei unterschiedlichen Rauhenoberflächen

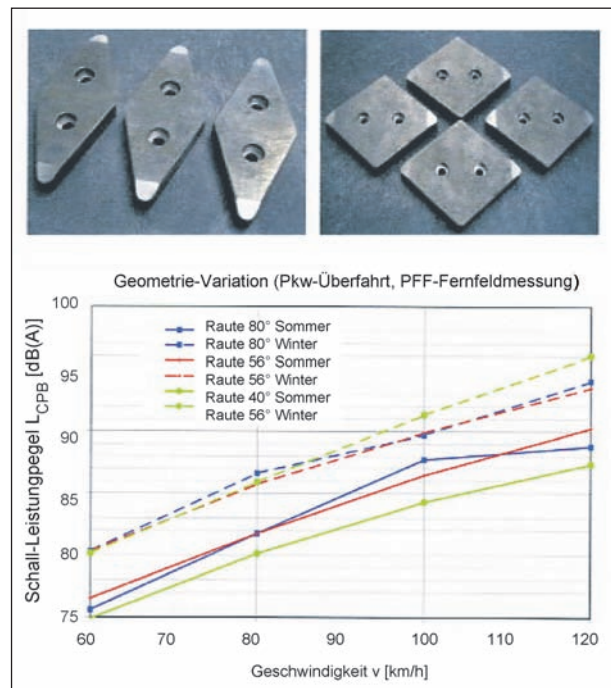


Bild 4.6.3-9: Schall-Leistungspegel bei unterschiedlichen Rauhengeometrien

- Eine hohe Oberflächenrauheit der SME bewirkt eine Verschiebung des Spektrums des Abstrahlgeräuschs in niedrigere Frequenzbereiche.
- Bei den Versuchen in Sommerstellung ist das Rauten-SME mit 40°-Rautenwinkel (das spitzeste SME im Reigen) das Element mit der höchsten Lautstärkereduzierung.

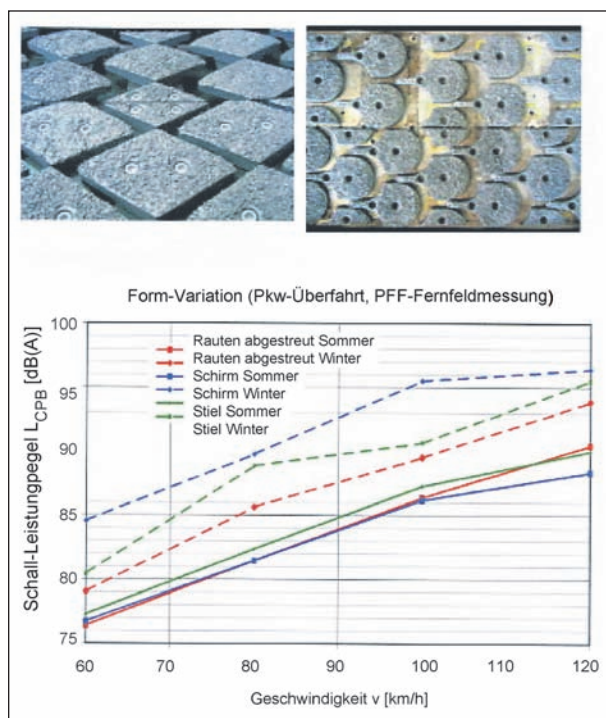


Bild 4.6.3-10: Schall-Leistungspegel bei unterschiedlichen SME-Formen

- Das leiseste SME in Winterstellung war das abgestreute Rauten-SME mit 66°-Rautenwinkel.
- In der Winterstellung war ein SME (tropfenförmiges SME) bei der Geschwindigkeit von 100 km/h lauter als die derzeitige verwendeten Standardlamellen.
- Das in großen Stückzahlen am günstigsten zu fertigende geschmiedete Rauten-SME („MAURER-Raute“) reduzierte in Winterstellung das Überfahrgeräusch zwischen 2 und 3 dB(A) und in Sommerstellung zwischen 4 und 5 dB(A).

Gesamtergebnis

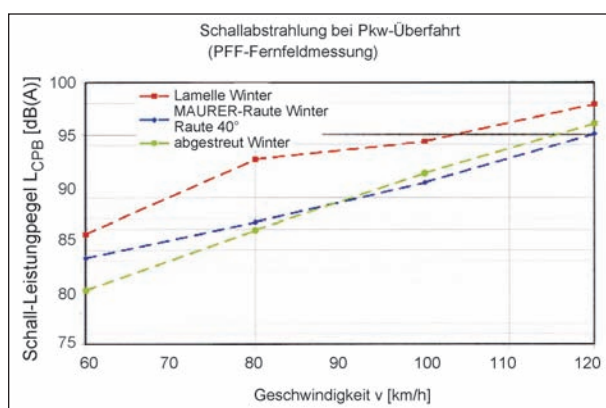


Bild 4.6.3-11: Schall-Leistungspegel bei Winterstellung

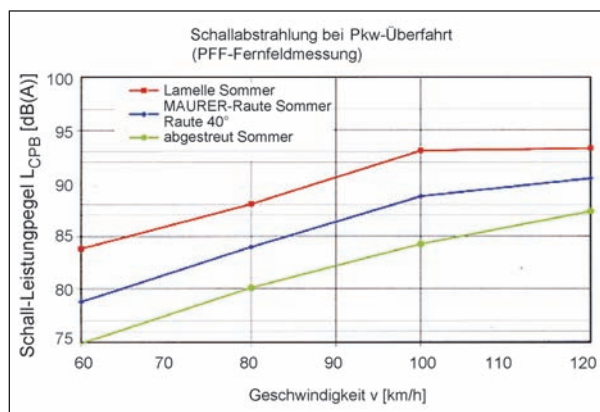


Bild 4.6.3-12: Schall-Leistungspegel bei Sommerstellung

Zusammenfassung und Ausblick

- Die Befestigung von Rauten-SME durch Aufschweißen ist insbesondere bei Nachrüstungen die bessere Lösung gegenüber Aufschrauben, da bei Letzterem die Ermüdungsfestigkeit der Lamellen um ca. 10 % reduziert wird.
- Die Grundform der Rauten hat sich bei den schalltechnischen Messungen als wirksamer erwiesen als die Tropfen-Form.
- Spitze Rauten-Anfahrwinkel zeigen gegenüber stumpfen zumindest bei kleinen Spaltweiten die stärkere Schallminderung, bedingen aber durch den größeren Rauten-Bedarf höhere Herstellungskosten.
- Den wirksamsten Minderungseffekt zeigen durch Abstreuen geraute SME-Oberflächen.

⇒ Die akustisch und wirtschaftlich sinnvollste Lösung ergibt sich somit bei einer Verwendung von Rauten mit mittlerem Anfahrwinkel (ca. 60°) in Verbindung mit einer rauen Oberfläche. Gegenüber Lamellenoberflächen ohne SME lassen sich damit bei Fahrzeuggeschwindigkeiten bis 100 km/h Schall-Leistungspegelsenkungen von 8 bis 9 dB(A) erzielen, gegenüber den auf dem Markt existierenden Rauten-SME immer noch 2 bis 3 dB(A).

⇒ Zur Überprüfung dieser Ergebnisse in der Praxis wird deshalb das Bauwerk Havelbrücke/Werder (im Zuge der BAB A 10 in Brandenburg) mit aufgeschweißten MAURER-Rauten mit rauer Oberfläche nachgerüstet.

4.7 Bewertung des Teilverbundes „Leise Straßen“

OPA spielen in Zeiten ansteigenden Verkehrsaufkommens und der damit verbundenen Zunahme des Verkehrslärms eine wesentliche Rolle. Durch ihre Konzeption als hohlraumreiches Asphaltmischgut trägt die eingebaute Fahrbahndeckschicht maßgeblich zur Reduktion des Reifen-Fahrbahngeräusches bei. Bei den Fahrbahnbelägen stellen OPA heute die effektivste Maßnahme zur Lärmreduzierung dar. Ein Nachteil dieser Bauweise ist jedoch deren Verschmutzungsanfälligkeit. Derzeit ist die akustische Wirksamkeit von OPA auf ca. 8 Jahre begrenzt.

Im Teilprojekt „Integrale Verbesserung von offenporigen Fahrbahndecken“ haben sich die Projektpartner das Ziel gesetzt, Lösungsansätze zur Verbesserung von OPA zu entwickeln. Voraussetzung dafür war im ersten Schritt die umfangreiche Analyse der Hohlraumstruktur, um Verschmutzungsmechanismen und Partikelbewegungen detailliert beschreiben zu können. Durch Untersuchungen mittels Computertomografie bei der Bundesanstalt für Materialforschung wurden hier sehr umfassende Strukturaufklärungen vorgenommen, die Eingang in die Bearbeitung der anderen Teilprojekte fanden.

Der Universität Stuttgart ist es gelungen, durch den Einsatz von Polymer-Nanotechnologie die Hohlraumwandungen in Offenporigen Asphaltten derart zu modifizieren, dass die Verschmutzungsneigung reduziert wird. Eine besondere Herausforderung stellte dabei die Abstimmung der einzelnen Bindemittelparameter dar. Durch die Zugabe des Polymers durften dessen Eigenschaften wie die Affinität zum Gestein nicht negativ verändert werden. In Laborversuchen zur Prüfung der Verschmutzungsanfälligkeit zeigte der Vergleich herkömmlicher OPA-Probepplatten mit OPA-Platten, die mit einem modifizierten Bindemittel hergestellt wurden, eine deutlich niedrigere Verschmutzungstendenz. Im Juli 2009 wurde auf der Erprobungsstrecke BAB 24 ein Testabschnitt mit diesem modifizierten OPA eingebaut. Die Praxis muss nun zeigen, ob sich die Laborergebnisse bestätigen und eine längere akustische Lebensdauer auch unter realen Bedingungen erzielt wird.

Die Universität München hat ein Simulationsmodell entwickelt, mit dem die Durchströmung in OPA nachgestellt werden kann. Dieses Modell veran-

schaulich sehr deutlich, welche Hohlraumstrukturen erforderlich sind, um die Entwässerungsfähigkeit von OPA verbessern zu können, und wie Reinigungsverfahren konzipiert werden sollten, um effektiver den Schmutzaustrag aus dem Gefüge zu bewirken.

Ein wesentlicher Bestandteil des Teilprojektes „Leise Straßen“ war die Analyse, inwieweit die Möglichkeit besteht, durch technische Maßnahmen das Schallabsorptionsvermögen von OPA weiter zu verbessern. Hinsichtlich der Ausprägung der Hohlraumstruktur und dessen Volumens sind hier physikalische Grenzen gesetzt. Deshalb war eine neue, sehr innovative Idee, Helmholtzresonatoren auf der Asphaltbinderschicht zu applizieren und mit dem Asphaltmischgut für OPA zu überbauen. Die Resonatorelemente wurden auf ein Absorptionsmaximum im Frequenzbereich von 800 bis 1.000 Hz eingestellt. Sie können somit das Absorptionsminimum von zweischichtigen Offenporigen Asphaltten ab 630 Hz ausgleichen. Auf Basis der labortechnischen Untersuchungen in der Hallkabine der Firma Müller BBM wurde eine zusätzliche lärmreduzierende Wirkung von bis zu 3 dB(A) prognostiziert. Damit sollte eine akustische Optimierung des Gesamtsystems bewirkt werden.

Nach Abschluss der Untersuchungen im akustischen Labor wurden zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der mechanischen Eignung der Resonatoren im Verbund durchgeführt. Die Belastungsversuche zeigten, dass durch den Einbau der Resonatoren keine nachteilige Beeinträchtigung des Ermüdungsverhaltens der offenporigen Asphaltdeckschichten infolge zyklischer Belastung zu erwarten ist [1].

Mit dem Bau der Erprobungsstrecke auf der BAB 24 sollten die Laborergebnisse in die Praxis umgesetzt werden. Im Vorfeld wurden bautechnische Fragen durch den Bau einer Versuchsstrecke auf dem Testgelände in Sperenberg geklärt. Die Ergebnisse zum Bau der Erprobungsstrecke und die Auswertung der akustischen Messungen sind im Kapitel 5 „Erfolgskontrolle“ detailliert beschrieben.

Einen weiteren Schwerpunkt im Teilprojekt „Leise Straßen“ stellte die akustische Optimierung von Lamellen-Fahrbahnübergängen dar. Hier arbeiteten die Firmen RW Sollinger Hütte, Mauer und Söhne GmbH & Co und die Bundesanstalt für Straßenwesen zusammen.

Im ersten Schritt wurden die Einbautechnologien hinsichtlich möglicher Verbesserungen untersucht. Dazu wurden verschiedene Variationen auf dem Testgelände in Sperenberg akustisch vermessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abweichungen vom niveaugleichen Einbau des Fahrbahnüberganges (Höhenversatz) zu deutlich höheren Schallemissionen im Vergleich zum niveaugleichen Einbau führen. Es wurden in Abhängigkeit der Höhendifferenz Pegelerhöhungen zwischen 1,5 und 2,5 dB(A) ermittelt [2]. In den derzeit gültigen ZTV-ING ist eine Höhendifferenz zwischen 3 bis 5 mm zulässig. Diese Forderung sollte aus Sicht der Lärmreduzierung bei der anstehenden Überarbeitung korrigiert und ein niveaugleicher Einbau zur angrenzenden Fahrbahn gefordert werden.

Eine weitere Ursache für die stoßartige Geräuschemission von Fahrbahnübergangskonstruktionen sind die verwendeten Materialien mit geringer Dämpfungswirkung im Fahrbahnübergang. Hier wurden umfangreiche Materialrecherchen und erste Tastversuche durchgeführt. Dabei zeigte sich die große Schwierigkeit, Materialien für Übergangskonstruktionen zu finden, die den hohen technischen Anforderungen hinsichtlich Funktionsfähigkeit und Nutzungsdauer entsprechen. Erste Erfolge zeigt der Einsatz elastomerbeschichteter dämpfender Lärmschutzelemente, wobei hier weiterführende Untersuchungen erforderlich sind.

Die Firma Maurer und Söhne GmbH & Co. hat zusammen mit der Bundesanstalt für Straßenwesen an der Entwicklung neuer Oberflächen für Fahrbahnübergänge gearbeitet. Die akustische Vermessung verschiedener Rautenelemente erfolgte im Prüfstand Fahrzeug-Fahrbahn der BAST. Dabei hat sich gezeigt, dass die akustisch und wirtschaftlich sinnvollste Lösung die Verwendung von Rauten mit mittlerem Anfahrwinkel (ca. 60°) in Verbindung mit einer rauen Oberfläche darstellt. Die Lärmreduzierung gegenüber dem Standard-Lamellen-Fahrbahnübergang beträgt bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h ca. 8 dB(A) [3]. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse in der Praxis wurde ein Fahrbahnübergang mit diesen Rautenelementen ausgerüstet. Die detaillierte Beschreibung und die Ergebnisse der akustischen Messungen sind im Kapitel 5 „Erfolgskontrolle“ beschrieben.

Literatur

- [1] RIEDL, S.: „Integrale Verbesserung Offenporiger Asphalte – Teil: Prüfung der mechanischen Belastung der Resonatoren im Verbund“, Universität Kassel; August 2008
- [2] ZÖLLER, M.: Schalltechnische Messungen am Fahrbahnübergang des Projektes LeiStra 2, Testgelände Sperenberg, Dezember 2008
- [3] SCHWALBE, G.: Untersuchungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn zur akustischen Optimierung von Fahrbahnübergängen für lange Brücken mit SME-Mustern der Fa. Maurer Söhne, Bundesanstalt für Straßenwesen, April 2009

5 Teilverbund „Erfolgskontrolle“

Dr.-Ing. Ulrike Stöckert
 Bundesanstalt für Straßenwesen
 Bergisch Gladbach

5.1 Einleitung

Schwerpunkt des Teilverbundes „Erfolgskontrolle“ ist die Erprobung der optimierten bzw. neu konzipierten Fahrbahnbeläge und -übergänge sowie die Bewertung der erzielten Ergebnisse hinsichtlich der lärmreduzierenden Wirkung.

Insgesamt wurden im Rahmen des laufenden Projektes folgende Erprobungsstrecken eingerichtet:

- BAB 61 Jackerath:
Erprobungsstrecke Waschbeton,
- BAB 61 Kerpen:
Erprobungsstrecke lärmoptimierter Gussasphalt,
- B 56 Düren:
Erprobungsstrecke Splittmastixasphalt lärmarm,
- BAB 24 Neuruppin:
Erprobungsstrecke Offenporiger Asphalt,
- BAB 10 Havelbrücke:
Erprobung lärmoptimierte Fahrbahnübergänge.

Die Bewertung der akustischen Eigenschaften der neuen Fahrbahnbeläge und der Oberflächenelemente für den Fahrbahnübergang erfolgt auf Grundlage durchgeführter Messungen nach der Methode der Statistischen Vorbeifahrt (SPB) gemäß ISO 11819-1 (Fernfeldmessungen) und mit der Nahfeldmethode (CPX) gemäß ISO/CD 11819-2.

Bei allen Erprobungsstrecken wurde mit den zuständigen Straßenbauverwaltungen in Nordrhein-Westfalen und Brandenburg zusammengearbeitet. Die Zielsetzung der Erprobungsstrecke mit allen erforderlichen Randbedingungen wurde bereits im Ausschreibungsverfahren formuliert.

Methode der Statistischen Vorbeifahrt (SPB)

Die Emission und Ausbreitung von Straßenverkehrsgeräuschen hängen hauptsächlich von den Eigenschaften der Straßenoberfläche ab, insbesondere von Textur und Porosität. Diese beiden Eigen-

schaften beeinflussen die Erzeugung des Reifen/Fahrbahngeräusches. Außerdem hat die Porosität Einfluss auf die Schallausbreitung, besonders dann, wenn die Ausbreitung dicht über der Oberfläche verläuft. Für die Beurteilung der akustischen Eigenschaften von Straßenoberflächen und deren Vergleich ist die Erfassung dieses Einflusses mit Hilfe eines genormten Messverfahrens sehr wichtig.

Der Geräuschpegel wird in der BASt an Mikrofonen in vier Höhen (1,20 m/2,40 m/3,60 m/4,80 m), 7,50 m von der Mitte des Fahrstreifens entfernt gemessen. Gleichzeitig werden die Geschwindigkeiten der vorbeifahrenden Fahrzeuge ermittelt.

Für jede Fahrzeugkategorie wird der maximale A-bewertete Geräuschpegel jeder Vorbeifahrt gegen den zugehörigen dekadischen Logarithmus der jeweiligen Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen. In einer Regressionsanalyse wird dann für jede Fahrzeugkategorie eine Gerade durch die Messwerte gelegt.

