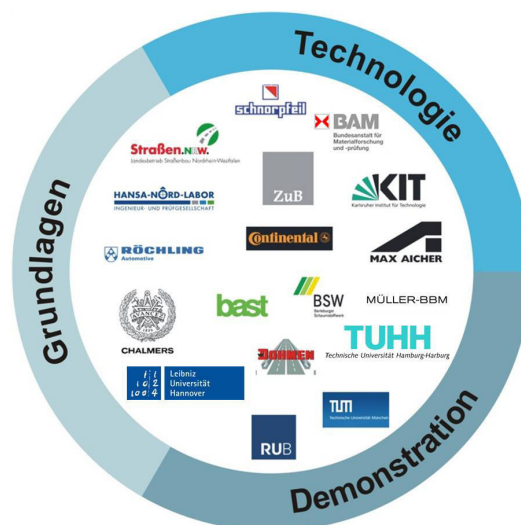


# Leiser Straßenverkehr 3

Gemeinsamer Schlussbericht

Oktober 2017



Das Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 3“ wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie unter dem Förderkennzeichen 19U10016 A-M gefördert. Der TÜV Rheinland hat die Aufgabe des Projektträgers übernommen. Die Bundesanstalt für Straßenwesen war für das Projektmanagement verantwortlich. Der Bau der Erprobungsstrecken erfolgte aus Baumitteln. Auf diese Weise unterstützte das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur das Projekt „Leiser Straßenverkehr 3“.

Der vorliegende Schlussbericht wurde auf Grundlage der Originalberichte der Partner erstellt. Auf die Wiedergabe von Anhängen wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Die Berichte der einzelnen Teilvorhaben sind ungekürzt bei der Technischen Informationsbibliothek (TIB) veröffentlicht.

---

Folgende Partner haben in dem Projekt zusammengearbeitet:

**BSW Berleburger Schaumstoffwerk GmbH, Bad Berleburg**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 H)

**Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 A)

**Continental Reifen Deutschland GmbH, Hannover**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 B)

**Hansa-Nord-Labor GmbH, Pinneberg**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 I)

**Heinz Schnorpfel Bau GmbH, Treis-Karden**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 M)

**Ingenieurgesellschaft für Zuschlag- und Baustofftechnologie mbH (ZuB), Mörfelden-Walldorf**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 J)

**Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 D)

**Leibniz Universität Hannover, Institut für Angewandte Mathematik, Hannover**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 F)

**Max Aicher GmbH & Co.KG, Freilassing**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 G)

**Müller-BBM GmbH, Planegg**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 C)

**Röchling Automotive SE & Co.KG, Worms**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 L)

**Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Modellierung und Berechnung, Hamburg**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 E)

**Willy Dohmen GmbH & Co.KG, Übach-Palenberg**

(Förderkennzeichen 19 U 10016 K)

Weiterhin haben als Unterauftragnehmer der BASt mitgearbeitet:

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin**

**Chalmers University of Technology, Division of Applied Acoustics, Göteborg, Schweden**

**Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik, Bochum**

**Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Bochum**

**Technische Universität München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung, München**

## Kurzfassung

### Verbundprojekt Leiser Straßenverkehr 3

Straßenverkehr stellt in Deutschland die stärkste Quelle für Lärmbelastungen dar. In 2014 wurde durch den Forschungsverbund Leiser Verkehr ein Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung in Deutschland veröffentlicht, der den aktuellen Wissensstand zum Einfluss des Verkehrslärms auf die Lebensqualität und die Gesundheit der Bevölkerung dokumentiert. Verschiedene Studien belegen, dass Dauerbelastungen über 65 dB(A) die Betroffenen stark beeinträchtigen. So mindern die hohen Lärmbelastungen nicht nur die Lebensqualität, sondern sie können auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schlafstörungen, kognitive Leistungseinschränkungen und Tinnitus verursachen. Gerade wegen des stetig wachsenden Verkehrsaufkommens sind deshalb Strategien zu entwickeln, die die Bevölkerung noch wirksamer vor Straßenverkehrslärm schützen.

Aus dem Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung wurden seit 2001 die Verbundprojekte *Leiser Straßenverkehr* gefördert. In 2014 wurde das dritte und letzte Verbundprojekt erfolgreich abgeschlossen.

Das Verbundprojekt *Leiser Straßenverkehr 3 (LeiStra3)* hatte sich als zentrales Ziel gesetzt, Maßnahmen zur Minderung des Straßenverkehrslärms in Ballungsräumen zu entwickeln, die dort aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte besonders wirkungsvoll sind. Es wurden verschiedene Forschungsansätze verfolgt, die die Geräuschemission an der Lärmquelle nachhaltig reduzieren. Da die Geräuschemission des fließenden Verkehrs maßgeblich durch Wechselwirkungen an der Kontaktstelle von rollendem Reifen und Fahrbahn bestimmt wird, standen die Reifen-Fahrbahn-Geräusche im Fokus der Untersuchungen.

Ein Schlüsselement in *LeiStra3* war die Erweiterung des Simulationsmodells SPERoN zur quantitativen Analyse und Vorhersage der Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Systematische Analysen von experimentell aufgenommenen Geräuschkennlinien mit dem Modell zeigten in *LeiStra3*, dass neben der Anregung von Reifenschwingungen aerodynamische Effekte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt maßgeblich an der Geräuschentstehung beteiligt sein müssen. Um diese aerodynamischen Effekte eingehend charakterisieren und kritische Größen identifizieren zu können, mussten auf einem angemieteten Testgelände Modelloberflächen mit speziellen Texturmustern hergestellt werden, die die Entstehungsmechanismen des Rollgeräusches weitgehend getrennt und unabhängig voneinander anregen. Diese Projektstudien bildeten die Grundlage für die Entwicklung eines tragfähigen physikalischen Modells zur Beschreibung der aerodynamischen Effekte.

Im Ergebnis von *LeiStra3* lassen sich mit SPERoN 2020 nun reale Fahrbahnoberflächen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Reifen-Fahrbahn-Geräusche quantitativ analysieren und Designs für neuartige geräuschmindernde Fahrbahnbeläge zuverlässig synthetisieren. Darüber hinaus stellt das Modell ein leistungsfähiges Modul zur Reifenoptimierung zur Verfügung, mit dem der Einfluss der Profilierung und des Reifenaufbaus auf die Schallabstrahlung und den Rollwiderstand untersucht werden kann. Im Fokus stand dabei die Auswahl und Anwendung geeigneter numerischer Verfahren zur Verkürzung der Rechenzeiten, um ein praxistaugliches Optimierungstool bereit zu stellen. Dies ermöglicht eine effiziente Bestimmung von Schallabstrahlung und Rollwiderstand ohne aufwendigen Prototypenbau.

Im Regionalverkehr treten vielfach Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge auf, zudem werden häufig enge Kurven durchfahren. Um die nötige Traktion zu gewährleisten, müssen die Antriebsachsreifen Profile mit einem hohen Anteil an Querrillen aufweisen. Diese Blockprofile neigen zu einer starken Schwingungsanregung auf der Fahrbahn und damit zu einer höheren Geräuschemission. In *LeiStra3* wurden technologische Ansätze erarbeitet, um Rollgeräusche blockprofilierter Lkw-Reifen über die gesetzlichen Grenzwerte hinaus zu reduzieren. Im Straßenversuch hat eine Entwicklungsvariante einen Schalldruckpegel von 74,4 dB(A) erreicht. Gegenüber den aktuellen Produkten wurde damit eine Geräuschreduzierung von etwa 4 bis 5 dB(A) erzielt. Diese Variante wurde etwa ein Jahr nach Projektabschluss auf dem Markt eingeführt.

Darüber hinaus wurden in *LeiStra3* schallabsorbierende Unterbodenverkleidungen realisiert, die das Rollgeräusch effizient absorbieren und damit den Vorbeifahrtpegel um bis zu 3 dB(A) mindern können. Mit Blick auf Elektrofahrzeuge wurden grundlegende Untersuchungen zur Reifen-Fahrbahn-Wechselwirkung unter Antriebsmoment und zur psychoakustischen Charakterisierung durchgeführt.

Einen weiteren Schwerpunkt in *LeiStra3* stellte die Entwicklung leiserer Fahrbahnoberflächen dar. Modellrechnungen belegen, dass die Oberflächengestalt einen starken Einfluss auf die Schwingungsanregung des Reifens und die aerodynamischen Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn hat. Aus akustischer Sicht ist es günstig, wenn alle Profilschulden auf einer Ebene liegen und sich plateauartige Texturen mit schluchtenförmigen Vertiefungen ausbilden.

Die lärmtechnisch optimierte Asphaltdeckschicht AC D LOA stellte zu Projektbeginn eine neue Entwicklung in der Straßenbautechnik dar und greift diesen Ansatz auf. Die Deckschicht wurde auf Basis einer dichten Asphaltzusammensetzung konzipiert und zeichnet sich durch eine Korngrößenverteilung aus, die auf eine lärmtechnisch wirksame Oberflächentextur abgestimmt ist. Der erste Einbau von AC D LOA erfolgte 2007 in Düsseldorf im Bereich der kommunalen Straßen. In *LeiStra3* wurde daran gearbeitet, die Verdichtungswilligkeit des Asphaltmischgutes zu verbessern. Auf diese Weise lassen sich die Dauerhaftigkeit der Deckschicht und damit ihr lärmtechnischer Nutzen erhöhen. Die Erkenntnisse flossen in die neuen „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten“ ein, die in 2015 von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen herausgegeben wurden.

Der Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche (engl.: Porous Mastic Asphalt, PMA) zeigt ebenfalls lärmmindernde Effekte. Im Vergleich zum herkömmlichen Gussasphalt enthält der PMA einen wesentlich höheren Anteil grober Gesteinskörnung. Es entsteht eine Deckschicht, die im unteren Bereich dicht und im oberen Bereich offenporig strukturiert ist. Die akustische Wirksamkeit ergibt sich aus der günstigen Oberflächentextur und einem hohen Hohlraumgehalt. In 2009 wurden erste Erprobungsstrecken gebaut, bei denen Schallpegelmessungen nach der Statistischen Vorbeifahrtmethode eine Lärmreduzierungen von bis zu 3 dB(A) gegenüber dem Referenzwert zeigten. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden in *LeiStra3* weiterführende Untersuchungen durchgeführt, um die Ausführungssicherheit des PMA zu erhöhen. Zu diesem Zweck wurde die Mischgutzusammensetzung optimiert und Laborverfahren zur Herstellung von praxisnahen Probekörpern für die Mischgutkonzeption entwickelt. Auf den Bundesautobahnen A 553 bei Brühl, A 3 bei Lohmar und A 5 bei Friedberg konnten Erprobungsstrecken mit verschiedenen PMA-Varianten hergestellt werden. Diese wurden hinsichtlich der Mischgut- und Einbauparameter untersucht.

Außerdem wurde in *LeiStra3* untersucht, inwieweit der Herstellungsprozess von Elektroofenschlacke (EOS) verbessert werden kann, um bestimmte Kornformen und Korngrößen gezielt zu erzeugen und damit einen hochwertigen Ausgangswerkstoff für den Asphaltstraßenbau zu gewinnen. Im ersten Schritt wurden dazu EOS-Körnungen hinsichtlich ihrer bautechnischen Eignung geprüft und darauf aufbauend das Potenzial verschiedener Prozessrouten bewertet. Mit einer ausgewählten EOS-Körnung (EloMinit<sup>®</sup>) konnten zwei Asphaltdeckschichtvarianten konzipiert und im Mai 2014 auf einem Testfeld eingebaut werden.

Die Nachgiebigkeit bestimmt neben der Oberflächentextur und der Offenporigkeit die akustischen Eigenschaften eines Fahrbahnbelags. Ein Ziel in *LeiStra3* war es, Asphaltkonstruktionen durch die Nutzung der schwingungsdämpfenden Eigenschaften des Straßenoberbaus geräuschkindernd zu gestalten. Dabei wurden verschiedene Ansätze wie die Integration einer elastischen Dämpfungsschicht oder die Konzeption eines Asphaltmischgutes mit schwingungsdämpfenden Eigenschaften verfolgt.

Im Bereich Betonbauweisen stand die Herstellung einer Betondecke mit offenporiger Oberfläche (COPS) im Vordergrund. Die Grundidee des Systems COPS greift die im Asphaltstraßenbau bereits erfolgreich eingesetzte Mischgutkonzipierung mit hohem Grobkornanteil und einer feinkörnigen standfesten Bindemittel-/Mörtelphase auf. Während des Einbauvorganges sinkt der feinkörnige Mörtel nach unten ab, so dass innerhalb der oberen 10 mm der Deckschicht eine offenporige Oberfläche entsteht. In Laborversuchen wurde die Betonrezeptur so eingestellt, dass ein kontrolliertes Absetzverhalten des Zementleimes erreicht wird. Die Betonrezeptur muss möglichst stabil gegenüber Einflüssen von Witterung und Einbau sein, um die vorteilhaften akustischen Eigenschaften der fertigen Betondeckschicht sicherzustellen.

Im Verbundprojekt *LeiStra3* haben Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft in einer interdisziplinär angelegten Forschungsarbeit gemeinsam Lösungen erarbeitet, mit denen das Lärmreduzierpotenzial von Reifen, Fahrzeug und Fahrbahn weiter ausgeschöpft werden kann. In allen Arbeitspaketen wurden zahlreiche Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen, die dazu beigetragen haben, die bestehende Technik zu verbessern, die Impulse zur Entwicklung neuer Technologien gesetzt haben und auf deren Basis das Technische Regelwerk fortgeschrieben wurde.

## Inhalt

<b>1. Einleitung und Zielsetzung.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Übersicht des Verbundprojektes .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Arbeitspaket Grundlagen .....</b>	<b>13</b>
3.1 Einleitung .....	13
3.2 TEILVORHABEN SPERON 2020 – TEIL I:.....	15
Erweiterung des effizienten Rechenmodells um physikalische Teilmodelle	
3.3 TEILVORHABEN SPERON 2020 – TEIL II:.....	85
Entwicklung eines performanten Rechenmodells zur Berechnung und Reduzierung der Geräuschabstrahlung von Reifen	
<b>4. Arbeitspaket Reifen und Fahrzeug .....</b>	<b>145</b>
4.1 Einleitung .....	145
4.2 TEILVORHABEN III:.....	147
Entwicklung neuer Technologien zur Reduzierung des Rollgeräusches von blockprofilierten C3-Reifen	
4.3 TEILVORHABEN IV:.....	177
Ansätze für die akustische Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge	
4.4 TEILVORHABEN V:.....	218
Fernfeld-Geräuschminderung durch auf das Reifen-Fahrbahn-Geräuschspektrum abgestimmte absorbierende KFZ-Unterbodenverkleidungen	
<b>5. Arbeitspaket Fahrbahnbeläge.....</b>	<b>280</b>
5.1 Einleitung .....	280
5.2 TEILVORHABEN VI-I:.....	281
Bau von Asphaltdeckschichten mit akustisch optimaler Textur mit künstlicher Gesteinskörnung (EOS)	
5.3 TEILVORHABEN VI-II:.....	312
Optimierung der lärmtechnischen und bautechnischen Wirksamkeit und Nutzungsdauer dichter Asphaltdeckschichten	
5.4 TEILVORHABEN VI-III:.....	382
Reduzierung der Reifen-/Fahrbahngeräusche durch Dämpfung des durch den Verkehr induzierten Körperschalls mit Hilfe einer elastischen Dämpfungsschicht	
5.5 TEILVORHABEN VI-IV .....	436
Entwicklung und Optimierung einer dauerhaft lärmarmen Oberbetonschicht mit offenporiger Struktur (COPS)	
<b>6. Zusammenfassende Bewertung des Gesamtprojektes mit Ausblick.....</b>	<b>490</b>



# 1 Einleitung und Zielsetzung

Deutschland besitzt eines der leistungsfähigsten Verkehrssysteme in Europa. Dieses Verkehrssystem stellt die Voraussetzung für eine hohe Mobilität und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit dar. Ein Ziel der Bundesregierung ist deshalb die Sicherung und nachhaltige Entwicklung der Verkehrsinfrastruktur. Mit dem im Jahr 2009 in Kraft getretenen 3. Verkehrsforschungsprogramm "Mobilität und Verkehrstechnologien" werden wichtige Akzente in der Verkehrsforschung gesetzt [3].

Eine negative Auswirkung der hohen Mobilität ist der Verkehrslärm. Straßenverkehr stellt dabei in Deutschland die stärkste Quelle für Lärmbelastungen dar. In 2014 wurde durch den Forschungsverbund *Leiser Verkehr* ein Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung [2] in Deutschland veröffentlicht, der den aktuellen Wissensstand zum Einfluss des Verkehrslärms auf die Lebensqualität und die Gesundheit der Bevölkerung dokumentiert. Verschiedene Studien belegen, dass dauerhafte Lärmbelastungen über 65 dB(A) negative Auswirkungen auf davon betroffene Anwohner haben. So mindern die hohen Lärmbelastungen nicht nur die Lebensqualität, sondern sie können auch Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Schlafstörungen, kognitive Leistungseinschränkungen und Tinnitus verursachen [1, 7]. Gerade wegen des stetig wachsenden Verkehrsaufkommens sind deshalb Strategien zu entwickeln, die die Bevölkerung noch wirksamer vor Straßenverkehrslärm schützen.

Um 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. Dabei war die Lärminderung an der Quelle Gegenstand aller Forschungsaktivitäten, wobei die Komponenten Reifen, Fahrzeug und Fahrbahn immer als Gesamtsystem betrachtet wurden. Darüber hinaus wurden Fragestellungen der Lärmwirkung und die Analyse geeigneter Mess- und Bewertungsverfahren intensiv bearbeitet. In den Forschungsverbund wurden die Verbundprojekte *Leiser Straßenverkehr* eingebettet, die über zehn Jahre aus dem Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung gefördert wurden.

Das Verbundprojekt *Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche* wurde 2003 erfolgreich abgeschlossen [4]. In diesem ersten Verbundprojekt (*LeiStra1*) wurden vorrangig die Mechanismen der Entstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches detailliert analysiert, um Anforderungen zu formulieren und gezielt Maßnahmen zu dessen Reduzierung entwickeln zu können.

Aufbauend auf Erkenntnissen und Ergebnissen der vorangegangenen Forschungsarbeiten wurde in den Jahren 2005 bis 2010 das Verbundprojekt *LeiStra2* bearbeitet [5]. Im Ergebnis dieser Forschungsarbeiten konnten u.a. Standardbauweisen in der Straßenbautechnik lärmtechnisch optimiert werden. Als Beispiele seien der lärmarme Gussasphalt, der lärmarme Splittmastixasphalt und die längere Nutzungsdauer offenerporiger Asphalte genannt. Diese Ergebnisse wurden sehr zeitnah im geltenden Technischen Regelwerk verankert. Parallel dazu konnten mit dem Verbundpartner Continental Reifen Deutschland AG Pkw- und Lkw-Reifen akustisch optimiert werden.

Im aktuellen Verbundprojekt *Leiser Straßenverkehr 3 (LeiStra3)* lag der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten an der Entwicklung von effektiven Maßnahmen zur Minderung des Straßenverkehrslärms in Ballungsräumen. Angestrebt wurde eine Reduzierung des durch Straßenverkehr verursachten Geräuschpegels um insgesamt 4 bis 6 dB(A) gegenüber dem heutigen Stand der Technik. Dabei sollten neuartige Technologien, innovative Materialien und Simulationsmodelle eingesetzt werden.

Ein Schlüsselement in *LeiStra3* war die Erweiterung des Simulationsmodells SPERoN (**S**tatistical **P**hysical **E**xplanation of **R**olling **N**oise) zur quantitativen Analyse und Vorhersage der Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Damit lassen sich die zugrundeliegenden Mechanismen und physikalischen Zusammenhänge im Detail aufklären, so dass Fahrbahnbeläge mit lärmmindernder Wirkung zielgerichtet optimiert und die Möglichkeiten vollkommen neuartiger Deckschichten abgeschätzt werden können.

Im Bereich der Reifenoptimierung wurden zwei Forschungsziele formuliert. Zum einen sollten technologische Ansätze erarbeitet werden, um Rollgeräusche blockprofilierter Lkw-Reifen zu reduzieren, die im Regionalverkehr eingesetzt werden. Zum anderen wurden die Möglichkeiten einer gezielten Geräuschabstrahlung von Reifenprofilen bei Elektrofahrzeugen untersucht. Bei Elektrofahrzeugen entfällt das typische Geräusch der Verbrennungsmotoren, so dass im innerstädtischen Bereich, wo Anfahr- und Beschleunigungsvorgänge dominieren, eine wesentliche Geräuschquelle wegfällt. Gleichzeitig ist jedoch die Wahrnehmbarkeit dieser Fahrzeuge deutlich reduziert, so dass ein erhöhtes Unfallrisiko befürchtet wird. Um dies möglichst gering zu halten, wird von der Europäischen Kommission vorgeschlagen, Elektro- und Hybridfahrzeuge je nach Geschwindigkeit und Fahrzeugverhalten akustisch zu betonen. Derartige Soundeffekte widersprechen jedoch dem Grundgedanken der gewünschten Lärminderungen, so dass in *LeiStra3* nach Alternativen gesucht wurde.

Im Zusammenhang mit der angestrebten Lärminderung und der Reduzierung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches wurden in den letzten Jahren auch immer wieder Möglichkeiten in der Fahrzeugtechnik analy-

sirt. So zeigten Untersuchungen zum Potenzial von Radeinhausungen im Verbundprojekt *LeiStra1* keine wesentliche Lärminderung. Aus aerodynamischen Gründen etablierten sich in den letzten Jahren jedoch vermehrt Unterbodenverkleidungen, wobei überwiegend Leichtbau-Sandwich-Materialien zum Einsatz kommen. Vor diesem Hintergrund wurde in *Leistra3* geprüft, inwieweit die Funktionalität derartiger Unterbodenverkleidungen um einen akustischen Aspekt erweitert werden kann.

Die Entwicklung leiserer Fahrbahnoberflächen stellte ebenfalls einen wesentlichen Schwerpunkt dar. In Vorgängerprojekten konnte nachgewiesen werden, dass die Oberflächengestalt einen starken Einfluss auf die Schwingungsanregung des Reifens und die aerodynamischen Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn hat. Aus akustischer Sicht ist es günstig, wenn alle Profilspitzen auf einer Ebene liegen und sich plateauartige Texturen mit schluchtenförmigen Vertiefungen ausbilden [1, 4, 5]. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden Mischgutkonzeptionen optimiert sowie neuartige Materialien und Konstruktionsaufbauten für die Straße entwickelt, wobei auch das Simulationsmodell SPERoN für Geräuschprognosen genutzt und erweitert wurde.

Das Verbundprojekt *Leiser Straßenverkehr 3* wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie mit einem Finanzvolumen von etwa 5 Mio. € gefördert. Darüber hinaus hat die Bundesanstalt für Straßenwesen im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur ergänzend Forschungsprojekte initiiert, deren Ergebnisse Eingang in das Verbundprojekt fanden. Hier sollte vor allem der erforderliche Rahmen für eine Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis geschaffen werden. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten sind im vorliegenden Bericht zusammengestellt.

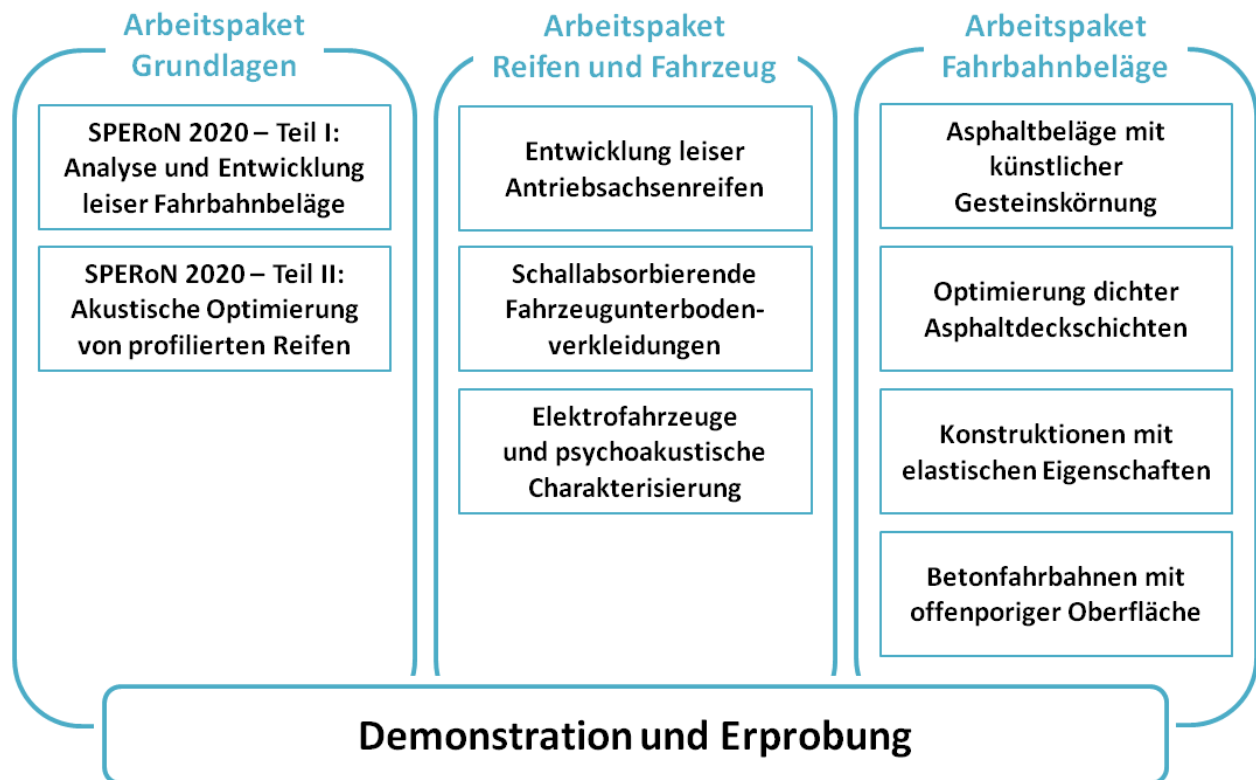
## Literatur

- [1] 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
- [2] Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung in Deutschland. Forschungsverbund Leiser Verkehr, 2013
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Mobilität und Verkehrstechnologien; 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung
- [4] Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr - Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 37 (2005)
- [5] Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 74 (2012)
- [6] World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe: Burden of disease from environmental noise. WHO, Kopenhagen (Dänemark), 2011
- [7] BECKENBAUER, T. et al.: „Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn Geräusch“, Schlussbericht zu FE 03.293/1995/MRB. Planegg, Juni 2001



## 2. Übersicht des Verbundprojektes

Die Forschungsaktivitäten des Verbundprojektes gliederten sich in die Bereiche Grundlagen, Technologie und Demonstration (Bild 2-1). Diese umfassten insgesamt zehn Teilvorhaben, die von den Verbundpartnern interdisziplinär bearbeitet wurden. Die Teilprojekte waren inhaltlich aufeinander abgestimmt und auf vielfältige Weise miteinander verknüpft. Erkenntnisse aus dem Bereich *Grundlagen* bildeten die Basis für eine zielgerichtete Weiterentwicklung von Reifen, Fahrzeugen und Straßenbelägen. In den Arbeitspaketen *Reifen und Fahrzeug* sowie *Fahrbahnbeläge* wurden Kenngrößen ermittelt, die zur Erweiterung der Simulationsmodelle genutzt werden konnten. Nach dem erfolgreichen Abschluss von Laboruntersuchungen wurden die Ergebnisse im Bereich *Demonstration* in der Praxis erprobt. Auf diese Weise konnten innovative, wirksame und unmittelbar umsetzbare Lösungen erarbeitet werden, die dazu beitragen, die Belastung der Bevölkerung durch Straßenverkehrslärm nachhaltig zu senken.



**Bild 2-1:** Struktur des Verbundprojektes *LeiStra3*

### Arbeitspaket Grundlagen

Mit dem Modell SPERoN lassen sich Reifen-Fahrbahn-Geräusche quantitativ berechnen. Im Rahmen des Verbundprojektes *LeiStra3* sollte das Modell umfassend erweitert werden, um auf der Basis theoretischer Analysen sowohl Fahrbahnbeläge als auch Reifen gezielt weiterentwickeln zu können. Auch sollte die Möglichkeit geschaffen werden, das Potenzial vollkommen neuartiger Fahrbahnbeläge und Reifenkonstruktionen zur Geräuschreduzierung ausloten zu können.

Von den Projektpartnern Müller-BBM GmbH, Chalmers Universität Göteborg, Karlsruher Institut für Technologie und Continental Reifen Deutschland GmbH wurde im Teilvorhaben I „SPERoN 2020 – Teil I: Analyse und Entwicklung leiser Fahrbahnbeläge“ der Einfluss von Fahrbahnoberflächeneigenschaften auf das Rollgeräusch eingehend analysiert. Insbesondere sollte die Geräuschenstehung durch aerodynamische Effekte, die beim Rollvorgang durch die zeitlichen Änderungen der Luftströmung bzw. des Luftdurchsatzes an den Hohlräumen im Reifen-Fahrbahn-Kontakt auftreten, im Detail aufgeklärt werden.

Die Geräuschenstehung durch aerodynamische Mechanismen ist bislang im Rechenmodell zwar berücksichtigt, enthält aber lediglich eine empirische Formulierung, die den Parameterraum der zu Grunde liegenden Messdaten abbildet. Auf Basis dieser Forschung sollte keine allgemeingültige physikalische Beschreibung der aerodynamischen Prozesse erfolgen. Die Partner Müller-BBM und Chalmers University waren von Anfang an gemeinsam an der Entwicklung und Weiterentwicklung des Rechenmodells SPERoN beteiligt. Neben den theoretisch physikalischen Arbeiten, die einen Schwerpunkt der Forschung an der

Chalmers Universität Göteborg bilden, war zu jedem Zeitpunkt der Modellentwicklung auch die Erhebung umfangreicher, unter definierten Bedingungen gewonnener, Messdaten des Reifen-Fahrbahn-Geräusches und anderer Parameter notwendig. Dies bildete einen Schwerpunkt der Arbeiten von Müller-BBM. Die Messdaten umfassten zu Beginn des Vorhabens bereits mehrere tausend Vorbeifahrtgeräuschspektren für eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrbahnbeläge, Reifen und Geschwindigkeiten und deren Kombinationen. Sowohl die Fahrbahnbeläge als auch die Reifen wurden darüber hinaus durch schalltechnische, mechanische und geometrische Messungen sehr genau beschrieben. Diese detaillierten Daten dienten größtenteils zur Entwicklung der physikalischen Interpretation der Rollgeräuschenstehung und zur Kalibrierung der berechneten Vorbeifahrtpegel anhand von gemessenen Vorbeifahrtpegeln mit Hilfe des statistischen Modells. Weitere Messdaten, die unabhängig von den für die Modellentwicklung benutzten Daten erhoben wurden, dienten der Validierung von SPERoN.

Zu Beginn von *LeiStra3* bestanden keine klaren Vorstellungen darüber, welche Praxisfälle das Modell richtig und mit hoher Genauigkeit wiedergibt und welche Fälle Schwierigkeiten bereiten. Letztere hingen durchweg damit zusammen, dass von der Entstehung der aerodynamischen Geräusche bislang nur diffuse, wenn nicht sogar falsche Vorstellungen bestanden. So war ein wichtiger Baustein im Bereich *Grundlagen* die Schaffung von Prüfbedingungen, die es zuließ, schalltechnische Experimente zur Entstehung aerodynamischer Geräusche während des Rollvorgangs störungsfrei, definiert und kontrolliert durchführen zu können. Auf Basis dieser Forschung sollte eine allgemeingültige physikalische Beschreibung der aerodynamischen Prozesse erfolgen.

Neben der Fahrbahnoberfläche bestimmen auch die Reifen das Rollgeräusch. Aufbauend auf Erkenntnissen aus den Verbundprojekten *Leiser Straßenverkehr 1 und 2* sowie nationaler und internationaler Forschungsprojekte verfolgten die Technische Universität Hamburg-Harburg, die Chalmers Universität Göteborg, die Leibniz Universität Hannover, die Firma Müller-BBM GmbH und die Firma Continental Reifen Deutschland GmbH im Teilvorhaben II das Ziel, ein leistungsfähiges schnelles Modell zur akustischen Optimierung von Reifen zu entwickeln. Der Kern der Idee war eine Anpassung des SPERoN-Modells zur akustischen Optimierung von profilierten Reifen. Das Reifenmodell basiert auf sogenannten „Waveguide Finite Elements“ und erlaubt eine effiziente Berechnung der Reifenschwingungen in Abhängigkeit von den Fahrbahn- und Reifeneigenschaften. Diese gehen schließlich in das Schallabstrahlungsmodell ein, mit dem der Einfluss konstruktiver Veränderungen des Reifenaufbaus auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch untersucht werden kann. Mit dem angepassten SPERoN-Modell in Kombination mit dem Abstrahlmodell und der Anwendung adäquater numerischer Verfahren zur Verkürzung der Rechenzeit sollte ein wirtschaftliches, praxistaugliches Simulationsprogramm zur akustischen Optimierung von Reifen entwickelt werden.

### Arbeitspaket Reifen und Fahrzeug

Nachdem im *Leisen Straßenverkehr 2* ein akustisch optimierter long-distance Lkw-Reifen für die Antriebsachse entwickelt wurde, stand im Projekt *Leiser Straßenverkehr 3* die Optimierung eines Lkw-Reifens für den Regionalverkehr im Fokus.

Im regionalen Güterverkehr werden an den Achsen der Fahrzeuge dem jeweiligen Einsatzzweck (Lenk-, Antriebs- und Nachlaufachse) angepasste Reifen eingesetzt. Insbesondere an der Antriebsachse sind Profile mit einem hohen Anteil an Querrillen erforderlich, um die nötige Traktion zu gewährleisten. Daher finden bei diesen Fahrzeugen in der Regel Reifen mit Blockprofilen Verwendung. Durch diese Profilart werden die Reifen jedoch auch auf glatten Fahrbahnen zu Schwingungen angeregt, was eine erhöhte Geräuschemission zur Folge hat.

Im Teilvorhaben III hatte die Firma Continental Reifen Deutschland GmbH zusammen mit den Partnern die Aufgabe, neue technologische Ansätze zur Reduzierung der Rollgeräusche von blockprofilierten Antriebsreifen für den Regionalverkehr zu entwickeln. Dabei mussten Varianten ausgewählt werden, die den bestmöglichen Kompromiss aus Akustik und den anderen Qualitätskriterien bilden.

Ein weiterer Aspekt, der beim Straßenverkehrslärm insbesondere beim Reifen-Fahrbahn-Geräusch berücksichtigt werden muss, ist der Einsatz von Elektrofahrzeugen. Diese sind vom Antrieb her deutlich leiser als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Dies hat Vor- und Nachteile. So trägt der leisere Antrieb von Elektrofahrzeugen dazu bei, dass das gesamte Fahrgeräusch bei geringen Geschwindigkeiten, wie sie im innerstädtischen Verkehr vorkommen, leiser wird und somit die Anwohner durch den Straßenverkehrslärm weniger gestört werden. Gleichzeitig kann es jedoch zu Situationen kommen, dass Fußgänger und Fahrradfahrer heranfahrende Fahrzeuge nicht mehr rechtzeitig wahrnehmen und folglich ein erhöhtes Sicherheitsrisiko besteht. Damit entsteht der Zielkonflikt, dass das Elektrofahrzeug einerseits einen gewissen Geräuschpegel erzeugen muss, damit es von anderen Verkehrsteilnehmern akustisch wahrgenommen werden kann, auf der anderen Seite aber die Lärmbelastung durch den Straßenverkehr spürbar reduziert werden soll.

Ziel im Teilvorhaben IV „Elektrofahrzeuge und psychoakustische Charakterisierung“ war es daher zu prüfen, inwieweit mit einer gezielten Geräuschabstrahlung von Reifenprofilen bei Elektrofahrzeugen ein warnendes Signal erzeugt werden kann, ohne für Anwohner als lästig empfunden zu werden. Diese Fragestellung umfasst neben der Entwicklung technischer Methoden auch die Berücksichtigung psychoakustischer Aspekte.

Methoden einer derartigen psychoakustischen Charakterisierung von Fahrzeuggeräuschen sollten in Schweden an der Chalmers Universität Göteborg erarbeitet werden. Insbesondere sollte untersucht werden, inwieweit die mit dem SPERoN-Modell ermittelten Geräuschspektren genutzt werden können, um Rückschlüsse auf die psychoakustische Wahrnehmung der Geräusche ziehen zu können. Im Ergebnis sollten Ansätze zur Auralisierung von Vorbeifahrten auf Basis des SPERoN-Modells entwickelt werden, die Eingang in eine technische Lösung finden.

Mit dem Ziel der CO<sub>2</sub>-Reduzierung von Pkw kamen in den letzten Jahren vermehrt aerodynamisch günstige Unterbodenverkleidungen (UBV) aus faserverstärkten Leichtbau-Sandwichmaterialien zum Einsatz. Diese Unterbodenverkleidungen bieten aufgrund ihrer Materialeigenschaften und konstruktiven Ausbildungen grundsätzlich auch die Möglichkeit, akustisch absorbierend gestaltet werden zu können. Die Firma Röchling Automotive AG Co.SE hatte im Verbundprojekt *Leiser Straßenverkehr 3* die Aufgabe, mit den Projektpartnern eine solche absorbierende Unterbodenverkleidung an Fahrzeugen (Transporter und Klein-Lkw) zu entwickeln, die in ihrer Frequenzcharakteristik auf das Reifen-Fahrbahn-Geräuschspektrum abgestimmt ist.

### Arbeitspaket Fahrbahnbeläge

Die Entwicklung leiserer Fahrbahnoberflächen stellte einen weiteren Schwerpunkt in *LeiStra3* dar. Modellrechnungen belegen, dass die Oberflächengestalt einen starken Einfluss auf die Schwingungsanregung des Reifens und die aerodynamischen Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn hat. Aus akustischer Sicht ist es günstig, wenn alle Profilsitzen auf einer Ebene liegen und sich plateauartige Texturen mit schluchtenförmigen Vertiefungen ausbilden.

Im Verbundprojekt wurden hinsichtlich der Entwicklung lärmoptimierter Fahrbahnbeläge vier Ansätze verfolgt. Teilvorhaben VI.I hatte die Entwicklung eines Asphaltstraßenbelages mit schalltechnisch optimierten Körnungen aus Elektroofenschlacke zum Ziel. Dieses Teilvorhaben wurde von der Firma Max Aicher GmbH & Co.KG und dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München bearbeitet.

Im Teilvorhaben VI.II sollte die lärmtechnische Wirksamkeit und bautechnische Umsetzbarkeit der dichten Asphaltbeläge PMA (Porous Mastic Asphalt) und LOA D<sup>1</sup> (Lärmoptimierte Asphaltdeckschicht) optimiert werden. Beide Deckschichten sind auf Basis einer "dichten" Asphaltzusammensetzung entwickelt worden, so dass deren lärmtechnische Wirkung ausschließlich durch die geometrische Ausbildung der Oberflächenstruktur geprägt wird. Anhand erster Messungen mit dem CPX-Verfahren auf Versuchsabschnitten konnte eine signifikante lärmtechnische Wirksamkeit messtechnisch nachgewiesen werden. Im Projekt *Leiser Straßenverkehr 3* arbeiteten die Ruhr-Universität Bochum mit den Partnern Willy Dohmen GmbH & Co.KG, Ingenieurgesellschaft für Zuschlag- und Baustofftechnologie (ZuB), Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) sowie mit Unterstützung durch den Landesbetrieb Straßenbau NRW an der Optimierung der lärmtechnischen und bautechnischen Wirksamkeit und Nutzungsdauer dieser dichten Asphaltdeckschichtarten. Im Rahmen von Laboruntersuchungen sollten Mischgutkonzeptionen entwickelt werden, die einen Einbau in der Straßenbaupraxis ohne materialtechnische Schwankungen gewährleisten. Anhand spezieller rheologischer Stoffuntersuchungen sollten Optimierungen in den Funktionseigenschaften und den Verarbeitungseigenschaften (Fördern, Einbau, Verdichtung etc.) erzielt werden.

Im Teilvorhaben VI.III wurde untersucht, inwieweit die akustische Wirksamkeit von Asphaltkonstruktionen durch die Nutzung von Materialien mit schwingungsdämpfenden Eigenschaften oder durch die Integration einer elastischen Zwischenschicht verbessert werden kann. Die Verbundpartner BSW Berleburger Schaumstoffwerk GmbH, HNL Ingenieur- und Prüfgesellschaft mbH, Ruhr-Universität Bochum und Müller-BBM GmbH untersuchen in diesem Forschungsprojekt, inwieweit eine derartige Straßenkonstruktion entwickelt werden kann.

Durch die Verbundpartner Heinz Schnorpfeil Bau GmbH, Ruhr-Universität Bochum und mit Unterstützung des Landesbetriebs Straßenbau Nordrhein-Westfalen sollte eine dauerhaft lärmarme Betondeckschicht mit oberflächennahem, zugänglichem Porensystem COPS (concrete with porous surface) im Teilvorhaben

<sup>1</sup> Inzwischen fanden die Ergebnisse Eingang in das FGSV-Arbeitspapier „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten AC D LOA und SMA LA [4]. Die offizielle Bezeichnung der Bauweise lautet daher AC D LOA.

VI.IV entwickelt werden. Die Grundidee des Systems hinsichtlich der akustischen Wirkungsweise ist angelehnt an die im Asphaltstraßenbau bereits erfolgreich konzipierte und angewandte Deckschicht PMA, die durch einen großen Grobkornanteil und eine feinkörnige standfeste Bindemittel-/Mörtelphase gekennzeichnet ist. Durch gezielt eingestellte Fehlkörnungen im feinkörnigen Mineralstoffanteil soll dabei eine offenporige Oberfläche erreicht werden.

Alle optimierten oder neu entwickelten Fahrbahnbeläge wurden im Labor einem umfangreichen Untersuchungsprogramm unterzogen. Neben der Bestimmung typischer Materialkenndaten wurden zur Beschreibung der Baustoffe auch umfangreiche Performanceprüfungen durchgeführt. Anhand dieser Prüfungen sollte eine Abschätzung des Materialverhaltens unter Temperatur- und Belastungseinwirkung erfolgen.

Auf Grundlage der Bewertung von Testfeldern sollten Erprobungsstrecken auf Bundesautobahnen sowie eine Erprobungsstrecke im kommunalen Straßennetz realisiert werden. Die Erprobungsstrecken wurden aus Baumitteln des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur finanziert. Die BAST hatte als Projektpartner die Aufgabe, die Entwicklung der neuen Fahrbahnbeläge fachtechnisch zu begleiten und sie hinsichtlich ihrer lärm- und bautechnischen Eignung zu bewerten.

## Literatur

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
Mobilität und Verkehrstechnologien; 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung
- [2] BECKENBAUER, T. et al.: „Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn Geräusch“, Schlussbericht zu FE 03.293/1995/MRB. Planegg, Juni 2001
- [3] Bericht zur Situation der Lärmwirkungsforschung in Deutschland. Forschungsverbund Leiser Verkehr, 2013
- [4] FGSV-Arbeitspapier „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten AC D LOA und SMA LA“, FGSV-Verlag, 2014
- [5] Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche“. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 37 (2005)
- [6] Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 2“. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft S 74 (2012)
- [7] World Health Organization (WHO) Regional Office for Europe: Burden of disease from environmental noise. WHO, Kopenhagen (Dänemark), 2011

## 3 Arbeitspaket Grundlagen

### 3.1 Einleitung

Das Arbeitspaket *Grundlagen* umfasst zwei Teilvorhaben, die sich mit der Erweiterung des Modells SPERoN im Hinblick auf eine akustische Optimierung von Fahrbahndecken und profilierten Reifen befassen.

SPERoN wurde für die Vorhersage des Rollgeräusches in Abhängigkeit der Eigenschaften des Fahrbahnbelages im Projekt *Leiser Straßenverkehr 1* entwickelt und anschließend in nationalen und internationalen Projekten weiterentwickelt und validiert. Zentraler Ausgangspunkt des Rechenmodells ist die Tatsache, dass nicht die Fahrbahntextur, sondern die im Reifen-Fahrbahn-Kontakt entstehenden zeitabhängigen und von der Fahrbahntextur beeinflussten Kontaktkräfte maßgeblich an der Rollgeräuschenstehung beteiligt sind. Die dynamischen Kontaktkräfte sind verantwortlich dafür, in welchem Maße der Reifen in Schwingung versetzt wird. Das Spektrum der Kontaktkräfte kann direkt mit dem Spektrum der Reifen-Fahrbahn-Geräusche korreliert werden, wogegen zwischen dem Spektrum der Fahrbahntextur und dem Rollgeräuschespektrum kein direkter und insbesondere kein linearer Zusammenhang besteht. Dieser Sachverhalt ist der massiven Nichtlinearität der Kontaktkraftentstehung und Schwingungsanregung des Reifens geschuldet.

Mit dem in SPERoN implementierten Rechenkern steht ein Werkzeug für die schnelle und korrekte Berechnung der nichtlinearen, dynamischen Kontaktkräfte im Zeitbereich zur Verfügung. Dem statistischen Modell liegt eine Vielzahl von Messergebnissen zugrunde, welche eine große Variation bezüglich der Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen und Reifen aufweisen.

Im Rahmen des Verbundprojektes *Leiser Straßenverkehr 3* sollte das Modell umfassend erweitert werden, um auf der Basis theoretischer Analysen sowohl Fahrbahnbeläge als auch Reifen gezielt weiterentwickeln zu können und das Potenzial vollkommen neuartiger Fahrbahnbeläge und Reifenkonstruktionen zur Geräuschreduzierung auszuloten.

Insbesondere sollte die Geräuschenstehung durch aerodynamische Effekte, die beim Rollvorgang durch die zeitlichen Änderungen der Luftströmung bzw. des Luftdurchsatzes an den Hohlräumen im Reifen-Fahrbahn-Kontakt bestimmt sind, im Detail aufgeklärt werden. Die Geräuschenstehung durch aerodynamische Mechanismen ist bislang im Rechenmodell zwar berücksichtigt, enthält aber lediglich eine empirische Formulierung, die den Parameterraum der zu Grunde liegenden Messdaten abbildet. Mit Projektstart gab es noch keine allgemeingültige physikalische Beschreibung der aerodynamischen Prozesse. Um ein tragfähiges Modell zu entwickeln und damit auch Fahrbahnoberflächen untersuchen zu können, die außerhalb des Parameterraumes der für das statistische Modell verwendeten Fahrbahnbeläge liegen, war der Bau spezieller Testflächen und deren messtechnische Untersuchung erforderlich. Damit sollten die Entstehungsmechanismen des Rollgeräusches weitgehend getrennt und unabhängig voneinander angeregt werden, so dass ein physikalisches Verständnis der relevanten Prozesse gewonnen werden konnte.

Darüber hinaus fehlte bislang ebenfalls ein effizientes Rechenmodell für den Rollwiderstand, obwohl wichtige Teilgrößen bereits gut berechnet werden können

Neben den Fahrbahnoberflächen bestimmen auch die Reifen das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Für die zuverlässige und schnelle Optimierung von Reifeneigenschaften am Rechner benötigt man zusätzlich zu einem heute guten qualitativen Verständnis der Entstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches exakte und schnelle Modelle zur quantitativen Vorhersage.

Vor diesem Hintergrund wurde in den Projekten *Leiser Straßenverkehr 1 und 2* das FE-Reifen-Fahrbahn-Modell „TINA“ für die Vorhersage der Geräuschemission von nicht profilierten Pkw- und Lkw-Reifen bis zu einer Frequenz von 1500 Hz entwickelt. Mit Hilfe dieses Modells können relative Aussagen hinsichtlich der akustischen Wirkung verschiedener Reifenkonstruktionen in Kombination mit unterschiedlichen Fahrbahntexturen gemacht werden. Auch können erste Untersuchungen zum Einfluss vereinfachter Reifenprofile gemacht werden und es lassen sich weitere Randbedingungen, wie z.B. die Einhausung des Reifens berücksichtigen.

Das 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. 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.

Das Modell wurde im Oktober 2008 bei der Firma Continental AG implementiert und dort für die lärmtechnische Optimierung von Lkw-Reifen im Projekt *Leiser Straßenverkehr 2* genutzt. Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse auch für die Industrie bereits von großem Nutzen sind, der Zeitaufwand für die Berechnungen jedoch erheblich ist, so dass eine Nutzung des „TINA“-Modells derzeit nicht wirtschaftlich ist und somit das Modell als Standardwerkzeug für die Optimierung von Reifen bisher nur selten eingesetzt wird.

Ein alternativer Ansatz wurde von der Forschungsgruppe an der Chalmers University of Technology entwickelt. Dieses Modell benutzt ein etwas vereinfachtes Reifenmodell, basierend auf sogenannten „Waveguide Finite Elements“, das dennoch eine hohe Modellgüte besitzt. Es erlaubt eine effiziente Berechnung der Reifenschwingungen in Abhängigkeit von der Fahrbahn- und Reifeneigenschaften. Diese gehen schließlich in das Schallabstrahlungsmodell ein, mit dem der Einfluss konstruktiver Veränderungen des Reifenaufbaus auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch untersucht werden kann. Mit dem angepassten SPERoN-Modell in Kombination mit dem Abstrahlmodell und der Anwendung adäquater numerischer Verfahren zur Verkürzung der Rechenzeit soll schließlich ein wirtschaftliches, praxistaugliches Simulationsprogramm zur akustischen Optimierung von Reifen entwickelt werden.

## 3.2 Teilvorhaben SPERoN 2020 – Teil I

### Erweiterung des effizienten Rechenmodells um physikalische Teilmodelle

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer  
Müller-BBM GmbH, Planegg

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kropp, M. Eng. Julia Winroth, Dipl.-Ing. Carsten Hoever  
Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin, Dipl.-Ing. Frank Stalter  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Dr. rer. nat. Christina Bückers, Dipl.-Ing. Bianca Drewes  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

#### Inhalt

<b>3.2.1</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Stand von Wissenschaft und Technik</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Wissenschaftlich-technische Ergebnisse</b> .....	<b>21</b>
3.2.3.1	Stresstest SPERoN 2020 .....	21
3.2.3.2	Einfluss der lateralen Texturauflösung auf die Simulation von Rollgeräuschen und Rollwiderstand von Pkw-Reifen.....	24
3.2.3.3	Eingangsdaten für das statistische Modell in SPERoN.....	29
3.2.3.4	Zusammenfassende Bewertung.....	36
3.2.3.5	Berücksichtigung nicht starrer Fahrbahndeckschichten.....	37
3.2.3.6	Berücksichtigung der Fahrbahnabsorption in SPERoN .....	38
3.2.3.7	Entwicklung eines physikalischen Modells für die strömungsabhängigen Geräusche .....	41
3.2.3.8	Experimentelle Bestimmung des Einflusses von Texturmerkmalen auf die strömungsbedingten Reifen-Fahrbahn-Geräusche .....	47
3.2.3.9	Erklärungsmodell und Modellierungsansatz für die strömungsabhängigen Geräusche durch Öffnen und Schließen von Kavitäten .....	71
3.2.3.10	Erklärungsmodell und Modellierungsansatz für die strömungsabhängigen Geräusche bei Rauigkeitsanregung.....	78
3.2.3.11	Berechnung des Rollwiderstands.....	80
<b>3.2.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>81</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>83</b>

### 3.2.1 Zielsetzung

Das Rechenmodell SPERoN für die Vorhersage des Reifen-Fahrbahn-Geräusches geht hervor aus Arbeiten im sogenannten Sperenberg-Projekt [1] und im Verbundprojekt „Leiser Straßenverkehr 1“ [2] [14]. Es dient der Vorhersage des Rollgeräusches in Abhängigkeit der Eigenschaften des Fahrbahnbelags und wurde in mehreren nationalen und internationalen Nachfolgeprojekten weiterentwickelt und validiert.

Das Modell ist ein sogenanntes Hybridmodell. Der hybride Ansatz entsteht durch Kombination eines analytischen Rechenmodells mit einem statistischen Modell, das Berechnungsergebnisse auf einen großen Datensatz von Messungen projiziert [3] [4]. Dieser Ansatz hat im Falle der Reifen-Fahrbahn-Geräusche mehrere Vorteile:

- Das physikalische Modell (in diesem Fall Modelle zur Berechnung der Kontaktkräfte) kann mit Hilfe der Statistik an eine äußerst komplexe Wirklichkeit so angepasst werden, dass nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ stimmige Schalldruckpegel des Reifen-Fahrbahn-Geräusches vorhergesagt werden können.
- Das physikalische Modell kann Vereinfachungen beinhalten, die durch das statistische Modell ausgeglichen werden können.
- Rechenzeiten sind ausreichend klein, so dass diese für die Anwendung in der schall- und bautechnischen Praxis kein Hindernis darstellen.

Mindestens zwei Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Geräusches müssen durch das Modell abgebildet werden: die mechanisch durch den Rollkontakt des profilierten Reifens mit der rauen Fahrbahnoberfläche induzierten Reifenschwingungen und aerodynamische Prozesse, das heißt Luftströmungsprozesse im Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Da das Modell kein vollständiges Verständnis aller komplexen Zusammenhänge verlangt, können Teile des Modells nicht physikalisch, sondern allenfalls empirisch beschrieben sein. Dies ist bislang der Fall. Das Teilmodell für die Rollgeräuschenentstehung durch das sogenannte air pumping (aerodynamische Rollgeräuschenentstehung) ist bislang nicht physikalisch beschrieben, wogegen die Prognose der mechanisch induzierten Geräusche auf einem physikalischen Teilmodell beruht. Dies stellt einen Nachteil von SPERoN in der bisherigen Version dar, da aufgrund der Empirie im aerodynamischen Teilmodell keine physikalische Vorstellung von den damit zusammenhängenden Prozessen im realen Reifen-Fahrbahn-Kontakt entwickelt werden kann und dadurch auch nicht sicher ist, dass das Teilmodell für Fälle von Reifen-Fahrbahn-Kombinationen, die über die der Empirie zugrunde liegenden Fälle hinausgehen, gültige Ergebnisse liefert.

Der Rollkontakt ist nicht nur für die Entstehung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche verantwortlich. Auch der Rollwiderstand hängt von den durch das Abrollen des Reifens auf der rauen Fahrbahnoberfläche hervorgerufenen schwingungsdynamischen Prozessen im Reifen ab. Da für den hochfrequenten Rollkontakt bereits ein physikalisches Teilmodell existiert, ist gut vorstellbar, SPERoN auf die Vorhersage auch des Rollwiderstands zu erweitern.

Ziele der Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben waren daher

- Analyse der Empfindlichkeit des Modells auf seine Eingangsparameter,
- Entwicklung eines verbesserten physikalischen Verständnisses und damit auch eine Verbesserung der Modellierung des sogenannten air pumping,
- Berücksichtigung elastischer und schallabsorbierender Fahrbahndeckschichten,
- Entwicklung eines Rechenmodells für den Rollwiderstand als Funktion der Eigenschaften des Reifens und der Fahrbahnoberflächentextur.

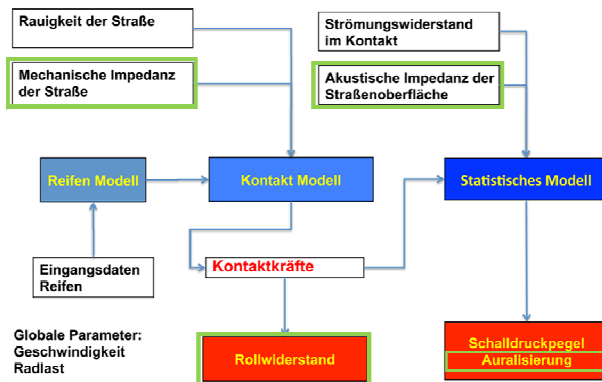
Die Berechnungen im Zusammenhang mit den mechanisch induzierten Prozessen finden bereits in der Ursprungversion von SPERoN im Zeitbereich statt. Auch für das aerodynamische Teilmodell wurde angestrebt, eine Modellvorstellung im Zeitbereich zu entwickeln. Das eröffnet die Möglichkeit, die Geräusche simulierter Vorbeifahrten auch hörbar zu machen. Die Umsetzung wurde innerhalb des Forschungsverbundes jedoch in Teilprojekt IV erarbeitet.



### 3.2.2 Stand von Wissenschaft und Technik

#### Ausgangspunkt

In der bisherigen Version von SPERoN werden berechnete Kontaktkräfte mit einem Datensatz von gemessenen Vorbeifahrten verknüpft. Dabei sind die Modelle der Verknüpfung wiederum basierend auf physikalischen Annahmen, die zu Regressionsgleichungen führen, die die Anpassung unbekannter Koeffizienten und Exponenten der unabhängigen Größen des statistischen Modells an den gemessenen Datensatz anpassen. Das in Bild 3.2-1 schematisch dargestellte Modell kann in drei Teilmodelle eingeteilt werden: ein Reifenmodell, ein Kontaktmodell und ein Statistisches Modell. Die im Bild grün umrandeten Komponenten umreißen den Gegenstand der Forschung im vorliegenden Vorhaben.



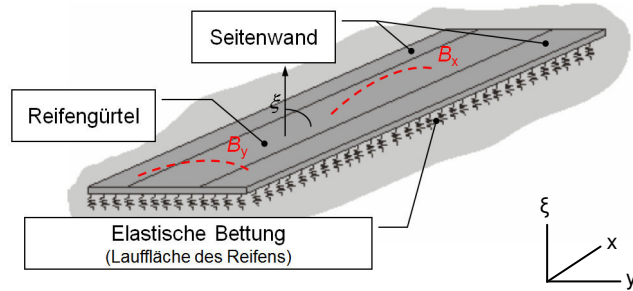
**Bild 3.2-1:** Schema des Rechenmodells SPERoN. Die grünen Umrandungen kennzeichnen die in LeiStra 3 entwickelten neuen Teilmodelle

#### Reifenmodell

Dem mechanischen Teilmodell in SPERoN liegt das Konzept der orthotropen, elastisch gebetteten und vorgespannten Platte zugrunde [6] (Bild 3.2-2). Die Bettung entsteht durch die elastische Gummischicht der (profilierten) Lauffläche, die den Gürtel umgibt und mit der Fahrbahn direkt in Berührung kommt. Die Vorspannung ergibt sich durch den Innendruck des mit Luft gefüllten Reifens. Das Modell der orthotropen, gebetteten und vorgespannten Platte führt zu folgender Bewegungsgleichung (Gleichung 1), die durch Überlegungen zum physikalischen Gleichgewicht der auf den Reifen wirkenden Kräfte zustande kommt:

	Vorspannung	dynamische Biegekräfte	Gewichtskraft	Einfederung
Gleichung 1	$T_0 \left( \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right)$	$+ B_x \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^4} + B_{xy} \frac{\partial^4 \xi}{\partial x^2 \partial y^2} + B_y \frac{\partial^4 \xi}{\partial y^4}$	$+ m'' \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$	$+ K \xi = F_0''$
				anliegende Kraft

mit	$\xi$	Auslenkung von Lauffläche und Gürtel in radialer Richtung in m
	$T_0$	Vorspannung durch den Reifeninnendruck in N/m <sup>2</sup>
	$B_x$	Biegesteifigkeit in x-Richtung in Nm <sup>2</sup>
	$B_y$	Biegesteifigkeit in y-Richtung in Nm <sup>2</sup>
	$B_{xy}$	Mischsteife mit $B_{xy} = \sqrt{B_x B_y}$ in Nm <sup>2</sup>
	$m''$	flächenbezogene Masse in kg/m <sup>2</sup>
	$K$	Bettungsziffer in N/m



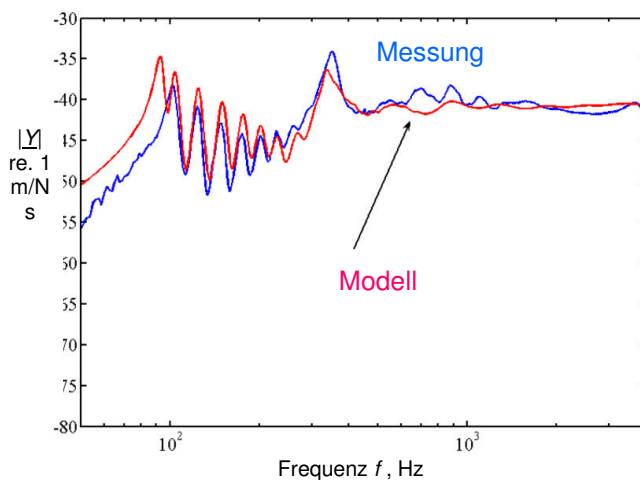
**Bild 3.2-2:** Modell der orthotropen Platte auf elastischer Bettung

Dieses Modell wird sowohl dazu benutzt, die Materialdaten aus den gemessenen Schwingantworten des Reifens abzuleiten (Analyse) als auch die Schwingantworten des Reifens zu berechnen, sobald die Materialdaten bekannt sind (Synthese). Der Modellabgleich wird auf einer modalen Basis durchgeführt, das heißt verschiedene Moden können verschiedene Materialparameter haben. Dies dient zur Kompensation der vernachlässigten Krümmung im Modell.

Das Modell erfordert folgende Daten, die messtechnisch erhoben werden müssen:

- Reifengeometrie (Umfang, Breite und Dicke des Laufstreifens)
- Flächenbezogene Masse  $m''$  der Reifenstruktur
- Radiale Bettungszahl  $K$  in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck und der Steifigkeit der Seitenwand
- Spannung  $T$  in Umfangs- und Querrichtung in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck
- Biegesteifigkeit  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_{xy}$  in Umfangs- und Querrichtung und als Mischsteife
- Dämpfung  $\eta$  für die verschiedenen Steifigkeitsterme

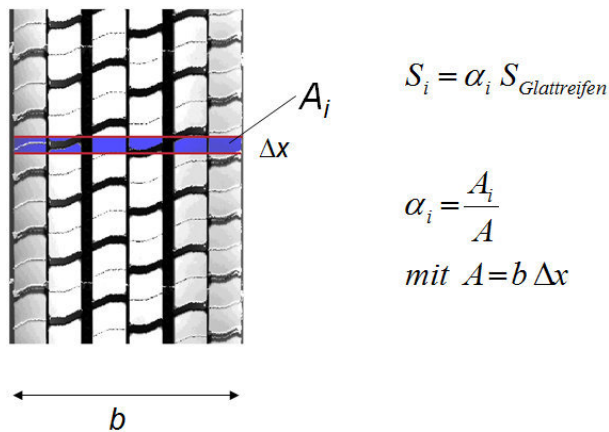
Das Modell führt trotz seiner Einfachheit zu guten Übereinstimmungen mit Messungen der Schwingantwort des Reifens. Bild 3.2-3 zeigt die gemessene und die anhand von Materialparametern berechnete Eingangsdmittanz  $|Y|$  eines konkreten Reifens. Die Abweichung bei der ersten Resonanz ist durch die Tatsache bedingt, dass der Reifen bei den Messungen frei aufgehängt ist, während die Felge sich bei der Rechnung nicht bewegen kann.



**Bild 3.2-3:** Reifen als orthotrope Platte. Vergleich zwischen berechneter und gemessener Schwingantwort eines Reifens, ausgedrückt als Betrag der Eingangsdmittanz  $|Y|$ . Die Anregung erfolgte bei der Messung in der Mitte des Laufstreifens in radialer Richtung

### Kontaktmodell

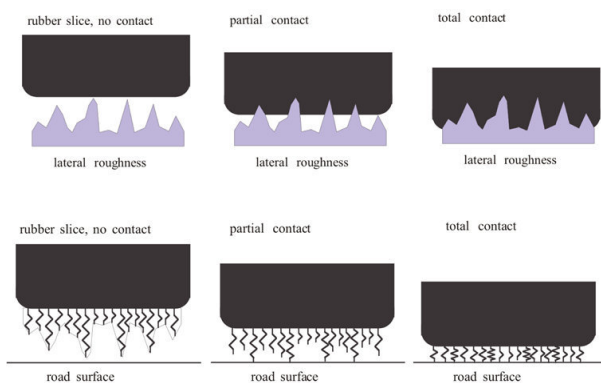
Die Berechnung der Kontaktkräfte wird mit einer vereinfachten Version des „Chalmers tyre/road Interaction“ Modells durchgeführt. Dabei muss das dreidimensionale Kontaktproblem zu einem zweidimensionalen Problem reduziert werden ohne wichtige Informationen, das heißt die dreidimensionale Textur der Straßenoberfläche und die Geometrie des Reifenprofils, zu verlieren. Die Reduzierung ist notwendig, um die Rechenzeiten in einem erträglichen Rahmen zu halten.



**Bild 3.2-4:** Berechnung der örtlich veränderlichen Kontaktsteife auf Grund des Reifenprofils. Kontaktfläche  $A_i$  pro Umfangsabschnitt mit der Gesamtfläche  $A$  nach (7)

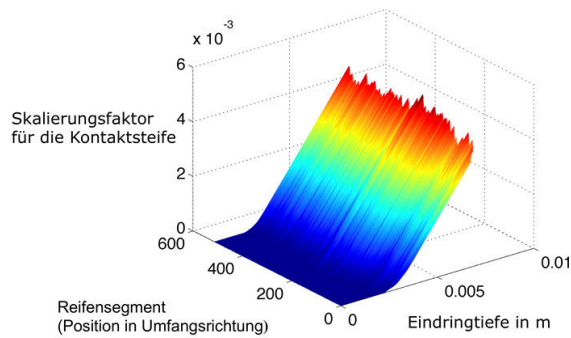
Für das Kontaktmodell werden sowohl Reifenprofil als auch Oberflächentextur der Fahrbahn zu Kontaktsteifen umgewandelt. Der Reifenumfang wird dabei in eine Anzahl von Querschnittsegmente eingeteilt. Die Länge  $\Delta x$  jedes Segments hängt von der notwendigen örtlichen Auflösung in Umfangsrichtung  $x$  ab. Typischerweise betragen diese Längen 2 mm bis 3 mm. Für jedes Segment  $i$  wird die Oberfläche  $A_i$  ermittelt, die theoretisch maximal mit der Fahrbahn in Kontakt kommen könnte, in Bild 3.2-4 blau gekennzeichnet. Die Steife  $S$  wird dann aus der Steife des Glattreifens  $S_{\text{Glattreifen}}$  so berechnet, dass diese mit dem Flächenverhältnis  $\alpha_i = A_i/A$  multipliziert wird (siehe Bild 3.2-4).

Für die Umwandlung der Rauigkeit in eine Steife wird ein ähnlicher Ansatz benutzt. In Bild 3.2-5 ist das Eindringen eines Querschnittsegments des Reifens in eine raue Oberfläche schematisch dargestellt. Man kann sich diesen Vorgang als das Zusammendrücken kleiner, voneinander unabhängiger, also nicht gekoppelter Federn vorstellen. Je größer die Eindringtiefe ist, desto mehr Federn kommen in Kontakt. Folglich ist die Steife eine nichtlineare Funktion, die mit der Eindringtiefe ansteigt.



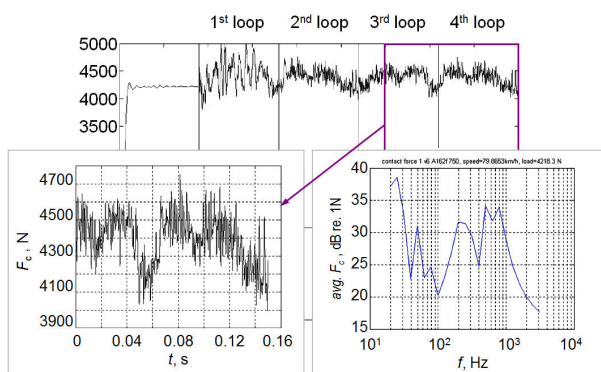
**Bild 3.2-5:** Schematische Darstellung des Eindringens eines Reifensegments in eine raue Oberfläche

Die daraus resultierenden Steifigkeitsfunktionen (Bild 3.2-6) sind ortsabhängig, da sie von der Amplitude und Querverteilung der Rauigkeit abhängen. Mit diesen Eingangsdaten kann ein Kontaktalgorithmus formuliert werden, der die Kontaktkräfte während des Rollens berechnet. Dabei gehen neben Reifenprofil und Fahrbahnoberflächenrauigkeit auch die Reifendynamik, also die Schwingungen während des Rollens ein. Die Reifenschwingungen wirken zurück auf den Kontakt und beeinflussen ihrerseits die Kontaktkraftverteilung, die zu den Schwingungen führt. Kern der Berechnungen ist ein nichtlinearer Algorithmus, der die notwendigen Kontaktkräfte als Funktion der Verschiebungen berechnet, die notwendig sind, um die Oberfläche der Lauffläche aber auch den Reifen während des Rollens zu verformen. Da die Verschiebungen wiederum eine Funktion der Kontaktkräfte sind, erhält man ein nichtlineares Gleichungssystem, das iterativ gelöst wird.



**Bild 3.2-6:** Beispiel eines Satzes von ortsabhängigen Funktionen der Kontaktsteifen

Die so erhaltenen Zeitverläufe der Kontaktkräfte (Bild 3.2-7) stellen eine Schwankung der Kontaktkraft um die statische Kraft dar. Letztere hängt mit der Radlast am Fahrzeug zusammen. Die Schwankungen können leicht bis zu  $\pm 10\%$  der statischen Kraft betragen. Dies ist eine Konsequenz der dynamischen Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn. Die Zeitverläufe der Kontaktkräfte werden in Form von Terzspektren ausgewertet (Bild 3.2-7 unten rechts). Der Zeitpunkt der Auswertung ist so gewählt, dass die Störungen durch den Beginn der Berechnungen abgeklungen sind. Die Terzspektren stellen die Eingangsdaten für das statistische Modell dar.



**Bild 3.2-7:** Beispiel einer zeitlich variierenden Kontaktkraft  $F_c$  während des Rollvorgangs. Oben: Zeitsignal im Verlauf von 4 Radumdrehungen nach Beginn des Rollvorgangs; unten links: Zeitausschnitt des Kontaktkraftsignals aus dritter und vierter Radumdrehung; unten rechts: Terzspektrum des Kontaktkraftsignals

### Statistisches Modell und Ergebnisse

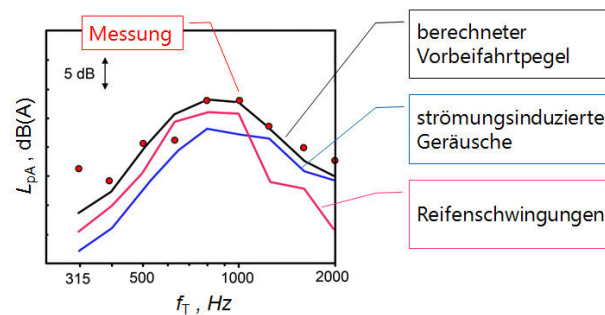
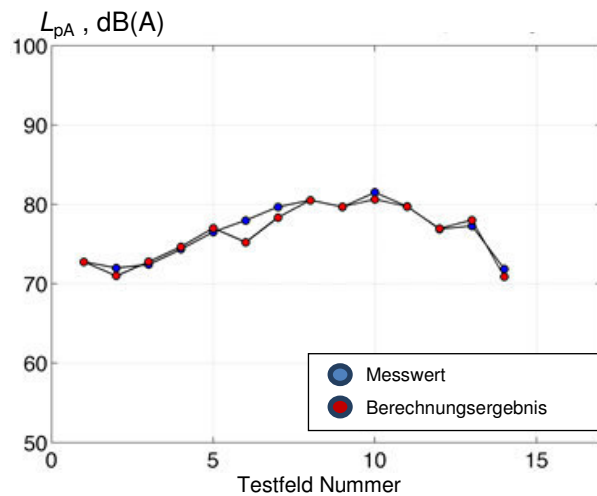
Dem statistischen Modell liegen Messungen aus dem Sperenberg-Projekt [1] zugrunde. Dies sind kontrollierte Vorbeifahrtmessungen auf einer Vielzahl von Fahrbahnbelägen. Die Messergebnisse wurden mit Hilfe angenommener „physikalischer“ Zusammenhänge miteinander verknüpft. Dabei werden vier verschiedene Mechanismen berücksichtigt:

- Schallabstrahlung auf Grund von Reifenschwingungen
- Schallabstrahlung durch strömungsabhängige Vorgänge
- Abstrahlung von Kavitätsmoden im Innentorus des Reifens
- Aerodynamische Vorgänge um das Fahrzeug, die zur Schallabstrahlung führen.

Für diese vier Beiträge wurde ein Zusammenhang aufgestellt, der folgende Parameter als Eingangsdaten enthalten kann:

- Strömungswiderstand im Reifen-Fahrbahn Kontakt (gemessen)
- Lokale Steife der Lauffläche
- Profil der Lauffläche
- Reifenbreite
- Last
- Rollgeschwindigkeit
- Kontaktkraftspektrum

Die notwendigen Koeffizienten und Exponenten der beschreibenden Regressionsgleichungen wurden pro Terz mit Hilfe der Messdaten aus dem Sperenberg-Projekt angepasst.



**Bild 3.2-8:** Vergleich zwischen Messungen und Berechnungen mit SPERoN. Oben: Messungen des A-bewerteten Gesamtschall-druckpegels  $L_{pA}$  von kontrollierten Vorbeifahrten auf 14 verschiedenen Fahrbahnbelägen mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h verglichen mit den SPERoN-Berechnungen; unten: Gemessenes A-bewertetes Terzspektrum für eine kontrollierte Vorbeifahrt auf einem rauen Fahrbahnbelag mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h verglichen mit dem SPERoN-Rechenergebnis für den Gesamtpegel und die Pegelanteile der strömungsinduzierten und mechanisch angeregten Geräusche,  $f_T$ : Terzmittelfrequenz

Bild 3.2-8 oben zeigt Ergebnisse für den A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel  $L_{pA}$  aus Messungen in Sperenberg für 14 verschiedene Oberflächen. Die Abweichungen sind sehr klein außer für die Oberfläche 6. Dies kann an einem fehlerhaften Wert für den Strömungswiderstand liegen, da sich diese Abweichung für alle Reifen und Geschwindigkeiten der Messungen auf dieser Oberfläche ergeben hat. Bild 3.2-8 unten zeigt den Vergleich zwischen Messung und Rechnung für einen relativ rauen Fahrbahnbelag in Norwegen und eine Geschwindigkeit von 50 km/h. In der Abbildung ist deutlich die frequenzabhängige Bedeutung beider Hauptmechanismen Reifenschwingungen und strömungsinduzierte Geräusche zu erkennen. Dabei wird auch hier die gute Übereinstimmung in weiten Teilen des Spektrums deutlich. Dennoch zeigen sich in diesem Fall wie auch in anderen Fällen, dass für manche Fälle größere Abweichungen in bestimmten Frequenzbändern auftreten können. Deshalb war es ein Ziel in dem vorliegenden Projekt, die Empfindlichkeit von SPERoN auf Abweichungen in den Eingangsdaten zu untersuchen.

### 3.2.3 Wissenschaftlich technische Ergebnisse

#### 3.2.3.1 Stresstest SPERoN 2020

##### Arbeitsansatz

Das statistische Modell basiert auf einer Vielzahl von Messergebnissen, die eine große Variation hinsichtlich der Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen und der Reifen aufweisen. Die Interaktion von Reifen und Fahrbahnoberfläche ist durch folgende Parameter charakterisiert:

- Textur der Oberfläche (gemessen in mindestens sechs parallelen Spuren)
- Strömungswiderstand im Reifen-Fahrbahn Kontakt (gemessen)

- Schwingungseigenschaften des Reifens (für jeden Reifen ein anhand von Schwingungsantworten des Reifens angepasstes Reifenmodell)
- Lokale Steife der Lauffläche
- Profil der Lauffläche
- Reifenbreite
- Radlast
- Rollgeschwindigkeit

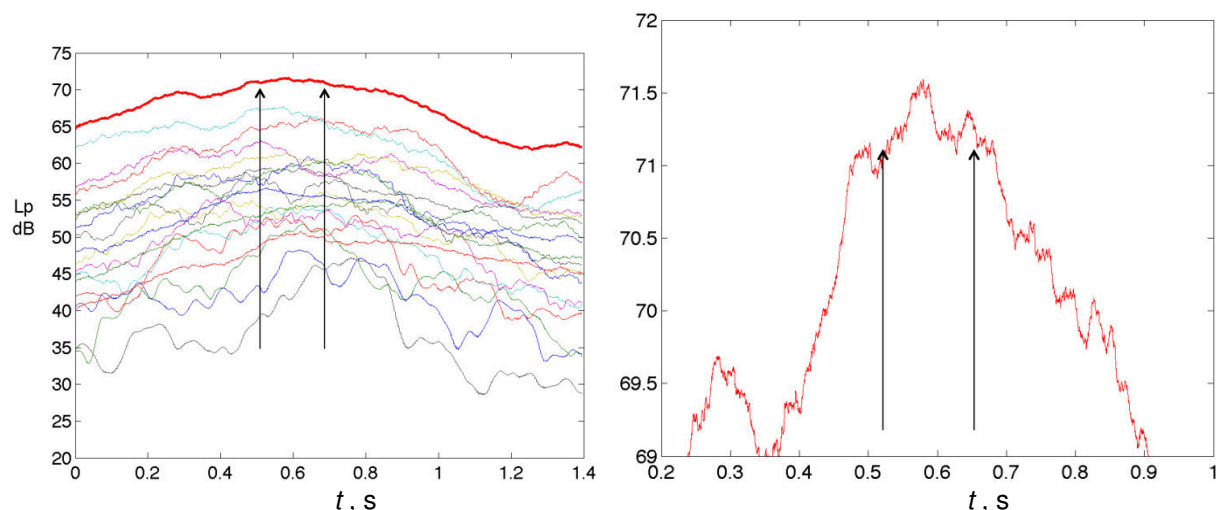
Abgesehen vom Strömungswiderstand gehen alle Größen in das Modell zur Berechnung der Kontaktkräfte ein. Das Teilmodell liefert die mittlere Kontaktkraft im Reifen-Fahrbahn-Kontakt, deren Quadrat proportional mit dem Schalldruck der mechanisch induzierten Rollgeräusche verknüpft wird. Die Proportionalitätskonstante ergibt sich durch den Regressionskoeffizienten für diese Modellkomponente aus dem nachgeschalteten statistischen Modell. Strömungswiderstand, lokale Steife, Reifenbreite, Radlast und Rollgeschwindigkeit gehen in das empirische Teilmodell für die aerodynamisch induzierten Rollgeräusche ein.

Die Anwendung von SPERoN liegt in der Vorhersage von Vorbeifahrtpegeln für beliebige reale Fahrbahnoberflächen, die auch nicht der Entwicklung der Teilmodelle von SPERoN zu Grunde lagen, das heißt nicht auch Basis des statistischen Modells sind. Auch künstliche geräuschkindernde Oberflächen, wie z.B. die sogenannte ITARI Oberfläche, wurden in verschiedenen Projekten entwickelt und deren Reifen-Fahrbahn-Geräusche mit SPERoN prognostiziert. Diese Oberflächen unterscheiden sich deutlich in ihren Eigenschaften von den Oberflächen, die SPERoN zu Grunde liegen. Trotzdem lieferte SPERoN sehr gute Vorhersagen für diese Oberflächen. Dies mag hauptsächlich darauf beruhen, dass der Ansatz des statistischen Modells nicht ein „Black Box“ Ansatz ist, sondern zumindest für die Reifenschwingungen auf einem physikalischen Ansatz beruht. Für die strömungsabhängigen Mechanismen stellt sich dies etwas anders dar. Auch wenn eine vernünftige physikalische Interpretation des empirischen Ansatzes angestrebt wurde, kann man nicht von einem physikalischen schlüssigen Modellansatz ausgehen.

Für eine weitere Entwicklung von SPERoN, aber auch für die Anwendung von SPERoN für die Entwicklung unkonventioneller Oberflächen ist es daher von großer Wichtigkeit, den Einfluss der verschiedenen Eingangsparameter in einem großen Wertebereich, d.h. auch außerhalb des Bereiches, der durch die Reifen und Fahrbahnoberflächen des Spenenberg-Projektes abgedeckt war, auszuweiten. Dazu ist es erforderlich, sowohl den Einfluss der verschiedenen Fahrbahnoberflächenparameter als auch die zu erwartende Vorhersagegenauigkeit besser zu kennen. Dies wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

### Genauigkeitsbetrachtungen zu den Messungen, die SPERoN 2020 zu Grunde liegen

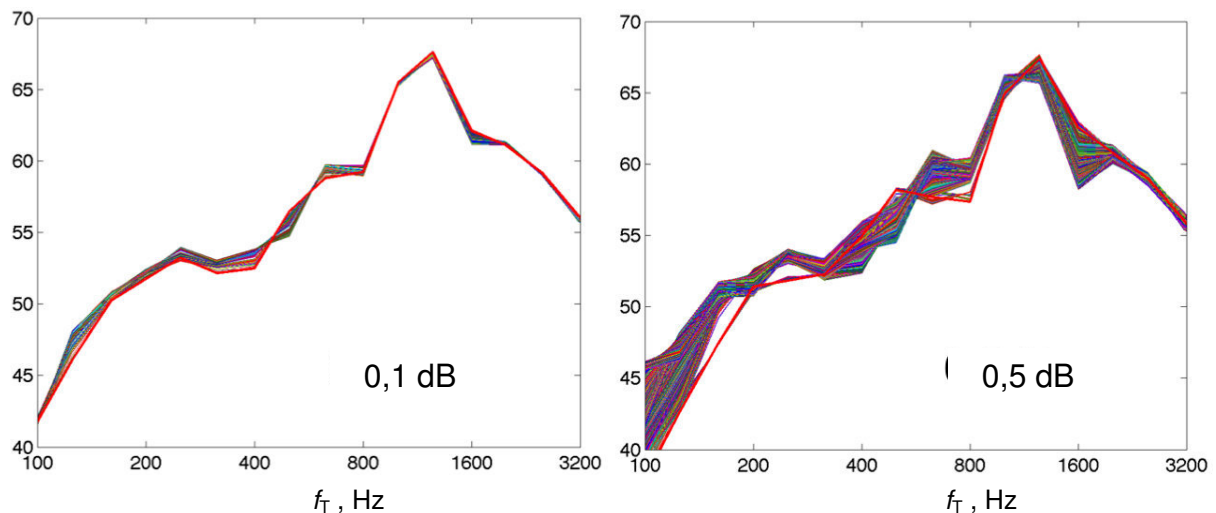
Das statistische Modell von SPERoN beruht auf einem großen Datensatz von kontrollierten Vorbeifahrtmessungen. Dabei wurde großer Wert darauf gelegt, einen möglichst weiten Bereich von Eigenschaften der Fahrbahnoberflächen abzudecken, um eine sichere Vorhersage zu gewährleisten. Im Modellansatz wurden am Ende aber nur 14 der 32 gebauten Oberflächen aus dem Spenenberg-Projekt [1] benutzt. Aus dem Reifensatz im Spenenberg-Projekt wurden insgesamt sechs verschiedene Reifen von zwei verschiedenen Fahrzeugen bei den Messungen berücksichtigt. Daraus ergaben sich aber immer noch mehr als 1.000 Messungen, die in das statistische Modell eingeflossen sind.



**Bild 3.2-9:** Schalldruckpegel  $L_p$  einer Vorbeifahrt als Funktion der Zeit  $t$ . Links: Gesamtpegel (dicke rote Linie) und alle Terzbänder. Rechts: Gesamtpegel in einem Zeitabschnitt um den Zeitaugenblick des maximalen Vorbeifahrtpegels

SPERoN berechnet das Terzspektrum des maximalen Vorbeifahrtpegels. Dementsprechend wurde auch aus den Messungen der Vorbeifahrtgeräusche das Terzspektrum des Schalldruckpegels zum Zeitpunkt des maximalen A-bewerteten Gesamtpegels ausgewertet. Die so ermittelten Schalldruckpegel in den verschiedenen Terzbändern zeigen eine äußerst hohe Reproduzierbarkeit. Dennoch kann dieses Auswerteverfahren zu gewissen Fehlern in den einzelnen Terzbändern führen, weil dem Terzspektrum nur ein einziger Zeitaugenblick des Vorbeifahrtverlaufes zugrundliegt, wodurch die relative Position des Fahrzeugs zum Mikrofon, etwaige Störungen, wie ein Windstoß, oder Störgeräusche zu diesem Zeitaugenblick bereits zu Pegelabweichungen führen können, die in der Vorhersagegenauigkeit des Rechenmodells liegen. Die relative Position des Fahrzeugs zum Mikrofon spielt dabei eine zentrale Rolle, da die von den Reifen und aus der Reifen-Fahrbahn-Kontaktzone abgestrahlten Geräusche einer erheblichen frequenzabhängigen Richtwirkung unterliegen, die pro Terzband in der geometrischen Beziehung zwischen Fahrzeugposition und Mikrofonposition zu einer erheblichen Richtungsempfindlichkeit der an der Mikrofonposition gemessenen Geräusche führt. In Bild 3.2-9 ist der Schalldruckpegel für eine typische Vorbeifahrt sowohl für den Gesamtpegel (dicke rote Linie im linken Bild) als auch für die Terzpegel über der Zeit aufgetragen.

Es handelt sich dabei um eine Vorbeifahrt mit 80 km/h auf einer ISO-Oberfläche. In der Abbildung ist für den Gesamtpegel ein relativ breites Maximum sichtbar. Der Bereich ist durch zwei Pfeile markiert. Dieser Bereich ist auf der rechten Seite des Bildes auch nochmals in vergrößertem Maßstab dargestellt. Die Variation des Gesamtpegels ist in diesem Bereich kleiner als 0,5 dB. In diesem Bereich variieren jedoch einzelne Terzen – vor allem solche mit relativ niedrigen Pegeln – deutlich in einem Bereich von bis zu 7 dB bis 8 dB.



**Bild 3.2-10:** Spektrale Empfindlichkeit der Vorbeifahrtmessung. Links: Streuung der Terzspektren des Gesamtpegels für Abweichungen des Gesamtpegels um maximal 0,1 dB vom maximalen Gesamtpegel der Vorbeifahrtmessung. Rechts: Streuung der Terzspektren des Gesamtpegels für Abweichungen um maximal 0,5 dB vom maximalen Gesamtpegel.  $f_T$ : Terzmittenfrequenz

Die Frage ist nun, wie sich die Messergebnisse ändern, wenn durch kleine Variationen, beispielsweise durch Einsatz eines anderen Fahrzeugs, Variationen der Abstrahleigenschaften des Reifens oder durch die Richtcharakteristik der Reifen-Fahrzeug-Kombination, eine Verschiebung des Zeitpunktes stattfindet, bei dem das Maximum des Gesamtpegels festgestellt wird. Hierzu wurden die Terzspektren für verschiedene Abweichungen des Gesamtpegels vom maximalen Gesamtpegel ausgewertet. Bild 3.2-10 links zeigt die Ergebnisse für ein Fenster von 0,1 dB. Dies bedeutet, dass alle Spektren dargestellt sind, deren Gesamtpegel größer als der maximale Gesamtpegel minus 0,1 dB sind. Die Abweichungen einzelner Terzpegel vom Terzspektrum für den maximalen Gesamtpegel (dicke rote Linie) liegen in der Größenordnung von maximal 1 dB bis 2 dB. Bild 3.2-10 rechts zeigt die Streuungen der Ergebnisse für den Fall, dass alle Spektren berücksichtigt werden, deren Gesamtpegel maximal 0,5 dB unter dem maximalen Gesamtpegel liegen. Hier treten nun größere Abweichungen auf, die in manchen Terzbändern bis zu 6 dB betragen können. Auch ändern sich die spektralen Eigenschaften deutlich. Man kann aber auch feststellen, dass die Terzbänder, die den Gesamtpegel bestimmen, am wenigsten variieren.

## Schlussfolgerung

Wenn Ergebnisse von Feldmessungen, z.B. statistische Vorbeifahrtmessungen, mit Ergebnissen von SPERoN 2020 verglichen werden, können unter Umständen Unterschiede in den Spektren entstehen, die auf kleinen Abweichungen in der Erfassung des Maximalpegels und der damit verbundenen Spektralanalyse beruhen. Dabei spielen dann auch Ungenauigkeiten bei der Mikrofonpositionierung für die Vorbeifahrtmessung eine Rolle. Die Empfindlichkeit der Messungen gegenüber derartigen kleinen Abweichungen könnte durch eine erweiterte Auswertung beurteilt werden. Diese erweiterte Auswertung müsste nicht nur das Spektrum des maximalen Gesamtpegels, sondern auch die Spektren in einem kleinen Fenster von 0,25 dB bis 0,5 dB um den Maximalpegel erfassen. Auf diese Weise wäre es möglich, eine Abschätzung des möglichen Fehlers durchzuführen.

### 3.2.3.2 Einfluss der lateralen Texturauflösung auf die Simulation von Rollgeräusch und Rollwiderstand von Pkw-Reifen

#### Ausgangspunkt

Die detaillierte Beschreibung der Interaktion zwischen Fahrbahn und Reifen ist essenziell für die präzise Berechnung von Rollwiderstand und Rollgeräusch. Dazu werden neben einem guten Kontaktmodell auch Eingangsdaten von hinreichend hoher Güte benötigt. Entsprechend groß ist der Aufwand zur Messung der Fahrbahntexturen: In Fahrtrichtung müssen Fahrbahnabschnitte von mehreren Metern Länge an aufeinanderfolgenden Messpunkten in einem Längsabstand von weniger als einem Millimeter vermessen werden. Obwohl in lateraler Richtung eine geringere Auflösung akzeptiert werden kann [8], werden für optimale Bedingungen weiterhin zwischen zehn und zwanzig parallele Spuren benötigt. In SPERoN wurde die Anzahl auf sechs Spuren begrenzt. Aber auch dies wurde in der Praxis oft in Frage gestellt. Begrenzte messtechnische Ressourcen und zeitliche Einschränkungen während der Messung motivieren dazu, Oberflächenscans von Fahrbahnen auf einige wenige laterale Spuren, im Extremfall auf eine einzige zu beschränken. Techniken zur Rekonstruktion von Oberflächentexturen aus wenigen einzelnen Texturprofilen bestehen [9], konnten bis dato aber ihre Tauglichkeit als adäquater Ersatz für hochaufgelöste Messdaten nicht in allen Fällen beweisen. Um die notwendige laterale Auflösung von Oberflächenscans zu bestimmen, wurde im vorliegenden Projekt deswegen untersucht, inwieweit die Berechnung des Rollgeräusches und des Rollwiderstandes von der Anzahl der Längsprofile beeinflusst wird. Dabei entsteht auch die Frage, ob die sechs Profile, die in SPERoN benutzt werden, ausreichend sind, oder die Anzahl der parallelen Profile sogar reduziert werden kann. Weiterhin stellt sich die Frage, ob man fehlende Spuren durch Extrapolation oder Wiederholung von Daten rekonstruieren kann.

#### Methodik

Das den hier beschriebenen Untersuchungen zugrundeliegende Simulationsverfahren für die Bestimmung von Rollgeräuschen und des Rollwiderstandes wurde im Teilprojekt II entwickelt [10]. Berechnungen wurden für zwei unterschiedliche Reifen durchgeführt: Einem 205/55 R16 Slick (Reifen 1) und einem Reifen der Dimension 175/65 R14 mit drei Rillen in Umfangsrichtung (Reifen 2). Die untersuchten Fahrbahnoberflächen waren:

- A - ISO-10844-Replik (Rollenprüfstand),
- B - generische raue Oberfläche (Rollenprüfstand),
- C - ISO-10844-Oberfläche,
- D - Splittmastixasphalt (SMA) 0/8 und
- E - eine mit Korngrößenverteilung 5/8 abgestreute Oberfläche.

Für Oberflächen A und B (C, D und E) standen 15 (20) laterale Scans mit einer Länge von jeweils neun Reifenumdrehungen (2,95 m) zur Verfügung. Die Auflösung in Fahrtrichtung beträgt 0,2 mm für alle Oberflächen. Für die Kontaktsimulationen wurden alle Oberflächen resampled, um mit der Auflösung des Reifenmodells von 512 Schritten in Umfangsrichtung (Schrittweite ca. 4 mm) übereinzustimmen. In lateraler Richtung ist die Anzahl der genutzten Spuren von der Anzahl der Kontaktspurten in dem zugrundeliegenden Wave Guide Finite Element Modell abhängig und beträgt entweder zehn (20/55) oder zwölf (175/65) Spuren.

Um den Einfluss der Anzahl der zur Verfügung stehenden lateralen Texturprofile auf die Simulation von Rollgeräusch und Rollwiderstand zu untersuchen, wurden für eine bestimmte Anzahl von Kontaktspurten keine originären Texturdaten verwendet, sondern eine oder mehrere bereits genutzte Texturprofile wiederholt. Eine Übersicht über die untersuchten Konfigurationen ist in Tabelle 3.2-1 wiedergegeben. Bild 3.2-11



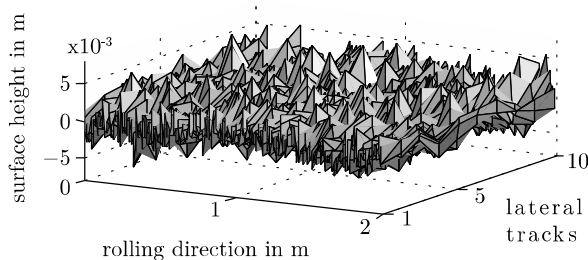
zeigt am Beispiel von Oberfläche E die Darstellung der Fahrbahnoberflächentextur anhand des vollständigen Datensatzes (a) und anhand der Profilanordnung III.b gemäß Tab. 3.2-1.

Konfiguration	Anordnung lateraler Texturprofile	
	Reifen 1 175/65 R14	Reifen 2 - 205/55 R16
Referenz	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
I.a	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
I.b	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
II.a	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2 1 2	1 2 1 2 1 2 1 2 1 2
II.b	5 6 5 6 5 6 5 6 5 6 5 6	5 6 5 6 5 6 5 6 5 6
III.a	1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3	1 2 3 1 2 3 1 2 3 1
III.b	5 6 7 5 6 7 5 6 7 5 6 7	4 5 6 4 5 6 4 5 6 4
IV.a	1 2 3 4 1 2 3 4 1 2 3 4	-
IV.b	5 6 7 8 5 6 7 8 5 6 7 8	-
V	1 2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 6	1 2 3 4 5 1 2 3 4 5
VI.a	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
VI.b	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6	5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5
VII.a	a b c d e f a b c d e f	a b c d e a b c d e
VII.b	a b c d e f f e d c b a	a b c d e e d c b a

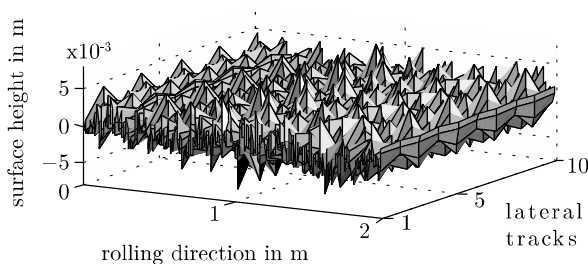
**Tab. 3.2-1:** In den Simulationen genutzte Anordnungen von lateralen Texturprofilen. Arabische Ziffern bezeichnen die Position eines lateralen Profils in der Referenzkonfiguration mit vollständig originären lateralen Profilen. \* bezeichnet ein in Fahrtrichtung invertiertes Profil. Buchstaben bezeichnen laterale Profile, welche aus späteren Segmenten von Scans länger als eine Reifenumdrehung erzeugt wurden

Ergebnisse werden als Differenz zu den Ergebnissen der Referenzsimulation angegeben. Für den Rollwiderstand geschieht dies in Form des Rollwiderstandskoeffizienten  $C_r$  und für das Rollgeräusch anhand des A-bewerteten Gesamt- oder Terzbandschalldruckpegels  $L_{pA}$ .

a)



b)



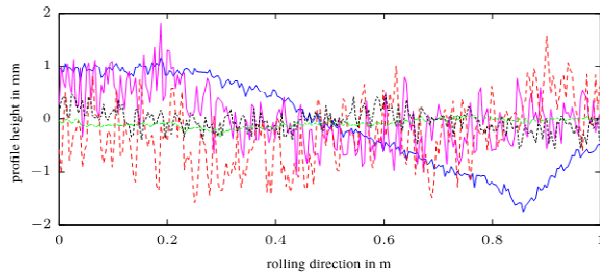
**Bild 3.2-11:** Beispiel für reduzierte laterale Texturdaten für die Oberfläche E. a) vollständige laterale Daten (Referenz); b) reduzierte laterale Daten (Anordnung III.b gemäß Tab. 3.2-1)

### Oberflächeneigenschaften

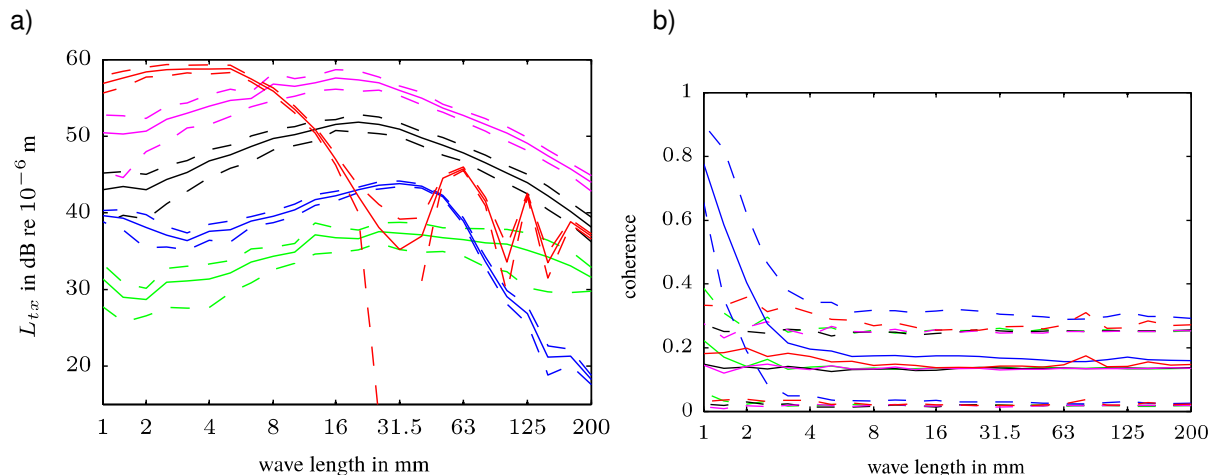
Aufgrund der eingeschränkten Daten in lateraler Richtung ist eine genaue Analyse der Oberflächeneigenschaften nur in Fahrtrichtung möglich. Erkenntnisse über das Verhalten in lateraler Richtung müssen über die Variation der Eigenschaften verschiedener paralleler Profile gewonnen werden.

Der laterale Mittelwert für den ersten Meter aller Scans ist in Bild 3.2-12 zu sehen. Wie erwartet ergeben sich die höchsten Amplituden für die Oberflächen B und E und der glatteste Scan ist die ISO-Oberfläche C.

Beide Rollenprüfstandsoberflächen A und B sind durch eine ausgeprägte Unebenheit gekennzeichnet. Die Amplitudenunterschiede sind auch in Bild 3.2-13a zu sehen, wo der laterale Mittelwert des gemäß ISO 13473 [11] berechneten Texturspektrums  $L_{tx}$  dargestellt ist. Die ebenfalls gezeigte Standardabweichung zeigt, dass für fast alle Oberflächen deutliche Variationen zwischen den einzelnen Profilen existieren. Dies wird durch Bild 3.2-13b unterstrichen, welches die berechnete mittlere Kohärenz [12] zwischen den einzelnen Spuren zeigt. Mit Ausnahme der kürzesten Wellenlängen für Oberfläche A ist die Kohärenz generell schlecht und die Standardabweichung groß.



**Bild 3.2-12:** Mittelwert der Oberflächentextur über alle lateralen Texturprofile für den ersten Meter in Fahrtrichtung. A (—), B (—), C (—), D (—) und E (—)



**Bild 3.2-13:** Terzbandmittelwerte (—) und -standardabweichungen (- -) der (a) über alle lateralen Profile gemittelten Oberflächenspektren und (b) Kohärenz zwischen den lateralen Profilen. A (—), B (—), C (—), D (—) und E (—)

Die Untersuchung der Oberflächeneigenschaften schließt mit Tab. 3.2-2 ab, in der - wiederum gemäß ISO 13473 - die mittlere Profiltiefe MPD, die geschätzten Texturtiefe ETD und die mittlere quadratische Abweichung Rms angegeben sind. Die Amplitudenunterschiede stimmen mit den vorherigen Beobachtungen überein, die Standardabweichungen betragen zwischen 10 % und 25 %. Dies bekräftigt die Annahme deutlicher Unterschiede zwischen den einzelnen parallelen Profilen.

Oberfläche	MPD, mm	ETD, mm	$R_{ms}$ , mm
A	$0,48 \pm 0,08$	$0,59 \pm 0,06$	$0,66 \pm 0,04$
B	$2,28 \pm 0,70$	$2,02 \pm 0,56$	$2,16 \pm 0,21$
C	$0,28 \pm 0,04$	$0,42 \pm 0,03$	$0,22 \pm 0,02$
D	$0,80 \pm 0,17$	$0,84 \pm 0,13$	$0,90 \pm 0,08$
E	$3,30 \pm 0,67$	$2,84 \pm 0,54$	$1,88 \pm 0,19$

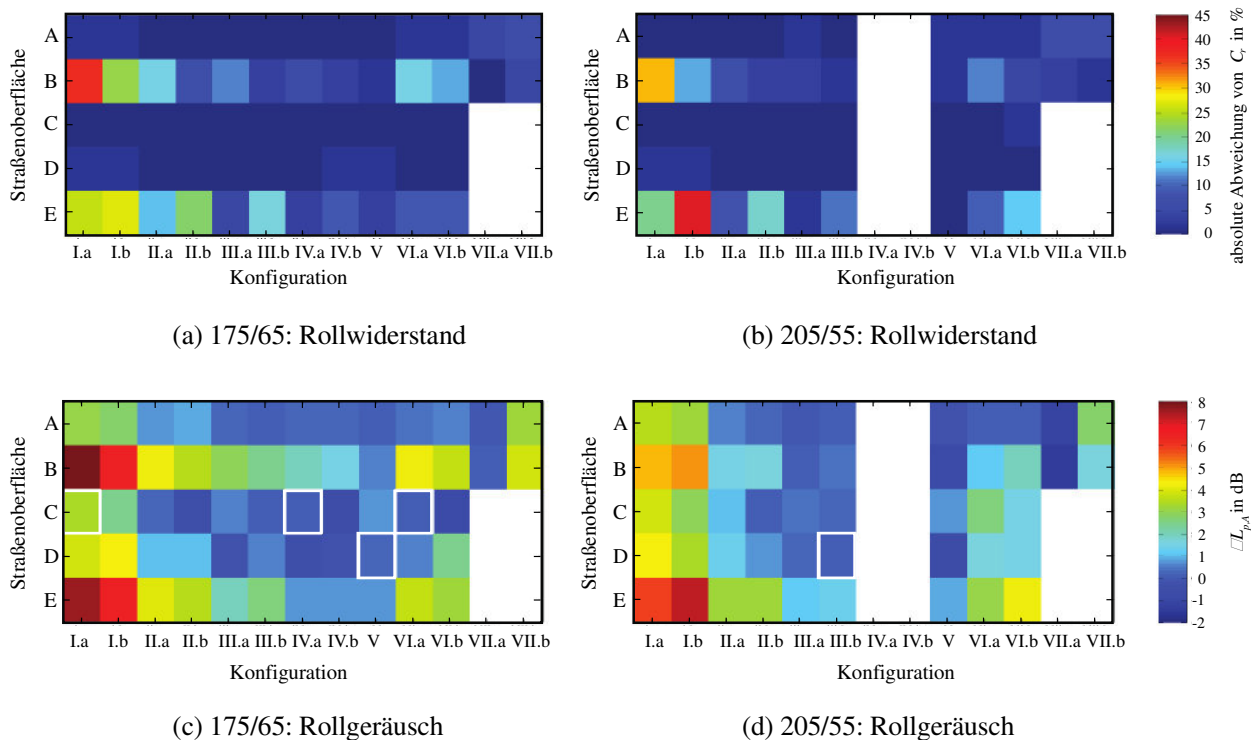
**Tab. 3.2-2:** Laterale Mittelwerte (inkl. Standardabweichung) der mittleren Profiltiefe (MPD), der geschätzten Texturtiefe (ETD) und der quadratischen mittleren Abweichung (Rms)

## Ergebnisse

Insgesamt wurden 108 Fälle für die zwei verschiedenen Reifen, fünf Fahrbahnoberflächen und die verschiedenen Wiederholungskonfigurationen berechnet. Die Ergebnisse für die beiden Reifen unterscheiden sich im Allgemeinen nur unwesentlich voneinander. Die Ergebnisse für den Rollwiderstand sind in Bild 3.2-14a und b zu sehen. Für die „glatteren“ Oberflächen A, C und D sind die Abweichungen zur Referenzkonfiguration in jedem Fall unter 5 %. Erheblich stärkere Abweichungen von bis zu 40 % ergeben sich für die „rauen“ Oberflächen B und E, wenn nur eine oder zwei Spuren wiederholt werden (Konfigurationen I, II und VI). Dabei kann auch eine Abhängigkeit davon, welche(s) laterale(n) Profil(e) wiederholt wird/werden festgestellt werden (Fälle a oder b). Für Abweichungen von weniger als 5 % werden für Oberfläche B mindestens vier Profile benötigt. Für Oberfläche E hingegen sind auch für Konfigurationen, in denen die Hälfte der Profile originär sind, Abweichungen von mehr als 10 % zu verzeichnen. Konfiguration VII, bei der laterale Profile durch longitudinale Daten späterer Umdrehungen aufgefüllt werden, zeigt eine Genauigkeit welche in etwa zwischen der von drei oder vier wiederholten Originalspuren liegt.

Noch deutlicher ausgeprägt ist die Abhängigkeit des A-bewerteten Gesamtschalldruckpegels  $L_{pA}$  von den zur Verfügung stehenden lateralen Daten, siehe Bild 3.2-14c und d. Eine einfache Wiederholung eines einzelnen Profils führt, unabhängig von der Fahrbahnoberfläche, zu einer deutlichen Überschätzung des Schalldruckpegels. Obwohl eine Invertierung jedes zweiten Profils (Konfiguration VI) zu einer deutlichen Verbesserung führt, ist der Fehler für alle Fälle außer der Oberfläche A immer noch größer als 1 dB. Bei Wiederholung von zwei oder mehr originären Profilen reduziert sich der Fehler für den Gesamtschalldruckpegel auf unter 1 dB für die beiden ISO-Oberflächen A und C. Derselbe Fall tritt für Oberfläche D bei drei oder mehr Profilen ein. Für die „rauen“ Oberflächen B und E werden hingegen, abhängig vom Reifen, fünf oder sechs Profile benötigt, um den Fehler auf unter 1 dB zu reduzieren. Konfiguration VII verhält sich im Vergleich zu den anderen Konfigurationen wiederum ähnlich wie für den Rollwiderstand. Gleichermäßen ist auch eine deutliche Abhängigkeit der Ergebnisse davon zu erkennen, welche(s) Profil(e) wiederholt wird/werden (a/b).

Die Rollgeräuschsimulationen können noch weiter untersucht werden, wenn die Ergebnisse in Terzspektren dargestellt werden. Nimmt man Abweichungen von weniger als 1 dB in den dominierenden Terzbändern, das heißt jenen, die den Gesamtschalldruckpegel maßgeblich bestimmen, zum Maßstab, so finden sich nur fünf Konfigurationen (markiert durch weiße Rahmen in Bild 3.2-14c und d, welche diese Anforderung erfüllen. Alle diese Fälle gelten für die Oberflächen C und E. Eine Zuordnung zu bestimmten Wiederholungskonfigurationen ist nicht möglich.



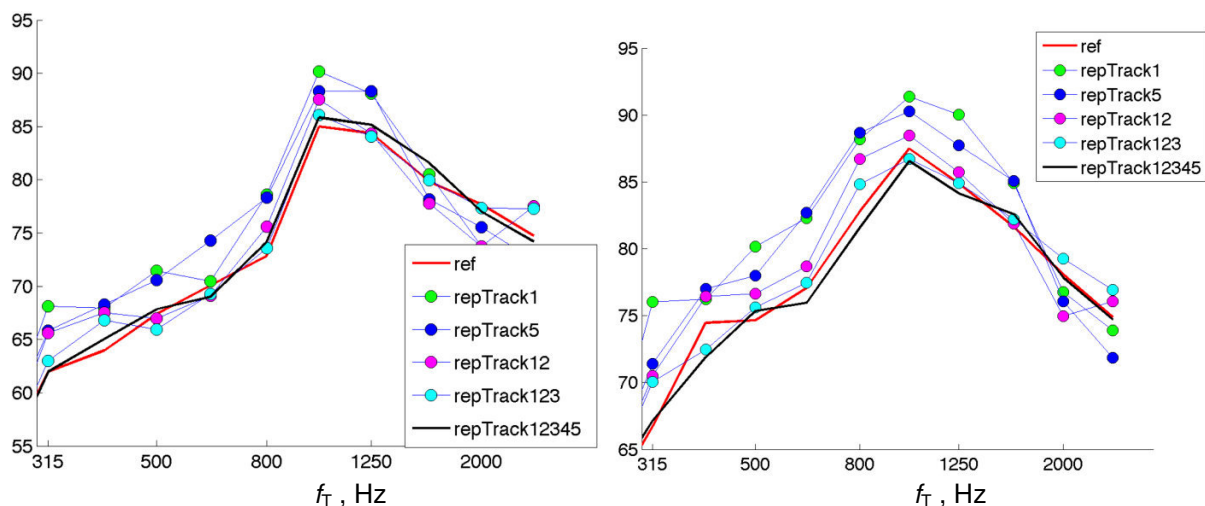
**Bild 3.2-14:** Abweichung von Rollwiderstand und Rollgeräusch von der Referenzkonfiguration. Weiße Flächen kennzeichnen unmögliche Fälle. Nur Rollgeräusch: Weiße Rahmen kennzeichnen Fälle, in denen die Abweichung in allen dominierenden Terzbändern kleiner als 1 dB ist

## Diskussion

Um die Frage beantworten zu können, ob eine zuverlässige Simulation von Rollgeräusch und -widerstand auch möglich ist, wenn die Anzahl der zur Verfügung stehenden lateralen Oberflächenscans begrenzt ist, müssen zwei unterschiedliche Aspekte beachtet werden. Der erste Aspekt ist, inwieweit ein einzelnes geschnittenes Profil repräsentativ für die komplette Oberfläche ist. Anhand der dargestellten Analysen wurde gezeigt, dass für typische Straßenoberflächen parallele Texturscans deutliche Variationen zeigen können. Dies spiegelt sich in den Rollgeräusch- und Rollwiderstandssimulationen wider, wo deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen für die gleichen Wiederholungsschemata, aber unterschiedlichen wiederholten Profilen (z.B. II.a und II.b) zu sehen sind. Der Einfluss des/der gewählten Profils(e) wird umso kleiner, je mehr originäre Profile genutzt werden, da ein größerer lateraler Bereich der Oberfläche abgedeckt wird. Obwohl intuitiv angenommen werden könnte, dass die Variation zwischen parallelen Scans geringer ist für glattere Oberflächen, konnten dafür keine Indizien gefunden werden.

Der zweite Aspekt ist, welche Möglichkeiten bestehen, die notwendigen lateralen Daten zu erzeugen, wenn nur eine geringe Anzahl an Scans zur Verfügung steht. Die Ergebnisse zeigen, dass Rollwiderstandssimulationen auf glatten Oberflächen auch bei nur wenigen lateralen Scans möglich sind. Der Grund ist, dass die Rollverluste auf diesen Oberflächen hauptsächlich durch die großflächige Verformung des Reifens während des Ein- und Austretens aus der Kontaktzone verursacht werden. Texturdetails und laterale Variationen sind von geringerer Bedeutung. Für rauere Oberflächen nimmt der Einfluss einzelner Unebenheiten zu, womit Texturdetails und laterale Variation an Bedeutung gewinnen. In diesem Fall deuten die Ergebnisse für Oberflächen B und E an, dass ungefähr fünf oder sechs Profile, das heißt die Hälfte der Kontaktprofile im Reifenmodell, notwendig sind.

Für das Rollgeräusch ist die kleinmaßstäbliche, hochfrequente Anregung durch die von der Oberflächenstruktur erzeugten Kontaktkräfte von entscheidender Bedeutung. Entsprechend sind Texturdetails bereits bei glatteren Oberflächen zu berücksichtigen. Dies wird dadurch gezeigt, dass auch bei glatteren Oberflächen bereits mindestens drei originäre Profile notwendig sind, wenn der Gesamtschalldruckpegel mit einer Genauigkeit von mindestens 1 dB bestimmt werden soll. **Für rauere Oberflächen steigt die Anzahl der dafür benötigten Scans sogar auf fünf bis sechs an. Dieses Ergebnis ist in guter Übereinstimmung mit der Mindestanzahl an parallelen Oberflächenscans, die SPERoN voraussetzt.** Die Stärke der Abhängigkeit des Rollgeräusches von der Oberflächentextur wird weiterhin verdeutlicht durch die Tatsache, dass für die meisten der Fälle, in denen der Gesamtschalldruckpegel hinreichend genau bestimmt wird, weiterhin größere Abweichungen in den Terzbandpegeln zu sehen sind (siehe Bild 3.2-15).



**Bild 3.2-15:** Terzspektren des A-bewerteten Schalldruckpegels  $L_{pA}$  in dB für verschiedene Kombinationen der parallelen Texturprofile für eine ISO (links) und eine SMA (rechts) Oberfläche. ref: gemessenes Rollgeräuschspektrum, rep\*: berechnete Rollgeräuschspektren unter Zugrundelegung verschiedener Variationen der Texturdaten.  $f_T$ : Terzmittenfrequenz

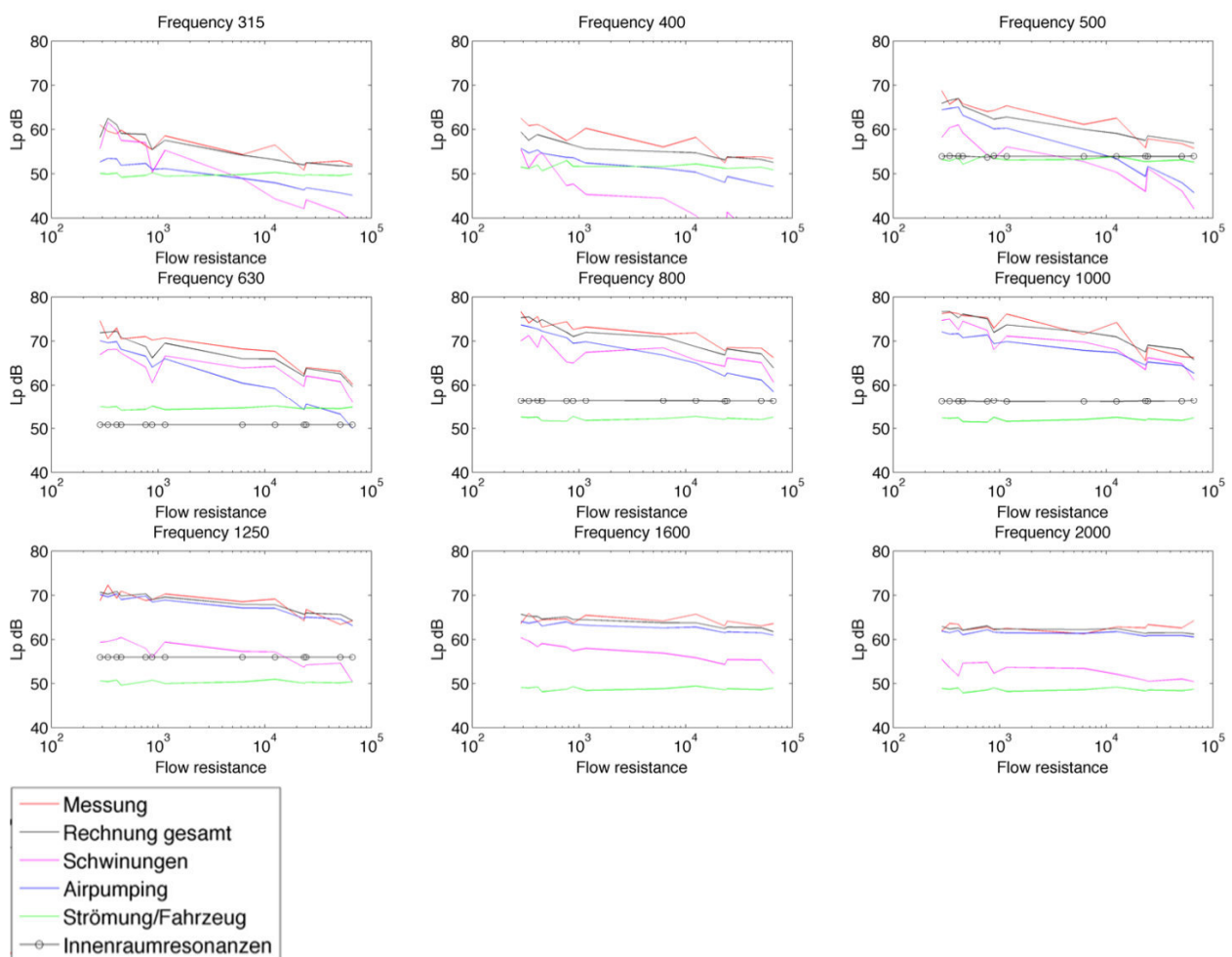
Wenn die Anzahl an zur Verfügung stehenden Scans sehr begrenzt ist, scheint es vorteilhaft zu sein, die Profile so zu wiederholen, dass eine größtmögliche laterale Variation erzeugt wird, siehe die Ergebnisse für Konfigurationen I.a/b und VI.a/b. Falls nur ein (sehr langes) Profil existiert, sind die Ergebnisse nicht zwangsläufig besser, wenn über eine Reifenumdrehung hinausgehende Segmente als parallele Profile genutzt werden, siehe VI.a/b und VII.a/b. Vermutlich sind die eigentlich in Fahrtrichtung auftretenden Texturvariationen für die lateralen Variationen im Kontaktbereich nicht repräsentativ.

### 3.2.3.3 Eingangsdaten für das statistische Modell in SPERoN

Im Folgenden wird eine Empfindlichkeitsstudie für die Eingangsdaten des statistischen Teils von SPERoN durchgeführt, um den Einfluss der verschiedenen Parameter auf die beiden Hauptquellen – Reifenschwingungen und strömungsabhängige Geräusche zu untersuchen. Dazu wurde der Mittelwert der Ergebnisse für sechs Reifen gebildet und nur die für die Charakterisierung der Fahrbahnoberflächen relevanten Parameter berücksichtigt. Es wurden Berechnungen für die Sperenberg Testfelder durchgeführt, da damit für alle betrachteten Fälle ein gemessener Referenzwert vorliegt. Im Folgenden werden die Resultate für zwei ausgewählte Parameter, den Strömungswiderstand und die Kontaktkräfte diskutiert.

#### Strömungswiderstand im Kontakt zwischen Straßenoberfläche und Reifen

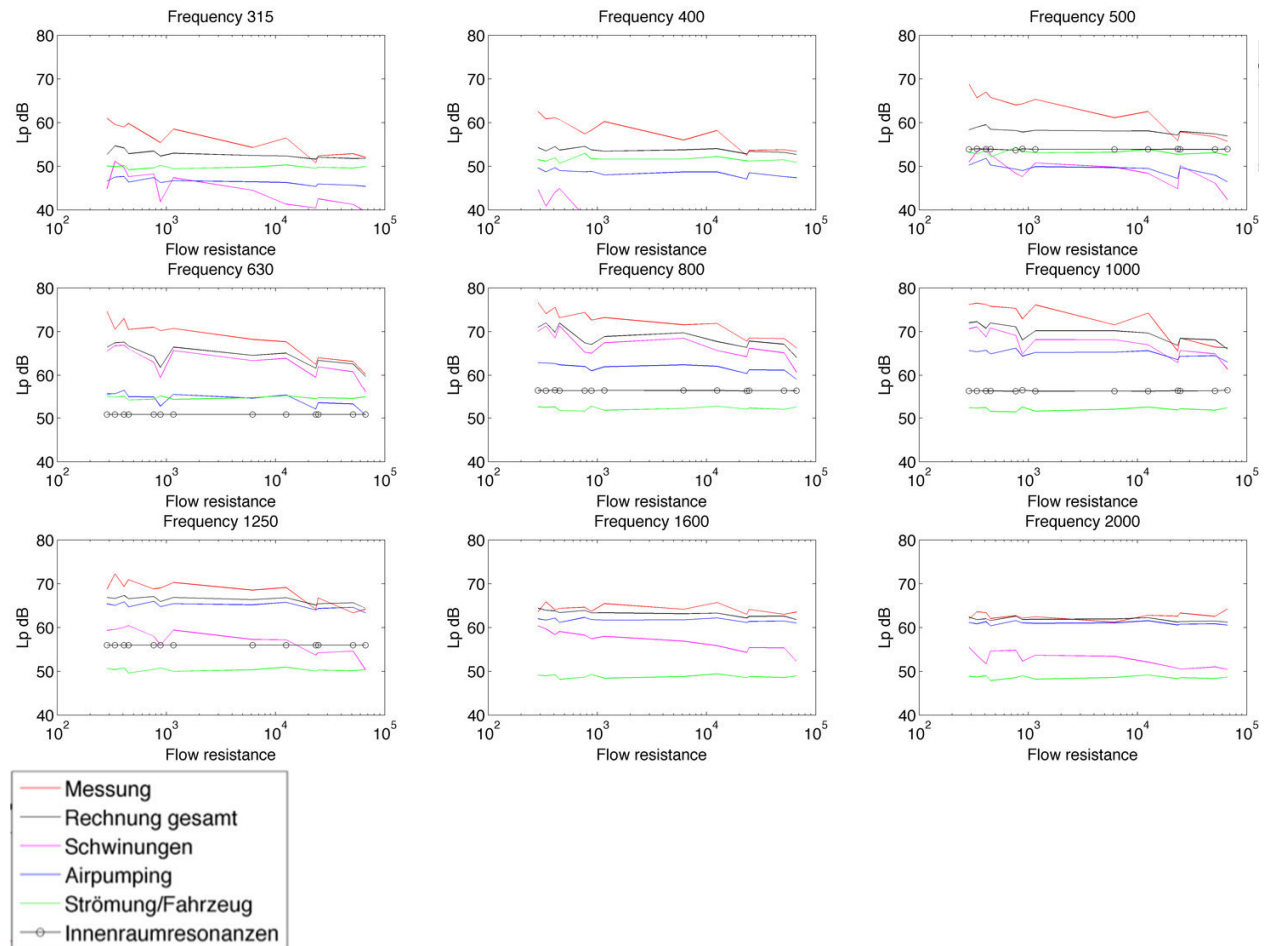
Durch ein spezielles, im Verbundprojekt Leiser Straßenverkehr 1 entwickeltes Messverfahren [13] wird der Strömungswiderstand zwischen dem Kontaktbereich und der Reifenumgebung ermittelt. In Bild 3.2-16 ist der gemessene und berechnete maximale Schalldruckpegel von Vorbeifahrten (Vorbeifahrtpegel)  $L_{pA}$  als Funktion des Strömungswiderstandes  $R_s^*$  aufgetragen.



**Bild 3.2-16:** A-bewerteter Vorbeifahrtpegel  $L_{pA}$  in dB für den Datensatz aus dem Sperenberg-Projekt. Mittelwert über Reifen und Geschwindigkeiten im Bereich von 70 km/h bis 90 km/h, aufgetragen über den Strömungswiderstand der 13 berücksichtigten Fahrbahnoberflächen. Strömungswiderstand  $R_s^*$  in Pa s/m

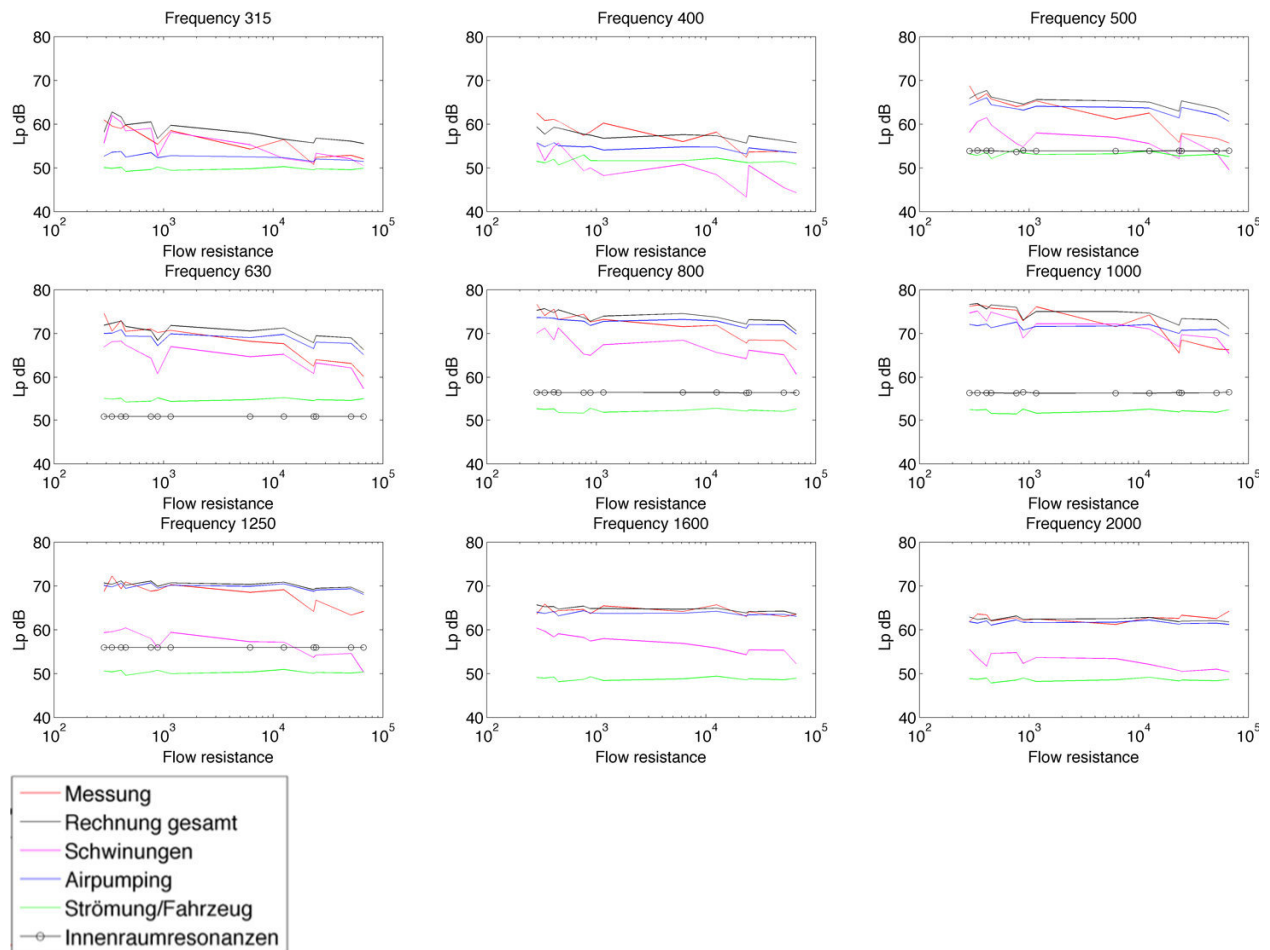
Dabei erlaubt SPERoN auch, die verschiedenen Teilquellen zu unterscheiden. Der Nachteil einer solchen Darstellung ist, dass sie nicht nur die Variation der Strömungswiderstände beinhaltet, sondern auch die zwangsläufig damit verbundene Variation der Oberflächentextur. Was sowohl in Rechnungen als auch Messungen überraschend ist, ist die geringe Varianz der Ergebnisse in den Terzbändern für 1.600 Hz und 2.000 Hz. Für alle anderen Terzbänder kann man einen generellen Trend sehen, bei dem größerer Strömungswiderstand zu leiseren Oberflächen zu führen scheint. Diese Erkenntnis widerspricht der noch im Laufe des Sperenberg-Projekts aufrechterhaltenen Interpretation des Einflusses von Fahrbahnoberflächen-

texturen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Demnach wurden grob texturierte bzw. grobraue Oberflächen mit einer „guten Durchlüftung“ des Reifen-Fahrbahn-Kontaktes in Verbindung gebracht, die (bei niedrigem Strömungswiderstand) dafür sorgen, dass das sogenannte air pumping nicht bzw. wenig zur Wirkung kommt und die strömungsbedingten Geräusche minimiert werden. „Glattere“, also feinraueren Oberflächen wurden aufgrund der vermuteten „schlechteren „Durchlüftung“ (bei hohem Strömungswiderstand) für den Anstieg der Geräuschanteile im Frequenzbereich oberhalb von 1 kHz verantwortlich gemacht, der dem air pumping zugeordnet wurde.



**Bild 3.2-17:** A-bewerteter Vorbeifahrtpegel  $L_{pA}$  in dB für den Datensatz aus dem Spenberg-Projekt. Mittelwert über Reifen und Geschwindigkeiten im Bereich von 70 km/h bis 90 km/h, aufgetragen über den wirklichen Strömungswiderstand  $R_s^*$  der 13 berücksichtigten Fahrbahnoberflächen. Festlegung des Strömungswiderstands für alle Berechnungen auf 51.000 Pa s/m. Strömungswiderstand  $R_s^*$  in Pa s/m

Um die nun neu zu treffende Aussage zu überprüfen wurden zwei neue Berechnungen durchgeführt. In beiden Berechnungen wird die Variation der Oberflächentexturen beibehalten, aber für alle Oberflächen mit einem identischen Strömungswiderstand gerechnet. In der ersten Berechnung wird ein großer Strömungswiderstand (entsprechend der ISO Oberfläche) benutzt. Die Ergebnisse sind in Bild 3.2-17 gezeigt.



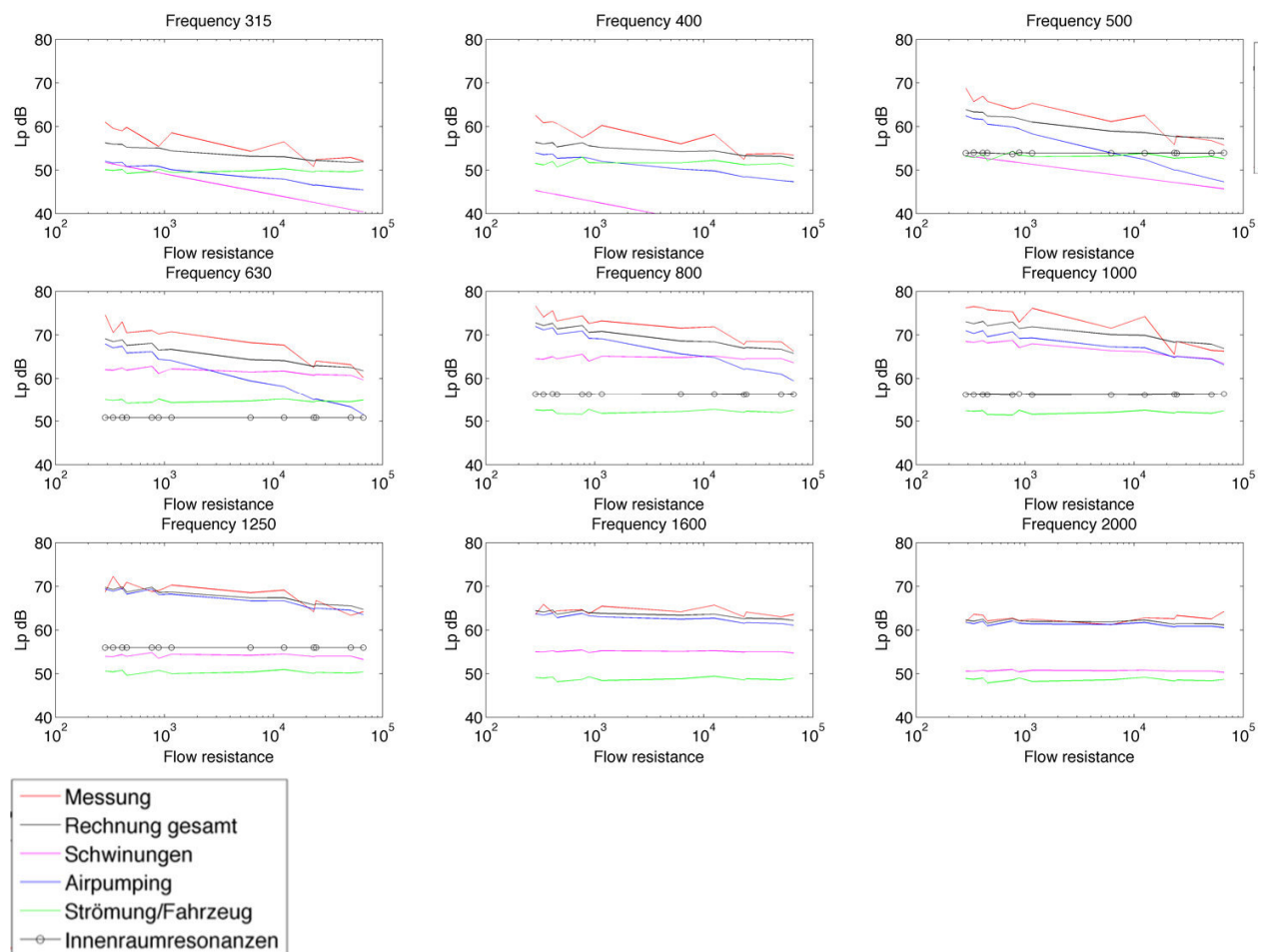
**Bild 3.2-18:** A-bewerteter Vorbeifahrtpegel  $L_{pA}$  in dB für den Datensatz aus dem Sperenberg-Projekt. Mittelwert über Reifen und Geschwindigkeiten im Bereich von 70 km/h bis 90 km/h, aufgetragen über den wirklichen Strömungswiderstand  $R_s^*$  der 13 berücksichtigten Fahrbahnoberflächen. Festlegung des Strömungswiderstands für alle Berechnungen auf 286 Pa s/m. Strömungswiderstand  $R_s^*$  in Pa s/m

Die Veränderung des Strömungswiderstandes beeinflusst sehr deutlich den Quellenanteil, der dem strömungsabhängigen Geräusch entspricht. Ein großer Strömungswiderstand führt zu einer kleineren Quellstärke des strömungsabhängigen Geräusches im SPERoN-Modell. Noch deutlicher wird dies, wenn man den Strömungswiderstand für alle Oberflächen sehr klein setzt, wie in Bild 3.2-18 dargestellt. Ein kleiner Strömungswiderstand führt zu einer starken Dominanz des strömungsabhängigen Geräusches.

Man könnte den Schlusssatz auf die Art formulieren, dass raue Fahrbahnoberflächen zu einem starken Anteil des strömungsabhängigen Geräusches führen und die Abstrahlung aus dem Kontakt in die Umgebung begünstigen. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass es zwei grundlegend verschiedene Mechanismen für die Entstehung des strömungsabhängigen Geräusches gibt. Das plötzliche Schließen und Öffnen von Hohlräumen und das Eindringen von Rauigkeitsspitzen in die Lauffläche, bei dem ebenfalls Luft verdrängt wird. Bei beiden Vorgängen ist die Plötzlichkeit des Ablaufes entscheidend, das heißt sie sind beide stark von der Geschwindigkeit abhängig. Mit zunehmender Geschwindigkeit nehmen diese Quellterme im Vergleich zu den Reifenschwingungen deutlich zu.

### Einfluss der Kontaktkräfte

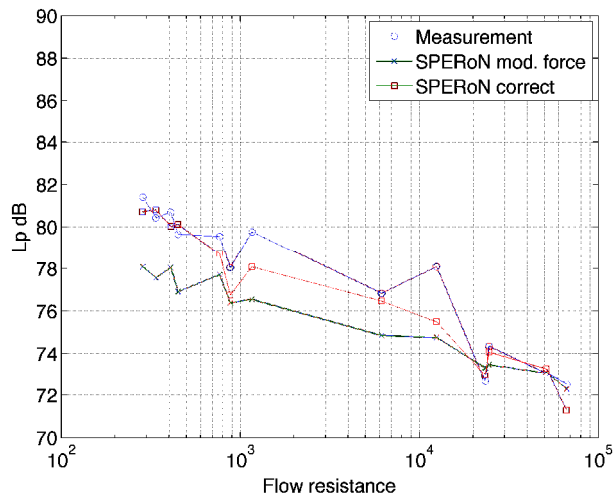
In SPERoN werden für jede Reifen-Fahrbahn-Geschwindigkeit-Kombination Kontaktkräfte berechnet, die als Eingangsgrößen für das statistische Modell dienen. Um den Einfluss der Kontaktkräfte zu demonstrieren, wurden im Sperenberg-Datensatz alle Kontaktkräfte auf einem Referenzwert festgesetzt. Dafür wurde der Mittelwert über alle Reifen und Geschwindigkeiten für die ISO Oberfläche herangezogen. Bild 3.2-19 zeigt die Ergebnisse für die so berechneten Vorbeifahrtpegel und die gemessenen Pegel im Vergleich. Sowohl Reifenschwingungen als auch strömungsabhängige Geräusche werden im Frequenzbereich bis ca. 1.250 Hz deutlich unterschätzt. Für die letzten zwei Frequenzbänder ist nur eine geringe Abweichung zu beobachten. Für die Reifenschwingungen scheint der Einfluss der Kontaktkräfte am größten zu sein. Deutlich wird dies z.B. für die Terz mit der Mittenfrequenz von 1.000 Hz. Während in Bild 3.2-18 der Beitrag der Reifenschwingungen sehr nahe an den gemessenen Werten liegt, sind in Bild 3.2-19 nahezu 10 dB Unterschied. Diese Abweichungen führen auch im Gesamtpegel zu Abweichungen, auch wenn diese nicht so groß sind.



**Bild 3.2-19:** A-bewerteter Vorbeifahrtpegel  $L_{pA}$  in dB für den Datensatz aus dem Sperenberg-Projekt. Mittelwert über Reifen und Geschwindigkeiten im Bereich von 70 km/h bis 90 km/h, aufgetragen über den wirklichen Strömungswiderstand  $R_s^*$  der 13 berücksichtigten Fahrbahnoberflächen. Festlegung der Kontaktkräfte für alle Berechnungen auf den Wert für die ISO-Oberfläche. Strömungswiderstand  $R_s^*$  in Pa s/m

Bild 3.2-20 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Gesamtpegeln. Dabei wurden für eine Berechnung die „korrekten“ Eingangsdaten benutzt. Für die zweite Berechnung gingen die wie oben beschrieben modifizierten Kontaktkräfte in die Berechnungen ein.



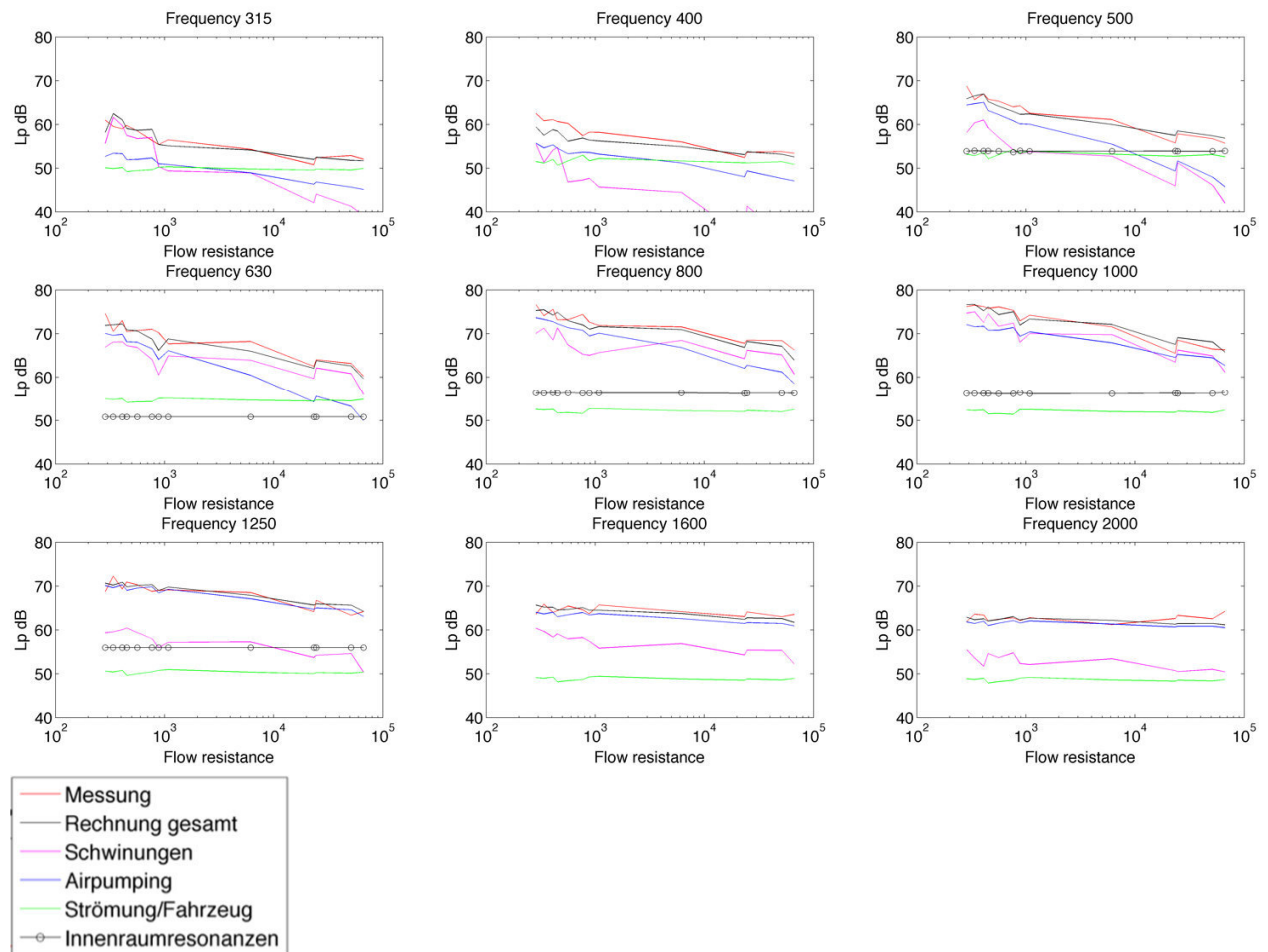


**Bild 3.2-20:** Vergleich der gemessenen und berechneten Gesamtpegel  $L_{pA}$  in dB, aufgetragen über den Strömungswiderstand  $R_s^*$  der verschiedenen Oberflächen. Die Berechnungen wurden für den korrekten Datensatz und für einen Datensatz mit modifizierten Kontaktkräften (siehe Text) durchgeführt. Strömungswiderstand  $R_s^*$  in Pa s/m

### Anmerkungen zu den Ergebnissen

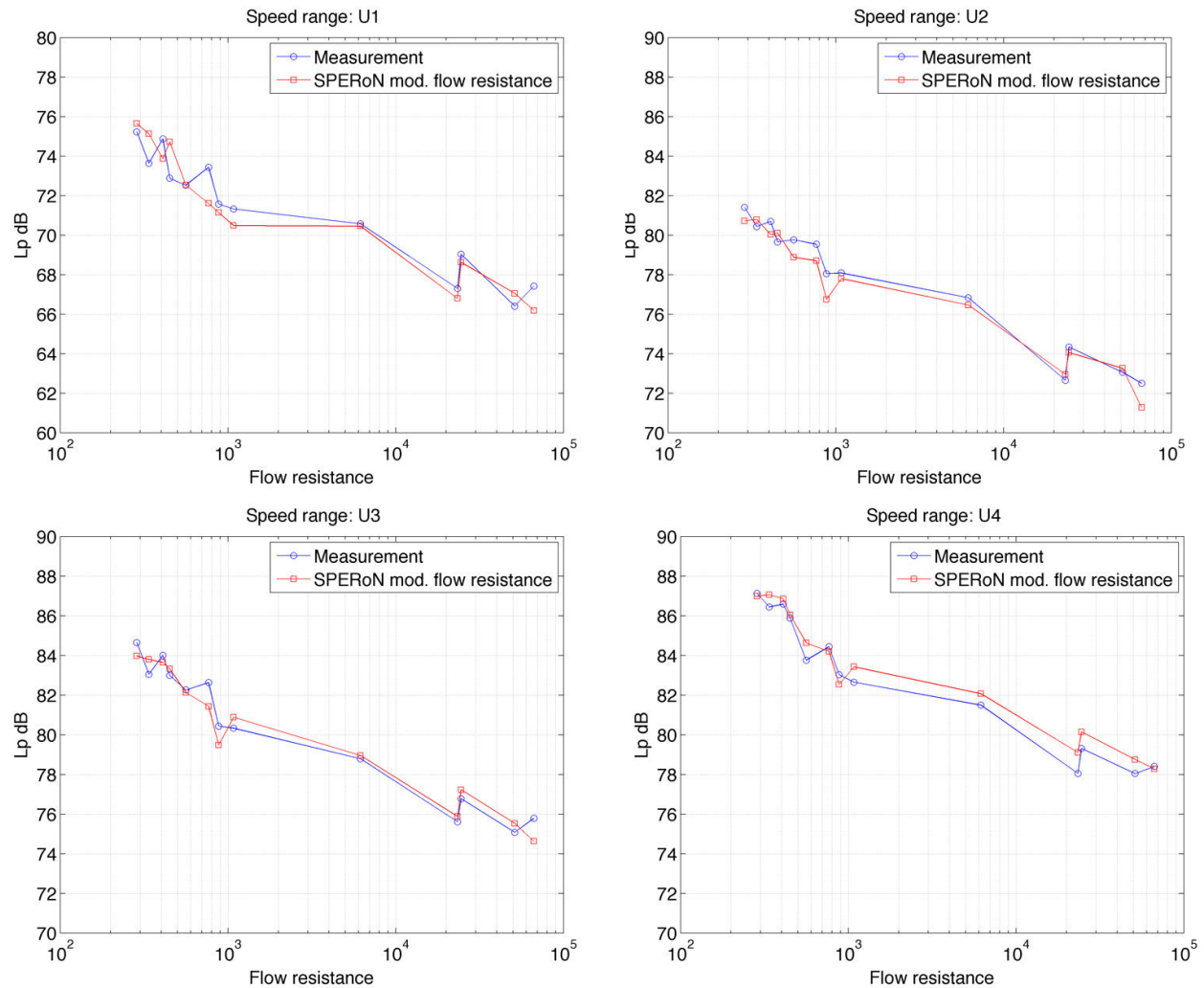
In den in Bild 3.2-20 dargestellten Berechnungsergebnissen ist eine deutliche Abweichung für eine Oberfläche mit einem Strömungswiderstand von ca. 13.000 Pa s/m zu beobachten. Dies war schon zu einem früheren Zeitpunkt der Modellbildung beobachtet worden. In der Pilotstudie zeigten sich Strömungswiderstand und Kontaktkräfte als die wichtigsten Parameter im statistischen Modell. Es stellt sich die Frage, ob die Abweichungen in Bild 3.2-20 ein Modellfehler oder eine Konsequenz unvollständiger oder fehlerhafter Eingangsdaten sind. Würde man den Strömungswiderstand für die abgestreuten Sperenberg-Oberflächen A14 und A15 [1] entsprechend korrigieren, würde man sehr gute Ergebnisse über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich erhalten.

Bild 3.2-21 zeigt die Ergebnisse für die einzelnen Frequenzbänder und für den Geschwindigkeitsbereich 70 km/h bis 90 km/h. Dabei ist zu beachten, dass durch die Veränderung des Strömungswiderstandes die Reihenfolge der Oberflächen längs der x-Achse geändert ist.



**Bild 3.2-21:** Vergleich der gemessenen und berechneten Terzpegel  $L_{pA}$  in dB, aufgetragen über dem Strömungswiderstand  $R_s^*$  der verschiedenen Oberflächen. Die Berechnungen wurden für einen Datensatz mit modifizierten Strömungswiderständen A14 (1/10 des ursprünglichen Wertes) und A15 (1/2 des ursprünglichen Wertes) durchgeführt. Strömungswiderstand  $R_s^*$  in Pa s/m

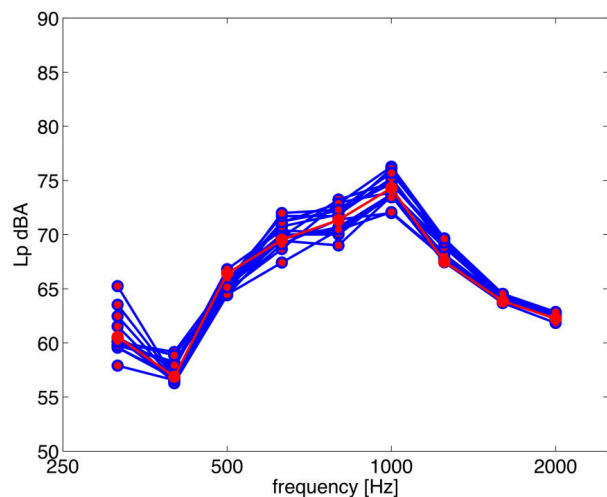
Bild 3.2-22 zeigt für alle vier Geschwindigkeitsbereiche den Vergleich der berechneten mit den gemessenen Gesamtpegeln. Dabei fällt auf, dass im Bereich sehr kleiner Strömungswiderstände immer noch Abweichungen auftreten können. Man muss sich jedoch auch bewusst sein, dass gerade hier kleine Variationen des Strömungswiderstandes relativ große Variationen in den vorhergesagten Pegeln bewirken können.



**Bild 3.2-22:** Vergleich der gemessenen und berechneten Gesamtpegel  $L_{pA}$  in dB, aufgetragen über dem Strömungswiderstand  $R_s^*$  der verschiedenen Oberflächen. Die Berechnungen wurden für einen Datensatz mit modifizierten Strömungswiderständen A14 (1/10 des ursprünglichen Wertes) und A15 (1/2 des ursprünglichen Wertes) durchgeführt. Strömungswiderstand  $R_s^*$  in Pa s/m. Links oben: Geschwindigkeitsbereich 40 km bis 70 km/h; rechts oben: Geschwindigkeitsbereich 70 km/h bis 90 km/h; links unten: Geschwindigkeitsbereich 90 km/h bis 110 km/h; Geschwindigkeitsbereich über 110 km/h

### Bedeutung der Reifenwahl

SPERoN ist zur Untersuchung der akustischen Eigenschaften von Straßenoberflächen entwickelt worden. Dabei würde man die Ergebnisse gerne ohne den Einfluss des Reifens erhalten. Dabei wäre es natürlich von Vorteil, wenn man nur einen repräsentativen Reifen berechnen müsste. Alternative ist eine Reihe von Berechnungen mit einer Variation von Reifen durchzuführen. Die Ergebnisse müssen dann gemittelt werden. Diese Prozedur ist jedoch zeitaufwendiger. Um den Einfluss des Reifens auf das Berechnungsergebnis aufzuzeigen wurden zehn verschiedene Reifen aus der vorhandenen Bibliothek ausgewählt und mit diesen Reifen Berechnungen für einen Splittmastixasphalt und eine Geschwindigkeit von 70 km/h durchgeführt. Bild 3.2-23 zeigt die Terzbandspektren für diese zehn Reifen. Ein einzelner beliebiger Reifen wurde dabei besonders markiert, um zu zeigen, dass es weder eine systematische Variation der Terzpegel gibt, noch dass ein Reifen als „mittlerer Reifen“ herangezogen werden kann. Die Reihenfolge der Pegelwerte in einer Terz zu den einzelnen Reifen ändert sich von Terz zu Terz. Dies bedeutet, dass grundsätzlich mit einem Mittelwert über die Einzelberechnungsergebnisse einer größeren Anzahl von Reifen gerechnet werden muss.



**Bild 3.2-23:** A-bewertete Terzspektren des Schalldruckpegels  $L_{pA}$  in Abhängigkeit von der Frequenz für 10 Reifen berechnet für einen Splittmastixasphalt und eine Geschwindigkeit von 70 km/h

### 3.2.3.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Messmethode der kontrollierten und statistischen Vorbeifahrt gewisse Unsicherheiten beim Vergleich zwischen Messung und Rechnung bzw. bei der Verwendung der Messergebnisse für die Modellierung bestehen. Diese beruht auf der Tatsache, dass kleine Abweichungen in der Feststellung des Zeitpunkts, zu dem der maximale Gesamtpegel erreicht ist, zu relativ großen Unterschieden in einzelnen Terzen führen kann. Diese Unsicherheit sollte bei Messungen ausgewertet werden. Dies könnte durch eine Auswertung des Schalldruckpegel-Zeitverlaufs in einem Fenster um den Maximalpegel erreicht werden.

Darüber hinaus zeigen die Untersuchungen einen starken Einfluss des Strömungswiderstandes im Kontaktgebiet zwischen Reifen und Fahrbahn. Die Ergebnisse betonen auch die Notwendigkeit, den Strömungswiderstand nicht nur messtechnisch sondern auch rechnerisch z.B. aus gemessenen Oberflächen-texturen, Reifenprofil und mittlerer berechneter Kontaktgeometrie bestimmen zu können.

Die strömungsabhängigen Geräusentstehungsmechanismen zeigen sich vor allem auf rauen Oberflächen als dominierender Quellterm. Dies ist nicht eine Konsequenz des Modellansatzes wie er in SPERoN benutzt wird, sondern wird so auch in dem SPERoN zu Grunde liegenden Datensatz der Messungen in Sperenberg wiedergefunden. Auf Grund der unterschiedlichen Geschwindigkeitsabhängigkeit der Teilschallquellen (Reifenschwingungen  $\sim v^2$  und strömungsabhängige Geräusentstehungsmechanismen:  $\sim v^4$ ) lassen sich deren Beiträge in den einzelnen Terzbändern identifizieren. Die gute Übereinstimmung in Bild 3.2-22 zeigt ebenfalls, dass die Kombination der Teilschallquellen korrekt gewählt ist.

In der Literatur wurden bisher (mindestens) zwei unterschiedliche Mechanismen für die strömungsabhängigen Geräusche, das Öffnen und Schließen von Hohlräumen und das Eindringen von Rauigkeitsspitzen in die Lauffläche genannt. Der erste Mechanismus benötigt möglichst glatte Oberflächen und sollte besonders stark sein, wenn der Strömungswiderstand im Kontakt groß ist. Jedoch reichen kleine Abweichungen vom perfekten Schließen der Hohlräume, um diesen Mechanismus zu verringern. Es kann davon ausgegangen werden, dass der zweite Mechanismus der in den meisten Fällen wichtigere Mechanismus ist oder dass, wie in diesem Bericht dargestellt, noch weitere Mechanismen existieren.

Als Konsequenz sind auf jeden Fall Oberflächen mit kleinem Strömungswiderstand lauter als Oberflächen mit großem Strömungswiderstand. Dies gilt jedoch nur solange der Strömungswiderstand durch die Geometrie zwischen reifen und Fahrbahn bestimmt ist. Sollte die Oberfläche absorbierend sein (und damit auch einen kleinen Strömungswiderstand haben) so gilt dieser Schlusssatz nicht.

Die Variation der Reifen zeigt, dass es schwer wird einen „mittleren Reifen“ zu finden, der eine Gruppe von Reifen repräsentieren und damit die Anzahl der Berechnungen reduzieren kann. Es bleibt unabdingbar, bei der Betrachtung von Terzspektren immer auf den Mittelwert über eine größere Gruppe von Reifen zurückzugreifen, wenn die Vorhersagegenauigkeit von SPERoN gewährleistet bleiben soll.

### 3.2.3.5 Berücksichtigung nicht starrer Fahrbahndeckschichten

Für die Untersuchung des Einflusses elastischer Fahrbahndecken auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch stand das Teilvorhaben VI.III „Reduzierung der Reifen-/Fahrbahngeräusche durch Dämpfung des durch den Verkehr induzierten Körperschalls mit Hilfe einer elastischen Dämpfungsschicht“ zur Verfügung. Einzelheiten der physikalischen Zusammenhänge des Rollgeräuschs mit elastischen Eigenschaften der Fahrbahndecke und Ergebnisse sind dort beschrieben. Im vorliegenden Teilvorhaben I wurde entschieden, zusätzlich auch das komplexe Berechnungsmodell, das in Teilvorhaben II entwickelt wurde, für die Untersuchung des Einflusses nicht starrer Fahrbahndeckschichten auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch heranzuziehen. Darüber wird nachfolgend berichtet.

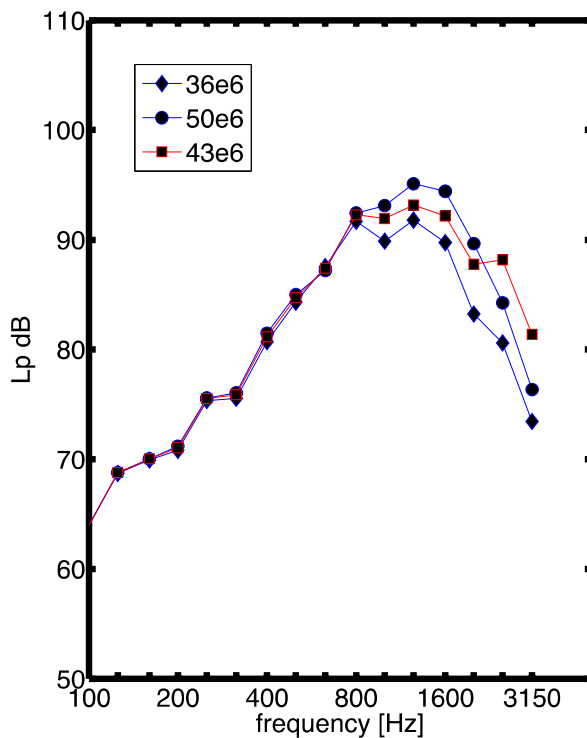
Um den Einfluss unterschiedlicher Kontaktsteifen auf die Kontaktkräfte und den abgestrahlten Schall zu untersuchen, wurde eine zusätzliche Kontaktsteife für die Fahrbahn in das Modell eingebunden. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die elastische Fahrbahn nur lokal reagiert, d.h. eine Wellenausbreitung nicht oder nur begrenzt stattfindet. Dies mag eine starke Vereinfachung sein, ist jedoch in Betracht der starken Dämpfung in elastischen Belägen gerechtfertigt.

Die gesamte Kontaktsteife  $K$  ergibt durch die in Serie geschalteten Kontaktfedern der Straße  $K_{\text{Straße}}$  und des Reifens  $K_{\text{Reifen}}$  als

$$\text{Gleichung 2} \quad \frac{1}{K} = \frac{1}{K_{\text{Reifen}}} + \frac{1}{K_{\text{Straße}}} \quad \text{bzw.}$$

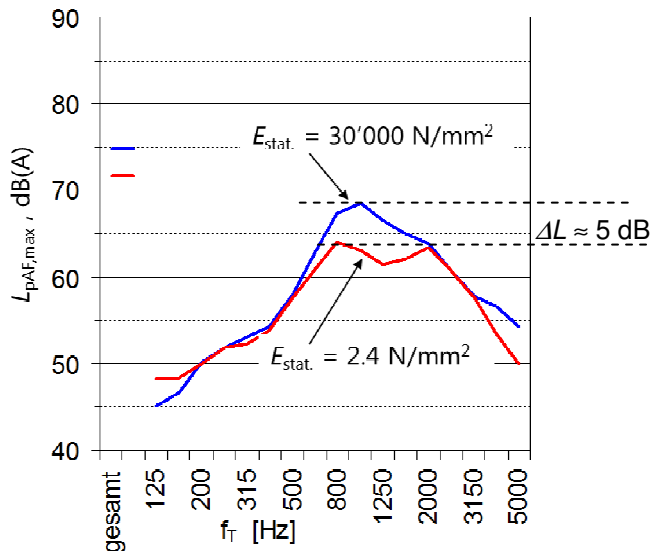
$$\text{Gleichung 3} \quad K = \frac{K_{\text{Reifen}} K_{\text{Straße}}}{K_{\text{Reifen}} + K_{\text{Straße}}}$$

Bild 3.2-24 zeigt den berechneten abgestrahlten Schalldruck in der Nähe des Reifens wie er auf dem Trommelprüfstand gemessen würde für drei verschiedene Steifen des Kontaktes. Die Rechnungen wurden für eine Oberflächentextur einer ISO Oberfläche bei einer Geschwindigkeit von  $v = 80 \text{ km/h}$  durchgeführt.



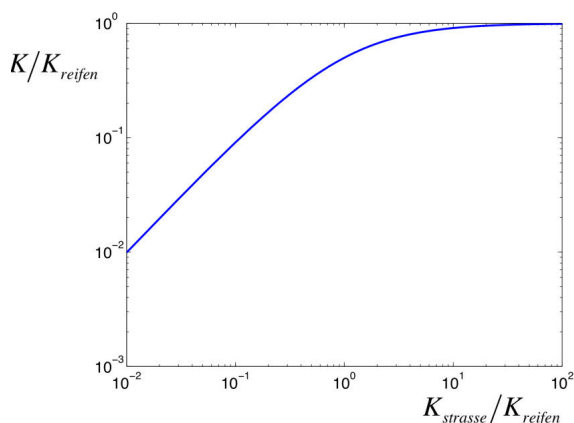
**Bild 3.2-24:** Einfluss einer elastischen Fahrbahndecke. Simulation für eine ISO Oberflächentextur mit drei unterschiedlichen Kontaktsteifen (Elastizitätsmoduli). Werte sind in Pa

Die Ergebnisse der Simulation deuten auf einen qualitativ ähnlichen Effekt wie bei der Messung (siehe Bild. 3.2-25) hin, das heißt identische Spektren bis ca. 800 Hz. Ab 800 Hz ist eine deutliche Abnahme des Pegels zu beobachten. Bei der Simulation fehlt jedoch das strömungsabhängige Geräusch, welches sehr wahrscheinlich zu einer Erhöhung der Pegel oberhalb 1 bis 2 kHz führen würde. Die Messungen wurden im Sperenberg-Projekt durchgeführt. Dabei wurden zwei Oberflächen mit identischer Textur aber unterschiedlicher Elastizität verglichen. Bei der ersten Oberfläche wurde Schleifband zur Texturierung direkt auf einer polierten Betonoberfläche verlegt. Bei der zweiten Oberfläche wurde zwischen Schleifband und Betonoberfläche eine elastische Zwischenlage mit einem statischen E-Modul von  $2,4 \text{ N/mm}^2$  eingebaut.



**Bild 3.2-25:** Einfluss einer elastischen Fahrbahndecke (Sperenberg-Projekt). Mittlerer A-bewerteter Vorbeirollpegel  $L_{pAF,max}$  für ein Kollektiv von Pkw-Reifen in Abhängigkeit von der Terzmittenfrequenz  $f_T$ , Geschwindigkeit  $v = 80 \text{ km/h}$ .  $f_T$ : Terzmittenfrequenz. Aus (1)

Die notwendige Steife der elastischen Schicht lässt sich aus Bild 3.2-24 und Bild 3.2-26 schließen. Ein Faktor 2 in der totalen Kontaktsteife ergibt ca. 3 dB Reduktion im Gesamtpegel. Dafür muss aber die Steife der Fahrbahn in die Größenordnung der Kontaktsteife des Reifens kommen. Diese ist aber üblicherweise ca. zehnmal kleiner als die Steife der Reifenlauffläche.



**Bild 3.2-26:** Resultierende Kontaktsteife als Funktion des Verhältnisses zwischen Steife der Straße und der Kontaktsteife der Lauffläche des Reifens (inklusive lokaler Effekte, d.h. das Eindringen der Rauigkeitsspitzen in die Lauffläche)

### 3.2.3.6 Berücksichtigung der Fahrbahnabsorption in SPERoN

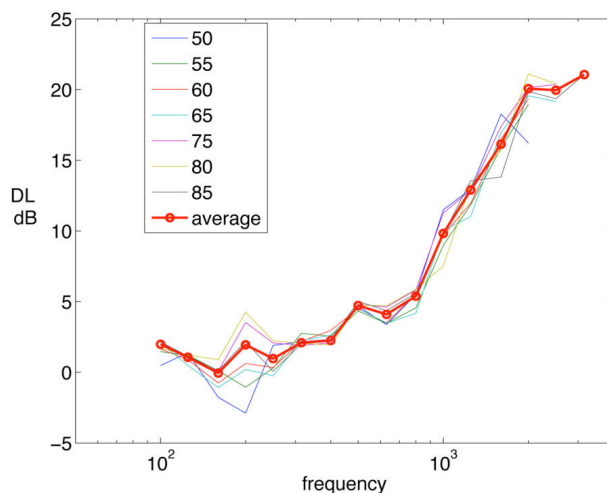
Bisher wurde die akustische Absorption hohlraumreicher Fahrbahnbeläge in SPERoN nicht berücksichtigt. Im vorliegenden Projekt wurde deshalb ein Modell für die Absorption in Form einer frequenzabhängigen

Korrektur der Pegel in den einzelnen Terzbändern entwickelt. Dabei zeigte sich, wie bereits auch in der Literatur beschrieben, dass die Absorption nur den Horneffekt, aber kaum die Schallausbreitung über die Straßenoberfläche beeinflusst.

### Horneffekt für den rollenden Reifen

Um dies zu demonstrieren wurde das komplette Modell von Teilprojekt II benutzt, um den Horneffekt für einen rollenden Reifen zu berechnen. Dazu wurde die Schallabstrahlung eines Reifens, der mit unterschiedlicher Geschwindigkeit auf einer ISO Oberfläche rollt, berechnet. Bei der Abstrahlung wurde die Fahrbanoberfläche einmal als schallhart (totalreflektierend) und einmal als akustisch transparent (totalabsorbierend) angenommen.

Die Schalleistung wurde für beide Fälle auf einer sich mit dem Reifen mitbewegenden Hüllfläche ermittelt. Bild 3.2-27 zeigt die Ergebnisse als Differenz zwischen beiden Fällen für alle berechneten Geschwindigkeiten.

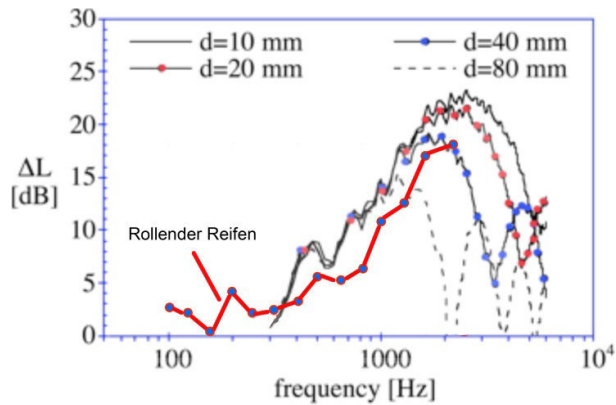


**Bild 3.2-27:** Berechneter Pegelunterschied DL in der abgestrahlten Schalleistung auf Grund einer total absorbierenden Oberfläche. Die Kurven entsprechen verschiedenen Geschwindigkeiten (50 km/h bis 85 km/h) sowie dem energetischen Mittelwert

Das Ergebnis zeigt, dass bei 1.000 Hz eine maximale Reduktion von 10 dB möglich ist, was gut mit den praktischen Erfahrungen übereinstimmt. Es ist also wichtig, die abgestrahlte Schalleistung insgesamt zu betrachten und nicht nur die Abstrahlung zur Seite. Schließlich ist die Schalleistung die relevante Größe, z.B. im innerstädtischen Bereich.

Bisher war es nur möglich, den Horneffekt und damit das Minderungspotential für schallabsorbierende Oberflächen mit Hilfe von „statischen“ Messungen abzuschätzen. Dafür wurde eine Schallquelle an der Stelle des Kontakts zwischen Reifen und Fahrbahn platziert und der Unterschied des Schalldruckpegels oder der Schalleistung mit und ohne Vorhandensein des Reifens gemessen. Bild 3.2-28 zeigt das Ergebnis solcher Messungen. Der Empfangspunkt liegt in der Ebene des Reifens in 7,5 m Abstand und 1,2 m Höhe über Fahrbahn. Die vier Kurven repräsentieren vier verschiedene Quellpositionen, das heißt der Abstand zwischen Quelle und Zentrum des Kontaktes wurde variiert. Dabei war die Schallquelle immer in der Mittellinie des Laufstreifens des Reifens.

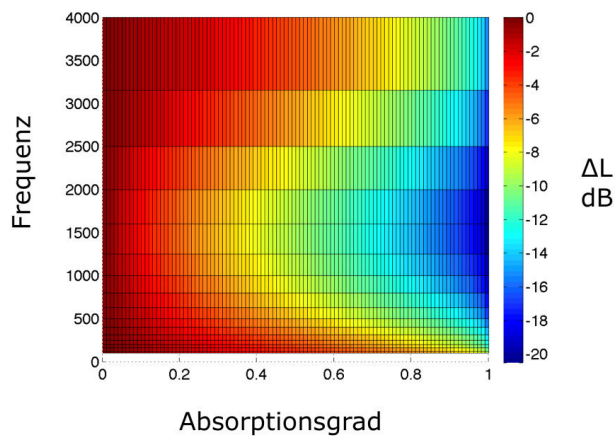
Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen der „statischen“ Messung und der Berechnung. Der generelle Unterschied von ca. 3 dB beruht auf dem Vergleich zwischen Horneffekt in der Ebene des Reifens (dort ist er sicherlich am größten) und dem Horneffekt bzgl. der abgestrahlten Schalleistung, die eine Summe über alle Richtungen darstellt, also auch Richtungen, bei denen der Horneffekt nicht ausgeprägt ist.



**Bild 3.2-28:** Messungen des Horneffektes im Vergleich zu dem berechneten Horneffekt für den rollenden Reifen. Dargestellt ist der Pegelunterschied  $\Delta L$  in dB in Abhängigkeit der Frequenz

### Korrektur der SPERoN-Ergebnisse für schallabsorbierende Oberflächen

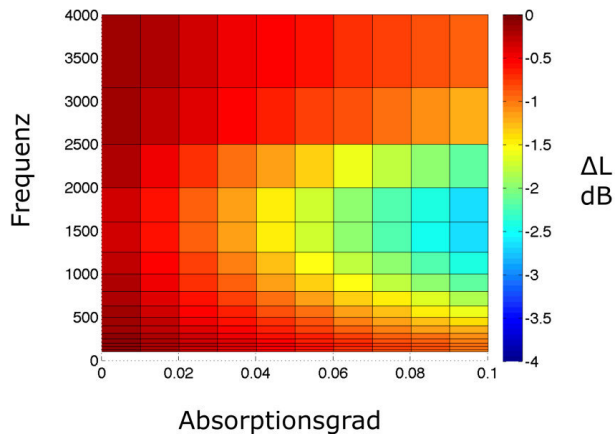
Die gute Übereinstimmung zwischen „statisch“ gemessenem Horneffekt und dem Horneffekt eines rollenden Reifens eröffnet die Möglichkeit für eine einfache Vorgehensweise zur Berechnung von Korrekturfunktionen bzgl. der Abstrahlung vom Reifen für Oberflächen mit verschiedenem Absorptionsgrad. Aus dem statischen Modell (Schallquelle unter dem Reifen) wurde der Horneffekt für die abgestrahlte Schalleistung als Funktion des Absorptionsgrades und der Frequenz berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 3.2-29 dargestellt. Die Berechnungsergebnisse von SPERoN, die die Schallabsorption nicht enthalten, können durch Addition der dargestellten Pegelkorrekturwerte auf die einzelnen Terzpegel entsprechend korrigiert werden. Diese Korrekturen sind auch für kleine Werte des Absorptionsgrades wichtig.



**Bild 3.2-29:** Korrekturwerte  $\Delta L$  für SPERoN als Funktion des Absorptionsgrads und der Frequenz in Hz

Gerade für kleine Werte sind die Änderungen dramatisch, da der Horneffekt stark abnimmt, wenn man von keiner Absorption (keine zugänglichen Hohlräume in der Fahrbahndeckschicht) zu etwas Absorption (kleiner Hohlraumgehalt) übergeht. Um dies besser zu illustrieren, zeigt Bild 3.2-30 die Korrekturfunktion für Werte des Absorptionsgrades unter 0,1. Für 0,1 erreicht man bei 1.000 Hz bereits eine Minderung von 2 dB im Vergleich zur schallharten Straßenoberfläche.





**Bild 3.2-30:** Korrekturwert  $\Delta L$  für SPERoN als Funktion des Absorptionsgrads und der Frequenz in Hz in einem vergrößerten Maßstab für kleine Werte des Absorptionsgrads

Der Einfluss ist am deutlichsten bei ca. 1.000 Hz bis 2.000 Hz. Aus Bild 3.2-29 und Bild 3.2-30 wird auch deutlich, dass bei tieferen Frequenzen (unter 500 Hz) eine Reduktion des Reifen-Fahrbahn-Geräusches mit Hilfe von Absorption kaum möglich ist, da der Horneffekt hier nur einen sehr kleinen Einfluss hat.

### 3.2.3.7 Entwicklung eines physikalischen Modells für die strömungsabhängigen Geräusche

Ein wichtiger Teil der vorliegenden Arbeit betrifft das Erstellen eines Modells für die aerodynamischen Rollgeräusche. Auch wenn das bisherige Modell in SPERoN in den meisten Fällen gut funktioniert, ist es aufgrund seines empirischen Charakters nicht geeignet, physikalische Zusammenhänge sinnvoll zu erläutern und erlaubt nicht notwendigerweise Vorhersagen des Rollgeräuschpegels außerhalb des dem statistischen Modells zugrundeliegende Datensatzes. Dies ist jedoch ein großer Nachteil, wenn es um die Optimierung von Fahrbahnoberflächen über bestehende Technologien hinaus geht. Zur Modellierung bedarf es jedoch einer Klärung wie stark der Beitrag des strömungsabhängigen Geräusches zum Gesamtgeräusch ist und welche Parameter das strömungsabhängige Geräusch auf welche Weise beeinflussen.

#### Geschwindigkeitsexponent

Es ist eine seit langem anhaltende Diskussion, wie stark Reifenschwingungen und strömungsabhängige Geräusche zum Gesamtgeräusch beitragen. In der Literatur werden Reifenschwingungen, also die mechanisch induzierten Rollgeräusche, als dominant bis ca. 1.000 Hz beschrieben. Strömungsabhängige Geräusche – oft als „air pumping“ bezeichnet – werden dagegen als Hauptschallquelle über 1.200 Hz genannt. Dies muss jedoch mehr als Schätzung bezeichnet werden. Eine exakte Untersuchung hierzu gibt es nicht.