Durch eine Vielzahl von Messungen an unterschiedlichen Messquerschnitten wird für jeden Straßenbelag ein mittlerer Geräuschpegel ermittelt. Dieser wird zu dem Geräuschpegel auf einem Referenzbelag (nicht geriffelter Gussasphalt) in Beziehung gesetzt. Als Pegeldifferenzen ergibt sich so ein Wert, der nach einer offiziellen Einführung durch das Verkehrsministerium als Korrekturwert für unterschiedliche Straßenoberflächen die D_{Stro} -Werte bei der Lärmprognose von dem Neubau und der baulichen Erweiterung von Straßen im Rahmen der „Richtlinie für den Lärmschutz an Straßen“ RLS-90 [7] angewendet wird.

In Bild 5-1 ist der Messaufbau der Statistischen-Vorbeifahrt-Methode der BASt darstellt.



Bild 5-1: Messaufbau der Statistischen-Vorbeifahrt-Methode

Straßenoberfläche	D _{StrO} in dB(A)
Nicht geriffelter Gussasphalt (Referenz)	0
Asphaltbeton ≤ 0/11 und Splittmastixasphalt 0/8 und 0/11 ohne Abspaltung Waschbeton lärmarmere Gussasphalt ¹	- 2
Offenporige Asphalte 0/11 (Hohlraumgehalt ≥ 22 Vol.-%)	- 4
Offenporige Asphalte 0/8 (Hohlraumgehalt ≥ 22 Vol.-%)	- 5

Tab. 5-1: D_{StrO}-Werte für Fahrbahndecken gemäß RLS-90 [1, 4, 5, 7]

Tabelle 5-1 führt neben dem Referenzbelag die lärmindernden Straßenoberflächen gemäß RLS-90 mit den entsprechenden D_{StrO}-Werten an. Als lärmarm werden Straßenoberflächen mit einer Lärminderung von mindestens 2 dB(A) bezeichnet.

Die RLS-90 werden derzeit überarbeitet. Insbesondere die Emissionsannahmen sind nach fast 20 Jahren veraltet und bedürfen einer Aktualisierung. Um zukünftigen Entwicklungen bei der Geräuschemission Rechnung tragen zu können, soll in den neuen RLS neben einer Tabelle mit Korrekturwerten D_{StrO} auf ein Verfahren verwiesen werden, mit dem neue Werte ermittelt werden können.

Nahfeldmethode (Close Proximity Method [CPX])

Mit dem CPX-Anhänger können die Reifen-/Fahrbahngeräusche unbeeinflusst von den speziellen Gegebenheiten der Messumgebung und unabhängig von den Antriebsgeräuschen des Fahrzeuges gemessen werden.

Die Messung erfolgt gemäß ISO/CD 11819-2 kontinuierlich über den zu untersuchenden Messabschnitt und dient vor allem der Beurteilung der akustischen Homogenität des Streckenabschnitts. Die Methode ist für die vergleichende Betrachtung unterschiedlicher Streckenabschnitte gut geeignet.

Der Messanhänger der BAST ist in Bild 5-2 (oben) dargestellt. Das Reifen-/Fahrbahngeräusch wird mit zwei verschiedenen Referenzreifen erzeugt.



Bild 5-2: CPX-Anhänger der BAST (links) – Messrad und Mikrofone (rechts) [14]

In kurzem Abstand zur Reifenaufstandsfläche sind jeweils vor und hinter dem Reifen Messmikrofone montiert, die der Schallaufzeichnung dienen (Bild 5-2, unten).

Da die Messungen im fließenden Verkehr durchgeführt werden, muss der Anhänger besondere Anforderungen an die Schalldämmung im Inneren erfüllen, um Außengeräusche, die durch andere Fahrzeuge verursacht werden, zu dämmen. Gemäß ISO-Norm ist die Verwendung spezieller Reifensätze vorgeschrieben, um reproduzierbare Messungen zu gewährleisten.

Mit dem CPX-Verfahren werden pro Streckenabschnitt im Abstand von 20 m die A-bewerteten Schalldruckpegel gemessen und energetisch gemittelt. Die Messungen erfolgen bei Geschwindigkeiten möglichst nahe der Referenzgeschwindigkeit von $v_{Ref} = 80$ km/h. Gemäß Entwurf werden Korrekturrechnungen vorgenommen, um die akustischen Messdaten für Vergleichsanalysen zu ermitteln [14].

¹ Mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 22/2010 des BMVBS wurde im Spetember 2010 der lärmarme Gussasphalt in die Tabelle 4 der RLS-90 als weitere lärmindernde Bauweise aufgenommen.

5.2 Erprobungsstrecken

5.2.1 Erprobungsstrecke Waschbeton auf der BAB 61

Zielsetzung

Die Suche nach einer neuen noch leiseren Oberflächengestaltung für Betonfahrbahndecken konzentriert sich derzeit auf den Waschbeton. Bei Waschbetondecken wird die dünne obere Mörtelschicht durch Ausbürsten entfernt. Die lärmindernden Eigenschaften der Waschbetone hängen von Größe sowie Ausrichtung und Texturtiefe der Oberflächengesteinskörnung ab.

Mit dem Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/2006 [2] wurde der Waschbeton als lärmindernde Straßenoberfläche eingeführt. Mit Einführung der ZTV Beton StB 07 stellt die Waschbetonbauweise eine Regelbauweise dar, sodass Betondecken fast ausschließlich mit dieser Oberflächenstruktur gebaut werden. Gemäß ZTV Beton-StB 07 soll die Texturtiefe des Waschbetons zwischen 0,6 mm und 1,1 mm liegen, wobei mit Beginn der Bearbeitung des Projektes nicht bekannt war, welche mittlere Texturtiefe zur Verminderung der Schallemission erforderlich ist und gleichzeitig die Anforderungen an die Griffigkeit der Straßenoberfläche erfüllt.

Ziel des Projektes war es, zu untersuchen, inwieweit durch die Variation der Texturtiefe die Geräuschemission von Waschbetonoberflächen optimiert werden kann. Theoretische Grundlagen zum Einfluss der Textur auf das Reifen-Fahrbahngeräusch zeigen einen Zusammenhang zwischen dem Größtkorn einer Straßenoberfläche und der Geräuschenstehung. Kleine Durchmesser ergeben tendenziell leisere Straßen. Dies gilt sowohl für Pkw- als auch Lkw-Reifen. Beim optimalen Größtkorndurchmesser zeigen sich jedoch Unterschiede, da Pkw- und Lkw-Reifen, neben der Größe, einen unterschiedlich steifen Aufbau haben, der Unterschiede in der Schwingungs-Anregung bewirkt.

In Laborversuchen musste zunächst geprüft werden, ob die gesamte Bandbreite möglicher Texturtiefen von 0,6 mm bis 1,1 mm hergestellt werden kann. Im Rahmen der Erprobungsstrecke sollten Abschnitte mit unterschiedlicher Texturtiefe hergestellt werden, um zu prüfen, welches Schallminderungspotenzial hinsichtlich Pkw- und Lkw-Reifen besteht.

Einbau der Erprobungsstrecke

Im Juni 2007 wurde auf der BAB 61 zwischen den Anschlussstellen Jackerath und Bergheim über einen Streckenabschnitt von 14,2 km eine grundlegende Erneuerung der Fahrbahn in Betonbauweise vorgenommen. Auf einem Streckenabschnitt von ca. 7 km Länge wurde in Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb Straßen NRW eine Erprobungsstrecke für die Optimierung der Waschbetonoberfläche eingerichtet. Baubegleitend wurden die Laborprüfungen von der TPA in Köln durchgeführt.

Auf verschiedenen Streckenabschnitten sollte ein Waschbeton 0/8 mit Texturtiefen zwischen 0,6 mm und 1,1 mm hergestellt werden. Die Länge der Streckenabschnitte betrug 500 m.

Im Rahmen der erweiterten Eignungsprüfungen wurden im Betonlabor der TPA Köln Probestplatten hergestellt und verschiedene Oberflächenverzögerer und Entaktivierer getestet. Zum Einsatz kamen der Kontaktverzögerer Rheoface und verschiedene Produkte des Entaktivierers whispertop kombi (im

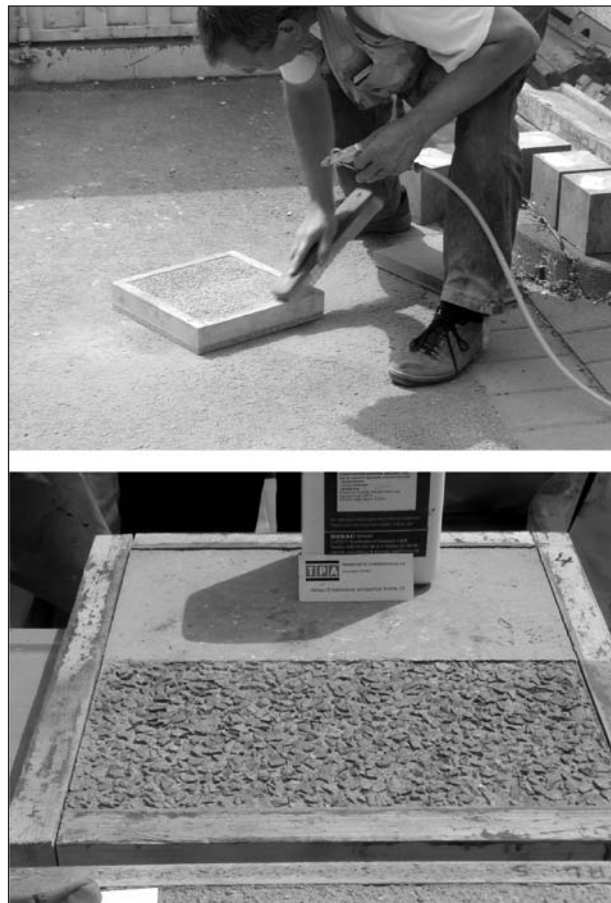


Bild 5-3: Probestplatten für die Herstellung von Waschbetonoberflächen im Labor der TPA Köln

Folgenden mit Auftragsmittel A bis F benannt). Die Laborergebnisse zeigten, dass die geforderten Texturtiefen mit diesen Auftragsmitteln labortechnisch erreicht werden können. Bild 5-3 zeigt die Herstellung der Probelplatten und die Oberflächenstruktur nach dem Ausbürstvorgang.

Bild 5-4 zeigt die Ergebnisse der Texturmessungen, die durch die Bundesanstalt für Straßenwesen mittels Sandfleckverfahrens ermittelt wurden. Insgesamt wurden Texturtiefen zwischen 0,5 und 1,2 mm im Labor hergestellt.

Im nächsten Schritt sollten jetzt unter realen Einbaubedingungen Testfelder auf der Erprobungsstrecke unter Verwendung dieser Auftragsmittel mit einer Waschbetonoberfläche hergestellt werden. Die Einbauarbeiten auf der BAB 61 begannen im Juli 2007. Die BAST begleitete den Einbau. Bild 5-5 zeigt den Herstellungsprozess.

Insgesamt wurden 5 Testfelder à 100 m Länge mit jeweils unterschiedlichen Auftragsmitteln behandelt und anschließend die Waschbetonoberfläche hergestellt.

Mittels Sandfleckverfahrens wurden ca. 24 Stunden nach Fertigstellung der Deckschicht die Texturtiefen bestimmt. Dabei wurden pro Betonplatte insgesamt 5 Messpunkte festgelegt. Die Werte wurden anschließend gemittelt. In Bild 5-6 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

Die im Labor ermittelten Texturtiefen konnten unter praktischen Gegebenheiten nicht erzielt werden. Vor allem Texturtiefen über 0,8 mm wurden in den Testfeldern auf der BAB 61 nicht erzielt. Um den Bauablauf nicht zu verzögern, wurden keine weiteren Auftragsmittel und -mengen im Rahmen von Testfeldern untersucht. Für die Einrichtung des Hauptfeldes wurden die Auftragsmittel A, B und C

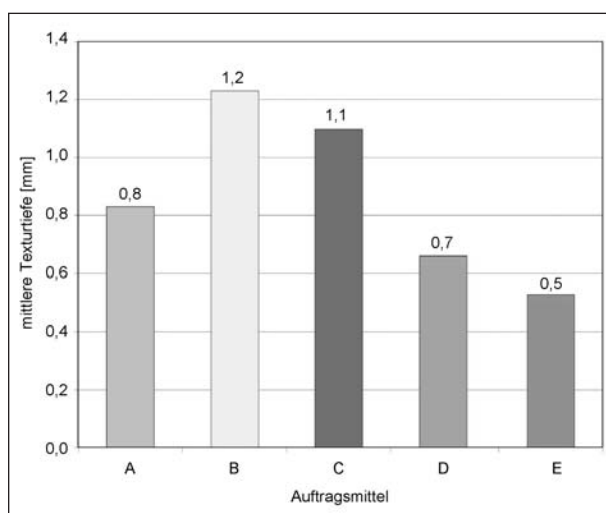


Bild 5-4: Texturtiefen der Probelplatten unter Verwendung verschiedener Oberflächenverzögerer

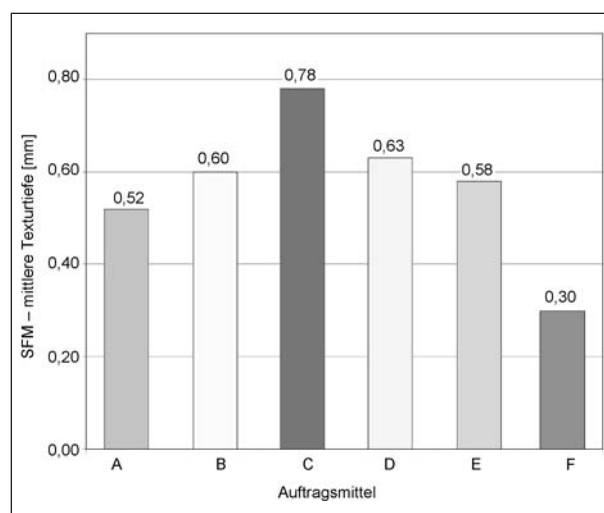


Bild 5-6: Testfelder Waschbeton auf der BAB 61 – Texturtiefen



Bild 5-5: Aufbringen des Entaktivierers und Ausbürsten der Mörtelschicht zur Herstellung von Waschbeton

ausgewählt. Mit jedem Auftragsmittel wurden Streckenabschnitte von 500 m hergestellt.

Während des Einbaus erfolgten die Messungen der Mörtelschichtdicke und Auftragsmenge des Oberflächenverzögerers bzw. Entaktivierers. Nach Fertigstellung der Waschbetonoberfläche wurde nach ca. 24 Stunden die Texturtiefe mittels Sandfleckverfahrens bestimmt. In Bild 5-7 sind die Ergebnisse dargestellt.

Die erreichten Texturtiefen lagen zwischen 0,6 und 0,8 mm.

Mit dem verwendeten Auftragsmittel A wurde in den Tastversuchen im Labor eine Texturtiefe von 0,8 mm erzielt. Auf der Erprobungsstrecke lagen die erreichten Texturtiefen zwischen 0,5 mm und 0,6 mm bei Mörtelschichtdicken von ca. 0,2 mm. Insgesamt wurde visuell eine gleichmäßige Waschbetonoberfläche hergestellt.

Mit dem Auftragsmittel B wurden Texturtiefen zwischen 0,65 und 0,84 mm auf der Erprobungsstrecke erreicht. In den Tastversuchen im Labor wurde an Probeplatten aus Waschbeton eine Texturtiefe von 1,2 mm erzielt. Die ermittelten Mörtelschichtdicken auf diesem Probefeld lagen zwischen 0,2 und 0,4 mm. Insgesamt liegt die Streuung der erzielten Texturtiefen in diesem Probeabschnitt am größten.

Mit dem Auftragsmittel C wurde im Labor im Rahmen der Tastversuche eine Texturtiefe von ca. 1,1 mm

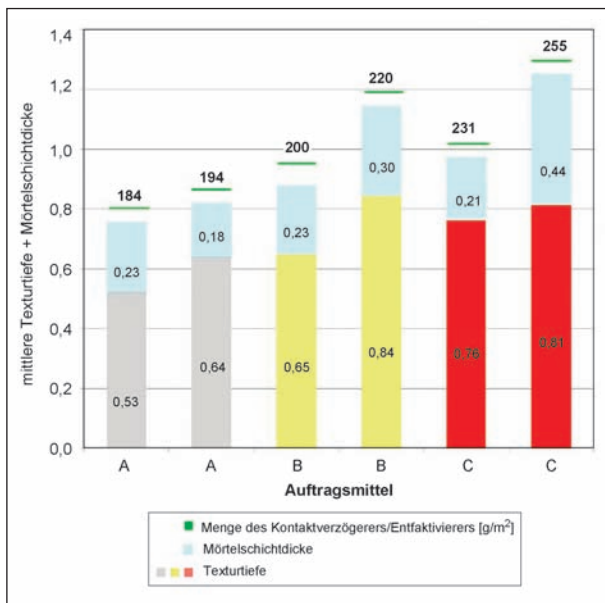


Bild 5-7: Hauptfelder Waschbeton auf der BAB 61 – Texturtiefen

erreicht. Auf dem Testfeld der Erprobungsstrecke lagen die Werte zwischen 0,76 und 0,81 mm bei Mörtelschichtdicken zwischen 0,2 und 0,4 mm. Ein signifikanter Einfluss der Mörtelschichtdicke auf die Texturtiefe konnte mit diesen Prüfverfahren nicht nachgewiesen werden.

Messungen der akustischen Eigenschaften

Für die Erfassung der akustischen Eigenschaften der Waschbetonoberflächen muss der gesamte Bauabschnitt dem Verkehr übergeben sein. Die Messungen sollten dann frühestens nach 6 Wochen Verkehrsbelastung erfolgen, um ein Entfernen loser Mörtelpartikel durch den überrollenden Verkehr zu gewährleisten.

Die akustischen Eigenschaften der Waschbetonoberflächen wurden mit der SPB-Methode und dem CPX-Verfahren im Oktober 2007 ermittelt. Tabelle 5-2 beinhaltet die Ergebnisse der SPB-Messungen auf den einzelnen Streckenabschnitten der Hauptfelder.

Insgesamt liegen die ermittelten Geräuschpegel sehr nah beieinander. Die Ergebnisse der mittleren Pkw-Vorbeifahrtpegel zeigen, dass auf allen drei Testabschnitten eine Lärmreduzierung von ca. -1 dB(A) gegenüber dem Referenzwert gemäß RLS-90 (82,5 dB(A)) erreicht wurde.

Neben den mittleren Pkw-Vorbeifahrtpegeln wurden auch mittlere Vorbeifahrtpegel schwerer Lkw gemessen. Gemäß RLS-90 gibt es keinen SPB-Referenzwert für Lkw. Nach ULLRICH [12] kann für eine Geschwindigkeit von 88 km/h ein Referenzwert L (Lkw, GA) von 88,5 dB(A) zur Beurteilung herangezogen werden. Unter Berücksichtigung dieses Wertes wurde für die Geräuschemission von Lkw keine Lärmreduzierung erzielt.