Dies ist umso überraschender, da die beiden Mechanismen verschiedene Geschwindigkeitsabhängigkeit aufweisen. Der Schalldruck auf Grund von Strukturschwingungen steigt mit dem Geschwindigkeitsquadrat:  $\sim v^2$ . Der Schalldruck der strömungsabhängigen Geräusche, die Monopol-Charakter aufweisen, also eine Volumenquelle darstellen, steigt mit der vierten Potenz der Geschwindigkeit:  $\sim v^4$ . Dies erlaubt einen Ansatz, bei dem der Gesamtschalldruckpegel  $L_p$  als Funktion der Frequenz  $f$  und der Geschwindigkeit  $v$  wie folgt gegeben ist:

$$\text{Gleichung 4} \quad L_p = 10 \lg[A_R(f, v) \cdot v^2 + A_S(f, v) \cdot v^4] \text{ dB}$$

Dabei sind  $A_R$  die Amplituden der Reifenschwingungen und  $A_S$  die Amplituden der strömungsabhängigen Mechanismen. Beide Amplituden hängen von der Anregung durch die Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche und dem Reifenprofil ab. Diese Amplituden sind frequenzabhängig und leider auch geschwindigkeitsabhängig, da sich mit veränderlicher Geschwindigkeit auch die Wellenlängen der Rauigkeit und die spektralen Komponenten des Reifenprofils ändern, die in einem Frequenzband für die Anregung verantwortlich sind. Betrachtet man jedoch einen glatten Reifen (Slick) und ein relativ gleichmäßiges Rauigkeitsspektrum, kann man  $A_R$  und  $A_S$  als von der Geschwindigkeit unabhängige Amplituden ansehen. Dies führt zu:

$$\text{Gleichung 5} \quad L_p = 10 \lg[A_R(f) \cdot v^2 + A_S(f) \cdot v^4] \text{ dB} ,$$

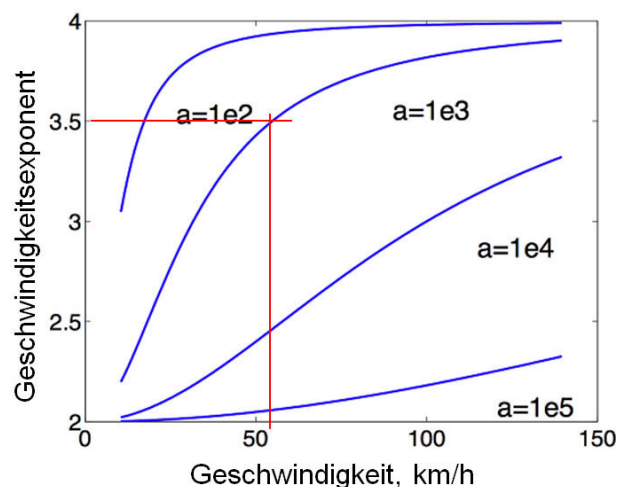
das heißt es bleiben nur die durch den Charakter des Geräuschenstehungsmechanismus gegebenen Geschwindigkeitsabhängigkeiten übrig.

Typischerweise werden Analysen des Geschwindigkeitsexponenten, beispielsweise anhand von Vorbeifahrtmessungen, nur am A-bewerteten Gesamtpegel durchgeführt. Dies ist an sich überraschend, da die Aussagekraft eines solchen Wertes sehr begrenzt ist. Bild 3.2-31 zeigt den resultierenden Geschwindigkeitsexponenten als Funktion des Verhältnisses der Amplituden  $A_R$  und  $A_S$ . Dabei ist:

$$a = \frac{A_R}{A_S}$$

Gleichung 6

In Bild 3.2-31 sieht man deutlich, dass mit ansteigender Fahrgeschwindigkeit  $v$  ein auf diese Weise ermittelter Geschwindigkeitsexponent stark anwächst und selbst für eine kleine Amplitude  $A_S$  (z.B. tausendmal kleiner) ein Exponent in der Größenordnung zwischen 3 und 4 ermittelt wird, wie er oft in der Praxis beobachtet wird.



**Bild 3.2-31:** Geschwindigkeitsexponent als Funktion der Geschwindigkeit und des Amplitudenverhältnisses  $a$

Im Folgenden wird dieser Ansatz zweier Teilschallquellen mit unterschiedlicher Geschwindigkeitsabhängigkeit dazu benutzt, um Vorbeifahrtmessungen aus dem Sperenberg-Projekt zu analysieren.

### Identifizierung der Beiträge strömungsabhängiger Geräusche und Reifenschwingungen zum Vorbeifahrtpegel

Bereits im vorausgegangen Kapitel wurde ein Modell vorgestellt, das die unterschiedliche Abhängigkeit der zwei Schallentstehungsmechanismen von der Fahrgeschwindigkeit  $v$  (Reifenschwingungen  $\sim v^2$  und strömungsabhängige Geräusche  $\sim v^4$ ) ausnutzt, um die Beiträge der Teilschallquellen in den einzelnen Terzbändern zu identifizieren. Dieses Modell wurde noch etwas verfeinert. Ein mathematischer Modellansatz

$$\text{Gleichung 7} \quad L_{p, \text{Modell}}(f_T, v_n) = 10 \lg [p_S^2(f_T) v_n^2 + p_A^2(f_T) v_n^4] \text{ dB}$$

wird benutzt, bei dem die Unbekannten (Quellstärke für die Reifenschwingungen) und  $p_A^2(f_T)$  (Quellstärke für das strömungsabhängige Geräusch) für jede Terz mit der Mittenfrequenz  $f_T$  an die Messwerte mit dem kleinsten Fehlerquadrat angepasst wird:

$$\text{Gleichung 8} \quad |L_{p, \text{Modell}}(f_T, v_n) - L_{p, \text{Messung}}(f_T, v_n)|^2 = \min$$

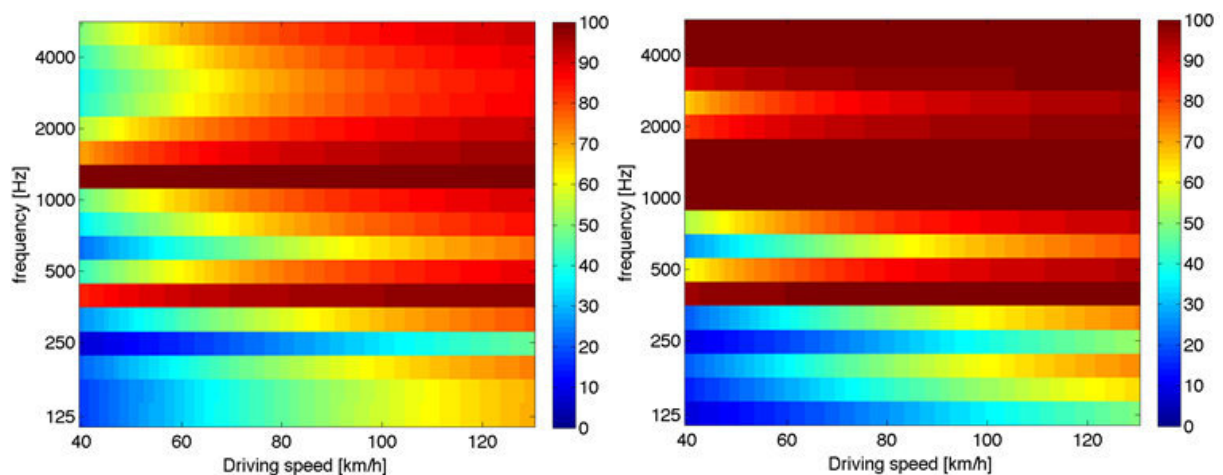
Dabei steht  $n$  für einen Messwert.

Basierend auf den Ergebnissen dieser Analyse kann der Anteil des strömungsabhängigen Geräusches am Vorbeifahrtpegel in jedem Terzband wie folgt berechnet werden:

$$\text{Gleichung 9} \quad \alpha_A = \frac{p_A^2(f_T) v_n^4}{p_S^2(f_T) v_n^2 + p_A^2(f_T) v_n^4} \cdot 100\%$$

Bild 3.2-32 zeigt zwei Beispiele für eine Gussasphaltoberfläche (GA1, Gussasphalt 0/11 mit Abstreung 2/5). Dabei wurden zwei verschiedene Reifen benutzt: ein Slick (DB1) und ein profilierter Reifen (DB3). Die Beschreibung dieser und aller anderen im folgenden Text genannten Oberflächen und Reifen sind im Bericht für das Sperenberg-Projekt [1] beschrieben.

Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung des strömungsabhängigen Geräusches in einem weiten Frequenzbereich speziell für höhere Fahrgeschwindigkeiten. Diese Dominanz ist beim Glattreifen etwas geringer als für den profilierten Reifen, bei dem aufgrund des Laufflächenprofils stärkere Reifenschwingungen angeregt werden. Bei 400 Hz sind durchgehend strömungsabhängige Geräusche mit der entsprechenden Proportionalität  $v^4$  wichtig. Allerdings ist in diesem Frequenzbereich auch der Vorbeifahrtpegel etwas geringer. Gleichzeitig ist das der Bereich, in dem die Schallabstrahlung ganz von den sogenannten „breathing modes“, also Schwingungsmoden bei denen sich der Querschnitt des Reifens ändert, bestimmt. Diese Moden sind schwer anzuregen.



**Bild 3.2-32:** Beitrag  $\alpha_A$  in % des strömungsabhängigen Geräusches am Vorbeifahrtpegel für jede Terz und als Funktion der Fahrgeschwindigkeit. Links: Glattreifen; rechts: profilierter Reifen

Auffallend ist auch, dass für sehr hohe Frequenzen und niedrige Geschwindigkeiten beim profilierten Reifen wieder die Reifenschwingungen wichtig sind. Dies könnte durch tangentielle Anregung auf Grund von stick-slip Bewegungen des Profils verursacht werden. Dies kann jedoch nur eindeutig mit Hilfe eines vollständigen Reifenmodells, das auf dem in Teilprojekt 2 entwickelten Modell aufbaut, geklärt werden.

### **Einfluss der Fahrbahnoberflächenrauigkeit und des Reifenprofils auf das strömungsabhängige Geräusch**

Es gibt (mindestens) zwei unterschiedliche Mechanismen für die Entstehung strömungsabhängiger Geräusche: das Öffnen und Schließen von Hohlräumen im Reifen-Fahrbahn-Kontakt und das Eindringen von Rauigkeitsspitzen der Fahrbahnoberfläche in die Lauffläche des Reifens. Der erste Mechanismus benötigt möglichst glatte Fahrbahnoberflächen und sollte besonders hervortreten, wenn der Strömungswiderstand im Kontakt groß ist. Allerdings reichen kleine Abweichungen vom perfekten Schließen der Hohlräume aus, um diesen Mechanismus zu verringern. Es kann davon ausgegangen werden, dass der zweite Mechanismus der in den meisten Fällen wichtigere Mechanismus ist.

Um dies näher zu studieren wurden Vorbeifahrtmessungen an 7 verschiedenen Fahrbahnoberflächen ausgewertet. Diese Oberflächen wurden unter dem Gesichtspunkt ausgewählt, eine große Bandbreite von verschiedenen Oberflächeneigenschaften zu erhalten. Die folgende Tab. 3.2-3 beschreibt die Oberflächen.

Bezeichnung	Beschreibung
A01	Einlagiger offenporiger Asphalt (Drainasphalt) 4/8 (siehe (1) S. 47)
A04	Asphaltbeton 0/8 nach ISO 10844 (siehe (1), S. 55)
A11	Kunstharzversiegelung auf Asphalt ohne Abstreuerung (siehe (1), S. 66)
A20	Einfache Oberflächenbehandlungen mit den Körnungen 5-8 mm, scharfkantig, (siehe (1), S. 68)
GA1	Gussasphalt 0/11, Abstreuerung mit Grauwacke 2/5 mm, (siehe (1), S. 71)
B02	Beton Planschliff, (siehe (1), S. 75)
B16	Möbelschleifband P24 auf elastischer Zwischenlage, (siehe (1), S. 82)

Tab. 3.2-3: Oberflächen zur Untersuchung der strömungsabhängigen Geräusche

Im Folgenden sind einige der Ergebnisse zusammengefasst. Dabei wurde hauptsächlich ein profilierter Reifen berücksichtigt. Betrachtet man die rauen Oberflächen A20 (siehe Bild 3.2-33 rechts) und GA1 (Bild 3.2-33 links), so sieht man, dass das strömungsabhängige Geräusch über weite Bereiche der bestimmende Mechanismus ist. Dies wird auch am A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel deutlich.

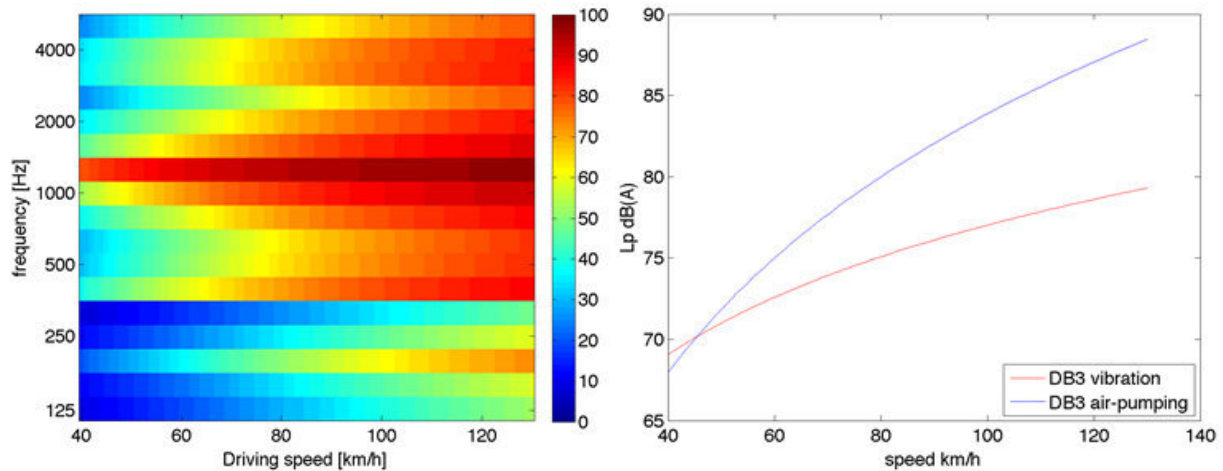
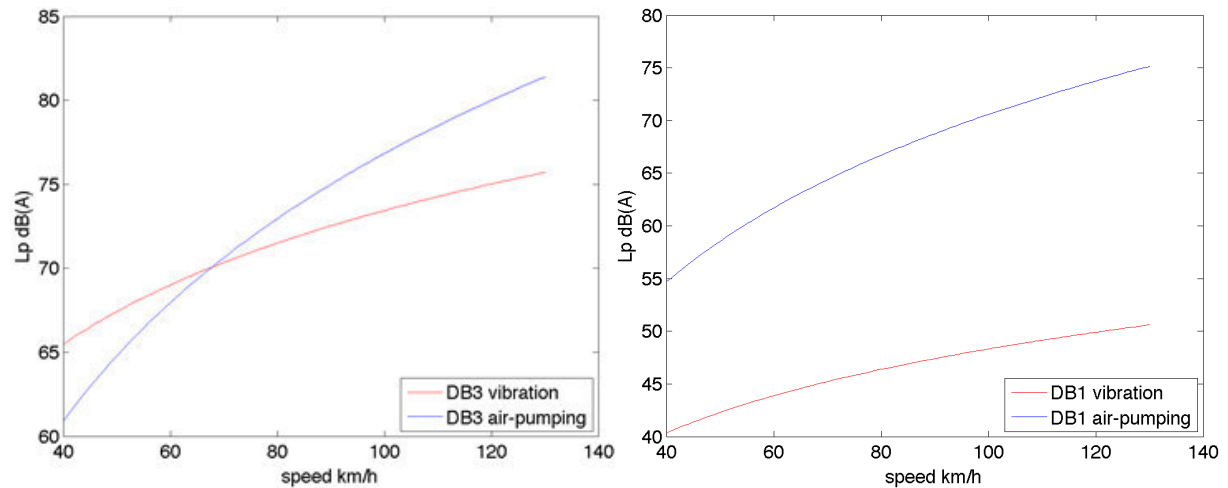
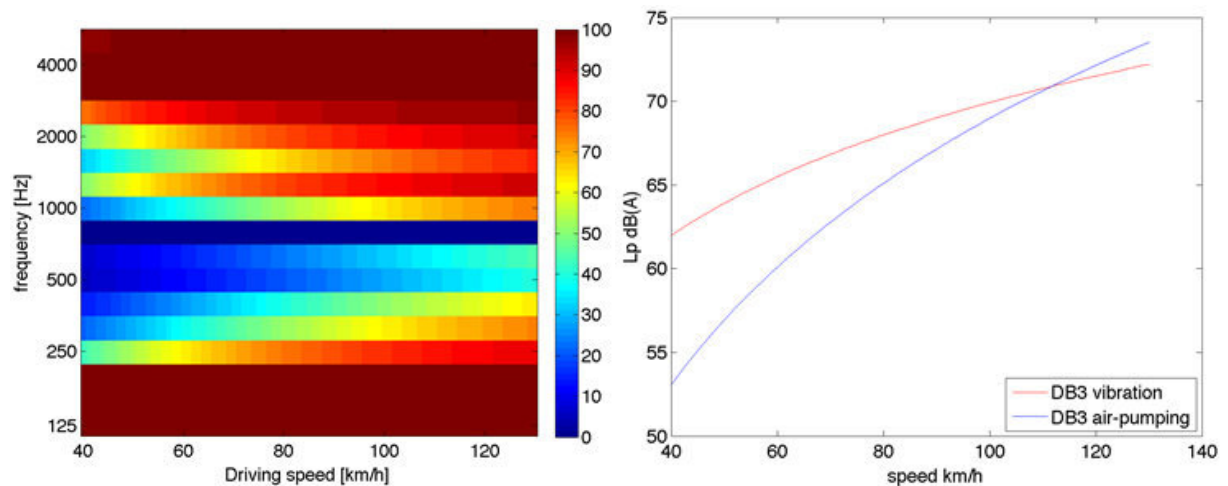


Bild 3.2-33: Ergebnisse für Oberfläche GA1 und A20 mit Reifen DB3. Links: Beitrag  $\alpha_A$  in % des strömungsabhängigen Geräusches am Vorbeifahrtpegel für Oberfläche GA1 in Abhängigkeit der Terzmittenfrequenz und der Fahrgeschwindigkeit; rechts: A-bewertete Schalldruckpegel  $L_p$  in dB(A) für Reifenschwingungen und strömungsabhängige Geräusche auf Oberfläche A20

Bild 3.2-33 rechts macht aber auch deutlich, dass die Reifenschwingungen bis zu hohen Geschwindigkeiten einen Beitrag zum A-bewerteten Gesamtpegel leisten. Wählt man stattdessen eine sehr glatte Oberfläche wie B02, so sehen die Ergebnisse deutlich anders aus (Bild 3.2-34). Der Einfluss der Reifenschwingungen wird stärker. Da es sich um eine sehr glatte Oberfläche handelt, ist dies hauptsächlich dem Reifenprofil zuzuschreiben. Betrachtet man den Glattreifen DB1 auf B02, so ist der Beitrag der Reifenschwingungen gegenüber dem strömungsabhängigen Geräusch vernachlässigbar.



**Bild 3.2-34:** A-bewerteter Schalldruckpegel  $L_p$  in dB(A) für Reifenschwingungen und strömungsabhängige Geräusche für die Oberfläche B02. Links: profilierte Reifen DB3; rechts: Glattreifen DB1



**Bild 3.2-35:** Ergebnisse für Oberfläche A01 und Reifen DB3. Links: Beitrag  $\alpha_A$  in % des strömungsabhängigen Geräusches am Vorbeifahrtpegel für jede Terz und als Funktion der Fahrgeschwindigkeit; rechts: A-bewerteter Schalldruckpegel  $L_p$  in dB(A) für Reifenschwingungen und strömungsabhängige Geräusche

Dies konnte man in dieser Form erwarten. Was jedoch überrascht, ist die starke Zunahme des strömungsabhängigen Geräuschbeitrags für den profilierten Reifen. Die Ursache hierfür ist nicht klar und bedarf weiterer Untersuchungen.

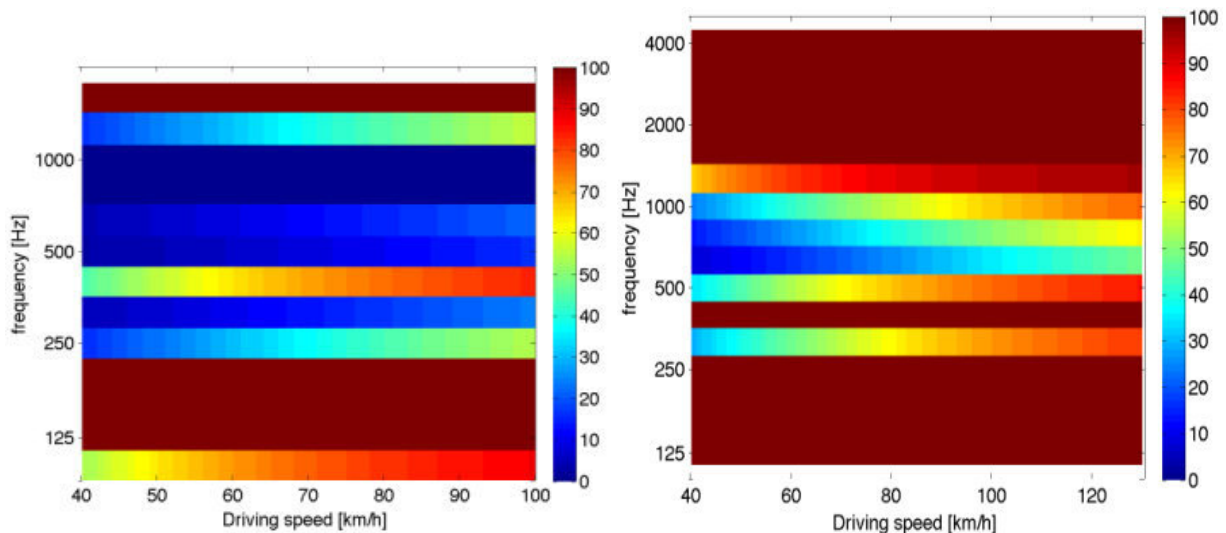
Als letztes Beispiel soll die Oberfläche A01 (Offenporiger Asphalt) betrachtet werden (siehe Bild 3.2-35). Obwohl es sich dabei um eine relativ raue Oberfläche handelt, scheinen die offenen Poren des Belags die strömungsabhängigen Geräusche deutlich zu reduzieren. Es könnte aber auch sein, dass sich die Absorptionseigenschaften der Oberfläche stärker für die lokalen Quellen im Kontakt auswirken als für die Reifenschwingungen. Betrachtet man einen Glattreifen auf dieser Oberfläche so sind die Reifenschwingungen etwas reduziert, aber bestimmen immer noch in weiten Teilen den A-bewerteten Vorbeifahrtpegel.

### Simulation der strömungsabhängigen Geräusche mit einem Modell für die Reifenschwingungen

Ein wichtiger Teil der Arbeit in diesem Teilprojekt betrifft das Erstellen eines Modells für strömungsabhängige Geräusche. Anhand der Analyse der Messergebnisse ist zu sehen, dass sehr glatte Oberflächen zu sehr hohen Beiträgen des strömungsabhängigen Geräusches führen, der sich für profilierte Reifen noch weiter erhöht. Die sogenannte „Belüftung“ der Oberfläche führt zu einer Reduzierung des strömungsabhängigen Geräusches, wenn sie nicht durch Rauigkeit, sondern durch Porosität der Oberfläche realisiert wird, also durch „Belüftung“ in die Deckschicht und nicht durch „Belüftung“ durch die Textur. Für optimierte Reifenprofile und glatte Oberflächen wird das strömungsabhängige Geräusch damit der begrenzende Faktor für eine weitere Reduzierung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches.

Im kompletten Modell für die Simulation des Reifen-Fahrbahn-Geräusches in Teilprojekt II wurde der abgestrahlte Schall für eine Reihe von Geschwindigkeiten berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass auch in diesen Simulationen strömungsabhängige Geräusche auftreten. Bild 3.2-36 zeigt den Vergleich zwischen der Auswertung von Messungen und der Auswertung von Rechenergebnissen.

Das überraschende Ergebnis ist, dass strömungsabhängige Geräusche auch bei niedrigen Frequenzen unter 250 Hz dominant sein können. Auch bei ca. 400 Hz und oberhalb von 1.000 Hz kann das strömungsabhängige Geräusch das Rollgeräusch bestimmen. In diesen Frequenzbereichen sind hauptsächlich ebene Wellen für die Abstrahlung wichtig. Diese führt zu starken Monopolquellen im Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn. Dies wird in weiteren Berechnungen näher untersucht. Dabei stehen die Abstrahleigenschaften des Reifens im Mittelpunkt.



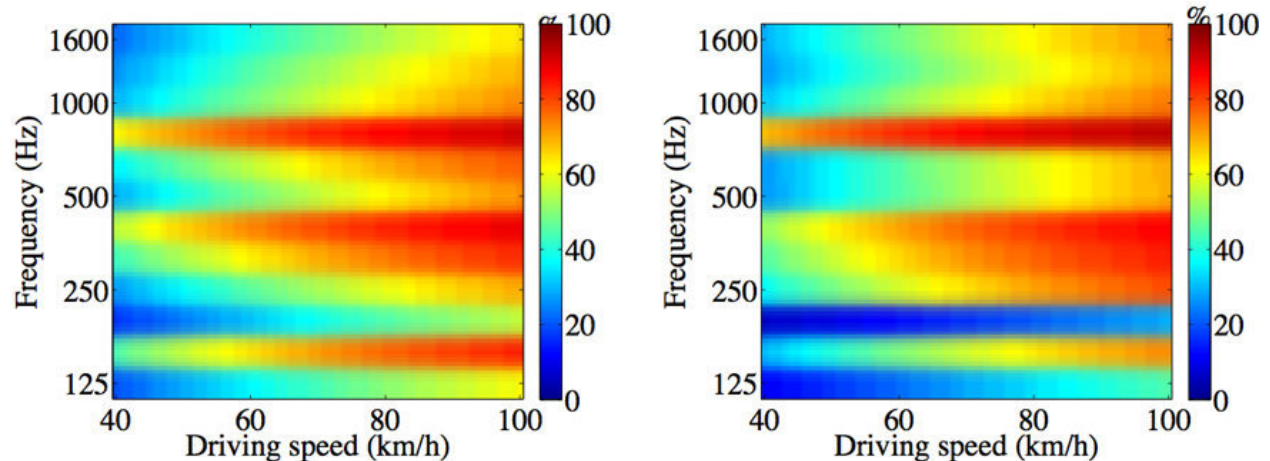
**Bild 3.2-36:** Beitrag  $\alpha_A$  in % des strömungsabhängigen Geräusches zum Rollgeräusch. 100 Prozent bedeutet, dass die strömungsabhängigen Geräusche dominant sind. Links: Berechnungsergebnis für einen profillosen Reifen (slick) bei 70 km/h auf einer ISO Oberfläche; rechts: Messergebnis

### Untersuchung der strömungsabhängigen Mechanismen

Anhand der Analyse der Messergebnisse ist zu sehen, dass viele Oberflächen zu sehr hohen Beiträgen des strömungsabhängigen Geräusches führen, der sich für profilierte Reifen noch weiter erhöht. Dies zeigte sich nicht nur bei hohen Frequenzen, sondern auch im tieffrequenten Bereich. Bisher wurde davon ausgegangen, dass die sogenannte „Belüftung“ der Oberfläche zu einer Reduzierung des Entstehungsmechanismus führt, wenn sie nicht durch Rauigkeit, sondern durch Porosität der Oberfläche realisiert wird.

Im kompletten Modell (Teilvorhaben II) für die Simulation des Reifen-Fahrbahn-Geräusches wurde der abgestrahlte Schall für eine Reihe von Geschwindigkeiten berechnet. Dabei wurde festgestellt, dass auch in diesen Simulationen „strömungsabhängige Geräusche“ auftreten. In einem weiteren Schritt wurde die Fahrbahnoberfläche bei der Abstrahlung als akustisch transparent (total schallabsorbierend) angesetzt. Es wurde erwartet, dass damit zum Einen die abgestrahlte Schalleistung verringert wird, zum Anderen aber auch der Anteil des „strömungsabhängigen Geräusches“ deutlich reduziert wird.

Das überraschende Ergebnis zeigt, dass die strömungsabhängigen Geräusche erhalten bleiben, auch wenn die Fahrbahnoberfläche als akustisch transparent angenommen wird. Dies bedeutet, dass die Belüftung des Kontaktes keine Rolle spielt für das Auftreten von strömungsabhängigen Anteilen im Geräusch. Man kann daraus auch schließen, dass es sich bei der starken  $\sim v^4$  Abhängigkeit in den Vorbeifahrtmessungen um Reifenschwingungen handeln muss, die in ihrer Überlagerung einen Volumenfluss erzeugen.



**Bild 3.2-37:** Beitrag des strömungsabhängigen Geräusches zum Rollgeräusch für einen Glattreifen mit einer Geschwindigkeit von 70 km/h auf einer rauen Oberfläche. 100 Prozent bedeutet, dass das strömungsabhängige Geräusch dominant ist. Links: Berechnungsergebnis für eine akustisch schallharte Fahrbahnoberfläche; rechts: Berechnungsergebnis für eine akustisch „transparenten“ Fahrbahnoberfläche

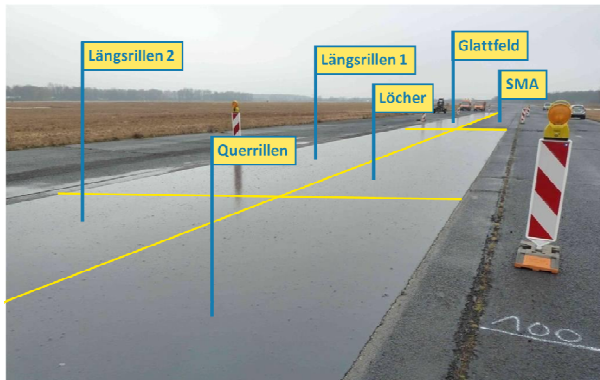
In Bild 3.2-37 ist zu sehen, dass der abgestrahlte Schall für den Fall der akustisch transparenten Oberfläche deutlich geringer ist als für den Fall der schallharten Fahrbahnoberfläche. Rechnet man auf einer gegebenen Hüllfläche die abgestrahlte Schalleistung für beide Fälle in Bild 3.2-37, so kann man sehen, dass dies nur auf der Verringerung des Horneffektes während des Rollens beruht, wie bereits gezeigt wurde.

### 3.2.3.8 Experimentelle Bestimmung des Einflusses von Texturmerkmalen auf die strömungsbedingten Reifen-Fahrbahn-Geräusche

#### Herstellung der Testfelder auf dem Versuchsgelände Geilenkirchen

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeiten bestand in schalltechnischen Untersuchungen an speziellen Testfeldern, die so konzipiert waren, dass die Anregung der strömungsinduzierten Rollgeräusche weitgehend isoliert von den mechanisch induzierten Reifenschwingungen stattfand. Vor diesem Hintergrund mussten genau definierte Modelloberflächen hergestellt werden. Derartige Oberflächen können aus Gründen der Verkehrssicherheit nur auf nichtöffentlichen Bereichen hergestellt werden. Hier konnte durch die BAST ein Gelände auf der NATO-Airbase angemietet werden.

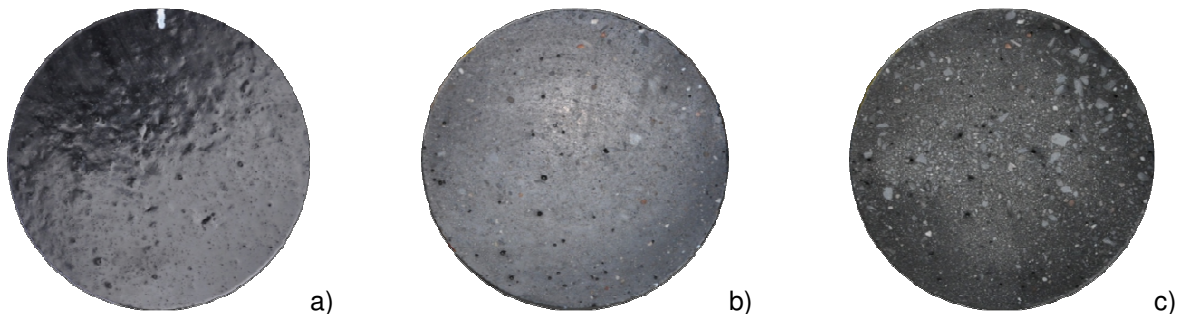
In Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern wurden verschiedene Modelloberflächen entworfen. Grundlagen hierfür wurden im FE-Projekt „Grundlagen zur Erweiterung des Simulationsmodells SPERoN zur akustischen Optimierung von Fahrbahnbelägen“ [5] erarbeitet. Für die Durchführung der akustischen Messungen wurde die Länge der Testfelder auf 60 m und die Breite auf 3,50 m festgelegt. Insgesamt wurden sechs Testfelder, ein Referenzfeld (SMA 8) und angrenzende Beruhigungszonen gebaut. Die Realisierung der SPERoN-Testfelder im Frühjahr 2012 stellte eine große Herausforderung dar, denn die geplanten Studien erforderten eine weitgehend makro- und megatexturfreie Oberfläche, die in hoher Präzision mit Löchern und Rillen strukturiert werden musste. Vor diesem Hintergrund wurden in enger Zusammenarbeit der Partner Müller BBM GmbH, Willy Dohmen GmbH & Co.KG und der BAST geeignete Herstellungsverfahren diskutiert, die notwendigen Bearbeitungsschritte entwickelt und sukzessive umgesetzt. Bild 3.2-38 zeigt die Anordnung und Lage der Testfelder.



**Bild 3.2-38:** Übersicht der SPERoN-Testfelder nach dem Einbau des Gussasphalts

Im Februar 2012 erfolgte der Einbau des Gussasphalts. In die Gussasphaltdeckschicht wurden gemäß den Entwürfen fünf verschiedene Modelloberflächen eingearbeitet (Lochfeld, Querrillen, Längsrillen 1, Längsrillen 2, Glattfeld). Die Anordnung von zwei, in Reihen hintereinander geschalteten Testfeldern bot den Vorteil, dass bei den vorgesehenen experimentellen Untersuchungen häufig drei Testfelder in einem Durchgang erfasst werden konnten (z. B. die kontrollierte Vorbeifahrt durch Müller BBM GmbH).

Im ersten Arbeitsgang sollte auf der Gussasphaltdeckschicht mittels Schleifen und Polieren zunächst eine Glattfläche realisiert werden, die die Anregung von Reifenschwingungen beim Abrollen des Reifens auf der Fahrbahn weitgehend unterbindet. Um die Qualität der nach einem Schliff zu erwartenden Oberflächenstruktur vorab einschätzen zu können, wurden den Testfeldern zunächst Proben entnommen und die Entwicklung der Oberflächenstruktur in Abhängigkeit vom Schleifprozess im Labor nachgestellt. Bild 3.2-39 zeigt anhand eines Bohrkerns, der im Rahmen dieser Vorversuche poliert wurde, wie die Mörtelphase an der Oberfläche mit zunehmendem Abtrag in die Gesteinsphase übergeht und sich eine makro- und megatexturarme Oberfläche ausbildet.



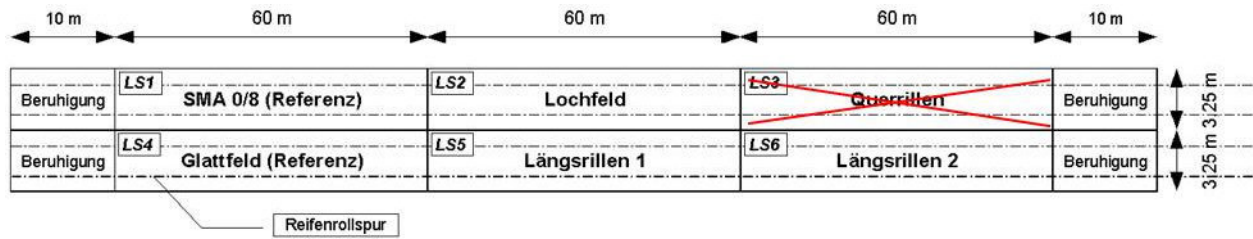
**Bild 3.2-39:** Oberfläche eines Bohrkerns mit einem Durchmesser von 150 mm vor dem Schleifen (a) und nach dem Schleifen bei einem Abtrag von insgesamt 1,01 mm (b) und 1,49 mm (c).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden die Schleifarbeiten auf den Testfeldern in einem 60 cm breiten Abschnitt im Bereich der Reifenrollspuren ausgeführt. Es wurden mehrere Schleifgänge nacheinander mit immer feiner werdenden Schleifaufsätzen vorgenommen, um die gewünschte Glattfläche zu schaffen. Da der Einschluss von kleineren Luftlöchern während des Einbaus der Gussasphaltschicht unvermeidbar war, wurden diese nach den groben Schleifgängen durch Aufbringen von Porenfüller über die gesamte Rollspurbreite verfüllt. Anschließend wurde der letzte Feinschliff durchgeführt. Durch Texturmessungen der Firma Müller BBM GmbH konnte nachgewiesen werden, dass die so geschaffene Oberfläche eine ausreichend glatte Textur aufweist, um die mechanische Anregung des Reifens zu minimieren.

Um die geschliffene Gussasphaltfläche gemäß den Entwürfen mit Löchern und Rillen zu strukturieren, wurden verschiedene Verfahren hinsichtlich ihrer Präzision getestet. Die Längsrillen konnten mit einer Fräse in den geschliffenen Gussasphalt eingebracht werden. Für die Herstellung des Lochfeldes wurde eine spezielle Bohrmaschine mit Doppelgelenkarm angefertigt, mit der die Löcher entlang einer Schablone von Hand gebohrt wurden (Bild 3.2-40). In Vorversuchen zur Fertigung des Querrillensfeldes hatte sich gezeigt, dass mit Hilfe einer Fräsmaschine keine ausreichende Präzision zur Realisierung von engen Rillen erreicht

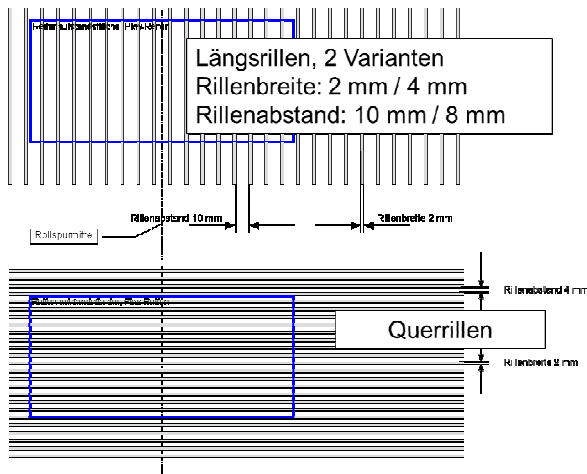


werden kann. Daher mussten Kunststoffplatten mit den erforderlichen Profilen künstlich hergestellt und in die Deckschicht eingelassen werden.



**Bild 3.2-40:** Anordnung und Lage der Testfelder auf dem Versuchsgelände der NATO Air Base Geilenkirchen (Quelle Landkarte: OpenStreetMap)

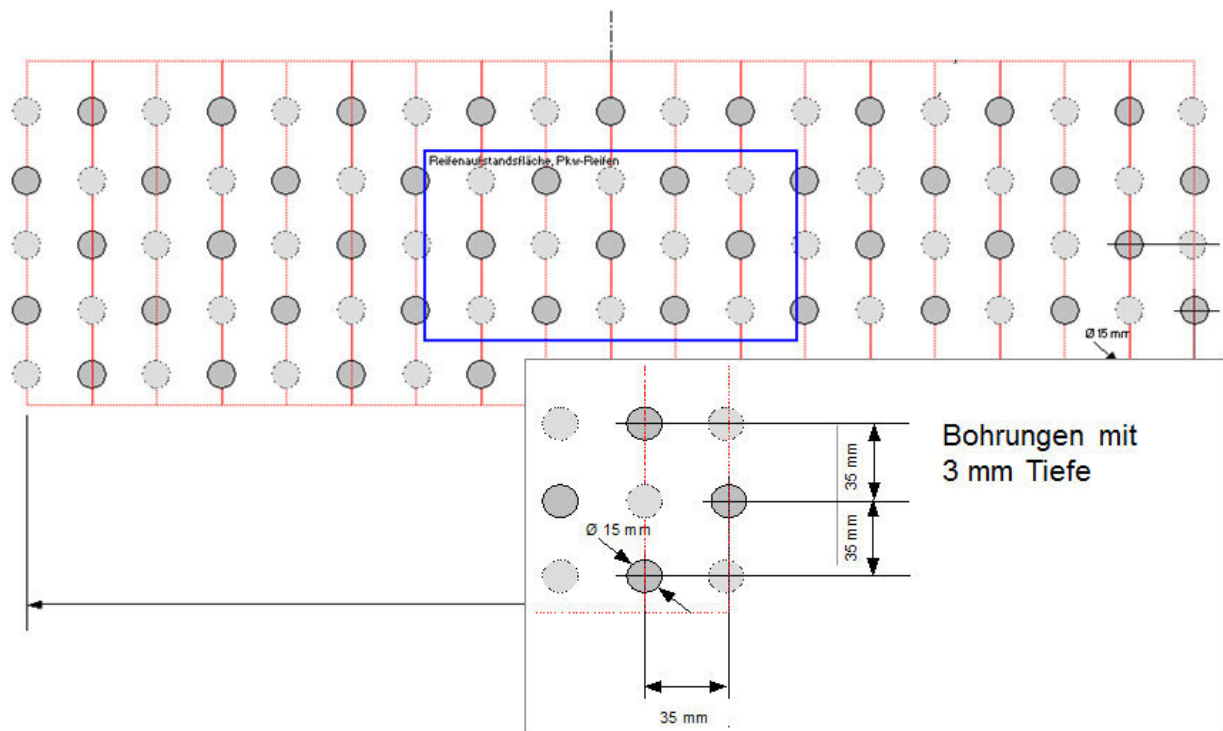
Die folgenden Bilder zeigen die Entwürfe der Modelloberflächen sowie die fertiggestellten Oberflächen.



**Bild 3.2-41:** Entwurf der Längsrillenfelder (oben) und der geplanten aber nicht ausgeführten Querrillenfelder (unten)



**Bild 3.2-42:** Oberflächenbilder der tatsächlich ausgeführten Längsrillenfelder. Links: nom. Rillenbreite 2 mm, nom. Rillenabstand 10 mm; rechts: nom. Rillenbreite 4 mm, nom. Rillenabstand 8 mm



**Bild 3.2-43:** Entwurf des tatsächlich ausgeführten Lochfeldes LS2



**Bild 3.2-44:** Fertiggestelltes Lochfeld



**Bild 3.2-45:** Detailaufnahme der Oberfläche des fertiggestellten Lochfelds



**Bild 3.2-46:** Oberflächen des fertiggestellten Längsrillenfelds LS5 (links) und des fertiggestellten Lochfelds (rechts)

Die messtechnische Erfassung der Geräusche anhand von Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen stand dabei im Vordergrund. In Bild 3.2-38 ist die Anordnung der sechs Testfelder LS1 bis LS6 und deren Position auf dem Versuchsgelände der NATO Air Base Geilenkirchen dargestellt.

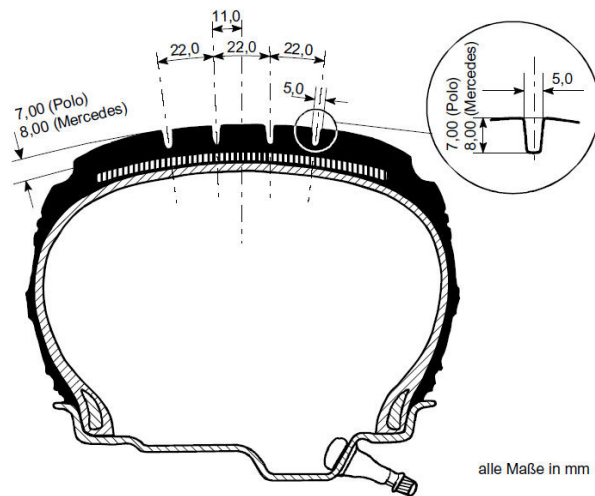
Die Testfelder LS1 und LS4 dienen als Referenztestfelder und repräsentieren im Fall von LS1 die Ausführung eines herkömmlichen, weit verbreiteten Fahrbahnbelagtyps Splittmastixasphalt SMA 8S und im Fall von LS4 eine makro- und megatexturfreie Oberfläche (Glattfeld), die den Reifen texturseitig nicht oder kaum zu mechanischen Schwingungen anregt.

### **Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen**

Aufgabe war, die Vorbeifahrtgeräusche eines Pkws mit verschiedenen Reifen und verschiedenen Geschwindigkeiten auf den unterschiedlichen Testfeldern unter definierten und gut dokumentierten Bedingungen zu messen. Folgende Reifen wurden hierfür vom Projektpartner Continental geliefert und bei den Messungen eingesetzt:

- Profilloser Reifen (slick)
- Reifen mit vier Längsrillen mit den Abmessungen wie im Sperenberg-Projekt
- PremiumContact (Seriensommerreifen)
- EcoContact (Seriensommerreifen)
- WinterContact (Serienwinterreifen)

Die Reifen wurden mit den Abmessungen 205/55 R16 geliefert. Bild 3.2-47 zeigt die Profilierung des Längsrillenreifens.



**Bild 3.2-47:** Profilierung des Längsrillenreifens

In Tab. 3.2-4 sind die Daten der für die Messungen zur Verfügung stehenden Reifen zusammengefasst.

Hersteller	Bezeichnung	Dimension	Felgenmaß
Continental	slick	205/55 R16	6,5J x 16 ET42
Continental	Längsrillen	205/55 R16	6,5J x 16 ET42
Continental	PremiumContact 3	205/55 R16	6,5J x 16 ET42
Continental	EcoContact 5	205/55 R16	6,5J x 16 ET42
Continental	WinterContact	205/55 R16	6,5J x 16 ET42

**Tab. 3.2-4:** Daten der Messreifen

In Bild 3.2-48 sind die für die erste Messkampagne zur Verfügung stehenden Reifen in Fotos abgebildet.

Als Testfahrzeug wurde ein aktueller VW Passat verwendet. Als Reifeninnendruck wurde der vom Hersteller VW für normale Fahrzeugbeladung angegebene Nominalwert von 2,4 bar auf beiden Achsen eingestellt. Der angegebene Reifendruck wurde im kalten Zustand, i.a. nach Montage der Reifen, eingestellt. Die Ausgangssituation vor jeder Messreihe ist damit immer die gleiche. Der tatsächliche Reifendruck wurde vor jeder Testfahrt geprüft und im Messprotokoll vermerkt.

**Slick**



**EcoContact 3**



**PremiumContact3**



**WinterContact TS850**



**Bild 3.2-48:** Fotos der in der ersten Messkampagne verwendeten Reifen für die Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen

In ISO 13325 „Reifen - Verfahren zur Messung des Reifen/Fahrbahn-Geräuschs beim Rollen“ sind Hinweise enthalten, wie der Reifendruck für Vorbeifahrtmessungen eingestellt werden soll. Die durchschnittliche Last pro Reifen soll etwa  $75\% \pm 5\%$  des load index des Reifens betragen. Als oberer und unterer Grenzwert für die Last pro Reifen sind 90% bzw. 70% des load index genannt. Der load index gibt die Masse pro Reifen an, mit der ein Reifen maximal belastet werden darf. Um festzustellen, mit welcher Masse die Reifen bei mit Fahrer besetztem Fahrzeug belastet sind, wurde das Testfahrzeug vor den Messungen vollgetankt und inklusive Fahrer mit einer Fahrzeugwaage verwogen.

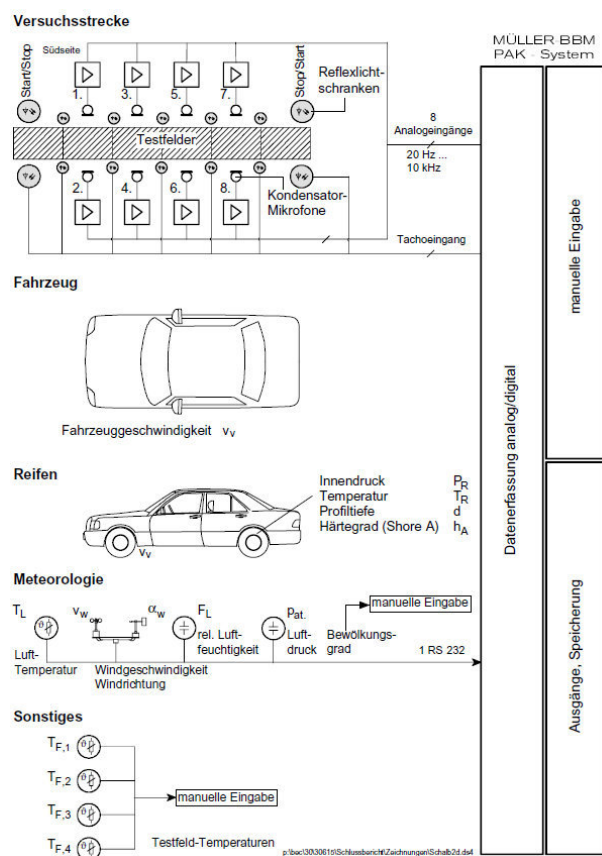
Anhand des Wiegeergebnisses war festzustellen, dass für alle Reifen eine Zuladung des Fahrzeugs von 200 kg erfolgen musste, um die oben angegebene Anforderung einzuhalten.

Die Messreifen wurden vor Beginn der ersten Messreihe über eine Strecke von 100 km eingefahren. Vor Beginn jeder Messreihe wurde der jeweilige Reifensatz 15 Minuten lang warmgefahren. Die Lufttemperatur hat  $10^\circ\text{C}$  nicht unterschritten.

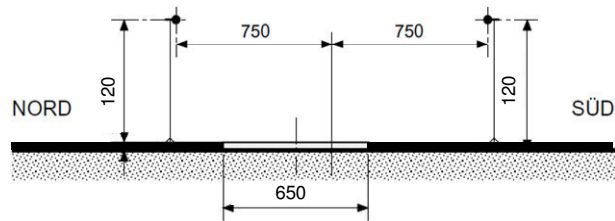
Die Messanordnung und Aufstellung der Mikrofone entsprach vollständig derjenigen im Sperenberg-Projekt [1]. Bild 3.2-49 gibt die Anordnung aus dem Sperenberg-Projekt wieder. Der einzige Unterschied ist, dass auf der NATO Air Base Geilenkirchen nur drei Testfelder anstelle von vier Testfeldern hintereinander angeordnet sind.

Die Testfelder in Geilenkirchen sind jeweils 60 m lang. Die Mikrofone wurden zu beiden Seiten der Testfelder in der Mitte bei 30 m angeordnet. Die Mikrofonaufstellung erfolgte in 7,5 m Abstand zur Mittelachse der zu messenden Testfelder und in 1,2 m Höhe über Testfeldoberkante.

Bild 3.2-50 und Bild 3.2-51 zeigen die Aufstellung der Mikrofone im Lageplan und im Schnitt.



**Bild 3.2-49:** Messanordnung und Messgrößen der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen



**Bild 3.2-50:** Messaufstellung bei Messung der Testfelder auf der Südseite. Zeichnung nicht maßstäblich. Alle Maße in cm



**Bild 3.2-51:** Aufstellung der Messgeräte zur Messung der Kontrollierten Vorbeifahrt

Die Messungen wurden wie im Sperenberg-Projekt [1] mit ausgeschaltetem Motor durchgeführt. Das Fahrzeug wurde hierzu bis zur Nominalgeschwindigkeit beschleunigt, das Getriebe vor Erreichen der Testfelder ausgekuppelt und der Motor ausgeschaltet. Das Fahrzeug rollt dann bis Erreichen des Endes der jeweiligen Testfeldreihe aus.

Insgesamt wurden die Messungen mit folgenden Variationen durchgeführt:

- 5 Reifensätze (slick, Längsrillenreifen, 2 Sommerreifen und 1 Winterreifen)
- 4 Geschwindigkeiten (nominal 50, 75, 95, 120 km/h)
- 6 Testfelder
- 2 Fahrtrichtungen
- 2 Mikrofone pro Testfeld, jeweils eines auf jeder Seite des jeweiligen Testfelds
- 3 malige Wiederholung jeder Einzelmessung pro Fahrtrichtung und Geschwindigkeit

Die Testfelder wurden vor Beginn der Messreihe gereinigt. Für die Messungen waren die Oberflächen trocken. In den Löchern und Rillen stand kein Wasser. Bild 3.2-51 zeigt die Aufstellung der Messgeräte (Mikrofone, Lichtschranken).

### Ergebnisse der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen

Bild 3.2-52 zeigt den Zeitverlauf des Schmalbandspektrums ohne A-Bewertung (Campbell-Diagramme) mit einer Frequenzauflösung von 4 Hz für vollständige Vorbeifahrten mit dem Glattreifen auf allen Testfeldern mit den Geschwindigkeiten  $v = 50$  km/h und  $v = 120$  km/h. Dargestellt sind die Zeitverläufe sowohl für die Mikrofonposition auf der Süd- als auch auf der Nordseite der Testfelder. Zusätzlich dargestellt sind die Zeitverläufe des A-bewerteten Gesamtschalldruckpegels  $L_{pA}$ .

Wie den Diagrammen für die Geschwindigkeit  $v = 50$  km/h zu entnehmen ist, weist der Verlauf des A-bewerteten Gesamtschalldruckpegels in den meisten Fällen kaum ein Maximum auf, insbesondere nicht auf dem Glattfeld (LS1) und dem Längsrillenfeld 1. Das bedeutet, dass die Fremdgeräusche aufgrund des Bodenbetriebs auf der NATO Air Base während der Messzeit zu so hohen Schalldruckpegeln führen, dass die Vorbeifahrtgeräusche des Glattreifens kaum gemessen werden konnten. Der Vorbeifahrtmaximalpegel auf dem Lochfeld (LS2) liegt mit  $L_{AFmax} = 76$  dB(A) dagegen deutlich, d.h. mehr als 10 dB über dem Fremdgeräuschpegel.

Bei  $v = 120$  km/h stellen sich Schalldruckpegel ein, die insgesamt deutlich über dem Fremdgeräuschpegel liegen, auch am Anfang und am Ende des jeweiligen Testfelds, so dass auch die Auswertung des Zeitverlaufs des Schmalbandspektrums über die gesamte Länge jedes Testfelds gelingt. Der Vergleich des Glattfelds mit dem Längsrillenfeld 1 und dem Lochfeld zeigt, dass die aerodynamischen Geräusche im Reifen-Fahrbahn-Kontakt offenbar empfindlich auf die Strömungsverhältnisse in Rollrichtung des Reifens reagieren. Längsrillenfeld 1 zeigt gegenüber dem Glattfeld kaum eine Zunahme der Rollgeräuschpegel. Bei tiefen

Frequenzen bis etwa 400 Hz ist das Spektrum bestimmt durch die aerodynamischen Geräusche an der Karosserie. Im darüberliegenden Frequenzbereich treten kaum Veränderungen der spektralen Pegel gegenüber dem Glattfeld ein.

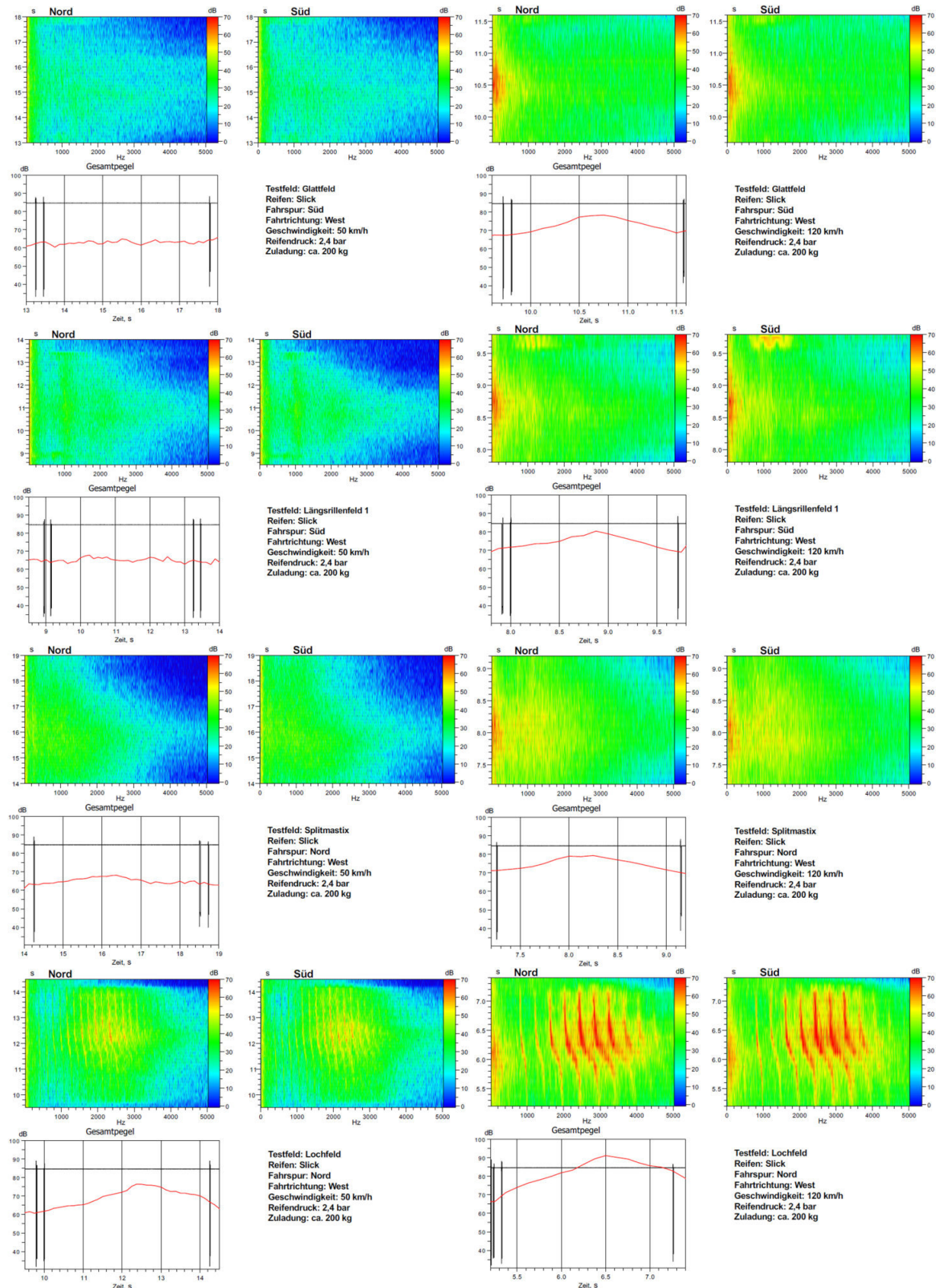
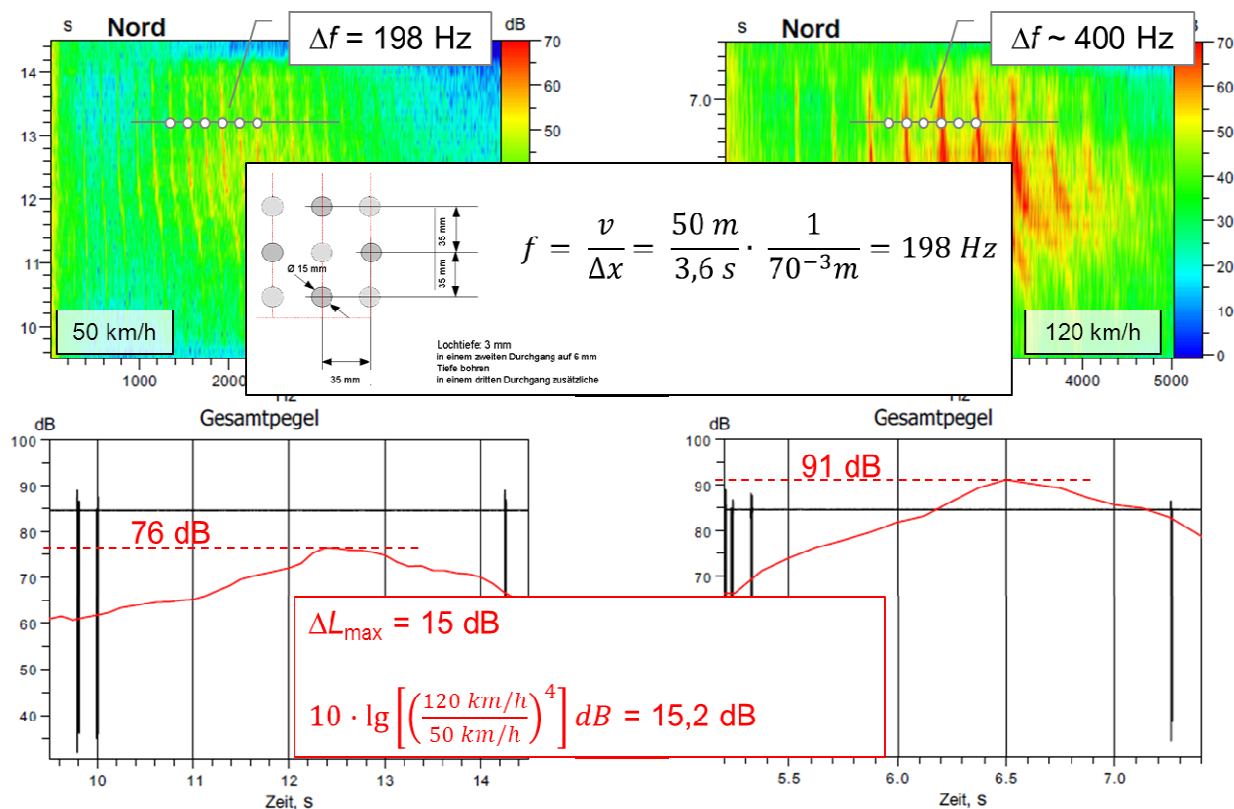


Bild 3.2-52: Campbell-Diagramme und Pegel-Zeitverläufe der Vorbeifahrtgeräusche auf den Testfeldern

Erst bei Behinderung oder Verhinderung der Strömungsvorgänge in Rollrichtung, wie dies auf dem Lochfeld explizit gegeben ist, treten massive aerodynamische Geräusche mit hohen Schalldruckpegeln auf. Der Vorbeirollpegel beträgt auf diesem Testfeld bei 120 km/h über 90 dB(A). Das entspricht einem Schallleistungspegel  $L_{WA}$  von über 115 dB(A). Die Frequenzverschiebung des harmonischen Spektrums der tonalen Rollgeräusche während der Vorbeifahrt ist auf den Dopplereffekt zurückzuführen.

Dass die gemessenen Schalldruckpegel tatsächlich auf aerodynamische Vorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zurückzuführen sind, lässt sich anhand zweier Überlegungen nachvollziehen. Bild 3.2-53 zeigt die Campbell-Diagramme mit den Frequenzabständen des harmonischen Spektrums der Vorbeirollgeräusche auf dem Lochfeld bei Nominalgeschwindigkeiten von  $v = 50$  km/h und von  $v = 120$  km/h.

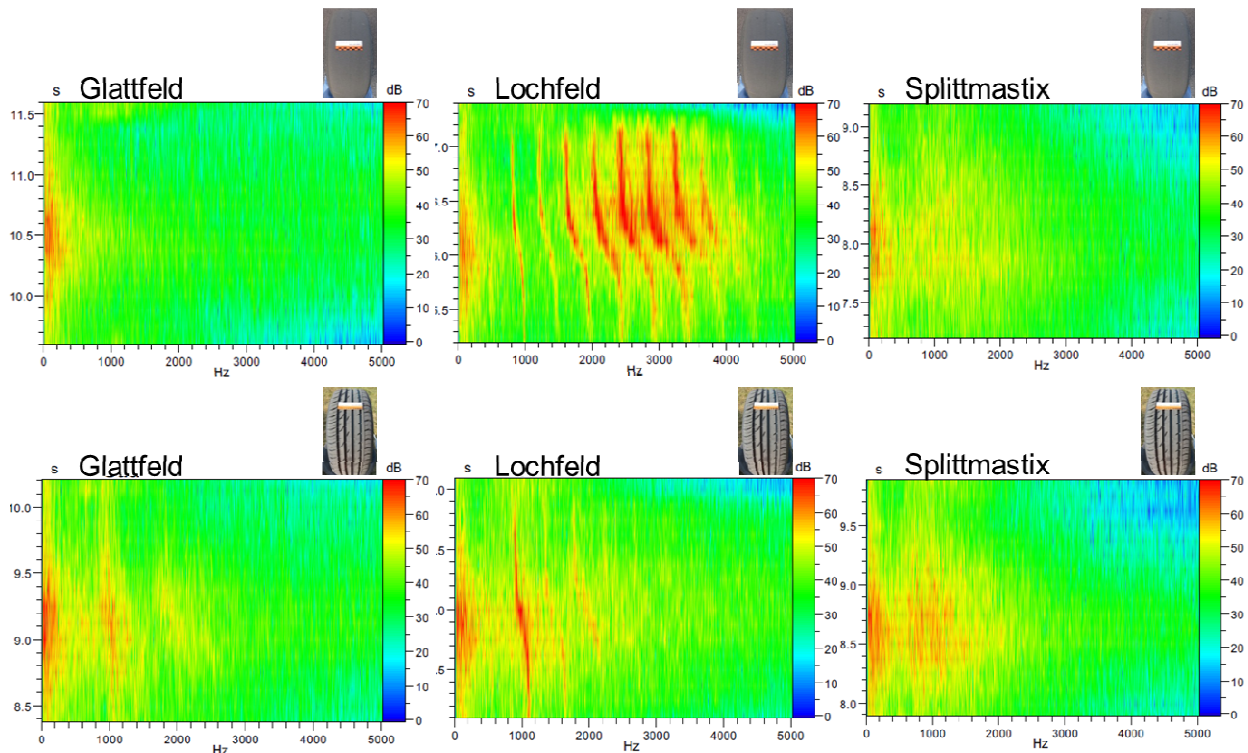


**Bild 3.2-53:** Geschwindigkeitsabhängigkeit und spektraler Zusammenhang der aerodynamisch induzierten Rollgeräusche auf dem Lochfeld

Die Grundfrequenz des harmonischen Spektrums beträgt bei 50 km/h 198 Hz, was aus dem Frequenzabstand der Spektralanteile abgeleitet werden kann. Die Frequenz von 198 Hz kann ihrerseits aber auch aus dem Lochabstand in Längsrichtung von 70 mm abgeleitet werden, wie in Bild 3.2-52 dargestellt ist. Es besteht also ein direkter Zusammenhang zwischen der Geometrie des Lochfelds und dem ermittelten Geräuschspektrum. Bei 120 km/h liegt der Frequenzabstand und damit die Grundfrequenz etwas über 400 Hz.

Wertet man die Pegeldifferenz der Gesamtschalldruckpegel für 50 km/h und 120 km/h aus ergibt sich ein Wert von rund 15 dB. Dies entspricht exakt dem zehnfachen Logarithmus der vierten Potenz des Verhältnisses der beiden Geschwindigkeiten. Das Geräusch ist damit tatsächlich einer Monopolschallquelle zuzuordnen.





**Bild 3.2-54:** Campbell-Diagramme (Pegel-Zeit-Verlauf des Vorbeirollgeräuschspektrums) der Vorbeirollgeräusche für den profillosen Reifen (oben) und den PremiumContact3-Reifen (unten), auf Glattfeld, Lochfeld und Splittmastixasphalt,  $v = 120$  km/h

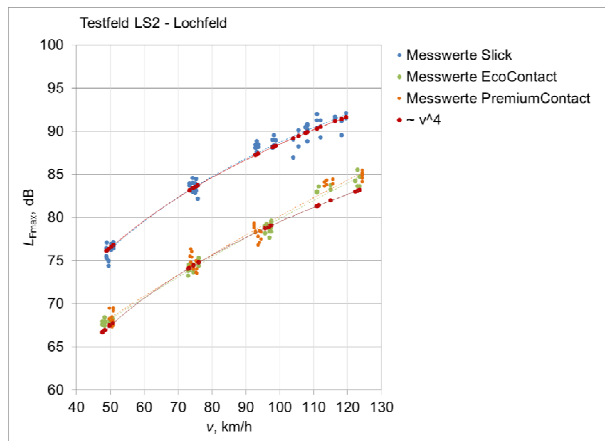
Bild 3.2-54 zeigt den Pegel-Zeitverlauf des Vorbeirollgeräuschspektrums für den Glattreifen im Vergleich zum PremiumContact3-Reifen auf drei Testfeldern für die Geschwindigkeit  $v = 120$  km/h. Die Campbell-Diagramme für den Glattreifen zeigen nochmals deutlich den Einfluss der aerodynamischen Geräuschregung durch Schließen und Öffnen der Kavitäten des Lochfelds. Ein effizientes Öffnen und Schließen von Kavitäten durch den Glattreifen findet auf der feinrauen Splittmastixasphaltoberfläche dagegen nicht statt. Auch wenn diese Vorgänge auf der rauhen und isotropen Oberfläche nicht periodisch auftreten können, zeigen die Schalldruckpegel im mittleren und hohen Frequenzbereich aber auch Werte von nicht mehr als 30 dB bis 45 dB.

Tauscht man die Rauigkeit der Fahrbahnoberfläche gegen einen „rauen“, das heißt profilierten Reifen aus, ergibt sich ein ähnlicher Effekt. Die deutliche Ausprägung des durch die Kavitäten hervorgerufenen aerodynamischen Geräuschs auf dem Lochfeld verschwindet nahezu vollständig bei Verwendung des profilierten Serienreifens. Wie auf dem Glattfeld tritt die erste Blockharmonische des Reifens mit einer Frequenz von etwa 920 Hz|re.  $v = 33$  m/s in Erscheinung, die grundsätzlich mechanisch bedingt ist. Allerdings stellt sich die Frage, woher der deutliche Pegelunterschied zwischen Glattfeld und Lochfeld bei dieser Frequenz rührt. Ein aerodynamischer Geräuschanteil im Falle des Lochfelds kann daher nicht ausgeschlossen werden. Das tonale aerodynamische Geräusch trägt bei mittleren und hohen Frequenzen jedoch nur noch ansatzweise zum Spektrum bei.

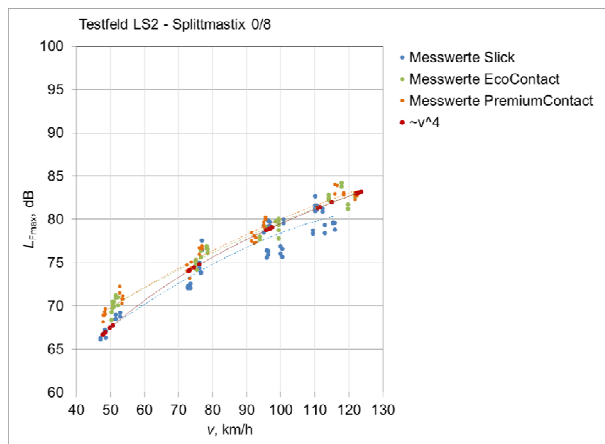
Bild 3.2-55 zeigt die Abhängigkeit der gemessenen Werte des nicht A-bewerteten Vorbeirollmaximalpegels  $L_{F_{\max}}$  von der Rollgeschwindigkeit für drei Reifentypen auf dem Lochfeld. In das Diagramm sind zusätzlich punktierte Linien als logarithmische Kurvenanpassungen an die Messwerte eingetragen. Im Vergleich hierzu enthält das Diagramm auch Punkte und Anpassungskurven (rot), die sich bei einer Abhängigkeit des Vorbeirollpegels von der Geschwindigkeit mit einem Exponenten 4 für aerodynamische Monopolquellen ergäben. Wie dem Bild zu entnehmen ist, folgen die Messwerte für den Glattreifen der  $\sim v^4$ -Kurve nahezu perfekt, wogegen bei den profilierten Reifen bei niedrigen und hohen Geschwindigkeiten deutliche Abweichungen von dieser Abhängigkeit auftreten. Bei niedrigen Geschwindigkeiten verlaufen die Messkurven flacher, bei höheren Geschwindigkeiten dagegen steiler. Das bedeutet, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten der Entstehungsmechanismus der mechanischen Geräuschregung, für den eine Geschwindigkeitsabhängigkeit von  $\sim v^2$  zu erwarten ist, die Messergebnisse mit beeinflusst, wogegen sich bei höheren Geschwindigkeiten ein weiterer aerodynamischer Geräuschentstehungsmechanismus mit einer stärkeren Geschwindigkeitsabhängigkeit bemerkbar macht. Aeroakustische Dipolquellen weisen eine Geschwindigkeitsabhängigkeit von  $\sim v^6$  auf und treten in vielen Situationen der Umströmung fester Strukturen gleichzei-

tig mit Monopolquellen auf. Eine solche Konstellation muss hier gegeben sein, da sich die gemessene Geschwindigkeitsabhängigkeit sonst nicht erklären lässt.

Der Dipoleinfluss könnte mit Strömungsgeräuschen an der Karosserie in Zusammenhang stehen, die bei Vorbeirollpegelmessungen mit realen Fahrzeugen akustisch genauso eine Rolle spielen können wie der Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Wenn dies bei den hier beschriebenen Messungen der Fall gewesen wäre, müssten sich die Karosseriegeräusche jedoch bei allen Messungen, unabhängig von der Reifen-Fahrbahn-Kombination, bemerkbar gemacht haben.



**Bild 3.2-55:** Gemessene Vorbeirollmaximalpegel  $L_{Fmax}$  (nicht A-bewertet) drei verschiedener Reifen auf dem Lochfeld in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Punktierte Linien: logarithmische Kurvenanpassung an die Messwerte. Rote Punkte und Linien: logarithm. Kurve für den Geschwindigkeitsexponenten 4



**Bild 3.2-56:** Gemessene Vorbeirollmaximalpegel  $L_{Fmax}$  (nicht A-bewertet) drei verschiedener Reifen auf dem Splittmastixasphalt-Testfeld in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Punktierte Linien: logarithmische Kurvenanpassung an die Messwerte. Rote Punkte und Linien: logarithmische Kurve für den Geschwindigkeitsexponenten 4

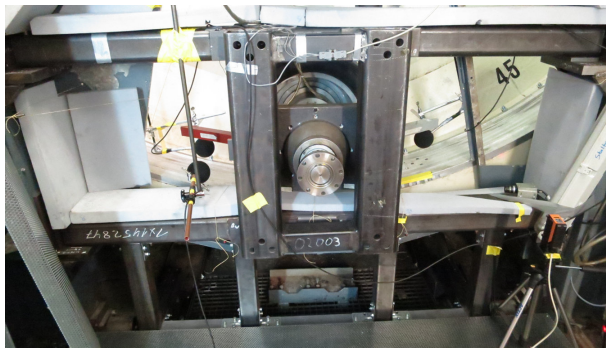
Dies ist jedoch nicht der Fall. Bild 3.2-56 zeigt die Ergebnisse der Messungen auf dem Splittmastixasphalt-Testfeld in gleicher Form. Eine größere Geschwindigkeitsabhängigkeit als  $\sim v^4$  lässt sich in keinem Geschwindigkeitsbereich mehr feststellen. Da die absoluten Schalldruckpegelwerte bei höheren Geschwindigkeiten auch nicht höher ausfallen als auf dem Lochfeld, muss der aeroakustische Quelleinfluss bei höheren Geschwindigkeiten auf dem Lochfeld also ausschließlich mit den Vorgängen im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zusammenhängen. Damit wird auch deutlich, dass die Strömungsgeräusche im Reifen-Fahrbahn-Kontakt mehrere Quelltypen umfassen können.

Aus Bild 3.2-56 geht außerdem hervor, dass die mechanische Geräuschanregung auf der gegenüber dem Glattfeld und Lochfeld raueren Oberfläche bei niedrigen Geschwindigkeiten eine größere Rolle spielt. Erst ab einer Geschwindigkeit von etwa 80 km/h gehen die Messkurven für die profilierten Reifen in die Vergleichskurve für eine Geschwindigkeitsabhängigkeit von  $\sim v^4$  über.

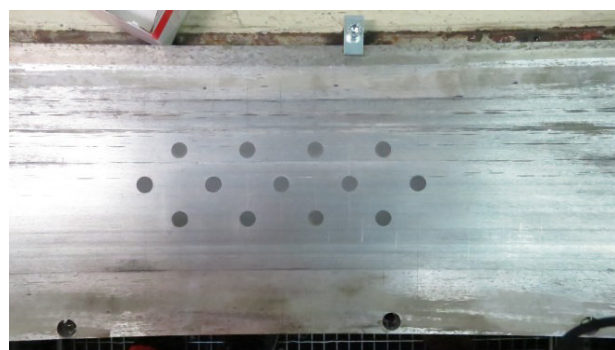
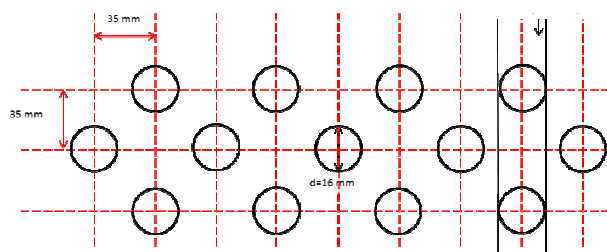
### Prüfstandsversuche zur Parametervariation

Die praktische Ausführung des Lochfelds auf dem Versuchsgelände in Geilenkirchen hat gezeigt, dass eine Modifikation der Löcher, insbesondere die Variation des Strömungswiderstands und die Texturierung der Oberfläche zwischen den Löchern, die sich als wichtige Parameter bezüglich der strömungsbedingten Geräuschenstehung herausgestellt haben, mit hoher Genauigkeit in situ nur mit hohem Aufwand möglich ist. Auf der anderen Seite haben die Messergebnisse gezeigt, dass die Ergiebigkeit der strömungsakustischen Quellen sehr empfindlich auf Änderungen der Oberflächentextur und des Strömungswiderstands im Reifen-Fahrbahn-Kontakt reagiert und deshalb eine systematische Variation notwendig und sinnvoll ist. Aus diesem Grund wurde der Innentrommelprüfstand des Projektpartners am KIT in Karlsruhe in die experimentellen Untersuchungen mit einbezogen. Hier konnte eine feinstraue Aluminiumfahrbahn eingebaut werden, in die auf gezielte Weise und mit hoher Genauigkeit Bohrungen unterschiedlicher Tiefe und in veränderbarer Anordnung eingebracht werden konnten. Die Aluminiumfahrbahn wurde für eine zweite Versuchsreihe mit Hilfe von Schleifpapier der Körnung P40 überklebt. Diese Vorgehensweise war erheblich flexibler und budgetverträglicher als die Herstellung der Ein- und Ausbau einzelner Aluminiumplatten, die, jede für sich, eine der Lochfeldvarianten aufweist.

Bild 3.2-57 zeigt den Innentrommelprüfstand mit Anordnung der Mikrofone vor dem Reifenein- und -auslauf. In Bild 3.2-58 sind Anordnung und Abmessungen der Bohrungen in der Aluminiumfahrbahn dargestellt. Bild 3.2-59 zeigt die Fahrbahn im Innentrommelprüfstand bei der Versuchsfahrt mit dem Glattreifen auf gelochter Aluminiumfahrbahn (links) und mit dem Glattreifen auf der mit Hilfe von Schleifpapier texturierten Fahrbahn mit fünf Bohrungen.



**Bild 3.2-57:** Ansicht des Innentrommelprüfstands am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik des KIT mit eingebauter gelochter Aluminiumfahrbahn und Instrumentierung



**Bild 3.2-58:** Anordnung der durch Verschraubungen verschließbaren Bohrungen in der Aluminiumfahrbahn. Links: Bemaßte Skizze, rechts: Realisierung im Prüfstand mit Verschraubungen

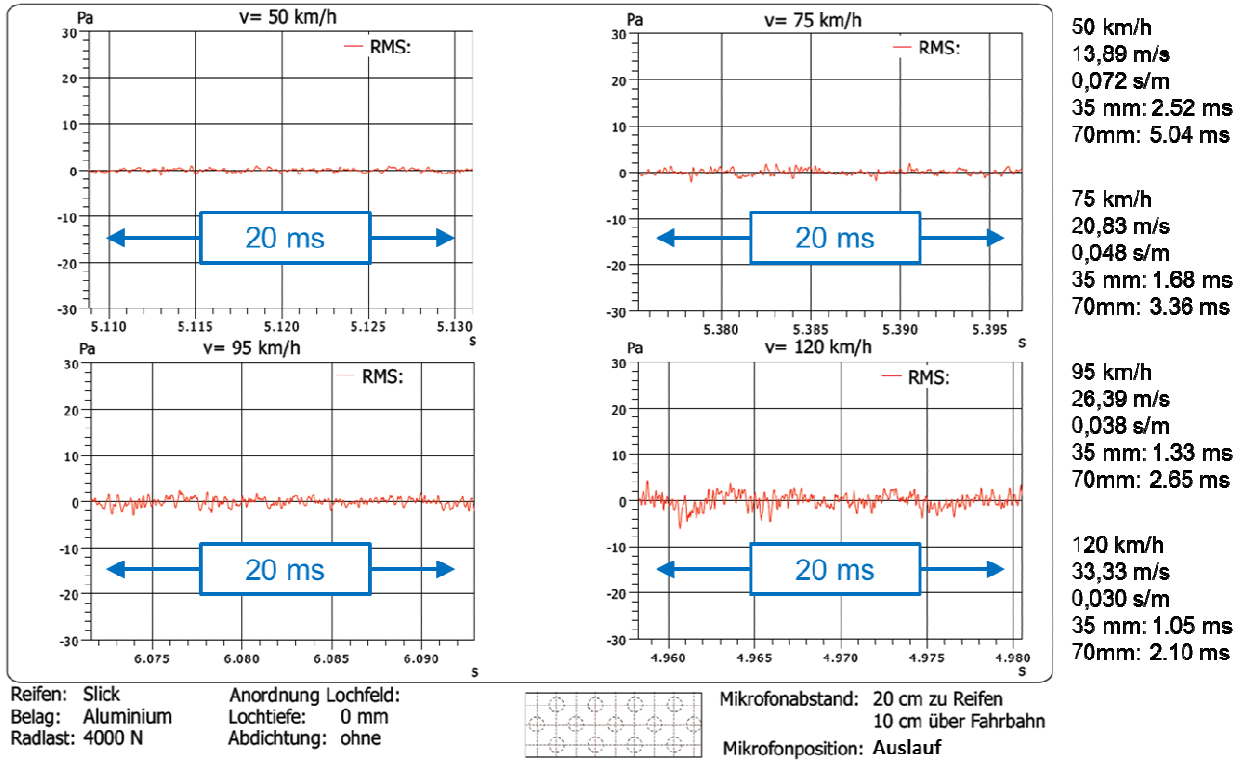
Der Trommelradius des Prüfstands beträgt innen 1,9 m. Die Radlast wurde auf 4.000 N eingeregelt mit einer maximalen Abweichung von  $\pm 200$  N. Der Mikrofonabstand wurde auf 20 cm zur äußeren Kontur des Reifens auf Höhe der Mikrofone am Reifenein- und -auslauf eingestellt, die in einem Abstand von 11 cm über der Fahrbahn fixiert wurden.



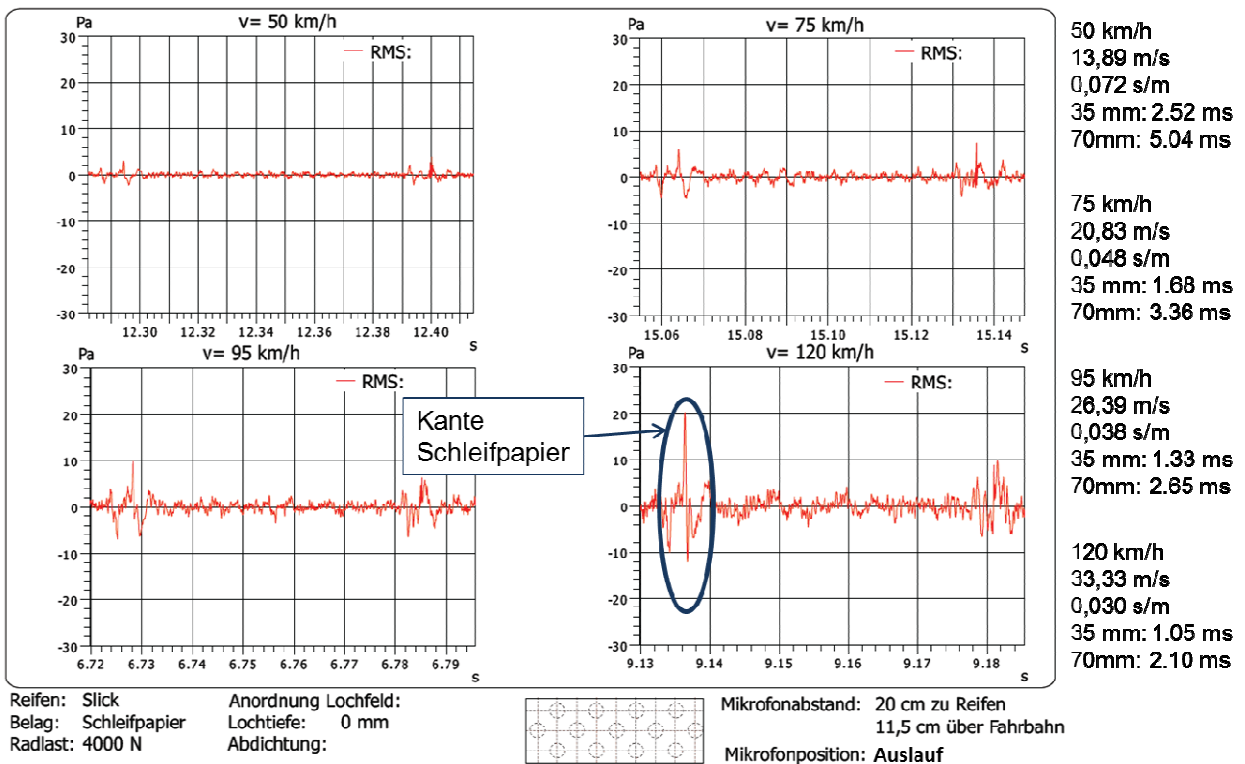
**Bild 3.2-59:** Fahrbahn im Innentrommelprüfstand. Links: Versuchsfahrt mit Glattreifen auf gelochter Aluminiumfahrbahn, rechts: Glattreifen und texturierte Fahrbahn mit fünf Bohrungen.

Absicht war, sowohl Lochtiefe, Strömungswiderstand in den Löchern und die Oberflächentextur zwischen den Löchern systematisch zu variieren und sowohl einen Glattreifen als auch einen profilierten Reifen (Continental PremiumContact3) zu untersuchen. Der Strömungswiderstand sollte pro Loch durch Anbringung einer und mehrerer dünner Entlüftungsbohrungen beginnend mit einem Durchmesser von 1 mm variiert werden. Die Fahrversuche wurden mit vier verschiedenen Konstantgeschwindigkeiten  $v$  der Innentrommel durchgeführt: 50 km/h, 75 km/h, 95 km/h und 120 km/h.

Bild 3.2-60 und Bild 3.2-61 zeigen die Ergebnisse der Nullmessungen mit dem Glattreifen auf der Aluminiumfahrbahn und der Schleifpapierfahrbahn, wobei jeweils alle Bohrungen geschlossen waren. Die Ergebnisse mit dem Glattreifen geben gewissermaßen den Schalldruck des Grundgeräusches des in Betrieb und in Bewegung befindlichen Prüfstandes wieder. Mit Schleifpapier nimmt dieser Grundgeräuschs Schalldruck kaum zu, was auf eine gute Einbauqualität des Schleifpapiers hinweist. Lediglich die Übergänge zwischen der Aluminiumfahrbahn und dem Fahrbahnabschnitt mit Schleifpapier machen sich durch einen Schalldruckimpuls, der allerdings sehr schnell abklingt, bemerkbar.



**Bild 3.2-60:** Nullmessung der Aluminiumfahrbahn mit Glattreifen, alle Löcher geschlossen, ohne Abdichtung. Schalldruck-Zeitsignale des Mikrofons vor dem Reifenlauf für v = 50 km/h, 75 km/h, 95 km/h und 120 km/h



**Bild 3.2-61:** Nullmessung der Schleifpapierfahrbahn mit Glattreifen, Löcher überdeckt. Schalldruck-Zeitsignale des Mikrofons vor dem Reifenlauf für v = 50 km/h, 75 km/h, 95 km/h und 120 km/h

Während zahlreicher Versuchsfahrten mit unterschiedlichen Lochkonstellationen stellte sich jedoch heraus, dass der gewählte Versuchsaufbau eine Schwäche in der Mechanik der Lochverschraubungen aufweist. Die kurzen Gewinde waren nicht ausreichend dicht, um das entstehende Reifen-Fahrbahn-Geräusch nicht durch einen endlichen Strömungswiderstand in den Bohrungen zu beeinflussen. Die entstehenden Schalldrucksignaturen waren kaum reproduzierbar. Durch die schlechte Reproduzierbarkeit konnten Veränderungen der Signatur nicht eindeutig auf gezielt herbeigeführte Veränderungen der Lochgeometrie oder Lochanordnung zurückgeführt werden.

Bild 3.2-62 zeigt den Schalldruck-Zeitverlauf des Reifen-Fahrbahn-Geräusches am Reifenauslauf des Glattreifens für eine Serie von fünf hintereinander liegenden Löchern, deren Tiefe auf 3 mm eingestellt war. In Teilbild a) sind die Verschraubungen nicht abgedichtet, in Teilbild b) nur die Verschraubung im ersten Loch und in Teilbild c) das erste und das mittlere Loch. Durch die Abdichtung entstehen wesentlich höhere Schalldrücke als ohne Abdichtung. Liegt im ersten Fall die Schalldruckamplitude für  $v = 120$  km/h bei 10 Pa, ergeben sich mit Abdichtung Schalldruckspitzen von bis zu 30 Pa. Im Schalldrucksignal sind die einzelnen Löcher gut voneinander getrennt, das heißt die aerodynamischen Vorgänge klingen in Zeitintervallen von etwa 2 ms ausreichend schnell ab. Dies entspricht den Ergebnissen der Experimente zum air pumping von Hamet [17].

Die schlechte Reproduzierbarkeit der Messergebnisse lässt sich an den in die Diagramme eingetragenen Effektivwerten (RMS) des Schalldrucks für den ersten Impuls ablesen. Während dieser im abgedichteten Fall Teilbild b) bei  $v = 120$  km/h einen Wert von 22 Pa erreicht, beträgt er ohne Veränderungen am Loch im zweiten Fall Teilbild c) dagegen nur etwa 15 Pa. Das entspricht einer Abweichung um rund 30 %.

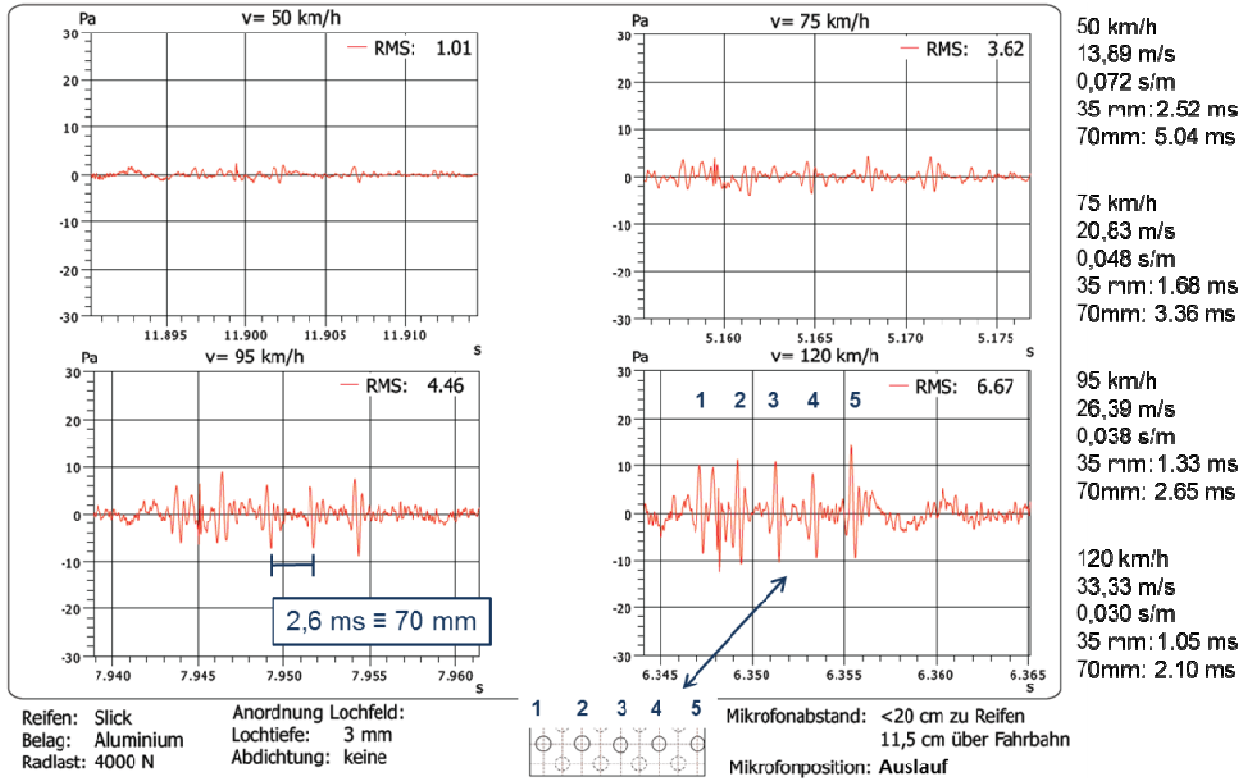
Profilreifen und Fahrbahnrauigkeit verändern die Vorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt radikal. Wie Bild 3.2-62 zeigt, ist die Signatur des Lochfelds von Teilbild a) in den anderen beiden Fällen (Teilbilder b) und c)) nicht mehr zu erkennen.

Den Ergebnissen dieser Experimente nach kann man folgendes festhalten:

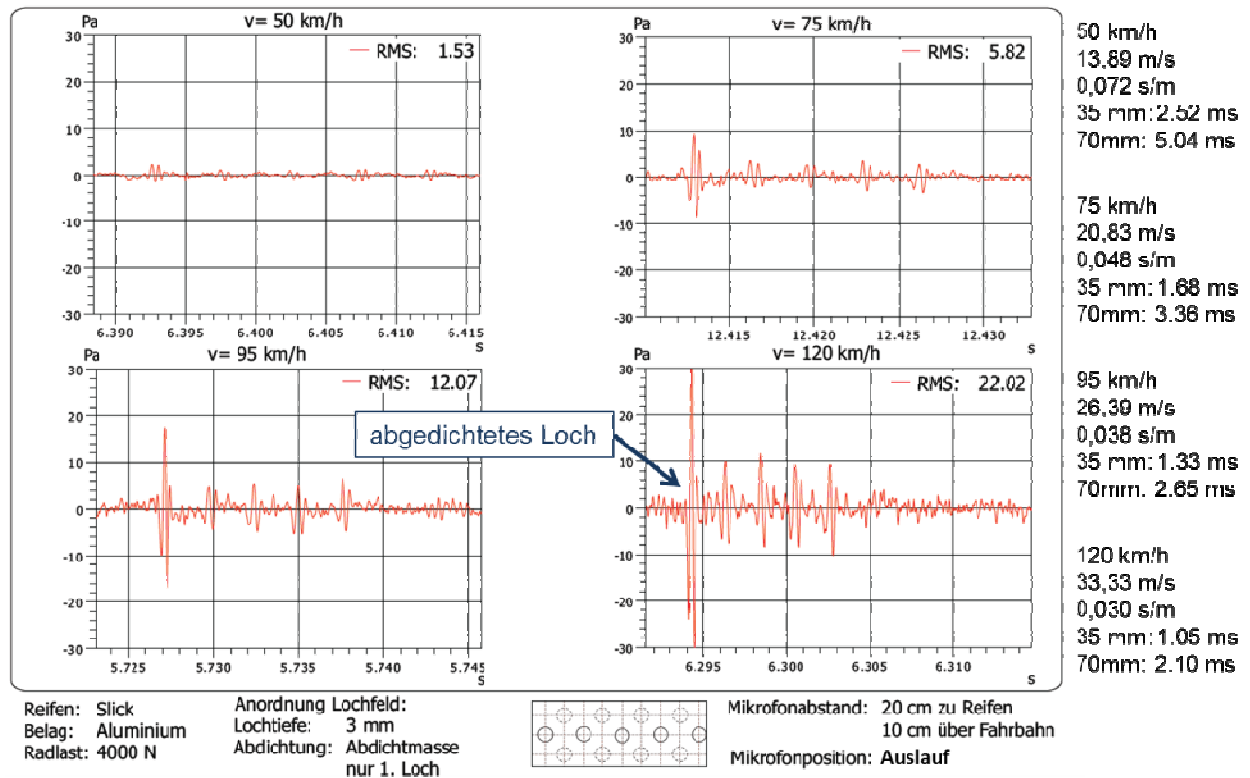
- Singuläre Kavitäten können bei allen Geschwindigkeiten im Signal des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs einzeln nachgewiesen werden. Das System ist so schwach gedämpft, dass jede einzelne in kurzem Abstand zueinander angeordnete Kavität im Schalldruck-Zeitverlauf erscheint. Die entstehenden Schalldrücke bei der Überrollung der Kavität treten jedoch nur an Positionen vor dem Reifenauslauf auf. Vor dem Reifeneinlauf treten die Kavitäten nicht in Erscheinung.
- Messbare Einzelereignisse, wie sie auch in den Experimenten zum air pumping von Hamet [17] erzeugt, gefunden und hier teilweise nachvollzogen wurden, erfordern präzise und fahrbahnuntypische Hohlraumgeometrien. Fahrbahntypische Geometrien, Anordnung und Ausgestaltung der Hohlräume verringern die messbaren Effekte deutlich.
- Die gezielte Variation des Strömungswiderstands in einzelnen Kavitäten war auch mit dem Prüfstandsexperiment noch nicht gelungen.

Änderungen und Variationen von Lochkonstellationen, insbesondere des Strömungswiderstands in den Kavitäten, sind im Prüfstand sehr aufwändig und schwer zu realisieren, weshalb die Prüfstandsexperimente anhand von CPX-Messungen in einer zweiten Versuchsreihe auf den Testfeldern auf dem Versuchsgelände in Geilenkirchen wiederholt wurden.

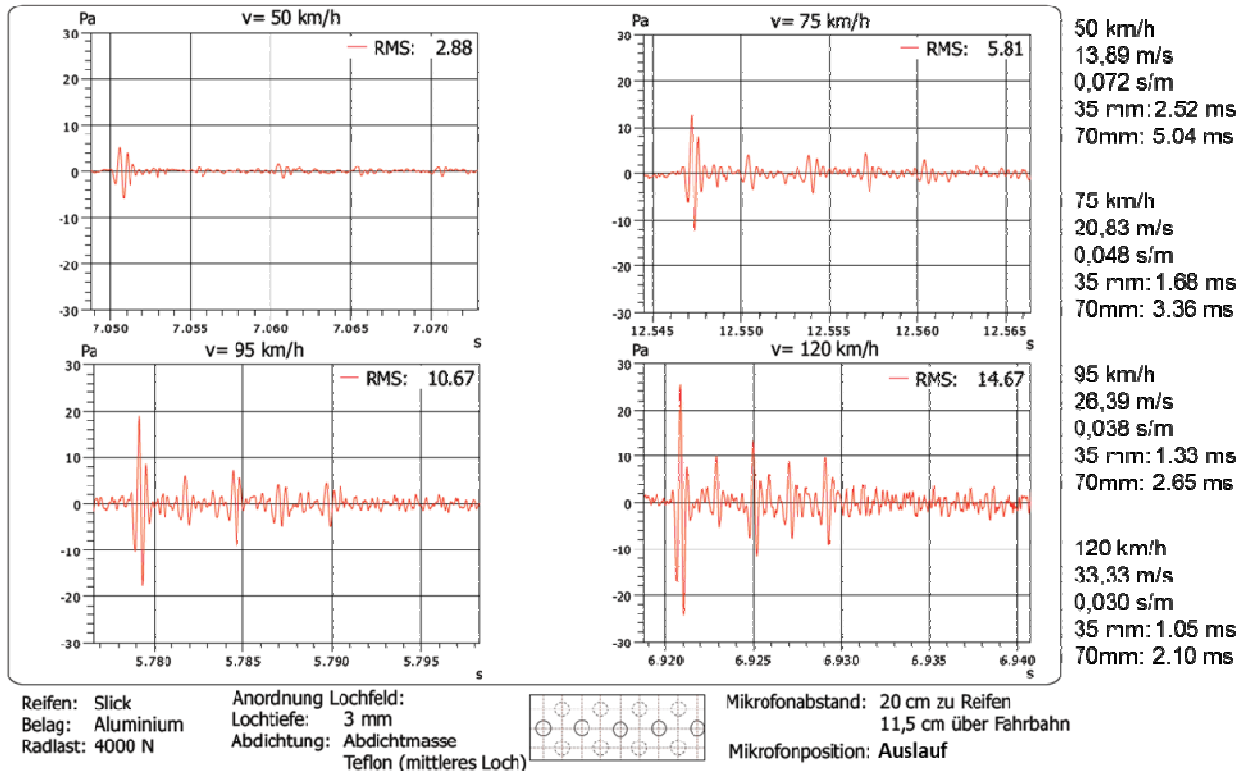
a)



b)

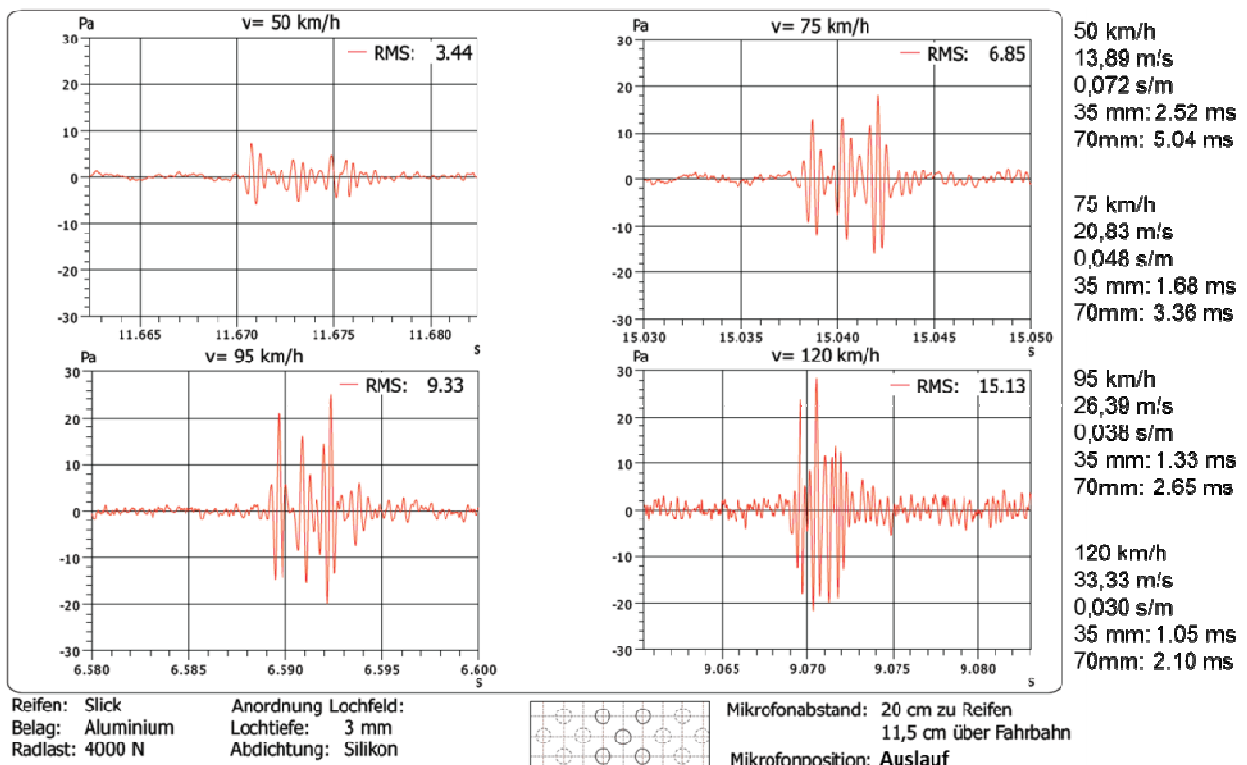


c)



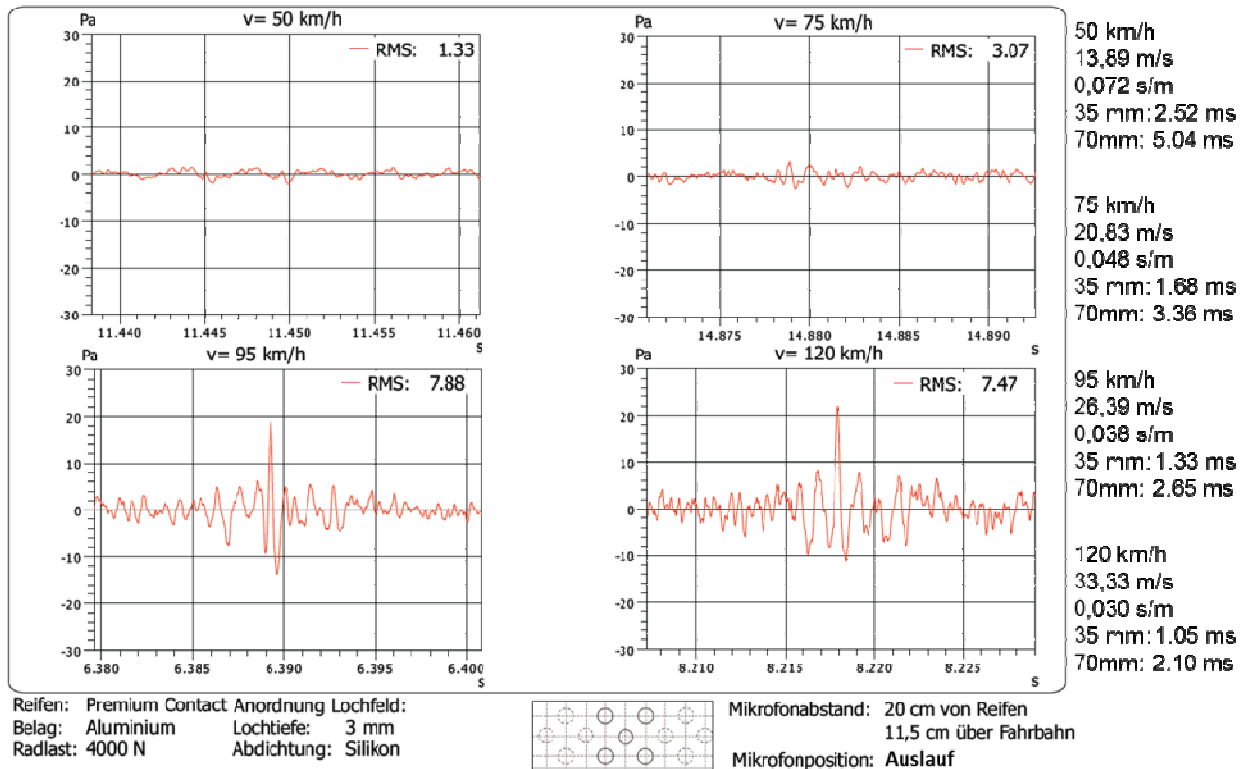
**Bild 3.2-62:** Messung der Fünflochserie mit Glattreifen, Schalldruck-Zeitsignale des Mikrofons vor dem Reifenauslauf für v = 50 km/h, 75 km/h, 95 km/h und 120 km/h. a) ohne Abdichtung, b) nur 1. Loch abgedichtet, c) 1. und mittleres Loch abgedichtet

a)

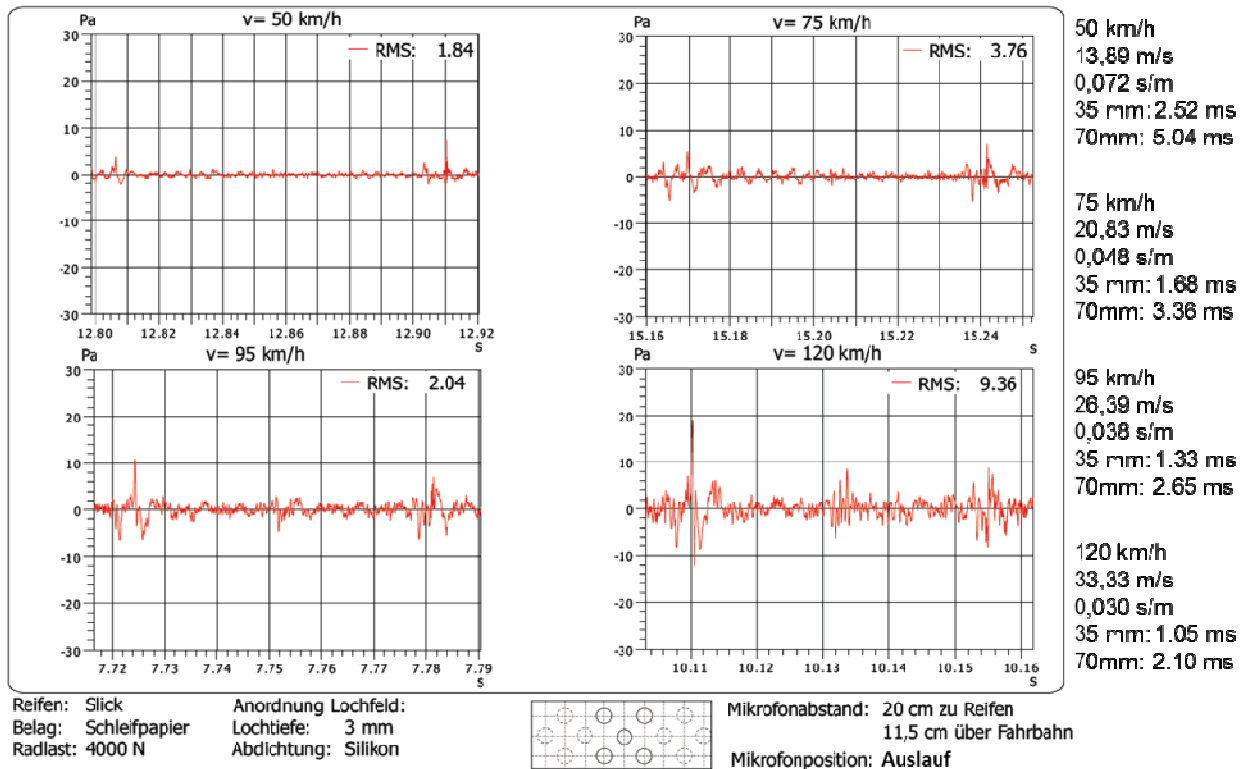




b)



c)



**Bild 3.2-63:** Messung der Fünflochanordnung, Schalldruck-Zeitsignale des Mikrofons vor dem Reifenauslauf für  $v = 50$  km/h, 75 km/h, 95 km/h und 120 km/h. a) Glattreifen auf Aluminiumfahrbahn, b) PremiumContact3 Reifen auf Aluminiumfahrbahn, c) Glattreifen auf Schleifpapierfahrbahn

### Feldversuche zur Parametervariation

Die Feldversuche fanden auf dem Glattfeld LS4 (Bild 3.2-64) des Versuchsgeländes in Geilenkirchen statt. Ziel des Feldversuchs war die gezielte Variation einzelner Eigenschaften der Kavitäten in der Fahrbahn zur Variation des Strömungswiderstands. Bild 3.2-64 zeigt die Versuchsanordnung und Varianten der hergestellten Löcher.



**Bild 3.2-64:** Versuchsanordnung. Links: Glattfeld auf dem Versuchsgelände in Geilenkirchen mit Markierung der Rollspur für die Nahfeldmessungen mit dem CPX-Messsystem; rechts: Nahaufnahme einzelner Lochvarianten auf dem Glattfeld.

Der Strömungswiderstand wurde einerseits durch Imperfektionen des Lochrandes und andererseits durch Befüllen der Löcher mit Material bekannten Strömungswiderstands bewerkstelligt.

Tabelle 3.2-5 enthält die Werte der Parameter, die im Feldversuch systematisch variiert wurden. Dabei handelt es sich um die Lochtiefe, die Ausführung des Lochrandes, die Lochfüllung und schließlich auch die Lochanordnung. Letztere bestand aus einem oder fünf Löchern mit Abmessungen für Lochdurchmesser und Lochabstand, wie sie auch dem Prüfstandsversuch zugrundelagen. Zur Erzeugung von „Undichtigkeiten“ wurde der Lochrand mit einer Länge von 2 mm oder 5 mm geschlitzt. Das Füllmaterial bestand aus Material mit einem Strömungswiderstand von  $R_s = 65 \text{ Pa s/m}$  („lose Füllung“) und von  $R_s = 280 \text{ Pa s/m}$  („fasrig“).

Die akustischen Messungen wurden mit einem Glattreifen und einer Geschwindigkeit von  $v = 80 \text{ km/h}$  durchgeführt. Der Reifen wurde in einer Messkammer des Müller-BBM Anhängers für die Nahfeld-Messung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche mitgeführt. Messgröße war der Schalldruck in 20 cm Abstand zur äußeren Reifenkontur hinter dem Reifen in einer Höhe von 11 cm über der Fahrbahn. Die Mikrofonpositionierung entsprach damit vollständig der aus dem Prüfstandsversuch am KIT.

	0	1	2	Bemerkung
<b>Tiefe</b>	1 - 2 mm	3 - 4 mm	6 - 7 mm	
<b>Lochrand</b>	nein	5/ 2 mm	10/ 4 mm	(breite/ tiefe)
<b>Füllung</b>	nein	Lose	Fasrig	

Nr.	Zeit s	Tiefe mm	Lochrand	Füllung	Bemerkung
1	-0.002	2	0	0	5er Anord-
2	0.007	2	0	1	5er Anord-
3	0.020	2	0	0	
4	0.027	2	0	2	
5	0.033	2	2	0	
6	0.390	2	0	1	
7	0.045	1	0	0	
8	0.051	1	0	2	
9	0.057	1	0	0	
10	0.064	1	0	1	
11	0.070	0	0	0	
12	0.076	0	2	0	
13	0.082	0	2	0.5	
14	0.088	0	0	0.5	
15	0.095	1	0	0	
16	0.101	1	0	1	
17	0.107	1	1	0	
18	0.113	1	1	1	
19	0.119	1	0	0	
20	0.125	1	1	0	
21	0.132	1	2	0	Schlitz quer
22	0.138	1	2	0	

Tab. 3.2-5: Parameter der Lochvarianten für den Feldversuch und deren Werte.

Aus dem Verlauf des Schalldruck-Zeitsignals über 22 Löcher vor und nach der Modifikation der Löcher in Bild 3.2-65 geht hervor, dass die Modifikationen zu erheblichen Reaktionen des Reifen-Fahrbahn-Geräusches gegenüber dem Ursprungszustand führen.

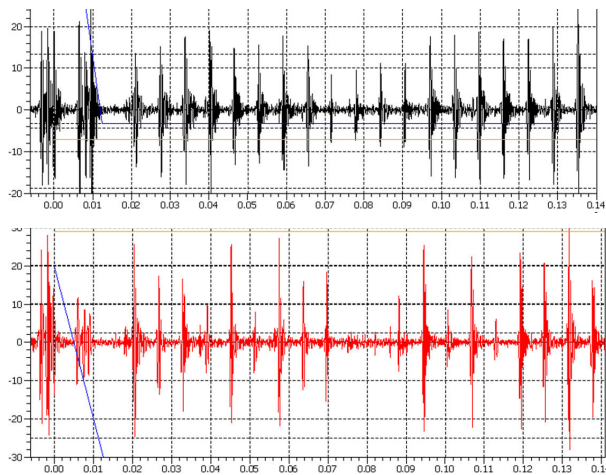
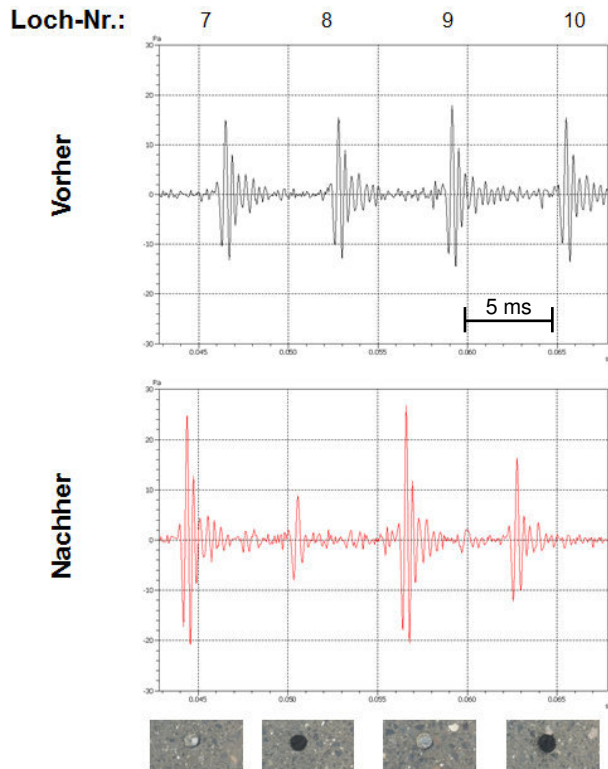


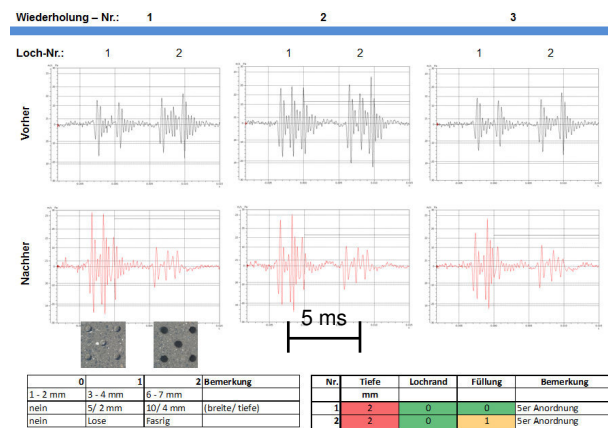
Bild 3.2-65: Verlauf des Schalldrucks  $p$  in Pa über der Zeit  $t$  in s einer vollständigen Messfahrt mit dem Glattreifen bei einer Geschwindigkeit von  $v = 80$  km/h. Oben: Löcher vor der Modifikation; unten: Löcher nach der Modifikation.

Bild 3.2-66 zeigt die Messsignale für die Ein-Loch-Varianten, die sich nur durch den Strömungswiderstand des Füllmaterials unterscheiden (Loch 8 „fasrig“, Loch 10 „lose“). Mit Anwendung der Strömungswiderstände nehmen auch in den anderen Fällen die Schalldruckspitzen um mindestens die Hälfte des ursprünglichen Wertes ab. Die Hohraumfüllung ist dabei stets wirksamer als der texturbedingte Strömungswiderstand durch Schlitzung des Lochfeldrandes.



**Bild 3.2-66:** CPX-Signal Reifenauslauf Slick,  $v = 80$  km/h. Löcher 7 bis 10 vor und nach der Modifikation

Bilder 3.2-67 bis 3.2-72 zeigen die Messsignale nach Löchern mit einheitlicher Tiefe gruppiert für drei Wiederholungen der Messfahrten. Die Wiederholungen zeigen die sehr gute Reproduzierbarkeit der Schalldruck-Zeitsignale.



**Bild 3.2-67:** CPX-Signal Reifenauslauf Slick,  $v = 80$  km/h. Löcher 1 und 2 vor und nach der Modifikation

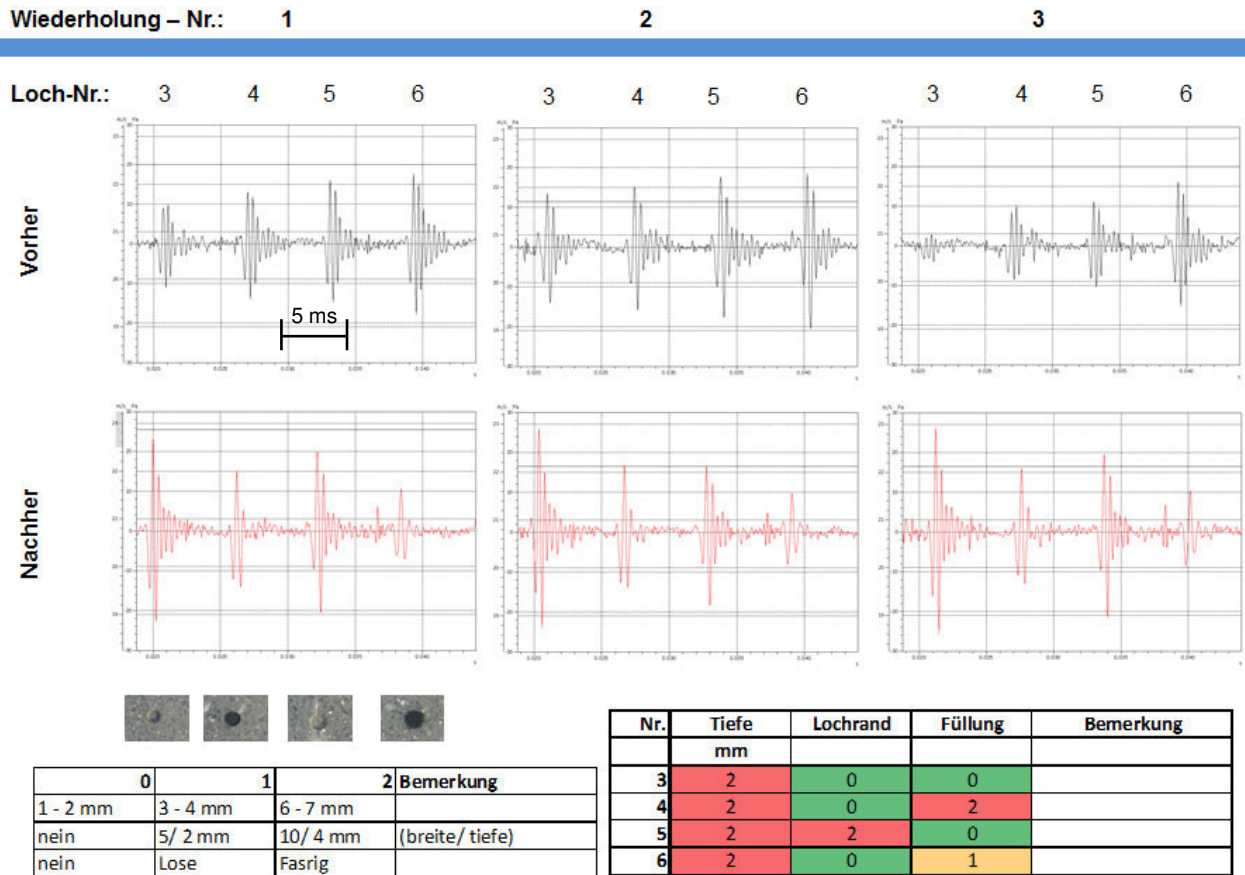


Bild 3.2-68: CPX-Signal Reifenlauf Slick, v = 80 km/h. Löcher 3 bis 6 vor und nach der Modifikation

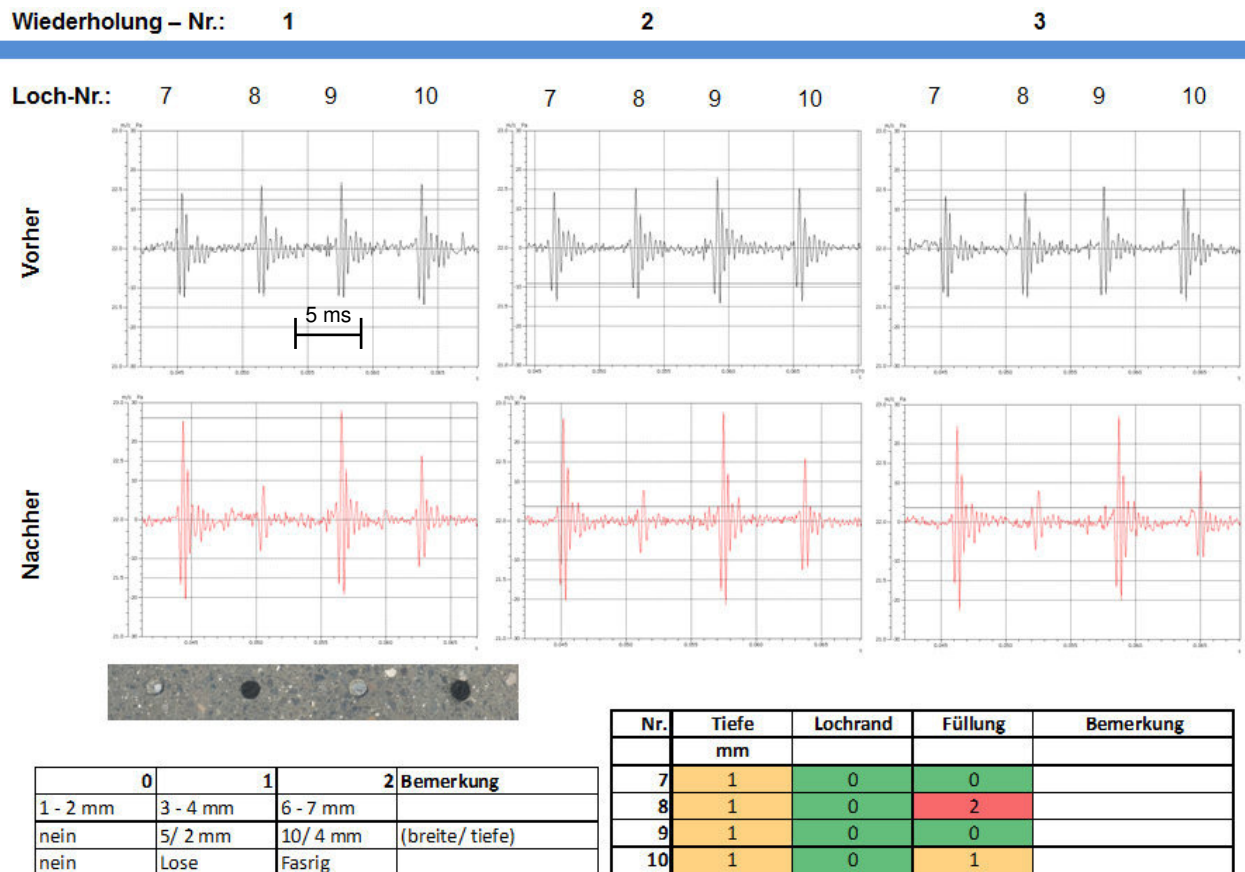


Bild 3.2-69: CPX-Signal Reifenlauf Slick, v = 80 km/h. Löcher 7 bis 10 vor und nach der Modifikation

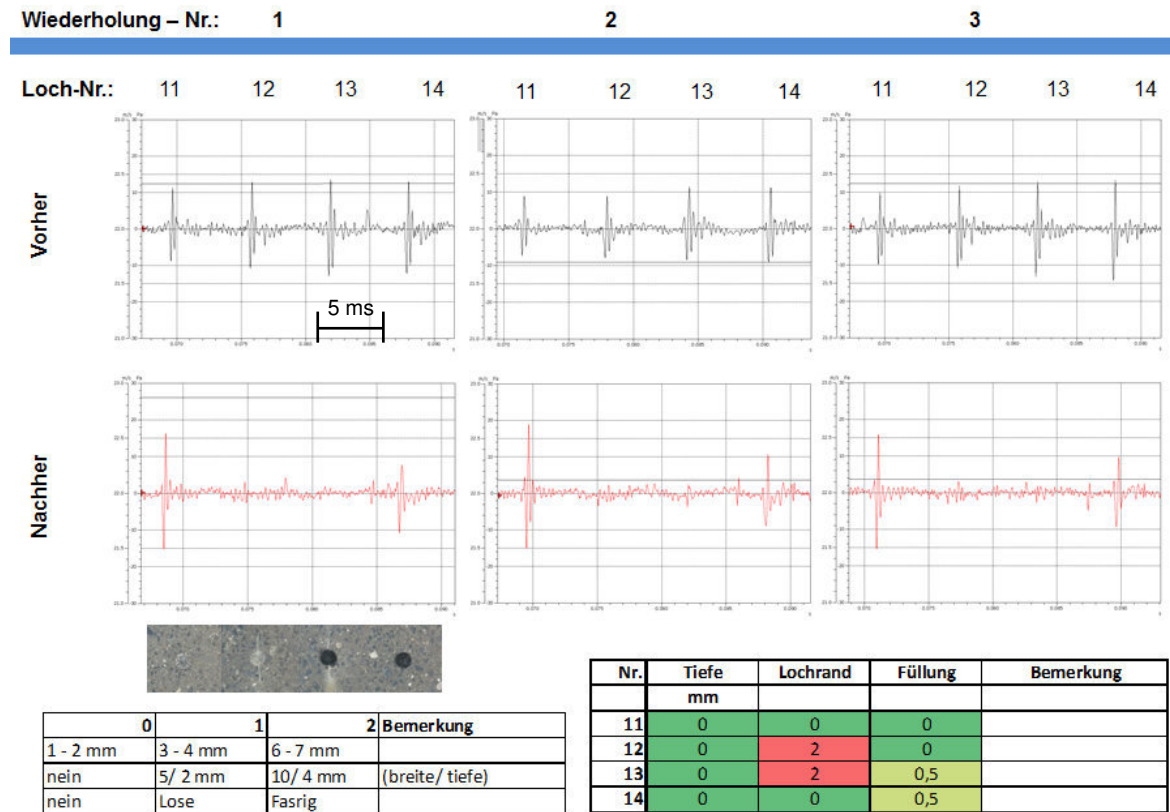


Bild 3.2-70: CPX-Signal Reifenlauf Slick, v = 80 km/h. Löcher 11 bis 14 vor und nach der Modifikation

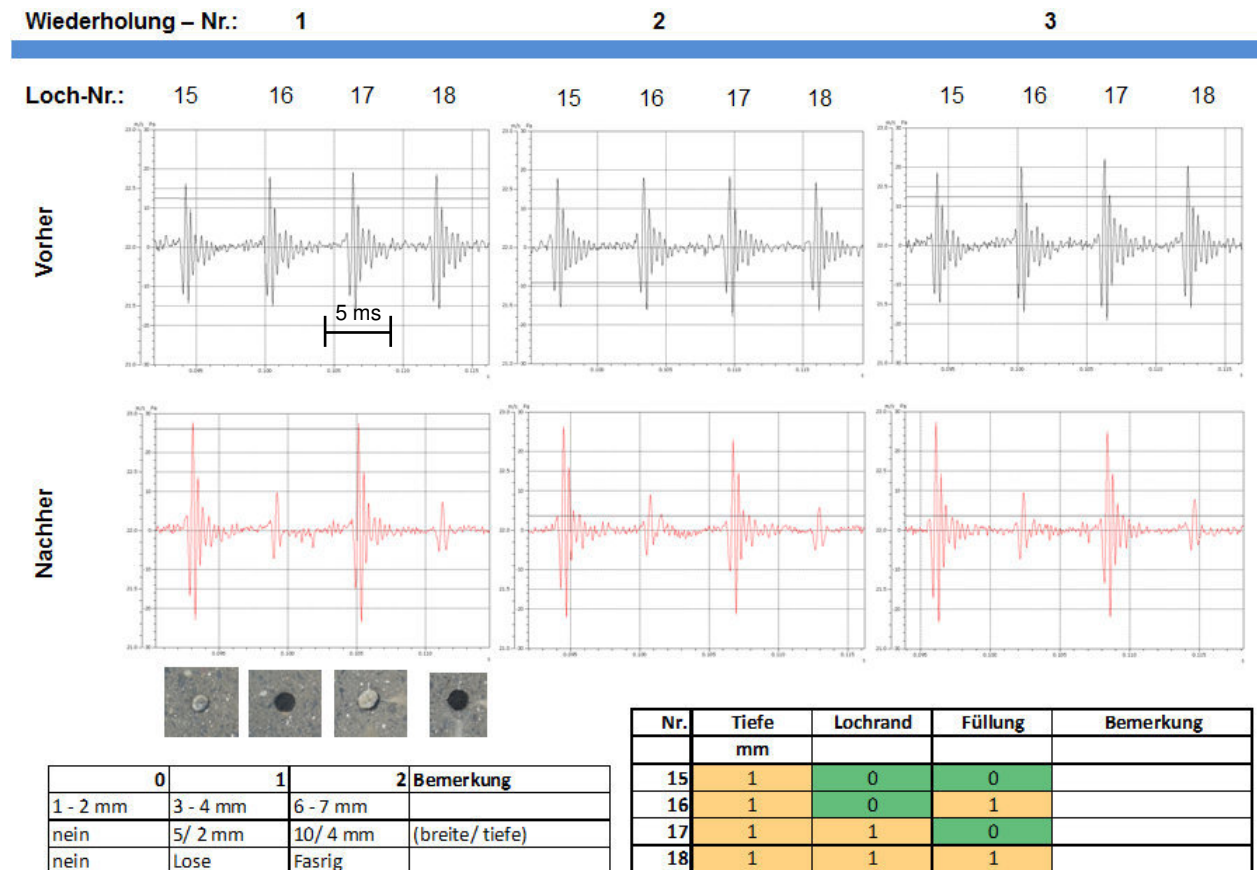
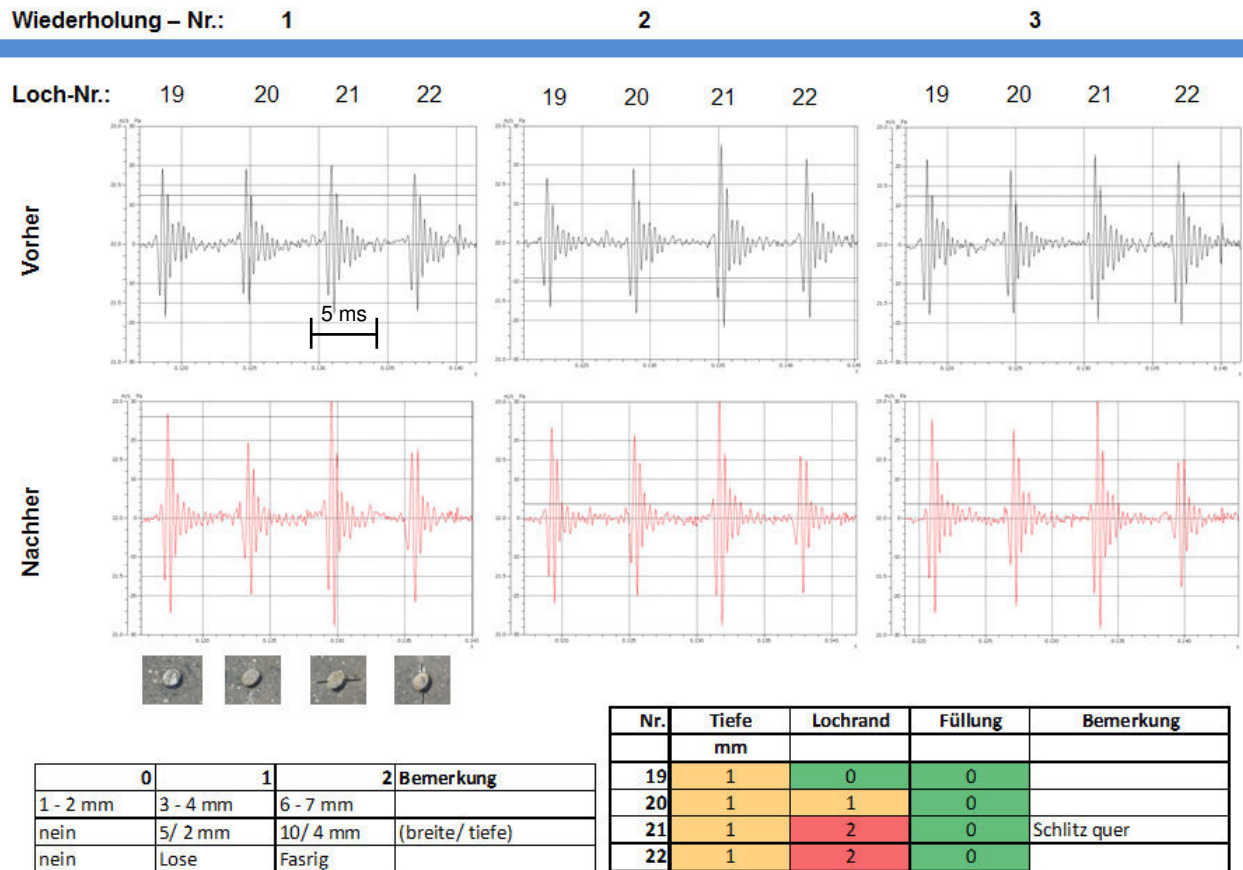


Bild 3.2-71: CPX-Signal Reifenlauf Slick, v = 80 km/h. Löcher 15 bis 18 vor und nach der Modifikation



**Bild 3.2-72:** CPX-Signal Reifenauslauf Slick,  $v = 80 \text{ km/h}$ . Löcher 19 bis 22 vor und nach der Modifikation

Im Ergebnis der Feldversuche ist festzustellen, dass die Tiefe der Kavitäten kaum einen Einfluss auf die Schalldrucksignatur ausübt. Die Variation der Lochtiefe von 1 bis 7 mm führt zu einer Variation des Schalldrucks von höchstens etwa 20%. Großen Einfluss üben dagegen Erhöhungen des Strömungswiderstands aus. Mit höheren Strömungswiderständen nimmt der Schalldruck der strömungsbedingten Rollgeräusche deutlich ab. Damit passt auch dieses Ergebnis zu den anderen Versuchsergebnissen und den theoretischen Untersuchungen zu den strömungsbedingten Geräuschen.

### 3.2.3.9 Erklärungsmodell und Modellierungsansatz für die strömungsabhängigen Geräusche durch Öffnen und Schließen von Kavitäten

#### Hintergrund

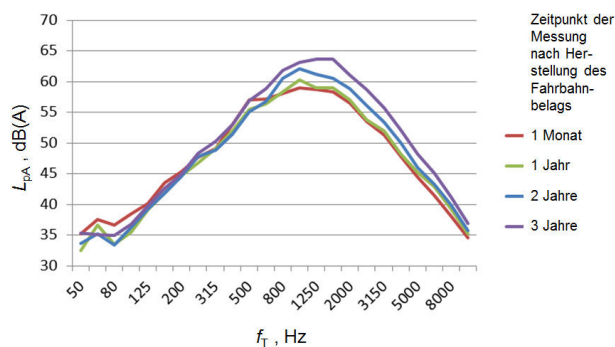
Unter „air pumping“ verstand man bislang die sich zeitlich verändernde Beschleunigung von Luft in kleinen Volumina, die durch den darüber rollenden Reifen geschlossen oder geöffnet werden. Diese Beschleunigung führt dann zu der Entstehung von Schall, wobei der orts- und zeitabhängige Schalldruck  $p = p(x, t)$  proportional zur ersten Ableitung des Volumenflusses  $q$  nach der Zeit ist:

$$\text{Gleichung 10} \quad p(x, t) \sim \frac{\partial q(x, t)}{\partial t}$$



**Bild 3.2-73:** Durch Beanspruchung und Alterung entstandene Rauigkeit eines Dünnschichtbelags.

Der Volumenfluss  $q$  ist die Menge an Gas (Luft), die pro Zeiteinheit transportiert wird und hat dementsprechend die Einheit  $\text{m}^3/\text{s}$ . Wichtig dabei ist, dass nicht die Menge des transportierten Gases, sondern dessen Beschleunigung für die Stärke des abgestrahlten Schalls von Bedeutung ist. Dies bedeutet, dass selbst kleine Gasvolumina, wie beispielsweise Luft in einer kleinen Vertiefung in der Straßenoberfläche, Ursache erheblicher Schalldrücke werden können. Ein gutes Beispiel ist die Entstehung hochfrequenten Schalls beim Überrollen sogenannter „Dünnschichtbeläge“. Diese nach dem Einbau zunächst sehr feinrauen Fahrbahnoberflächen mit einem Größtkorn von typisch 5 mm Durchmesser, werden durch die Verkehrsbelastung, Verwitterung und andere Alterungseffekte mit der Zeit rauer. Dieser Zuwachs an Rauigkeit entsteht zunächst durch Ausmagern des Mischguts der Fahrbahndeckschicht an der Oberfläche, zu einem späteren Zeitpunkt auch durch Ausbrechen einzelner Gesteinskörner aus der Oberflächenmatrix. Bild 3.2-72 zeigt deutlich die Veränderung in der Radrollspur. Die Veränderungen der Textur an der Fahrbahnoberfläche führen zu Kavitäten in der ansonsten sehr feinrauen Oberfläche. Als Konsequenz ergeben Messungen einen Anstieg des Vorbeifahrtpegels im hochfrequenten Bereich (siehe Bild 3.2-74). Für Frequenzen über 800 Hz steigen die Schalldruckpegel mit dem Alterungsprozess deutlich an.



**Bild 3.2-74:** A-bewertete Terzspektren der Vorbeifahrtpegels  $L_{\text{PA}}$  von Pkw mit 50 km/h in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Messung nach Herstellung eines Dünnschichtbelags.  $f_T$ : Terzmittenfrequenz.

Ziel ist, ein physikalisches Erklärungsmodell für diese Form der Schallerzeugung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zu formulieren, das in SPERoN 2020 implementiert werden kann. Das Modell basiert auf den experimentellen Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführt wurden.

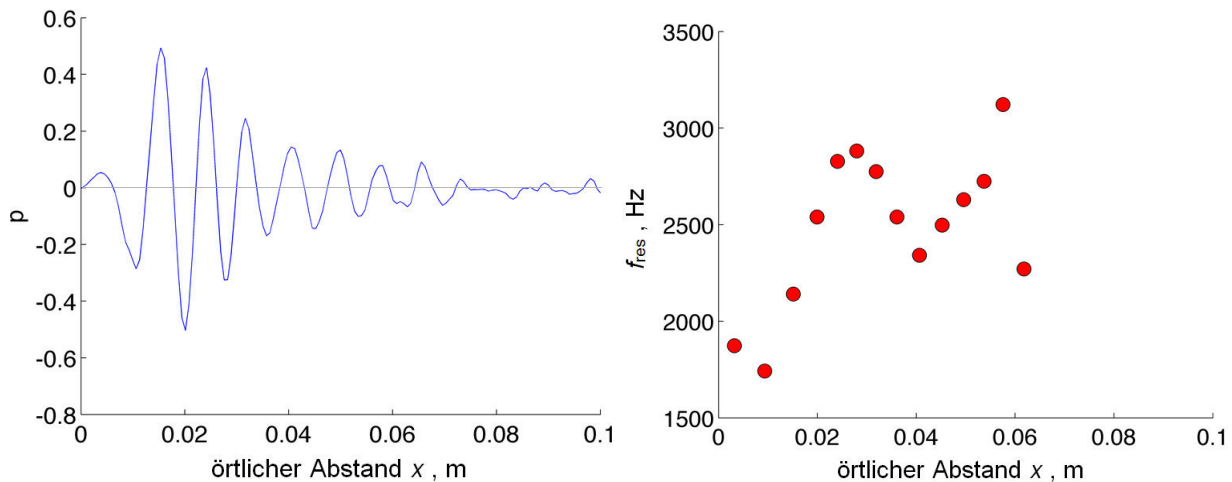
### Modellbildung

Eines der ersten Experimente zum air pumping wurde bereits in den siebziger Jahren in Schweden durchgeführt [18]. Auch wenn sich diese Studien mit der Kavität zwischen den Querstellen eines Reifens beschäftigten, führten sie doch zu einem Erklärungsmodell für die Entstehung des air pumping, das auch für das Überrollen von kleinen Kavitäten gilt. Ende der Neunzigerjahre wurden Messungen von Deffayet [19] und Hamet [17] an einer einzelnen zylindrischen Kavität in Oberflächen durchgeführt. Diese Messungen



zeigten im Reifeneinlauf einen kurzen Puls, wenn die Kavität geschlossen wurde, und ein ausklingendes tonales Signal, wenn sich die Kavität im Auslauf wieder öffnete. Diese Messergebnisse von Hamet et al. gaben schließlich auch den Ausschlag für die Herstellung des Lochfelds auf dem Versuchsgelände in Geilenkirchen im vorliegenden Vorhaben. Conte [20] zeigte in seiner Dissertation numerisch, dass nur die Schallentstehung im Reifenauslauf von Bedeutung ist. Der einzelne Puls im Reifeneinlauf tritt nur für eine einzelne Kavität deutlich auf. Sollten mehrere Kavitäten hintereinander in den Kontakt einlaufen, so findet eine Kompensation zwischen den Kavitäten statt. Dies bestätigten auch die Ergebnisse der beschriebenen Messungen im Prüfstand des KIT.

In allen drei genannten Veröffentlichungen wurde die Schallentstehung im Auslauf als eine Resonanzschwingungen beschrieben, die zu einem zeitlich sich verändernden Volumenfluss und damit zur Erzeugung von Schall führt.

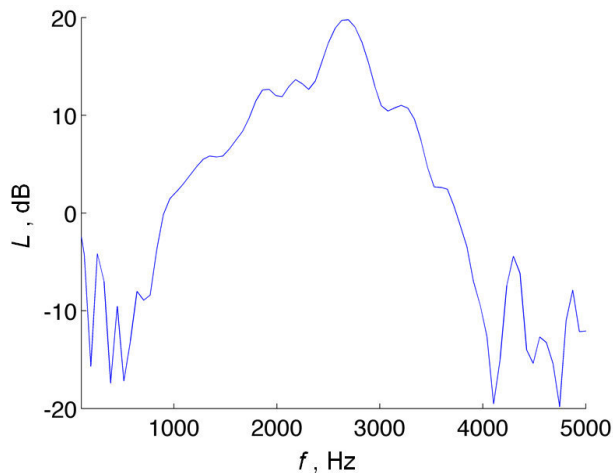


**Bild 3.2-75:** Signatur und Frequenz eines Schalldruckpulses im Reifenauslauf. Links: nicht kalibriertes, gemessenes Schalldrucksignal  $p$  für 80 km/h; rechts: örtliche Abfolge der Resonanzfrequenz  $f_{res}$  des Signals, ausgewertet für jede halbe Periode.

Bild 74 links zeigt ein typisches Beispiel des Schalldrucksignals im Reifenauslauf aufgrund dieser Resonanz bei Überrollung einer einzelnen Kavität aus den experimentellen Untersuchungen. Die Grundfrequenz des Signals variiert zwischen verschiedenen Überrollungen (Bild 3.2-67), aber auch innerhalb einer einzelnen Überrollung. Die Resonanz zeigt eine sich mit der Zeit, das heißt mit dem Ort  $x$  der Quelle im Horn zwischen Reifen und Fahrbahn veränderliche Frequenz  $f_{res}$  (Bild 3.2-75 rechts). Dieser Effekt wurde bereits in [18] mit dem Umstand erklärt, dass sich der Resonator in der Geometrie bestehend aus Reifenkontur und Fahrbahn bewegt und damit sich das System zeitlich ändert.

In Bild 3.2-75 ist die Signatur des Schalldruckpulses anstatt über der Zeit über dem Ort dargestellt. Dabei wurde angenommen, dass sich erst ein Signal ergibt, wenn die Kavität den Kontaktbereich verlässt. Dieser Punkt wurde als Ursprung definiert. Man sieht in Bild 3.2-75, dass das Maximum des Schalldrucks erst auftritt, wenn sich die Quelle ca. 20 mm außerhalb des Kontaktes befindet. Dabei verändert sich die Resonanzfrequenz  $f_{res}$  des Systems. Über dem Ort steigt die Frequenz erst an, um dann nach einem ersten Maximum wieder abzufallen und nochmals anzusteigen (Bild 3.2-75 rechts). Diese Werte wurden durch Ausmessen zweier aufeinanderfolgender Nulldurchgänge, also durch Ausmessen der halben Periode einer Schwingung bestimmt. Dabei sind die Werte bei  $x > 0,06$  m nicht sehr zuverlässig, doch wurde bei allen Messungen ein ähnliches Verhalten beobachtet, so dass keine zuverlässigeren Werte für  $x > 0,06$  m ermittelt werden konnten.

Für den gesamten Zeitverlauf des Schalldruckpulses wurde das in Bild 3.2-76 dargestellte Spektrum berechnet. Es zeigt ein breites Maximum um 2,5 kHz.



**Bild 3.2-76:** Spektrum des Zeitsignals aus Bild 3.2-75 links. Überrollung einer 6 mm bis 7 mm tiefen Kavität mit 80 km/h.

### Modellansatz für einen Resonator

Im Folgenden wird ein lineares Modell für die Resonanzschwingungen in einer zylindrischen Kavität vorgestellt. Für den Resonator werden eine Steife, eine mitschwingende Masse und eine Dämpfung benötigt. Die Steife  $K$  ergibt sich aus dem Volumen der Kavität mit

$$\text{Gleichung 11} \quad K = \rho c^2 \frac{S_c}{L}$$

wobei  $\rho$  die Dichte und  $c$  die Schallgeschwindigkeit in Luft sind.  $S_c$  ist die Fläche der Öffnung und  $L$  die Tiefe der Kavität.

Die Impedanz der Kavität ergibt sich als

$$\text{Gleichung 12} \quad \underline{Z}_c = \frac{F}{v_c} - \frac{K}{j\omega} = \rho c^2 \frac{S_c}{j\omega L}$$

wobei die von der Fahrbahnoberfläche nach oben weisende Schnelle  $v$  als positiv angenommen wurde.  $\omega$  ist die Kreisfrequenz und  $j = \sqrt{-1}$ .

Masse und Dämpfung ergeben sich aus Imaginär- und Realteil der Strahlungsimpedanz  $Z_{rad}$ . Dabei handelt es sich generell um die Strahlungsimpedanz eines ebenen Strahlers in einer schallharten Oberfläche (Fahrbahn). Die Fläche des Strahlers ist ebenfalls  $S_c$ . Da es sich bei der Impedanz der Feder um eine mechanische Impedanz handelt, muss die Strahlungsimpedanz eines Monopols mit der Fläche  $S_c$  skaliert werden:

$$\text{Gleichung 13} \quad \underline{Z}_{rad} = S_c \frac{p}{v_c} = S_c Z_{Monopol}$$

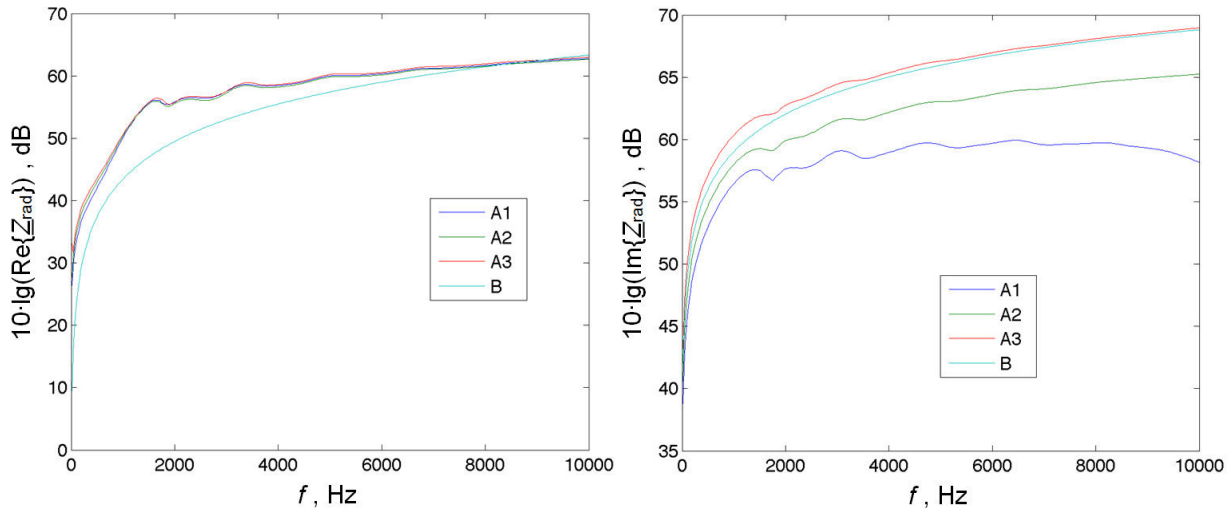
$$\text{mit} \quad Z_{Monopol} = \frac{p_{Monopol}}{v_{Quelle}}$$

Für die Betrachtung einer Kavität im Reifen-Fahrbahn-Kontakt muss dabei die besondere Geometrie berücksichtigt werden. Die besondere Geometrie besteht in der Form des Horns bzw. Schalltrichters, der sich durch Reifen und Fahrbahn ergibt.

Die Abstrahlung wurde numerisch mit Hilfe eines Finite Elemente Modells für den zweidimensionalen Fall ermittelt. Dafür wurde das Abstrahlungsmodell benutzt, das an der Universität Hamburg Harburg im Teilprojekt II entwickelt wurde. Es wurde die Schallabstrahlung für einen Monopol in der Öffnung des Horns berechnet. Bild 3.2-77 zeigt den so berechneten den Realteil und Imaginärteil der Strahlungsimpedanz  $Z_{Monopol}$  (Fall B).

Außerdem wurde die Strahlungsimpedanz  $Z_{rad}$  direkt in der Öffnung des Trichters zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt. Dabei wurden drei Modelle mit verschiedener räumlicher Auflösung benutzt (Fälle A1, A2 und A3). Die Schnelle  $v$  wurde auf einem Element direkt im Übergang vorgegeben. Dies bedeutet, dass die Quellengröße von der räumlichen Auflösung abhängig ist. Wie Bild 3.2-77 zeigt, ist der Realteil bei entsprechender Normierung unabhängig von der Anregefläche. Der Realteil der Strahlungsimpedanz steht

für die ins Fernfeld abgestrahlte Schalleistung. Für den Imaginärteil, das heißt für die Massenbelastung, kann die Normierung jedoch nicht so einfach durchgeführt werden. Der Imaginärteil repräsentiert das Nahfeld des Schallstrahlers, weshalb Form und exakte Größe des Strahlers sehr wichtig sind. Die Kurve des Imaginärteils für den Fall A1 ist jedoch den Ergebnissen, die man für eine Schallquelle in einer schallharten Wand ohne den Einfluss des Trichters erhält, sehr ähnlich. Hierbei wurde eine kreisförmige Strahlerfläche mit einem Radius von 3 mm angenommen, so wie es dem Lochdurchmesser in den experimentellen Untersuchungen entspricht.



**Bild 3.2-77:** Auf die Anregefläche normierter Realteil (links) und Imaginärteil (rechts) der Strahlungsimpedanz  $Z_{rad}$  in Abhängigkeit der Frequenz  $f$  für drei verschiedene Größen des Berechnungsgitters. A1:  $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ ; A2:  $6,4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ ; A3:  $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ ; B: Strahlungsimpedanz  $Z_{rad} = Z_{Monopol}$  für einen Monopol in einer schallharten Oberfläche mit der Strahlungsfläche  $S_c = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ .

Zusätzlich zur Dämpfung durch die Abstrahlung von der Resonatoröffnung kann noch Dämpfung durch viskose Verluste in der Öffnung der Kavität angenommen werden. Die Impedanz  $Z_l$  hierfür ergibt sich zu:

Gleichung 14 
$$\underline{Z}_l = S_c R$$

wobei  $R$  die viskose Reibungskonstante ist.

Die Impedanz des Resonators  $Z_{Resonator}$  ergibt sich aus der Kombination der drei Impedanzen zu:

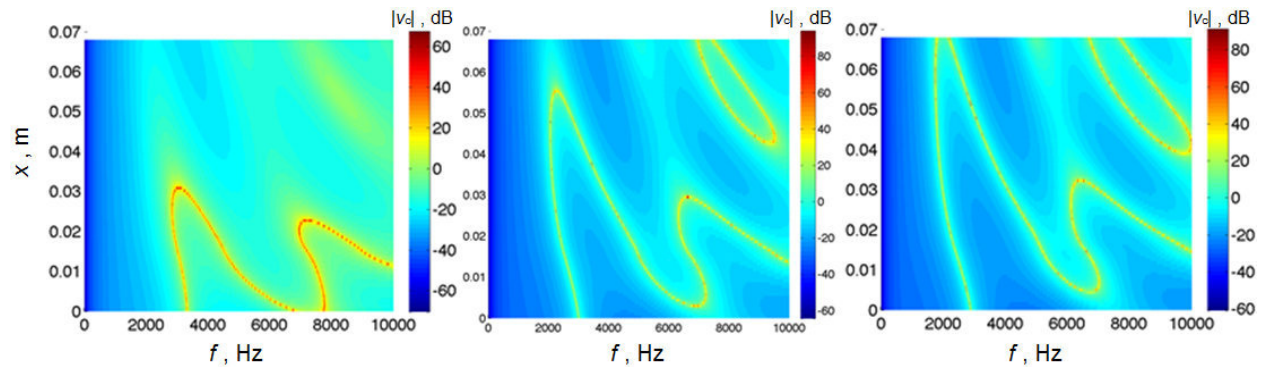
Gleichung 15 
$$\underline{Z}_{resonator} = \underline{Z}_c + \underline{Z}_{rad} + \underline{Z}_l = \rho c^2 \frac{S_c}{j\omega L} + S_c Z_{Monopole} + S_c R$$

womit auch die Schnelle  $v_{Quelle}$  an der Öffnung berechnet werden kann:

Gleichung 16 
$$v_{Quelle} = v_c = \frac{F_{ext}}{Z_{Resonator}} = \frac{F_{ext}}{\rho c^2 \frac{S_c}{j\omega L} + S_c Z_{Monopole} + S_c R}$$

Die externe Kraftanregung  $F_{ext}$  ergibt sich aus dem Überdruck in der Kavität, der beim Öffnen abgebaut wird.

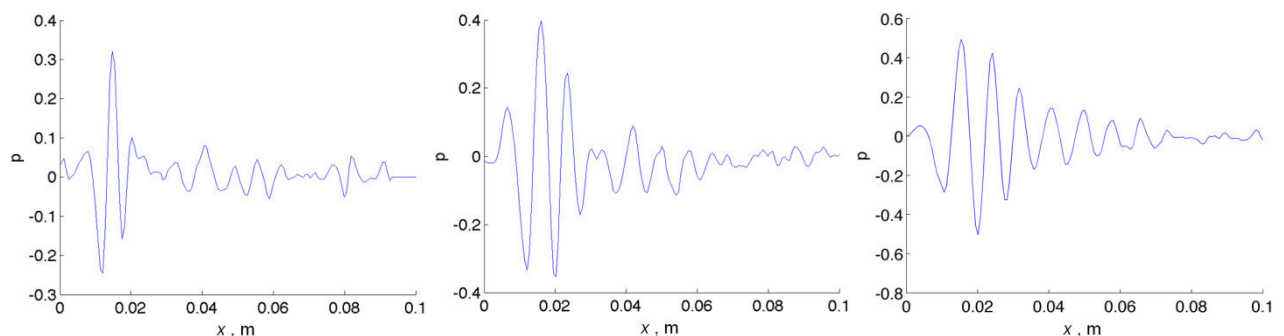
Benutzt man die Berechnungen in Bild 3.2-76 zur Bestimmung der Resonanzfrequenz  $f_{res}$ , erhält man eine zu hohe Frequenz (über 8 kHz). Dies kann jedoch darauf beruhen, dass als Quellpunkt die Position direkt im Trichter gewählt wurde. Um dies näher zu untersuchen wurde ein zweidimensionales FE-Modell benutzt. Dies ergab deutlich geringere Rechenzeiten und erlaubte eine schnelle Berechnung für 100 verschiedene Quellpositionen. Bild 3.2-76 zeigt den Betrag von Gleichung 16  $|v_c|$  als Funktion der Frequenz  $f$  und der Anregeposition  $x$  im Trichter.



**Bild 3.2-78:** Resonanzantwort als Funktion von Frequenz und Anregeort. Links: Lochtiefe 2 mm; Mitte: Lochtiefe 4 mm; rechts: Lochtiefe 6 mm.

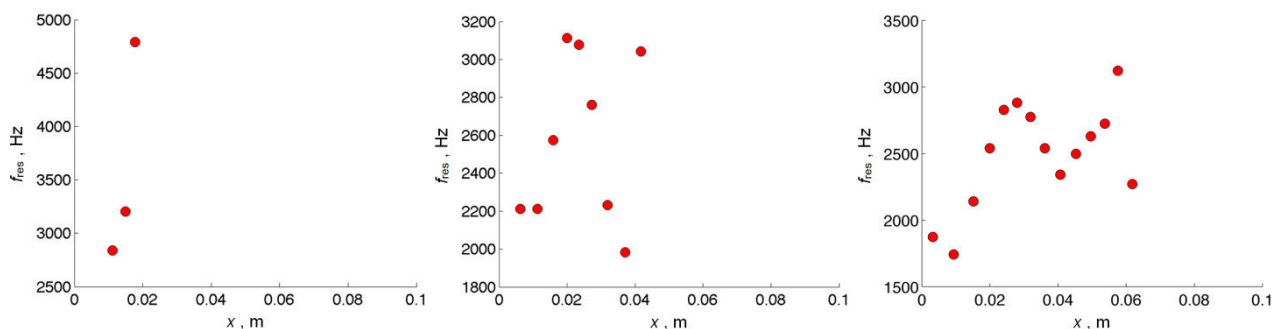
Anhand von Bild 3.2-78 wird deutlich, dass die Resonanzfrequenz mit der Anregeposition deutlich verändert wird. Sie fällt mit zunehmendem Abstand zum Trichter, um dann auch wieder anzusteigen. Es ist nicht sicher, dass sich dies auch im dreidimensionalen Fall so verhält. Man kann jedoch davon ausgehen, dass gewisse Ähnlichkeiten bestehen.

Interessant ist auch die Variation des Abstandes unter dem eine Resonanz auftreten kann. Für die kleinste Lochtiefe ist nur auf einer kurzen Strecke eine Resonanz möglich, während für die größte Lochtiefe diese Strecke deutlich länger ist. Ein Effekt, der so auch in den Messungen beobachtet werden kann wie Bild 3.2-79 zeigt.



**Bild 3.2-79:** Gemessener Schalldruck  $p$  als Funktion des Abstandes  $x$  (Position der Quelle im Horn) für verschiedene Lochtiefen. Links: Lochtiefe 2 mm; Mitte: Lochtiefe 4 mm; rechts: Lochtiefe 6 mm.

Auch der Frequenzinhalt ist deutlich durch die Lochtiefe bestimmt, da mit kleinerer Lochtiefe die Federsteife zunimmt (Bild 3.2-79). Da sich mit der Frequenz auch das abgestrahlte Nahfeld ändert, das die mit-schwingende Masse darstellt, gibt es jedoch keinen linearen Zusammenhang.



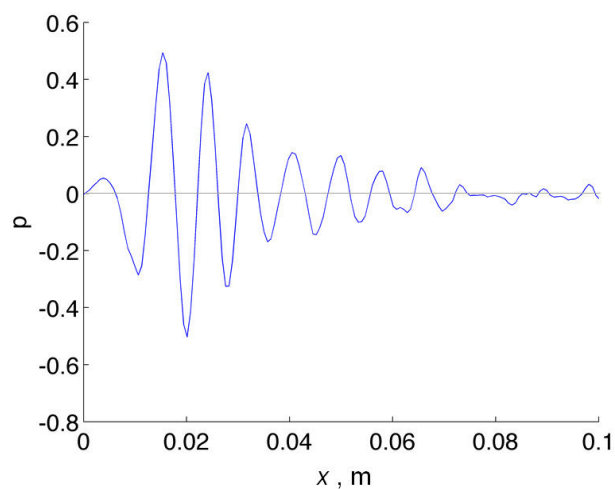
**Bild 3.2-80:** Gemessene Resonanzfrequenzen  $f_{\text{res}}$  in Abhängigkeit des Abstandes  $x$  nach der für Bild 3.2-75 beschriebenen Methode für verschiedene Lochtiefen. Links: Lochtiefe 2 mm; Mitte: Lochtiefe 4 mm; rechts: Lochtiefe 6 mm.

## Zusammenfassung und Grundlagen für einen Modellansatz

Die in der Literatur vorhandenen Erklärungsansätze lassen sich auch auf die Messungen an den Lochfeldern in Geilenkirchen anwenden. Die Löcher werden dabei als Federsteifen betrachtet, die durch das an der Öffnung befindliche akustische Nahfeld belastet werden. Dabei ist eine Variation der Frequenz des Oszillators über der Zeit bzw. dem Ort zu beobachten. Diese erklärt sich zumindest teilweise durch das sich örtlich verändernde Nahfeld. Dabei wurde hier der Einfluss des Dopplereffekts, wie er sich bei den Messungen darstellt (vergleiche hierzu Bild 3.2-53), vernachlässigt. Verschiedene Lochtiefen bestimmen auch den relevanten Frequenzbereich in dem air pumping auftritt. Durch die Variation der Lochtiefe und der Position im Trichter kann man jedoch davon ausgehen, dass diese Effekte in der Realität eher verschmiert werden, wenn man von idealen Lochfeldern, wie sie den experimentellen Untersuchungen zugrunde gelegt wurden, absieht. Dies muss bei einem Ansatz für ein physikalisches Modell berücksichtigt werden.

### Modellansatz für SPERoN 2020

Ausgangspunkt für dieses Modell sind die Zeitfunktionen der gemessenen Schalldrücke für das Überrollen einzelner Löcher. Bild 3.2-81 zeigt hierzu nochmals beispielhaft den Schalldruckverlauf bei Überrollung eines einzelnen Lochs mit 6 mm Tiefe.



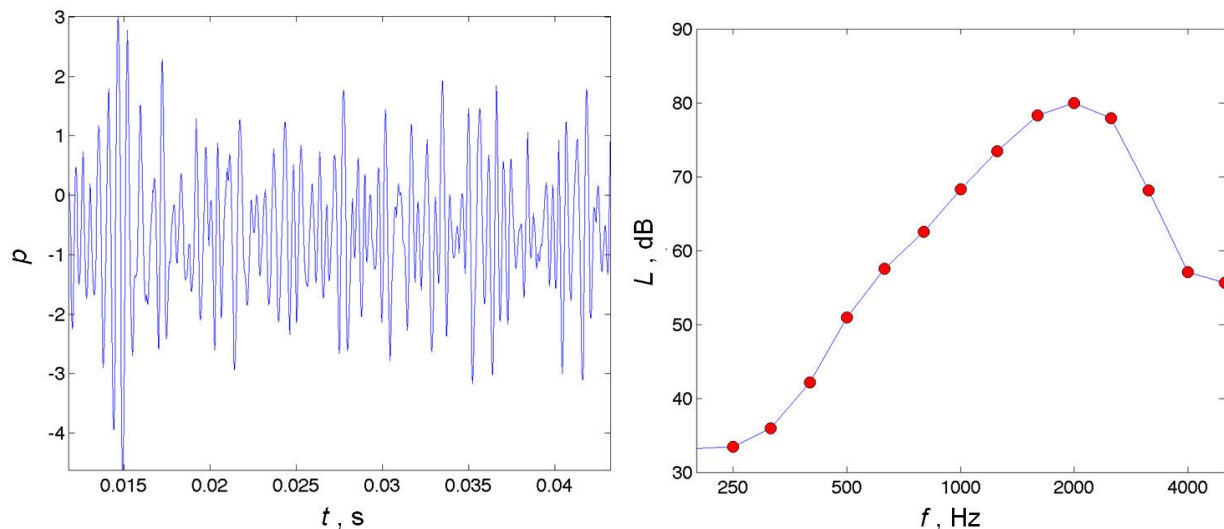
**Bild 3.2-81:** Schalldruck  $p$  an der Messposition im Reifenauslauf für 80 km/h als Funktion des Abstandes  $x$  bei Überrollung eines einzelnen Lochs mit 6 mm Tiefe.

Die Vorgehensweise für den Modellansatz geht von folgenden Annahmen aus:

- Die Lage jeder einzelnen Kavität verändert sowohl Frequenzinhalt als auch Stärke des Signals
- Das Gesamtsignal ist eine Superposition vieler einzelner unterschiedlicher Signale
- Die Verteilung der Lochtiefen und der Häufigkeit der Löcher in einem begrenzten Gebiet kann als Maß für die Bestimmung der Variation sowohl des Frequenzinhalts als auch der Amplitude benutzt werden.

Diese Bedingungen können durch folgende Parameter ausgedrückt werden:

- $f_u$  und  $f_o$   
untere und obere Grenze des Frequenzbereichs, in dem sich alle Oszillatoren „bewegen“
- $\Delta t_{\min}$  und  $\Delta t_{\max}$   
kleinster und größter Zeitabstand des Überrollens zweier aufeinanderfolgender Löcher
- $A_{\min}$  und  $A_{\max}$   
kleinste und größte Amplitude, die durch die Position der Löcher im Reifen-Fahrbahn-Kontakt und dem Wirkungsgrad des Verschleißens durch den Reifen gegeben ist.



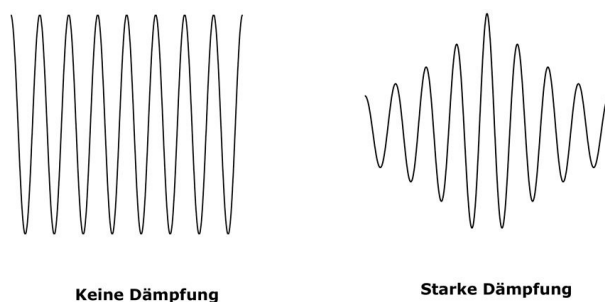
**Bild 3.2-82:** Modellberechnung. Links: simuliertes Schalldrucksignal im Auslauf für 80 km/h; rechts: unkalibriertes Spektrum.

Mit diesen Parametern lässt sich ein Zeitsignal für das air pumping auf einer rauen Fahrbahnoberfläche erzeugen. Ausgangspunkt ist die Textur dieser Oberfläche. Bild 3.2-82 links zeigt das Zeitsignal für  $f_u = 1.500$  Hz und  $f_o = 4.000$  Hz.  $\Delta t_{\min}$  wurde wie  $\Delta t_{\max}$  identisch mit dem Zeitinkrement angenommen. Es zeigte sich, dass dieser Parameter nur eine Rolle spielt, wenn die einzelnen Löcher deutlich voneinander entfernt sind. Die Amplitude wurde gleichverteilt zwischen 0 % und 100% variiert. Aus dem sich daraus ergebenden Zeitsignal wurde auch das dazugehörige Terzspektrum ermittelt (Bild 3.2-82 rechts).

### 3.2.3.10 Erklärungsmodell und Modellierungsansatz für die strömungsabhängigen Geräusche durch Rauigkeitsanregung

Zwei Tatsachen stützen die Annahme, dass die Entstehungsmechanismen der strömungsabhängigen Geräusche eigentlich eine Form von Reifenschwingungen darstellen, die zur Erzeugung eines Volumenflusses führen:

- die akustischen Eigenschaften der Straße (Schallabsorption) spielen keine Rolle für die Anregung der strömungsabhängigen Geräusche;
- das komplette Modell von Chalmers, das in Teilprojekt II entwickelt wurde, kann die Beiträge der strömungsabhängigen Geräusche wiedergeben, obwohl es nur Reifenschwingungen enthält.

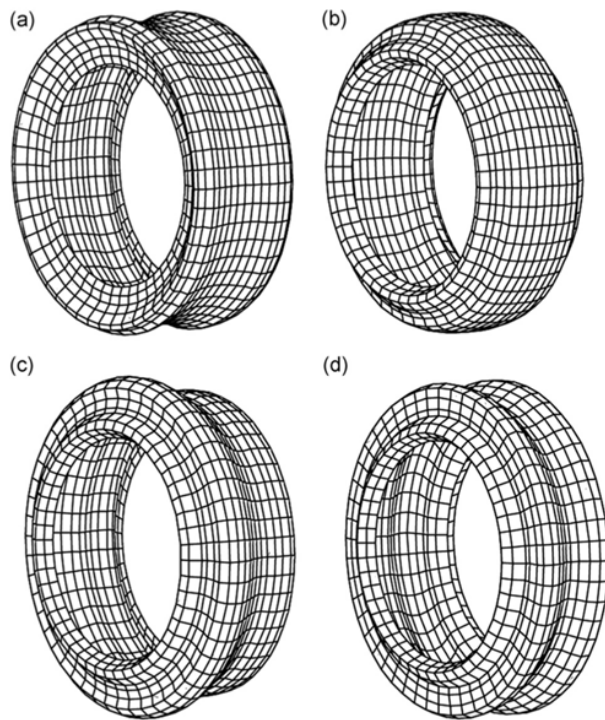


**Bild 3.2-83:** Schematische Darstellung von Schwingungen mit kleiner Dämpfung (links) und mit großer Dämpfung (rechts)

Die Erzeugung eines Volumenflusses durch Reifenschwingungen kann man sich auf zweierlei Art vorstellen:

Durch die starke Dämpfung der Reifenstruktur nehmen die Amplituden der von der Anregestelle ausgehenden Reifenschwingungen stark ab (Bild 3.2-83 rechts). Die Summe der von der Nulllinie abweichenden positiven und negativen Anteile des Schwingungszeitverlaufes ergibt im schwach gedämpften Fall einen Wert, der sehr nahe bei null liegt, während im gedämpften Fall ein deutlicher von null verschiedener Rest

übrig bleibt, da die Amplitude der von der Anregerstelle ausgehenden Schwingung schnell abnimmt. Dieser Rest stellt einen Volumenfluss dar, der zu einer Monopolabstrahlung führt und damit auch für den  $\sim v^4$  Anteil der Geräusche verantwortlich sein kann.



**Bild 3.2-84:** Beispiele von „breathing modes“, die einen Volumenfluss erzeugen können. Anzahl halber Wellenlängen über dem Querschnitt: a) 5, b) 3, c) 6 und d) 7

Ein zweiter Beitrag zur Anregung der strömungsabhängigen Geräusche stellen Moden dar, die an sich bereits einen Volumenfluss erzeugen. Die wichtigsten Moden dieses Typs sind sicherlich die so genannten „breathing modes“, die bei ca. 400 Hz die abgestrahlte Leistung eines rollenden Reifens bestimmen [21]. Vier Beispiele derartiger Moden sind in Bild 3.2-84 dargestellt.