	SPB-Messung [dB(A)] Pkw (120 km/h)*	SPB-Messung [dB(A)] Lkw (88 km/h)
Testfeld 1 (Auftragsmittel A)	84,1	88,3
Testfeld 2 (Auftragsmittel B)	84,4	88,6
Messstation 3 (Auftragsmittel C)	84,0	88,0
* Referenz gemäß RLS-90 (nicht geriffelter Gussasphalt) = 85,2 dB(A)		

Tab. 5-2: SPB-Messungen auf der BAB 61 [1]

In Bild 5-8 sind die Ergebnisse der CPX-Messungen auf allen Waschbetonfeldern dargestellt.

Die Messungen zeigen gleich bleibende Schalldruckpegel über den gesamten Streckenabschnitt.

Die Messungen erfolgten mit den zwei Referenzreifen der CPX-survey-Methode. Reifen D (CPX_{Lkw}) ist hinsichtlich der Texturunterschiede einer Fahrbahnoberfläche verhältnismäßig unempfindlich, reagiert aber empfindlich auf das Absorptionsvermögen und den Hohlraumgehalt einer Oberfläche. Reifen D repräsentiert ein dem Lkw-Reifen ähnliches Verhalten.

Reifen A (CPX_{Pkw}) spiegelt die Unterschiede akustisch deutlich differenzierter wider als Reifen D und ist sehr gut geeignet, um die akustische Qualität der Textur der Oberfläche zu beurteilen. Reifen A repräsentiert ein dem Pkw-Reifen ähnliches Verhalten.

Wie in Bild 5-8 deutlich wird, unterscheiden sich die Waschbetonfelder hinsichtlich der ermittelten CPX_{Lkw} und CPX_{Pkw} nicht voneinander. Über den gesamten Streckenabschnitt wurden gleich bleibende Schalldruckpegel erfasst.

Eine Ursache dafür liegt in der engen Spannweite der erreichten Texturtiefen (0,6 mm bis 0,8 mm) auf der Erprobungsstrecke. Die ermittelten Texturtiefen bei Tastversuchen im Labor (0,6 mm bis 1,2 mm) konnten auf der Erprobungsstrecke nicht erzielt werden.

Ein direkter Vergleich der CPX-Messungen mit den SPB-Messungen ist nicht möglich, da die Korrelation der Messverfahren bisher nicht eindeutig festzustellen ist. Deshalb wurden auf der BAB 61 vor Beginn der Teststrecke CPX-Messungen auf einem Streckenabschnitt durchgeführt, bei dem die Oberfläche mit einem Stahlbesen in Querrichtung strukturiert wurde. Dabei wurden CPX_{Pkw} - und CPX_{Lkw} -Werte von 102,2 dB(A) ermittelt. Der Vergleich zeigt, dass die Waschbetonoberfläche um ca. 3 bis 4 dB(A) leiser ist.

Parallel zu den Messungen der akustischen Eigenschaften wurden auf der BAB 61 die Griffigkeitskennwerte mit dem SKM-Verfahren ermittelt.

Die Ergebnisse der SKM-Messungen zeigen, dass für die Waschbetonoberfläche durchgehend sehr gute Griffigkeitswerte von $\mu_{SKM} = 0,58$ ermittelt wurden. Die bessere Makrotextur der Waschbetonoberfläche beeinflusst entscheidend deren positive Griffigkeitsausbildung. Die gewünschte Griffigkeit von $\mu_{SKM} = 0,46$ (ZTV Beton-StB) wird zielsicher erreicht.

Insgesamt hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse aus den Laborversuchen nicht auf die Erprobungsstrecke übertragen werden konnten. Texturtiefen $> 0,8$ mm wurden nicht erreicht. Somit konnte die geplante Untersuchung der Abhängigkeit zwischen Texturtiefe und Schalldruckpegel auf der BAB 61 nicht durchgeführt werden. Deshalb wurden weitere Laboruntersuchungen durchgeführt.

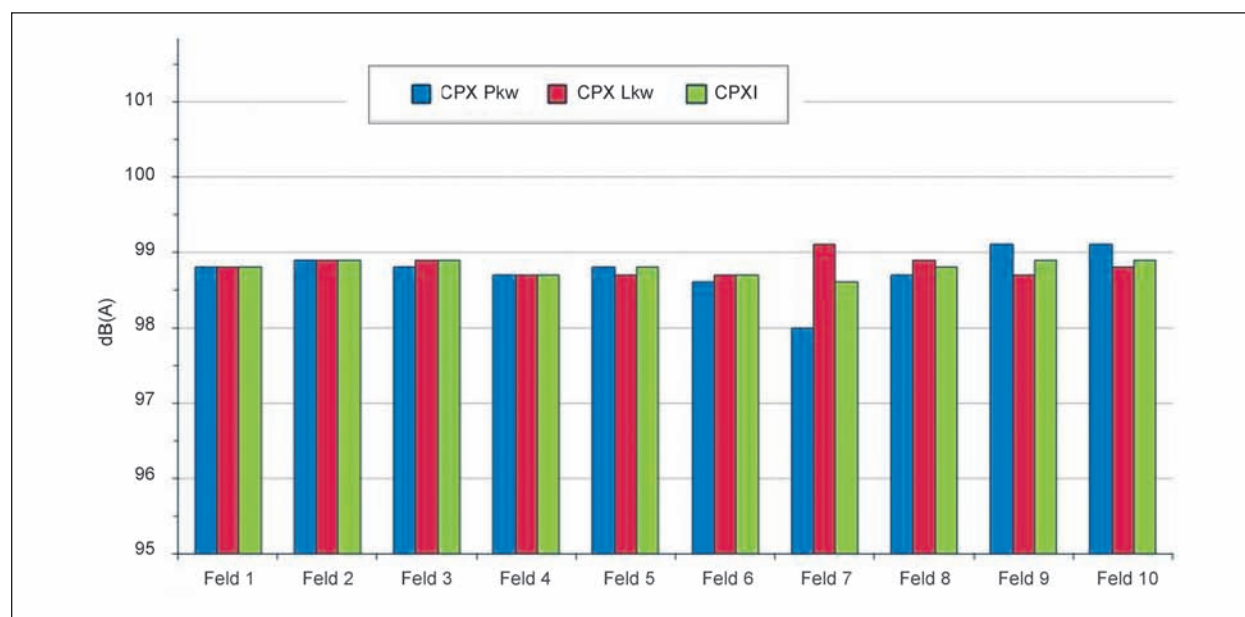


Bild 5-8: Waschbeton auf der BAB 61 – CPX-Messungen [14]

Die Bundesanstalt für Straßenwesen verfügt über den Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (PFF), mit dem die akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen ermittelt werden können (Bild 5-9). In diesem Prüfstand können verschiedene Fahrbahnoberflächen eingebaut und das Reifen/Fahrbahngeräusch mit Hilfe von einem Pkw- oder Lkw-Reifen erfasst werden.

Von der TPA Köln wurden Probepplatten unterschiedlicher Texturtiefe hergestellt. Für die Herstellung der Probepplatten wurde ein Waschbeton 0/8 mit einer Ausfallkörnung verwendet. Auf allen Probepplatten wurde die Texturtiefe mittels Sandfleckverfahrens erfasst (Bild 5-10). Die Betonzusammensetzung entspricht der in der Praxis am häufigsten verwendeten Betonsorte. Dabei wurden die Platten entsprechend ihrer Texturtiefe in drei Bereiche unterteilt:

- Bereich A: 0,4 bis 0,6 mm,



Bild 5-9: Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der Bundesanstalt für Straßenwesen

- Bereich B: 0,7 bis 0,9 mm,
- Bereich C: 1,0 bis 1,2 mm.

Die Fahrbahn des Prüfstands Fahrzeug/Fahrbahn wurde in drei Abschnitte zu je sechs Kassetten unterteilt. Jeweils sechs aufeinanderfolgende Kassetten waren mit einer Waschbetonoberfläche gleicher Texturtiefe bestückt. Durch diese Dreiteilung war es möglich, direkt die Schallpegel der unterschiedlichen Texturtiefen zu ermitteln.

Die Schallmessungen des Abrollgeräusches fanden unter Laborbedingungen im PFF der Bundesanstalt für Straßenwesen statt. Die Positionierung der Mikrofone erfolgte in Anlehnung an die Richtlinien für die Messung der Schallabstrahlung eines Reifens im Nahfeld mittels CPX-Methode und für die Messung im Fernfeld mittels CPB-Messungen [10].

Die Versuchsreihen wurden jeweils mit Geschwindigkeiten von 50 km/h, 80 km/h, 110 km/h und

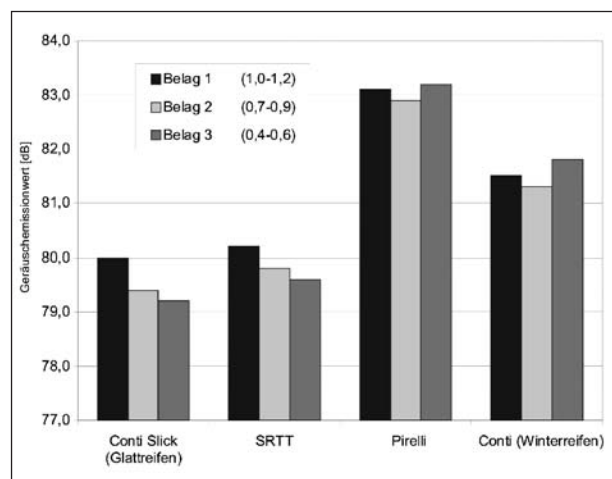


Bild 5-11: Geräuschemissionswerte auf Waschbetonoberflächen mit unterschiedlicher Texturtiefe (Messung bei 80 km/h mit verschiedenen Reifentypen)

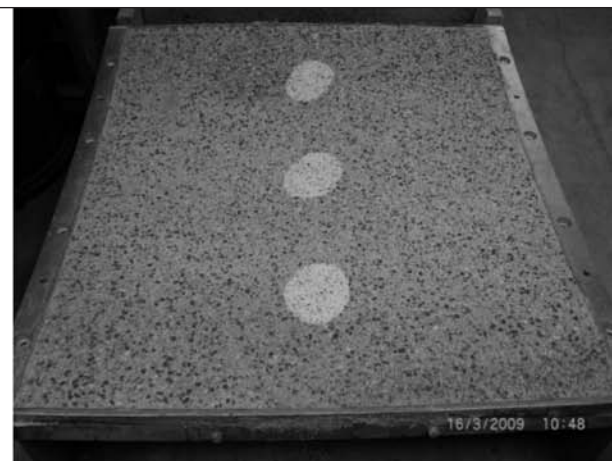


Bild 5-10: Prüfkassetten mit Waschbeton 0/8 für Untersuchung im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn

120 km/h durchgeführt. Es wurden fünf unterschiedlich profilierte Reifen und ein Glattreifen verwendet.

In Bild 5-11 sind erste Ergebnisse der Geräuschemission bei 80 km/h bei unterschiedlichen Reifentypen dargestellt. Der Einfluss des Profils auf das Reifen-/Fahrbahngeräusch wird sehr deutlich.

Der Vergleich der Waschbetonoberflächen mit unterschiedlicher Texturtiefe zeigt Pegelunterschiede im Bereich zwischen 0,5 und 1,0 dB(A). Ein Einfluss der Texturtiefe auf das Reifen-Fahrbahngeräusch konnten in diesen Versuchsreihen nicht nachgewiesen werden.

Bewertung

Seit 2007 werden Betondecken fast ausschließlich mit einer Waschbetonstruktur gebaut. In den letzten Jahren wurde durch die Bundesanstalt für Straßenwesen der Bau von Fahrbahndecken aus Waschbeton bundesweit begleitet, um Erfahrungen bei der Herstellung dieser neuen Bauweise zu dokumentieren und ggf. Optimierungsvorschläge hinsichtlich der Gebrauchseigenschaften aufzuzeigen. Diese Erfahrungen sollen in die Bewertung der Ergebnisse der Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Leiser Straßenverkehr 2“ einbezogen werden.

Auf über 10 Strecken wurden nach Fertigstellung der Deckschicht Texturtiefen mittels Sandfleckverfahrens ermittelt. Gemäß Regelwerk (ZTV Beton-StB 07) soll die Texturtiefe des Waschbetons zwischen 0,6 mm und 1,1 mm liegen. Diese Anforderung wurde bei allen Strecken zielsicher erreicht, wobei die ermittelten Texturtiefen in der Regel zwischen 0,7 und 0,8 mm lagen.

In den letzten drei Jahren wurden parallel zum Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ 10 Waschbetonstrecken mittels Statistischer Vorbeifahrt hinsichtlich ihrer Geräuschemission durch die BAST untersucht.

Als lärmarm werden Straßenoberflächen mit einer Lärminderung von mind. 2 dB(A) bezeichnet. Gemäß RLS-90 weisen Waschbetonoberflächen einen D_{StrO} -Wert von -2 dB(A) auf und zählen zu den lärmarmen Fahrbahnbelägen.

Die Ergebnisse zeigen eine sehr große Spannweite der ermittelten Schalldruckpegel von -0,5 dB(A) bis -2,6 dB(A) auf den untersuchten Waschbeton-

oberflächen. Unter Berücksichtigung des entsprechend dem Prüfverfahren zu berücksichtigenden Toleranzbereiches entsprechen insgesamt 7 der 10 untersuchten Strecken den Anforderungen einer lärmarmen Fahrbahnoberfläche gemäß RLS-90. Es kann festgehalten werden, dass die Waschbetonoberflächen der Eingruppierung als lärmarme Fahrbahndeckschicht entsprechen. Die Bandbreite der Ergebnisse zeigt jedoch auch, dass hier Optimierungspotenzial hinsichtlich der Geräuschemission besteht.

Die Untersuchungen im Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“ haben gezeigt, dass bei dieser neuen Bauweise eine Lärmoptimierung allein über die Texturtiefe nicht möglich ist. Erste akustische Analysen im Labor haben gezeigt, dass auch bei größeren Texturtiefen (> 0,9 mm) keine deutliche Lärminderung eintritt. In weiterführenden Forschungsarbeiten sollte untersucht werden, inwieweit z. B. über die Gesteinsart und die Kornform die Texturausbildung hinsichtlich der akustischen Eigenschaften von Waschbetonoberflächen optimiert werden kann.

5.2.2 Erprobungsstrecke lärmoptimierter Gussasphalt auf der BAB 61

Zielsetzung

Deckschichten aus Gussasphalt stellen auf Bundesautobahnen eine langjährig bewährte Bauweise dar, die bis vor kurzem nicht in die Liste der lärmindernden Deckschichten eingeordnet werden konnte. Gussasphalt wird in der Variante „nicht geriffelt“ mit einer 5/8-Abstreuung als Referenzbauweise betrachtet und hat in der RLS-90 den D_{StrO} -Wert = 0 dB(A). Der D_{StrO} -Wert ist definiert als Differenz zwischen dem Pkw-Vorbeifahrtspegel an einer bestimmten Deckschichtart und der Pkw-Vorbeifahrt an Gussasphaltdecken. Damit ist diese Bauweise derzeit aus Sicht der Lärmreduzierung gegenüber anderen Asphaltbauweisen im Nachteil.

Die zentrale Fragestellung bei der lärmtechnischen Optimierung zielt auf die Gestaltung und Ausführung der Oberfläche ab. Bei Einbau von Gussasphaltemischgut mit dem Fertiger entsteht ein „Mörtelspiegel“, der zur Sicherstellung der Griffigkeit aufgeraut werden muss. Dazu werden bei herkömmlichem Gussasphalt relativ grobe Gesteinskörnungen aufgestreut und mit Hilfe von Gummirad- und Glattmantelwalzen eingedrückt. Diese

Bauweise wird als „nicht geriffelt“ bezeichnet und ist die bereits genannte Referenzbauweise gemäß RLS-90. Die durch den Walzprozess entstehende Oberfläche ist relativ uneben und trägt zur Erhöhung des Reifen-Fahrbahngeräusches bei. Die akustisch optimierte Bauweise verwendet Abstreuematerial mit einem maximalen Größtkorn von 3 bis 4 mm und verzichtet gänzlich auf das Walzen. Damit lassen sich bei optimaler Ausführung gegenüber der herkömmlichen Bauweise bis zu 3 dB(A) leisere Oberflächen für Pkw herstellen, wie die Erprobungsstrecke im Rahmen des Verbundprojekts „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“ ergab.

Im Zuge der weiteren Erprobung im „Leisen Straßenverkehr 2“ war angedacht, die Abstreuung der Gussasphalt-Oberfläche je nach Hauptnutzung mit Lkw oder Pkw fahrstreifenweise zu variieren. Hierzu ist eine Abstreuung des Hauptfahrstreifens mit 5 mm Größtkorn und des Überholfahrstreifens mit 3 mm Durchmesser denkbar, sodass für Strecken mit hoher Belastung durch Schwerverkehr auch die Lkw-Pegel reduziert werden können².

Einbau der Erprobungsstrecke

Für die Baumaßnahme BAB 61 war ein Einbau über volle Breite vorgesehen, sodass das Erpro-

bungskonzept in der Form modifiziert werden musste, dass die Abstreuvarianten hintereinander folgend angelegt und die Wirksamkeit für die jeweilige Fahrzeugart durch Messung der Schallpegel ermittelt wird.

Die Erprobungsabschnitte befinden sich auf der BAB 61 zwischen der Anschlussstelle Kerpen-Türnich und dem Autobahndreieck Erfttal in beiden Fahrtrichtungen. Die Länge je Richtungsfahrbahn beträgt ca. 6,5 km.

Zur Umsetzung des geschilderten Konzeptes kamen auf der Erprobungsstrecke die Abstreumaterialien 2/3, 3/4, und 3/5 mm zum Einsatz. Als Mischgut wird ein Gussasphalt 0/8 S eingesetzt, der unter Verwendung eines Bindemittels der Sorte 30/45 hergestellt wird. Neben dem Grundbindemittel kommen viskositätsverändernde Zusätze und Naturasphalt zur Anwendung. Diese Kombination ermöglicht die aus Gründen des Arbeitsschutzes notwendige Begrenzung der Einbautemperatur auf 230 °C.

Der Einbau der Deckschicht auf der Richtungsfahrbahn Venlo erfolgte im September/Oktober 2008 (Bild 5-12 links). Bild 5-12 rechts zeigt den Einbau der Gussasphaltschicht und die Abstreuung der Oberfläche.

Die starke Witterungsabhängigkeit dieser Bauweise – der Einbau kann nur bei absolut trockener Unterlage durchgeführt werden – machte tagelange Einbaupausen notwendig. Im Bereich nördlich des Autobahndreiecks Erfttal bis zur AS Gymnich kam die Abstreuung 3/5 mm zur Anwendung, nördlich davon bis zur AS Türnich die Abstreuung 2/3 mm. Bild 5-13 zeigt die abgestreute Gussasphalt-Ober-

² Diese Vorgehensweise ist bei einer fahrstreifenweisen Erneuerung technisch ausführbar, bei einem Einbau über volle Fahrbahnbreite zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich. Die Einbaubohle bildet mit dem Abstreuer in der Regel eine Geräte-Einheit, die intern keine Trennung des Größtkorns erlaubt.



Bild 5-12: Einbau der Gussasphaltschicht und Abstreuung der Oberfläche (links) und Radlader zur Beschickung des Splittkastens (rechts)

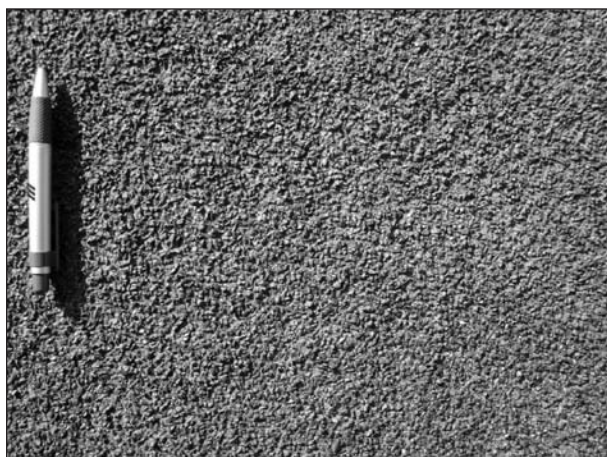


Bild 5-13: Oberfläche mit Abstreuung 3 mm vor Verkehrsfreigabe

	SPB-Messung [dB(A)] Pkw (120 km/h)*	SPB-Messung [dB(A)] Lkw (80 km/h)
Messstation 1 (Abstreuung 2/3)	84,4	86,6
Messstation 2 (Abstreuung 3/5)	84,1	86,6
* Referenz gemäß RLS-90 (nicht geriffelter Gussasphalt) = 85,2 dB(A)		

Tab. 5-3: SPB-Messungen auf der BAB 61 [1]

fläche vor der Verkehrsfreigabe. Überschüssige Gesteinskörnungen wurden abgekehrt. Im Zuge der Überrollungen werden weitere lose Gesteinskörnungen entfernt, was zu einer weiteren Homogenisierung der Oberfläche führt.

Messungen der akustischen Eigenschaften

Die Messungen der akustischen Eigenschaften mit der Methode der Statistischen Vorbeifahrt sind in der Tabelle 5-3 aufgeführt. Der Referenzwert für Pkw-Vorbeifahrtpegel gemäß RLS-90 (nicht geriffelter Gussasphalt) liegt bei 85,2 dB(A).

Die erzielte Lärmreduzierung bei Pkw gegenüber dem Referenzwert gemäß RLS-90 liegt bei ca. -1 dB(A).

Neben den mittleren Pkw-Vorbeifahrtpegeln wurden auch mittlere Vorbeifahrtpegel schwerer Lkw gemessen. Nach ULLRICH [12] kann für eine Geschwindigkeit von 80 km/h ein Referenzwert L (Lkw, GA) von 87,4 dB(A) zur Beurteilung herangezogen werden. Unter Berücksichtigung dieses Wertes wurde für die Geräuschemission von Lkw ebenfalls eine Lärmreduzierung von -1 dB(A) erzielt.

Eine Abhängigkeit des Größtkorns des verwendeten Abstreumaterials und der erzielten Lärmreduzierung für Pkw bzw. Lkw konnte im Rahmen dieser Erprobung nicht nachgewiesen werden.

Beurteilung der Ergebnisse

Bei der Deckschichtart Gussasphalt (GA) handelt es sich um eine Asphaltbauweise, die sich seit vielen Jahrzehnten auf Bundesautobahnen aufgrund ihrer langen Nutzungsdauer bewährt hat. Gussasphaltdeckschichten verfügen über eine hohe Standfestigkeit und verhindern aufgrund ihrer Mischgutkonzeption (Dichtigkeit) das Eindringen von Wasser in die darunterliegenden holraumreichen Binderschichten. Sie weisen ein sehr gutes Griffigkeitsverhalten auf.

Um eine lärmtechnische Optimierung dieser Bauweise zu erzielen, wurde in den letzten Jahren an der Gestaltung und Ausführung der Oberflächen gearbeitet. Im Ergebnis mehrerer Forschungsarbeiten wie dem „Leisen Straßenverkehr 1 und 2“ konnten folgende Empfehlungen für die Straßenbaupraxis formuliert werden:

- Der Einsatz von Gussasphaltnischgut sollte sich auf die Verwendung von kleinerem Größtkorn (5 oder 8 mm) anstelle der derzeit üblichen 11 mm beschränken.
- Als Abstreumaterial sollte möglichst feinkörniges kubisch gebrochenes Material (2/3 mm) verwendet werden.
- Auf den Einsatz von Walzen sollte möglichst verzichtet werden.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Erprobungsstrecke und die Erfahrungen, die gleichzeitig auf weiteren Erprobungsstrecken gewonnen wurden, dass unter Beachtung der oben genannten Empfehlungen und einer strikten Einhaltung der bautechnischen Parameter Deckschichten aus Gussasphalt hergestellt werden können, die ein sehr gutes lärmtechnisches Verhalten aufweisen.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat im April 2010 einen Statusbericht „Lärmarmen Gussasphalt“ in einer speziellen Variante (nicht gewalzt) erstellt, in dem auf Grundlage der Erkenntnisse der letzten Jahre diese Bauweise bei genauer Formulierung der bautechnischen Randbedingungen mit einem Korrekturwert von $D_{StrO} = -2$ dB(A) in die Tabelle 4 der lärmindernden Straßenoberflächen nach RLS-90 aufgenommen werden kann.

Im September 2010 hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Einvernehmen mit dem Bundesministerium für Umwelt, Natur und Reaktorsicherheit ein Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (Nr. 22/2010) [5] veröffentlicht, mit dem der lärmarme Gussasphalt einen D_{StrO} -Korrekturwert von -2 dB(A) erhält und in Tabelle 4 der RLS-90 [7] als weitere lärmindernde Bauweise aufgenommen wird. Damit ist diese Bauweise lärmtechnisch denen aus Walzasphalt ebenbürtig, weist jedoch auf Grund der Mischgutzusammensetzung eine wesentlich höhere Nutzungsdauer auf.

5.2.3 Erprobungsstrecke lärmreduzierter Splittmastixasphalt auf der B 56

Zielsetzung

Bei dieser Deckschichtart handelt es sich um einen hohlraumreichen zusammengesetzten Splittmastixasphalt 0/5 und 0/8. Durch die gegenüber herkömmlichen SMA-Deckschichten noch stärker ausgeprägte Ausfallkörnung stellt sich eine geänderte Oberflächentextur ein, die eine noch bessere Entlüftung des Reifenprofils bei Überrollung erlaubt.

Einbau der Erprobungsstrecke

Die Erprobungsstrecke wurde im Juli 2007 gebaut. Folgende Anforderungen sind bei der Herstellung eines SMA – lärmarm zu beachten:

- Einsatz eines höher polymermodifizierten Bindemittels PmB 40/100-65 H nach Tabelle 4 der TL PmB, Ausgabe 2001.
- Hohlraumgehalt 9 bis 11 Vol.-% am Marshall-Probekörper und 10 bis 15 Vol.-% in der fertigen Schicht. In der Eignungsprüfung sollte eine Schlagzahlvariation vorgenommen werden und

die Änderung von Hohlraumgehalt/Verdichtungsgrad in Abhängigkeit von der Verdichtungsarbeit (Schlagzahl) aufgezeichnet werden.

- Durch die erhöhten Hohlraumgehalte ist ein Einbau auf einer Abdichtung erforderlich. Es ist eine Emulsion U 60 K C2 nach TL PmOB in einer Menge von $0,4$ bis $0,6 \text{ kg/m}^2$ einzusetzen. Durch die homogenere Oberfläche empfiehlt sich der Einsatz eines Asphaltbinders 0/16 S. Bei hohen Außentemperaturen ist beim Einbau der Deckschicht als Trennmittel ein dünner Wasserfilm als Trennmittel vorzuhalten, um beim Einbau ein Aufziehen der Abdichtung durch die Lkw-Reifen zu vermeiden.
- Die Einbaudicke beträgt 3 cm (PB nur auf B 56).
- Die Deckschicht wird nicht abgestumpft, um die Oberflächentextur nicht zu verändern.
- PSV-Wert der Splitte ≥ 53 mit Nachweis.

Ein Einbau des Splittmastixasphaltes lärmarm erfolgt auf einer Abdichtung. Bild 5-14 zeigt die Herstellung dieser Abdichtungsschicht aus Emulsion U 60 K C2 in einer Menge von $0,6 \text{ kg/m}^2$.

Messungen der akustischen Eigenschaften

Die akustischen Eigenschaften des Streckenabschnittes wurden mittels SPB- und CPX-Messungen durchgeführt.

Im Vergleich zum Referenzwert für Pkw-Vorbeifahrtpegel gemäß RLS-90 (nicht geriffelter Gussasphalt) von $78,8 \text{ dB(A)}$ zeigt der untersuchte Streckenabschnitt eine Lärmreduzierung von 4 dB(A) [1].

Da die B 56 seit vielen Jahren Erprobungsstrecke ist, liegen Ergebnisse der Statistischen Vorbeifahrt



Bild 5-14: Herstellung der Abdichtung (links) und Einbau des Asphaltmischgutes (rechts)

anderer Deckschichtarten vor und können zum direkten Vergleich herangezogen werden. Bild 5-15 zeigt die Schalldruckpegel eines herkömmlichen Splittmastixasphaltes SMA 0/8 und die Schalldruckpegel von lärmoptimierten Gussasphaltdeckschichten mit unterschiedlichem Größtkorn (GA 0/8 LA und GA 0/5 LA).

Im Vergleich zum herkömmlichen Splittmastixasphalt SMA 0/8 zeigt die lärmoptimierte Variante dieser Bauweise eine Lärmreduzierung um 2 dB(A). Die Grafik verdeutlicht darüber hinaus, dass der lärmoptimierte Gussasphalt ebenfalls eine Lärmreduzierung von 2 bis 2,6 dB(A) im Vergleich zur Referenzbauweise „nicht geriffelter Gussasphalt“ mit einer 5/8-Abstreifung aufweist.

In Tabelle 5-4 sind die Ergebnisse der CPX-Messungen aufgeführt. Da es sich um einen Streckenabschnitt von ca. 270 m handelt, sind Aussagen zur Homogenität der akustischen Eigenschaften kaum möglich.

Ein direkter Vergleich zu den SPB-Messungen ist nicht möglich. Da die Bundesanstalt für Straßenwesen zahlreiche CPX-Messungen auf herkömmlichen Splittmastixasphalten durchgeführt hat, werden diese Erfahrungen zur Beurteilung herangezogen.

Auf über 20 Streckenabschnitten mit einer Deckschicht aus Splittmastixasphalt wurden CPX_{PKW} -Werte bei einer Messgeschwindigkeit von 80 km/h ermittelt, die zwischen 98 und 100 dB(A) liegen.

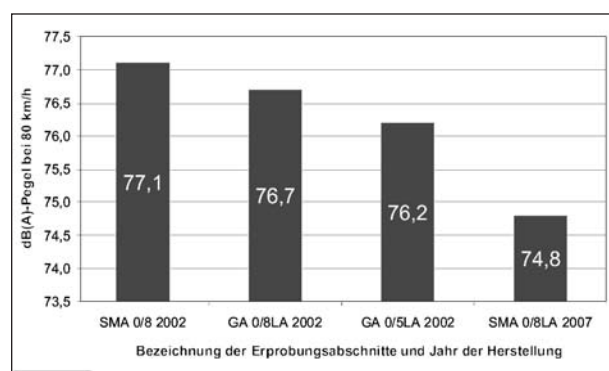


Bild 5.15: SPB-Messungen bei 80 km/h auf der Erprobungsstrecke B 56

	CPX-Messung [dB(A)] Reifen A CPX_{PKW} (80 km/h)	CPX-Messung [dB(A)] Reifen D CPX_{Lkw} (80 km/h)
mittlerer Schalldruckpegel	96,6	99,1

Tab. 5-4: CPX-Messungen auf der B 56 [14]

Der Vergleich mit dem Messwert auf der B 56 zeigt eine Lärmreduzierung von ca. 3 dB(A). Durch den größeren Hohlraumgehalt dieser Deckschichtart ist es gelungen, dass sich die Gesteinskörner an der Oberfläche zu einer Textur ausrichten, die einer Plateaubildung entspricht, die wesentlich lärmärmer wirkt.

Bewertung

Der lärmtechnisch optimierte Splittmastixasphalt stellt die neueste Entwicklung bei den Splittmastixasphaltdeckschichten dar. Diese Deckschichtart zeichnet sich durch ihren hohen Hohlraumgehalt (10 bis 12 Vol.-%) aus, der durch die Sieblinie mit ausgeprägter Ausfallkörnung ermöglicht wird. Diese Sieblinie bedingt, dass sich die Gesteinskörner an der Oberfläche im Sinne einer lärmindernden Textur ausrichten. Auf der Erprobungsstrecke B 56 wurde eine Lärmreduzierung von ca. 4 dB(A) im Vergleich zum Referenzbelag gemäß RLS-90 ermittelt. In den letzten Jahren wurde diese Bauweise vor allem in Nordbayern mehrfach erprobt. Die bisherigen Erfahrungen dort bestätigen diese Lärmreduzierung gegenüber dem Referenzwert gemäß RLS-90 [7].

Erste Strecken liegen jetzt seit ca. 5 Jahren unter Verkehr. Es sind keine nennenswerten Schädigungen aufgetreten. Dennoch ist aufgrund der Struktur, die einem offenporigen Belag ähnelt, die Frage der Lebensdauer noch nicht abschließend geklärt. Hier sind Erfahrungen in der Praxis zu sammeln.

5.2.4 Erprobungsstrecke Offenporige Asphalte

Zielsetzung

Offenporige Asphaltdeckschichten stellen eine sehr wirksame Maßnahme dar, das Reifen-Fahrbahn-Geräusch am Ort der Entstehung zu reduzieren. Die Lärmreduzierung dieser Bauweise wird maßgeblich von den zugänglichen Hohlräumen der Schicht bestimmt, die eine Entlüftung des Reifenprofils ermöglichen. Parallel dazu bewirkt die Planebenheit der Oberfläche eine geringe Anregung der Reifen. Einen zusätzlichen wichtigen Beitrag zur lärmindernden Wirkung leistet die Schallabsorption.

Der hohen Effektivität steht eine begrenzte Nutzungsdauer gegenüber, die eng mit der Verschmutzungsanfälligkeit dieser Bauweise verbunden ist. Nicht alle eindringenden Schmutzpartikel werden durch die Saugwirkung der überrollenden Reifen

entfernt, sondern lagern sich über die Jahre in der Schicht ab und führen zum Verstopfen der Hohlräume und damit zum Verlust ihrer Funktionalität.

Die Ergebnisse des Teilprojektes „Optimierung Offenporiger Asphalte“ sollte auf einer Erprobungsstrecke hinsichtlich ihrer Anfangslärminderung und Wirksamkeit über mehrere Jahre untersucht werden. Durch die Straßenbauverwaltung Brandenburg wurde ein Streckenabschnitt von ca. 7 km auf der BAB 24 zwischen den Anschlussstellen Neuruppin und Neuruppin-Süd zur Verfügung gestellt.

Die Einrichtung einer Erprobungsstrecke erfolgte im Sommer 2009. Im Rahmen der Erprobung sollten Einflüsse auf die Lärminderung von Offenporigen Asphaltten untersucht werden. Darüber hinaus sollen verschiedene Konzepte zur Reduzierung der Schmutzanhaftung im Hohlraumgefüge und der Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Gesamtkonstruktion erprobt werden.

In einem späten Stadium der Planung kam es noch zur Ergänzung von drei Erprobungsfeldern aus Gussasphalt mit offenporiger Struktur. Diese mit dem Arbeitstitel „Porous Mastic Asphalt (PMA)“ bezeichnete Bauweise wurde in Nordrhein-Westfalen vom Landesbetrieb Straßen entwickelt. Die entstehende Oberfläche ist SMA/OPA ähnlich, darunter befindet sich Gussasphalt mit seinen abdichtenden Eigenschaften.

Das genaue Erprobungskonzept der Strecke sah vor, neben der Erprobung der Laborergebnisse aus dem Projekt „LeiStra 2“, auch weitere theoretische Erkenntnisse über die Wirkung von OPA einfließen zu lassen und eine Erprobung zu ermöglichen. Hierzu zählt der Einfluss der akustisch wirksamen Dicke, der Abdichtung unter der offenporigen Schicht und das Bindemittel.

Die genaue Festlegung der Abschnitte mit den vorgesehenen Dicken, Mischgut und Bindemittel sind in Tabelle 5-5 aufgeführt.

Einbau der Erprobungsstrecke (neu)

Der Bau der Strecke erfolgte unter Vollsperrung der jeweiligen Richtungsfahrbahn (RF) und einer 4+0-Verkehrsführung auf der nicht betroffenen Seite. Mit dem Bau wurde in Fahrtrichtung (FR) Berlin begonnen, d. h., die Einrichtung des 4+0-Verkehrs auf der RF Hamburg erfolgte im April 2009.

Die Einbaubegleitung durch die BAST wurde in FR Berlin ab dem Zeitpunkt des Einbaus der Binder-

schicht im Juni 2009 und bis zum abschließenden Einbau von Abschnitt 6 durchgeführt. Die FR Hamburg folgte gut zwei Monate später im September 2009.

An jedem Einbautag wurden mehrere Mischgutproben an definierten Stellen entnommen. Die Temperatur des angelieferten bzw. eingebauten Mischguts wurde kontinuierlich alle 20 m aufgezeichnet und sonstige Vorkommnisse wie etwa Fertigerstillstände notiert. Damit ist im Zuge der Liege- bzw. Nutzungsdauer eine Zuordnung zu evtl. schadhafte Stellen möglich.

Über einen Streckenabschnitt von ca. 50 m wurden die im Verbundprojekt in Zusammenarbeit mit der Firma Müller BBM entwickelten Resonatoren (Bild 5-16) zur akustischen Optimierung von Offenporigen Asphaltten eingebaut.

Neben der Entwicklung der Resonatorelemente wurde auch die Belegungszahl der Fläche vorgegeben. Gemäß der Verlegeanordnung (Bild 5-17) mussten ca. 20 Elemente je 1 m² platziert werden.

Die Elemente selbst weisen 6 unterschiedlich große Resonatorkörper auf und müssen fahrtrich-

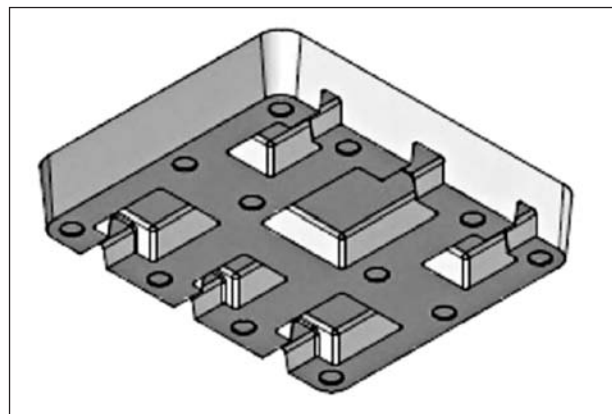


Bild 5-16: Resonatorkörper zur akustischen Optimierung von Offenporigen Asphaltten; (Quelle: Firma Müller BBM)

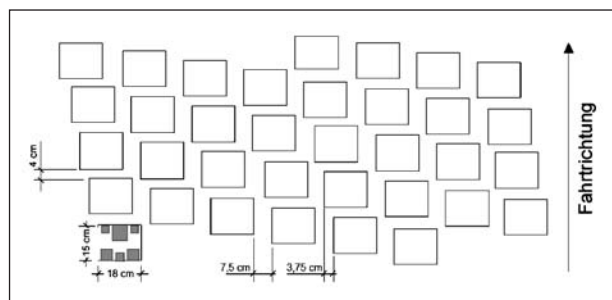


Bild 5-17: Verlegeanordnung Resonatoren

tungsgenau aufgelegt werden, was bei der fehlenden Symmetrie mit einem erhöhten Aufwand verbunden ist.