Für einen Modellansatz muss man sich bei diesen Betrachtungen jedoch bewusst sein, dass strömungsabhängige Geräusche im gesamten Frequenz- und Geschwindigkeitsbereich vorhanden sind. Das Gleiche gilt natürlich für die mechanisch induzierten Geräusche mit einer Geschwindigkeitsabhängigkeit  $\sim v^2$ . Ein Modellansatz muss darauf zielen, diese Abhängigkeiten richtig zu erfassen. Dabei kann der Ansatz aus Kapitel 3.2.3.7 benutzt werden, der vereinfacht wie folgt aussieht:

$$\text{Gleichung 17} \quad L_{p_{\text{Reifen}}} = 10 \lg[A_R(f)v^2] \quad ,$$

$$\text{Gleichung 18} \quad L_{p_{\text{Strömung}}} = 10 \lg[\alpha_a(f)A_R(f)v^4] \quad ,$$

wobei das Verhältnis  $\alpha_a(f)$  aus der Analyse der Messdaten, wie in Kapitel 3.2.3.7 gezeigt, gewonnen wird. Die Amplituden  $A_R$  werden aus den Messdaten mit dem gleichen Modellansatz wie bisher berechnet, während  $\alpha_a(f)$  aus den Messdaten neu bestimmt werden muss.

Dieses Modell wird parallel zu dem Ansatz für das Schließen und Öffnen von Kavitäten im SPERoN 2020 eingebaut.

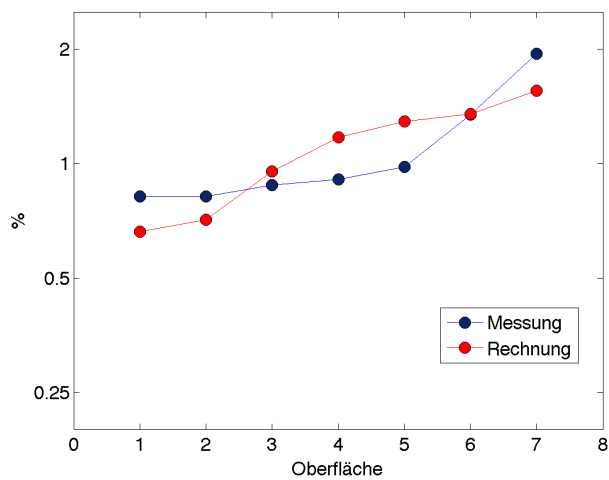
Für zukünftige Optimierungen und Entwicklungen geräuschmindernder Fahrbahnbeläge kann der Quelltyp der Dipolquelle nicht außer Acht gelassen werden. In speziellen Fällen, die von herkömmlichen Fahrbahnbelägen hinsichtlich Texturierung und Isotropie deutlich abweichen, kann dieser Quelltyp bei höheren Rollgeschwindigkeiten ebenfalls einen pegelbestimmenden Einfluss ausüben. Das Modell aus Gleichung 4 ist dementsprechend folgendermaßen zu erweitern:

$$\text{Gleichung 19} \quad L_p = 10 \lg[A_R(f, v) \cdot v^2 + A_{S, \text{Monopol}}(f, v) \cdot v^4 + A_{S, \text{Dipol}}(f, v) \cdot v^6] \text{ dB}$$

### 3.2.3.11 Berechnung des Rollwiderstands

#### Berechnungsansatz und Vergleich mit Messungen

In SPERoN 2020 wird ein Modell für die Vorhersage des Rollwiderstandes in Abhängigkeit von den Fahr- bahnoberflächeneigenschaften implementiert. Dieses Modell benutzt die eingespeiste Leistung im Kontakt während des Rollens. Zur Überprüfung dieses Ansatzes wurden bereits im Teilprojekt II Berechnungen durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass der Ansatz prinzipiell gute Ergebnisse liefert, jedoch stark von den einzelnen Reifeneigenschaften abhängt. Das Modell aus dem Teilprojekt II wurde nun im Teilpro- jekt I zur Berechnung des Rollwiderstandes verschiedener Oberflächen benutzt. Dabei wurden Fahrbahn- beläge aus dem IPG Projekt zugrundegelegt. Für diese Oberflächen liegen Rauigkeitsmessungen vor, die durch ihre laterale Auflösung (20 Spuren) auch in dem kompletten Modell benutzt werden können. Mes- sungen des Rollwiderstandes können für diese Oberflächen in der Literatur gefunden werden [22]. Bild 3.2- 85 zeigt einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten des Rollwiderstandes.



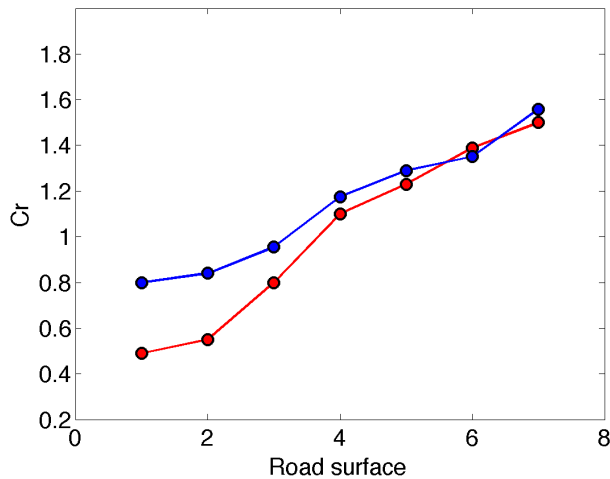
**Bild 3.2-85:** Vergleich des berechneten (rote Kurve) und gemessenen Rollwiderstandes (blaue Kurve) für die Oberflächen 1: 1c, 2: 1a, 3: 22c, 4: 6c, 5: 38c, 6: 40c, 7: 41c. Die Bezeichnungen entsprechen den Oberflächen im IPG-Projekt (23). Die Berechnungen wurden für eine Geschwindigkeit von  $v = 50$  km/h und einem profillosen (Slick) bzw. profilierten Reifen durchgeführt

Die Ergebnisse zeigen immer noch relativ große Abweichungen, auch wenn die Größenordnung und das Ranking der Oberflächen relativ gut erfasst werden. Die Abweichungen können durch die begrenzte Länge der gemessenen Rauigkeit verursacht sein. Die zur Verfügung stehenden Messwerte beziehen sich auf nur 2 m lange Fahrbahnabschnitte. Der Rollwiderstand wird durch Schwingungen unterhalb von 200 Hz mit einem Maximum typischerweise unter 100 Hz bestimmt. Bei 50 km/h und 80 Hz ergeben sich ca. 10 Rauigkeitswellenlängen auf 2 m Länge. Dies zeigt sich auch für die Oberflächen 1 und 2, die eigentlich beide ISO-Oberflächen darstellen sollen. Die Berechnungen wurden für zwei unterschiedliche Teilabschnitte der Fahrbahnoberfläche, für die Texturmesswerte vorlagen, durchgeführt. Die Ergebnisse für die beiden Messungen streuen deutlich. Für die Simulation wurde das Profil des SRTT Reifens in Kombination mit der Struktur eines Reifens von Continental untersucht.

#### Einfluss des Reifenprofils auf den Rollwiderstand

Für die Simulation wurde zuerst ein profilloser Reifen (Slick) benutzt. Dieser wies für glatte Oberflächen jedoch einen deutlich zu geringen Rollwiderstand auf. Bild 3.2-86 zeigt die Rechenergebnisse für den profil- losen Reifen und einen Reifen mit SRTT-Profil und identischer Reifenkonstruktion.





**Bild 3.2-86:** Vergleich des berechneten Rollwiderstandes für ein SRTT Profil (blaue Kurve) und einen profillosen Reifen identischer Konstruktion (rote Kurve). Oberflächen 1: 1c, 2: 1a, 3: 22c, 4: 6c, 5: 38c, 6: 40c, 7: 41c. Die Bezeichnungen entsprechen den Oberflächen im IPG Projekt [23]. Die Berechnungen wurden für  $v = 50$  km/h durchgeführt

Weil das Reifenprofil für die glatten Oberflächen (z.B. 1 bis 3) deutlich zum Rollwiderstand beiträgt, sind für die rauen Oberflächen (Oberfläche 6 und 7) die Ergebnisse mit und ohne Profil fast identisch.

Eine Optimierung des Reifenprofils im Hinblick auf den Rollwiderstand wäre also für relativ glatte und geräuscharme Oberflächen von Bedeutung. Solche Modelle existieren aber bis jetzt kaum und der hier vorgestellte Ansatz könnte einen wichtigen Beitrag in diese Richtung liefern. Auch wenn der Ansatz für die Simulation des Rollwiderstandes gute Ergebnisse zeigt, sind diese in ihrer Güte nicht vergleichbar mit den Ergebnissen in Teilprojekt II. Die Rechenzeiten für den Rollwiderstand in Teilprojekt II sind inzwischen so kurz, dass diese durchaus als Alternative dienen könnten. Gleichzeitig wurde in einer Veröffentlichung von Hoever und Kropp [24] gezeigt, dass der Rollwiderstand sehr gut mit der „Mean Profile Depth“ (MPD) korreliert, wie auch schon Sandberg et al. [25] festgestellt haben.

### 3.2.4 Zusammenfassung

Der Einfluss der Messmethode für die kontrollierte und statistische Vorbeifahrt auf die Genauigkeit/Reproduzierbarkeit von Eingangsdaten für SPERoN wurde untersucht. Dabei zeigte sich, dass unter Umständen Unterschiede in den Spektren entstehen, die auf kleine Unterschiede in der Erfassung des Maximalpegels und der damit verbundenen Spektralanalyse ihre Ursache haben. Solche Unterschiede können beispielsweise durch eine außermittige Fahrweise bei der Vorbeifahrt entstehen, wodurch sich die relative Position des Fahrzeugs mit Mikrofon zum Zeitpunkt des Auftretens des maximalen Schalldruckpegels ändert. Die Empfindlichkeit der Messungen auf solch kleinen Abweichungen könnte durch eine erweiterte Auswertung erfasst werden, wobei nicht nur ein Spektrum des Maximalpegels, sondern auch die Spektren in einem kleinen Fenster (z.B. 0.25 dB oder 0.5 dB) um den Maximalpegel erfasst werden. Auf diese Weise wäre es möglich, eine Abschätzung des auftretenden Fehlers durchzuführen.

Für das Rollgeräusch ist die kleinmaßstäbliche, hochfrequente Anregung durch die von der Fahrbahnoberflächentextur erzeugten Kontaktkräfte von entscheidender Bedeutung. Entsprechend sind Texturdetails bereits bei glatteren Oberflächen zu berücksichtigen. In einer ausführlichen Parameterstudie zeigte sich, dass auch bei isotropen Oberflächen mindestens fünf oder sechs parallele Profile der Fahrbahnoberflächenrauigkeit erfasst werden müssen.

Wenn die Anzahl der zur Verfügung stehenden Texturscans sehr begrenzt ist, scheint es vorteilhaft zu sein, die Profile so zu wiederholen, dass eine größtmögliche laterale Variation erzeugt wird. Falls nur ein (sehr langes) Profil existiert, so sind die Ergebnisse nicht zwangsläufig besser, wenn über eine Reifenumdrehung hinausgehende Segmente als parallele Spuren genutzt werden. Die in Fahrtrichtung auftretenden Texturvariationen sind nicht repräsentativ für die lateralen Variationen im Kontaktbereich.

Die Arbeiten zeigen den starken Einfluss des Strömungswiderstandes im Kontaktgebiet zwischen Reifen und Fahrbahn. Die Ergebnisse betonen auch die Notwendigkeit, den Strömungswiderstand nicht nur messtechnisch sondern auch rechnerisch, beispielsweise aus gemessenen Oberflächentexturen, Reifenprofil und mittlerer berechneter Kontaktgeometrie rekonstruieren zu können. Die strömungsabhängigen Geräuschenstehungsmechanismen zeigen sich vor allem auf rauen Oberflächen als der dominierende Quell-

term. Dies ist nicht eine Konsequenz des Modellansatzes wie er in SPERoN benutzt wird, sondern wird so auch in dem SPERoN zu Grunde liegenden Datensatz der Messungen in Sperenberg wiedergefunden. Auf Grund der unterschiedlichen Geschwindigkeitsabhängigkeit der Teilschallquellen (Reifenschwingungen:  $\sim v^2$  und strömungsabhängige Geräusche  $\sim v^4$ ) lassen sich deren Beiträge in den einzelnen Terzbändern identifizieren.

Die experimentellen Arbeiten haben jedoch auch gezeigt, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Reifen-Fahrbahn-Geräusche in speziellen Fällen auch über den Zusammenhang mit  $\sim v^4$  hinausgehen kann. Dies tritt nicht bei herkömmlichen rauen isotropen Fahrbahnoberflächentexturen auf, sondern dann, wenn die Textur gezielt auf Geräuschminderung optimiert wird, die Texturmerkmale, die zur Geräuschminderung führen also optimiert werden. Dann ist davon auszugehen, dass auch Dipolquellen an der strömungsbedingten Geräuschentstehung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt beteiligt sind mit einer Geschwindigkeitsabhängigkeit  $\sim v^6$ .

In der Literatur wurden bisher (mindestens) zwei unterschiedliche Mechanismen für die strömungsabhängigen Geräusche, das Öffnen und Schließen von Hohlräumen und das Eindringen von Rauigkeitsspitzen der Fahrbahnoberfläche in die Lauffläche des Reifens genannt. Der erste Mechanismus benötigt möglichst glatte Oberflächen und sollte besonders stark sein, wenn der Strömungswiderstand im Kontakt groß ist. Jedoch reichen kleine Abweichungen vom perfekten Schließen der Hohlräume, um diesen Mechanismus zu verringern. Es kann davon ausgegangen werden, dass der zweite Mechanismus der in den meisten Fällen wichtigere Mechanismus ist, oder dass, wie zuvor beschrieben, noch weitere Geräuschentstehungsmechanismen bestehen.

Als Konsequenz führen auf jeden Fall Fahrbahnoberflächen mit kleinem Strömungswiderstand zu größeren Pegeln des Reifen-Fahrbahn-Geräusches als Oberflächen mit großem Strömungswiderstand. Dies gilt jedoch nur solange der Strömungswiderstand durch die Geometrie zwischen Reifen und Fahrbahn bestimmt ist. Sollte die Oberfläche schallabsorbierend sein, also durch die zugänglichen Hohlräume in der Deckschicht ebenfalls einen kleinen Strömungswiderstand aufweisen, so gilt diese Schlussfolgerung nicht. Insofern ist also von großer Bedeutung, zwischen texturinduziertem und hohlrauminduziertem Strömungswiderstand zu unterscheiden. Mit dem bislang verwendeten Luftgleichstromverfahren zur Bestimmung des Strömungswiderstandes im Reifen-Fahrbahn-Kontakt gelingt dies nicht. Der Messwert stellt einen Mischwert aus beiden Widerstandstypen dar, wenn es sich nicht um einen dichten, hohlraumfreien Fahrbahnbelag handelt, dessen Strömungswiderstand ausschließlich texturinduziert ist.

Sehr glatte Fahrbahnoberflächen führen demnach zu hohen Beiträgen der strömungsabhängigen Geräusche, die sich für profilierte Reifen noch weiter erhöhen. Die sogenannte „Belüftung“ der Oberfläche führt zu einer Reduzierung des strömungsabhängigen Geräusches, wenn sie nicht durch Rauigkeit sondern durch Porosität der Oberfläche realisiert wird. Für optimierte Reifenprofile und glatte Oberflächen wird das strömungsabhängige Geräusch zum begrenzenden Faktor für eine weitere Reduzierung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche.

Die Analyse der Geschwindigkeitsabhängigkeit zeigte, dass die strömungsabhängigen Geräusche für normal raue Oberflächen nicht durch Verdichten von Luft im Kontakt erzeugt werden, sondern ihre Ursache in Reifenschwingungen haben, die einen nicht ausgeglichenen Volumenfluss erzeugen. Für diesen Mechanismus wurde ein Ansatz für SPERoN 2020 entwickelt.

Die Variation der Reifen zeigt, dass es kaum möglich ist, einen „mittleren Reifen“ zu definieren, der eine Gruppe von Reifen repräsentieren kann. Es ist also wichtig, bei der Ermittlung von Terzspektren des Vorbeifahrtpegels immer auf einen Mittelwert über eine größere Gruppe von Reifen zuzugreifen, wenn man eine gewisse Sicherheit in den Ergebnissen anstrebt.

Für die elastischen Fahrbahnbeläge wurde die notwendige Steife berechnet. Dabei zeigt sich, dass ein Faktor 2 in der totalen Kontaktsteife ca. 3 dB Reduktion im Gesamtpegel ergibt. Dafür muss aber die Steife der Fahrbahn in die Größenordnung der Kontaktsteife des Reifens kommen. Diese ist aber üblicherweise ca. 10 Mal kleiner als die Steife der Reifenlauffläche. Dies gelingt auch nur dann, wenn die elastische Schicht direkt mit der Lauffläche des Reifens in Kontakt kommt. Elastische Zwischenlagen unter einer weitgehend starren Deckschicht scheiden damit für die Minderung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche aus.

Für einen rollenden Reifen wurde der Horneffekt berechnet. Die so berechnete Verstärkungskurve zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen der „statischen“ Messung und der Berechnung. Die Ergebnisse zeigen auch, dass gerade für kleine Werte des Absorptionsgrades die Änderungen des Horneffektes dramatisch sind, da dieser stark abnimmt, wenn man von keiner Absorption zu etwas Absorption übergeht. Für einen Absorptionsgrad von 0,1 erreicht man bei 1.000 Hz bereits eine Minderung von 2 dB im Vergleich zur schallharten Fahrbahnoberfläche.

Für die Weiterentwicklung des Rechenmodells SPERoN wurden neue Teilmodelle zur Simulation der Mechanismen für die Entstehung strömungsabhängiger Geräusche, die das Öffnen und Schließen von Hohlräumen und das Eindringen von Rauigkeitsspitzen der Fahrbahnoberfläche in die Lauffläche des Reifens umfassen, erstellt. Außerdem entstand ein Modell für den Rollwiderstand. Auch nicht starre Deckschichten können jetzt berücksichtigt werden, erfordern jedoch zusätzliche Eingangsdaten, die die mechanische Impedanz der Fahrbahn wiedergeben.

## Literatur

- [1] BECKENBAUER, T., et al.: „FE 03.293/1995/MRB – Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 847, August 2002
- [2] Bundesanstalt für Straßenwesen BAST: Verbundprojekt Leiser Straßenverkehr 1 – Reduzierte Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Februar 2004
- [3] BECKENBAUER, T., KLEIN, P., HAMET, J.-F., KROPP, W.: „Tyre/road noise prediction: A comparison between the SPERoN and HyRoNE models – Part 1“, Proc. Acoustics'08 conference, Paris, 2008
- [4] KLEIN, P., BECKENBAUER, T., HAMET, J.-F., KROPP, W.: „Tyre/road noise prediction: A comparison between the SPERoN and HyRoNE models – Part 2“, Proc. Acoustics'08 conference, Paris, 2008
- [5] BECKENBAUER, T.: „FE 09.0165/2011/HBR – Grundlagen zur Erweiterung des Simulationstools SPERoN zur akustischen Optimierung von Fahrbahnbelägen“. Schlussbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2015
- [6] KROPP, W.: „Ein Modell zur Beschreibung des Rollgeräusches eines unprofilierten Gürtelreifens auf rauer Straßenoberfläche“. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 166, VDI Verlag, Düsseldorf, 1992
- [7] BECKENBAUER, T., KROPP, W.: „Typisierung von Reifen und Fahrbahnbelägen“. Tagungsband DAGA 2010, Paper Nr. 392, Deutsche Gesellschaft für Akustik DEGA, Berlin, 2010
- [8] WULLENS, F. and KROPP, W.: „A three-dimensional contact model for tyre/road interaction in rolling conditions“. Acta Acustica United Ac., 90(4), 702–711, 2004
- [9] GRAHAM, W., LIU, F., SUTCLIFFE, V. and DALE, M.: „Characterisation and simulation of asphalt road surfaces“. Wear, 271(5–6), 734–747, 2011
- [10] HOEVER, C.: „The influence of modelling parameters on the simulation of car tyre rolling losses and rolling noise“. Lizentiatsabhandlung, Chalmers University of Technology, 2012 (Erhältlich unter <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/166543/166543.pdf>)
- [11] ISO 13473: „Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Parts 2 and 4“
- [12] PIERINGER, A., KROPP, W. and THOMPSON, D.: „Investigation of the dynamic contact filter effect in vertical wheel/rail interaction using a 2D and a 3D non-Hertzian contact model“. Wear, 271(1–2), 328–338, 2011
- [13] Forschungsverbund „Leiser Straßenverkehr 1 – Teilprojekt 3122: Messverfahren des Strömungswiderstandes“. Schlussbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen und Projektpartner, Bergisch Gladbach, 2003
- [14] Forschungsverbund „Leiser Straßenverkehr 1 – Teilprojekt 3122: Messverfahren des Strömungswiderstandes“. Schlussbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen und Projektpartner, Bergisch Gladbach, 2003
- [15] CREMER, L., HECKL, M.: „Körperschall“. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996
- [16] HAMET, J.-F.: „Estimation of the attenuation of rolling noise by acoustic absorption“. EU-Projekt SILVIA, Forschungsbericht SILVIA-INRETS-013-00-WP2-09/06/2004, Bron Cedex, France, 2004

- [17] HAMET, J. F., DEFFAYET, C. and PALLAS, M. A.: "Air pumping phenomena in road cavities". In Proceedings of the International Tire/Road Noise Conference, August 8- 10 1990, Gothenburg, Sweden, 1990
- [18] "Air-resonant radiation – a possible mechanism for high frequency noise from cross bar tyres". Report by IFM Akustikbyrå, März 1979
- [19] DEFFAYET, C.: "Bruit de contact pneumatique/chaussée - Emission acoustique d'une cavité de chaussée - Résultats expérimentaux". Satolas 1989, INRETS NNB 8907, France, Oktober 1989
- [20] CONTE, F. und KLEIN, P.: "3D CFD modelling of air pumping noise from road cavities with constant volume". INTER-NOISE 2013, Innsbruck, Österreich, 2013
- [21] KROPP, W., SABINIARZ, P., BRICK, H., BECKENBAUER, T.: "On the sound radiation of a rolling tyre". Journal of Sound and Vibration, 331 (8), S. 1789-1805, 2012
- [22] van BLOKLAND, G.J., SCHWANEN, W., BOERE, S.W.: "Influence of road characteristics on rolling resistance". Presentation at the Tire Technology Expo 2009, Hamburg, Germany, 2009
- [23] KUIJPERS, A., PEETERS, B., KROPP, W., BECKENBAUER, T.: „Acoustic Optimization Tool – RE4 Modeling refinements in the SPERoN framework.“ Bericht M+P.DWW.06.04.7 im Rahmen des Forschungsprojekts "Innovation Program Noise" (IPG) des Niederländischen Verkehrsministeriums, Vught, Niederlande, November 2007
- [24] HOEVER, C. and KROPP, W.: "Models for rolling resistance". In Road Infrastructure Asset Management Systems: "A model for investigating the influence of road surface texture and tyre tread pattern on rolling resistance", submitted to Journal of Sound and Vibration, 2011
- [25] SANDBERG, U., BERGIERS, A., EJSMONT, J., GOUBERT, L., KARLSSON, A., ZÖLLER, M.: "Road surface influence on tyre/road rolling resistance". Report MIRIAM SP1 04, 2004
- [26] BECKENBAUER, T., BOEGLER, D., OTTO, T., SCHUBERT, S.: „Grundlagen zur Erweiterung des Simulationsmodells SPERoN zur akustischen Optimierung von Fahrbelägen“ (FE 09.0165/2011/HRB), Bergisch Gladbach, 2015

Der Schlussbericht einschließlich aller Anlagen zum vorliegenden Teilvorhaben I (Förderkennzeichen 19U10016 C) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.

### 3.3 Teilvorhaben SPERoN 2020 – Teil II

#### Entwicklung eines Rechenmodells zur Reduzierung des Rollgeräusches profilierter Reifen

Prof. Dr.-Ing. Otto von Estorff, Dipl.-Ing. Sören Keuchel  
TU Hamburg-Harburg, Institut für Modellierung und Berechnung, Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kropp, M. Eng. Julia Winroth, Dipl.-Ing. Carsten Hoever  
Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden

Prof. Dr. rer. nat. Ernst P. Stephan, Dipl.-Math. Zouhair Nezhi  
Leibniz Universität Hannover, Institut für angewandte Mathematik, Hannover

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer  
Müller-BBM GmbH, Planegg

#### Inhalt

<b>3.3.1</b>	<b>Zielsetzung .....</b>	<b>86</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Simulationstool zur Abbildung der Strukturdynamik von Reifen .....</b>	<b>87</b>
3.3.2.1	Modell zur Berechnung der Reifen-/Fahrbahninteraktion .....	87
3.3.2.2	Vergleich zwischen FEM- und WFEM für die Simulation von Reifen/Fahrbahnkontakt.....	93
3.3.2.3	Parameterstudie zum Einfluss auf den Rollwiderstand .....	96
3.3.2.4	Zusammenhang zwischen Rollgeräusch und Rollwiderstand von PKW-Reifen.....	98
3.3.2.5	Numerische Simulation von Rollgeräusch und Rollwiderstand von LKW-Antriebsachsenreifen .....	101
3.3.2.6	Zusammenfassung.....	102
<b>3.3.3</b>	<b>Simulationstool zur Abbildung der Schallabstrahlung von Reifen .....</b>	<b>103</b>
3.3.3.1	Rechenmodell .....	103
3.3.3.2	Numerische Untersuchungen .....	125
3.3.3.3	Zusammenfassung.....	129
<b>3.3.4</b>	<b>Entwicklung eines Simulationsmodells im Zeitbereich .....</b>	<b>130</b>
3.3.4.1	Rechenmodell .....	130
3.3.4.2	Theoretische Ergebnisse .....	131
3.3.4.3	Software Entwicklung.....	133
3.3.4.4	Numerische Experimente.....	134
3.3.4.5	Zusammenfassung.....	142
	<b>Literatur.....</b>	<b>142</b>

### 3.3.1 Zielsetzung

Eine effektive Reduzierung der Geräuschabstrahlung von Reifen ist nur möglich, wenn Änderungen am Reifen bereits in der Designphase hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Schallabstrahlung untersucht werden können. Dazu ist ein Werkzeug für die Simulation der Reifen-/Fahrbahninteraktion nötig, welches nicht nur die relevanten physikalischen Prozesse korrekt wiedergibt, sondern einerseits auch detailliert genug ist, um Designentscheidungen für den Reifen treffen zu können, andererseits aber gleichzeitig numerisch effizient genug ist, um Parameterstudien für z.B. bestimmte Konstruktionsmerkmale zu ermöglichen. Das an der Chalmers University Göteborg entwickelte Reifen-/Fahrbahnsimulationsprogramm, bestehend aus einem schnellen und trotzdem genauen Waveguide-Finite-Element-Modell (WFEM) der Reifenstruktur und einem effizienten nicht-linearen Kontaktmodul, eignet sich vom Ansatz her vorzüglich für diese Aufgabe.

Ziel der Arbeiten in diesem Teilprojekt war eine Weiterentwicklung des Rechenprogramms in folgenden Punkten:

1. Schaffung einer Schnittstelle zu den Abstrahlungsberechnungen der Projektpartner an der TU Hamburg-Harburg und der Leibniz Universität Hannover.
2. Entwicklung einer Methodik zur schnellen Implementierung neuer Reifenmodelle in das Werkzeug, möglichst basierend auf Design-Daten des Reifenherstellers.
3. Basierend auf Punkt 2 die Implementierung eines LKW-Antriebsachsenreifens zur Unterstützung der Arbeiten im LeiStra3-Teilprojekt IV.
4. Verbesserung des Kontaktmoduls.
5. Erweiterung um ein Modul zur Berechnung des Rollwiderstandes zur Unterstützung der Arbeiten im LeiStra3-Teilprojekt I.
6. Optimierung von Ausführungsgeschwindigkeit und Bedienbarkeit im Hinblick auf die Möglichkeit ausführlicher Parameterstudien.

Basierend auf den ausgeführten Punkten wurden einige Studien zum Einfluss verschiedenster Faktoren auf den Rollwiderstand und/oder das Rollgeräusch durchgeführt. Dabei wurde insbesondere untersucht, inwiefern Maßnahmen zur Veränderung des Rollgeräusches oder des Rollwiderstandes sich gegenseitig beeinflussen.

Die Modellierung der Akustik des Reifens (TU Hamburg-Harburg) kann mit Hilfe von unterschiedlichen Berechnungsverfahren erfolgen. Neben der Modellierung mit der Finite-Elemente-Methode (FEM), welche im Projekt „Leiser Straßenverkehr 2“ angewendet wurde, besteht die Möglichkeit einer Modellierung mit der Boundary-Elemente-Methode (BEM). Hierbei wird im Gegensatz zur FEM nicht das gesamte Volumen diskretisiert, sondern nur die Oberfläche des zu untersuchenden Reifens. Dies führt zu einer Reduktion der Freiheitsgrade. Im Gegenzug wird jedoch der Aufwand zum Lösen des Gleichungssystems höher, da nun vollbesetzte Systemmatrizen, wie sie in der BEM regelhaft vorliegen, zu verarbeiten sind. Vor diesem Hintergrund wurde die Fast-Multipole-Methode (FMM) eingesetzt und damit eine schnellere Berechnung der Akustik des Reifens ermöglicht. Die Methode beinhaltet einen Algorithmus zur effizienten Berechnung eines Matrix-Vektor-Produktes [4]. Die vollbesetzten Systemmatrizen der BEM führen beim Lösen mit einem iterativen Lösungsverfahren zu einer Komplexität  $O(N^2)$ . In der BEM hat jeder Knoten einen Einfluss auf jeden anderen Knoten. Die FMM nutzt die Multipole-Entwicklung (Reihenentwicklung der Fundamentallösung), um die Quellen zusammenzufassen und die komprimierten Informationen danach gebündelt weiterzugeben. Die Verwendung der FMM in der BEM führt zu einer Fast-Multipole-Boundary-Elemente-Methode (FMBEM), welche nur eine quasi-lineare Komplexität anstelle einer quadratischen Komplexität besitzt.

Ziel dieses Teilprojektes am IfAM, Leibniz Universität Hannover, war die Entwicklung eines in ein Gesamtkonzept integrierbares Simulationswerkzeug, das die Schallabstrahlung eines Autoreifens im Zeitbereich simulieren kann. Durch die entwickelten effizienten numerischen Verfahren (fehler kontrollierte adaptive zeitabhängige Randelementmethode in Verbindung mit einem effizienten Zeitschrittverfahren) ist es nun möglich, die Geräuschentwicklung eines Reifens für verschiedene Konfigurationen zu simulieren, und so geräuscharme Reifen ohne aufwändige Produktions- und Messschritte zu produzieren. Um diesem Anspruch gerecht zu werden, wurden experimentelle Daten der Chalmers University Göteborg in die Validierung des Programms einbezogen.

Als Hauptergebnis wurde eine effiziente und stabile, zeitabhängige Randelementmethode entwickelt, die die Berechnung der Schallemission realistischer PKW- und LKW-Reifen im Zeit- wie Frequenzbereich erlaubt. Insbesondere wurden adaptive Gitterverfeinerungsstrategien entwickelt, welche besonders für die Berechnung des Horneffekts und die komplexe Geometrie der Profilrillen relevant sind. Die Rechnungen im Zeitbereich erlauben die präzise Simulation der Schallabstrahlung auch bewegter und rollender Reifen und die Quantifizierung des Dopplereffekts.

Detailliert formuliert war es das Ziel des Teilprojektes am IfAM, der Leibniz Universität Hannover, eine Galerkin-Randelementmethode im Zeitbereich (time domain Galerkin boundary element method (TDBEM))

für vibrierende, bewegte und rollende Reifen auf der Fahrbahn zu untersuchen und ihre Effizienz, Genauigkeit und Stabilität für Anwendungen im Ingenieurbereich zu demonstrieren. Die voll-transiente Beschreibung ist nicht nur notwendig um die Schallabstrahlung von Fahrzeugen zu modellieren (mit Beschleunigen, Abbremsen und dynamischem Kontakt mit der Straße), sondern nach einer Fouriertransformation in der Zeitvariablen können aus einer solchen Beschreibung Informationen in einem breiten Frequenzbereich gewonnen werden.

Die Berechnung der Schallabstrahlung von Autoreifen ist von großem industriellem Interesse und stellt einen sehr aktiven Bereich der aktuellen Forschung dar. Neben der zeitharmonischen Simulation bildet die vollzeitabhängige Methode einen stark wachsenden Anteil. Diese Methode besitzt gegenüber dem zeitharmonischen Ansatz viele Vorteile. Insbesondere wird das komplette Spektrum in einer Simulation abgedeckt, was vor allem für hochfrequente Terme interessant ist. Zu gegebenen Daten auf der Reifenoberfläche wird die Schallabstrahlung im Außenraum mit Hilfe der Randelementmethode simuliert. Dieses Verfahren erfordert nur eine Diskretisierung der Reifenoberfläche und nicht, wie bei der Methode der finiten Elemente, die Diskretisierung des gesamten Außenraums. Es ermöglicht im Postprocessing die Darstellung des Schalldrucks in jedem beliebigen Punkt im Außenraum. Eine Simulation mit Hilfe der sogenannten retardierten Potentiale in Verbindung mit einem Galerkin Verfahren in Raum und Zeit resultiert in einem Zeitschrittverfahren der Bauart:

$$V^0 p^n = f^n - \sum_{m=1}^{n-1} V^{n-m} p^m,$$

wobei  $p^j$  den Druck auf der Reifenoberfläche im  $j$ -ten Zeitschritt darstellt und  $V^j$  die entsprechende Matrix zur  $j$ -ten Zeitdifferenz bezeichnet. Es ist also nötig eine Reihe von Matrizen und Lösungsvektoren zu speichern. Hierbei ist das Aufstellen der Matrizen der rechenintensive Anteil der Simulation. Das Gleichungssystem wird mit dem CG-Verfahren iterativ gelöst. Um die Rechenzeit zu reduzieren, sind Parallelisierungskonzepte mittels OpenMP und MPI umgesetzt worden, was zu einer deutlichen Beschleunigung führt. Das Raum-Zeit-Galerkin-Verfahren für retardierte Potentiale findet eine numerische Lösung der Wellengleichung, löst also das physikalisch zugrunde liegende Problem ohne weitere Einschränkungen an eine mögliche Lösung, wie sie für den zeitharmonischen Fall notwendig sind. Lange Zeit wurde dieses Verfahren als instabil abgetan, doch mit Hilfe moderner numerischer Techniken wurden im Projekt stabile Ansätze entwickelt und auf reale Simulationen der Schallabstrahlung von PKW- und LKW-Reifen angewendet. Des Weiteren haben lange Rechenzeiten von der Umsetzung des transienten Randelemente-Verfahrens abgeschreckt. Heutige Rechenleistung und die Möglichkeit zur Parallelisierung ermöglichen eine signifikante Reduktion der Rechenzeiten, die das Verfahren nun auch für Anwender interessant macht. Weitere Möglichkeiten signifikanter Zeitersparnisse bieten schnelle Multipolmethoden und die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zur adaptiv gesteuerten Gitterverfeinerung.

Am IfAM werden die Ergebnisse der zeitabhängigen (time-domain) BEM mit der Burton-Miller stabilisierten BEM-Rechnung im Frequenz-Bereich der TU Hamburg-Harburg validiert und verglichen. Die TDBEM, basierend auf der Galerkin-Diskretisierung in Raum und Zeit, führt auf ein Gleichungssystem mit unterer Block-Dreiecks-Matrix, das durch blockweise Rücksubstitution gelöst wird. Dieses oben erwähnte, so genannte „marching in on-time“ (MOT) Schema involviert die Berechnung einer Reihe von schwach besetzten Matrizen  $V^{n-m}$ . Diese fließen ihrerseits nur in die rechte Seite des Gleichungssystems über eine Matrix-Vektor-Multiplikation ein. Die zu invertierende Matrix  $V^0$  ist hingegen in jedem Zeitschritt dieselbe.

### 3.3.2 Simulationstool zur Abbildung der Strukturodynamik von Reifen

#### 3.3.2.1 Modell zur Berechnung der Reifen-/Fahrbahninteraktion

##### Reifenmodell

Bei der WFE-Modellierung wird ein Finite-Elemente-Ansatz über den Reifenquerschnitt mit einem Wellenansatz in Umfangsrichtung kombiniert. In einem zylindrischen Koordinatensystem ist somit die Auslenkungskomponente  $u_i$  für den Punkt  $(r, x, \emptyset)$  gegeben durch

$$u_i(r, x, \phi) = \mathbf{N}(r, x) \mathbf{v}_i(\phi) \quad 1 = r, x, \phi \quad (1)$$

Hierbei ist  $\mathbf{N}$  der Vektor der Formfunktionen über den Reifenquerschnitt während  $\mathbf{v}_i$  die entsprechenden Freiheitsgrade an den Knoten bezeichnet, welche von der Umfangskoordinate  $\emptyset$  abhängen. Es kann gezeigt werden [12], dass sich auf Basis von (1) ein gekoppeltes Differentialgleichungssystem ergibt:

$$\left[ -\mathbf{A}_{11} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + (\mathbf{A}_{01} - \mathbf{A}_{10}) \frac{\partial}{\partial \phi} + \mathbf{A}_{00} - \omega^2 \mathbf{M} \right] \mathbf{v}(\phi) = \mathbf{f}(\phi) \quad (2)$$

Die Steifigkeitsmatrizen  $\mathbf{A}_{nm}$  und die Massematrix  $\mathbf{M}$  folgen aus der potentiellen respektive kinetischen Energie des Reifens und  $\mathbf{f}$  ist ein externer Kraftvektor. Für den homogenen Fall  $\mathbf{f}=0$  sind die Lösungen gegeben als Exponentialfunktionen der Form

$$\mathbf{v}(\phi) = \hat{\mathbf{v}} e^{i\kappa\phi} \quad (3)$$

Diese lassen sich physikalisch als Wellen deuten, die sich mit Querschnittsschwingungsform  $\hat{\mathbf{v}}$  und einer Kreiswellenzahl  $\kappa$  in Umfangsrichtung ausbreiten. Durch Einsetzen von (3) in (2) erhält man ein Eigenwertproblem. Die Lösung dessen ergibt die Eigenfrequenzen und Eigenformen für eine spezifische Wellenzahl. Der Fall der erzwungenen Anregung kann z.B. durch ein „assumed modes procedure“ [12] oder modale Summation [23] gelöst werden. Für weitere Details zum Reifenmodell sei auf [12] und [30] verwiesen.

### Kontaktmodell

Für die Kontaktmodellierung wird ein nicht-lineares 3D-Modell benutzt [32], welches die gegenseitige Abhängigkeit von radialen Kontaktkräften und Reifenschwingungen berücksichtigt und Scans reeller Reifenprofile bzw. Straßenoberflächen als Eingangsdaten benutzt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde das Modell dahingehend weiterentwickelt, dass statt eines elastischen Halbraumes die Impulsantworten des Reifens für die Berechnung der Kontaktauslenkung benutzt werden. Weiterhin werden mikroskopische Rauigkeitsphänomene und der daraus resultierende Unterschied zwischen augenscheinlicher und echter Kontaktfläche durch Einführung einer zusätzlichen Kontaktsteife berücksichtigt [18]. Der Kontakt ist formuliert als

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(t_N) &= \mathbf{G}_0 \mathbf{F}(t_N) + \mathbf{u}_{\text{old}}(t_N) \\ F_e(t_N) &= k d_e(t_N) \mathcal{H}(d_e(t_N)) \\ \mathbf{d}(t_N) &= \mathbf{Z}_R(t_N) - \mathbf{Z}_T(t_N) - \mathbf{u}(t_N). \end{aligned} \quad (4)$$

$\mathbf{u}$  und  $\mathbf{F}$  sind die Reifenauslenkungen und Kontaktkräfte in Normalrichtung zum Zeitpunkt  $t_N$ .  $\mathbf{G}_0$  enthält die Werte der Impulsantwort des Reifens zum Zeitpunkt  $t_N=0$ .  $\mathbf{u}_{\text{old}}$  ist die Auslenkung aufgrund vergangener Zeitschritte und  $\mathbf{Z}_R$  und  $\mathbf{Z}_T$  sind die Straßen- bzw. Reifenprofile.  $\mathcal{H}$  ist die Heavisidesche Sprungfunktion,  $k$  die Kontaktsteife und der Subskript  $e$  bezeichnet einen individuellen Kontaktpunkt.

### Bestimmung der Eingangsdaten zur Strukturdynamikberechnung

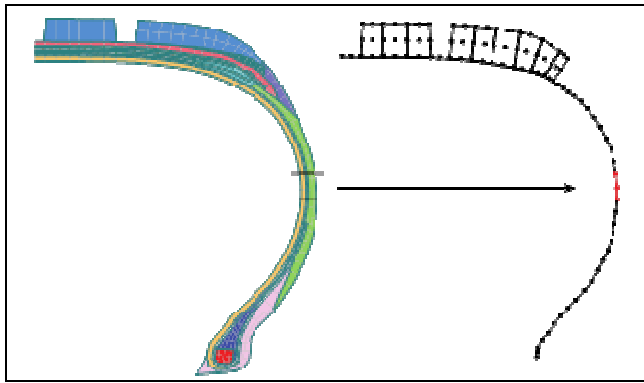
Ein entscheidender Parameter für die Güte der Berechnung der Strukturdynamik des Reifens sind die zur Verfügung stehenden Eingangsdaten für die Materialeigenschaften des Reifens, da auch ein exaktes Modell ohne richtige Materialparameter keine korrekten Ergebnisse liefert. Die Bestimmung der Eingangsdaten wird dabei dadurch erschwert, dass dem Reifenhersteller zwar an sich die Materialparameter der unterschiedlichen Reifenbestandteile bekannt sind, dies aber zumeist nur für den statischen Fall und nicht unter Betriebsbedingungen. Weiterhin werden im Zuge der Modellierung große Teile der Struktur kondensiert, so dass z.B. die kombinierten Materialeigenschaften von mehrschichtigen Materialkombinationen benötigt werden (siehe [30] für eine Übersicht der benötigten Daten).

Daher wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Continental ein Verfahren entwickelt, welches als Startpunkt ein vorhandenes, dynamisches, detailliertes FE-Modell des Reifens, hier als Beispiel ein 175/65R 14T XL, nutzt. Dieses Modell bildet die komplizierte Reifenkonstruktion aus einer Vielzahl von Schichten (Gummi, Textil, Stahl, etc.) mit unterschiedlichen Materialeigenschaften explizit nach, d. h. jedem Element kann genau eine Materialgruppe zugeordnet werden. Für das WFE-Modell hingegen muss die Anzahl der Elemente drastisch reduziert werden, so dass die Materialeigenschaften für ein Element nicht einer Materialgruppe, sondern einer bestimmten geometrischen Kombination verschiedener Materialgruppen entsprechen. Dies geschieht auf Basis des FE-Modells indem zunächst mittels des FE-Gitters die Geometrie und Materialzusammensetzung jedes Waveguide-Finite-Elementes bestimmt wird. Während die Geometrie und die Dichte des kombinierten Elementes leicht bestimmbar sind, ist die Bestimmung der Steifigkeitsmatrize komplizierter.

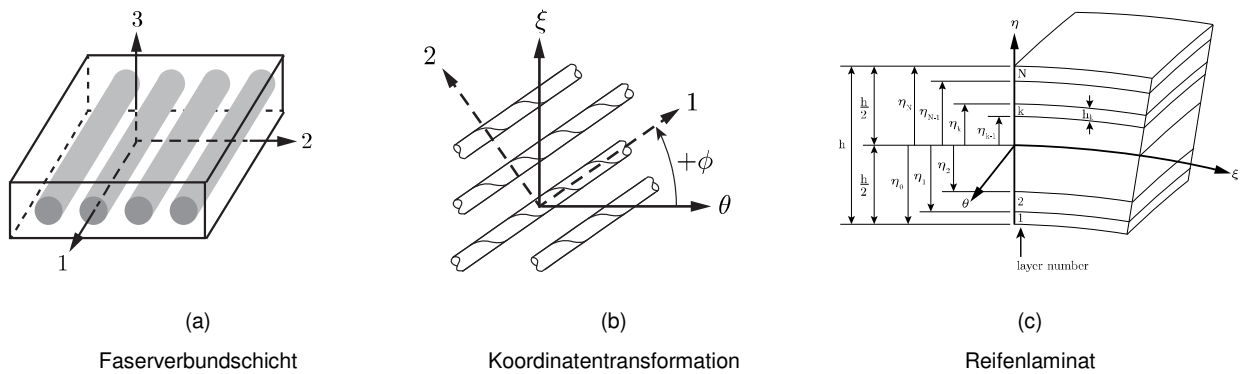
Die notwendige Kondensation der detaillierten mehrlagigen Ausgangsdaten zu vereinfachten Eingangsdaten für die WFEM, siehe Bild 3.3-1, lässt sich dabei im Wesentlichen auf drei zentrale Schritte reduzieren:

1. Die Bestimmung der orthotropen Eigenschaften einzelner Faserverbundschichten (siehe Bild 3.3-2a),
2. die Bestimmung anisotroper Eigenschaften im Reifenkoordinatensystem (siehe Bild 3.3-2b), und
3. die Bestimmung von Kraft- und Momentresultierenden für das Laminat (siehe Bild 3.3-2c).





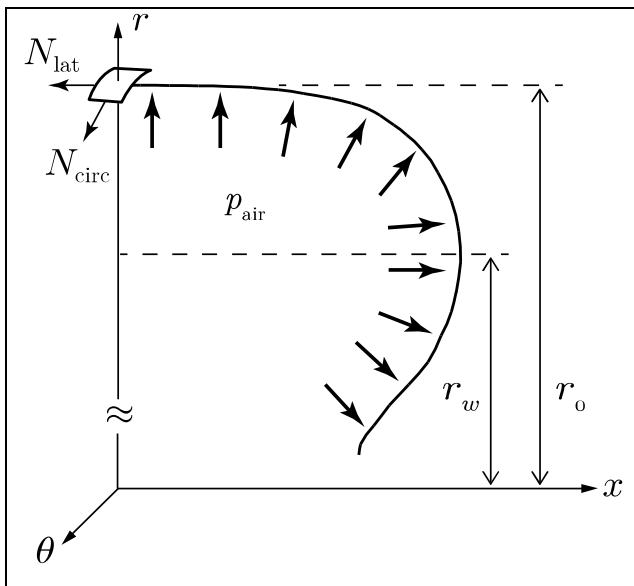
**Bild 3.3-1:** Vereinfachung der Materialdaten für die WFEM-Simulation



**Bild 3.3-2:** Die drei zentralen Bestandteile des Kondensationsvorganges

Mittels dieses Verfahrens können die Steifigkeitsmatrizen für alle Elemente des WFE-Reifenmodells bestimmt werden. Elementgeometrie und -dichte sind durch die vom Reifenhersteller übermittelten Daten gegeben. Anschließend werden weitere Anpassungen, u.a. für den Profilanteil in der Lauffläche und die Temperatur vorgenommen. Die Dämpfungseigenschaften werden anhand von Mobilitätsmessungen an einem Exemplar des Reifens bestimmt. Details zu allen Schritten sind in [18] zu finden.

Ebenfalls unbekannt sind die Reifenvorspannungen in lateraler und Umfangsrichtung. Wird der Reifen als doppelt-gekrümmte Membran wie in Bild 3.3-3 dargestellt betrachtet, so ergeben sich die Vorspannungen zu



**Bild 3.3-3:** Reifengeometrie für die Berechnung der Vorspannung

$$N_{lat}(x, r) = \frac{\rho_{air}}{2r} (r_0^2 - r_w^2)$$

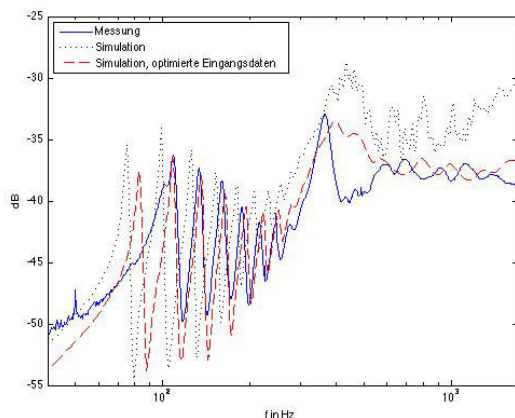
$$N_{circ}(x, r) = R_{circ}(x, r) \left( \rho_{air} - \frac{N_{lat}(0, r_w)}{R_{lat}(x, r)} \right) + \mu \Omega^2 r_0^2 \quad (5)$$

$N_{lat}$  und  $N_{circ}$  bezeichnen die Vorspannungen in lateraler und Umfangsrichtung,  $\rho_{air}$  die Dichte der eingeschlossenen Luft,  $\mu$  die Flächenmasse des Gürtels und  $\Omega$  die Rotationsgeschwindigkeit.  $r_0$  und  $r_w$  sind geometrische Größen, welche durch Bild 3.3-3 gegeben sind und  $R_{lat}$  und  $R_{circ}$  sind Krümmungsradien.

Aufgrund notwendiger Vereinfachungen in den Kondensations- und Simulationsroutinen, numerischen Ungenauigkeiten und vor allem den Unsicherheiten, die aus der Änderung der Reifenparameter während des Produktionsprozesses entstehen, ist eine weitere Anpassung der ermittelten Materialparameter für die WFEM-Simulation notwendig. Dies geschieht auf Basis eines Vergleiches zwischen gemessenen und berechneten Punkteingangs- und Transfermobilitäten des betreffenden Reifens. Die Einträge der Steifigkeitsmatrix, die Vorspannung und die Laufflächensteife werden mittels eines genetischen Algorithmus<sup>1</sup> auf eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Mobilitäten -  $Y_{Messung}$  und  $Y_{GA}$  - optimiert. Startwerte, Optimierungsgrenzen und weitere Optimierungsparameter werden aufgrund physikalischer Überlegungen bestimmt. Als Zielfunktion dient die Summe der Fehlerquadrate (mit  $\omega_i$  als Kreisfrequenz)

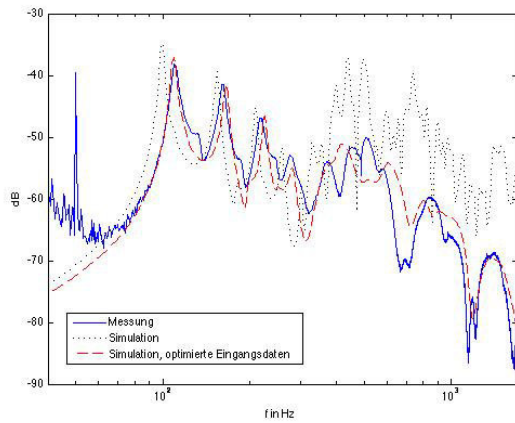
$$SSR = \sum_{\omega_i} (Y_{Messung}(\omega_i) - Y_{GA}(\omega_i))^2, \quad (6)$$

Die Validierung des Verfahrens erfolgt nach Erzeugung eines kompletten WFE-Modells des Reifens, zum einen anhand des Vergleiches mit den Ergebnissen von Mobilitätsmessungen und zum anderen anhand eines Vergleichs zu Eigenwertberechnungen im detaillierten FE-Modell. Dabei zeigt sich, siehe Bild 3.3-4 und Bild 3.3-5, dass die auf Basis der automatisch generierten Daten berechneten Mobilitäten einen sehr guten Ausgangspunkt darstellen. Eine perfekte Übereinstimmung mit den Messergebnissen kann mittels des implementierten Verfahrens grundsätzlich nicht erreicht werden, da nur unzureichende Informationen über den die Reifenvorspannung (welche für das dynamische Verhalten in weiten Frequenzbereichen maßgeblich ist) und die Verlustfaktoren zur Verfügung stehen. Zudem ist aufgrund von u.a. herstellungsspezifischen Abweichungen zwischen dem als Basis dienenden FE-Modell und dem zur Messung vorliegendem Reifen eine weitere manuelle Anpassung der ermittelten Materialparameter nötig. Die dadurch mögliche Verbesserung der Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation ist ebenfalls in Bild 3.3-4 und Bild 3.3-5 ersichtlich. Das entwickelte Verfahren hat sich als relativ effizient und genau erwiesen, so dass bei Vorliegen entsprechender Eingangsdaten (d.h. detailliertes FE-Modell) eine kurzfristige Implementierung neuer Reifen in die Simulationssoftware bei vertretbarem Arbeitsaufwand möglich ist.



**Bild 3.3-4:** Vergleich gemessene und berechnete Eingangsmobilitäten auf der Laufflächenmitte. Simulationsergebnisse beruhen auf den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Verfahren zur Materialparameterbestimmung und anschließender Optimierung

<sup>1</sup> Die Routine `ga()` aus MATLABS *Global Optimization Toolbox*, siehe [6].



**Bild 3.3-5:** Vergleich gemessene und berechnete Transfermobilitäten auf der Laufflächenmitte vom Anregepunkt zu einem Punkt  $90^\circ$  entfernt in Umfangsrichtung. Simulationsergebnisse beruhen auf den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Verfahren zur Materialparameterbestimmung und anschließender Optimierung.

### Entwickelte Reifenmodelle

Bei Beginn des Forschungsvorhabens war der in Bild 3.3-6/3.3-7a dargestellte 205/55 R16 PKW-Reifen im Modell implementiert. Im Zuge des Projektes wurde der in Bild 3.3-6/3.3-7b zu sehende 175/65 R14 PKW-Reifen als Testobjekt für das in Abschnitt 2.3 beschriebene Verfahren zur effizienteren Implementierung neuer Reifen genutzt. Zur Unterstützung des Teilprojektes IV wurde schließlich der in Bild 3.3-6c gezeigte 315/80 R22.5 LKW-Reifen implementiert. Im Gegensatz zu den bisherigen PKW-Reifen-Simulationen wird dabei der Reifenquerschnitt nicht hauptsächlich durch Shell-Elemente simuliert und (isotrope) Solid-Elemente nur für die Lauffläche eingesetzt, sondern der Großteil der Reifenkonstruktion durch Solid-Elemente abgebildet und nur die Karkasse durch Shell-Elemente modelliert, siehe Bild 3.3-7c. Dies trägt den größeren Dimensionen des LKW-Reifens Rechnung und vereinfacht die Handhabung der unterschiedlichen Materialgruppen, erfordert jedoch die Einführung anisotroper Solid-Elemente und steigert den numerischen Aufwand beträchtlich.



(a) 205/55 R16 PKW-Reifen

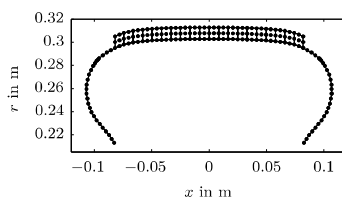


(b) 175/65 R14 PKW-Reifen

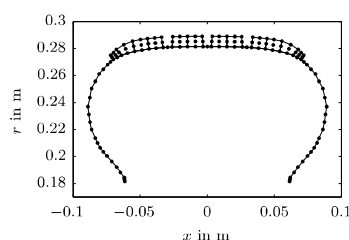


(c) 315/80 R22.5 Reifen

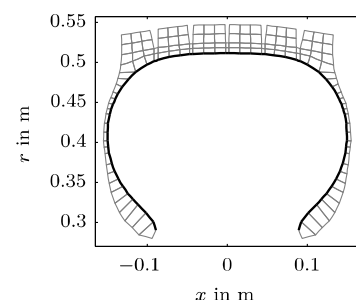
**Bild 3.3-6:** Die implementierten Reifen



(a) 205/55 R16 PKW-Reifen



(b) 175/65 R14 PKW-Reifen



(c) 315/80 R22.5 Reifen

**Bild 3.3-7:** Die WFEM-Meshs der implementierten Reifen

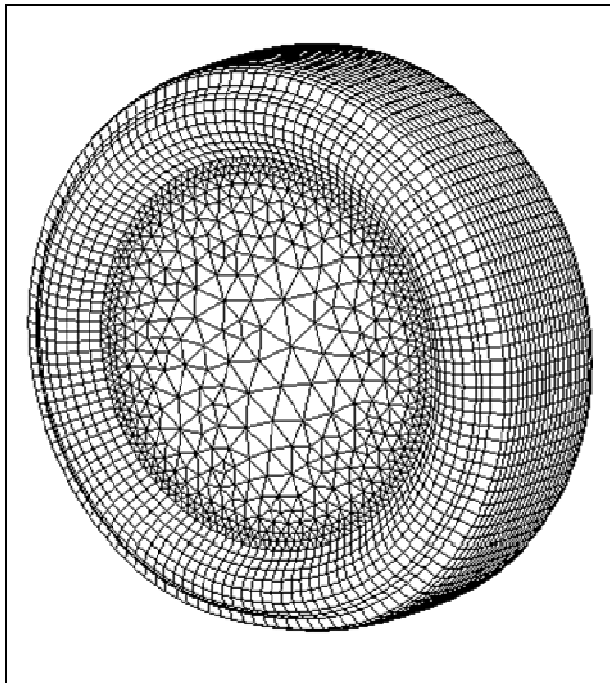
### Festlegung der Schnittstelle zum Datenaustausch zwischen Rollmodell und Abstrahlungsmodell

Zielsetzung ist unter anderem die Verknüpfung des Reifen- und Kontaktmodells, das von Chalmers im Projekt weiterentwickelt wird mit den Abstrahlmodellen, die an der Leibniz Universität Hannover und an der TU Hamburg-Harburg entwickelt werden. Hierzu musste eine Schnittstelle entwickelt werden, die eine Übergabe der Schwingungsverteilung auf dem Reifen erlaubt.

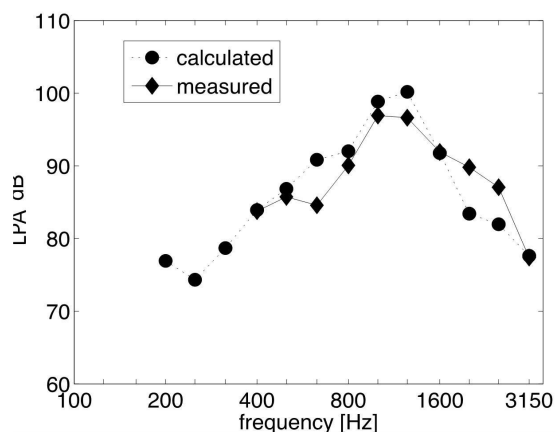
Hierzu wurde für einen ersten Test ein Modell des 205/55R16 Reifens erzeugt. Für diesen Reifen wurden die Kontaktkräfte während des Rollens auf eine ISO Oberfläche mit 80 km/h und einer Last von 2700 N berechnet.

Da bei der Berechnung des Schwingungsfeldes eine sehr hohe räumliche Auflösung notwendig ist (für die korrekte Abbildung des Kontaktes), wurde ein Verfahren entwickelt, das eine zuverlässige Datenreduktion erlaubt. Die im Zeitbereich berechneten Kontaktkräfte werden nach einer Koordinatentransformation in modale Kräfte umgerechnet. Die Anwendung eines modalen Ansatzes erlaubt auf eine elegante Weise ein Geschwindigkeitsfeld zu erzeugen, das nur die für die Abstrahlung relevanten Moden beinhaltet und eine deutlich gröbere Auflösung des Gitters (bestimmt durch die Schallwellenlänge im umgebenden Medium) für die Abstrahlung erlaubt.

Zum Test der Schnittstelle wurde von Chalmers ein Boundary Element Modell erzeugt, das konstante trianguläre und rechteckige Elemente beinhaltet (siehe Bild 3.3-8).



**Bild 3.3-8:** BEM Mesh



**Bild 3.3-9:** Vergleich zwischen Messung und Rechnung des A-bewerteten Schalldrucks in 1 m Entfernung zur Achse (Mittelwert über drei Mikrofonpositionen)

Für dieses Gitter wurden entsprechende Datensätze erzeugt und an die Partner übergeben. Als Referenz wurden auch Berechnungen mit dem BE-Modell (das auch die Straße berücksichtigt) durchgeführt. Bild 3.3-9 zeigt ein Vergleich zwischen Berechnung und einer Messung für einen vergleichbaren Fall auf einer ISO Oberfläche (jedoch mit einem etwas unterschiedlichen Reifen).

### 3.3.2.2 Vergleich zwischen FEM- und WFEM für die Simulation von Reifen/Fahrbahnkontakt

#### Zielsetzung

Es ist bekannt, dass die Simulation der Strukturmechanik von Reifen mittels FEM rechenintensiv ist. Analytische Modelle hingegen bieten oftmals nicht die notwendige Genauigkeit in der Beschreibung der Reifenstruktur. WFEM kombiniert die detaillierte Beschreibung eines diskretisierten Reifenquerschnitts mit einem effizienten Wellenansatz in Umfangsrichtung. Die richtige Beschreibung der durch die Straße verursachten Reifenschwingungen ist essentiell für die Simulation des Rollgeräusches. Sowohl das hochfrequente, dynamische Vibrationsfeld als auch die niederfrequente, quasistationäre Deformation im Kontaktbereich müssen präzise wiedergegeben werden. Um die Güte des von Chalmers genutzten WFE-Reifenmodells in Bezug auf traditionelle dynamische NVH-Parameter (z.B. Mobilität und modale Frequenzen) und das Kontaktverhalten (z.B. Aufstandsfläche) abschätzen zu können, wurden von Continental Vergleichssimulationen mit standardmäßig eingesetzten FE-Modellen durchgeführt. Auf diesem Wege kann das Potenzial der WFEM-Methode zur genauen Beschreibung sowohl der Anregung als auch der Dynamik eines rollenden Reifens kritisch untersucht werden.

#### Methodik

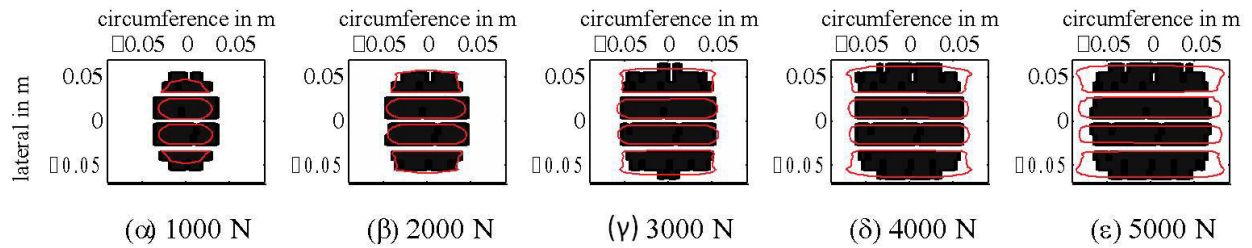
Ausgangsbasis ist das WFE-Modell des 175/65 R14 PKW-Reifens. Zum Vergleich dient eine von Continental entwickelte und eingesetzte FE-Software, in der ein 3D-Modell des Reifens mit 100 radialen Sektionen erstellt wird. Zur Modellierung der Vollgummiregionen des Reifens dienen hyperelastische Festkörperelemente, während für die faserverstärkten Zonen eine Kompositformulierung zum Einsatz kommt. Die statische Verformung und die resultierende Vorspannung aufgrund des Reifeninnendrucks werden nichtlinear berechnet. Die Temperatur- und Frequenzabhängigkeit der viskoelastischen Materialeigenschaften wird bei der Lösung des Eigenwertproblems berücksichtigt. Mobilitäten werden auf Basis eines abgeleiteten modalen Modells berechnet. In beiden Modellen wird nur die Reifenstruktur ohne Luftkavität oder Felge modelliert. Der Innendruck von 200 kPa wird entweder direkt als statischer Druck (FEM) oder als Vorspannung (WFEM) berücksichtigt. Im Bereich des Flansches wird zudem die Reifenverformung unterbunden. In beiden Modellen werden identische Materialeingangsdaten für 20 °C und 200 Hz verwendet, wobei eine weitere Materialparameteroptimierung im WFE-Modell verwendet wird. In beiden Modellen kommt die gleiche frequenzabhängige proportionale Dämpfung zum Einsatz.

Einige konzeptionelle Unterschiede gibt es zwischen grundlegenden Arbeitsweisen der Modelle: Das WFE-Modell wurde zur Berechnung von durch den Reifen-Fahrbahnkontakt verursachten Reifenschwingungen entwickelt, was zur Folge hat, dass die Kontaktverformung und die Reifendynamik gleichzeitig unter Berücksichtigung aller viskoelastischen Effekte bestimmt werden. Im FE-Modell werden statische und dynamische Berechnungen als getrennte Anwendungsfälle betrachtet, was z. B. zur Folge hat, dass viskoelastische Effekte nur für dynamische Fälle berücksichtigt werden.

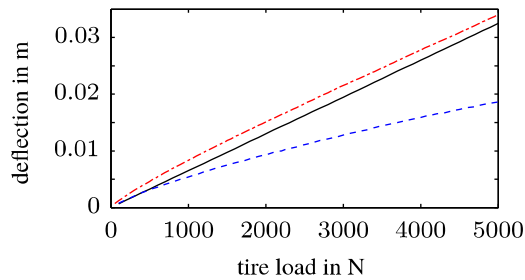
#### Ergebnisse

##### Quasi-statische Simulationen

Vorhergesagte Reifenaufstandsflächen für fünf verschiedene Achslasten werden für beide Methoden in Bild 3.3-10 verglichen. Die Aufstandsfläche für 3000 N ist bei beiden Methoden in etwa gleich groß. Für kleinere (größere) Achslasten überschätzt (unterschätzt) WFEM die Aufstandsfläche, wobei die Unterschiede hauptsächlich durch Änderungen in Umfangsrichtung verursacht werden.



**Bild 3.3-10:** Größe der Aufstandsfläche für verschiedene Achslasten für FE (—) und WFE-Simulationen (schwarze Flächen).



**Bild 3.3-11:** Achslast-Auslenkungskurve für FE- (---) und WFE-Simulationen (--) und gemäß Formel (7) (—).

Größere Unterschiede zwischen beiden Methoden sind in den Achslast-Auslenkungskurven zu verzeichnen, die in Bild 3.3-11 zusammen mit der empirischen Näherungsformel

$$d = L \cdot (0.00028 P \sqrt{(-0.004 AR + 1.03) S_N (S_N AR / 50 + D_R)} + 3.45)^{-1} \quad (7)$$

dargestellt sind. Dabei ist  $d$  die Auslenkung,  $L$  die Achslast in kg,  $P$  der Reifeninnendruck in kPa,  $AR$  und  $SN$  sind das Aspektverhältnis und Nennbreite wie auf dem Reifen angegeben und  $DR$  ist der Felgendurchmesser in mm. Die FEM-Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Näherungsformel. Die WFE-Simulationen hingegen unterschätzen die Auslenkung merklich für Achslasten größer 500 N.

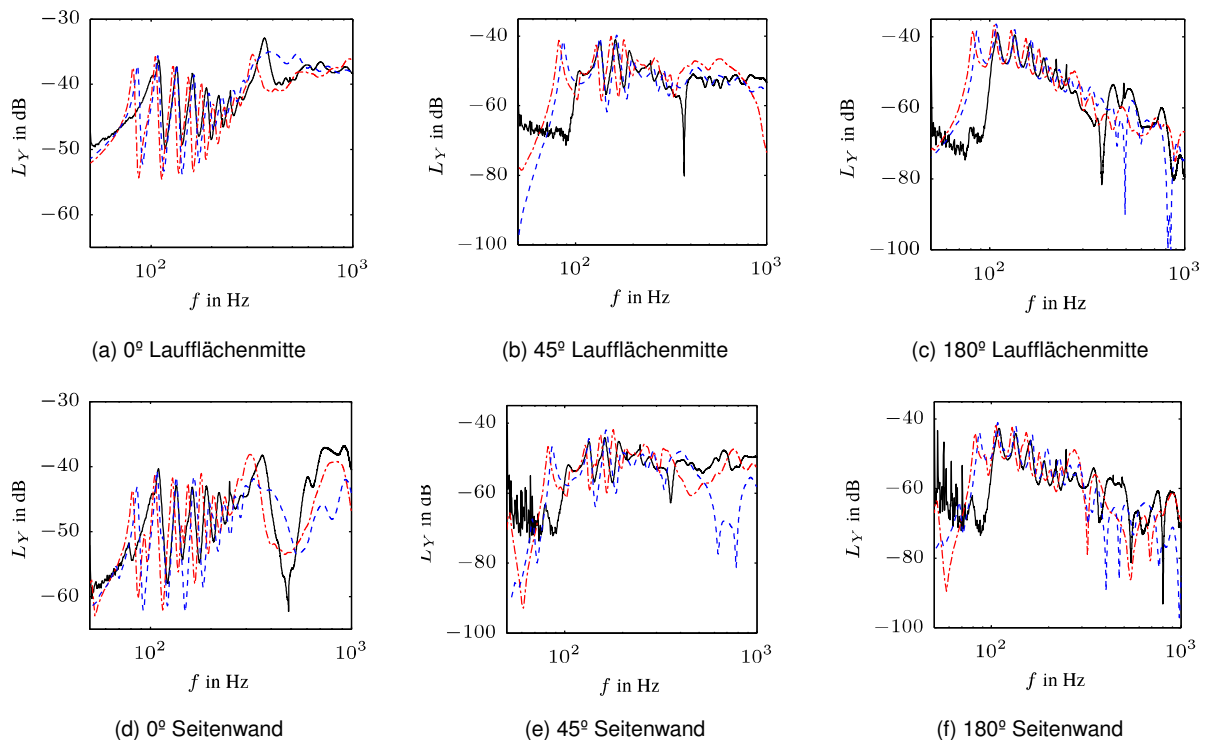
### Dynamische Simulationen

Umfangsordnung	Schwingungsform	gemessen, Hz	FEM, Hz	WFEM, Hz
0	SR: teleskopisch	40	41	55
0	SR: rotatorisch	63	51	72
1	SR: kippend	50	52	68
1	SR: translatorisch	82	82	86
2	S/AS	106/96	106/94	108/115
3	S/AS	131/157	129/143	134/167
4	S/AS	157/196	153/178	164/204
5	S/AS	184/217	179/204	196/234
6	S/AS	212/244	205/227	228/262
7	S/AS	241/265	233/250	259/290
8	S/AS	270/295	262/273	291/317
9	S	367	291	322

**Tab. 3.3-1:** Gemessene und simulierte Eigenfrequenzen. SR: semi-rigid, S: symmetrisch, AS: asymmetrisch.

Tabelle 3.3-1 vergleicht die Ergebnisse von FE und WFEM Eigenfrequenzanalysen mit gemessenen Eigenfrequenzen. Die FE-Ergebnisse sind, mit Ausnahme der letzten Mode, immer innerhalb von 10 % der gemessenen Werte. Die höchsten Abweichungen treten jeweils für asymmetrische Moden auf. Die WFE-Simulationen zeigen deutlich höhere Abweichungen, speziell für drei der vier semi-rigiden Moden und Ordnung 9. Für alle anderen Moden liegt die Abweichung unter 10 %. Tendenzen für unterschiedliche Abweichungen für symmetrische und asymmetrische Moden sind nicht erkennbar.

Gemessene und simulierte Mobilitäten für drei Umfangswinkel und zwei Positionen auf dem Reifenquerschnitt sind in Bild 3.3-12 zu sehen. In den Messungen ist die Felge nicht blockiert, sondern elastisch gelagert. Aufgrund dessen ist die niedrigste Resonanz der Simulationen in den Messungen nicht zu finden. Für die Punkteingangsmobilität und die Transfermobilitäten auf der Laufflächenmitte, Bild 3.3-12 a bis c, ist zu sehen, dass die WFE-Ergebnisse in den Frequenzbereichen bis 260 Hz und oberhalb von 500 Hz besser mit den Messungen übereinstimmen als die FE-Simulationen. Im mittleren Frequenzbereich sind für beide Methoden Abweichungen erkennbar, wobei generelle Tendenzen weiterhin erkennbar sind. Die Ergebnisse für die Positionen auf der Seitenwand, siehe Bild 3.3-12 d-f, sind für beide Methoden etwas schlechter als für die Positionen auf der Laufflächenmitte, aber qualitativ immer noch gut. Unterhalb von 450 Hz sind wiederum die WFEM-Ergebnisse besser als die FE-Ergebnisse. Für höhere Frequenzen kehrt sich dieser Trend um.



**Bild 3.3-12:** Vergleich von Mobilitäten aus Messung (—), WFE- (--) und FE-Simulation (-·-).  $L_Y = 20 \log_{10}(|Y/Y_0|)$ , mit  $Y_0 = 1 \text{ N}/(\text{ms})$  und  $Y$  Mobilität.

### Diskussion der Ergebnisse

Aus den quasi-statischen Berechnungen ergeben sich drei Beobachtungen: Erstens ist die mittels WFEM ermittelte Aufstandsfläche erstaunlich gut für ein dynamisches Modell, welches nicht für statische Berechnungen optimiert ist. Zweitens enthält das beschriebene Kontaktmodell Kontaktfedern, welche die Berechnung der Aufstandsfläche beeinflussen. Diese Steifen dieser Kontaktfedern sind für 2820 N Achslast gewählt. Dies erklärt die gute Übereinstimmung für 3000 N und die Abweichungen für die anderen Lasten. Drittens sind deutliche Abweichungen der WFEM-Achslast-Auslenkungskurve von den per FEM und Näherungsformel bestimmten Kurven sichtbar. Dies deutet auf zu große Seitenwandsteife im WFE-Modell. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass das WFE-Modell nicht in der Lage ist, das nicht-lineare Weichwerden der Seitenwandmembran unter Last zu simulieren. Zusätzlich könnte die Seitenwanddicke zu groß sein, um wie im genutzten Modell mit nur einer Lage Shell-Elemente modelliert zu werden.

In den dynamischen Messungen sind einige Unterschiede zwischen den Ergebnissen für die Eigenfrequenzanalyse und den Mobilitätsberechnungen erkennbar. Dies ist nicht verwunderlich, da freie und erzwungene Anregung zu unterschiedlichen Dehnungszuständen führten. Dies hat einen Einfluss auf die dynamische Steifigkeit des Reifens, da die viskoelastischen Parameter dehnungsabhängig sind.

Das WFE-Modell wurde im Hinblick auf Mobilitätsmessungen optimiert. Da die ersten drei semi-rigiden Moden nicht in den durchgeführten Mobilitätsmessungen erfasst werden, konnten diese Moden im Optimierungsprozess nicht berücksichtigt werden. Dass alle drei Moden hauptsächlich von der Seitenwandsteife (und teilweise der Vorspannung) abhängen, erhärtet die Annahme, dass die Seitenwand im WFE-Modell zu

steif ist. In den Ergebnissen ist ebenfalls erkennbar, dass die Referenzfrequenz für die viskoelastischen Parameter 200 Hz ist. Einerseits muss diese Frequenz tief genug sein, um eine korrekte Modellierung der quasi-statischen Kontaktverformung zu erlauben. Andererseits werden dynamische Simulationen bis  $\geq 1$  kHz durchgeführt. Die im WFE-Modell durchgeführte Materialoptimierung verbessert die Simulationsergebnisse für höhere Frequenzen, wodurch allerdings das Model zu steif im niedrigen Frequenzbereich wird (zu sehen an den Ordnungen 0 und 1 in Tabelle 3.3-1).

Zusammenfassend kann dem WFE-Modell attestiert werden, dass die Aufstandsfläche und die Struktur- dynamik gut erfasst werden. Dies ist von Bedeutung, da dies die beiden Merkmale sind, welche entscheidend für die korrekte Berechnung des Vibrationsfeldes auf einem rollenden Reifen sind. Ein Teil der dynamischen Simulationen deutet darauf hin, dass etwaige Materialparameteroptimierungen nicht ausschließlich aufgrund von Mobilitätsmessungen erfolgen sollten. Eventuell ist es auch notwendig, unterschiedliche Frequenzbereiche für die viskoelastischen Parameter einzuführen. Schlussendlich ist auch eine zu steife Seitenwandimplementierung erkennbar. Dies kann eventuell in der Materialparameteroptimierung oder dem Design des WFE-Querschnittsmeshes berücksichtigt werden. Ungeklärt ist momentan, inwieweit die Seitenwandsteife einen Einfluss auf Rollwiderstand oder -geräusch hat.

### 3.3.2.3 Parameterstudie zum Einfluss auf den Rollwiderstand

Im Jahr 2006 war der durch den Straßenverkehr verursachte Treibstoffverbrauch für 23 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb der EU verantwortlich [1], wobei ein signifikanter Anteil davon auf Rollverluste im Reifen zurückzuführen ist [11]. Trotz allem gibt es außer empirischen Daten keine oder wenig detaillierte Informationen über Rollwiderstandsmechanismen oder den Zusammenhang zwischen Rollwiderstand und Rollgeräuschentstehung bei Reifen. In einem ersten Schritt wird deshalb über eine Parameterstudie der Einfluss verschiedener Reifenmerkmale auf den Rollwiderstand und das Rollgeräusch (siehe nächstes Kapitel) untersucht.

## Zusammenhang von Verlusten im Reifen und Rollwiderstand

### Modellierung

Aufgrund des Prinzips der Energieerhaltung kann die Verlustleistung in Form der über den Kontakt eingespeisten Leistung berechnet werden. Eine detaillierte Aufstellung der Modellierungs- und Materialparameter kann in [30] gefunden werden, wobei hier mit 29 Shell-Elementen und 13 Solid-Elementen ein etwas größeres Mesh gewählt wurde. Als Fahrgeschwindigkeit werden 50 km/h bei einer Achslast von 3415 N gewählt. Das Rauigkeitsprofil der Straße basiert auf einer gescannten ISO 10844 Oberfläche. Für die Parameterstudie wurden die in Tabelle 3.3-2 aufgezählten Varianten der Ausgangskonfiguration betrachtet.

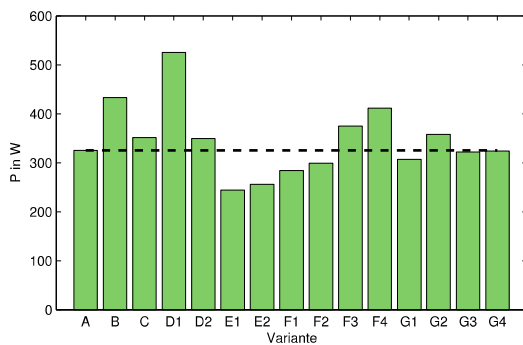
Variante	Beschreibung
A	Ausgangskonfiguration.
B	80 km/h, 2943 N.
C	Raue Straßenoberfläche.
D1/2	Verlustfaktoren verdoppelt/halbiert.
E1	Vorspannung verdoppelt. E-Modul Lauffläche halbiert.
E2	Vorspannung um 50 % erhöht.
F1/2/3/4	E-Module Seitenwand multipliziert mit 2/1,5/0,75/0,5.
G1/2	Dichte multipliziert mit 1,25/0,75.
G3	Veränderte Massenverteilung: Schwerere Seitenwand.
G4	Veränderte Massenverteilung: Schwerere Laufflächenmitte.

Tab. 3.3-2: Varianten für die Parameterstudie

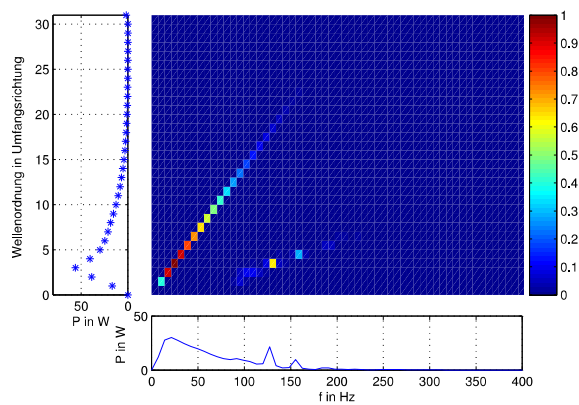


## Ergebnisse

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Parameterstudie besprochen. Aus Platzgründen muss auf eine detaillierte Analyse verzichtet werden. Bild 3.3-13 zeigt die dissipierte Leistung für alle berechneten Varianten. Für die Ausgangsvariante A beträgt die Verlustleistung 325 W. Bild 3.3-14 verdeutlicht, dass sich die Dissipation auf zwei Bereiche verteilt: Eine dominierende gerade Linie vom Koordinatenursprung bis etwa Umfangswellenzahl 20 und 140 Hz sowie zwei kleinere Maxima bei 127 Hz, Ordnung 3 und 156 Hz, Ordnung 4. Mittels der in [30] durchgeführten Analyse des Wellenfeldes auf einem Reifen, können die beiden einzelnen Maxima einem Wellentyp zugeordnet werden, bei dem im Reifenquerschnitt die komplette Lauffläche als Einheit radial schwingt. Ebenso kann nach [12] gefolgert werden, dass der zweite, dominierende Dissipationsbereich unterhalb der Cut-On-Frequenzen für ausbreitungsfähige Wellen liegt. Stattdessen wird dieser Bereich durch die Anregungseigenschaften geprägt. Basierend auf dem Reifenumfang und der Geschwindigkeit ergibt sich eine Anregfrequenz von 7,1 Hz, welche zusammen mit ihren Vielfachen die charakteristische Gerade ergibt. Die Dissipationsverteilung entlang der Linie ergibt sich aus dem Verhältnis der Kontaktfläche zur Wellenlänge der jeweiligen Ordnung.



**Bild 3.3-13:** Verlustleistung für alle Varianten. (- -) Verlustleistung der Ausgangskonfiguration A.



**Bild 3.3-14:** Verlustleistung im Frequenz- und Wellenzahlbereich für Variante A. Farbskalierung re. Maximalwert

Die Varianten B und C zeigen den erwarteten negativen Einfluss von Rollgeschwindigkeit bzw. rauere Straßenbelag. Weiterhin kann B als Bestätigung des Modells angesehen werden, da sich vergleichbare Werte ergeben wie in [12]. Die Ergebnisse für Veränderungen im Reifendruck (E), der Steife der Seitenwände (F) und der Dämpfungserhöhung (D1) sind wie erwartet und werden nicht weiter kommentiert. Gleiches gilt für die Änderung der Masseverteilung in den Fällen G3 und G4, bei denen sich keine signifikante Änderung des Rollverlustes ergibt.

### 3.3.2.4 Zusammenhang zwischen Rollgeräusch und Rollwiderstand von PKW-Reifen

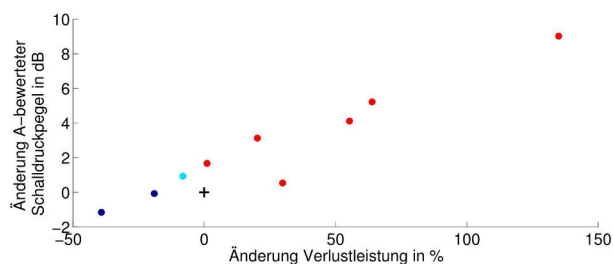
#### Parameterstudie Reifeneigenschaften

##### Modellierung

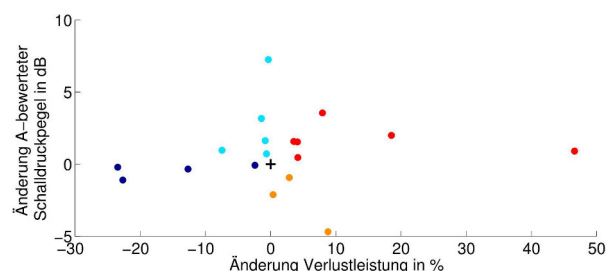
Das eingesetzte Modellierungsverfahren für den Rollwiderstand ist identisch zu dem in Abschnitt 3.3.2.1 beschriebenen. Zur Abstrahlungsberechnung kommt ein Halbraum-BEM-Verfahren zum Einsatz bei dem die Reflexion an der Straßenoberfläche in den Green'sche Funktionen berücksichtigt ist, siehe [23]. Die Auswertung der Schallabstrahlung erfolgt als gemittelter Schalldruck über 321 Punkte auf einer Halbkugel im Abstand von 1 m zum Kontaktpunkt Reifen-Fahrbahn. Ein A-bewerteter Gesamtschalldruckpegel wird basierend auf den Terzen 200 Hz bis 2000 Hz berechnet. Die Parameterstudie wurde aufgeteilt in eine Variation von reifenunabhängigen Parametern wie Geschwindigkeit, Achslast, Straßenoberfläche, usw. und eine Variation von Reifenparametern wie Masse, Masseverteilung, Steife, Vorspannung, Geometrie, usw. Insgesamt wurde für 51 Konfiguration der Rollwiderstand und zusätzlich für 32 davon das Rollgeräusch berechnet.

##### Ergebnisse

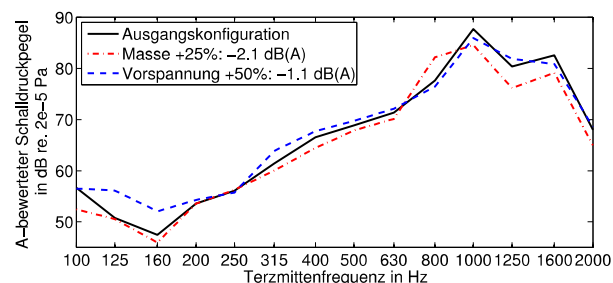
Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Parameterstudie besprochen. Bild 3.3-15 und Bild 3.3-16 zeigen für alle Konfigurationen die Gesamtänderungen von Rollgeräusch und Rollwiderstand im Vergleich zur Ausgangskonfiguration. Für die reifenunabhängigen Parameter in Bild 3.3-15 ergibt sich mit überwiegender Mehrheit eine Korrelation zwischen Rollgeräuschminderung bzw. -erhöhung und Ab- bzw. Zunahme des Rollwiderstandes. Bei Änderung der Reifenparameter ergibt sich ein inhomogeneres Bild, siehe Bild 3.3-16. In der sich ergebenden „kreuzförmigen“ Verteilung basiert die horizontale Achse mit starker Änderung des Rollwiderstandes und geringer Änderung des Rollgeräusches ausschließlich auf Änderungen der Steife des Reifengürtels bzw. der Vorspannung. Die vertikale Achse mit starker Rollgeräusch-, aber schwacher Rollwiderstandsänderung enthält nur Konfigurationen, in denen die Masse bzw. die Masseverteilung des Reifens (per Änderung der Materialdichten) geändert wird.



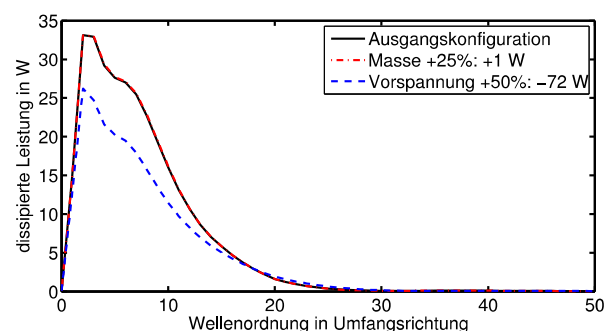
**Bild 3.3-15:** Ergebnisse Parameterstudie für reifenunabhängige Parameter. + Ausgangskonfiguration. Farben identifizieren unterschiedliche Kombinationen von Ab-/Zunahme für Rollgeräusch/-widerstand



**Bild 3.3-16:** Ergebnisse Parameterstudie für reifenunabhängige Parameter. + Ausgangskonfiguration. Farben identifizieren unterschiedliche Kombinationen von Ab-/Zunahme für Rollgeräusch/-widerstand



**Bild 3.3-17:** Rollgeräusch in Terzbändern für Standardkonfiguration und zwei Varianten. Anmerkung: Gesamtpegel für Terzen 200 Hz bis 2000 Hz



**Bild 3.3-18:** Rollwiderstand per Umfangsordnung für Standardkonfiguration und zwei Varianten

Als Beispiel wird für jeweils einen Vertreter der horizontalen und der vertikalen Achse ein detaillierter Vergleich des Rollgeräusches und des Rollverlustes mit den Werten der Standardkonfiguration durchgeführt, siehe Bild 3.3-17 und Bild 3.3-18. Für die Standardkonfiguration ergibt sich das erwartete Bild eines Rollgeräusches, welches von den Terzen 1 kHz bis 1,6 kHz dominiert wird, und eines von niedrigen Wellenordnungen in Umfangsrichtung geprägten Rollwiderstandes. Betrachtet man die Konfiguration, in der die Masse des Reifens global um 25 % erhöht wird, so ergibt sich keine relevante Änderung des Rollwiderstandes, jedoch eine Senkung des Schalldruckpegels um 2,1 dB(A). Wie in Bild 3.3-17 ersichtlich, folgt dies hauptsächlich aus einer Absenkung des dominierenden Bereiches oberhalb 1 kHz. Für tiefere Frequenzen sind die Änderungen eher zu vernachlässigen bzw. es ergeben sich sogar Pegelerhöhungen. Für eine Erhöhung der Vorspannung um 50 % ergibt sich eine Reduzierung des Rollverlustes um 72 W, welche sich hauptsächlich in den Ordnungen kleiner 10 vollzieht, siehe Bild 3.3-18. Die Verteilung der Verluste zwischen den Ordnungen wird dabei mit Ausnahme der Ordnung 2 nicht wesentlich geändert. Weiterhin ergibt sich auch eine Reduzierung des Rollgeräusches um 1,1 dB(A); die Änderungen in den einzelnen Terzbändern sind dabei aber deutlich anders, als für den Fall der erhöhten Masse. Bis 630 Hz liegt der Pegel sogar über dem der Ausgangskonfiguration. Die Pegelreduktion kann weitestgehend einer Absenkung der Spitzen bei 1 kHz und 1,6 kHz zugeordnet werden. Ein möglicher Erklärungsansatz wird in [23] geliefert, indem gezeigt wird dass die Abstrahlung eines Reifens oberhalb von etwa 1 kHz stark von niedrigen Wellenordnungen dominiert wird. Aufgrund der Ergebnisse für den Rollwiderstand kann für den Fall der erhöhten Vorspannung von einer reduzierten Anregung niedriger Moden ausgegangen werden; dies führt dann auch bei der Abstrahlung zu einer Absenkung der Pegel im beobachteten Bereich. Für den Fall der Masseerhöhung kann ein gleichwertiger Schluss nicht gezogen werden, vielmehr könnten Änderungen im Wellenfeld bzw. in der Abstrahleffizienz für die beobachtete Pegelreduktion verantwortlich sein.

### **Zusammenfassende Betrachtung**

Aus den Ergebnissen folgt, dass für Rollwiderstand und Rollgeräusch kein genereller Zielkonflikt erkennbar ist, vielmehr gibt es in vielen Fällen eine Korrelation der Größen. Die Parameterstudie deutet ein gleichzeitiges Optimierungspotential für beide Größen durch Modifikation bestimmter Reifenparameter an. Dabei könnten niedrige Wellenordnungen, welche sowohl den Rollwiderstand als auch die Abstrahlung im wichtigen Bereich oberhalb von 1 kHz dominieren, eine wichtige Rolle für beide Prozesse spielen. Generell scheinen Änderungen an der Reifenkonstruktion eine höhere Signifikanz für die Rollverluste als für das Rollgeräusch zu haben; die Pegelabnahme liegt größtenteils unter 2 dB.

### **Einfluss von Modellierungsparametern**

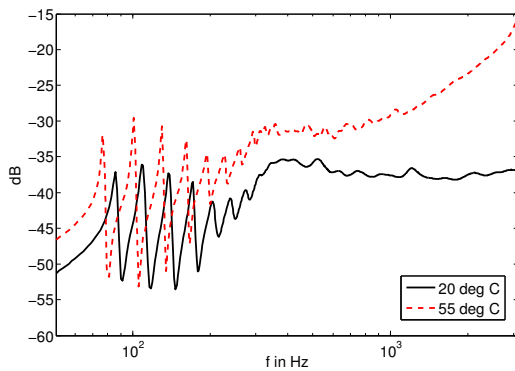
Auf Basis der ermittelten Reifeneingangsdaten wurden umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Modellierungsparameter auf Rollgeräusch- und Rollwiderstandssimulationen durchgeführt. Bei diesen Parametern handelt es sich u.a. um:

- Betriebsbedingungen (Fahrgeschwindigkeit, Achslast, Reifendruck),
- Reifenparameter (Temperatur, Optimierungsgrad, anisotrop oder orthotrop) und
- Simulationsparameter (Zentrifugalkräfte, Kontaktsteife und -geometrie Abstrahlgeometrie).

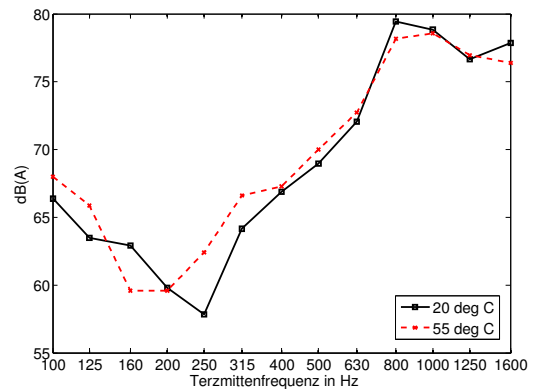
Eine detaillierte Übersicht über die Ergebnisse kann in [18] gefunden werden. Eine Darstellung der Ergebnisse ist hier aus Platzgründen nicht möglich, zwei Fälle sollen jedoch als Beispiel dienen.

### **Temperatureinfluss**

Während des Rollvorganges erhitzt sich der Reifen auf ca. 55 °C. Dies ist insofern problematisch, als die Materialdaten größtenteils für Raumtemperatur vorliegen und Messungen der Mobilität normalerweise ebenfalls nicht im erhitzten Zustand stattfinden. Da sich insbesondere die Steifigkeiten und Verlustfaktoren des Gummimaterials deutlich mit der Temperatur ändern, ist ein großer Einfluss der Temperatur auf die Strukturmechanik, d.h. z. B. die Mobilität, zu erwarten. Unbekannt ist jedoch, inwieweit dies auch die Schallabstrahlung beeinflusst.



(a)



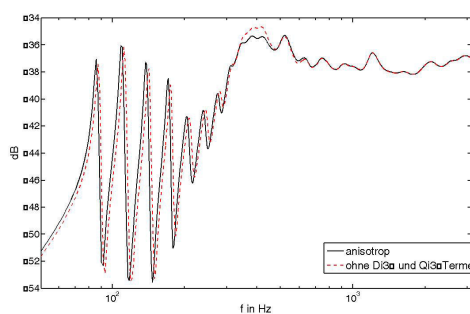
(b)

**Bild 3.3-19:** (a) Punkteingangsmobilität in Laufflächenmitte und (b) Schallabstrahlung für unterschiedliche Reifentemperaturen

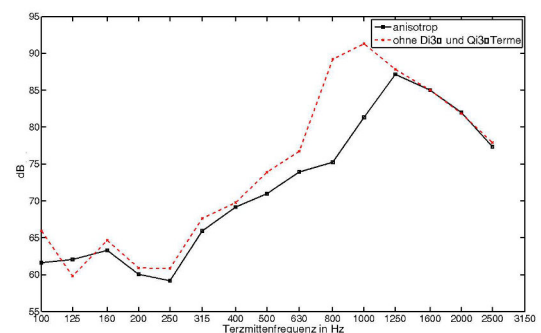
Wie in Bild 3.3-19a ersichtlich ist, zeigen sich in der Simulation deutliche Unterschiede in den Mobilitäten für 20 °C und 55 °C, wobei der wärmere Reifen wie erwartet klar weicher ausfällt. Interessanterweise spiegeln sich diese deutlichen Unterschiede kaum im Schalldruck wieder. In den dominierenden Terzen liegen die Pegeldifferenzen im Rahmen von ca. 1 dB. Für niedrigere Frequenzen ergeben sich größere Unterschiede, diese sind jedoch für den Gesamtpegel irrelevant. Es folgt, dass die Berechnung der Schallabstrahlung ohne aufwendige Ermittlung der Materialdaten für den erwärmten Reifen möglich ist.

### Grad der Anisotropie der Steifigkeitsmatrix

Mittels des beschriebenen Verfahrens ist es möglich die kompletten anisotropen Materialdaten des Reifens zu ermitteln. Vormalig konnten bestimmte Kopplungsterme nicht bestimmt werden, so dass bestenfalls orthotrope Reifendaten vorlagen. Eine Abschätzung des Unterschiedes, der sich durch diese unterschiedlichen Elastizitätsbeschreibungen des Reifens ergibt, ist mit Bild 3.3-20 möglich. In der Punkteingangsmobilität ist nur ein minimaler Unterschied von weniger als 1 dB für ca. 400 Hz ersichtlich. Deutlich größere Unterschiede ergeben sich für das Rollgeräusch, welches um bis zu 12 dB(A) für einzelne Terzen steigt, wenn die Kopplungsterme nicht mit berücksichtigt werden. Da für den simulierten Reifen keine Messungen der Schallabstrahlung vorliegen, kann momentan nicht geklärt werden, welcher der berechneten Schalldruckpegel näher an der Wirklichkeit ist. Der sich ergebende deutliche Unterschied ist in jedem Fall bemerkenswert und sollte noch näher untersucht werden. Abschließend kann zusammen mit den eingangs dargestellten Ergebnissen auch festgehalten werden, dass es nicht möglich ist, aus Änderungen der Mobilität auf ebensolche Änderungen des abgestrahlten Schalldruckpegels (oder umgekehrt) zu schließen.



(a)



(b)

**Bild 3.3-20:** (a) Punkteingangsmobilität in Laufflächenmitte und (b) Schallabstrahlung für komplett anisotrope Steifigkeitsmatrizen und für fehlende Kopplungsterme

### 3.3.2.5. Numerische Simulation von Rollgeräusch und Rollwiderstand von LKW-Antriebsachsenreifen

Das Teilvorhaben III sah die Entwicklung leiserer Antriebsreifen für den Regionalverkehr vor, welche mittels Computer-Simulationen durch das Teilvorhaben II unterstützt werden soll. Die Erstellung eines derartigen Computermodells setzt die Existenz von entsprechenden Validierungsdaten voraus. Für das Reifenmodell sind dazu insbesondere Eigenresonanzanalysen und Mobilitätsmessungen geeignet. Für Eigenresonanzmessungen liegen seitens Continental entsprechende Daten vor, während Messungen der Mobilität von Chalmers selbst durchgeführt wurden. Beim Reifen handelt es sich um einen von Continental zur Verfügung gestellten Antriebsachsenreifen der Maße 315/80R 22.5 mit 5 Längsrillen aber ohne Querprofil, siehe Bild 3.3-6c.

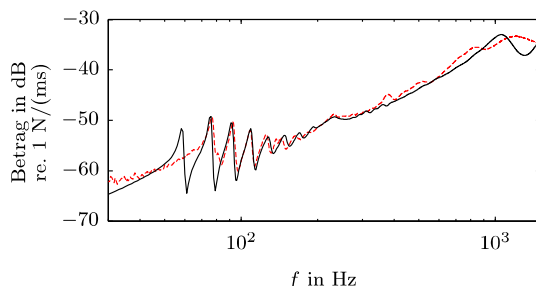
#### Modellierung

Die Modellierung von Rollgeräusch und Rollwiderstand erfolgt analog zu den bereits für PKW-Reifen vorgestellten Verfahren, siehe Abschnitte 3 und 5. Der Rollwiderstandskoeffizient ist gegeben als  $C_r = P_{\text{ein}} / (F_N V)$ , wobei  $P_{\text{ein}}$  die eingespeiste Leistung,  $F_N$  die Achslast und  $V$  die Rollgeschwindigkeit sind. Das Reifen-/Fahrbahngeräusch wird mittels eines Halbraum-BEM-Verfahrens [32] in Form des A-bewerteten Schalldruckpegels für Terzen von 100 Hz bis 2 kHz berechnet. Die statischen Materialparameter wurden durch Continental zur Verfügung gestellt und mittels Vergleich zu gemessenen Mobilitäten für den dynamischen Fall angepasst. Die Simulationen erfolgen für 70 km/h für den Rollwiderstand und 50 km/h für das Rollgeräusch, einen Reifeninnendruck von 670 kPa und einer Achslast von 20 kN. Für die Straßenprofile kommen 3D-Scans einer SMA 0/8 Oberfläche (Schallabstrahlung), sowie für den Rollwiderstand einer ISO 10844 Oberfläche und einer abgestreuten Oberfläche (Korngröße 11 mm bis 16 mm) zum Einsatz.

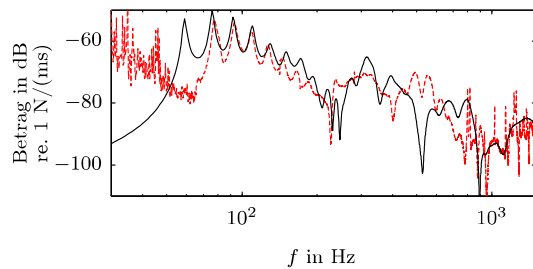
#### Ergebnisse

Zur Validierung des Reifenmodells und der Materialparameter sind in den Bild 3.3-21 und Bild 3.3-22 die radiale Punkteingangsmobilität und die Transfermobilität zu einem Empfangspunkt  $180^\circ$  in Umfangsrichtung dargestellt. Mit Ausnahme der zweiten Antiresonanz in der Punktmobilität und des Bereiches von 450 Hz bis 800 Hz in der Transfermobilität ist die Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Mobilitäten sehr gut. Die zusätzliche Resonanz bei ca. 55 Hz in den Simulationen beruht auf unterschiedlichen Randbedingungen (Simulation: fest eingespannt, Messung: frei schwingend).

In Tabelle 3.3-3 sind simulierte Rollwiderstände für die zwei Straßenoberflächen angegeben. In Ermangelung von Rollwiderstandsmessungen für den LKW-Reifen sind als Vergleichsdaten Werte für einen PKW-Reifen angegeben. Aufgrund der höheren Last ist die eingespeiste Leistung für den LKW-Reifen deutlich größer als für den PKW-Reifen. Weiterhin ergibt sich für beide Reifen ein deutlicher Anstieg der Verlustleistung auf der abgestreuten Oberfläche, wobei allerdings für den LKW-Reifen der Anstieg mit 37 % geringer ausfällt als für den PKW-Reifen (52%). Drückt man die Rollverluste durch den Rollwiderstandskoeffizienten  $C_r$  aus, so ergeben sich für den LKW-Reifen durchgängig  $C_r$ -Werte, welche kleiner sind, als die des PKW-Reifens. Dieser Effekt deckt sich mit der Praxis (siehe z.B. [13]) und beruht auf der deutlich höheren Steife des LKW-Reifens.



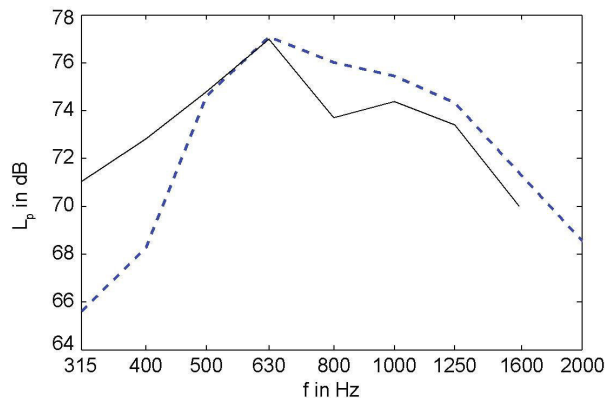
**Bild 3.3-21:** Gemessene (-) und simulierte (- -) radiale Punkteingangsmobilität in der Laufflächenmitte. Die zusätzliche Resonanz in der Simulation bei 55 Hz ist unterschiedlichen Randbedingungen geschuldet.



**Bild 3.3-22:** Gemessene (-) und simulierte (- -) radiale Transfermobilität in der Laufflächenmitte zu einem Empfangspunkt  $180^\circ$  in Umfangsrichtung. Die zusätzliche Resonanz in der Simulation bei 55 Hz ist unterschiedlichen Randbedingungen geschuldet.

	PKW		LKW	
	$P_{ein}$ in W	$C_r$	$P_{ein}$ in W	$C_r$
ISO 10844	2874	0.74 %	492	0.80 %
abgestreut	3926	1.01 %	749	1.22 %

**Tab. 3.3-3:** Simulierte Rollwiderstände



**Bild 3.3-23:** Rollgeräusch für die SMA0/8 Oberfläche. Messung (-) und Simulation (- -).

Simulationsergebnisse für das Rollgeräusch auf der SMA 0/8 Oberfläche werden in Bild 3.3-23 zusammen mit gemittelten CPX-Messungen gezeigt. Es gibt eine nahezu perfekte Übereinstimmung der Simulation mit den Messwerten für die Terzen von 500 Hz und 630 Hz. Die höheren Terzen werden leicht unterschätzt, mit Ausnahme der 800 Hz, bei der die Abweichung ca. 3 dB beträgt, jedoch nur um etwa 1 dB. Eine deutliche Überschätzung der Messwerte um etwa 4 dB bis 5 dB ergibt sich für die niedrigsten beiden Terzen. Es ist momentan unklar, woher diese Abweichung kommt. Für eine Rollgeräuschprognose ist sie jedoch von geringem Belang, da die Terzpegel deutlich unterhalb der Maximalpegel im Spektrum liegen.

### 3.3.2.6 Zusammenfassung

Das an der Chalmers University Göteborg entwickelte Reifen-/Fahrbahnsimulationsprogramm, bestehend aus einem WFE-Reifenmodell und einem nichtlinearen Kontaktmodul wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens grundlegend erweitert. Es wurde eine Schnittstelle zu den Abstrahlungsberechnungen der Projektpartner TU Hamburg-Harburg und Leibniz Universität Hannover geschaffen, die einen schnellen Datenaustausch erlaubt. Für die effiziente Implementierung neuer Reifen in das Berechnungswerkzeug wurde ein Verfahren entwickelt, welches basierend auf beim Reifenhersteller vorhandenen Daten aus dem Entwicklungsprozess die Erstellung eines reduzierten WFE-Modells erlaubt. Die Anwendbarkeit des Verfahrens wurde durch die Implementierung zweier neuer Reifen in das Reifenmodul nachgewiesen. Bei einem dieser Reifen handelt es sich um den in Teilprojekt IV genutzten LKW-Reifen. Aufgrund der besonderen Merkmale von LKW-Reifen war in diesem Zusammenhang eine Erweiterung des Moduls zur Berechnung der Strukturmechanik nötig (u.a. Implementierung anisotroper Solid-Elemente). Eine Verbesserung des Kontaktmoduls war möglich durch das Ersetzen des elastischen Halbraumes durch die Impuls-

antworten des Reifens für die Berechnung der Kontaktverformung, und durch die Berücksichtigung mikroskopischer Kontakteffekte aufgrund der Kontaktsteifen.

Ein zusätzliches Berechnungsmodul zur Bestimmung des Rollwiderstandes wurde entwickelt. Dabei ist nicht nur die Bestimmung des Gesamtverlustes möglich, sondern auch eine detaillierte Analyse der Frequenz- und Ordnungsverteilung sowie eine Lokalisierung der Verluste in der Reifenstruktur. Zusammen mit Verbesserungen der Ausführungsgeschwindigkeit und der Bedienbarkeit des Programmes konnte dies für umfangreiche Parameterstudien mit mehr als 100 Fällen zum Rollwiderstand und Rollgeräusch genutzt werden. Die Abhängigkeit beider Größen von Reifenkonstruktion, externen Parametern und Modellierungsfaktoren wurde untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass Rollwiderstand und Rollgeräusch nicht notwendigerweise in einem Spannungsfeld zueinander stehen, sondern dass vielmehr eine gleichzeitige Verbesserung beider Größen durch Änderungen der Reifenkonstruktion möglich ist.

### 3.3.3 Simulationstool zur Abbildung Schallabstrahlung von Reifen

#### 3.3.3.1 Rechenmodell

##### Boundary-Elemente-Methode in der frequenzabhängigen Akustiksimulation

Die Ausbreitung des Schalldrucks im Frequenzbereich wird durch die Helmholtzgleichung:

$$\nabla^2 p + k^2 p = 0$$

beschrieben und beruht auf einer zeitharmonischen Schwingung mit der Wellenzahl  $k$ . Diese Differentialgleichung kann mit Hilfe der zweiten Greenschen Identität in eine Randintegralgleichung umgeformt werden, die nur noch von Größen auf dem Rand des zu untersuchenden Gebietes abhängt [8]:

$$c(x)p(x) = \int_{\Gamma} G(x, y) \underbrace{\frac{\partial p(y)}{\partial \mathbf{n}_y}}_q d\Gamma - \int_{\Gamma} p(y) \underbrace{\frac{\partial G(x, y)}{\partial \mathbf{n}_y}}_F d\Gamma$$

Die benötigte Fundamentallösung für den dreidimensionalen Fall der Akustik lautet:

$$G(x, y) = \frac{e^{ik|x-y|}}{4\pi|x-y|},$$

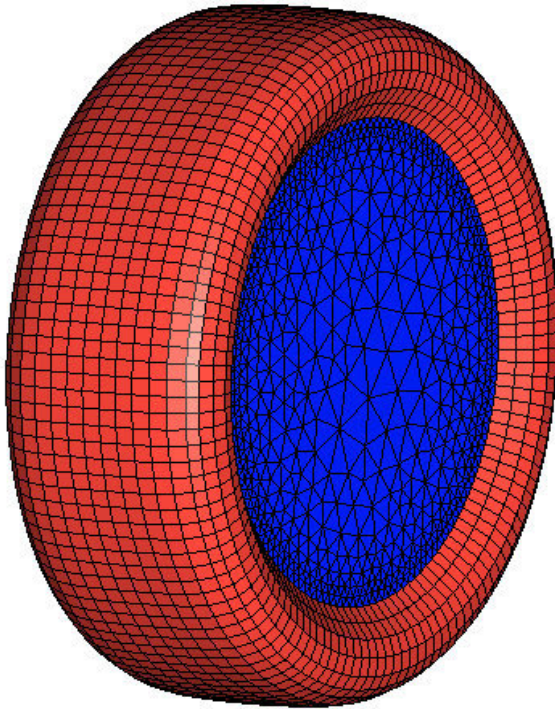
wobei  $x$  der Empfänger und  $y$  der Quellpunkt ist. Die Randintegralgleichung muss nun noch diskretisiert werden, wobei hier konstante Elemente verwendet werden, um den Randwert anzunähern. Diese Diskretisierung und eine numerische Integration über den Rand ermöglicht dann die Verwendung der Kollationsmethode zur Erstellung eines linearen Gleichungssystems der Form:

$$Ax = b.$$

Unter Vorgabe der Randbedingungen kann das Gleichungssystem danach gelöst werden, um alle Randwerte auf der Oberfläche zu ermitteln. In einer Nachlaufberechnung kann darauf aufbauend eine Lösung im gesamten Außenraum bestimmt werden. Weitere Details finden sich in [19].

#### Schnittstellen Chalmers University

Zur Kopplung der Modelle müssen die Schnittstellen zum Teilmodell der Chalmers University definiert werden. Als Übergabevariablen dienen die Schnellen auf dem Reifen. Die Schnelleverteilung wird auf einem Oberflächennetz (siehe Bild 3.3-24) für die BEM-Berechnung übermittelt. Im entwickelten C++ -Programm der TUHH wurden Einleseroutinen für die übergebenden Matlab-Dateien erstellt.



**Bild 3.3-24:** Diskretisierung eines Reifens mit Quad- und Tria-Elementen der Chalmers University

### Fast-Multipole-Methode

Die Fast-Multipole-Methode ist ein Verfahren zur Approximation eines Matrix-Vektor-Produktes und kann unter Verwendung von iterativen Gleichungslösern zur Beschleunigung der BEM eingesetzt werden. Die Näherung beruht auf der Multipole-Entwicklung der Fundamentallösung [27]

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \approx \frac{ik}{(4\pi)^2} \int_{\mathbb{S}^2} \underbrace{e^{ik(\mathbf{x}-\mathbf{z}_a)\hat{\mathbf{s}}}}_{R(x, z_a, \hat{\mathbf{s}})} \underbrace{\sum_{l=0}^P (2l+1) i^l h_l^{(1)}(k|\mathbf{D}|) e^{ikd\hat{\mathbf{s}}} P_l(\hat{\mathbf{s}}\hat{\mathbf{D}})}_{M_L(\mathbf{z}_b, \mathbf{z}_a, \hat{\mathbf{s}})} \underbrace{e^{ik(\mathbf{z}_b-\mathbf{y})\hat{\mathbf{s}}}}_{R(z_b, y, \hat{\mathbf{s}})} ds.$$

Diese Formulierung wird Diagonalform genannt und besteht aus den Operatoren  $R(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \hat{\mathbf{s}}) = e^{ik(\mathbf{a}-\mathbf{b})\hat{\mathbf{s}}}$  (M2M und L2L) und  $M_L(\mathbf{z}_b, \mathbf{z}_a, \hat{\mathbf{s}})$  (M2L) mit  $\mathbf{D} = \mathbf{z}_a - \mathbf{z}_b$  und der Entwicklungslänge  $P$ . Die Diskretisierung wird durch eine hierarchische Baumstruktur in mehrere Boxen auf unterschiedlichen Leveln aufgeteilt. Die größte Box (Level 0) umfasst alle Elemente und wird dann sukzessive in je acht gleichgroße „Child-Boxen“ unterteilt. Dieser Vorgang wird solange weitergeführt bis sich eine maximale Anzahl von Elementen in jeder Box befindet. Mithilfe des M2M-Operators kann nun die Information mehrerer Quellen auf dem feinsten Level der Baumstruktur zusammengefasst und dann gebündelt an das nächst größere Level gesendet werden. Die Informationen werden anschließend durch den M2L-Operator an weiter entfernte Boxen übertragen und können anschließend mit dem L2L-Operator auf das feinste Level transferiert werden. Dieser Algorithmus ermöglicht so die Auswertung des Einflusses durch das Fernfeld in einer komprimierten Weise. Das Nahfeld muss weiterhin wie in der konventionellen BEM ausgewertet werden. In Bild 3.3-25 ist die Verringerung der Komplexität bildlich dargestellt. In Bild 3.3-26 ist der Algorithmus zur Berechnung des Fernfeldes mit Hilfe der FMM schematisch dargestellt. Es werden die Übertragungswege und verwendeten Operatoren gezeigt.



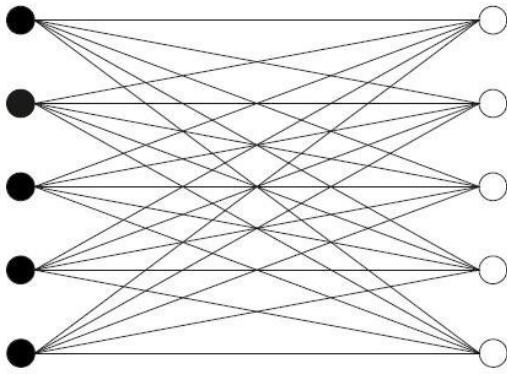


Bild 3.3-25: Fast-Multipole-Methode nach [7]

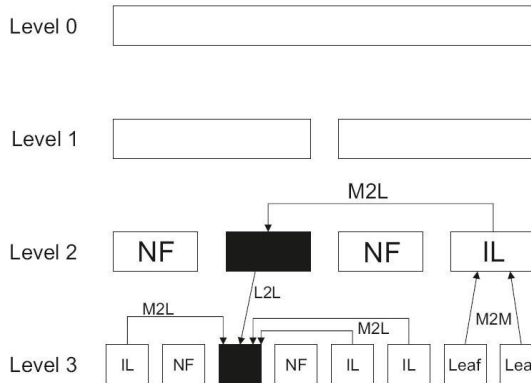
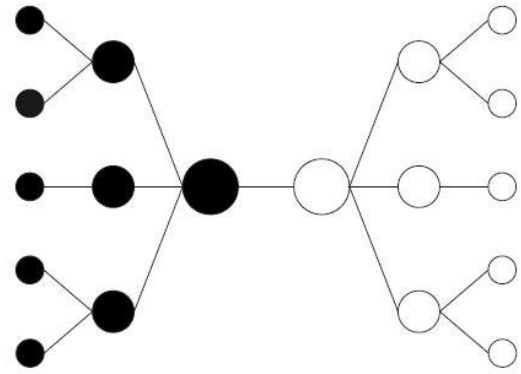


Bild 3.3-26: Schematische Darstellung des FMM-Algorithmus

### Halbraum-Formulierung

Die Straße besitzt einen hohen Einfluss auf die Akustik des Reifens. Im Projekt wurden daher Möglichkeiten zur Modellierung der Straße untersucht. Die verwendete Boundary-Elemente-Methode (BEM) beschreibt bei Außenraumproblemen die Schallabstrahlung in ein unendlich ausgedehntes Freifeld. Eine Diskretisierung der Straße mit Elementen, wie es bei der Finite-Elemente-Methode möglich wäre, ist daher ungeeignet. Die BEM ermöglicht die Einbindung voll reflektierender Halbebenen. Dies kann zur Modellierung der Straße verwendet werden, wobei die Straße durch eine solche Halbebene dargestellt wird. Die Darstellung der Ebene und deren Einfluss auf das Schallfeld ist für eine Punktquelle (S-Source) und einen Empfänger (R-Receiver) in Bild 3.3-27 schematisch dargestellt. Die Quellen werden hierbei an der Ebene gespiegelt und beschreiben die Reflexionen an der Straße. In den folgenden Kapiteln wird zunächst die Halbraum-Formulierung beschrieben und zwei unterschiedliche Algorithmen zur Anwendung mit der Fast-Multipole-Methode (FMM) aufgezeigt, daraufhin werden die implementierten Verfahren analysiert und miteinander verglichen.

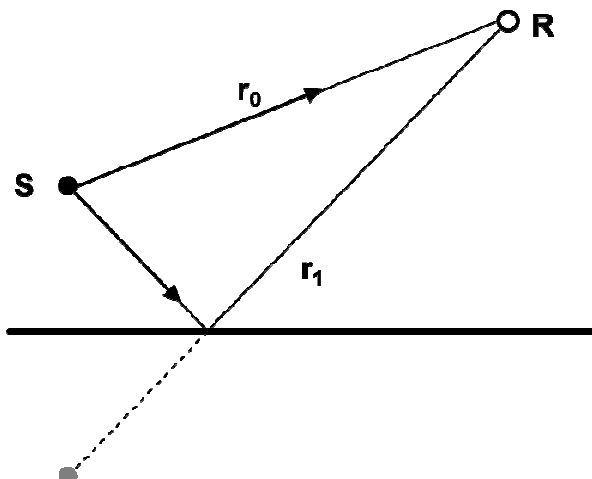


Bild 3.3-27: Reflexion an einer Ebene

In der BEM gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Realisierung von unendlichen Halbebenen. Ein Problem der konventionellen BEM ist jedoch der mit zunehmender Elementanzahl quadratisch wachsende Aufwand bei Verwendung eines iterativen Gleichungslösers. Abhilfe schafft hier die Fast-Multipole-BEM (FMBEM), die das Lösen mit quasi-linearer Komplexität erlaubt. Eine Möglichkeit der Realisierung von unendlichen Halbebenen ist die Verwendung einer modifizierten Fundamentallösung zur Einbindung einer voll reflektierenden Ebene. Eine andere Variante ist die tatsächliche Spiegelung der Diskretisierung an der Ebene. Dabei entstehen Elemente im realen Bereich und im gespiegelten Bereich. Kommt zur Lösung des Halbraumproblems die FMBEM zum Einsatz, ergeben sich hieraus unterschiedliche Algorithmen für die Halbraum-Formulierung. Die notwendige hierarchische Baumstruktur umgibt dabei entweder die Elemente im realen und im gespiegelten Bereich oder, bei Verwendung der modifizierten Fundamentallösung, nur die Elemente im realen Bereich. In den folgenden Abschnitten werden die beiden Algorithmen genauer erläutert.

### Modifizierte Fundamentallösung

Die Realisierung eines Halbraums mittels einer modifizierten Fundamentallösung ist von Liu [24] für die Anwendung in der BEM und FMBEM beschrieben. Die BEM beruht auf der bereits dargestellten Randintegralgleichung, wobei die Fundamentallösung für den dreidimensionalen akustischen Anwendungsfall durch:

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{e^{ik|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}}{4\pi|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}$$

gegeben ist. Sie hängt von dem Abstand zwischen Quell- und Empfängerpunkt  $r = |\mathbf{x} - \mathbf{y}|$  ab. Für den Fall einer schallharten Ebene muss die Fundamentallösung durch einen weiteren Term ergänzt werden, der einem gespiegelten Element entspricht:

$$G(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{e^{ik|\mathbf{x}-\mathbf{y}|}}{4\pi|\mathbf{x}-\mathbf{y}|} + \frac{e^{ik|\bar{\mathbf{x}}-\mathbf{y}|}}{4\pi|\bar{\mathbf{x}}-\mathbf{y}|}$$

Diese Ergänzung ermöglicht die Modellierung der Straße durch eine vollreflektierende Ebene. Die FMM muss dazu an die modifizierte Fundamentallösung angepasst werden. Da die Spiegelung nur in der Integrationsfunktion eingebracht wird und keine gespiegelten Elemente entstehen, muss der vorgestellte Ablauf der FMM angepasst werden. Die benötigte hierarchische Baumstruktur umfasst hierbei nur die im realen Bereich vorhandenen Elemente. Der Algorithmus ist im Artikel [24] dargestellt und kann folgendermaßen zusammengefasst werden:

#### Upward-Pass

Im Upward-Pass werden zunächst auf dem feinsten Level der Baumstruktur die Multipole-Momente der Boxen berechnet. Diese werden im nächsten Schritt mittels der Multipole-to-Multipole (M2M) Translation zu der nächst höheren Box verschoben. Dies wird so lange wiederholt bis das Level 2 der Boxen erreicht ist. Der Algorithmus unterscheidet sich im Ablauf des Upward-Pass nicht von der Version ohne Halbraum-Formulierung.

#### Downward-Pass

Der Downward-Pass startet im Level 2 und es werden die Multipole-to-Local (M2L) Translationen durchgeführt. Jede Box übermittelt den Einfluss auf die Boxen in der Interaktionsliste, wie es auch ohne Halbraum-Formulierung der Fall ist. Der Unterschied in dieser Halbraum-Formulierung ist, dass die M2L-Translationen zusätzlich auf die jeweils gespiegelten Boxen im gespiegelten Bereich angewendet werden müssen. Da sich diese Boxen jedoch nur durch eine Spiegelung an der Halbebene unterscheiden, kann anstelle von Boxen im gespiegelten Bereich ein zweiter Satz der Local-Expansion berechnet werden. Dieser stellt nun die gespiegelten Boxen dar, ohne wirklich existieren zu müssen. Die Koordinaten können durch eine Spiegelung an der Halbebene bestimmt werden. Im nächsten Schritt werden die Local-to-Local (L2L) Translationen auf die beiden Local-Expansion einer Box angewendet um die Informationen auf das feinere Level zu verschieben. Die Informationen über den realen Bereich und den gespiegelten Bereich stehen nun in den jeweiligen Local-Expansion (real und gespiegelt) zur Verfügung. Diese beiden Schritte werden so lange wiederholt bis das feinste Level erreicht ist. Sobald in jeder Box auf dem feinsten Level die Local-

Expansion für den realen Bereich und den gespiegelten Bereich vorliegen, kann das Fernfeld durch die zwei Local-Expansion und das Nahfeld durch die direkte Auswertung bestimmt werden. Die direkte Auswertung findet hierbei mit der modifizierten Fundamentallösung statt. Die Auswertung der beiden Local-Expansion wird mit der gleichen Formel, wie in der FMM ohne Halbraum-Formulierung durchgeführt.

### **Gespiegelte Diskretisierung**

Die Halbraum-Formulierung mit Hilfe einer gespiegelten Diskretisierung wird für die BEM und die FMBEM in der Dissertation von Brunner [7] dargestellt. Hierbei werden im Gegensatz zur modifizierten Fundamentallösung alle Elemente an der Halbebene gespiegelt und es entsteht so eine zweite Geometrie. Durch diese zweite Diskretisierung ist die Verwendung der ursprünglichen Fundamentallösung möglich. Die hierarchische Baumstruktur der FMM muss hierbei alle Elemente im realen und gespiegelten Bereich umfassen und ist wesentlich größer als im zuvor beschriebenen Algorithmus. Da jedoch nur die Punkte  $x$  gespiegelt werden, kann der FMM-Algorithmus verändert werden, um Rechenzeit einzusparen. Ein weiterer Unterschied zwischen den Algorithmen ist die Einteilung der Translationen zum Upward- bzw. Downward-Pass. Die M2L-Translation befindet sich in diesem Algorithmus im Upward-Pass anstatt im Downward-Pass. Diese Einteilung hat jedoch keine weitere mathematische Bedeutung, da sich die Momente aus Summen zusammensetzen und das Kommutativgesetz gilt. Dieser Algorithmus wird im folgenden Abschnitt dargestellt und erläutert:

#### **Upward-Pass**

Der Upward-Pass weist eine Veränderung zum ursprünglichen FMM-Algorithmus auf. Da sich Elemente im gespiegelten Bereich befinden, diese jedoch nur den Einfluss der Punkte  $x$  darstellen, müssen die Elemente zur Berechnung der Multipole-Momente nicht berücksichtigt werden. Auch die M2M-Translationen sind nur abhängig von den Punkten  $y$  und müssen daher nur im realen Bereich berechnet werden. Es werden somit die Berechnung der Multipole-Momente und das Verschieben mittels M2M-Translation nur im realen Bereich durchgeführt bis das Level 2 erreicht ist. Die M2L Translationen gehen von allen Boxen aus, die ein Multipole-Moment besitzen und sich damit im realen Bereich befinden. Die Ziel-Box der Translation ist in der Interaktionsliste, wobei sich in der Interaktionsliste Boxen aus dem gespiegelten Bereich befinden können. Hierdurch werden aus den Multipole-Momenten Local-Expansion im realen und gespiegelten Bereich berechnet.

#### **Downward-Pass**

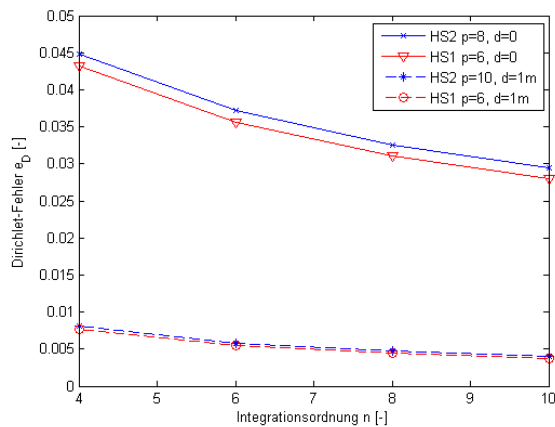
Der Downward-Pass startet auf dem Level 2 und es wird die M2M-Translation auf alle Boxen im realen und gespiegelten Bereich angewendet. Dieser Vorgang wird bis zum feinsten Level wiederholt. Es besitzen nun alle Boxen eine Local-Expansion und der Einfluss des Fernfelds kann nun bestimmt werden. Die direkte Auswertung findet mit der originalen Fundamentallösung statt, wobei im Nahfeld einer Box auch Elemente aus dem gespiegelten Bereich enthalten sein können, wenn sich die Box in der Nähe der Halbebene befindet.

### **Parameterstudie zur Halbraum-Formulierung**

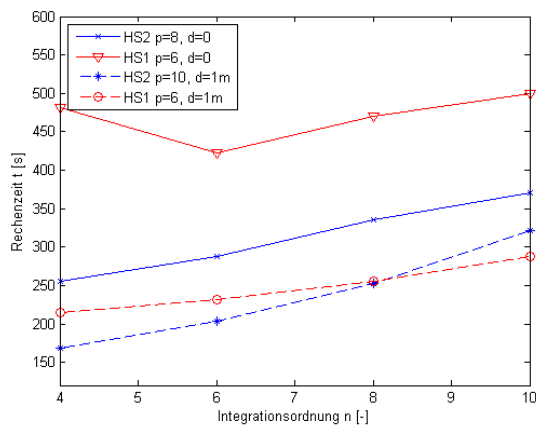
Die beiden Halbraum-Formulierungen werden innerhalb der Parameterstudie auf unterschiedliche Einflussfaktoren untersucht. Hieraus sollen Schlussfolgerungen zur effizienten Anwendung auf die Simulation der Reifenakustik erzielt werden. Die Grundlage für die Parameterstudie stellt die Berechnung einer unterschiedlich fein diskretisierten Kugel über einer voll reflektierenden Halbebene dar. Der Abstand zur Halbebene kann hierbei variiert werden. Die Verwendung einer Monopolquelle innerhalb der Kugel ermöglicht die Ermittlung der Genauigkeit aufgrund einer analytischen Lösung. Die folgenden Ergebnisse sind zudem auf zwei Konferenzen veröffentlicht [22], [21].

Die erste Untersuchung befasst sich mit dem Einfluss der Integrationsordnung für unterschiedliche Abstände zur Halbebene. Hierbei werden der Dirichlet-Fehler, die Rechenzeit und der Speicherbedarf betrachtet. Die Kugel ist in diesem Abschnitt mit  $N=21166$  Elementen diskretisiert. Die HS1 besitzt durch den Algorithmus nur die Baumstruktur im realen Bereich und ist somit kleiner. Da die Entwicklungslänge abhängig von der Größe der einzelnen Boxen der Baumstruktur ist, wird bei der HS1 eine geringe Entwicklungslänge benötigt. Diese wird so angepasst, dass die Fehler für die Vergleiche ähnliche Werte aufweisen. In Bild 3.3-28 ist der Dirichlet-Fehler, in Bild 3.3-29 die Rechenzeit und in Bild 3.3-30 der Speicherbedarf jeweils über der Integrationsordnung aufgetragen. Die Entwicklungslänge für den geringeren Abstand von  $d = 0$  m muss bei der HS2 um 2 größer sein als bei der HS1 für einen vergleich-

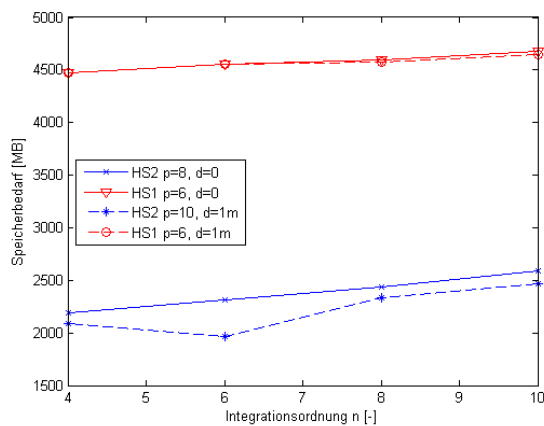
baren Fehler. Bei Erhöhung der Integrationsordnung ist ein kleiner werdender Fehler zu beobachten. Bei dem größeren Abstand von  $d = 1$  m ist diese Verringerung des Fehlers nicht zu beobachten. Hier wird bei der HS2 eine um 4 größere Entwicklungslänge für den gleichen Fehler benötigt. Der gesamte Fehler ist in diesem Fall jedoch weitaus niedriger. Dies zeigt, dass bei einem geringen Abstand zur Halbebene größere Fehler auftreten und eine Erhöhung der Integrationsordnung sinnvoll sein kann. Die Rechenzeit zeigt für den kleineren Abstand zur Halbebene einen Vorteil für die HS2. Bei dem größeren Abstand von  $d = 1$  m ist die Rechenzeit beider Halbraum-Formulierungen im gleichen Bereich, da die um 4 höhere Entwicklungslänge bei der HS2 rechenzeitaufwändiger ist. Zudem ist für beide Formulierungen und beide Abstände eine Zunahme der Rechenzeit mit ansteigender Integrationsordnung zu beobachten. Der Speicherbedarf zeigt für beide Formulierungen kaum Veränderungen in Bezug zur Integrationsordnung. Die HS1 benötigt jedoch wesentlich mehr Speicherplatz. In diesem Fall erfordern die vorgeschichteten M2L-Operatoren der HS1 mehr Speicher als die größere Baumstruktur der HS2.



**Bild 3.3-28:** Dirichlet-Fehler über der Integrationsordnung

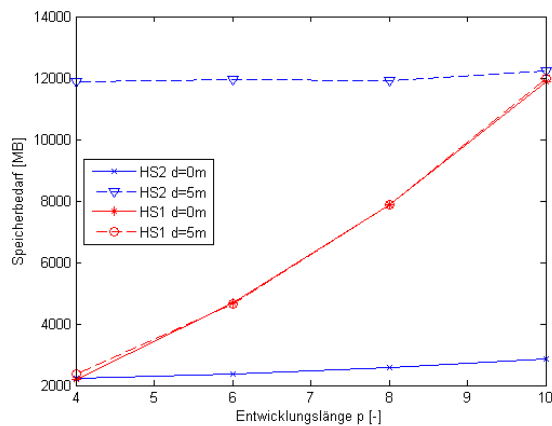


**Bild: 3.3-29:** Rechenzeit über der Integrationsordnung



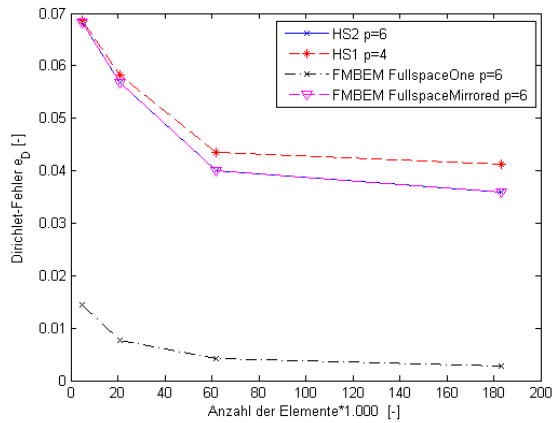
**Bild 3.3-30:** Speicherbedarf über der Integrationsordnung

Im Folgenden wird der Speicherbedarf unter Einfluss des Abstandes zur Halbebene und Entwicklungslänge genauer untersucht, wobei auch hier eine Diskretisierung mit  $N=21166$  Elementen verwendet wird. In Bild 3.3-31 ist der Speicherbedarf über der Entwicklungslänge für die Abstände  $d = 0$  m und  $d = 5$  m aufgetragen. Hierbei zeigt die HS1 eine große Sensitivität gegenüber der Entwicklungslänge und keinen Einfluss durch den Abstand. Die HS2 zeigt bei dieser Untersuchung ein gegenteiliges Verhalten. Es ist kein Einfluss der Entwicklungslänge zu erkennen, jedoch ein großer Unterschied bei den unterschiedlichen Abständen. Dies lässt sich durch die unterschiedlichen Ansätze der Algorithmen erklären. Die Baumstruktur der HS2 ist sowohl im realen als auch im gespiegelten Bereich und wächst demnach mit zunehmendem Abstand stark an. Die HS1 zeigt diesen Einfluss nicht, da sich die Baumstruktur immer nur im realen Gebiet befindet und nicht vom Abstand zur Halbebene abhängt. Im Fall der HS1 müssen jedoch mehr M2L-Operatoren vorgespeichert werden und der Speicherbedarf eines Operators ist abhängig von der Entwicklungslänge.

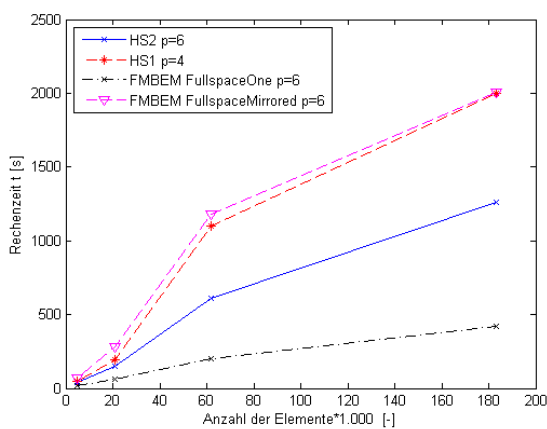


**Bild 3.3-31:** Speicherbedarf über der Entwicklungslänge

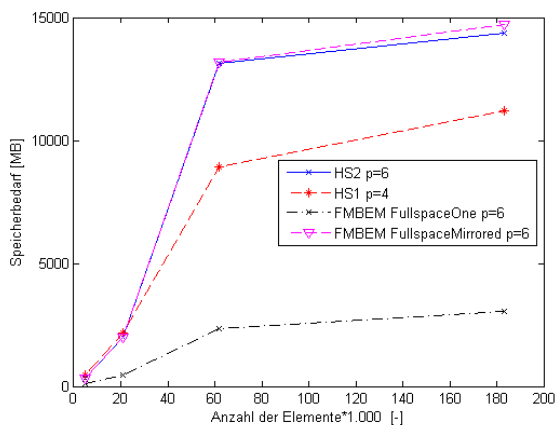
Die letzte Untersuchung der Parameterstudie befasst sich mit dem Einfluss der Anzahl der Elemente für einen Abstand  $d = 0$  m. Hier zeigt sich die Effizienz der FMM für Probleme mit einer großen Anzahl von Freiheitsgraden. Als Referenz dieser Untersuchung werden zwei unterschiedliche Berechnungen mit der normalen FMBEM ohne Halbraum-Formulierung herangezogen. Eine Berechnung wird hierbei mit zwei diskretisierten Kugeln durchgeführt, wobei sich eine oberhalb der Halbebene und die andere darunter befindet. Dies stellt das gleiche Schallfeld dar wie eine Halbraum-Formulierung und wird mit „FMBEM FullspaceMirrored“ bezeichnet. Dieser Fall besitzt die gleiche Baumstruktur wie im Fall der gespiegelten Diskretisierung HS2. Die andere Referenzberechnung besitzt eine Kugel, welche sich nur im realen Bereich befindet. Hierbei werden keine Reflexionen abgebildet, sondern eine Abstrahlung in ein Freifeld dargestellt. Dieses Beispiel hat die gleiche Baumstruktur wie im Fall HS1 und ist mit „FMBEM FullspaceOne“ benannt. In den Diagrammen Bild 3.3-32, Bild 3.3-33 und Bild 3.3-34 sind der Dirichlet-Fehler, die Rechenzeit und der Speicherbedarf jeweils über der Anzahl der Elemente aufgetragen. Der Fehler zeigt dabei zwei unterschiedliche Bereiche, zum einen den Bereich von Berechnungen, die Reflexionen einer Halbebene darstellen, und zum anderen den Bereich der Abstrahlung ins Freifeld. Der Bereich der Halbraum-Formulierungen liegt deutlich über dem anderen, da dieses akustische Problem eine höhere numerische Schwierigkeit darstellt. Die HS1 benötigt jedoch nur eine Entwicklungslänge von  $p = 4$  im Gegensatz zu  $p = 6$  bei den Berechnungen mit der größeren Baumstruktur. Bei der Rechenzeit zeigt sich der effiziente Einsatz der FMM mit dem quasi-linearen Anstieg der Rechenzeit in Bezug auf die Anzahl der Elemente. Bei der klassischen BEM wäre hier ein quadratischer Anstieg zu beobachten. Die Berechnung „FMBEM FullspaceMirrored“ mit den zwei diskretisierten Kugeln zeigt die höchste Rechenzeit. Die HS1 benötigt etwas weniger Rechenzeit, jedoch wesentlich mehr als die HS2. Diese Zeit ist um ca. 40% geringer als bei der Vollraum-Berechnung mit zwei Kugeln. Am wenigsten Rechenzeit benötigt die Berechnung „FMBEM FullspaceOne“ mit einer Kugel, wobei durch das einfachere akustische Problem nur ca. 11 Iterationen im Gegensatz zu 30 bis 40 Iterationen bei den anderen Berechnungen benötigt werden. Bezieht man die Rechenzeit auf die Anzahl der Iterationen, so benötigt die HS2 nur ein wenig mehr Rechenzeit pro Iteration als die normale FMBEM. Der Speicherbedarf zeigt bei der HS2 ähnlich hohe Werte, wie die Formulierung mit zwei diskretisierten Kugeln bei der FMBEM ohne Halbraum. Der Grund hierfür ist die gleiche Baumstruktur sowie die gleiche Anzahl von M2L-Operatoren. Bei dieser Formulierung müssen keine zusätzlichen Operatoren bei Verwendung eines Halbraums abgespeichert werden. Trotz der gleich großen Baumstruktur zeigen die HS1 und die „FMBEM FullspaceOne“ dieses Verhalten nicht. Die HS1 benötigt mehr Speicherplatz, welches auf die zusätzlich gespeicherten Operatoren zurückzuführen ist. Der gesamte Speicherbedarf ist jedoch geringer als bei der HS2.



**Bild 3.3-32:** Dirichlet-Fehler in Abhängigkeit der Anzahl der Elemente



**Bild 3.3-33:** Rechenzeit in Abhängigkeit der Anzahl der Elemente



**Bild 3.3-34:** Speicherbedarf in Abhängigkeit der Anzahl der Elemente

Die Parameterstudie zeigt die korrekte Implementierung der Halbraum-Formulierungen und deren Vor- und Nachteile. Die beiden Halbraum-Formulierungen zeigen unterschiedliche Einflüsse der Parameter. Dieses Wissen ist sehr wichtig zur korrekten Wahl der Halbraum-Formulierung beim Einsatz zur Berechnung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen. Die Untersuchungen zeigen, dass bei einem kleinen Abstand zur Halbebene die HS2 durchgängig eine geringere Rechenzeit aufweist, jedoch wird eine höhere Entwicklungslänge benötigt. Eine Schwierigkeit ist der größere Fehler bei geringem Abstand zur Halbebene aufgrund der numerischen Schwierigkeit dieser akustischen Probleme. Der Reifen liegt auf der Straße auf und somit ist dieses Rechenbeispiel sehr wichtig für das weitere Vorgehen. Die Verwendung der HS2 zur Reifenberechnung macht aus diesen Gründen Sinn. Eine Möglichkeit der weiteren Verbesserung liegt in der Erhöhung der Integrationsordnung, welches jedoch wiederum eine erhöhte Rechenzeit zur Folge hat. Eine Option ist eine adaptive Integrationsordnung, welche im Bereich der Halbebene größer ist und mit zunehmendem Abstand geringer ausfallen könnte. Eine weitere Verbesserung ist zudem eine adaptive

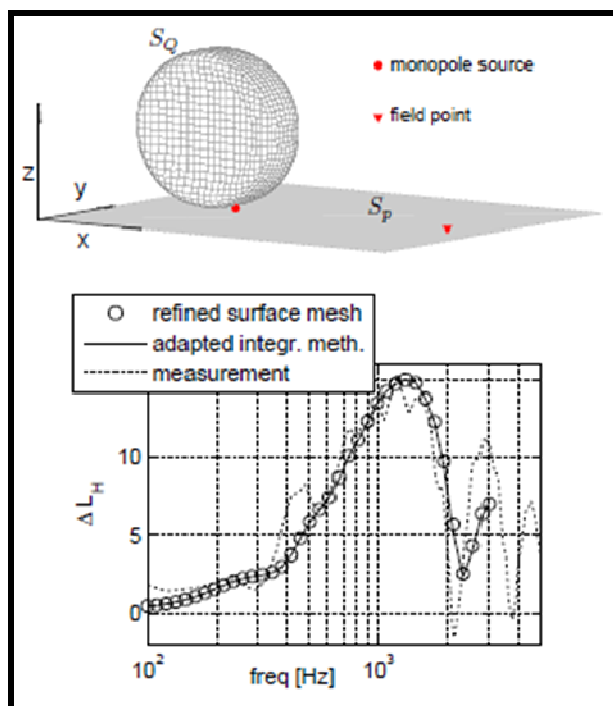
Entwicklungslänge, da die einzelnen Level der Baumstruktur unterschiedliche minimale Entwicklungslängen aufgrund der unterschiedlich großen Boxen benötigen. Dies wäre eine Option zur Vermeidung des Einflusses der Entwicklungslänge auf die Genauigkeit, sowie eine Reduzierung des Speicherbedarfs. Eine adaptive Baumstruktur ist eine weitere Möglichkeit zur Verringerung des Speicherbedarfs. Dies sind sinnvolle Erweiterungen, die in folgenden Kapiteln vorgestellt werden.

### Abbildung des Horneffektes

In diesem Abschnitt wird zur Validierung des Modells mit Halbraum-Formulierung der Horneffekt abgebildet. Der Horneffekt ist ein sehr wichtiger Faktor zur korrekten Abbildung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen. Durch die Aufstandsfläche des Reifens und der Straße entsteht eine hornartige Geometrie, die das Reifen-Geräusch in eine Richtung verstärkt. Zur Abbildung wird eine Monopolquelle in den Reifenauslauf platziert und im Abstand von 1m der Schalldruck berechnet. Als Referenz dient hierbei der Schalldruck ohne Reifen. Mit Hilfe der Formel

$$\Delta L_H = 20 \log_{10} \left| \frac{p_{\text{mit Reifen}}(\vec{x}_{fp})}{p_{\text{ohne Reifen}}(\vec{x}_{fp})} \right|$$

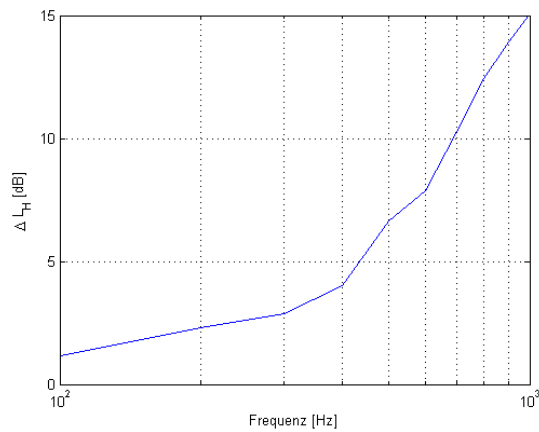
kann die Verstärkung für verschiedene Frequenzen berechnet werden. Für dieses Beispiel sind sowohl Messdaten vorhanden, als auch Berechnungen mit einer klassischen BEM durchgeführt [6]. Die Ergebnisse und der Aufbau des Modells dieser Arbeit sind in Bild 3.3-35 dargestellt.



**Bild 3.3-35:** Modell Horneffekt und Ergebnisse

[Quelle: Application of the Boundary Element Method to combustion noise and half-space problems, Brick 2009]

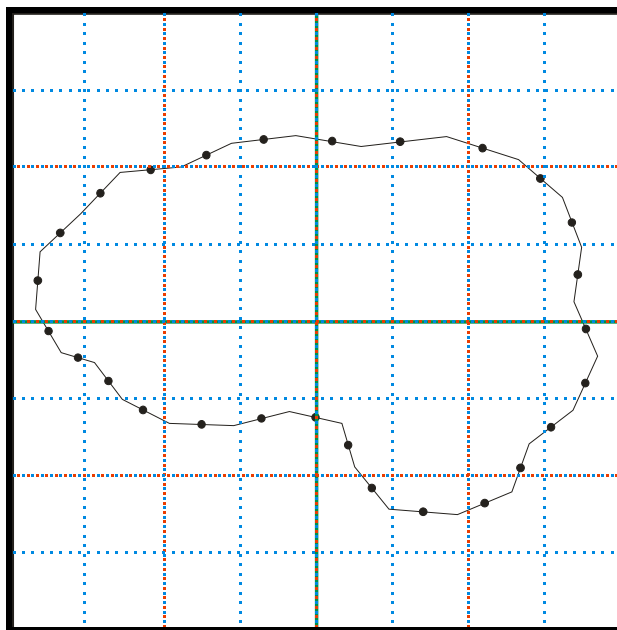
Die Berechnungen mit der FMBEM werden mit der HS2 durchgeführt. Die Parameterstudie zeigt, dass dieser Algorithmus Vorteile für einen geringen Abstand zur Halbebene zeigt. Bild 3.3-36 zeigt die berechneten Verstärkungen im Bereich von 100 Hz bis 1000 Hz. Die Ergebnisse bis zu 1000 Hz zeigen sehr gute Übereinstimmungen mit den Mess- beziehungsweise Berechnungsdaten aus der oben genannten Arbeit. Dies ist ein sehr gutes Indiz für die korrekte Umsetzung der Halbraum-Formulierung mit Hilfe der FMM. Oberhalb von 1000 Hz ergaben sich größere Abweichungen, welche auf den kritischen Frequenzen beruhen und in einem folgenden Kapitel behoben werden.



**Bild 3.3-36:** Verstärkung durch Horneffekt in Abhängigkeit der Frequenz

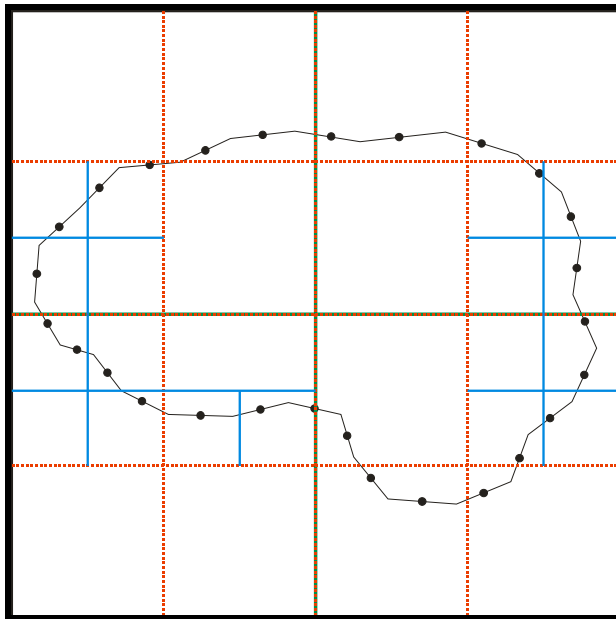
### Adaptive Baumstruktur

Die Fast-Multipole-Methode benötigt zur Unterteilung des Berechnungsgebietes eine hierarchische Baumstruktur. Es wird zunächst eine Box erstellt, die alle Elemente der Diskretisierung beinhaltet. Zur weiteren Unterteilung wird nun in Abhängigkeit der maximalen Anzahl von Elementen in einer Box die Baumstruktur in weitere Level unterteilt. Bei der nicht adaptiven Baumstruktur, wie sie in Bild 3.3-37 zu sehen ist, werden alle Boxen eines Levels unterteilt, sobald in einer Box die maximale Anzahl von Elementen überschritten wird. Durch diese Unterteilungsvorschrift kann es passieren, dass Boxen entstehen, in denen keine Elemente vorhanden sind. Die Boxen auf dem feinsten Level werden Leaf-Boxen genannt und befinden sich alle auf dem gleichen Level, wodurch der FMM-Algorithmus eine einfache Umsetzung besitzt. Die zuvor beschriebenen Nahfeld- und Interaktionslisten sind unkomplizierter zu bestimmen. Eine adaptive Baumstruktur verwendet eine andere Unterteilungsvorschrift. Es werden nur noch die Boxen unterteilt, in denen sich zu viele Elemente befinden. Die so entstehende hierarchische Baumstruktur (siehe Bild 3.3-38) enthält nun Leaf-Boxen auf unterschiedlichen Leveln. Die Definition der Nahfeldliste kann nun auch Boxen auf unterschiedlichen Leveln beinhalten, da sich angrenzende Leaf Boxen nicht notwendigerweise auf dem gleichen Level befinden. Die Interaktionsliste enthält weiterhin nur Boxen des gleichen Levels, wodurch diese eine geringere Größe besitzen kann. Hierdurch kann es passieren, dass weniger FMM-Operationen im Fernfeld (Interaktionsliste) und mehr Auswertungen im Nahfeld durchgeführt werden.



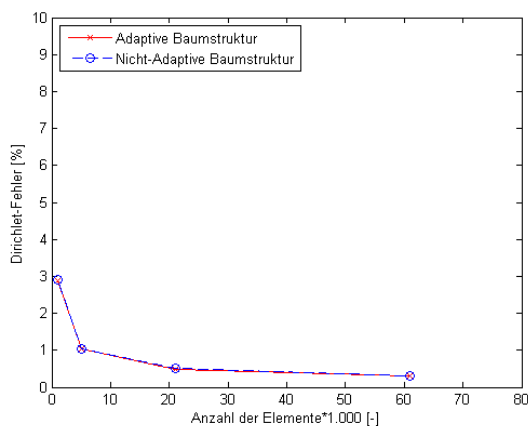
**Bild 3.3-37:** Nicht adaptive Baumstruktur



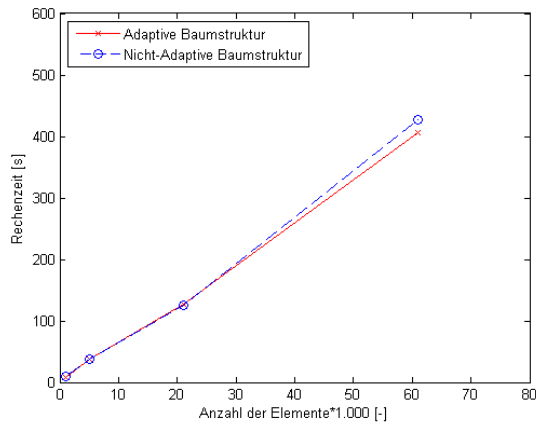


**Bild 3.3-38:** Adaptive Baumstruktur

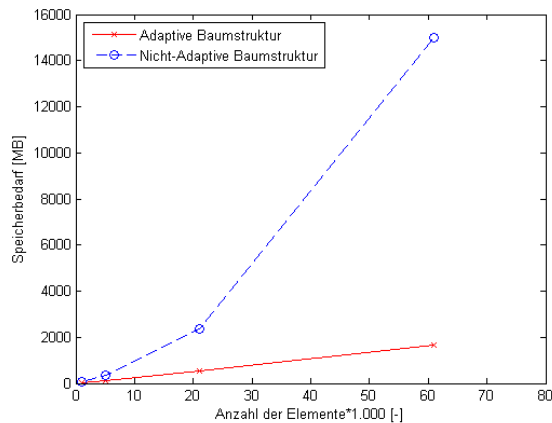
Zur numerischen Untersuchung der entwickelten adaptiven Baumstruktur werden Berechnungen mit einer unterschiedlich fein diskretisierten Kugel oberhalb einer schallharten Ebene durchgeführt. Es werden hierbei die Genauigkeit, die Rechenzeit und der Speicherbedarf untersucht. Als Halbraum-Formulierung wird die als optimale Version identifizierte HS2-Formulierung verwendet. Die Verwendung einer Monopolquelle innerhalb der Kugel ermöglicht die analytische Bestimmung des akustischen Feldes und den Vergleich zur numerischen Berechnung mit der Fast-Multipole-Boundary-Elemente-Methode (FMBEM). In Bild 3.3-39 ist diese Abweichung als Dirichlet-Fehler über der Anzahl der Elemente aufgetragen. Hierbei zeigt sich die korrekte Implementierung der Erweiterung, da die Genauigkeit keine Unterschiede zwischen nicht-adaptiver und adaptiver Baumstruktur aufweist. Auch bei der Rechenzeit in Bild 3.3-40 zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den beiden Formulierungen. Erst ab einer höheren Anzahl von Elementen wird ein kleiner Unterschied sichtbar. Dieses Ergebnis sieht zunächst nicht optimal aus, da durch die adaptive Baumstruktur weniger Operationen notwendig sein müssten. In der vorherigen Version des Programmcodes wurden jedoch schon einige semi-adaptive Ansätze verwendet. Die nicht adaptive Baumstruktur enthält dabei zwar auch Boxen ohne Elemente, diese werden aber nicht zur Berechnung verwendet. Diese Selektion ist gerechtfertigt, da Boxen ohne Elemente keinen Einfluss auf andere Boxen haben können. Der große Vorteil der Änderung wird in der letzten Untersuchung deutlich. Hierbei ist der Speicherbedarf in Abhängigkeit der Anzahl der Elemente in Bild 3.3-41 dargestellt. Die adaptive Baumstruktur enthält wesentlich weniger Boxen als die nicht-adaptive Baumstruktur und benötigt daher weniger Speicherbedarf. Dies wird sehr deutlich bei einer hohen Anzahl von Elementen, da die Elemente nicht gleichmäßig im Raum verteilt sind und so viele leere Boxen entstehen können. Die Verwendung einer adaptiven Baumstruktur ermöglicht somit die effiziente Lösung von akustischen Fragestellungen durch eine erhebliche Verringerung des Speicherbedarfs.



**Bild 3.3-39:** Dirichlet-Fehler, Adaptive Baumstruktur



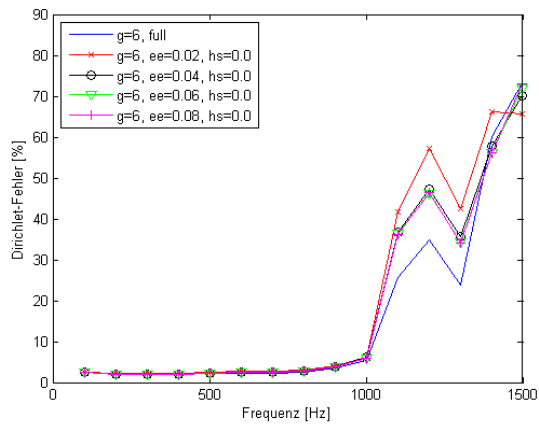
**Bild 3.3-40:** Rechenzeit, Adaptive Baumstruktur



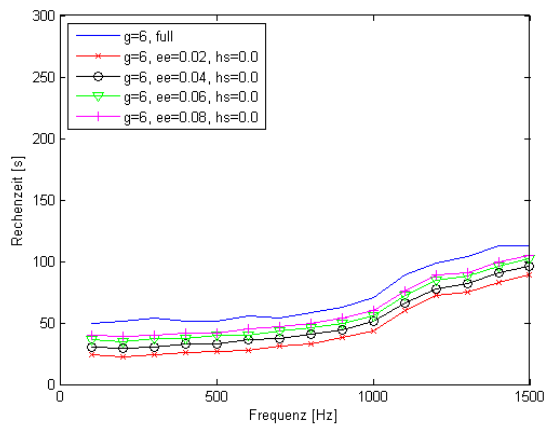
**Bild 3.3-41:** Speicherbedarf, Adaptive Baumstruktur

### Adaptive Gauss-Integration

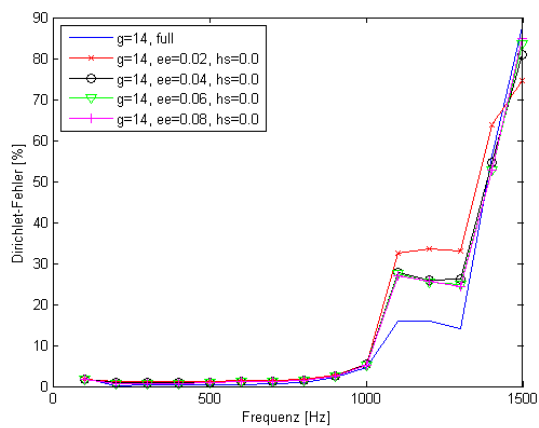
Die numerische Integration in der Boundary-Elemente-Methode wird für die Lösung des Randintegrals benötigt. Hierbei muss die Fundamentallösung über ein Oberflächen-Element integriert werden. In der FMBEM wird ebenfalls eine direkte Auswertung für das Nahfeld benötigt. Das Integral hängt vom Abstand des Empfänger- und Quellpunktes ab und weist unterschiedliche Singularitäten der Formen  $1/r$  beziehungsweise  $1/r^3$  auf. Für eine sehr kurze Distanz muss daher eine genaue numerische Integration durchgeführt werden. Im Gegensatz dazu wird für einen größeren Abstand keine hohe Integrationsordnung benötigt. Dieser Umstand kann in der entwickelten Methode verwendet werden, um die Rechenzeit zu verkürzen. Bei der Simulation von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen treten an zwei unterschiedlichen Stellen geringe Abstände von Elementen auf. Neben dem Abstand zweier Elemente im realen Bereich tritt eine geringe Distanz zwischen Elementen nahe der Halbebene auf. Hierbei ist die verwendete Integrationsordnung wichtig zum genauen Bild des Integrals. Bei der verwendeten adaptiven Gauss-Integration werden zwei Parameter eingeführt, die dieses Verhalten berücksichtigen. Zum einen handelt es sich um den Abstand Element-Element „ee“ und zum anderen um den Abstand der Elemente zur Halbebene „hs“. Hierdurch kann eine höhere Integrationsordnung für Elemente in der Nähe der Halbebene verwendet werden, obwohl diese den Schwellenwert „ee“ nicht unterschreiten. Für die weiter entfernten Elemente wird eine niedrige Integrationsordnung „AdapGaussOrder“ verwendet. Der Einfluss dieser Parameter wird im Folgenden untersucht. Hierfür wird eine Reifendiskretisierung mit ca. 7300 Elementen oberhalb einer schallharten Ebene verwendet. Dies entspricht der späteren Modellierung mit den Oberflächenschnellen des Strukturmodells. In dieser grundlegenden Untersuchung wird jedoch zunächst auf die Verwendung der berechneten Schnellen verzichtet und eine Auswertung mit Hilfe eines analytischen Feldes einer Monopolquelle durchgeführt. In den Diagrammen aus Bild 3.3-42 bis Bild 3.3-49 sind der Dirichlet-Fehler und die Rechenzeit für Frequenzen von 100 Hz bis 1500 Hz dargestellt. Es werden Berechnungen mit einer feineren Integrationsordnung von  $g = 6$  beziehungsweise  $g=14$  und jeweils einer größeren Integrationsordnung von AdapGaussOrder = 1 durchgeführt. Dabei werden die Parameter ee und hs im Bereich von 0,02 m bis 0,08 m variiert und mit einer Berechnung ohne adaptive Gauss-Integration verglichen („full“). Ein Element hat hierbei eine ungefähre Länge von 0,01 m.



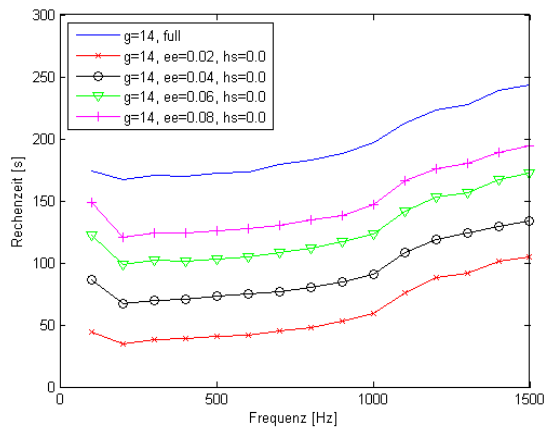
**Bild 3.3-42:** Dirichlet-Fehler,  $g = 6$ , Abstand ee



**Bild 3.3-43:** Rechenzeit,  $g = 6$ , Abstand ee

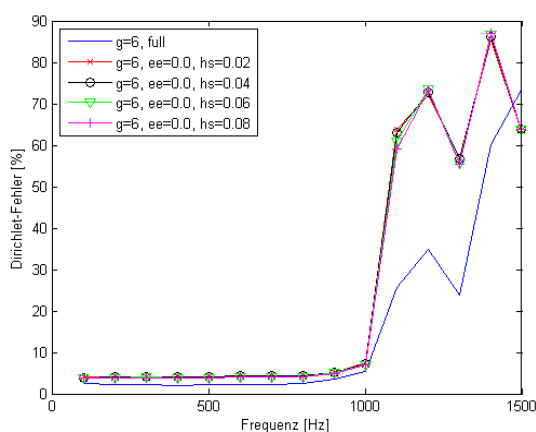


**Bild 3.3-44:** Dirichlet-Fehler,  $g = 14$ , Abstand ee

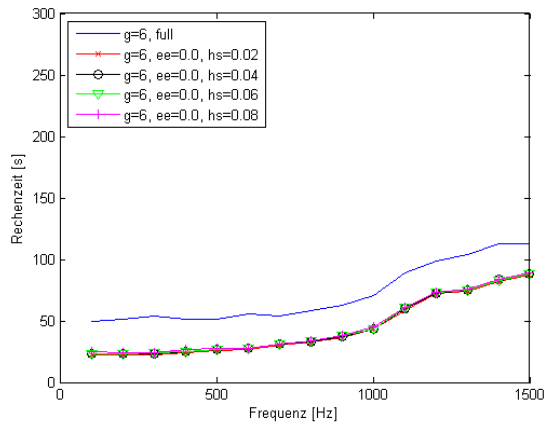


**Bild 3.3-45:** Rechenzeit,  $g = 14$ , Abstand  $ee$

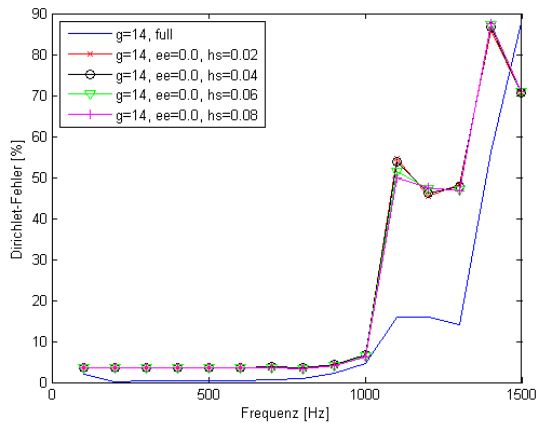
Die Diagramme aus Bild 3.3-42 bis Bild 3.3-45 zeigen die Untersuchung für die Variation des Parameters  $ee$  für die zwei unterschiedlichen Integrationsordnungen. Bis zu einer Frequenz von 1000 Hz liegt der Fehler aller Berechnungen in einem einstelligen Prozentbereich und zeigen somit sehr gute Resultate. Hier ist die Integrationsordnung ausreichend auch für geringe Werte von  $ee$ . Ab 1000 Hz zeigen sich andere Resultate. Hier ist die Variante *full* wesentlich genauer bis 1300 Hz. Bei  $g = 6$  liegt der Fehler jedoch schon relativ hoch bei ca. 30% und für  $g = 14$  bei ca. 15%. Ab 1400 Hz steigt der Fehler in einen nicht mehr akzeptablen Bereich. Hier müsste entweder die Integrationsordnung weiter erhöht oder eine feinere Diskretisierung verwendet werden. Die Rechenzeiten zeigen das zu erwartende Ergebnis, dass mit zunehmendem Abstand  $ee$  die Rechenzeit ansteigt und die Variante *full* jeweils die größte Rechenzeit besitzt. Zudem benötigt die höhere Integrationsordnung von  $g = 14$  in der *full* Variante im Gegensatz zur Integrationsordnung  $g = 6$  eine ca. dreifache Rechenzeit. Der Unterschied von  $ee = 0,02$  m zur *full* Variante zeigt eine Halbierung der Rechenzeit bei  $g=6$  beziehungsweise nur ein Drittel der Rechenzeit bei  $g = 14$ . Je höher also die verwendete Integrationsordnung ist, desto mehr Rechenzeit kann durch die Verwendung des Parameters  $ee$  erreicht werden. Um ein optimales Verhältnis von Genauigkeit zu Rechenzeit zu erhalten, muss die Integrationsordnung entsprechend der Frequenz angepasst werden. Ein Wert des Parameters  $ee = 0,02$  m im Frequenzbereich unterhalb von 1000 Hz erweist sich als gut geeignet. Die Genauigkeit bei einem größeren Wert von  $ee$  kann nicht deutlich gesteigert werden, aber die Rechenzeit nimmt zu. Auf den Bereich oberhalb von 1000 Hz trifft diese Aussage jedoch nicht mehr zu. Hier müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um ein besseres Ergebnis zu erhalten.



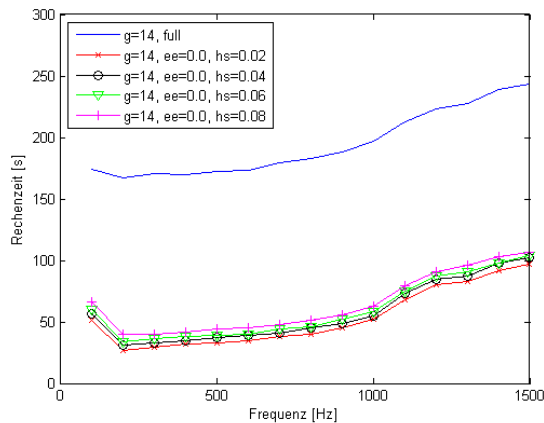
**Bild 3.3-46:** Dirichlet-Fehler,  $g = 6$ , Abstand  $hs$



**Bild 3.3-47:** Rechenzeit,  $g = 6$ , Abstand  $h_s$



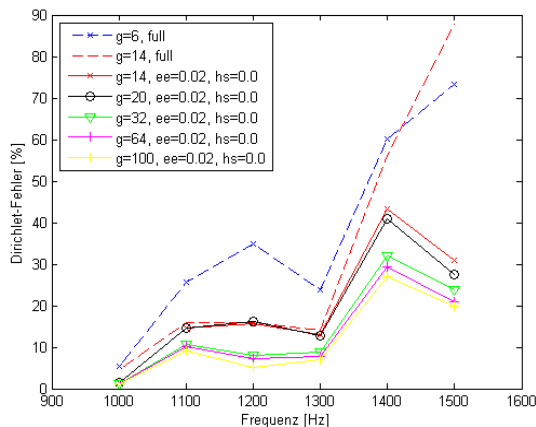
**Bild 3.3-48:** Dirichlet-Fehler,  $g = 14$ , Abstand  $h_s$



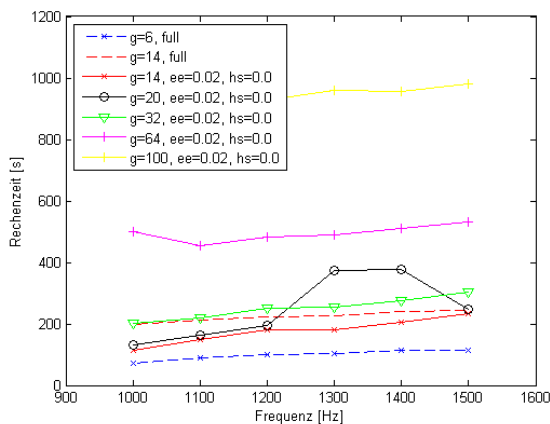
**Bild 3.3-49:** Rechenzeit,  $g = 14$ , Abstand  $h_s$

In den Diagrammen aus Bild 3.3-45 bis Bild 3.3-48 ist die Variation des Parameters  $h_s$  dargestellt. Hier zeigt sich ein qualitativ ähnliches Verhalten wie bei der Variation von  $ee$ . Jedoch sind die Genauigkeiten selbst im Frequenzbereich bis 1000 Hz nicht so gut wie in der vorherigen Untersuchung. Dies bedeutet, dass auch Elemente, die relativ nah aneinander liegen, aber sich nicht in der Nähe der Halbebene befinden, mit einer erhöhten Integrationsordnung behandelt werden sollten. Die Rechenzeiten zeigen für beide Integrationsordnungen ein weniger starkes Ansteigen der Rechenzeit mit erhöhtem Parameter  $h_s$ . Dies lässt sich durch die unterschiedlichen Kriterien erklären. Der Parameter  $ee$  steuert den Bereich der genaueren Integration bei der gesamten zweidimensionalen Diskretisierung. Dies führt zu einer größeren Erhöhung der Rechenzeit im Gegensatz zur Verwendung des Parameters  $h_s$ . Der Parameter  $h_s$  alleine kann somit nicht die gewünschte Genauigkeit liefern. Die Kombination von beiden kann jedoch eine gute Verbesserung liefern, sobald weitere, genauere Integrationen in der Nähe der Halbebene sinnvoller sind als im gesamten Bereich. Die Genauigkeit kann gesteigert werden ohne die stärkere Erhöhung der Rechenzeit durch die Einstellung des Parameters  $ee$ .

Die bisherigen Untersuchungen zeigen ein nicht zufriedenstellendes Ergebnis im Bereich von 1000 Hz bis 1500 Hz. Je höher die Frequenz ist, desto mehr numerische Schwierigkeiten können bei der Simulation auftreten. In diesem Abschnitt wird daher dieser Bereich genauer untersucht. Die vorherigen Untersuchungen zeigen, dass eine höhere Integrationsordnung zu deutlich besseren Ergebnissen führt, jedoch auch die Rechenzeiten dementsprechend stark ansteigen. Es werden daher Berechnungen mit unterschiedlicher Integrationsordnung durchgeführt, wobei der im vorherigen Abschnitt untersuchte Parameter  $ee = 0,02$  m verwendet wird. Dieser besitzt ein gutes Verhältnis von Rechenzeit zu Genauigkeit. Zur weiteren Verbesserung der Genauigkeit wird für die Berechnungen der Parameter  $AdapGaussOrder = 2$  gesetzt. Diese Kombination bietet ähnlich gute Ergebnisse wie die zuvor verwendete Variante full-Variante. Als Vergleichsberechnung dienen die jeweiligen full-Varianten der vorherigen Untersuchung. In Bild 3.3-50 und Bild 3.3-51 sind der Fehler und die Rechenzeit für verschiedene Integrationsordnungen dargestellt.



**Bild 3.3-50:** Dirichlet-Fehler, ab 1000 Hz



**Bild 3.3-51:** Rechenzeit, ab 1000 Hz

Die Genauigkeit kann hierbei durch eine Erhöhung der Integrationsordnung gesteigert werden und nimmt Werte von unter 10% an. Der Einfluss des Parameters  $AdapGaussOrder = 2$  wird im Vergleich von den Berechnungen mit  $g = 14$  deutlich. Die full-Variante mit  $AdapGaussOrder = 1$  zeigt ab 1400 Hz einen deutlich höheren Fehler als die Variante mit  $ee = 0,02$  m und  $AdapGaussOrder = 2$ . Der Frequenzbereich von sinnvollen Ergebnissen kann somit erhöht werden. Werden die Berechnungen mit  $ee = 0,02$  m miteinander verglichen, so wird deutlich, dass eine Steigerung von  $g = 20$  auf  $g = 32$  noch eine Verbesserung von ca. 5% bewirkt, jedoch eine weitere Erhöhung keine signifikanten Unterschiede aufweist. Im zweiten Graphen zeigt sich das gleiche Verhalten wie in der vorherigen Untersuchung, dass mit zunehmender Integrationsordnung auch die Rechenzeit ansteigt. Die Variante mit  $g = 32$  erweist sich hierbei als empfehlenswert. Die Rechenzeit beträgt weniger als die Hälfte in Bezug zu  $g = 64$  und ca. ein Viertel der Rechenzeit von  $g = 100$ , obwohl die Genauigkeit in einem ähnlichen Bereich liegt. Diese Untersuchung zeigt, dass eine Erhöhung der Integrationsordnung eine sinnvolle Möglichkeit zur Verbesserung der Genauigkeit ist. Die Fehler liegen im höheren Frequenzbereich jedoch weiterhin hoch. Eine Verbesserung könnte die Verfeinerung der Diskretisierung sein, wodurch eine bessere Auflösung der

Lösung ermöglicht wird, oder der in einem nachfolgenden Kapitel vorgestellte Ansatz der Burton-Miller-Formulierung.