Der Einbau der Elemente wurde an einem Tag durchgeführt. Auf die Unterlage aus Gussasphalt wurde mittels eines Rampenspritzgeräts polymer-

Rechte Richtungsfahrbahn (Berlin)						
Abschnitt	Betriebskilometer	Anzahl der Schichten	Dicke [cm]	Asphaltmischgut	Bindemittelsystem	Abdichtung
1	206+169 – 207+400	1	4	SMA 11 S	25/55-55 A	---
2	207+400 – 208+200	1	3	SMA 8 LA (lärmarm)	40/100-65 A	C60BP1-S
3	208+200 – 209+300	2	3 + 5	PA 8 PA 16	40/100-65 A	MA 5 S 2 cm
4	209+300 – 209+950	2	3 + 5	PA 8 PA 11	40/100-65 A	MA 5 S 2 cm
5 Resonator	209+950 – 209+995	2	3 + 5	PA 8 PA 11	40/100-65 A	MA 5 S 2 cm
6	209+995 – 210+250	2	3 + 5	PA 8 PA 11	40/100-65 A	MA 5 S 2 cm
Bauwerk 5: km 210+250 – 210+297						
7	210+297 – 211+200	1	4	SMA 11 S	10/40-65 A + Sasobit	---
8	211+200 – 212+250	1	4	SMA 11 S	25/55-55 A	---
Linke Richtungsfahrbahn (Hamburg)						
Abschnitt	Betriebskilometer	Anzahl der Schichten	Dicke [cm]	Asphaltmischgut	Bindemittelsystem	Abdichtung
9	210+297 – 211+130	1	4	SMA 11 S	Mexphalte 45 RM	---
Bauwerk 5: km 210+250 – 210+297						
10	209+650 – 210+250	1	5	PA 8	Mexphalte 45 RM+	Mexphalte 45 RM+
11	209+050 – 209+650	1	5	PA 8	tecRoad premium	40/100-65 A
12	208+200 – 209+050	1	5	PA 8	40/100-65 A	40/100-65 A
14	208+100 – 208+200	1	5	PA 8	40/100-65 A + TEGOPREN®	40/100-65 A
15	207+500 – 208+100	1	5	PA 8	40/100-65 A	MA 5 S 2 cm
16	207+186 – 207+500	1	4	SMA 11 S	tecRoad premium	---
17	206+760 – 207+186	1	4	PMA 5 Granodiorit	Sübit VR 35	---
18	206+340 – 206+760	1	4	PMA 5 Granodiori	10/40-65 A + Sasobit	---
19	206+169 – 206+340	1	4	PMA 5 Eolit	10/40-65 A + Sasobit	---
Erläuterungen						
	Referenz Splittmastixasphalt SMA 11 S und Varianten SMA					
	Varianten Zweischichtiger Offenporiger Asphalt (ZWOPA)					
	Varianten Offenporiger Asphalt (OPA)					
	Varianten PMA					

Tab. 5-5: Einteilung der Erprobungsabschnitte

modifiziertes Heißbitumen in einer Spritzfilmdicke von etwa 2 mm abschnittsweise aufgebracht und die Elemente mit Hilfe einer Schablone aufgelegt (Bild 5-18). Um eine Befahrung des Abschnittes durch Mischguttransporter und andere Baustellenfahrzeuge zu ermöglichen, wurde der Standstreifen von einer Belegung ausgenommen.

Die Überbauung der Elemente mit Offenporigem Asphalt (PA 11) wurde am 02.07.2009 durchgeführt. Am Folgetag wurde die obere Schicht aus PA 8 ergänzt. Das Verhalten der Resonatorelemente beim Überfahren mit dem sehr schweren Straßenfertiger bzw. dem Übergabefertiger war eine weitgehend unbekannte Größe. Der Gesamtaufbau wurde zwar einem Belastungstest im Prüfstand unterzogen und die Lasten der Kettenfahrwerke bei der Konzeption berücksichtigt, der Einbau mit sehr großem Gerät bei hohen Außentemperaturen war zuvor jedoch noch nicht erfolgt. Die sommerlichen Temperaturen machten den Einsatz eines Wassersprengwagens notwendig, um die Deckentemperatur etwas zu

senken. Trotzdem kam es in den ersten Metern zu einem leichten Verdrehen der Elemente unter den Lkw-Reifen der Lenkachsen und der Laufspur der Ketten (Bild 5-19). Die relativ glatte Oberfläche der Elemente (Polymerbeton) führte durch den großen Zugkraftbedarf der sehr breiten Bohle zudem kurzzeitig zu einem einseitigen Durchdrehen der Ketten, das eine Querstellung des Fertigers bewirkte. Erst als die Überdeckung der Elemente mit PA 11 etwas erhöht wurde, vergleichmäßigte sich der Einbau [8].

Durch das PEBA-Prüfinstitut für Baustoffe GmbH wurde im Auftrag des Auftraggebers die Kontrollprüfung durchgeführt. Die vorliegende Untersuchung der Offenporigen Asphaltsschichten PA 8 und PA 11 zeigte an den drei untersuchten Bohrkernen keine Auffälligkeiten. Die geforderten Verdichtungsgrade wurden erreicht, ebenso die Mindest-Hohlraumgehalte von 22 Vol.-%. Für den PA 8 lagen sie jedoch nahe oder über 30 Vol.-%. Diese Werte deuteten sich bereits im Eignungsnachweis an und sind



Bild 5-18: Einbau der Resonatoren im Abschnitt 5 der BAB 24 am 30.06.2009



Bild 5-19: Einbau A 24 – Überdeckung der Resonatorelemente mit PA 11

der verwendeten extrem kubischen Gesteinskörnung Eolit geschuldet. Bei der Untersuchung der Mischgutproben zeigte sich eine Unterschreitung des Grobkornanteils 5/8 bzw. 8/11. Es kam zu einer Kornverfeinerung bei der Herstellung des Mischguts, oder die Lieferkörnungen enthielten mehr Unterkorn, was bei einer Umgehung der Heißabsiebung in der Mischanlage direkte Auswirkungen auf die Sieblinie hat. Eine gezielte Zugabe von Anteilen 2/5 bzw. 5/8 ist nahezu auszuschließen. Die geforderten Hohlraumgehalte in der fertigen Schicht wurden, wie erwähnt, trotzdem erreicht. Der Bindemittelgehalt und die Bindemittelkenngrößen Elastische Rückstellung und Erweichungspunkt RuK wurden eingehalten [8].

Messung der akustischen Eigenschaften

SPB-Messungen

Im April 2010 wurden durch die BASt Geräuschmessungen mit der Methode der Statistischen Vorbeifahrt durchgeführt. Nach Ende der Baumaßnahme im Herbst 2009 konnten aus Witterungsgründen keine Messungen mehr durchgeführt werden. Um den erheblichen Zeitaufwand bei SPB-Messungen zu begrenzen, wurden fünf Messpunkte ausgewählt, die eine Beurteilung des Streckenabschnittes ermöglichen (Tabelle 5-6). Das Gesamtverhalten der Strecke lässt sich dennoch mit Relativbetrachtungen aus der CPX-Messung ableiten.

Auf allen Streckenabschnitten wurde eine deutliche Lärminderung gegenüber dem SPB-Referenzwert nach RLS-90 von 85,2 dB(A) erreicht. Die Streckenabschnitte mit dem OPA 8 zeigen eine Lärminderung von über 9 dB(A). Im Vergleich

zum D_{Stro} -Wert für Offenporige Asphalte gemäß RLS-90 (-5 dB(A)) wurde ein Vorhaltemaß für die Lärminderung von 4 dB(A) erreicht. Der Abschnitt mit OPA 8 auf GA-Abdichtung ist für Lkw ca. 1 dB(A) leiser als der herkömmliche OPA 8 auf Bitumenabdichtung. Hier scheint sich die größere akustisch wirksame Schichtdicke auszuwirken (kein Aufsteigen der Abdichtung in den OPA).

Die lärmoptimierten Asphaltdeckschichten SMA LA und PMA sind für Pkw ca. 5 dB(A) leiser als die Referenz der RLS-90, nicht geriffelter Gussasphalt.

Der Abschnitt ZWOPA mit Resonatoren wurde mit der SPB-Methode lauter gemessen als die Abschnitte mit OPA 8. Dies widerspricht den bisherigen Erfahrungen aus zahlreichen SPB-Messungen auf ein- und zweischichtigen Offenporigen Asphalten. Aufgrund der vorgegebenen Messbedingungen und zeitlichen Begrenzungen konnte kein zusätzliches ZWOPA-Messfeld ohne Resonatoren gemessen werden. In den nachfolgend dargestellten CPX-Messungen weisen alle ZWOPA-Abschnitte niedrigere Schalldruckpegel im Vergleich zu den OPA-Abschnitten auf. Eine Ursache für den relativ hohen Messwert könnte darin liegen, dass die schon geschilderten leichten Unebenheiten im Anfangsbereich des Resonatorabschnitts bei der SPB-Messung stärker durchschlagen.

Entsprechend den Laborergebnissen wurde in dem Streckenabschnitt ZWOPA mit Resonatoren eine zusätzliche Lärminderung von ca. 3 dB(A) erwartet. Diese konnte mit den SPB-Messungen nicht festgestellt werden. Da die Messungen im April 2010 erfolgten, wurde vermutet, dass die Resonatoren möglicherweise teilweise mit Wasser gefüllt waren. Daraufhin wurde in einer sehr heißen,

Mess-km	Fahrtrichtung	Abschnitt	Belag/Bemerkung	SPB [dB(A)]	
				Pkw* 120 km/h	Lkw 80 km/h
209,975	Berlin	5	ZWOPA 8 + 11 (mit Helmholtzresonatoren)	76,4	80,6
207,980	Hamburg	15	OPA 8 GA-Abdichtung	75,8	80,7
208,430	Hamburg	12	OPA 8 (Referenz OPA)	75,9	81,6
207,020	Hamburg	17	PMA 5 (mit Sübit VR 35, Granodiorit)	81,2	85,4
207,800	Berlin	2	SMA 8 LA	79,7	85,0

* SPB-Referenzwert nach RLS-90: 85,2 dB(A)

Tab. 5-6: SPB-Messungen A 24, April 2010 [1]

trockenen Wetterperiode im Juli 2010 eine Wiederholungsmessung des Resonatorabschnitts durchgeführt. Sie ergab nahezu identische Werte. Der Einfluss von Wasser konnte damit ausgeschlossen werden. Es wurden weiterführende Untersuchungen im akustischen Labor der BAST durchgeführt (siehe Kapitel „Ergänzende akustische Laboruntersuchungen“).

CPX-Messungen

Parallel zu den SPB-Messungen wurden die akustischen Eigenschaften der verschiedenen Streckenabschnitte auf der BAB 24 mit dem CPX-Anhänger [14] erfasst. Tabelle 5-7 stellt die Ergebnisse der einzelnen Abschnitte dar.

Der Vergleich der einzelnen Erprobungsabschnitte lässt folgende Aussagen zu:

Anhand der CPX-Messungen wird deutlich, dass die zusätzliche lärmindernde Wirkung der Reso-

natoren mit ca. 1 dB(A) unter den Erwartungen blieb. Der hier nicht abgebildete örtliche Verlauf der Messung zeigt eine Zweiteilung des 45 m langen Abschnitts. Die erste Hälfte ist etwa 1 dB(A) lauter. Dies ist vermutlich in leichten Unebenheiten aus bereits geschilderten Anfangsschwierigkeiten beim Überbau der Resonatoren begründet.

Die Abschnitte ZWOPA sind bis zu 2 dB(A) leiser als OPA. Verglichen mit der Referenz SMA 11 S wurden Lärminderungen von ca. 7 dB(A) erreicht. Die Gummimodifizierung des Bindemittels brachte sowohl bei SMA wie auch OPA keine zusätzliche akustische Wirkung. Der lärmoptimierte SMA 8 LA und PMA sind bis zu 4 dB(A) leiser als herkömmlicher SMA 11 S.

Ergänzende akustische Laboruntersuchung (Wirkung Resonatoren auf BAB 24)

Der Eignungsnachweis und die Kontrollprüfung ergaben für den Resonator- und Vergleichsabschnitt

Mess-km	Fahrtrichtung	Abschnitt	Belag/Bemerkung	CPX 80 km/h [dB(A)]*	
				Reifen P1	Reifen H1
206,500 bis 207,400	Berlin	1	SMA 11 S (Referenz)	97,3	97,7
207,800 bis 208,200	Berlin	2	SMA 8 LA	93,0	93,9
208,200 bis 209,300	Berlin	3	ZWOPA 8 + 16	91,0	90,6
209,300 bis 209,900	Berlin	4	ZWOPA 8 + 11	91,5	91,0
209,950 bis 210,000	Berlin	5	ZWOPA 8 + 11 Resonatoren	90,3	91,0
210,050 bis 210,250	Berlin	6	ZWOPA 8 + 11	90,6	90,3
210,300 bis 211,200	Berlin	7	SMA 11 S Viskositätsverändernder Zusatz Sasobit	97,9	97,9
211,200 bis 212,000	Berlin	8	SMA 11 S	97,6	98,3
211,130 bis 210,300	Hamburg	9	SMA 11 S Gummimodifizierung Mexphalte RM	97,3	97,7
209,650 bis 209,050	Hamburg	11	OPA 8 Gummimodifizierung tecRoad	93,2	93,3
209,050 bis 208,250	Hamburg	12	OPA 8 Referenz OPA	93,0	93,4
208,100 bis 207,500	Hamburg	15	OPA 8 auf GA-Abdichtung	92,7	93,0
207,200 bis 206,760	Hamburg	17	PMA Granodiorit Sübit	94,0	95,0
206,760 bis 206,340	Hamburg	18	PMA Granodiorit Sasobit	93,8	94,7

* Werte temperaturkorrigiert

Tab. 5-7: CPX-Messungen BAB 24 [14]

sehr große Hohlraumgehalte bis 30 Vol.-% für den PA 8. Derartig große Hohlraumgehalte erzeugen eine Struktur der Hohlräume, die mutmaßlich von OPA mit üblichen Hohlraumgehalten > 22 Vol.-% abweicht. Die Struktur eines absorbierenden Mediums kann mit dem Strukturfaktor beschrieben werden. Der Wert steigt, wenn die Krümmung und Verschränkung der Luftkanäle zunehmen. Nach FGSV-Hinweisen³ wird bei zunehmendem Strukturfaktor das Maximum des Schallabsorptionsgrades zu tieferen Frequenzen verschoben. Übertragen auf die hier vorliegende Problematik hieße dies, dass beim Vergleich von Probekörpern aus unterschiedlichem OPA-Mischgut bei gleicher Bauhöhe Veränderungen im Absorptionsverhalten vorliegen müssten. Zur Überprüfung dieser These wurden aus dem Mischgut PA 8 und PA 11 der BAB 24 und einem Vergleichsmischgut PA 8 der A 61 Asphaltplatten mit 50 mm Höhe im Walzsektorverdichter hergestellt. Anschließend wurden jeweils zwei zylindrische Körper mit einem Durchmesser von 100 mm gewonnen und im Kundt'schen Rohr der BAST untersucht [2]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-8 enthalten.

Der Vergleich zeigt zunächst, dass die Probekörper aus dem Mischgut der BAB 24 einen deutlich niedrigeren Strömungswiderstand gegenüber den Vergleichsproben aufweisen, der Formfaktor (Wurzel aus dem mittleren Schallumweg in der Probe) sehr niedrig liegt und die Lage der Absorptionsmaxima um ca. 300 Hz zu hohen Frequenzen hin verschoben ist. Hier sollte noch eine genaue akustische Bewertung erfolgen.

Bewertung

Im Rahmen des Teilprojektes „Integrale Verbesserung von offenporigen Fahrbahndecken“ war ein

³ Hinweise für die Anwendung schalltechnischer Messverfahren bei Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt (H SO). Entwurf Januar 2010

Mischgut		BAB 24 PA 11	BAB 24 PA 8	BAB 61 PA 8
Absorptionsgrad q_{\max}	[-]	0,98	1,00	0,92
Max. bei Frequenz f_{\max}	[Hz]	1.200	1.200	900
Strömungswiderstand R_S	[Pa s/m]	4.100	2.700	21.400
Formfaktor K	[-]	1,9	2,0	2,4

Tab. 5-8: Absorptionsverhalten Labor-Probekörper BAB 24 und BAB 61 nach [2]

Ziel, das Schallabsorptionsvermögen dieser Bauweise weiter zu optimieren. Die Firma Müller BBM hat als Partner im Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ Resonatorelemente entwickelt, die in die offenporige Deckschicht integriert werden und aufgrund ihrer speziellen Frequenzabstimmung ein breiteres Frequenzband zur Schallreduzierung abdecken sollen.

Im akustischen Labor der Firma Müller BBM wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Ergebnisse an Probekörpern in der Hallkabine zeigten die Wirksamkeit der Resonatorelemente mit Absorptionsmaxima im Frequenzbereich von 800 bis 1.000 Hz. Sie können somit das Absorptionsminimum von ZWOPA ab 630 Hz ausgleichen. Durch die Integration der Resonatorkörper sollte eine akustische Optimierung des Gesamtsystems bewirkt werden. Auf Basis der labortechnischen Untersuchungen wurde eine zusätzliche lärmreduzierende Wirkung von bis zu 3 dB(A) prognostiziert.

Mit dem Bau der Erprobungsstrecke auf der BAB 24 sollten die Laborergebnisse in die Praxis umgesetzt werden. Im Vorfeld wurden bautechnische Fragen durch den Bau einer Versuchsstrecke auf dem Testgelände in Sperenberg geklärt.

Nachdem der Einbau der Resonatoren im Sommer 2009 prinzipiell problemlos erfolgte, wurden im April 2010, nach der Verkehrsfreigabe des gesamten Streckenabschnittes, umfangreiche Lärmmessungen durch die BAST durchgeführt. Insgesamt wurde auf der BAB 24 eine Geräuschpegelreduzierung von ca. 9 dB(A) gegenüber dem Referenzpegel gemäß RLS-90 erreicht. Die im Labor nachgewiesene Wirksamkeit der Resonatorelemente konnte vor Ort messtechnisch nicht bestätigt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden im Juli 2010 weiterführende Untersuchungen auf der BAB 24 und im akustischen Labor der BAST durchgeführt [9].

Erste Vermutungen, dass die Wirksamkeit der Resonatoren durch den Einfluss von Wasser verhindert wurde, konnte durch die Wiederholmessungen

nach einer lang anhaltenden Trockenperiode ausgeschlossen werden. Untersuchungen im akustischen Labor der BAST zeigten jedoch eine deutliche Abhängigkeit der Wirksamkeit der Resonatoren vom verwendeten Asphaltmischgut. Sowohl für die Laborversuche als auch für die Testversuche in Sperenberg und auf der BAB 24 wurden unterschiedliche OPA-Mischgutzusammensetzungen verwendet. Dadurch stellten sich unterschiedliche Hohlraumgehalte und -strukturen ein. Auf der BAB 24 kam als Gesteinskörnung eine Elektroofenschlacke (Eolit) mit sehr kubischer Kornform zum Einsatz. Die ermittelten Hohlraumgehalte lagen mit 30 Vol.-% ungewöhnlich hoch. In der Regel werden beim Bau von offenporigen Deckschichten Hohlraumgehalte zwischen 22 und 24 Vol.-% erzielt. Absorptionsmessungen im Kundt'schen Rohr zeigten in Abhängigkeit vom Mischgut bzw. Hohlraumgehalt des Probekörpers eine deutliche Frequenzverschiebung des Absorptionsmaximums. Die geometrische Form der Resonatorelemente wurde auf Grundlage der Laborergebnisse im Zuge der Bearbeitung des Projektes „Leiser Straßenverkehr 2“ festgelegt. Eine Anpassung der Elemente an das verwendete ungewohnt hohlraumreiche Mischgut auf der BAB 24 erfolgte nicht, da zu diesem Zeitpunkt der Projektbearbeitung der Einfluss unterschätzt wurde.

Auf Grundlage erster Untersuchungsergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass durch das verwendete hohlraumreiche OPA-Mischgut auf der BAB 24 die Absorptionsmaxima nicht in den bisher bekannten Frequenzbereichen aufgetreten sind. Dadurch lässt sich auf eine Überschneidung der Wirksamkeitsbereiche von OPA und Resonatoren in ähnlichen Frequenzbereichen schließen: Die Abdeckung des gewünschten breiten Frequenzbereiches zur Schallreduzierung ist in der Praxis nicht gelungen. Hier ist Optimierungspotenzial erkennbar.

Insgesamt können die Konzeption und die Bauausführung auf der Erprobungsstrecke BAB 24 dennoch als gelungen betrachtet werden. Es wurde auf den verschiedenen Streckenabschnitten eine Minderung des Geräuschpegels von über 9 dB(A) erreicht. Die Ergebnisse beim Bau des Testfeldes mit den Resonatorelementen haben gezeigt, dass baupraktisch keine nennenswerten Probleme auftreten und auch nach einem Jahr mit hohem Verkehrsaufkommen und teilweise extremen Witterungsbelastungen (lang anhaltenden Kälte- und Hitzeperioden) keine Schäden aufgetreten sind.

In weiterführenden Untersuchungen sollten zunächst im Labor der Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die akustische Wirksamkeit der Resonatoren und eine mögliche Anpassung der Elemente untersucht werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse sollte eine zweite Erprobungsstrecke gebaut werden, die speziell die akustische Anpassung der Resonatoren zur Optimierung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Deckschichten verfolgt.

Darüber hinaus haben die Erprobungen auf der BAB 24 gezeigt, dass mit dem Bau einer Abdichtungsschicht aus Gussasphalt die akustische Wirksamkeit des darüberliegenden Offenporigen Asphaltes erhöht werden kann. Ein Aufsteigen des Bindemittels, wie es bei Bitumenabdichtung beobachtet wurde, kann somit verhindert werden.

Erste Erprobungen mit der lärmoptimierten Asphaltdeckschicht PMA zeigt für Pkw eine Pegelminderung um ca. 5 dB(A) im Vergleich zur Referenz gemäß RLS-90, nicht geriffelter Gussasphalt. Die lärmtechnische Wirksamkeit und die bautechnische Lebensdauer sollen in weiterführenden Forschungsarbeiten optimiert werden.

5.2.5 Erprobung eines Fahrbahnüberganges auf der BAB 10

Zielsetzung

Nach Abschluss des Teilprojektes „Akustische Optimierung von Lamellen-Fahrbahnübergängen für lange Brücken“ sollten die Ergebnisse in der Praxis erprobt werden. Mit Unterstützung des Ministeriums (Potsdam) wurde auf der BAB 10 bei Berlin ein Brückenbauwerk zur Sanierung des Fahrbahnüberganges für die Erprobung zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen des Verbundprojektes hat die Firma Maurer Söhne in Zusammenarbeit mit der BAST an der Entwicklung neuer Oberflächen für Fahrbahnübergänge gearbeitet. Durch Einsatz verschiedener Rautenoberflächen sollten Lamellen-Fahrbahnübergänge lärmtechnisch optimiert werden. Dazu wurden im ersten Schritt umfangreiche Untersuchungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der BAST durchgeführt. Bild 5-20 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der akustischen Messungen an verschiedenen Rautenelementen im Vergleich zur Standard-Lamelle [12].

Die schwarze Linie zeigt die Geräuschemission der Standardlamelle ohne Rautenoberfläche. Die bunt

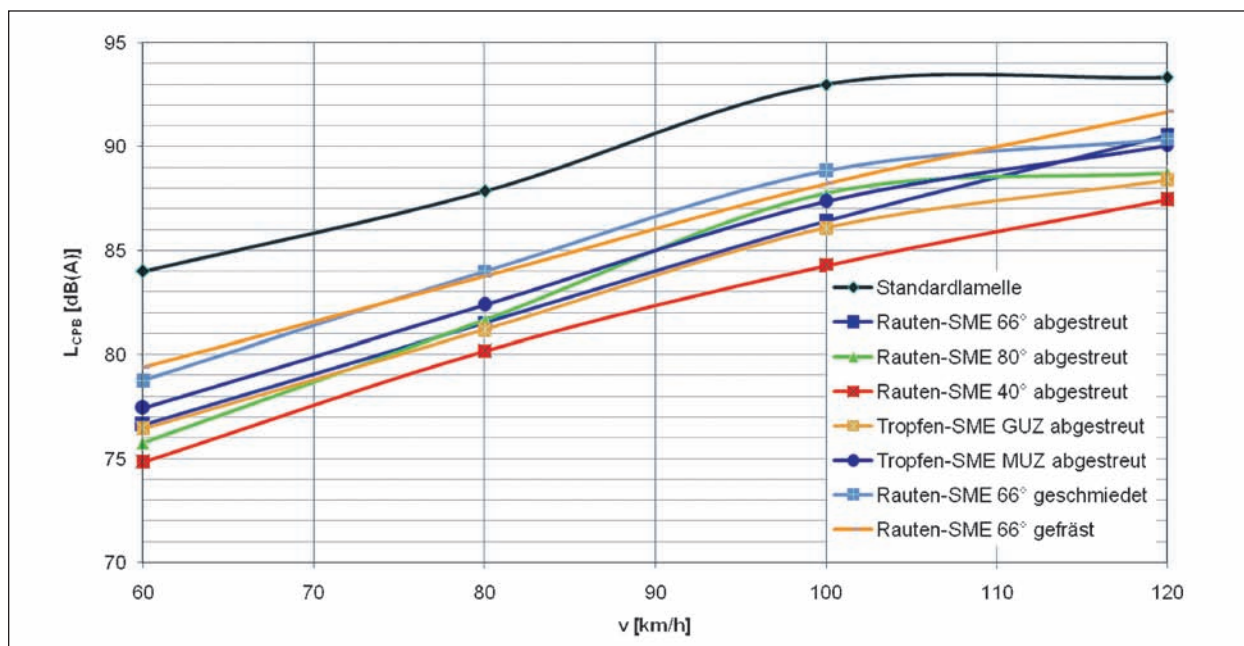


Bild 5-20: Vergleich akustischer Eigenschaften verschiedener Rautenprofile und Standardlamelle [11]



Bild 5-21: Fahrbahnübergang in Lamellenbauweise ohne Lärminderung

dargestellten Linien zeigen die Geräuschemissionen der verschiedenen Rautenprofile. Allein mit dem Einsatz einer Rautenoberfläche auf dem Fahrbahnübergang ist eine Reduzierung der Geräuschemission von 5 bis 10 dB(A) möglich.

Im Ergebnis der Laboruntersuchungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der BAST hat sich gezeigt, dass Fahrbahnübergänge mit Rautenoberflächen durch folgende Modifizierungen dauerhaft lärmtechnisch verbessert werden können:

- Einsatz von spitzwinkligen Rauten (Winkel 40°),
- feine Strukturierung der Rautenoberfläche, z. B. durch Rändeln.

Einbau des Fahrbahnüberganges

Auf der BAB 10 bei Berlin wurden die Rautenoberflächen auf einem Lamellen-Fahrbahnübergang erprobt (Bild 5.21). Diese Maßnahme wurde im Juni 2009 durchgeführt.

Die Bilder 5-22 bis 5-24 zeigen den Einbau des neuen Fahrbahnüberganges sowie die eingebauten Rautenformen zur Lärminderung.

Messung der akustischen Eigenschaften

In den Jahren 2008 und 2009 wurden an den Fahrbahnübergängen auf der BAB 10 bei Phoebe/Havelbrücke Messungen der Statistischen Vorbeifahrt durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen auf dem alten Fahrbahnübergang und den neuen Rautenelementen sind in Tabelle 5-9 dargestellt.

Die Messungen der mittleren Pkw-Vorbeifahrtpegel verdeutlichen, dass bei Verwendung von Rautenelementen eine Geräuschpegelreduzierung von 4 bis 5 dB(A) gegenüber den Standardlamellen erzielt wurde. Die Lkw-Vorbeifahrtpegel zeigen eine Pegelreduzierung durch Einsatz der Rautenelemente gegenüber dem Lamellen-Fahrbahnübergang von ca. 7 dB(A).

	SPB-Messung [dB(A)] Pkw (120 km/h)	SPB-Messung [dB(A)] Lkw (80 km/h)
Messstation 1 (FR Nord) Lamellen	92,7	96,3
Messstation 2 (FR Süd) Rauten	87,2	88,9
Messstation 3 (FR Nord) Lamellen	91,9	96,4
Messstation 4 (FR Süd) Rauten	86,7	89,5
Messstation 5 (FR Nord) Rauten	87,4	88,9
Messstation 6 (FR Nord) Rauten	86,9	89,0

Tab. 5-9: SPB-Messungen auf der BAB 10 – Fahrbahnübergang [1]



Bild 5-22: Einbau des neuen Fahrbahnüberganges mit lärmoptimierten Oberflächen

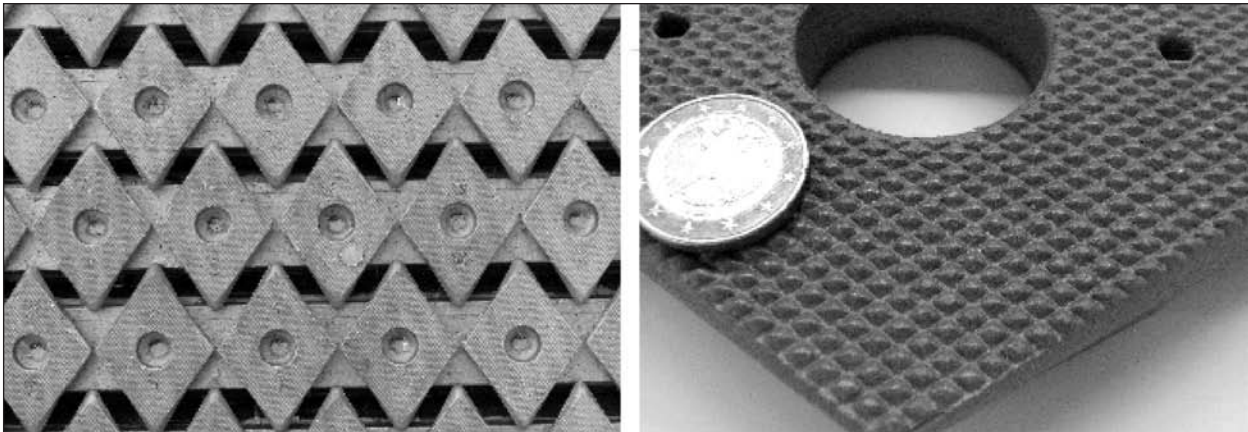


Bild 5-23: Fahrbahnübergang in Lamellenbauweise mit SMEs in Pyramidenform

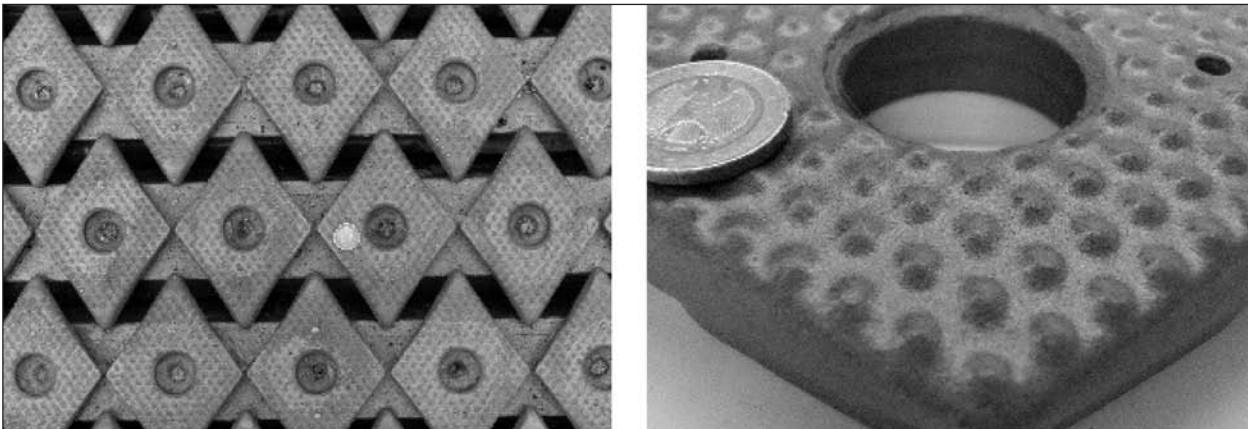


Bild 5-24: Fahrbahnübergang mit SMEs in Kegel- oder Noppenform

Bewertung

Eine besondere Geräuschquelle im Straßennetz sind die Fahrbahnübergänge zwischen Brückenbauwerken und Straßen: Bei längeren Brücken werden Lamellen aus Stahl eingesetzt, die beim Überfahren erheblichen Lärm verursachen. Im Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“ wurde an der akustischen Optimierung von Fahrbahnübergängen gearbeitet. Sehr umfangreiche Untersuchungen wurden dabei im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der Bundesanstalt für Straßenwesen durchgeführt. Die akustische Vermessung der Fahrbahnübergänge im Labor hat gezeigt, dass eine Geräuschpegelreduzierung zwischen 5 und 8 dB(A) allein durch den Einsatz lärmarmen Oberflächen erreicht werden kann.

Im Juli 2009 wurden diese lärmarmen Rautenelemente auf einem Fahrbahnübergang auf der BAB 10 bei Berlin eingebaut. Die Messungen der akustischen Eigenschaften bestätigen die Laborergebnisse. Auch in der Praxis wurden deutliche Geräuschpegelreduzierungen zwischen 4 und 7 dB(A) im Vergleich zur Standardlamelle nachgewiesen.

5.3 Bewertung des Teilverbundes „Erfolgskontrolle“

Im Teilprojekt „Erfolgskontrolle“ galt es, die Ergebnisse aus dem Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ hinsichtlich optimierter bzw. neu konzipierter Fahrbahnbeläge und -übergänge in die Praxis umzusetzen. Mit Unterstützung der Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Brandenburg werden insgesamt fünf Neubaustrecken bzw. Strecken mit grundlegender Erneuerung für die Erprobung zur Verfügung gestellt.

Einen Schwerpunkt stellte dabei die akustische Optimierung von Regelbauweisen dar. Im Betonstraßenbau wird derzeit Waschbeton als lärmindernde Straßenoberfläche gemäß RLS-90 geführt. Ein Ziel des Projektes war es, zu untersuchen, inwieweit durch die Variation der Texturtiefe die Geräuschemission von Waschbetonoberflächen optimiert werden kann. Gleichzeitig müssen die Anforderungen an die Griffigkeit der Straßenoberfläche erfüllt werden. Untersuchungen der BAST haben gezeigt, dass die Waschbetonoberflächen der Eingruppierung als lärmarme Fahrbahndeckschicht grundsätzlich entsprechen. Die Bandbreite

der Ergebnisse zeigt jedoch auch, dass hier Optimierungspotenzial hinsichtlich der Geräuschemission besteht. In weiterführenden Untersuchungen sollte analysiert werden, inwieweit über die Texturausbildung, die Gesteinsart und die Kornform eine Optimierung hinsichtlich der akustischen Eigenschaften von Waschbetonoberflächen möglich ist.

In der Asphaltbauweise wurden die Regelbauweisen Splittmastixasphalt und Gussasphalt hinsichtlich der Geräuschreduktion weiter untersucht. Gussasphaltdeckschichten konnten bislang nicht in die Liste der lärmindernden Deckschichten eingeordnet werden. Untersuchungen zeigten, dass die Verwendung von grobem Abstreumaterial (z. B. 5/8) die Reifenschwingungen ansteigen lässt und dadurch ein lauterer Reifen-Fahrbahngeräusch entsteht. Darüber hinaus wird durch den Walzeneinsatz eine für die Lärmentstehung ungünstige Textur erzeugt. Um eine lärmtechnische Optimierung dieser Bauweise zu erzielen, wurde in den letzten Jahren an der Gestaltung und Ausführung der Oberflächen gearbeitet. Für die Straßenbaupraxis wurden Empfehlungen formuliert. So sollte sich der Einsatz von Gussasphaltnischgut auf die Verwendung von kleinerem Größtkorn 5 oder 8 mm beschränken. Als Abstreumaterial sollte möglichst feinkörniges kubisch gebrochenes Material (2/3 mm) verwendet werden. Auf den Einsatz von Walzen sollte möglichst verzichtet werden. Bei einer strikten Einhaltung der bautechnischen Parameter weisen Deckschichten aus Gussasphalt ein sehr gutes lärmtechnisches Verhalten auf.

In einem neuen Statuspapier der Bundesanstalt für Straßenwesen wurde auf Grundlage der Erkenntnisse der letzten Jahre diese Bauweise bei genauer Formulierung der bautechnischen Randbedingungen mit einem Korrekturwert von $D_{\text{StrO}} = -2$ dB(A) versehen und vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung per Allgemeinem Rundschreiben in die Tabelle der lärmindernden Straßenoberflächen nach RLS aufgenommen [5]. Damit ist diese Bauweise lärmtechnisch denen aus Walzasphalt ebenbürtig.