### Anpassung der Entwicklungslänge

Die Anpassung der Entwicklungslänge ist ein sehr wichtiger Punkt bei der Verwendung der Fast-Multipole-Methode. Die Entwicklungslänge bestimmt sowohl die Anzahl der Reihenglieder in der Multipole-Entwicklung als auch die Anzahl der Richtungen auf der Einheitskugel, welche die Ordnung der numerischen Integration der Nah- und Fernfeldrepräsentanten bestimmt. Diese beiden Einflussgrößen können jedoch getrennt voneinander betrachtet werden. Eine numerische Instabilität kann bei der Auswertung des M2L-Operators entstehen, wenn die Entwicklungslänge zu groß gewählt wird. Dies beruht auf der Auswertung der sphärischen Hankelfunktion. Die minimale Entwicklungslänge kann mit Hilfe einer semi-empirischen Formel abgeschätzt werden:

$$p(kD) = kD + C \ln(kD + \pi),$$

welche von der Wellenzahl als auch der Größe einer Box abhängt. Für eine Box mit einer größeren Abmessung wird demnach auch eine höhere Entwicklungslänge benötigt. Im Umkehrschluss kann jedoch für kleinere Boxen auf feineren Level eine geringere Entwicklungslänge verwendet werden. Hierfür ist eine adaptive Entwicklungslänge notwendig, die bei steigender Boxengröße eine Interpolation und bei sinkender Boxengröße eine Filterung durchführt.

In einem ersten Ansatz zur Anpassung der Entwicklungslänge wird diese komplett adaptive Entwicklungslänge noch nicht verwendet, sondern die Anzahl der Richtungen auf der Einheitskugel (numerische Integration) anhand der größten Box und der jeweiligen Frequenz gewählt. Die Auswertung des M2L-Operators wird an die jeweilige Größe einer Box auf den unterschiedlichen Level angepasst. So kann eine gute Genauigkeit des Fast-Multipole-Algorithmus erreicht werden.

### Burton-Miller-Formulierung

Ein Problem der BEM bei Außenraumproblemen sind die kritischen Frequenzen. Bei Verwendung der konventionellen Randintegralgleichung (CBIE) entstehen für Außenraumprobleme nicht eindeutige Lösungen bei den Eigenfrequenzen des Innenraumproblems. Diese Probleme werden durch die mathematische Formulierung der Randintegralgleichung hervorgerufen. Die Burton-Miller-Formulierung umgeht dieses Problem durch eine Linearkombination der konventionellen (CBIE) und der hypersingulären (HBIE) Randintegralgleichung. Beide Randintegralgleichungen beschreiben das akustische Feld, weisen jedoch unterschiedliche kritische Frequenzen auf. Da die gleiche Problemstellung beschrieben wird, besitzen auch beide Formulierungen eine gemeinsame Lösung und die Linearkombination kann verwendet werden.

Eine Schwierigkeit der HBIE ist das Auftreten von Singularitäten höherer Ordnungen in den zusätzlich verwendeten Kernen der Randintegralgleichung. Es existieren unterschiedliche Ansätze zur Integration dieser Kerne. In dem zugrunde liegenden Programm wird eine Formulierung nach Brandao verwendet, welche die singulären Integrale als „Hadamard Finite Part“ interpretiert [5]. Um die hypersinguläre Randintegralgleichung zu erhalten, muss die konventionelle Randintegralgleichung nach dem Normalenvektor am Empfängerpunkt abgeleitet werden:

$$q(\mathbf{x}) = \int_{\Gamma} q(\mathbf{y}) \underbrace{\frac{\partial G(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial \mathbf{n}_x}}_K ds_y - \int_{\Gamma} p(\mathbf{y}) \underbrace{\frac{\partial^2 G(\mathbf{x}, \mathbf{y})}{\partial \mathbf{n}_y \partial \mathbf{n}_x}}_L ds_y.$$

Die neuen Kerne besitzen demnach die Form:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{e^{ik|\mathbf{r}|}}{4\pi |\mathbf{r}|^3} (ik|\mathbf{r}| - 1) \mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_x$$

$$L(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{e^{ik|\mathbf{r}|}}{4\pi} \left( \frac{a(\mathbf{n}_x \cdot \mathbf{n}_y)}{|\mathbf{r}|^3} + \frac{b(\mathbf{n}_x \cdot \mathbf{r})(\mathbf{n}_y \cdot \mathbf{r})}{|\mathbf{r}|^5} \right),$$

mit

$$a = 1 - ik|\mathbf{r}|$$

$$b = -3 + 3ik|\mathbf{r}| + k^2|\mathbf{r}|^2.$$

Für die Verwendung mit der Fast-Multipole-Methode sind einige Anpassungen notwendig. Die direkte Auswertung wird anstatt mit den zuvor verwendeten zwei Kernen mit den oben beschriebenen vier Kernen durchgeführt. In der Fernfeldberechnung muss lediglich bei der Auswertung des Nahfeldrepräsentanten innerhalb einer Box der Baumstruktur ein zusätzlicher Faktor  $G(\mathbf{n}_x, \hat{\mathbf{s}})$  verwendet werden:

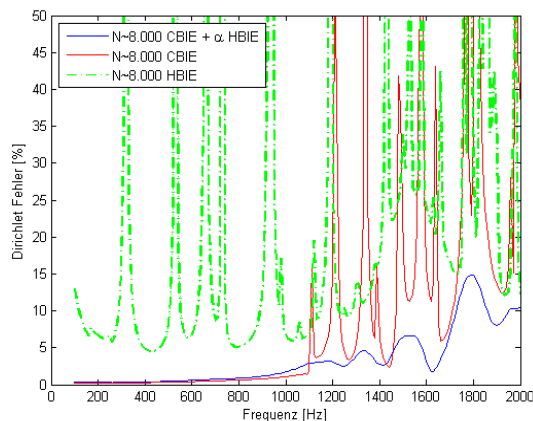
$$\Phi(\mathbf{x}) = \frac{ik}{(4\pi)^2} \int_{S^2} G(\mathbf{n}_x, \hat{\mathbf{s}}) \cdot e^{ik(\mathbf{x}-\mathbf{z}_d)\hat{\mathbf{s}}} \underbrace{e^{ik(\mathbf{z}_d-\mathbf{z}_a)\hat{\mathbf{s}}} N_a(\hat{\mathbf{s}})}_{N_d(\hat{\mathbf{s}})} d\mathbf{s}$$

mit

$$G(\mathbf{n}_x, \hat{\mathbf{s}}) = 1 + \alpha ik(\mathbf{n}_x \hat{\mathbf{s}}).$$

### Reifensimulation mit den Erweiterungen

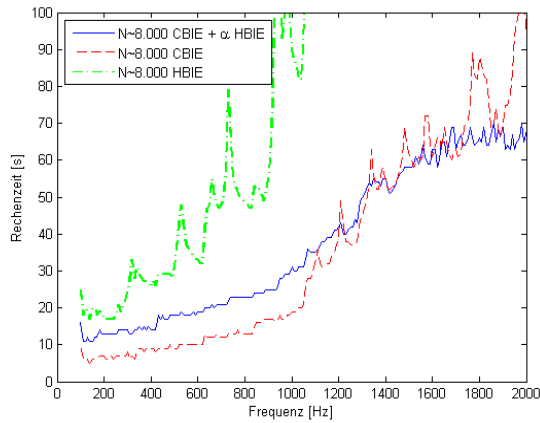
Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Erweiterungen, die Burton-Miller-Formulierung und die Angepasste Entwicklungslänge, werden in diesem Abschnitt mit Hilfe einer Reifensimulation im Bereich von 100 Hz bis 2000 Hz untersucht. Als Referenz werden die Oberflächenschnellen analog zu einer Monopolquelle innerhalb des Reifens bestimmt. So steht für jede Frequenz eine analytische Lösung zur Verfügung zur Bestimmung des Dirichlet-Fehlers. Die Berechnungen werden mit einer Diskretisierung von ca. 8000 Elementen für die CBIE, die HBIE und die Linearkombination beider, welche der Burton-Miller-Formulierung entspricht, durchgeführt. In allen Berechnungen wird die beschriebene angepasste Entwicklungslänge verwendet. Somit können größere Abweichungen durch eine nicht korrekt gewählte Entwicklungslänge ausgeschlossen werden. In Bild 3.3-52 ist der Dirichlet-Fehler, in Bild 3.3-53 die Rechenzeit und in Bild 3.3-54 die Anzahl der Iterationen über der Frequenz dargestellt.



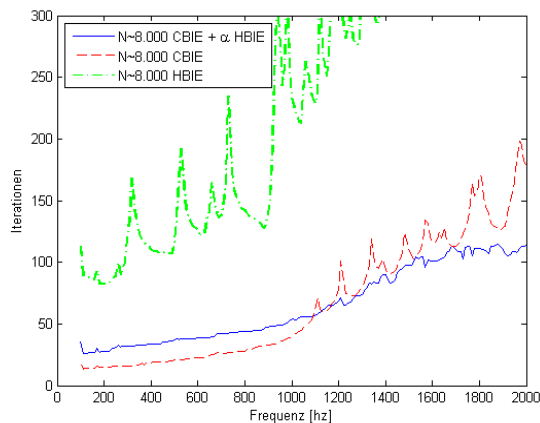
**Bild 3.3-52:** Dirichlet-Fehler über der Frequenz

Der Dirichlet-Fehler zeigt eindeutig die kritischen Frequenzen beider Randintegralgleichungen. Für die HBIE sind diese im gesamten Frequenzbereich deutlich sichtbar. Die CBIE zeigt dieses starke Verhalten der kritischen Frequenzen erst ab einer Frequenz von ca. 1100 Hz. Die bisherigen Probleme oberhalb von 1000 Hz lassen sich somit eindeutig dem Problem der kritischen Frequenzen zuweisen. In den vorangegangenen Untersuchungen konnte nur eine Vermutung angestellt werden und es mussten zunächst andere Ursachen ausgeschlossen werden. Die Linearkombination beider Randintegralgleichungen ermöglicht eine gute Genauigkeit im gesamten Frequenzbereich. Im oberen Frequenzbereich treten schwankend noch leichte Abweichungen auf. Der Grund hierfür kann eine nicht mehr ausreichend feine Diskretisierung in Kombination mit einer Überlappung der jeweiligen kritischen Frequenzen der CBIE und HBIE sein. Eine Möglichkeit in diesem Bereich kann die Verfeinerung der Diskretisierung sein, die in einem weiteren Abschnitt untersucht wird. Ob dieser Mehraufwand gerechtfertigt ist, muss anhand einer Validierung und der geforderten Genauigkeit überprüft werden.





**Bild 3.3-53:** Rechenzeit über der Frequenz



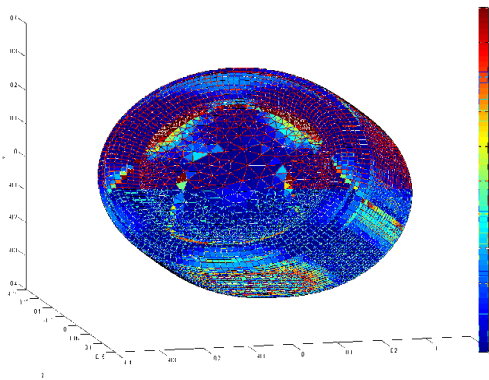
**Bild 3.3-54:** Iterationen über der Frequenz

Die Rechenzeit und die Iterationen sind direkt voneinander abhängig. Die zusätzliche Verwendung der HBIE hat die Integration zwei weiterer Kerne zur Folge, die im Fall der Singularität (Empfänger entspricht der Quelle) eine gesonderte Behandlung benötigen. Im unteren Frequenzbereich bis ca. 1100 Hz ist die Rechenzeit der CBIE geringer als die der Burton-Miller-Formulierung. Da hier keine deutlichen kritischen Frequenzen auftreten, ist auch die Anzahl der Iterationen gering. Wird der obere Frequenzbereich betrachtet, so steigt auch die Anzahl der Iterationen, insbesondere beim Auftreten der kritischen Frequenzen. Durch die Burton-Miller-Formulierung können die Iterationen hier gesenkt werden und der Mehraufwand durch die zusätzliche Integration wird relativiert. Diese Formulierung hat einen positiven Einfluss auf die Kondition des zu lösenden Gleichungssystems. Die Rechenzeit der Burton-Miller-Formulierung liegt hier unterhalb von der CBIE beziehungsweise ist im schlechtesten Fall gleich. Die Formulierung ermöglicht somit eine korrekte Lösung und ist im oberen Frequenzbereich sogar schneller. Eine weitere Möglichkeit wäre der Einsatz der Burton-Miller-Formulierung nur im Bereich oberhalb von ca. 1000 Hz. Dies würde im unteren Frequenzbereich die Rechenzeit nochmals senken, ohne die Genauigkeit negativ zu beeinflussen. Oberhalb von 1000 Hz wären mit der Burton-Miller-Formulierung dann beide Vorteile anwendbar: Kein Einfluss der kritischen Frequenzen und eine geringere Rechenzeit.

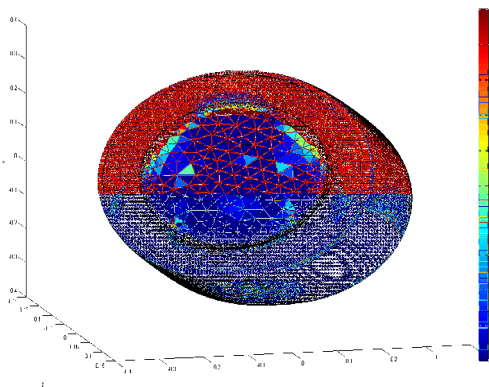
### Genauigkeit oberhalb von 1000 Hz

Im vorherigen Abschnitt sind im oberen Frequenzbereich teilweise leichte Abweichungen von der analytischen Lösung aufgetreten. Der Grund für diese Ungenauigkeiten soll im Folgenden genauer untersucht werden. Zunächst sollten die Fehler lokalisiert werden, daher ist in Bild 3.3-55 die relative Abweichung des Drucks in einem Element dargestellt bei einer Diskretisierung des Reifens mit ca. 8000 Elementen. In Bild 3.3-56 ist der relative Fehler des Drucks für eine Diskretisierung des Reifens mit ca. 50000 Elementen dargestellt. Die gröbere Vernetzung zeigt deutliche Abweichungen im Aufstandsbereich des Reifens. Auch am Übergang zwischen Reifen und Felge sind Abweichungen zu erkennen. Diese sind jedoch nicht relevant, da der absolute Druck in diesem Bereich geringer ist als im Aufstand. Zur Gesamt-Genauigkeit der Simulation trägt dieser Teil nicht bedeutend bei. Der Aufstandsbereich ist bei der Halbraum-Formulierung besonders kritisch, da in diesem die Elemente sehr nah aneinander liegen und somit die Integration aufgrund der Singularität schwierig ist. Eine feinere Diskretisierung löst dieses Problem und die Ungenauig-

keiten im Aufstandsbereich werden verringert. Die Erhöhung der Anzahl von Elementen hat jedoch auch eine größere Rechenzeit zur Folge.

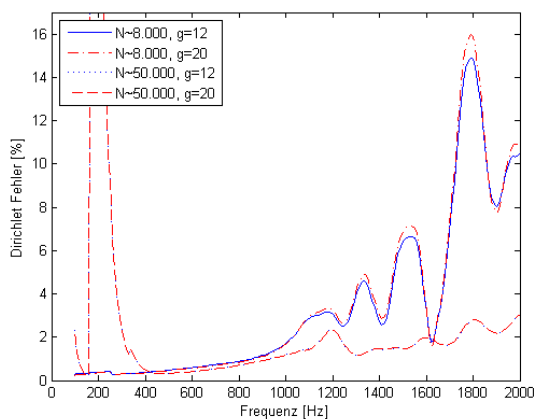


**Bild 3.3-55:** Relativer Fehler auf der Oberfläche des Reifens mit ca. 8.000 Elementen



**Bild 3.3-56:** Relativer Fehler auf der Oberfläche des Reifens mit ca. 50.000 Elementen

In Bild 3.3-57 ist der Dirichlet-Fehler für die beiden Diskretisierungen und zwei unterschiedliche Integrationsordnungen dargestellt. Im oberen Frequenzbereich ist eine erhebliche Steigerung der Genauigkeit bei der feineren Vernetzung zu erkennen. Der Fehler erreicht in diesem Bereich maximale Werte von 2 %. Die Erhöhung der Integrationsordnung führt in beiden Fällen zu keiner signifikanten Verbesserung. Eine Ordnung von  $g = 12$  ist somit ausreichend.



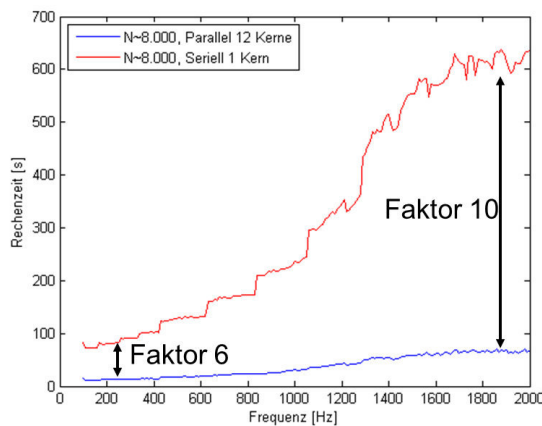
**Bild 3.3-57:** Dirichlet-Fehler für unterschiedliche Diskretisierungen und Integrationsordnungen

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere im oberen Frequenzbereich die Größe der Elemente ein kritischer Faktor für die Genauigkeit ist. Die höhere Anzahl von Elementen (Faktor  $\sim 6$ ) führt jedoch auch zu einer erhöhten Rechenzeit (Faktor  $\sim 10$ ). Dies entspricht der quasi-linearen Komplexität der Fast-Multipole-

Methode. Die Darstellung der relativen Abweichungen zeigt, dass nur der Aufstandsbereich des Reifens zu Problemen führt. Eine Möglichkeit zur effizienten Simulation des Reifens wäre eine lokale Anpassung der Diskretisierung in Abhängigkeit der Frequenz. Mit höherer Frequenz müssten die Elemente im Aufstandsbereich des Reifens verfeinert werden. Dies wäre eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung der Genauigkeit unter Berücksichtigung der Rechenzeit. Diese Abwägung muss jedoch noch anhand von Messungen überprüft werden. Da auch bei Messungen Toleranzen einbezogen werden müssen, kann so die Genauigkeit der Simulation an die Messungen angepasst werden.

### Parallelisierung

Der Programmcode wurde für die Verwendung einer Parallelisierung auf einem Linux Cluster implementiert. Dies ermöglicht die parallele Ausführung gewisser Programmabschnitte mit Hilfe der Programmierschnittstelle OpenMP. Als Berechnungsgrundlage wurde eine PKW-Reifen-Berechnung durchgeführt. In Bild 3.3-58 ist die Rechenzeit über der Frequenz aufgetragen für die serielle Ausführung des Codes und die parallele Ausführung mit 12 Kernen. Im unteren Frequenzbereich beträgt der Faktor zwischen der Rechenzeit der seriellen und der parallelen Ausführung den Wert 6. Die serielle Rechnung benötigt ungefähr 70 s und die parallele Ausführung benötigt circa 12 s. Da die Iterationen in diesem Frequenzbereich relativ niedrig sind, ist der Offset durch die seriellen Programmteile höher als im oberen Frequenzbereich. Hier sind mehr Iterationen notwendig und damit ist die Rechenzeit höher. Der Faktor zwischen serieller und paralleler Berechnung ist jedoch größer, da der zuvor erwähnte Offset geringer ist. Die Parallelisierung der Programmcodes ermöglicht die Berechnung einer Frequenz auch im oberen Frequenzbereich innerhalb von 60 s.



**Bild 3.3-58:** Geschwindigkeitsvorteil durch die Parallelisierung

### Krylov-Subspace-Recycling

Für die Berechnung der Schallabstrahlung im Frequenzbereich muss für jede Frequenz ein eigenes lineares Gleichungssystem gelöst werden. Daraus resultiert eine große Sequenz von linearen Gleichungssystemen, die gewöhnlicher Weise mit Krylov-Unterraumverfahren, wie zum Beispiel GMRES, gelöst werden. Für jeden Frequenzschritt wird diese Prozedur unabhängig gelöst. Eine Möglichkeit der weiteren Reduzierung der Rechenzeit ist die Verwendung des sogenannten Krylov-Subspace-Recycling [3], [20], wobei ein gewisser Informationsgrad zwischen den einzelnen Frequenzschritten übertragen und somit die Konvergenz des iterativen Lösungsprozesses beschleunigt wird. Das Vorgehen bei iterativen Gleichungslösern ist die Approximation des Gleichungssystems:

$$Ax = b .$$

Zunächst wird eine Startlösung  $x_0$  angenommen und danach mit der Korrektur  $z_m$  das Residuum  $r_m = b - A(x_0 + z_m)$  minimiert. Dies wird solange iterativ wiederholt bis das Residuum sich unterhalb einer vorgegeben Toleranz befindet. Die Approximation im Schritt  $m$  ist demnach  $x_m = x_0 + z_m$ . Diese Lösungsräume unterliegen im Allgemeinen gewissen Restriktionen, so dass die Übertragung von Information zwischen verschiedenen Lösungsprozessen nicht möglich ist. Eine Möglichkeit ist jedoch die Verwendung des GCR Gleichungslösers. Dieser beruht auf einer schiefen Projektion, wobei die Spalten von  $U$  den Lösungsraum  $K$  und die Spalten von  $C$  den Raum  $AK$ , auf welchen das Residuum projiziert wird, aufspannen. Der GCR Algorithmus hat hierbei keine Restriktion für die Richtungsvektoren

$U$ . Es ist daher möglich Informationen zwischen unterschiedlichen Lösungsprozeduren zu transferieren. Diese Übertragung kann durch:

$$C^{(i)} = A^{(i)}U^{(i)} \rightarrow U_k^{(i)} \subset U^{(i)} \rightarrow C^{(i+1)} = A^{(i+1)}U^{(i+1)}$$

realisiert werden. Sie ermöglicht nun den Transfer von Informationen, jedoch hängt die Qualität des Subspace Recycling von der Wahl der Richtungsvektoren  $U$  ab. In dem ursprünglichen GCR Algorithmus wird das letzte Residuum als neuer Richtungsvektor hinzugefügt:

$$u_m = r_{m-1} .$$

Dies führt jedoch zu einer nicht optimalen Wahl des neuen Richtungsvektors. Zur Verbesserung werden zwei Ideen verwendet. Zum einen wird eine Approximation des korrekten Richtungsvektors, dem Fehlervektor  $e = x_{correct} - x_m$ , durchgeführt. Da die korrekte Lösung jedoch nicht bekannt ist, wird das Konzept eines Nested Solvers verwendet, welcher die Fehler Gleichung  $Ae = r$  approximiert. Es wird ein GMRES Algorithmus benutzt, um  $u_m = \tilde{e}_{m-1} \approx A^{-1}r_{m-1}$  zu erhalten. Zum anderen werden Informationen aus dem Nested Solver genutzt. Hierfür wird die Orthogonalität zum Lösungsraum  $span(C_k)$  durch den orthogonalen Operator  $\tilde{A}_k = (I - C_k C_k^H)A$  innerhalb des GMRES gefordert. Dieser Algorithmus heißt GCRO und führt zu folgender Rekurrenz:

$$\begin{aligned} (I - C_k C_k^H)AV_{m-k} &= V_{m-k+1}\underline{H}_{m-k} \\ AV_{m-k} &= C_k B_{m-k} + V_{m-k+1}\underline{H}_{m-k} , \end{aligned}$$

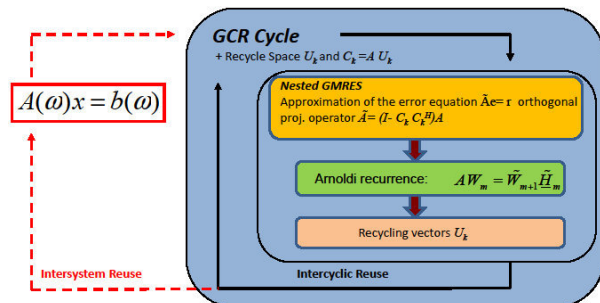
mit  $B_{m-k} = C_k^H AV_{m-k}$ . Mit Hilfe dieser Rekurrenz kann eine Arnoldi-ähnliche Beziehung definiert werden:

$$\begin{aligned} A[U_k \ V_{m-k}] &= [C_k \ V_{m-k+1}] \begin{bmatrix} I_k & B_{m-k} \\ 0 & \underline{H}_{m-k} \end{bmatrix} \\ AW_m &= \tilde{W}_{m+1}\tilde{H}_m . \end{aligned}$$

Diese ermöglicht die freie Wahl der Richtungsvektoren  $U_k \subset W_m$  und die Übertragung von Informationen zwischen den Lösungsprozessen. Mit der Substitution  $z_m = W_m y$  ist das Minimierungsproblem im i-ten GCR Lösungsschritt:

$$\min_{y \in \mathbb{R}^m} \|r_i - AW_m y\|_2 .$$

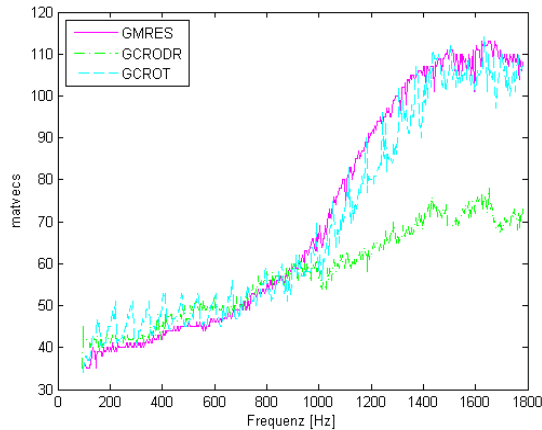
Der schematische Ablauf dieses Verfahrens ist in Bild 3.3-59 dargestellt. Wird die Information innerhalb eines Systems nach einem Restart übertragen, so nennt sich dies „intercyclic reuse“. Im Gegensatz dazu ist die Übertragung von Information zwischen zwei Systemen „intersystem reuse“.



**Bild 3.3-59:** Schematische Darstellung des Krylov-Subspace-Recycling

Der GCRO Algorithmus ermöglicht nun die Übertragung und den Gewinn der Information des Lösungsprozesses. Die weitere Spezialisierung des Algorithmus beruht auf der Auswahl der zu übertragenden Information. Die Algorithmen GCRODR und GCROT sind solche Spezialisierungen und unterscheiden sich in der Art der Beschleunigung der Konvergenz. GCRODR berechnet die harmonischen Ritzvektoren zu den

kleinsten approximierten Eigenwerten mit Hilfe der Arnoldi Rekurrenz. Es werden somit diese Eigenwerte aus dem Spektrum des resultierenden Systems entfernt, wodurch eine bessere Konvergenz entsteht. Der Ansatz des GCROT Algorithmus ist die Erkennung der Richtungsvektoren mit einer größtmöglichen Orthogonalität. Es wird somit der Verlust an Orthogonalität zwischen zwei Lösungsprozeduren minimiert. Zudem bietet der Algorithmus einen weiten Spielraum für neue Möglichkeiten der Auswahl der wiederverwendeten Richtungsvektoren. In Bild 3.3-60 sind die benötigten Matrix-Vektor-Produkte für eine PKW-Reifen-Berechnung mit ca. 50000 Elementen über der Frequenz aufgetragen. Es wurde hierbei eine reale Anregung durch eine Straßenoberfläche verwendet. Als Referenzlösung dient ein klassischer GMRES. Insbesondere im oberen Frequenzbereich ist eine deutliche Reduktion der Matrix-Vektor-Produkte bei Verwendung des GCRODR zu erkennen, welches einem Reduktionsverhältnis von fast der Hälfte entspricht. Da in der FMM die Matrix-Vektor-Produkte direkt mit der Rechenzeit korrelieren, ist hierdurch ein enormer Rechenzeitvorteil zu erreichen.



**Bild 3.3-60:** Matrix-Vektor-Produkte bei Verwendung des Krylov-Subspace-Recycling

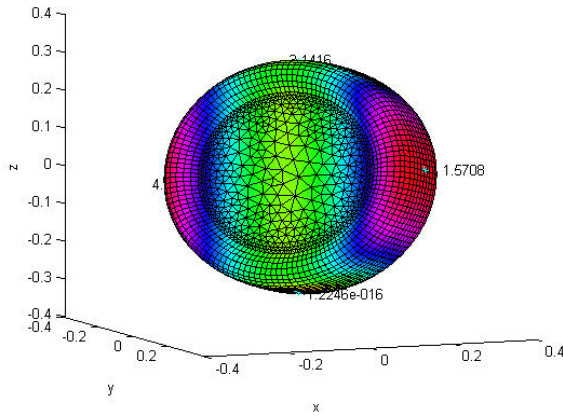
### 3.3.3.2 Numerische Untersuchungen

#### PKW-Reifen Validierung

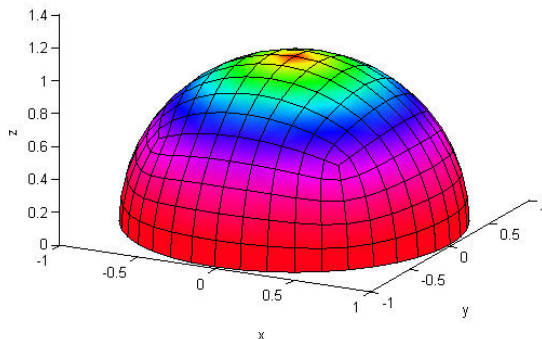
Die Validierung des Modells wird anhand eines PKW-Reifens durchgeführt. Die Fast-Multipole-Boundary-Elemente-Methode (FMBEM) kann mit einer bereits validierten klassischen Boundary-Elemente-Methode (BEM) verglichen werden. Diese wurde bereits für die Berechnung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen validiert und zeigt gute Übereinstimmung mit Messungen. Der gesamte Simulationsablauf zur Bestimmung der Schallabstrahlung soll hierbei getestet werden. Die Strukturmechanik des Reifens wird von der Chalmers Universität berechnet und die resultierenden Oberflächenschnellen an das Akustikmodell der TUHH übergeben. Die Auswertung erfolgt auf einer Halbkugel und die Ergebnisse werden als Terzspektrum dargestellt und verglichen.

#### Auswertung

Die Auswertung der Ergebnisse soll in Form von Terzspektren erfolgen. Im ersten Simulationsschritt wird die FMBEM-Berechnung mit den Oberflächenschnellen der Strukturberechnung durchgeführt, wobei als Ergebnis die Schalldrücke auf der Oberfläche zur Verfügung stehen (siehe Bild 3.3-61). Zum Vergleich der Berechnungsergebnisse mit Messungen wird eine Auswertung auf einer Halbkugel mit einem Radius von 1 m (siehe Bild 3.3-62) durchgeführt. Dies würde bei einer Messung einem Array von Mikrofonen entsprechen, welche um die Reifen positioniert werden. Die Bestimmung des Schalldrucks auf der Halbkugel erfolgt in einem Post-Processing-Schritt im Rahmen der BEM.



**Bild 3.3-61:** Schalldruck auf der Oberfläche des Reifens



**Bild 3.3-62:** Auswertung auf einer Halbkugel

Im nächsten Schritt des Simulationsablaufs wird nun ein einzahliger Wert für jede Frequenz aus den Schalldrücken auf der Halbkugel gebildet. Es wird der Mittelwert aus den Effektivwerten des Schalldrucks bestimmt. Der Effektivwert lässt sich aus der Amplitude des Schalldrucks berechnen:

$$p_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \hat{p} \cdot$$

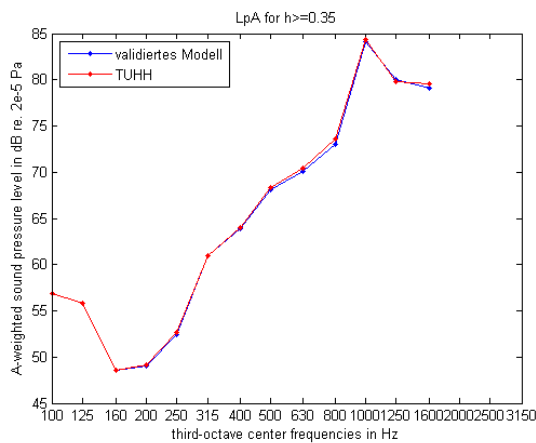
Für das Terzspektrum werden diese gemittelten Effektivwerte innerhalb eines Terzbandes aufsummiert, wodurch jedes Teilband einen Terzpegel besitzt und dieser in dB logarithmisch dargestellt wird:

$$L = 20 \cdot \log \left( \frac{p_{\text{mean}}}{p_0} \right) \cdot$$

Der Referenzdruck ist, aufgrund des Mediums Luft,  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Pa und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt als A-bewerteter Schalldruckpegel. Diese Anpassung wird aufgrund der frequenzabhängigen Wahrnehmung des menschlichen Gehörs durchgeführt.

## Ergebnisse

Die Validierung des Modells wird anhand einer Diskretisierung mit ca. 8000 Elementen durchgeführt. Als Parameter für die Berechnung werden die als sinnvoll erachteten Werte gewählt. Der Frequenzbereich der Untersuchung geht von ca. 100 Hz bis 1800 Hz, wobei 475 Frequenzschritte berechnet werden. Die Ergebnisse werden wie im vorherigen Kapitel bestimmt und sind in Bild 3.3-63 dargestellt. Als Referenz werden vorhandene und validierte Berechnungen einer klassischen BEM verwendet.

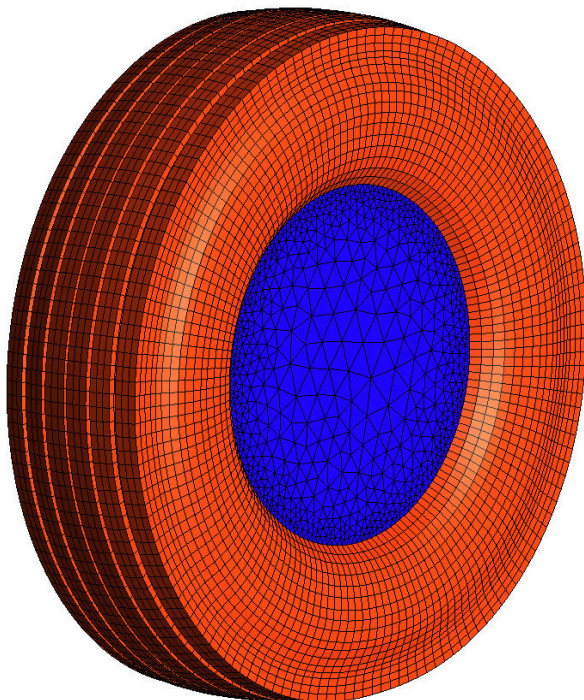


**Bild 3.3-63:** A-bewertetes Terzspektrum in dB der Reifensimulation

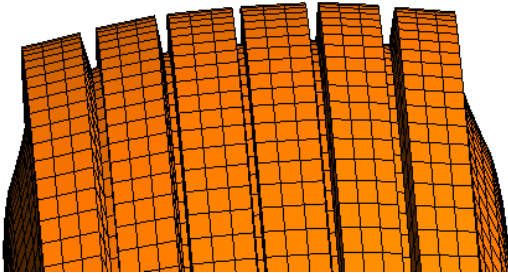
In dem betrachteten Frequenzbereich liegen 13 Terzbänder, die nun zur Validierung zur Verfügung stehen. Die Berechnung mit der FMBEM zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit der validierten Lösung. Die maximale Abweichung innerhalb eines Terzbandes beträgt 0,5 dB. Diese Resultate bestätigen die korrekte Umsetzung und Anwendbarkeit des Berechnungsmodells der TUHH. Zudem zeigen diese guten Ergebnisse, dass eine Anpassung der Diskretisierung, wie sie im Projektverlauf angedacht war, nicht notwendig ist. Es ist somit eine Grundlage zur Berechnung von LKW-Reifen gegeben.

### LKW-Reifen

Das entwickelte Programm ermöglicht nun die numerische Simulation von LKW-Reifen-Rollgeräuschberechnungen. Der LKW-Reifen, siehe Bild 3.3-64, weist einige Änderungen im Vergleich zum validierten Modell des PKW-Reifens auf. Zum einen sind die Abmessungen größer, was bei gleicher Elementauflösung zu einer größeren Systemdimension führt. Zum anderen sind die Umfangsrillen des LKW-Reifens, wie in Bild 3.3-65 zu sehen, wesentlich größer als die eines PKW-Reifens. Eine Vernachlässigung dieser Eigenschaft für eine Abstrahlungsberechnung wird als wichtig erachtet. Das angepasste Modell besitzt daher circa 14000 Elemente im Gegensatz zu den 8000 Elementen zuvor.



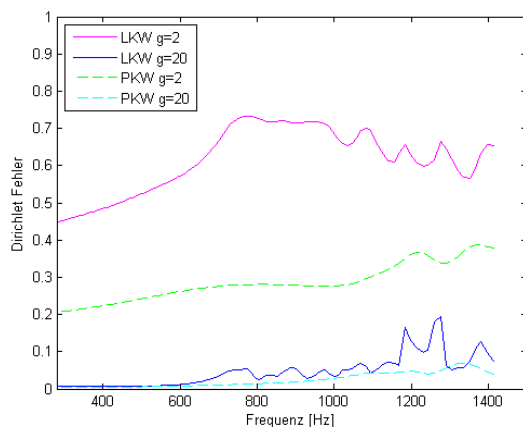
**Bild 3.3-64:** LKW-Reifen Diskretisierung



**Bild 3.3-65:** Umfangsrillen des LKW-Reifens

### Einfluss Integrationsordnung

Durch die veränderte Geometrie und Diskretisierung ist es zunächst sinnvoll eine Analyse der neuen Diskretisierung durchzuführen. Hierfür wird eine künstliche Anregung, bei der eine analytische Lösung durch eine Monopolquelle vorhanden ist, gewählt. Einen sehr großen Einfluss auf die Genauigkeit und die Rechenzeit einer BEM-Berechnung hat die Integrationsordnung  $g$ . Es werden daher für unterschiedliche Integrationsordnungen Berechnungen im akustisch relevanten Bereich für den LKW-Reifen durchgeführt. Als Vergleich dient ein PKW-Reifen, da die Einflüsse des analytischen Fehlers auf eine Validierung bekannt sind. In Bild 3.3-66 ist der Dirichlet Fehler über der Frequenz für die Integrationsordnung  $g = 2$  und  $g = 20$  für PKW- und LKW-Reifen aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss einer niedrigen Integrationsordnung bei einer LKW-Reifen-Berechnung einen wesentlich höheren Einfluss als bei einer PKW-Reifen besitzt. Der Fehler beim LKW-Reifen zeigt einen durchschnittlichen Fehler von 60% und im Gegensatz dazu der PKW-Reifen nur 20%. Wird eine Integrationsordnung von  $g = 20$  verwendet, so sind die Genauigkeiten beider Berechnungen in einem ähnlichen Bereich. Für die LKW-Reifen-Rollgeräuschberechnung ist eine hohe Integrationsordnung somit von wesentlicher Bedeutung, um korrekte Ergebnisse zu erhalten.

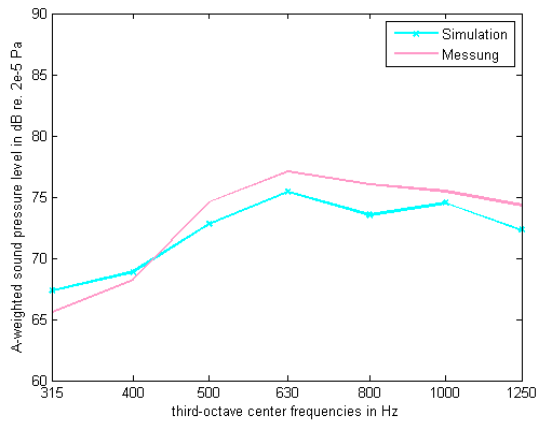


**Bild 3.3-66:** Fehler für unterschiedliche Integrationsordnungen  $g$  für einen PKW- und LKW-Reifen

### Validierung

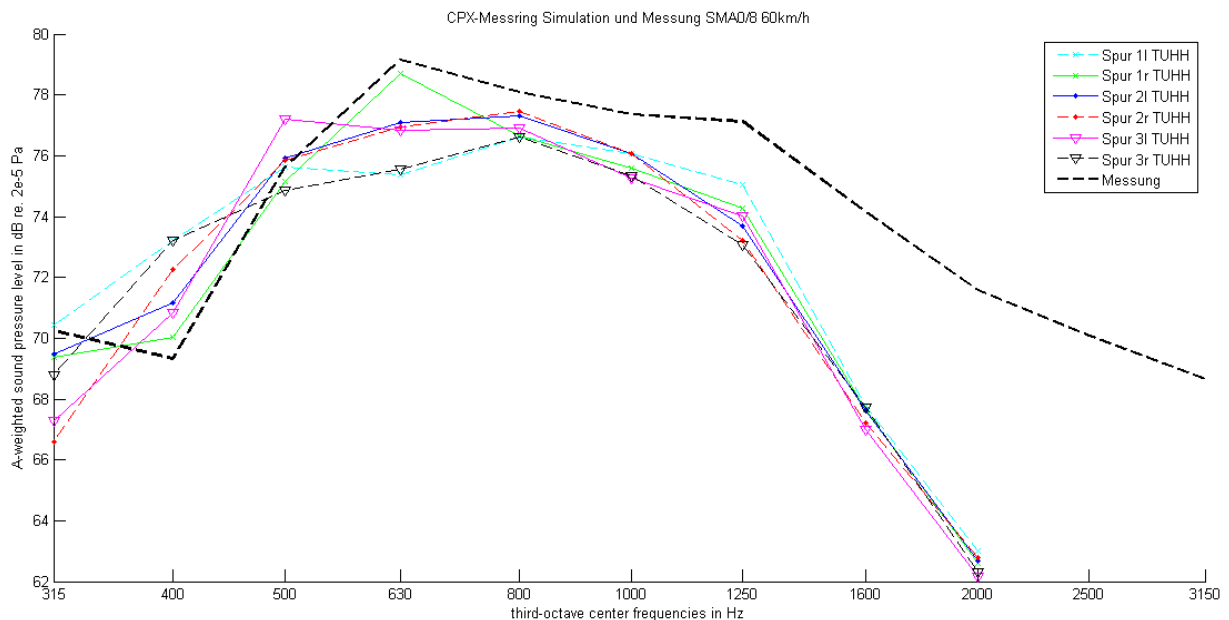
Die Validierung für eine LKW-Reifen-Rollgeräuschberechnung wird in einer ähnlichen Weise wie bei dem PKW-Reifen durchgeführt. Die Oberflächenschnellen aus der Struktursimulation der Chalmers Universität werden im Akustik-Rechenmodell als Eingangsdaten verwendet. Es wird ein Rillen-LKW-Reifen auf einem SMA 0 / 8 S bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h untersucht. Für die Validierung wird eine CPX-Messung durchgeführt und zusätzlich ein Mikrofon-Array aus 9 Messpositionen auf einer Höhe und gleichem Radius in unterschiedlichen Winkeln um den Reifen verwendet. Die Ergebnisse in Bild 3.3-67 sind gemittelte Werte über das genannte Mikrofon-Array, welche als A-gewichtete Terzspektren dargestellt werden. Die Simulation wird an den gleichen Positionen wie die Mikrofone ausgewertet. Die numerische Berechnung zeigt eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung mit der Messung. Die Berechnungszeiten für 138 Frequenzen liegen für die Akustiksimulation bei insgesamt 37 Minuten für die Bestimmung der Randwerte und die Nachlaufrechnung zur Auswertung der Messpositionen. Eine Einzelberechnung dauert somit im Mittel 16 s bei einer Systemgröße von 14000 Elementen.





**Bild 3.3-67:** Vergleich von Messung und Simulation eines LKW-Rillenreifens

Zur Bestätigung der Ergebnisse wurden weitere Berechnungen durchgeführt. Als LKW-Reifen wird ein 315/80R22.5 Antriebsachsenreifen verwendet. Die Geschwindigkeit ist bei dieser Untersuchung 60 km/h und es wird erneut die Straßenoberfläche SMA 0 / 8 S analysiert. Die Daten für die Kontaktmodellierung im Strukturmodell beruht auf 6 unterschiedlichen Messpositionen der Straßenoberfläche auf dem verwendeten Untersuchungsgebiet. Der Einfluss der unterschiedlichen Messpositionen soll eruiert werden. In Bild 3.3-68 ist der A-bewertete Schalldruckpegel über den untersuchten Terzbändern aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der Messpositionen nicht unerheblich ist. Besonders in den unteren Terzbändern ist ein deutlicher Einfluss zu sehen. Die gescannte Straßenoberfläche ändert sich somit auch auf einem Testfeld mit gleichem Straßenbelag. Wird diese Toleranz mit einbezogen, so kann trotzdem eine gute Vorhersage der Schallabstrahlung von Reifen-Rollgeräuschen erreicht werden. Die Berechnungszeiten sind durch die gleiche akustische Diskretisierung wiederum in einem sehr guten Bereich von ungefähr 16 s pro Frequenz, wobei die Gesamtzeit in dieser Untersuchung etwas höher liegt. Dies beruht auf einer höheren Anzahl von untersuchten Frequenzen als bei der vorherigen Untersuchung. Die entwickelte Methode ermöglicht somit eine sehr effiziente und genaue Vorhersage von Reifen-Rollgeräuschen.



**Bild 3.3-68:** Vergleich von Messung und Simulation eines LKW-Reifens bei 60 km/h und unterschiedlichen Messpositionen der Straßenoberfläche

### 3.3.3.3 Zusammenfassung und Ausblick

Die entwickelte Fast-Multipole-Boundary-Elemente-Methode bietet eine performante Möglichkeit die Geräuschabstrahlung von Reifen im Frequenzbereich zu berechnen. Das Modell wurde hinsichtlich der Genauigkeit und der Rechenzeit optimiert und sowohl für PKW-Reifen als auch LKW-Reifen validiert. Die enorm kurzen Rechenzeiten ermöglichen die Untersuchung einer Vielzahl von unterschiedlichen Reifentypen, ohne dass diese durch teure Prototypen und Messungen getestet werden müssen. Es können zudem

einzelne physikalische Gegebenheiten von Reifen-Rollgeräuschberechnungen erarbeitet werden, da die numerische Simulation das Zu- und Abschalten gewisser Phänomene erlaubt, was im Rahmen einer Messung nicht möglich ist.

### 3.3.4 Entwicklung eines Simulationsmodells im Zeitbereich

#### 3.3.4.1 Rechenmodell

Wie in [2] beschrieben (siehe auch [26]) führt die Abstrahlung von zeitabhängigen akustischen Wellen außerhalb des Reifens oberhalb einer schallharten Straße nach einem Einfachschichtpotential-Ansatz für den Schalldruck:

$$p(t, x) = S\varphi(t, x) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} \frac{\varphi(t - \frac{|x-y|}{c}, y)}{|x-y|} ds_y + \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} \frac{\varphi(t - \frac{|x-y'|}{c}, y)}{|x-y'|} ds_y \quad (0.1)$$

dank der Neumann-Randbedingung (Schallhart) auf dem Reifen  $\Gamma$  :

$$\frac{\partial p}{\partial n}(t, x) = -\rho \ddot{u}_N - \frac{\partial p^I}{\partial n}(t, x) \quad \text{für } t > 0$$

auf eine Integralgleichung 2. Art für die unbekannte Dichte  $\varphi(t, x)$  auf  $\Gamma$ :

$$(-I + K')\varphi(t, x) = 2 \frac{\partial p}{\partial n}(t, x) \quad (0.2)$$

Hier ist  $K'$  das transiente Doppelschichtpotential des Halbraums [8],  $y'$  der an der Fahrbahn gespiegelte Bildpunkt des Quellpunktes  $y$ ,  $x$  der Empfängerpunkt,  $t$  die Zeit,  $n$  die äußere Normale auf der Reifenoberfläche  $\Gamma$ ,  $c$  die Schallgeschwindigkeit,  $\rho$  die Luftdichte und  $p^I$  der Schalldruck einer einfallenden Welle.  $K'$  hat die Form:

$$K'\varphi(t, x) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \frac{n_x \cdot (y-x)}{|x-y|} \left( \frac{\varphi(t - \frac{|x-y|}{c}, y)}{|x-y|^2} + \frac{\dot{\varphi}(t - \frac{|x-y|}{c}, y)}{c|x-y|} \right) ds_y + \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \frac{n_x \cdot (y'-x)}{|x-y'|} \left( \frac{\varphi(t - \frac{|x-y'|}{c}, y)}{|x-y'|^2} + \frac{\dot{\varphi}(t - \frac{|x-y'|}{c}, y)}{c|x-y'|} \right) ds_y \quad (0.3)$$

Die Integralgleichung (1.2) wird mit einem Raum-Zeit-Galerkin-Verfahren gelöst mit stückweise konstanten Ansatz- und Testfunktionen auf einer Näherungsoberfläche (aus Dreiecken bestehend) des Reifens und auf Teilintervallen  $I_m = (t_{m-1}, t_m)$  der Länge  $\Delta t$  im Zeitbereich [2], [26]. Das zu lösende Problem lautet:

Finde  $\varphi_h$  so dass:

$$\int_{t=0}^T \int_{x \in \Gamma} (-I + K')\varphi_{h,\Delta t}(t, x) \gamma^n(t) \varphi_j(x) ds_x dt = 2 \int_{t=0}^T \int_{x \in \Gamma} \frac{\partial p}{\partial n}(t, x) \gamma^n(t) \varphi_j(x) ds_x dt \quad (0.4)$$

für  $j = 1, \dots, N_s$  und  $n = 1, \dots, N_t$ , wobei:

$$\varphi_{h,\Delta t}(t, x) = \sum_{m=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_s} b_i^m \gamma^m(t) \varphi_i(x) \quad (0.5)$$

mit der zeitlichen Ansatzfunktion:

$$\gamma^m(t) = \begin{cases} 1 & t \in (t_{m-1}, t_m] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} .$$

Man erhält ein MOT- Schema, das in jedem Zeitschritt gelöst wird:

$$\left(-\Delta t \cdot M + (K')^0\right) \varphi^n = 2F^n - \sum_{m=1}^{n-1} (K')^{n-m} \varphi^m \quad (0.6)$$

mit dem Lösungsvektor  $\varphi^n = (b_1^n, \dots, b_{N_s}^n)^T$  der Entwicklungskoeffizienten der

Galerkinnäherung  $\varphi_{h,\Delta t}$  im  $n$ -ten Zeitintervall. Dabei bezeichnet  $(K')^l$  die Galerkinmatrix des Integraloperators  $K'$  im  $l$ -ten Zeitintervall,  $M$  die zugehörige Massematrix und  $F^n$  die entsprechende BEM-Diskretisierung der rechten Seite in (1.2). Siehe [2].

Beachte, dass die Berechnung jeder Matrix nur von der Zeitdifferenz abhängt [29], [26]. Bei beschränkter Oberfläche  $\Gamma$ , wie bei einem Reifen, verschwinden die Matrizen  $(K')^{n-m}$ , wenn immer die Zeitdifferenz  $l := n - m$  die Relation  $l > \left\lceil \frac{\text{Durchmesser}(\Gamma)}{c\Delta t} \right\rceil$  erfüllt, das heißt der Lichtkegel

$E_l = \left\{ (x, y) \in \Gamma \times \Gamma, t_l \leq \frac{|x-y|}{c} \leq t_{l+1} \right\}$  über die ganze Fläche  $\Gamma$  gewandert ist. Der Beitrag des MOT-

Algorithmus, der die meiste CPU-Zeit benötigt, ist die Berechnung der Matrixelemente, obwohl die resultierenden Matrizen dünn besetzt sind. Diese Berechnung geschieht mit einer effizienten, zusammengesetzten hp-Gauß-Quadratur, wobei die Quadraturpunkte zu den Dreiecksseiten hin graduiert sind und lokal verschiedene Ordnungen für die Quadratur erlaubt sind.

### Wissenschaftlicher Kontext

Die Untersuchung zeitabhängiger Randelementmethoden geht zurück auf Arbeiten von Bamberger und Ha-Duong [17]. In den vergangenen 30 Jahren hat sich insbesondere die französische Schule um Nedelec und Bachelot mit der Analyse und Implementierung dieser Verfahren beschäftigt. Die grundlegenden algorithmischen Aspekte sind besonders in den Arbeiten von Terrasse und Abboud entwickelt worden. Darauf aufbauend hat in den vergangenen Jahren speziell Michielssen effiziente Verfahren besonders für elektromagnetische Ingenieur Anwendungen implementiert [33]. Auch in der Luftfahrtindustrie haben sich zeitabhängige Randintegralgleichungen als ein Standardwerkzeug etabliert.

Eine Motivation dieser Forschungsarbeit ist die kürzliche Herleitung einer expliziten Fundamentallösung im Halbraum von Ochmann [28], der die einfache Modellierung einer absorbierenden Straße ermöglicht. Schnelle Verfahren für Berechnungen des Horneffekts zwischen Straße und Reifen stellen die Verbindung zu aktivsten Forschungsfeldern her: Die theoretische Untersuchung der Randintegraloperatoren führt nicht nur, zu Raum-Zeit-adaptiven Verfahren, sondern ist ebenso eine Basis zur Untersuchung der Faltungsquadratur als alternativem Zeitschrittverfahren oder schneller Löser für die zeitharmonische Helmholtzgleichung bei hoher Frequenz.

#### 3.3.4.2 Theoretische Ergebnisse

Im Projekt wurden neue theoretische Ergebnisse für die TDBEM gewonnen, wie z.B. a priori Fehlerabschätzungen für die zeitabhängige Galerkin-Randelementmethode für die Wellengleichung außerhalb eines Lipschitz-Hindernisses im absorbierenden Halbraum [15]. Dies umfasst die Schallabstrahlung eines (möglicherweise absorbierenden) Reifens auf absorbierender Straße. Die Resultate dieser Publikation liefern einen fundamentalen Hintergrund für weitere theoretische und numerische Analysen. Sie garantieren vor allem die Stabilität und Konvergenz von Galerkinverfahren für zeitabhängige Randintegralgleichungen 1. Art. In [14] wurde erstmalig a posteriori Fehlerabschätzungen für die TDBEM hergeleitet und einen Raum-Zeit adaptiven Algorithmus zur Gewinnung einer schnellen Galerkin-Lösung durch Gitter-Verfeinerung angegeben. Der Ausbau dieser innovativen fehlerkontrollierten Rechnungen wird z. T. durchgeführt; insbesondere wird unser Softwarepaket auf die Integralgleichung 1. Art mit dem zeitabhängigen, hypersingulären Operator der Normalen ableitung des Doppelschichtpotentials erweitert.

#### Adaptive TDBEM mit residualem Fehlerschätzer

Als einfaches Beispiel wird das äußere Dirichlet-Problem für die Wellengleichung außerhalb der Einheitskugel betrachtet; d.h. die Schallabstrahlung im Zeitbereich für eine schallweiche Kugel ohne Straße. Dies führt auf die Integralgleichung 1. Art für die Zeitableitung der Dichte  $\dot{\varphi}$  mit dem Einfachschichtpotential bei vorgegebener Zeitableitung des Schalldrucks:

$$\dot{p}(t, \mathbf{x}) = \dot{f}(t, \mathbf{x}) = \begin{cases} 2, & x_1 > 0 \\ 0, & x_1 < 0 \end{cases}$$

nämlich:

$$V\dot{\phi}(t, x) = \frac{1}{4\pi} \int_{\Gamma} \frac{\dot{\phi}(t - \frac{|x-y|}{c}, y)}{|x-y|} ds_y = \dot{f}(t, x), \quad x \in \Gamma \text{ Kugeloberfläche.} \quad (0.7)$$

Die Funktion  $\dot{f}$  ist ein Testbeispiel für eine zeitunabhängige Singularität, ähnlich der Situation der Horn-ähnlichen Geometrie, in der ein Reifen auf die Straße trifft. Ausgehend von einem groben Anfangsgitter berechnen wir mit einem MOT-Schema eine Galerkin-Näherung  $\dot{\phi}_{h,\Delta t}$ , die stückweise linear in Raum und Zeit ist. Mit  $\dot{\phi}_{h,\Delta t}$  und  $\dot{f}$  bestimmt man auf jedem Dreieck  $\Delta$  und für jedes Zeitintervall  $I_n = [t_{n-1}, t_n]$  den lokalen Fehlerindikator:

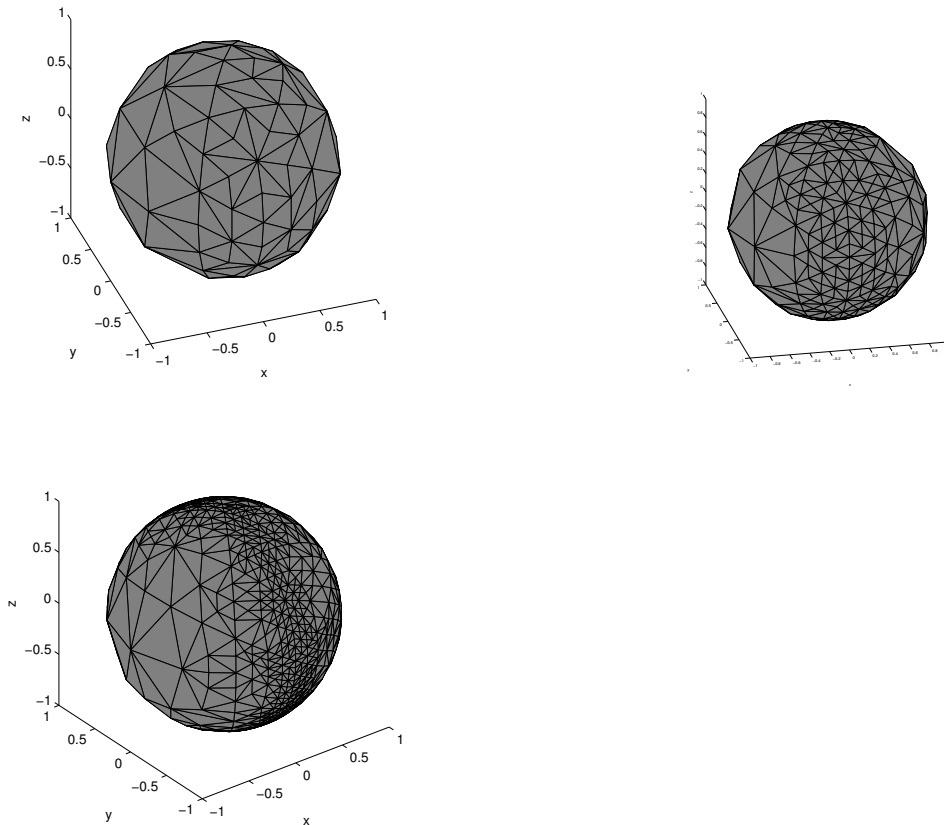
$$\eta_{\Delta}(I_n)^2 = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \int_{\Delta} [h \nabla_{\Gamma} (\dot{f} - V\dot{\phi}_{h,\Delta t})]^2$$

mit dem Flächengradienten  $\nabla_{\Gamma}$ . Daraus ermittelt man den zeitintegrierten Indikator  $\eta_{\Delta} = (\sum_{n=1}^{N_t} \eta_{\Delta}(I_n)^2)^{1/2}$

Anschließend bestimmt man  $\eta_{\max} = \max_{\Delta} \eta_{\Delta}$ , den maximalen Fehlerindikator aller Dreiecke.

Man markiert alle Dreiecke  $\eta(\Delta_i) > \theta \cdot \eta_{\max}$  mit fest gewähltem  $\theta$ ,  $0 < \theta < 1$ , und verfeinert  $\Delta_i$  in 4 neue Dreiecke durch verbinden der Mittelpunkte der Seiten von  $\Delta_i$  und erhält ein neues Gitter  $T$  (und projiziert die neuen Knoten auf die exakte Kugel). Dann wählt man  $\Delta t$  so dass  $\frac{c\Delta t}{\Delta x} \leq 1$  für alle Dreiecke, wobei  $\Delta x$  die längste Dreieckseite bezeichnet. Man führt diesen **adaptiven Algorithmus (löse  $\rightarrow$  schätze ab  $\rightarrow$  markiere  $\rightarrow$  verfeinere)** so lange aus, bis  $\sum_i \eta^2(\Delta_i) < \varepsilon^2$  mit fest vorgewähltem  $\varepsilon > 0$ .

Damit erhält man Galerkin-Näherungen für die Lösung von (1.7) auf einer Folge adaptiv verfeinerter Gitter, die bedeutend schneller konvergieren als die Galerkin-Lösung auf gleichmäßig verfeinertem Gitter, siehe Bild 3.3-69 [14].



**Bild 3.3-69:** Die ersten 3 adaptiv erzeugten Gitter für (1.7) ausgehend von einem Ikosaeder mit 80 Knoten,  $\Theta = 0.9$

### Optimale Quadraturen

Die Simulation dreidimensionaler zeitabhängiger Probleme ist eine herausfordernde Aufgabe. Ha-Duong [17] konnte die unbedingte Stabilität der transienten Randelementmethode für das Raum-Zeit-Galerkinverfahren angewendet auf Integralgleichungen erster Art nachweisen. Daher blieb die Frage, warum so viele Instabilitäten in den numerischen Experimenten berichtet werden. Anhand von Vorarbeiten [25] [31] konnten für die Integralgleichung mit dem Einfachschichtpotential diese Instabilitäten behoben werden, indem optimale hp-Quadraturen [29] zur Berechnung der Matrixelemente hergeleitet wurden. Dazu haben wir die Potenziale, die bei der Berechnung der Galerkin-Elemente in [31] auftreten, analysiert. Die Arbeit zeigt, dass eine neue Art von „geometrischen Lichtkegel-Singularitäten“ schwerwiegende Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Galerkin-Steifigkeitsmatrix bewirken können. Deshalb muss ein genaues Quadraturverfahren, das diese Singularitäten berücksichtigt, bei der Berechnung der Matrixeinträge benutzt werden. Das leistet die hier entwickelte effiziente, zusammengesetzte hp-Gauß-Quadratur, die mit einer angemessenen Graduierung und mit variabler Ordnung ausgestattet ist. In diesem Teilvorhaben wurden diese hp-Quadraturen auf die Integralgleichung 2. Art (1.2) bzw. 1. Art (1.7) angewendet.

#### 3.3.4.3 Software Entwicklung

Das am IfAM für dieses Projekt entwickelte und implementierte Programm besteht aus drei Teilen. Erstens das Preprocessing, zweitens das Berechnungsprogramm und drittens das Postprocessing, welche auch in dieser Reihenfolge ausgeführt werden. Dabei ist das Pre- und Postprocessing in MATLAB implementiert, um von der graphischen Oberfläche und der einfach zu bedienenden Zeichenroutine zu profitieren, sowohl bei der Bedienbarkeit, wie auch von der reduzierten Entwicklungszeit. Weil MATLAB den implementierten Quellcode während der Laufzeit in Maschinensprache übersetzt (interpretiert), sind die Rechenzeiten von MATLAB Programmen verglichen mit denen von präkompilierten Programmen typischerweise schlechter. Bei den wenig rechenintensiven Programmteilen ist dies vernachlässigbar, nicht jedoch bei den Teilen, welche die eigentlichen Berechnungen (Lösen der Integralgleichung und Punktauswertung des Potentials) ausführen. Diese wurden in FORTRAN implementiert und in das seit zwei Jahrzehnten kontinuierlich weiterentwickelte Softwarepaket Maiprogs integriert.

Die Aufgabe des Preprocessings ist die Überführung der zur Verfügung gestellten Daten in ein von der Berechnungsroutine weiterverarbeitetes Format. Dazu gehören: Erstens die Zerlegung von eventuell vorkommenden Vierecken in zwei Dreiecke, um eine Triangulierung des Reifens mit nur einem Typ von Elementen zu erhalten, zweitens die Berechnung der äußeren Normalen, welche für die Integralgleichung und die Berechnung der rechten Seite benötigt werden, und drittens das Konvertieren dieses Gitters in das "px"-Gitterformat von Maiprogs. Darüber hinaus setzt das Preprocessing noch die lokalen und globalen Freiheitsgrade über das "rci"-Format. Der zweite integrale Bestandteil des Preprocessing ist die Überführung der Schnellen aus dem Frequenz- in den Zeitbereich. Weil die Anwendung der diskreten FFT lediglich Punktauswertung der Schnellen in festen Zeitpunkten liefert, und damit eine unangemessene Zeitdiskretisierung vorgibt, wird aus den Fourierkoeffizienten und den dazugehörigen Frequenzen explizit die Linearkombination der Kosinusfunktionen rekonstruiert, welche dann in beliebigen Zeitpunkten, entsprechend der Zeitdiskretisierung, ausgewertet werden kann. Diese Punktauswertungen werden dann im "cx"-Format für die gesamte Zeitdiskretisierung abgespeichert.

Die Hauptaufgabe des Berechnungsprogramms ist die Ausführung des Marching-in-on-time Algorithmus mit dem Aufstellen und Lösen eines linearen Gleichungssystems in jedem Zeitschritt. Dabei ist der zentrale Bestandteil die Berechnung der lokalen Matrizen, siehe [29], [25] für eine geeignete hp-zusammengesetzte Quadratur, und deren Zusammensetzung zur globalen Matrix. Da die Berechnungen der lokalen Matrizen sehr zeitintensiv sind, sind mehrere Maßnahmen zu ergreifen. Dazu gehört erstens die parallele Berechnung aller lokalen Matrizen mittels MPI, zweitens Tests, ob der Kern des adjungierten Doppelschichtpotentials Null ist, wie z.B. auf dem Selbstelement, und drittens Tests, ob durch die Verwendung der Lichtkegel das Integrationsgebiet eine Nullmenge ist. Die Tests, ob das Integrationsgebiet Null ist, erfolgen in zwei Schritten. Erstens ein einfacher Test vor der äußeren Quadratur, ob die Ansatz- und Testdreiecke für den aktuellen Zeitschritt den richtigen Abstand haben können. Ist dieser Test positiv, so wird vor der inneren Quadratur der minimale und maximale Abstand von dem äußeren Quadraturpunkt auf dem Testelement zu dem Ansatzdreieck berechnet, um zu überprüfen, ob das Integrationsgebiet für die innere Quadratur eine Nullmenge ist.

Während des Postprocessings werden Punktauswertungen des Schalldrucks mittels Potentialauswertung zu unterschiedlichen Orts- und Zeitpunkten vorgenommen, um diese Werte für weitere Berechnungen, wie z.B. das A-weighting, zu benutzen. Die Steuerung des Postprocessings erfolgt über MATLAB, wobei aber, aus den oben genannten Gründen, für die Potentialauswertung Maiprogs programmintern aufgerufen wird. Erfolgt die Potentialauswertung für alle Zeitpunkte bei gleichem Ortspunkt zeitgleich, kann durch Wiederverwendung der grundlegenden Integrale, genauso wie bei den Matrizen, die Komplexitätsklasse um eine Ordnung reduziert werden. Wie bei der Berechnung der Matrizen sind auch hier die Parallelisierung und der Test auf Nullmengen als Integrationsgebiet essenziell.

### 3.3.4.4 Numerische Experimente

#### Validierung: Schallabstrahlung einer Kugel in den Halbraum

Zur Validierung durchgeführter numerischer Experimente wurde eine geschlossene, exakte Lösung der Wellengleichung im Halbraum entwickelt.

Für die Einheitskugel  $B$  im Abstand  $h$  über einer starren Fahrbahn wird die Wellengleichung mit Schallgeschwindigkeit  $c=1$  m/s und Anfangsbedingung  $u(0, x, y, z) = u_0(r) + u_0(r')$  betrachtet, wobei

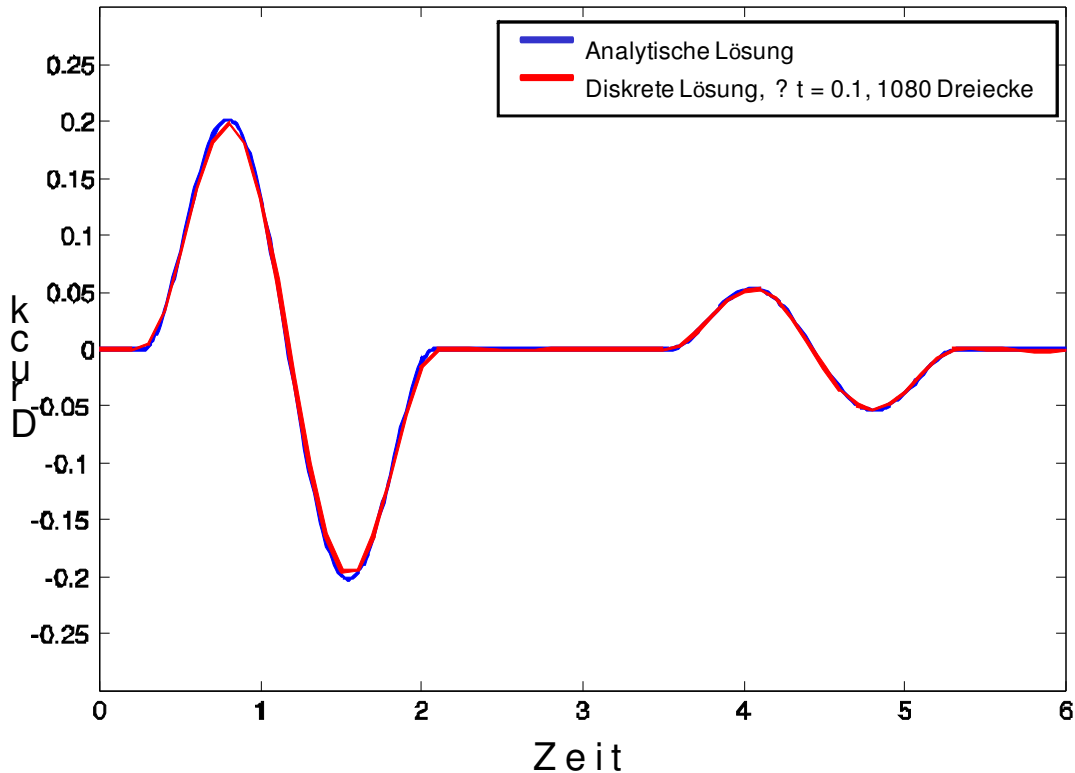
$$\begin{cases} u_0(r) = 1 + \cos\left(\frac{\pi r}{R}\right) & r < R, \\ u_0(r) = 0 & r \geq R \end{cases},$$

$$r = |(x, y, z - h)| = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - 1 - h)^2} \quad \text{und} \quad r' = |(x, y, z + h)| = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + 1 + h)^2}.$$

Für Neumann-Randbedingungen auf der Kugeloberfläche ist die exakte Lösung des Anfangswertproblems gegeben durch:

$$u(t, x, y, z) = \frac{r-t}{2r} u_0(r-t) + \frac{r'-t}{2r'} u_0(r'-t)$$

Bild 3.3-70 zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung der analytischen und approximativen Lösung in  $(0,0,2.8)$  m für  $R=0.9$  m,  $h=0.63$  m,  $\Delta t=0.1$  s und 1080 gleichmäßige Dreiecke [2].

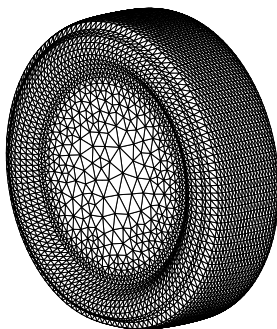


**Bild 3.3-70:** Exakter Schalldruck und seine Galerkinnäherung in  $(0,0,2.8)$

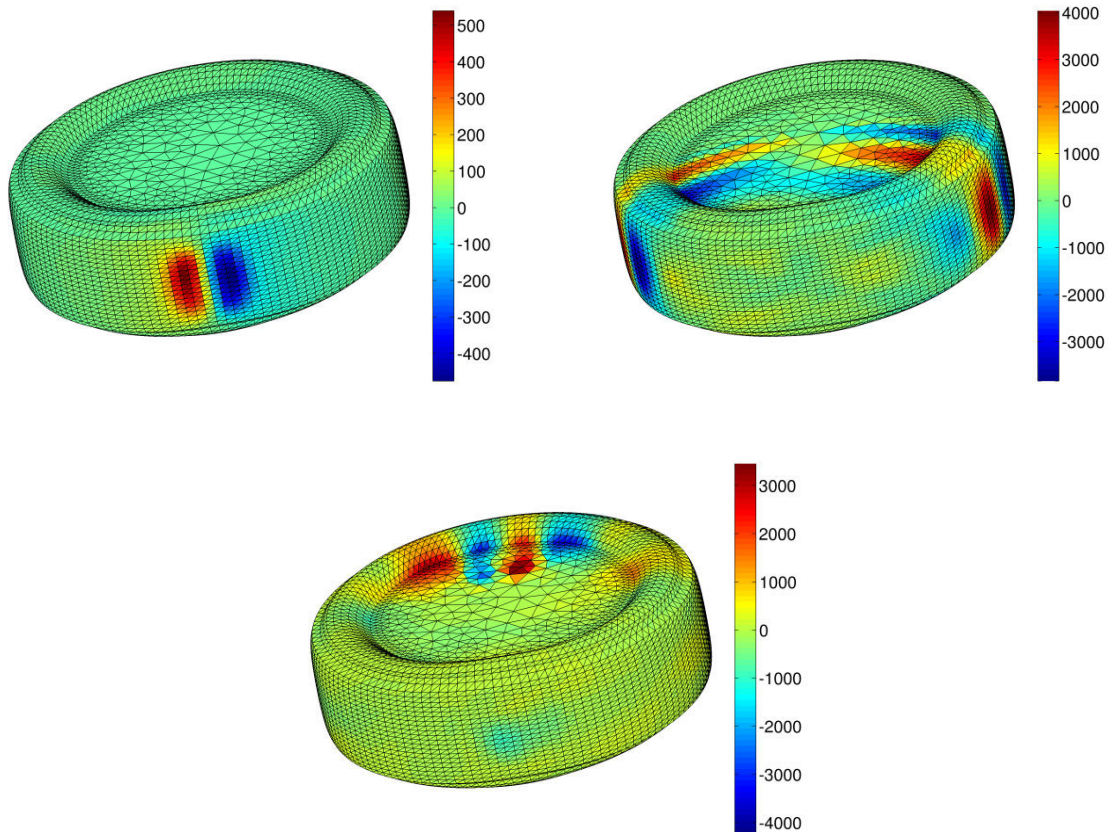
### Der vibrierende PKW- Reifen

Ein gleichmäßig rollender Reifen erfährt zyklische Deformationen. Um die Vibrationen, das heißt die rechte

Seite in (1.2), zu beschreiben, benutzen wir die Partikelgeschwindigkeit (Schnellen)  $\frac{\partial u_n}{\partial t}$  (von Prof. Kropp, Chalmers Univ. zur Verfügung gestellt). Diese Schnellen sind als Fourierkoeffizienten durch drei komplexe Werte (Amplitude, Phasenverschiebung der Kosinus-Funktion in drei Raumdimensionen) für 513 äquidistante Frequenzpunkte zwischen 0 Hz und 1809.4 Hz in jedem der 6027 Knoten der benutzten Triangulierung gegeben. Gerechnet wurde ein PKW-Glatt-Reifen (205/55R16) Bild 3.3-71 auf einer Straße mit einer ISO 10844 Oberfläche (Achslast 3415 N, Geschwindigkeit 50 km/h). Bild 3.3-72 zeigt die Dichte von (1.4) für  $\Delta t = 2.9 \cdot 10^{-5} s$  zu verschiedenen Zeitschritten. Zusätzlich zu der Singularität in der Kuppe, wo der Reifen die Fahrbahn trifft (siehe Horn-Effekt) beobachten wir eine Welle mit großer Amplitude, die um den Reifen läuft. Dieser Effekt motiviert unser Studium von a posteriori Fehlerabschätzungen und adaptiven Diskretisierungen für die Lösung von Randintegralgleichungen im Zeitbereich [2].



**Bild 3.3-71:** Diskretisierung des 205/55R16 PKW Reifens, benutzt für Berechnung von Reifenvibration, Horneffekt



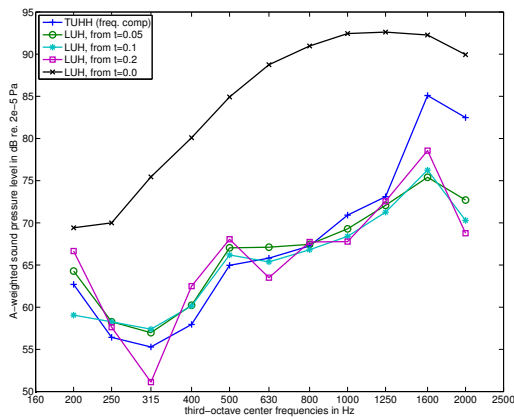
**Bild 3.3-72:** Visualisierung der Dichte des vibrierenden Reifens für Zeitschrittlänge 0.01, und Zeitschritte: 3, 50, 100 [2].

Der sogenannte **A-weighted Schalldruckpegel** liefert eine Näherung für die menschliche Wahrnehmung des Geräuschs. Bild 3.3-73 zeigt den Schalldruckpegel für die Schallabstrahlung des obigen Reifens gemittelt über 321 Punkte auf der Halbkugel mit Radius 1 m oberhalb der Straße. Dazu wurde mit der genähernten Dichte (Lösung von (1.4)) der zeitabhängige Schalldruck  $p(t, x)$  mit (1.1) bestimmt und dann mit diskreter schneller Fouriertransformation (FFT) in den Frequenzbereich überführt. Schließlich wurde das Resultat zur Berechnung des A-weighted Schalldruckpegels benutzt. Im Bereich zwischen 200 Hz und 2000 Hz besteht qualitativ gute Übereinstimmung mit der Kurve TUHH, gewonnen mit BEM Rechnungen im Frequenzbereich an der TUHH.

Die hornförmige Geometrie zwischen Reifen und Straße ist der Grund für die Verstärkung einer Quelle nahe dem Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn. Wir modellieren diesen **Horn-Effekt** mit einem Dirac-Impuls, wodurch das gesamte Frequenzspektrum abgedeckt wird. Wir vernachlässigen die Reifenschwingung  $-\rho\ddot{u}_N$  in (1.2) und setzen dort

$$\frac{\partial p^l}{\partial n}(t, x) = \frac{\partial \delta}{\partial n_x} \left( \frac{t - s - \frac{|x - y_{scr}|}{c}}{2\pi |x - y_{scr}|} \right)$$





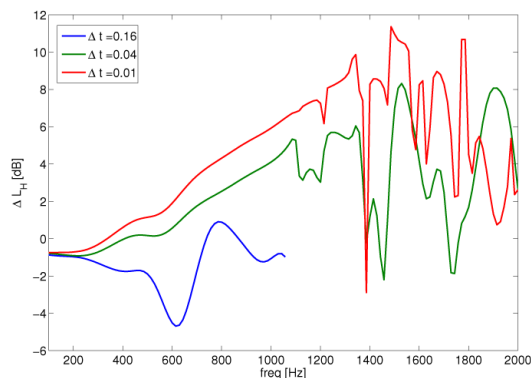
**Bild 3.3-73:** Vergleich des Schalldruckpegels des PKW Reifens gemittelt über 321 Punkte und Frequenzbändern für die TDBEM und den Frequenzbereich BEM [2].

mit  $y_{src} = (0.8 \text{ m}, 0, 0)$ . Mit der so modifizierten rechten Seite im MOT Schema (1.6) wird die Dichte gerechnet und der zeitabhängige Schalldruck über das Einfachschichtpotential im Empfängerpunkt  $x_{fp} = (1 \text{ m}, 0, 0)$  ausgewertet. Damit ergibt sich die frequenzabhängige Verstärkung im Empfängerpunkt zu

$$\Delta L_H(\omega) = 20 \log_{10} \left( \frac{|\hat{p}_1(x_{fp}, \omega)|}{|\hat{p}_2(x_{fp}, \omega)|} \right).$$

Dabei ist  $\hat{p}_2$  der Fourier transformierte Schalldruck des Dirac-Impulses, und  $\hat{p}_1$  die Fouriertransformation des Schalldrucks des Dirac-Impulses zusammen mit dem Schalldruck des Reifens. Bild 3.3-74 zeigt die berechnete Verstärkung für Frequenzen zwischen 200 Hz und 2000 Hz. Die gesamte simulierte Zeitspanne beträgt  $T=0.07\text{s}$  mit Zeitschrittweiten  $\Delta\tau = 4.66 \cdot 10^{-4} \text{ s}, 1.17 \cdot 10^{-4} \text{ s}, 2.92 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ , mit  $\Delta\tau = \frac{\Delta t}{c}$ . Bild 3.3-74 zeigt, dass eine maximale Zeitschrittweite nicht überschritten werden darf, da die

Ergebnisse durch den numerischen Approximationsfehler (siehe Kurve für  $\Delta\tau = 4.66 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ ) dominiert werden. Dies wird auch aus den Rechnungen zum LKW-Reifen deutlich. Für kleinere Schrittweiten konvergiert das Verfahren zu der exakten Schallabstrahlung und die Kurven im Frequenzbereich nähern sich einander an [2].

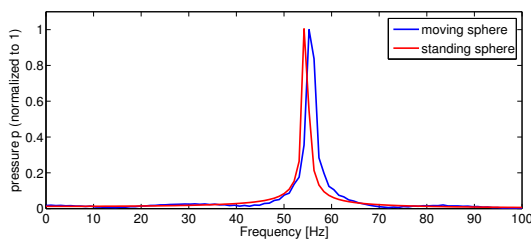


**Bild 3.3-74:** Verstärkung durch Horneffekt, 205/55R16 Glattreifen 1 mm über Grund

Um den **Doppler-Effekt** zu simulieren, wurde eine akustische Punktquelle auf der Einheitskugel, die sich mit konstanter Geschwindigkeit  $\vec{v} = (v, 0, 0)$ ,  $v = 6.86 \text{ m/s}$  horizontal (entlang der  $x_1$ -Achse) bewegt. Die Kugel strahlt mit  $f_s = (2\pi)^{-1} 343 \text{ Hz} \approx 54.59 \text{ Hz}$  bei Schallgeschwindigkeit  $c = 343 \text{ m/s}$ . Dank der The-

orie des Doppler-Effektes erwarten wir eine Frequenz von  $f_R = \nu(c - \nu)^{-1} f_s + f_s \approx 55.70 \text{ Hz}$  im Punkt  $x_R = (13 \text{ m}, 0, 0)$  erweitert werden, wenn die Winkeländerung zwischen Empfänger und Sender bei Annäherung der Kugel an den Empfänger vernachlässigt wird. Für die Berechnung wählen wir 320 gleichseitige Dreiecke zur Diskretisierung der Kugeloberfläche, Zeitschritt  $\Delta t = 4.37 \cdot 10^{-4} \text{ s}$  und 2194 Zeitschritte. Bild 3.3-75 zeigt den diskret Fourier transformierten Schalldruck  $\hat{p}(f, x_R)$  (normalisiert auf 1) in  $x_R$  für Frequenzen bis 100 Hz und vergleicht das Signal mit der diskreten Fouriertransformation einer Sinus-Welle  $\sin(2\pi f_s t_j)$  in denselben Zeitknoten  $t_j = (t-1)\Delta t$ . Die erwartete Frequenzverschiebung von 2% ist klar sichtbar im numerischen Experiment.

Als eine Variation des **bewegten Reifens** wird das folgende idealisierte Modell eines rollenden Reifens betrachtet: Zusätzlich zur Vorwärtsgeschwindigkeit  $v$  entlang  $x_1$  rotiert er um seinen Mittelpunkt mit einer Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  um die  $x_2$ -Achse durch  $x_3 = R + h$ , wobei  $\omega = v/R$ ,  $R$  der Radius des Reifens. Um die Schallabstrahlung eines rollenden Reifens realistischer zu modellieren, wird eine stationäre Druckverteilung  $f = f(t, x_1, x_2, x_3)$  auf die bewegte Oberfläche transformiert.



**Bild 3.3-75:** Dopplereffekt: Fourier transformierter Schalldruck vs. Sinussignal als Funktion der Frequenz im Punkt (13,0,0) [2].

Die Kraft  $f$  wirkt dann am Ort:

$$\begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ R+h \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & 0 & -\sin(\omega t) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\omega t) & 0 & \cos(\omega t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 - \omega R t \\ x_2 \\ x_3 - R - h \end{pmatrix}$$

Auflösen nach  $(x_1, x_2, x_3)$  ergibt:

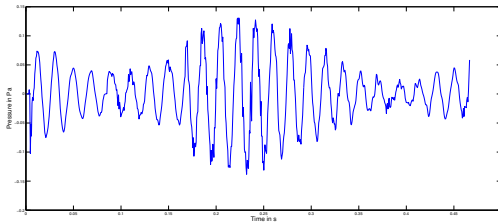
$$\begin{pmatrix} x_1 - \omega R t \\ x_2 \\ x_3 - R - h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & 0 & \sin(\omega t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\omega t) & 0 & \cos(\omega t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 - R - h \end{pmatrix}$$

Damit erhalten wir als Dirichlet-Randbedingung auf dem **rollenden Reifen**:

$$f_{roll}(t, \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3) = f(t, \cos(\omega t)\tilde{x}_1 + \sin(\omega t)(\tilde{x}_3 - h) + \omega R t, x_2, h - \sin(\omega t)\tilde{x}_1 + \cos(\omega t)(\tilde{x}_3 - h))$$

Um den Schalldruck außerhalb des Reifens zu erhalten, der die Lösung  $U(\tilde{t}, \tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3)$  der Wellengleichung ist, wird die Randintegralgleichung (1.2) gelöst und wieder ein Einfachschichtpotential-Ansatz (1.1) auf der Oberfläche des Reifens benutzt.

Bild 3.3-76 zeigt die numerischen Ergebnisse für eine rollende Einheitskugel. Dazu wurde eine Monopol-Schallquelle an der Vorderseite der Kugel genommen, die sich mit konstanter Geschwindigkeit  $v = 24.6 \text{ km/h}$  bewegt. Der Schalldruck ist ausgewertet im Punkt  $(2 \text{ m}, 0, 0)$  und die Kugel rollt über diesen Punkt zum Zeitpunkt 0.25 Sekunden. Es konnte ein hochfrequenter numerischer Nebeneffekt, sogenannte Wiggles, die dem tatsächlichen Schalldruck überlagert sind, beobachtet werden.



**Bild 3.3-76:** Rollende Kugel: Schalldruck (in Pa) in (1,0,0) für 343 Hz

### Rollender Reifen

Bei der Untersuchung sich bewegendem Reifen, beziehungsweise der Wirkung ihrer Oberflächen auf das Schallfeld, ist eine Berechnung im Zeitbereich unumgänglich. Wir beschränken uns auf geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit des Reifens. Das Schallfeld im Außenraum kann ebenfalls berechnet und mit den Messungen von Vorbeifahrtexperimenten verglichen werden.

Das Thema dieses Abschnitts ist die Entwicklung einer transienten 3D Randelementmethode für den rollenden Reifen auf der Straße.

Eine bewegte Punktquelle im Punkt  $y + \vec{v}t$  erzeugt Schall gemäß einer zeitabhängigen Intensitätsfunktion  $Q(t)$ .

Unter Anwendung einer Lorentz-Transformation lässt sich die Fundamentallösung für die Wellengleichung im mitbewegten Koordinatensystem schreiben als:

$$G(x, t; y, \tau) = \frac{\delta(t - \tau - \frac{R}{c})}{4\pi R[1 - M_R]},$$

wobei  $M_R = \frac{MR}{R}$  und der Machvektor  $M = \frac{\vec{v}}{c}$  sind. An einer ebenen Oberfläche wird der Schall je nach Beschaffenheit der Oberfläche reflektiert.

Der einfachste Fall ist wieder die symmetrische Reflektion für schallharte Oberflächen (keine Absorption). Die Fundamentallösung ergibt sich in diesem Fall aus der Addition zweier Vollraum-Fundamentallösungen:

$$G(x, t; y, \tau) = \frac{\delta(t - \tau - \frac{R}{c})}{4\pi R[1 - M_R]} + \frac{\delta(t - \tau - \frac{R'}{c})}{4\pi R'[1 - M_{R'}]}$$

Die theoretischen Ergebnisse dieser Arbeiten zu Konvergenz und adaptiven Methoden [15] [14] übertragen sich auf diesen Fall. Man erhält wieder die Integralgleichung (1.2) und ihre diskrete Variante (1.4), wobei hier der adjungierte Doppelschichtoperator im Zeitbereich im bewegten Koordinatensystem gegeben ist durch:

$$\begin{aligned} K'\varphi(t, \mathbf{x}) = & \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \frac{n_x \cdot \vec{R}}{R[1 - M_R]} \dot{\varphi}(t - \frac{\vec{R}}{c}, y) ds_y + \frac{n_x \cdot \vec{R} + R n_x \cdot M}{R[1 - M_R]^2} \varphi(t - \frac{\vec{R}}{c}, y) ds_y \\ & + \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma} \frac{n_x \cdot \vec{R}'}{R'[1 - M_{R'}]} \dot{\varphi}(t - \frac{\vec{R}'}{c}, y') ds_{y'} + \frac{n_x \cdot \vec{R}' + R' n_x \cdot M}{R'[1 - M_{R'}]^2} \varphi(t - \frac{\vec{R}'}{c}, y') ds_{y'}. \end{aligned}$$

Zur Validierung dieser Rechnungen benutzt man die im Folgenden hergeleitete exakte Lösung der

Wellengleichung im Halbraum, die zu einer mit der Geschwindigkeit  $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ 0 \end{pmatrix}$  bewegten Kugel mit Dirichlet

Randbedingungen gehört.

Es wird angenommen, dass sich die Kugel in Richtung der x-Achse rollt ( $v_y = 0$ ) und sich in  $z = h$  um die y-Achse dreht. Mit der Lorentz-Transformation:

$$\begin{pmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(t - \frac{v}{c^2}x) \\ \gamma(x - vt) \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

transformiert man für die Lösung  $U(t, x, y, z)$  der Wellengleichung in eine Lösung  $U(t', x', y', z')$  im bewegten Koordinatensystem.

Die neue Lösung der Wellengleichung lautet:

$$U(t', x', y', z') = \frac{r - \gamma(t - \frac{v}{c^2}x)}{2r} u_0(r - \gamma(t - \frac{v}{c^2}x)) + \frac{r' - \gamma(t - \frac{v}{c^2}x)}{2r'} u_0(r' - \gamma(t - \frac{v}{c^2}x))$$

mit

$$r = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z' - 1 - h)^2} = \sqrt{\gamma^2(x - vt)^2 + y^2 + (z - 1 - h)^2}$$

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2 + (z' + 1 + h)^2} = \sqrt{\gamma^2(x - vt)^2 + y^2 + (z + 1 + h)^2}$$

Die Lösung  $U(t, x, y, z)$  beschreibt die Schallabstrahlung einer Einheitskugel, die sich mit Geschwindigkeit  $v_x$  in x-Richtung auf einer schallharten Straße bewegt.

Für einen Betrachter, der unter dem Reifen auf der Straße sitzt, sieht die Lösung so aus:

$$U(\tilde{t}, \tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) = \frac{\tilde{r} - \frac{\tilde{t}}{\gamma} + (\gamma - \frac{1}{\gamma})\tilde{x}}{2\tilde{r}} U_0(\tilde{r} - \frac{\tilde{t}}{\gamma} + (\gamma - \frac{1}{\gamma})\tilde{x}) + \frac{\tilde{r}' - \frac{\tilde{t}}{\gamma} + (\gamma - \frac{1}{\gamma})\tilde{x}}{2\tilde{r}'} U_0(\tilde{r}' - \frac{\tilde{t}}{\gamma} + (\gamma - \frac{1}{\gamma})\tilde{x})$$

Hier sind  $c = 1$ ,

$$\tilde{r} = \sqrt{\gamma^2 \tilde{x}^2 + y^2 + (z - 1 - h)^2}, \quad \tilde{r}' = \sqrt{\gamma^2 \tilde{x}^2 + y^2 + (z + 1 + h)^2}, \quad \tilde{x} = x - v_x t$$

Diese Lösung der bewegten Wellengleichung im Halbraum wurde zur Verifizierung unserer numerischen Ergebnisse verwendet.

### Der vibrierende LKW Reifen

Das neuentwickelte Programm ermöglicht die numerische Simulation von LKW-Reifen-Rollgeräuschen (über einen breiten Frequenzbereich). Die Oberfläche des LKW Reifens 315/80R22.5 ist diskretisiert durch 26064 Dreieckselemente [2] (Bild 3.3-77). Die Geschwindigkeit ist 60 km/h auf einer SMA 0/8 Straßenoberfläche. Wie bei der Untersuchung des PKW Reifens schwebt auch der LKW Reifen 1 mm über der Straße. Bild 3.3-78 zeigt den A-gewichteten Schalldruckpegel über den untersuchten Terzbändern, berechnet mit diskret Fourier transformierten Mittelwerten des Schalldrucks  $\varphi$  aus (1.4) mit  $\Delta t = 7.29 \cdot 10^{-4} s$ . Die unterschiedlichen Kurven wurden erhalten für verschiedene Bereiche  $t \geq t_0$  mit  $t_0 = 0s, 2.92 \cdot 10^{-6} s, 1.16 \cdot 10^{-6} s, 2.92 \cdot 10^{-5} s, 5.83 \cdot 10^{-5} s, 8.75 \cdot 10^{-5} s, 1.17 \cdot 10^{-4} s$ . Im Bild sind die Zeitschrittweiten in Einheiten mit  $c = 1$  angegeben. Alle Kurven zeigen für den Bereich 200 - 1000 Hz qualitativ ähnliches Verhalten. Für höhere Frequenzen ist eine kleinere Zeitschrittweite wie beim PKW Reifen nötig, da für die obige Zeitschrittweite dann zu wenige Zeitpunkte pro Schwingung verwandt werden. Der Vergleich mit Bild 3.3-67 im Bericht der TUHH zeigt, dass die mit der TDBEM gewonnenen Lösungen qualitativ gleiche Vorhersagen liefern wie die Lösungen der Frequenzbereich-BEM, zumindest im von unseren Experimenten erfassten Bereich bis 900 Hz. Für höhere Frequenzen zeigt Bild 3.3-79, wie der zuverlässig berechnete Frequenzbereich sich bei Halbierung der Zeitschrittweite verdoppelt. Weitere numerische Studien mit kleineren Zeitschrittweiten finden derzeit statt, verzögert von einem unvorhersehbaren Wartungszeitraum des verwendeten Rechenclusters.

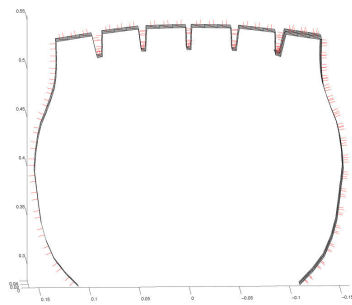
Die Rechnungen wurden durchgeführt auf dem Intel Xeon Hochleistungsserver des Instituts für Angewandte Mathematik der Leibniz Universität Hannover (X5675 Hexacore CPU's (3,06 GHz)). Ohne weitere Optimierung des Programms benötigt die Randelementmethode zur Berechnung der Dichte für den LKW-Reifen etwa 2 Tage, das Postprocessing für den Schalldruck 4h. Mit Verwendung der implementierten adaptiven Methoden auch in diesen großen Rechnungen sowie, in der Zukunft, schnellen Multipolmethoden zur Berechnung der Matrixeinträge erwarten wir eine Reduktion der Rechenzeiten um eine Größenordnung, wie etwa in [33].

### Die hypersinguläre Integralgleichung - eine Alternative für die Reifenberechnung auf schallharter Fahrbahn

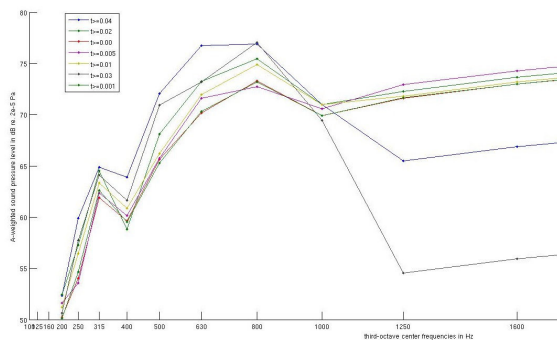
Wird ein Doppelschichtpotentialansatz für den Schalldruck angenommen, führt die Neumann-Randbedingung (Schall hart) auf dem Reifen  $\Gamma$  auf eine Integralgleichung 1. Art mit dem hypersingulären Operator  $W$  für die unbekannte Dichte  $\psi(t, \mathbf{x})$  auf  $\Gamma$ :

$$\int_0^\infty \int_\Gamma W \psi(\mathbf{x}, t) \eta(\mathbf{x}, t) ds_x dt = \int_0^\infty \int_\Gamma \int_\Gamma \left\{ \frac{-n_x \cdot n_y}{|x-y|} \psi\left(t - \frac{|x-y|}{c}, y\right) \dot{\eta}(t, \mathbf{x}) ds_x ds_y dt \right\} + \int_0^\infty \int_\Gamma \int_\Gamma \frac{1}{4\pi |x-y|} \text{curl}_{\Gamma_y} \psi\left(t - \frac{|x-y|}{c}, y\right) \text{curl}_{\Gamma_x} \eta(t, \mathbf{x}) ds_x ds_y dt \quad (0.8)$$

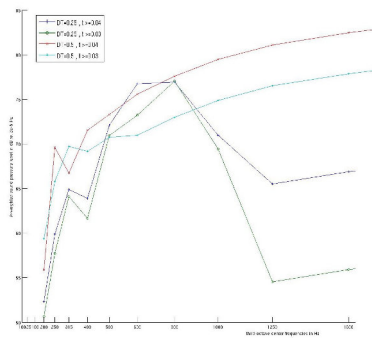
mit dem tangentiellen Oberflächen-curl-Operator  $\text{curl}_{\Gamma}$  sowie Zusatztermen mit  $y'$  statt  $y$ .



**Bild 3.3-77:** Querschnitt des LKW Reifens mit Verteilung der Normalenvektoren



**Bild 3.3-78:** Schalldruckpegel des LKW Reifens gemittelt über 321 Punkte auf einer Halbkugel vom Radius 2 m um (0,0,0) und gemittelt über Frequenzbänder für die TDBEM mit Zeitschrittweite  $7.29 \cdot 10^{-4}$  s [2].



**Bild 3.3-79:** Vergleich der Schalldruckpegel für Schrittweiten  $1.46 \cdot 10^{-3}$  s und  $7.29 \cdot 10^{-4}$  s.

Analog zu Abschnitt 1.2 kann (1.8) durch das Raum-Zeit-Galerkin-Verfahren gelöst werden, wobei die BEM Diskretisierung wieder auf ein MOT-Schema führt. In [14] wurde auch für die Lösung der hypersingulären Integralgleichung 1. Art (1.8) a posteriori Fehlerabschätzungen und adaptive Gitterverfeinerungsalgorithmen gewonnen.

Mit dem Einfachschichtpotential  $V$  in (1.7) dem Operator  $K'$  in (1.3), seinem adjungierten Operator  $K$  und dem hypersingulären Operator  $W$  in (1.8) wurden alle für eine symmetrische FEM-BEM Kopplung im Zeitbereich nötigen Integraloperatoren implementiert und analysiert. Man kann nun allgemeine akustische Randbedingungen auf dem Reifen [15], [14], [17] sowie nicht-lineare Probleme (Reifenverformung bei Fahrbahnkontakt) und zugehörige Schallabstrahlung adaptiv voll zeitabhängig rechnen.

### 3.3.4.5 Zusammenfassung und Ausblick

Die entwickelte zeitabhängige Randelementmethode bietet eine performante Möglichkeit, die Geräuschabstrahlung von Reifen im Zeitbereich zu berechnen. Das Modell wurde hinsichtlich der Genauigkeit optimiert und sowohl für ruhende und bewegte PKW Reifen als auch für LKW Reifen validiert. Adaptive Algorithmen wurden für Fehler kontrollierte Verfahren zur effizienten numerischen Simulation mit lokaler Gitterverfeinerung gewonnen. Dies ermöglicht eine Verkürzung der Rechenzeiten, welche ebenso durch Parallelisierung des Codes erreicht wurde. Die Simulation im Zeitbereich eröffnet ein breites Anwendungsspektrum jenseits der mit Frequenzbereichsmethoden behandelbaren Ingenieursproblemen. Insbesondere bietet sich die Möglichkeit zur quantitativen Simulation nichtlinearer dynamischer Prozesse und transientser Phänomene. Zukünftige Forschungsvorhaben umfassen die Modellierung der Brems- und Beschleunigungsvorgänge des Stadtverkehrs, die dynamische Verformung des rollenden Reifens und den Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn in einem gekoppelten Finite Elemente/Randelemente-Verfahren. Der effiziente und hochpräzise entwickelte Code stellt alle für diese Kopplungsprozesse benötigten Bausteine zur Verfügung, ein hochaktives Feld internationalen Interesses.

Darüber hinaus bieten die hier präsentierten Arbeiten eine Basis, auch höherfrequente Schallemission quantitativ zu studieren. Die Herausforderung ist es, die numerische Pollution mit hp-adaptiven oder an die Physik angepassten Ansatzfunktionen zu beheben.

## Literatur

- [1] Annual EC greenhouse gas inventory 1990 - 2006 and inventory report 2008. Report No 6/2008, EC, EPA, 2008.
- [2] BANZ, L. GIMPERLEIN, H. NEZHI, Z., STEPHAN E. P. Time domain BEM for sound radiation of tyres, (2014) to appear
- [3] BIERMANN, J.: Effiziente Simulation von Reifen-Rollgeräuschen, Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut Modellierung und Berechnung, 2013.
- [4] BIERMANN, J., ESTORFF, O., PETERSEN, S. und SCHMIDT, S.: „A computational model to investigate the sound radiation from rolling tires,“ Tire Sci and Technol., Volume 35, Issue 3, 2007.

- [5] BRANDAO, M.: „Improper integrals in theoretical aerodynamics - The problem revisited“ *AIAA Journal* 25(9), 1258-1260, 1987.
- [6] BRICK, H.: *Application of the Boundary Element Method to combustion noise and half-space problems*, 2009.
- [7] BRUNNER, D.: „Fast Boundary Element Methods for Large-Scale Simulations of the Vibro-Acoustic Behavior of Ship-Like Structures, Universität Stuttgart, 2009.
- [8] CHENG, H.: „A wideband fast multipole method for the Helmholtz equation in three dimensions“ *Journal of Computational Physics*, 2006.
- [9] DREYER, D. und ESTORFF, O.: „Improved conditioning of infinite elements for exterior acoustics,“ *Int. J. Numer. Methods Eng.* 58, 2003.
- [10] DREYER, D., PETERSEN, S. und ESTORFF, O.: „Effectiveness and robustness of improved infinite elements for exterior acoustics“ *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 195, 2006.
- [11] Final Report SI2.408210 Tyre/Road Noise - Vol. 1. FEHRL, 2006
- [12] FRAGGSTEDT, M.: *Vibrations, damping and power dissipation in car tyres*. Dissertation, Royal Inst. of Sciences, Stockholm, 2008.
- [13] GENT, A. und WALTER, J. (Hrsg.): *The pneumatic tire*. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration (2006)
- [14] GIMPERLEIN, H. NEZHI, Z., STEPHAN E. P. A residual a posteriori error estimate for the time-domain boundary element method, in preparation
- [15] GIMPERLEIN, H. NEZHI, Z., STEPHAN E. P. A priori error estimates for a time-dependent boundary element method for the acoustic wave equation in half-space, *Math. Meth. Appl. Sci.* (2014) to appear
- [16] Global optimization toolbox, <http://www.mathworks.se/products/global-optimization/index.html>, besucht 10. August 2014.
- [17] HA-DUONG, T. On retarded potential boundary integral equations and their discretizations, *Topics in computational wave propagation*, pp. 301-336, *Lect. Notes Comput. Sci. Eng.*, 31, Springer, Berlin (2003).
- [18] HOEVER, C.: *The influence of modelling parameters on the simulation of car tyre rolling losses and rolling noise*, *Lizenziatsabhandlung*, Chalmers University of Technology, 2012.
- [19] KEUCHEL, H., BIERMANN, J., GEHLKEN, M. und von ESTORFF, O.: „Krylov-Unterraumverfahren mit Subspace Recycling zur Beschleunigung der Fast-Multipole-Boundary-Elemente-Methode,“ in *40. Jahrestagung für Akustik - DAGA 2014*, Oldenburg.
- [20] KEUCHEL, S., BIERMANN, J., GEHLKEN, M. und von ESTORFF, O.: „Speed Up of 3D-Acoustics in frequency domain by the Fast Multipole Boundary Element Method in combination with Krylov Subspace Recycling based iterative solvers,“ in *39. Jahrestagung für Akustik - DAGA 2013*, Meran, 2013
- [21] KEUCHEL, S., GEHLKEN, M. und von ESTORFF, O.: „Analyse zweier Halbraum-Formulierungen zur Lösung der Helmholtz-Gleichung mittels Fast-Multipole-Boundary-Elemente-Methode,“ in *38. Jahrestagung für Akustik – DAGA 2012*, Darmstadt, 2012.
- [22] KEUCHEL, S., GEHLKEN, M. und von ESTORFF, O.: „Halfspace formulations for the Boundary Element Method in 3D-Acoustics using the Fast Multipole Method“ in *The 19th International Congress on Sound and Vibration - ICSV2012*, Vilnius, 2012.
- [23] KROPP, W. et al. On the sound radiation of a rolling tyre. *Journal of Sound and Vibration*, Nr. 331, 2012.
- [24] LIU, Y, SHEN, L. und BAPAT, M.: „Adaptive fast multipole boundary element method for three-dimensional half-space acoustic wave problems“ *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2009.
- [25] MAISCHAK, M., OSTERMANN, E., STEPHAN, E.P. TD-BEM for sound radiation in 3 dimensions and the numerical evaluation of retarded potentials, *International Conference on Acoustics, NAG/DGA*. (2009).

- [26] NEZHI, Z. Adaptive time- domain boundary element method for sound radiation of tyres, Ph.D. thesis, Leibniz University Hannover, (2014)
- [27] NISHIMURA, N.: „Fast multipole accelerated boundary integral equation methods“ Journal of Applied Mechanics, 2002.
- [28] OCHMANN, M. Closed form solutions for the acoustical impulse response over a masslike or an absorbing plane. J. Acoust. Soc. Am. 129(6), 3502-3512 (2011).
- [29] OSTERMANN, E. Numerical methods for space-time variational formulations of retarded potential boundary integral equations, Ph.D. thesis, Leibniz University Hannover, 2009.
- [30] SABINIARZ, P.: Modelling the vibrations on a rolling tyre and their relation to exterior and interior noise. Dissertation, Chalmers Univ. of Techn., Göteborg, 2011.
- [31] STEPHAN, E.P., MAISCHAK, M., OSTERMANN, E., Transient boundary element method and numerical evaluation of retarded potentials, Computational Science-ICCS (2008) 321-330.
- [32] WULLENS, F.: Excitation of tyre vibrations due to tyre/road interaction. Dissertation, Chalmers Univ. of Techn., Göteborg, 2004.
- [33] Yilmaz, A.E., Jin, J.M., Michielssen, E.: Time domain adaptive integral method for surface integral equations, IEEE Trans. Antennas Propagation 52 (2004) 2692-2708.

Der Schlussbericht zum vorliegenden Teilvorhaben II (Förderkennzeichen 19U10016 C, 19U10016 E und 19U10016 F) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.



## 4 Arbeitspaket Reifen und Fahrzeug

### 4.1 Einleitung

Das Arbeitspaket Reifen und Fahrzeug umfasst drei Teilvorhaben, die sich mit der technologischen Entwicklung neuer Konzepte für Maßnahmen zur Lärmreduzierung in den Bereichen Reifen- und Fahrzeugtechnik befassen.

Der moderne Lkw-Reifen unterliegt vielen unterschiedlichen Anforderungen, die zum Einen aus dem Einsatzzweck des Fahrzeuges (z.B. Fern- oder Regionalverkehr und Wintereinsatz) und zum Anderen aus der Position des Reifens am Fahrzeug (Lenk-, Antriebs- oder Nachlaufachse) resultieren. Daher ist es schon lange unumgänglich, an den verschiedenen Achsen speziell auf die dort vorliegenden Belastungen abgestimmte Reifen einzusetzen. Nachdem im *Leisen Straßenverkehr 2* ein akustisch optimierter *long-distance* Lkw-Reifen für die Antriebsachse entwickelt wurde, steht im Projekt *Leiser Straßenverkehr 3* die Optimierung eines Lkw-Reifens für den Regionalverkehr im Fokus.

Anders als im Fernverkehr, wo Lkw auf eine Geschwindigkeit beschleunigen und diese über lange Zeiten beibehalten, treten im Regionalverkehr häufige Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge sowie Kurvenfahrten auf. Um die nötige Traktion an den Antriebsachsen von Lkw im Regionalverkehr zu gewährleisten, ist es erforderlich, Profile mit einem hohen Anteil an Querrillen zu verwenden. Daher kommen Reifen mit Blockprofilen zum Einsatz. Durch diese Profilart werden die Reifen jedoch auch auf glatten Fahrbahnen zu Schwingungen angeregt, was eine erhöhte Geräuschemission zur Folge hat. Die Schallemission von Nutzfahrzeugreifen gewinnt mit wachsendem Verkehrskehrsaufkommen zunehmend an Bedeutung. Aus diesem Grund war akustische Optimierung von Reifen ein wichtiger Forschungsschwerpunkt. Er stellte eine besondere Herausforderung dar, da die akustische Auslegung von Reifen seit jeher im Zielkonflikt mit anderen Qualitätsmerkmalen wie beispielsweise dem Rollwiderstand und dem Abrieb steht.

Im Teilvorhaben III hatte die Firma Continental Reifen Deutschland GmbH zusammen mit den Partnern die Aufgabe, neue technologische Ansätze zur Reduzierung der Rollgeräusche von blockprofilierten Antriebsreifen für den Regionalverkehr zu entwickeln.

Für die Optimierung des Rollgeräusches kommen grundsätzlich drei Einflussfaktoren in Frage: Laufstreifenmischung, Konstruktion und Profilgestaltung. Das Verbesserungspotential im Bereich Laufstreifenmischung und Konstruktion wird jedoch als gering eingestuft, da andere wichtige Eigenschaften wie Abrieb, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit negativ beeinflusst werden. Aus diesem Grund konzentrierten sich die Optimierungsarbeiten auf die geräuschverbessernde Profilgestaltung. Im Einzelnen können u.a. der Einlaufwinkel, die Kantengestaltung und die Klotzgröße akustisch optimiert werden.

Ein weiterer Aspekt, der beim Straßenverkehrslärm berücksichtigt werden muss, ist der Einsatz von Elektrofahrzeugen. Die Bundesregierung möchte die Anzahl der Elektrofahrzeuge auf 1 Million im Jahr 2020 steigern. Dieses birgt große Chancen sowohl für den Klimaschutz als auch für die Reduzierung des Straßenverkehrslärms vor allem in Ballungsräumen.

Elektrofahrzeuge sind vom Antrieb her deutlich leiser als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor. Bei konventionellen Fahrzeugen ist unter typischen Betriebsbedingungen das Reifen-Fahrbahn-Geräusch ab etwa 40 km/h dominant. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Geräusch eines Verbrennungsmotors von der gewählten Gangstufe abhängt, da der Motor mit unterschiedlicher Drehzahl läuft und unterschiedliches Drehmoment abliefern. In kleinen Gängen, also bei Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen, ist die Geräuschentwicklung höher. Diese Tatsache führt dazu, dass innerorts, wo ein hoher prozentualer Anteil des Verkehrs bei geringen Geschwindigkeiten unterhalb 50 km/h erfolgt, ein erheblicher Anteil des Verkehrslärms vom Verbrennungsmotor stammt. Bei Elektrofahrzeugen entfällt das typische Geräusch der Verbrennungsmotoren, so dass im innerstädtischen Bereich, wo Anfahr- und Beschleunigungsvorgänge dominieren, eine wesentliche Geräuschquelle wegfällt. Gleichzeitig ist jedoch die Wahrnehmbarkeit dieser Fahrzeuge deutlich reduziert, so dass geräuscharme elektrische Antriebe zu neuen Herausforderungen in der Verkehrssicherheit führen. Um das Unfallrisiko möglichst gering zu halten, wird von der Europäischen Kommission vorgeschlagen, Elektro- und Hybridfahrzeuge je nach Geschwindigkeit und Fahrzeugverhalten akustisch zu betonen. Derartige Soundeffekte widersprechen jedoch dem Grundgedanken der gewünschten Lärminderungen.

Im Teilvorhaben IV „Elektrofahrzeuge und psychoakustischen Charakterisierung“ wurde untersucht, inwieweit mit einer gezielten Geräuschabstrahlung von Reifenprofilen bei Elektrofahrzeugen ein warnendes Signal erzeugt werden kann, ohne für Anwohner als lästig empfunden zu werden. Diese Fragestellung umfasst neben der Entwicklung technischer Methoden auch die Berücksichtigung psychoakustischer Aspekte.

Aus aerodynamischen Gründen haben sich in den letzten Jahren Unterbodenverkleidungen aus faserverstärkten Leichtbau-Sandwichmaterialien am Fahrzeug etabliert. Die Firma Röchling Automotive AG Co.KG hatte im Teilvorhaben V zusammen mit den Projektpartnern die Aufgabe zu prüfen, inwieweit diese Unterbodenverkleidungen aufgrund ihrer Materialeigenschaften und konstruktiven Ausbildungen auch akustisch absorbierend gestaltet werden zu können. Ziel war es, eine absorbierende Unterbodenverkleidung für Fahrzeuge zu entwickeln, die in ihrer Frequenzcharakteristik auf das Reifen-Fahrbahn-Geräuschspektrum abgestimmt ist.

## 4.2 Teilvorhaben III

### Leisere Antriebsreifen für den Regionalverkehr

Dipl.-Ing. Lars Schnieders

Continental Reifen Deutschland GmbH

#### Inhalt

<b>4.2.1</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>148</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Entwicklung neuer Technologien zur Reduzierung des Rollgeräusches von blockprofilierten C3-Reifen</b> .....	<b>148</b>
4.2.2.1	Anforderungen an moderne Lkw-Reifen .....	148
4.2.2.2	Entwicklungskonzept und Arbeitsstruktur im Teilvorhaben IV .....	149
4.2.2.3	Relevante Regularien .....	151
4.2.2.4	Versuchsaufbau: Trommelprüfstand bei Continental Reifen Deutschland GmbH .....	152
<b>4.2.3</b>	<b>Untersuchungsergebnisse</b> .....	<b>154</b>
4.2.3.1	Entstehungsmechanismen des Reifen-/Fahrbahngeräusches .....	155
4.2.3.2	Parameterstudien an Einspurreifen .....	157
4.2.3.3	Mehrspurreifen .....	165
4.2.3.4	Entwicklung von Gesamtprofilen .....	168
<b>4.2.4</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>175</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>176</b>

#### **4.2.1 Zielsetzung**

Da die Fahrzeugreifen einen wesentlichen Beitrag zur Entstehung des Straßenverkehrslärms haben, stellt die Minimierung der Reifen/Fahrbahngeräusche seit langer Zeit einen zentralen Punkt der Entwicklungsarbeit dar. Für PKW-Reifen betrifft dies sowohl die in die Umwelt abgestrahlten Geräusche als auch die in den Innenraum weitergeleiteten Geräusche, die das Komfortempfinden der Passagiere beeinflussen. Für LKW gilt das hauptsächlich für die nach außen abgestrahlten Geräusche. Gerade das Außengeräusch unterliegt wegen seiner die Umwelt belastenden Wirkung gesetzlichen Anforderungen.

Ziel und Motivation für Continental ist, die Lärmemissionen nach Möglichkeit über die vom Gesetzgeber vorgegebenen Grenzwerte hinaus zu verringern. Für dieses Vorhaben bietet die Forschungsplattform „Leiser Verkehr“ eine sehr gute Möglichkeit, insbesondere in Kooperation mit den hier vertretenen Partnern, ein optimales Ergebnis zu erzielen. Gerade das Zusammenspiel der Reifen mit verschiedensten Fahrbahnbelägen sowie die Wechselwirkung Reifen/Fahrbahn sind von großem Interesse und wurden in mehreren Teilvorhaben betrachtet.

Im Rahmen des dritten Verbundprojektes „Leiser Straßenverkehr 3“ wurde bei Continental das Teilvorhaben III mit dem Titel „Entwicklung neuer Technologien zur Reduzierung des Rollgeräusches von blockprofilierten C3-Reifen und Umsetzung in ein marktfähiges Produkt“ durchgeführt. Das Ziel war es, die Mechanismen, die zur Geräuscentstehung im Reifen/Fahrbahnkontakt von LKW-Antriebsachsreifen im Regionaleinsatz führen, tiefergehend zu verstehen und darauf aufbauend einen Prototypen für ein leises Produkt der nächsten Generation zu entwickeln.

Daneben wurden noch verschiedene weitere Teilvorhaben durch Vergleichsmessungen oder die Lieferung von speziellen Versuchsreifen unterstützt. Insbesondere die Teilvorhaben I und II sowie das Teilvorhaben IV sind hier zu nennen.

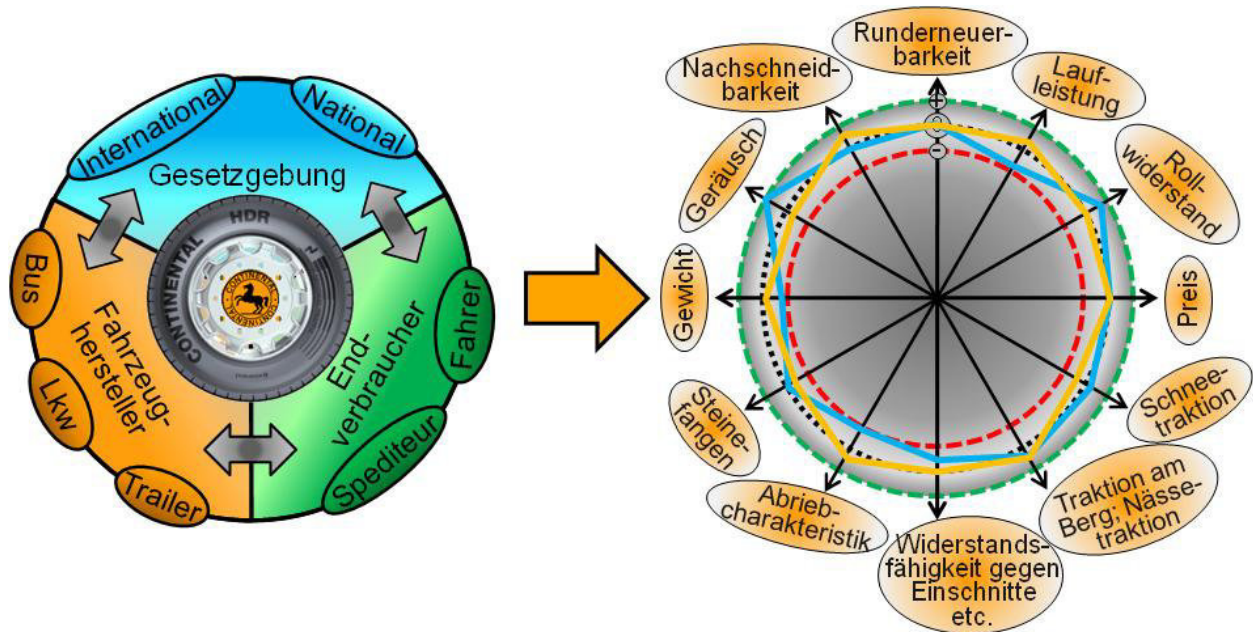
Am Ende des Projektes steht einerseits ein besseres Verständnis und Wissen um die Geräuscentstehung für die zukünftige Reifenentwicklung zur Verfügung. Andererseits konnte ein Prototyp für die nächste Generation von Antriebsachsreifen im Regionaleinsatz entwickelt werden. Dieser wird z.Zt. zur Serienreife weiterentwickelt.

#### **4.2.2 Entwicklung neuer Technologien zur Reduzierung des Rollgeräusches von blockprofilierten C3-Reifen**

##### **4.2.2.1 Anforderungen an moderne Lkw-Reifen**

Zu Beginn eines solchen Vorhabens gilt es, zunächst einmal einen Blick auf die Anforderungen und den aktuellen Stand der Technik zu werfen. Die technischen Anforderungen an Lkw-Reifen sind sehr vielfältig und werden durch verschiedene Interessengruppen eingefordert.

So gibt es Forderungen, die durch den Endverbraucher, d.h. den Flottenbetreiber (Spediteur) und den Fahrer gestellt werden. Dies betrifft insbesondere die Wirtschaftlichkeit von Reifen. Hier spielt nicht nur ein niedriger Einkaufspreis eine Rolle, sondern vielmehr ist ein geringer Rollwiderstand, der einen unmittelbaren Einfluss auf den Treibstoffverbrauch hat, ein zentrales Kriterium. Dazu gesellen sich die Fahrzeughersteller mit weiteren Forderungen sowie die nationalen und internationalen Gesetzgebungen. An dieser Stelle finden sich auch die Forderungen nach einem geringen Rollgeräusch. Die folgende Abbildung (Bild 4.2-1) zeigt beispielhaft, welche Anforderungen an moderne Lkw-Reifen gestellt werden.



**Bild 4.2-1:** Anforderungen an moderne Lkw-Reifen und resultierende Zielkonflikte

Diese Anforderungen bilden die Basis für die technische Auslegung von Reifenkonstruktion und Profilgestaltung. Allerdings treten durch diese Vielfalt an zu erfüllenden Kriterien auch eine große Zahl an möglichen Zielkonflikten auf. In der rechten Hälfte der Darstellung sind exemplarisch zwei mögliche Erfüllungsgrade für die Anforderungen aufgezeigt. Hiermit soll verdeutlicht werden, dass eine Verbesserung in einer Anforderung häufig eine Verschlechterung in einem anderen Bereich nach sich zieht. So steht beispielsweise ein niedriges Abrollgeräusch im Konflikt mit einer guten Abriebcharakteristik. Die eigentliche Kunst in der Reifenentwicklung besteht also weniger in der Erfüllung einer einzelnen Eigenschaft als vielmehr in der optimalen Balance aller Kriterien. Die Lösung der Zielkonflikte ist die große Aufgabe. Dabei spielt auch die vom Markt getriebene Fokussierung auf Rollwiderstand und Laufleistung bzw. Gleichmäßigkeit des Abriebs eine enorme Rolle. Der leiseste Reifen würde nicht helfen, wenn man ihn nicht verkaufen kann.

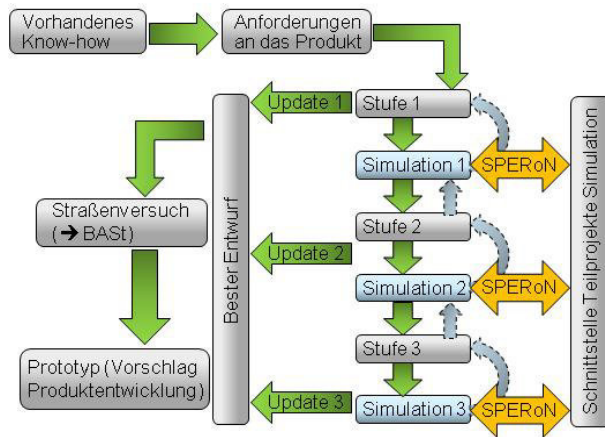
Allerdings rückt die Schallemission von Reifen von Nutzfahrzeugreifen inzwischen weit stärker als bisher in das Blickfeld. Dies liegt an der parallel zum steigenden Verkehrsaufkommen ansteigenden Belästigung durch den immer stärker werdenden Verkehrslärm. Dementsprechend wurden und werden die gesetzlichen Grenzwerte zur Lärmemission von Reifen verschärft. Die entsprechenden Grenzwerte sind mit der aktuellen Regelung bereits so niedrig, dass in der Produktentwicklung diesem Aspekt deutlich mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden muss als in der Vergangenheit. Ein bloßes Feintuning bestehender Produktlinien reicht an dieser Stelle keinesfalls mehr aus. Es gilt, die Entstehungsursachen, deren Auswirkungen und die anschließende Optimierung bzw. Umsetzung in den zukünftigen Produkten besser und tiefergehend zu verstehen als bisher. Daher wurden bereits im Rahmen der Vorgängerprojekte „Leiser Verkehr 1 & 2“ einige Erkenntnisse gewonnen, die im aktuellen Projekt weiter genutzt werden können. Ebenso gab es in den vergangenen Jahren einige Grundsatzarbeiten bei Continental zum Thema Reifen-/Fahrbahngeräusch von Nutzfahrzeugreifen. Die dort gefundenen Ergebnisse gehen ebenfalls in dieses Projekt ein.

#### 4.2.2.2 Entwicklungskonzept und Arbeitsstruktur im Teilvorhaben IV

Für das vorliegende Teilvorhaben wurden zunächst die Hauptziele definiert. Einerseits galt es, für die Entwicklung zukünftiger Produkte technische Ansätze bzw. Gestaltungsrichtlinien zu generieren, die ein verringertes Reifen-/Fahrbahngeräusch bei gleichzeitiger Einhaltung der weiteren Lastenheftforderungen erlauben.

Desweiteren sollte anhand eines Prototyps für eine kommende Reifenlinie die praktische Umsetzbarkeit aufgezeigt werden und dieser Entwicklungsstand dann als Basis für die weitere Entwicklung zur Serienreife dienen.

Die folgende Darstellung (Bild 4.2-2) zeigt schematisch den geplanten Projektaufbau.



**Bild 4.2-2:** Schematischer Projektablauf

Zunächst wird in der ersten Projektphase das vorhandene Know-how im Hinblick auf das Reifen-/Fahrbahngeräusch und den möglichen Zielkonflikten zusammengetragen. Anschließend werden gemeinsam mit der Produktentwicklung die Anforderungen an die zukünftig zu entwickelnden Produkte definiert. Hier werden einerseits die Konkreten Anforderungen im Sinne eines Lastenheftes für die im Rahmen dieses Projektes vorentwickelte Reifenserie festgelegt sowie andererseits die grundsätzlichen Eigenschaften für das gesamte Produktsegment betrachtet, um auch für später zu entwickelnden Reifenlinien die richtigen Voraussetzungen zu schaffen.

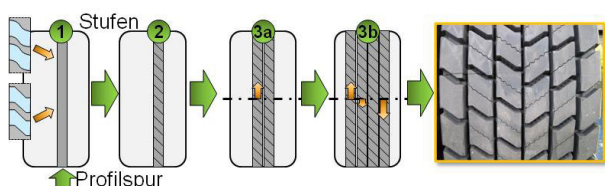
Der eigentliche Prozess für die technische Umsetzung gliedert sich in drei Abschnitte. Zunächst soll in Stufe 1 der grundlegende Mechanismus zur Geräuschentstehung detailliert untersucht werden. Im Fokus steht dabei insbesondere die Profilgestaltung, die durch den Wechsel von Profilblöcken und -rillen zu einer periodischen Anregung von Schwingungen führt.

Die Untersuchungen in diesem Projektstadium finden zunächst mit Einspurreifen am Trommelprüfstand statt. Die Methodik wird im Weiteren noch genauer beschrieben. Die Erkenntnisse bzw. Messergebnisse werden dann in zwei Weisen genutzt. Zum einen wird darauf aufbauend ein erster Gesamtprofilentwurf dargestellt, der als Schnitzreifen auch auf der Straße geprüft wird und hinsichtlich seiner nicht-akustischen Eigenschaften wie beispielsweise Haltbarkeit, Gleichmäßigkeit des Abriebbildes und Abriebrate bewertet wird. Zusätzlich wird die im Pkw-Bereich vorhandene Simulationstechnik dahingehend erweitert, auch die Rollgeräusche von Lkw-Reifen besser bewerten zu können. An dieser Stelle kann auch der Vergleich mit den Ergebnissen aus der im Rahmen der „Leiser Verkehr“-Projekte entwickelten SPERoN-Software stattfinden. Dies bildet auch die Schnittstelle zu den Simulationsprojekten in LeiStra 3.

Während der zweiten Stufe wird dann eine optimierte Blockstruktur in einer Einzelspur entwickelt. Wiederrum soll daraus ein Update für ein Gesamtprofil unter dem Stichwort „Besten Entwurf“ abgeleitet werden. Auch hier werden die Ergebnisse und Messdaten als Eingangsgrößen für die Simulation benutzt. Abschließend wird im dritten Abschnitt das Zusammenspiel mehrerer Profilsuren untersucht. Dabei geht es unter anderem auch um die Wechselwirkungen, die durch die Überlagerung von verschiedenen Schwingungsformen auf dem Reifenumfang entstehen. Die Annahme ist dabei, dass zumindest in der Theorie durch eine geeignete Phasenlage der einzelnen Vibrationen eine Verbesserung durch destruktive Interferenz, d.h. Auslöschung, erzielt werden kann. Letzten Endes führt dieser Prozess zu einem Entwurf für ein Gesamtprofil, welches das Potential zur Minimierung des Rollgeräusches aufzeigt und die wesentlichen Zielkonflikte verringert.

Gegen Ende des Projektes soll dann dieser Reifen auch in der Zusammenarbeit mit verschiedenen weiteren Teilvorhaben herangezogen werden, um Validierungsmessungen für die SPERoN Simulation sowie Bewertungsmessungen für verschiedene Testfelder zur Verfügung zu stellen.

Das Schaubild in Bild 4.2-3 zeigt die Entwicklung eines Profils im Rahmen des Teilvorhabens IV.



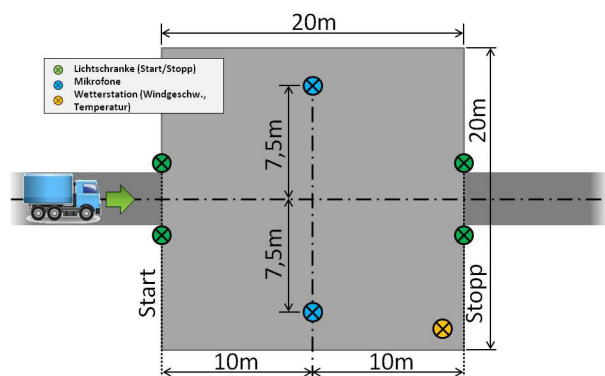
**Bild 4.2-3:** Stufen der Profilentwicklung

Angefangen mit dem Grundverständnis über die Entstehungsmechanismen und der Optimierung der Blockstruktur einer Profilspur über das Zusammenspiel mehrerer Spuren wird der Prototyp für eine neue Produktgeneration entwickelt.

#### 4.2.2.3 Relevante Regularien

Um die erzielte Verbesserung zu bewerten, ist es erforderlich, die Profilentwürfe nicht nur am Prüfstand, sondern auch am Fahrzeug bzw. auf der Straße zu bewerten. Hierzu wird die Freigabemethode nach UN ECE R117.02 [1] angewendet. Diese wird auch im normalen Entwicklungsprozess angewendet, wenn die Neuentwicklungen für die Markteinführung zertifiziert werden sollen. Diese stellt zunächst einmal ein relevantes Maß für die Bewertung des Rollgeräusches zur Verfügung. In der UN ECE R117.02 [1] werden zum einen die genauen Bedingungen und die Art der Messungen beschrieben und zum anderen werden dort auch die gültigen Grenzwerte angegeben.

Die Messumgebung wird dort ausführlich beschrieben. Die Skizze in Bild 4.2-4 zeigt die Anordnung der Messeinrichtungen sowie die wesentlichen Maße der Strecke.



**Bild 4.2-4:** Messstrecke nach UN ECE R117.02

Die Oberfläche des 20m x 20m großen Messfeldes ist nach ISO 10844 definiert. Die Durchfahrt der Messstrecke erfolgt bei abgeschaltetem Antrieb. An der Linie A-A' im Abstand von 10 m vor der Mikrofonlinie P-P' wird bei Durchqueren einer Lichtschranke (relevant ist die Fahrzeugfront) die Geräuschemessung gestartet. Die Messung endet, wenn das Fahrzeugheck die Lichtschranke an Linie B-B' 10 m hinter der Mikrofonlinie P-P' passiert. Nach Vorschrift müssen für C3-Fahrzeuge acht Messungen im Geschwindigkeitsbereich 60-80 km/h durchgeführt werden. Vier davon sollen unterhalb der Referenzgeschwindigkeit von 70 km/h und vier Messungen oberhalb dieser Geschwindigkeit durchgeführt werden. Alle Messungen sollten gleichmäßig über dem jeweiligen Geschwindigkeitsfenster verteilt sein. Daraus wird über eine Regressionskurve anschließend der Wert bei der Referenzgeschwindigkeit berechnet. Der so ermittelte Wert sagt allerdings recht wenig über die akustische Qualität eines Reifens aus, ist aber für die Produktfreigabe und für das Reifenlabeling von zentraler Bedeutung. Daher findet diese Messprozedur auch in diesem Projekt Anwendung. Ein tieferer Einblick in die Entstehung der Reifen-/Fahrbahngeräusche und deren Optimierung kann nur über die detaillierte Auswertung der spektralen Zusammensetzung erfolgen. Aus verschiedenen Gründen stellt ein Fahrversuch wie dieser nicht die ideale Versuchsanordnung für ein solches Entwicklungsprojekt dar. Da ein Lkw immer mit mindestens vier Rädern ausgestattet ist, überlagern sich während der Messung ebenso viele Geräuschquellen. Dies erschwert eine Analyse der Entstehungsmechanismen. Zudem ist der in einer solchen dynamischen Messsituation auftretende Dopplereffekt ein Hindernis für eine akkurate Analyse. Hinzu kommt der erhebliche Aufwand hinsichtlich Reifenfertigung, Radmontage und Versuchsdurchführung, der den Außenversuch nicht als ideal erscheinen lässt ebenso wie sich verändernde Umgebungsbedingungen.

Die nach UN ECE R117.02 bzw. EC 661/2009 für Lkw (Klasse: C3) festgelegten Grenzwerte sind in der nachstehenden Tabelle 4.2-1 aufgelistet.

Aktuelle EU-Grenzwerte gemäß UN ECE R117.02				
Fzg.-klasse	Reifentyp	Normal	Schnee	Spezial
C3	Normal	73	74	75
	Traktion	75	76	77

**Tab. 4.2-1:** Aktuelle Grenzwerte für die Typfreigabe bzw. Reifenlabel

Relevant sind hier die Traktionsreifen mit 75 dB(A) bzw. 76 dB(A), wenn sie die Bedingungen an einen Winterreifen erfüllen und auch als solche gekennzeichnet sind. Da in diesem Projekt primär Traktionsreifen betrachtet werden, ist eine möglichst deutliche Unterschreitung von 75 dB(A) der Anspruch, an dem sich der Erfolg messen lassen wird.

#### 4.2.2.4 Versuchsaufbau: Trommelprüfstand bei Continental Reifen Deutschland GmbH

Um die oben erläuterten Nachteile zu vermeiden, werden sämtliche Versuche auf dem Trommelprüfstand der Continental Reifen Deutschland GmbH in Hannover, Stöcken durchgeführt. Dies hat folgende Vorteile.

Bei einem Prüfstandsversuch handelt es sich um einen stationären Aufbau, d.h. die geometrischen Bedingungen sind sehr konstant. So ist der Abstand zwischen der Geräuschquelle, also dem Reifen, und den Mikrofonen immer identisch. Desweiteren sind die Messungen wetterunabhängig. Dies bildet die Grundlage für eine hohe Reproduzierbarkeit und eine sehr gute Vergleichbarkeit von verschiedenen Messungen bzw. Varianten.

Der hier zur Verfügung stehende Prüfstand erfordert zudem nur einen Reifen pro Variante, was den Aufwand zur Reifenfertigung deutlich reduziert. Gleiches gilt für die Versuchsvorbereitung, da der Messaufbau nie abgebaut wird und auch nur ein Rad zu montieren ist.

Im Überblick bieten sich für den Prüfstandsversuch folgende Vorteile:

- Nur eine Messung pro Variante
- Wetterunabhängigkeit
- Nur ein Reifen erforderlich
- Beste Reproduzierbarkeit
- Beste Vergleichbarkeit
- Vergleichsweise einfacher Zugriff auf Spektraldaten

Aus diesen Gründen wird die im Folgenden genauer beschriebene Methode am Trommelprüfstand für die Grundsatzuntersuchungen im Rahmen des Projektes gewählt.

Der Trommelprüfstand bei Continental ist als Halbfreifeldraum ausgelegt. Das heißt, alle Wände sowie die Raumdecke sind schallabsorbierend verkleidet, während der Boden schallhart, also schallreflektierend ausgelegt ist. Dies entspricht vom akustischen Standpunkt im Prinzip der Situation auf einer Geräuschmessbahn im Freien. Dort sollte es im Wesentlichen keine Objekte geben, die den vom Messobjekt, d.h. dem Versuchsfahrzeug, ausgehenden Schall reflektieren. Die einzige Reflektionsfläche ist die Fahrbahn. Diese Eigenschaften werden im Halbfreifeldraum durch eine schallabsorbierende Verkleidung von Wänden und Decke erreicht. Bild 4.2-5 zeigt den bei Continental Reifen Deutschland GmbH genutzten Trommelprüfstand. Zu sehen sind zwei der vier Trommeln, mit verschiedenen Fahrbahnoberflächen, die für unterschiedliche Anwendungen benutzt werden. Für dieses Projekt wurde insbesondere die Nachbildung des ISO-Belags der Versuchsstrecke am Contidrom, dem Continental Testgelände am Rande der Lüneburger Heide, für die Entwicklung verwendet. Dies ist in der Abbildung der linke Belag auf der linken Trommel.

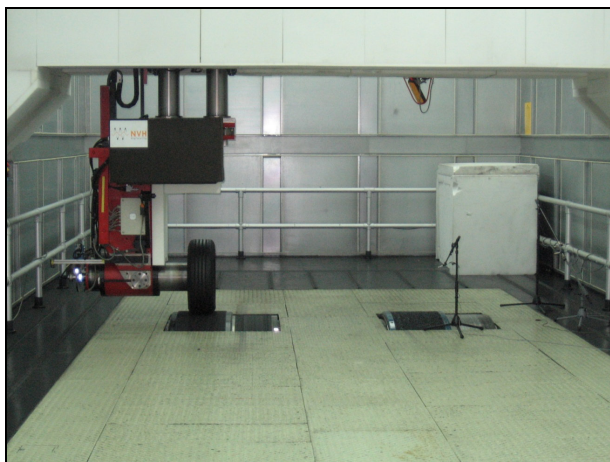


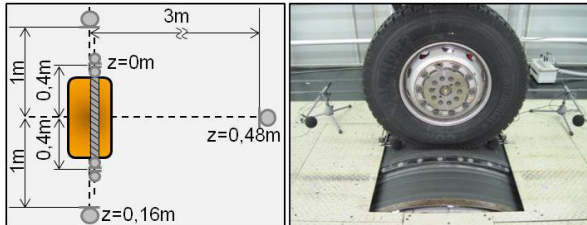
Bild 4.2-5: Trommelprüfstand



Für die Untersuchungen in diesem Projekt werden Ausrollmessungen durchgeführt, bei denen die Geräusche an fünf verschiedenen Positionen gemessen werden. Diese sind:

- „3 m Seite“: Mikrofon in 3 m Entfernung seitlich der Laufstreifenmitte
- „Einlauf“: Mikrofon in 1 m Entfernung vor dem Reifen
- „Auslauf“: Mikrofon in 1 m Entfernung hinter dem Reifen
- „SI\_LE“: Schallintensitätssonde im Reifeneinlauf
- „SI-TE“: Schallintensitätssonde im Reifenauslauf

Die Anordnung der Mikrofone ist der Übersicht in Bild 4.2-6 zu entnehmen.

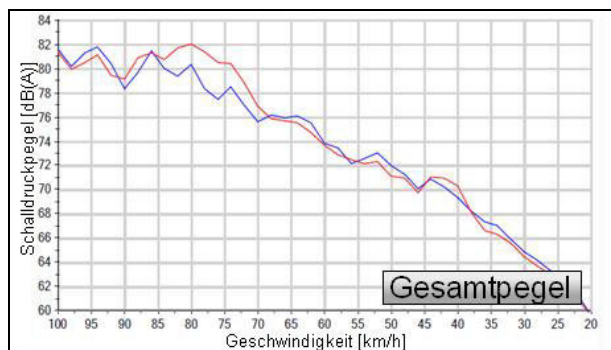


**Bild 4.2-6:** Mikrofonanordnung und Beispielfoto

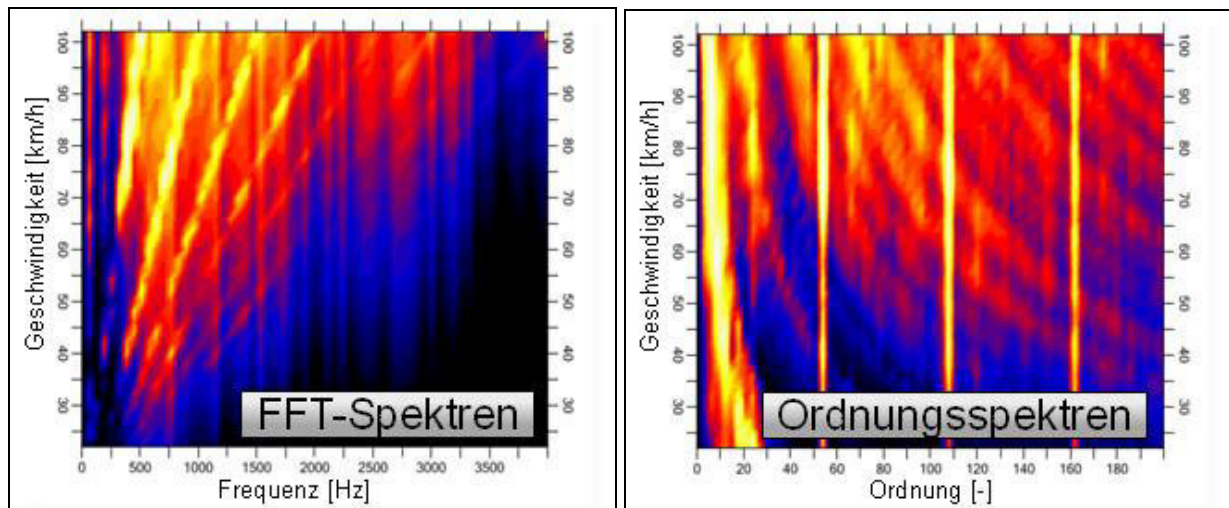
Das Foto auf der rechten Seite zeigt einen Serienreifen, der zu Beginn der Untersuchungen gemessen wird. Das seitlich angeordnete Mikrofon dient der Bewertung des Gesamtgeräusches und der Frequenzanalyse insbesondere im Hinblick auf den Abgleich mit der Straßenmessung.

Die Mikrofone in 1 m Abstand vor und hinter dem Reifen bzw. die Schallintensitätssonden (kurz: SI-Sonden) dienen zur Differenzierung zwischen Reifenein- und -auslauf. Eine der zentralen Fragestellungen war u.a., welche Grenze der Aufstandsfläche die dominante Schallquelle darstellt.

Zur Analyse werden vor allem die Gesamtschallpegel, die schmalbandigen Frequenzspektren (FFT) sowie die Ordnungsspektren herangezogen. Beispiele für die Darstellung sind in Bild 4.2-7 sowie Bild 4.2-8 gezeigt.



**Bild 4.2-7:** Gesamtschalldruckpegel für zwei Beispielfreifen



**Bild 4.2-8:** FFT- und Ordnungsspektren für einen Beispielreifen

Für die Ausrollversuche wird in der Regel eine Last-/Luftdruckkombination gewählt, die an den Betriebszustand gemäß UN ECE R117.02 angelehnt ist. In dieser Messvorschrift wird die Radlast mit 75% ( $\pm 5\%$ ) der Last, welche durch den Lastindex maximal zulässig ist, gewählt. Der Luftdruck wird am kalten, unbelasteten Reifen in einen Bereich eingestellt, der gemäß Gleichung Gl. 1 bestimmt ist.

$$P_r \cdot \left( \frac{Q_t}{Q_r} \right)^{1.25} \leq P_t \leq 1.1 P_r \cdot \left( \frac{Q_t}{Q_r} \right)^{1.25} \quad \text{Gl. 1}$$

Die in der Gleichung verwendeten Variablen sind:

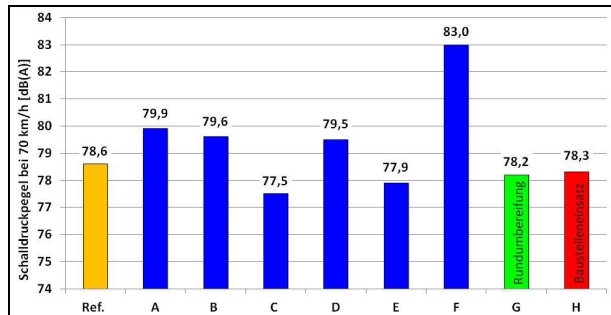
- $P_r$ : Der durch den Fülldruckindex definierte Betriebsfülldruck
- $Q_r$ : Referenzradlast, entspricht der durch den Lastindex definierten Maximallast.
- $Q_t$ : Testradlast, im Mittel 75% ( $\pm 5\%$ ) von  $Q_r$ .

Für die in diesem Projekt hauptsächlich verwendeten Reifen der Größe 315/80 R22.5 mit einem Lastindex von 156 ergibt sich eine Radlast von 3000 kg und ein mittlerer Fülldruck 6,6 bar.

Beim Wechsel von der flachen Fahrbahn (Teststrecke) auf die runde Trommel verändert sich auch die Form und Größe der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn, der sog. Footprint. Um diesen Effekt möglichst gering zu halten, wird der Fülldruck um etwa 0,4 bar abgesenkt. Damit ist die Form der Aufstandsfläche in etwa die gleiche wie auf der Straße.

### 4.2.3 Untersuchungsergebnisse

Gemäß der Projektstrategie wird im ersten Projektabschnitt zunächst ein Blick auf den aktuellen Stand der Produkte geworfen. Dazu werden am Anfang der Arbeiten verschiedene Reifen auf der Geräuschmessstrecke nach UN ECE R117.02 [1] geprüft. Bei den dort getesteten Reifen handelt es sich um Antriebsachsreifen. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Bild 4.2-9 zusammengefasst. Die Reifen „A“ bis „F“ sowie der Referenzreifen sind Produkte von Continental oder von Wettbewerbern, die für den Einsatz im Regionalverkehr spezifiziert sind. Der Reifen „G“ ist ein Produkt eines Wettbewerbers, das an allen Achspositionen verwendet werden soll. Dementsprechend ist die Profilgestaltung etwas feiner als bei den übrigen Profilen. Bei Reifen „H“ handelt es sich um ein Produkt, das für den Einsatz unter Baustellenbedingungen entwickelt wurde. Dieser Reifen zeichnet sich durch eine im Vergleich sehr grobe Profilgestaltung aus.



**Bild 4.2-9:** Ergebnisse des Benchmarks

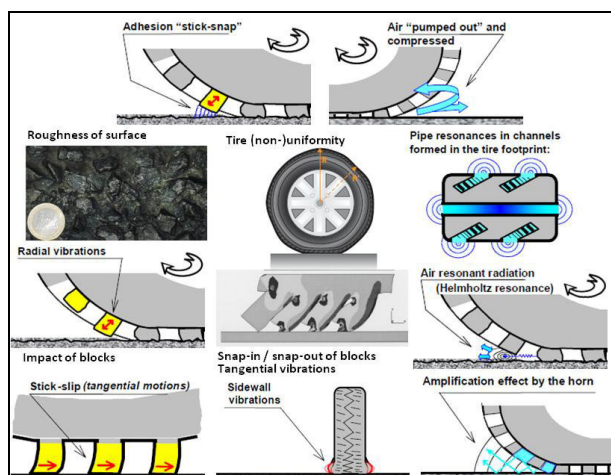
Es zeigt sich, dass mit Ausnahme von Reifen „F“ alle Reifen in einer Bandbreite von etwa 2,5 dB(A) liegen. Der Messwert von 83,0 dB(A) für den Reifen „F“ kann abschließend nicht genau erklärt werden, muss aber im Reifen selbst begründet sein, da eine fehlerhafte Messreihe ausgeschlossen werden kann.

Insgesamt ist hier festzustellen, dass keiner der Reifen den Grenzwert von 75dB(A) einhält. Im weiteren Verlauf der Untersuchung wird das Laufstreifenprofil des Referenzreifens als Bewertungsmaßstab genutzt, da es sich hierbei um einen Continental-Reifen für das betrachtete Produktsegment handelt. Dadurch sind die Eigenschaften dieses Reifens bestens bekannt. Das wesentliche Projektziel, d.h. die Entwicklung eines leisen Antriebsachsprofils unter Einhaltung der übrigen Anforderungen kann an diesem Punkt genauer definiert werden. Der Anspruch ist, den echten Messwert unter 75 dB(A) zu reduzieren.

#### 4.2.3.1 Entstehungsmechanismen des Reifen-/Fahrbahngeräusches

Wie bereits zuvor beschrieben werden die weiteren Untersuchungen auf dem Trommelprüfstand vorgenommen. Doch zuvor ist eine Betrachtung der Entstehungsmechanismen des Reifen-/Fahrbahngeräusches angebracht. Durch die Forschungs- und Entwicklungsarbeit auf dem Reifengebiet sind die Effekte, die das gesamte Reifen-/Fahrbahngeräusch hervorrufen, grundsätzlich bekannt. Daher geht es in diesem Projekt auch eher darum, die Hauptmechanismen für die Anregung des Reifen-/Fahrbahngeräusches bei Lkw-Reifen noch besser zu verstehen und vor dem Hintergrund der vielfältigen Zielkonflikte eine Reduzierung der Geräuschemissionen zu erreichen.

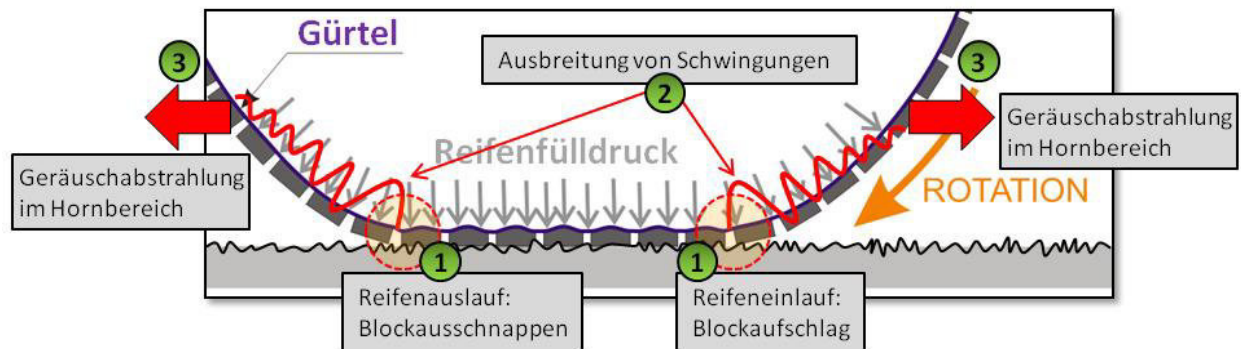
Die folgende Darstellung (Bild 4.2-10) zeigt eine prinzipielle Übersicht zu verschiedenen Arten der Geräuschanregung bei Reifen.



**Bild 4.2-10:** Anregungsmechanismen des Reifen-/Fahrbahngeräusches [3]

Die gegebene Übersicht soll zunächst nur unsortiert die Vielfalt der möglichen Ursachen aufzeigen. An dieser Stelle findet auch noch keine Unterscheidung zwischen Pkw- und Lkw-Reifen statt. Für Lkw-Reifen, insbesondere für die in diesem Projekt untersuchten Antriebsachreifen sind die Anregung durch Blockaufschlagen und Blockausschnappen von zentraler Bedeutung.

Dies sind auch die Themen, mit denen sich die weitere Untersuchung befasst. Die Skizze von Bild 4.2-11 zeigt den Fokus des Teilvorhabens IV.



**Bild 4.2-11:** Anregung des Reifen-/Fahrbahngeräusches

Gemäß der bereits vorgestellten Projektstrategie soll im ersten Teil der Untersuchung anhand von Einspurreifen der Einfluss des Aufschlagens von Profilklötzen im Reifeneinlauf bzw. das Ausschnappen von verspannten Profilklötzen im Reifenauslauf analysiert werden.

Es stellt sich also die Frage, was in der Reifenaufstandsfläche bzw. in den angrenzenden Bereichen geschieht, wenn ein Reifen auf einer Straße rollt.

Zunächst wird der Reifen durch sein Eigengewicht sowie die Fahrzeuglast deformiert, d.h. der eigentlich runde Reifen wird abgeplattet. Dadurch entsteht an den Rändern der Aufstandsfläche quasi Knickstellen. Wenn nun das Rad rollt, durchlaufen abwechselnd Profilklötze und Rillen diese Grenze zwischen rundem Reifen und flacher Aufstandsfläche. Im Reifeneinlauf treffen entlang dieser Grenze die Profilblöcke auf die Straßenoberfläche auf. Dies entspricht einer impulsartigen Stoßanregung und einer Deformation des Blockes sowie des darunter befindlichen Reifenunterbaus. Im Reifenauslauf kehren die deformierten und verspannten Blöcke in ihre Ausgangslage und -form zurück. Die Profilblöcke sind durch querorientierte Rillen voneinander getrennt. Dies bedingt, dass durch die regelmäßige Anordnung von Blöcken und Rillen die Ereignisse Blockaufschlag und Blockausschnappen periodisch wiederholen. Dementsprechend lässt sich die Frequenz für diese Anregung wie folgt bestimmen.

$$f_i(v) = i \times \left(\frac{v}{U}\right) \times p \quad \text{Gl. 2}$$

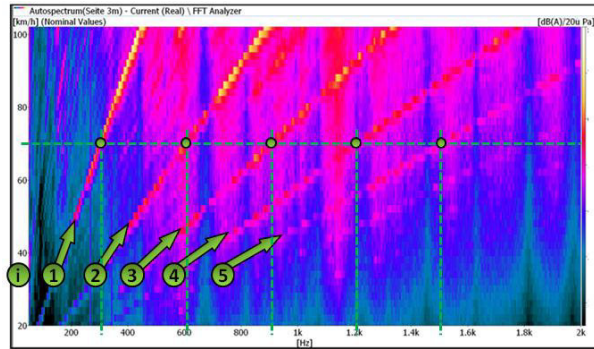
Die in der Gleichung verwendeten Variablen sind:

- f: Anregungsfrequenz durch Blockaufschlagen und -ausschnappen in [Hz].
- v: Geschwindigkeit [m/s].
- i: Blockharmonische [i = 1, 2, 3,...]
- U: Reifenumfang [m]
- p: Anzahl der Profilblöcke [-].

Die so ermittelte Frequenz ist im Fall von  $i=1$  die Grundfrequenz, mit der ein Reifen zu Schwingungen und somit auch zur Geräuschabstrahlung angeregt wird. Wie bei einer schwingenden Saite werden gleichzeitig mit der Grundfrequenz auch die Harmonischen bzw. Obertöne angeregt. Dies sind rechnerisch gesehen die ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz, also  $i > 1$  (vgl. Gl. 5.1-1).

Die Anregungsfrequenzen sind zum einen also abhängig von der Reifengröße, die bestimmend für den Reifenumfang ist und zum anderen von der Anzahl der Profilklötze auf dem Reifenumfang. Insgesamt sind die Frequenzen Gl. 5.1-1 folgend proportional zur Rollgeschwindigkeit. Die Reifengröße stellt hinsichtlich des Optimierungspotentials keinen Parameter dar, den man nutzen kann. Im Gegensatz dazu ist die Anzahl der Profilblöcke ein Parameter, mit dem man die Frequenzlage der emittierten Geräusche bzw. Einzeltöne verändern kann.

In der Grafik Bild 4.2-12 ist exemplarisch das Frequenzspektrum eines ausrollenden Reifens dargestellt.



**Bild 4.2-12:** Exemplarisches Frequenzspektrum eines Reifens

Auf der Abszissenachse ist die Frequenz aufgetragen (im Bild 4.2-20 - 2000 Hz). Die Ordinatenachse zeigt die Geschwindigkeit, hier von 20 km/h bis 102 km/h. Die Farbskala zeigt den Schalldruckpegel in dB(A). Je heller die Farbe, desto höher der Schalldruckpegel. Die grünen Pfeile samt Nummern markieren die Blockharmonischen. Diese sind im Konturplot deutlich als diagonale Linien mit erhöhten Pegeln zu erkennen. Die Kreuzungspunkte der gestrichelten Linien markieren die Frequenzen der Blockharmonischen ( $i=1$  bis  $5$ ) bei der Bezugsgeschwindigkeit von 70 km/h. Die Beispielrechnung gemäß Gl. 5.1-1 ergibt bei der Reifengröße 315/80 R22.5, die einen Umfang von  $U \approx 3,28$  m hat, und einer Blockanzahl von  $p = 52$  nachstehende Frequenzen:

$$f_1(70 \text{ km/h}) = 1 \times \left( \frac{70 \text{ km/h}}{3,28 \text{ m}} \right) \times 52 \approx 308 \text{ Hz}$$

$$f_2(70 \text{ km/h}) = 2 \times \left( \frac{70 \text{ km/h}}{3,28 \text{ m}} \right) \times 52 = 2 \times f_1 \approx 616 \text{ Hz}$$

$$f_3(70 \text{ km/h}) = 3 \times \left( \frac{70 \text{ km/h}}{3,28 \text{ m}} \right) \times 52 = 3 \times f_1 \approx 924 \text{ Hz}$$

Mit diesem Wissen kann man nun in die detaillierte Untersuchung der Reifen-/Fahrbahngeräusche einsteigen.

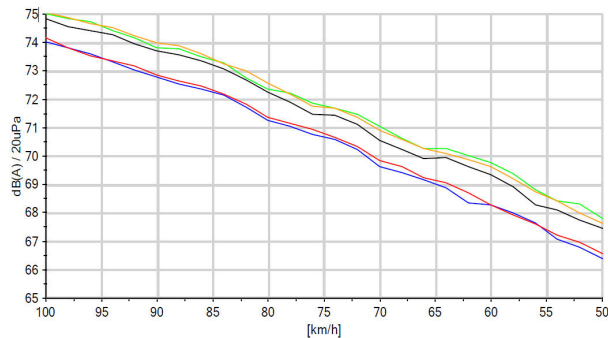
#### 4.2.3.2 Parameterstudien an Einspurreifen

Wie bereits zuvor beschrieben kann man nun in einer Messreihe den Einfluss von verschiedenen Blockstrukturen auf das Rollgeräusch untersuchen. Zur Vorbereitung werden zunächst zwei unterschiedliche Glattreifen hergestellt, welche die Basisreifen für die Versuche in diesem Teilvorhaben darstellen. Der erste ist ein echter Glattreifen ohne jegliche Profilelemente, während es sich beim zweiten Reifen um einen Reifen handelt, der bereits mit Umfangsrillen ausgestattet ist. Letzterer ist in Bild 4.2-14 dargestellt.



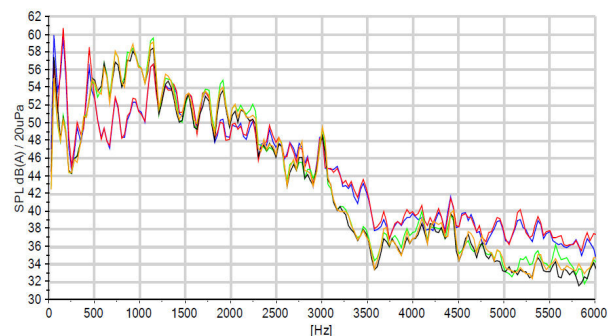
**Bild 4.2-13:** Basisreifen 315/80 R22.5 mit fünf Umfangsrillen

In einer ersten Messung wurden verschiedene Exemplare dieser beiden Reifentypen auf dem Trommelprüfstand akustisch vermessen (siehe Bild 4.2-14). Schon in diesem Vergleich kann man sehen, dass das Profildesign einen enormen Einfluss auf das Reifen-/ Fahrbahngeräusch haben muss. Im Vergleich von Slicks (vollständiger Glattreifen) mit den Umfangsrillenreifen stellt sich heraus, dass allein die Umfangsrillen das Rollgeräusch im Mittel um ca. 1,5 dB(A) erhöhen.



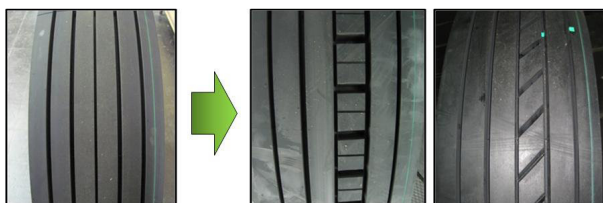
**Bild 4.2-14:** Ausgangsmessung (Gesamtpegel) von Glattreifen ohne (blau; rot) und mit (schwarz, grün, orange) Umfangsrillen

Zudem stellte sich heraus, dass auch das abgestrahlte Geräusch der einzelnen Rillenreifen einer gewissen Streuung unterliegt. Dies ist auch in dem in Bild 4.2-15 dargestellten FFT-Spektrum bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h zu sehen. Hier ist auch zu erkennen, dass zwar der Slick-Reifen im hochfrequenten Bereich oberhalb von 3 kHz und bei ca. 200 Hz lauter ist als der Rillenreifen, dieser aber in einem Bereich von etwa 500 Hz bis 1200/1300 Hz z.T. um mehr als 6dB(A) lauter ist als der Slick. Dies ist der Grund für den höheren Gesamtpegel in Bild 4.2-14.



**Bild 4.2-15:** Ausgangsmessung (FFT bei 70 km/h) von Glattreifen ohne (blau; rot) und mit (schwarz, grün, orange) Umfangsrillen

Nachdem in der ersten Projektphase das bereits vorhandene Know-how gesammelt und die Produkthanforderungen festgelegt wurden, geht es in der ersten Stufe der Rollgeräuschuntersuchung nun darum, einen detaillierten Einblick in das Optimierungspotential zu erhalten. Wie bereits oben erklärt, werden dazu einzelne Profilsuren der Reifen mit Umfangsrillen mit einer Blockstruktur versehen (vgl. Bild 4.2-16). Dies geschieht im Handschnittverfahren in der Schnitzabteilung. Diese Abteilung hat die Aufgabe, Glattreifen mit Profilen zu versehen. Das kann entweder durch manuelles Schneiden oder mittels Fertigung durch einen computergesteuerten Schnitzroboter geschehen.



**Bild 4.2-16:** Beispiele für Einspurreifen

Da im Falle dieses Projektes zunächst sehr einfache Blockformen angefertigt werden müssen, wird hier das Handschnitzen bevorzugt. Ein Grund hierfür ist die hohe Auslastung der vorhandenen Schnitzroboter. Ein weiterer ist, dass die erforderlichen Vorbereitungen für das Handschnitzen wesentlich geringer sind als für die Arbeit mit einem Roboter. Auch ist die erforderliche Genauigkeit bereits bei manueller Anfertigung der Profile zu erreichen.

Für die erste Parameterstudie wurde die Blockgeometrie des Referenzproduktes als Basis genutzt, da diese zwar akustisch nicht das Optimum darstellt, sich aber in den übrigen Kriterien als sehr gut erwiesen hat.

Ausgehend vom Basisprofilblock werden zunächst sehr einfache Blockgeometrien untersucht. Die Versuche werden in größeren Gruppen, die hier als „Carving Cycle“ bezeichnet werden durchgeführt. Um zu gewährleisten, dass jede Profilvariante eine individuelle Benennung erhält, wird eine einfache Nomenklatur verwendet. So wird der Reifen mit einer Spur des (vereinfachten) Referenzprofils als „C1-1-1“ bezeichnet. Dabei beschreibt „C1“ die erste Versuchsreihe, „-1“ die Nummer der Blockvariante und die nachstehende „-1“ den Schnitzzschritt. So wird auch berücksichtigt, dass manche Profile in mehreren Schritten modifiziert werden.

Zur Auswertung und Dokumentation, um welche Variante es sich bei einzelnen Reifen handelt, wird unter anderem ein einfaches, in MS Excel® erstelltes Werkzeug genutzt, mit dem man sehr schnell Vergleichsdiagramme erzeugen kann. Die zur Auswahl von bis zu sechs Einzelsignalen benötigte Tabelle ist in Bild 4.2-17 gezeigt.

	Reference	Plot A	Plot B	Plot C	Plot D	Plot E
<b>Mikroposition</b>	3m Seite	3m Seite	3m Seite	3m Seite	3m Seite	3m Seite
<b>Variante</b>						
<b>Cycle</b>	C1	C1	C1	C1	BOB	BOB
<b>Variant</b>	1	2	3	4	1	1
<b>Step/Track</b>	1	1	1	1	4	4
<b>Direction</b>	pos	pos	pos	pos	pos	pos
<b>Ordnung/Summe</b>	Sum	Sum	Sum	Sum	1st	2nd
<b>On/Off-switch</b>	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF
<b>SPL @ 70 km/h</b>	70,1	72,4	77,3	72,2	0,0	0,0

Bild 4.2-17: Excel®-Werkzeug zur Erzeugung von Vergleichsdiagrammen.

Durch geeignete Auswahl mittels der gezeigten Schaltflächen können Diagramme erzeugt werden, die jeweils den Schalldruckpegel der ersten bis fünften Blockharmonischen oder des Summenpegels aus den ersten fünf Harmonischen über der Rollgeschwindigkeit wiedergeben. Ein Beispiel ist im folgenden Diagramm wiedergegeben.

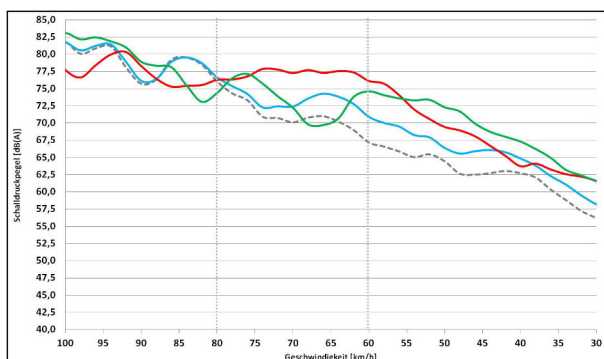


Bild 4.2-18: Beispiel für ein Vergleichsdiagramm.

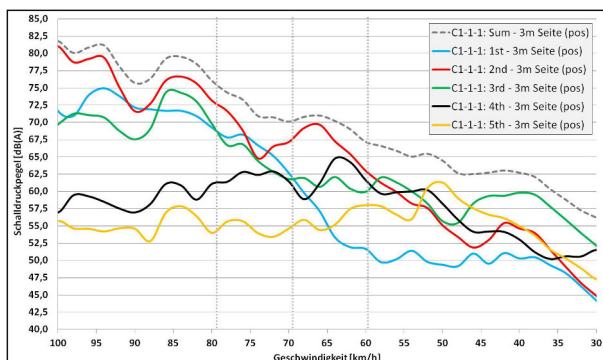
Die Auswahlmöglichkeiten sind die Mikrofonposition (vgl. Bild 4.2-6), der „Carving Cycle“, die Variante, die Schnitzstufe, die Rollrichtung sowie die Harmonische bzw. der Summenpegel. Zudem können einzelne Graphen an und abgeschaltet werden, wenn weniger als sechs Signale verglichen werden sollen.

Dementsprechend sind alle Daten, die in den Versuchen erfasst wurden hinter dieser Auswahlmaske abgelegt. Insgesamt wurden etwa 70 Profilvarianten so erfasst, was wiederum zu 350 Datensätzen führt, die es auszuwerten gilt. Hier sind aber auch schon Varianten mit mehr als einer Profilsur enthalten.

Folgende Parameter werden untersucht:

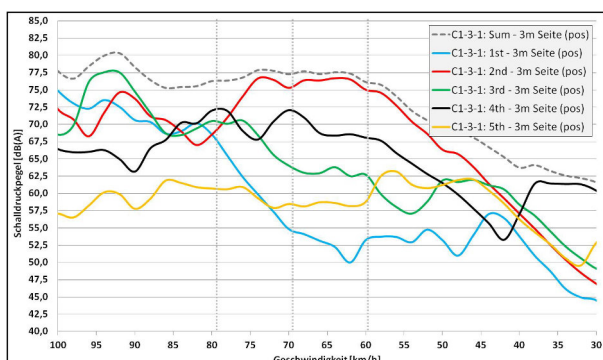
- Referenz (im Produkt implementierte Blockform, 52 Blöcke)
- Gerader Block (52 Blöcke mit Retarderwinkel)
- Blockanzahl (weniger 47 und mehr 57 Blöcke)
- Rillentiefe (in den mittleren Spuren)
- Retarderwinkel (reduziert, erhöht, auf Rückseite des Blocks)
- Ausrichtung der Querrillen ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  &  $45^\circ$  bei konstantem Negativanteil)
- Oberflächliche Rillen in Blockoberfläche
- Einschnitte in seitlichen Blockflanken
- Rillenform (gerade, schräg, wellenförmig)
- Ausrichtung der Querrillen ( $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  &  $45^\circ$  bei konstanter Rillenbreite)
- Rillentiefe in einer Schulterspur (Effekt der „geschlossenen Schulter“)

Um zu verstehen, wie man das Rollgeräusch am besten reduzieren kann, muss man einerseits für jedes Profil analysieren, welche Blockharmonische am stärksten zum Gesamtpegel beiträgt. Bild 4.2-19 zeigt den Einfluss der ersten fünf Ordnungen über der Geschwindigkeit.



**Bild 4.2-19:** Einfluss der Blockharmonischen über der Geschwindigkeit („C1-1-1“)

Wie zu sehen ist, variiert die Rangfolge der Anteile über der Geschwindigkeit sehr stark. Als generelle Regel lässt sich feststellen, dass die dritte und vierte Blockordnung zumindest bei niedrigen Geschwindigkeiten zwar nicht zu vernachlässigen sind, aber für eine wirksame Reduzierung des Gesamtpegels eher von nachgeordneter Bedeutung sind. Die dritte Harmonische ist häufig erst im Bereich höherer Geschwindigkeiten bedeutsam (vgl. Bild 4.2-20). Eine ebenfalls häufig gemachte Beobachtung ist, dass die erste Harmonische bei niedrigen Geschwindigkeiten nur eine geringe Bedeutung für den Gesamtpegel hat.

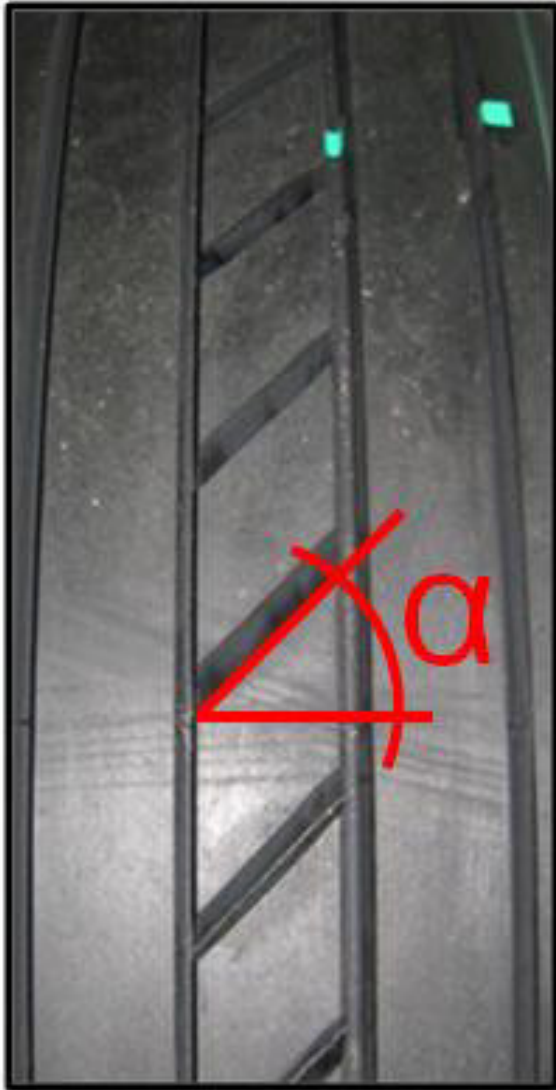


**Bild 4.2-20:** Einfluss der Blockharmonischen über der Geschwindigkeit („C1-3-1“)



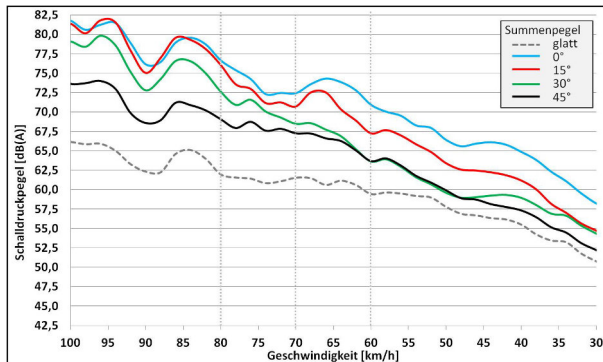
Bei allen Profilen ist immer die zweite Blockharmonische diejenige, die es in nahezu allen Geschwindigkeitsbereichen zu reduzieren gilt. Besonders das in Bild 4.2-20 gezeigte Beispiel kann dies verdeutlichen. Vor allem ist im Bereich unterhalb von 80 km/h eine klare Dominanz der zweiten Blockharmonischen für das Rollgeräusch festzustellen. Diese verharrt zwischen 75 km/h und 55 km/h auf einem sehr hohen Niveau und sinkt bei dieser Blockgeometrie erst unterhalb von 50 km/h fast linear ab, bleibt aber dominant.

Der nächste Parameter ist der Blockwinkel, der hier zunächst bei konstantem Negativanteil verändert wird. Es werden vier Winkel gemessen: 0°, 15°, 30° und 45°. Dieser Winkel wird gemessen zwischen der Blockkante und der Reifenquerrichtung. Bild 4.2-21 verdeutlicht die Ausrichtung am Reifen.