Der lärmtechnisch optimierte Splittmastixasphalt stellt die neueste Entwicklung bei den Splittmastixasphaltdeckschichten dar. Diese Deckschichtart zeichnet sich durch ihren hohen Hohlraumgehalt aus. Auf der Erprobungsstrecke B 56 wurde eine Lärmreduzierung von ca. 4 dB(A) im Vergleich zum Referenzbelag gemäß RLS-90 ermittelt. In den letz-

ten Jahren wurde diese Bauweise vor allem in Bayern mehrfach erprobt. Die bisherigen Erfahrungen dort bestätigen diese Geräuschminderung gegenüber dem Referenzwert der RLS-90. Erste Strecken liegen jetzt seit ca. 5 Jahren unter Verkehr. Es sind keine nennenswerten Schädigungen aufgetreten. Hinsichtlich der Lebensdauer dieser Bauweise sind Erfahrungen in der Praxis zu sammeln.

Den Schwerpunkt des Teilprojektes „Erfolgskontrolle“ bildete die Einrichtung der Erprobungsstrecke mit optimierten Offenporigen Asphalten auf der BAB 24 bei Neuruppin im Sommer 2009. Im Rahmen der Umsetzung der Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt wurden neuartige Baustoffe (modifiziertes Bitumen) und ein neues innovatives Konstruktionsverfahren (Einsatz von Resonatoren) eingesetzt.

Die Erprobungen auf der BAB 24 haben gezeigt, dass mit dem Bau einer Abdichtungsschicht aus Gussasphalt die akustische Wirksamkeit des darüberliegenden Offenporigen Asphalt erhöht werden kann. Ein Aufsteigen des Bindemittels in den OPA, wie es bei einer Bitumenabdichtung beobachtet wird, kann somit verhindert werden.

Insgesamt wurde auf der BAB 24 in den Streckenabschnitten mit Offenporigem Asphalt eine Lärmreduzierung von ca. 9 dB(A) gegenüber dem Referenzpegel der RLS-90 erreicht. Zur akustischen Verbesserungen Offenporiger Asphalte hat der Projektpartner Müller BBM Resonatorelemente entwickelt, die in die offenporige Deckschicht integriert werden und aufgrund ihrer speziellen Frequenzabstimmung ein breiteres Frequenzband zur Schallreduzierung abdecken sollen. Auf Basis der labor-technischen Untersuchungen wurde eine zusätzliche lärmreduzierende Wirkung von bis zu 3 dB(A) prognostiziert.

Die im Labor nachgewiesene Wirksamkeit der Resonatorelemente konnte vor Ort messtechnisch jedoch nicht bestätigt werden. Weiterführende Untersuchungen im akustischen Labor der BAST haben gezeigt, dass auf der BAB 24 ein sehr hohlraumreiches Mischgut verwendet wurde. Der ermittelte Hohlraumgehalt des Offenporigen Asphalt lag mit 30 Vol.-% deutlich über den Standardwerten zwischen 22 Vol.-% und 24 Vol.-%. Auf Grundlage erster Untersuchungsergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass durch das verwendete hohlraumreiche OPA-Mischgut auf der BAB 24 die Absorptionsmaxima nicht in den bisher bekannten Frequenzbe-

reichen aufgetreten sind. Dadurch lässt sich auf eine Überschneidung der Wirksamkeitsbereiche von OPA und Resonatoren in ähnlichen Frequenzbereichen schließen: Die Abdeckung des gewünschten breiten Frequenzbereiches zur Schallreduzierung ist in der Praxis nicht gelungen. Hier ist Optimierungspotenzial erkennbar.

Insgesamt können die Konzeption und die Bauausführung auf der Erprobungsstrecke BAB 24 dennoch als gelungen betrachtet werden. Mit dem Bau des Resonator-Testfeldes wurde erstmals innerhalb von 3 Jahren eine innovative Idee von der Planung über den erfolgreichen Abschluss der Laborversuche in die Straßenbaupraxis umgesetzt. Die Umsetzung dieser Idee war nur im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit möglich. Ein Forscherteam aus Akustikern und Bauingenieuren hat an der technischen Umsetzung des Einsatzes der Resonatorkörper im Offenporigen Asphalt gearbeitet:

- Dem Resonator musste eine geeignete Form gegeben werden,
- es musste ein geeignetes Material gefunden werden,
- es mussten Fragen wie z. B. die Verklebung des Resonatorkörpers mit dem Untergrund geklärt werden.
- In Belastungsversuchen musste getestet werden, ob die Resonatorkörper dem Gewicht eines Fertigers während des Einbaues standhalten, wie sie überhaupt befahren werden können.

Baupraktisch sind keine nennenswerten Probleme aufgetreten und auch nach einem Jahr mit hohem Verkehrsaufkommen und teilweise extremen Witterungsbelastungen (lang anhaltenden Kälte- und Hitzeperioden) sind keine Schäden aufgetreten.

Die Erprobung hat aber auch gezeigt, dass weitere Schritte folgen müssen. Im Labor muss zunächst der Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die akustische Wirksamkeit der Resonatoren und eine mögliche Anpassung der Elemente untersucht werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse sollte eine zweite Erprobungsstrecke gebaut werden, die speziell die akustische Anpassung der Resonatoren zur Optimierung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Deckschichten verfolgt.

Im Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“ wurde an der akustischen Optimierung von Fahrbahnübergängen

gearbeitet. Die akustische Vermessung der Fahrbahnübergänge im Labor und in der Praxis hat gezeigt, dass eine Reduzierung des Geräuschpegels zwischen 5 und 8 dB(A) allein durch den Einsatz lärmarmen Oberflächen erreicht werden kann.

Die Forschungsarbeiten der letzten Jahre haben gezeigt, dass Innovationen im Straßenbau zwingend erforderlich sind, um den Straßenverkehrslärm deutlich und dauerhaft reduzieren zu können.

Literatur

- [1] BARTOLOMAEUS, W., BECKER, R.: Messberichte der Statistischen Vorbeifahrt auf der BAB 61, BAB 24, B56, BAB 10, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007-2010
- [2] BARTOLOMAEUS, W., LÖFFLER, U.: Messberichte des Absorptionsgrades im Kundt'schen Rohr, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 14/2006, Sachgebiet 04.4: Straßenbefestigungen, Bauweisen, Sachgebiet 06.1: Straßenbaustoffe; Anforderungen, Eigenschaften, Fahrbahndecken aus Beton mit Waschbetonoberflächen
- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 5/2006, Sachgebiet 12.1: Umweltschutz; Lärmschutz Deckschichten aus Waschbeton, Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90
- [5] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 22/2010, Sachgebiet 12.1: Umweltschutz; Lärmschutz, Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90 – Fahrbahnoberflächen – Korrekturwert D_{Str0} für lärmarmen Gussasphalt
- [6] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 14/1991, Sachgebiet 12.1: Lärmschutz, Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS 90 – Ausgabe 1990 – Ergänzung der Fußnote der Tabelle 4
- [7] Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-90), Ausgabe 1992
- [8] RIPKE, O.: Verbundforschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“ Einbau von Erprobungs- und Versuchsabschnitten auf der Erprobungsstrecke BAB 24 bei Neuruppin, Bundesanstalt für Straßenwesen, Juli 2010
- [9] RIPKE, O., STÖCKERT, U.: Einsatzerfahrungen mit Resonatorelementen im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“, Bundesanstalt für Straßenwesen, August 2010
- [10] SCHWALBE, G.: Durchführung von Geräuschmessungen an Waschbetonbelägen mit unterschiedlichen Texturtiefen, Bundesanstalt für Straßenwesen, März 2010
- [11] SCHWALBE, G.: Akustische Optimierung von Fahrbahnübergängen für lange Brücken mit SME-Mustern der Fa. Maurer Söhne, München, Bundesanstalt für Straßenwesen, April 2009
- [12] ULLRICH, S.: Der Einfluss der Straßenoberfläche auf die Geräusch-Emission mehrachsiger Lkw – Gussasphalt auf Autobahn-Fahrbahnen, Bundesanstalt für Straßenwesen (AP 96661/V3), Juli 2002
- [13] Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S37, Bergisch Gladbach, Dezember 2004
- [14] ZÖLLER, M.: CPX-Messungen auf Erprobungsstrecken des Projektes LeiStra 2; Messberichte Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007-2010

6 Zusammenfassende Bewertung des Gesamtprojektes mit Ausblick

Straßenverkehr ist in allen Ländern die am meisten verbreitete Lärmquelle und die häufigste Ursache für Belästigung. Maßnahmen zur Minderung von Straßenverkehrslärm haben deshalb eine sehr hohe Priorität. In Deutschland fühlen sich 60 % der Bevölkerung durch den Straßenverkehrslärm belästigt. Die Auswirkungen des Lärms reichen von der Beeinträchtigung der Konzentration und Kommunikation bis hin zur möglichen Schädigung der Gesundheit.

Neben den diskutierten gesundheitlichen Beeinträchtigungen wurden in den letzten Jahren aber auch zunehmend negative Auswirkungen des Verkehrslärms auf eine gesunde, sozial ausgewogene Stadtentwicklung beobachtet. Bevölkerungsschichten mit höherem Einkommen ziehen in ruhige Wohnlagen abseits der Verkehrsachsen.

Im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsarbeiten im Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr“ ist es in den letzten Jahren gelungen, die Wirkmechanismen der Lärmentstehung im Zusammenspiel Reifen – Fahrbahn detailliert zu beschreiben und Anforderungen für eine dauerhafte Lärmreduzierung zu formulieren.

Straßenverkehrslärm setzt sich zusammen aus Motor- und Antriebsgeräuschen und den Reifen-Fahrbahngeräuschen. Um eine dauerhafte Lärmreduzierung zu erzielen, muss bei der Entwicklung neuer Lösungsansätze die Wechselwirkung aller Komponenten berücksichtigt werden. Deshalb arbeiten in dem Forschungsprojekt „Leiser Straßenverkehr“ Partner aus Forschung und Industrie zusammen. Dieser interdisziplinäre Ansatz macht die Arbeit an der Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung des Straßenverkehrslärms im Rahmen des Projektes „Leiser Straßenverkehr 2“ erfolgreich.

So konnte die Firma Continental AG im letzten Jahr einen um ca. 3,5 dB(A) gegenüber dem aktuellen Produkt geräuschreduzierten Reifen für die Antriebsachsen von Lkw auf dem Markt einführen, der im Rahmen des Projektes entwickelt wurde. Es ist vorgesehen, dieses neu entwickelte Reifenprofil auch auf andere Reifendimensionen zu übertragen. Die Entwicklung neuer Reifen ist eine sehr komplexe Aufgabe. Änderungen an einer Eigen-

schaft eines modernen Reifens vorzunehmen heißt, viele andere Eigenschaften des Produktes mit zu beeinflussen. Das Reifenprofil ist für eine Reihe sicherheitsrelevanter Eigenschaften verantwortlich. Ein profilloser Reifen (genannt Slick) stellt aus akustischer Sicht das Optimum dar. Um aber auf nasser oder glatter Fahrbahn die Brems- und Antriebskräfte übertragen zu können und gleichzeitig die Seitenführung zu gewährleisten, ist eine Reifenprofilierung unerlässlich. Im Teilprojekt „Grundlagenuntersuchung und Optimierung von Lkw-Reifen“ ist es gelungen, einen Reifen mit einem leiseren Profil zu entwickeln, der gleichzeitig alle Anforderungen an die Verkehrssicherheit und Nutzungsdauer erfüllt. Die Umsetzung von Forschungsergebnissen in ein marktfähiges Produkt und dessen Markteinführung sind ein sehr langwieriger Prozess und konnten hier bereits innerhalb von 4 Jahren realisiert werden.

Parallel zu der Entwicklung eines neuen leiseren Antriebsachsenreifens wurde von den Projektpartnern Continental AG und den Universitäten Hannover und Hamburg-Harburg ein Simulationstool für die Reifenoptimierung entwickelt. Das Modell zeichnet sich durch eine hohe Genauigkeit hinsichtlich der physikalischen Eigenschaften des Reifen-Fahrbahn-Systems aus und konnte für verschiedene Fragestellungen bereits erfolgreich validiert werden. Erstmals steht weltweit ein Simulationsmodell zur Verfügung, mit dem das Rollen eines Reifens auf einer Fahrbahn mit realer Textur simuliert und die daraus resultierenden Geräusche prognostiziert werden können. Mit der Entwicklung des Simulationsmodells wurden tiefe Einblicke in die Wirkmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes gewonnen. Erstmals ist es möglich, Aussagen zu Einflüssen eines Reifenprofils auf die Schallabstrahlung zu machen. Darüber hinaus fand das Modell Anwendung bei speziellen Fragestellungen (Wirksamkeit von Radkastenauskleidungen, Fahrbahnübergängen), die bisher nur mit großem messtechnischem Untersuchungsaufwand geklärt werden konnten. Die Erarbeitung des Modells findet große Anerkennung im Rahmen der nationalen und internationalen Forschung. Auf der internationalen Reifen-Konferenz-Messe „Tire Technology Expo 2008“ wurde Herr Dr. Maik Brinkmeier von der Leibniz-Universität Hannover mit dem 1. Preis für „Tire Manufacturing and Design of the Year“ ausgezeichnet.

Das Simulationsmodell wurde im Oktober 2008 bei der Firma Continental AG implementiert und wird

für Forschungsarbeiten bei der lärmtechnischen Optimierung von Lkw-Reifen eingesetzt. Da momentan noch erhebliche Rechenzeiten für eine Geräuschprognose erforderlich sind, ist eine wirtschaftliche Nutzung des Modells noch nicht möglich. Um ein derartiges Simulationsmodell als Standardwerkzeug für die Optimierung von Reifen einsetzen zu können, sind hier weitere Forschungsarbeiten erforderlich.

Neben den Reifen müssen auch die Straßenoberflächen einen Beitrag zur Lärminderung leisten. Die effektivste Maßnahme, um das Reifen-Fahrbahngeräusch direkt am Ort der Entstehung zu reduzieren, ist der Bau von Offenporigem Asphalt. Die Lärminderung dieser Bauweise wird hauptsächlich bestimmt durch die Hohlraumstruktur, die für die Reduzierung des aerodynamischen Schallanteils sorgt und zusätzlich Geräusche absorbieren kann. Der Nachteil der offenporigen Hohlraumstruktur liegt darin, dass sie für Regen, Reifen- und Fahrbahnabrieb und weitere Verschmutzungen zugänglich ist. Im Laufe der Nutzungsdauer setzt sich der Hohlraum zu und die akustische Wirksamkeit nimmt ab.

Im Teilprojekt „Integrale Verbesserung von offenporigen Fahrbahndecken“ haben sich die Projektpartner das Ziel gesetzt, Lösungsansätze zur Verbesserung Offenporiger Asphalte zu entwickeln. Im ersten Schritt wurde durch die Bundesanstalt für Materialforschung eine umfangreiche Analyse der Hohlraumstruktur vorgenommen, um die Verschmutzungsmechanismen und Partikelbewegungen detailliert beschreiben zu können. Die Ergebnisse fanden Eingang in die Bearbeitung der anderen Teilprojekte.

Der Universität Stuttgart ist es gelungen, durch den Einsatz von Polymer-Nanotechnologie die Hohlraumwandungen in Offenporigen Asphalten derart zu modifizieren, dass die Verschmutzungsneigung deutlich reduziert wird. Eine besondere Herausforderung stellte dabei die Abstimmung der einzelnen Bindemittelparame-ter dar. Durch die Zugabe des Polymers durften dessen Eigenschaften wie die Affinität zum Gestein nicht negativ verändert werden. In Laboruntersuchungen konnte in den modifizierten Offenporigen Asphalten die Reduzierung der Schmutzanhaftung in dem Hohlraumgefüge nachgewiesen werden. Im Juli 2009 wurde auf der Erprobungsstrecke BAB 24 ein Testabschnitt mit diesem Offenporigen Asphalt eingebaut. Die Praxis muss nun zeigen, ob sich die Laborergebnisse be-

stätigen und eine längere akustische Lebensdauer auch unter realen Bedingungen erzielt wird.

Die Universität München hat ein Simulationsmodell entwickelt, mit der die Durchströmung in Offenporigen Asphalten nachgestellt werden kann. Viele Versuche, derartige Deckschichten mechanisch zu reinigen, haben bisher keine zufrieden stellenden Ergebnisse erbracht. Mit Hilfe des neuen Modells kann sehr gut veranschaulicht werden, welche Hohlraumstrukturen erforderlich sind, um die Entwässerungsfähigkeit von Offenporigen Asphalten verbessern zu können und wie Reinigungsverfahren konzipiert werden sollten, um effektiver den Schmutzaustrag aus dem Gefüge zu bewirken.

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschungsarbeit war die Analyse, inwieweit durch technische Maßnahmen das Schallabsorptionsvermögen offenporiger Fahrbahnbeläge optimiert werden kann. Hinsichtlich der Ausprägung der Hohlraumstruktur und dessen Volumens sind physikalische Grenzen gesetzt. Deshalb war eine neue, sehr innovative Idee, Helmholtzresonatoren auf der Asphaltbinderschicht zu applizieren und mit zweischichtigem Offenporigem Asphalt zu überbauen. Die Resonatorelemente wurden auf ein Absorptionsmaximum im Frequenzbereich von 800 bis 1.000 Hz eingestellt. Sie können somit das Absorptionsminimum von zweischichtigen Offenporigen Asphalten ab 630 Hz ausgleichen. Auf Basis der labortechnischen Untersuchungen in der Hallkabine der Firma Müller BBM wurde eine zusätzliche lärmreduzierende Wirkung von bis zu 3 dB(A) prognostiziert. Damit sollte eine akustische Optimierung des Gesamtsystems bewirkt werden.

Nach Abschluss der Untersuchungen im akustischen Labor wurden zahlreiche Untersuchungen hinsichtlich der mechanischen Eignung der Resonatoren in der Gesamtkonstruktion durchgeführt. Die Belastungsversuche zeigten, dass durch den Einbau der Resonatoren keine nachteilige Beeinträchtigung des Ermüdungsverhaltens der offenporigen Asphaltdeckschichten infolge zyklischer Belastung zu erwarten ist [1].

Mit dem Bau der Erprobungsstrecke auf der BAB 24 sollten die Laborergebnisse in die Praxis umgesetzt werden. Im Vorfeld wurden bautechnische Fragen durch den Bau einer Versuchsstrecke auf dem Testgelände in Sperenberg geklärt. Die Einrichtung der Erprobungsstrecke auf der BAB 24 erfolgte im Sommer 2009. Der Einbau der Resonato-

ren auf einem Testabschnitt von ca. 50 erfolgte prinzipiell problemlos. Im April 2010 wurden nach der Verkehrsfreigabe des gesamten Streckenabschnittes umfangreiche Lärmmessungen durch die BAST durchgeführt. Insgesamt wurde auf der BAB 24 eine Lärmreduzierung von ca. 9 dB(A) gegenüber dem Referenzpegel der RLS-90 erreicht. Die im Labor nachgewiesene Wirksamkeit der Resonatorelemente konnte vor Ort messtechnisch nicht bestätigt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden im Juli 2010 weiterführende Untersuchungen auf der BAB 24 und im akustischen Labor der BAST durchgeführt [7, 8].

Erste Vermutungen, dass die Wirksamkeit der Resonatoren durch den Einfluss von Wasser verhindert wurde, konnten durch die Wiederholmessungen nach einer lang anhaltenden Trockenperiode ausgeschlossen werden. Untersuchungen im akustischen Labor der BAST zeigten jedoch eine deutliche Abhängigkeit der Wirksamkeit der Resonatoren vom verwendeten Asphaltmischgut. Sowohl für die Laborversuche als auch für die Testversuche in Sperenberg und auf der BAB 24 wurden unterschiedliche OPA-Mischgutzusammensetzungen verwendet. Dadurch stellten sich unterschiedliche Hohlraumgehalte und -strukturen ein. Auf der BAB 24 kam als Gesteinskörnung eine Elektroofenschlacke (Eolit) mit sehr kubischer Kornform zum Einsatz. Die ermittelten Hohlraumgehalte lagen mit 30 Vol.-% ungewöhnlich hoch. In der Regel werden beim Bau von offenporigen Deckschichten Hohlraumgehalte zwischen 22 und 24 Vol.-% erzielt. Absorptionsgradmessungen im Kundt'schen Rohr zeigten in Abhängigkeit vom Mischgut bzw. Hohlraumgehalt des Probekörpers eine deutliche Frequenzverschiebung des Absorptionsmaximums [6]. Ursachen hierfür müssen noch aufgeklärt werden. Die geometrische Form der Resonatorelemente wurde auf Grundlage der Laborergebnisse im Zuge der Bearbeitung des Projektes „Leiser Straßenverkehr 2“ festgelegt. Eine Anpassung der Elemente an das verwendete ungewohnt hohlraumreiche Mischgut auf der BAB 24 erfolgte nicht, da zu diesem Zeitpunkt der Projektbearbeitung der Einfluss unterschätzt wurde.

Auf Grundlage erster Untersuchungsergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass durch das verwendete hohlraumreiche OPA-Mischgut auf der BAB 24 die Absorptionsmaxima nicht in den bisher bekannten Frequenzbereichen aufgetreten sind. Dadurch lässt sich auf eine Überschneidung der Wirksam-

keitsbereiche von OPA und Resonatoren in ähnlichen Frequenzbereichen schließen. Die Abdeckung des gewünschten breiten Frequenzbereiches zur Schallreduzierung ist in der Praxis nicht gelungen. Hier ist Optimierungspotenzial erkennbar.

Insgesamt können die Konzeption und die Bauausführung auf der Erprobungsstrecke BAB 24 dennoch als gelungen betrachtet werden. Es wurde auf den verschiedenen Streckenabschnitten eine Geräuschpegelminderung von über 9 dB(A) erreicht. Die Ergebnisse beim Bau des Testfeldes mit den Resonatorelementen haben gezeigt, dass baupraktisch keine nennenswerten Probleme auftreten und auch nach einem Jahr mit hohem Verkehrsaufkommen und teilweise extremen Witterungsbelastungen (lang anhaltenden Kälte- und Hitzeperioden) keine Schäden aufgetreten sind.

In weiterführenden Untersuchungen sollten zunächst im Labor der Einfluss des Hohlraumgehaltes auf die akustische Wirksamkeit der Resonatoren und eine mögliche Anpassung der Elemente untersucht werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse sollte eine zweite Erprobungsstrecke gebaut werden, die speziell die akustische Anpassung der Resonatoren zur Optimierung des Schallabsorptionsverhaltens von offenporigen Deckschichten verfolgt.

Ein noch neuer lärmarter Asphaltbelag ist der hohlraumreich zusammengesetzte Splittmastixasphalt (SMA LA). Um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, kommen hoch modifizierte Bindemittel und ein hoher Bindemittelgehalt zum Einsatz. Die fertige Schicht wird nicht abgestumpft und weist trotzdem gute Griffigkeitskennwerte auf. Der Einbau erfolgt auf einer abdichtenden Schicht. Dieser Fahrbahnbelag wurde im Rahmen der Erprobungsstrecken auf der B 56 und der BAB 24 erprobt. Die Messungen der akustischen Eigenschaften zeigen eine Lärminderung von ca. 4 dB(A) im Vergleich zur Referenzbauweise gemäß RLS-90 [7].

Im Rahmen des Projektes „Leiser Straßenverkehr 2“ war ein Ziel, Regelbauweisen lärmtechnisch zu optimieren. Bereits im Projekt „Leiser Straßenverkehr 1“ [4] wurde an der Optimierung von Gussasphaltdeckschichten gearbeitet, die aufgrund ihrer Mischgutkonzeption eine sehr lange Nutzungsdauer aufweisen. Auf Testabschnitten der B 56 und BAB 61 wurde lärmoptimierter Gussasphalt eingebaut. Die Optimierung des akustischen Verhaltens

dieser Deckschichten gelang durch den Einsatz eines Abstreumaterials mit kleinem Größtkorn, in diesem Fall 3 mm, und den Verzicht auf das sonst übliche Einwalzen dieses Materials. Hinzu kommt der Einsatz eines Mischguts mit kleinerem Größtkorn, meist 5 mm, in geringer Dicke von etwa 2 cm. Im September 2010 wurde durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung ein Allgemeines Rundschreiben (ARS 22/2010) [5] veröffentlicht, mit dem der lärmarme Gussasphalt einen D_{Stro} -Korrekturwert gemäß RLS-90 von -2 dB(A) erhält und damit zu den lärmarmen Bauweisen zählt.

Einen weiteren Schwerpunkt im Teilprojekt „Leise Straßen“ stellte die akustische Optimierung von Lamellen-Fahrbahnübergängen dar. Hier arbeiteten die Firmen RW Sollinger Hütte, Mauer Söhne GmbH & Co. KG und die Bundesanstalt für Straßenwesen zusammen.

Im ersten Schritt wurden die Einbautechnologien hinsichtlich möglicher Verbesserungen untersucht. Dazu wurden verschiedene Variationen auf dem Testgelände in Sperenberg akustisch vermessen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Abweichungen vom niveaugleichen Einbau des Fahrbahnüberganges (Höhenversatz) zu deutlich höheren Schallemissionen im Vergleich zum niveaugleichen Einbau führen. Es wurden in Abhängigkeit der Höhendifferenz Pegelerhöhungen zwischen 1,5 und 2,5 dB(A) ermittelt [2]. In den derzeit gültigen ZTV-ING ist eine Höhendifferenz zwischen 3 bis 5 mm zulässig. Diese Forderung sollte aus Sicht der Lärmreduzierung bei der anstehenden Überarbeitung korrigiert und ein niveaugleicher Einbau zur angrenzenden Fahrbahn gefordert werden.

Die Firma Maurer und Söhne GmbH & Co. hat zusammen mit der Bundesanstalt für Straßenwesen an der Entwicklung neuer Oberflächen für Fahrbahnübergänge gearbeitet. Die akustische Vermessung verschiedener Rautenelemente erfolgte im Prüfstand Fahrzeug-Fahrbahn der BASt. Dabei hat sich gezeigt, dass die akustisch und wirtschaftlich sinnvollste Lösung die Verwendung von Rauten mit mittlerem Anfahrwinkel (ca. 60°) in Verbindung mit einer rauen Oberfläche darstellt. Die Pegelreduzierung gegenüber dem Standard Lamellen-Fahrbahnübergang beträgt bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h ca. 8 dB(A) [3]. Zur Überprüfung dieser Ergebnisse in der Praxis wurde ein Fahrbahnübergang auf der BAB 10 mit diesen Rautenelementen ausgerüstet. Die Mes-

sung der akustischen Eigenschaften zeigte eine Bestätigung der Laborergebnisse. Es wurde eine Pegelreduzierung zwischen 4 und 7 dB(A) durch die Verwendung lärmoptimierter Rautenelemente erzielt [7].

Die Ergebnisse des Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“ zeigen, dass in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit der Reifen-, Fahrzeug- und Straßenbauindustrie sowie Forschung und Verwaltung effektive Lösungen für eine dauerhafte Reduzierung des Straßenverkehrslärms an der Quelle erarbeitet werden konnten. Diese Technologien zur Reduzierung von Verkehrslärm tragen nicht nur zur Verbesserung der Lebensqualität bei, sie sind auch ein Aushängeschild für den Technologie-Standort Deutschland. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“ zeigen, dass mit gezielter Projektförderung in Deutschland die technologische Spitzenposition für ein modernes, innovatives und umweltfreundliches Verkehrssystem gesichert werden kann.

Gleichzeitig wird aber auch deutlich, dass die technischen Potenziale der Schallreduktion noch nicht abschließend entwickelt sind. So ist es gelungen, mittels Simulationsprogrammen lärmarme Fahrbahn Texturen zu skizzieren. Es hat sich jedoch als schwierig erwiesen, diese Texturen dauerhaft auf einer Fahrbahnoberfläche herzustellen. Hier gibt es erste sehr innovative Ideen und Entwicklungen mit neuen Materialien, die nach erfolgreichem Laborversuch in der Praxis getestet werden müssen. Es wurden weiterführende Forschungskonzepte erarbeitet, die sich mit der Anwendung neuer Technologien und dem Einsatz neuer Materialien befassen werden.

Literatur

- [1] RIEDL, S.: „Integrale Verbesserung Offenporiger Asphalte – Teil: Prüfung der mechanischen Belastung der Resonatoren im Verbund“, Universität Kassel; August 2008
- [2] ZÖLLER, M.: Schalltechnische Messungen am Fahrbahnübergang des Projektes LeiStra 2, Testgelände Sperenberg, Dezember 2008
- [3] SCHWALBE, G.: Akustische Optimierung von Fahrbahnübergängen für lange Brücken mit

SME-Mustern der Fa. Maurer Söhne, München
Bundesanstalt für Straßenwesen, April 2009

- [4] Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Straßenbau, Heft S 37, Bergisch Gladbach, Dezember 2004
- [5] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 22/2010; Sachgebiet 12.1: Umweltschutz; Lärmschutz; Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen – RLS-90; Fahrbahnoberflächen – Korrekturwert D_{StrO} für Lärmarmen Gussasphalt
- [6] RIPKE, O., STÖCKERT, U.: Einsatzerfahrungen mit Resonatorelementen im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Leiser Straßenverkehr 2“, Bundesanstalt für Straßenwesen, August 2010
- [7] BARTOLOMAEUS, W., BECKER, R.: Messberichte der Statistischen Vorbeifahrt auf der BAB 61, BAB 24, B 56, BAB 10 Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007-2010
- [8] BARTOLOMAEUS, W., LÖFFLER, U.: Messberichte des Absorptionsgrades im Kundt'schen Rohr; Bundesanstalt für Straßenwesen, 2010

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2000

S 20: 36. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 14,00

S 21: Walzbeton: Ergebnisse aus neuester Forschung und langjähriger Praxis – Kompendium
Birmann, Burger, Weingart, Westermann

Teil 1: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (1)
Schmidt, Bohlmann, Vogel, Westermann

Teil 2: Einfluß der Zusammensetzung und der Verdichtung von Walzbeton auf die Gebrauchseigenschaften (2)
Weingart, Dreßler

Teil 3: Messungen an einer Versuchsstrecke mit Walzbeton-Tragschicht an der B54 bei Stein-Neukirch
Eisenmann, Birmann

Teil 4: Temperaturdehnung, Schichtenverbund, vertikaler Dichteverlauf und Ebenheit von Walzbeton
Burger € 17,00

2001

S 22: 3. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Nutzen der systematischen Straßenerhaltung
€ 19,50

S 23: Prüfen von Gesteinskörnungen für das Bauwesen
Ballmann, Collins, Delalande, Mishellany,
v. d. Elshout, Sym € 10,50

2002

S 24: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Konsolidationsverfahren -

Teil 1: Vergleichende Betrachtung von Konsolidationsverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund

Teil 2: Erfahrungsberichte über ausgeführte Straßenbauprojekte auf wenig tragfähigem Untergrund unter Verwendung von Konsolidationsverfahren
Koch € 17,50

S 25: 37. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 16,50

2003

S 26: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund - Aufgeständerte Gründungspolster
Rogner, Stelter € 14,00

S 27: Neue Methoden für die Mustergleichheitsprüfung von Markierungsstoffen – Neuentwicklung im Rahmen der Einführung der ZTV-M 02
Killing, Hirsch, Boubaker, Krotmann € 11,50

S 28: Rechtsfragen der Bundesauftragsverwaltung bei Bundesfernstraßen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 25./26. September 2000 in Saarbrücken
€ 13,00

S 29: Nichtverkehrliche Straßennutzung – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 24./25. September 2001 in Saarbrücken
€ 13,50

2004

S 30: 4. Bund-Länder-Erfahrungsaustausch zur systematischen Straßenerhaltung – Workshop Straßenerhaltung mit System –
€ 19,50

S 31: Arbeitsanleitung für den Einsatz des Georadars zur Gewinnung von Bestandsdaten des Fahrbahnaufbaues
Golkowski € 13,50

S 32: Straßenbaufinanzierung und -verwaltung in neuen Formen – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 23. und 24. September 2002 in Saarbrücken
€ 13,50

S 33: 38. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 17,50

S 34: Untersuchungen zum Einsatz von EPS-Hartschaumstoffen beim Bau von Straßendämmen
Hillmann, Koch, Wolf € 14,00

2005

S 35: Bauverfahren beim Straßenbau auf wenig tragfähigem Untergrund – Bodenersatzverfahren
Grundhoff, Kahl € 17,50

S 36: Umsetzung und Vollzug von EG-Richtlinien im Straßenrecht – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ am 22. und 23. September 2003 in Saarbrücken
€ 13,50

S 37: Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“
Projektgruppe „Leiser Straßenverkehr“ € 16,50

2006

S 38: Beschleunigung und Verzögerung im Straßenbau – Referate eines Forschungsseminars der Universität des Saarlandes und des Arbeitsausschusses „Straßenrecht“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen am 27./28. September 2004 in Saarbrücken
€ 16,50

S 39: Optimierung des Triaxialversuchs zur Bewertung des Verformungswiderstandes von Asphalt
Renken, Büchler € 16,00

S 40: 39. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 17,50

S 41: Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt – Untersuchungen von ausgegrabenen Proben
Schröder € 13,50

S 42: Veränderung von PmB nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren – Veränderungen der Eigenschaften von polymermodifizierten Bitumen nach Alterung mit dem RTFOT- und RFT-Verfahren und nach Rückgewinnung aus Asphalt
Wörner, Metz € 17,50

S 43: Eignung frostempfindlicher Böden für die Behandlung mit Kalk
Krajewski, Kuhl € 14,00

S 44: 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund
Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann € 21,50

2007

S 45: Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen
Leutner, Lorenzl, Schmoeckel, Donath, Bald, Grätz, Riedl, Möller, Oeser, Wellner, Werkmeister, Leykauf, Simon € 21,00

S 46: Analyse vorliegender messtechnischer Zustandsdaten und Erweiterung der Bewertungsparameter für Innerortsstraßen
Steinauer, Ueckermann, Maerschalk € 21,00

S 47: Rahmenbedingungen für DSR-Messungen an Bitumen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hase, Oelkers € 24,50

S 48: Verdichtbarkeit von Asphaltmischgut unter Einsatz des Walzsektor-Verdichtungsgerätes
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Wörner, Bönisch, Schmalz, Bösel € 15,50

2008

S 49: Zweischichtiger offenporiger Asphalt in Kompaktbauweise
Ripke € 12,50

S 50: Finanzierung des Fernstraßenbaus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitsausschusses "Straßenrecht" der FGSV am 25./26. September 2006 in Tecklenburg-Leeden
€ 15,50

S 51: Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Haftfestigkeit von Straßenmarkierungsfolien
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Killing, Hirsch € 14,50

S 52: Statistische Analyse der Bitumenqualität aufgrund von Erhebungen in den Jahren 2000 bis 2005
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Hirsch € 16,00

S 53: Straßenrecht und Föderalismus – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 24./25. September 2007 in Bonn
€ 15,50

S 54: Entwicklung langlebiger dünner Deckschichten aus Beton
Silwa, Roßbach, Wenzl € 12,50

S 55: Dicke Betondecke auf Schichten ohne Bindemittel (SoB/STSuB)
Leykauf, Birmann, Weller € 13,50

2009

S 56: Vergangenheit und Zukunft der deutschen Straßenverwaltung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 22./23. September 2008 in Bonn
€ 14,00

S 57: Vergleichende Untersuchung zweischichtiger offenporiger Asphaltbauweisen
Ripke € 13,50

S 58: Entwicklung und Untersuchung von langlebigen Deckschichten aus Asphalt
Ludwig € 15,50

S 59: Bestimmung des adhäsiven Potentials von Bitumen und Gesteinsoberflächen mit Hilfe der Kontaktwinkelmessmethode
Hirsch, Friemel-Göttlich € 16,00

2010

S 60: Die Zukunftsfähigkeit der Planfeststellung – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 21./22. September 2009 in Bonn
€ 15,50

S 61: Modell zur straßenbautechnischen Analyse der durch den Schwerverkehr induzierten Beanspruchung des BAB-Netzes
Wolf, Fielenbach € 16,50

S 62: 41. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau
€ 18,50

S 63: Vergleichsuntersuchungen zum Frosthebungsversuch an kalkbehandelten Böden, RC-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten
Blume € 16,00

S 64: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten (OPA) Teil 1: Bestandsaufnahme an vorhandenen Strecken
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Ripke, Zöller, Pöppel-Decker € 23,00

S 65: Untersuchungen von Dübellagen zur Optimierung des Betondeckenbaus
Freudenstein, Birmann € 14,00

2011

S 66: Qualitätssicherung von Waschbetonoberflächen
Breitenbücher, Youn € 14,50

S 67: Weiterentwicklung der automatisierten Merkmalerkennung im Rahmen des TP3
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rohleder, Kunz, Wasser, Pullwitt, Müller, Canzler, Winkler € 16,50

S 68: Lärmindernder Splittmastixasphalt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Ripke

S 69: Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen
Müller, Wasser, Germann, Kley € 14,50

S 70: Erprobungsstrecke mit Tragschichten ohne Bindemittel aus ziegelreichen RC-Baustoffen
Dieser Bericht liegt außerdem in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> heruntergeladen werden.
Jansen, Kurz € 16,00

S 71: Enteignung für den Straßenbau – Verfahrensvereinheitlichung – Privatisierung, Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises "Straßenrecht" am 20./21. September 2010 in Bonn
€ 15,00

S 72: Griffigkeitsprognose an offenporigen Asphalten - Teil 2: Neue Baumaßnahmen
Jansen, Pöppel-Decker € 15,00

S 73: Längsebenenheitsauswerteverfahren "Bewertetes Längsprofil" – Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung
Maerschalk, Ueckermann, Heller € 18,50

2012

S 74: Verbundprojekt "Leiser Straßenverkehr 2" – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche
Projektgruppe "Leiser Straßenverkehr 2" € 30,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.