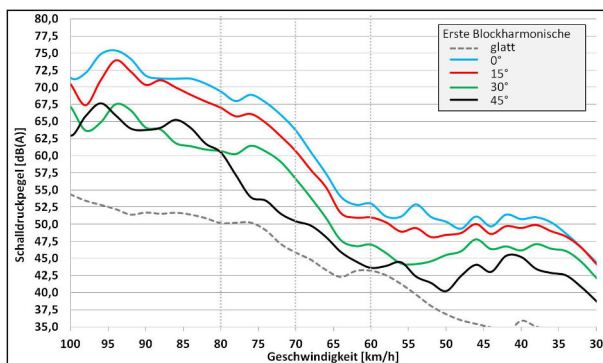
**Bild 4.2-21:** Blockwinkel

Das nachstehende Diagramm (Bild 4.2-22) zeigt den Einfluss des Rillenwinkels auf das Rollgeräusch. Der Zusammenhang an dieser Stelle ist relativ klar. Je größer der Winkel je leiser rollt der Reifen ab. Dabei muss man wieder zwischen verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen unterscheiden. Bei höherer Geschwindigkeit ist eine Schrägstellung der Rillen bzw. Blockkanten für relativ kleine Winkel zunächst nicht wirksam (vgl. 0° → 15°). Erst, wenn die Variante mit um 30° schräggestellten Rillen ist deutlich leiser als die reinen Querrillen. Die 45°-Rillen sind dann nochmals erheblich leiser. Der Bereich zwischen 80 km/h und 60 km/h stellt eine Art von Übergang dar. Bei 80 km/h benötigt man anscheinend relativ große Winkel, um eine klare Pegelreduktion zu erzielen. Hier ist der Pegel für die 15°-Variante ungefähr gleich der 0°-Variante und erst der 30°-Reifen ist deutlich leiser. Von 80 km/h bis 60 km/h fällt der Pegel des 15°-Reifen schneller ab als der der 0°-Variante. Gleiches gilt für die 30°-Variante.

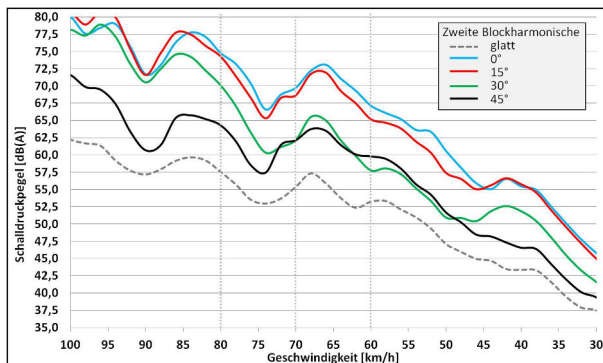


**Bild 4.2-22:** Einfluss des Rillenwinkels auf das Reifen-/Fahrbahngeräusch

Anhand der folgenden Diagramme (Bild 4.2-23 bis Bild 4.2-27) lässt sich ermitteln, welche Ordnungen ausschlaggebend für den Gesamtpegel bzw. die Unterschiede in den Gesamtpegeln sind.

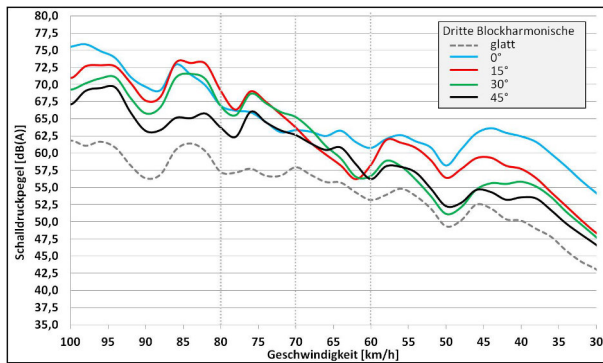


**Bild 4.2-23:** Einfluss des Blockwinkels auf die erste Blockharmonische

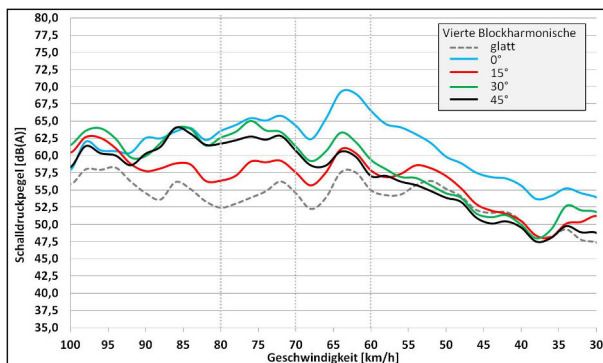


**Bild 4.2-24:** Einfluss des Blockwinkels auf die zweite Blockharmonische

Es zeigt sich, dass je größer der Block- bzw. Rillenwinkelwinkel, desto geringer sind die auftretenden Schalldruckpegel innerhalb der Blockharmonischen. Auch bei diesem Parameter ist die zweite Harmonische mehrheitlich pegelbestimmend. Für alle Winkel variieren die Pegel sehr stark mit der Geschwindigkeit, wobei hier kein einfacher Zusammenhang (z.B. linear oder quadratisch) zwischen Pegel und Rollgeschwindigkeit besteht. Es muss also für jede Blockform gesondert betrachtet werden, bei welcher Geschwindigkeit welche Harmonische einen bestimmten Anteil am Gesamtpegel hat.

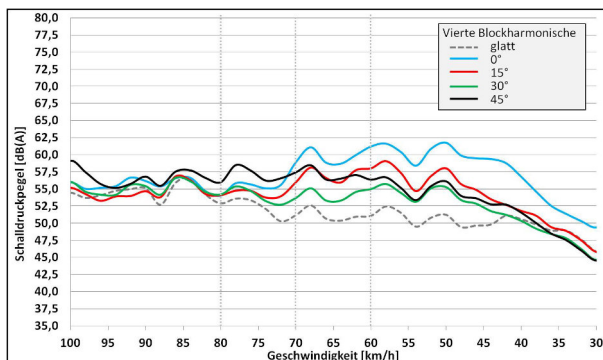


**Bild 4.2-25:** Einfluss des Blockwinkels auf die dritte Blockharmonische



**Bild 4.2-26:** Einfluss des Blockwinkels auf die vierte Blockharmonische

So nimmt beim 0°-Reifen selbst die sonst relativ leise vierte Blockharmonische im Bereich oberhalb von 60 km/h Werte an, die im Gegensatz zu den anderen Varianten pegelbestimmend sind.



**Bild 4.2-27:** Einfluss des Blockwinkels auf die fünfte Blockharmonische

Im Verlauf dieser Studie werden verschiedene Parameter der Profilgestaltung eingehend analysiert. Folgend werden die wichtigsten Erkenntnisse dargestellt.

- Blockanzahl:

Bei gegebener Reifengröße (hier 315/80 R22.5) und einer vorgegebenen Rillenbreite führt eine Veränderung der Blockanzahl zu einer geänderten Blocklänge. Diese führt einerseits im Falle einer höheren Blockanzahl zu einer Änderung der Anregungsfrequenz. Dies ist aber in erster Näherung keine Maßnahme für eine Rollgeräuschreduzierung. Vielmehr ist die mechanische Steifigkeit der Profilblöcke entscheidend für die Geräuschregung. Bei kürzeren Blöcken, die eine geringere Steifigkeit aufweisen wird die Anregung durch das Auftreffen der Blöcke auf die Straßenoberfläche im Reifeneinlauf reduziert. Allerdings neigen diese kürzeren Blöcke beim Ausschnappen im Reifenauslauf zu einem stärkeren Nachschwingen, was wiederum das Gesamtgeräusch verstärkt.

Umgekehrt weisen lange Blöcke eine starke Geräuschanregung im Reifeneinlauf auf, während sie im Auslauf eher leise sind, da nur ein geringes Nachschwingen der verspannten Blöcke stattfindet. Als Grundregel für die Blocklänge lässt sich festhalten, dass kürzere Blöcke tendenziell leiser sind als lange Blöcke. Hier ist aber immer auch die Robustheit des Reifenprofils im harten Einsatz zu beachten. Die Profilklotze dürfen nicht zu kurz werden, da sie sonst schneller aus dem Laufstreifen ausgerissen werden könnten, was sehr schnell zu einem Bauteildefekt führen kann.

- Rillentiefe:

Die Rillentiefe beeinflusst die Steifigkeit des Reifens insgesamt sowie die Steifigkeit der einzelnen Blöcke. Innerhalb der Blöcke ist die Biegesteifigkeit in Umfangsrichtung sehr groß, während sie in den Rillen relativ klein ist. Folglich sind die Unterschiede für große Profiltiefen stärker ausgeprägt als für geringe. Was dementsprechend zu einer stärkeren Schwingungsanregung an der vorderen und hinteren Grenze der Reifenaufstandsfläche führt. Eine für das Rollgeräusch vorteilhafte geringe Profiltiefe steht allerdings im Widerspruch zu einer hohen Traktion auf nassen Fahrbahnen sowie der Forderung nach einer hohen Laufleistung eines Reifens.

- Retarderwinkel:

Der sog. Retarderwinkel ist eine Schrägstellung der vorderen Blockflanke, die eingesetzt wird, um das Reifenprofil gegen die mechanische Beanspruchung durch die hohe Leistung heutiger Retarderbremsen unempfindlich zu machen. Ansonsten würde das Profil zu schnell abreiben und die Forderung nach einer hohen Laufleistung nicht erfüllt werden. Aus akustischer Sicht ist ein geringer Winkel von Vorteil.

- Ausrichtung der Querrillen:

Wie bereits oben beschrieben ist ein möglichst großer Winkel zwischen Blockkante und Reifenquerrichtung wünschenswert. Dem sind in der realen Profilstaltung von Lkw-Reifen allerdings gewisse Grenzen gesetzt, da große Winkel schnell zu recht feinen Blockspitzen führen. Diese sind wiederum kritisch im Hinblick auf ein gleichmäßiges Abriebbild.

- Oberflächliche Rillen in Blockoberfläche:

Wenn man Blöcke mit Rillen von sehr geringer Tiefe und geringer Breite (wenige Millimeter) versieht, dann wird der Block dadurch zunächst weicher, was in erster Linie durchaus positive Auswirkungen auf die erste Blockharmonische hat. Da aber gleichzeitig auch neue Kanten entstehen, die an den Grenzen der Bodenaufstandsfläche zu zusätzlicher Geräuschanregung führt. Zudem werden auch die zweite und/oder dritte Harmonische verstärkt, je nachdem, ob man nun ein oder zwei solcher Rillen einfügt. Die Veränderung der Blockharmonischen sowie des Gesamtpegels ist auch hier, wie bei allen Parametern sehr geschwindigkeitsabhängig. Die Messergebnisse zeigen, dass bei keiner Geschwindigkeit der Gesamtpegel abnimmt. Im besten Fall bleibt er auf dem Niveau des entsprechenden Basisblocks

- Ausrichtung der Querrillen (0°, 15°, 30° & 45° bei konstanter Rillenbreite):

Die Ausrichtung der Querrillen ist ein sehr wirkungsvoller Parameter bei der Reduzierung des Rollgeräusches. Durch eine Schrägstellung der Rillen kann man den Impuls, der beim Auftreffen eines Blockes auf die Fahrbahn entsteht und ursächlich für die Schwingungsanregung an dieser Stelle und somit auch für die Geräuschabstrahlung ist, effektiv abmildern. Dadurch wird nicht nur die erste, sondern auch die zweite und dritte Harmonische reduziert. Für die Blockgeometrie bedeutet dies im Grunde genommen eine Ausbildung weicher Spitzen, die beim Auftreffen auf die Fahrbahnoberfläche leicht verformt werden können. Damit ist man aber unmittelbar beim Zielkonflikt, den man dadurch aufwirft. Solche feinen Blockspitzen neigen verständlicher Weise dazu, sehr schnell abzureiben, was in einem schlechten Abriebbild mündet. Hier gilt es also einen geeigneten Kompromiss zu finden bzw. eine Lösung, die eine Weichheit erzeugt, ohne schnell abzureiben. Damit ist man auch schon bei der Rillenform.

- Rillenform (gerade, schräg, wellenförmig)

- Die Form der Querrillen und damit auch die Blockgeometrie als solche haben ebenfalls einen großen Einfluss auf das Reifen-/Fahrbahngeräusch sowie alle anderen Kriterien, die zu beachten sind. Die Messergebnisse zeigen, dass man durch eine geeignete Blockform auf der einen Seite dafür sorgen kann, dass der Aufschlagimpuls beim Zusammentreffen mit der Fahrbahn abgemildert bzw. auch der Ausschnappeffekt beim Verlassen der Aufstandsfläche reduziert werden kann. Es zeigt sich, dass eine Art S-Schlag, bei der die Rille zunächst rechtwinklig zur Umfangsrille beginnt und dann in einem Sinusbogen verläuft, d.h. die Rillen sehr schräg läuft, um dann zur anderen Blockseite wieder rechtwinklig zu den Umfangsrillen zu liegen, einen sehr geringen Geräuschpegel auf-

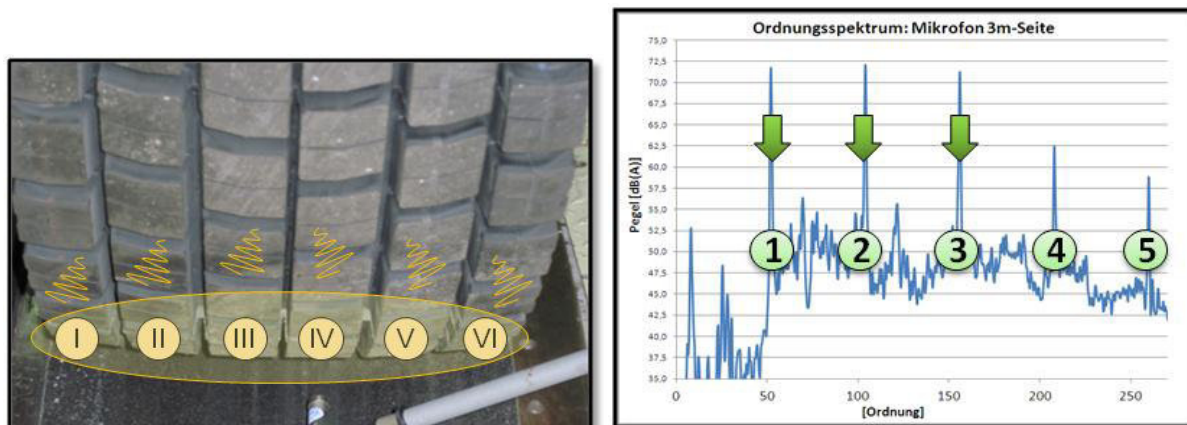
weist. Der schon zuvor genannte Zielkonflikt mit einem gleichmäßigen Abriebbild ist auch hier wieder der kritische Punkt. Darauf wird später noch im Kapitel zur Gesamtprofilgestaltung eingegangen.

- Rillentiefe in einer Schulterspur (Effekt der „geschlossenen Schulter“)

In den Messungen zeigt sich, dass die Rillentiefe in den Schulter Spuren einen stärkeren Einfluss hat als bei den anderen Spuren. Das liegt unter anderem daran, dass diese Spuren noch besser zur Seite die Geräusche abstrahlen als die übrigen Spuren. An einem Reifen wird untersucht, inwieweit eine Vermeidung von Querrillen in den Schulter Spuren das Rollgeräusch positiv beeinflussen kann. Es zeigt sich, dass für Querrillen mit sehr geringer Tiefe der Geräuschpegel sogar niedriger sein kann als bei fehlenden Querrillen. Allerdings kehrt sich dieser Effekt mit steigender Rillentiefe sehr schnell um und die Pegel steigen dann deutlich an. Die Begründung dürfte die gleiche sein, wie bei den oberflächlichen Rillen in einzelnen Blöcken (siehe weiter oben)

#### 4.2.3.3 Mehrspurreifen

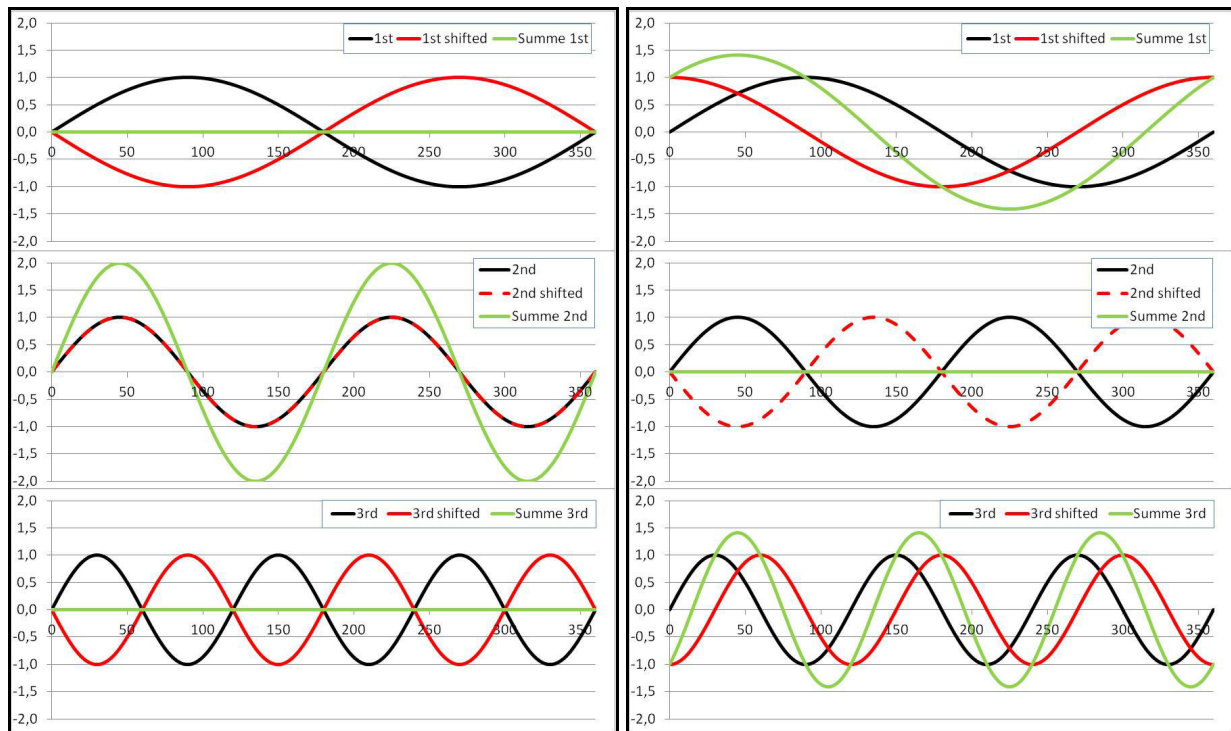
Nach der Auswertung der Einzelspurreifen befasst sich Abschnitt 5.3 mit dem Zusammenspiel von mehreren Profils Spuren. Wie bereits erläutert, geht man davon aus, dass eine einzelne Profils pur Schwingungen in der Reifenstruktur mit einem bestimmten Frequenz- bzw. Ordnungsspektrum anregt. Diese Vibrationen breiten sich entlang des Reifenumfangs und auch in Reifenquerrichtung aus. Wenn man nun mehrere solcher einzelnen Schwingungsquellen (Profils puren) auf dem Reifen anordnet, dann müssen sich diese innerhalb der Struktur überlagern und es kommt zur Abstrahlung eines Gesamtgeräusches. Dies ist allerdings nicht zwingend die lineare Summe aus beiden Einzelquellen, da es zu einer Verstärkung oder Abschwächung durch Interferenz kommen kann. Der Graph in Bild 4.2-28 zeigt beispielhaft das insgesamt vom Reifen abgestrahlte Geräusch als Ordnungsspektrum bei 70 km/h.



**Bild 4.2-28:** Ordnungsspektrum für ein Gesamtprofil.

Wenn man nun die einzelnen Profils puren auf dem Umfang derart verschiebt, dass durch die veränderte Abfolge der Schwingungsanregung durch Blockaufschlagen und Blockausschnappen eine destruktive Interferenz erzeugt werden kann, dann müssten die Amplituden der Blockharmonischen geringer werden und somit der Gesamtgeräuschpegel reduziert werden.

Die Diagramme in Bild 4.2-29 sollen verdeutlichen, was bei der Überlagerung von Schwingungen mit unterschiedlichen Phasenwinkeln geschieht.



**Bild 4.2-29:** Interferenz bei verschiedenen Phasenwinkeln ( $180^\circ$  links und  $90^\circ$  rechts)

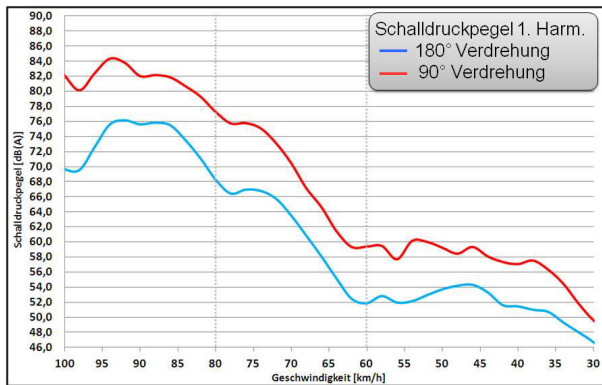
Die Diagramme auf der linken Seite der Darstellung zeigen, wie die ersten drei Blockharmonischen miteinander interagieren, wenn die beiden Quellen um  $180^\circ$  bezogen auf die Blocklänge gegeneinander verdreht werden. Theoretisch würden sich jeweils die ersten und dritten Harmonischen gegenseitig auslöschen, während die zweiten Harmonischen sich gegenseitig verstärken. Im Gegensatz dazu würde eine Verschiebung um nur  $90^\circ$  zu einer Verstärkung der ersten und dritten Blockharmonischen führen, während in diesem Fall die zweite ausgelöscht würde. Das ist natürlich zunächst einmal ein eher theoretisches Beispiel, das aber den Grundgedanken verdeutlichen kann.

Um zu überprüfen, ob die Theorie auch im realen Reifen zu einer Verbesserung führen kann, werden zwei Reifen mit jeweils zwei Profilsuren in der Reifenmitte versehen, die sich lediglich in der relativen Verdrehung der beiden Spuren auf dem Reifenumfang unterscheiden (siehe Bild 4.2-30).

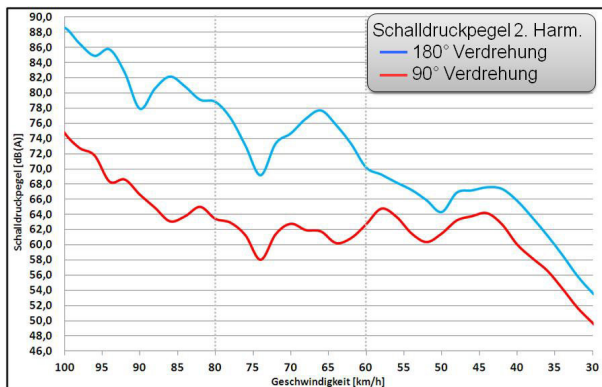


**Bild 4.2-30:** Reifen mit zwei Profilsuren und unterschiedlicher Verdrehung

Die unterschiedlichen Positionierungen der beiden Profilsuren zueinander lassen sich in den beiden Bildern von Bild 4.2-30 gut erkennen. Wenn der theoretische Effekt auch praktisch umsetzbar ist, dann müssen die beiden Reifen deutliche Unterschiede in den beiden ersten Blockharmonischen aufweisen. Dazu werden die beiden Reifen am Prüfstand gemessen und die beiden Harmonischen einzeln ausgewertet. Die beiden folgenden Diagramme zeigen das Ergebnis der Messungen.

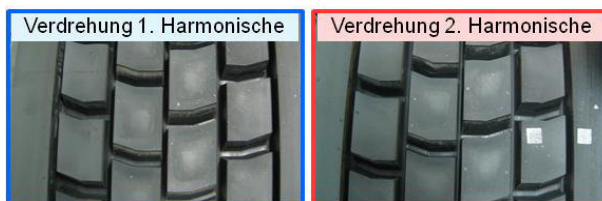


**Bild 4.2-31:** Auswertung der ersten Blockharmonischen (zwei Spuren)



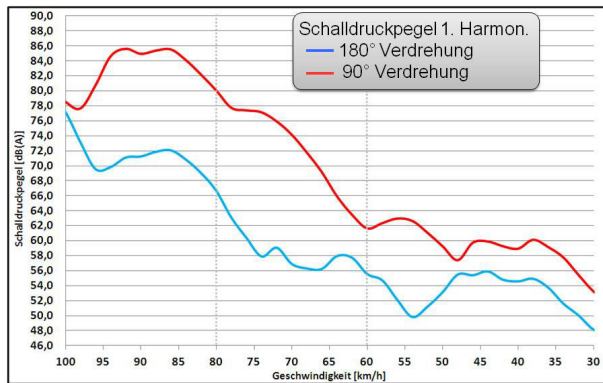
**Bild 4.2-32:** Auswertung der zweiten Blockharmonischen (zwei Spuren)

Es zeigt sich in der Auswertung sehr deutlich, dass allein über die unterschiedliche Abfolge der Blöcke in den hier zwei Profilsuren die einzelnen Blockharmonischen klar beeinflusst werden können. Der nächste Schritt ist dann die Erweiterung der Schwingungs- bzw. Geräuschanregung auf vier und später auf sechs Profilsuren.



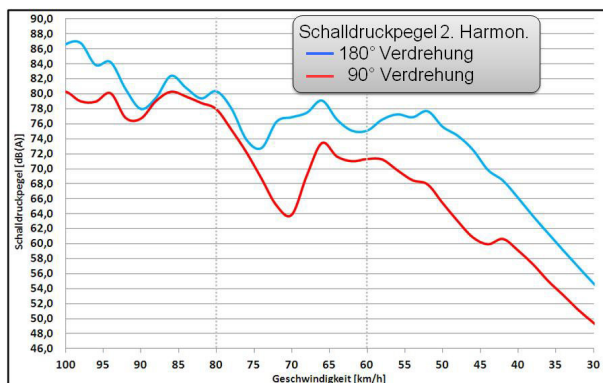
**Bild 4.2-33:** Reifen mit vier Profilsuren und unterschiedlicher Verdrehung

In Bild 4.2-33 sind zwei Reifen mit je vier Profilsuren und unterschiedlichen Verdrehungen dargestellt. Der linke Reifen ist für eine geringstmögliche Anregung der ersten Blockharmonischen ausgelegt, während der rechte Reifen auf eine geringe Anregung der zweiten Blockharmonischen ausgelegt ist. Die beiden folgenden Diagramme (Bild 4.2-34 und Bild 4.2-35) zeigen die entsprechende Auswertung wie schon bei den „Zweispurreifen“.



**Bild 4.2-34:** Auswertung der ersten Blockharmonischen (vier Spuren)

Auch hier ist wieder klar ersichtlich, dass bei einer Abstimmung auf eine bestimmte Blockharmonische ein sehr guter Effekt erzielt werden kann. Nun ist das Ziel einer solchen Optimierung aber nicht die Reduzierung einer einzelnen Blockharmonischen, sondern die Absenkung des gesamten Rollgeräusches mit allen relevanten Anteilen.



**Bild 4.2-35:** Auswertung der zweiten Blockharmonischen (vier Spuren)

Dazu ist die Absenkung einzelner Geräuschanteile lediglich ein Zwischenschritt. Zunächst ist festzustellen, dass die Auslöschung von Geräuschanteilen durch destruktive Interferenz sehr wirksam ist. Insbesondere bei der ersten bis dritten Harmonischen funktioniert das Prinzip sehr gut. Ab der Vierten wird dies wegen der kürzer werdenden Wellenlängen immer schwieriger umsetzbar. Für eine wirksame Reduzierung des Gesamtgeräusches muss man verschiedene Phasenwinkel, die auf unterschiedliche Blockharmonische abgestimmt sind, bestmöglich miteinander kombinieren. Dabei gilt, je komplexer das zu optimierende Profil, umso komplexer wird die Umsetzung. Letztlich muss hierfür noch ein geeignetes Computermodell entwickelt werden, das diese Optimierung durchführen kann. Zumal auch hier ggf. schwerwiegende Zielkonflikte auftreten können, die letztlich dazu führen, dass man den Effekt der Auslöschung nur in relativ engen Grenzen nutzen kann. Dies wäre für jedes neue Laufstreifendesign im Einzelfall zu bewerten.

#### 4.2.3.4 Entwicklung von Gesamtprofilen

Nach der Untersuchung der Blockgestaltung und der Wechselwirkungen zwischen mehreren Profilsuren ist der nächste Schritt im vorliegenden Teilvorhaben die Entwicklung von verschiedenen Gesamtprofilen, von denen letztlich eines als Eingangsentwurf für die spätere Produktentwicklung dienen soll.

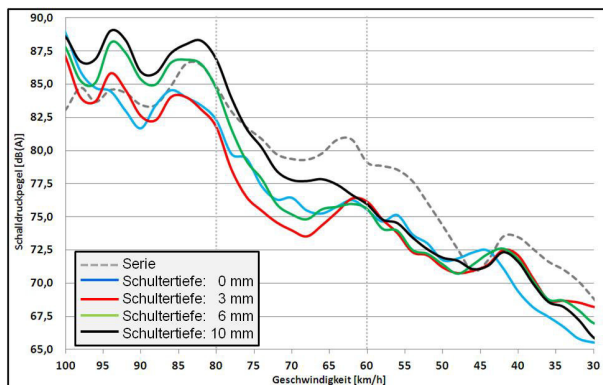
Ein erster Entwurf stellt das in Bild 4.2-36 auf der rechten Seite gezeigte Profil dar. An diesem Profil wurde zum einen untersucht, wie sich das Reifen-/Fahrbahngeräusch darstellt, wenn man mit einer relativ einfachen Blockstruktur große Winkel zwischen den Blockkanten und den Grenzen der Reifenaufstandsfläche erzeugt. Ziel dabei war es, sowohl an der vorderen als auch an der hinteren Grenze die Winkel möglichst gleichmäßig zu haben. Bei durch den Glattreifen vorgegebener Aufstandsfläche kommt man daher zu geraden Blöcken in den äußeren Spuren und zu diagonalen Blöcken im Mittelbereich.





**Bild 4.2-36:** Serien- und Konzeptprofil im Vergleich

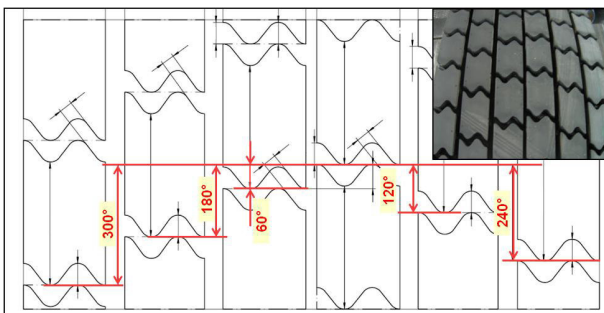
Desweiteren wurde an diesem Reifen der Effekt der geschlossenen Schulter untersucht, der schon in Abschnitt 4.2.4.2 erläutert wurde.



**Bild 4.2-37:** Erster Gesamtprofilentwurf („Geschlossene Schulter“)

Die Daten legen nahe, dass bei einem solchen Profilentwurf eine unterschiedliche Bewertung je nach Geschwindigkeit erfolgen muss. Bei niedrigen Geschwindigkeiten stellt dieses Profil unabhängig von der Tiefe der Querrillen in den Schulerspuren eine deutliche Verbesserung gegenüber der Referenz dar. Bei höheren Geschwindigkeiten spielt die Tiefe eben dieser Rillen eine große Rolle. Die drei Millimeter tiefen Querrillen in den Schulerspuren bringen eine klare Verbesserung im Bereich bis ca. 90 km/h mit sich. Wenn diese Rillen noch tiefer werden, steigt der Gesamtpegel oberhalb von ca. 75-80 km/h über die Pegel des Serienreifens an.

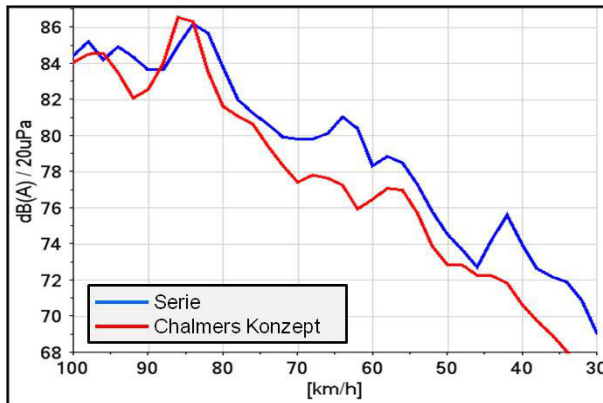
Einen weiteren Entwurf, der im Rahmen dieses Teilvorhabens untersucht wird, zeigt die Darstellung in 4.2-38.



**Bild 4.2-38:** „Chalmers Konzept“

Dieses Konzept basiert im Wesentlichen auf den von Prof. Wolfgang Kropp an der Chalmers Universität, Göteborg, Schweden erarbeiteten Erkenntnissen, wonach es für ein geringes Rollgeräusch günstig ist, eine gleichmäßige Verteilung der Biegesteifigkeit in Umfangsrichtung zu generieren. Dazu wurde einerseits die in der Darstellung gezeigte Rillenform entwickelt, die durch eine Quasiverzahnung der einzelnen Blöcke für relativ kleine Steifigkeitssprünge zwischen den Blöcken sorgt. Zum anderen wurden die Spuren in Umfangsrichtung gleichmäßig verdreht. Im vorliegenden Fall sind dies jeweils Vielfache von 60°, wie in Bild 4.2-38 zu sehen ist. Bei dem hier untersuchten Profil handelt es sich um eine Adaption des Entwurfs, der bereits zuvor in den SPERoN-Teilvorhaben von Leiser Verkehr gute Ergebnisse erzielt hat. Die wesentliche

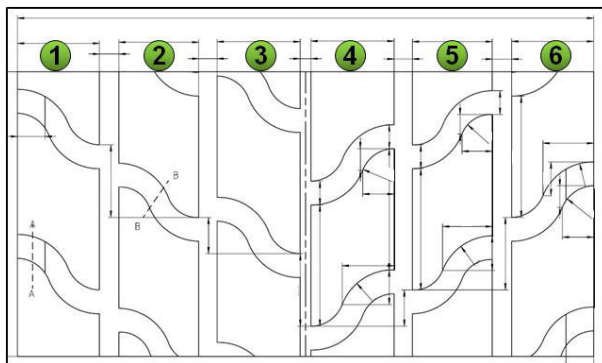
Veränderung ist dabei, dass dieses Profil nun sechs anstatt wie zuvor fünf Profilsuren aufweist. Zusätzlich wurde die Rillenbreite vergrößert, um eine Vergleichbarkeit mit dem Serienprofil, welches als Referenz genutzt wird herzustellen. Das Diagramm in Bild 4.2-39 zeigt den Gesamtpegel für die Ausrollmessung am Trommelpfprüfstand. Es stellt sich heraus, dass ein solches Profil bis zu Geschwindigkeiten oberhalb von 80 km/h klare Vorteile gegenüber dem Serienprofil hat. Allerdings besitzt dieses Profil auch wenigstens einen sehr großen Nachteil. Dieser ist ein sehr schlechtes Abriebbild, das durch die feinen Blockspitzen hervorgerufen wird. Dieser Effekt würde durch den fehlenden Retarderwinkel an der Vorderseite der Blöcke zusätzlich verstärkt.



**Bild 4.2-39:** Ausrollmessung am Trommelpfprüfstand (Serie vs. Chalmers Konzept)

Insofern kann diese Blockgeometrie zunächst nur für die prinzipiellen Erkenntnisse zur Steifigkeitsverteilung und zur Untersuchung der Auslöschungseffekte durch Interferenz dienen.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Einzelspurreifen und der ersten Konzeptprofile wird im nächsten Schritt ein Konzept erstellt, das bereits den Anspruch haben soll, neben einem reduzierten Rollgeräusch auch die weiteren Qualitätskriterien zu erfüllen. Das Profilkonzept ist in Bild 4.2-40 dargestellt.



**Bild 4.2-40:** Profilkonzept „LV3 – Profil 1“

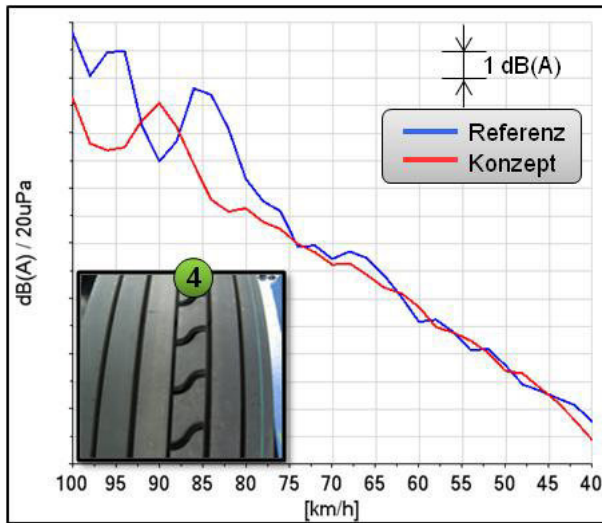
Das Konzept sieht vor, dass verschiedene Maßnahmen, die in den Untersuchungen mit Einspurreifen gute Ergebnisse erzielt hatten, umgesetzt werden. Dies sind eine möglichst diagonale Ausrichtung der Querrillen, ein reduzierter Retarderwinkel, eine geringfügig reduzierte Profiltiefe sowie eine weitgehend geschlossene Schulter.

Zunächst werden Reifen mit jeweils nur einer Profilsur untersucht und mit den entsprechenden Spuren des Referenzprofils verglichen. Im nächsten Schritt wird dann aus den einzelnen Spuren ein Gesamtprofil „LV3 – Profil 1“ generiert. Die folgende Darstellung (Bild 4.2-41) zeigt die Einzelspuren und das Gesamtprofil.

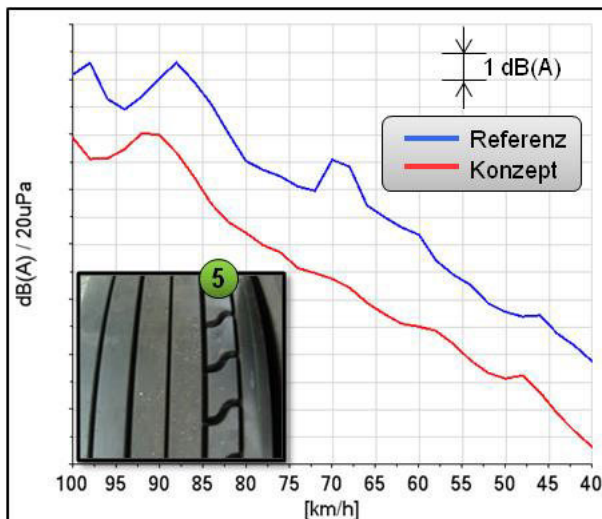


**Bild 4.2-41:** Einzelspuren und Gesamtprofil „LV3 – Profil 1“

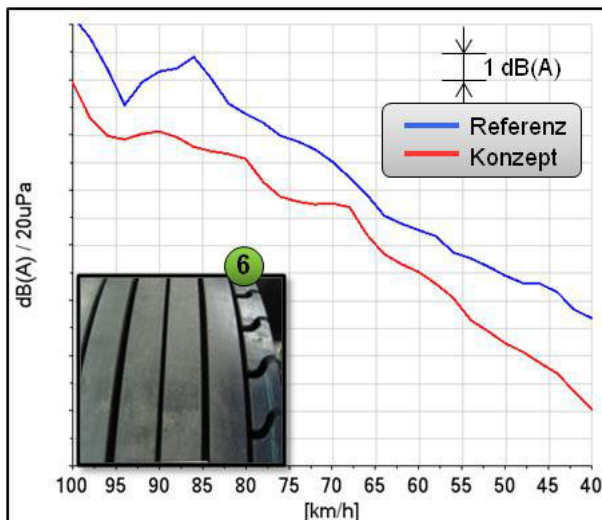
Die Zusammenstellung des Gesamtprofils geht davon aus, dass die Anregung des Rollgeräusches quasi symmetrisch ist, d.h. die Spuren 1 & 6, 2 & 5 sowie 3 & 4 erzeugen jeweils die gleichen Schwingungen in der Reifenstruktur. Daher genügt es, lediglich drei Spuren zu untersuchen. Die drei folgenden Diagramme (Bild 4.2-42 bis Bild 4.2-44) zeigen die Gesamtpegel über der Ausrollgeschwindigkeit am Trommelprüfstand für die drei Einzelpuren im Vergleich zur jeweiligen Referenz.



**Bild 4.2-42:** Vergleich Gesamtpegel: Referenz und „LV3 – Profil 1“: Spur Nr. 4

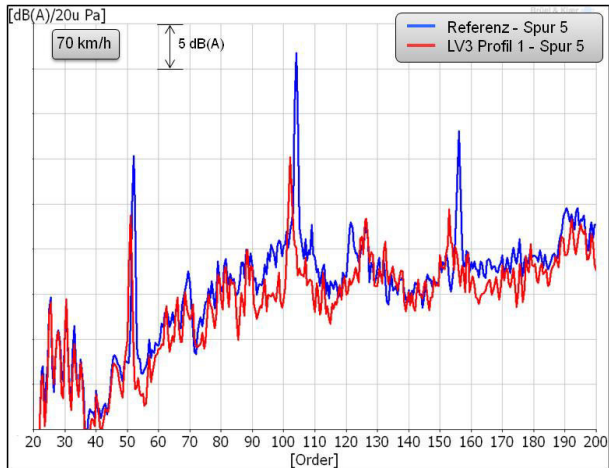


**Bild 4.2-43:** Vergleich Gesamtpegel: Referenz und „LV3 – Profil 1“: Spur Nr. 5



**Bild. 4.2-44:** Vergleich Gesamtpegel: Referenz und „LV3 – Profil 1“: Spur Nr. 6

Bild 4.2-42 zeigt, dass die Spur Nr. 4 erst bei höheren Geschwindigkeiten (>75 km/h) Vorteile im Gesamtpegel gegenüber der Referenz hat. Im Vergleich dazu zeigt sich, dass die Spuren fünf und sechs über den gesamten Geschwindigkeitsbereich deutlich geringere Schalldruckpegel aufweisen als die zugehörigen Spuren des Referenzprofils. Insbesondere bei Spur Nr. 5 wird eine Pegelreduktion von mehr als drei dB(A), teilweise sogar bis vier dB(A), erreicht. Um zu verdeutlichen, wie diese Verbesserung zustande kommt, wird das Ordnungsspektrum bei 70 km/h für Profilspur Nr. 5 herangezogen (Bild 4.2-45).

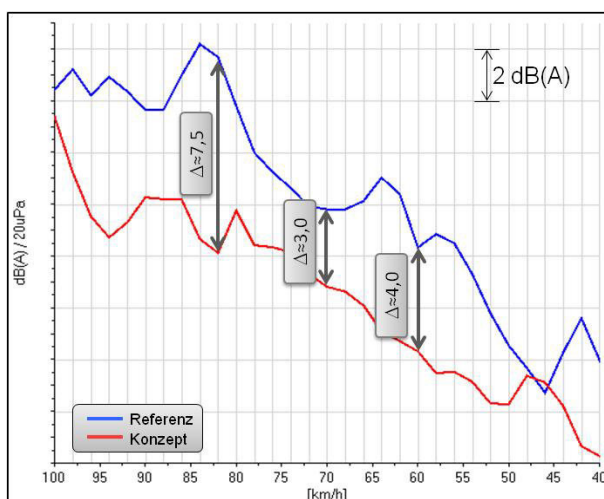


**Bild 4.2-45:** Vergleich Ordnungsspektrum: Referenz und „LV3 – Profil 1“: Spur Nr. 5

Im Diagramm wird schnell ersichtlich, dass es mit der neuen Blockstruktur sehr gut gelingt, die ersten drei Blockharmonischen mehr als deutlich zu reduzieren. Insbesondere die zweite Harmonische, d.h. die 102te Ordnung wird bei 70 km/h um mehr als 10 dB(A) verringert.

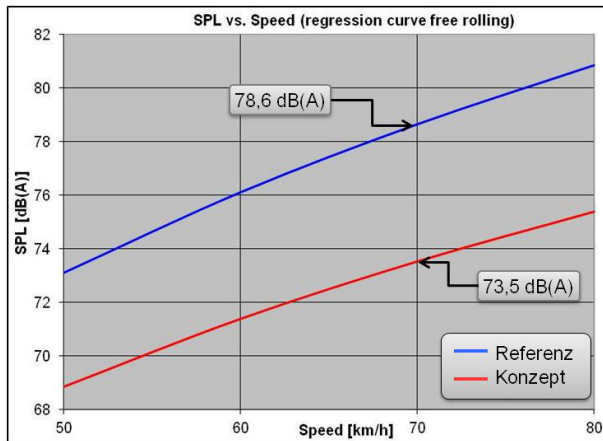
Im nächsten Entwicklungsschritt wird dann aus den Einzelspuren ein Gesamtprofil generiert (vgl. Bild 4.2-40 und 4.2-41, rechts), das sowohl im Prüfstandsversuch als auch im Straßenversuch eine wesentliche Verbesserung im Vergleich mit dem Referenzreifen aufweisen sollte. Bei den hierfür angefertigten Reifen handelt es sich um Schnitzreifen und nicht um Formreifen. Daher muss ist das Ergebnis mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Man kann davon ausgehen, dass die Schnitzreifen ca. 0,6-0,7 dB(A) leiser sind als Formreifen mit identischer Profilierung.

Das folgende Diagramm (Bild 4.2-46) stellt die Verläufe der Gesamtpegel in drei Meter Entfernung seitlich zum Reifen für das Referenzprofil und das neue Profil gegenüber.



**Bild 4.2-46:** Vergleich Gesamtpegel: Referenz und „LV3 – Profil 1“ (Trommelprüfstand)

Es wird hier eine Pegelreduzierung von bis zu 7,5 dB(A) abhängig von der Rollgeschwindigkeit erzielt. Bei der Bezugsgeschwindigkeit von 70 km/h liegt der Gesamtpegel des Konzeptprofils immerhin 3 dB(A) unter dem des Referenzreifens. Die am Prüfstand erzielte Geräuschreduktion stellt aber lediglich einen ersten Anhalt dar.



**Bild 4.2-47:** Vergleich Gesamtprofile im Straßenversuch (Abstand 7,5 m)

Entscheidend für den Projekterfolg ist die Messung auf der Teststrecke, die schlussendlich einen Wert für eine spätere Produktfreigabe bzw. die im realen Verkehrsgeschehen erzielte Verbesserung liefert. Dazu wird das Konzeptprofil dem entsprechenden Test unterzogen. Das zugehörige Ergebnis ist in Bild 4.2-47 wiedergegeben. Die Reduzierung des Rollgeräusches beträgt im Mittel fast fünf dB(A). Bei 70 km/h wird eine Pegelreduzierung von 5,1 dB(A) erzielt. Wenn man berücksichtigt, dass ein Formreifen etwas lauter wäre als der hier zur Verfügung stehende Schnitzreifen, dann würde man immerhin eine Pegelabsenkung von 4 bis 4,5 dB(A) erzielen.

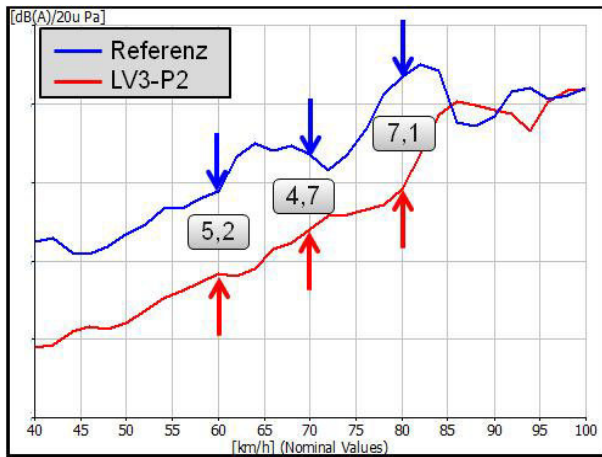
Die in diesem Profil ebenfalls optimierte Phasenlage der Einzelspuren zueinander führt dazu, dass die Querrillen in benachbarten Spuren sehr nah zusammen kommen. Dies bedingt im Zusammenspiel mit den doch sehr weichen Blockspitzen Nachteile in der Abriebcharakteristik. Aus diesem Grund muss ein weiterer Profilentwurf hergestellt werden, der diese Schwäche vermeidet. Das Vorgehen ist analog zur ersten Variante. Zunächst werden die Einzelspuren am Prüfstand untersucht, bevor diese dann ebenfalls zu einem Gesamtprofil zusammengestellt werden. Die Fotos in Bild 4.2-48 zeigen den Vergleich der zweiten Variante mit dem Serienprofil.



**Bild 4.2-48:** Serienprofil (links) und Konzeptprofil „LV3-P2“ (rechts) im Vergleich

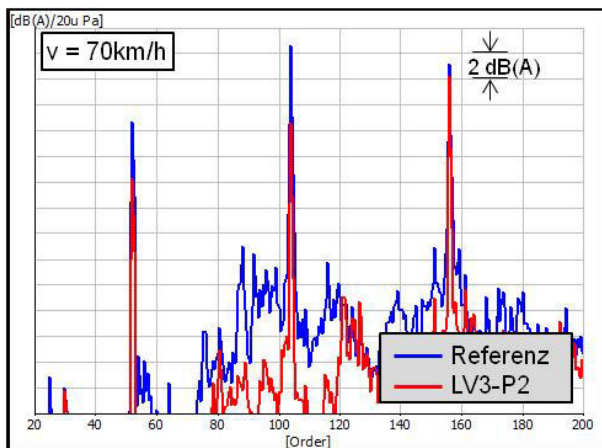
Im Gegensatz zu der ersten Variante handelt es sich bei dieser zweiten Variante bereits um einen Formreifen. Wie bereits zuvor erläutert sind Formreifen etwas lauter als identisch profilierte Schnitzreifen. Insofern ist dieser Vergleich der realistischere Fall. Die hier nicht dargestellte Auswertung der geschnitzten Einzelspuren spiegelt eine ähnliche Verbesserung wieder wie bei der ersten Variante. Somit kann man davon ausgehen, dass auch das Gesamtprofil auf einem ähnlichen Gesamtpegel liegen wird wie „LV3 – Profil1“.

Das nachstehende Diagramm zeigt die Gesamtpegel für den Ausrollversuch auf dem Trommelprüfstand. Das erzielte Ergebnis ist vergleichbar mit der ersten Variante. Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, werden auch hier je nach Geschwindigkeit Pegelreduzierungen von bis zu 7 dB(A) erzielt.



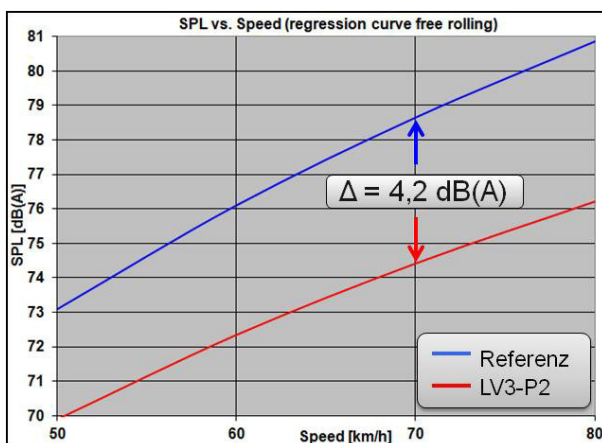
**Bild 4.2-49:** Vergleich Gesamtpegel: Referenz und „LV3 – Profil 2“ (Trommelprüfstand)

Das Ordnungsspektrum in Bild 4.2-50 verdeutlicht, wie die Blockharmonischen bei der neuen Profilvariante reduziert werden.



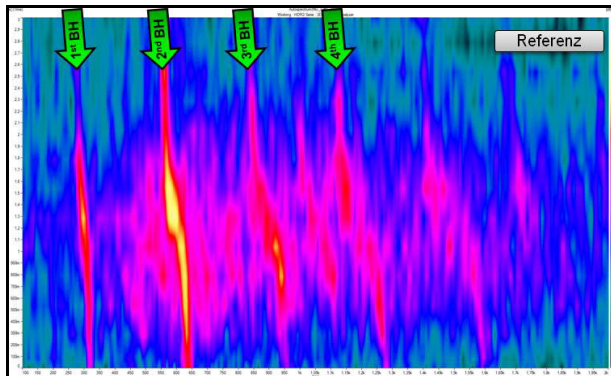
**Bild 4.2-50:** Vergleich Ordnungsspektrum: Referenz und „LV3 – Profil 2“

Wie schon bei der ersten Variante wird abschließend der Außenversuch auf dem Continental Testgelände durchgeführt. Auch hier wird eine klare Pegelreduzierung über den gesamten Geschwindigkeitsbereich erzielt. Das Ergebnis ist in Bild 4.2-51 dokumentiert.



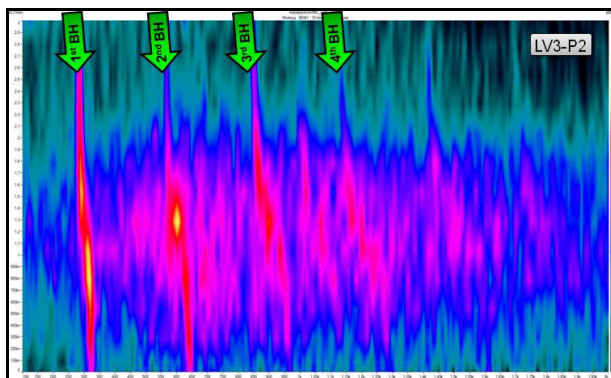
**Bild 4.2-51:** Vergleich Gesamtprofile im Straßenversuch

Zusätzlich zum Gesamtpegel über der Geschwindigkeit in Bild 4.2-51, der die Verbesserung bezogen auf den Serienreifen darstellt, zeigen die beiden Frequenzspektren in den Graphiken Bild 4.2-52 und Bild 4.2-53 qualitativ, wie sich die einzelnen Blockharmonischen zwischen dem Serienreifen und dem Entwicklungsprofil verändern.



**Bild 4.2-52:** Frequenzspektrum einer Rollmessung (70 km/h); Serienreifen

In den beiden Darstellungen ist auf der X-Achse die Frequenz und auf der Y-Achse die Zeit abgebildet. Die Farbskala gibt die Amplitude des Schalldruckpegels wider. Es gilt je heller die Farbe, umso höher der Schalldruck in dB(A).



**Bild 4.2-53:** Frequenzspektrum einer Rollmessung (70 km/h); Profil „LV3-P2“

Vor allem die Verbesserung der zweiten Blockharmonischen ist sehr deutlich ersichtlich. Diese ist auch bei dem Basisprodukt der wesentliche Grund für den hohen Gesamtpegel.

Diese Variante, die im Straßenversuch einen Gesamtpegel von 74,4 dB(A) bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h erzielt, stellt die Basis für die abschließende Weiterentwicklung zur Serienreife dar.

Diese Profilvariante wurde inzwischen an die zuständige Abteilung übergeben, um die erforderlichen Schritte bis zur Markteinführung durchzuführen. Derzeit laufen verschiedene Prüfungen, die mögliche Schwachstellen dieses Prototypen aufdecken sollen. Es zeichnet sich ab, dass noch kleinere Modifikationen erforderlich sein werden, die wahrscheinlich auch zu Lasten des Rollgeräusches gehen werden. Dennoch kann man davon ausgehen, dass das spätere Serienprodukt eine klare Verbesserung im Vergleich mit dem Vorgängerprodukt erzielen wird.

#### 4.2.4 Zusammenfassung

Nach der erfolgreichen Teilnahme an den ersten beiden Teilen des Forschungsverbundes „Leiser Straßenverkehr“ war es für die Continental Reifen Deutschland GmbH eine Selbstverständlichkeit, auch an dem 2010 gestarteten dritten Teil mitzuwirken. Aufbauend auf den Erkenntnissen der ersten beiden Teile, in denen Pkw-Reifen und Lkw-Antriebsachsreifen für den Langstreckeneinsatz untersucht wurden, sollte nun im dritten Projekt das Reifen-/Fahrbahngeräusch von Lkw-Antriebsachsreifen für den Einsatz im Regional-

verkehr untersucht werden. Gründe für die Auswahl eben dieses Reifentyps sind zum einen die hohen Geräuschpegel, die von diesen Reifen erzeugt werden sowie eine hohe Marktpräsenz. Diese beiden Punkte sorgen zusammen für ein hohes Reduktionspotential im realen Verkehrsgeschehen.

Das Teilvorhaben hatte im Wesentlichen zwei Zielsetzungen. Das erste Ziel war die Erarbeitung eines tiefgehenden Verständnisses um die Entstehungsmechanismen des Reifen-/Fahrbahngeräusches sowie dessen spektraler Zusammensetzung, welches bei zukünftigen Produkten eine reduzierte Abstrahlung von Rollgeräuschen ermöglicht. Das zweite Ziel ist die Umsetzung der Erkenntnisse in einem Profil-Prototyp für die nächste Produktgeneration von Antriebsachreifen im Regionalverkehr, welcher auch weiteren wesentlichen Qualitätskriterien genügt.

Um diese Ziele zu erreichen wurde nach der Betrachtung des aktuellen Wissensstandes und der Festlegung der technischen Anforderungen in einem strukturierten Ablauf zunächst die Blockstruktur einer einzelnen Profilspur untersucht und optimiert. Anschließend wurde das Zusammenspiel mehrerer Profilsuren untersucht und Verbesserungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Nachdem das erste Ziel mit den umfangreichen Studien zu den unterschiedlichen Elementen der Profilgestaltung erfolgreich erreicht wurde, konnten neue Gestaltungsrichtlinien für „leise“ Reifenprofile festgelegt und verschiedene lärmarme Gesamtprofilkonzepte entwickelt werden, deren Analyse letztlich zu dem am Ende von Abschnitt 4.4 vorgestellten Prototypen „LV3-P2“ führte. Dieser erzielte im Test nach UNECE R117.02 ein für diesen Reifentyp hervorragendes Ergebnis von 74,4 dB(A) bei 70 km/h. Dieses Antriebsachsprofil wird nun bis zur Marktreife weiterentwickelt und wird dann aller Voraussicht zu einer wirksamen Reduzierung des Verkehrslärms beitragen. Die geplante Markteinführung ist im Sommer 2015. Somit stellt das Teilvorhaben IV einen Erfolg im Streben nach einer Verringerung des Verkehrslärms dar.

## Literatur

- [1] E/ECE/324/Rev.2/Add.116/Rev.2-E/ECE/TRANS/505/Rev.2/Add.116/ Rev.2, 2011
- [2] E/ECE/324/Rev.1/Add.50/Rev.2/Corr.1 –E/ECE/TRANS/505/Rev.1/Add.50/Rev.2 /Corr.1, 2012
- [3] HOFMANN, R., v.d. KOOIJ, J.: Results from the Dutch noise Innovation Program Road traffic (IPG) and Roads to the Future (WnT), Proceedings of Internoise 2003

Der Schlussbericht zum vorliegenden Teilvorhaben III (Förderkennzeichen 19U10016 B) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.



## 4.3 Teilvorhaben IV

### Geräuschoptimierte Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge

Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin, Dipl.-Ing. Frank Stalter  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kropp, Dipl.-Phys. Alice Hoffmann  
Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer  
Müller BBM GmbH, Planegg

#### Inhalt

<b>4.3.1</b>	<b>Zielsetzung .....</b>	<b>178</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Stand der Technik .....</b>	<b>178</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Versuchsmethodik .....</b>	<b>180</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Grundsatzuntersuchungen am IPS .....</b>	<b>183</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Ergebnisse der Grundsatzuntersuchungen .....</b>	<b>186</b>
4.3.5.1	Einfluss geneigter Rillen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch.....	186
4.3.5.2	Einfluss der Umfangssteifigkeit auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch.....	190
4.3.5.3	Einfluss anisotroper Fahrbahntexturen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch .....	197
<b>4.3.6</b>	<b>Auralisierung .....</b>	<b>198</b>
4.3.6.1	Validierung der Auralisierung .....	199
4.3.6.2	Optimierung.....	203
<b>4.3.7</b>	<b>Psychoakustische Charakterisierung von Fahrzeuggeräuschen .....</b>	<b>209</b>
<b>4.3.8</b>	<b>Einfluss der Versuchssprache .....</b>	<b>213</b>
<b>4.3.9</b>	<b>Komplexe Verkehrssituationen .....</b>	<b>214</b>
<b>4.3.10</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>215</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>216</b>

### 4.3.1 Zielsetzung

Im Zuge der zunehmenden Verbreitung von Elektrofahrzeugen wird das Reifen-Fahrbahn-Geräusch an Bedeutung für die Verkehrsgeräuschentwicklung vor allem im urbanen Umfeld gewinnen. Dies liegt zum einen daran, dass E-Fahrzeuge über einen erheblich leiseren Antrieb verfügen. Zum anderen entwickeln E-Motoren aus dem Stand ein deutlich höheres Drehmoment als Verbrennungskraftmaschinen vergleichbarer Leistung, was in der Praxis zu höheren antriebsmomentbedingten Reifen-Fahrbahngeräuschen führen wird.

Reifen-Fahrbahngeräusche bestehen aus einem Anteil, der beim freien Rollen auftritt sowie zusätzlicher Geräuschentwicklung, wenn ein Antriebs- oder Bremsmoment auf den Reifen einwirkt. Entgegen den Vorgängen beim freien Rollen ist der momentinduzierte Anteil des Reifen-Fahrbahngeräuschs bislang vergleichsweise wenig erforscht. Es fehlen systematische Untersuchungen über den Einfluss von Reifen- und Fahrbahnparametern.

Geräuscharme elektrische Antriebe führen zu neuen Herausforderungen in der Verkehrssicherheit, da herannahende Fahrzeuge von Fußgängern und Radfahrern nicht mehr zuverlässig gehört werden können. Bislang wurde nicht erforscht, welchen Beitrag Reifen-Fahrbahn-Geräusche zur Erhöhung der Straßenverkehrssicherheit liefern können. Eine gezielte Geräuschabstrahlung beim Bremsen könnte die Aufmerksamkeit von Passanten vor herannahenden Fahrzeugen steigern.

Ziel des Teilvorhabens IV „Ansätze für die akustische Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge“ ist es einerseits, den Einfluss von Reifen- und Fahrbahnparametern auf antriebs- und bremsmomentinduzierte Reifen-Fahrbahngeräusche zu ermitteln und basierend darauf Designansätze für prototypisch geräuschverbesserte Reifen und Fahrbahnen vorzustellen (Karlsruher Institut für Technologie (KIT)).

Des Weiteren wird am Verständnis des Rollgeräusches gearbeitet. Dabei wird ein Fokus auf die Wahrnehmung gelegt. In Folge einer umfangreichen Literaturrecherche wird der Schwerpunkt auf zwei Aspekte gelegt: Zum einen wird eine Methode weiterentwickelt, die es möglich macht, im SPERoN Modell untersuchte Reifen-Fahrbahn Kontakte als Vorbeifahrgeräusch hörbar zu machen. Diese Methode wird auch als Basis für ein Programm verwendet, um komplexe Verkehrsgeräusch-Situationen zu generieren. Des Weiteren wird die Frage untersucht, wie Reifengeräusche wahrgenommen werden und welche Parameter die Angenehmheit und auch die Aktivierung durch das Geräusch beeinflussen (Chalmers University).

### 4.3.2 Stand der Technik

#### Kräfte am Reifen

Der Reifen ist Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrbahn und soll sowohl Radlast, Antriebs- und Bremskräfte auf der Straße abstützen als auch Unebenheiten der Straße abfedern. Treibt der Motor an, entstehen Umfangskräfte an den Reifen, die Differenzen zwischen Reifen- und Fahrzeuggeschwindigkeit erzeugen. Der relative Unterschied zwischen der Umfangsgeschwindigkeit des Rades und der Fahrzeuggeschwindigkeit wird als Schlupf bezeichnet:

$$s = \frac{v_R - v_{Fzg}}{v_{Fzg}} \quad (1.1)$$

mit:	s	Schlupf
	$v_R$	Umfangsgeschwindigkeit am Rad
	$v_{Fzg}$	Fahrzeuggeschwindigkeit

Die Schlupfwerte können hierbei positiv oder negativ sein. Negativer Schlupf wird bei Fahrzeugverzögerungen erreicht, der Wert von -100 % entspricht dann vollständig blockierenden Rädern. 0 % Schlupf bedeutet freies Rollen ohne jegliche Geschwindigkeitsunterschiede. Der Wert von +100 % bedeutet, dass die Umfangsgeschwindigkeit des Reifens doppelt so hoch ist wie die aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit.

Trägt man die auf die Radlast bezogene Umfangskraft, den sog. Umfangskraftbeiwert  $\mu$ , über dem Schlupf  $s$  auf, so findet man ein Maximum. Es liegt zwischen 8 - 15 % Schlupf und wird Haftreibungskoeffizient genannt. Unterhalb des Maximums haftet die Reifenoberfläche in großen Teilen der Bodenaufstandsfläche an der Fahrbahn. Oberhalb fällt der Reibungskoeffizient asymptotisch auf den niedriger liegenden Gleitreibungskoeffizient  $\mu_g$  ab. Ist dieser erreicht, gleitet der Reifen vollständig auf der Fahrbahn.

In der Bodenaufstandsfläche treten Relativgeschwindigkeiten auf, die sich lokal in Formänderungs- und Gleitschlupf aufteilen. Formänderungsschlupf ist der Anteil, der durch Scherung des Profilblockes entsteht. Werden Umfangskräfte am Reifenerzeugt, so entstehen Relativbewegungen zwischen dem unteren Teil des Profilblockes und dem Reifengürtel. Der Profilblock verformt sich elastisch und kommt nach dem Aus-treten aus der Aufstandsfläche wieder in seine ursprüngliche Lage zurück. Überschreitet die Kraft parallel zur Fahrbohnoberfläche die Haftkraft zwischen einem Profilblock und der Fahrbohn, setzt Gleiten ein. Die übertragene Kraft sinkt auf die Gleitreibungskraft ab und der Profilblock entspannt sich dadurch teilweise. Das Gleiten der Profilblöcke breitet sich mit zunehmender Umfangskraft vom hinteren Ende der Aufstandsfläche her nach vorne aus. Während der Reifen über einen in der Bodenaufstandsfläche befindlichen Profilklotz rollt, steigt die durch eine Reifenumfangskraft erzeugte Materialspannung immer weiter an, bis der Gleitvorgang beginnt. Es entsteht Gleitschlupf [3] [16] [12].

### Reifen-Fahrbohn-Geräusch

Beim Abrollen des Reifens auf der Fahrbohn entstehen in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbohn kontinuierlich Schwingungen (Profilklotzaufschlag, Deformation der Reifenstruktur durch die Textur der Fahrbohn, adhäsive Anregungsmechanismen, abruptes Entspannen der Profilblöcke am Auslauf der Aufstandsfläche), die sowohl als Körperschall ins Fahrzeugweitergeleitet werden, aber auch als Luftschall in die Umgebung emittiert werden können. Durch das Zusammenspiel von Reifen und Straße in der Kontaktfläche entstehen Druckschwankungen in der den Reifen umströmenden Luft. Neben Luftturbulenzen, Helmholtzresonanzen sowie Luftröhrenresonanzen in den zwischen Riefen und Fahrbohn eingeschlossenen Hohlräumen ist das Air-Pumping ein wesentlicher Geräuscherstehungsmechanismus. Da sich dieser Projektteil im Wesentlichen auf die antriebs- und bremsmomenterregten Reifen-Fahrbohn-Geräusche konzentriert, wird für die Erläuterung der anderen Entstehungsmechanismen auf die Literatur verwiesen [20].

Umfangskräfte verursachen am Reifen eine deutliche Erhöhung der Reifen-Fahrbohn-Geräusche. Steven und Pauls untersuchen mit einem speziellen Rollgeräuschmessgerät in [24] den Einfluss von Umfangskräften auf das Reifen-Fahrbohngeräusch bei Pkw. Für einen sprunghaften Drehmomentanstieg von 100 auf 700 Nm bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h finden sie eine Pegelerhöhung im Reifeneinlauf um 7 dB(A), im Reifenauslauf um 9 dB(A). Es wird dabei von einem linearen Zusammenhang zwischen Umfangskraft und Schalldruckpegel ausgegangen.

Denker zeigt in seiner Untersuchung zum Rollgeräusch und zur Fahrsicherheit einige Zusammenhänge zwischen Geräuscherhöhung und Fahrzeugbeschleunigung bei Vorbeifahrtmessungen auf. Zusätzlich zum reinen Rollgeräusch können beim Pkw Pegelzuwächse von 3 dB(A) und bei Lkw von 7 dB(A) nachgewiesen werden [4].

Eine weitere Veröffentlichung von Steven zeigt eine große Auswirkung des Drehmomentes auf das Reifen-Fahrbohn-Geräusch. In [25] beträgt der Pegelanstieg bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h und einem Antriebsmoment von 800 Nm bis zu 10 dB(A). Der Pegelanstieg fällt bei niedrigeren Geschwindigkeiten deutlich höher aus, da das Geräuschniveau hier generell niedrig ist. Bei hohen Geschwindigkeiten ist das Grundgeräusch höher und ein Pegelanstieg des Reifen-Fahrbohn-Geräuschs hat weniger starke Auswirkungen.

Die Veröffentlichungen von Haug [9] zeigen Einflüsse der Zugkraft auf die Reifengeräusche schwerer Nutzfahrzeuge auf. Als Ursachen für die Pegelerhöhungen wird das Auftreten von Schlupf und die damit verbundene verstärkte Schwingungsanregung des Reifens und die Erhöhung der Verspannungen in der Kontaktzone (verstärktes Ausschlagen der Profilelemente) genannt. Unter Zugkrafteinwirkung ist für das Reifen-Fahrbohn-Geräusch eine Kombination von Zugkraft, Schlupf und der Fahrgeschwindigkeit verantwortlich.

Bei Längsprofilreifen ergeben sich deutliche Pegeldifferenzen im Frequenzbereich zwischen 300 - 700 Hz, bei Traktionsprofilreifen reicht der relevante Frequenzbereich bis zu 2500 Hz [8] [9].

[10] untersucht die Einflüsse der Zugkraft auf das Reifen-Fahrbohn-Geräusch an einem vollständig gekapselten Mittelklasse-Pkw und einem Lkw der schweren Klasse. Die Überschussmomente von 417 Nm pro Rad am Pkw erzeugen Pegelerhöhungen bis zu 3 dB(A), die Mehrheit der Pegelerhöhungen bleibt jedoch unter 1 dB(A). Der untersuchte Traktionsreifen des Lkws hingegen erreicht Pegelerhöhungen bis zu 20 dB. Helfer zeigt ebenfalls, dass die Pegelerhöhung nicht ausschließlich von der Zugkraft, sondern auch von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist.

Die Untersuchungen von Olms zeigen mit dem Messanhänger MARGA Veränderungen des Schalldruckpegels bei Antriebsmomenten von 500 Nm auf. Die Differenz zwischen freirollenden und momentinduzierten Rad beträgt bis zu 5 dB(A), wobei der Pegelanstieg am Reifenauslauf erneut stärker ist als vorne. Des

Weiteren kann gezeigt werden, dass ein profilierter Reifen sensibler auf Antreiben reagiert, ein Slick-Reifen eher auf bremsendes Moment [17].

[7] untersucht für fünf verschiedene Reifen das Reifen-Fahrbahn-Geräusch unter Umfangskräften bis zu 5940 N. Da unter Antriebsmoment der Anteil an Gleitschlupf in der Kontaktzone zwischen Reifen und Fahrbahn zunimmt, bewirkt das Gleiten eine Zunahme der hochfrequenten Geräuschanteile. Die Versuche mittels Glattreifen (schersteif, großer Pegelanstieg) und Querprofilreifen (wenig Gleiten aufgrund Klotzverformung, kleine Geräuscherhöhung) bestätigen dies. Bei steigenden Umfangskräften erhöht sich das Reifen-Fahrbahn-Geräusch im Bereich von 2500 Hz bis 3400 Hz deutlich. Umfangskräfte tragen somit zu einer deutlichen Pegelerhöhung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches bei.

### **Geräuschemissionen von Elektrofahrzeugen**

Elektrofahrzeuge sind vor allem bei geringer Fahrgeschwindigkeit deutlich leiser als Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb, da gerade bei Beschleunigungsvorgängen die störenden Motorgeräusche entfallen. Da Elektrofahrzeuge aus dem Stillstand heraus jedoch volles Drehmoment abrufen können, entstehen dementsprechend auch hohe Antriebskräfte ab 0 km/h. Hohe Antriebskräfte erzeugen wie beschrieben eine Pegelerhöhung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches. Ursachen und Abhilfe werden in diesem Teilvorhaben behandelt.

Andererseits wird aktuell diskutiert, ob Elektrofahrzeuge aufgrund ihrer Geräuscharmheit bei niedrigen Geschwindigkeiten mit Warnsignal aussendenden Geräuschgeneratoren ausgestattet werden müssen, um Passanten bei Fahrzeugannäherung zu warnen. In diesem Teilvorhaben wird ebenfalls diskutiert, inwiefern umfangskraft- und richtungsabhängig das vorhandene Reifen-Fahrbahn-Geräusch gestaltet werden kann.

#### **4.3.3 Versuchsmethodik**

##### **Technische Beschreibung des Innentrommelprüfstandes (IPS)**

Der Innentrommelprüfstand des Instituts für Fahrzeugsystemtechnik am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik besteht aus einer zylindrischen Trommel mit einem Innendurchmesser von 3,8 m. Durch eine entsprechende Radaufhängung können verschiedene Reifen bis auf Geschwindigkeiten von 200 km/h beschleunigt werden. Die Trommelkrümmung der Fahrbahn beeinflusst die Reifen-Fahrbahn-Interaktion aufgrund des großen Durchmessers nur geringfügig. Über hydraulische Aktoren und Regeleinrichtungen können Vertikal- und Seitenkräfte bis 15 kN aufgebracht werden. Der an der Radführung angebaute Hydraulikmotor kann zusätzlich antreibende oder bremsende Umfangskräfte von bis zu 6000 N auf den Reifen aufbringen. Kräfte und Momente in Radmitte können über eine 6-Komponenten-Messnabe aufgezeichnet und ausgewertet werden. Als Fahrbahnbeläge können sowohl speziell angefertigte Beton- und Asphaltbeläge, aber auch klassischer Safety Walk montiert werden. Zusätzlich können auf dem Innentrommelprüfstand Nassmessungen bis zu einer Wasserhöhe von 4 mm sowie Eis- und Schneemessungen bei bis zu -20 °C durchgeführt werden [5].

##### **Geräuschoptimierung des Innentrommelprüfstandes (IPS)**

Während des Verbundprojektes Leiser Straßenverkehr 2 untersucht [7] den Einfluss des Antriebsmomentes auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Hierbei zeigt sich, dass der Hydraulikmotor, der das Antriebsmoment auf den Reifen überträgt, einen großen akustischen Störfaktor darstellt und nicht alle Frequenzbereiche ausgewertet werden konnten.

Vor Beginn der in diesem Projekt durchzuführenden Messungen werden zunächst schallisolierende und schalldämpfende Maßnahmen zur Reduktion des Störgeräusches durch das Hydraulikaggregat durchgeführt.

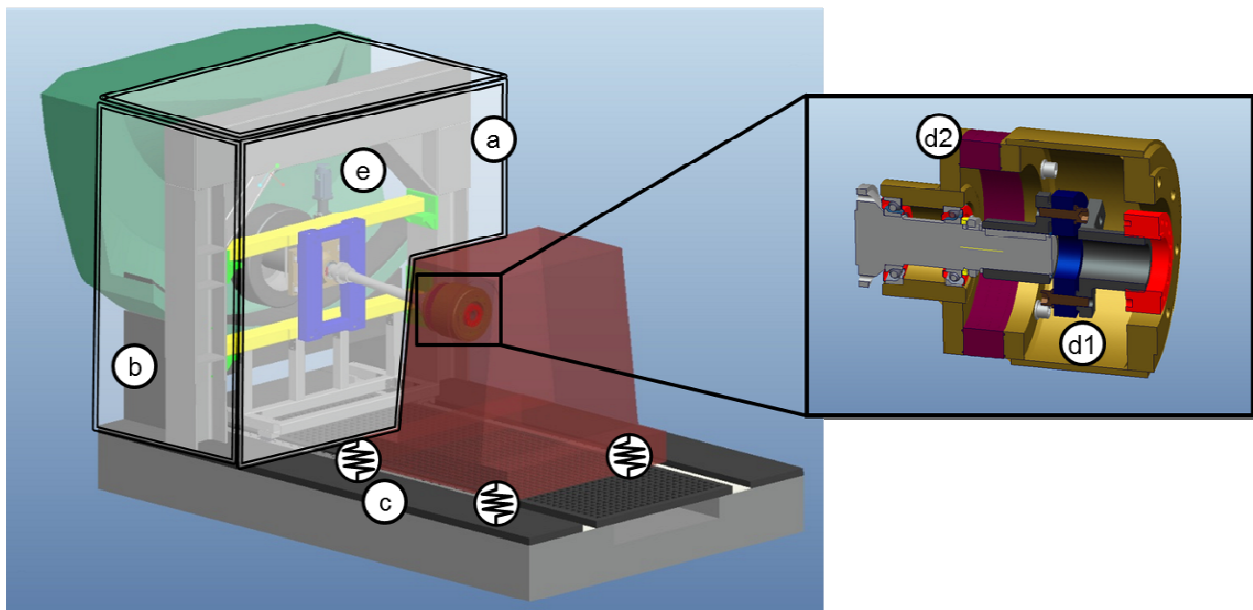
Die Geräuschoptimierung setzt sich dabei aus folgenden Abschnitten zusammen:

- a) Trennung des Prüfstandes in Akustikmesskammer und Antriebskammer mittels akustischer Trennwand,
- b) Auskleidung der Kammern mit Schallabsorbieren,
- c) Entkopplung des Antriebsaggregats vom Fundament mittels Elastomerlagern,
- d) Entkopplung der Antriebswelle vom System Reifen / Felge sowie der
- e) Substitution des hydraulischen Radlastaktors durch einen elektrisch-mechanischen Linearantrieb.

Erste Maßnahme zur Schallreduktion ist das Einziehen einer akustischen Trennwand in den Innentrommelprüfstand (IPS), sodass der Prüfraum in eine Akustikmesskammer sowie eine Antriebskammer aufgeteilt wird [22]. Hierzu wurde eine partiell demontierbare Trennwand (a) mit Personenluke installiert, deren Schallabsorptionsgrad nach DIN 52212 bei 0,9 bei einer Frequenz von 500 Hz liegt. Damit eine weitere Schallpegelreduktion in der Akustikmesskammer erzielt werden kann, werden sowohl auf der Radseite als auch auf der Motorseite alle Wände mit schallabsorbierenden Platten (b) verkleidet. Je mehr Schallanteile in der Antriebskammer absorbiert werden, umso weniger Schall wird in die Akustikmesskammer übertragen (vgl. Bild 4.3-1).

Um eine Körperschallübertragung in den Innenraum der Akustikmesskammer zu unterbinden, wurde das Antriebsaggregat vom Fundament mittels elastischer Maschinenlagern (c) entkoppelt. Die Eigenfrequenz der Anordnung liegt im Bereich von 18 Hz, was einer Reifengeschwindigkeit von circa 130 km/h entspricht. Da die durchzuführenden Messungen auf den innerstädtischen Verkehr abzielen, sind Reifengeschwindigkeiten bis zu 80 km/h (11,2 Hz) ausreichend. Dieser Anregungsbereich liegt deutlich im unterkritischen Bereich der Eigenfrequenzüberhöhung der Maschinenlagerung. Berücksichtigt man des Weiteren die 7-fache Pulsation der Hydraulikeinheit, beträgt die niedrigste Geschwindigkeit, die angefahren werden darf, 24 km/h (3,3 Hz). Diese Radgeschwindigkeit entspricht einer Pulsationsfrequenz von 23 Hz und liegt somit im überkritischen Bereich der Eigenfrequenzkennlinie der Maschinenfüße. Es können somit alle in diesem Projekt erwünschten Fahrgeschwindigkeiten angefahren werden (vgl. Bild 4.3-1).

Eine weitere mögliche Körperschallübertragung kann über die durch einen Durchbruch in der akustischen Trennwand geführte Abtriebswelle erfolgen. Auch dieser Schwingungsübertragung wurde mittels Elastomerlagern verringert. Die Abtriebswelle selbst wurde mit einer Gelenkwelle (d1) mechanisch verbunden, sodass sowohl die Pulsationsschwankungen des Hydraulikmotors als auch die Körperschallübertragung in die Akustikmesskammer verringert wurden. Für die konkrete Auslegung der Gelenkwelle wurde eine Schwingungsüberprüfung des gesamten Antriebsstanges von der Motorwelle des Hydraulikmotors bis zum Reifen durchgeführt. Die Resonanzfrequenz des kompletten Systems mit eingebauter Gelenkwelle liegt mit circa 63 Hz deutlich über der maximalen Drehfrequenz des Reifens von 11,2 Hz bei 80 km/h. Bei einer Geschwindigkeit von 60 km/h liegt die Pulsationsfrequenz des Hydraulikaggregats zwar im Bereich von 63 Hz, Beschleunigungsmessungen an der Radnabe zeigten allerdings, dass sich die erste ausgeprägte Anregungsamplitude bei der doppelten Pulsationsfrequenz von 117 Hz befindet und somit im überkritischen Bereich liegt. Kritisch ist demnach eine Geschwindigkeit von 30 km/h mit einer dominanten Pulsationsanregungsfrequenz von 58 Hz. Es zeigte sich jedoch, dass die Störungen klein und damit tolerabel sind. Zur Verringerung der Strukturschalleitung über die Kugellager der Wellenlagerung auf die bereits entkoppelte Welle wurde dieser Teil der Lagerung mit einer Dämmeinheit entkoppelt (d2). Die Ausgangswelle ist somit vollständig entkoppelt und verhindert sowohl eine Körperschallübertragung als auch eine Abstrahlung von Störschall in die Akustikmesskammer (vgl. Bild 4.3-1).



**Bild 4.3-1:** Akustische Optimierungen am Innentrommelprüfstand des KIT

Schlussendlich wird die Radlast nicht durch pulsierende und Störschall abstrahlende Hydraulikaktoren aufgebracht, sondern mittels einem elektrisch angetriebenem Kugelgewindetrieb, der nach erfolgter Einstellung der Radlast geklemmt werden kann.

Durch die eingebaute Schallschutzwand wurde der Prüfstand in eine Mess- und in eine Antriebskabine aufgeteilt. Die schallweiche Akustikauskleidung der Antriebskammer (Bild 4.3-2) absorbiert den Störschall des Hydraulikaggregats deutlich. Da die akustische Trennwand auf der Seite der Antriebskammer schallhart ausgeführt ist, wird der Großteil des Störschalles reflektiert und nicht in die Akustikmesskammer (Bild 4.3-3) geleitet. Die Akustikmesskammer ist vollständig an allen Wänden, dem Boden und der Decke mit Absorptionsmodulen verkleidet, sodass Reflexionen im Raum deutlich reduziert sind.

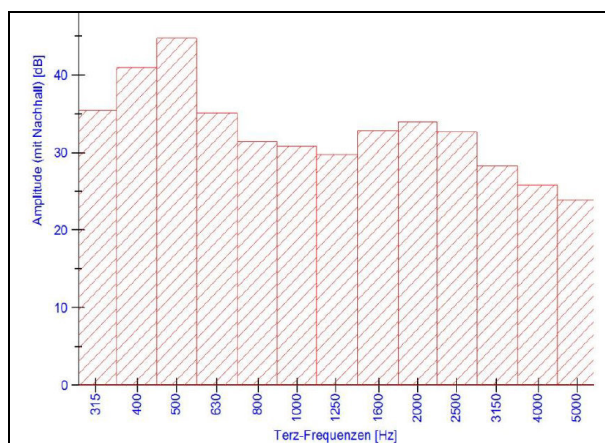


**Bild 4.3-2:** Antriebskammer und Trennwand mit Schallabsorbern



**Bild 4.3-3:** Akustikmesskammer mit Schallabsorbern

Untersuchungen zur Wirkung der Akustikoptimierung zeigen, dass die Schallabstrahlung der Hydraulik in den Messraum erheblich reduziert werden konnte. Die Messung des Bauschalldämmmaßes nach ISO 140-4 zeigt eine Pegelreduktion von über 25 dB über den gesamten Frequenzbereich (Bild 4.3-4). Die Störschallanteile des Hydraulikmotors sind lediglich im niederfrequenten Bereich unter 200 Hz noch nennenswert. Über den weiteren Frequenzverlauf lassen sich keine nennenswerten Störeinflüsse durch die Hydraulik feststellen, sodass mit der akustischen Umrüstung der komplette Frequenzbereich von 200 Hz bis 12.000 Hz kontinuierlich ausgewertet werden kann.



**Bild 4.3-4:** Bauschalldämmmaß nach der akustischen Optimierung

### Optimierung der beschleunigten Vorbeifahrt

Die beschleunigten Vorbeifahrten zur Verifizierung der gefundenen Reifenoptimierungen wurden auf der NATO Airbase Geilenkirchen durchgeführt. Auf diesem Gelände wurden im Zuge des Projekts „Leiser Straßenverkehr 3“ zahlreiche Fahrbahnbeläge gebaut, sodass an einem Ort viele unterschiedliche Fahrbahnen untersucht werden können. Im Rahmen dieses Teilvorhabens wurden die Beläge SMA 8, LOA 5D und PMA 5 untersucht. Für die Vorbeifahrten wurde ein am KIT elektrifizierter Pkw verwendet. Das Fahrzeug erlaubt einen direkten Eingriff in das Motormanagement. Nach Durchfahren einer Lichtschranke wird

automatisch ein vordefiniertes Motordrehmoment angelegt, sodass äußerst reproduzierbare Umfangskräfte und Fahrzeuggeschwindigkeiten an der Messstelle dargestellt werden können. Ferner wird über Lichtschranken eine Synchronisation zwischen den Messsystemen im Fahrzeug und an der Außenmessstelle gewährleistet (s. Bild 4.3-5).



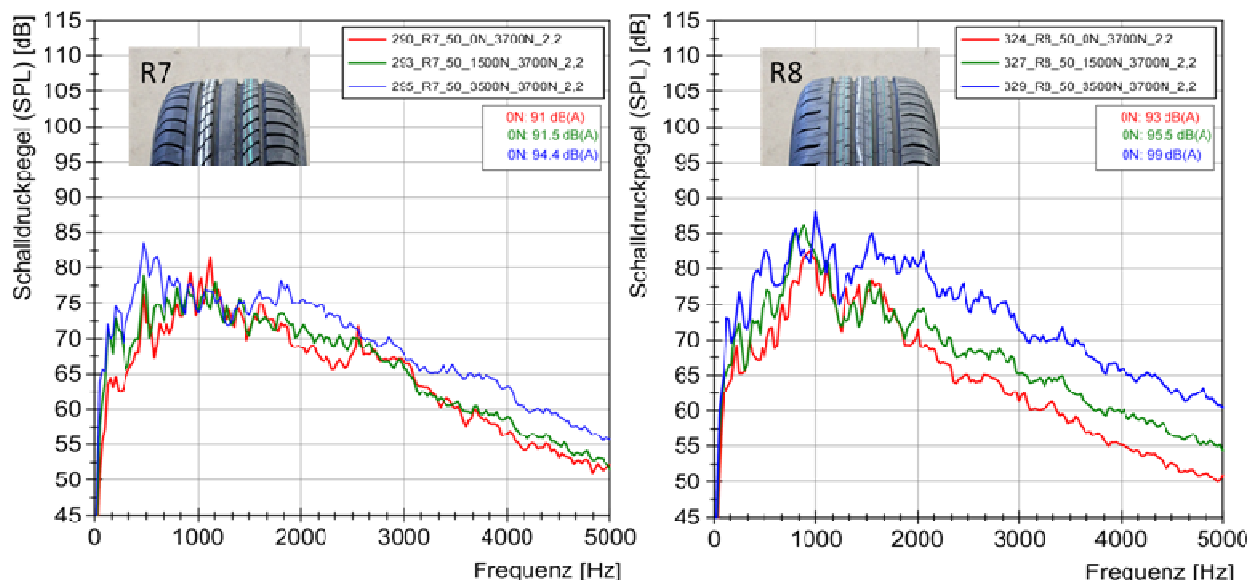
**Bild 4.3-5:** Vorbeifahrt auf dem Testgelände mit Elektrofahrzeug

#### 4.3.4 Grundsatzuntersuchungen am IPS

##### Grundlegende Effekte

Wie bereits die Untersuchungen im Rahmen des Projektes „Leiser Straßenverkehr 2“ gezeigt haben, steigt der Schalldruckpegel des Reifen-Fahrbahn-Geräusches deutlich unter Umfangskraft an. Mit Hilfe von Bild 4.3-6 soll diese Zunahme nochmals verdeutlicht werden. Sowohl bei Serien-Reifen R7 als auch bei R8 erkennt man eine deutliche Zunahme der Pegelverläufe zwischen dem freirollenden Reifen (rote Messkurve) und den Messreihen unter Antriebskraft (grüne & blaue Messkurven). Dies führt ebenfalls zu einer Zunahme des Gesamtpegels. Der Reifen R7 ist bei 3500 N Umfangskraft somit um 3 dB, der Reifen R8 um 3,8 dB im Geräuschpegel erhöht. Analysiert man die Frequenzverläufe, wird ersichtlich, dass bis auf den Frequenzbereich um die 1000 Hz der komplette Frequenzbereich um bis zu 10 dB angehoben ist.

Nachfolgend werden unter Verwendung von Schnitzreifen Ursachen und mögliche Beeinflussung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches unter Antriebsmoment untersucht.



**Bild 4.3-6:** Vergleich der Serienreifen R7 & R8 bei 50 km/h und Antriebskräften von 0 N, 1500 N und 3500 N

## Versuchsdurchführung

Für die Grundsatzuntersuchungen wurden zahlreiche Glatt- und Schnitzreifen bei Geschwindigkeiten von 30 km/h, 50 km/h und 80 km/h analysiert. Durch Variation der Blockanzahl auf dem Reifenumfang sowie durch vier unterschiedliche Gummimischungen konnten unterschiedliche Umfangssteifigkeiten realisiert werden. Für realitätsnahe Untersuchungen am Prüfstand wurde eine Radlast von 3700 N gewählt. Diese Radlast ergibt sich aus dem Fahrzeuggewicht des KIT-Elektrofahrzeuges, mit welchem im Anschluss an die Versuche am IPS auch die Vorbeifahrtmessungen durchgeführt werden. Die maximal übertragbaren Umfangskräfte sind durch den maximalen Kraftschlussbeiwert bestimmt und betragen 3500 N. Zwischen freierrollendem Zustand mit 0 N Umfangskraft und der Maximalumfangskraft wurden Zwischenwerte in 500 N- oder 1000 N-Schritten analysiert. Zunächst wurde als Fahrbahnoberfläche ein Safety Walk ausgewählt, damit der Reifen möglichst wenig fahrbahnseitig angeregt wird und die reinen Reifeneigenschaften untersucht werden können. Im Anschluss daran werden auch Akustikmessungen auf realen Fahrbahnen durchgeführt.

Insgesamt werden am IPS neun Mikrofonpositionen ausgewertet. Die Messpositionen aus dem Nahfeldmessverfahren der ISO 11819-2 können jedoch aufgrund der Trommelkrümmung nicht realisiert werden, sodass hier verkürzte Abstände vorliegen (vgl. Bild 4.3-7). Die Abtastrate der jeweiligen Mikrofone wurde auf 25,6 kHz festgelegt. Bevor eine Messung startet, wird Radlast, Geschwindigkeit und Umfangskraft eingeregelt, sodass ein stationärer Zustand entsteht. Nach Einschwingen des Systems wird dann für eine Dauer von 10-15 Sekunden aufgezeichnet.

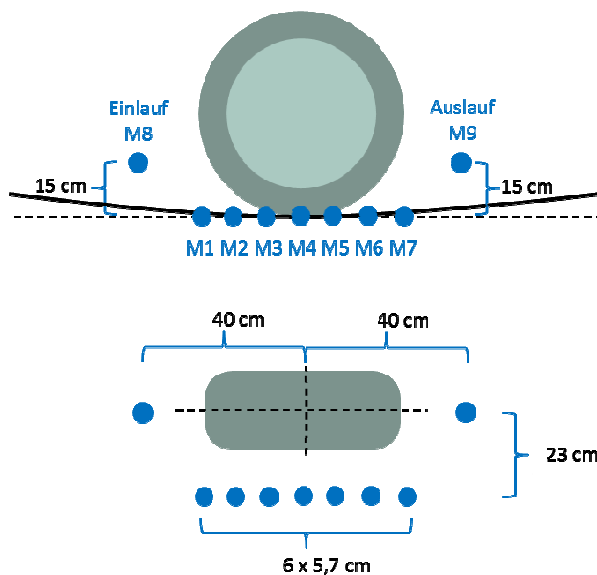


Bild 4.3-7: Mikrofonpositionen im Ein- und Auslauf

## Reifenprofile & Hypothesen

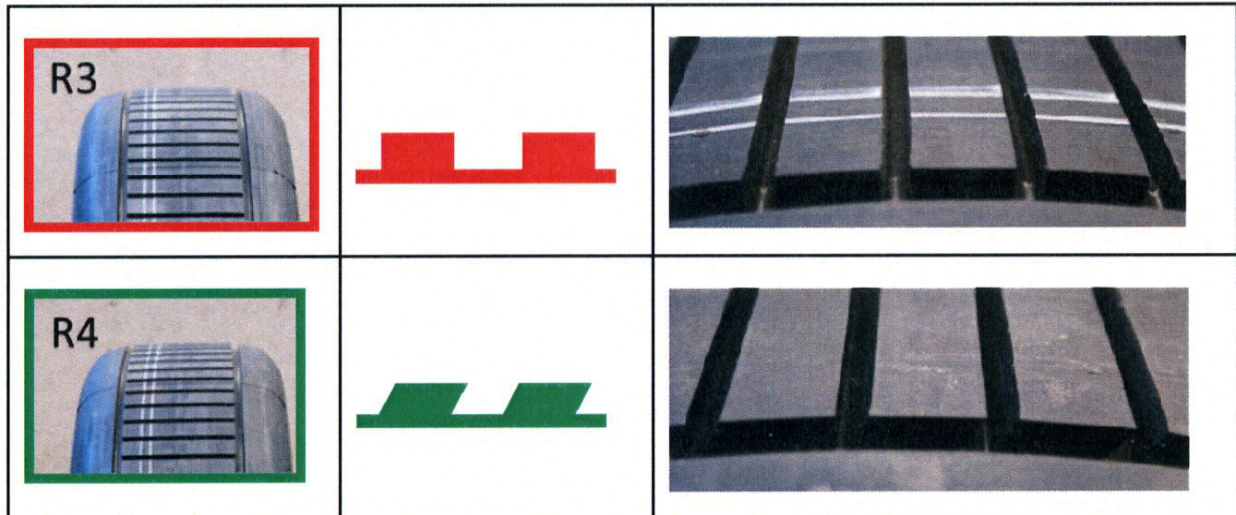
In diesem Teilkapitel werden zwei unterschiedliche Ansätze zur Geräuschreduktion erarbeitet:

- Beeinflussung des abgestrahlten Reifen-Fahrbahn-Geräusches mit Hilfe von gegen den Reifenradius geneigten (Quer-) Rillen;
- Analyse der Entstehung und Reduktion des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs unter Antriebsmoment durch Veränderungen der Profilklotzsteifigkeit.

## Geneigte Rille

Die Idee der geneigten Rille ist in nachfolgendem Schaubild in Tabelle 4.3-1 dargestellt. Die Rillen werden nicht wie auf herkömmliche Art senkrecht zur Reifenoberfläche eingebracht, sondern in Umfangsrichtung geneigt. Diese Rillen haben je nach Anordnung einen großen Einfluss auf die momenteninduzierten Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Es wird gezeigt, dass diese Asymmetrie des Reifenprofils zu einer Asymmetrie des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs hinsichtlich der Drehrichtung und der Richtung der Umfangskraft führt.





Tab. 4.3-1: Vergleich der konventionellen, radial orientierten Rille zur in Umfangsrichtung geneigten Rille















Im Bereich der geneigten Rillen sind insgesamt drei Optimierungsschleifen untersucht worden. Zunächst wurden einfache Profile (R4) untersucht, um das generelle Potential der geneigten Rillen aufzuzeigen. Bei Reifen R4b und R4c wird die Neigungsrichtung der Rillen untersucht, um dann schlussendlich die gewonnenen Erfahrungen in den Reifen R10a einfließen lassen zu können, der bei unterschiedlich geneigten Profilsuren bereits ein bezüglich der Umfangslänge der Profilblöcke randomisiertes Reifenprofil aufweist.

					
<p>R3: Querrillen in einzelner Profilspur, radiale Flanke, Referenz zu R4</p>	<p>R4: Querrillen in einzelner Profilspur, geneigte Flanke</p>	<p>R4b: Querrillen in zwei Profilsuren, geneigte Flanke, identisch ausgerichtet</p>	<p>R4c: Querrillen in zwei Profilsuren, geneigte Flanke, gegenläufig ausgerichtet</p>	<p>R10a: gefeilte Profilsuren, vier Spuren, randomisierte Blocklänge, geneigte Flanke, gegenläufig ausgerichtet</p>	<p>R10b: gefeilte Profilsuren, vier Spuren, randomisierte Blocklänge, radiale Flanke, Referenz zu R10a</p>

Tab. 4.3-2: Schnitzmuster zur geneigten Rille

### Einfluss der Umfangssteifigkeit

Der Einfluss der Umfangssteifigkeit wurde sowohl mittels Variation der Profilklotzgrößen als auch mit einer Variation der Gummimischung untersucht. Zunächst wurde in der ersten Reifengruppe (R1, R2, R3, R5a) der generelle Einfluss der Umfangskraft auf das Reifengeräusch untersucht, um dann mit den Reifen R5c und R5e und den bezüglich der Profilklotzlänge in Umfangsrichtung randomisierten Reifen R9a und R9b näher an ein reales Reifenprofildesign zu gelangen. Die Reifen R11a-c und R12a-c unterscheiden sich durch die Shorehärten der Gummimischungen und somit in den Umfangssteifigkeiten.

 R1: Glattreifen	 R2: einfache Querprofilierung ohne Längsrillen	 R3: Querprofilierung mit zwei Längsrillen	 R5a: gefeiltes Profil mit zwei Längsrillen, kurze Profilklötze
 R5c: gefeiltes Profil mit vier Längsrillen, kurze Profilklötze	 R5e: gefeiltes Profil mit vier Längsrillen, lange Profilklötze	 R9a: gefeiltes Profil mit vier Längsrillen, randomisierte & kurze Profilklötze	 R9b: gefeiltes Profil mit vier Längsrillen, randomisierte & lange Profilklötze
 R11a	 R11b	 R11c	R11a – R11c gefeiltes Profil mit vier Längsrillen, kurze Profilklötze Variation Gummimischung weich a, mittel b, hart c
 R12a	 R12b	 R12c	R12a – R12c gefeiltes Profil mit vier Längsrillen, lange Profilklötze Variation Gummimischung weich a, mittel b, hart c

Tab. 4.3-3: Schnitzmuster der Reifenthematik Umfangssteifigkeit

### 4.3.5 Ergebnisse der Grundsatzuntersuchungen

#### 4.3.5.1 Einfluss geneigter Rillen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch

##### Untersuchungen am IPS und bei der Vorbeifahrt

Eine Gegenüberstellung der Reifen R3 und R4 zeigte sehr früh, dass die geneigte Rille je nach Reifendrehrichtung und Art der Umfangskraft im Gegensatz zu der radialen Rille große Unterschiede im abgestrahlten Schallpegel aufweist. Obwohl in der Literatur [20] keine Unterschiede zwischen Antreiben und Bremsen im Pegelverlauf der untersuchten Serienreifen festgestellt werden, zeigen die geneigten Rillen einen deutlichen Unterschied zwischen angetriebenem und gebremstem Reifen.

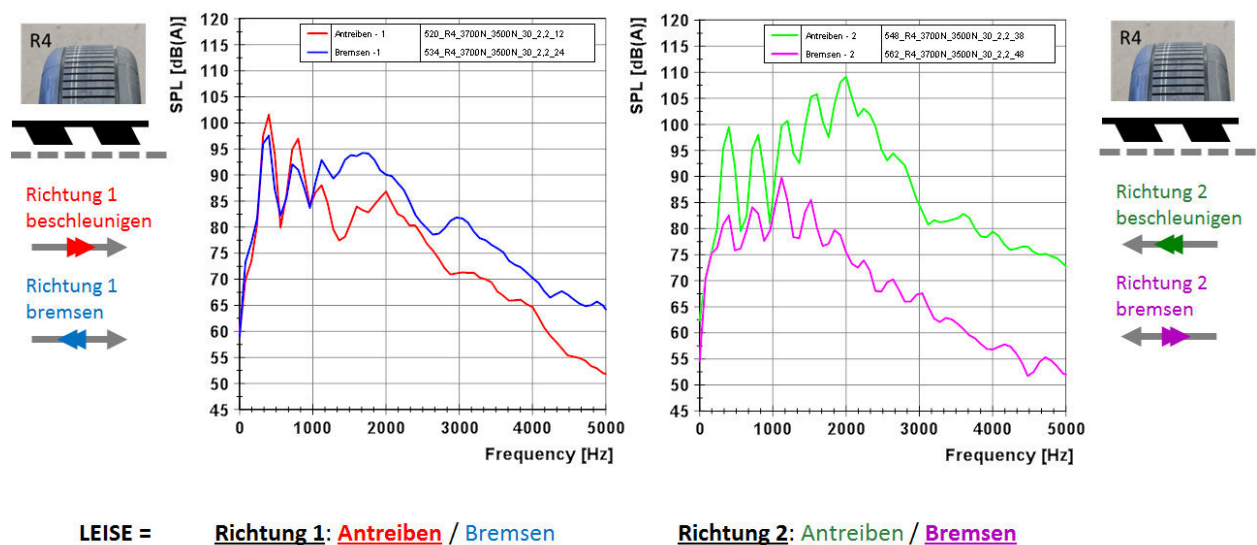


Bild 4.3-8: Frequenzverläufe des Reifens R4 bei unterschiedlichen Laufrichtungen und Fahrzuständen „Antreiben“ bzw. „Bremsen“. Die Bewegungsrichtung der Fahrbahn (gestrichelte graue Linie) gegenüber der Radmitte ist dargestellt durch graue Pfeile, die vom Reifen auf die Fahrbahn ausgeübte Antriebs- und Bremskraft durch Doppelpfeile.

Es konnte festgestellt werden, dass je nach Montagerichtung bzw. Drehrichtung der mit geneigten Querrillen versehenen Reifen eine gezielte Absenkung bzw. Erhöhung der Schallabstrahlung beim Antreiben oder Bremsen erreicht werden kann (vgl. Bild 4.3-8). Es zeigt sich, dass Richtung 1 im Fahrzustand „Antreiben“ und Richtung 2 im Fahrzustand „Bremsen“ geräuschärmer ist.

Da Untersuchungen von Ludwig [15] zeigen, dass während des Bremsvorganges die äußeren Profilsuren eines Reifens intensiver beansprucht werden, wird beim Reifen R4c das geneigte Profil wie in Richtung 2 auf der äußeren Profilsur installiert. Ludwig zeigt des Weiteren, dass ein Antriebsmoment zu einem Mitlenabtrieb am Reifen führt. Daraus lässt sich ableiten, dass der Reifen beim Antreiben in der mittleren Profilsur mehr beansprucht wird. Richtung 1, welche beim Antreiben als leiser gemessen wurde, wird somit in der Reifenmitte installiert. Dieser neue Reifen sollte somit sowohl im antreibenden als auch im bremsenden Fall geräuschärmer sein als ein Reifen, bei dem beide Profilsuren der geneigten Rillen in die gleiche Richtung weisen (vgl. Bild 4.3-9 & Bild 4.3-10).



**Bild 4.3-9:** Montagerichtungen am R4

**Bild 4.3-10:** Versuchsreifen R4b & R4c: geneigte Rillen auf mittlerer und äußerer Profilsur

Für den akustisch verstärkenden Warneffekt werden die äußeren Profilsuren, die während des Bremsvorganges stärker belastet werden wie in der Montagerichtung 1, die inneren Profilsuren werden wie in Montagerichtung 2 eingebracht, um auch während des Beschleunigungsvorganges stärkere Geräusche auszusenden. Diese Anordnung bietet die Möglichkeit, im innerstädtischen Bereich Passanten vor Elektrofahrzeugen zu warnen, die sich im Beschleunigungs- oder Bremsvorgang befinden.

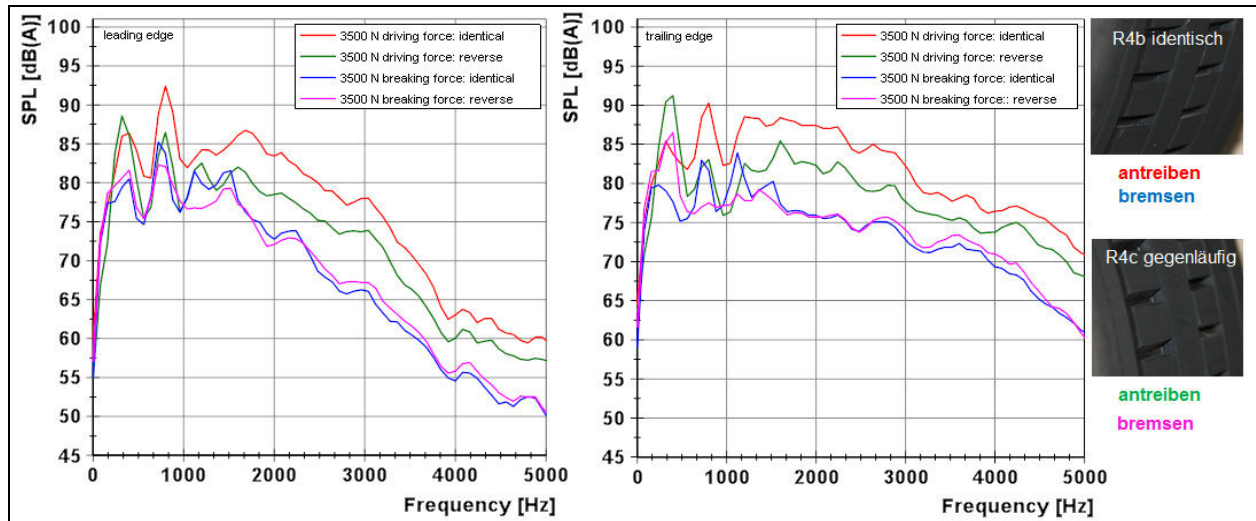
In Bild 4.3-11 ist der Frequenzverlauf für eine Mikrofonposition im Einlauf als auch im Auslauf in den Betriebszuständen „Antreiben“ und „Bremsen“ für die beiden Versuchsreifen R4b und R4c dargestellt.

Die Analyse des Bremsvorganges (blauer & lilafarbener Verlauf) zeigt keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Reifen. Dies ist so auch zu erwarten, da die äußere Profilsur, die beim Bremsen generell mehr belastet wird, bei beiden Reifen die gleiche Neigungsorientierung hat. Hier kann festgehalten werden, dass die Orientierung der Mittelspur (identisch oder gegenläufig) beim Bremsvorgang keine Auswirkung auf die Geräuschentwicklung hat.

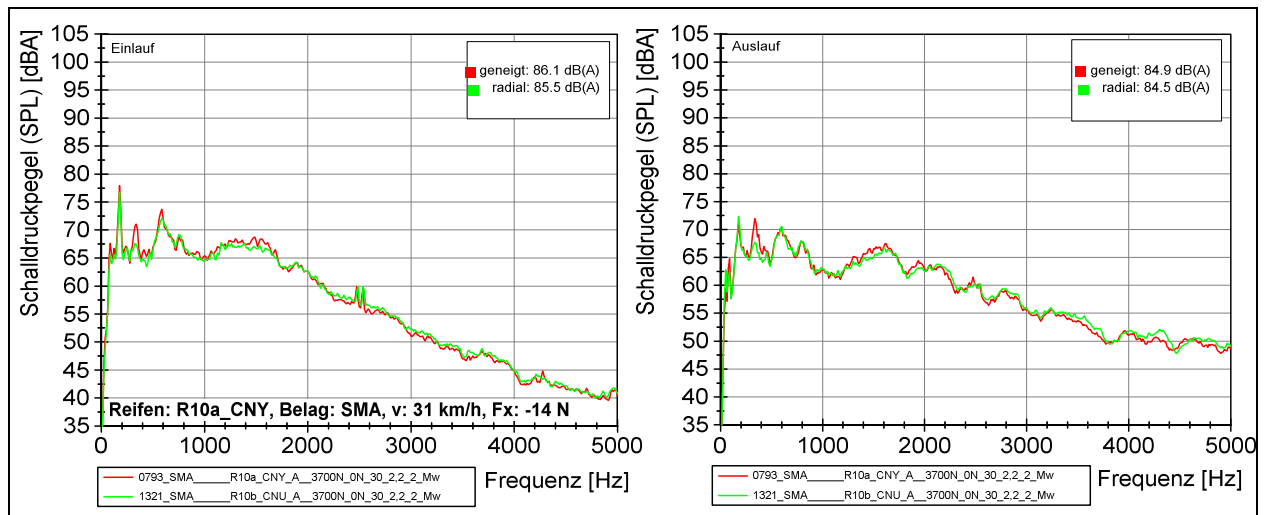
Die äußere Profilsur jedoch ist maßgeblich für die Geräuschentwicklung unter Antriebsmoment verantwortlich. Der Fahrzustand „Antreiben“ (Reifen R4b rot, R4c grün) bewirkt deutliche Schallpegelunterschiede zwischen den beiden Reifen (vgl. Bild 4.3-13). Da beim Antreiben die innere Spur mehr beansprucht wird, zeigen die unterschiedlich orientierten Querrillen hier die bereits bei Reifen R4c gefundenen Geräuschminderungspotentiale. Reifen R4c mit seinem gegenläufigen Profil ist über den kompletten Frequenzbereich zwischen 3 - 5 dB leiser als Reifen R4b.

Die Untersuchungen mit den Reifen R4b und R4c zeigen, dass bereits eine einzelne Profilsur ausreicht, um das abgestrahlte Reifengeräusch je nach Lastfall deutlich zu beeinflussen. Bei den Reifen mit geneigter Rille konnte gezeigt werden, dass das Reifen-Fahrbahn-Geräusch beim Beschleunigen im Vergleich zum Bremsen reduziert werden kann, wenn geneigte Rillen (bisher nur auf zwei Spuren) eingebracht sind.

Für einen seriennahen Reifen müssen die Profilklötze auf alle Spuren erweitert und zugleich in ihrer Umfangslänge randomisiert werden (R10a und R10b). Untersuchungen auf realen Belägen (hier SMA 8) zeigen im freirollenden Zustand für beide Reifen identische Verläufe im Ein- und Auslauf. Eine Neigung der Rillen wirkt sich also nicht auf die Schallabstrahlung bei Konstantfahrten aus (vgl. Bild 4.3-12). Dies ist positiv zu werten, da ein Profildesign gesucht wurde, welches ausschließlich bei Fahrzeugannäherung Warnsignale aussenden soll, jedoch nicht im freirollenden Verkehr.

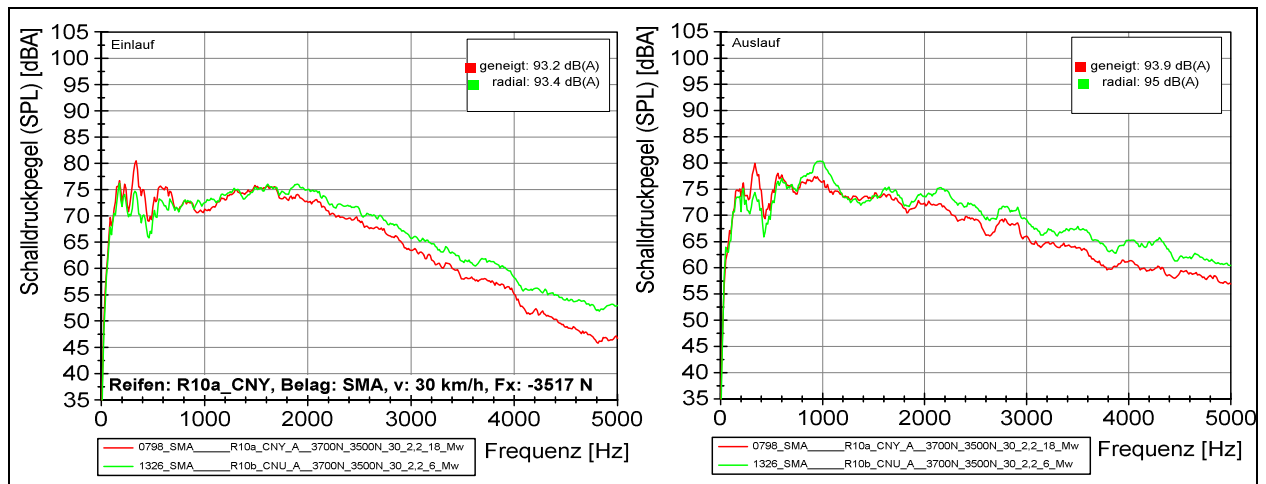


**Bild 4.3-11:** IPS Messung im Einlauf (links) & Auslauf (rechts) für die Reifen R4b & R4c unter Antreiben & Bremsen



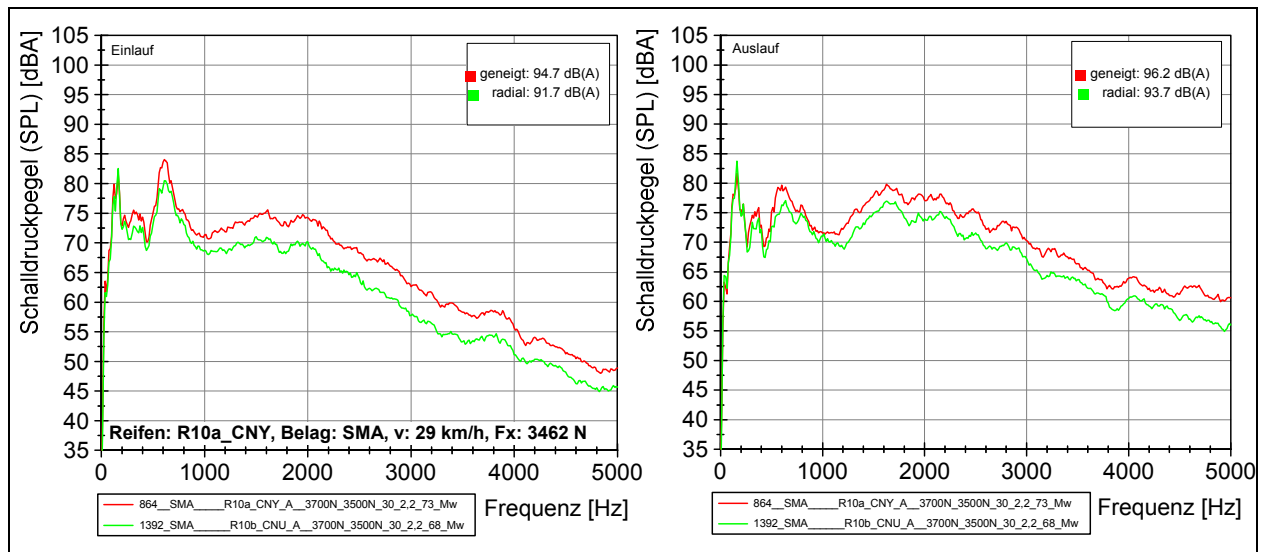
**Bild 4.3-12:** Vergleich Reifen R10a und R10b, SMA, 30 km/h, freierlaufend, Mikrofon vor dem Reifen (links) und dahinter (rechts).

Wird die Schallabstrahlung des neu entwickelten Reifens und des Referenzprofils nun unter Antriebsmoment von 3500 N untersucht, zeigen sich deutliche Unterschiede. Der Reifen mit den geneigten Rillen weist gegenüber dem Reifen mit der radialen Rille im Frequenzspektrum ab 1500 Hz eine deutliche Pegelabnahme bis zu 5 dB auf. Die Neigung der Rillen bewirkt somit unter Antriebsmoment eine Gesamtpegelreduktion von über 1 dB (vgl. Bild 4.3-13).



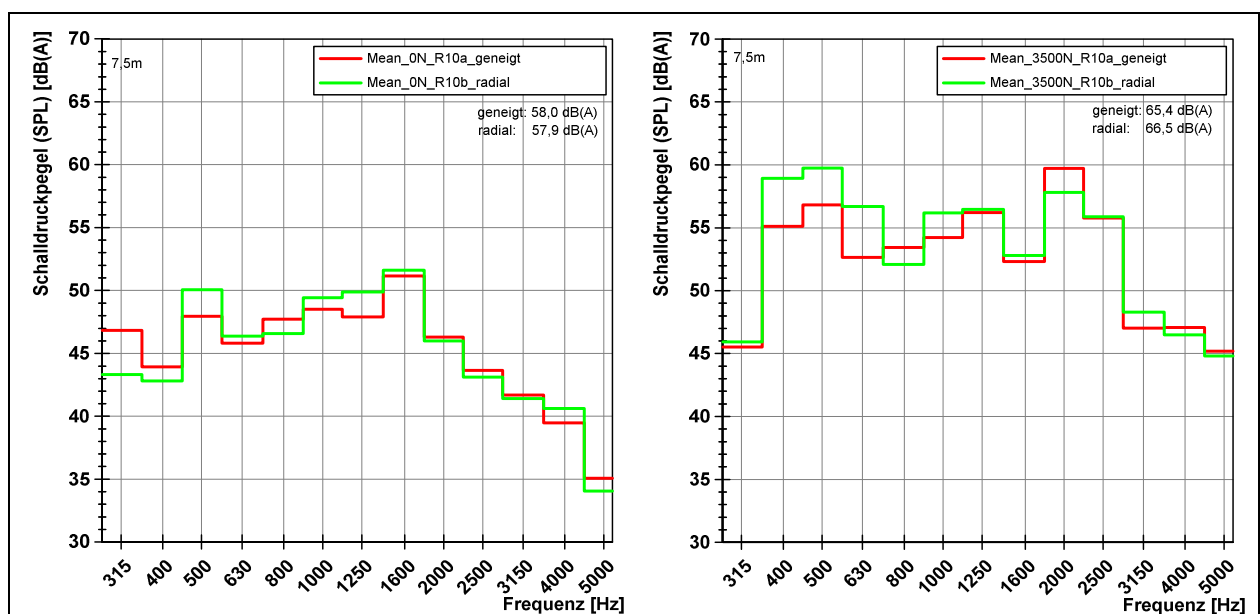
**Bild 4.3-13:** Vergleich Reifen R10a und R10b, SMA, 30 km/h, 3500 N Antreiben, Mikrofon vor dem Reifen (li.) und dahinter (re.)

Ändert sich der Fahrzustand von Antreiben in Bremsen, so kehrt sich der Effekt um. Bei einer Bremskraft von 3500 N ist das abgestrahlte Reifen-Fahrbahn-Geräusch am Reifen mit geneigtem Profil über den gesamten Frequenzbereich erhöht. Im Ein- und Auslauf führt dies zu einer Gesamtpegelerhöhung um 3 dB (vgl. Bild 4.3-14). Die Neigung der Rille bewirkt unter Bremsmoment somit eine Pegelerhöhung, was möglicherweise zu einer Warnung der Passanten vor herannahenden bremsenden Fahrzeugen führt. Diese Signalwirkung muss in Probandenversuchen noch untersucht werden.



**Bild 4.3-14:** Vergleich Reifen R10a und R10b, SMA, 30 km/h, 3500 N Bremsen, Mikrofon vor dem Reifen (links) und dahinter (rechts)

Die Untersuchungen im Prüfstand zeigen sowohl auf Safety Walk als auch auf realen Fahrbahnen interessante Effekte. Da schlussendlich aber diese Effekte bei der Vorbeifahrt erkennbar sein müssen, wurden beschleunigte Vorbeifahrten in Geilenkirchen durchgeführt. Hierbei zeigt sich, dass es bei der Konstantfahrt bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h ebenfalls kaum Unterschiede zwischen den Reifen mit geneigter und radialer Rille gibt (vgl. Bild 4.3-15, links). Bei einer Umfangskraft von 3500 N Antriebskraft sind auch bei der Vorbeifahrt Pegelreduzierungen von bis zu 1,1 dB(A) im Gesamtpegel bei einem Mikrofonabstand von 7,5 m zur Fahrzeugmitte zu verzeichnen. Da die zuvor am Prüfstand beschriebenen Effekte auch bei der Vorbeifahrt messbar sind, kann somit eine geneigte Rille zur Schallpegelreduktion unter Antriebskraft beitragen. Untersuchungen unter Bremsmoment wurden auf dem Testgelände ebenfalls durchgeführt, sind jedoch aufgrund der geringen Bremswirkung des Elektromotors im Rekuperationsmodus des Fahrzeugs nicht verwertbar.



**Bild 4.3-15:** Vergleich Reifen R10a und R10b bei 30 km/h, freirollend (links) & 3500 N Antreiben (rechts)

## Zwischenfazit

Der in diesem Abschnitt vorgestellte Profildesignparameter der Rillenneigung zeigt bei konstanter Geschwindigkeit keine Geräuscherhöhung gegenüber einem Reifenprofil mit radialer Rille. Da Serienreifen aktuell unter Antriebsmoment eine Geräuschanhebung um über 3 dB (Reifen R7 und R8, 30 km/h, 3500N) aufweisen, kann solch eine Geräuschüberhöhung mit einem geeigneten Profildesign reduziert werden. Bei geeigneter Orientierung der Rillenneigung wird die Geräuschentwicklung unter Antriebsmoment verringert und während des Bremsvorganges erhöht. Das Reifen-Fahrbahn-Geräusch unter Bremsmoment ist ein möglicher Ansatz zur Warnung von Passanten vor der Annäherung von Fahrzeugen und damit möglicherweise zur Einsparung von Sound-Generatoren.

### 4.3.5.2 Einfluss der Umfangssteifigkeit auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch

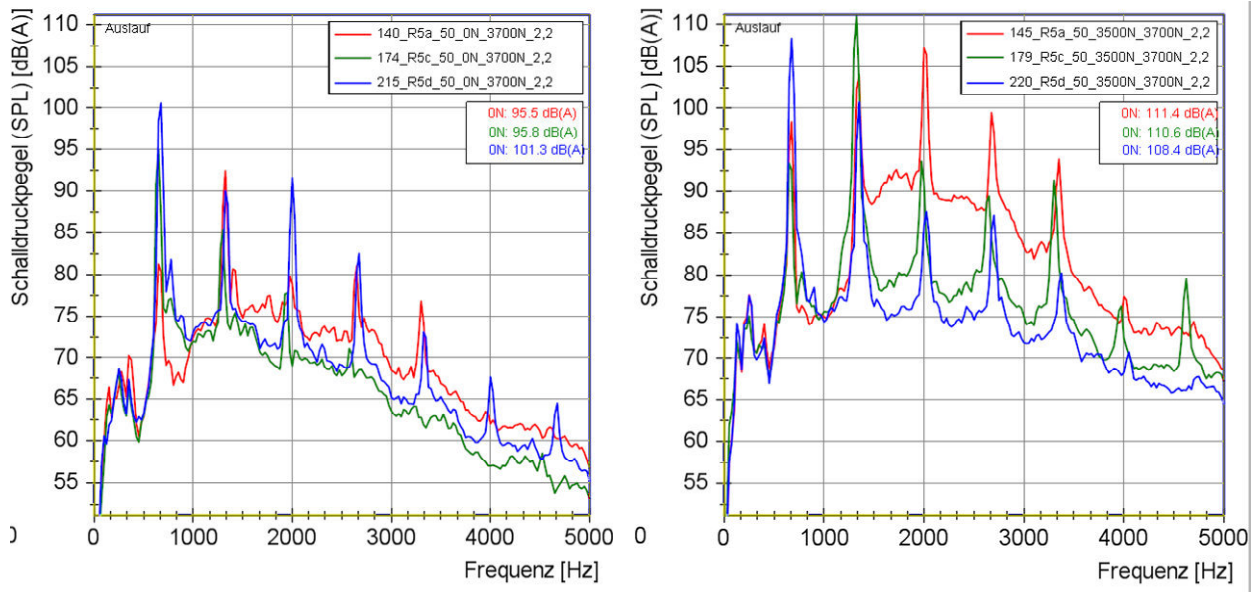
Das zu dieser Arbeit vorangegangene Forschungsprojekt konnte in Vorversuchen aufzeigen, dass Umfangskräfte im hohen Frequenzbereich um 3000 Hz zu Geräuschüberhöhungen führen [7]. In diesem Projekt soll der Zusammenhang zwischen Umfangskraft und Geräuschpegel weitergehend untersucht werden. Zunächst wird bei gleichbleibender Gummimischung das Reifenprofil variiert, sodass sich hierbei unterschiedliche Umfangssteifigkeiten abbilden lassen. Im zweiten Schritt werden bei gleichbleibender Profilageometrie die Gummi-Shorehärte der Versuchsreifen variiert.

## Voruntersuchungen

Im ersten Versuchsprogramm wurden drei Reifen gegenübergestellt, die sich durch Anzahl und Breite der Längsrillen unterscheiden (R5a, R5c und R5d, bei R5d ist die Mittelrille gegenüber R5c verbreitert). Die Messung der statischen Reifenumfangssteifigkeiten zeigt eine Steifigkeitsabnahme von Reifen R5a zu R5c und von R5c zu R5d. Da die beidseitig umlaufenden Schultern nicht verändert wurden, ist die effektive Steifigkeitsreduktion der Profilklotze wesentlich höher.

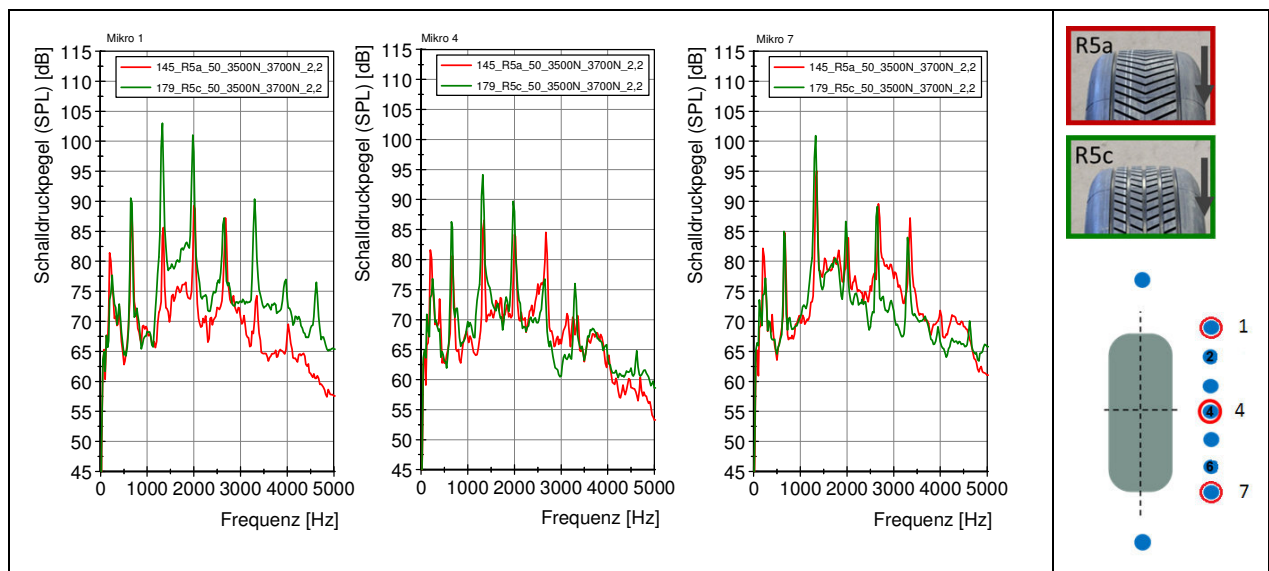
Analysiert man den freirollenden Zustand der Reifen R5a und R5c im Reifenauslauf (Bild 4.3-16, links), so zeigt sich ab einer Frequenz von 1500 Hz eine Geräuscherhöhung bei Reifen R5a. Als Ursache dieser Erhöhung wird das Entstehen von Verspannungen im Reifenlatsch durch das Abplatten des Reifens vermutet, die das schersteife Reifenprofil (R5a) schlechter ausgleichen kann als das scherweiche Profil. Nach Durchlaufen der Bodenaufstandsfläche sind die Profilklotze stärker verspannt und schnappen dementsprechend heftiger zurück, sodass dadurch bedingt bereits im freirollenden Zustand der schersteifere Reifen einen erhöhten Schalldruckpegel aufweist.

Wird bei den Versuchsreifen eine Umfangskraft aufgebracht (Bild 4.3-16, rechts), so zeigt sich, dass der scherweiche Reifen R5c hochfrequent eine deutlich geringere Schallabstrahlung aufweist als der scherharte Reifen R5a. Der Reifen R5c kann vermutlich leichter Scherverformungen zulassen und die antriebskraftbedingte Wegdifferenz zwischen Fahrbahn und Gürtel länger durch Formschlupf ausgleichen. Die Profilklotze würden somit länger an der Fahrbahn haften und der Übergang zum Gleiten später erfolgen. Ab einer Frequenz von 1500 Hz spiegelt sich dies in einer Geräuschreduktion wider. Wird die Umfangssteifigkeit erneut reduziert (R5d), kann hochfrequent eine weitere Schallpegelreduktion beobachtet werden. Es wird daher angenommen, dass die Reduktion der Steifigkeit eine weitere Auslenkung der Profilklotze ermöglicht und somit zu längerem Haften an der Fahrbahn und damit zu weniger Gleiten im Vergleich zu R5c führt. Es ist daher zu vermuten, dass die hochfrequenten Geräuschanteile durch Gleitvorgänge erzeugt werden. Das Ausschlagen der Profilklotze am Reifenauslauf trägt ebenfalls zum Reifen-Fahrbahn-Geräusch bei und wirkt sich vor allem auf die ersten Blockharmonischen (Klotzanzahl multipliziert mit der Raddrehfrequenz) bei 50 km/h entsprechend 630 Hz und 1260 Hz aus. Da das weichere Profil (R5d) länger an der Fahrbahn haftet, werden die Profilklotze beim Durchlaufen der Bodenaufstandsfläche mehr verformt als das scherharte Profil. Die Profilklotze im Reifenauslauf besitzen somit eine höhere Scherspannung, die beim Ablösen von der Fahrbahn zu stärkeren Klotzschwingungen führt. Die ersten Blockharmonischen sind daher erhöht. Die schmalbandige Erhöhung des Schalldruckpegels durch Ausschlagereffekte um 630 Hz und 1260 Hz hat jedoch im Vergleich zur breitbandigen Erhöhung durch Gleit- und Stick-Slip-Effekte ab 1500 Hz nur eine geringe Auswirkung auf den Gesamtschalldruckpegel. Daher wirkt sich das scherweiche Reifenprofil positiv auf die Geräuschentwicklung unter Antriebsmoment aus.



**Bild 4.3-16:** Vergleich der Reifen R5a, R5c & R5d freiliegend (links) und unter Antriebsmoment (rechts), Mikrofon im Reifenauslauf

Mittels mehrerer Mikrofone an der Reifenseite soll genauer auf den Entstehungsort der Schallerhöhungen geschlossen werden (vgl. Bild 4.3-19). Am Mikrofon M1 im seitlichen Reifeneinlauf liefert der Reifen R5c wie auch im Einlauf einen höheren Schalldruck als Reifen R5a. Die Ursache dürfte ein stärkerer Klotzaufschlag sein, da Reifen R5c viermal so viele Klötzen aufweist. In der Reifenmitte bei M4 sind unter Antriebsmoment die Unterschiede zwischen den beiden Reifen geringer. Die seitlich geschlossenen Schultern reduzieren bei beiden Reifen das Reifen-Fahrbahn-Geräusch gleichermaßen. Am seitlichen Reifenauslauf (Mikrofon M7) zeigt der Reifen R5a ab 2500 Hz eine deutliche Schallpegelerhöhung um bis zu 5 dB. Die Schubspannungen unter Antriebsmoment nehmen gerade im Reifenauslauf zu und verformen somit auch die Profilelemente weiter. Da die Profilklotze des Reifens R5a die Wegdifferenz zwischen Karkasse und Fahrbahn nicht mehr vollständig ausgleichen können, beginnen einzelne Klötze zu gleiten. Dies spiegelt sich in einer hochfrequenten Schallaustrahlung wider (rechts).



**Bild 4.3-17:** Vergleich der Reifen R5a und R5c an unterschiedlichen Mikrofonpositionen

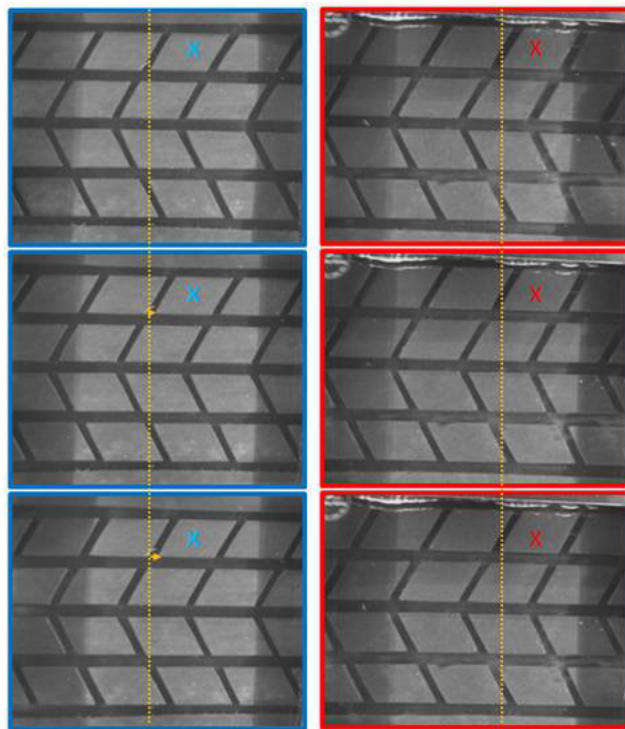
**Messungen am Unterflurlabor**

Die These, dass profilweiche Reifen länger an der Fahrbahn haften, soll mittels eines am KIT entwickelten Unterflurlabors überprüft werden. Es handelt sich um eine Messeinrichtung, die die Reifenaufstandsfläche

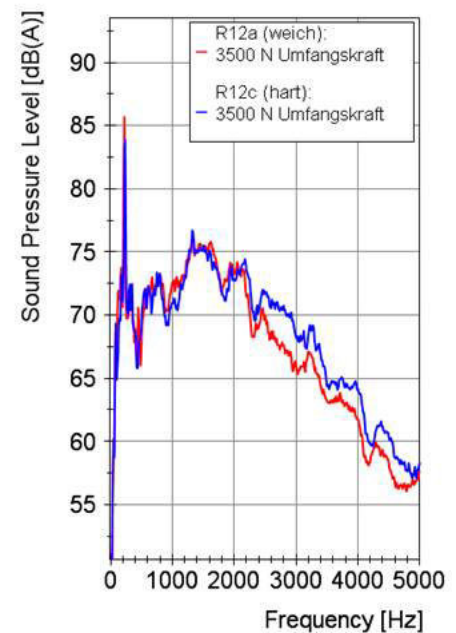
durch eine Glasplatte hindurch von unten bei Reifenüberfahrt filmt (vgl. Bild 4.3-18) und in jeden genormten Abwasserschacht eingesetzt werden kann. Mit einer Hochgeschwindigkeitskamera werden 1000 Bilder pro Sekunde aufgezeichnet, wobei die örtliche Auflösung es erlaubt, Auslenkungen der Profilklötze unterhalb von 0,5 mm zu detektieren. Ein vor dem Unterflurlabor angebrachter Anfahrteppich mit einer Länge von 50 m verhindert das Aufsammeln von Staubpartikeln und Steinchen von der Fahrbahn, sodass ein Herabsetzen des Haftbeiwertes und das Zerkratzen der Glasoberfläche verhindert werden kann [21].



**Bild 4.3-18:** Unterflurlabor vor dem Einsetzen in einen genormten Abwasserschacht, Anfahrteppich mit eingesetztem Unterflurlabor, Überfahrt mit Elektrofahrzeug



**Bild 4.3-19:** Aufnahmen bei Überfahrt mit Geschwindigkeit von 30 km/h und Umfangskraft von 3500 N, links: Reifen 12c (schersteif), rechts: Reifen R12a (scherweich), gelbe Pfeile markieren Gleitweg von Reifen 12c



**Bild 4.3-20:** Vergleich der Reifen R12a und R12c im Reifenauslauf bei 30 km/h auf einem lärmarmen Fahrbahnbelag

Unter optimalen Bedingungen (Außentemperatur > 20°C, Anfahrt auf Teppich) konnte gezeigt werden, dass unter einer Umfangskraft von 3500 N das scherweiche Profil des Reifens R12a in der kompletten Kontaktzone auf der Glasplatte haftet. Bild 4.3-19 zeigt beispielhaft eine Überrollung im Abstand von je 6 ms. Die Bildanalyse des Überrollvorgangs des schersteifen Profils an einem Block (Gleitweg durch gelben Pfeil markiert, betrachteter Block mit x) zeigt, dass beim Überrollen der Glasplatte kein Haften besteht. Das Reifenprofil gleitet kontinuierlich auf der Glasplatte und legt dabei eine Wegdifferenz von einigen Milli-



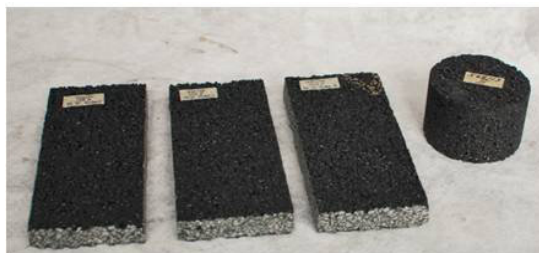
metern zurück. Zur Erklärung wird angenommen, dass das schersteife Profil bereits durch die Deformation bei der Abplattung des Reifens in der Bodenaufstandsfläche höhere Schubspannungen in Umfangsrichtung aufbaut, die zusammen mit der überlagerten Antriebskraft zu einer höheren Kraftschlussausnutzung führt und es daher bei Reifen R12c eher zu Gleiten kommt, als dies bei dem schwerweicheren Reifen R12a der Fall ist. Im direkten akustischen Vergleich der beiden Reifen zeigt Bild 4.3-20, dass der schwerweiche Reifen R12a über weite Teile des Frequenzspektrums niedrigere Schalldruckpegel aufweist, was zu einem niedrigeren Gesamtschalldruckpegel führt [21].

Diese Untersuchungen zeigen, dass profilgeometriebedingt umfangsweichere Reifen unter Antriebsmoment im Reifenauslauf geräuschärmer sind, da sie länger an der Fahrbahnoberfläche haften und somit weniger gleiten. Ein vermindertes Gleiten im Latsch hat eine Reduktion der hochfrequenten Geräuscherzeugung zur Folge. Auf die Effekte des Ausschnappens wurde bereits hingewiesen.

Im nächsten Schritt werden reale Fahrbahnen für den Prüfstand entwickelt und Reifen mit Laufstreifen unterschiedlicher Shorehärte bei identischem Reifenprofil auf den realen Fahrbahnen am IPS untersucht. Dies führt wiederum zu Reifen mit unterschiedlicher Schersteifigkeit, jedoch mit anderen Mitteln.

### Herstellung und Einfluss realer Fahrbahnbeläge

Um realitätsnahe Vergleiche zwischen der Vorbeifahrt und den Messungen an der Innentrommel herstellen zu können, müssen an beiden Versuchsvorrichtungen identische Fahrbahnbeläge vorliegen. Aus diesem Grund sind für den Einbau realer IPS-Fahrbahnen Parameterstudien bezüglich Hohlraumgehalt und Dichte der Prüfstandskassetten durchgeführt worden. Neben Marshallkörpern wurden kleine Versuchsfahrbahnen hergestellt (Bild 4.3-21), die am Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen (ISE) am KIT analysiert wurden. So zeigte sich beispielsweise in Tabelle 4.3-4, dass die berechnete Verdichtungskraft von 9 kN bei Platte VII nicht für das Erreichen eines Verdichtungsgrades von über 98% ausreicht. Die Walzlast wurde aus diesem Grund auf 12 kN erhöht. Der Verdichtungsgrad wurde damit erreicht.



Kennzeichnung der Schicht	Raumdichte		Verdichtungsgrad		Rohdichte des Bohrkernmischgutes	Hohlraumgehalt am Bohrkern	
	am Bohrkern	am MPK	Ist	Soll*		Ist	Soll*
	$P_{b,c}$ g/cm <sup>3</sup>	$P_{b,j}$ g/cm <sup>3</sup>	k	k		V	V
			%	%	$P_{in}$ g/cm <sup>3</sup>	Vol.-%	Vol.-%
<b>Platte V</b>							
LOA 5 D	2,241	2,423	92,5	≥ 98	2,579	13,1	3,0...6,0
<b>Platte VI</b>							
LOA 5 D	2,286	2,423	94,3	≥ 98	2,579	11,4	3,0...6,0
<b>Platte VII</b>							
LOA 5 D	2,306	2,423	95,2	≥ 98	2,579	10,6	3,0...6,0

\* Aus den „Hinweisen zur Umsetzung einer LOA 5 D“, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Bochum

**Bild 4.3-21:** Marshallkörper und Fahrbahnproben

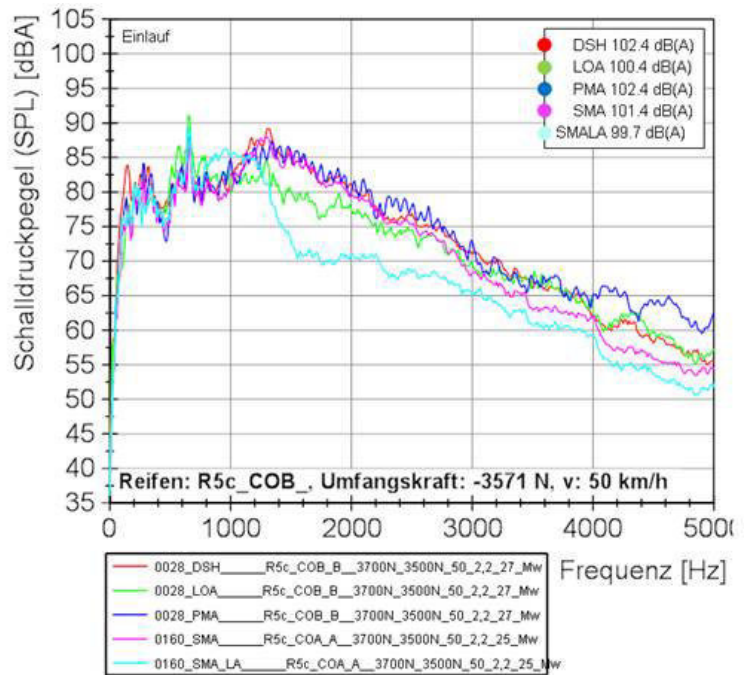
**Tab. 4.3-4:** Eigenschaften der Proben

Im Rahmen dieses Teilvorhabens wurden insgesamt 24 m an Fahrbahnen erstellt. Es wurden sowohl lärmoptimierte Beläge wie LOA 5 D, PMA 5, DSH 5 (ohne Versiegelung) und SMA 8 LA als auch eine Referenzfahrbahn, den SMA 8, gebaut und im Prüfstand analysiert (Bild 4.3-22).

Ein Vergleich der Fahrbahnen zeigt naturgemäß bereits im freirollenden Zustand Unterschiede im Gesamtschalldruckpegel (s. Bild 4.3-23). Der PMA Belag ist mit 100,2 dB(A) am lautesten, wohingegen der SMA LA mit 93,5 dB(A) deutlich leiser ist. Die Gesamtdifferenz über alle Beläge ist im freirollenden Zustand 6,9 dB. Bei einer Antriebskraft von 3500 N ergibt sich auf dem PMA mit 102,4 dB(A) noch immer der höchste Gesamtschalldruckpegel. Der SMA LA bleibt weiterhin auf dem niedrigsten Level mit 99,7 dB(A). Die Rangfolge der Gesamtpegel verändert sich unter Antriebsmoment nicht. Beläge, die freirollend einen hohen Schalldruckpegel aufweisen, wie der PMA, zeigen unter Antriebsmoment einen geringen Pegelanstieg (2,2 dB(A)). Beläge, die freirollend einen kleinen Gesamtpegel aufweisen (SMA LA), zeigen Pegelzunahmen um 6,2 dB unter Umfangskraft. Die Gesamtdifferenz über alle Beläge liegt unter Antriebsmoment nur noch bei 2,7 dB. Die Pegelzunahme unter Antriebsmoment hängt somit deutlich vom Rollgeräuschniveau des jeweiligen Belags ab.



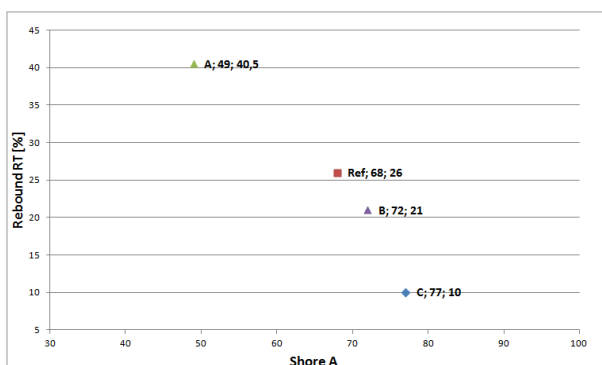
**Bild 4.3-22:** IPS Fahrbahnkassetten



**Bild 4.3-23:** Vergleich der Fahrbahnen bei 50 km/h unter Antriebsmoment

### Einfluss der Shorehärte

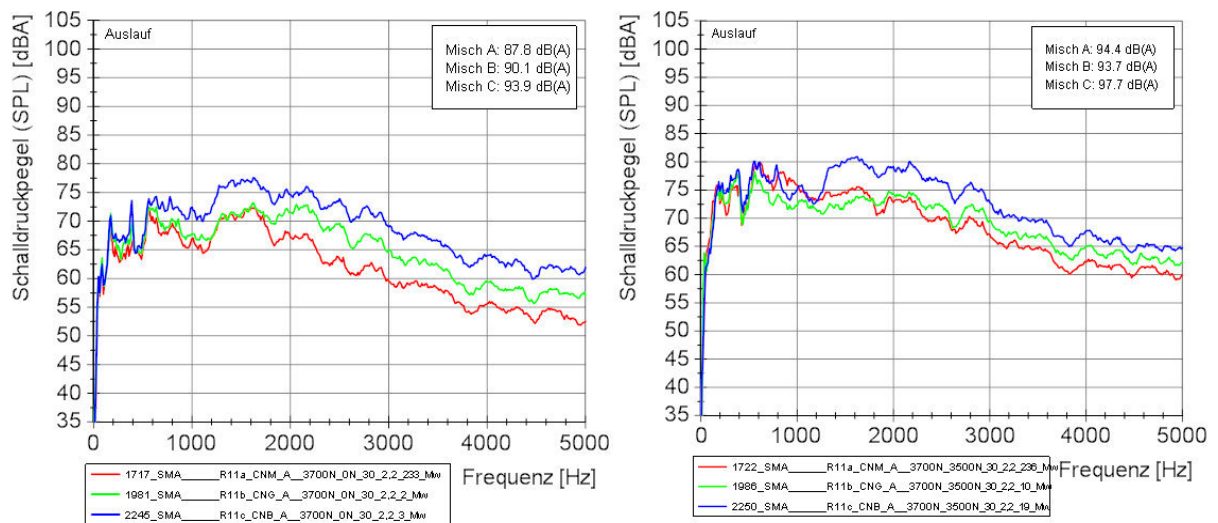
Um den Einfluss der Schersteifigkeit und der daraus resultierenden Schubspannungen im Reifenlatsch auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch untersuchen zu können, wurden zusätzlich zu den bereits geschilderten Versuchen Reifen untersucht, die bei identischer Profilgestaltung unterschiedliche Gummimischungs-Shorehärten zwischen 49 Sh(A) bei Mischung A und 77 Sh(A) bei Mischung C aufweisen (s. Bild 4.3-24). Bei der weichen Mischung sollten weniger Relativbewegungen zwischen Profilklotzoberfläche und Fahrbahn entstehen, da zum einen der, aufgrund der Abplattung des Reifens im Latsch erforderliche Wegausgleich zwischen Gürtel und Fahrbahn zu geringeren Scherkräften im Profilblock und damit bei Überlagerung mit Umfangskräften in einem kleineren Flächenanteil des Latschs zum Gleiten führt. Zum anderen führt eine weichere Gummimischung auf adhäsiven Oberflächen zu einem höheren Haftbeiwert. In der Folge verformen sich die weichen Klötze stärker, haften länger an der Fahrbahn und gleiten somit weniger. Da somit nur kleine Differenzgeschwindigkeiten entstehen, erzeugt der Reifen weniger hochfrequente Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Eine harte Mischung führt umgekehrt zu größeren Relativbewegungen zwischen Reifen- und Fahrbahnoberfläche. Diese Gleitvorgänge erzeugen hochfrequente Schallanteile.



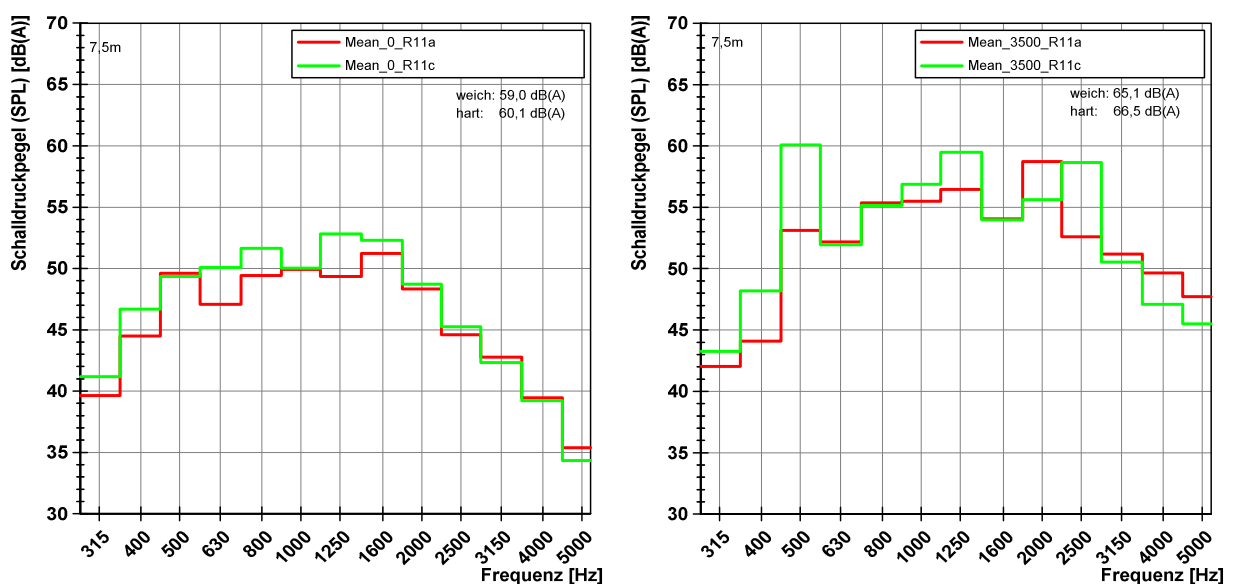
**Bild 4.3-24:** Überblick über die verwendeten Shorehärten und Rückprallelastizitäten.

Im Bild 4.3-25 links wird das Geräusch von Reifenprofil R11 (kleine Profilklotze) mit drei unterschiedlichen Reifenmischungen (A, B & C) freierollend bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h verglichen. Die weiche Mischung A führt sowohl im Ein- als auch im Auslauf des Reifens zum niedrigsten Schalldruckpegel. Der harte Reifen mit Mischung C ist im Einlauf um 3,7 dB lauter, im Auslauf um 6,1 dB. Ab einer Frequenz von 2000 Hz liegen teilweise Unterschiede von über 10 dB vor. Im freierollenden Zustand zeigt sich, dass der

scherweiche Reifen geräuschärmer ist. Dies dürfte neben dem geringeren Kraftaufbau beim Einlaufen der Profilklotze in die Bodenaufstandsfläche auch daran liegen, dass die abplattungsbedingten Spannungen im Latsch besser durch Klotzverformung ausgeglichen werden können. Die Auswertung der Akustikmessungen unter Antriebsmoment (Bild 4.3-25, rechts) zeigt, dass auch die weiche Gummimischung A geräuscharm im Vergleich zu den Mischungen B und C ist. Die harte Reifenmischung erzeugt einen um über 3 dB erhöhten Gesamtschalldruckpegel gegenüber der weichen Mischung. Im Frequenzverlauf sind Unterschiede bis zu 7 dB feststellbar. Die erhöhten Ausschnappeffekte im Auslauf beim scherweichen Reifen sind auch bei diesen Untersuchungen bei der ersten Blockharmonischen (630 Hz) zu erkennen. Im Vergleich zum freierollenden Zustand erhöht sich diese bei der weichen Mischung um 4 dB(A) mehr als bei der harten Mischung, da die weichen Klötze am Reifenauslauf weiter ausgelenkt sind und somit auch heftiger ausschappen. Ab 1400 Hz jedoch fällt der Schallpegelverlauf unter die Verläufe der anderen beiden Reifen und trägt somit zur Geräuschreduktion bei. Dass unter Antriebsmoment gerade im hochfrequenten Bereich keine Überhöhungen auftreten, deutet darauf hin, dass die Profilklotze des weichen Reifens zu großen Teilen haften. Dies hat sich bei den bereits vorgestellten Untersuchungen am Unterflurlabor bestätigt. Der scherharte Reifen hingegen gleitet und erzeugt hochfrequente Reifen-Fahrbahn-Geräusche. Bemerkenswert ist, dass die Gleiteffekte des scherharten Reifens dominanter sind als die Ausschnappeffekte des weichen Profils. Das Gleiten in der Kontaktfläche hat somit einen großen Anteil am Reifen-Fahrbahn-Geräusch unter Antriebsmoment.



**Bild 4.3-25:** Vergleich von Reifen mit materialbedingt unterschiedlicher Laufreifensteifigkeit, links freierollend, rechts unter Antriebskraft von 3500 N.



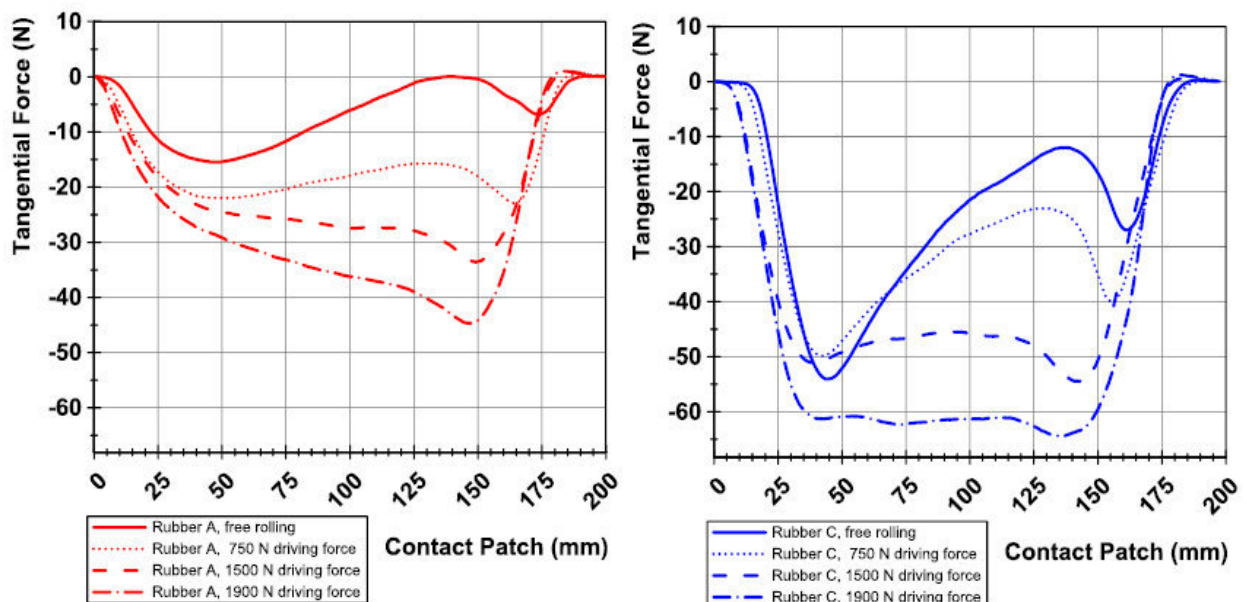
**Bild 4.3-26:** Vergleich der Schersteifigkeit des Laufstreifenmaterials, Vorbeifahrt konstant und unter Antriebsmoment

Die gefundenen Ergebnisse im Prüfstand lassen sich auch bei der Vorbeifahrt finden (Bild 4.3-26). Sowohl bei der Konstantfahrt von 30 km/h als auch bei einer Antriebskraft von 3500 N ist das scherweiche Profil A um bis zu 1,4 dB geräuschärmer als das scherharte Reifenprofil C.

### Validierung mittels Überfahrtsensor

Neben den Messungen des lokalen Schlupfs mit dem Unterflurlabor und den akustischen Messungen in der Vorbeifahrt und am IPS wurden die dynamischen Kräfte im Latsch mit einem Überfahrtsensor untersucht. Hierzu wird eine Aluminiumfahrbahn in die Innentrommel integriert, aus der an einer Stelle ein triaxial messender, zylindrischer Messstift (10 mm Durchmesser) mit definiertem Überstand herausragt. Wird der Stift vom Reifen überfahren, so misst er die entstandenen Kräfte in x-, y- und z-Richtung und überträgt die Spannungssignale mittels mitrotierender Telemetrie zur feststehenden Aufzeichnungseinheit des IPS. Die Signale können mit einer Abtastrate von bis zu 25 kHz aufgenommen und gespeichert werden. Rollt ein Profilklotz unter Antriebsmoment über den Sensor, kann über den Verlauf der Kraftkurve auf Haften oder Gleiten geschlossen werden. Da die aufgrund eines Antriebs- oder Bremsmoments auf die Fahrbahn übertragene Kraft im Latsch vom Einlauf zum Auslauf zunimmt, steigt die übertragene Kraft eines den Sensor berührenden Profilklotzes ebenfalls bis zum Auslauf an. Dem überlagert sich der typische s-förmige kraftverlauf aufgrund der Abplattung des Reifens. Wird die Gleitgrenze erreicht, rutscht der Klotz durch die Bodenaufstandsfläche. Die Gleitkraft bleibt dabei weitgehend konstant, solange auch die Normalkraft unverändert bleibt. Im aufgezeichneten Kraftverlauf über dem Latsch ist dies als waagrechter Kurvenabschnitt zu erkennen.

Untersucht wurden sowohl die Reifen mit unterschiedlicher Laufstreifen-Gummimischung als auch mit unterschiedlicher Profilklotzgeometrie. Es zeigt sich, dass der Reifen mit der harten Mischung C (Bild 4.3-27, rechts) bereits bei geringen Umfangskräften von 1500 N in weiten Teilen der Aufstandsfläche gleitet. Wird die Umfangskraft auf 1900 N erhöht, so gleitet der Reifen über den gesamten Latsch (Gleiten = horizontale Linie). Der Reifen mit der weichen Gummimischung A hingegen zeigt auch bei 1900 N keine ausgeprägte Gleitzone. Wie auch bei den Untersuchungen am Unterflurlabor zeigt sich, dass an keiner Stelle des Durchlaufens durch die Bodenaufstandsfläche der Reifen zu gleiten beginnt. Die tangential Wegdifferenz zwischen Reifengürtel und Fahrbahn, die unter Antriebsmoment entsteht, kann über weite Strecken durch Scherdeformation der weichen Blöcke realisiert werden [23]. Wird die Umfangssteifigkeit durch Variation der Bocklänge variiert, zeigt sich der gleiche Trend.



**Bild 4.3-27:** Vergleich der Tangentialkraft im Latsch für die Laufstreifen-Gummimischungen A (weich, links) und C (hart, rechts) mittels Überfahrtsensor [28]

## Zwischenfazit

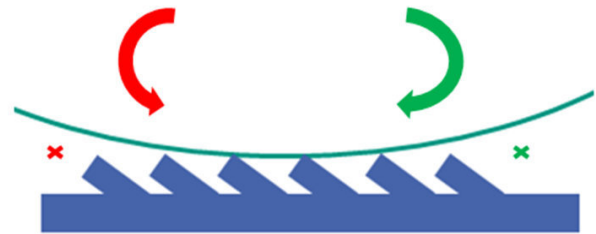
Größere und somit steifere Profilklotze beginnen im Vergleich zu kleinen und weichen Profilklotzen früher zu gleiten und tragen somit zu einer Geräuscherhöhung vor allem im höherfrequenten Bereich ab 1500 Hz bei. Weiche Blöcke überbrücken eine größere Wegdifferenz zwischen Reifengürtel und Fahrbahn, bauen langsamer Schwerkräfte auf und haften daher länger an der Fahrbahn. Haftende Profilklotze schnappen im Reifenauslauf zwar heftiger aus und erhöhen somit den Geräuschpegel der niedrigen Blockharmonischen (eine Blockharmonische ist eine Radordnung mit einem ganzzahligen Vielfachen der Profilklotzanzahl auf dem Reifenumfang). Da diese Blöcke aber weniger gleiten, erzeugen sie somit geringere Geräuschpegel im Frequenzbereich zwischen 1500 Hz und 5000 Hz. Dies führt in Gänze betrachtet zu einer Geräuschpegelreduktion.

### 4.3.5.3 Einfluss anisotroper Fahrbahntexturen auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch

Neben den geräuschoptimierten Asphaltfahrbahnen wurde am KIT auch eine künstliche anisotrope Fahrbahn aus Kunstharz hergestellt, um den Einfluss einer in Fahrtrichtung geneigten Oberflächentextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch zu analysieren. Hierfür wurden von Hand mehrere kurze Fahrbahnsektionen mit Einzelsteinen gesetzt und dann mittels eines Abdruckverfahrens [2] auf die 1,6 m lange Fahrbahnkassette vervielfältigt (vgl. Bild 4.3-28). Je nach Abrollrichtung des Reifens treffen die Profilklotze auf die spitze Kante der Fahrbahnsteine (Bild 4.3-29, rot) bzw. auf die stumpfe Kante (grün) auf.

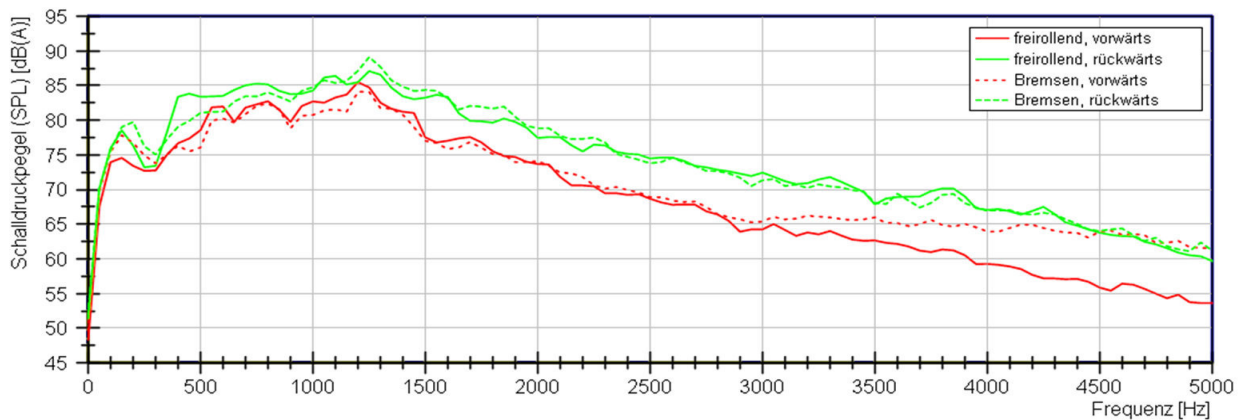


**Bild 4.3-28:** Anisotrope Fahrbahn mit nach vorne gerichteter Textur und Mikrofonposition



**Bild 4.3-29:** Schematische Darstellung der anisotropen künstlichen Fahrbahn mit Kennzeichnung der Fahrtrichtung (vorwärts = rot) und Mikrofonpositionen (Einlauf)

Untersuchungen bei einer Geschwindigkeit von 30 km/h zeigen, dass im Gegensatz zu einem isotropen Fahrbahnbelag wie dem Safety Walk, die anisotrope Fahrbahn deutliche Geräuschunterschiede je nach Abrollrichtung vorweist. Im freirollenden Zustand bei Vorwärtsfahrt (vgl. Bild 4.3-30, durchgezogene, rote Kurve) liegt der Gesamtschalldruckpegel und auch der Verlauf der Frequenzanalyse auf ähnlichem Niveau wie beim Safety Walk. Wird in gegenläufiger Richtung über die Fahrbahn gefahren, ergibt sich ein erhöhtes Reifen-Fahrbahn-Geräusch (grüne Kurve). Der Einfluss eines Bremsmomentes (gestrichelte Kurven) erzeugt bei Rückwärtsfahrt keine wesentlichen Geräuschveränderungen. Bei Vorwärtsfahrt zeigt sich jedoch ab einer Frequenz von 3000 Hz eine hochfrequente Pegeländerung. Eine mögliche Erklärung für diese Pegelerhöhung sind erneut Gleiteffekte. Wird bei Vorwärtsfahrt ein Bremsmoment eingeleitet, muss dieses über die stumpfen, flachen Kanten der Fahrbahnsteine abgestützt werden. Da im Gegensatz zum Antreiben und der dann vorliegenden erhöhten Formschlüssigkeit der Fahrbahn beim Bremsen das Haftvermögen der Fahrbahn aufgrund der geringeren Verzahnung herabgesetzt wird, fangen die Profilklotze an zu gleiten und erzeugen hochfrequente Schallanteile.



**Bild 4.3-30:** Einfluss der Fahrtrichtung und des Bremsmomentes auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch im Reifeneinlauf (durchgezogen = freirollend, gestrichelt = gebremst)

### Zwischenfazit

Es konnte gezeigt werden, dass eine Anisotropie der Fahrbahntextur einen rollrichtungsabhängigen Einfluss auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch hat. Nutzen könnte man diese Fahrbahnen beispielsweise an Fußgängerübergängen. Nähert sich ein leises Elektrofahrzeug und leitet einen Bremsvorgang ein, so entsteht ein hochfrequentes Geräusch, das möglicherweise als Warnsignal dienen kann. In einem Probandenversuch sollte die tatsächliche Warnwirkung, mit Variation von Steingrößen und -winkel, analysiert werden. Über Haftbeiwertmessungen sollte zusätzlich untersucht werden, wie diese Fahrbahn den Bremsweg beeinflusst.

#### 4.3.6 Auralisierung

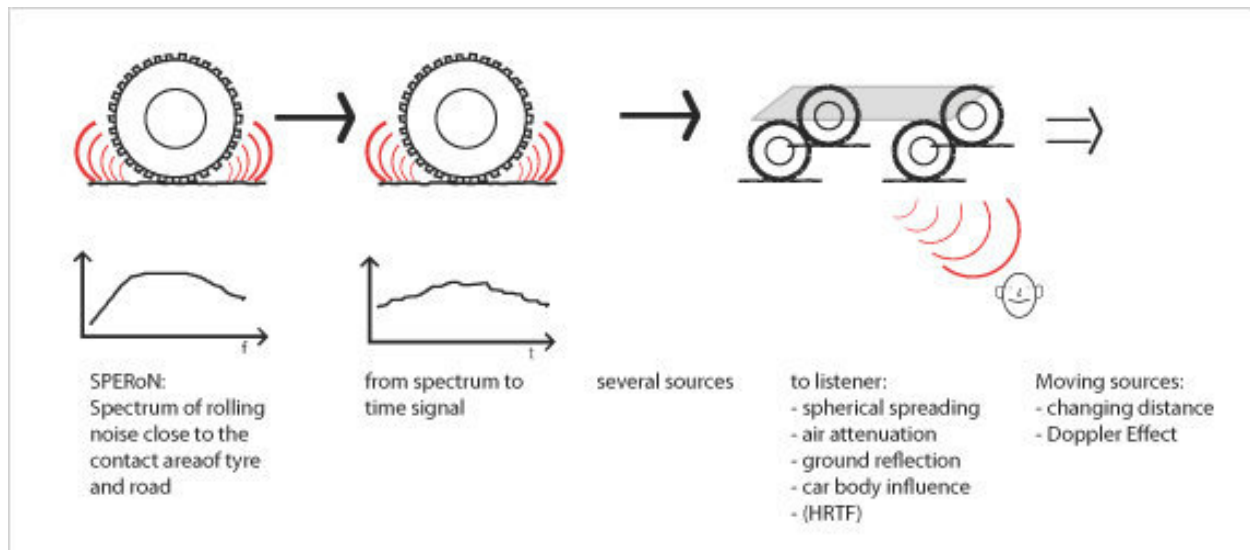
Auralisieren ist das Hörbarmachen von komplexen Daten. Damit kann ein tieferes Verständnis der Daten erreicht werden und sie können zum Beispiel in Hörversuchen untersucht werden.

Die Idee ist diesen Ansatz zu benutzen, um in SPERoN simulierte Reifengeräusche hörbar zu machen. SPERoN kann Schallspektren für die simulierte Vorbeifahrt verschiedener Reifen- und Straßenkombinationen erzeugen.

Diese Rollgeräusch-Prognose aus SPERoN soll hier mit einem Auralisierungs-Programm kombiniert werden, das im Listen Projekt [14] von Jens Forssén entwickelt wurde. Validiert wurde das kombinierte Modell mit Hilfe von psychoakustischen Versuchen, bei denen sowohl simulierte als auch aufgenommene Signale verwendet wurden.

Das Auralisierungs-Programm geht von aufgenommenen Vorbeifahrten aus und rechnet diese zurück auf die Quellen. Dabei wird das Motorengeräusch vom Reifen getrennt. Bei der zugrundeliegenden Vorbeifahrt sind alle Parameter dokumentiert: Geschwindigkeit, Abstand, Reifeneigenschaften, Straßeneigenschaften, usw. Schrittweise werden die Einflüsse der Schallausbreitung zurückgerechnet, wie der Doppler Effekt, geometrische Ausbreitung, Abschwächung durch die Luft, Einflüsse des Bodens und Richtcharakteristik. Das stationäre Signal, das dadurch erhalten wird, wird in zwei Quellen aufgeteilt. Eine Quelle wird dem Motor zugeordnet und eine dem Rollgeräusch. Diese Teile können jetzt getrennt modifiziert werden und zu neuen Vorbeifahrten zusammengesetzt werden. Dazu werden für die gewünschte Fahrsituation alle Effekte wieder auf die Quellen angewendet. Das Auralisierungs-Programm wird in [18] und in [6] genauer beschrieben.

Um das Auralisierungs-Programm auf Daten aus SPERoN anzuwenden wurde sichergestellt, dass beide Programme mindestens auf einem gemeinsamen Datensatz beruhen, als Referenzdatensatz. Dieser Datensatz bildet den Ausgang für die Auralisierung. Die dazugehörigen Quelldaten können nun mit Daten aus SPERoN verglichen und entsprechend modifiziert werden. Dazu werden die Differenzen der Spektren beider Signale gebildet und für die Terzbänder Anpassungswerte ermittelt. Diese Werte werden dann benutzt, um den Quellterm für das Rollgeräusch zu modifizieren und daraus Vorbeifahrten für verschiedene Reifen Fahrbahn Kombinationen zu erzeugen. Dieser Prozess ist in Bild 4.3-31 grafisch dargestellt.



**Bild 4.3-31:** Skizze des Prozesses der Auralisierung

#### 4.3.6.1 Validierung der Auralisierung

Zur Validierung des Modelles wurden Hörversuche mit simulierten Signalen und mit aufgenommenen Signalen durchgeführt. Es wurden jeweils die gleichen Straßenbeläge und Reifen betrachtet. Die verwendeten Rollgeräusche bestanden aus konstanten Vorbeifahrten bei 50 kmh auf drei verschiedenen Straßenoberflächen (A04, A07, B09) und mit drei verschiedenen Reifen (DB3, DB4, VW3). Für alle Kombinationen sind die Input Daten für SPERoN vorhanden. Die verwendeten Signale wurden aus einer vorhandenen Datenbank ausgewählt mit dem Ziel, Rollgeräusche zu verwenden, die sich möglichst stark im Höreindruck unterscheiden. Die Versuche wurden in Form von kategorialen Skalierungstests mit einer Bewertungsskala in sieben Stufen durchgeführt.

##### Versuch 1

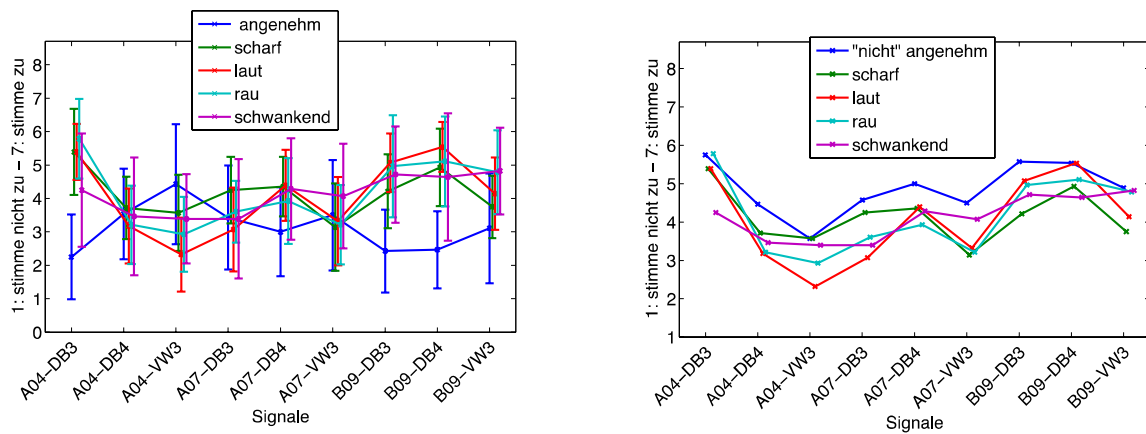
In diesem Versuch wurden simulierte reine Rollgeräusche verwendet. Erzeugt wurden diese mit Hilfe des beschriebenen Auralisierungs-Programmes. Die verwendeten Signale sind A04\_DB3, A04\_DB4, A04\_VW3, A07\_DB3, A07\_DB4, A07\_VW3, B09\_DB3, B09\_DB4 und B09\_VW3.

A04, A07 und B09 bezeichnen hierbei die ausgewählten Straßen nach [3] und DB3, DB4 und VW3 bezeichnen die verwendeten Reifen nach [1].

Der Versuch wurde mit 14 Probanden durchgeführt, von denen die eine Hälfte Deutsch und die andere Hälfte Schwedisch als Muttersprache hat. Pro Versuch waren maximal vier Teilnehmer anwesend im nach außen schallisolierten Versuchsraum. Die Signale wurden mit zwei Lautsprechern frontal abgespielt.

Für die kategoriale Skalierung wurden die Begriffe „angenehm“, „scharf“, „laut“, „rau“ und „schwankend“ verwendet. Jeder dieser Begriffe wurde auf einer siebenstufigen Skala von „trifft zu“ bis „trifft nicht zu“ für jedes Geräusch einzeln bewertet. Die Bewertungsskalen wurden auf Papier ausgeteilt. Jeder Begriff hatte eine eigene Seite, um Mustereffekte zu vermeiden, und für jede Begriffsbewertung wurde ein Signal abgespielt (zweimal). Sowohl die Reihenfolge der Begriffe als auch die Reihenfolge der Signale war randomisiert, aber für alle Probanden wurde dieselbe Reihenfolge verwendet. Die Wiederholung hatte eine neue Randomisierung. In Bild 4.3-32 in der linken Grafik sind die Ergebnisse des kategorialen Skalierungstests zu sehen. Abgebildet sind die Mittelwerte über die Versuchspersonen und die Wiederholungen samt einer Standardabweichung. 1 entspricht der Bewertung „trifft zu“, und 7 der Bewertung „trifft nicht zu“.

Wie erwartet, verläuft die Angenehmheit gegenläufig zu allen anderen Größen. Je lauter/rauer/schärfer/schwankender ein Signal ist, desto unangenehmer ist es. Die Standardabweichungen sind groß, man kann jedoch trotzdem Unterschiede in der Bewertung erkennen, vor allem für die Begriffe „angenehm“, „laut“ und „rau“.



**Bild 4.3-32:** Mittelwert und Standardabweichung über die Ergebnisse des kategorialen Skalierungstests (links) und Mittelwerte über die Ergebnisse des Kategorialen Skalierungstests, inverse Daten für die Angenehmheit (rechts) für die simulierten Signale

Die Werte für „schwankend“ und „scharf“ sind nicht so stark ausgeprägt und liegen zwischen vier und sechs, also im neutralen bis nicht zutreffenden Bereich. In Bild 4.3-32 wurden in der rechten Grafik die Standardabweichungen zur besseren Lesbarkeit weggelassen und die Werte zur Angenehmheit gespiegelt. Man kann sehen, dass nun alle Begriffe einem ähnlichen Muster folgen. „Laut“ und „nicht angenehm“ haben eine sehr ähnliche Form. Auch „rau“ passt sehr gut zu „nicht angenehm“. Die Ordnung der Signale ist aber nicht für alle Begriffe gleich. So ist B09\_DB3 weniger angenehm und schärfer als B09\_DB4. Für „laut“, „scharf“ und „rau“ ist der Verlauf andersherum. Sie sind aber in allen Fällen dicht bei einander.

Interessant ist auch, dass für die Straßenoberfläche A04 sowohl das lauteste/unangenehmste/... Geräusch zu finden ist als auch das am schwächsten Ausgeprägte für die meisten Begriffe. Dieses Ergebnis passt zu den Erwartungen, da A04 die ISO Oberfläche ist. Klar zu erkennen ist auch, dass der Reifen VW3 immer am besten bewertet wird. Die anderen Reifen wechseln auf den verschiedenen Straßenoberflächen. Um die Daten sicher interpretieren zu können, wurde ein Signifikanztest in Form einer einfaktoriellen ANOVA durchgeführt. Für Angenehmheit, Lautheit, Rauigkeit und Schärfe kann die Nullhypothese „Die Wahrnehmung unterscheidet sich nicht zwischen den neun Rollgeräuschen“ abgelehnt werden. Das bedeutet, dass es signifikante Unterschiede zwischen mindestens zwei der bewerteten Signale gibt. Für die Schwankungsstärke kann die Nullhypothese nicht abgelehnt werden. Es gibt keine signifikanten Unterschiede.

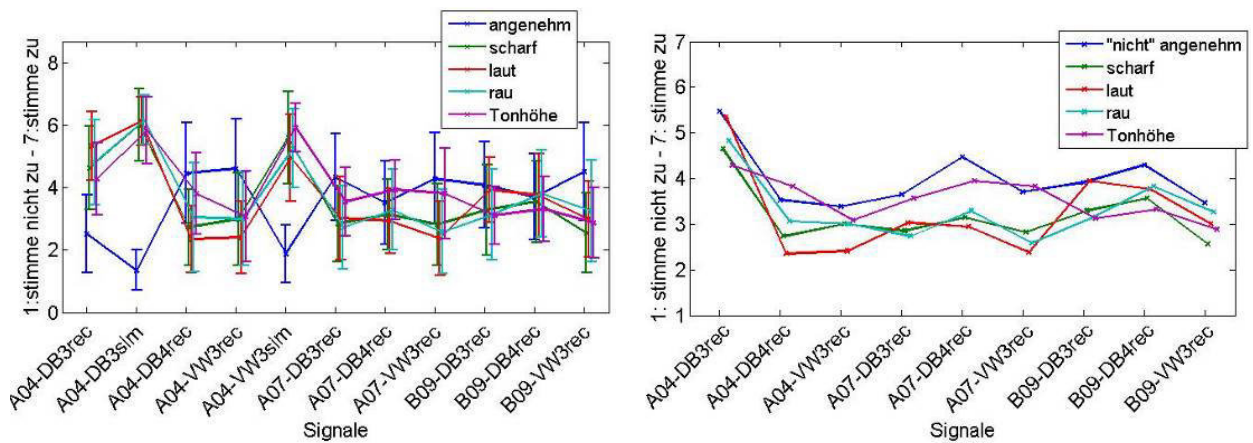
## Versuch 2

In diesem Versuch wurden aufgenommene Vorbeifahrten verwendet. Die Daten stammen aus den Spenberg-Messdaten [1]. Verwendet wurden die gleichen Reifen-Fahrbahn-Kombinationen wie im vorhergehenden Versuch. Der Versuch wurde Matlab-basiert mit Sennheiser HD650 Kopfhörern, in einem von Umgebungsgeräuschen abgeschirmten Raum, als Einzelversuch durchgeführt. Teilgenommen haben 17 Probanden, von denen ca. 1/4 auch am vorherigen Versuch teilgenommen haben. Jeder Proband hat den Versuch dreimal durchgeführt. Nur der 2. und 3. Durchgang wurden für die Auswertung betrachtet. Der erste Durchgang wurde als Training genutzt. Die Reihenfolge der Kombinationen von Signalen und Fragen war randomisiert.

Im Bild 4.3-33 in der linken Grafik sind die Ergebnisse des Hörversuches zu sehen. Aufgetragen sind die Mittelwerte mit Standardabweichung für alle untersuchten Signale.

Wie im vorherigen Versuch kann man sehen, dass die Angenehmheit invers zu den anderen abgefragten Größen verläuft. Die Standardabweichungen sind groß, aber sie überlappen nicht für alle Signale. Sie sind also unterscheidbar in ihren Eigenschaften.





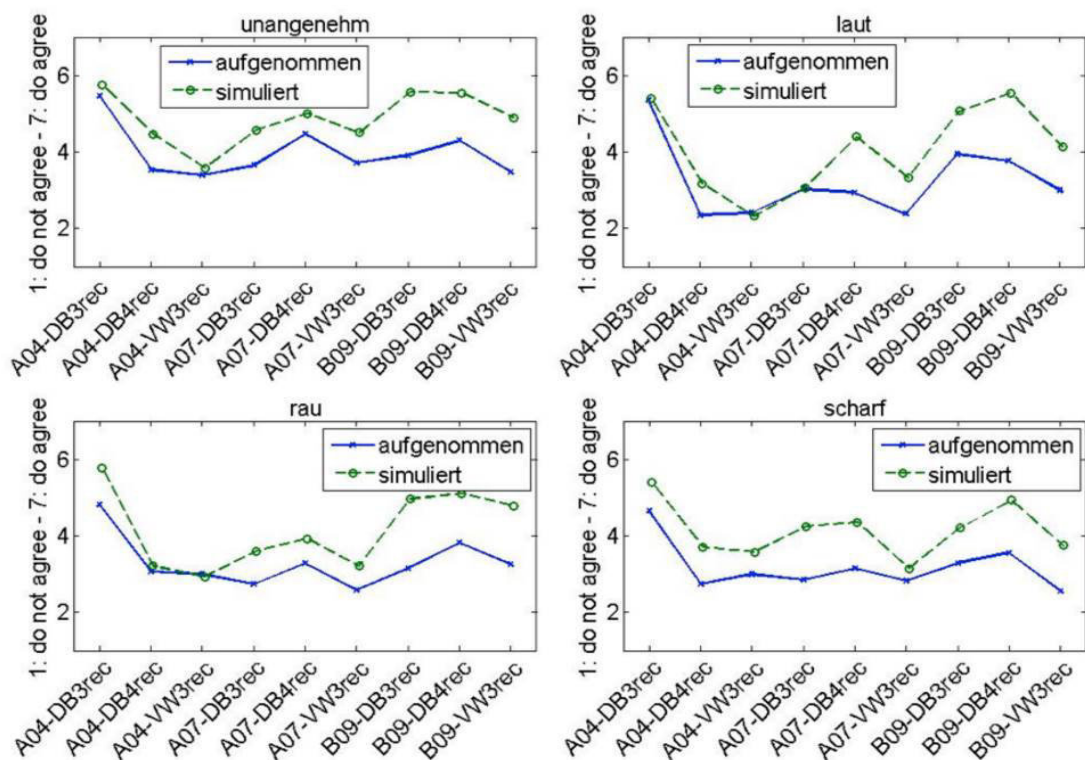
**Bild 4.3-33:** Mittelwerte und Standardabweichungen des Hörversuchs mit aufgenommenen Signalen über alle Probanden (links) und Mittelwerte der aufgenommenen Signale mit invertierten Werten für die „Angenehmheit“ (rechts). Die Antworten sind von 1 stimme nicht zu bis 7 stimme zu sind für die 11 Testsignale aufgetragen

Insgesamt sind die simulierten Signale deutlich stärker wahrgenommen worden. Dieses könnte durch eine andere Kalibrierung der Signale behoben werden. Dadurch wurde der Bewertungsraum für die anderen neun Signale deutlich reduziert.

Die Signifikanzen wurden wieder mit Hilfe einer einfaktoriellen Anova untersucht. Für alle untersuchten Wahrnehmungsgrößen kann die Nullhypothese „Die Wahrnehmung unterscheidet sich nicht zwischen den neun Rollgeräuschen“ abgelehnt werden. Das bedeutet, dass es signifikante Unterschiede zwischen mindestens zwei der bewerteten Signale gibt.

#### Vergleich

Die beiden Versuche können verglichen werden, obwohl die Aufnahmen zeitlich kürzer sind als die gerechneten Signale. Zum einen liegt der Schwerpunkt des Versuches auf einer qualitativen Auswertung. Zum anderen liegen alle Signale im Bereich konstanter Wahrnehmung (länger als 500 ms). Außerdem wurden die Versuchsteilnehmer in jedem Versuch auf die verwendeten Signale trainiert.



**Bild 4.3-34:** Vergleich der Wahrnehmung von aufgenommenem und simuliertem Signal für die (inverse) Angenehmheit, die Lautheit, die Rauigkeit und die Schärfe. Die Antworten von 1: stimme nicht zu bis 7 stimme zu sind für die neun Testsignale aufgetragen

In Bild 4.3-34 werden die aufgenommenen und die simulierten Signale in ihrer Bewertung hinsichtlich der verschiedenen Wahrnehmungsgrößen verglichen. Man kann sehen, dass die Bewertungen ähnlich sind, es scheint jedoch auch Unterschiede in der Bewertung für einige Signale zu geben. Die Abstände zwischen den Kurven haben keine Aussagekraft, da die Versuche mit unterschiedlichen Personen und leicht unterschiedlichen Bedingungen durchgeführt wurden. Zusätzlich wurden die Korrelationen zwischen den jeweiligen Signalen untersucht.

Für die Angenehmheit ergibt sich  $R=0.75$  und  $P=0.026$ . Das bedeutet, dass die Signale am 5%-Signifikanzniveau gemessen gleich sind, nach strengeren Kriterien jedoch nicht.

Für die Lautheit ergibt sich  $R=0.81$  und  $P=0.01$ . Das bedeutet, dass die Signale sowohl am 5%-Signifikanzniveau gemessen gleich sind, als auch am strengeren 1% Niveau. Für die Rauigkeit ergibt sich  $R=0.81$  und  $P=0.01$ . Das bedeutet, dass die Signale sowohl am 5%-Signifikanzniveau gemessen gleich sind als auch am strengeren 1% Niveau. Für die Schärfe ergibt sich  $R=0.81$  und  $P=0.01$ . Das bedeutet, dass die Signale sowohl am 5% Signifikanzniveau gemessen gleich sind, als auch am strengeren 1% Niveau. Für alle Wahrnehmungsgrößen ergeben sich Vertauschungen in der Rangfolge der Bewertung zwischen den aufgenommenen und simulierten Signalen. Diese werden in den Tabellen 4.3-5 bis 4.3-12 weiter untersucht. In der ersten Tabelle sind jeweils die Mittelwerte der Bewertung der Signale zu einem Begriff angegeben. In der zweiten Tabelle die sich daraus ergebenden Rangordnungen. Für die Angenehmheit kann man sehen, dass die stärksten und schwächsten Signale zwischen Simulation und Aufnahme übereinstimmen. Dazwischen gibt es Vertauschungen.

Für die Lautheit sind einige Signale vertauscht. Für die Rauigkeit stimmen die am stärksten bewerteten Signale überein, sonst gibt es Vertauschungen. Für die Schärfe stimmen die beiden am stärksten bewerteten Signale überein, sonst gibt es Vertauschungen. Im Allgemeinen kann man sagen, dass Vertauschungen da auftreten, wo die Signale sich nicht signifikant unterscheiden.

	A03-DB3	A03-DB4	A03-VW3	A07-DB3	A07-DB4	A07-VW3	B09-DB3	B09-DB4	B09-VW3
Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
simuliert	2.25	3.54	4.43	3.43	3.00	3.50	2.43	2.46	3.11
aufgenommen	2.53	4.47	4.62	4.35	3.53	4.29	4.09	3.71	4.53

**Tab. 4.3-5:** Vergleich der Mittelwerte der simulierten und aufgenommenen Signale für die Angenehmheit

simuliert	1	7	8	5	9	4	6	2	3
aufgenommen	1	5	8	7	6	4	2	9	3

**Tab. 4.3-6:** Rangordnung der simulierten und aufgenommenen Signale für die Angenehmheit

	A03-DB3	A03-DB4	A03-VW3	A07-DB3	A07-DB4	A07-VW3	B09-DB3	B09-DB4	B09-VW3
Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
simuliert	5.39	3.18	2.32	3.07	4.39	3.32	5.07	5.54	4.14
aufgenommen	5.35	2.35	2.41	3.03	2.94	2.38	3.94	3.76	3.00

**Tab. 4.3-7:** Vergleich der Mittelwerte der simulierten und aufgenommenen Signale für die Lautheit

simuliert	3	4	2	6	9	5	7	1	8
aufgenommen	2	6	3	5	9	4	8	7	1

**Tab. 4.3-8:** Rangordnung der simulierten und aufgenommenen Signale für die Lautheit

	A03-DB3	A03-DB4	A03-VW3	A07-DB3	A07-DB4	A07-VW3	B09-DB3	B09-DB4	B09-VW3
Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
simuliert	5.79	3.21	2.93	3.61	3.93	3.21	4.96	5.11	4.79
aufgenommen	4.82	3.06	3.00	2.74	3.29	2.59	3.15	3.82	3.26

**Tab. 4.3-9:** Vergleich der Mittelwerte der simulierten und aufgenommenen Signale für die Rauigkeit

simuliert	3	2	6	4	5	9	7	8	1
aufgenommen	6	4	3	2	7	9	5	8	1

**Tab. 4.3-10:** Rangordnung der simulierten und aufgenommenen Signale für die Rauigkeit

	A03-DB3	A03-DB4	A03-VW3	A07-DB3	A07-DB4	A07-VW3	B09-DB3	B09-DB4	B09-VW3
Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
simuliert	5.39	3.71	3.57	4.25	4.36	3.14	4.21	4.93	3.75
aufgenommen	4.65	2.74	3.00	2.85	3.15	2.82	3.29	3.56	2.56

**Tab. 4.3-11:** Vergleich der Mittelwerte der simulierten und aufgenommenen Signale für die Schärfe

simuliert	6	3	2	9	7	4	5	8	1
aufgenommen	9	2	6	4	3	5	7	8	1

**Tab. 4.3-12:** Rangordnung der simulierten und aufgenommenen Signale für die Schärfe

## Ergebnisse der Validierung

Die auralisierten Signale stimmen in der Wahrnehmung schon recht gut mit den aufgenommenen Signalen überein. Das heißt, die Auralisierung funktioniert als Methode zur Einschätzung von Reifen-Fahrbahngeräuschen. Bei der genaueren Betrachtung der Signale und der Auralisierungsmethode sind jedoch einige Schwachstellen aufgefallen. Zum einen werden nur Frequenzen über 315 Hz betrachtet. Für die Wahrnehmung sind jedoch auch tiefere Frequenzen von Bedeutung. Außerdem werden die Signale in Terzbändern behandelt. Dabei können Schwankungen und tonale Anteile unterdrückt werden.

Die Bedeutung beider Aspekte und mögliche Verbesserungen in der Auralisierung sollen im Folgenden untersucht werden

### 4.3.6.2 Optimierung

Die Analyse der zwei vorangegangenen Versuche ergab zwei Optimierungsansätze. Zum einen sollen die tiefen Frequenzen unter 315 Hz mit berücksichtigt werden und zum anderen sollen tonale Komponenten ermittelt werden und in der Auralisierung ergänzt werden.

Es soll untersucht werden, welchen Einfluss die Optimierungen auf das Signal haben und in welchem Umfang die Auralisierung verbessert werden kann.

### Tiefe Frequenzen

Die verwendeten Simulationen brechen bei Frequenzen unter 315 Hz ab. Dieser Bereich ist aber für den Höreindruck wichtig. Folglich sollen diese Frequenzen stärker mit berücksichtigt werden. Eine Idee ist, vor der Auralisierung Werte für die tieferen Frequenzen zu ergänzen.

### Modell

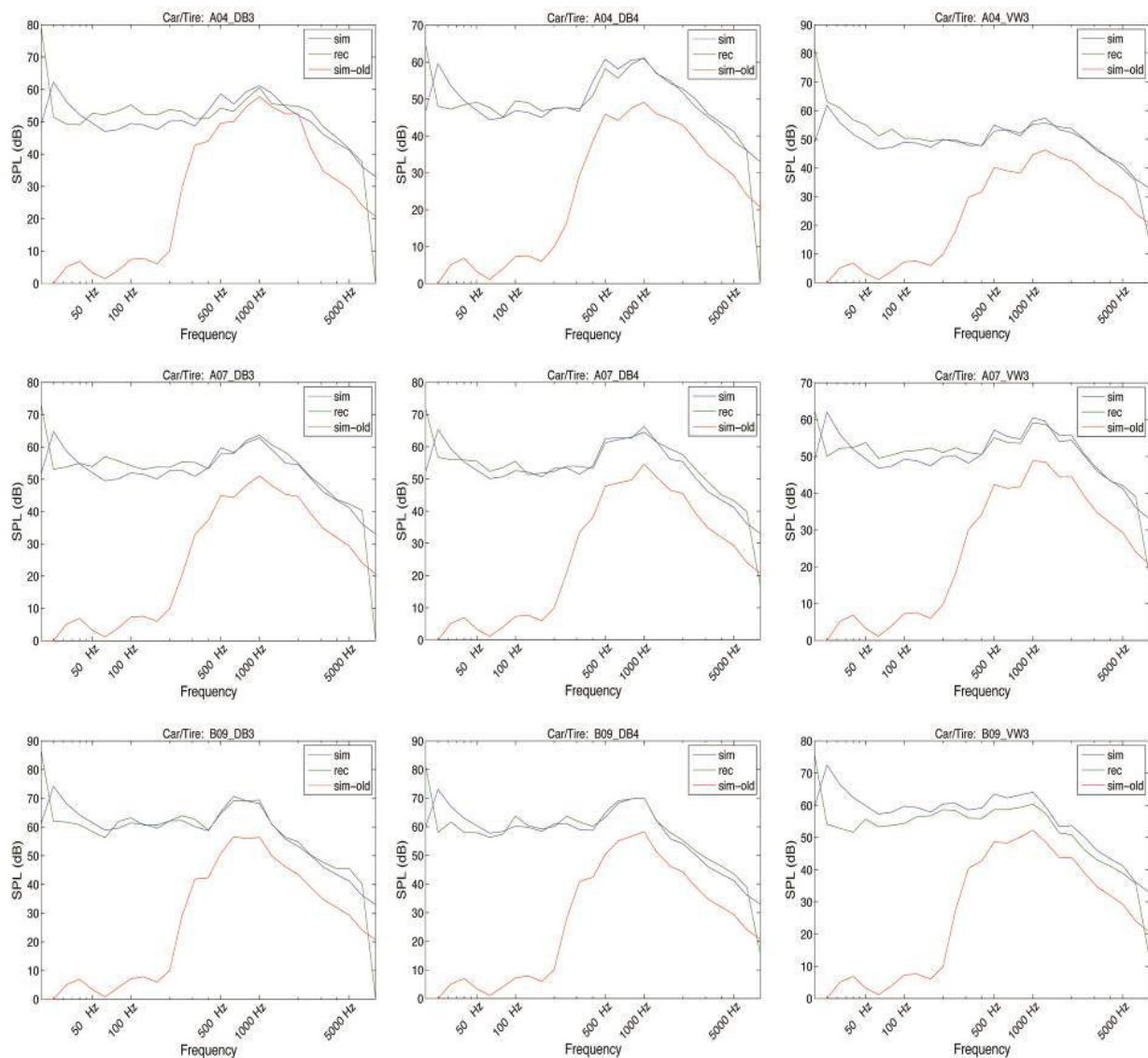
Um passende Kalibrationswerte zu ermitteln, wurden die simulierten Signale im Vergleich zu aufgenommenen Signalen unter „gleichen“ Bedingungen (gleiche Straße, gleicher Reifen, gleiche Geschwindigkeit) betrachtet. Die aufgenommenen Signale wurden über ihre Maximalpegel ( $L_{AFmax}$ ) kalibriert.

Um die simulierten Signale in der Auralisierung an die aufgenommenen Signale anzupassen, wurden die Daten im Übergang zwischen SPERoN und der Auralisierung mit Hilfe zusätzlicher Kalibrierungswerte angepasst. Dabei wurden fünf Frequenz-Bereiche unterschieden. Die tiefsten drei Bereiche beruhen auf dem tiefsten Wert aus SPERoN, da es für Frequenzen unter 315 Hz keine Daten aus SPERoN gibt. Das tiefste Terzband (erster Bereich) wurde am stärksten verstärkt (+12). Die folgenden sieben Terzbänder (zweiter Bereich) hatten leicht abfallende Werte (von 2 bis -1). Die folgenden drei Terzbänder (dritter Bereich) wieder leicht ansteigende Werte. Dann kommt der Bereich vier mit Werten aus SPERoN ohne zusätzlichen Kalibrationswert (die neun Frequenzbänder von 315 Hz bis 2000 Hz). Die höheren Frequenzbänder wurden alle um -7 abgeschwächt (Bereich fünf).

Dieselben Anpassungswerte wurden für alle Reifen-Straßen Kombinationen verwendet.

In Bild 4.3.-35 sind die Signale im Vergleich aufgetragen. Zu sehen sind für jede Reifen-Straßen-Kombination die simulierten und die aufgenommenen Signale. Zusätzlich sind auch die ursprünglichen Simulationen (sim-old) aufgetragen.

Wie man in Bild 4.3-35 sehen kann, ist der Unterschied zwischen den simulierten und aufgenommenen Signalen in fast allen Fällen ähnlich. Nur der Fall A04\_DB3 fällt aus der Reihe. Dies kann unter anderem an den deutlich abweichenden Kalibrationswerten für die Aufnahme liegen. Dieser Unterschied könnte allerdings auch auf einen Messfehler hinweisen.



**Bild 4.3-35:** Vergleich zwischen aufgenommenem Signal, der ersten Simulation und der aktuellen Optimierung für die verwendeten Straßenbeläge und Reifen

### Hörversuch

Für den Hörversuch wurden sowohl aufgenommene als auch simulierte Signale verwendet. In beiden Fällen wurden die neun schon in früheren Versuchen verwendeten Reifen-Fahrbahn Kombinationen verwendet. Sie basieren auf Vorbeifahrten mit 50 km/h mit den Fahrbahnoberflächen A04, A07 und B09, und den Reifen DB03, DB04 und VW03.

Die aufgenommenen Signale waren auf ihren Maximalschallpegel kalibriert ( $L_{AFmax}$ ). Die simulierten Signale wurden wie oben beschrieben erzeugt und die tiefen Frequenzen angepasst.

Der Versuch wurde als Kategorial Skalen-Versuch durchgeführt. Die Versuchssprache war schwedisch.

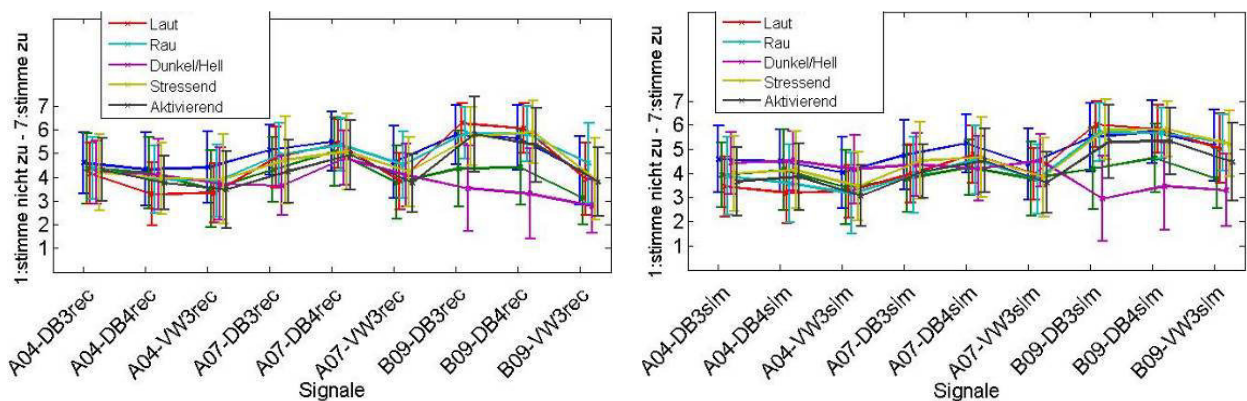
Die verwendeten Begriffe waren wie im vorhergegangenen Versuch Angenehmheit, Schärfe, Lautheit, Rauigkeit und Klangfarbe. Hinzugenommen wurden noch Stress und Aktivierung. Die Antwortskala hatte sieben Stufen. Für Aussage fünf waren die Endpunkte mit dunkel / hell benannt. Für alle anderen Aussagen waren die Endpunkte mit stimme nicht zu / stimme zu benannt.

Der Versuch wurde in einem schallisolierten neutralen Raum als Einzelversuch durchgeführt und die Durchführung war computerbasiert. Die Geräusche wurden über einen Sennheiser HD 650 Kopfhörer wiedergegeben (kalibriert via Kunstkopf). Signale und Fragen wurden randomisiert dargeboten. Es wurde jeweils eine Frage mit einem Signal abgefragt.

An dem Versuch haben insgesamt 20 Personen teilgenommen. Zwei Datensätze wurden jedoch wegen Unvollständigkeit verworfen. Zur Auswertung wurden 18 Datensätze verwendet.

## Ergebnisse

In Bild 4.3-36 sind die Ergebnisse des Hörversuches dargestellt. Auf den ersten Blick sehen die Bewertungen der Signale recht ähnlich aus zwischen simulierten (rechts) und aufgenommenen (links) Signalen. In beiden Fällen weichen die Bewertungen für Schärfe und Klangfarbe (besonders für die letzten drei Begriffe) von den anderen Begriffen ab. Die Unterschiede zwischen den Bewertungen der verschiedenen Signale scheinen sich für simulierte und aufgenommene Signale zu ähneln.



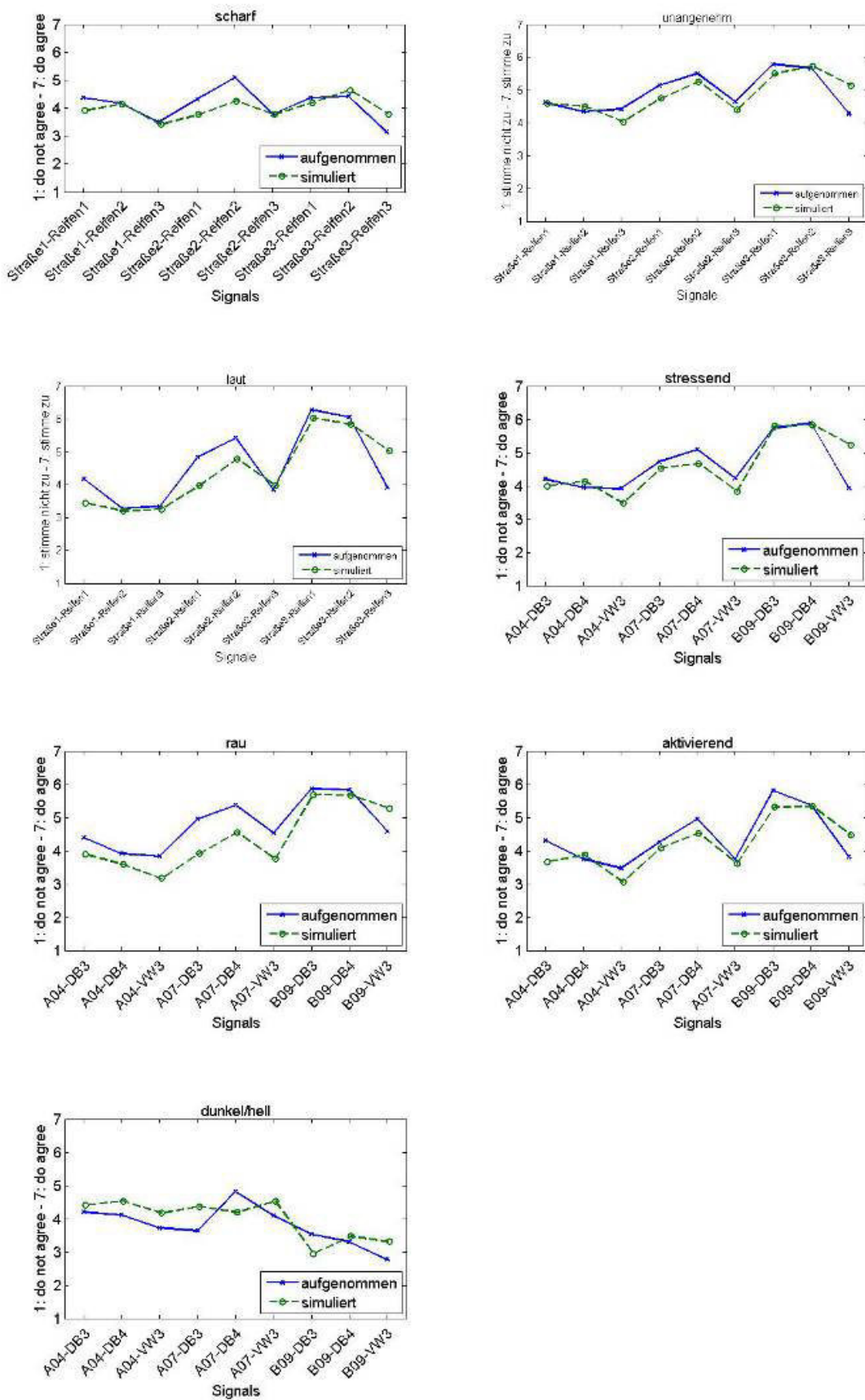
**Bild 4.3-36:** Ergebnisse des Hörversuches für die aufgenommenen (links) und simulierten (rechts) Signale. Abgebildet sind Mittelwerte und Standardabweichung für die sieben untersuchten Begriffe. Für jedes Signal sind die Werte von stimme nicht zu (1) bis stimme zu (7) aufgetragen. (links)

Mit einer ANOVA wurde bestätigt, dass die Signale sich signifikant unterscheiden und die Daten aussagekräftig und interpretierbar sind.

Um besser vergleichen zu können wie ähnlich simulierte und aufgenommene Signale für verschiedene Begriffe bewertet werden, sind sie in Bild 4.3-37 zusammen dargestellt pro Begriff. Man kann sehen, dass sich die Bewertungen deutlich dichter gekommen sind im Vergleich zur vorherigen Simulation (Bild 4.3-34). Dies liegt aber auch an der besseren Kalibrierung der aufgenommenen Signale.

	angenehm	scharf	laut	rau	Klangfarbe	stressend	aktivierend
R	0.769	0.658	0.86	0.843	0.672	0.782	0.877
P	0.015	0.054	0.003	0.004	0.048	0.012	0.002
Rold	0.729	0.852	0.813	0.811	-	-	-
Pold	0.026	0.004	0.008	0.008	-	-	-

**Tab. 4.3-13:** Korrelationswerte zwischen den aufgenommenen und simulierten Signalen vom neuen Versuch (R, P) und vom vorhergehenden Versuch (Rold, Pold)



**Bild 4.3-37:** Vergleich zwischen aufgenommenen und simulierten Signalen für jeden Begriff. Aufgetragen sind jeweils die Mittelwerte der Bewertungen über den neun Signalen.

In Tabelle 4.3-13 sind die entsprechenden Korrelationen berechnet. Demnach korrelieren die Bewertungen für „angenehm“, „laut“, „rau“ und „aktivierend“ eindeutig. Das heißt, simuliertes und aufgenommenes Signal werden gleich bewertet.

Für die Schärfe lässt sich keine Korrelation finden. Die Klangfarbe korreliert nur nach der 5% Grenze.

Für „stressend“ liegt der Wert nur über der 1%-Grenze. Das heißt, die Bewertung ist ähnlich aber nicht gleich.

In Tabelle 4.3-13 sind ebenfalls die Korrelationswerte des vorherigen Versuches angegeben. Für „angenehm“, „rau“ und „laut“ konnten diese verbessert werden. Für die Schärfe hat sich der Wert verschlechtert. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Schärfe immer sehr neutral bewertet wurde. Durch das Ergänzen der tiefen Frequenzen wurde dieses verstärkt und der relative Anteil der für den Höreindruck der Schärfe wichtigen hohen Frequenzen reduziert.

Die Bewertungen der neuen Simulierung liegen nah an denen der aufgenommenen Signale. Es konnte eine Verbesserung im Vergleich zur vorherigen Simulierung erreicht werden. Verschlechtert hat sich die Ähnlichkeit der Bewertung nur für die Schärfe. Diese Verschlechterung ist aber nicht sehr aussagekräftig und nicht gut zu interpretieren, da die Schärfe für alle Signale sehr ähnlich und sehr in der Mitte bewertet wurde.

Durch das Ergänzen der tiefen Frequenzen wurde die Schärfe in der Simulierung für alle Signale reduziert.

Wie schon in den vorherigen Versuchen sind die Bewertungen der Geräusche für die verschiedenen Begriffe recht ähnlich. Da die Variation für Lautheit, Rauigkeit ähnlich zueinander läuft sind die Ursachen vermutlich dieselben (eine rauere Oberfläche klingt meist sowohl rauer als auch lauter).

Lautheit und Rauigkeit korrelieren hoch mit „stressend“, „aktivierend“ und inverser Angenehmheit. Sie scheinen die Hauptfaktoren für diese Empfindungen zu sein.

Beide scheinen den Haupteffekt für die Wahrnehmungsintensität auszumachen. Zumindest die Lautheit ist aber kein favorisiertes Mittel zur Generierung von Warngeräuschen oder ähnlichem.

### **Tonale Komponenten**

Eine Schwäche bei der verwendeten Auralisierungs-Methode ist, dass das Signal in Terzbändern behandelt wird. Dabei geht die Information um tonale Anteile verloren. Dieses kann zu einem falschen Höreindruck und damit zu einer falschen Wahrnehmung des Signales führen.

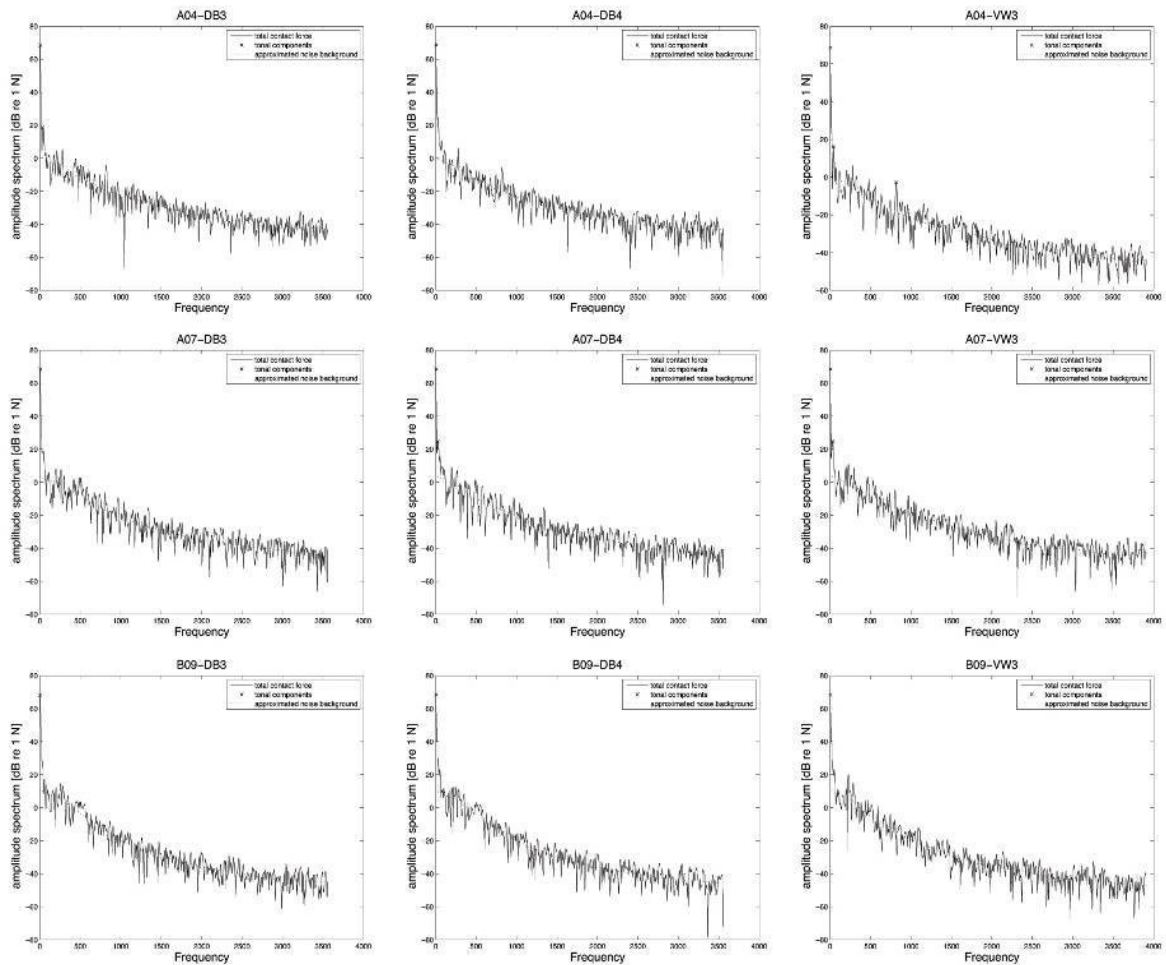
Deswegen sollen in der nächsten Optimierung der Auralisierung tonale Komponenten in der Simulierung der Signale detektiert werden, um dann in der Auralisierung berücksichtigt werden zu können.

Die Schallpegel liegen in SPERoN nur in Terzpegeln vor. Es ist aber möglich, für die generierten Signale das Spektrum der Kontaktkräfte zu betrachten. Diese sind linear mit den Schallpegeln verknüpft. Daher können die tonalen Komponenten und ihre relative Stärke aus den Kontaktkräften ermittelt werden.

Wenn in einem Signal tonale Komponenten detektiert werden, wird deren Energiegehalt ermittelt. Die Energie im zugehörigen Schalldruckpegel-Terzband wird aufgeteilt in den Anteil der tonalen Komponente und den Anteil für das Rauschen. Der Rauschanteil wird für das Terzband eingetragen und wie zu vor in die Auralisierung übergeben. Die Energie der tonalen Komponente wird zur Generierung eines Tons bei entsprechender Frequenz verwendet.

Dieser Ton wird in der Auralisierung getrennt behandelt und dem Signal dann hinzugefügt.

Bei den Signalen, die in den vorherigen Versuchen zur Validierung verwendet wurden, enthält nur das Signal A04-VW3 eine tonale Komponente wie in Bild 4.3-38 zu sehen ist. Diese tonale Komponente ist recht schwach.



**Bild 4.3-38:** Spektren der Kontaktkräfte der verwendeten Reifen-Fahrbahn-Konstellationen der Simulation in SPERoN

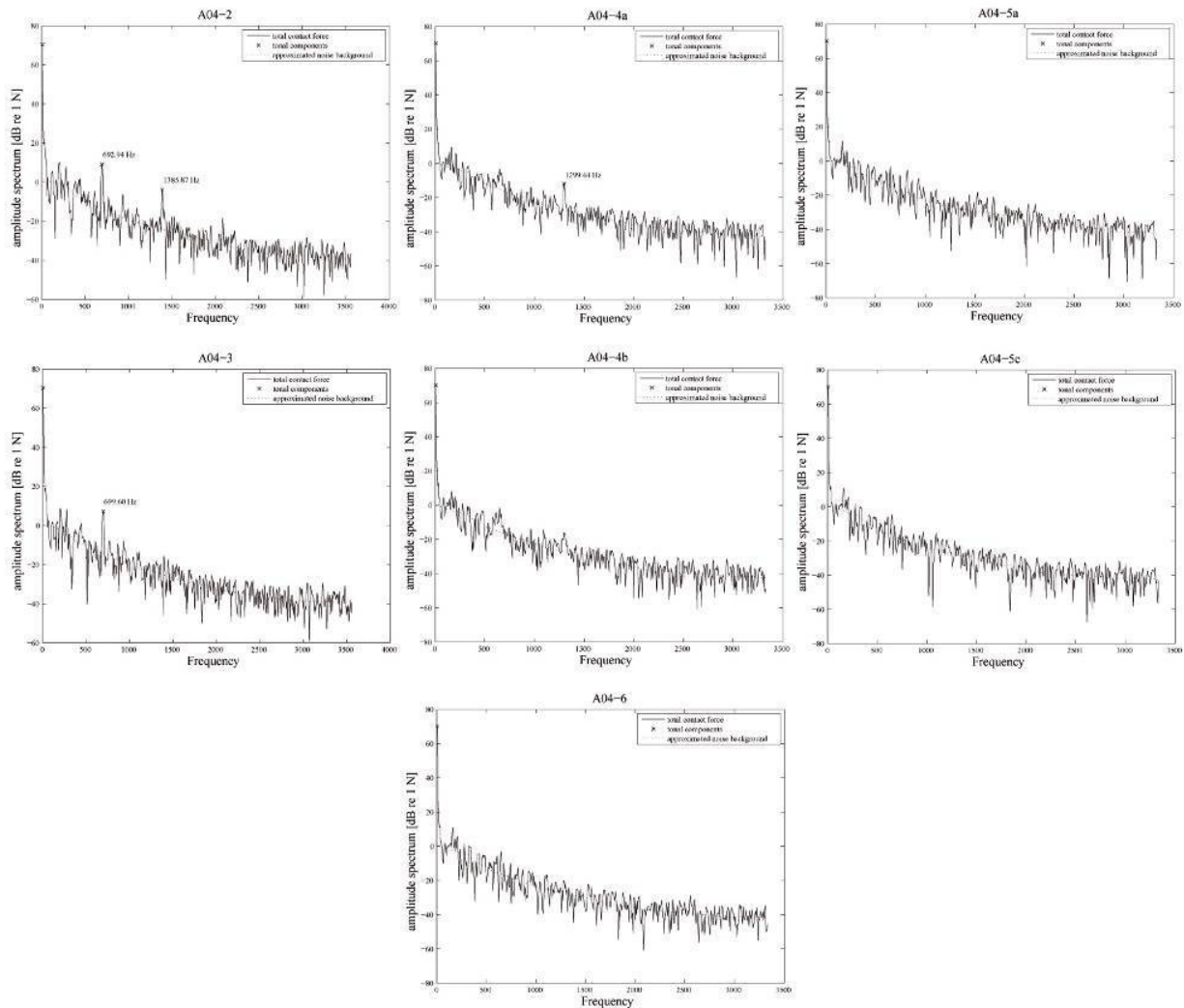
Peaks im Spektrum müssen ausgeprägt genug sein, um als tonale Komponente interpretiert zu werden. Nimmt man zu schwache Peak als tonale Komponente mit, wird sie in der Auralisierung stark übersteuert und dominiert das Signal.

Wegen Mangel an tonalen Anteilen wurde kein vergleichender Hörversuch mit diesen Signalen durchgeführt.

Im Projekt wurden Reifen entwickelt, die starke tonale Komponenten enthalten. Eine Analyse der Signale (Bild 4.3-39) zeigt, dass Signal A04-2 zwei tonale Komponenten hat. Eine bei 693 Hz und eine bei 1386 Hz. Signal A04-3 beinhaltet eine tonale Komponente bei 699 Hz und Signal A04-4a eine bei 1299 Hz.

Bei diesen Signalen verbessert sich der Höreindruck durch Hinzufügen der tonalen Komponente. Durch Verzögerungen im Projektablauf kann dieses jedoch noch nicht per Hörversuch belegt werden.





**Bild 4.3-39:** Spektren der Kontaktkräfte der im Projekt entwickelten und untersuchten Reifen (Frank Stalter) simuliert in SPERoN

## Fazit zur Optimierung

Die Ergebnisse zeigen, dass die tiefen Frequenzen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Wahrnehmung der auralisierten Signale haben. Die Korrelationswerte zwischen aufgenommenen und simulierten Signalen konnten unter Berücksichtigung der tiefen Frequenzen deutlich verbessert werden. Diese Optimierung sollte beibehalten werden. Die untersuchten tonalen Komponenten müssen von Fall zu Fall betrachtet werden. Nur bei stark ausgeprägten tonalen Komponenten kann eine Verbesserung des Höreindrucks erzielt werden. Es kann aber auch leicht zu einer Verfälschung des Höreindrucks kommen. Eine genaue Validierung dieser Optimierung steht durch Mangel passender Signale noch aus.

### 4.3.7 Psychoakustische Charakterisierung von Fahrzeuggeräuschen

Ein wichtiger Aspekt des Projektes war die Frage wie Rollgeräusche wahrgenommen werden. Dabei sollten den Fragen nachgegangen werden, ob sich Rollgeräusche genügend unterscheiden, um sie psychoakustisch zu charakterisieren und ob sich Berechnungen wichtiger Größen in SPERoN implementieren lassen.

Das Ziel ist es, aus dem von SPERoN gelieferten Spektrum Rückschlüsse auf die psychoakustische Wahrnehmung der Geräusche machen zu können.

Zur Entwicklung eines psychoakustischen Modells zur Ergänzung von SPERoN wurde nach ausführlicher Literaturrecherche "psychoakustische Belästigung (psychoacoustic annoyance)" von Fastl und Zwicker [26] als Basisgröße ausgewählt. Diese basiert auf der Lautheit, der Schärfe, der Rauigkeit und der Schwankungsstärke eines Signals. Es soll untersucht werden, ob diese Größen auch für Reifengeräusche eine hinreichend genaue Differenzierung liefern oder ob andere Begriffe hinzugezogen müssen, um die

Signale zu charakterisieren. Die Überprüfung soll sowohl im Experiment als auch anhand von Modellen stattfinden. Nach gründlicher Literaturstudie wurde entschieden, mit vorhandenen Aufnahmen von Fahrzeuggeräuschen psychoakustische Größen zu untersuchen. Für diese Aufnahmen sind auch alle relevanten Daten für SPERoN vorhanden.

Die Signale sollen verschiedene Straßenoberflächen, verschiedene Reifen und verschiedene Geschwindigkeiten abdecken. Es sollen auch Möglichkeiten offen gehalten werden, später Beschleunigungssignale und verschiedene Antriebsverfahren zu betrachten. Die verwendeten Signale waren so ausgewählt, dass sich für diese Fragestellung eine größtmögliche Variation in den Signalen wiederfindet, um einen möglichst großen Wahrnehmungsraum abzudecken und zu klassifizieren.

## Hörversuche

Die Versuche waren so konzipiert, dass sie auch die psychoakustischen Fragen beantworten sollten:

Wie werden Reifengeräusche wahrgenommen (psychoakustisch)?

Können Reifengeräusche anhand dieser Wahrnehmung differenziert werden?

An welchen Größen orientiert sich hauptsächlich wie angenehm ein Reifengeräusch ist?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden zwei Grundversuche und ein Folgeversuch konzipiert und durchgeführt.

Verschiedene Methoden sollen in den Versuchen verwendet werden:

Zum einen sollen die Geräusche mithilfe einer Kategorial-Skalierung bezüglich der Angenehmheit und der dazugehörigen Begriffe (Lautheit, Schärfe, Rauigkeit und Schwankungsstärke) bewertet werden.

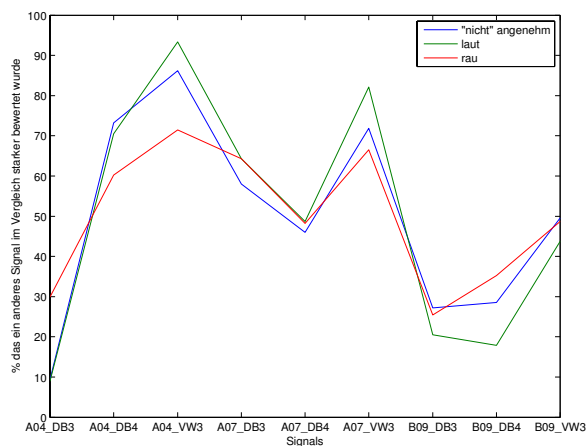
In einem Paarvergleich sollten die Signale in den verschiedenen Charakterisierungen sortiert werden, um einen ordinalen Vergleich mit den Modellen machen zu können.

Die Probanden wurden in den Kategorial-Skalierungsversuchen durch einen Trainingsdurchlauf, der nicht zur Auswertung benutzt wurde, auf die verwendeten Signale trainiert. Beim Paarvergleich war das Training durch einen vorangegangenen Kategorialskalierungsversuch schon vorhanden.

Der Paarvergleich wurde aus Zeitgründen nur für die Begriffe „angenehm“, „laut“, und „rau“ durchgeführt. Die Signalreihenfolge war pro Wiederholung randomisiert und die Frage war: „Welches Signal ist angenehmer/lauter/rauer?“ und es musste eine Entscheidung zwischen Signal A und Signal B getroffen werden. Teilgenommen haben dieselben Personen wie in der ersten Kategorialskalierung. Der Versuch wurde computerbasiert durchgeführt.

In Bild 4.3-40 sind die Ergebnisse des Paarvergleichs zu sehen. Angegeben ist der Prozentsatz, der dieses Signal schwächer bewertet hat als jedes andere.

Das heißt für den ersten Wert, dass 10% das andere Signal als weniger angenehm und lauter bewertet haben und 30% das andere Signal als rau bewertet haben. Es ist also hiernach das unangenehmste, lauteste und raueste Signal.



**Bild 4.3-40:** Ergebnisse des Paarvergleichs: Für jedes Signal sind die Prozent angegeben, die die anderen Signale in Vergleich in der Bewertung präferiert wurden.

Für den dritten Wert ergibt sich, dass 85% das andere Signal als weniger angenehm bewertet haben, 90% das andere Signal als lauter bewertet haben und 70% das andere Signal als rauer bewertet haben. Es ist damit das angenehmste, leiseste und am wenigsten raue Signal. Dieses deckt sich mit den Ergebnissen der kategorialen Skalierung. Auch sonst sieht der Verlauf recht ähnlich aus.

Im ersten Versuch mit kategorialer Skalierung wurden die Begriffe angenehm, scharf, laut, rau und schwankend untersucht.

Die Ergebnisse wurden mit einer einfaktoriellen ANOVA untersucht und ergaben signifikante Effekte für alle Begriffe außer der Schwankungsstärke. Für die Begriffe angenehm, scharf, laut und rau wurde zusätzlich eine repeated-measure ANOVA durchgeführt, die den Einfluss von Reifen und Straße und deren Interaktion ermittelt hat. Es konnten für alle Begriffe signifikante Effekte durch die Straße gefunden werden. Für die Reifen konnte für die Schärfe kein signifikanter Effekt gefunden werden. Die Interaktion war in allen Fällen signifikant.

Das bedeutet, dass Reifengeräusche psychoakustisch unterscheidbar sind und es sogar möglich ist, verschiedene Reifen und Straßen psychoakustisch zu unterscheiden.

Um zu untersuchen, welchen Einfluss die verschiedenen Begriffe auf einander haben, wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt

		angenehm	scharf	laut	rau	schwankend
angenehm	P	1	-0.7642	-0.9681	-0.9121	-0.7437
	R	1	0.0165	0.0000	0.0006	0.0216
scharf	P		1	0.7746	0.7989	0.3240
	R		1	0.0143	0.0098	0.3982
laut	P			1	0.9253	0.8096
	R			1	0.0003	0.0082
Rau	P				1	0.7591
	R				1	0.0177
schwankend	P					1
	R					1

**Tab. 4.3-14:** Korrelation zwischen den psychoakustischen Attributen aus dem ersten Kategorialskalierungsversuch

Wie in Tabelle 4.3-14 zu erkennen ist, korrelieren vor allem Rauigkeit und Lautheit stark mit der inversen Angenehmheit. Aber auch untereinander korrelieren die beiden Größen stark. Die einzigen Größen, die nicht stark mit einander korrelieren sind Schärfe und Schwankungsstärke.

Zu vermuten ist, dass die hinter den unterschiedlichen Rollgeräuschen liegenden Effekte meist mehrere Größen gleichzeitig beeinflussen.

Eine Möglichkeit dies zu umgehen, wäre die Signale so zu verändern, dass jeweils nur ein psychoakustisches Attribut variiert wird, um genauer untersuchen zu können, ab wann welche Attribute einen Einfluss auf die Angenehmheit haben.

Für den zweiten Versuch wurde der Begriff schwankend gegen eine Frage nach der Klangfarbe ausgetauscht.

In Bild 4.3-33 sind die aufgenommenen Signale dargestellt. Der Verlauf der meisten Wahrnehmungsgrößen ähnelt sich. Nur die Klangfarbe scheint abzuweichen.

In Tabelle 4.3-15 sind die Ergebnisse einer Korrelationsanalyse für diesen Versuch aufgetragen. Die Angenehmheit korreliert invers mit den anderen Größen. Unter Anwendung der strengeren 1% Signifikanz-Grenze korreliert die Klangfarbe nicht mit den anderen Größen.

Alle anderen Größen korrelieren miteinander.

		angenehm	scharf	laut	rau	Klangfarbe
Angenehm	P	1	-0.9266	-0.8509	-0.8742	-0.6695
	R	1	0.0003	0.0036	0.0020	0.0485
Scharf	P		1	0.9074	0.9015	0.5182
	R		1	0.0007	0.0009	0.1530
Laut	P			1	0.8762	0.3000
	R			1	0.0019	0.4328
Rau	P				1	0.3888
	R				1	0.3010
Klangfarbe	P					1
	R					1

**Tab. 4.3-15:** Korrelationswerte (P-Werte) der verschiedenen Wahrnehmungsgrößen zueinander. Werte größer 0.01 (strenges Kriterium) werden als nicht korrelierend angesehen.

Im dritten Versuch wurden die Fragen nach Stress und nach Aktivierung ergänzt.

Die Ergebnisse wurden mit einer einfaktoriellen ANOVA untersucht und ergaben signifikante Effekte für alle Begriffe außer der Schärfe. Für die anderen Begriffe wurde zusätzlich eine repeated-measure ANOVA durchgeführt, die den Einfluss von Reifen und Straße und deren Interaktion ermittelt hat. Es konnten für alle Begriffe signifikante Effekte durch die Straße gefunden werden. Für die Reifen konnte für die Klangfarbe kein signifikanter Effekt gefunden werden. Die Interaktion war nur für die Lautheit und die Klangfarbe signifikant.

Beide Versuche bestätigen, dass Reifengeräusche psychoakustisch unterscheidbar sind und es sogar möglich ist, verschiedene Reifen und Straßen psychoakustisch zu unterscheiden.

Auch hier wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt, um die Effekte der Begriffe auf einander zu untersuchen.

	angenehm	scharf	laut	rau	Klangfarbe	stressend	aktivierend
Angenehm	1.0000	-0.8111	-0.9320	-0.9530	0.7460	-0.9616	-0.9830
Scharf		1.0000	0.6357	0.6661	-0.3527	0.7114	0.8091
Laut			1.0000	0.9680	-0.8711	0.9439	0.9409
Rau				1.0000	-0.8881	0.9742	0.9511
Klangfarbe					1.0000	-0.8567	-0.7765
Stressend						1.0000	0.9798
Aktivierend							1.0000

**Tab. 4.3-16:** R-Werte der Korrelationsanalyse für die simulierten Signale. Untersucht wurde, inwieweit die Bewertung der verschiedenen Begriffe korreliert.

	angenehm	scharf	laut	rau	Klangfarbe	stressend	aktivierend
Angenehm	1.0000	0.0080	0.0003	0.0001	0.0210	0.0000	0.0000
Scharf		1.0000	0.0657	0.0501	0.3518	0.0316	0.0083
Laut			1.0000	0.0000	0.0022	0.0001	0.0002
Rau				1.0000	0.0014	0.0000	0.0001
Klangfarbe					1.0000	0.0032	0.0139
Stressend						1.0000	0.0000
Aktivierend							1.0000

**Tab. 4.3-17:** P-Werte der Korrelationsanalyse für die simulierten Signale. Untersucht wurde, inwieweit die Bewertung der verschiedenen Begriffe korreliert.

	angenehm	scharf	laut	rau	Klangfarbe	stressend	aktivierend
angenehm	1.0000	-0.7155	-0.9707	-0.9400	-0.0919	-0.9757	-0.9386
scharf		1.0000	0.6200	0.5483	0.6667	0.6266	0.6566
laut			1.0000	0.9840	-0.0748	0.9740	0.9709
rau				1.0000	-0.1351	0.9542	0.9368
Klangfarbe					1.0000	-0.0536	-0.0080
stressend						1.0000	0.9526
aktivierend							1.0000

**Tab. 4.3-18:** R-Werte der Korrelationsanalyse für die aufgenommenen Signale. Untersucht wurde, inwieweit die Bewertung der verschiedenen Begriffe korreliert.

	angenehm	scharf	laut	rau	Klangfarbe	stressend	aktivierend
angenehm	1.0000	0.0302	0.0000	0.0002	0.8142	0.0000	0.0002
scharf		1.0000	0.0749	0.1264	0.0499	0.0710	0.0547
laut			1.0000	0.0000	0.8483	0.0000	0.0000
rau				1.0000	0.7289	0.0001	0.0002
Klangfarbe					1.0000	0.8911	0.9836
stressend						1.0000	0.0001
aktivierend							1.0000

**Tab. 4.3-19:** P-Werte der Korrelationsanalyse für die aufgenommenen Signale. Untersucht wurde, inwieweit die Bewertung der verschiedenen Begriffe korreliert.

In Tabellen 4.3-16 bis 4.3-19 sind die Korrelationswerte zwischen den verschiedenen Begriffen angegeben, einmal für die aufgenommenen und einmal für die simulierten Signale. Die P-Werte bestätigen, dass die meisten Begriffe sehr ähnlich bewertet werden. Schärfe und Klangfarbe fallen jedoch raus. Sie korrelieren zwar teilweise auch mit den anderen Begriffen, jedoch deutlich schwächer. Bei den aufgenommenen Signalen ist dieser Unterschied stärker als für die simulierten Signale. Für die aufgenommenen Signale (Tabelle 4.3-19) korreliert nach dem 1 %-Kriterium weder Schärfe noch Klangfarbe mit einem anderen Begriff.

Betrachtet man die R-Werte für die beiden Signalarten (Tabelle 4.3-16 und 4.3-18) sieht man anhand des Vorzeichens, dass die Angenehmheit in beiden Fällen invers zu den anderen Größen verläuft. Für die simulierten Geräusche ist auch die Klangfarbe invers, jedoch nicht für die aufgenommenen Signale. Die Korrelation ist jedoch immer sehr schwach.

Die stärksten Parameter sind in jedem der Versuche Rauigkeit und Lautheit. Sie beeinflussen sowohl die Angenehmheit als auch den Stress und die Aktivierung.

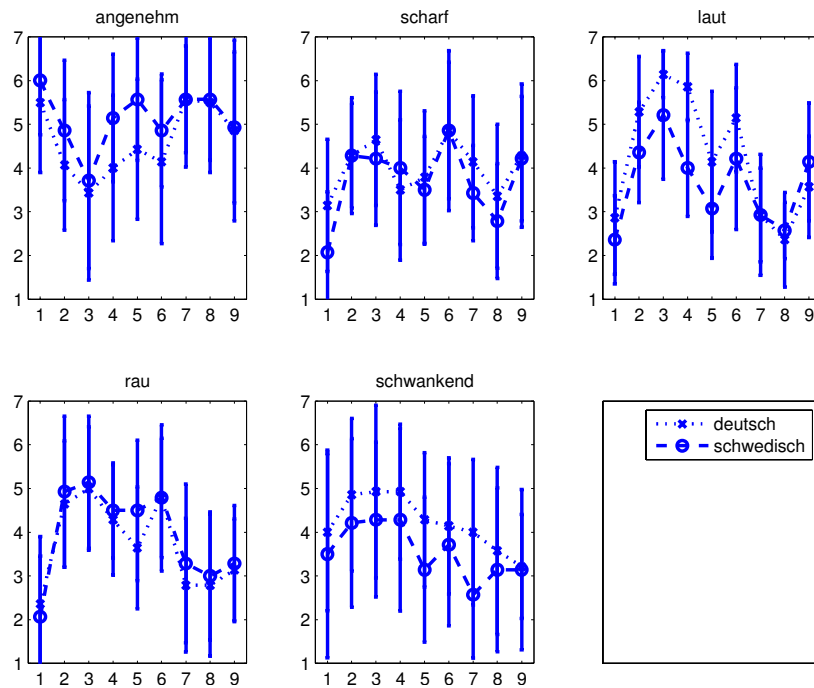
Der Vergleich mit psychoakustischen Rechenmodellen ergab für die Lautheit gute Übereinstimmung. Für die Schärfe und die Rauigkeit konnten keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt werden. Für die anderen untersuchten Größen gibt es noch keine weit genug entwickelten Modelle.

#### 4.3.8 Einfluss der Versuchssprache

Da diese Arbeit Teil eines deutschen Forschungsprojektes ist, aber die Versuche in Schweden durchgeführt werden sollten, wurde der erste Versuch zweisprachig durchgeführt. Teilgenommen haben je zur Hälfte Muttersprachler in Deutsch und in Schwedisch, um zu untersuchen ob die Sprache einen signifikanten Einfluss auf die Untersuchten Fragestellungen hat.

Wie in Bild 4.3-41 zu sehen ist, führten die deutschsprachigen und die schwedischsprachigen Versuchsreihen nicht zu den exakt gleichen Ergebnissen, liegen aber sehr dicht bei einander.

Zur Qualifizierung der Unterschiede wurde eine zweifaktoriellen Anova durchgeführt. Wie in Tabelle 4.3-20 zu sehen ist, zeigt sie keine eindeutigen Signifikanzen, außer für die Lautheit. Für diese ist eine Interaktion zwischen Sprache und Signalen abzulehnen (die Nullhypothese lautet auf keine Wechselwirkung zwischen den Prüfgrößen).



**Bild 4.3-41:** Vergleich der Mittelwerte und Standardabweichungen für die deutschsprachige und die schwedische Versuchsreihe

Attribut	Prob>F (Signale)	Prob>F (Sprachvergleich)	Prob>F (Interaktion)
Angenehm	0	0.0109	0.8281
Scharf	0	0.1188	0.7067
Laut	0	0.0001	0.0061
Rau	0	0.2171	0.9569
Schwankend	0.004	0.0037	0.09413

**Tab. 4.3-20:** Ergebnisse der zweifaktoriellen Anova (1. Faktor Signale, 2. Faktor Sprache)

Auf Grund der Daten wird beschlossen, dass die Versuche in der Sprache durchgeführt werden, die am leichtesten Zugang zu einer großen Gruppe Versuchspersonen ermöglicht, da die Unterschiede zwischen den infrage kommenden Sprachen nicht so groß erscheint. Dies war für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen Schwedisch.

#### 4.3.9 Komplexe Verkehrssituationen

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Methode zur Auralisierung von Vorbeifahrtgeräuschen vorgestellt und validiert. Diese Methode bietet die Möglichkeit, Vorbeifahrtgeräusche unter kontrollierten Bedingungen zu auralisieren. Distanz, Geschwindigkeit, Reifentyp, Motor, Straße und Schallschutzmauer sind mögliche variable Parameter.

Diese Kontrolle über die Vorbeifahrtssignale kann genutzt werden, um auch komplexere Verkehrssituationen akustisch zu realisieren, indem einzelne Signale nach Bedarf kombiniert werden.

In einem hier entwickelten Programm werden im ersten Schritt gewünschte Fahrsituationen aus SPERoN auralisiert. Dabei wird für jede Grundgeschwindigkeit eine Reihe von Geschwindigkeiten erzeugt, um eine realistischere Verkehrssituation zu erreichen. Zum Beispiel für die Grundgeschwindigkeit von 50 km/h werden alle Signale für 44 km/h, 46 km/h, 48 km/h, 50 km/h, 52 km/h, 54 km/h und 56 km/h auralisiert. Diese Verteilung ist variabel und kann nach Bedarf gewählt werden.

Im Anschluss daran wird jedem Signal mit Hilfe von Head-Related-Transfer-Funktionen eine gewünschte Richtung in der Vorbeifahrt gegeben.

Die so generierten Vorbeifahrtssignale können nun zu dem Geräusch einer Straße kombiniert werden. Dabei ist volle Kontrolle über die Verkehrsdichte, die Geschwindigkeitsverteilung und die Schwankung im

Verkehr gegeben und es kann genau vorgegeben werden, welche Fahrzeuge zu welchen Anteilen auf der Fahrbahn unterwegs sind.

Die Straßenverkehrsgeräusche können für verschiedene Abstände zum Zuhörer und für verschiedene Fahrtrichtungen erzeugt werden.

Im letzten Schritt werden die einzelnen Geräusche zu einem Gesamtgeräusch zusammengefügt.

Bis jetzt wurde bei Hörversuchen meist auf aufgenommene Signale zurückgegriffen. Diese beinhalten oft Störungen und geben sehr spezifische Situationen wieder.

Mit Hilfe des vorgestellten Programmes können Verkehrssituationen akustisch sehr kontrolliert und in allen Parametern variabel erzeugt werden

Diese Möglichkeit soll in Zukunft unter anderem genutzt werden, um verschiedene Fahrzeuge auf ihre Wahrnehmbarkeit bei verschiedenen Hintergrundgeräuschen zu testen.

#### **4.3.10 Zusammenfassung**

Im Teilvorhaben „Ansätze für die akustische Optimierung von Reifen und Fahrbahnen für Elektrofahrzeuge“ wird ein Reifenprüfstand vorgestellt, auf dem Akustikmessungen auf realen Fahrbahnen unter Antriebs- und Bremsmomenten durchgeführt werden können.

Es wird aufgezeigt, welchen Einfluss ein Antriebs- oder Bremsmoment auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch hat. Zwei unterschiedliche Ansätze zur Beeinflussung bzw. Reduktion von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen werden vorgestellt.

Der erste Ansatz stellte ein neues Profildesign vor, wobei die quer- und schrägläufigen Rillen nicht radial, sondern in Umfangsrichtung geneigt in den Reifen eingebracht werden. Mit diesem Reifenprofil kann gezielt das Reifen-Fahrbahn-Geräusch je nach Lastfall beeinflusst werden. Bei geeigneter Drehrichtung verringert Antreiben das abgestrahlte Geräusch und trägt somit zu einer Geräuschreduktion bei, wohingegen Bremsen bei niedrigen Geschwindigkeiten zu einer Erhöhung führt. In weiterführenden Untersuchungen sollte überprüft werden, inwieweit diese Geräusche als Warnsignale vor herannahenden E-Fahrzeugen für Passanten im innerstädtischen Bereich tauglich sind.

Der zweite Ansatz untersucht den Einfluss der Profilsteifigkeit auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Es zeigt sich, dass ein in Umfangsrichtung scherweiches Profil unter Antriebskraft weniger auf der Fahrbahn gleitet. Hierdurch wird das Reifen-Fahrbahn-Geräusch bei höheren Frequenzen und auch insgesamt gesenkt.

Es wurden unterschiedliche Messverfahren verwendet. Neben den akustischen Nahfeldmessungen am Prüfstand wurden die Reifen bei beschleunigter Vorbeifahrt untersucht. Optische Messungen der Profilklotzverschiebung sowie triaxiale Kraftmessungen in der Bodenaufstandsfläche erlaubten einen tieferen Einblick in die Vorgänge im Reifenlatsch.

Diese Ergebnisse können zukünftig für eine Erweiterung des SPERoN-Modells für Fahrten unter Antriebs- und Bremsmoment genutzt werden.

Weiterhin wurde eine Auralisierungsmethode von der Chalmers University entwickelt, mit deren Hilfe simulierte Vorbeifahrten hörbar gemacht werden können. Hierbei wird die Rollgeräuschvorhersage in SPERoN benutzt. Hörversuche zeigen eine gute Übereinstimmung der simulierten Signale im Vergleich zu aufgenommenen Signalen unter gleichen Bedingungen, vor allem, wenn die tieffrequenten Anteile berücksichtigt werden.

Es können auch Signale mit tonalen Anteilen behandelt werden, jedoch ist die Auralisierung sehr empfindlich auf die tonalen Anteile und übersteuert leicht. Die Auralisierung wurde auch als Ausgang benutzt, um komplexe Verkehrssituationen synthetisch zu erzeugen. Diese Methode ist hilfreich, um zum Beispiel genau definierte Hintergrundgeräusche für Hörversuche zu erzeugen.

Ein weiterer Aspekt des Projektes ist die Untersuchung der Wahrnehmung von Vorbeifahrtgeräuschen. Es konnte festgestellt werden, dass deutliche Unterschiede gemessen werden konnten in der Angenehmheit, dem Stress und der Aktivierung durch verschiedene Reifen-Fahrbahn Kombinationen. Diese wurden hauptsächlich durch die Wahrnehmung von Lautheit und Rauigkeit beeinflusst. Andere untersuchte Größen waren Schärfe, Klangfarbe und Schwankungsstärke. Für die Schwankungsstärke wurde kein Zusammenhang mit den untersuchten Signalen gefunden. Schärfe und Klangfarbe haben einen Effekt, der aber kleiner ist als der von Lautheit und Rauigkeit.

## Literatur

- [1] BECKENBAUER, T.: „Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“, 1995.
- [2] BÜRCKERT, M., GAUTERIN, F., UNRAU, H.-J., Untersuchung des Einflusses der Grobtextur auf Messergebnisse mit dem SKM-Messverfahren, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Germany December 2012 - final report of research project FE 84.0104/2009, Heft S78
- [3] BRAESS, H.-H.: Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik : Vieweg Verlag, 2005
- [4] DENKER, D.: Rollgeräusch und Fahrsicherheit. Wolfsburg, 1989 (VDI Berichte Nr.778)
- [5] FAST, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, URL <http://www.fast.kit.edu/lff/1050.php>
- [6] FORSSÉN, J., et al. Auralization of traffic noise within the LISTEN project - Preliminary results for passenger car pass-by. 2009. Edinburgh.
- [7] GROLLIUS, S.; GAUTERIN, F.: Experimentelle Untersuchung zum Einfluss des Antriebsmomentes auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch : Verbundprojekt: Leiser Straßenverkehr 2. Juli 2009 (86.052/2008)
- [8] HAUG, G.; ESSERS, U.: Einflüsse der Zugkraft auf die Reifen-Fahrbahn-Geräusche schwerer Nutzfahrzeuge. In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift (1997), Nr. 5, S. 266–269
- [9] HAUG, G. (Hrsg.): Verfahren zur Bestimmung der Antriebsgeräusche und der zugkraftabhängigen Reifen-Fahrbahn-Geräusche von schweren Nutzfahrzeugen : Expert Verlag, 1999 (Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen Uni Stuttgart 11)
- [10] HELFER, M.: Einfluss der Zugkraft auf das Reifen/ Fahrbahngeräusch. Darmstädter Reifenkolloquium, 1998
- [11] HOFSTETTER, K.: Thermo-mechanical simulation of rubber tread blocks during frictional sliding. unveröffentlichte Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der TU Wien, 2004.
- [12] LEISTER, G.: Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung : Strategie, Methoden, Tools. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, 2009
- [13] LENZ, H.-P.: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn : Ergebnisse Forschungsschwerpunkt Lärmarme Straßen. 1995 (VDI Berichte 1224)
- [14] Listen Projekt. <http://https://www.tii.se/projects/listen> ,2013
- [15] LUDWIG, D.: Untersuchungen zur Verformung von Pkw- Reifen auf realer Fahrbahn bei Geradeausfahrt unter besonderer Berücksichtigung von Verschleiß und Reibwert. 1998 (Badel, F.: Footprint Physics, Interner Bericht Continental AG, 1993)
- [16] MÖSER, M.: Technische Akustik. 8. Aufl. s.l : Springer-Verlag, 2009
- [17] OLMS, H.: Untersuchungen mit MARGA zum Fahrbahneinfluss auf Reifen/ Fahrbahngeräusche. Darmstädter Reifenkolloquium, 2000
- [18] PENDHARKAR, C.: Auralization of road vehicles using spectral modeling synthesis, in Institutionen för bygg- och miljöteknik, Teknisk akustik, Vibroakustik, Chalmers tekniska högskola2012, Chalmers: Reproservice / Department of Civil and Environmental Engineering.
- [19] REICHERT, U.: Straßenverkehrslärm im Fokus aktueller europäischer Gesetzgebung. 2010
- [20] SANDBERG, U.; ESJMONT, J.: Tyre road noise reference book : Informex, 2002
- [21] STALTER, F.; GAUTERIN, F.: Research on Tyre/Road Noise Generation under Driving Torque. In (International Institute of Acoustics and Vibration (IIAV) Hrsg.): International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), 2013a.
- [22] STALTER, F.; FREY, M.; GAUTERIN, F.: Einfluss des Antriebsmoments auf das Reifengeräusch. Untersuchungen an einem Akustik-Innentrommelprüfstand. In ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift, 2013b, 115; S. 528.
- [23] STALTER, F.; GAUTERIN, F.: Influence of Circumferential Tread Pattern Stiffness on Tire Road Noise Generation under Driving Torque. In Internoise 2014: Melbourne, Australien



- [24] STEVEN, H.; PAULS, H.: Untersuchungen zu einem Messverfahren für das Reifen-Fahrbahn-Geräusch von PKW. Düsseldorf, 1989 (VDI Berichte Nr.778 778)
- [25] STEVEN, H.: Entwicklung eines Messverfahrens für das RFG von Pkw. 1991 (VDI Berichte 916)
- [26] ZWICKER, E. and FASTL, H.: Psychoacoustics Facts and Models 1999: Springer.

Der Schlussbericht zum vorliegenden Teilvorhaben IV (Förderkennzeichen 19U10016 C und 19U10016 D) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.

## 4.4 Teilvorhaben V

### Straßenseitig schallabsorbierende Unterbodenverkleidung

Dr. Klaus Pfaffelhuber  
Röchling Automotive SE & Co.KG, Worms

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kropp, M. Eng. Julia Winroth, Dipl.-Ing. Carsten Hoever  
Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer  
Müller-BBM GmbH, Planegg

Dr.-Ing. Klaus-Peter Glaeser, Dr.-Ing. Ulrike Stöckert  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

#### Inhalt

<b>4.4.1</b>	<b>Zielsetzung .....</b>	<b>219</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Konzeption der absorbierenden Unterbodenverkleidung.....</b>	<b>219</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Analyse der Ausbreitung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen zur akustischen Optimierung von Fahrzeugunterbodenverkleidungen .....</b>	<b>220</b>
<b>4.4.4</b>	<b>Geräuschminderung an einem Klein-Lkw mit absorbierender Unterbodenverkleidung bei beschleunigter und konstanter Vorbeifahrt .....</b>	<b>226</b>
4.4.4.1	Vorbeifahrtmessungen mit beschleunigter Geschwindigkeit an einem Klein-Lkw mit absorbierender Unterbodenverkleidung .....	226
4.4.4.2	Vorbeifahrtmessungen mit konstanter Geschwindigkeit von einem Klein-Lkw mit absorbierender Unterbodenverkleidung .....	230
4.4.4.3	Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse .....	235
<b>4.4.5</b>	<b>Untersuchung der möglichen Verbesserung des Außengeräusches durch selektiv abgestimmte absorbierende Unterbodenverkleidung .....</b>	<b>236</b>
4.4.5.1	Klein-Lkw mit tieffrequent abgestimmten Resonatoren auf der Unterbodenverkleidung .....	236
4.4.5.2	Klein-Lkw mit 1 kHz-Resonatoren auf der absorbierenden Unterbodenverkleidung .....	243
<b>4.4.6</b>	<b>Vorbeifahrtpegel am Klein-Lkw bei konstanter Geschwindigkeit bei Variation der Belegung mit absorbierendem Unterboden.....</b>	<b>249</b>
<b>4.4.7</b>	<b>Transferpfaduntersuchungen zur Schallübertragung von den Reifen zu Mikrofonen seitlich, vor und hinter einem Kleinlastwagen (Daimler ATEGO).....</b>	<b>255</b>
<b>4.4.8</b>	<b>Akustische Untersuchungen Transporter.....</b>	<b>262</b>
<b>4.4.9</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>278</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>279</b>

#### 4.4.1 Zielsetzung

Ein Ansatz im Verbundvorhaben LeiStra3 lag in der Konstruktion einer schallabsorbierenden Fahrzeugunterbodenverkleidung, die die Rollgeräusche effizient absorbiert und zudem die Aerodynamik des Fahrzeugs begünstigt.

In den jüngsten Baureihen der Mittel- und Oberklasse-Pkw werden aus aerodynamischen Gründen vermehrt Leichtbau-Sandwich-Unterbodenverkleidungen eingesetzt. Im Zuge fahrzeugtechnischer Untersuchungen zeigte sich, dass diese Verkleidungen eine Geräuschminderung gegenüber herkömmlichen Systemen zeigen, obwohl keine gezielte konstruktive Ausbildung dahingehend erfolgte (Absorptionsorientierung). Vor diesem Hintergrund hatte die Firma Röchling Automotive SE & Co. KG in Zusammenarbeit mit der Chalmers University of Technology und der Firma Müller-BBM im Teilvorhaben V die Aufgabe zu prüfen, inwieweit Unterbodenverkleidungen aus faserverstärkten Leichtbau-Sandwichmaterialien aufgrund ihrer Materialeigenschaften und konstruktiven Ausbildungen gezielt akustisch absorbierend gestaltet werden können.

Dabei sollten vor allem die folgenden Fragestellungen beantwortet werden:

- Kann eine schallabsorbierende Unterbodenverkleidung Reifengeräusche und Motorengeräusche reduzieren?
- Führt die Schallabsorption zu einer nennenswerten Pegelminderung?
- Um wie viel dB(A) kann das Geräusch insbesondere bei Lastwagen und Transportern vermindert werden?
- Welchen Beitrag leisten die zugewandten und die abgewandten Reifen?
- Spielt eine auf das Reifen-Fahrbahngeräuschspektrum abgestimmte Frequenzselektivität der Schallabsorption eine wichtige Rolle?
- Spielt die Position der Verkleidungen eine wichtige Rolle?

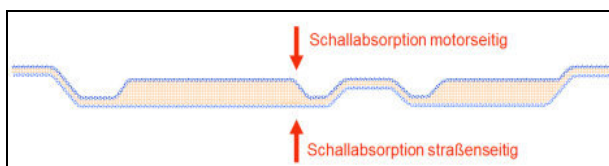
Im ersten Schritt sollte ein Simulationsverfahren zur Erforschung der Schallausbreitung zwischen Fahrbahn und Unterbodenverkleidung (UBV) erarbeitet werden. Diese Arbeiten wurden projektbegleitend im Rahmen eines durch das Bundesverkehrsministerium finanziertes Forschungsprojekt durchgeführt [1]. Dabei sollten physikalische Wechselwirkungsmechanismen detailliert analysiert werden, um Anforderungen an eine schallabsorbierende Fahrzeugunterbodenverkleidung hinsichtlich der konstruktiven und der materialspezifischen Ausbildung zu formulieren.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen und Erkenntnissen sollten Unterbodenverkleidungen an Klein-Lkw in Testversuchen erprobt werden, um das Lärminderungspotenzial zu eruieren.

#### 4.4.2 Konzeption der absorbierenden Unterbodenverkleidung

Die schallabsorbierenden Unterbodenverkleidungen (UBV) wurden aus einem neuartigen faserverstärkten LWRT (Low Weight Reinforced Thermoplastics) Kunststoff-Sandwichmaterial erstellt. Dieses poröse Leichtbaumaterial aus Glasfasern und thermoplastischer Bindematrix ist biegesteif und selbsttragend, lässt sich aerodynamisch günstig gestalten und ist robust gegen Steinschlagbelastung.

Bild 4.4-1 zeigt schematisch das verwendete absorbierende Sandwichmaterial. Das verwendete Material besteht aus porösen Polypropylen-Glasfasern (Bild 4.4-2). Die Deck- und Kernschichten besitzen straßen- und fahrzeugseitig annähernd ein identisches Schallabsorptionsvermögen.

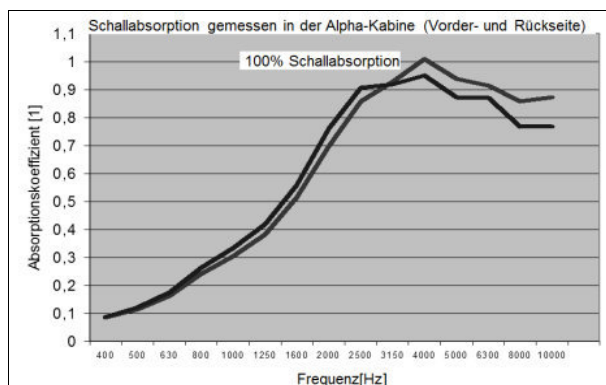


**Bild 4.4-1:** Schematische Darstellung des verwendeten absorbierenden Sandwichmaterials



**Bild 4.4-2:** Materialaufbau (Polypropylen-Glasfaser) einer Fahrzeugunterbodenverkleidung

Das verwendete Material besitzt ein 100%-Schallabsorptionsvermögen straßen- und fahrzeugseitig. Bild 4.4-3 zeigt den Schallabsorptionskoeffizienten, der in einem Hallraum (Alpha-Kabine) gemessen wurde. Das LWRT Sandwichmaterial zeigt den typischen Verlauf eines porösen Schallabsorbers mit 100 % Absorptionsgrad bei höheren Frequenzen.



**Bild 4.4-3:** Schallabsorptionskoeffizient, des faserverstärkten LWRT

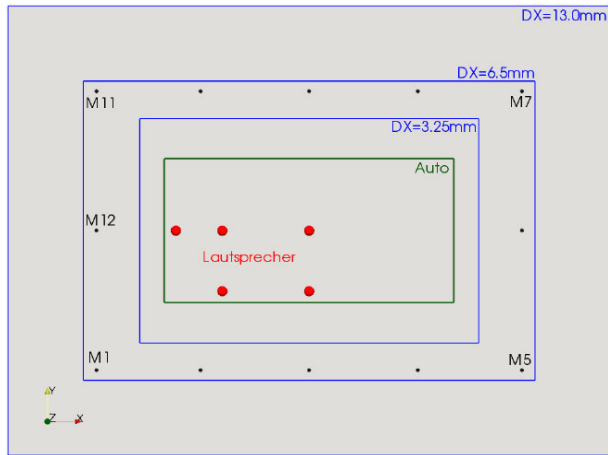
#### 4.4.3 Analyse der Ausbreitung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen zur akustischen Optimierung von Fahrzeugunterbodenverkleidungen

Das Ziel des Forschungsprojektes stellte die spektrale Abstimmung und topologische Anpassung der Unterbodenverkleidung von Fahrzeugen an das Schallspektrum und die Abstrahlcharakteristik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche dar. Vor diesem Hintergrund sollte ein Modell entwickelt werden, mit dem insbesondere die Ausbreitung des Schallfeldes unter Berücksichtigung der spezifischen Randbedingungen analysiert werden kann. Relevante Mechanismen mussten identifiziert werden, die Abstrahlung des Rollgeräusches im Raum zwischen Fahrbahn und Fahrzeugunterboden charakterisiert und die Schallausbreitung von diesem Raum ins Fernfeld erfasst werden.

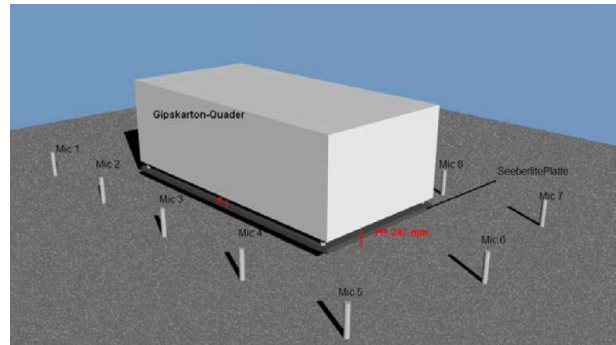
Das Verständnis dieser Prozesse und ihre Modellierung bildeten eine wichtige Grundlage für eine systematische Weiterentwicklung schallabsorbierender Unterbodenverkleidungen. Diese Zielsetzung wurde begleitend zum Verbundprojekt LeiStra 3 in dem Forschungsprojekt der BAST FE 89.0272/2011 „Modellierung und Analyse der Ausbreitung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen zur akustischen Optimierung von Fahrzeugunterbodenverkleidungen“ [1] der BAST vom Konsortium bearbeitet.

#### Simulation des Schallfeldes – theoretischer Ansatz

Um die grundsätzlichen Mechanismen der Schallausbreitung unter und neben einem Fahrzeug beschreiben zu können, wurde das Schallfeld unter und neben einem nach oben unendlich ausgedehnten Quader der Länge 3,2 m und der Breite 1,6 m simuliert. Das Modell ist in Bild 4.4-4 schematisch dargestellt. Als Quelle wurde eine Punktquelle gesetzt, die an fünf verschiedenen Positionen eine Anregung erzeugte (Bild 4.4-4, rote Punkte). Ausgewertet wurden 12 virtuelle Mikrofonpositionen, die im Abstand von 750 mm und einer Höhe von 250 mm vom Quader entfernt angebracht waren (Bild x1, M1 bis M12).



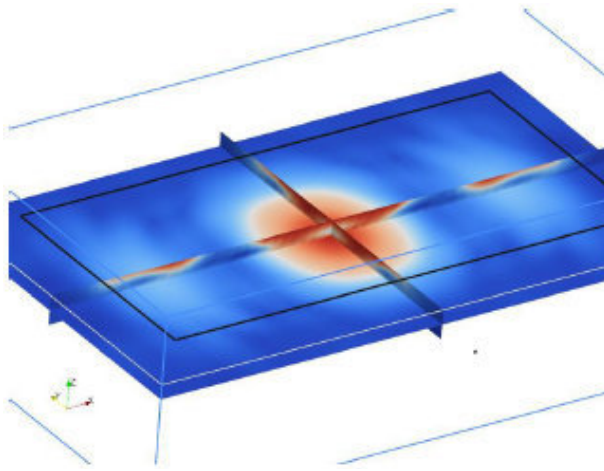
**Bild 4.4-4:** Simulationsmodell Quader (grün) mit Position der Quelllautsprecher (rot) und den simulierten Mikrofonpositionen M1 bis M12



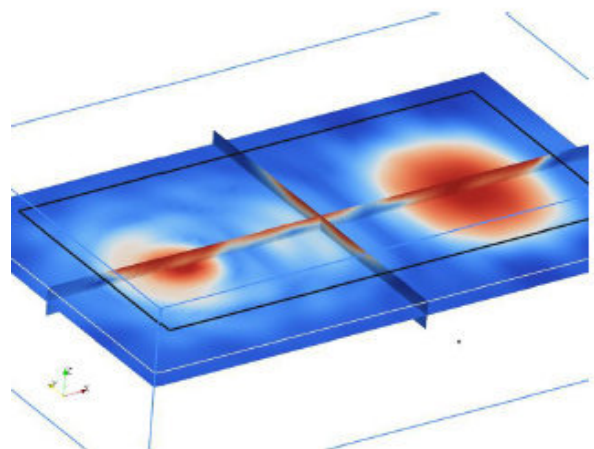
**Bild 4.4-5:** Perspektivische Darstellung des Simulationsmodell-Quaders mit der schallabsorbierenden Platte (SL-LWRT-Platte) und den Mikrofonpositionen M1 bis M8

Bild 4.4-5 zeigt die perspektivische Darstellung des Simulationsmodells. Die schallabsorbierende Platte bestand aus einem LWRT-Sandwichmaterial, Markenname Seeberlito (SL), war 6,5 mm dick, und für die im Folgenden dargestellten Simulationen als einfache Strömungsresistenz mit einem Wert von 800 Pa s/m modelliert.

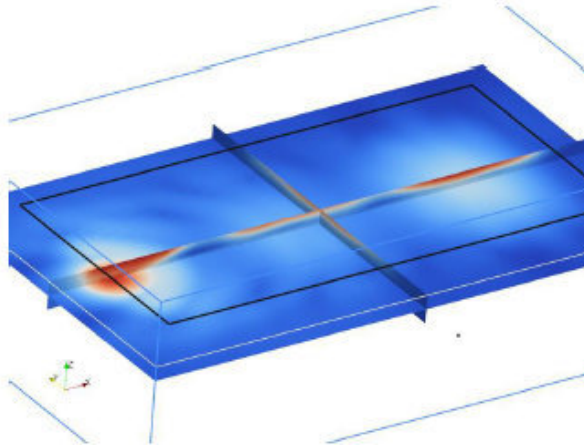
Bild 4.4-6 zeigt exemplarisch eine Simulation des Flachraumschallfeldes an den verwendeten Quellpositionen Mitte, Motor, Mitte kurze Seite, Mitte lange Seite und Rad.



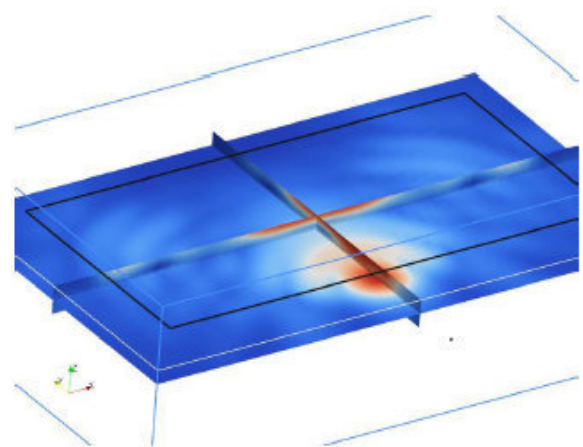
**Bild 4.4-6a:** Schallfelder im Unterbodenflachraum angeregt durch die „Lautsprecher“ aus Bild 4.4-1 an der Position Mitte



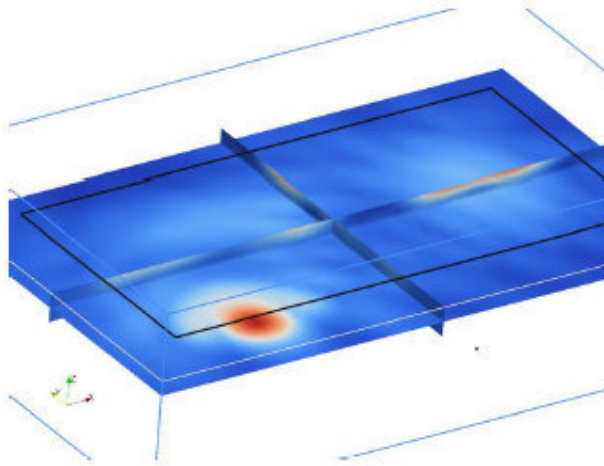
**Bild 4.4-6a:** Schallfelder im Unterbodenflachraum angeregt durch die „Lautsprecher“ aus Bild 4.4-1 an der Position Motor



**Bild 4.4-6b:** Schallfelder im Unterbodenflachraum angeregt durch die „Lautsprecher“ aus Bild 4.4-1 an den Positionen Mitte kurze Seite



**Bild 4.4-6b:** Schallfelder im Unterbodenflachraum angeregt durch die „Lautsprecher“ aus Bild 4.4-1 an der Position Mitte lange Seite



**Bild 4.4-6c:** Schallfelder im Unterbodenflachraum angeregt durch die „Lautsprecher“ aus Bild 4.4-1 an der Position Rad

### Ergebnisse der Simulationsrechnungen

In einem umfangreichen Untersuchungsprogramm wurde der

- Einfluss der Lautsprecherposition,
- Einfluss einer schallabsorbierenden Platte unter dem Quader mit verschiedenem Wandabstand,
- Einfluss der Höhe des Flachraums unter dem Quader,
- Einfluss einer schallabsorbierenden Platte unter dem Quader bei verschiedenem Strömungswiderstand und verschiedenem Wandabstand

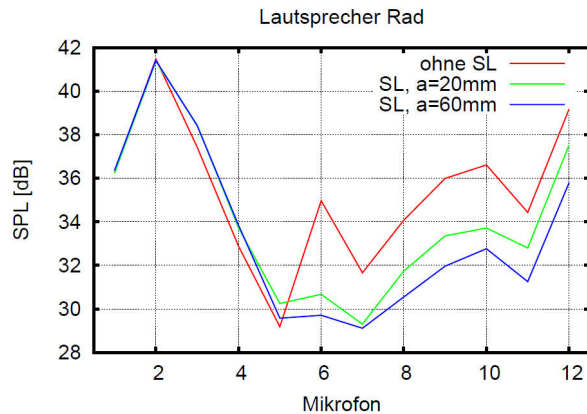
untersucht.

In den Simulationsrechnungen konnte nachgewiesen werden, dass der Einbau einer schallabsorbierenden Platte die tieffrequenten Spitzen nicht beeinflusst. Die höherfrequenten ( $f > 650$  Hz) werden gedämpft. Hinsichtlich der Analyse zum Einfluss der Lautsprecherposition hat sich erwartungsgemäß gezeigt, dass je näher ein Mikrofon an der Schallquelle liegt, desto höher fällt der Pegel aus.

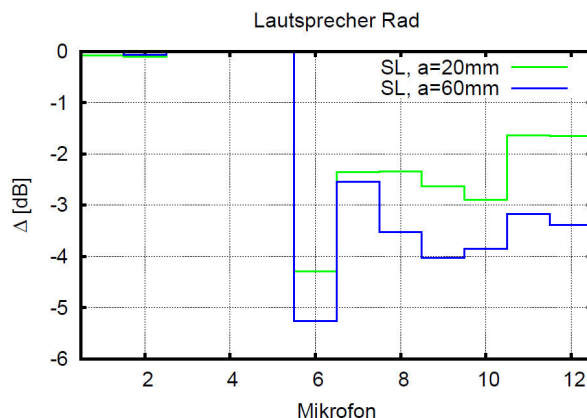
Der Einbau einer schallabsorbierenden Platte (SL-Platte) reduziert die Schallpegel bei Anregung in der Mitte an allen Positionen. Der Effekt ist umso stärker, je größer der Abstand  $a$  vom Unterboden und je länger die vom Schall überstrichene Länge ist. Besonders stark ist die Wirkung an den Stirnseiten. Dort gibt es neben dem direkten Schallweg und einem mit je einer Reflexion an Unterboden und Boden noch einen dritten mit je zwei Reflexionen. Die Schallreduktion an den unterschiedlichen Positionen reicht für  $a = 60$  mm von 3 bis 6 dB.

Auch bei der Anregung ‚Motor‘ ist der Effekt einer schallabsorbierenden Platte umso stärker, je größer der Abstand  $a$  vom Unterboden ist und je länger die vom Schall überstrichene Länge ist. Liegt die schallabsorbierende Platte jedoch in der Mitte des Unterbodenspalts ( $a = 125$  mm), wird die maximale Dämpfung an der Schallquelle abgeschwächt.

Bilder 4.4-7a und 4.4-7b zeigen die Ergebnisse der Simulationsrechnung bei unterschiedlich angebrachten Höhen der schallabsorbierenden Platte (SL-Platte). Bei doppelter Höhe  $H$  ist die Wirkung der schallabsorbierenden Platte qualitativ dieselbe wie zuvor, allerdings ist der Betrag der Dämpfung auf 1 bis 3 dB halbiert.

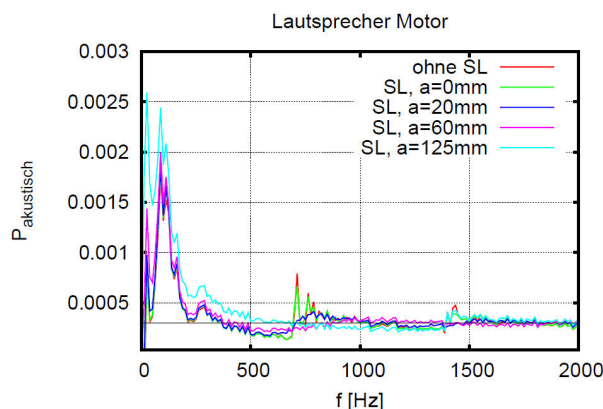


**Bild 4.4-7a:** Pegeländerung seitlich des Quaders gegenüber freiem Schallfeld (Halbfreiefeld über Fahrbahn) bei Anregung an der Lautsprecherposition Rad



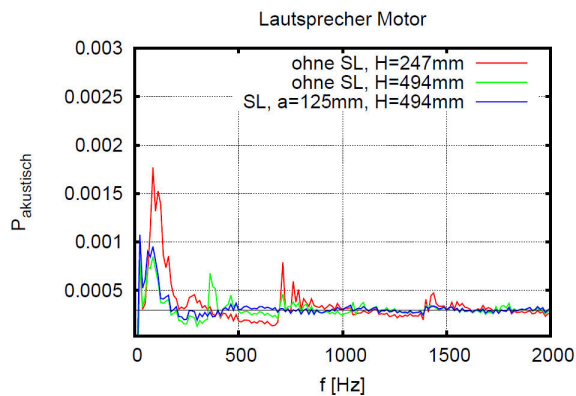
**Bild 4.4-7b:** Pegeländerung seitlich des Quaders gegenüber freiem Schallfeld (Halbfreiefeld über Fahrbahn) bei Anregung an der Lautsprecherposition Rad

Die Simulation mit einer schallabsorbierenden Platte (SL) in der Mitte des Unterbodenspalts (Bild 4.4-8; Wandabstand  $a = 125$  mm) zeigt, dass in diesem Fall die Spitzen um 700 Hz vollständig ausgelöscht werden. Die dazugehörige Mode, die erste stehende senkrechte Welle, hat in diesem Fall ihr Maximum genau an der SL-Platte, wird also optimal bedämpft.



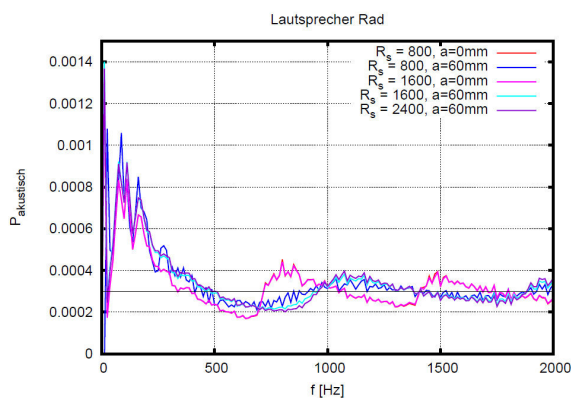
**Bild 4.4-8:** Schalleistung bei Variation der Wandabstände 0 mm, 20 mm, 60 mm, 125 mm einer schallabsorbierenden Platte (SL) zum Quader. Quellposition Mitte

Eine Verdoppelung der Höhe  $H$  verringert die tieffrequenten Resonanzspitzen. Das höherfrequente Muster tritt nun alle 350 Hz auf. Diese Änderung der Frequenz korrespondiert mit der Halbierung der Frequenz der ersten senkrechten stehenden Welle. Eine schallabsorbierende Platte mit Strömungswiderstand 800 Pa s/m (SL-Platte) mit 125 mm Abstand glättet die höherfrequenten Spitzen erheblich.



**Bild 4.4-9:** Schalleistung bei Variation des Abstandes des Quaders zur Fahrbahn sowie bei Einfügen einer schallabsorbierenden Platte (Frequenzbereich 0-2000 Hz)

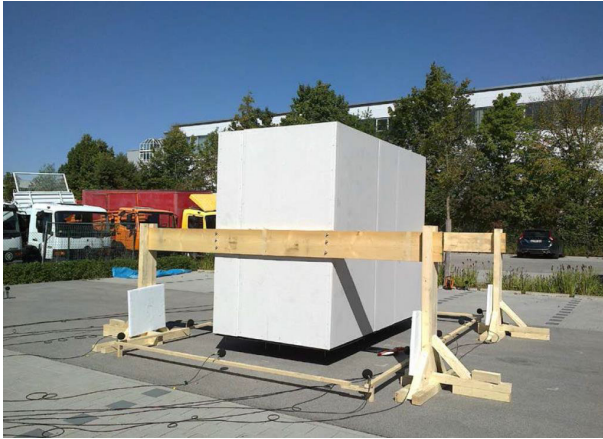
Die Verdoppelung der Strömungsresistenz  $R_s$  hat, wenn die SL-Platte direkt auf dem Unterboden angebracht ist, keinen nennenswerten Einfluss auf die abgegebene Schalleistung. Hat die Platte einen Abstand vom Unterboden, existieren leichte Effekte für Frequenzen bis 2000 Hz.



**Bild 4.4-10:** Schalleistung bei Variation des Abstandes einer schallabsorbierenden Platte (SL) zum Quader (Frequenzbereich 0-2000 Hz) sowie der Variation des Strömungswiderstands Lautsprecherposition Rad

Um die Ergebnisse der Simulation messtechnisch validieren zu können, wurde ein Quader aus Gipskartonplatten erstellt. Dieser wurde über einem, in den Boden eingelassenen Lautsprecher so positioniert, dass die verschiedenen Lautsprecherpositionen der Simulation nachvollzogen werden konnten. Im Unterbodenspalt war eine in der Höhe verstellbare, schallabsorbierende SL-Platte angebracht. Gemäß der Simulationsanordnung waren Mikrofone um den Quader herum positioniert. Bild 4.4-11 zeigt den Messaufbau.





**Bild 4.4-11:** Messaufbau zur Validierung der Simulationsergebnisse

Bei der Untersuchung zum Einfluss der Lautsprecherposition hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse aus der Simulation mit den Messergebnissen gut übereinstimmen. Der Pegel liegt umso höher, je näher ein Mikrofon an der Schallquelle liegt. Die absoluten Pegelwerte können nicht miteinander verglichen werden, da die Lautsprecherpegel unter den Messbedingungen im Freien höher gewählt werden mussten als bei der Simulation, um einen ausreichenden Störgeräuschabstand zu erhalten.

Die Messergebnisse bei der Bewertung des Einflusses bei unterschiedlichem Wandabstand zeigen ebenso wie die Simulationsergebnisse grundsätzlich, dass der Einbau einer schallabsorbierenden Platte (SL) den Schallpegel an allen Positionen reduziert. Der Effekt ist größer, je größer der Abstand  $a$  vom Unterboden ist und je länger die vom Schall überstrichene Länge ist. Allerdings fällt die Schallreduktion der Messungen geringer aus als die der Simulation. Es wird maximal eine Reduktion von 3,5 dB bei  $a = 60$  mm erreicht. Die Schallpegelreduktion von über 4 dB an Position 7 fällt stark aus dem sonstigen Verlauf heraus.

Bei doppelter Höhe  $H$  ist die Wirkung der SL-Platte sowohl bei der Messung als auch in der Simulation qualitativ dieselbe wie zuvor. Im Gegensatz zu den berechneten Ergebnissen hat sich aber der Betrag der Dämpfung nicht halbiert, sondern ist etwa gleich geblieben.

Insgesamt zeigt sich, dass bei der gewählten Flachraumhöhe die Wirksamkeit von SL erst ab einer Frequenz von etwa 700 Hz einsetzt. Dies ist unabhängig vom Wandabstand  $a$  der absorbierenden Platte und deckt sich mit den Simulationen. Im Gegensatz zu den Simulationsergebnissen lässt sich in den Messungen aber kein Einfluss des Abstandes  $a$  der Absorberplatte auf die Höhe der Dämpfung feststellen. Auch nicht eindeutig nachvollzogen werden kann die Halbierung der Grenzfrequenz bei einer Verdoppelung der Höhe  $H$ .

Wie in der Simulation treten auch bei den Messungen teilweise Pegelerhöhungen bei einzelnen Frequenzen durch die eingebauten Absorberplatten auf. Diese lassen sich durch Kammfiltereffekte bzw. den Wegfall von Interferenzauslöschungen über verschiedene Schallwege (Reflexionen) erklären.

### Zusammenfassende Betrachtung der Simulationsrechnung

Eine wesentliche Erkenntnis des erarbeiteten Simulationsmodells war, dass die Schallintensität im Unterbodenspalt durch das Vorhandensein des Unterbodenflachraums wesentlich verändert wird. Bei tiefen Frequenzen wird die Schalleistungsabgabe einer Quelle bis um das zehnfache verstärkt, wenn ein schallharter Quader (einfaches Modell eines Fahrzeugs) mit einem Abstand darüber positioniert wird. Weiterhin bilden sich im Unterbodenspalt zwei Arten von Moden aus: Tieffrequente Moden mit ausschließlich waagerechter Schallschnelle, bestimmt durch die Längen  $L_x$  und  $L_y$  des Quaders sowie Moden mit Anteil senkrechter Schallschnelle, im Wesentlichen die stehenden Wellen im Spalt bestimmt durch die Höhe  $H$  zwischen Quader und Grundfläche (Fahrbahn).

Eine schallabsorbierende Platte, unterhalb des Quaders angebracht, dämpft die Schallabstrahlung. Der Effekt ist umso stärker, je größer der Wandabstand der Platte zum Quader ist. Die Platte vermindert die Schallfeldintensität allerdings erst oberhalb der Grenzfrequenz  $f=c/2H$  ( $c$  = Schallgeschwindigkeit). In einem simulierten Fall mit einer Spalthöhe von ca. 250 mm sind dies etwa 700 Hz.

Die Ergebnisse von validierenden Messungen an einem real erstellten Quader zeigten in vielen Punkten eine gute Übereinstimmung mit der Simulation. So konnte messtechnisch nachvollzogen werden, dass der Gesamtschallpegel durch die Anwesenheit des Quaders erhöht wird und dass der Pegel sich desto mehr

steigert, je näher ein Mikrofon an der Schallquelle liegt. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass der Einbau der schallabsorbierenden Platte zu einer erheblichen Schallpegeldämpfung führt. Der bei den Simulationsergebnissen erhaltene Effekt, dass mit größerem Wandabstand der absorbierenden Platte vom Quader auch der Dämpfungseffekt größer ist, zeigte sich hingegen in den Messungen nur bedingt.

Mit Hilfe der gemessenen Terzspektren ließ sich weiterhin nachvollziehen, dass sich die Wirksamkeit der schallabsorbierenden Platte bei den gewählten Abmessungen - ebenfalls wie bei den Simulationen - erst ab einer unteren Grenzfrequenz (in der gewählten Anordnung ebenfalls bei einer Frequenz von etwa 700 Hz) einstellt.

Bei Simulationen mit modellierten schallharten Reifen ergab sich bei sonst identischer Lautsprecheranlenkung im Reifentrichter eine deutliche Verstärkung der abgegebenen Schallleistung bei Frequenzen oberhalb ca. 500 Hz. Im Bereich 1200 - 1500 Hz liegt diese sogar um das Zehnfache über der Abstrahlung des Lautsprechers in den freien Unterbodenspalt und bestätigt den in der Literatur beschriebenen Horn-Effekt. Der trichterförmige Spalt verbessert die Anpassung des Lautsprechers an den Raum. Dieser Effekt tritt in den durchgeführten Simulationen auf, sobald die Wellenlänge die Größenordnung des Raddurchmessers unterschreitet, erreicht seine maximale Wirkung bei  $f$  bei etwa 1400 Hz und nimmt bei höheren Wellenlängen wieder ab.

Mit Hilfe der erarbeiteten Modelle konnten wesentliche Phänomene der Schallpegelminderung durch schallabsorbierende Platten im Unterbodenspalt eines KFZ nachgebildet werden und anhand eines identisch dimensionierten Quaders mit absorbierender Platte messtechnisch im Wesentlichen bestätigt werden. Die Größenordnung der simulierten Schallpegelminderung bei Anordnungen mit 4 Quellen an den Reifenpositionen und einem virtuellen Mikrofon seitlich neben dem modellierten Fahrzeug bewegt sich auf dem Niveau der messtechnisch ermittelten Ergebnisse.

Somit konnte ein wirkungsvolles Werkzeug entwickelt werden, mit dem bei vorhandener Geometrie eines Unterbodenflachraums die Schallpegelminderung der abgestrahlten Reifen-Fahrbahn-Geräusche durch den Anbau einer schallabsorbierenden Unterbodenverkleidung prognostiziert werden kann [1].

#### 4.4.4 Geräuschminderung an Klein-Lkw mit absorbierender Unterbodenverkleidung bei beschleunigter und konstanter Vorbeifahrt

##### 4.4.4.1 Vorbeifahrtmessungen mit beschleunigter Geschwindigkeit an Klein-Lkw mit absorbierender Unterbodenverkleidung

*Ebene, großflächige, absorbierende Unterbodenverkleidung an Daimler ATEGO*

Bei Beginn des Projekts im Dezember 2010 wurden an einem Lkw Daimler Atego erste Potenzialuntersuchungen mit einer großflächigen LWRT-Sandwich-Unterbodenverkleidung durchgeführt. Diese Verkleidung besitzt einen Schallabsorptionsfrequenzgang gemäß der Bild 4.4-14 (rote Kurve). Die Unterbodenverkleidung wurde an das Fahrzeug in einer Ebene angebracht, welche weitgehend der vorgegebenen Bodenfreiheitlinie entsprach. Diese liegt etwas unterhalb des Kraftstofftanks (Bild 4.4-12).



- Abhängung mit Gewindestangen
- Verstärkung durch Alu-Profile
- Höhe über der Fahrbahn ca. 35 cm  
(direkt unterhalb Abgasschalldämpfer, Druckluftbehälter, Tank)

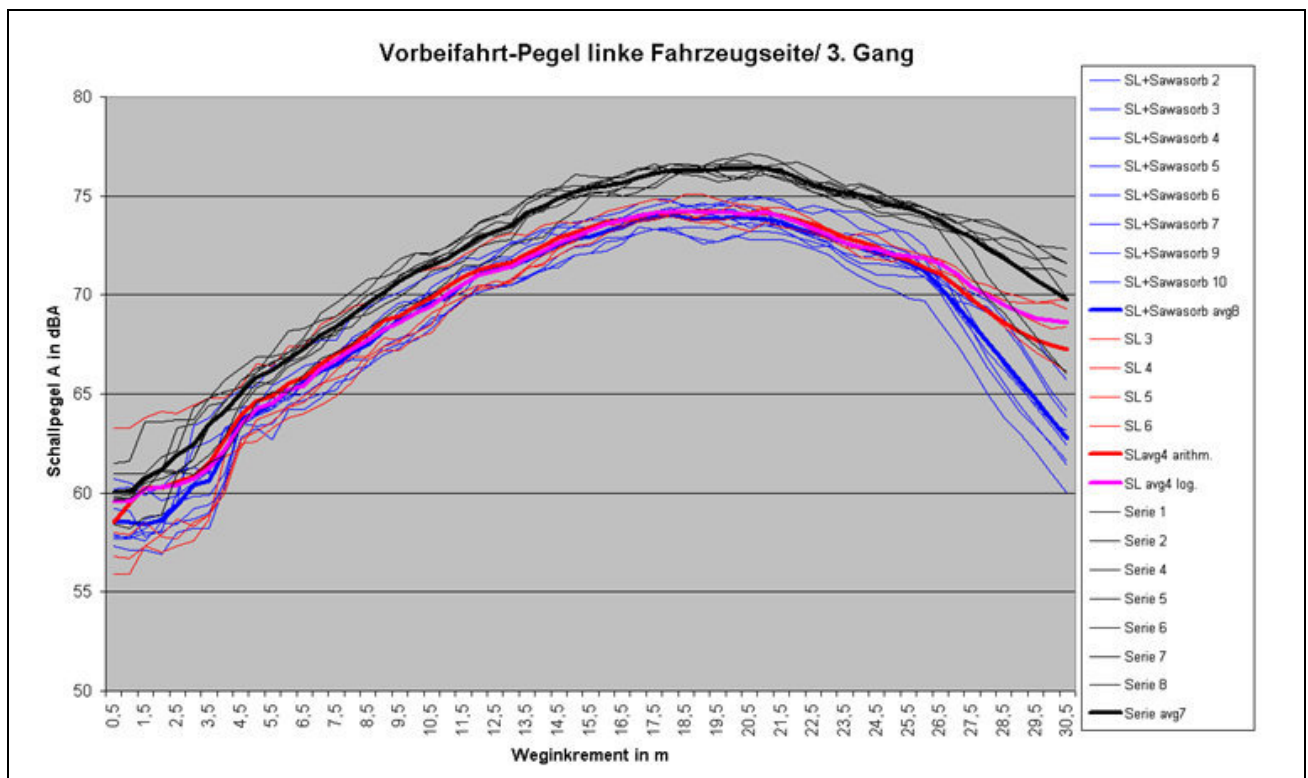
**Bild 4.4-12:** Aufbau eines absorbierenden Unterbodens auf Basis von LWRT-Sandwichplatten

Mit dem derart ausgestatteten Fahrzeug wurden Messungen der beschleunigten Vorbeifahrt auf der Vorbeifahrtsmessstrecke des TÜV Allach gemäß ECE-R51 durchgeführt (Bild 4.4-13). Die Messmikrofone hatten 7,5 m Abstand zur Fahrbahnmitte bei einer Höhe von 1,65 m. Die dabei sich ergebenden Vorbeifahrtspegel zeigten eine deutliche Pegelminderung von etwa 2 dB(A) im vierten Gang und 3 dB(A) im dritten Gang (Bild 4.4-14, Bild 4.4-15, rote Kurven zu schwarze Kurven).

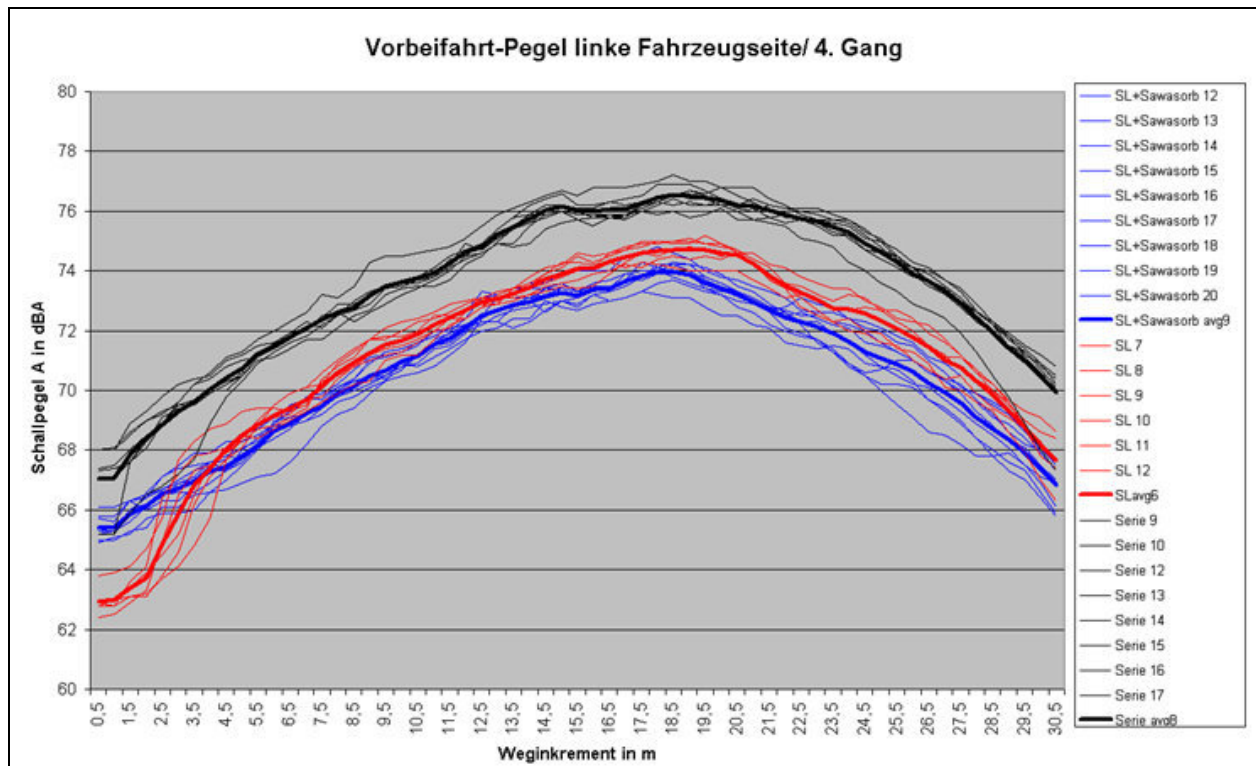
Bei diesen Messungen wurde zudem weiteres Absorptionsmaterial (30 mm Polyesterwolle) auf die Unterbodenverkleidung (UBV) gelegt, um den Einfluss einer Schallabsorptionssteigerung zu ermitteln (blaue Kurven). Hierdurch zeigte sich eine nur unwesentliche Verbesserung im 3. Gang und eine leichte Verbesserung im 4. Gang.



**Bild 4.4-13:** Messung der Vorbeifahrtspegel auf dem Testgelände TÜV Allach



**Bild 4.4-14:** Verbesserung der Vorbeifahrtspegel von ca. 2 - 3 dB bei der beschleunigten Vorbeifahrt (3. Gang) durch absorbierende LWRT-Unterbodenverkleidung. Weiteres Absorptionsmaterial auf der Verkleidung (blaue Kurvenschar) zeigte kaum eine Verbesserung.



**Bild 4.4-15:** Verbesserung der Vorbeifahrtpegel von ca. 2 - 3 dB bei der beschleunigten Vorbeifahrt (4. Gang) durch absorbierende LWRT-Unterbodenverkleidung. Weiteres Absorptionsmaterial auf der Verkleidung (blaue Kurvenschar) zeigte kaum eine Verbesserung.

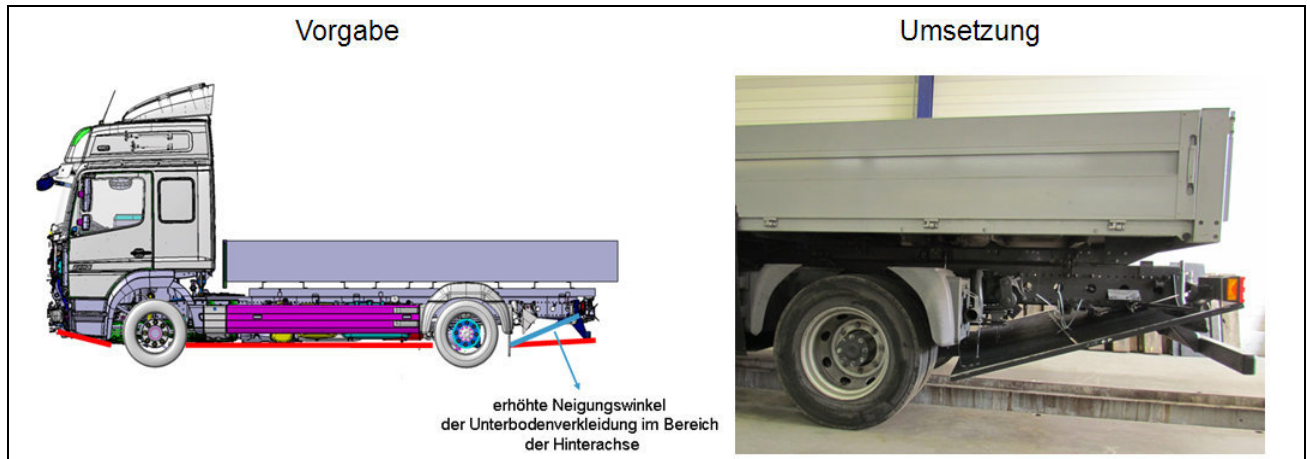
#### *Aerodynamische Optimierung des absorbierenden Unterbodens und Untersuchung der Auswirkungen auf beschleunigten Vorbeifahrtpegel*

Mit der Fachabteilung Daimler Nutzkraftfahrzeuge wurde die absorbierende Unterbodenverkleidung bezüglich deren aerodynamischer Gestaltung diskutiert und Maßnahmen diesbezüglicher Optimierung festgelegt. Dies waren insbesondere das Anstellen des hinteren Bereichs der Verkleidung, um hier eine Diffusorwirkung zu erreichen (Bild 4.4-16) sowie eine seitliche Verkleidung zwischen UBV und Pritsche, um eine Luftdurchströmung dieses Flachraums zu verhindern (Bild 4.4-17).

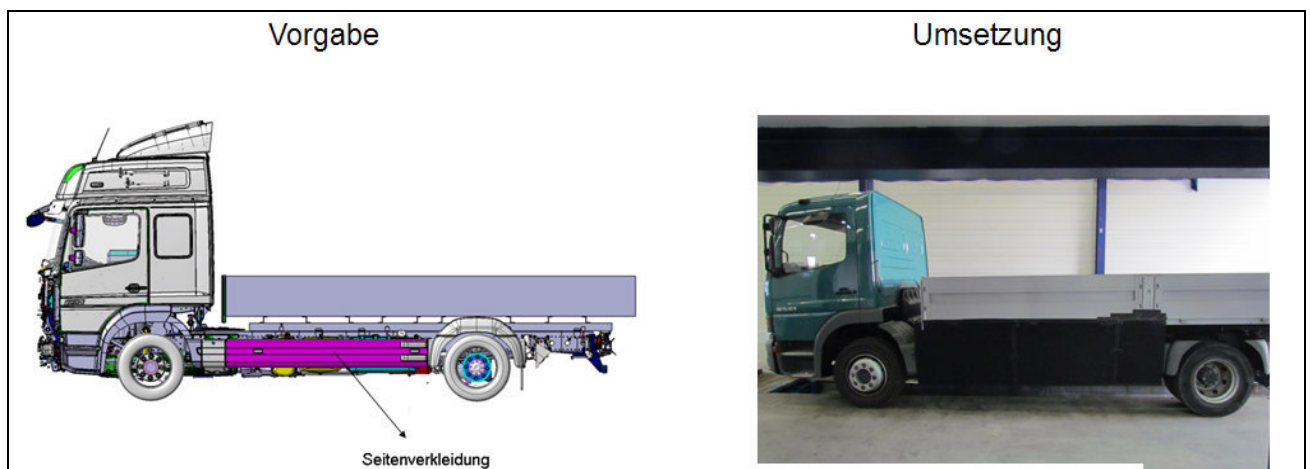
Anschließend wurde eine weitere akustische Untersuchung dieser Maßnahmen durchgeführt, um die Auswirkung der Umgestaltung auf die akustische Wirksamkeit zu beurteilen. Ausgehend von der ursprünglichen Unterbodenanordnung der vorangegangenen Messkampagnen wurden die genannten Veränderungen eingebracht und jeweils akustisch vermessen. Bild 4.4-18 zeigt im Vergleich den Pegelverlauf der Vorbeifahrtmessung bei den Maßnahmen:

- Ausgangszustand ohne absorbierenden Unterboden (schwarz),
- absorbierender Unterboden der vorangegangenen Untersuchungen (grün),
- aerodynamisch optimierter Unterboden Heckteil mit Diffusorwinkel (blau),
- aerodynamisch optimierter Unterboden mit zusätzlicher Seitenwand (rot).

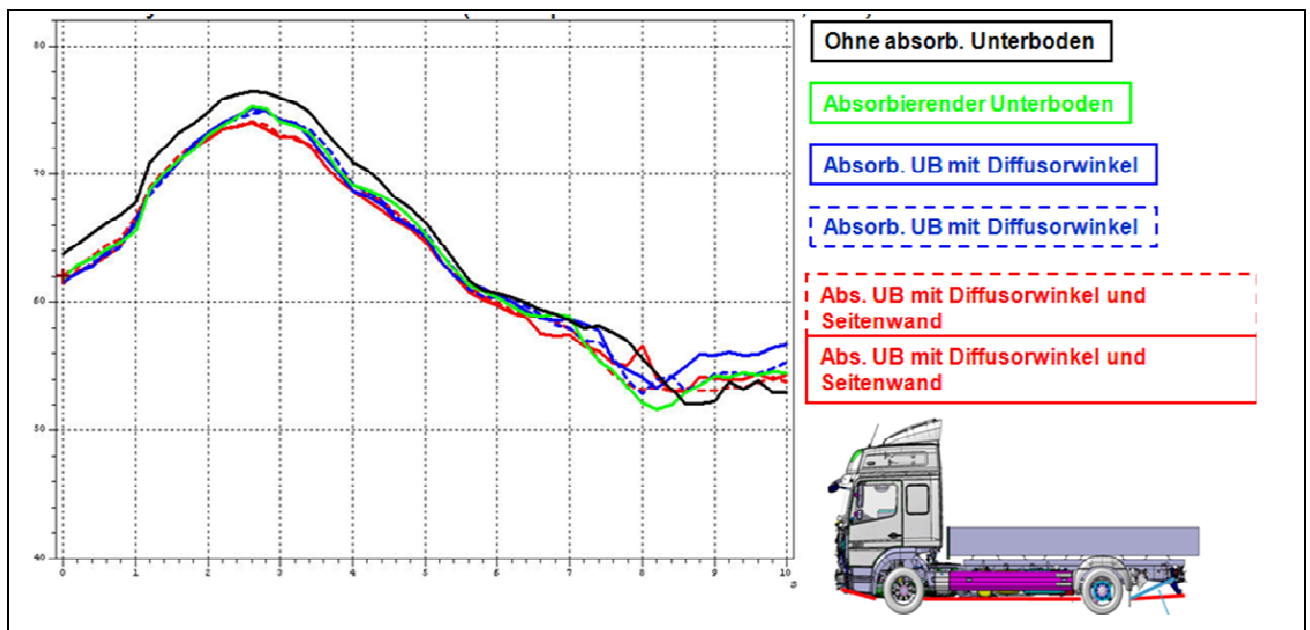
Die aerodynamisch gestalteten Modifikationen zeigen zunächst mal keinen akustischen Nachteil; vielmehr ergibt sich durch die Seitenwand sogar ein weiterer Vorteil im Maximalverlauf des Vorbeifahrtpegels. Dies bestätigen die Terzpegeldiagramme dieser einzelnen Maßnahmen (Bild 4.4-19). Somit ergibt sich letztendlich eine weitere Verbesserung von ca. 0,5 dB im Vorbeifahrtpegel durch diese aerodynamisch günstige Seitenwand.



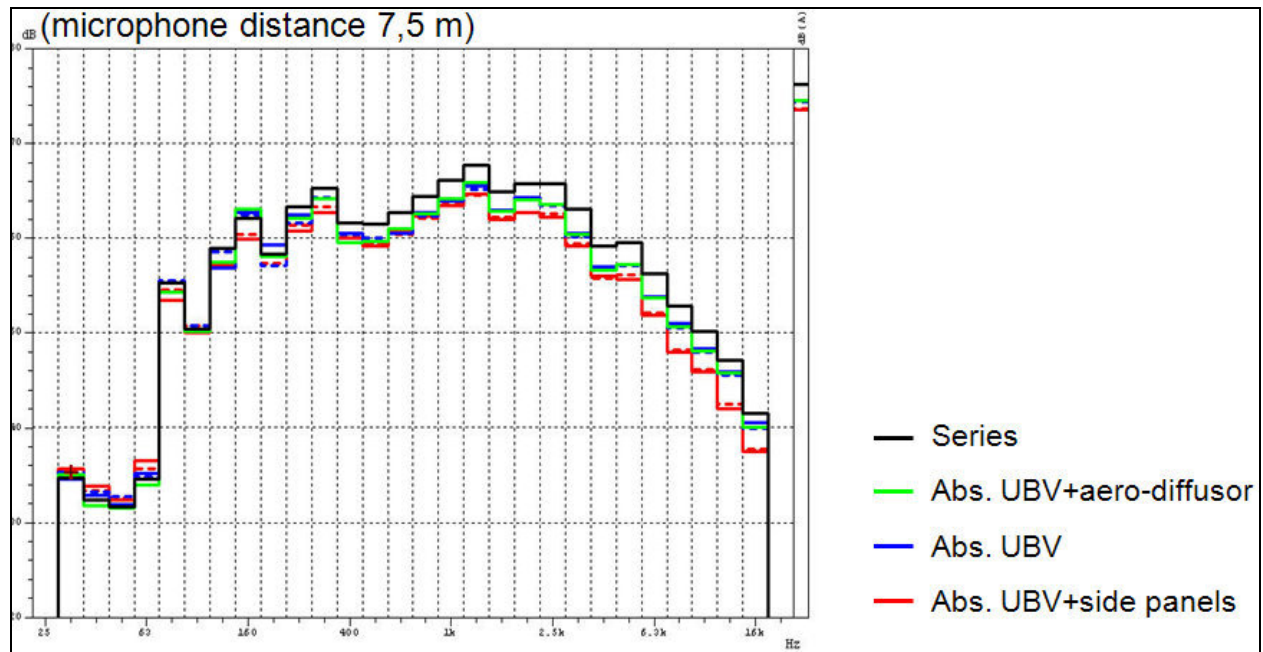
**Bild 4.4-16:** Modifikation des Unterbodens zur Verbesserung der Aerodynamik: Diffusorwinkel



**Bild 4.4-17:** Modifikation des Unterbodens zur Verbesserung der Aerodynamik: Seitenverkleidung



**Bild 4.4-18:** Vorbeifahrtmessung der Maßnahmen Ausgangszustand (schwarz) absorbierender Unterboden der vorangegangenen Untersuchungen (grün) und aerodynamisch optimierter Unterboden (blau Heckteil mit Diffusorwinkel, rot zusätzliche Seitenwand)

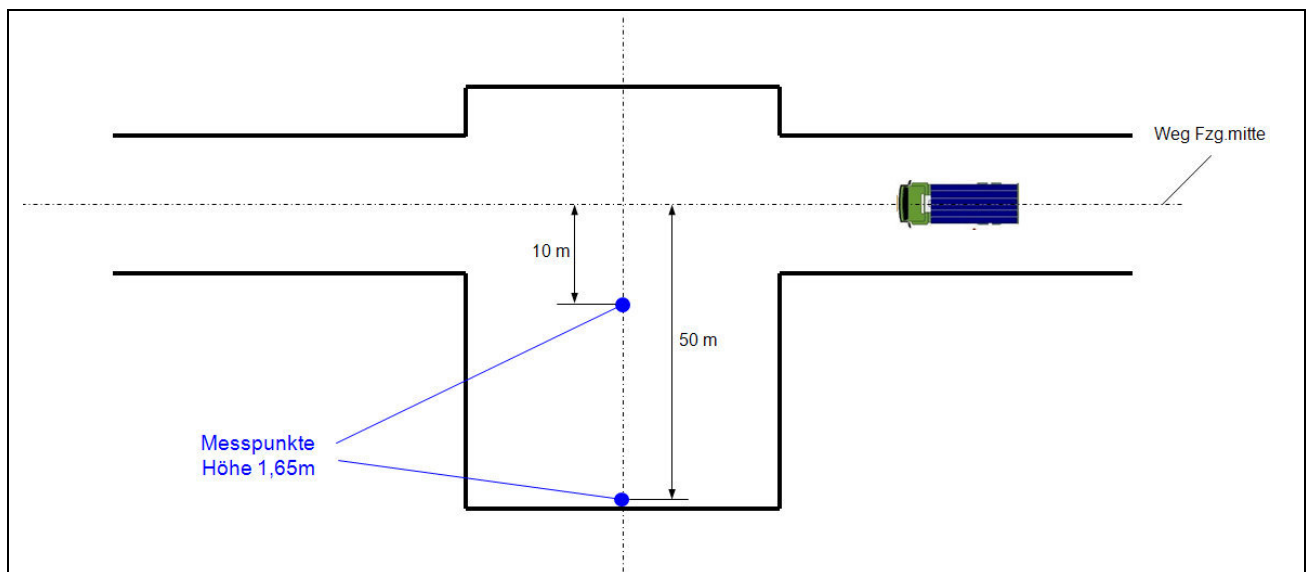


**Bild 4.4-19:** Vorbeifahrtmessung (Terzspektrum) der Maßnahmen Ausgangszustand (schwarz) absorbierender Unterboden der vorangegangenen Untersuchungen (grün) und aerodynamisch optimierter Unterboden (blau Heckteil mit Diffusorwinkel, rot zusätzliche Seitenwand)

#### 4.4.4.2 Vorbeifahrtmessungen mit konstanter Geschwindigkeit an Klein-Lkw mit absorbierender Unterbodenverkleidung

Die folgenden Untersuchungen zeigen die akustischen Auswirkungen einer schallabsorbierenden Unterbodenverkleidung auf den Vorbeifahrtpegel bei konstanter Geschwindigkeit.

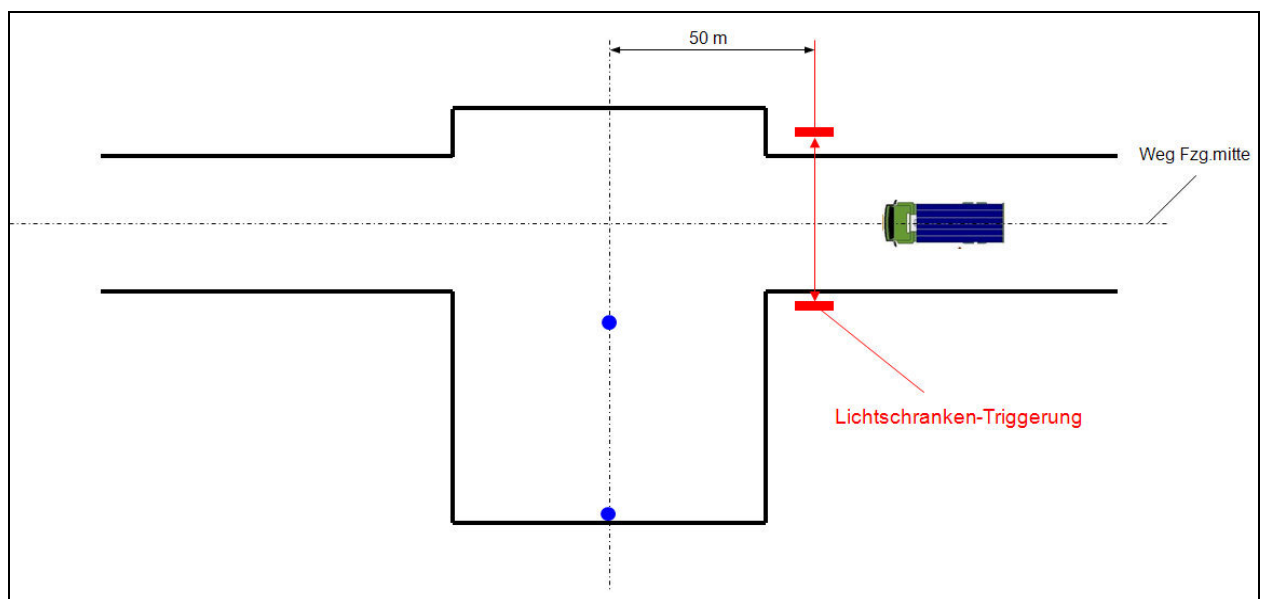
Bild 4.4-20 verdeutlicht die verwendete Anordnung der Messmikrone bei den durchgeführten Messungen. Die verwendete Teststrecke war die AKS Akustikstrecke des Testcenters Papenburg (Asphaltdeckschicht). Gemessen wurde mit Kunstkopf und Messmikrofonen jeweils 10 m und 50 m von Fahrbahnmitte bei einer Mikrofonhöhe von 1,65 m.





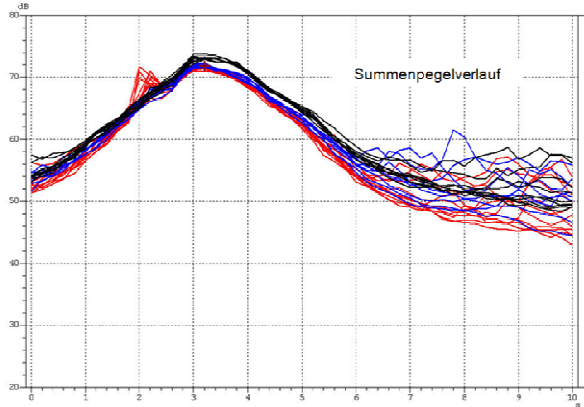
**Bild 4.4-20:** Anordnung der Messmikrofone

Die Messungen wurden mittels einer Lichtschranke getriggert, um für eine statistische Mittelung mehrerer Messungen eine präzise Zeitinformation zu gewährleisten (Bild 4.4-21).



**Bild 4.4-21:** Anordnung der Lichtschranke

Die folgenden Diagramme stellen die überlagerten Zeitverläufe der Einzelmessungen dar bei 10 m Mikrofonabstand (Bild 4.4-22) und bei 50 m Mikrofonabstand (Bild 4.4-23). Verglichen sind hierbei jeweils eine Fahrzeugausstattung ohne absorbierende Unterbodenverkleidung (schwarz) mit einer Ausstattung mit vollflächiger absorbierender Unterbodenverkleidung (blau). Weiterhin wurde auf diese Verkleidung noch ein zusätzliches Absorbervlies aufgebracht (rote Kurven). Bei diesem Bauzustand zeigen die Messkurven leider einen Impuls bei 2 s, der auf eine Fahrbahnunebenheit (Kabelkanal) zurückzuführen ist.

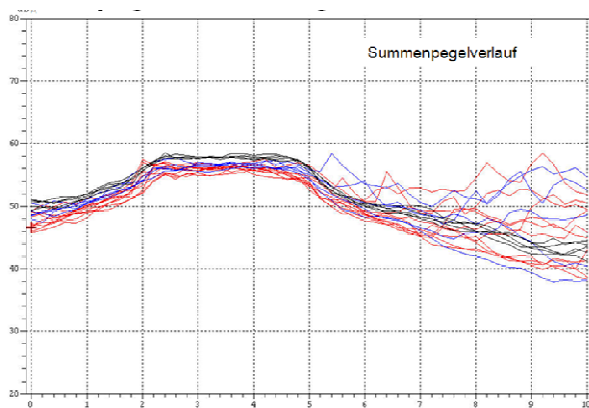


**Bild 4.4-22:** Zeitverläufe der Einzelmessungen bei 10 m Mikrofonabstand

Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung

Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung

Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und zusätzl. aufgelegtem Absorbervlies



**Bild 4.4-23** Zeitverläufe der Einzelmessungen bei 50 m Mikrofonabstand

Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung

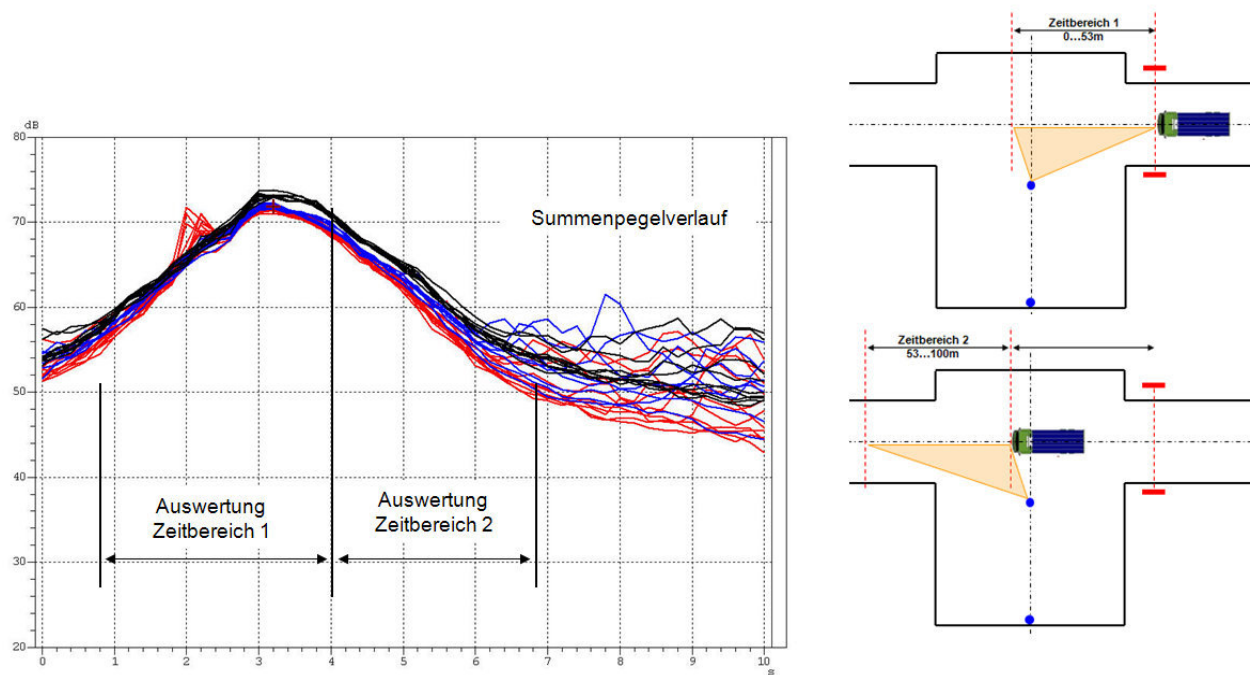
Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung

Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und zusätzl. aufgelegtem Absorbervlies

Es ergeben sich Pegelverbesserungen von ca 2 - 3 dB wie sie auch schon bei den beschleunigten Vorbeifahrtmessungen zu sehen waren.

Wie sich die Verbesserung im Spektrum darstellt, verdeutlichen die folgenden Auswertungen. Die gemessenen Zeitverläufe wurden in zwei Zeitbereiche unterteilt und diese jeweils einer Terzpegelanalyse unterzogen. In Bild 4.4-24 sind die gewählten Zeitbereiche und die jeweilige Zuordnung zu den durchfahrenden Fahrzeugpositionen zu sehen.

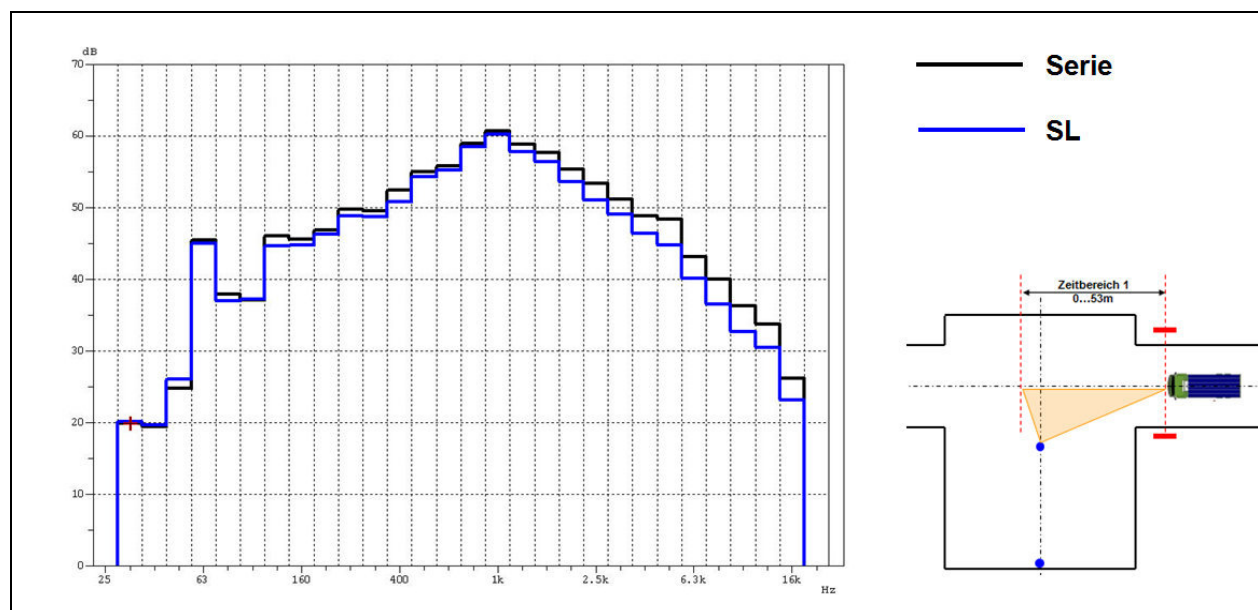




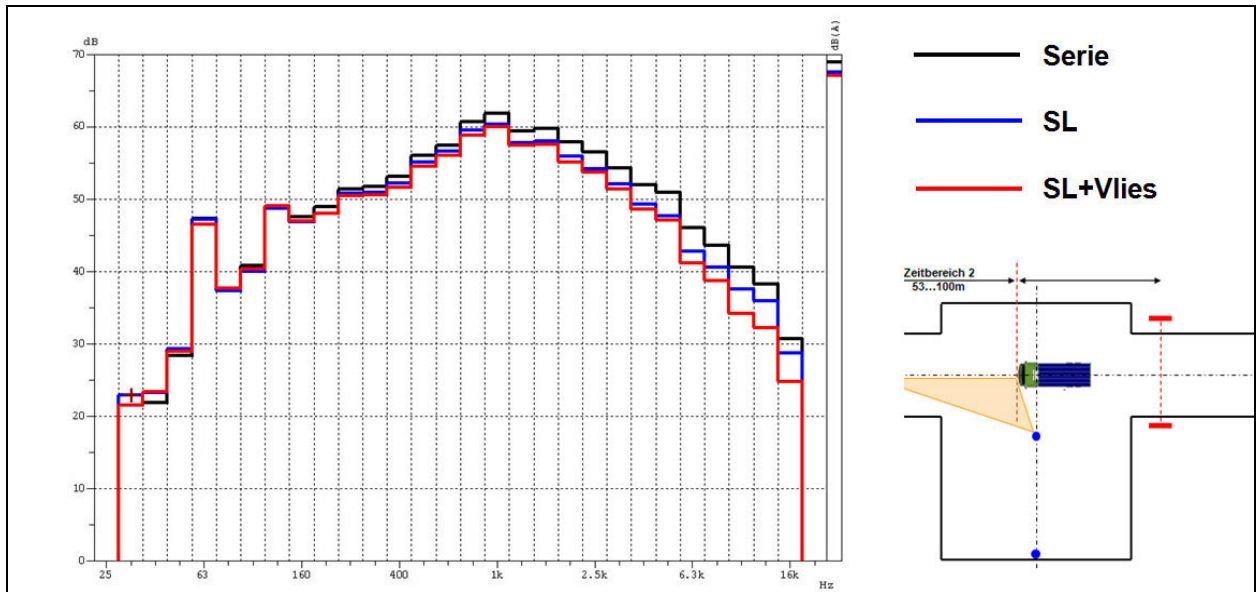
**Bild 4.4-24** Zeitbereiche für die Spektralauswertung (Mikrofonabstand 10 m)

Die Terzpegelanalyse des Zeitbereichs 1 (Bild 4.4-25) zeigt eine Verminderung der Schallpegel durch den absorbierenden Unterboden (Bezeichnung SL), insbesondere im Frequenzbereich oberhalb 1 kHz (eine Auswertung des Bauzustandes mit zusätzlichem Vlies wurde in diesem Zeitbereich auf Grund der Impulse bei 2 s nicht durchgeführt). Im Zeitbereich 2 (Bild 4.4-26) ergibt sich mehr oder weniger die gleiche frequenzabhängige Verbesserung. Die zusätzliche Absorbierauflage auf dem absorbierenden Unterboden (Bezeichnung SL + Vlies) wirkt sich vor allem hochfrequent aus.

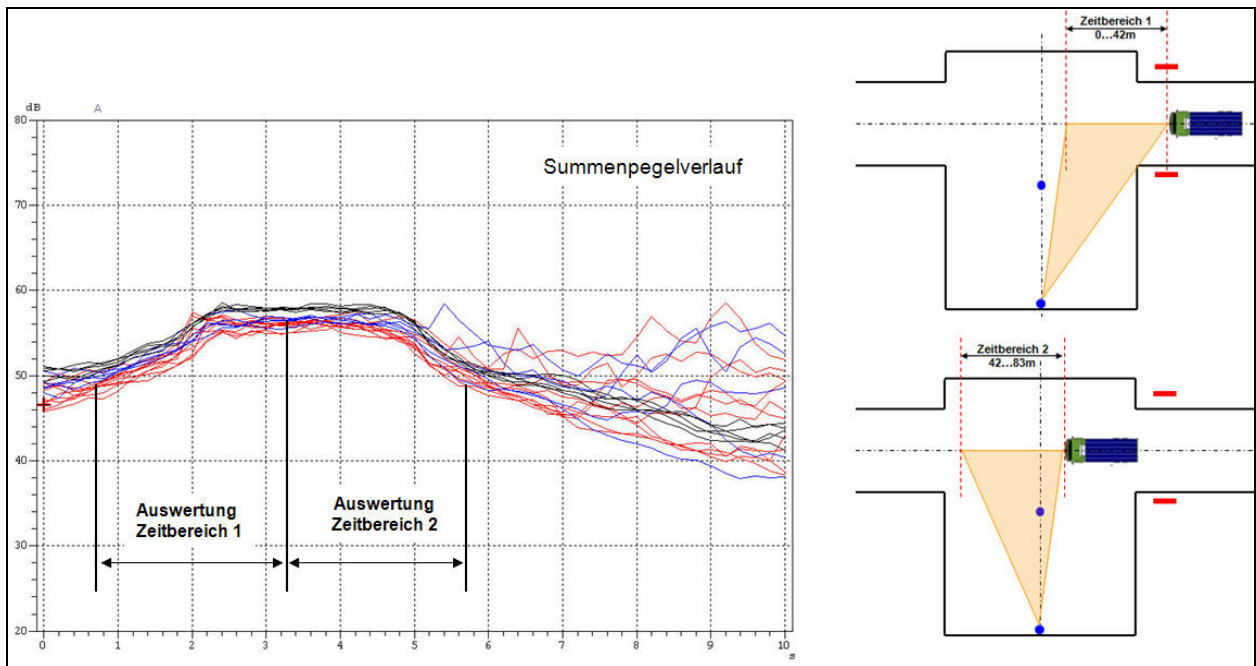
Die gleiche Auswertung wurde auch für den Mikrofonabstand 50 m durchgeführt (Bilder 4.4-27, 4.4-28, 4.4-29). Hierbei sieht man mehr oder weniger das gleiche frequenzabhängige Verhalten der einzelnen Bauzustände wie bei dem Mikrofonabstand 10 m.



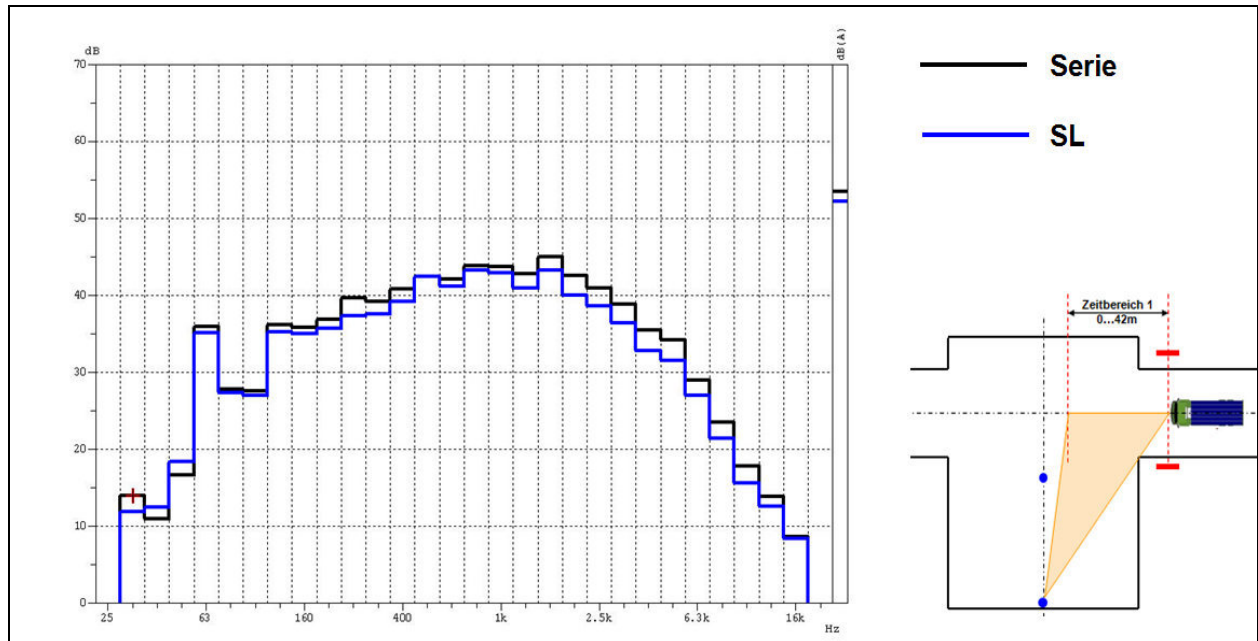
**Bild 4.4-25:** Terzpegelanalyse der aufgezeichneten Vorbeifahrtssignale Zeitbereich 1 (Mikrofonabstand 10 m)



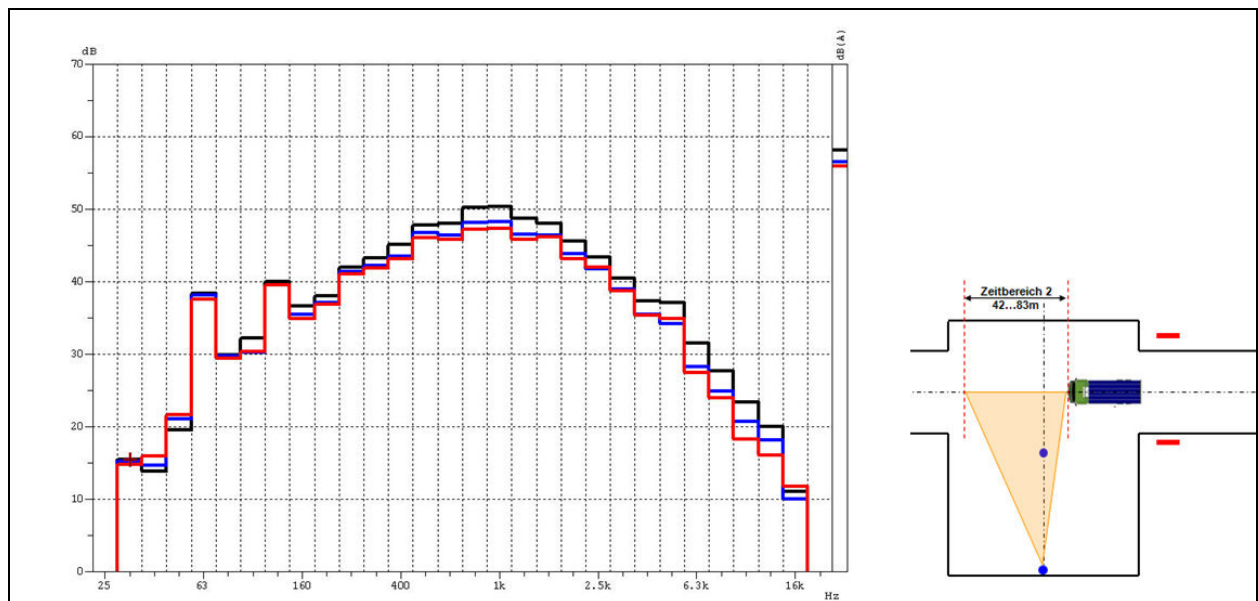
**Bild 4.4-26:** Terzpegelanalyse der aufgezeichneten Vorbeifahrtsignale Zeitbereich 2 (Mikrofonabstand 10 m)



**Bild 4.4-27:** Zeitbereiche für die Spektralauswertung (Mikrofonabstand 50 m)



**Bild 4.4-28:** Terzpegelanalyse der aufgezeichneten Vorbeifahrtssignale Zeitbereich 1 (Mikrofonabstand 50 m)



**Bild 4.4-29:** Terzpegelanalyse der aufgezeichneten Vorbeifahrtssignale Zeitbereich 2 (Mikrofonabstand 10 m)

#### 4.4.4.3 Zusammenfassende Betrachtung der Ergebnisse

Die bisherigen Untersuchungen an großflächigen straßenseitig absorbierenden Unterbodenverkleidungen zeigen bei beschleunigter Vorbeifahrt ein erhebliches Potential zur Geräuschminderung von ca. 2 - 3 dB(A), wobei auch eine aerodynamisch günstige Gestaltung hier zu keinen Verschlechterungen führt. Vielmehr zeigt sich, insbesondere durch die Erweiterung der Konzeption mit aerodynamisch wirksamen Seitenwänden, eine weitere Verbesserung von ca. 0,5 dB(A). Vorbeifahrtpegel am Lkw bei konstanter Geschwindigkeit von 60 km/h mit absorbierendem Unterboden zeigen eine Pegelminderung von ca. 2 dB(A). Im Terzspektrum bilden sich diese Verbesserungen im Wesentlichen bei mittleren bis hohen Frequenzen > 250 Hz ab.

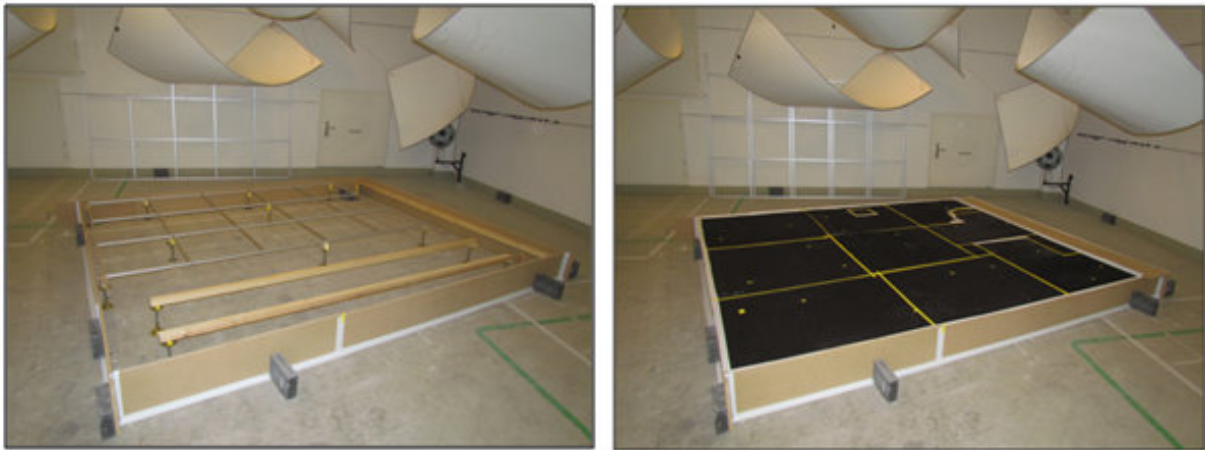
#### 4.4.5 Untersuchung der möglichen Verbesserung des Außengeräuschs durch selektiv abgestimmte, absorbierende Unterbodenverkleidung

##### 4.4.5.1 Klein-Lkw mit tieffrequent abgestimmten Resonatoren auf der Unterbodenverkleidung

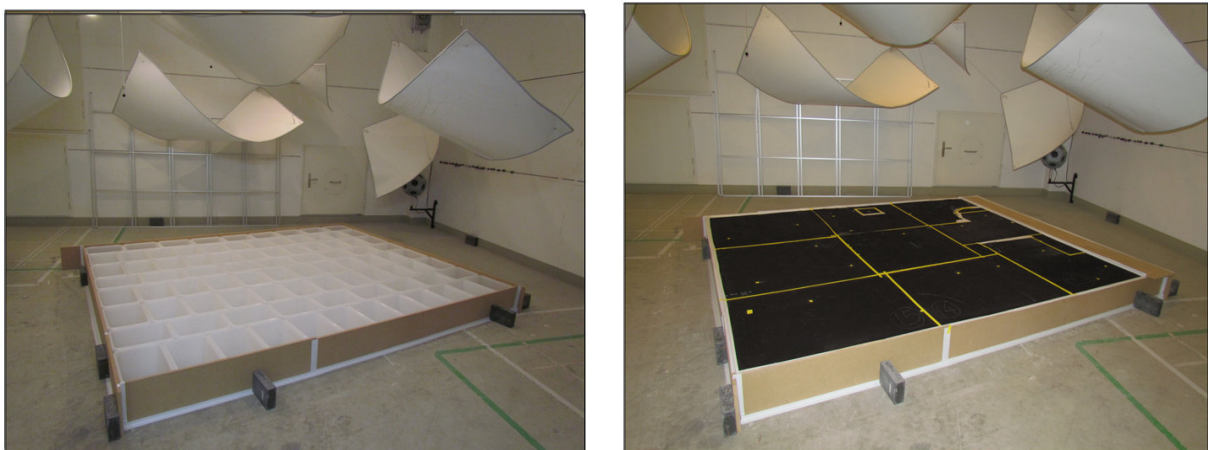
Im Teilvorhaben konnte gezeigt werden, dass sich die Schallabsorption des absorbierenden Unterbodens durch zusätzliche Resonanzkavitäten gezielt in gewissen Frequenzbereichen weiter steigern lässt. Die Erforschung, inwiefern dies einem Einfluss auf die frequenzselektive Verminderung des Außengeräusches mit sich bringen würde, war ein Bestandteil dieses Teilvorhabens und schließlich auch die Voraussetzung für die Sinnhaftigkeit weiterer Aktivitäten zur frequenzselektiven Optimierung des Schallabsorptionsgrades der LWRT-Sandwichaufbaus an sich.

Eine einfache Realisierung derartiger Resonatoren wurde im Forschungsvorhaben dadurch erreicht, dass Kunststoffbehälter mit ihrer offenen Seite auf der LWRT-Unterbodenkonstruktion fixiert wurden.

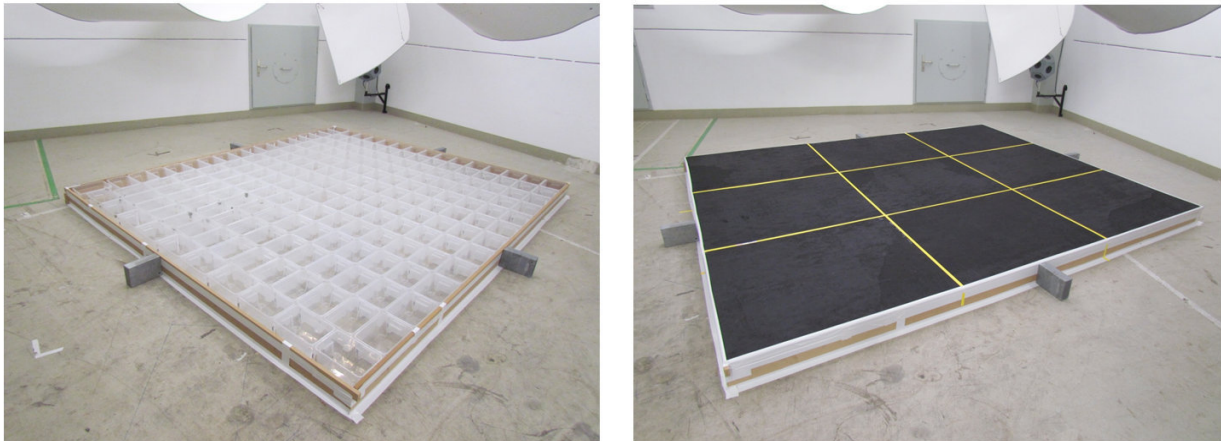
Bild 4.4-30 zeigt die Messanordnung zur Schallabsorptionsmessung des Fahrzeugunterbodens ohne Resonatorhöhlen, die Bilder 4.4-31 und 4.4-32 zeigen die Messanordnung mit zwei unterschiedlichen Kammervolumina von ca. 5 L (13 cm Kammerhöhe) und 20 L (24 cm Kammerhöhe), durchgeführt im Hallraum von Müller-BBM.



**Bild 4.4-30:** Messung des Schallabsorptionsgrads der absorbierenden Unterbodenverkleidung (Hallraum Müller-BBM) Unterbau Lattenkonstruktion (links) Resonatorhöhlen abgedeckt mit absorbierendem Unterboden (rechts)



**Bild 4.4-31:** Messanordnung schallabsorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatorhöhlen 20 L hinterlegt (links: Kammern aus Kunststoffkästen, rechts: diese Kammern mit absorbierenden Unterbodenplatten belegt)

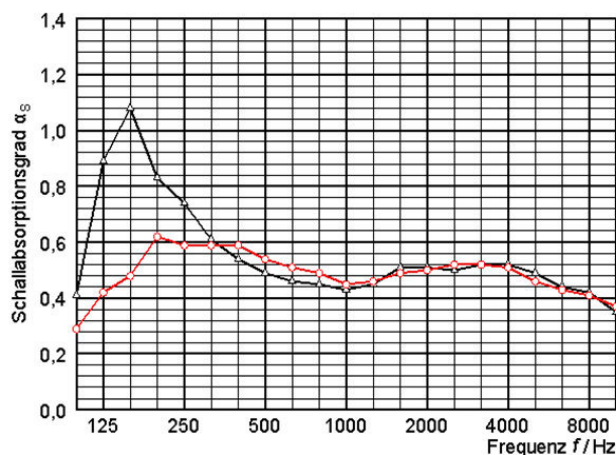


**Bild 4.4-32:** Messanordnung schallabsorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatorräumen 5 L hinterlegt (links: Kammern aus Kunststoffkisten, rechts: diese Kammern mit absorbierenden Unterbodenplatten belegt)

In Bild 4.4-33 sieht man die gemessenen Schallabsorptionsgrade mit und ohne Resonatorunterbau. Im unteren Frequenzbereich wird mit beiden Resonatorvolumina eine deutliche Verbesserung des Schallabsorptionsgrads erreicht. Wie erwartet, führt das größere Resonatorvolumen (im rechten Bild) zu einer tieffrequenteren Abstimmung der Resonanzfrequenz.

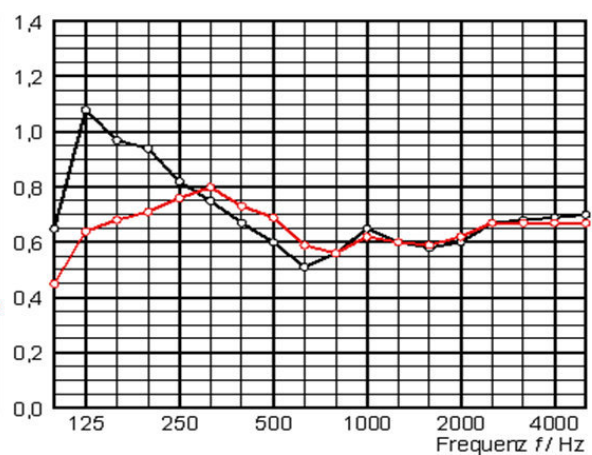
#### 5L Resonatoren

—△— Vlies SL2-146 mit Unterkonstruktion aus Kunststoffkisten  
—○— Vlies SL2-146 mit Unterkonstruktion aus Latten



#### 20L Resonatoren

—○— Vlies SL-2 mit Unterkonstruktion aus Kunststoffkisten  
—○— Vlies SL-2 mit Unterkonstruktion aus Latten



**Bild 4.4-33:** Schallabsorption von absorbierenden Unterbodenverkleidungsplatten mit und ohne Resonatorräumen hinterlegt. Die Verbesserung im tiefen Frequenzbereich ist bei beiden Resonatorvolumina zu erkennen. Das größere Resonatorvolumen (Bild rechts) führt zu einer tieffrequenteren Abstimmung der Resonanzfrequenz

Bild 4.4-34 veranschaulicht die Messanordnung am Fahrzeug. Der absorbierende Unterboden war wie bisher am Fahrzeug angebracht. Auf ihm wurden die Resonatorräume mit der offenen Seite nach unten aufgelegt und befestigt. Im oberen Bild erkennt man die 20 L Resonatoren, im unteren die 5 L-Resonatoren.



## 20L Resonatoren

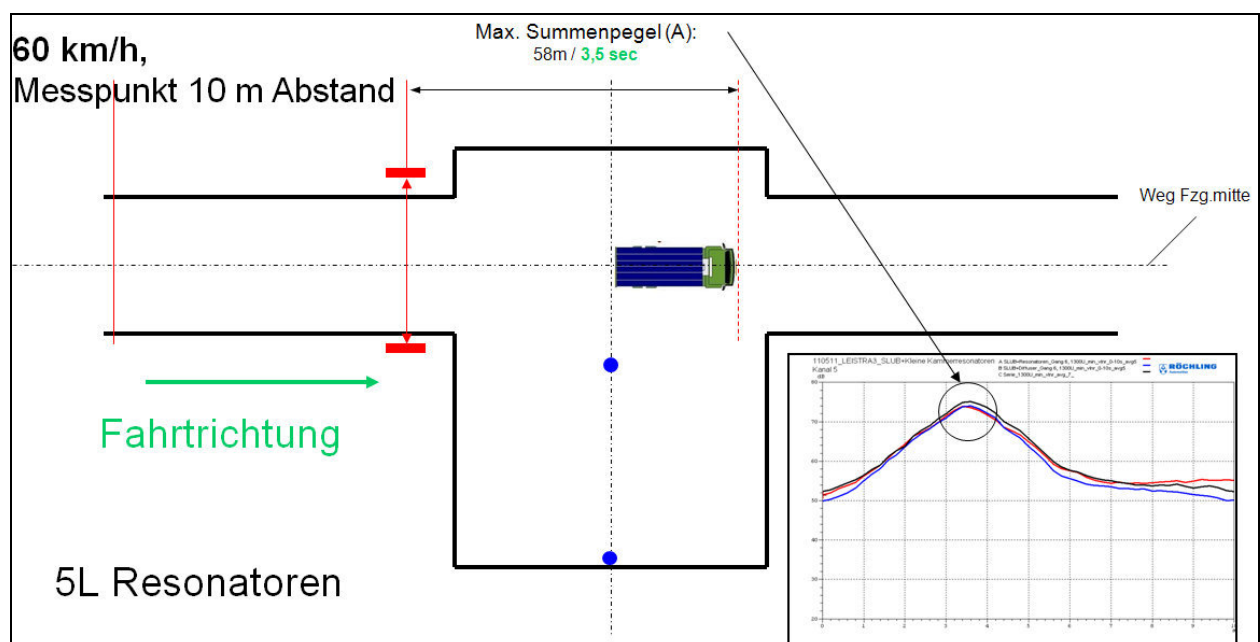


## 5L Resonatoren

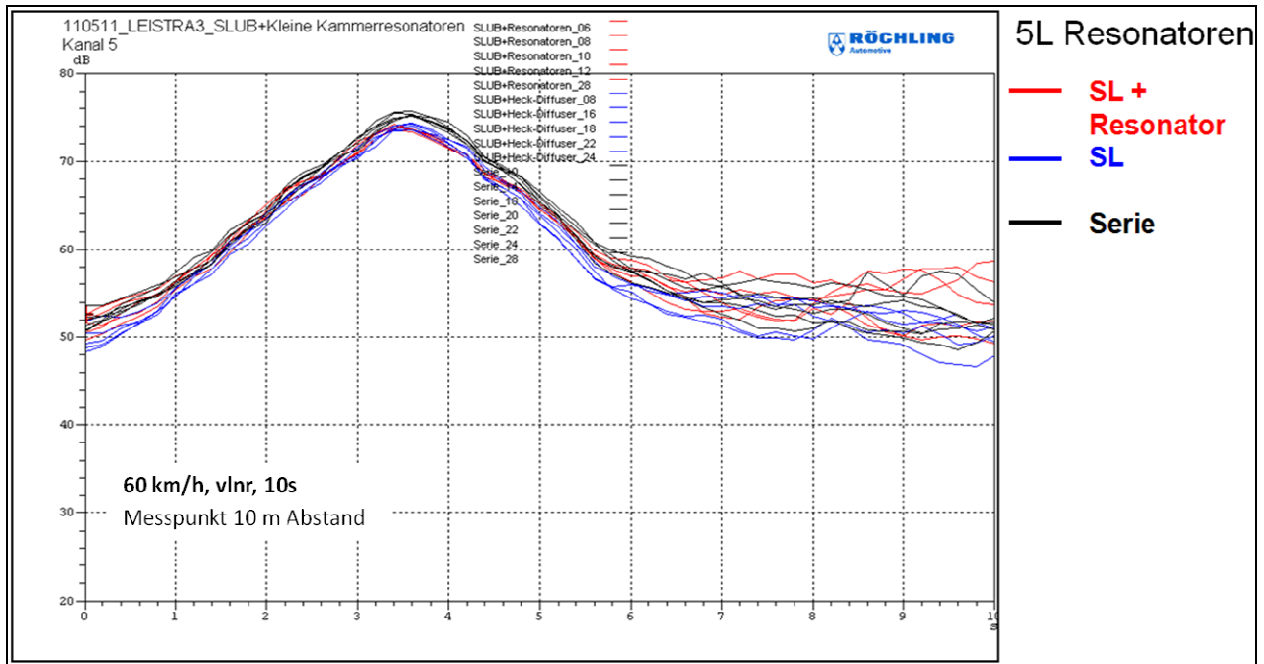


**Bild 4.4-34:** Aufbau des Fahrzeugs mit absorbierender Unterbodenverkleidung und aufgesetzten Kunststoffresonatoren (20 L oben und 5 L unten)

In den Bildern 4.4-35 bis 4.4-41 sind die Messergebnisse für die absorbierende UBV mit 5 L-Resonator-Anordnung im Vergleich zu einer Anordnung absorbierende UBV ohne Resonatoren sowie einem Fahrzeugaufbau ganz ohne Unterbodenverkleidung dargestellt.



**Bild 4.4-35:** Mikrofonanordnung für die konstante Vorbeifahrt und Fahrzeugposition beim Maximalpegel

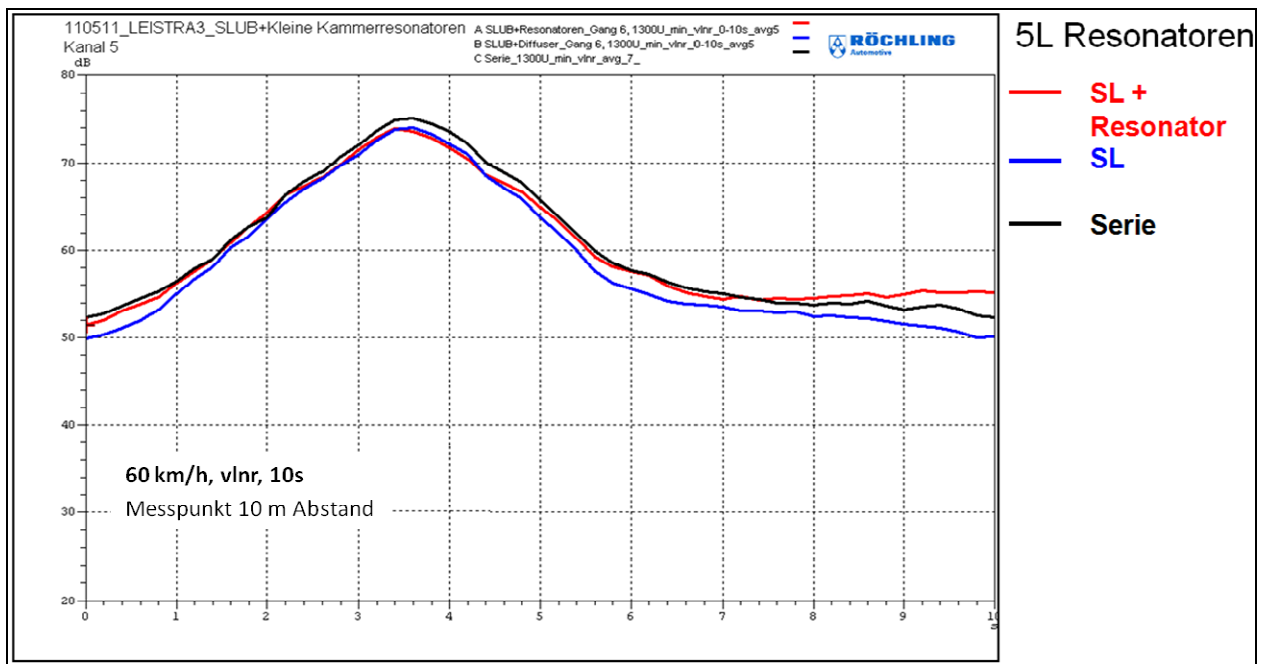


**Bild 4.4-36:** A-bewertete Schallpegelverläufe der konstanten Vorbeifahrt bei verschiedenen Aufbauten der absorbierenden Unterbodenverkleidungen

Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung (Serie)

Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung (SL)

Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und 5 L-Resonatoren (SL + Resonatoren)



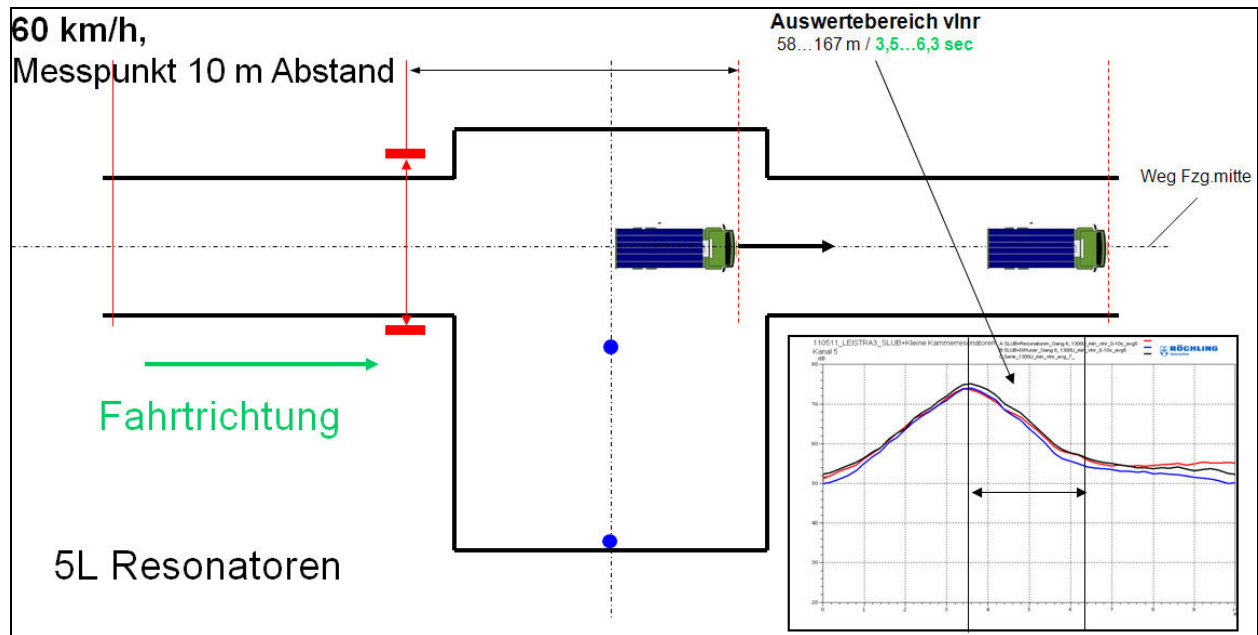
**Bild 4.4-37:** A-bewertete Schallpegelverläufe (Mittelwerte) der konstanten Vorbeifahrt bei verschiedenen Aufbauten der absorbierenden Unterbodenverkleidungen

Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung (Serie)

Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung (SL)

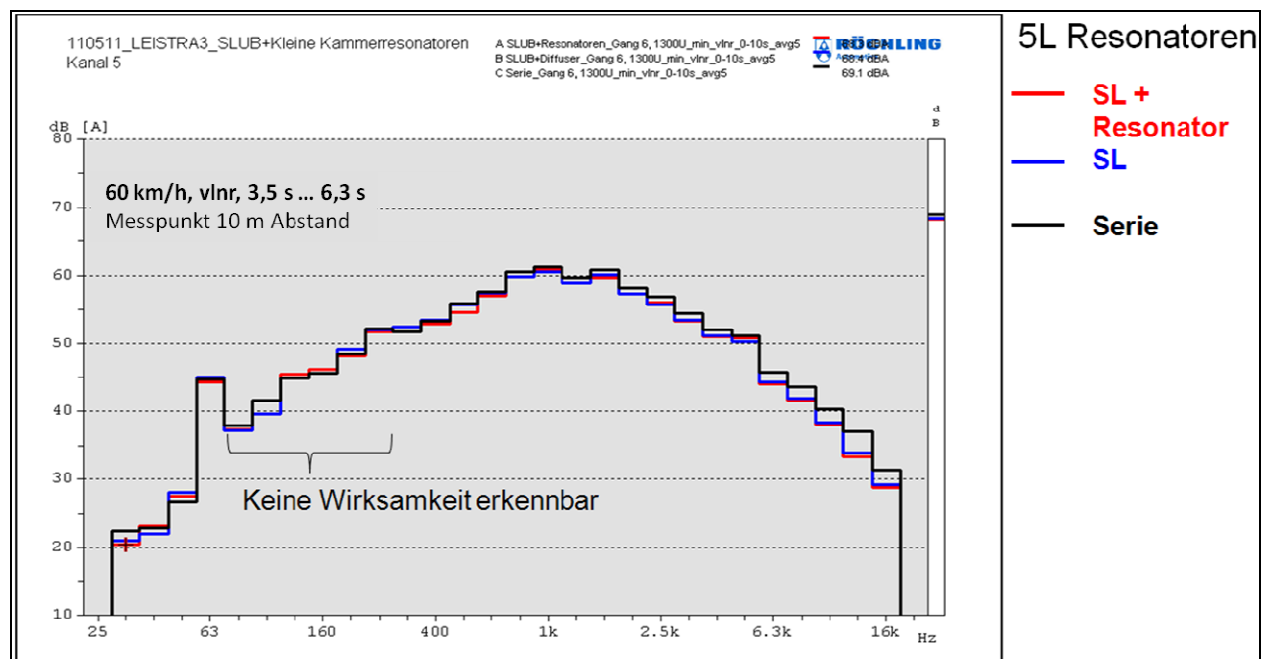
Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und 5 L-Resonatoren (SL + Resonatoren)

Im Folgenden wurden die Terzpegelspektren analysiert und zwar im Bereich des sich entfernenden Fahrzeugs (Zeitbereich siehe Bild 4.4-38).



**Bild 4.4-38:** Analyse Fenster für Terzpegelanalyse

Das Ergebnis zeigt auch in der Spektralanalyse keine nennenswerte Verbesserung der abgestrahlten Terzpegel, auch nicht in dem Frequenzbereich um die 160 Hz, welcher aus den Schallabsorptionsmessungen eine deutliche Verbesserung hätte erwarten lassen.



**Bild 4.4-39:** Terzpegelanalyse bei verschiedenen Aufbauten der absorbierenden UBV

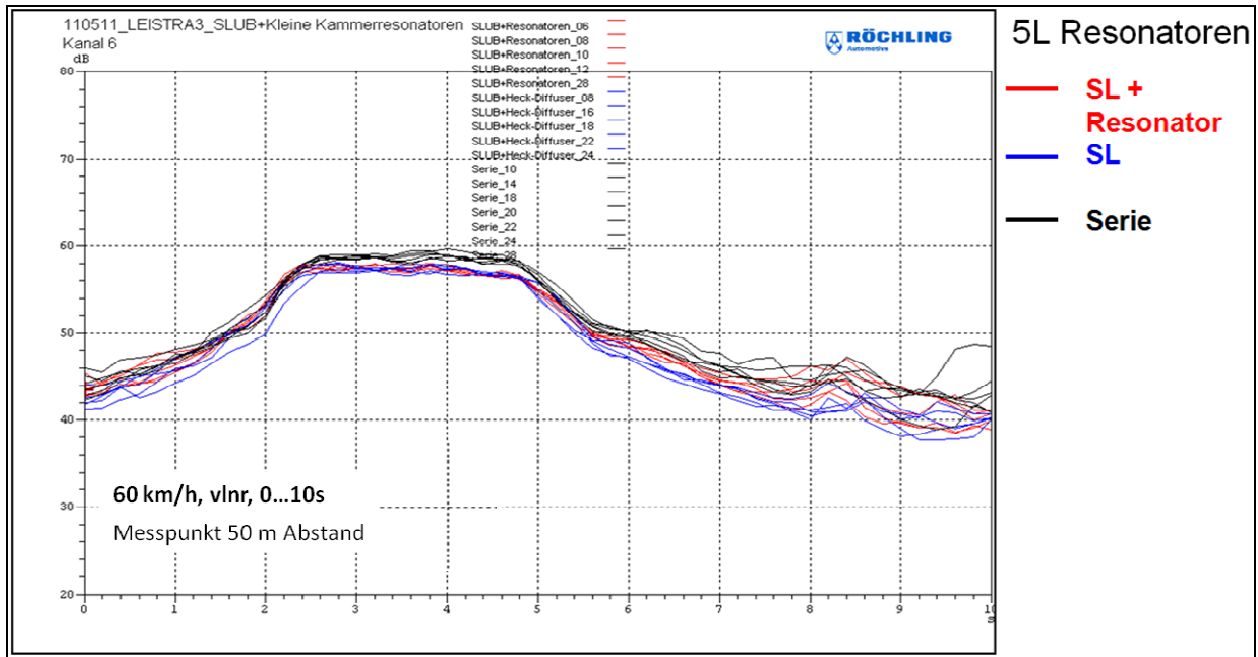
Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung (Serie)

Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung (SL)

Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und 5 L-Resonatoren (SL + Resonatoren)

Auch die folgenden Messergebnisse aus der Mikrofonposition 50 m (Bilder 4.4-40 und 4.4-41) lassen keine Verbesserung durch die Resonatoren erkennen.



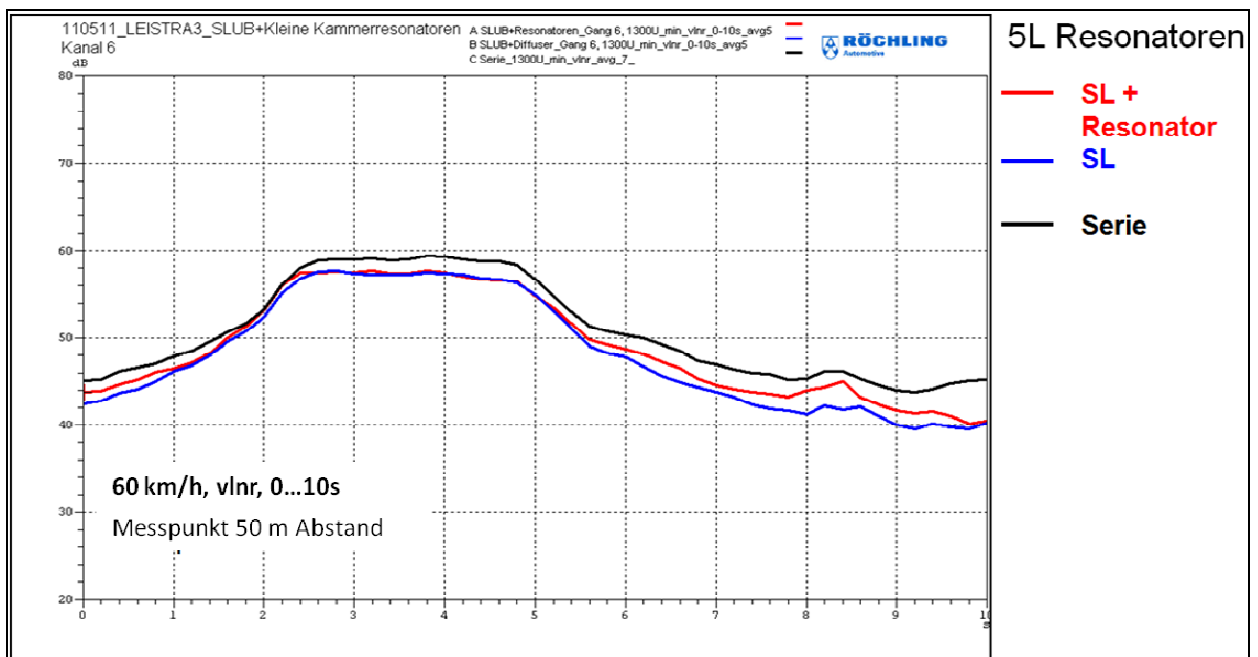


**Bild 4.4-40:** A-bewertete Schallpegelverläufe der konstanten Vorbeifahrt

Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung (Serie)

Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung (SL)

Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und 5 L-Resonatoren (SL + Resonatoren)



**Bild 4.4-41:** A-bewertete Schallpegelverläufe (Mittelwerte) der konstanten Vorbeifahrt

Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung (Serie)

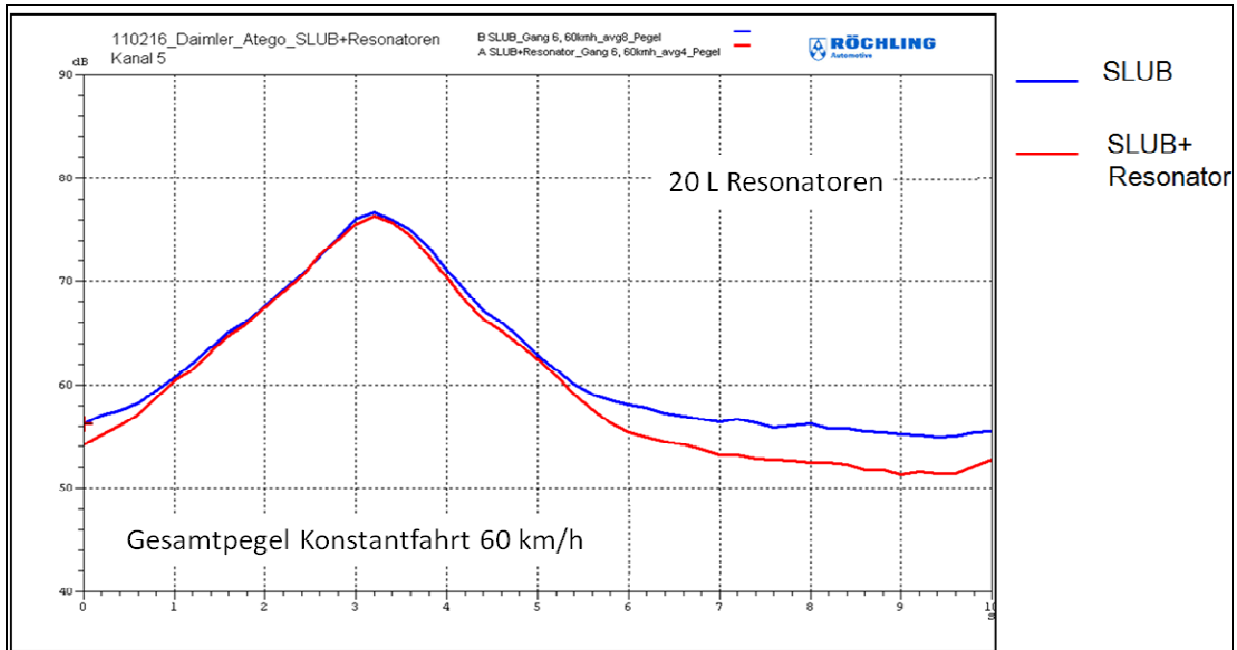
Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung (SL)

Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und 5 L-Resonatoren (SL + Resonatoren)

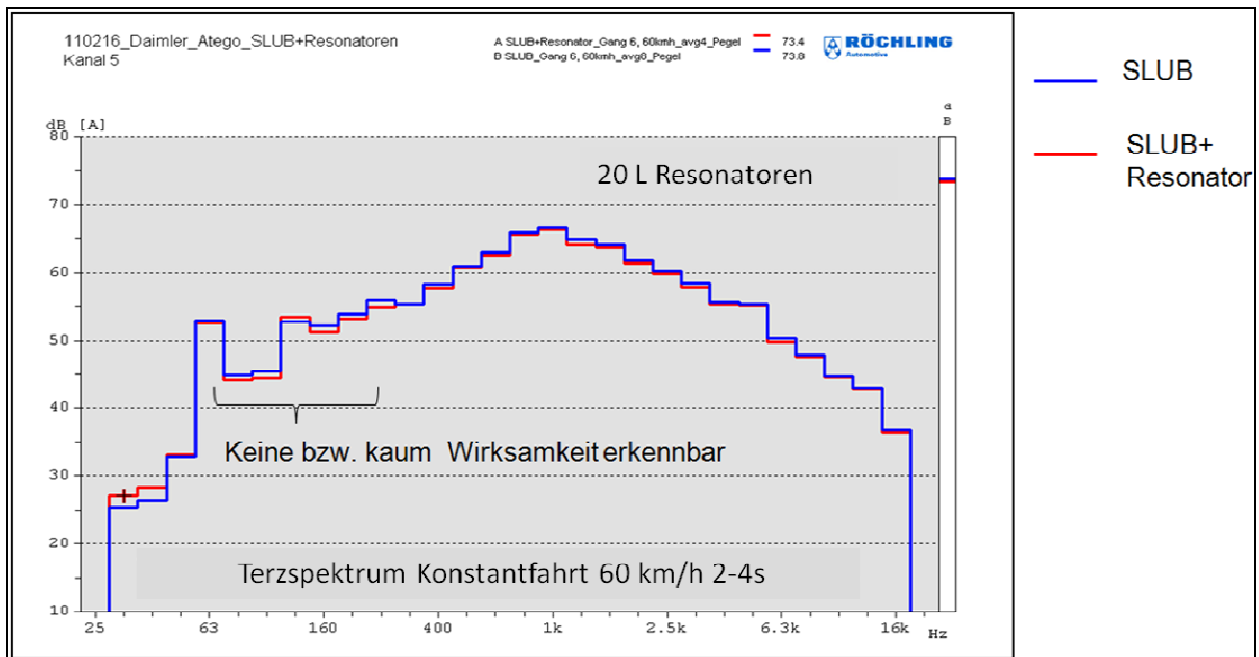
In den nächsten Diagrammen werden noch auszugsweise Messungen dargestellt, die mit den 20 L Resonatoren durchgeführt worden waren.

Die Bilder 4.4-34 und 4.4-35 zeigen die Zeitverläufe und das Terzspektrum für den Mikrofonabstand 10 m. Hier könnte man in Bild 4.4-35 zwar eine gewisse Verbesserung im Frequenzbereich von 80 - 250 Hz vermuten. Allerdings zeigt gerade die Terz des Absorptionsmaximums bei 125 Hz (siehe Bild 4.4-25 rechtes Diagramm, schwarze Kurve) eine leichte Verschlechterung.

Somit konnte - zumindest bei den relativ tieffrequenten Abstimmungen der Resonatoren und den damit verbundenen tieffrequenten Schallabsorptionsverbesserungen - keine nennenswerte Verminderung der abgestrahlten Schallpegel festgestellt werden.



**Bild 4.4-42:** A-bewertete Schallpegelverläufe (Mittelwerte) der konstanten Vorbeifahrt bei verschiedenen Aufbauten der absorbierenden Unterbodenverkleidungen  
 Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung (Serie)  
 Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung (SL)  
 Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und 20 L-Resonatoren (SL +Resonatoren)



**Bild 4.4-43:** Terzpegelanalyse bei verschiedenen Aufbauten der absorbierenden Unterbodenverkleidungen  
 Schwarz: Ohne Unterbodenverkleidung (Serie)  
 Blau: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung (SL)  
 Rot: Mit absorbierender Unterbodenverkleidung und 20 L-Resonatoren (SL +Resonatoren)

#### 4.4.5.2 Klein-Lkw mit 1kHz-Resonatoren auf der absorbierenden Unterbodenverkleidung

In Ergänzung zu den Untersuchungen mit 5 Liter (160 Hz Resonanzfrequenz) und 20 Liter (125 Hz Resonanzfrequenz) Resonatorkammern am ATEGO wurden weitere Untersuchungen mit deutlich höherfrequent abgestimmten Kammern (1 kHz) durchgeführt. Die 1 kHz-Abstimmung sollte schon deswegen eine Außen-geräuschverbesserung nach sich ziehen, da in diesem Frequenzbereich auch das Reifen-Fahrbahn-Geräusch sein Maximum besitzt. Insofern sollte eine Absorptionssteigerung zumindest hier eine nennenswerte Außengeräuschwirksamkeit erwarten lassen.

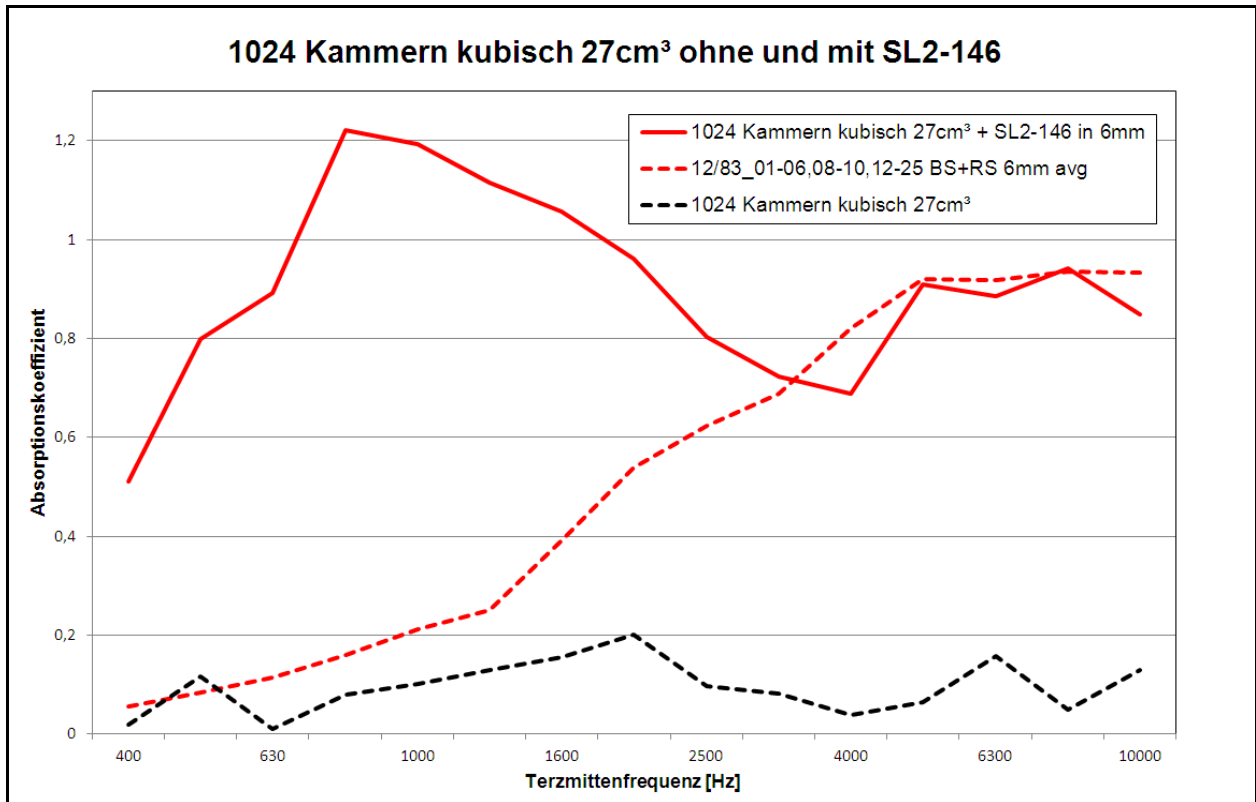
Für die Realisierung der Resonatorkammern wurden Stegplatten mit 500\*500 mm im Spritzgussverfahren erstellt. Steghöhe und Stegabstand betragen 30 mm, so dass sich kubische, einseitig offene Kammern mit einem Volumen von etwa 0,027 L ergaben. Bild 4.4-44 zeigt vier derartige Stegplatten (offene Seite oben) und die mit absorbierender Platte abgedeckten Stegplatten jeweils in der Alpha-Kabine (verkleinerter Hallraum für Messungen > 400 Hz).



**Bild 4.4-44:** Resonatorstegplatten abgedeckt mit absorbierendem LWRT in der Alpha-Kabine

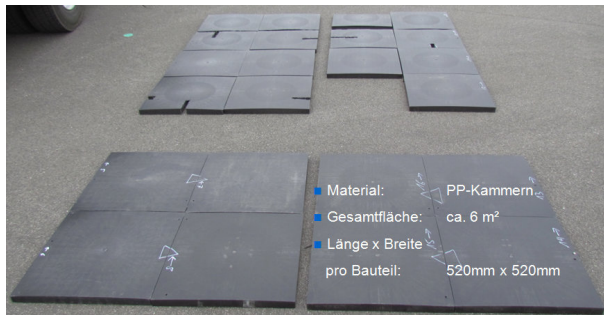
Die dort durchgeführte Absorptionsmessung ist im Diagramm Bild 4.4-45 zu sehen. Aufgetragen ist der Schallabsorptionskoeffizient der Kammerplatte (schwarz gestrichelt), die absorbierende LWRT-Unterbodenplatte (SL 2 146 6 mm, rot gestrichelt, auf den Boden gelegt) sowie die absorbierende LWRT-Unterbodenplatte auf der Kammerplatte (rot, durchgezogen).

Das Unterlegen der Stegplatte führt zu einer erheblichen Verbesserung der Schallabsorption bei mittleren Frequenzen. Die Kammern sind dabei so abgestimmt, dass sich insbesondere eine 1 kHz-Resonanz ausbildet.



**Bild 4.4-45:** Schallabsorptionskoeffizienten der Kammerplatte (schwarz gestrichelt), der absorbierenden LWRT-Unterbodenplatte (SL 2 146 6 mm, rot gestrichelt) sowie der absorbierenden LWRT-Unterbodenplatte auf der Kammerplatte (rot, durchgezogen)

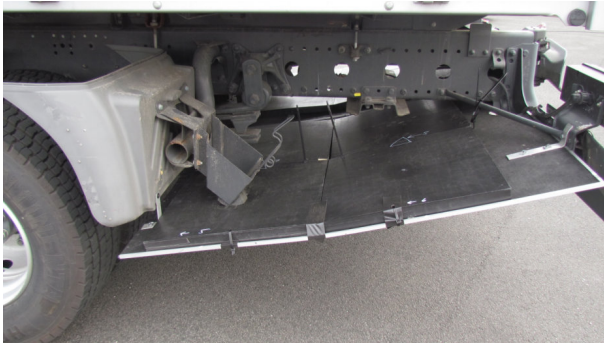
Das mit diesen Resonatorplatten-LWRT-Platten ausgestattete Fahrzeug (Bilder 4.4-46, 4.4-47, 4.4-48, 4.4-49) wurde wiederum einer konstanten Vorbeifahrtmessung unterzogen. Verglichen wurde der Zustand mit und ohne aufgelegten Resonatorkammern.



**Bild 4.4-46:** Für die Fahrzeugmessung verwendete Kammerplatten



**Bild 4.4-47:** Klein-Lkw Daimler ATEGO mit absorbierender Unterbodenplatte und fahrzeugseitig aufgelegten Kammerplatten (Kammeröffnungen der absorbierenden Platte zugewandt)



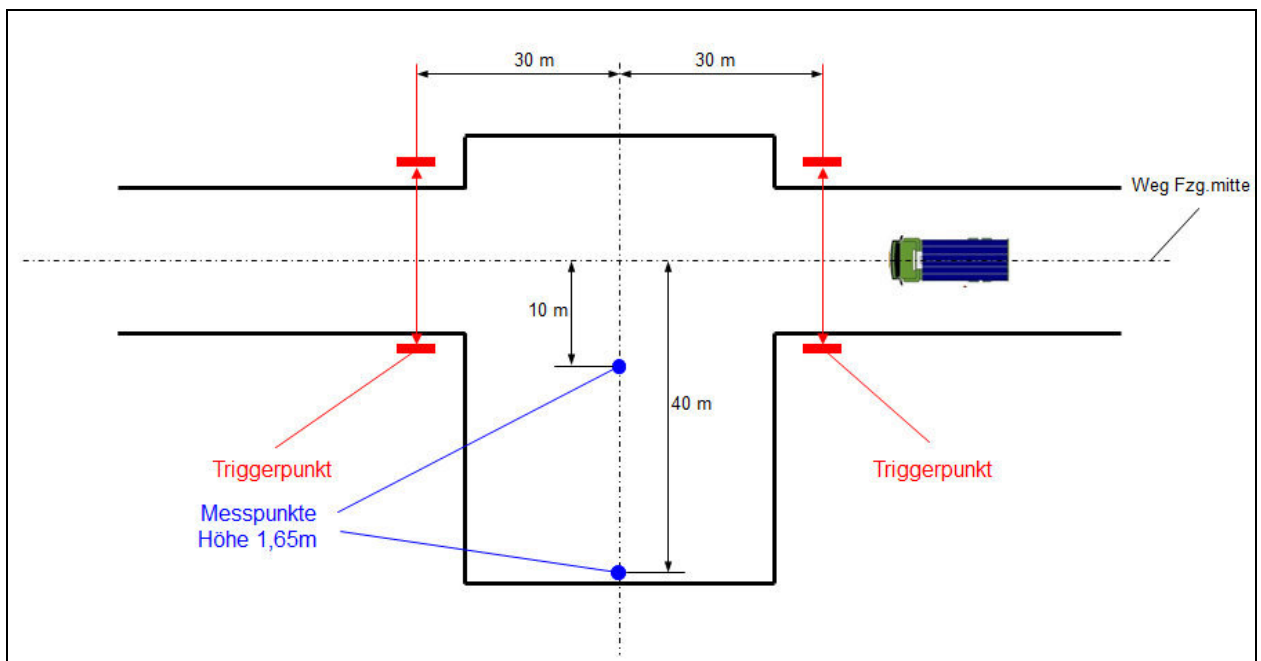
**Bild 4.4-48:** Absorbierende Unterbodenplatte, abgedeckt mit den Kammerplatten im hinteren Fahrzeugbereich



**Bild 4.4-49:** Absorbierende Unterbodenplatte, abgedeckt mit den Kammerplatten im mittleren Fahrzeugbereich

Mit diesen Platten wurde der schon mehrfach gemessene Daimler Atego ausgestattet und auf der Geräuschmessstrecke in Papenburg wie schon bei früheren Untersuchungen bei konstanter Geschwindigkeit 60 km/h vermessen.

Die Bilder 4.4-50 bis 4.4-52 zeigen die Anordnung der Messmikrofone und der Lichtschranken für die Messung des Vorbeifahrtpegels. Die Messungen wurden im ATP Testcenter in Papenburg auf der AKS Akustikstrecke (Asphaltdeckschicht) durchgeführt. Kunstkopf und Messmikrofon waren im Abstand von 10 m und 40 m zur Streckenmitte auf 1,65 m Höhe positioniert.



**Bild 4.4-50:** Anordnung von Messmikrofonen, Kunstköpfen und Lichtschranken bei der konstanten Vorbeifahrtmessung



**Bild 4.4-51:** Anordnung der Messmikrofone, Kunstköpfe (rote Pfeile) bei der konstanten Vorbeifahrtmessung: 10 m und 40 m zur Streckenmitte auf 1,65 m Höhe



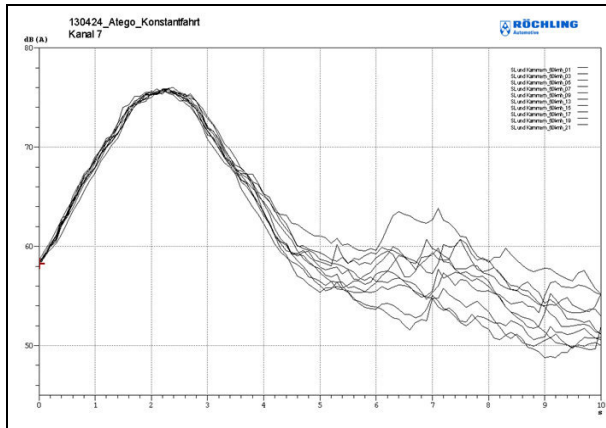
**Bild 4.4-52:** Anordnung der Lichtschranken im Abstand von 30 m vor der Messpunktlinie

Folgende Randbedingungen waren bei der Versuchsdurchführung festgelegt bzw. ermittelt worden:

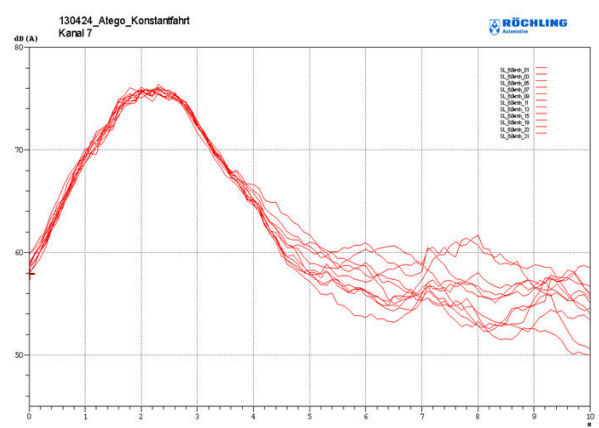
- Teststrecke: ATP Testcenter Papenburg, AKS Akustikstrecke Asphalt nach DIN ISO 362
- Messpunkte: Kunstkopf/Messmikrofon 40 m / 10 m von Fahrbahnmittle, 1,65 m Höhe
- Triggerung: Handtriggerung
- Betriebspunkte: Konstantfahrt mit 60 km/h
- Gangstufe 6: 62...58/ ca. 1300 U/min
- Durchführung: 25. April 2013
- Klimadaten:  $T_{\text{Umg}}$  16...19 °C /  $p_{\text{at}}$  1.024 mbar / Rel. F. 60...67% / Wind 0...3 m/s aus SW
- Messsystem: Müller-BBM PAK

Im Folgenden sind die A-bewerteten Schallpegelverläufe der Einzelmessungen, die daraus berechneten Mittelwerte sowie die Terzpegelverläufe dargestellt:

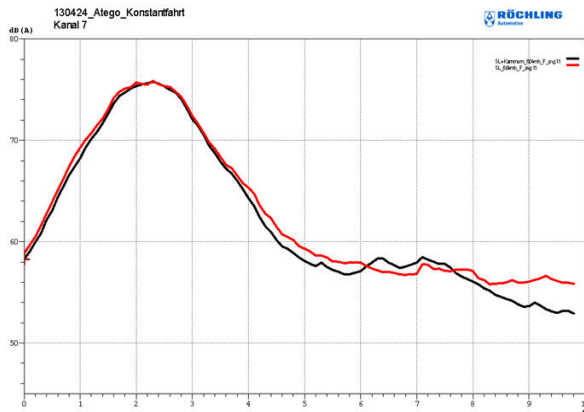
- für die linke Fahrzeugseite bei 10 m Mikrofonabstand (Bilder 4.4-53 bis 4.4-55 und 4.4-65)
- für die linke Fahrzeugseite bei 40 m Mikrofonabstand (Bilder 4.4-56 bis 4.4-58 und 4.4-66)
- für die rechte Fahrzeugseite bei 10 m Mikrofonabstand (Bilder 4.4-59 bis 4.4-61 und 4.4-67)
- für die rechte Fahrzeugseite bei 40 m Mikrofonabstand (Bilder 4.4-62 bis 4.4-64 und 4.4-68)



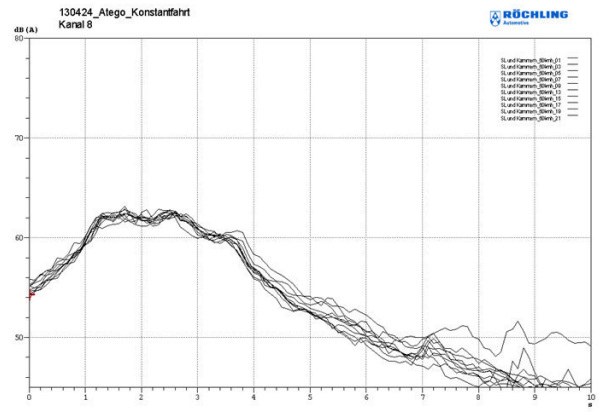
**Bild 4.4-53:** A-bewertete Pegelverläufe (Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, linke Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 10 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren



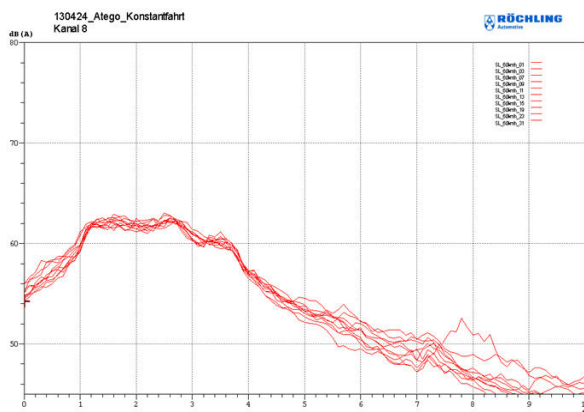
**Bild 4.4-54:** A-bewertete Pegelverläufe (Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, linke Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 10 m, absorbierende Unterbodenverkleidung ohne Resonatoren



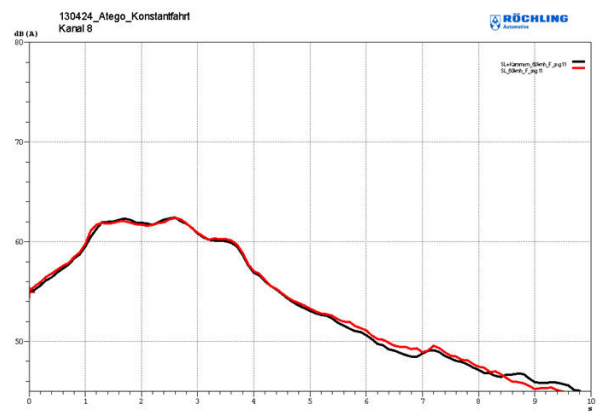
**Bild 4.4-55:** A-bewertete Pegelverläufe (Mittelwerte) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, linke Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 10 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren (schwarz) und ohne Resonatoren (rot)



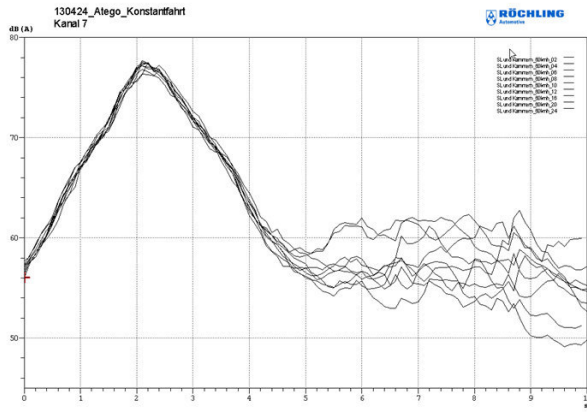
**Bild 4.4-56:** A-bewertete Pegelverläufe (Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, linke Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 40 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren



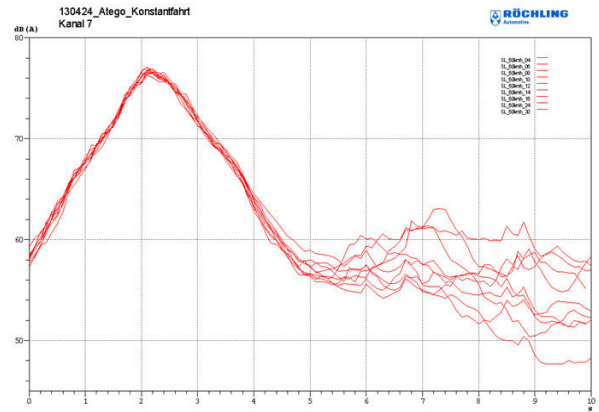
**Bild 4.4-57:** A-bewertete Pegelverläufe (Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, linke Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 40 m, absorbierende Unterbodenverkleidung ohne Resonatoren



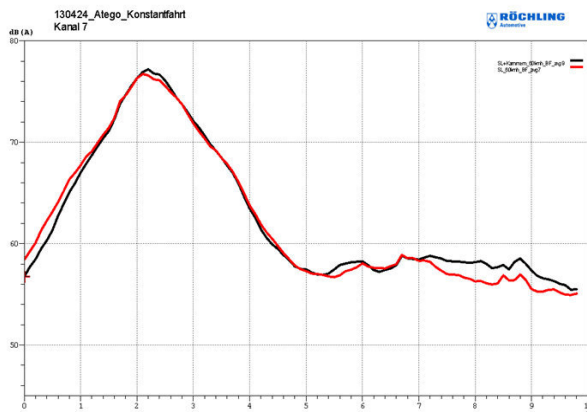
**Bild 4.4-58:** A-bewertete Pegelverläufe (Mittelwerte) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, linke Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 40 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren (schwarz) und ohne Resonatoren (rot)



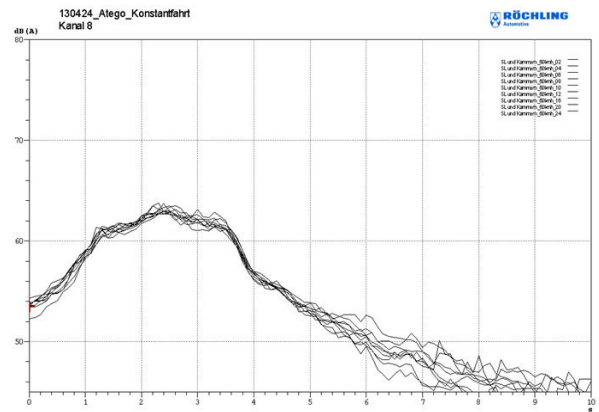
**Bild 4.4-59:** A-bewertete Pegelverläufe (Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, rechte Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 10 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren



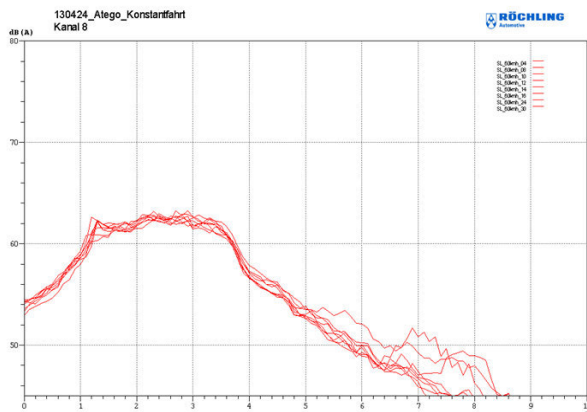
**Bild 4.4-60:** A-bewertete Pegelverläufe (Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, rechte Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 10 m, absorbierende Unterbodenverkleidung ohne Resonatoren



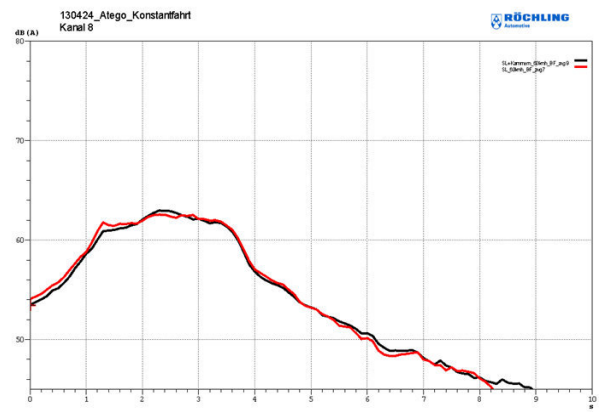
**Bild 4.4-61:** A-bewertete Pegelverläufe (Mittelwerte) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, rechte Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 10 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren (schwarz) und ohne Resonatoren (rot)



**Bild 4.4-62:** A-bewertete Pegelverläufe (Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, rechte Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 40 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren

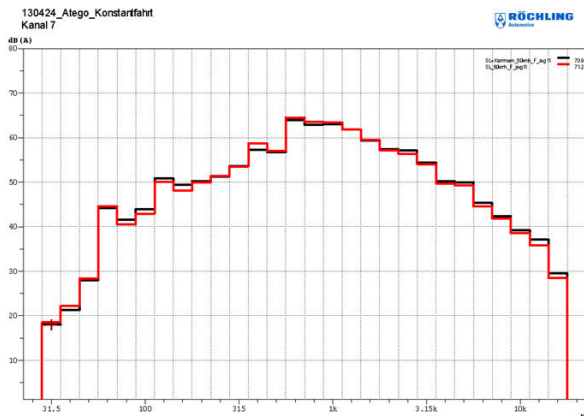


**Bild 4.4-63:** A-bewertete Pegelverläufe (Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, rechte Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 40 m, absorbierende Unterbodenverkleidung ohne Resonatoren

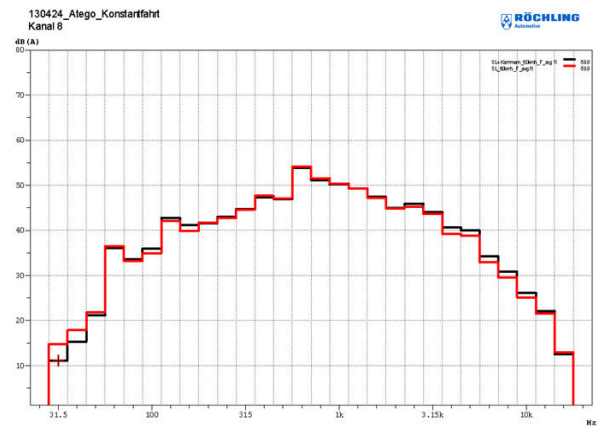


**Bild 4.4-64:** A-bewertete Pegelverläufe (Mittelwerte) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, rechte Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 40 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren (schwarz) und ohne Resonatoren (rot)

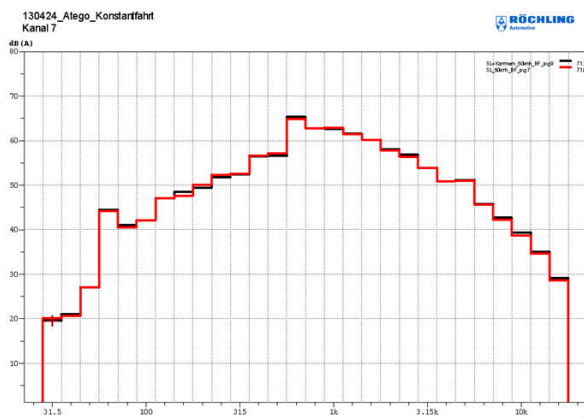




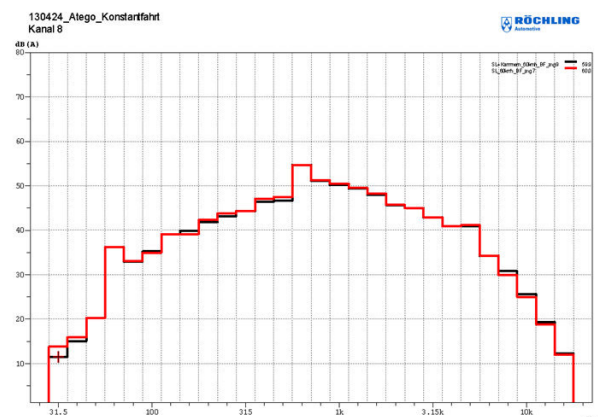
**Bild 4.4-65:** A-bewertete Terzpegelverläufe (Mittelwerte) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, linke Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 10 m, absorbierende Unterbodenverkleidung mit Resonatoren (schwarz) und ohne Resonatoren (rot)



**Bild 4.4-66:** A-bewertete Terzpegelverläufe (Mittelwerte aus den Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, linke Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 40 m, absorbierende UBV mit Resonatoren (schwarz) und ohne Resonatoren (rot)



**Bild 4.4-67:** A-bewertete Terzpegelverläufe (Mittelwerte aus den Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, rechte Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 10 m, absorbierende UBV mit Resonatoren (schwarz) und ohne Resonatoren (rot)



**Bild 4.4-68:** A-bewertete Terzpegelverläufe (Mittelwerte aus den Einzelmessungen) der konstanten Vorbeifahrt mit 60 km/h, rechte Fahrzeugseite, Mikrofonabstand 40 m, absorbierende UBV mit Resonatoren (schwarz) und ohne Resonatoren (rot)

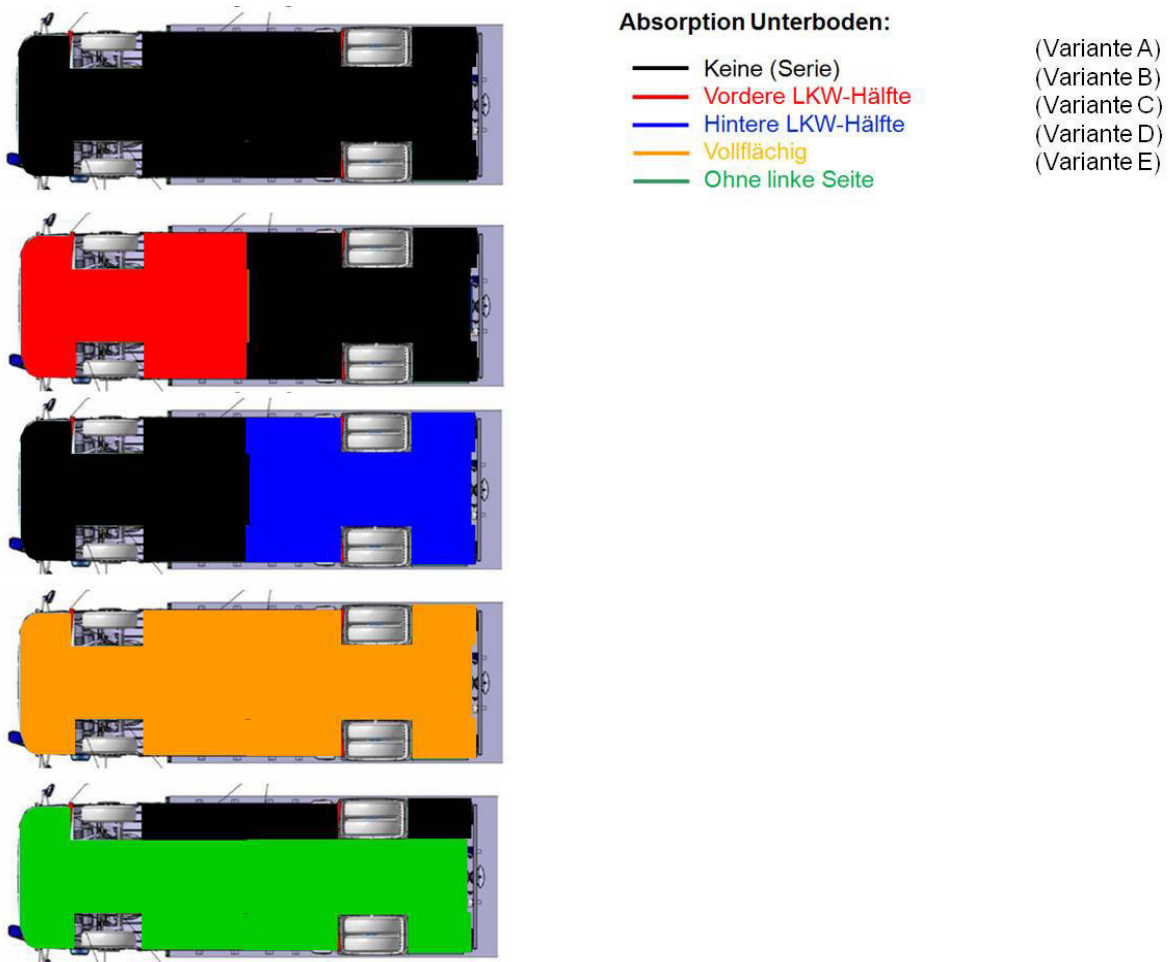
Wie schon in den vorangegangenen Untersuchungen mit Resonatoren hat sich auch bei der Abstimmung auf die 1 kHz keine Verbesserung im Vorbeifahrtgeräusch eingestellt. Dies, obwohl die Verbesserung im Schallabsorptionsgrad um die 1 kHz erheblich war und obwohl bei dieser Untersuchung damit auch auf das dominierende Reifen-Fahrbahn-Spektrum sehr gut abgestimmt war. Somit kann man endgültig eine Maßnahme zur Verbesserung der tieffrequenten Schallabsorption bzw. eine Maßnahme zur selektiven Frequenzabstimmung einer absorbierenden Unterbodenverkleidung als nicht zielführend bezeichnen.

#### 4.4.6 Vorbeifahrtpegel am Klein-Lkw bei konstanter Geschwindigkeit bei Variation der Belegung mit absorbierendem Unterboden

Im Weiteren wurde in ersten Untersuchungen der Frage nachgegangen, welche Auswirkung eine topologische Variation der Verkleidung auf die Vorbeifahrtpegel hat. Hierzu wurde der Klein-Lkw (Daimler Atego) mit den in Bild 4.4-69 skizzierten Belegungsvarianten versehen und damit jeweils der Vorbeifahrtpegel bei konstanter Vorbeifahrt ermittelt.

Folgende Varianten wurden untersucht:

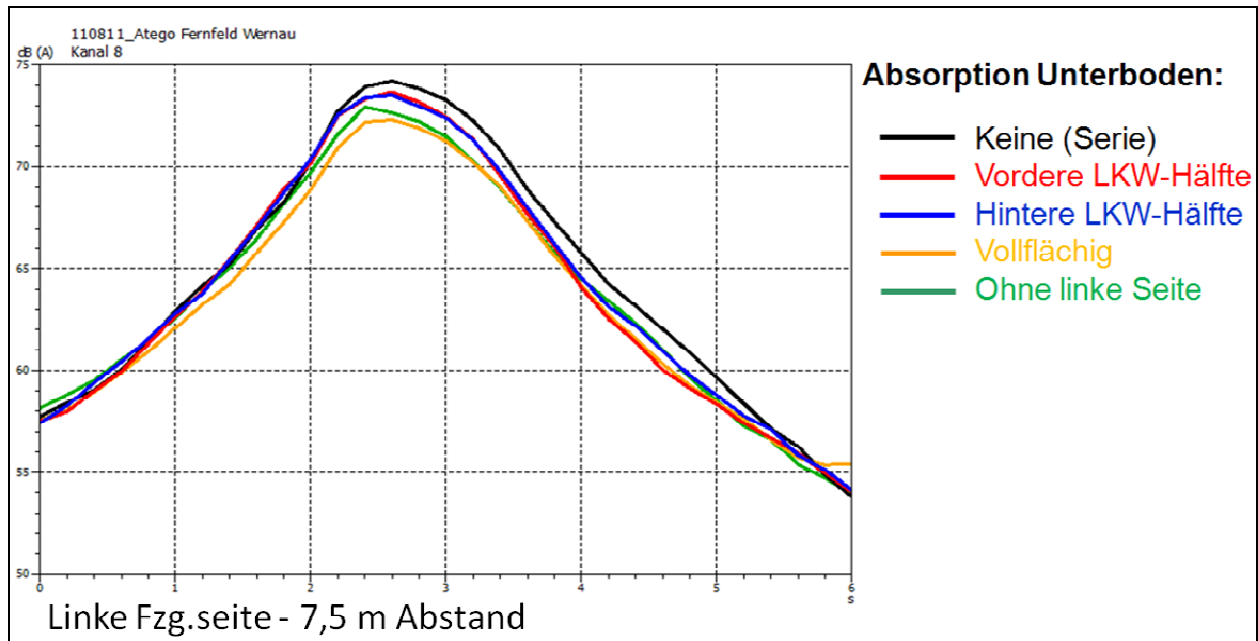
- (A) Keine absorbierende Unterbodenverkleidung
- (B) Verkleidung der vorderen Lkw-Hälfte
- (C) Verkleidung der hinteren Lkw-Hälfte
- (D) Vollflächige Verkleidung mit absorbierender UVB
- (E) Vollverkleidung mit Aussparung der linken Fahrzeugseite



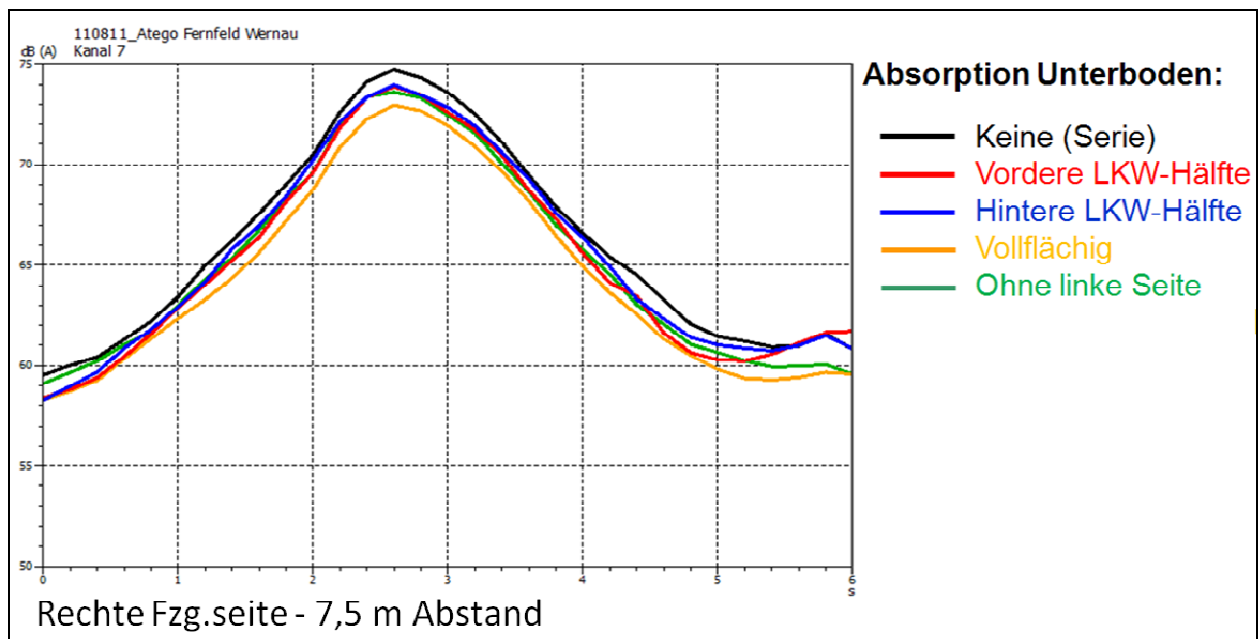
**Bild 4.4-69:** Belegungsvarianten mit absorbierendem LWRT-Material

Die Bilder 4.4-70 bis 4.4-73 zeigen die gemessene Pegelreduktion bei den Messabständen 7,5 m und 10 m. Bemerkenswert ist die Tatsache, dass bei der konstanten Vorbeifahrt offenbar vor allem der Anteil der belegten Fläche entscheidend ist und weniger die Position der absorbierenden Verkleidung. Sowohl die vordere als auch die hintere Teilbelegung führen zu etwa der gleichen Pegelerhöhung von etwa 1 dB. Auch bei der Fernfeldmessung mit 50 m Mikrofonabstand (Bild 4.4-74) ist zwischen der hinteren und vorderen Belegung kaum ein Unterschied in der Wirksamkeit zu erkennen.

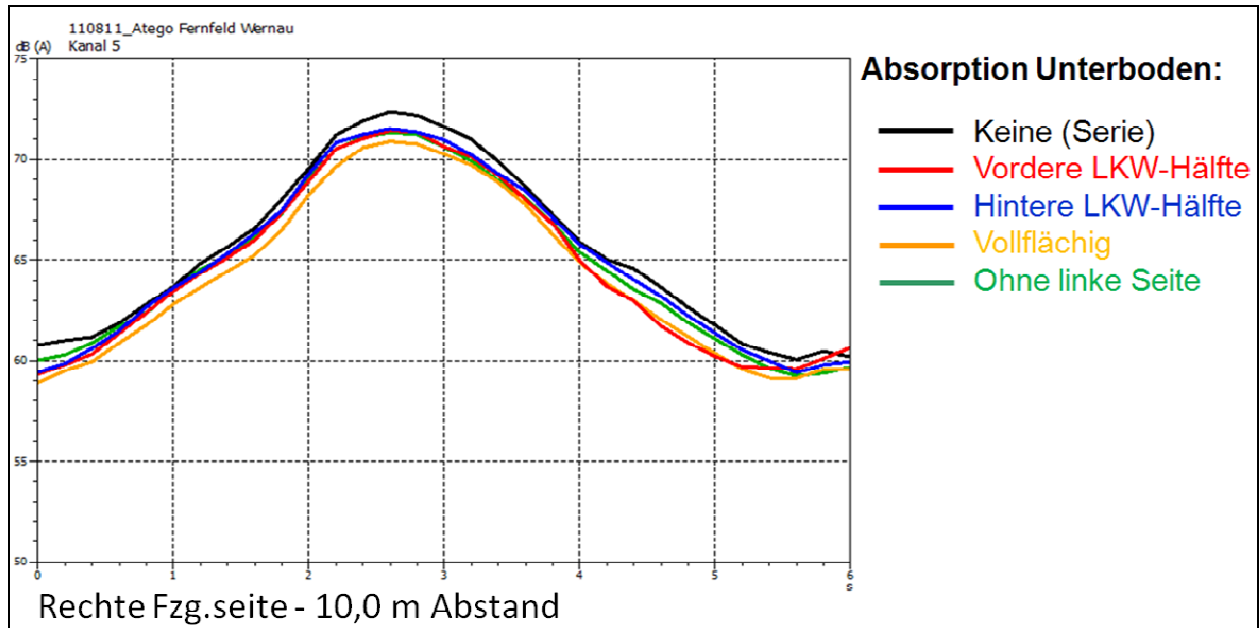
Bei der Wegnahme einer Teilfläche auf der linken Fahrzeugseite ist der Effekt der Pegelerhöhung in etwa der gleichen Größenordnung.



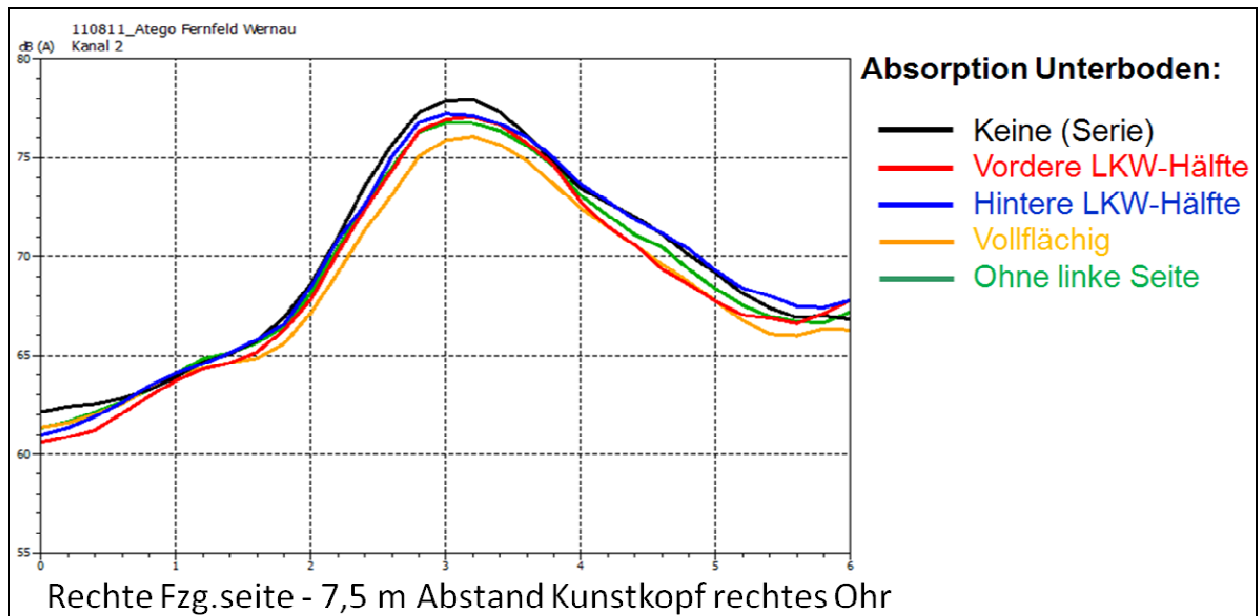
**Bild 4.4-70:** Schallpegel der beschleunigten Vorbeifahrt bei verschiedenen Belegungsvarianten der absorbierenden Unterbodenverkleidung (Mikrofonposition linke Fahrzeugseite 7,5 m von Fahrzeugmitte)



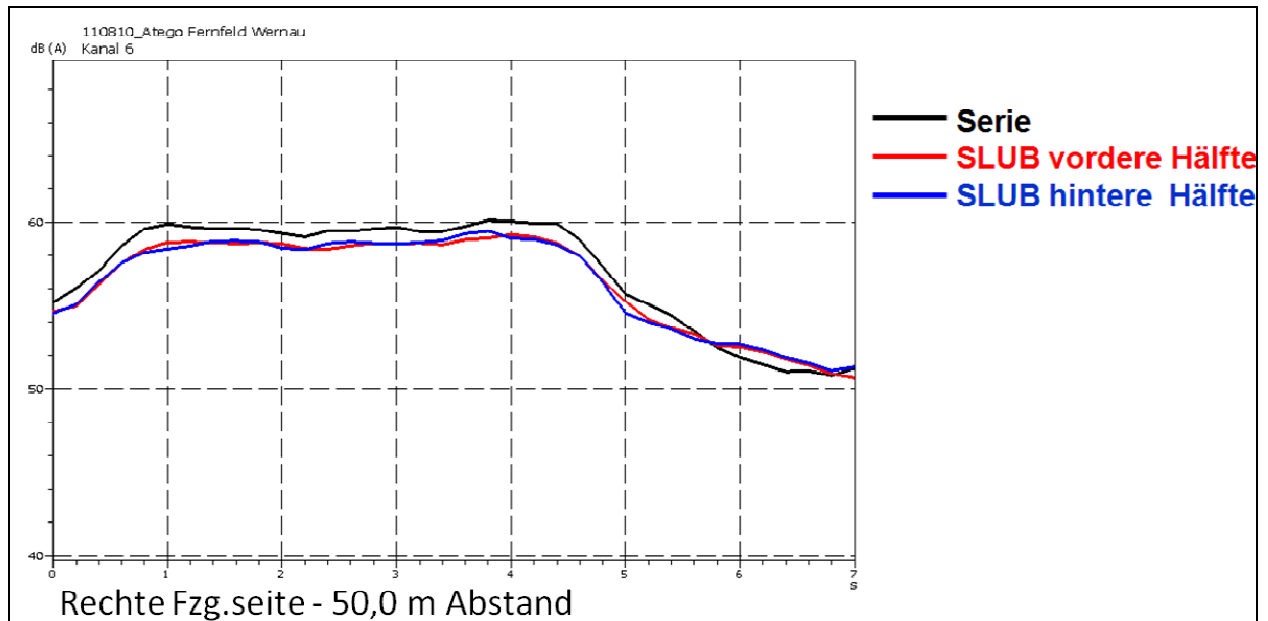
**Bild 4.4-71:** Schallpegel der beschleunigten Vorbeifahrt bei verschiedenen Belegungsvarianten der absorbierenden Unterbodenverkleidung (Mikrofonposition rechte Fahrzeugseite 7,5 m von Fahrzeugmitte)



**Bild 4.4-72:** Schallpegel der beschleunigten Vorbeifahrt bei verschiedenen Belegungsvarianten der absorbierenden Unterbodenverkleidung (Mikrofonposition rechte Fahrzeugseite 10 m von Fahrzeugmitte)



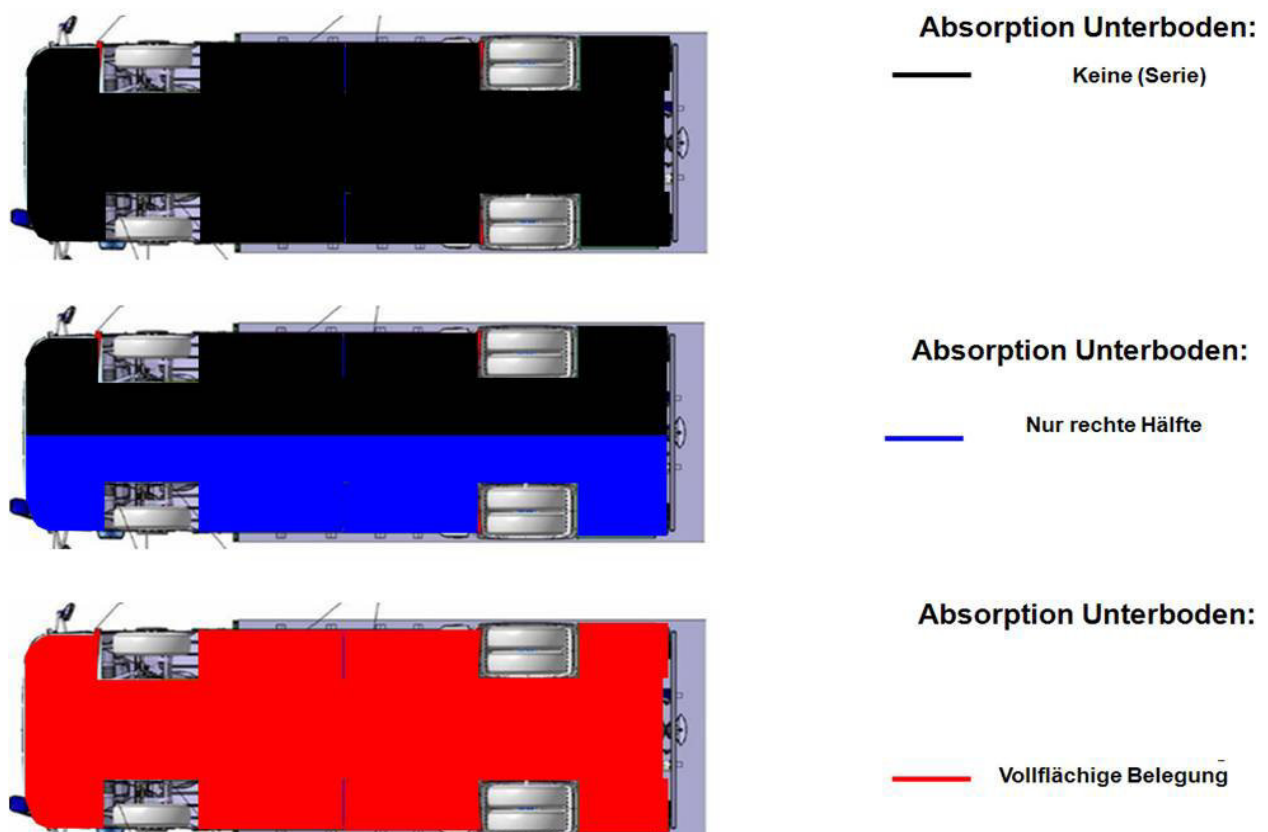
**Bild 4.4-73:** Schallpegel der beschleunigten Vorbeifahrt bei verschiedenen Belegungsvarianten der absorbierenden Unterbodenverkleidung (Kunstkopfposition rechte Fahrzeugseite 7,5 m von Fahrzeugmitte)



**Bild 4.4-74:** Schallpegel der beschleunigten Vorbeifahrt bei verschiedenen Belegungsvarianten der absorbierenden Unterbodenverkleidung (Mikrofonposition rechte Fahrzeugseite 50 m von Fahrzeugmitte)

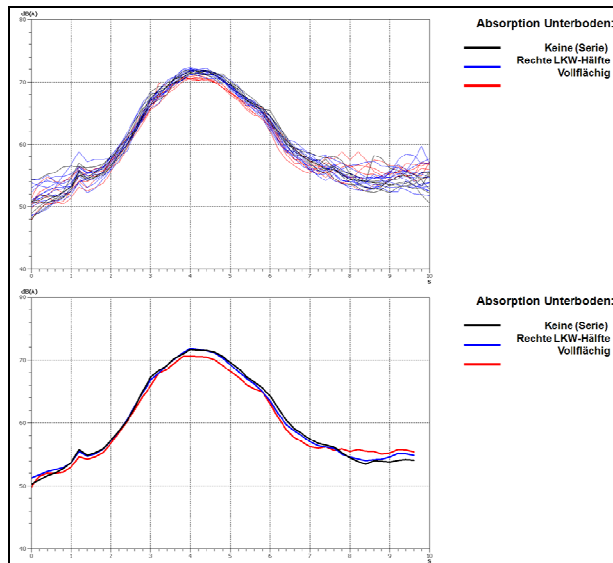
Bei der Wegnahme einer Teilfläche auf der linken Fahrzeugseite war der Effekt der Pegelerhöhung gegenüber der vollverkleideten Version in etwa in der gleichen Größenordnung wie bei nur vorderer oder nur hinterer Verkleidung, allerdings nur bei Wegnahme auf der dem Mikrofon abgewandten Seite. Bei der Entfernung der Unterbodenverkleidungen auf der Mikrofonseite war kaum eine Pegelminderung festzustellen.

Um den Effekt der seitlichen Teilfläche noch näher zu untersuchen, wurde eine weitere Vergleichsmessung durchgeführt. Diesmal mit einem in der Mittelachse halbierten Unterboden, wieder im Vergleich zu einer Vollbelegung und einem unverkleideten Fahrzeug (Bild 4.4-75).

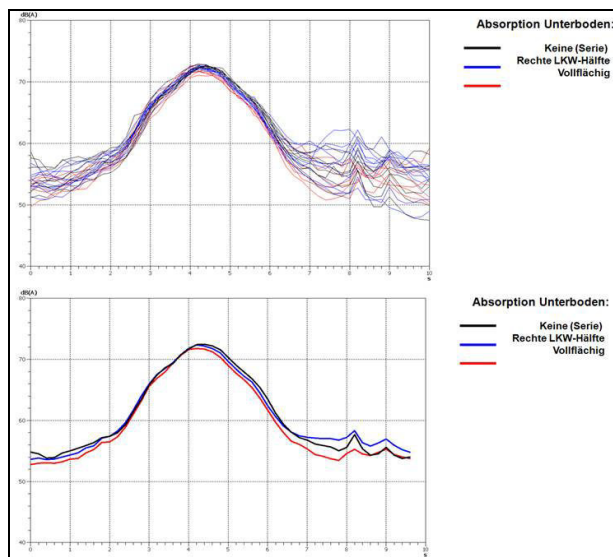


**Bild 4.4-75:** Belegungsvarianten der absorbierenden Unterbodenverkleidung mit längs halbiertem Unterboden

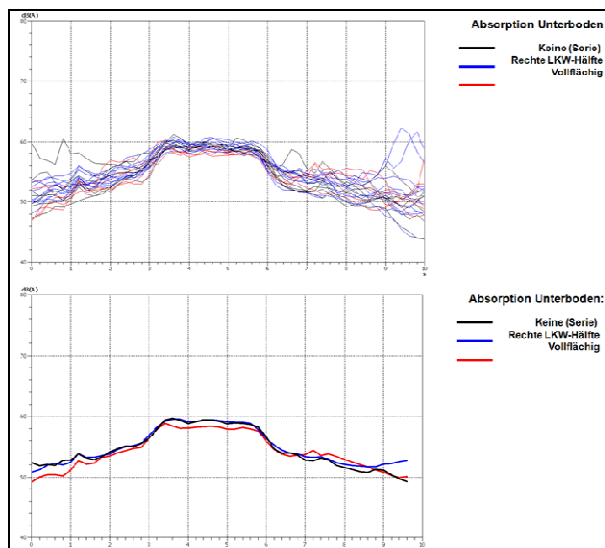
Die Ergebnisse der Vorbeifahrtmessung bei Mikrofonabständen 10 und 50 m jeweils links und rechts vom Fahrzeug und einer konstanten Geschwindigkeit von 60 km/h zeigen die Bilder 4.4-76 bis 4.4-79.



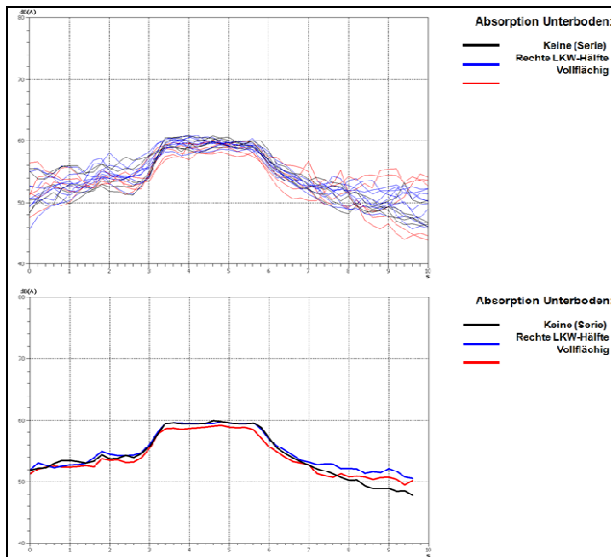
**Bild 4.4-76:** Linke Fzg.seite - Messpunkt 10 m Abstand (oben Einzelmessungen, unten daraus berechnete Mittelwertkurven)



**Bild 4.4-77:** Rechte Fzg.seite - Messpunkt 10 m Abstand (oben Einzelmessungen, unten daraus berechnete Mittelwertkurven)



**Bild 4.4-78:** Linke Fzg.seite - Messpunkt 50 m Abstand (oben Einzelmessungen, unten daraus berechnete Mittelwertkurven)



**Bild 4.4-79:** Rechte Fzg.seite - Messpunkt 50 m Abstand (oben Einzelmessungen, unten daraus berechnete Mittelwertkurven)

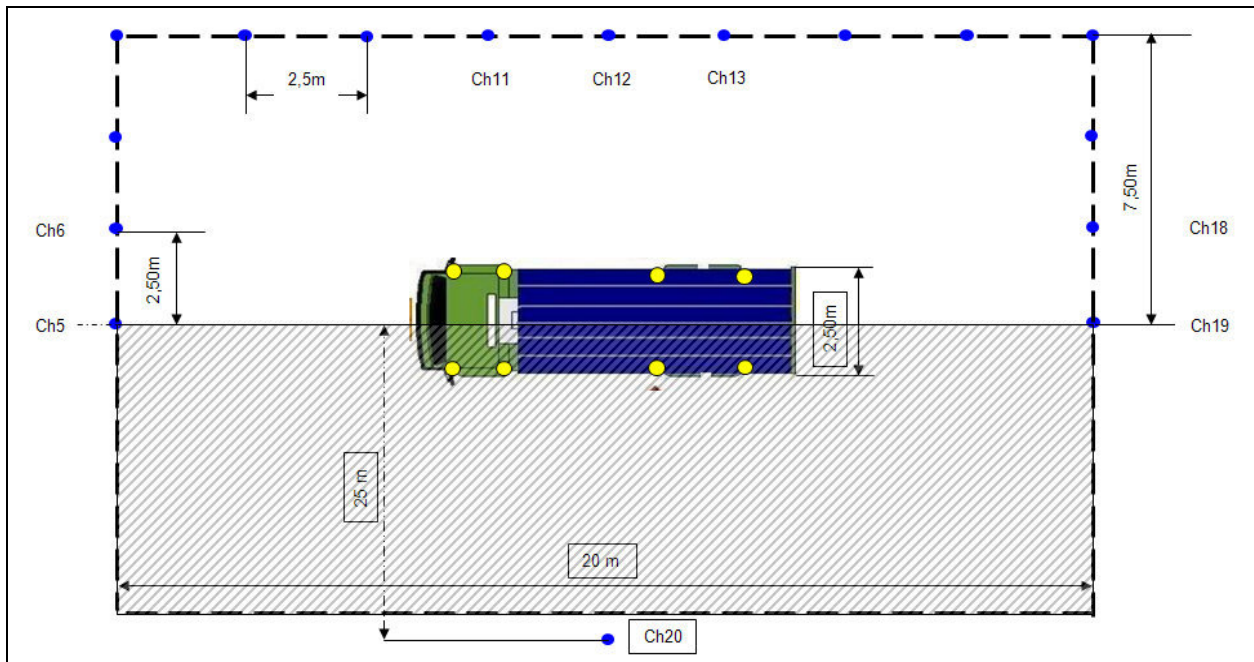
Bei dem Mikrofon im Abstand von 10 m ergab sich folgende Situation: Während die Unterbodenbelegung auf der dem Mikrofon abgewandten Seite so gut wie keine Verbesserung zu dem nicht verkleideten Zustand zur Folge hat, führt die Teilbelegung auf der dem Mikrofon zugewandten Seite zu einer leichten Verbesserung, die in etwa der Hälfte der Verbesserung entspricht, die man mit dem vollflächig verkleideten Unterboden ermitteln konnte. Dies allerdings nur im Zeitabschnitt des sich entfernenden Fahrzeugs.

Sehr interessant ist die Tatsache, dass sich bei dem Mikrofon im Abstand von 50 m eine Verbesserung nur bei vollflächiger Belegung zeigt. Die Teilbelegung führt zu keiner Verbesserung im A-bewerteten Schallpegel, egal, auf welcher Seite gemessen wird.

#### 4.4.7 Transferpfaduntersuchungen zur Schallübertragung von den Reifen zu Mikrofonen seitlich, vor und hinter einem Kleinlastwagen (Daimler Atego)

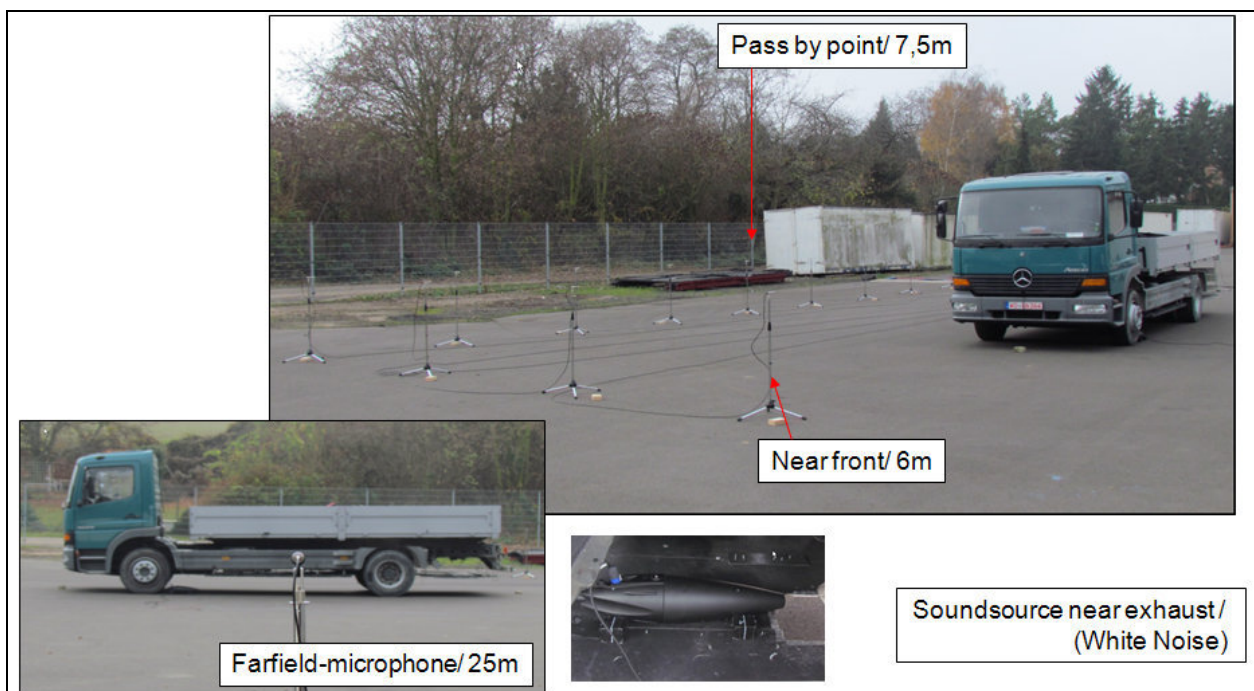
Die folgenden Untersuchungen zeigen die akustischen Auswirkungen einer schallabsorbierenden Unterbodenverkleidung auf den Pegel im Umfeld des Lastwagens.

Hierzu wurden 9 Mikrofone im Abstand von 7,5 m rechts zur Fahrzeugmitte aufgestellt; zueinander jeweils in einen Abstand von 2,5 m. Jeweils weitere 3 Mikrofone standen auf einer Linie (in einem Abstand von ca. 6 m) vor und hinter dem Fahrzeug sowie schließlich ein Mikrofon in 25 m Abstand zur Fahrzeugmitte auf der linken Seite. Als Schallquelle wurde in den Zwischenraum zwischen Reifen und Fahrbahn (8 Positionen) eine Kugelschallquelle mit weißem Rauschen positioniert und jeweils das empfangene Schallsignal an den Mikrofonen simultan gemessen. Bild 4.4-80 zeigt schematisch die Anordnung. Diese Messungen wurden einmal mit absorbierendem Unterboden und einmal ohne diesen durchgeführt.



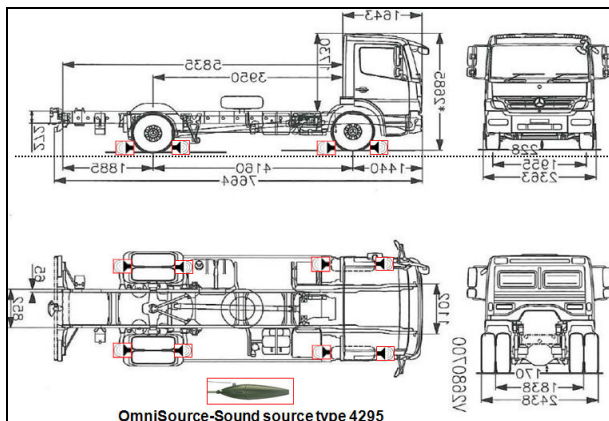
**Bild 4.4-80:** Position der Quelle (gelb) und der Mikrofone (blau) für die Transferpfadanalyse

Die Messungen wurden auf einem Freigelände durchgeführt. Bild 4.4-81 zeigt die aufgestellten Mikrofone sowie die Schallquelle, Bild 4.4-82 die Abmessungen des Fahrzeugs sowie die Orientierung der Schallquelle.



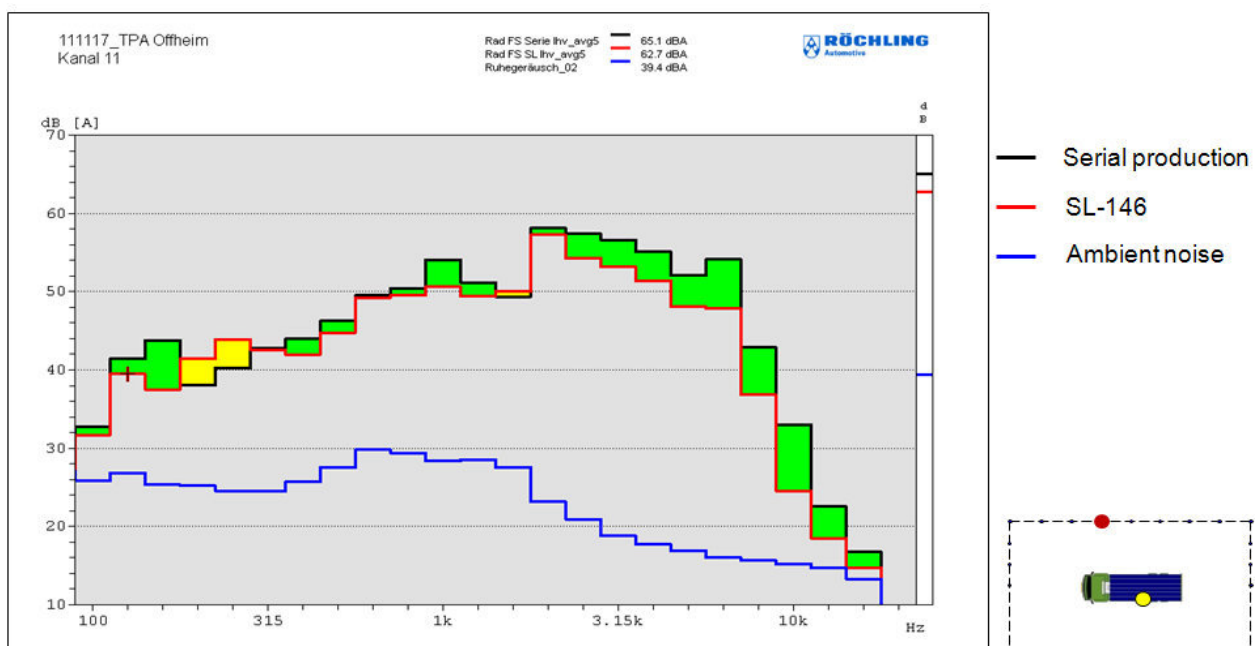
**Bild 4.4-81:** Anordnung der Mikrofone





**Bild 4.4-82:** Abmessungen des Fahrzeugs und Orientierung der Quelle

Bild 4.4-83 zeigt als Beispiel die an Mikrofon 11 gemessenen Terzpegelspektren, wobei die Quelle am Reifen links hinten auf der vorderen Seite angebracht war. Bei der roten Kurve war das Fahrzeug mit dem absorbierenden Unterboden ausgestattet, bei der schwarzen Kurve war der Unterboden entfernt. Der Vergleich zeigt, dass sich durch die absorbierende Platte unter dem Fahrzeug weitgehend eine Verbesserung (grün) einstellt. Nur an wenigen Frequenzen ist eine Verschlechterung (gelb) zu erkennen.

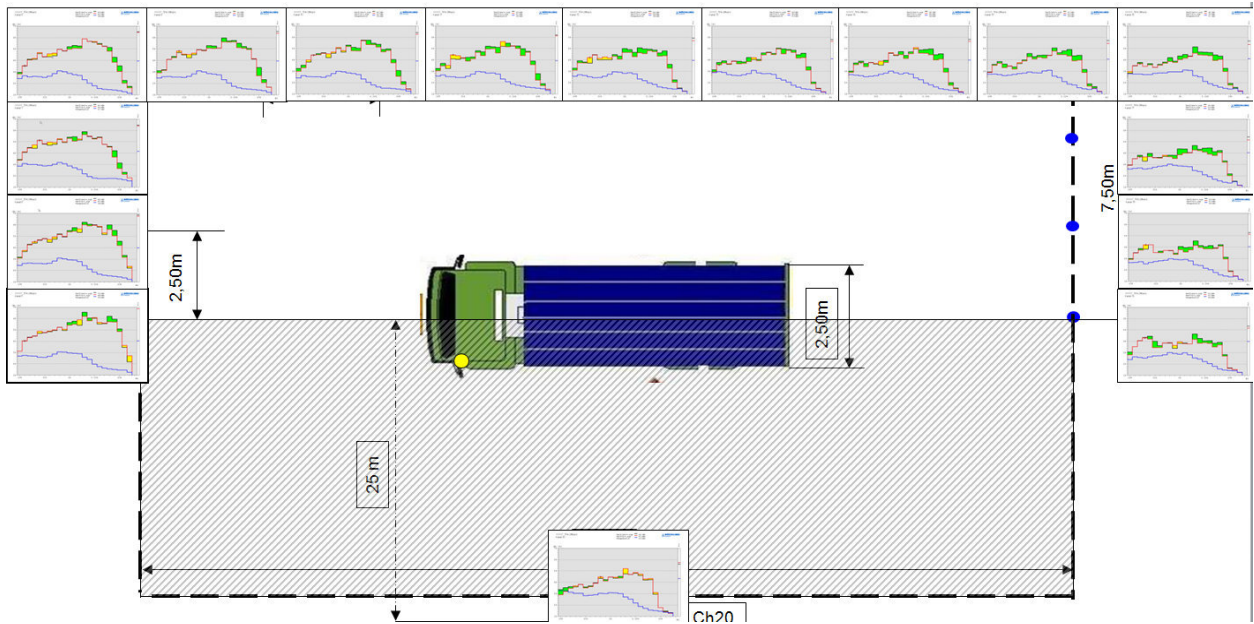


**Bild 4.4-83:** Beispiel Quelle Reifen links hinten vorne Mikrofon Kanal 11

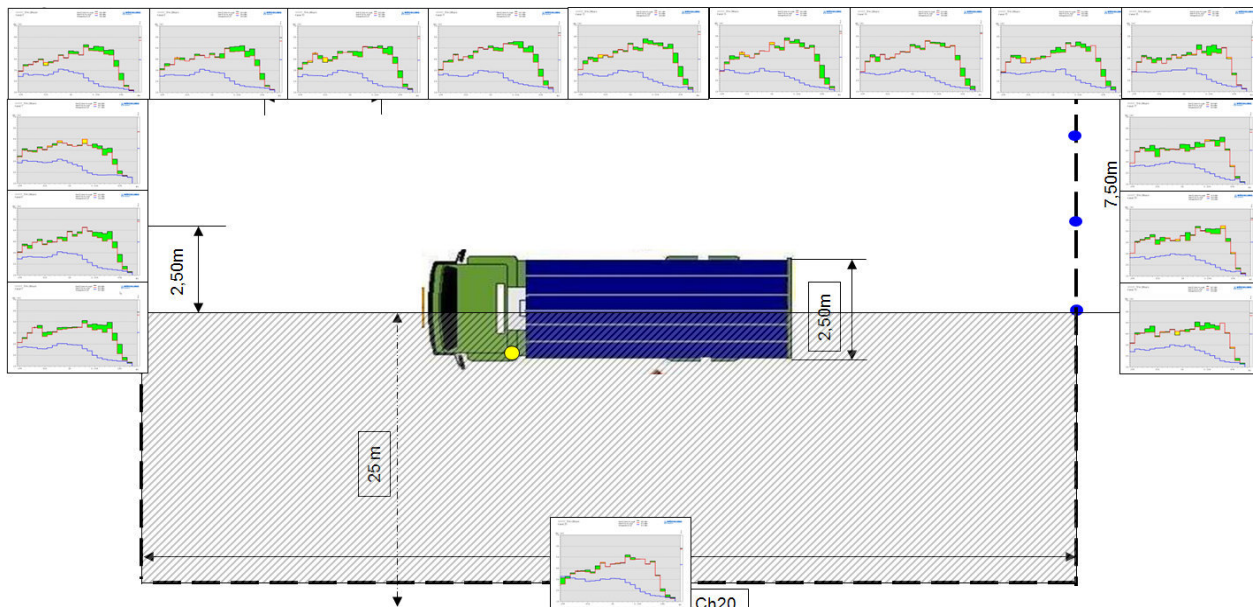
Rote Kurve mit absorbierendem Unterboden  
Schwarze Kurve ohne absorbierendem Unterboden  
Grün: Verbesserung Gelb: Verschlechterung

Die folgenden Diagramme (Bilder 4.4-84 bis 4.4-91) zeigen in einer Übersichtsdarstellung die Pegelminderung an den einzelnen Mikrofonen, hervorgerufen durch die Quelle an den beschriebenen Positionen. Hierbei lassen sich folgende Tendenzen erkennen:

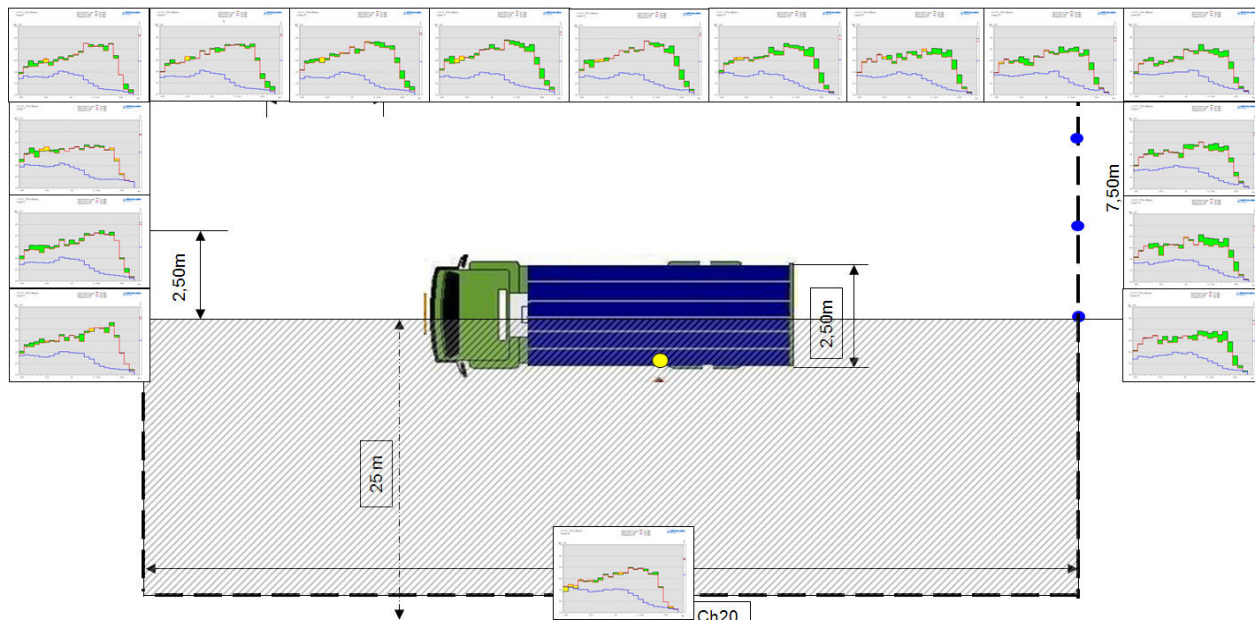
- Die größten Pegelminderungen ergeben sich, wenn die Quelle zwischen Vorder- und Hinterachse angebracht ist, dies insbesondere,
  - wenn sich die Quelle auf der anderen Fahrzeugseite befindet als das Mikrofon und
  - wenn sich zwischen Quelle und Mikrofon ein Reifen befindet.
- Verschlechterungen findet man, wenn der Lautsprecher direkt auf das Mikrofon strahlt, also bei den hinteren Mikrofonen, wenn der Lautsprecher hinter den Hinterreifen positioniert ist bzw. bei den vorderen Mikrofonen, wenn der Lautsprecher von den Vorderreifen positioniert ist. Diese Verschlechterung ergibt sich jedoch nur im oberen Frequenzbereich von etwa 4000 und 10000 Hz.



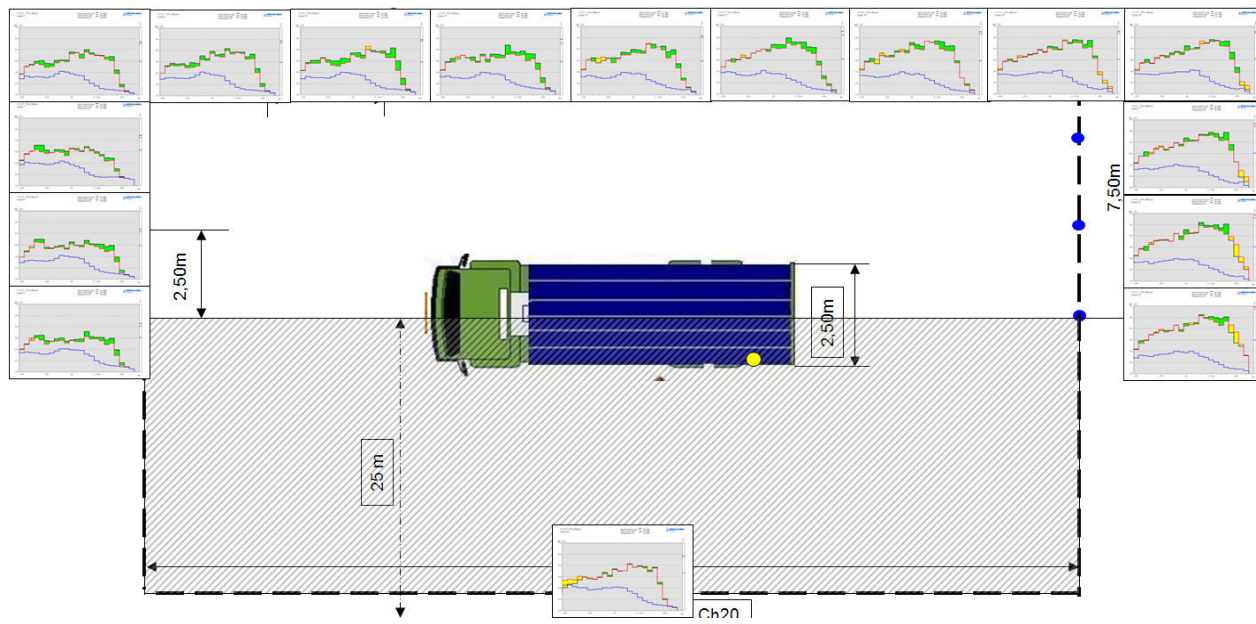
**Bild 4.4-84:** Quelle Reifen links vorne vorne



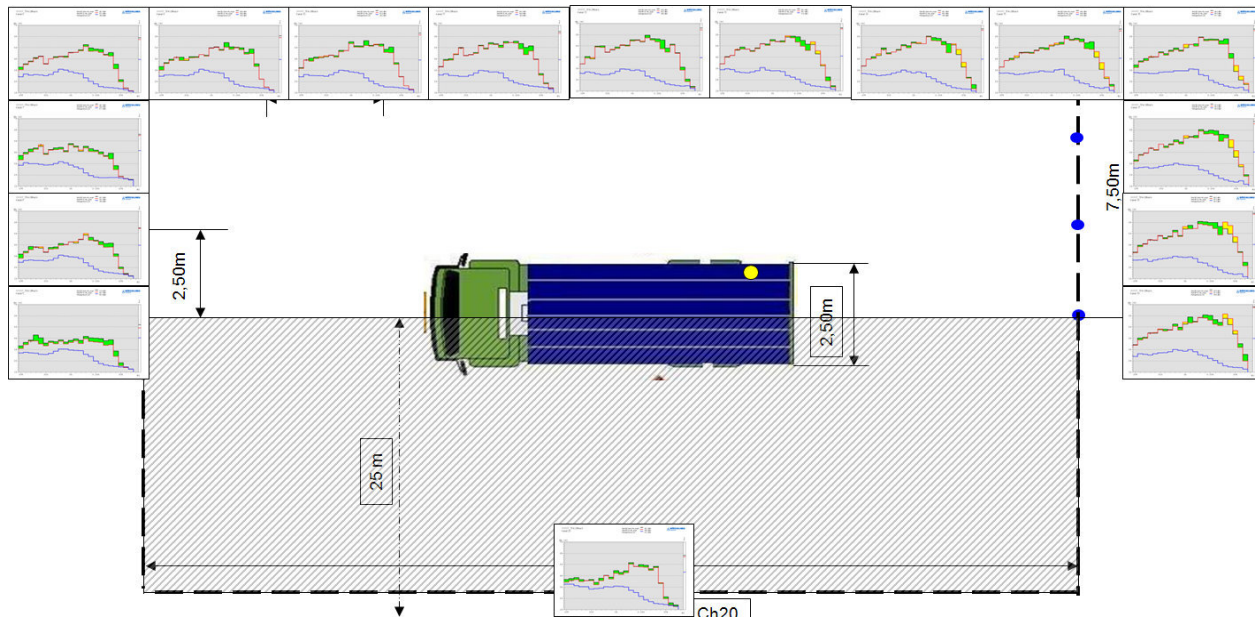
**Bild 4.4-85:** Quelle Reifen vorne links hinten



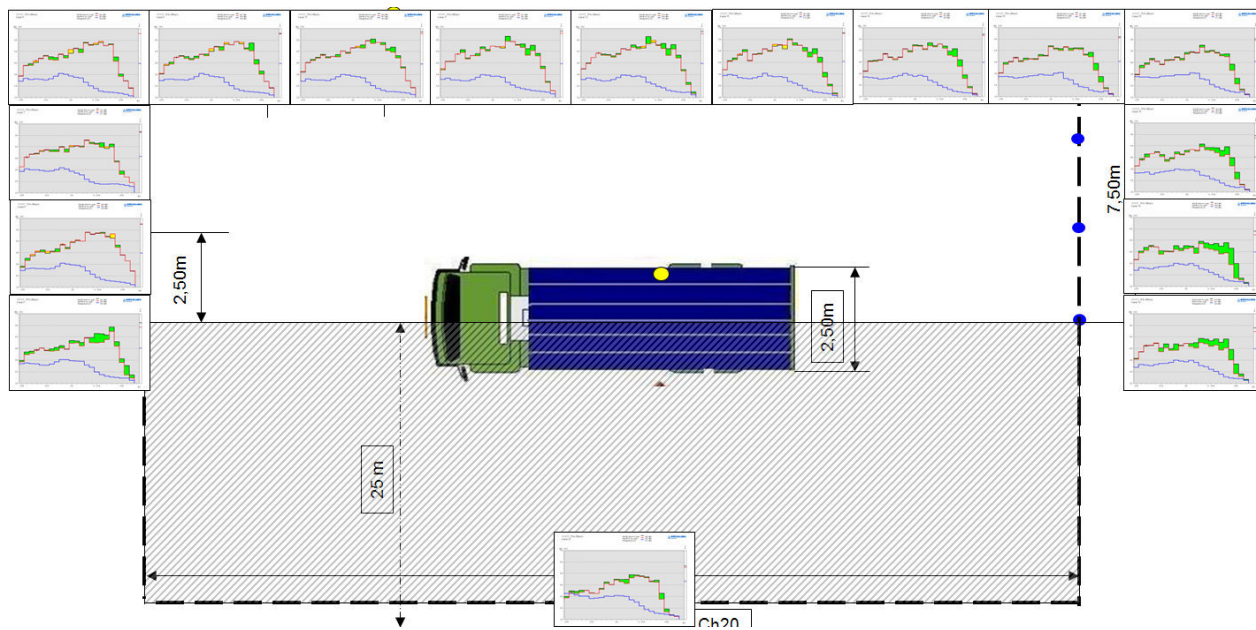
**Bild 4.4-86:** Quelle Reifen links hinten vorne



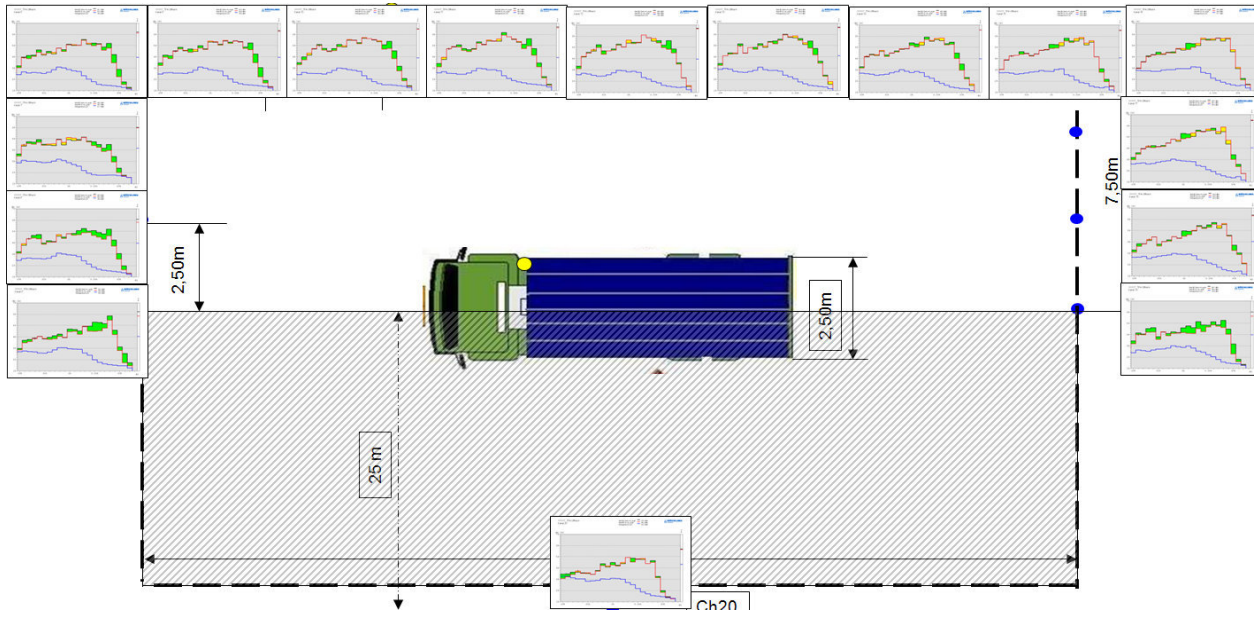
**Bild 4.4-87:** Quelle Reifen links hinten hinten



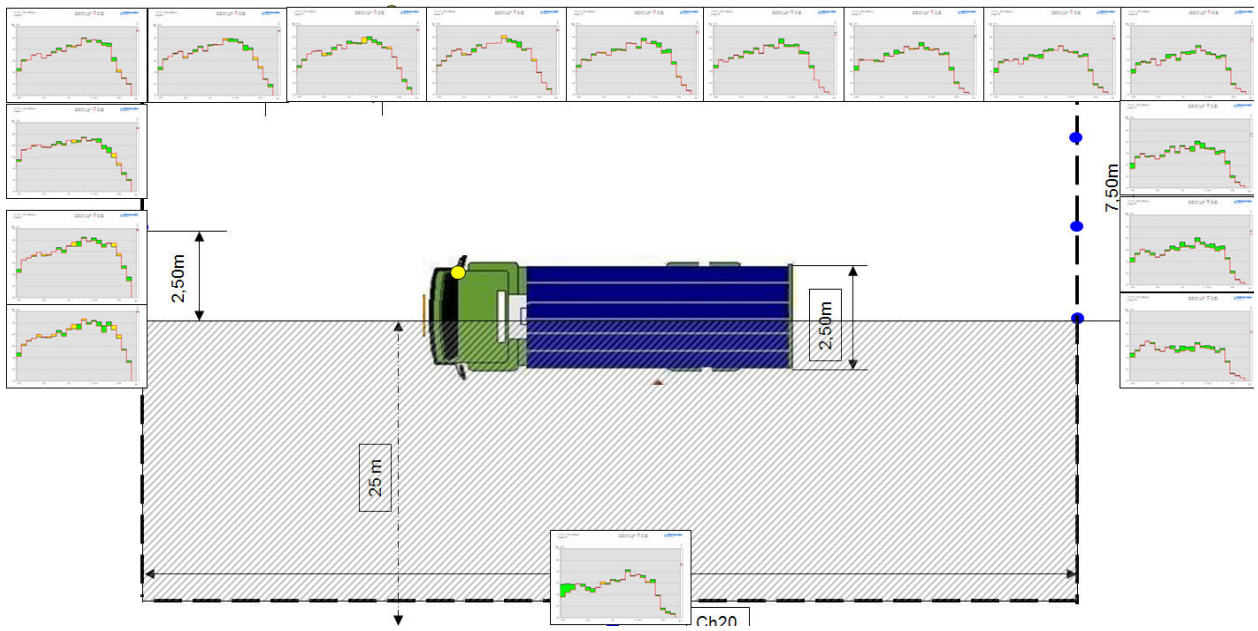
**Bild 4.4-88:** Quelle Reifen rechts hinten hinten



**Bild 4.4-89:** Quelle Reifen rechts hinten vorne



**Bild 4.4-90:** Quelle Reifen rechts vorne hinten



**Bild 4.4-91:** Quelle Reifen rechts vorne vorne

#### 4.4.8 Akustische Untersuchungen Transporter

Nachdem die Untersuchungen am kleinen Lkw (Daimler ATEGO) mit vollflächigem absorbierendem Unterboden und mit absorbierendem Unterboden verschiedener Belegung weitgehend abgeschlossen war, wurde nun der Fokus auf die Wirksamkeit bei den Transportern gesetzt. Hierzu wurde ein Daimler Sprinter mit zul. Gesamtmasse von 3.500 kg, einer Nennleistung von 120 kW / 163 PS sowie einer max. Zuladung von ca. 1.500 kg beschafft und dieser mit einer vollflächigen, ca. 7 m<sup>2</sup> großen Verkleidung aus absorbierendem Plattenmaterial mit 6,5 mm Sandwichdicke (Länge x Breite ca. 6,1 m x 1,7 m) verkleidet (Bilder 4.4-92 und 4.4-93).

Mangels vorhandener Befestigungsmöglichkeiten wurden Aluminium-Profile und -Winkel an das Fahrzeug montiert und an diese die Verkleidung mit Kabelbindern befestigt. Die Höhe der absorbierenden Sandwichplatte über der Straße betrug ca. 25 cm (Bild 4.4-94).



Bild 4.4-92: Versuchsfahrzeug

- Typ: Daimler Sprinter
- zul. Gesamtmasse: 3.500 kg
- Nennleistung: 120 kW / 163 PS
- Zuladung: ca. 1.500 kg



Bild 4.4-93: Prototyp des absorbierenden Unterbodens

- Material: Platten  
SL2-146/ 6,5mm
- Gesamtfläche: ca. 7 m<sup>2</sup>
- Länge x Breite: ca. 6,1m x 1,7m



Front



Heck

- Abhängung über Kabelbinder
- Verstärkungen mit Aluminium-Profilen, siehe unten
- Höhe über der Fahrbahn ca. 25 cm



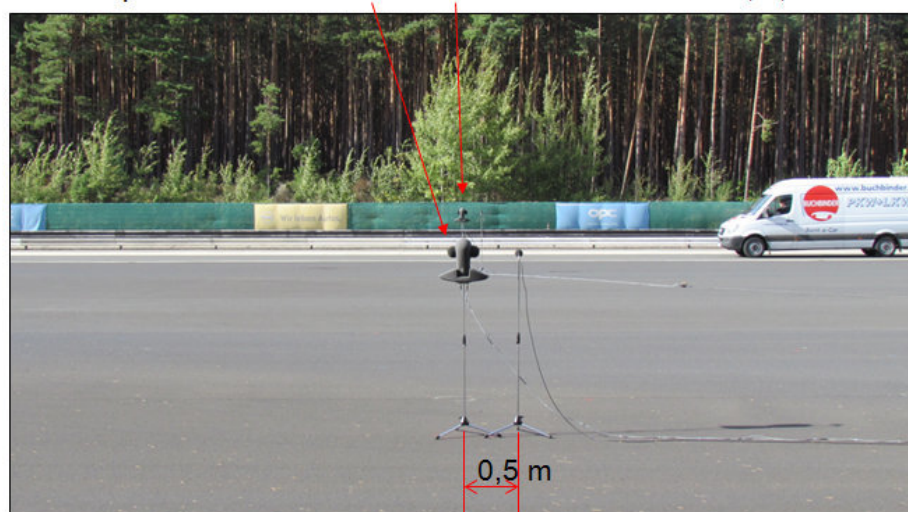
**Bild 4.4-94:** Anbau des absorbierenden Unterbodens an das Fahrzeug

Mit diesem Fahrzeug wurden sowohl konstante als auch beschleunigte Vorbeifahrten durchgeführt und die Schallsignale mit Mikrofonen bzw. mit dem Kunstkopf aufgezeichnet.

### Konstante Vorbeifahrt

Gemessen wurde auf dem Adam Opel GmbH-TestCenter Dudenhofen auf der Performancestrecke mit ISO-Asphalt. Die Messpunkte waren Kunstkopf und Mikrophon 40 m und 10 m von Fahrbahnmitte entfernt, jeweils in 1,65 m Höhe. Die Triggerung für Start-Stopp erfolgte mittels Lichtschranke 50 m vor und nach der Messpunktlinie. Das Lichtschrankensignal wurde telemetrisch übertragen (Bild 4.4-95).

- Teststrecke: Adam Opel GmbH-Test Center Dudenhofen , Performancestrecke, ISO-Asphalt
- Messpunkte: Kunstkopf/Messmikrophon 40m / 10m von Fahrbahnmitte, 1,65m Höhe

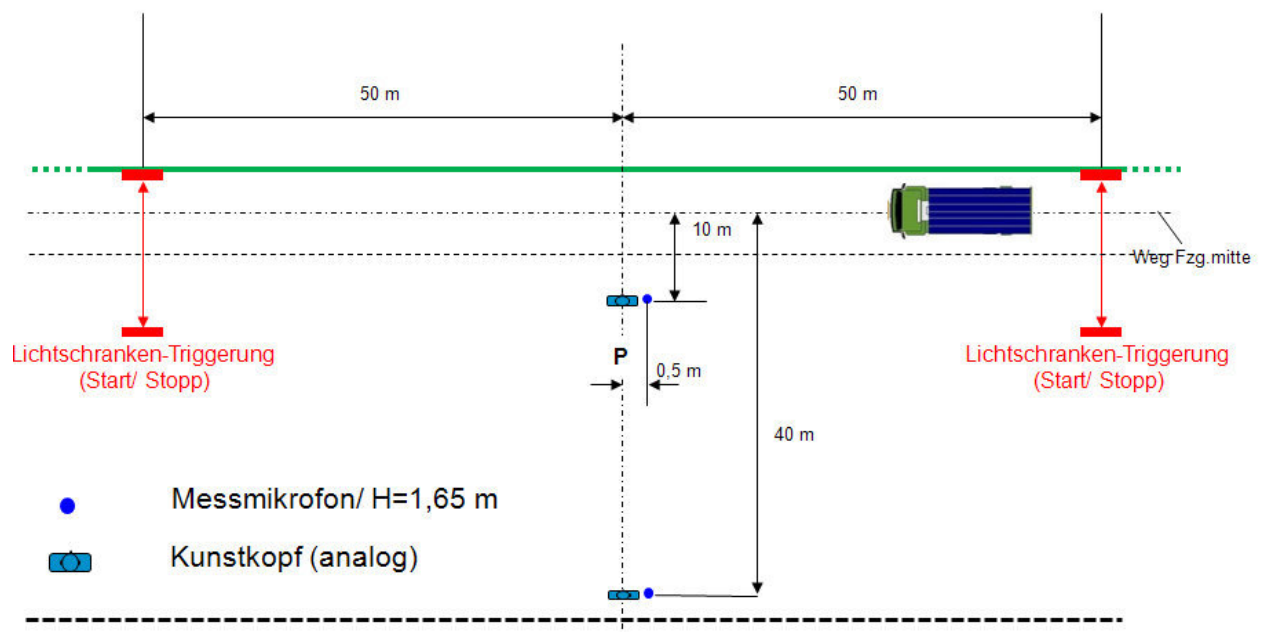


- **Triggerung:** Lichtschranke 50m vor und nach der Messpunktlinie für Start-Stopp, telemetrische Signalübertragung



**Bild 4.4-95:** Messbedingungen Konstantfahrt 60 km/h

Bild 4.4-96 zeigt die verwendeten Positionen in einer schematischen Darstellung.



**Bild 4.4-96:** Schematische Darstellung der Messbedingungen

Die folgenden Diagramme zeigen die A-bewerteten Vorbeifahrtpegel an den Mikrofonpositionen 10 m und 40 m jeweils auf der Fahrerseite (Bilder 4.4-97 und 4.4-98) sowie auf der Beifahrerseite (Bilder 4.4-99 und 4.4-100) gemessen. Ausgehend vom Punkt des Maximalpegels dieser A-Pegelverläufe wurde ein Zeitintervall von 2 Sekunden ausgewählt und in Terzbändern frequenzanalysiert (siehe Bilder 4.4-101/4.4-102/4.4-103 für die Fahrerseite und Bilder 4.4-104/4.4-105/4.4-106 für die Beifahrerseite). Die zugehörigen Terzpegelverläufe zeigen jeweils eine deutliche und weitgehend konstante Verbesserung von ca. 2 - 3 dB im Frequenzbereich oberhalb 200 Hz für die Variante mit der absorbierenden Platte. Diese Verbesserung fällt auf der Beifahrerseite tendenziell noch etwas besser aus als auf der Fahrerseite. Insbesondere unterhalb von 100 Hz zeigt die Fahrerseite sogar eine leichte Verschlechterung. Im Gesamtpegel bilden sich diese Verbesserungen ebenfalls mit etwa 2 - 3 dB ab.



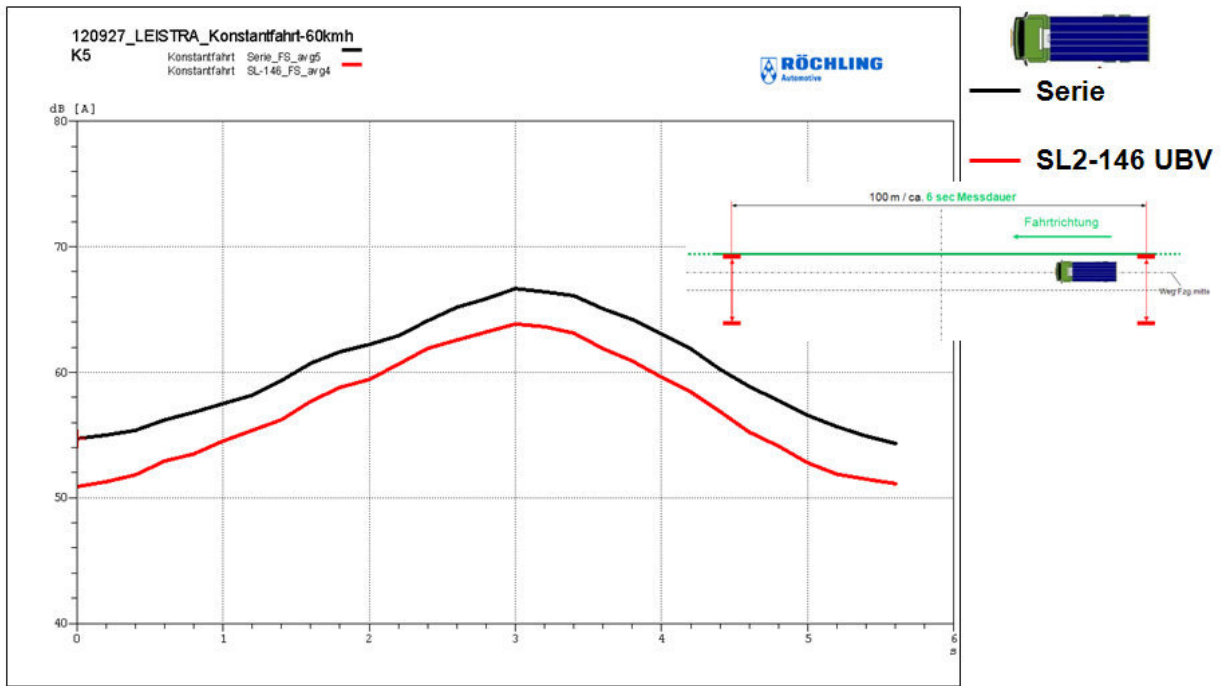


Bild 4.4-97: Messpunkt 10 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite, Vorbeifahrtpegel

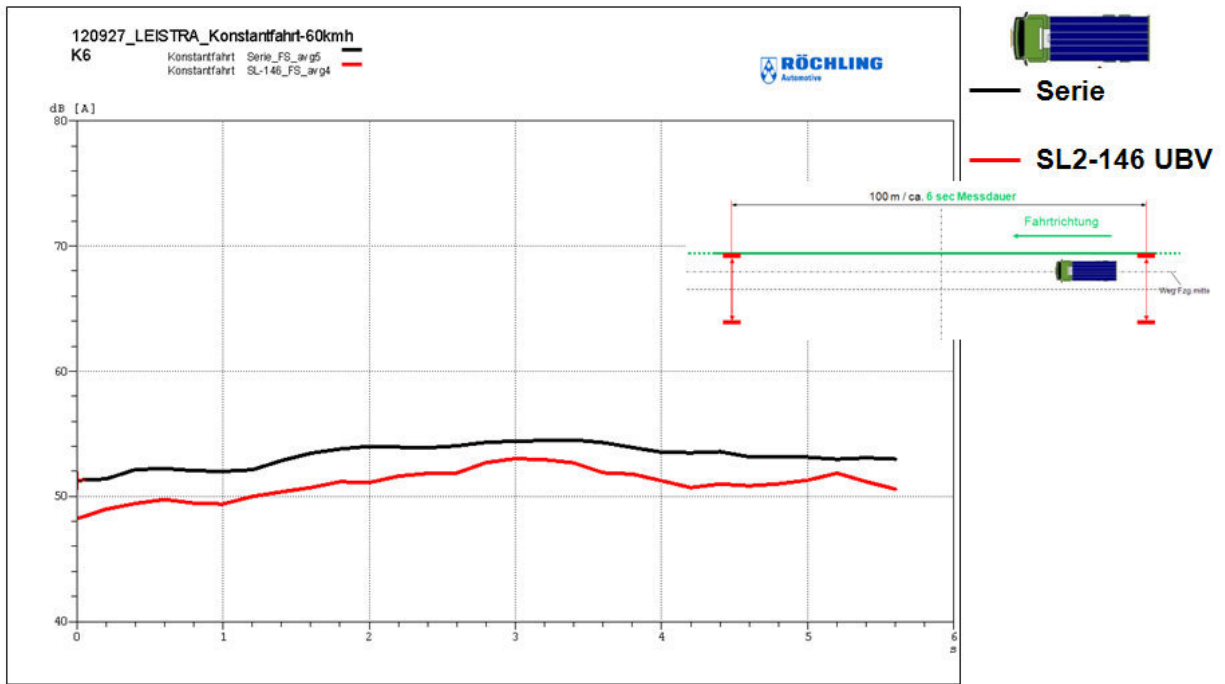
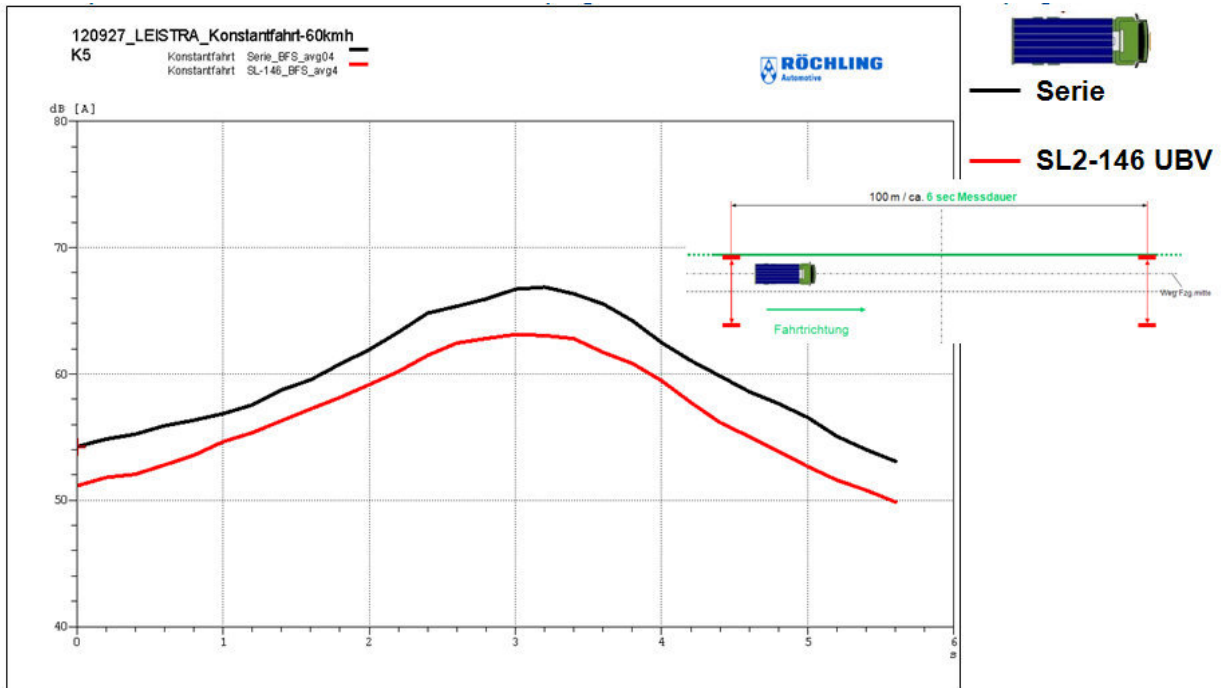
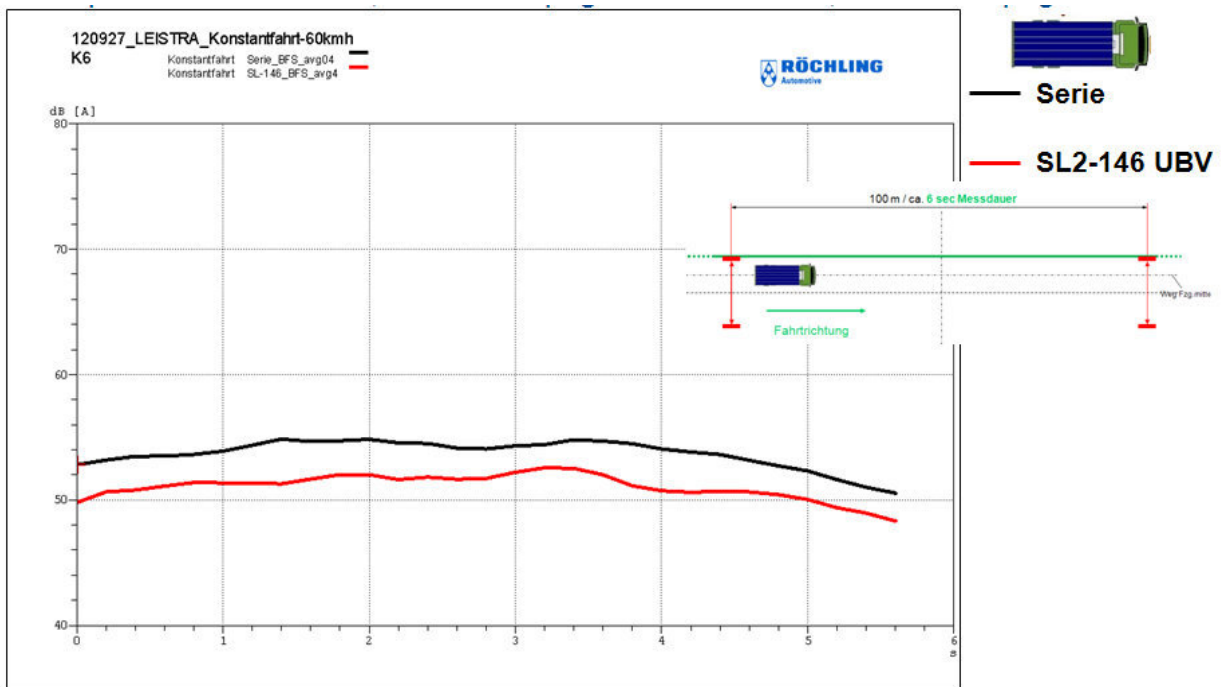


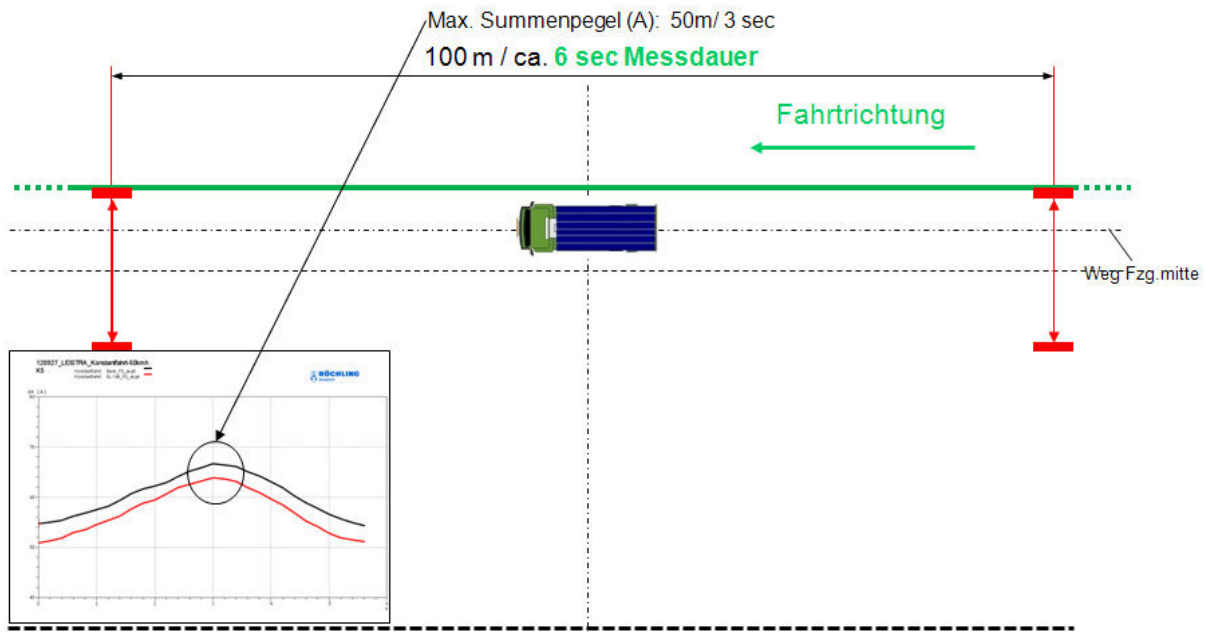
Bild 4.4-98: Messpunkt 40 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite, Vorbeifahrtpegel



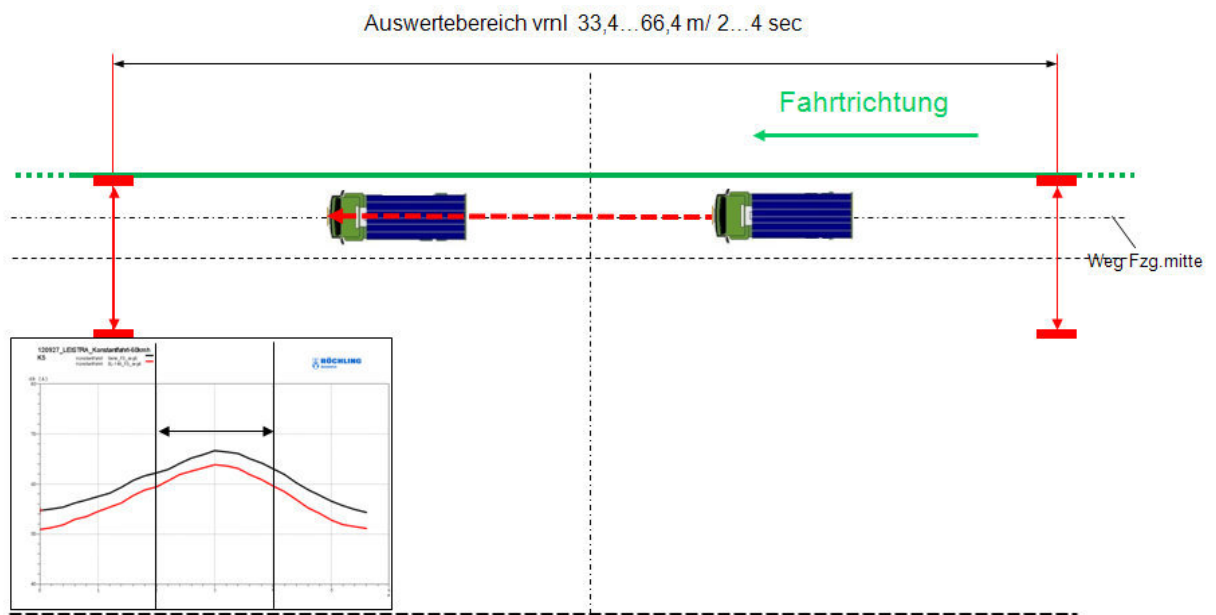
**Bild 4.4-99:** Messpunkt 10 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Beifahrerseite, Vorbeifahrtpegel



**Bild 4.4-100:** Messpunkt 40 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Beifahrerseite, Vorbeifahrtpegel



**Bild 4.4-101:** Intervallmittelpunkt für Terzpegelanalyse Messpunkt 10 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite



**Bild 4.4-102:** Auswertebereich für Terzpegelanalyse Messpunkt 10 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite

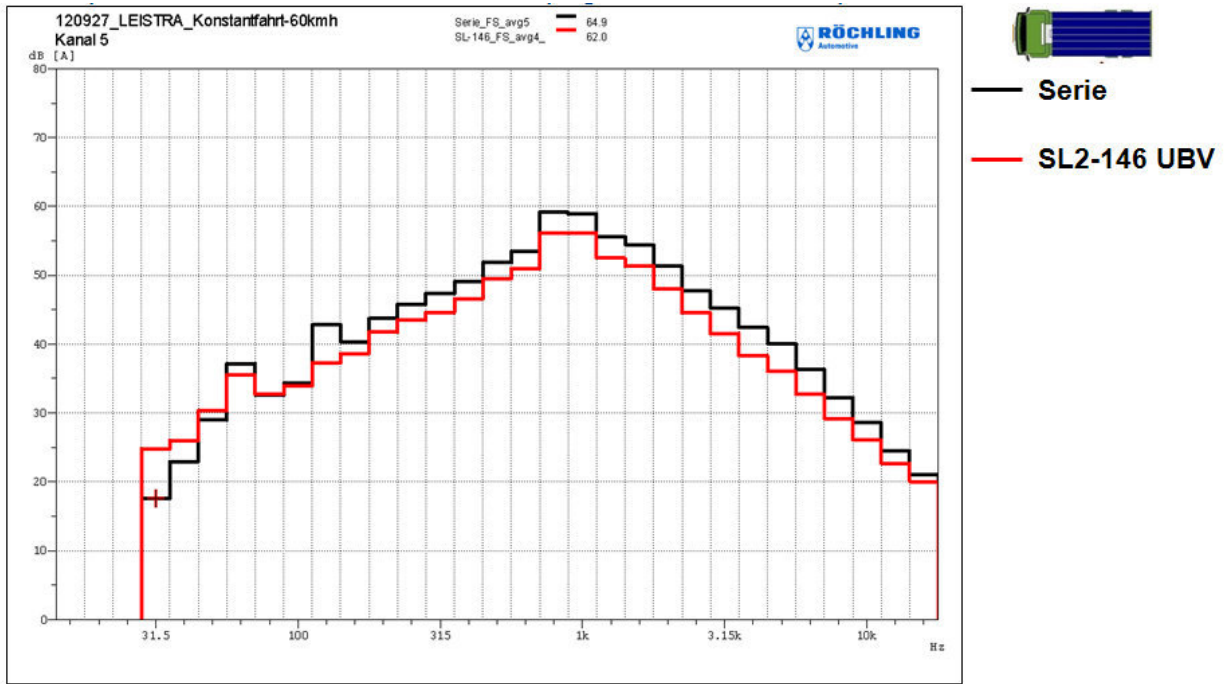


Bild 4.4-103: Terzpegelanalyse Messpunkt 10 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite

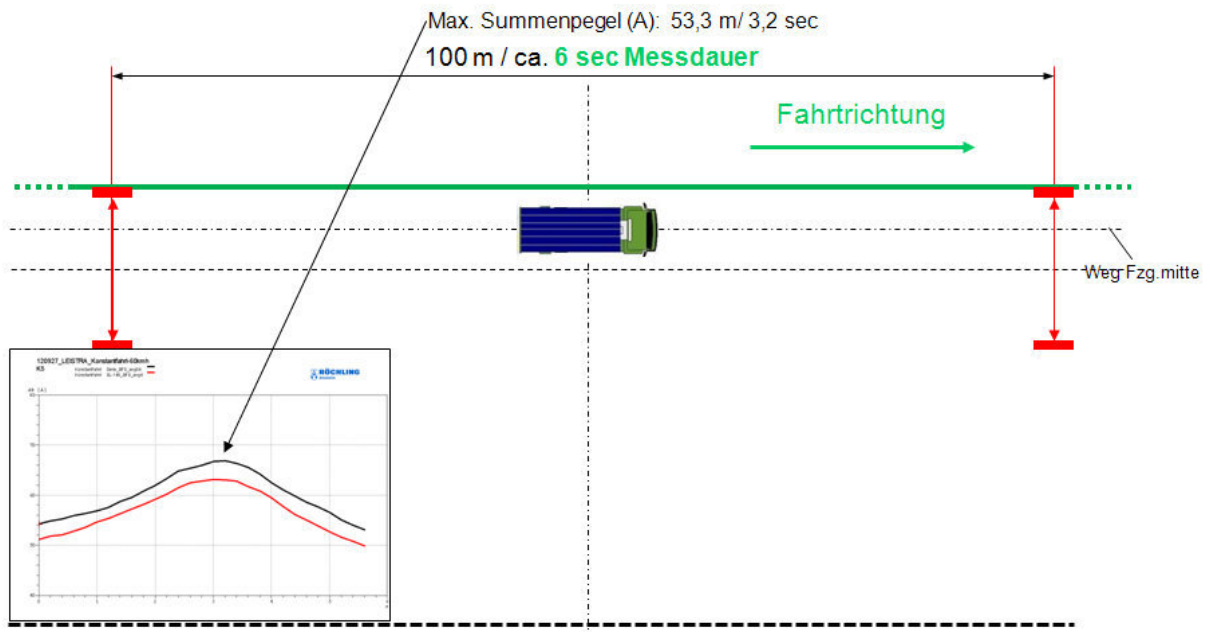
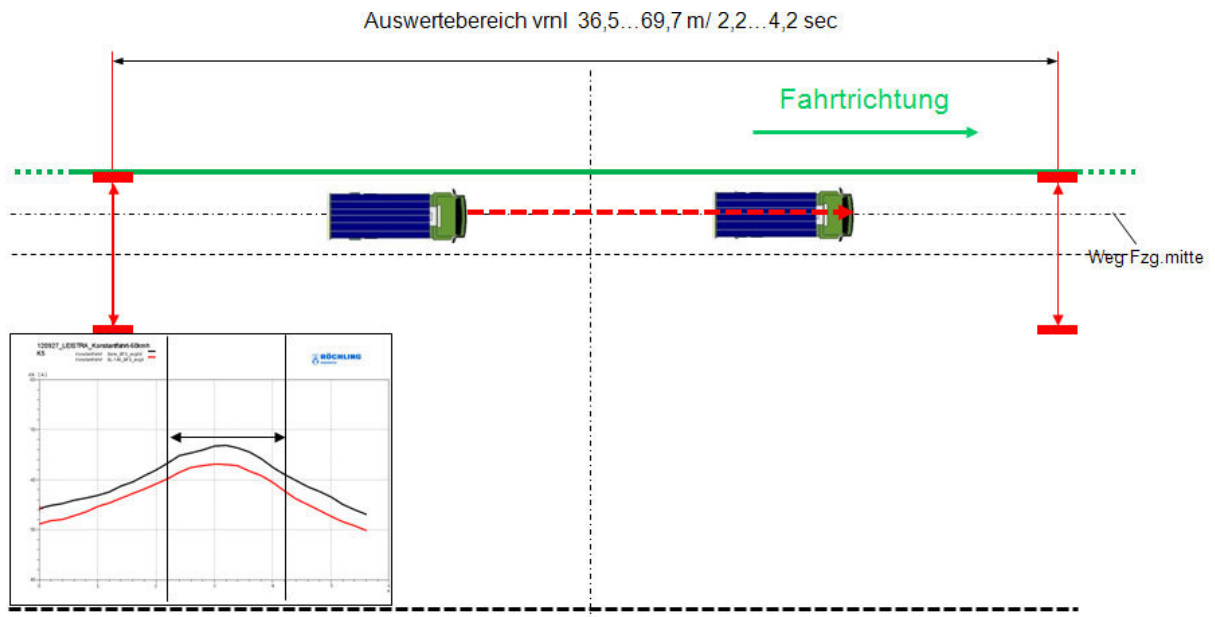
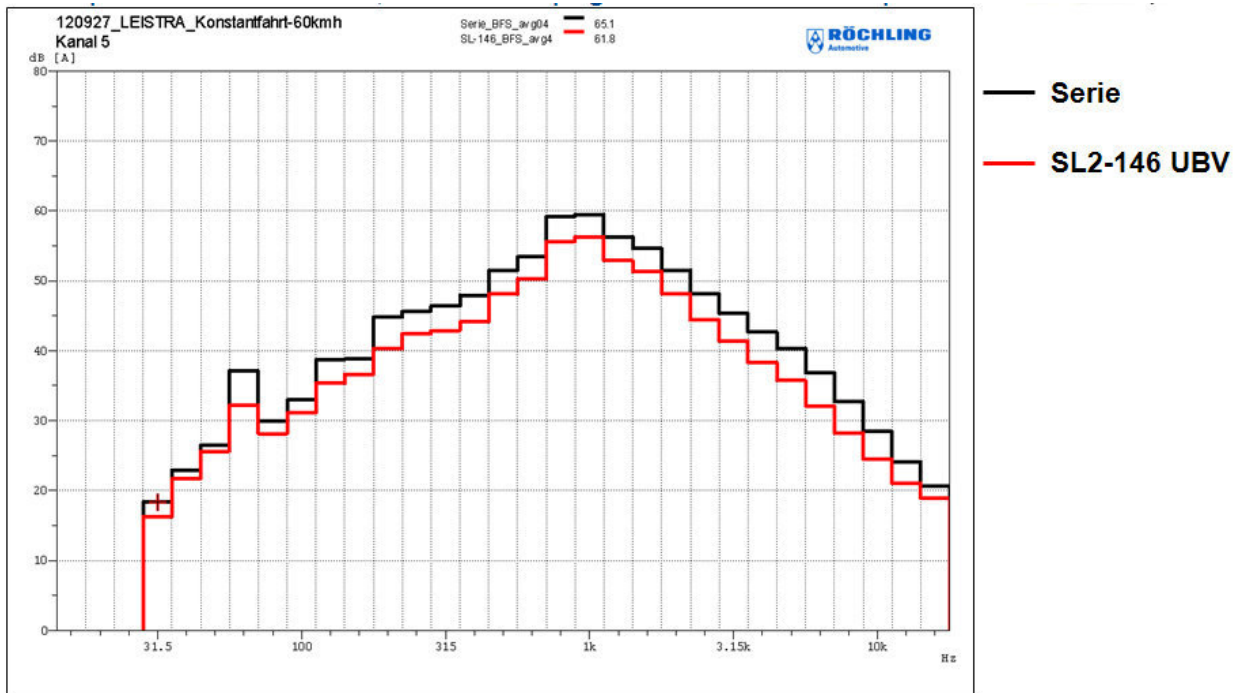


Bild 4.4-104: Intervallmittelpunkt für Terzpegelanalyse Messpunkt 10 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite



**Bild 4.4-105:** Auswertebereich für Terzpegelanalyse Messpunkt 10 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite

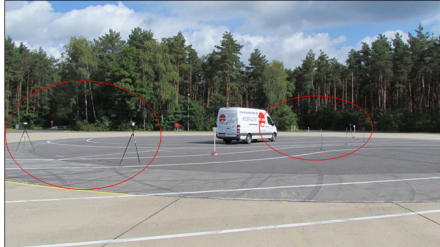


**Bild 4.4-106:** Terzpegelanalyse Messpunkt 10 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite

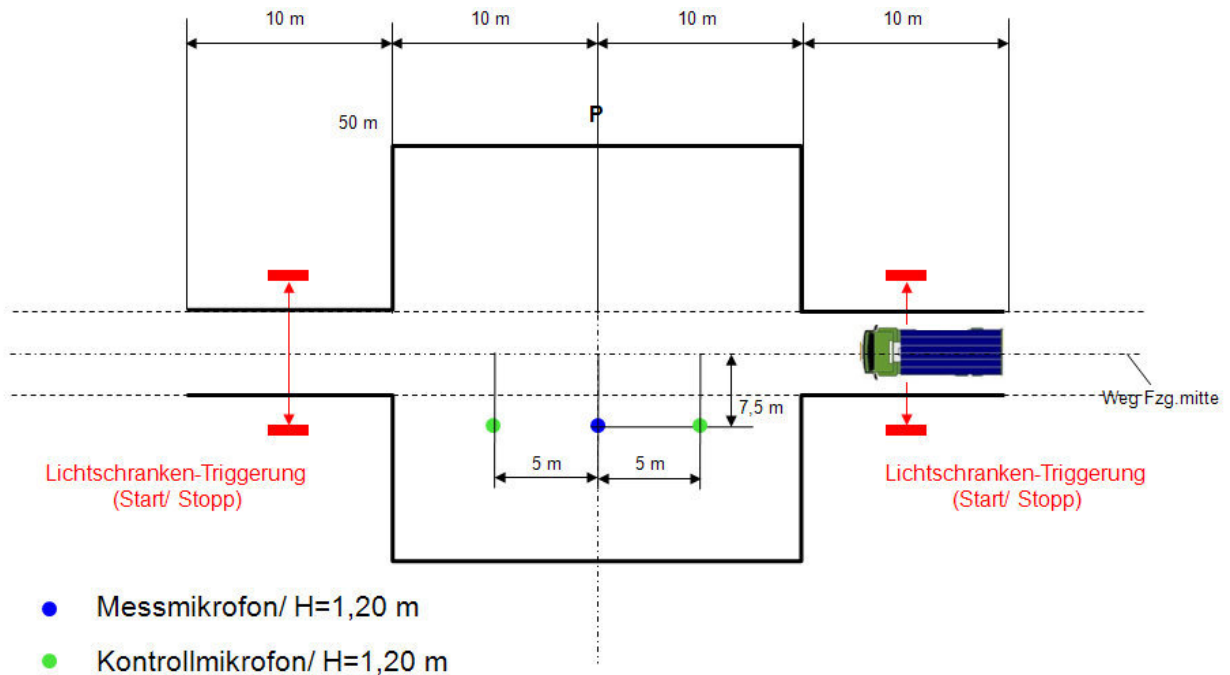
### Beschleunigte Vorbeifahrt

Gemessen wurde auch hier auf dem Adam Opel GmbH-Test Center Dudenhofen auf der Performancestrecke mit ISO-Asphalt. Die Messpunkte waren Mikrofon 7,5 m von Fahrbahnmitte entfernt jeweils in 1,65 m Höhe. Die Triggerung für Start-Stopp erfolgte mittels Lichtschranke 15 m vor und nach der Messpunktlinie. Das Lichtschrankensignal wurde wiederum telemetrisch übertragen (Bilder 4.4-107 und 4.4-108).

- Teststrecke: Adam Opel GmbH-Test Center Dudenhofen , Skid Pad -Messstrecke, ISO-Asphalt
- Triggerung: Lichtschranken 15m vor und nach der Messpunktlinie PP/ Start-Stopp

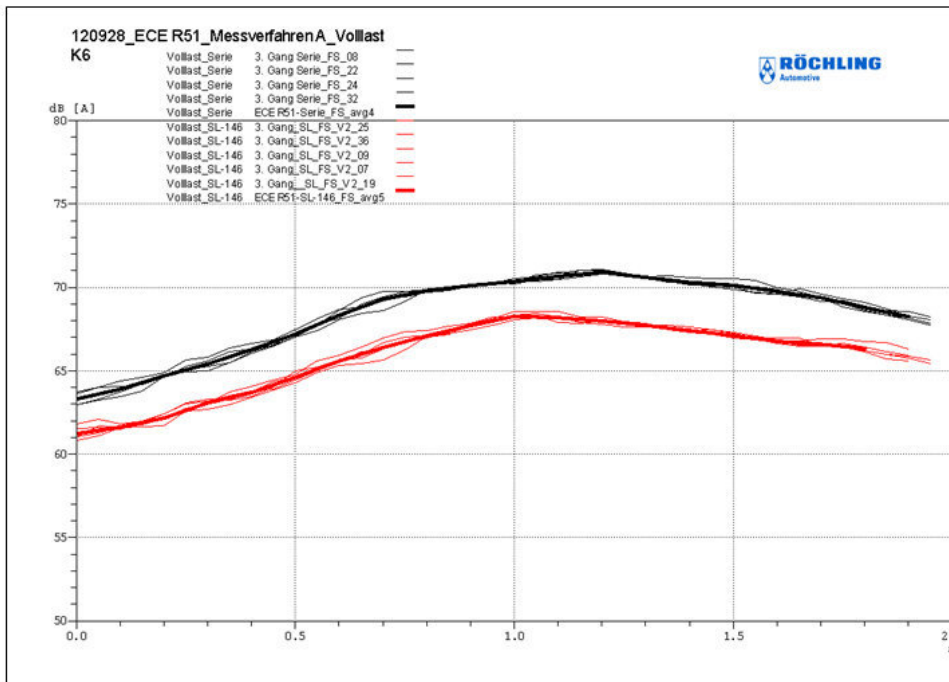


**Bild 4.4-107:** Versuchsbedingungen beschleunigte Vorbeifahrt



**Bild 4.4-108:** Schematische Darstellung der Messbedingungen

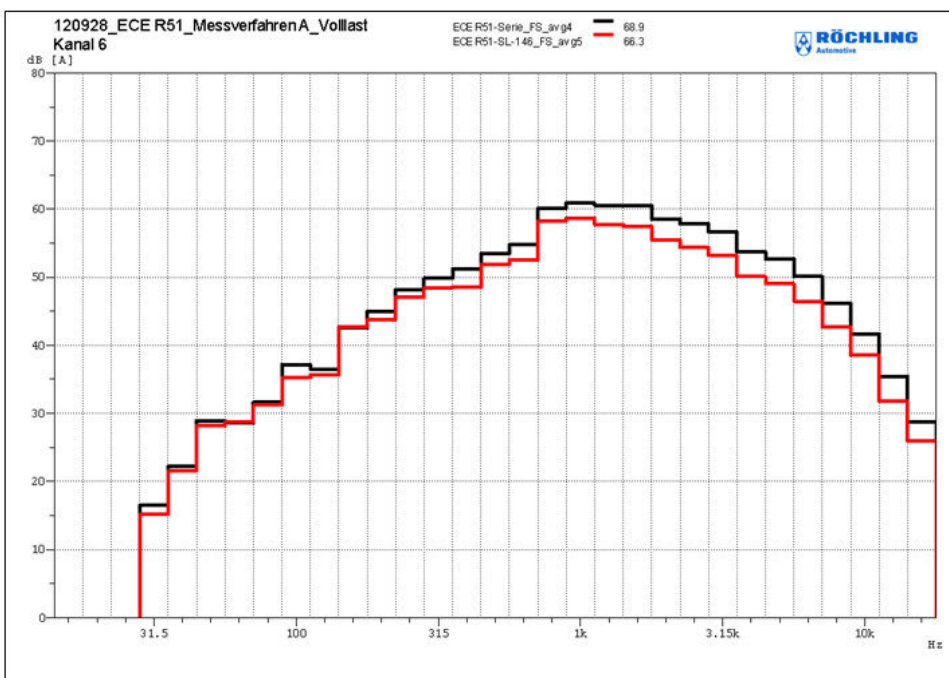
Die Bilder 4.4-109 und 4.4-110 (Fahrerseite) sowie 4.4-111 und 4.4-112 (Beifahrerseite) zeigen jeweils die A-bewerteten Schalldruckverläufe und die zugehörigen Terzspektren der beschleunigten Vorbeifahrt. Auch hier zeigt sich, wie schon bei der konstanten Vorbeifahrt, eine Verbesserung von 2 - 3 dB.



— Serie

— SL2-146 UBV

Bild 4.4-109: Messpunkt 7,5 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite, Vorbeifahrtpegel



— Serie

— SL2-146 UBV

Bild 4.4-110: Messpunkt 7,5 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Fahrerseite, Terzpegelspektren

Diese findet sich bei den Terzspektren allerdings nur im Frequenzbereich oberhalb etwa 500 Hz wieder. Unterhalb vermindert sich der Unterschied und verschwindet schließlich bei etwa 200 Hz ganz.

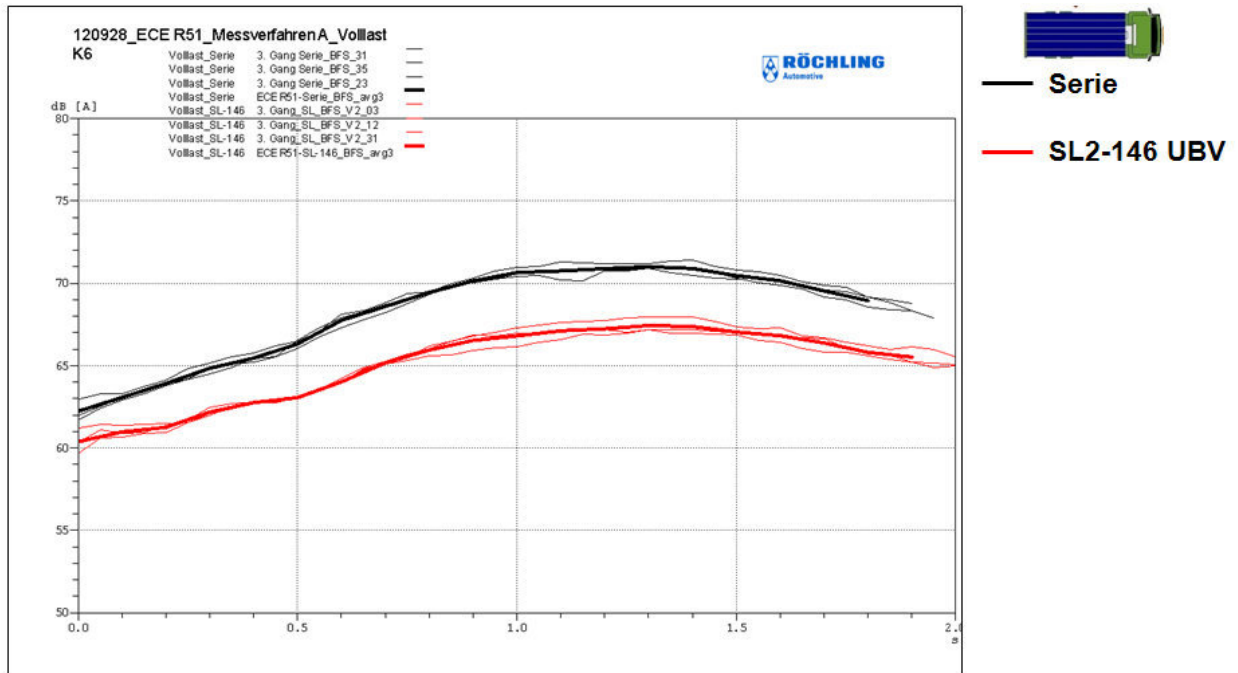


Bild 4.4-111: Messpunkt 7,5 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Beifahrerseite, Vorbeifahrtpegel

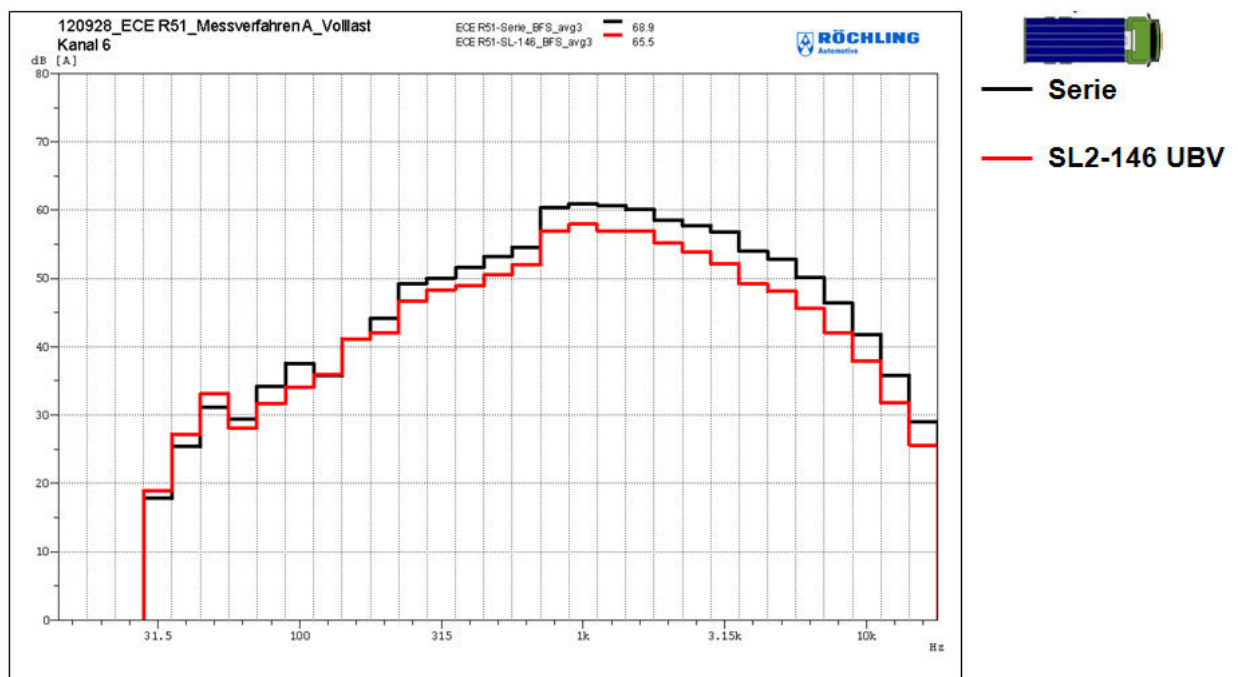


Bild 4.4-112: Messpunkt 7,5 m Abstand, Vorbeifahrtpegel Beifahrerseite, Terzpegelspektren

### Innengeräuschuntersuchungen am Daimler Sprinter mit vollflächig absorbierender Unterbodenverkleidung

Nachdem sich bei der Ausstattung des Daimler Sprinter mit einer vollflächig absorbierenden Unterbodenverkleidung - wie schon beim Lkw - ein Potential von 3 dB nachweisen ließ, und bei dieser Fahrzeugklasse - insbesondere im Segment Kleinbusse - auch ein besonderes Interesse zu Innengeräuschverbesserungen besteht, war es naheliegend, auch diesbezügliche Verbesserungspotentiale zu untersuchen. Der absorbierende Unterboden des Sprinters wurde daher nochmal montiert und das Innengeräusch gemessen. Bild 4.4-113 zeigt die Gesamtabsorption und die Beiträge der Teilkomponenten hierzu. Mit einer äquivalenten Absorptionsfläche von bis zu 9 m<sup>2</sup> im Maximum ist mit bei einer derartigen Verkleidung ein erhebliches Schallabsorptionsvermögen vorhanden.



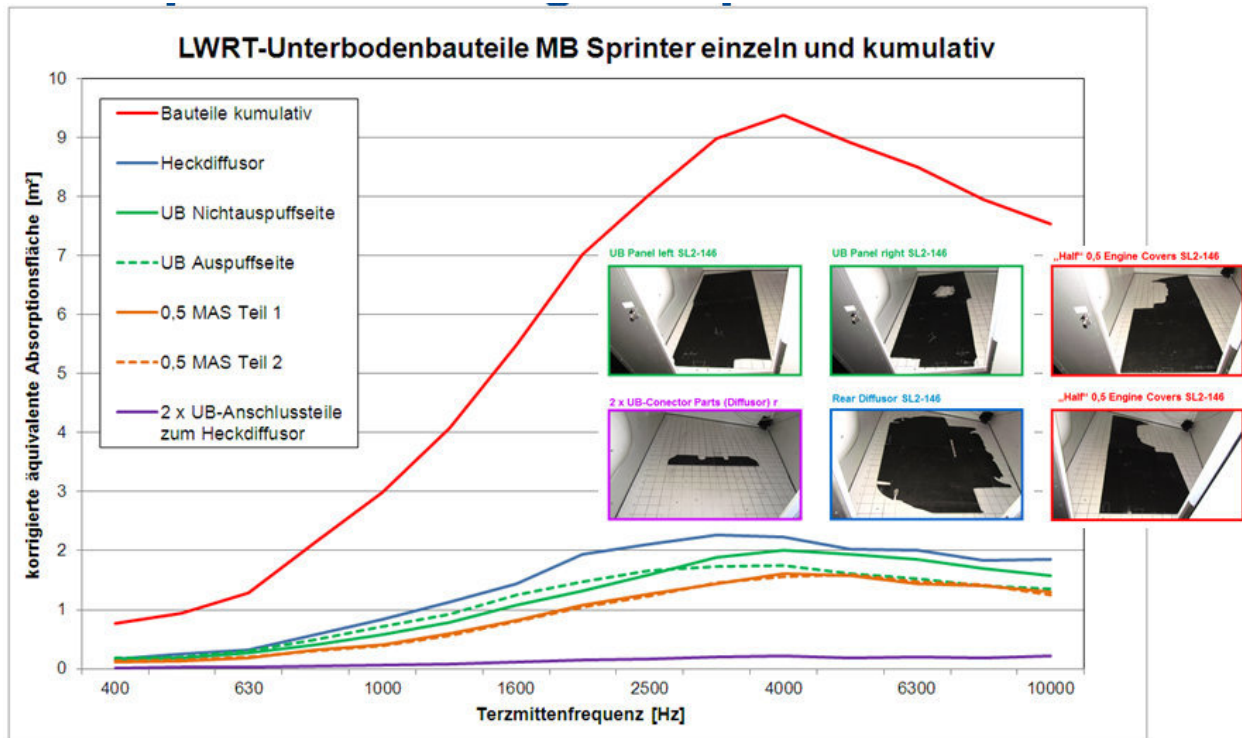


Bild 4.4-113: Absorbierender Unterboden Sprinter: Gesamtabsorption und Beiträge der Teilkomponenten

Im vorhergehenden Kapitel wurde die Verbesserung des Außengeräusches durch diese großflächige absorbierende Verkleidung beschrieben. Die Diagramme (Bild 4.4-114 und Bild 4.4-115) zeigen diese Verbesserung in grüner Schraffur.

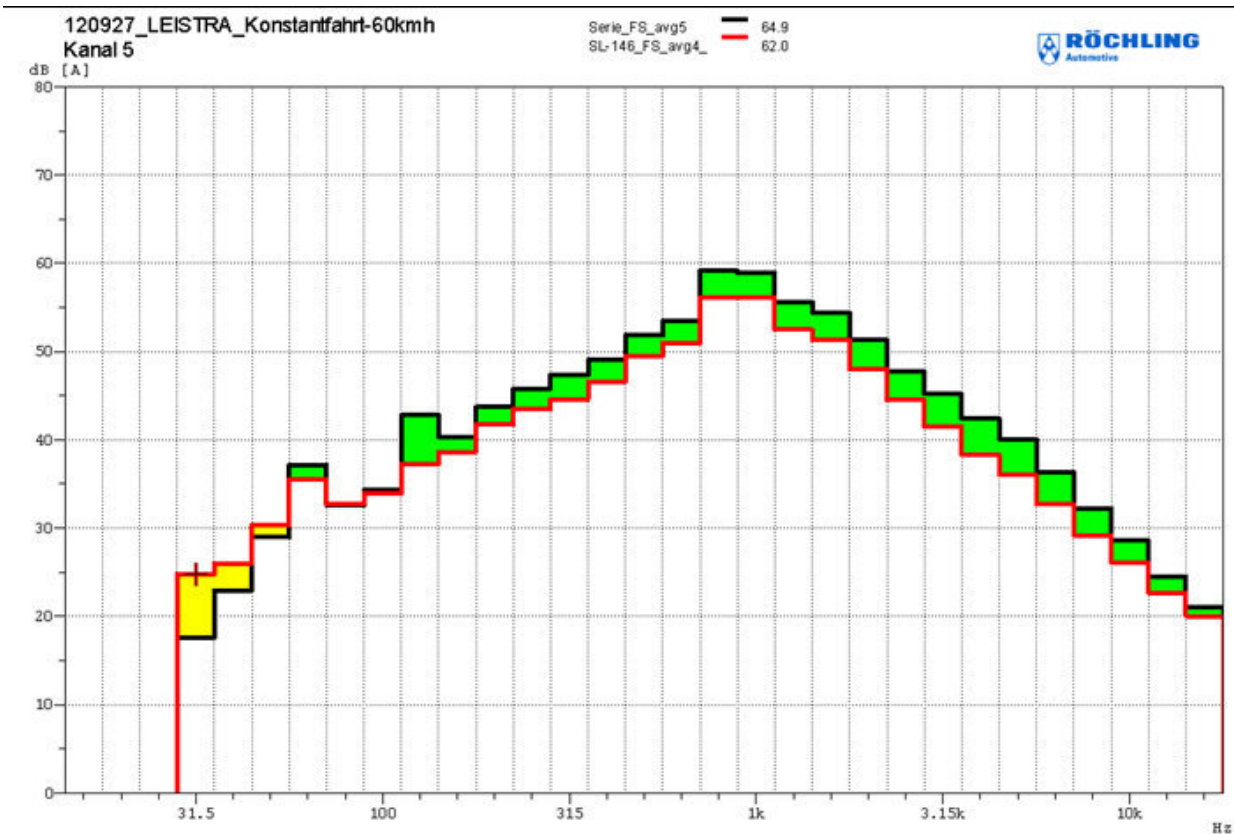
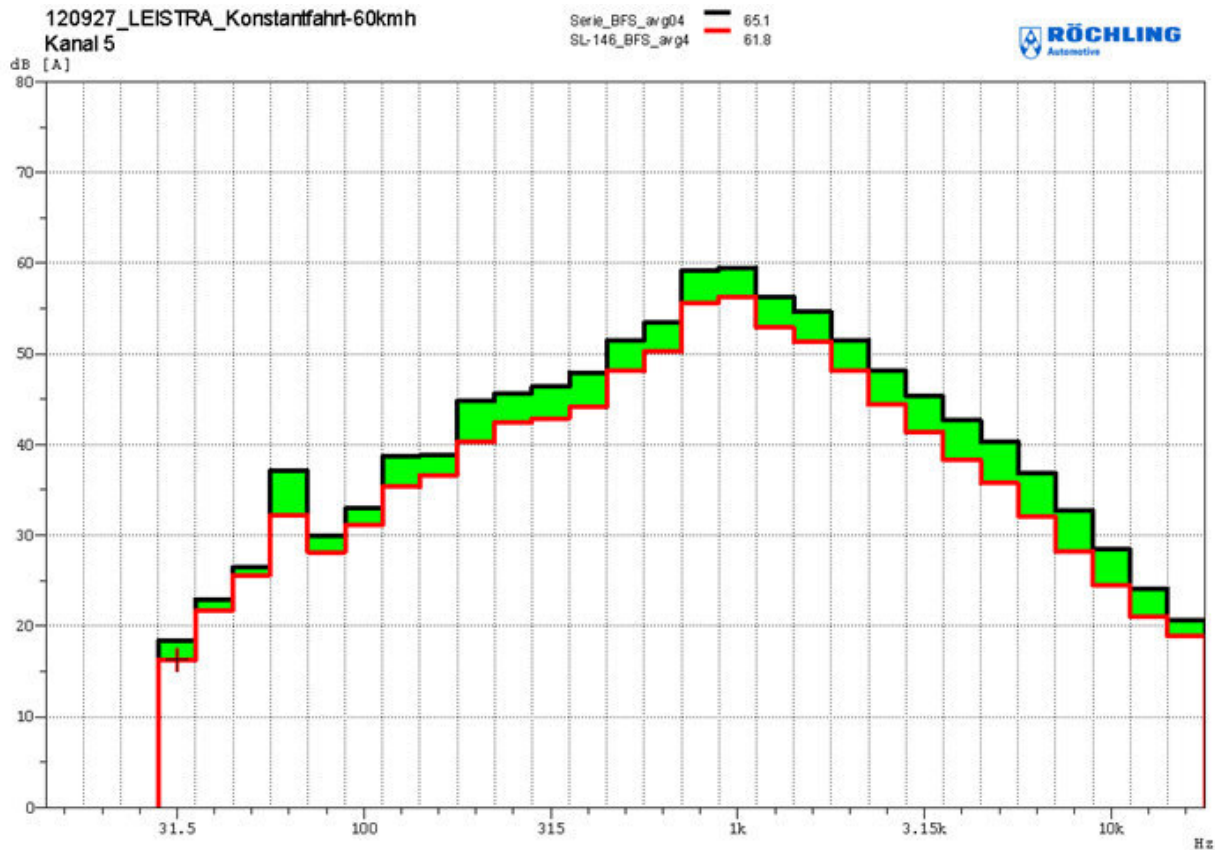
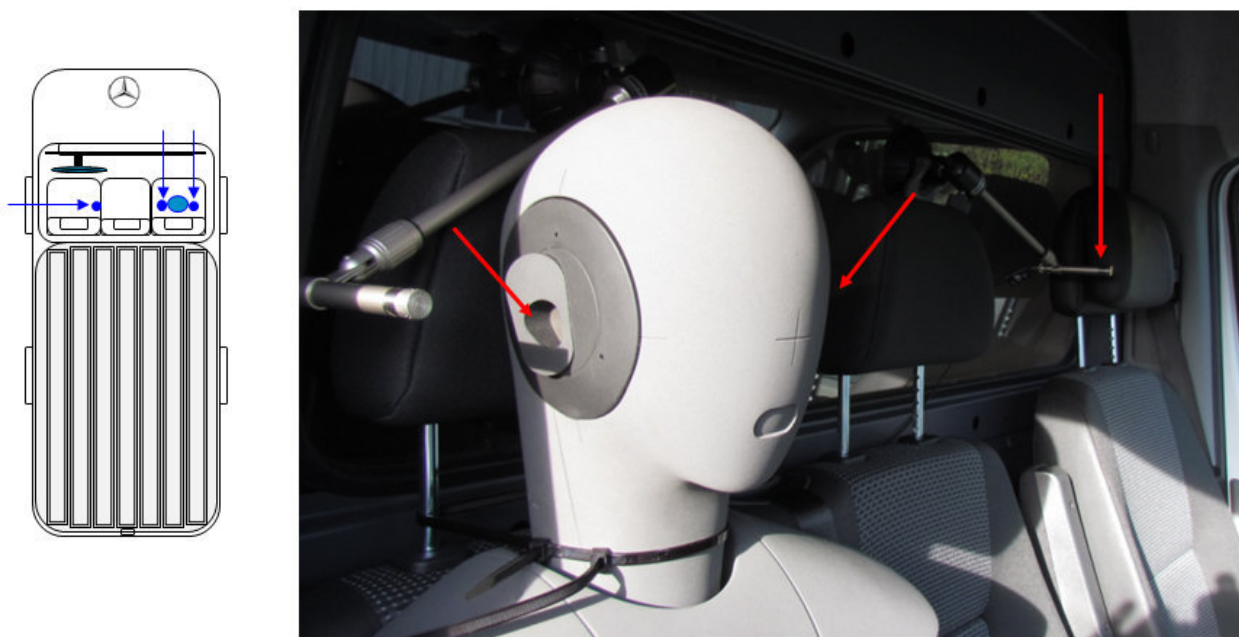


Bild 4.4-114: Verbesserung Außengeräusch Daimler Sprinter Fahrerseite. Terzpegelanalyse Messpunkt 10 m Abstand, (siehe auch Bild 4.4-103)



**Bild 4.4-115:** Verbesserung Außengeräusch Daimler Sprinter Beifahrerseite Terzpegelanalyse Messpunkt 10 m Abstand, (siehe auch Bild 4.4-98)

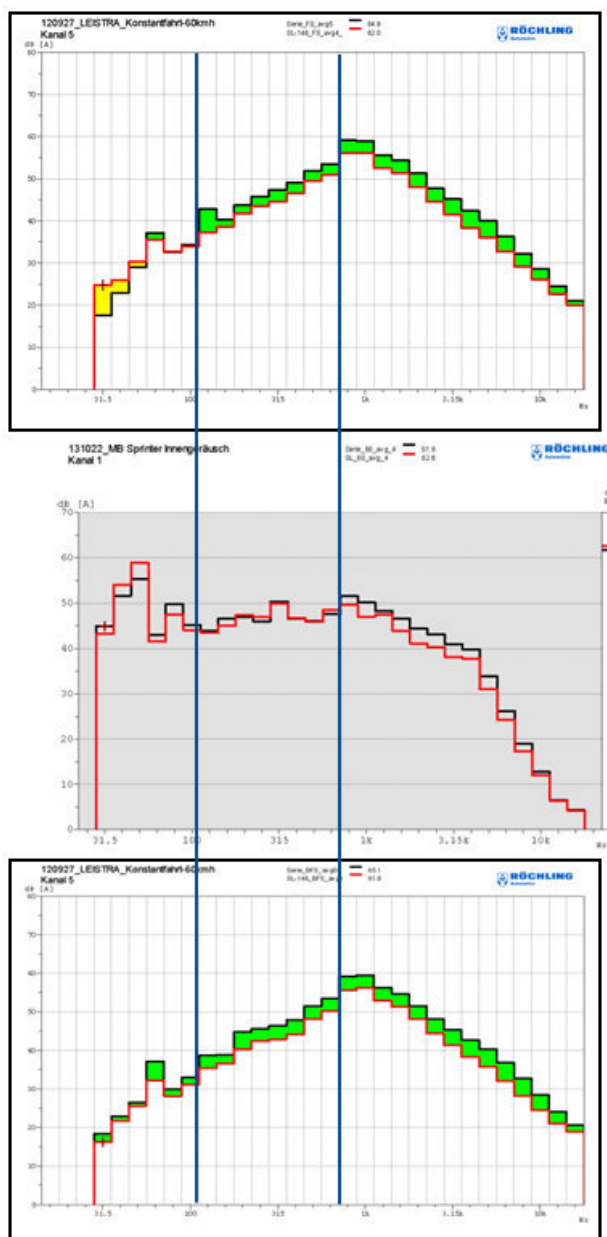
Die Messung des Innengeräusches wurde mit Kunstkopf auf dem rechten Beifahrersitz und jeweils einem Messmikrofon ca. 10 cm rechts vom Fahrerohr bzw. 10 cm rechts vom rechten Beifahrerohr durchgeführt (Bild 4.4-116).



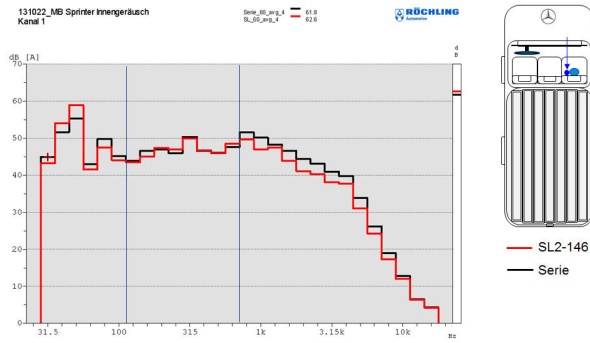
**Bild 4.4-116:** Anordnung der Messmikrofone und des Kunstkopfmikrofons für Innengeräuschmessungen Daimler Sprinter

In Bild 4.4-117 sind die beiden Außengeräuschspektren aus den Bildern 4.4-114 und 4.4-115 mit einem gemessenen Innengeräuschspektrum (jeweils mit der gleichen Skalierung der Abszisse) dargestellt. Die blauen senkrechten Linien zeigen die Grenzfrequenzen der Außengeräuschverbesserung (linke senkrechte Linie) und der Innengeräuschverbesserung (rechte senkrechte Linie). Jeweils zu höheren Frequenzen sind durchweg Verbesserungen in den Terzpegeln feststellbar, während zu tieferen Frequenzen keine eindeutige Aussage möglich ist.

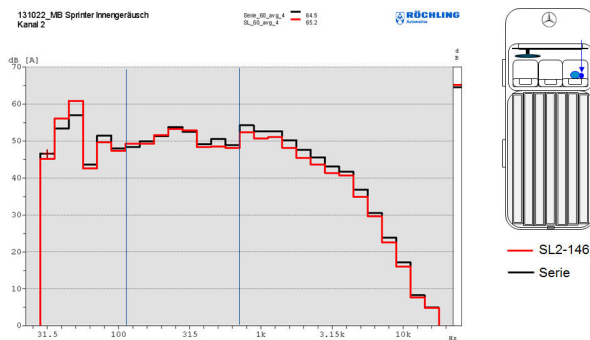
Die Bilder 4.4-118 bis 4.4-120 zeigen die Veränderung des Innengeräusch-Schallpegels an den Mikrofonpositionen Kunstkopf links, Kunstkopf rechts und Fahrerrohr rechts für die gefahrene Geschwindigkeit 60 km/h, die Bilder 4.4-121 bis 4.4-123 die Veränderung des Schallpegels an denselben Mikrofonpositionen für die gefahrene Geschwindigkeit 80 km/h. In allen Fällen ergibt sich eine Verbesserung durch die schallabsorbierende Verkleidung oberhalb 800 Hz, gekennzeichnet durch die rechte senkrechte blaue Linie. Bei allen tieferen Frequenzen ist die Verbesserung des Außengeräusches im Innengeräusch nicht mehr wiederzufinden. Insbesondere im Frequenzbereich zwischen 100 Hz (linke senkrechte Linie) und 800 Hz (rechte senkrechte Linie) ist nahezu keine Veränderung festzustellen. Hier liegen beide Spektren sehr nahe beieinander.



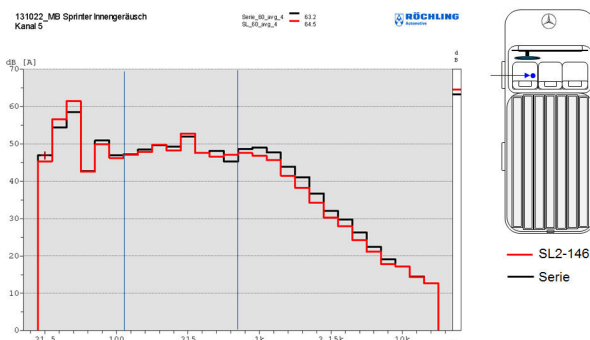
**Bild 4.4-117:** Außengeräuschmessungen oberes und unteres Diagramm und Innengeräuschmessung Kunstkopf linkes Ohrmikrofon. Senkrechte Linien unterteilen die Wirksamkeitsbereiche



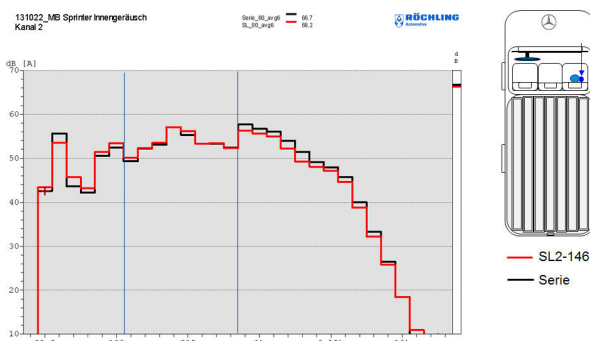
**Bild 4.4-118:** Terzpegelspektrum Innengeräusch 60 km/h mit (rot) und ohne (schwarz) absorbierender Unterbodenverkleidung. Mikrofonposition Kunstkopf links



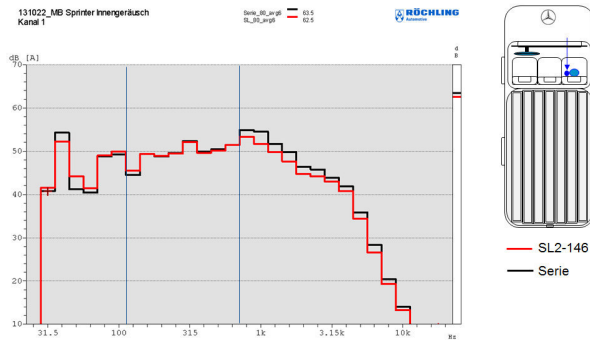
**Bild 4.4-119:** Terzpegelspektrum Innengeräusch 60 km/h mit (rot) und ohne (schwarz) absorbierender Unterbodenverkleidung. Mikrofonposition Kunstkopf rechts



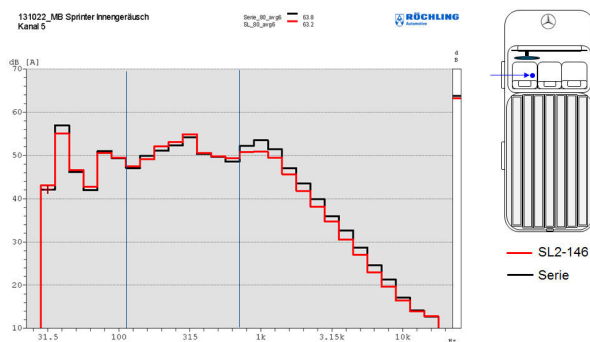
**Bild 4.4-120:** Terzpegelspektrum Innengeräusch 60 km/h mit (rot) und ohne (schwarz) absorbierender Unterbodenverkleidung. Mikrofonposition Fahrerohr rechts



**Bild 4.4-121:** Terzpegelspektrum Innengeräusch 80 km/h mit (rot) und ohne (schwarz) absorbierender Unterbodenverkleidung. Mikrofonposition Kunstkopf rechts

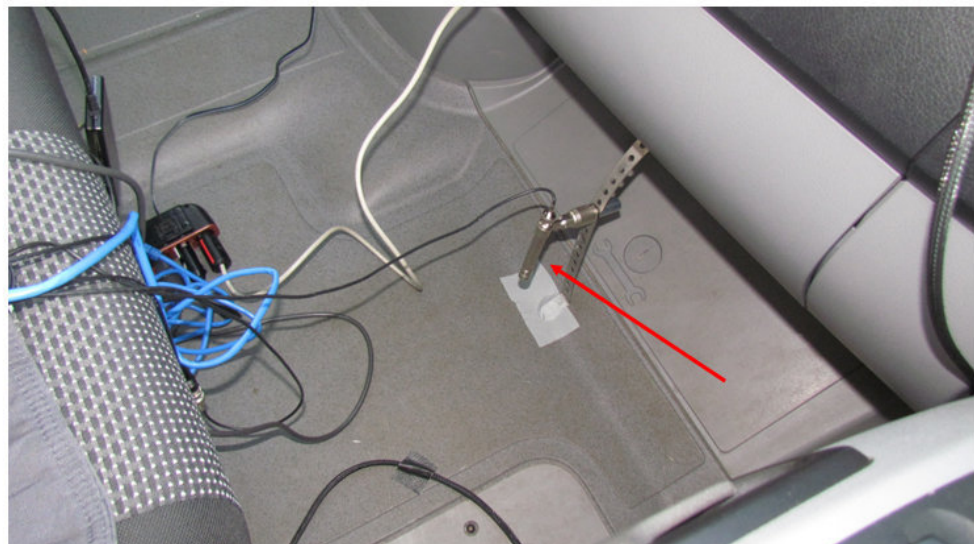
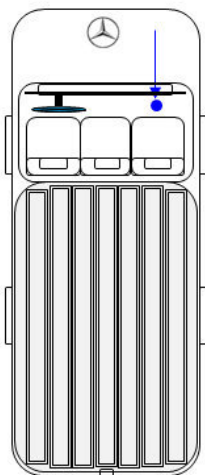


**Bild 4.4-122:** Terzpegelspektrum Innengeräusch 80 km/h mit (rot) und ohne (schwarz) absorbierender Unterbodenverkleidung. Mikrofonposition Kunstkopf links

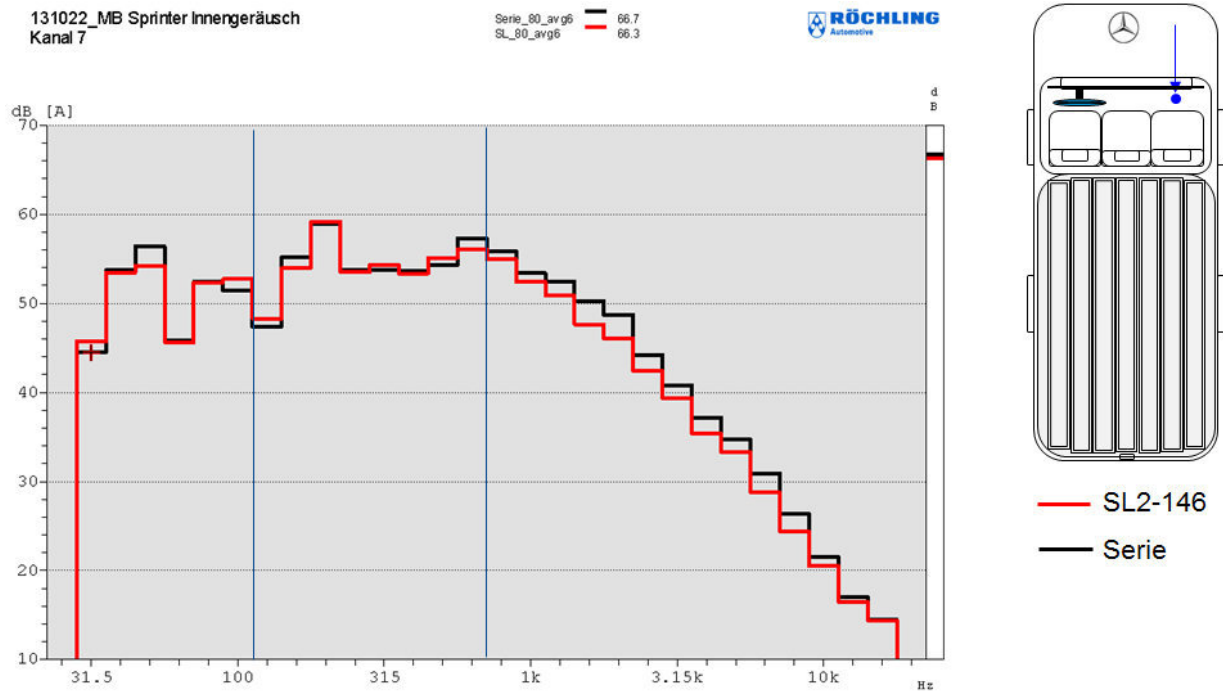


**Bild 4.4-123:** Terzpegelspektrum Innengeräusch 80 km/h mit (rot) und ohne (schwarz) absorbierender Unterbodenverkleidung. Mikrofonposition Messmikrofon Fahrerohr rechts

Als Kontrollmessung wurde ein Mikrofon in den Fußraum montiert (Bild 4.4-124) und auch für diese Position die Schallpegelverbesserung ausgewertet. Diese Messung zeigt das gleiche Verhalten: Verbesserung oberhalb der 800 Hz, unterhalb 800 Hz ist keine eindeutige Aussage möglich (Bild 4.4-125).



**Bild 4.4-124:** Absorbierende Unterbodenplatte, abgedeckt mit den Kammerplatten im mittleren Fahrzeugbereich



**Bild 4.4-125:** Absorbierende Unterbodenplatte, abgedeckt mit den Kammerplatten im mittleren Fahrzeugbereich

#### 4.4.9 Zusammenfassung

Das Verbundprojekt Leiser Straßenverkehr 3 (LeiStra3) hat sich als zentrales Ziel gesetzt, Maßnahmen zur Minderung des Straßenverkehrslärms in Ballungsräumen zu entwickeln, die dort aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte besonders wirkungsvoll sind. Verfolgt wurden verschiedene Forschungsansätze, die die Geräuschemission an der Lärmquelle nachhaltig reduzieren. Da die Geräuschemission des fließenden Verkehrs maßgeblich durch Wechselwirkungen an der Kontaktstelle von rollendem Reifen und Fahrbahn bestimmt wird, standen die Reifen-Fahrbahn-Geräusche im Fokus der Untersuchungen. Detaillierte Analysen der physikalischen Wechselwirkungsmechanismen und der induzierten Schallabstrahlung bildeten die Basis für eine akustische Optimierung von Reifen, Fahrzeug und Straßenbelägen.

Ein Ansatz lag in der Konstruktion einer schallabsorbierenden Fahrzeugunterbodenverkleidung, die die Rollgeräusche effizient absorbiert und zudem die Aerodynamik des Fahrzeugs begünstigt. Im Teilvorhaben V sollte durch die Firma Automotive SE & Co.KG in Zusammenarbeit mit der Chalmers University of Technology und der Firma Müller-BBM ein Simulationsverfahren zur Erforschung der Schallausbreitung zwischen Fahrbahn und Unterbodenverkleidung erarbeitet werden. Basierend auf diesen Ergebnissen sollten verschiedene Materialaufbauten und Konstruktionen von Unterbodenverkleidungen entwickelt und deren schallabsorbierende Wirkung nachgewiesen werden.

Eine wesentliche Erkenntnis des erarbeiteten Simulationsmodells war, dass die Schallintensität im Unterbodenspalt durch das Vorhandensein des Unterbodenflachraums wesentlich verändert wird. Bei tiefen Frequenzen wird die Schalleistungsabgabe einer Quelle bis um das Zehnfache verstärkt, wenn ein schallharter Quader (einfaches Modell eines Fahrzeugs) mit einem Abstand darüber positioniert wird.

Die Ergebnisse von validierenden Messungen, durchgeführt an einem real erstellten Quader, zeigten in vielen Punkten eine gute Übereinstimmung mit der Simulation. So konnte messtechnisch nachvollzogen werden, dass sich der Gesamtschallpegel durch die Anwesenheit des Quaders erhöht und dass der Pegel sich steigert, je näher ein Mikrofon an der Schallquelle liegt. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass der Einbau der schallabsorbierenden Platte zu einer erheblichen Schallpegeldämpfung führt. Der bei den Simulationsergebnissen erhaltene Effekt, dass mit größerem Wandabstand der absorbierenden Platte vom Quader auch der Dämpfungseffekt größer ist, zeigte sich hingegen in den Messungen nur bedingt.

Mit Hilfe der erarbeiteten Modelle konnten wesentliche Phänomene der Schallpegelminderung durch schallabsorbierende Platten im Unterbodenspalt eines KFZ nachgebildet werden und anhand eines identisch dimensionierten Quader mit absorbierender Platte messtechnisch im Wesentlichen bestätigt werden. Die Größenordnung der simulierten Schallpegelminderung bei Anordnungen mit 4 Quellen an den Reifenpositionen und einem virtuellen Mikrofon seitlich neben dem modellierten Fahrzeug bewegt sich auf dem Niveau der messtechnisch ermittelten Ergebnisse.

Somit steht nun ein wirkungsvolles Werkzeug zur Verfügung, mit welchem bei vorhandener Geometrie eines Unterbodenflachraums die Schallpegelminderung der abgestrahlten Reifen-Fahrbahn-Geräusche durch den Anbau einer schallabsorbierenden Unterbodenverkleidung prognostiziert werden kann.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei Lastwagen und Transportern durch eine schallabsorbierende Unterbodenverkleidung eine Geräuschkinderung von ca. 2-3 dB(A) erreicht werden kann.

Diese Pegelminderung wurde

- bei konstanter Geschwindigkeit (Reifengeräusche dominant),
- bei beschleunigter Fahrt (Motorengeräusche dominant),
- im Stand bei laufendem Motor (Motorengeräusche dominant)

erreicht.

Resonatoren mit frequenzselektiv abgestimmten Verkleidungen zeigten keine Verbesserung im Vergleich zu porösen, hochfrequent wirksamen Systemen.

Je größer die Absorptionsfläche, desto besser die Wirksamkeit. Die Position der Verkleidung spielt nur eine untergeordnete Rolle.

## Literatur

- [1] FE 89.0272/2011 „Modellierung und Analyse der Ausbreitung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen zur akustischen Optimierung von Fahrzeugunterbodenverkleidungen“, BAST, Bergisch Gladbach 2013

Der Schlussbericht zum vorliegenden Teilvorhaben V (Förderkennzeichen 19U10016 L) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.

## 5 Arbeitspaket Fahrbahnbeläge

### 5.1 Einleitung

Die Entwicklung leiserer Fahroberflächen stellte den Schwerpunkt im Arbeitspaket Fahrbahnbeläge und Demonstration dar. Anhand von Modellrechnungen konnte bereits in den vorangegangenen Verbundprojekten *Leiser Straßenverkehr* nachgewiesen werden, dass die Oberflächengestalt von Straßenbelägen einen starken Einfluss auf die Schwingungsanregung des Reifens und die aerodynamischen Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn hat.

Im vorliegenden Arbeitspaket wurden hinsichtlich der Entwicklung lärmoptimierter Fahrbahnbeläge vier Ansätze verfolgt. Teilvorhaben VI.I hatte die Entwicklung eines Asphaltstraßenbelages mit schalltechnisch optimierten Körnungen aus Elektroofenschlacke (EOS) zum Ziel. Es sollte untersucht werden, inwieweit der Herstellungsprozess von Elektroofenschlacke verbessert werden kann, um bestimmte Kornformen und Korngrößen gezielt zu erzeugen und damit einen hochwertigen Ausgangswerkstoff für den Asphaltstraßenbau zu gewinnen. Dazu musste u.a. die bautechnische Eignung von EOS-Körnungen für den Einsatz im Asphaltstraßenbau geprüft sowie das Potenzial verschiedener Prozessrouten geprüft werden.

Im Teilvorhaben VI.II sollte die lärmtechnische Wirksamkeit und bautechnische Umsetzbarkeit der dichten Asphaltbeläge PMA (**P**orous **M**astic **A**sphalt) und LOAD (**L**ärm**o**ptimierte **A**sphalt**d**eckschicht) optimiert werden. Die lärmtechnisch optimierte Asphaltdeckschicht AC D LOA stellte zu Projektbeginn eine neue Entwicklung in der Straßenbautechnik dar und greift diesen Ansatz auf. Die Deckschicht wurde auf Basis einer dichten Asphalzzusammensetzung konzipiert und zeichnet sich durch eine Korngrößenverteilung aus, die auf eine lärmtechnisch wirksame Oberflächentextur abgestimmt ist. Der erste Einbau von AC D LOA erfolgte 2007 in Düsseldorf im Bereich der kommunalen Straßen. In *LeiStra3* sollte daran gearbeitet werden, die Verdichtungswilligkeit des Asphaltmischgutes zu optimieren, um die Dauerhaftigkeit der Deckschicht und damit ihren lärmtechnischen Nutzen zu erhöhen.

Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche (engl.: Porous Mastic Asphalt, PMA) zeigt ebenfalls lärmmindern- de Effekte. PMA ist eine Deckschicht, die im unteren Bereich dicht und im oberen Bereich offenporig strukturiert ist. Die akustische Wirksamkeit ergibt sich aus der günstigen Oberflächentextur und einem hohen Hohlraumgehalt. In 2009 wurden erste Erprobungsstrecken gebaut, bei denen Schallpegelmessungen nach der Statistischen Vorbeifahrtmethode eine Lärminderungen von bis zu 3 dB(A) gegenüber dem Referenzwert zeigten. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse sollten in *LeiStra3* weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden, um die Ausführungssicherheit des PMA zu erhöhen. Es war erforderlich, die Mischgutzusammensetzung zu optimieren und Laborverfahren zur Herstellung von praxisnahen Probekörpern für die Mischgutkonzeption zu entwickeln.

Neben der Oberflächentextur und der Offenporigkeit bestimmt auch die Nachgiebigkeit die akustischen Eigenschaften eines Fahrbahnbelags. Im Teilvorhaben VII.III wurde untersucht, inwieweit die akustische Wirksamkeit von Asphaltkonstruktionen durch die Nutzung von Materialien mit schwingungsdämpfenden Eigenschaften oder durch die Integration einer elastischen Zwischenschicht verbessert werden kann.

Die Entwicklung und Optimierung einer dauerhaft lärmarmen Betondeckschicht mit oberflächennahem, zugänglichem Porensystem COPS (**c**oncrete with **p**orous **s**urface) war das Ziel im Teilvorhaben VI.IV. Dabei sollte die fertige Betondeckschicht ohne zusätzliche Bearbeitungsschritte nach dem Einbau die endgültige Oberflächentextur aufweisen. Die Grundidee des Systems COPS greift die im Asphaltstraßenbau bereits erfolgreich eingesetzte Mischgutkonzipierung mit hohem Grobkornanteil und einer feinkörnigen standfesten Bindemittel-/Mörtelphase auf. Während des Einbauvorganges sinkt der feinkörnige Mörtel nach unten ab, so dass innerhalb der oberen 10 mm der Deckschicht eine offenporige Oberfläche entsteht. In Laborversuchen sollte die Betonrezeptur so eingestellt werden, dass ein kontrolliertes Absetzverhalten des Zementleimes erreicht wird. Die Betonrezeptur muss möglichst stabil gegenüber Einflüssen von Witterung und Einbau sein, um die vorteilhaften akustischen Eigenschaften der fertigen Betondeckschicht sicherzustellen.



## 5.2 Teilvorhaben VI-I

### Bau von Asphaltdeckschichten unter Einsatz künstlicher Gesteinskörnung zur Herstellung einer akustisch optimierten Textur

Dipl.-Ing. Peter Leopold, Lutz Herzprung  
Max Aicher GmbH & Co.KG, Freilassing

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer  
Müller-BBM GmbH, Planegg

Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, Dr.-Ing. Thomas Wörner  
TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), München

Dipl.-Ing. Oliver Ripke  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

#### Inhalt

5.2.1	Zielsetzung .....	282
5.2.2	Bestandsuntersuchung von EloMinit® .....	283
5.2.3	Aufbereitung der Elektroofenschlacke.....	283
5.2.4	Auswahl und Prüfung des eingesetzten Materials.....	285
5.2.5	Asphalttechnologie .....	289
5.2.6	Bau einer Versuchsstrecke .....	295
5.2.7	Zusammenfassung .....	310
	Literatur .....	311

### 5.2.1 Zielsetzung

Elektroofenschlacke (EOS) entsteht als Nebenprodukt bei der Herstellung von Rohstahl im Elektrolichtbogenofen. Nach anschließender Abkühlung und Aufbereitung können unterschiedliche Körnungen für vielseitige Einsatzbereiche hergestellt werden. Bei der EOS handelt es sich um ein Schmelzgestein, das dem Lavagestein in physikalischen und chemischen Eigenschaften sehr ähnlich ist. Seit vielen Jahren wird sie als künstlicher Mineralstoff im Straßenbau eingesetzt. Aufgrund langjähriger positiver Erfahrung hat sich der Einsatz der Elektroofenschlacke im Asphalt bewährt, so dass in LeiStra3 untersucht werden sollte, inwieweit Elektroofenschlacke zur Herstellung von Asphaltdeckschichten mit einer akustisch optimierten Textur geeignet ist.

Bereits die Abkühlbedingungen beeinflussen die Elektroofenschlacke hinsichtlich ihrer Form und Porenstruktur. Ziel ist es, ein geeignetes Verfahren bereitzustellen, mit dem eine Elektroofenschlacke in gleichbleibender Qualität hergestellt werden kann. Die hohen Anforderungen an die Asphalteigenschaften müssen zielsicher erreicht werden, um den Bau von Asphaltdeckschichten zu gewährleisten, die dauerhaft, griffig, eben und leise sind.

Die reproduzierbare Herstellung geräuschkindernder Fahrbahnbeläge erfolgt vorzugsweise mit Gesteinskörnungen, an die nicht nur bautechnische, sondern hinsichtlich der Gleichmäßigkeit, auch erhöhte Anforderungen an die Materialaufbereitung gestellt werden. Dies betrifft insbesondere die Kornform. Die Aufbereitung und Herstellung der Elektroofenschlacke erfolgt durch Entschrotten und anschließendes Brechen und Absieben. Je nach Einsatzort und Verwendungszweck werden definierte Körnungen hergestellt. Aufgrund der speziell hergestellten Körnungen findet das Endprodukt zahlreiche Einsatzmöglichkeiten wie z. B. den hochwertigen Einsatz im Asphalt. Aber auch außerhalb des Straßenbaus wird die Elektroofenschlacke erfolgreich als Baustoff eingesetzt.

Im Teilvorhaben sollte mit der Elektroofenschlacke als Gesteinskörnung, neben der Konzeption eines offenporigen Asphaltes, auch die Texturoptimierung dichter geräuschkindernder Deckschichten untersucht und entwickelt werden.

Die beteiligten Projektpartner waren Max Aicher GmbH, Müller-BBM, TU München und die BAST. Die Aufbereitung der Elektroofenschlacke erfolgte bei der Max Aicher Umwelt GmbH (MAU) in Meitingen (Bild 5.2-1). Die Aufbereitungsanlage liegt angrenzend zu den Lech-Stahlwerken. Vor Ort wird die EOS verarbeitet. Nach den erforderlichen Bearbeitungsschritten und Qualitätsprüfungen trägt sie den Marknamen EloMinit®.

Aufgabe der Firma Max Aicher war es, verschiedene Prozessvarianten zur reproduzierbaren Herstellung von definierten Festkörpern aus EOS zu analysieren. In diesem Zusammenhang sollte auch der Einfluss des Brech- und Mahlvorganges auf die Ausbildung der Kornform untersucht werden.

Nach Abschluss dieser Analysen sollten mit EOS-Körnungen Asphaltmischgutsorten konzipiert werden. Die asphalttechnischen Untersuchungen wurden durch die TU München im Auftrag der BAST [1] vorgenommen. Die schalltechnischen Prüfungen erfolgten durch den Projektpartner Müller-BBM.

Die Erkenntnisse und Ergebnisse der Analysen sollten abschließend mit dem Bau eines Demonstrators bewertet werden, um Empfehlungen für den Einsatz in die Straßenbaupraxis formulieren zu können.



**Bild 5.2-1:** Aufbereitungsanlage der MAU für die Herstellung von EloMinit® (Quelle: Max Aicher Umwelt)

### 5.2.2 Bestandsuntersuchung von EloMinit®

Für das Forschungsprojekt werden bestimmte Ausgangsqualitäten benötigt, welche in Tabelle 5.2-1 aufgeführt werden.

PSV-Wert (Polierwiderstand)	49 bis 56
SZ-Wert (Schlagzertrümmerung)	22 bis 18 [einfach und zweifach gebrochen]
Kornformzahl SI	15
Korntrockenrohddichte	3,3 bis 3,8 g/cm <sup>3</sup>
Tausalzbeständigkeit	FTS < 5 %
Widerstand gegen Frost	F 4
Hitzebeanspruchung - Unterkorn	< 3 % + VSZ

**Tab. 5.2-1:** Basisuntersuchungen für die Prüfung und Klärung der Ausgangsqualität

Bei der Konzeption von Asphalt stellte sich heraus, dass der Sand mit der Körnung 0/3 aufgrund seiner ungünstigen Zusammensetzung nicht für die Herstellung von lärmoptimierten Asphalten geeignet ist. Auf die Verwendung von EOS-Sanden wurde in dem Vorhaben grundsätzlich verzichtet.

Die ersten Untersuchungen der TU München ergaben, dass ein mehrfaches Brechen einen positiven Einfluss auf die Gleichmäßigkeit, den Schlagzertrümmerungswert (SZ) sowie die Kornform hat. Die Kornformzahl SI des doppelt gebrochenen Materials lag bei allen drei Proben bei 0 M.-%. Die Werte der einfach gebrochenen Materialien lag zwischen 0 und 9 M.-%. Eine Veränderung war ebenfalls bei SZ-Werten zu erkennen. Die Kennwerte verbesserten sich bei dem doppelt gebrochenen Material von 19,4 auf 17,4 so wie von 17,3 auf 13,6.

Aus den Messergebnissen ist abzuleiten, dass neben dem Erstarrungsprozess vor allem die Aufbereitung (zweiter Brechvorgang, d. h. doppelt gebrochenes Material) einen positiven Einfluss auf die Kornform und SZ-Wert der Elektroofenschlacken mit sich bringt.

### 5.2.3 Aufbereitung der Elektroofenschlacke

Aufgrund neuer umweltrechtlicher Rahmenbedingungen war Nutzung des alten Schlackenbeetes nicht mehr möglich.

So erfolgte während des Untersuchungszeitraumes erfolgte eine Prozessänderung in der Schlackenherstellung. Die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen fanden Verwendung beim Bau des neuen Schlackenbeetes. Im Jahre 2012 erfolgten die Realisierung und der Bau des neuen Schlackenbeetes, welches einen hohen Umweltstandard aufweist (Bild 5.2-2).



**Bild 5.2-2:** Abkippen der flüssigen EOS am neu gebauten Schlackenbeet (Quelle: Max Aicher Umwelt)

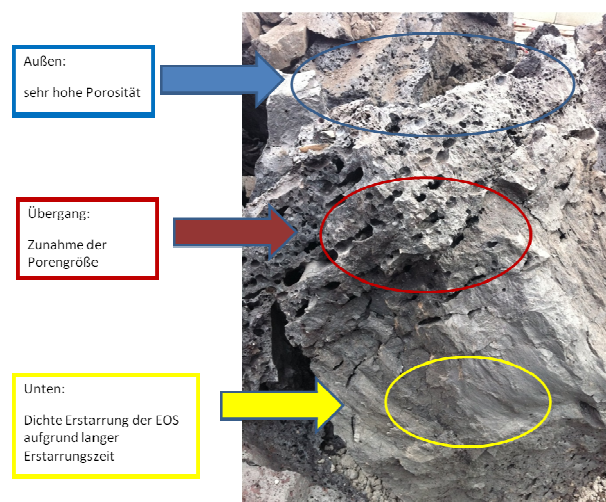
Als Zwischenlösung erfolgte die Abkühlung der Elektroofenschlacke direkt im Schlackenkübel (Bild 5.2-3).



**Bild 5.2-3:** Langsame Erstarrung der Elektroofenschlacke im Schlackenkübel (Quelle: Max Aicher Umwelt)

Eine Schlackencharge mit bekannter chemischer Zusammensetzung wurde im Schlackenkübel zu Versuchszwecken ohne weitere Zusatzmaßnahmen erstarrt, ausgekippt und unter Aufsicht gebrochen. Die Erstarrung im Schlackenkübel zeigte, dass sich über die Zeit unterschiedliche Erstarrungsmuster bildeten, welche in Bild 5.2-4 sehr gut zu erkennen sind. Die Probeentnahme erfolgte gezielt aus unterschiedlichen Erstarrungsbereichen des Monoliths. Bei den Untersuchungen soll der Einfluss der Erstarrungsgeschwindigkeit bei der Schlacke bei gleichbleibender Materialzusammensetzung qualitativ erfasst werden.

Die Untersuchungen der TU München an einem Monolithen, der nach Erstarrung im Schlackenkübel gewonnen wurde, haben interessante Erkenntnisse gebracht, welche in Tabelle 5.2-2 kurz zusammengefasst wurden. Im laufenden Forschungsvorhaben wurden diese Erfahrungen berücksichtigt. Alle gewonnenen Daten wurden genutzt, um die Planung und Realisierung des neuen Schlackenbeetes zu optimieren.



**Bild 5.2-4:** Erstarrung des Monolithen im Schlackenkübel (Quelle: TU München)

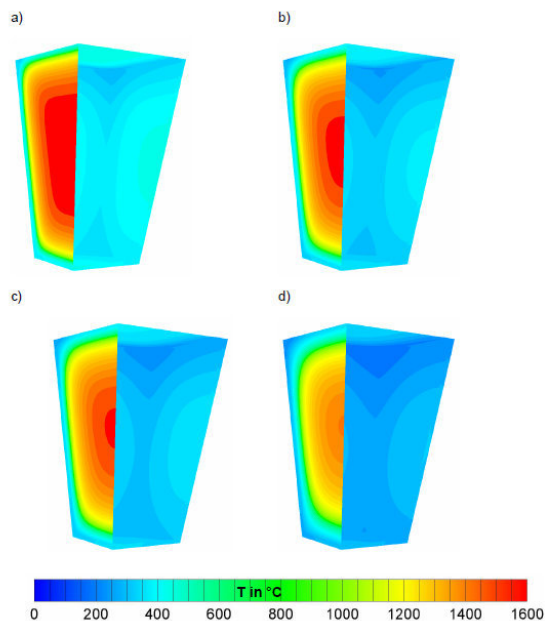
Folgende Ergebnisse konnten, wie in Tabelle 5.2-2 dargestellt, bei den weiteren Untersuchungen des Monoliths festgestellt werden:

- Sehr langsame Abkühlungsphasen im Kübelkern (nach zwei Tagen im Kern noch glühend)
- Unterschiedliche Materialkonsistenz im Verlauf zwischen Kübelwand und -kern
- Verbesserung des SZ-Wertes bei doppelt gebrochenen Material
- Die Kornformkennzahl verschlechtert sich gegenüber der konventionellen Schlackenabkühlung
- Große Unterschiede in der Rohdichte (lagebedingt)
- Die Brechart beeinflusst die Korngrößenverteilung - Prallmühle erzeugt bessere Ergebnisse

	Außenbereich Monolith		Innenbereich Monolith	
	Original (einfach gebrochen)	Prallmühle (doppelt gebrochen)	Original (einfach gebrochen)	Prallmühle (doppelt gebrochen)
Schlagzertrümmerungswert (SZ)	20,6	15,9	25,5	17,8
Kornformkennzahl $S_f$ [M.-%]	21,4	1,1	23,6	3,0
Trockenrohddichte $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	3,877	3,885	3,986	3,892

**Tab. 5.2.-2:** SZ-Werte der Einzelproben (8/12,5 mm)

Um eine Aussage über das Erstarrungsverhalten im Schlackenkübel zu erhalten, wurde das Temperaturverhalten über die Zeit mittels der CDF Methode simuliert. Auf Basis von echten Temperaturmessungen kann so die zeitliche Entwicklung des Erstarrungsverhaltens dargestellt werden, welches in Bild 5.2-5 gezeigt wird.



**Bild 5.2-5:** Wärmeentwicklung im Schlackenkübel nach CFD-Simulation nach a)  $t=3h$ , b)  $t=6h$ , c)  $t=9h$  und d)  $t=12h$  (Quelle: FEhS Institut)

#### 5.2.4 Auswahl und Prüfung des eingesetzten Materials

Im Versuchszeitraum 2012/2013 erfolgte die Untersuchung der Schlacke aus unterschiedlichen Herstellungsprozessen. Zur Optimierung des Endprodukts war die Bearbeitung der Schlacken mit unterschiedlichen Brechtypen vorgesehen. Folgende Materialien und Brechvorgänge wurden ausgewählt:

Material A	alte abgelagerte Schlacke aus dem alten Schlackenbeet
Material B	frische Schlacke aus Qualitätsstahlerzeugung Edeltaustahlproduktion (neues Schlackenbeet)
Material C	frische Schlacke aus Qualitätsstahlerzeugung Edeltaustahlproduktion (neues Schlackenbeet) [längere Abkühlungszeit gegenüber Material B]

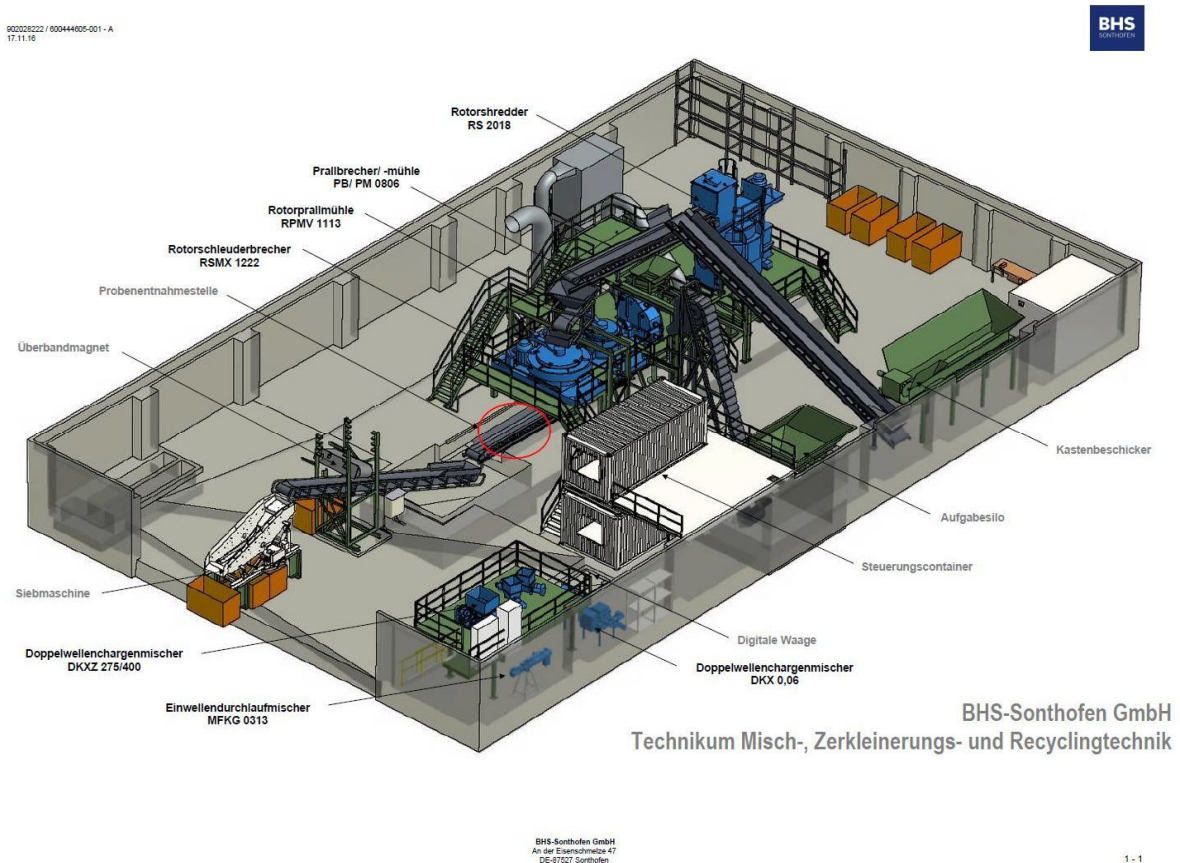
**Tab. 5.2-3:** Auswahl der eingesetzten Materialien

Alle drei Materialien wurden mit unterschiedlichen Vorbrechern bearbeitet:

- Prallbrecher der MAU in Meitingen,
- BHS Prallbrecher (PB) und
- BHS Rotorschredder (RS).

Für den anschließenden zweiten Brechvorgang wurden Rotorschleuder mit Ringpanzerung (RSMR) und Rotorschleuder mit Sandbett (RSMS) verwendet.

Das Bild 5.2-6 zeigt die Zerkleinerungsanlage vom Technikum BHS Sonthofen. Die für die Brechversuche verwendeten Rotorschleudern mit Ringpanzerung und Sandbett werden in den Bildern 5.2-7 und 5.2-8 dargestellt.



**Bild 5.2-6:** 3D Schemazeichnung vom Technikum BHS, Sonthofen (Quelle: BHS Sonthofen)



- Vorbrechen:
  - Prallbrecher der MAH in Meitingen,
  - BHS Prallbrecher (PB) und
  - BHS Rotorschredder (RS).
- zweiter Brechvorgang
  - Rotorschleuder mit Ringpanzerung (RSMR)
  - Rotorschleuder mit Sandbett (RSMS)



Hergestellt wurden 48 Varianten

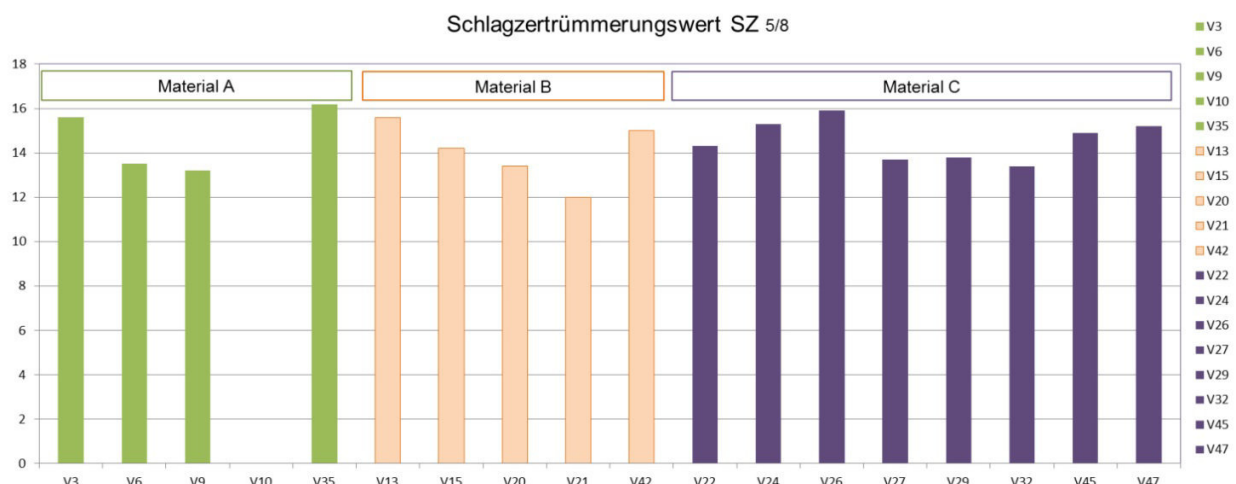
**Bild 5.2-7:** Rotorschleuder für Brechversuche (Quelle: TU München)



**Bild 5.2-8:** Wesentliche Versuchsreihen für das Materialbrechen erfolgten bei der Firma BHS, Sonthofen (Quelle: TU München)

Die SZ-Werte liegen bei allen Varianten in einem günstigen Bereich. Das Material C weist im Vergleich zu dem Material B geringere Schwankungen auf, was durch das langsamere Abkühlen im Schlackenbett, das zu einem dichteren und gleichmäßigeren Gefüge führt, bedingt ist. Für die weiteren asphalttechnologischen Untersuchungen wurde daher das Material C ausgewählt. Angesichts der geringen Menge an Gesteinskörnung aus den Versuchen im Technikum der BHS wurden für die ersten Versuche zur Asphaltkonzeption die in Bild 5.2-9 aufgeführten Varianten 1 und 2 ausgewählt.

Aufgrund der Endergebnisse wurde die geeignete Gesteinskörnung ausgewählt. Nach Berechnung des Hohlraumgehaltes und der Makrotextur-Messungen wurde die Rezeptur für die Asphaltmischungen PA 8 und PMA 5 abgeleitet und festgelegt.



**Bild 5.2-9:** SZ-Werte der unterschiedlichen Materialien (A/B/C) mit verschiedenen Varianten (Quelle: TU München)

Für die Versuche wurde dahingehend zunächst folgendes Material eingesetzt:

#### Variante 1

- Material C
- Big Bags Nr. 27, 29, 32
- Vorbrechen: BHS Sonthofen, 2. Brechvorgang: BHS Sonthofen
- Mittlere Rohdichte:  $3,617 \text{ g/cm}^3$
- SZ-Wert: 13,6
- PSV-Wert: 52

Aufgrund nicht ausreichender Mengen für die erforderlichen Analysen wurde auf eine weitere Charge mit folgender Bezeichnung BB 43-45, zurückgegriffen.

Lieferungsergänzung aus **Variante 2** (Lieferung am 28.03.2013)

- Material C
- Big Bags Nr. 43-45
- Vorbrechen: Max Aicher Umwelt, Meitingen; 2. Brechvorgang: BHS Sonthofen

- Mittlere Rohdichte: 3,545 g/cm<sup>3</sup>
- SZ-Wert: 15,1
- PSV-Wert: 51

In den folgenden Bildern (5.2-10, 5.2-11 und 5.2-12) werden die technischen Ergebnisse der Untersuchungen an der alten und neuen Schlacke einzeln dargestellt.

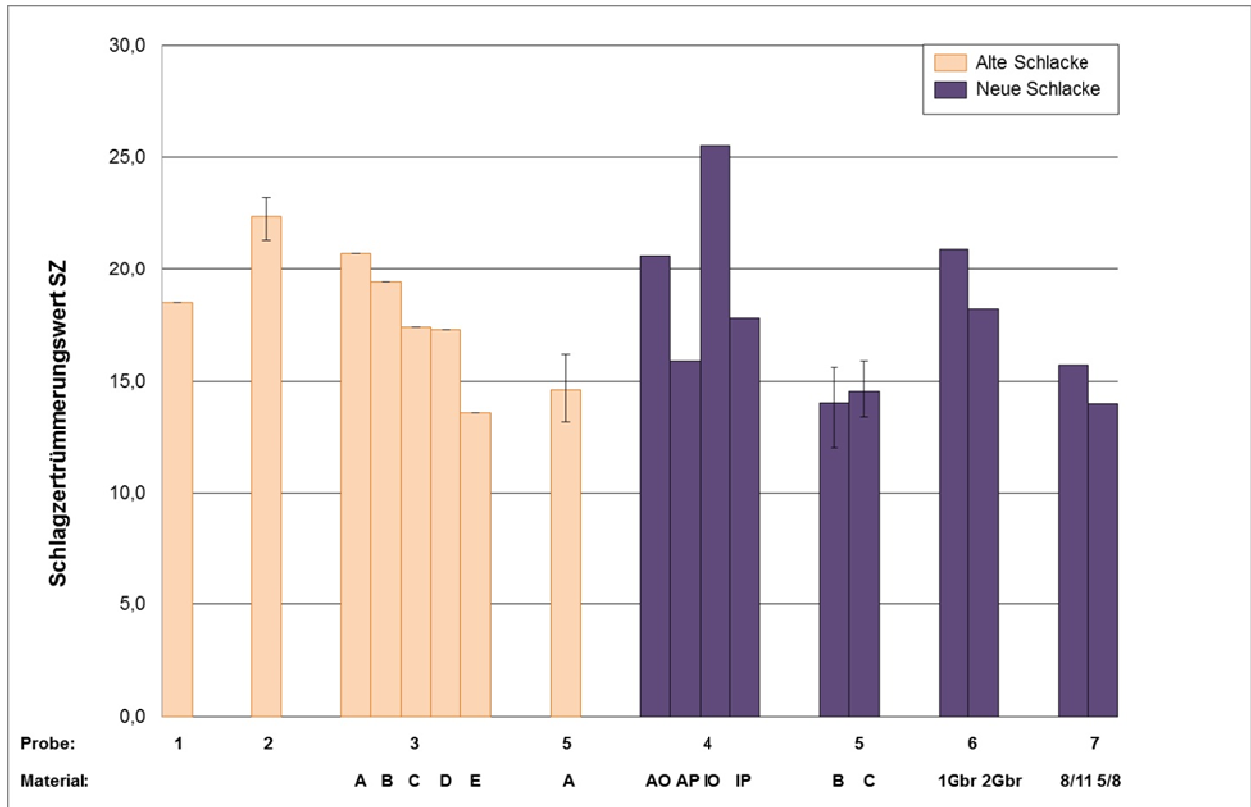


Bild 5.2-10: Darstellung der SZ-Werte des eingesetzten Materials (Quelle: TU München)

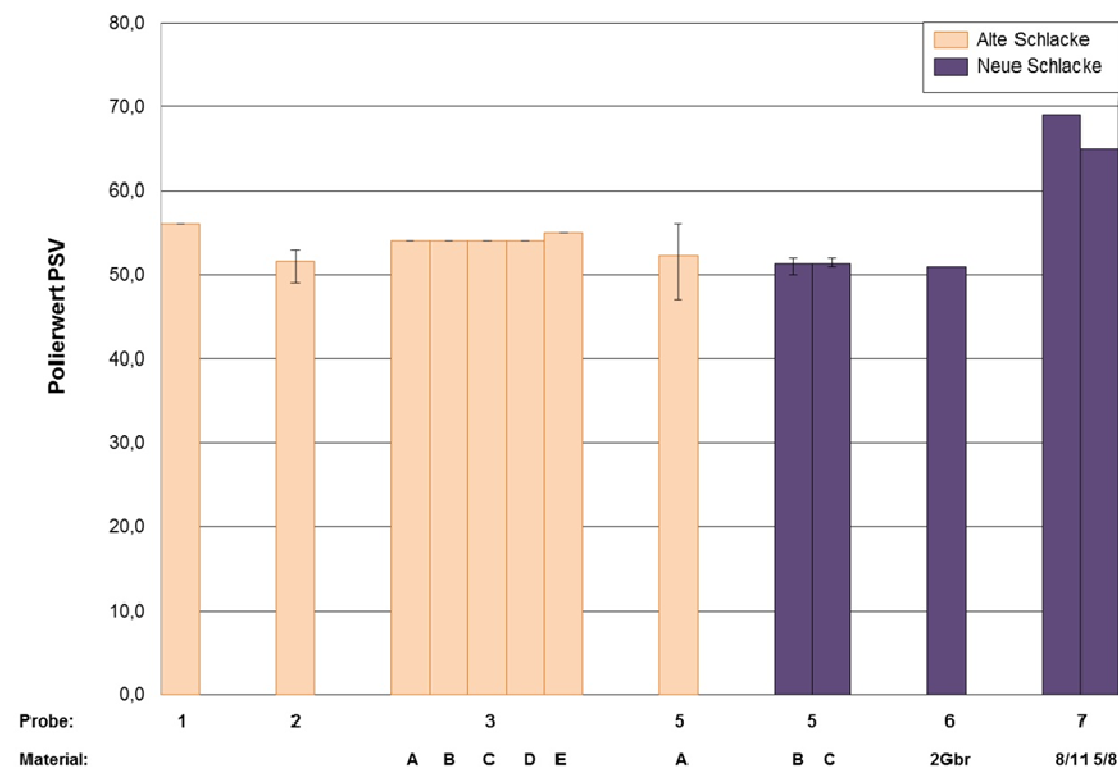


Bild 5.2-11: Darstellung des PSV-Wertes des eingesetzten Materials (Quelle: TU München)



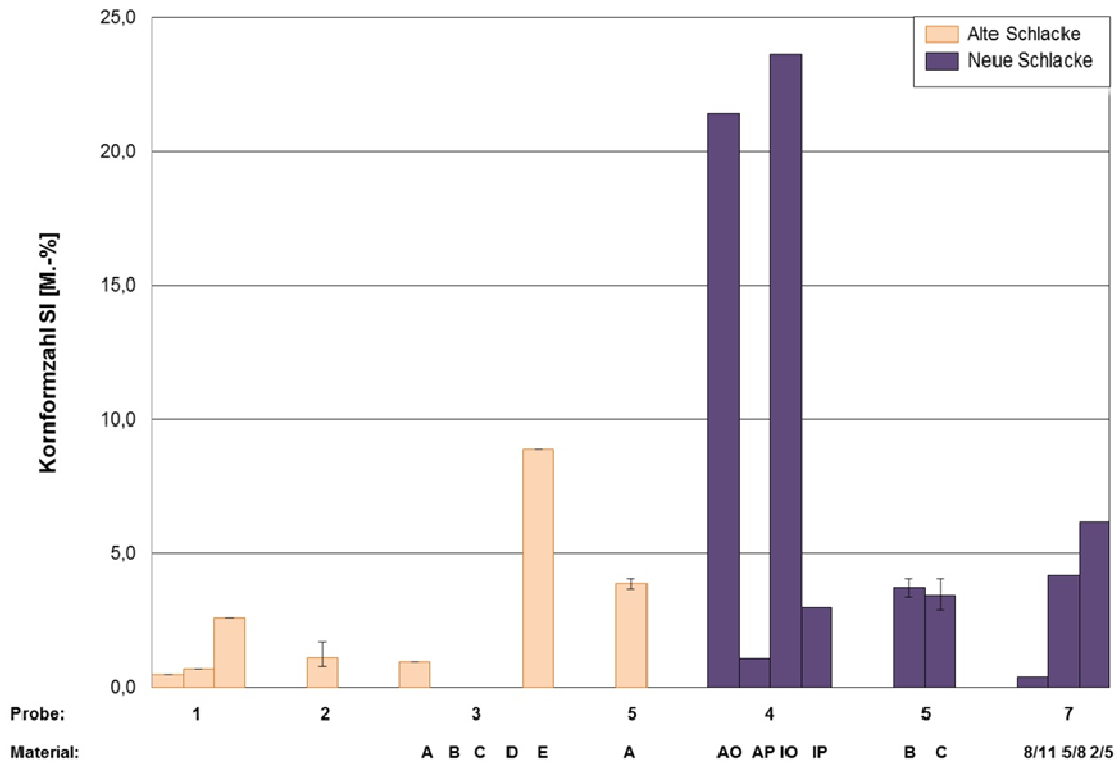
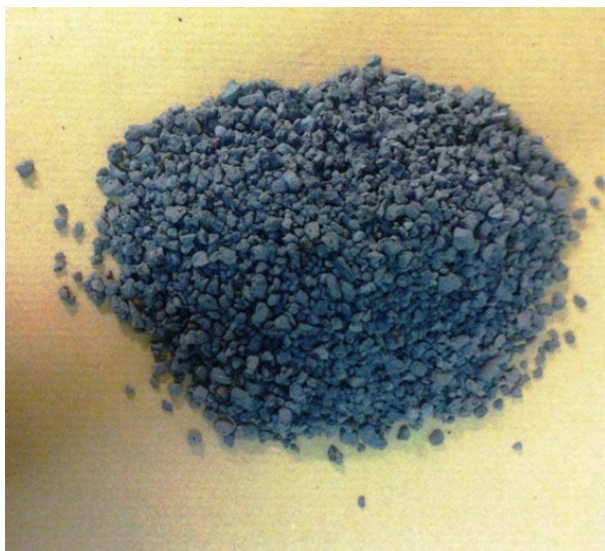


Bild 5.2-12: Darstellung der Kornform [SI] des eingesetzten Materials (Quelle: TU München)

### 5.2.5 Asphalttechnologie

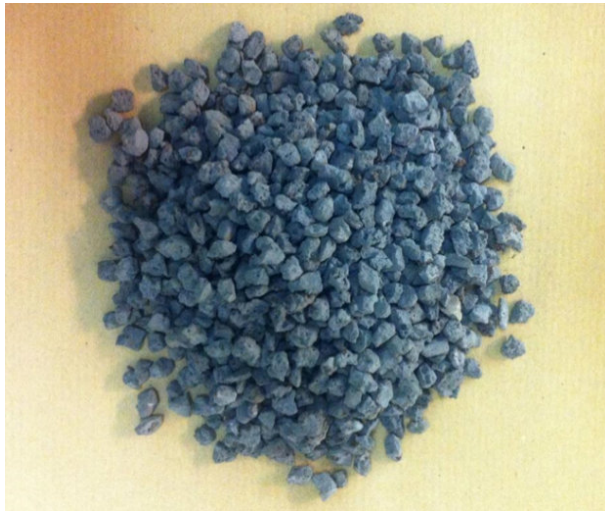
Für die orientierenden Asphaltuntersuchungen wurden aus den gelieferten Big Bags mit doppelt gebrochenem Material (Sammelprobe) die Kornklassen 2/5 und 5/8 ausgesiebt (Bild 5.2-13 und Bild 5.2-14). Anschließend wurden für den PMA 5 zwei Varianten mit unterschiedlichem Bindemittelgehalt und für den PA die Variante PA 8 konzipiert.

Asphaltdeckschichten aus PMA wurden in den vergangenen Jahren verstärkt gebaut, obwohl es noch kein festgeschriebenes und vertraglich verwertbares Prüfkonzept für diese Asphalte gibt. Eine Asphaltdeckschicht aus PMA hat im Idealfall eine offenporige Oberfläche, einen mittleren, dem Splittmastixasphalt ähnlichen Bereich und entspricht im unteren Bereich einem Gussasphalt.



Nr.	Hersteller / Lieferwerk	Korngruppe	Anteil [M.-%]
1	Max Aicher EOS	2/5	75
2	Natursand	0/2	5
3	Kalksteinmehl	0/0,063	20
4	Bindemittel: 10/40-65 A NV	Variante 1	6,9
		Variante 2	7,2

Bild 5.2-13: Material aus der Sammelprobe zweimal gebrochen, 2/5 Material – PMA 5 (Quelle: TU München)



Nr.	Hersteller / Lieferwerk	Korngruppe	Anteil [M.-%]
1	Max Aicher EOS	5/8	95,5
2	Kalksteinmehl	0/0,063	4,5
3	Arbocell ZZ		0,5
4	Bindemittel 10/40-65 A		6,5

**Bild 5.2-14:** Material aus der Sammelprobe zweimal gebrochen, 5/8 Material – PA 8 (Quelle: TU München)

Das Mischgut wurde im Labor per Hand (bei 160°C für den PA 8 bzw. 185°C für den PMA 5) hergestellt. Danach wurden folgende Probekörper hergestellt:

PA 8	Zwei Marshall-Probekörper mit 50 Schlägen je Seite bei 145°C nach TP Asphalt-StB, Teil 30
PMA 5	Drei Marshall-Probekörper mit 25 Schlägen auf eine Seite bei 175°C bzw. bei 185°C. Die Proben wurden nach der Verdichtung auf der beanspruchten Seite in der Form abgekühlt.

Für die weiteren Untersuchungen wurden Probekörper wie in Bild 5.2-15 hergestellt.



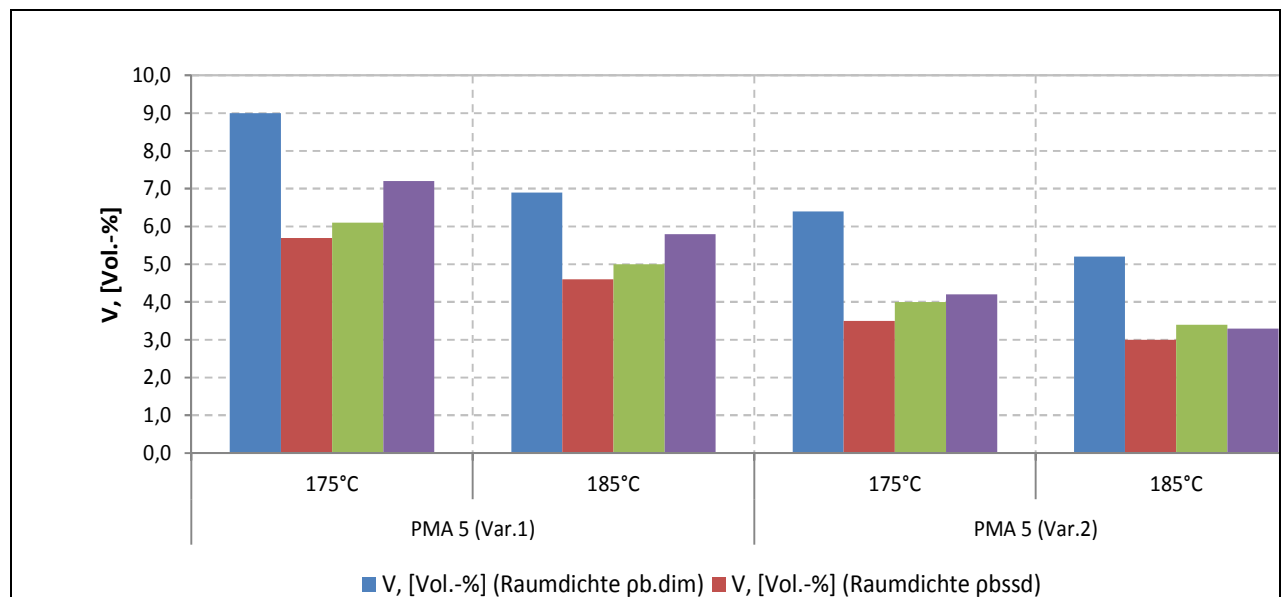
**Bild 5.2-15:** Verwendete Probekörper für anschließende Untersuchungen (Quelle: TU München)

Die Bestimmung der Raumdichten der PMA Proben wurde mit drei verschiedenen Verfahren durchgeführt und anschließend der Hohlraumgehalt berechnet. Des Weiteren erfolgte die Berechnung der Rauhtiefe mittels Makrotextur-Messung welches in Bild 5.2-16 dargestellt wird.

Hierbei stellt das pd.dim Verfahren die Bestimmung der Raumdichte mit Ausmessverfahren dar. Bei der pb.ssd-Methodik erfolgt die Bestimmung der Raumdichte mit dem Tauchwägewerfahren. pA stellt ein altes Tauchwägewerfahren da. Bei diesem Verfahren wird die Probe nicht abgetupft sondern 10 Sekunden lang abgetropft. Die Ergebnisse werden in Bild 5.2-17 dargestellt.

Herstellungs- temperatur	°C	PMA 5 Variante 1				PMA 5 Variante 2			
		175°C		185°C		175°C		185°C	
Probekörper Nr.	-	1	2	1	3	1	2	1	2
Masse Probe	g	1415,2	1424,3	1422,9	1445,0	1456,3	1444,1	1433,1	1461,2
Masse Probe mit Sand	g	1429,9	1437,1	1436,5	1458,0	1471,7	1461,8	1444,4	1474,6
Masse Sand	g	14,7	12,8	13,6	13,0	15,4	17,7	11,3	13,4
Volumen Sand	cm <sup>3</sup>	10,068	8,767	9,315	8,904	10,548	12,123	7,740	9,178
Durchmesser Probekörper	mm	101,5	101,7	101,5	101,7	101,5	101,9	101,6	101,5
Fläche	mm <sup>2</sup>	8091,37	8115,30	8091,37	8115,30	8091,37	8155,27	8109,87	8091,37
Mittlere Rauhtiefe	mm	<b>1,24</b>	<b>1,08</b>	<b>1,15</b>	<b>1,10</b>	<b>1,30</b>	<b>1,49</b>	<b>0,95</b>	<b>1,13</b>

**Bild 5.2-16:** Berechnung der mittleren Rauhtiefe mittels Makrotextur-Messung gem. DIN EN 13036-1:2010 (Quelle: TU München)



**Bild 5.2-17:** Bestimmung der Raumdichte und Berechnung der Hohlraumgehalte für die PMA-Proben (Quelle: TU München)

### Aufnahme von SMA 5S statt PMA ins Forschungsprogramm

In Abstimmung mit allen Beteiligten erfolgte eine Programmänderung - Herstellung eines SMA 5S statt PMA. Die Untersuchungen des PMA war in einem anderen Projekt bereits berücksichtigt und für den SMA 5S bestand noch weiterer Forschungsbedarf.

Durch die Neuanschaffung eines Brechers bei der MAU, der den gewachsenen Anforderungen für das Brechen der Edelsplitte entspricht, sowie der Umstellung einer Produktionsrezeptur bei den Lech-Stahlwerken, erfolgten erst ab Ende 2013 weitere Materialuntersuchungen.

Um den zeitlichen Forschungsrahmen nicht zu überziehen hat MAU, wie andere Teilnehmer des Projektes „Leiser Straßenverkehr“ eine Projektverlängerung beantragt - diese wurde genehmigt.

An den neuen Proben wurden zunächst folgende gesteintechnologischen Untersuchungen durchgeführt:

- Korngrößenverteilung
- Kornrohichte
- Wasseraufnahme
- Widerstand gegen Zertrümmerung (SZ, LA)
- Widerstand gegen Polieren (PSV)
- Affinität
- Widerstand gegen Hitzebeanspruchung
- Widerstand gegen Frost-/Tausalzbeanspruchung

Die Ergebnisse für die Untersuchung der Körnungen 2/5, 5/8 und 8/11 werden in Tabelle 5.2-4 zusammengefasst.

Körnung (mm)	2/5	5/8	8/11
Kornformkennzahl SI	6,2	4,2	0,4
Rohdichte	3,511	3,798	3,373
Wasseraufnahme	2,2	1,5	1,7
Schlagzertrümmerungswert SZ		14,0	15,7
Hitzebeanspruchung $\Delta$ SZ			0,9
Absplitterung			1,4
Frost-Tausalzbeständigkeit	0,6	0,4	0,5
Affinität 6 h		93	93
24 h		85	80
PSV		65	69

**Tab. 5.2-4:** Technische Eigenschaften der für den Versuch eingesetzten Gesteinskörnungen 2/5, 5/8 und 8/11 (Quelle: TU München)

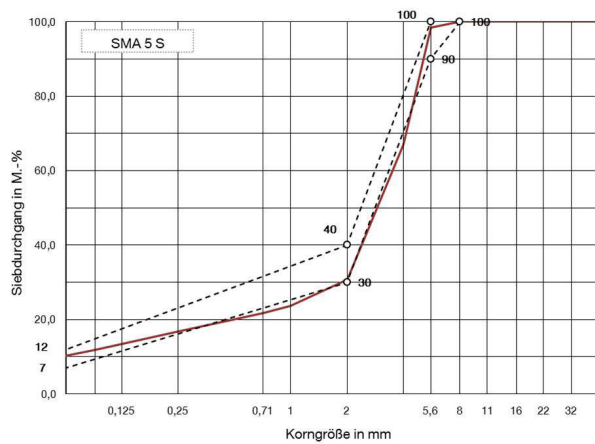
Die Probekörper mit der Körnung 2/5 (Bild 5.2-18) wurden nach folgender Rezeptur (Tabelle 5.2-5) hergestellt. Zuvor wurde die Korngrößenverteilung (Bild 5.2-19) der verwendeten Gesteinskörnung erstellt.



**Bild 5.2-18:** Beispiel der aus Erstprüfungen gewonnen Asphaltprobekörper – SMA 5 S (2/5 Material) (Quelle: TU München)

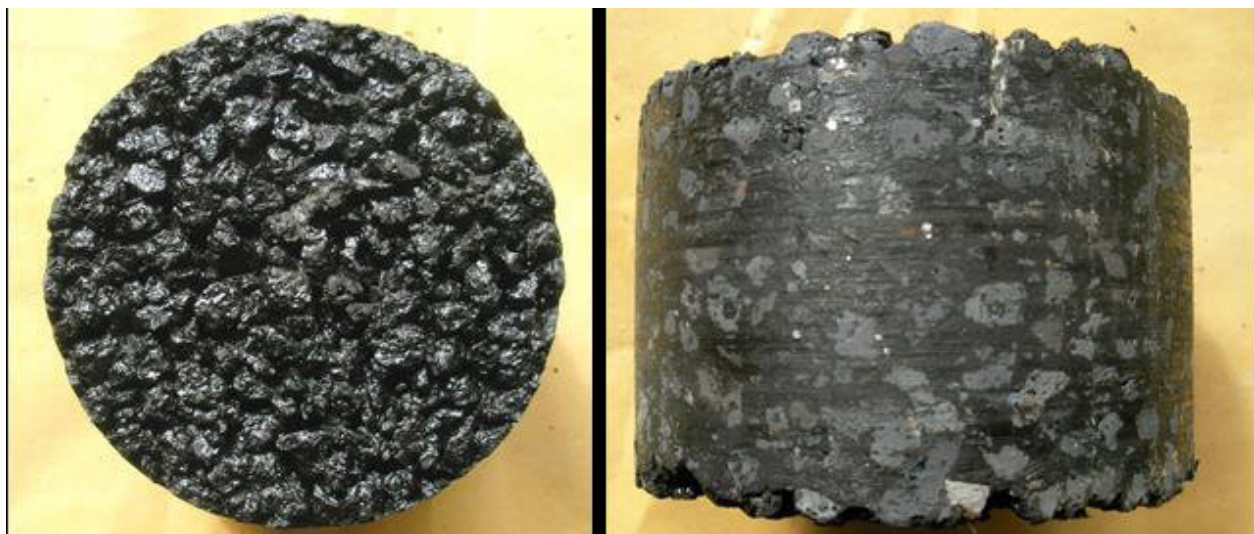
Nr.	Gesteinsart	Hersteller / Lieferwerk	Korngruppe/- klasse	Anteil [M.-%]
1	EOS	Max Aicher, Meitingen	2/5	72,0
2	Kiesbrechsand	Fa. Schulz, Gilching	0/2	23,0
3	Kalksteinmehl	Walhalla, Regensburg	0/ 0,063	5,0
4	25/55-55 A	OMV, Großmehring		7,0
5	Arbozel ZZ	JRS, Holzmühle		0,5

**Tab. 5.2-5:** Asphaltkonzeption SMA 5 S (Quelle: TU München)



**Bild 5.2-19:** Korngrößenverteilung des SMA 5 S (Quelle: TU München)

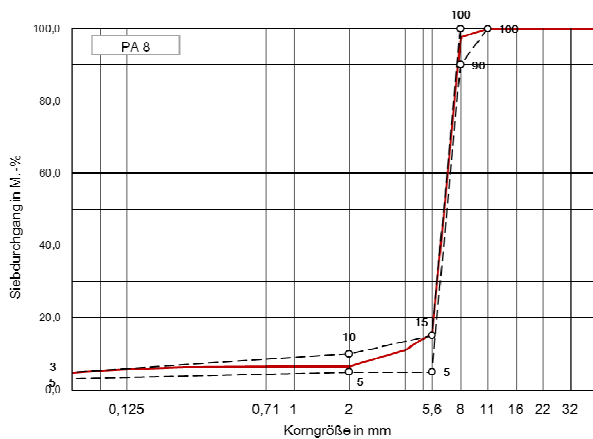
Für die Körnung 5/8 wurden die gleichen Untersuchungen durchgeführt. Es erfolgte die Erstellung der Korngrößenverteilung (Bild 5.2-21) und der Rezeptur (Tabelle 5.2-6) sowie die entsprechenden Probekörper (Bild 5.2-20).



**Bild 5.2-20:** Beispiel der aus Erstprüfungen gewonnenen Asphaltprobekörper - SMA 8 S (5/8 Material) (Quelle: TU München)

Nr.	Gesteinsart	Hersteller / Lieferwerk	Korngruppe/-klasse	Anteil [M.-%]
1	EOS	Max Aicher, Meitingen	5/8	85
2	EOS	Max Aicher, Meitingen	2/5	10,5
3	Kalksteinmehl	Walhalla, Regensburg	0/ 0,063	4,5
4	Olexobit SMA	BP,		7,2
5	Arbozel ZZ	JRS, Holzmühle		0,4

**Tab. 5.2-6:** Asphaltkonzeption PA 8 (Quelle: TU München)



**Bild 5.2-21:** Korngrößenverteilung des PA 8 (Quelle: TU München)

Anschließend wurden an den beiden eingesetzten Gesteinskörnungen asphalttechnologische Untersuchungen durchgeführt (Tabelle 5.2-7). Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse wurde die Rezeptur für die Herstellung der Probekörper festgelegt.

	PA 8		SMA 5 LA	
Bindemittelgehalt, Vol.-%	6,1	6,6	7,0	7,4
Rohdichte $\rho_m$ , [g/cm <sup>3</sup> ] nach TP Asphalt-StB, Teil 5	3,073	2,941	2,931	2,909
Raumdicke MPK $\rho_{0,cm}$ , [g/cm <sup>3</sup> ] nach TP Asphalt-StB, Teil 6/D	2,427	-	-	-
Raumdicke MPK $\rho_{best}$ , [g/cm <sup>3</sup> ] nach TP Asphalt-StB, Teil 6/B	-	2,753	2,771	2,775
Hohlraumgehalt V, [Vol.-%] nach TP Asphalt-StB, Teil 8	21,0	6,4	5,5	4,6

**Tab. 5.2-7:** Ergebnisse der Asphaltuntersuchungen (Quelle: TU München)



MBTM 04-A2-23500-140518 SMA 5 PmB 25-55-65, S,  
MA Sulzau, Paß Lueg - Mischanweisung

Asphaltort	Bindemittel	Typ	GK	eingesetzte GK	Nr. der MA
SMA 5	PmB 25/55-65	S		DB/EOS	23500
Deutschland					
zulässiger Bereich der Erzeugungstemperatur		160	bis	180	°C
Art des Mischanlagenbetriebes		JA	Sieb	NEIN	Bypass
Vordosierung				Gesamt	
Handelsbezeichnung	Produktionsstätte	Typ	Vordosierung	Anteil <sup>1)</sup>	
EBK 0/2	Saalfelden, Diabaswerk	Diabas	-	25	
2/5	Max Aicher	EOS	-	75	
Heißdosierung					
Fraktion mm	Heißdos. Nr.	Anteil M.-% <sup>2)</sup>	je Charge kg	Summe kg	
Bypass	1				
0 - 2 (0,15)	2	27,0	270	270	
2 - 4 (0,5)	3	52,6	526	796	
4 - 8 (0,8)	4	5,0	50	846	
8 - 11 (1,2)	5				
11 - 16 (1,8)	6				
16 - 22 (2,5)	7				
> 22	-				
Haftmittel <sup>3)</sup>					
Fasertstoff <sup>4)</sup>	Viatop Premium	0,4	4	850	
Ausbauesphalt <sup>5)</sup>					
Eigenfüller		8,0	80	930	
Fremdfüller					
Bitumen 1	PmB 25/55-65	7,0	70	1.000	
Bitumen 2					
Gesamt		100,0	1.000	1.000	

<sup>1)</sup> bezogen auf 100% Gesteinskörnungen  
<sup>2)</sup> bezogen auf das Bindemittel  
<sup>3)</sup> bezogen auf 100% Asphaltmischgut

Feuchtbitt und eingebaute durchfall	eingefügt ab (Datum und Uhrzeit):
-------------------------------------	-----------------------------------

**Bild 5.2-23:** Mischanweisung SMA 5 S (Quelle: TEERAG-ASDAG AG)

Die Asphalttragschicht wurde ebenfalls mit der Gesteinskörnung aus EloMinit® hergestellt.

In Zusammenarbeit mit der TEERAG-ASDAG AG (Niederlassung Salzburg), die Erfahrungen hinsichtlich dem Einsatz von Stahlwerksschlacken im Asphalt besitzen, konnte in Abstimmung mit der TU München eine Optimierung der Rezeptur vorgenommen werden. Die Parkplatzfläche wurde in der Mitte geteilt und die zwei Asphaltmischungen SMA 5 S sowie OPA 8 erfolgreich eingebaut (Bild 5.2-24).

Die zwei Probefelder aus PA 8 und SMA 5 S wurden im Mai 2014 auf dem Betriebsgelände (Mitarbeiterparkplatz) des Unternehmens Stahlwerk Annahütte in Hammerau eingebaut (Bild 5.2-25 und Bild 5.2-26).



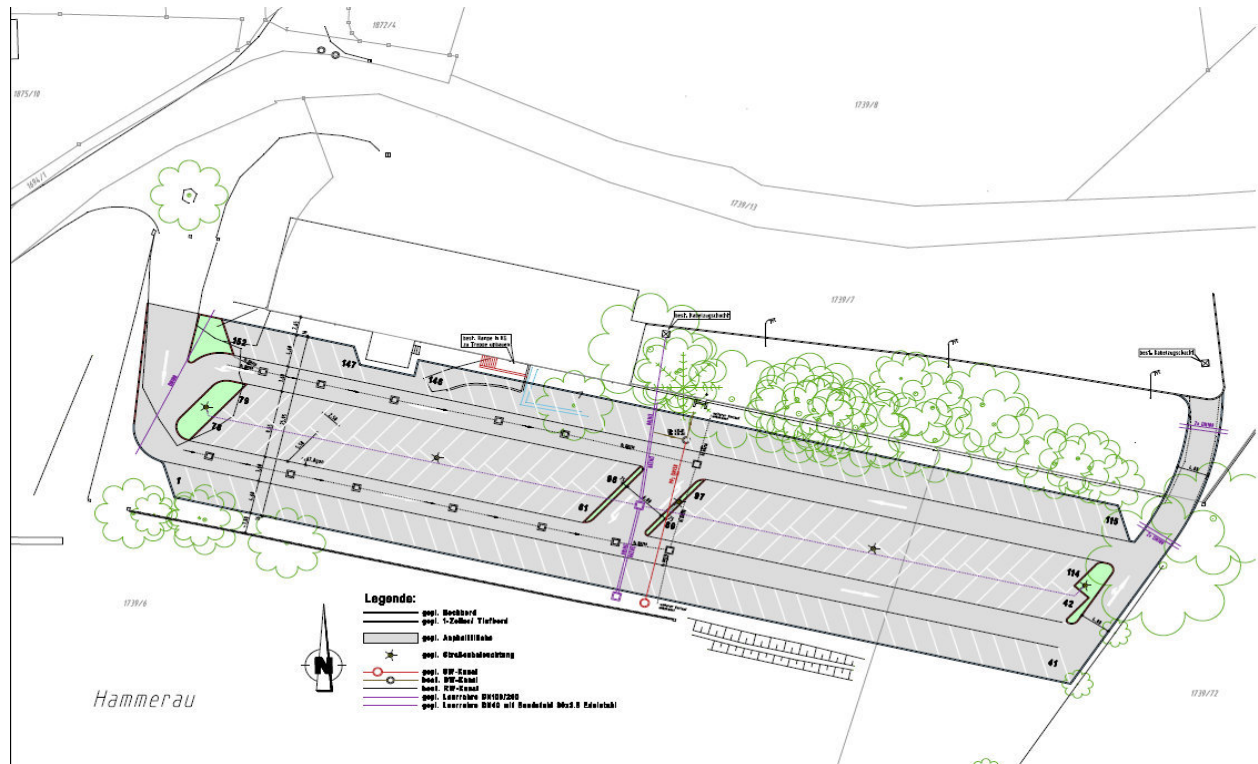


Bild 5.2-24: Lageplan Parkplatz Stahlwerk Annahütte (Quelle: Stahlwerk Annahütte)



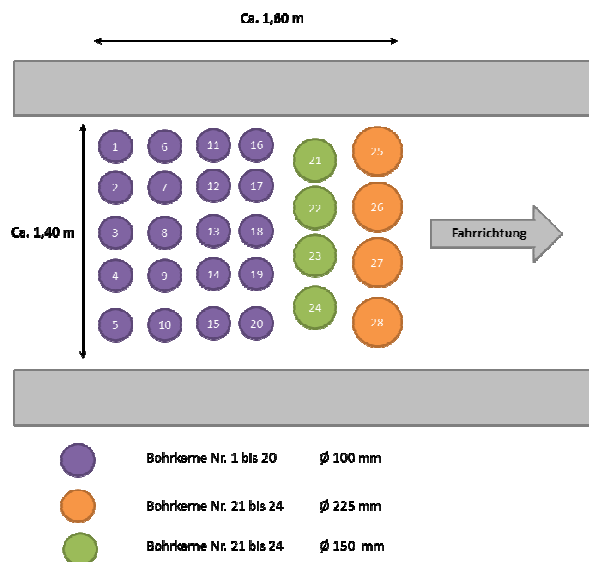
Bild 5.2-25: Aufnahmen während des Einbaus der zwei Asphaltbeläge SMA 5 S und PA 8 – linke Hälfte (Blick nach Süden) PA 8 und rechte Hälfte SMA 5 S (Quelle: Max Aicher Umwelt)



**Bild 5.2-26:** Weitere Bilder, die den Einbau der zwei Asphaltbeläge zeigen (Quelle: Max Aicher Umwelt)

### Probeentnahme und Untersuchungsprogramm

Nach Herstellung der Versuchsfelder wurden die Bohrkernentnahmen laut Vorgabe von der TU München von der Baufirma entnommen, um weitere Laboruntersuchungen durchführen zu können. Das Bohrkernentnahmeschema wird in Bild 5.2-27 dargestellt.



**Bild 5.2-27:** Bohrkernschema laut Vorgabe der TU-München zur Entnahme auf der Baustelle (Quelle: TU München)

Das Asphaltmischgut wurde hinsichtlich seiner Zusammensetzung (Bindemittelgehalt, Korngrößenverteilung) sowie der volumetrischen asphalttechnologischen Kennwerte untersucht. An den Bohrkernen wurde Hohlraumgehalt und Verdichtungsgrad ermittelt.



Untersuchungsbefund						
Untersuchungsgegenstand	Ergebnis	Anforderungen gem. Erstprüfung	Anforderung an SMA 5 S gem. TL Asphalt-StB 07	Toleranzbereich SMA 5 S gem. ZTV Asphalt-StB 07		
<b>1. Äußere Beschaffenheit</b>	Mischgut normal, schwarzglänzend, Gesteinskörnung vollständig umhüllt					
<b>2. Bindemittelgehalt</b> [M.-%]						
gesamt	7,1	7,0	≥ 7,4	6,6 - 7,4		
lösliche Anteile	6,79					
unlösliche Anteile	0,27					
Wassergehalt Ofentrocknung	< 0,1					
<b>3. Kornzusammensetzung</b> [M.-%]						
Korngröße [mm]	Rückstand	Durchgang	Durchgang	Durchgang		
8,0	0,0	100,0	k. A.	100		
5,6	0,2	99,8	k. A.	90 - 100		
2,0	68,6	31,2	k. A.	30 - 40		
1,0	5,9	25,3	k. A.			
0,25	7,6	17,7	k. A.			
0,125	3,3	14,4	k. A.			
0,063	2,5	11,9	k. A.	7 - 12		
< 0,063	11,9	-	-	-		
Gehalt an						
grober Gesteinskörnung > 2 mm	68,8	k. A.	60 - 70			
feiner Gesteinskörnung 0,063 - 2 mm	19,3	k. A.				
Füller < 0,063 mm	11,9	k. A.	7 - 12			
<b>4. Art der Gesteinskörnungen</b>	Schlacke, vereinzelt Kiessplitt, Biechensand und Füller sowie Faserstoffe (Pellets teilweise nicht aufgeben)					
<b>5. Stabilisierender Zusatz</b>						
a) Art der Zusätze		Viatop premium				
b) Gehalt im Mischgut [M.-%]		0,4	0,3 - 1,5			
<b>6. Eigenschaften des Bindemittels</b>						
a) Art des result. Bindemittels	Bitumen normal	25/55-55				
b) Klebekraft bei 20 °C						
c) Erweichungspunkt RuK [°C]	63,6				≤ 71	
d) Elastische Rückstellung [%]	74				≥ 40	
Ausziehlänge [cm]	20					
<b>7. Mischgutröhldichte</b> $\rho_m$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,922					
<b>8. Eigenschaften des Marshall-Probekörpers</b>						
Verdichtung mit 2 x 50 Schlägen bei 145 °C						
a) Raumdichte $\rho_{\text{best}}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,869					
b) Hohlraumgehalt V [Vol.-%]	1,8		2,0 - 3,0	1,0 - 4,0		

**Bild 5.2-29:** Zusammensetzung der Untersuchungsergebnisse von großtechnisch hergestelltem Asphaltmischgut SMA 5 S (Quelle: TU München)

Die Hohlraumgehalte der Bohrkerne aus SMA 5 S liegen mit Werten zwischen 6,0 und 6,8 Vol.-% über den für einen SMA 5 S nach TL Asphalt üblichen Hohlraumgehalten von maximal 5,0 Vol.-%. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die Verdichtungsgrade mit 95,6 bis 96,4 % deutlich unterhalb der geforderten 98 % liegen und am Marshall-Probekörper ein Hohlraumgehalt von 1,8 Vol.-% festgestellt worden war. Hier bleibt abzuwarten, wie sich der Belag während der Gebrauchsdauer verhalten wird.

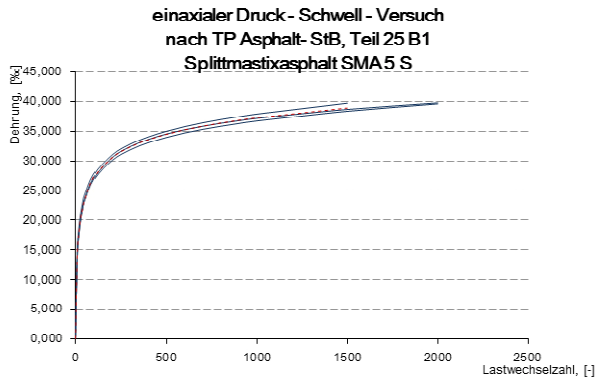
Die Hohlraumgehalte der Bohrkerne aus PA 8 liegen mit Werten zwischen 24,2 und 25,7 Vol.-% auf dem gewünscht hohen Niveau.

Die Zusammensetzung des SMA 5 S erfüllt unter Berücksichtigung der Toleranzen der ZTV Asphalt-StB 07/13 die Anforderungen der TL Asphalt-StB 07/13. Dabei ist jedoch festzustellen, dass von der final eingesetzten Asphaltmischung nur eine Mischanleitung zur Verfügung gestellt wurde. Das aus dem Asphaltmischgut rückgewonnene Bindemittel zeigt keine extreme Verhärtung auf und lässt aufgrund der ermittelten Eigenschaften auf eine weiterhin gute Elastizität schließen.

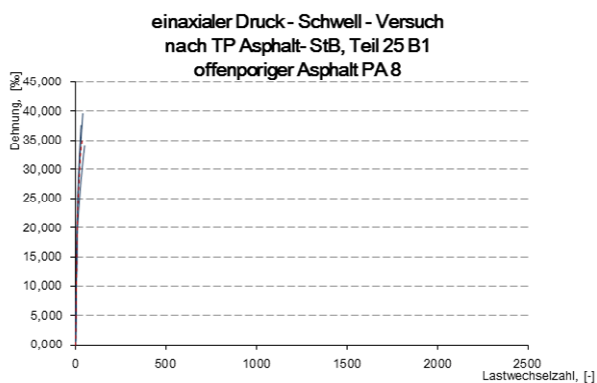
Die Zusammensetzung des PA 8 erfüllt unter Berücksichtigung der Toleranzen der ZTV Asphalt-StB 07/13 die Anforderungen der TL Asphalt-StB 07/13 nicht, was jedoch aufgrund der Verwendung des Stützkornes 2/5 mm zu erwarten war. Dabei ist wiederum festzustellen, dass von der final eingesetzten Asphaltmischung nur eine Mischanleitung zur Verfügung gestellt wurde. Das aus dem Asphaltmischgut rückgewonnene Bindemittel zeigt zwar eine deutliche Erhöhung des Erweichungspunktes Ring und Kugel, der Wert der elastischen Rückstellung liegt aber auf einem extrem hohen und günstigen Niveau, was auch hier auf eine weiterhin gute Elastizität schließen lässt.

Aus den Versuchen zum Gebrauchsverhalten können die nachfolgend aufgeführten Schlüsse gezogen werden.

Der einaxiale Druck-Schwellversuch nach TP Asphalt-StB, Teil 25 B1 wurde nur für die im Labor gewonnenen Proben durchgeführt. Bei beiden Asphaltvarianten zeigte sich ein extrem frühes Versagen. Die bei konventionellen Walzasphalten zu erreichenden 10.000 Lastwechsel wurden bei keiner der Proben erreicht, die offenporigen Asphalte hatten die Maximaldehnung von 40 % bereits nach 50 Lastwechseln erreicht, bei den SMA 5 S waren es 1500 bis 2000 Lastwechsel.



**Bild 5.2-30:** Einaxialer Druck-Schwellversuch SMA 5 S - Dehnung bei den untersuchten Asphalten in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl (Quelle: TU München)



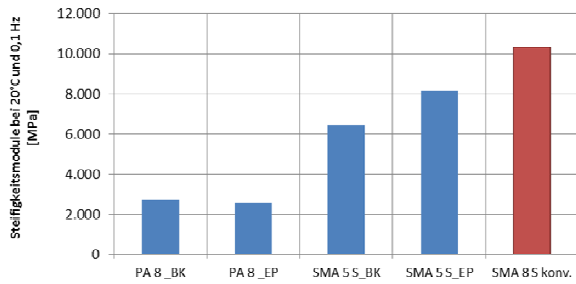
**Bild 5.2-31:** Einaxialer Druck-Schwellversuch PA 8 - Dehnung bei den untersuchten Asphalten in Abhängigkeit von der Lastwechselzahl (Quelle: TU München)

War das schnelle Versagen bei dem offenporigen Asphalt zu erwarten, so wundert das Ergebnis bei dem Splittmastixasphalt. Offensichtlich hat hier der Hohlraumfüllungsgrad mit 89 % einen erheblichen Einfluss auf das Verformungsverhalten.

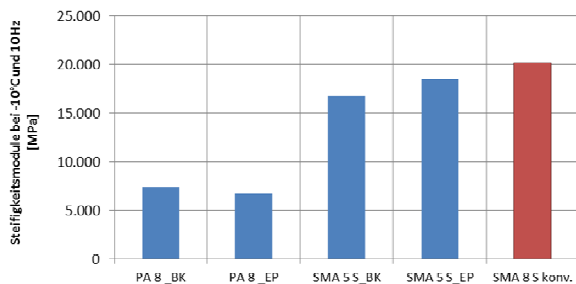
Die ermittelten Ermüdungsfunktionen sind in dem oben dargestellten Bild 5.2-30 eingetragen. Zu finden ist hier einerseits der Vergleich zwischen den an Laborproben (EP) und an Bohrkernen (BK) ermittelten Ergebnisse für den PA 8 und den SMA 5 S, andererseits ist orientierend auch das Ergebnis eines konventionellen SMA 8 S mit eingetragen.

Die Ergebnisse zur Ermittlung der Steifigkeit sind in nachfolgenden Bildern 5.2-31 und 5.2-32 für beide Asphaltvarianten dargestellt.

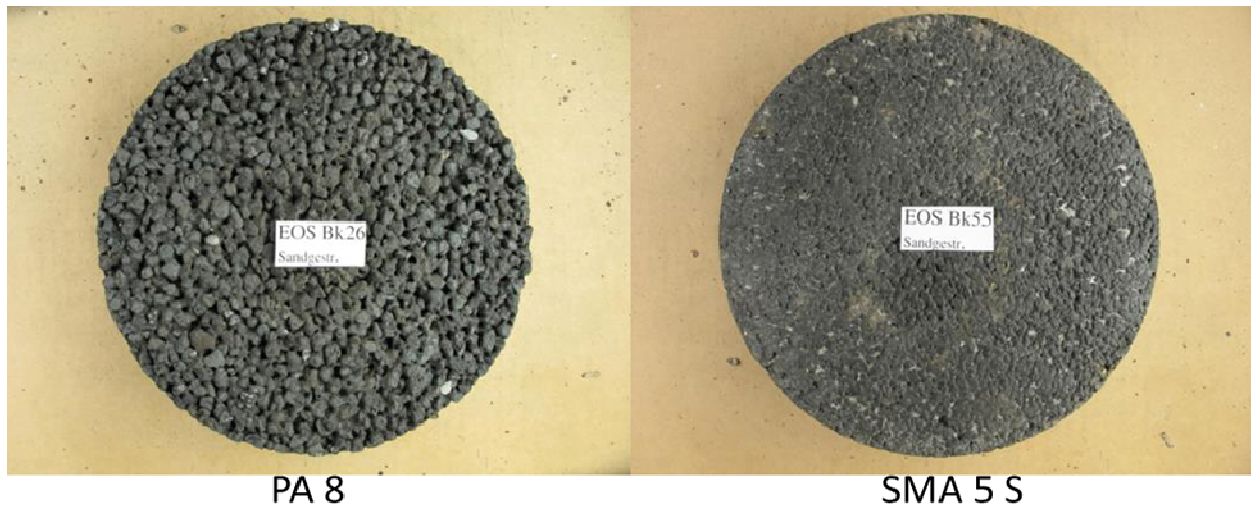
Auch hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Kennwerte ermittelt an der Laborprobe (EP) und ermittelt am Bohrkern (BK). Die vergleichend aufgeführten Steifigkeiten des konventionellen SMA 8 S liegen über den ganzen Temperaturbereich auf einem höheren Niveau, dies ist vor allem bei dem PA 8 zu erkennen. Die bei einer Frequenz und einer Temperatur ermittelten Steifigkeitsmodule sind in den Bildern 5.2-31 und 5.2-32 aufgetragen und zeigen für diese Kombination explizit nochmals die soeben dargestellten Erkenntnisse.



**Bild 5.2-32:** Steifigkeitsmodul bei 20°C und 0,1 Hz für die untersuchten Asphaltvarianten (Quelle: TU München)

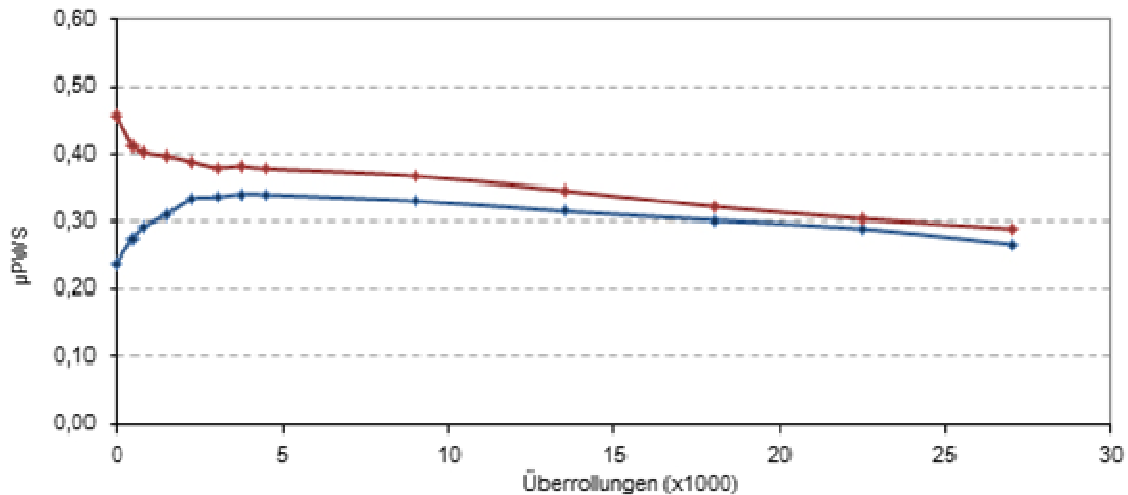


**Bild 5.2-33:** Steifigkeitsmodule bei -10°C und 10 Hz für die untersuchten Asphaltvarianten (Quelle: TU München)

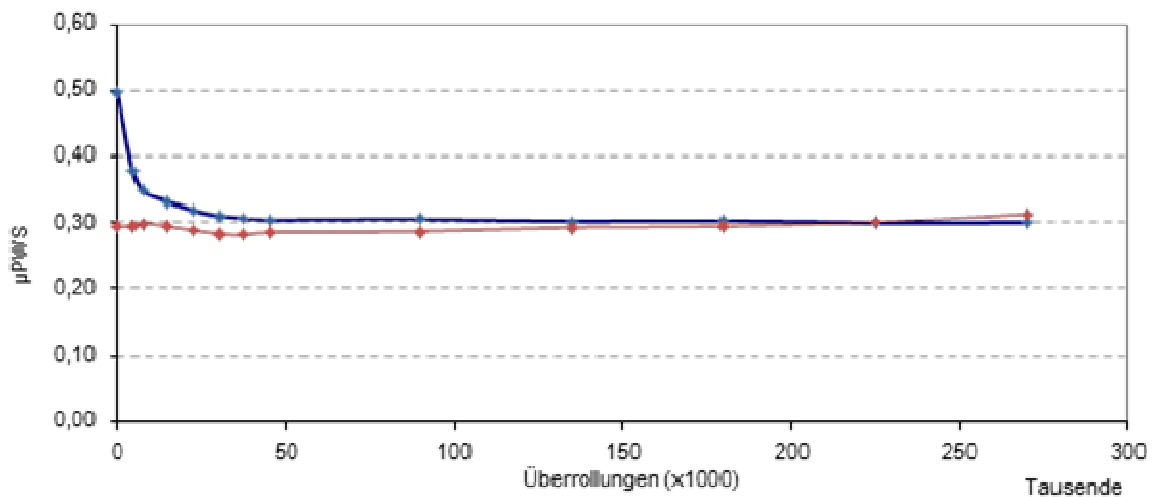


**Bild 5.2-34:** Oberflächen der zu prüfenden Bohrkerne (Quelle: TU München)

Die Prognose der Griffigkeitsentwicklung mit dem Prüfgerät Wehner-Schulze erfolgte nur an den entnommenen Bohrkerne. Vor der Ermittlung der Griffigkeitsentwicklung wurden die Oberflächen der Bohrkerne durch gezieltes Sandstrahlen von dem Bindemittelfilm befreit. In Bild 5.2-33 sind die zu prüfenden Bohrkerneoberflächen dargestellt.



**Bild 5.2-35:** mit PWS ermittelte Griffigkeitsentwicklung des SMA 5 S (Quelle: TU München)



**Bild 5.2-36:** mit PWS ermittelte Griffigkeitsentwicklung des PA 8 (Quelle: TU München)

In Bild 5.2-34 sind die Griffigkeitsentwicklungen der untersuchten Proben wiedergegeben. Die Griffigkeitsentwicklungen entsprechen nicht den gewohnten Verläufen und Endgriffigkeiten. Beim PA 8 sind die hohen Werte sicherlich auch darauf zurückzuführen, dass bei der Griffigkeitsmessung nicht der erforderliche Wasserfilm vorhanden ist, so dass sich eine höhere Griffigkeit darstellt als sie in Wirklichkeit vorhanden ist. Beim SMA 5 S ist vor allem der Verlauf für Bohrkern 55 auffällig, da hier während der ersten 50.000 Überrollungen eine deutliche Erhöhung der Griffigkeit auftritt. Unabhängig davon zeigen beide Proben auch nach 270.000 Überrollungen noch eine Tendenz zur weiteren Griffigkeitsabnahme.

Bei der parallel durchgeführten Ermittlung der Rauhtiefen mit dem ELA-Textur-Messgerät, das dem Sandfleckverfahren vergleichbare Ergebnisse erbringt, ergab sich eine Rauhtiefe für den PA 8 von 1,55 mm bei einem Gestaltfaktor von 69,9, für den SMA 5 S eine Rauhtiefe von 0,51 mm bei einem Gestaltfaktor von 77,1.

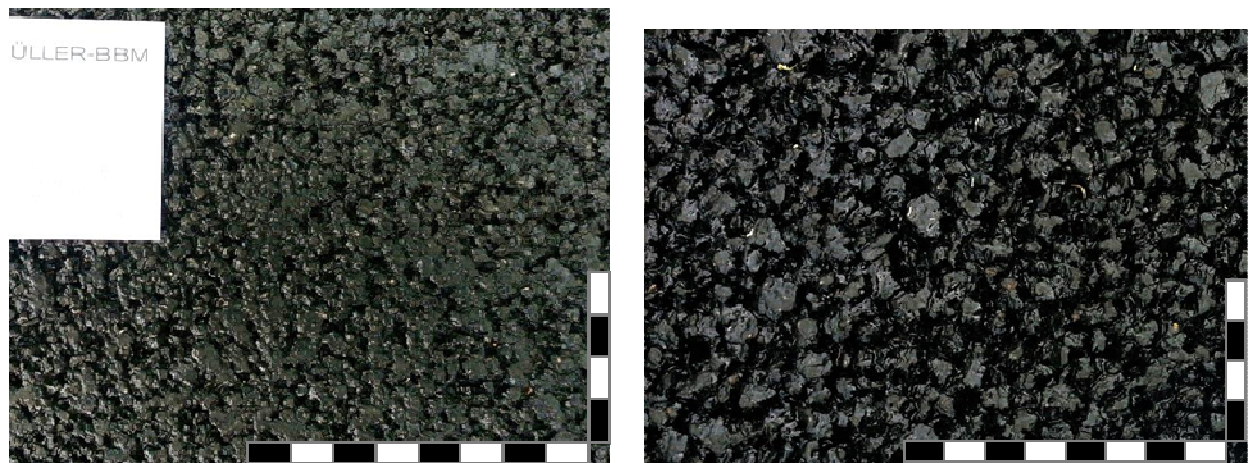
## Durchführung der schalltechnischen Messungen



**Bild 5.2-37:** Fertig eingebaute Fahrbahndeckschichten mit EOS auf dem Parkplatz der Annahütte bei Freilassing; die linke Hälfte der Fläche ist mit SMA 5 versehen, die rechte mit PA 8.

Bild 5.2-37 zeigt die fertiggestellte Fahrbahndecke und die Oberfläche beider Deckschichten. Die Schalltechnischen Messungen erfolgten mit Hilfe des Nahfeldmessverfahrens (CPX-Messverfahren) nach ISO/DIS 11819-2 durch den Projektpartner Müller-BBM.

Bild 5.2-38 zeigt Fotografien der Oberflächen der beiden Deckschichten.



**Bild 5.2-38:** Fotografien der Fahrbahnoberfläche. Links: SMA 5 S, rechts: PA 8.

Die Messungen erfolgten am 26. Mai 2014. Dabei kamen die Normmessreifen P1 und H1 zum Einsatz (Bild 5.2-39):

- Reifen P1: Uniroyal Tiger Paw SRTT  
225/60 R16  
Ser. APX0 EVUU 0512
- Reifen H1: AVON AV4  
195/80 R14  
Ser. ATJ8 PC 2610

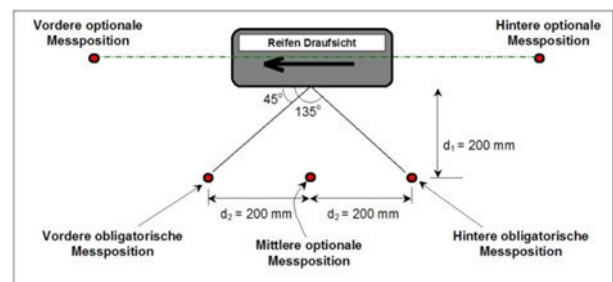
Der Reifenluftdruck wurde vor der Messreihe überprüft und gemäß den Anforderungen der Norm auf 2,0 bar eingestellt. Die Messgeschwindigkeiten betragen nominell 30 km/h und 50 km/h.





**Bild 5.2-39:** Verwendete Messreifentypen nach ISO/DIS 11819-2.

Für die Messungen wurde ein geschlossener Einachsanhänger verwendet, der den akustischen Anforderungen nach ISO/DIS 11819-2 entspricht. Der Messanhänger wurde mit jeweils zwei Reifen desselben Typs bestückt. Die Mikrofonpositionen entsprachen den in der genannten Norm beschriebenen obligatorischen Messpositionen. Die Mikrofonhöhe betrug 10 cm über Fahrbahnoberkante. Messanhänger und Messanordnung sind in Bild 5.2-40 dargestellt.



**Bild 5.2-40:** CPX-Messung. Links: geschlossener Messanhänger nach ISO/DIS 11819-2; rechts: Anordnung der Mikrofone in Relation zum Messreifen.

Es wurden nacheinander Messungen mit den Messreifensätzen P1 und H1 durchgeführt. Dabei wurden an jedem der beiden Messreifen die A-bewerteten Schalldruckpegel mit der Zeitkonstante "FAST" an den obligatorischen Messpositionen vor und hinter der Reifenaufstandsfläche ermittelt. Zusätzlich wurden die Luft- und Fahrbahnoberflächentemperatur sowie die Fahrzeuggeschwindigkeit aufgezeichnet.

Aus den gemessenen ortsabhängigen Schalldruckpegeln  $L_{p,P1}$  und  $L_{p,H1}$  wurden durch energetische Mittelung über Fahrbahnabschnitte von 5 m Länge CPX-Pegel  $CPXP_{1,5m}$  und  $CPXH_{1,5m}$  für jede Messmikrofonposition gebildet. Im Anschluss wurden die an den obligatorischen Mikrofonpositionen ermittelten CPX-Pegel  $CPX_x, 5m$  getrennt nach Reifentyp arithmetisch gemittelt.

Die so ermittelten Schalldruckpegel werden gemäß folgender Gleichung bezüglich der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten anhand der Größe  $c_v$  auf die Referenzgeschwindigkeiten korrigiert:

$$(1) \quad c_v = -b \cdot \lg \left( \frac{v}{v_{ref}} \right)$$

mit:

$c_v$	Geschwindigkeitskorrektur in dB
$b$	Geschwindigkeitskoeffizient in dB
$v$	tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit in km/h
$v_{\text{ref}}$	die Referenzgeschwindigkeit in km/h

Der Norm folgend wurden für  $b$  folgende Werte angesetzt:

$b = 25$ :	offenporige Deckschicht PA 8,
$b = 30$ :	dichte Asphaltdeckschicht SMA 5 S.

Weiterhin wird auf die Ergebnisse eine Temperaturkorrektur  $C_{\text{temp}}$  gemäß folgender Gleichung angewendet:

$$(2) \quad C_{\text{temp}} = 0,03 \cdot (T - 20 \text{ °C})$$

mit:

$C_{\text{temp}}$	Temperaturkorrektur in dB
$T$	Lufttemperatur in °C während der Messungen

Somit ergibt sich der temperatur- und geschwindigkeitskorrigierte Schalldruckpegel für die beiden Messreihen zu:

$$(3) \quad \begin{aligned} CPX_{P1,5\text{ m,korr}} &= CPX_{P1,5\text{ m}} + C_{\text{temp}} + c_v \\ CPX_{H1,5\text{ m,korr}} &= CPX_{H1,5\text{ m}} + C_{\text{temp}} + c_v \end{aligned}$$

Die Messungen wurden bei Lufttemperaturen von 27 °C durchgeführt, was zu einer Pegelkorrektur von  $C_{\text{temp}} = + 0.2$  dB führt.

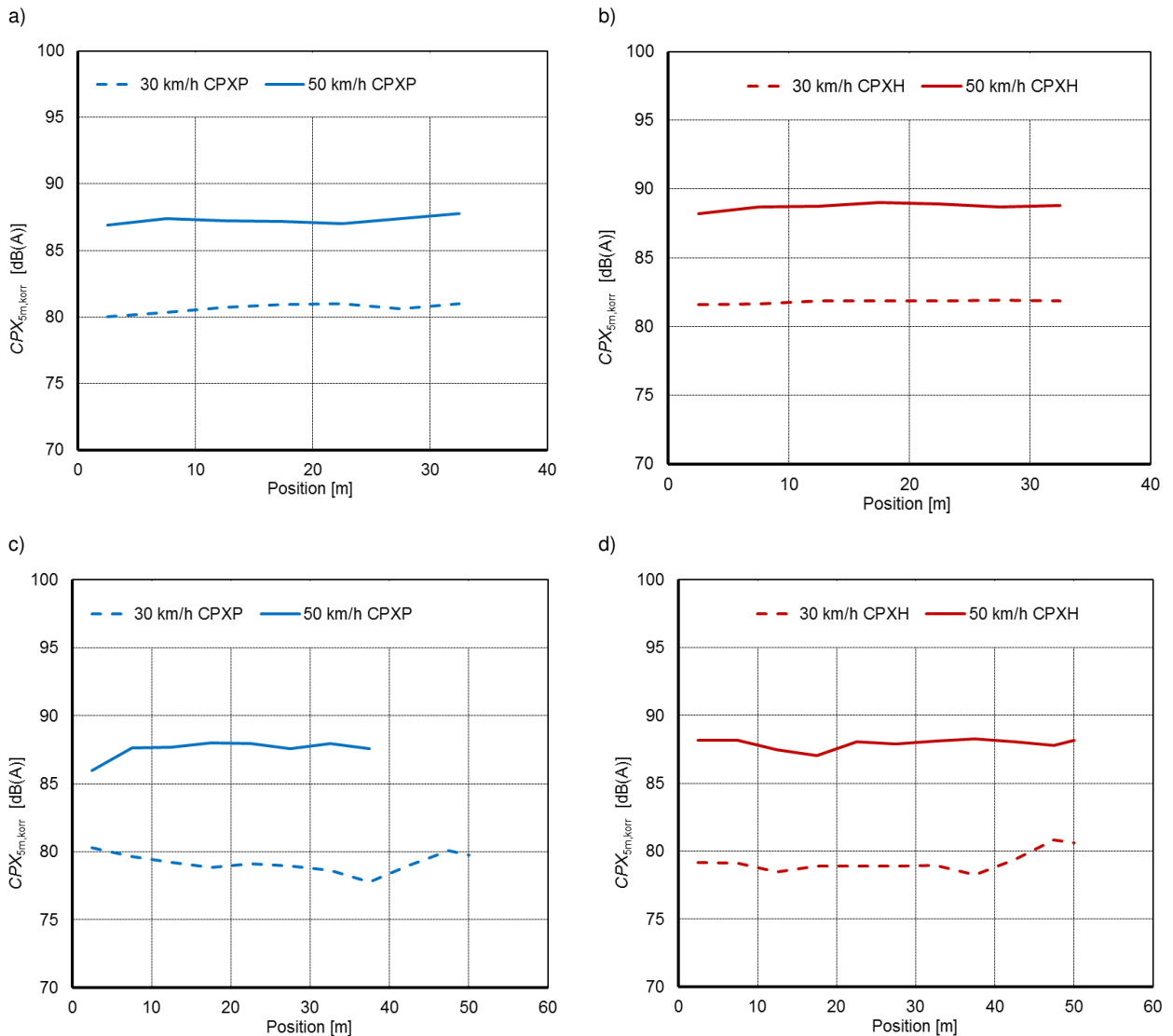
Durch arithmetische Mittelung aller für einen Streckenabschnitt relevanten 5 m-Intervalle ergeben sich die CPX-Indizes  $CPX_{P1}$ ,  $CPX_{H1}$  und der Close-Proximity Sound Index CPXI, der einen Fahrzeugmix repräsentiert:

$$(4) \quad \begin{aligned} CPX_{P1} &= CPX_{P1,5\text{ m,korr}} \\ CPX_{H1} &= CPX_{H1,5\text{ m,korr}} \\ CPXI &= 0,5 \cdot CPX_{P1} + 0,5 \cdot CPX_{H1} \end{aligned}$$

Zusätzlich kann das mittlere Frequenzspektrum der geschwindigkeits- und temperaturkorrigierten Messergebnisse für die Reifen P1 und H1 ausgewertet werden.

### Messergebnisse

In Bild 5.2-41 sind die Ortsverläufe der über Streckenabschnitte von jeweils 5 m Länge gemittelten CPX-Pegel dargestellt. Alle Werte sind sowohl temperatur- als auch geschwindigkeitskorrigiert.



**Bild 5.2-41:** Ortsverläufe der temperatur- und geschwindigkeitskorrigierten CPX-Pegel CPX<sub>5m, korr</sub>. a) SMA 5 S, Reifen P1; b) SMA 5 S, Reifen H1; c) PA 8, Reifen P1; d) PA 8, Reifen H1.

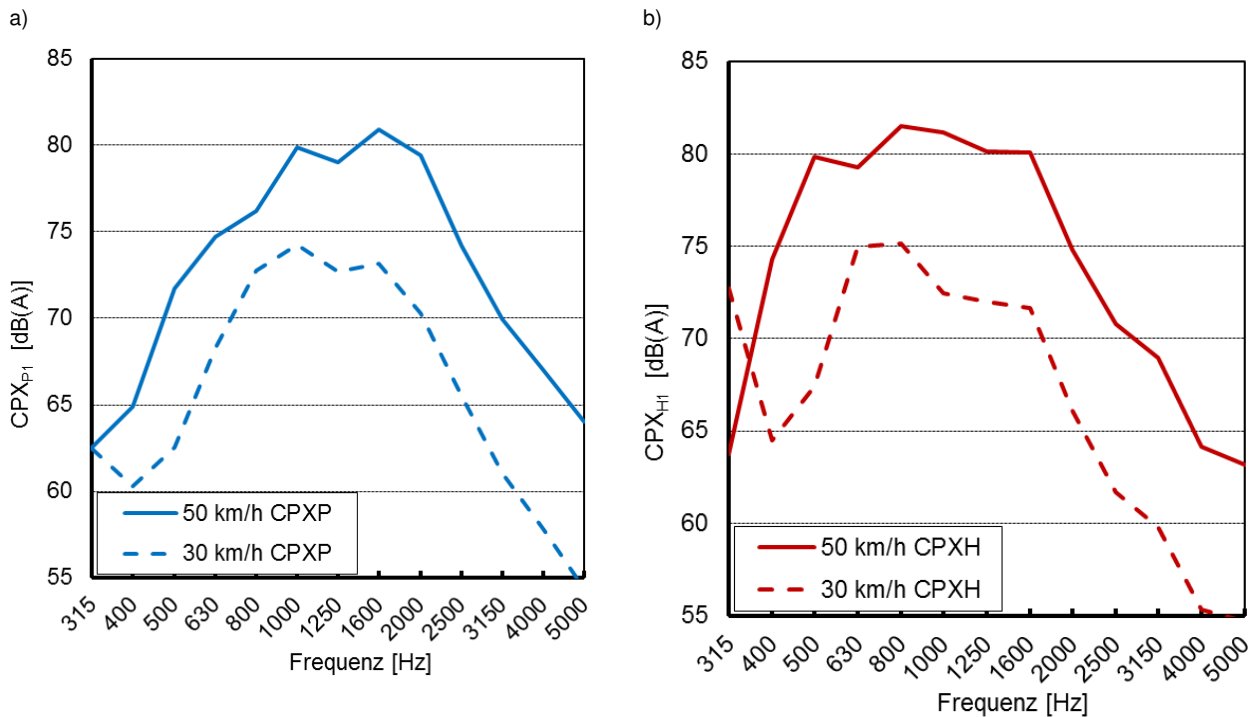
Wie den Ortsverläufen zu entnehmen ist, sind die Teststrecken insgesamt sehr homogen gelungen. Im Fall des SMA 5 S beträgt die Schwankung, unabhängig von Reifentyp und Geschwindigkeit, nicht mehr als  $\pm 0,5$  dB(A). Die Standardabweichungen betragen 0,2 bis 0,4 dB(A), was sehr guten Werten für homogene Fahrbahndeckschichten entspricht. Auch die Pegelschwankung innerhalb der Teststrecke mit PA 8 ist im Vergleich zu anderen offenporigen Belägen verhältnismäßig klein. Die Schwankung beträgt maximal  $\pm 1,0$  dB(A). Die Standardabweichung beträgt 0,7 dB(A) für den Reifen P1 und 0,4 dB(A) für den Reifen H1 bei 50 km/h.

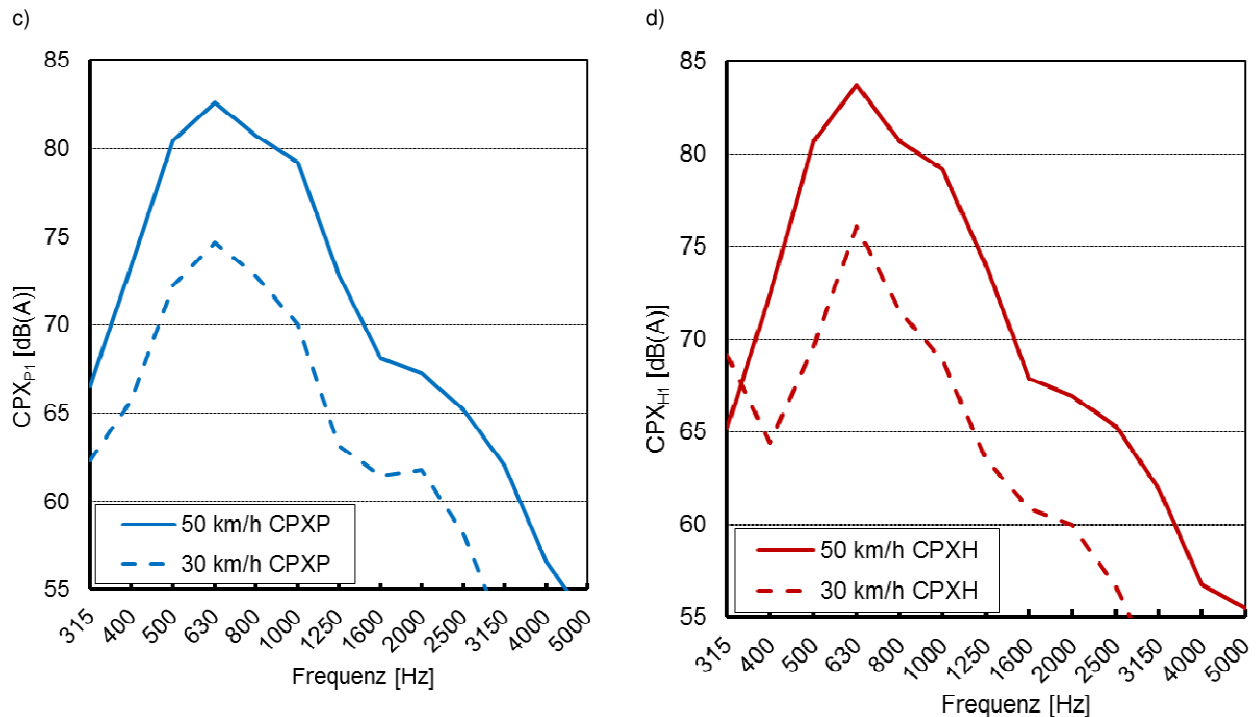
Wertet man die Mittelwerte über die gesamte Länge der Teststrecken aus, ergeben sich die in Tabelle 5.2-8 eingetragenen CPX-Indizes CPX<sub>P1</sub> und CPX<sub>H1</sub> mit den entsprechenden Standardabweichungen  $\sigma_{P1}$  und  $\sigma_{H1}$ .

	SMA 5 S EloMinit®	PA 8 EloMinit®
$v = 30 \text{ km/h}$		
$CPX_{P1}$	80,6	79,5
$\sigma_{P1}$	0,4	0,7
$CPX_{H1}$	81,7	79,5
$\sigma_{H1}$	0,2	0,8
$v = 50 \text{ km/h}$		
$CPX_{P1}$	87,3	87,5
$\sigma_{P1}$	0,3	0,7
$CPX_{H1}$	88,7	87,9
$\sigma_{H1}$	0,3	0,4

**Tab. 5.2-8:** CPX-Indizes CPXP1 und CPXH1 für beide Teststrecken und beide Geschwindigkeiten. Alle Werte in dB(A).

Bild 5.2-42 zeigt die Terzspektren der CPX-Indizes im Frequenzbereich zwischen 315 Hz und 5 kHz. Der Vergleich der Spektren zeigt deutliche Unterschiede im Frequenzbereich ab 1 kHz. Während die Terzpegel für den SMA 5 S Werte zwischen 81 dB(A) und 64 dB(A) aufweisen, tritt bei dem PA 8 Belag ein steiler Abfall der Terzpegel von 79 dB(A) auf unter 55 dB(A) auf. Dies gilt für beide Reifen und ist auf das Schallabsorptionsvermögen des PA 8 Belages zurückzuführen. Die akustisch wirksame Schichtdicke, die die untere Grenzfrequenz der pegelmindernden Wirkung durch Schallabsorption bestimmt. Bei einer unteren Grenzfrequenz von etwa 1 kHz beträgt die akustisch wirksame Schichtdicke jedoch nicht mehr als 4 cm.

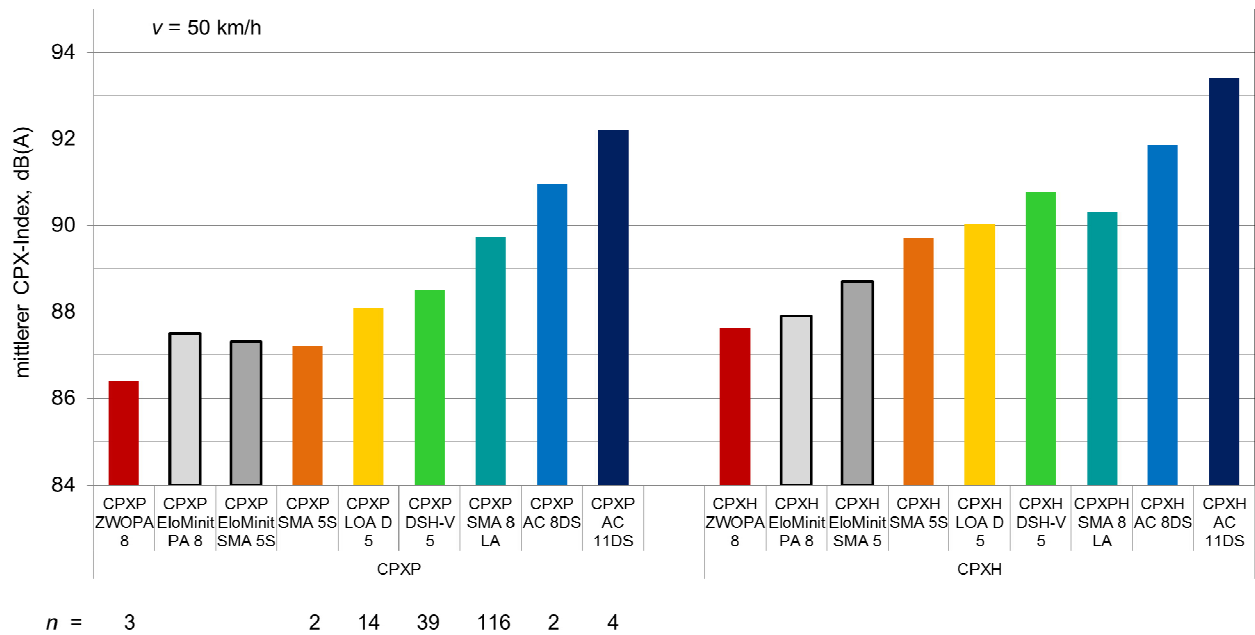




**Bild 5.2-42:** Spektren der CPX-Indizes CPXP1 und CPXH11. a) SMA 5 S, Reifen P1; b) SMA 5 S, Reifen H1; c) PA 8, Reifen P1; d) PA 8, Reifen H1.

Im Frequenzbereich unter 1 kHz weist der SMA 5 S Belag deutlich kleinere Terzpegel auf als der PA 8 Belag. Dieser Frequenzbereich wird stark von der mechanischen Geräuschanregung des Reifens bestimmt. Auf diese Weise kommt der Größtkornunterschied der beiden Beläge zur Wirkung. Der PA 8 Belag weist aufgrund des Größtkorns von 8 mm die gegenüber dem SMA Belag mit 5 mm Größtkorn deutlich grobrauhere Oberflächentextur auf. Da die Schallabsorption im tiefen Frequenzbereich nicht mehr wirksam ist, schlägt sich der Texturunterschied deutlich in den höheren Terzpegeln des PA 8 Belages nieder.

Der Pegelanstieg der Rollgeräusche des Reifens H1 bei Reduktion der Geschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h bei tiefen Frequenzen ist auf den Stolleneingriff des grobstolligen Profils zurückzuführen. Die mechanisch induzierte akustische Energie konzentriert sich aufgrund der gleichmäßigen Anordnung der Profilklötze auf ein schmales Frequenzband. Die Lage dieses schmalen Frequenzbandes hängt ab von der Anzahl der Profilklötze über den Reifenumfang und der Geschwindigkeit. Bei 50 km/h beträgt die Mittenfrequenz etwa 600 Hz. Bei Reduktion der Geschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h, die einem Faktor 0,6 entspricht, nimmt die Mittenfrequenz ebenfalls um Faktor 0,6 auf etwa 350 Hz ab. Die akustische Energie wird gewissermaßen entlang der Frequenzachse verschoben.



**Bild 5.2-43:** Mittlere CPX-Indizes CPXP1 und CPXH1 für 50 km/h in Abhängigkeit von der Bauweise.  $n$  gibt die Anzahl der pro Bauweise zur Verfügung stehenden Messwerte an.

Die beiden Fahrbahndeckschichten mit EOS sind sehr homogen gelungen und führen zu sehr niedrigen Rollgeräuschpegeln. Um die Messergebnisse besser einordnen zu können, sind in Bild 5.2-43 neben den Werten für die beiden EOS Teststrecken die CPX-Indizes verschiedener Bauweisen für 50 km/h aufgetragen. Die Werte entsprechen mittleren CPX-Indizes über eine Anzahl von Deckschichten jeweils gleichen Typs im Neuzustand. Die Anzahl  $n$  der pro Bauweise zur Verfügung stehenden Messwerte ist am unteren Bildrand eingetragen. Die Deckschichten waren jünger als 1 Jahr nach Einbau.

Wie man Bild 5.2-43 entnehmen kann, markieren die EOS-Beläge das untere Ende der durch die Bauweisen hervorgerufenen Rollgeräuschpegel. Nur zweischichtige offenporige Asphalte mit einer Schichtdicke von mehr als 7 cm (ZWOPA) führen zu noch kleineren Rollgeräuschpegeln als die EOS-Beläge. Bemerkenswert ist, dass der Belag EloMinit<sup>®</sup> SMA 5 S beim Reifen P1 SMA 5 S Belägen mit Naturgestein gleichwertig ist, beim Reifen H1 jedoch zu einem um rund 1 dB niedrigeren Wert führt. Dies führt zu dem Schluss, dass die Steifigkeitsvariation des Reifen-Fahrbahn-Kontakts über den Rollkontakt mit dem EOS-Belag tatsächlich weiter reduziert und damit verbessert werden konnte.

Das Schallabsorptionsvermögen kann den Nachteil der grobrauheren Oberfläche aufgrund des größeren Größtkorndurchmessers beim Reifen P1 nicht kompensieren. Der Rollgeräuschpegel für den EloMinit<sup>®</sup> PA 8 Belag liegt geringfügig höher als für den EloMinit<sup>®</sup> SMA 5 S Belag. Dies hängt auch damit zusammen, dass der Reifen P1 besonders texturempfindlich reagiert. Beim Reifen H1 kommt das Schallabsorptionsvermögen besser zum Tragen, da der grobstollige Reifen den Texturunterschied der beiden EOS-Beläge weniger deutlich widerspiegelt, die Schallabsorption den Rollgeräuschpegel jedoch deutlich reduziert.

Ziel des Forschungsvorhabens war eine deutliche Lärminderung um 5 dB(A) gegenüber der Referenzbauweise nach den RLS-90. Insgesamt ist festzustellen, dass die beiden EOS-Beläge, zumindest in dem hier untersuchten Neuzustand, zwei hochwertige geräuschmindernde Bauweisen darstellen, die, verglichen mit anderen fortschrittlichen und konventionellen Bauweisen, zu den niedrigsten Rollgeräuschpegeln führen und das Ziel einer Geräuschminderung um 5 dB(A) deutlich übertroffen wurde.

Wenn derartig schalltechnisch optimierte EOS-Körnungen in Standardbelägen aus Asphalt und Beton verwendet werden können, wird hierdurch eine erhebliche Reduzierung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche erreicht und ein bedeutender Beitrag zum Lärmschutz im Straßenverkehr geleistet.

### 5.2.5 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die Möglichkeit geschaffen, Gesteinskörnungen aus EOS so herzustellen, dass sie eine gleichbleibende Qualität aufweisen und in der Folge in lärmoptimierten Asphaltdeckschichten eingesetzt werden können. Die Anforderungen an die Qualität der Gesteinskörnung zur Herstellung der lärmoptimierten Asphaltdeckschichten sind sehr hoch. So hat beispielsweise neben der Festigkeit und dem Polierwiderstand auch die Kornform für die Ausbildung der erforderlichen dauerhaften

Oberflächenstruktur eine große Bedeutung. Folgerichtig wurden für das vorliegende Forschungsvorhaben die Kompetenzen der MAU als Produzent und Aufbereiter von EOS und des Centrums Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München für die bautechnische Bewertung der EOS und für die Konzeption der lärmindernden Asphalte gebündelt.

Nach umfangreichen Prüfungen unterschiedlich aufbereiteter EOS konnte unter Berücksichtigung der Verfahrensweise in einem neuen Schlackenbeet eine Aufbereitungskonstellation gefunden werden, mit der diese Grundanforderung erfüllt werden kann. Nach Laborversuchen an PMA, PA und SMA konnten mit den final hergestellten EOS Erstprüfungen für den Bau von Versuchsfeldern erstellt werden.

Nach dem Bau der Versuchsfelder im Bereich eines Mitarbeiterparkplatzes auf dem Betriebsgelände des Stahlwerks Annahütte in Hammerau wurden Bohrkerne und Asphaltmischgutproben für die abschließenden Laboruntersuchungen entnommen. Bei diesen Untersuchungen zeigten sich die Versuchsvarianten als weitgehend den konventionellen Asphalten vergleichbar, das tatsächliche Gebrauchsverhalten muss vor Ort in regelmäßigen Begehungen überwacht werden.

Die Lärmmessungen nahm der Projektpartner Müller-BBM GmbH nach dem CPX Verfahren und bei einer Geschwindigkeit von 50 km/h vor (Bild 5.2-35). Die Messungen auf der Versuchsstrecke zeigen, dass durch die Optimierung der Schlackenqualitäten und der Korngeometrie ein zusätzlicher signifikanter Beitrag zur Lärminderung einer Asphaltdeckschicht geleistet werden kann.

Die mit den unter Verwendung von EloMinit<sup>®</sup> aus EOS hergestellten Asphaltmischgütern zeigen sehr gute Lärminderungen, bei den angestellten Vergleichen liegen sie nahezu so günstig wie zweischichtige offenfellige Asphalte und günstiger als die ansonsten eingesetzten lärmindernden Asphaltvarianten.

Bei allen Untersuchungen zeigte sich, dass die sehr hohen Anforderungen zur Herstellung der lärmoptimierten Asphaltdeckschichten mit EloMinit<sup>®</sup> aus EOS erfüllt werden können.

Als nächster Schritt für die reproduzierbare Realisierung der Ergebnisse sind laufende Untersuchungen der Materialeigenschaften regelmäßig durchzuführen und durch die geforderten Fremdüberwachungsberichte im Zuge der Vorschriften sicherzustellen. Aufgrund der erfolgreichen Einsätze von EloMinit<sup>®</sup> in der Vergangenheit im Asphalt kann MAU auf positive Langzeiterfahrung verweisen.

Weitere Versuchsstrecken sind zu akquirieren, um Erfahrungen für neue Anwendungsbeispiele zu sammeln. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen helfen, die signifikanten Vorteile für den Regeleinsatz deutlich zu machen und eine positive politische Entscheidung für den Einsatz in Bayern zu fördern.

## Literatur

- [1] GEHLEN, C. und WÖRNER, T.: „Akustisch optimale Textur mit künstlicher Gesteinskörnung (EOS)“, (FE 06.0092/2010/DRB) BAST, Bergisch Gladbach

Der Schlussbericht zum vorliegenden Teilvorhaben VI-I (Förderkennzeichen 19U10016A, 19U10016C und 19U10016G) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.

## 5.3 Teilvorhaben VI-II

### Optimierung der lärmtechnischen und bautechnischen Wirksamkeit und Nutzungsdauer dichter Asphaltdeckschichten

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer  
Müller BBM GmbH, Planegg

Dr.-Ing. Viktor Root  
ZuB Ingenieurgesellschaft für Zuschlag und Baustofftechnologie mbH, Eppertshausen

Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg, Dipl.-Ing. Nina Nytus, Dipl.-Ing. Bianca Drewes  
Ruhr-Universität Bochum

Dipl.-Ing. Ralf Hübner  
Willy Dohmen GmbH & Co.KG, Übach-Palenberg

Dipl.-Ing. Christoph Recknagel  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Dr.-Ing. Ulrike Stöckert, Dipl.-Ing. Christian Gottaut  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

#### Inhalt

<b>5.3.1 Zielsetzung .....</b>	<b>313</b>
<b>5.3.2 Methodische Vorgehensweise .....</b>	<b>313</b>
5.3.2.1 Labortechnische Untersuchung und Mischgutoptimierung .....	314
5.3.2.2 Bau von Demonstratoren und Erprobungsstrecken .....	315
5.3.2.3 Erfassung und Bewertung der Fahrbahnoberflächeneigenschaften .....	315
<b>5.3.3 Labortechnische Untersuchungen und Mischgutoptimierung.....</b>	<b>325</b>
5.3.3.1 Lärmindernde Asphaltdeckschicht LOA 5 D.....	325
5.3.3.2 Porous-Mastic-Asphalt (PMA) .....	327
<b>5.3.4 Bau von Demonstratoren und Erprobungsstrecken.....</b>	<b>339</b>
5.3.4.1 Asphaltdeckschicht LOA 5 D .....	339
5.3.4.2 Porous-Mastic-Asphalt (PMA) .....	344
5.3.4.3 Erfassung und Bewertung der akustischen Eigenschaften auf der NATO-Airbase .....	347
<b>5.3.5 Bau und Bewertung von Erprobungsstrecken .....</b>	<b>356</b>
5.3.5.1 Erprobungsstrecke A 553 bei Brühl.....	356
5.3.5.2 Erprobungsstrecke BAB A 3 bei Lohmar.....	364
5.3.5.3 Erprobungsstrecke BAB A 5 bei Friedberg.....	369
5.3.5.4 Erprobungsstrecke LOA 5 D in Düren .....	378
<b>5.3.6 Zusammenfassung .....</b>	<b>379</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>381</b>



### 5.3.1 Zielsetzung

Im Teilvorhaben VI. II sollte die lärmtechnische Wirksamkeit und bautechnische Umsetzbarkeit der dichten Asphaltbeläge PMA (**P**orous **M**astic **A**sphalt) und LOA 5 D<sup>1</sup> (**L**ärm**o**ptimierte **A**sphalt**d**eckschicht) optimiert werden. Mit den lärm mindernden Asphaltdeckschichten LOA 5 D und PMA 5 sind effektive Maßnahmen entwickelt worden, um das Reifen-Fahrbahn-Geräusch direkt an der Quelle zu minimieren. Die lärm mindernde Wirkung der beiden Asphaltdeckschichten ist auf die optimierte plateauartige Textur zurückzuführen.

Ziel des Teilvorhabens stellte die Optimierung der Dauerhaftigkeit und der lärm mindernden Wirkung der beiden lärm mindernden Asphaltdeckschichten LOA 5 D und PMA 5 dar. Bei der Deckschicht LOA 5 D stand die bessere Verdichtbarkeit des Asphaltmischgutes im Focus der Entwicklungen. Insbesondere bei dünnen Asphaltdeckschichten steht während des Einbauprozesses oftmals nur ein kurzes Zeitfenster zur Erzielung der erforderlichen Verdichtung zur Verfügung, da die Schicht schneller auskühlt. Erste Erfahrungen in der Praxis zeigten oftmals zu geringe Verdichtungsgrade der eingebauten Schicht, so dass die Haltbarkeit deutlich reduziert war.

Bei der Deckschicht PMA stand der Einfluss der Asphaltmischgutzusammensetzung auf die Hohlraumverteilung im Vordergrund der Laborentwicklungen.

Die besondere Charakteristik des PMA besteht in einer speziellen Hohlraumverteilung über dem Querschnitt. Die untere Zone soll nahezu hohlraumfrei bleiben, um eine lange Haltbarkeit ähnlich wie beim bewährten Gussasphalt zu gewährleisten. Während des Einbauvorganges soll sich der feinkörnige, bindemittelreiche Mörtel absetzen, so dass sich an der Oberfläche eine offenporige Struktur ausbildet, die die akustische Wirksamkeit erzeugt.

Verschiedene PMA-Baumaßnahmen zeigten in der Vergangenheit, dass die Prozesssicherheit noch nicht gewährleistet ist. Teilweise kam es zu Mörtelanreicherungen an der Oberfläche und damit verbunden zur Einschränkung der akustischen Wirksamkeit. Im Rahmen der Laborentwicklungen wurden vertiefte Strukturanalysen mittels computergestützter Bildauswertung (CT) durchgeführt.

Alle Mischgutkonzepte wurden im Labor einem umfangreichen Untersuchungsprogramm unterzogen. Neben der Bestimmung typischer Materialkenndaten wurden zur Beschreibung der Baustoffe auch umfangreiche Performanceprüfungen durchgeführt. Anhand dieser Prüfungen ist eine Abschätzung des Materialverhaltens unter Temperatur- und Belastungseinwirkung möglich. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Laborentwicklung Testfelder wurden gebaut. Der BAST standen für den Bau der Testfelder Flächen auf dem NATO-Gelände in Geilenkirchen zur Verfügung. Damit konnte überprüft werden, ob die Herstellung der neuen Fahrbahnbeläge bzw. -aufbauten mit herkömmlicher Straßenbautechnik möglich ist und inwieweit die erzielten Oberflächeneigenschaften (z. B. Geräuschemission, Textur) den Zielsetzungen entsprechen.

Darüber hinaus sollte im Teilvorhaben VI II durch die Untersuchung von Demonstratoren Zusammenhänge zwischen der lärm mindernden Wirkung und der Textur sowie der Asphaltmischgutzusammensetzung ermittelt werden und Eingangsdaten für das Geräuschprognosemodell SPERoN 2020 gewonnen werden.

Auf Grundlage der Bewertung dieser Testfelder wurden insgesamt drei Erprobungsstrecken auf Bundesautobahnen sowie eine Erprobungsstrecke im kommunalen Straßennetz hergestellt. Die Erprobungsstrecken wurden aus Baumitteln des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur finanziert. In das Teilvorhaben fanden die Ergebnisse des FE 07.0248/2011/HRB „Schalltechnische Optimierung dichter Asphaltbeläge und Erhöhung der bautechnischen Nutzungsdauer“ [8] Eingang.

### 5.3.2 Methodische Vorgehensweise

Das Teilvorhaben gliederte sich in drei Hauptbearbeitungsphasen:

- Labortechnische Untersuchungen und Mischgutoptimierungen
- Bau von Demonstratoren und Erprobungsstrecken
- Erfassung und Bewertung der akustischen Eigenschaften der Oberflächen

---

<sup>1</sup> Inzwischen fanden die Ergebnisse Eingang in das FGSV-Arbeitspapier „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten AC D LOA und SMA LA [10]. Die offizielle Bezeichnung der Bauweise lautet daher AC D LOA.

### 5.3.2.1 Labortechnische Untersuchung und Mischgutoptimierung

In der ersten Phase wurden umfangreiche Laboruntersuchungen durchgeführt, um Mischgutkonzeptionen für LOA 5 D und PMA zu entwickeln, die einen Einbau in der Straßenbaupraxis ohne auftretende Schwankungen und eine lange bautechnische Nutzungsdauer mit der gewünschten akustischen Wirksamkeit gewährleisten. Dabei wurde am Asphaltmischgut das Verdichtungsverhalten in Abhängigkeit von der verwendeten Gesteinskörnung analysiert und die Fließkoeffizienten bestimmt. Neben den im technischen Regelwerk verankerten Asphaltkenndaten wie der Roh- und Raumdichte, dem Hohlraumgehalt etc. wurden rheologische Stoffparameter untersucht, um speziell die Verarbeitungseigenschaften zu untersuchen.

Für den PMA mussten die Verfahren zur labortechnischen Ansprache angepasst werden, um die spezielle Charakteristik dieser neuen Bauweise im Labor abbilden zu können. Dies war für alle weiteren Optimierungsschritte der lärm- und bautechnischen Eigenschaften zwingend erforderlich.

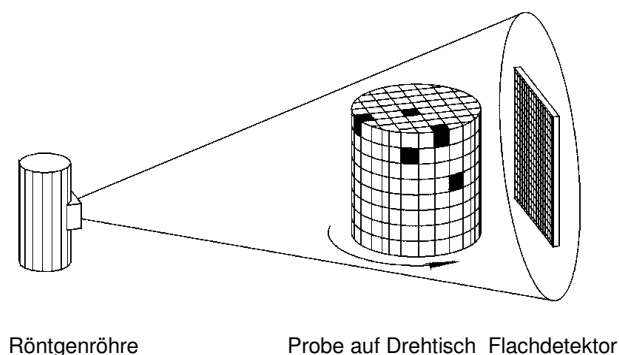
Anhand dynamisch-mechanischer Untersuchungen sollten Abschätzungen hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der Bauweise vorgenommen werden. Hinsichtlich des Verformungsverhaltens bei Wärme wurde der Spurbildungsversuch nach den TP Asphalt-StB, Teil 22 (Luftbad bei 60,0 °C) durchgeführt.

Zur Prüfung des Verschleißverhaltens fertiggestellter Oberflächen wurde an der TU Darmstadt die Oberflächen-Verschleiß-Prüfmaschine OVPM entwickelt.

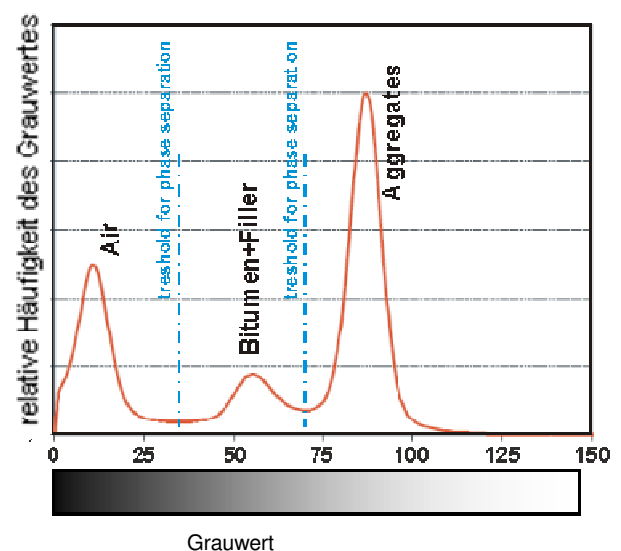
In dieser Prüfmaschine sollen Beanspruchungen der Fahrbahnoberfläche, welche in der Praxis bei Fahrten unter großen Schräglaufwinkeln auftreten (z.B. beim Rangieren oder bei Kurvenfahrten mit engen Radien), im Laboratorium nachgebildet werden. Durch solche extreme Schubbeanspruchungen in der Prüfmaschine tritt ein außergewöhnlicher Verschleiß der Belagsoberfläche auf, so dass während der Prüfung ein Versagen des Materialgefüges mit der Folge von Kornausbruch und Substanzverlust stattfindet. Das Prüfverfahren ist inzwischen in dem Entwurf der Europäischen Technischen Spezifikation (Vorstadium einer Europäischen Norm) EN 12697, Teil 50 enthalten.

Zur Analyse der inneren Struktur der verschiedenen Varianten, insbesondere der Hohlraumverteilung wurden Laborprobekörper und Bohrkerne aus den Erprobungsstrecken durch die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) untersucht. Als Messverfahren zur Bestimmung der inneren Struktur wurde die Methodik der Mikro-Computertomographie ( $\mu$ CT) auf die gegebenen Fragestellungen zur Struktur- und Hohlraumanalyse und den Untersuchungsgegenstand lärmoptimierter dichter Belagsdeckschichten adaptiert. Die Untersuchungen erfolgten nach einem speziell angepassten Verfahren in der entsprechend umgerüsteten Mikro-CT-Anlage der BAM.

Bei diesem Verfahren wird die zu untersuchende Probe mit Röntgenstrahlen durchleuchtet und aus vielen zweidimensionalen Durchstrahlungsbildern, die aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommen wurden (Bild 5.3-1), die dreidimensionale Verteilung der Absorptionsdichte errechnet. Das Resultat ist ein Volumendatensatz, in dem jedes einzelne Volumenelement (Voxel) einen Grauwert enthält, der zu der lokalen Absorptionsdichte proportional ist. Die einzelnen Bestandteile (Phasen) des Asphalts lassen sich in den Volumendaten anhand ihrer unterschiedlichen Grauwerte unterscheiden (Bild 5.3-2) und sich so ihre jeweiligen Grenzflächen bestimmen (Segmentierung).



**Bild 5.3-1:** Schema einer CT-Messung



**Bild 5.3-2:** Grauerthistogramm eines Volumendatensatzes mit Schwellwerten für die Segmentierung der Phasen eines konventionellen Asphaltbaustoffs

Die Messungen wurden auf den 225kV- $\mu$ CT-Anlagen der BAM mit jeweils identischen Parametern durchgeführt:

- Beschleunigungsspannung: 210 kV
- Vorfilterung: 0,75 mm Ag + 0,5 mm Cu
- 2000 Projektionen für die 360°-Drehung  
(versetzter Winkelabstand jeder Messposition: 0,18°)
- Belichtungszeit pro Projektion: 6,0 s
- Voxelgröße im rekonstruierten Volumen: 0,058 x 0,058 x 0,058 mm<sup>3</sup>

Nach der Segmentierung im Ergebnis der Messdatenauswertung können unterschiedliche Aspekte der inneren Struktur (z. B. zur Probenzusammensetzung und zum Hohlraum), der Anteil des Hohlraums in der Probe unter Ausschluss von Randeinflüssen, die lokale Hohlraumverteilung und -qualität - jeweils qualitativ und quantitativ - aber auch das Gesteinshaufwerk oder die Bindemittelmatrix detailliert weiter untersucht werden. Weiterhin kann die Struktur der oberflächennahen Bereiche aufgeklärt werden (Texturinformationen).

Zur Umsetzung der strukturaufklärenden Zielsetzung wurden die bereit gestellten Labor- und Ausbauproben speziell aufbereitet. Aus dem bereit gestellten Probenmaterial (i.d.R. angelieferte Bohrkern  $\varnothing$  150 mm) wurden zum Ausschluss möglicher Randeffekte bei der mechanischen Gewinnung der Ausbaubohrproben sowie zur Optimierung der erreichbaren Auflösung bei der CT-Analyse speziell aufbereitete Teilproben (Messproben mit  $\varnothing$  60 mm) mittels Höchstdruck-Wasserstrahlen gewonnen. Dabei wurde unter einem Arbeitsdruck von 3100 bar ein Wasser-Schneidmittel-Gemisch (Schneidmittel Granatsand mit einer Körnung von 0,08 - 0,12 mm) bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 29 mm/min eingesetzt. Die Schnittbreite konnte auf etwa 0,8 mm begrenzt werden. Dieses Aufbereitungsverfahren hat sich bereits bei zahlreichen Voruntersuchungen und dort insbesondere auch an besonders hohlraumreichen - und damit mechanisch weniger stabilen - Ausbauproben aus Asphalt bestens bewährt.

### 5.3.2.2 Bau von Demonstratoren und Erprobungsstrecken

Der Bau von Testfeldern erfolgte durch den Projektpartner Willy Dohmen auf dem Gelände der aktiven NATO-Airbase in Geilenkirchen. In der ersten Umsetzungsphase mussten die im Labor optimierten Asphalte in der erforderlichen Menge in einer Asphaltmischanlage hergestellt werden. Hier mussten in den Asphaltlaboren der Projektpartner entsprechende Erstprüfungen vorgenommen werden.

Die hergestellten Testfelder wurden umfangreichen baupraktischen Untersuchungen unterzogen. Im Ergebnis erfolgten weitere Anpassungs- und Optimierungsschritte im Labor.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Laboruntersuchungen und der Testflächen in Geilenkirchen wurden in Zusammenarbeit mit den Straßenbauverwaltungen in Hessen und Nordrhein-Westfalen im Jahr 2013 auf drei Bundesautobahnen Erprobungsstrecken für die Bauweise PMA (Porous Mastic Asphalt) eingerichtet. Darüber hinaus wurde im Mai 2014 der Bau einer kommunalen Erprobungsstrecke in Kreuzach, Kreis Düren realisiert. Hier wurde der dafür optimierte LOA 5 D auf einer Innerortsstraße gebaut.

Im Rahmen laufender Forschungsprojekte stellt die bautechnische Umsetzung der Ergebnisse auf Erprobungsstrecken immer eine besondere Herausforderung dar. Neben der Findung geeigneter Streckenabschnitte müssen die Vergabeunterlagen hinsichtlich der neuen Anforderungen angepasst und juristisch geprüft werden, ggf. sind Gewährleistungsforderungen auszuschließen. Die Beurteilung der erzielten Qualität der Fahrbahnbeläge erfolgt direkt nach Fertigstellung. Eine Beurteilung der Gebrauchseigenschaften über einen längeren Zeitraum ist in den laufenden Projekten nicht möglich. Aus diesem Grund nimmt die BAST eine Reihe von Erprobungsstrecken in ein internes Monitoring auf, um Aussagen zur Langzeitbewertung treffen zu können.

### 5.3.2.3 Erfassung und Bewertung der Fahrbahnoberflächeneigenschaften

Im Teilvorhaben VI.II wurden umfangreiche Untersuchungen zur Bestimmung der akustischen Wirkung der Fahrbahnoberflächen auf den Testfeldern und Erprobungsstrecken durchgeführt. Dabei kamen folgende Messverfahren zum Einsatz:

- Schallabsorptionsgrad
- Strömungswiderstand
- Texturmessungen
- Messmethode Kontrollierte Vorbeifahrt - CPB (Controlled Pass-By Method)
- Nahfeldmessverfahren - CPX (Close Proximity Methode)

- Griffigkeit (SKM)
- Längs- und Querebenheit
- Texturmessungen mittels Textur-Laserprofilometer (TMF)

Die Messverfahren sind nachfolgend beschrieben.

### Schallabsorptionsgrad

Für die Prüfung des Schallabsorptionsgrads von Probekörpern (Bohrkernen) steht das Verfahren mit Impedanzrohr nach DIN ISO 10534-2 zur Verfügung.

In situ wird der Schallabsorptionsgrad von Fahrbahndeckschichten über die Messung der akustischen Feldimpedanz ermittelt. Die Feldimpedanz  $\underline{Z}_s$  ist das Verhältnis des durch Beschallung an der Oberfläche entstehenden Schalldrucks  $\underline{p}$  zur Schallschnelle  $\underline{v}$  am selben Punkt:

$$\underline{Z}_s = \frac{\underline{p}}{\underline{v}}$$

Gleichung 1

Bei in situ Messungen wird eine senkrechte Schalleinfallrichtung gewählt. Der Schnellesensor wird entsprechend ausgerichtet. Die Feldimpedanz gilt damit für senkrechten Schalleinfall, so wie es im Impedanzrohr der Fall ist.

Für die Beschallung der Fahrbahnoberfläche wird ein deterministisches Schallsignal (Sinus Sweep) eingesetzt. Eine Messsonde für die simultane Erfassung von Schalldruck und Schallschnelle befindet sich in geringem Abstand über der Fahrbahnoberfläche. Durch die verwendete Signalverarbeitung kann auf die Impulsantwort des akustischen Systems mit der darin enthaltenen Schallreflexion geschlossen werden. Aus der Impulsantwort wird die akustische Feldimpedanz  $\underline{Z}_s$  der Prüffläche und daraus der Reflektionsfaktor  $\underline{r}$  bestimmt:

$$\underline{r} = \frac{\underline{Z}_s - Z_0}{\underline{Z}_s + Z_0}$$

Gleichung 2

wobei  $Z_0$  die akustische Kennimpedanz von Luft mit  $Z_0 = \rho c = 428 \text{ N s m}^{-3}$  ist ( $\rho$  mittlere Dichte der Luft,  $c$  Schallgeschwindigkeit).

Für den Absorptionsgrad  $\alpha$  gilt:

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

Gleichung 3

Für die in situ Messung steht ein von Müller-BBM entwickeltes Messsystem zur Verfügung. Der praktische Messaufbau ist in Bild 5.3-3 dargestellt. Die Schallquelle (elektrodynamischer Lautsprecher) hängt in einer Höhe von 1,2 m über der Fahrbahnoberfläche. Die Messsonde liegt auf der Fahrbahnoberfläche und ist mit einem Abstandshalter und Windschirm versehen.



**Bild 5.3-3:** Praktischer Messaufbau für die Messung des Schallabsorptionsgrads in situ an Testfeld MF5 auf dem Versuchsgelände Geilenkirchen.

### Strömungswiderstand

Für die Prüfung des Strömungswiderstands von Probekörpern (Bohrkernen) steht das Verfahren nach DIN EN 29053 "Akustik - Materialien für akustische Anwendungen, Bestimmung des Strömungswiderstandes" zur Verfügung. Die Messungen setzen durchströmbare Materialien voraus und werden bei verschiedenen Luftgeschwindigkeiten durchgeführt. Als Messprinzip liegt das Luftgleichstromverfahren zugrunde. Als Messergebnis wird normgemäß der spezifische Strömungswiderstand  $R_s$  in Pa s/m angegeben, welcher für die Luftgeschwindigkeit von  $u = 0,0005$  m/s durch Extrapolation (lineare Regression) ermittelt wird.

Die Untersuchung des Strömungswiderstandes in situ hat ein vom Laborverfahren abweichendes Ziel. Im Gegensatz zur Labormessung, die nur den hohlrauminduzierten Strömungswiderstand des Probekörpers bestimmt, schließt die in situ Messung auch den texturinduzierten Strömungswiderstand der Fahrbahnoberfläche mit ein. Der texturinduzierte Strömungswiderstand ist eine charakteristische Größe für die Beschreibung des Einflusses der Fahrbahnoberflächentextur auf die aerodynamische Geräuschenstehung und ist deshalb auch eine wichtige Eingangsgröße für das Rollgeräuschsimulationsmodell SPERoN. Dies wird dadurch erreicht, dass ein Messfuß auf die zu untersuchende Fahrbahnoberfläche gesetzt wird, der die räumlichen Verhältnisse in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche mit Hilfe eines elastischen Rings in der Aufstandsfläche und eine angepasste Vorlast nachgebildet. Ein Durchflussregler erzeugt einen konstanten Volumenfluss  $q$  durch eine Querschnittsfläche  $A$ . Der beim Durchströmen der Fahrbahndeckschicht auftretende Differenzdruck  $\Delta p$  wird gemessen. Aus dem Volumenfluss  $q$  und dem Differenzdruck  $\Delta p$  lässt sich die Strömungsresistenz  $\mathcal{E}$  der Fahrbahndeckschicht berechnen mit

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta p}{q}$$

Gleichung 4

Da  $q$  wegen  $q = u \cdot A$  ( $u$  = Strömungsgeschwindigkeit) von der Fläche des durchströmten Querschnitts  $A$  abhängt, ist auch die Strömungsresistenz  $\mathcal{E}$  eine vom durchströmten Querschnitt  $A$  abhängige Größe. Durch die Definition des spezifischen Strömungswiderstands  $R_s^*$  in-situ

$$R_s^* = \mathcal{E} \cdot A = \frac{\Delta p}{u}$$

Gleichung 5

wird diese Abhängigkeit von den Abmessungen der Apparatur behoben.

Zur Unterscheidung von der (abweichenden) Definition des Strömungswiderstands  $R_s$  in der Norm EN 29053 wird für den hier ermittelten spezifischen Strömungswiderstand die Bezeichnung  $R_s^*$  verwendet.

Das hier eingesetzte Verfahren erlaubt derzeit keine explizite Trennung zwischen dem texturinduzierten Anteil des Strömungswiderstand  $R_{s,T}^*$  und dem hohlrauminduzierten Anteil des Strömungswiderstands  $R_{s,\sigma}^*$ . Für den resultierenden Strömungswiderstand  $R_s^*$ , wie er mit dem bestehenden System gemessen wird, gilt:

$$R_s^* = \frac{R_{s,T}^* \cdot R_{s,\sigma}^*}{R_{s,T}^* + R_{s,\sigma}^*} \quad \text{bzw.} \quad \frac{1}{R_s^*} = \frac{1}{R_{s,T}^*} + \frac{1}{R_{s,\sigma}^*} \quad \text{Gleichung 6}$$

Für dichte Deckschichten mit weniger als 10 Vol.-% Hohlraumgehalt ergibt sich der Grenzfall des rein texturinduzierten Strömungswiderstands mit  $R_{s,\sigma}^* \rightarrow \infty$ , zu

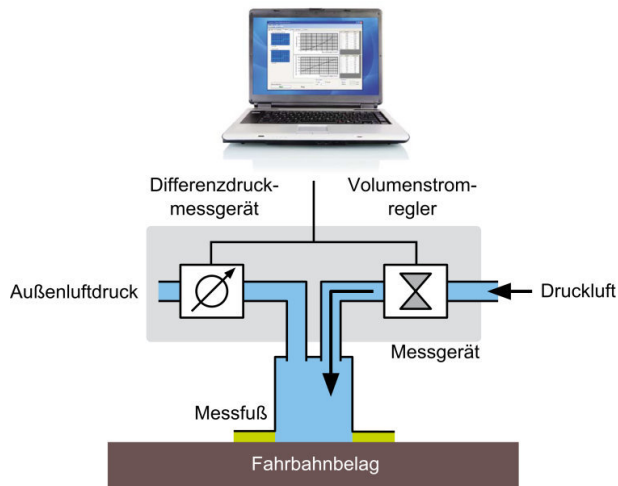
$$R_s^* = R_{s,T}^* \quad \text{Gleichung 7}$$

Für hohlraumeiche Deckschichten mit mehr als 16 Vol.-% Hohlraumgehalt ergibt sich der Grenzfall des rein hohlrauminduzierten Strömungswiderstands mit  $R_{s,\sigma}^* \ll R_{s,T}^*$  zu

$$R_s^* = R_{s,\sigma}^* \quad \text{Gleichung 8}$$

Für Hohlraumgehalte von 10 Vol.-% bis 16 Vol.-% findet ein stetiger Übergang zwischen textur- und hohlrauminduziertem Widerstand statt. Der resultierende Werte  $R_s^*$  ist dann ein Mischwert aus beiden Strömungswiderstandsbeiträgen.

Bild 5.3-4 zeigt eine Prinzipskizze des Geräteaufbaus. Eine Detailansicht des Messfußes ist in Bild 5.3-5 dargestellt.



**Bild 5.3-4:** Prinzipskizze des Strömungswiderstands-Messsystems.



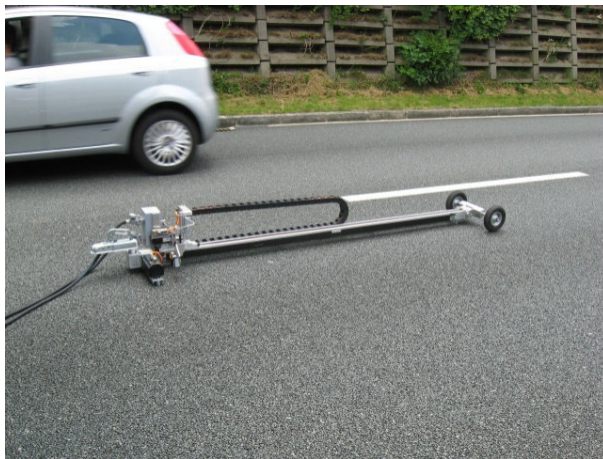
**Bild 5.3-5:** Messgerät mit Hebeeinrichtung im praktischen Einsatz.

Die Messung wird bei verschiedenen Volumenströmen durchgeführt, um die Messgenauigkeit zu erhöhen. Mit den Ergebnissen der einzelnen Durchflussstufen wird eine Regressionsanalyse durchgeführt, mit der der Strömungswiderstand  $R_s$  bei einer vorgegebenen Strömungsgeschwindigkeit von  $u_{ref} = 0,0125 \text{ m/s}$  – entsprechend einem Volumenfluss von ca. 6 l/min – ermittelt wird.

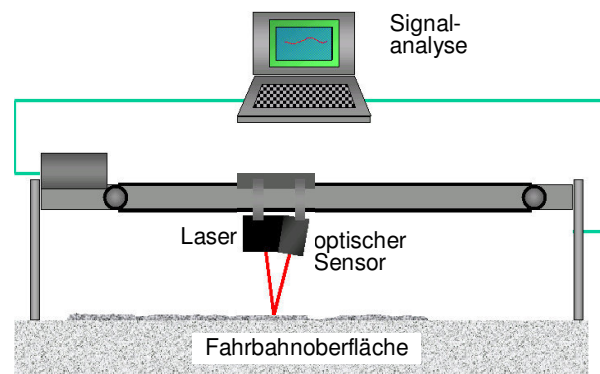
Für die Prüfung des Strömungswiderstands von Probekörpern (Bohrkernen) steht das Verfahren nach DIN EN 29053 "Akustik - Materialien für akustische Anwendungen, Bestimmung des Strömungswiderstandes" zur Verfügung

### Texturmessungen

Das eingesetzte berührungslose lasergestützte Messverfahren (Bild 5.3-6) ermöglicht eine zerstörungsfreie Ermittlung der Oberflächenrauigkeit (Makrotextur) von Fahrbahndeckschichten im fertig eingebauten Zustand.



**Bild 5.3-6:** Prinzipskizze des Messaufbaus.



**Bild 5.3-7:** Müller-BBM-Texturmessgerät.

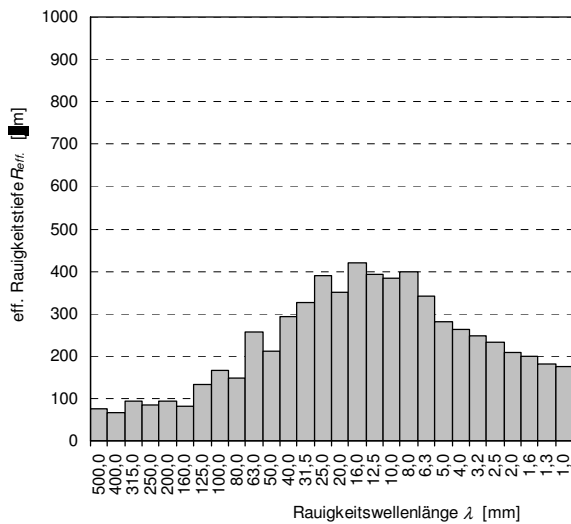
Die Messung und Beschreibung der Oberflächentextur erfolgt nach DIN EN ISO 13473 – Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen, Teil 1 – 3 (2004-07).

Die Fahrbahnoberfläche wird mit dem Triangulationslasermesssystem über eine Länge von 2,0 m in Fahrtrichtung abgetastet, wobei die Messung bei befahrenen Deckschichten günstigerweise in der Radrollspur erfolgt. Für die Einspeisung der Texturdaten in das Rechenmodell SPERoN werden 6 parallele Spuren in einem Abstand von 20 mm gemessen, womit auch Texturinformation in Querrichtung gewonnen wird.

Die Auflösung des verwendeten Messsystems beträgt  $200 \mu\text{m}$  horizontal und  $8 \mu\text{m}$  vertikal. Aus dem aufgenommenen Fahrprofil wird durch Fourieranalyse (FFT) die Rauigkeitstiefe als Funktion der Texturwellenlänge berechnet. Die effektive Rauigkeitstiefe  $R_{eff}$  ist der Effektivwert der Profiltiefe im jeweiligen Wellenlängenband.

Die Messungen können nur auf trockener Fahrbahn durchgeführt werden. Bei neu gebauten Fahrbahnbelägen sollte die Messung frühestens 4 Wochen nach Verkehrsfreigabe erfolgen, da sich die Textur durch den anfänglich noch vorhandenen Bitumenfilm auf der Oberfläche der groben Gesteinskörnung anders darstellt als nach der oberflächlichen Freilegung der Gesteinskörner durch den Verkehr.

Texturen setzen sich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Rauigkeitwellenlängen mit unterschiedlichen Amplituden zusammen, die als Texturspektren dargestellt werden können. Deshalb erfolgt zur Bewertung der Messergebnisse eine schmalbandige Spektralanalyse der Texturprofile in Terzbandbreite. Bild 5.3-8 zeigt ein typisches Texturspektrum. Für die Wellenlängen von 1 mm bis 500 mm werden die Effektivwerte der Rauigkeitstiefe  $R_{eff}$  in Abhängigkeit von der Wellenlänge für jede Messstelle angegeben. Die Texturspektren von Fahrbahnoberflächen wiesen typischerweise ausgeprägte Maxima auf. Die Wellenlänge  $\lambda_{max}$  und die Rauigkeitstiefe  $R_{max}$  im Maximum des Texturspektrums charakterisieren die akustische Wirkung der Fahrbahnrauigkeit.



**Bild 5.3-8:** Beispiel für ein Texturspektrum.

Zusätzlich erfolgt die Auswertung folgender Texturkennwerte pro Messstelle:

- mittlere Profiltiefe MPD
- geschätzte Texturtiefe ETD
- Effektivwert der Profiltiefe  $R_{eff}$  (Breitbandwert)
- Gestaltfaktor  $g$

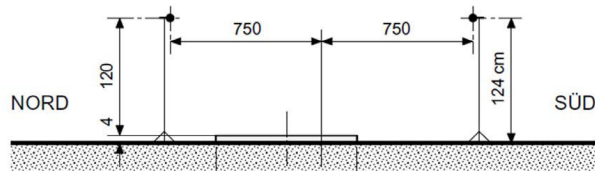
### Messmethode Kontrollierte Vorbeifahrt

Für die Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen CPB (Controlled Pass-By Method) auf dem Testgelände in Geilenkirchen wurden jeweils zwei Freifeld-Mikrofone zu beiden Seiten der Testfelder in einem Abstand von 7,5 m zur Mitte des Testfelds und in 1,2 m Höhe über der Fahrflächenoberkante aufgestellt. Der Messquerschnitt befand sich jeweils in der Mitte des Testfelds. Bild 5.3-9 zeigt den Messaufbau. In Bild 5.3-10 ist der Querschnitt des Messaufbaus skizziert.



**Bild 5.3-9:** Aufbau für die Messung der Kontrollierten Vorbeifahrt mit drei Messreifensätzen. Links: Blick von West nach Ost mit Aufstellung der beiden Mikrofone an Testfeld 5, rechts: Blick in Querrichtung mit dem nördlichen Mikrofon in der angrenzenden Wiesenfläche und dem südlichen Mikrofon auf der Asphaltfläche.





**Bild 5.3-10:** Querschnitt des Messaufbaus für die Kontrollierten Vobeifahrtmessungen.

Für die Erfassung der Reifen-Fahrbahngeräusche mittels kontrollierter Pkw-Vorbeifahrten (CPB-Methode) sind verschiedene Parameter variiert worden:

- 2 Fahrrichtungen (Ost/ West)
- 4 Geschwindigkeiten (50, 75, 95, 120 km/h)
- 3 Wiederholungen
- 3 Reifentypen (Slick, Sommerreifen, Winterreifen)
- 5 Testfelder
- 2 Mikrofone pro Querschnitt zu beiden Seiten des Testfelds

Bild 5.3-11 zeigt Exemplare der verwendeten Reifen. Die Verwendung des verkehrstechnisch untauglichen Glattreifens hängt mit der Erhebung von Eingangsdaten für das Rechenmodell SPERoN zusammen. Die neuen Reifen wurden vor Durchführung der ersten Messungen über eine Strecke von 100 km eingefahren.

Slick



EcoContact 5



WinterContact TS850



**Bild 5.3-11:** Messreifen für die Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen

Die Vorbeirollpegelmessungen wurden ohne Antrieb durchgeführt. Dazu wurde das Fahrzeug bis etwa dreißig Meter vor der Messstelle auf etwas mehr als die Nominalgeschwindigkeit beschleunigt. Danach wurde ausgekuppelt und der Motor ausgeschaltet. Auf diese Weise sind die gemessenen Vorbeifahrtgeräusche nicht durch Antriebsgeräusche beeinflusst.

Wie Bild 5.3-9 rechts zeigt, standen die nördlich der Testfelder positionierten Mikrofone bei den Messungen an den Testfeldern MF 4 und MF 5 in der nördlich an die Testfelder angrenzenden Grasfläche. Derartige Flächen wirken schallabsorbierend, was einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse von Vorbeifahrtmessungen hat. Die Unterschiede der Vorbeifahrtpegel bei normgerechter Positionierung der Mikrofone auf der schallreflektierenden Oberfläche zu der Messung auf der Grasfläche betragen bis zu 4 dB. Aus diesem Grund mussten die Ergebnisse an den Mikrofonpositionen nördlich der oben genannten Testfelder verworfen werden. In allen anderen Fällen waren die Mikrofone normgerecht auf einer schallreflektierenden Oberfläche positioniert.

Die Shorehärte A wurde zwischen den Messungen an Seitenwand, Profilklotz und Laufband an allen vier Reifen gemessen. Für den EcoContact Reifen ergab sich durchgängig ein Wert von 64. Für den WinterContact Reifen wurden dagegen Werte zwischen 55 und 61 gemessen mit einem Mittelwert von 59.

### Nahfeldmessverfahren – CPX

Das „reine“ Reifen-Fahrbahn-Geräusch eines Fahrbahnbelages wird mit dem CPX-Verfahren (Nahfeldmethode) ermittelt. Die Messungen erfolgen gemäß ISO/CD 11819-2 mit zwei Referenzreifen. Der Reifen CPXP (Passenger cars) ist sehr gut geeignet, um die akustische Qualität der Textur der Oberfläche zu beurteilen. Der Reifen CPXH (Heavy cars) ist hinsichtlich der Texturunterschiede einer Fahrbahnoberfläche verhältnismäßig unempfindlich, reagiert aber empfindlich auf das Absorptionsvermögen und den Hohlraumgehalt einer Oberfläche. Der Reifen CPXH repräsentiert ein dem Lkw-Reifen ähnliches Verhalten.

Für die Messungen wird ein geschlossener Einachsanhänger verwendet, der den akustischen Anforderungen nach ISO/DIS 11819-2 entspricht. Der Messanhänger wird mit jeweils zwei Reifen desselben Typs bestückt. Die Mikrofonpositionen entsprechen den in der genannten Norm beschriebenen obligatorischen Messpositionen. Die Mikrofonhöhe beträgt 10 cm über Fahrbahnoberkante.

Mit dem CPX-Verfahren werden pro Streckenabschnitt im Abstand von 20 m die A-bewerteten Schalldruckpegel gemessen und gemittelt. Die Messungen erfolgen bei Geschwindigkeiten von 50 km/h (innerorts) und 80 km/h (außerorts).

Die CPX-Messungen auf den Testflächen auf der NATO Airbase in Geilenkirchen erfolgten in beiden Fahrrichtungen (Ost/West), bei zwei Geschwindigkeiten (50 und 80 km/h) und mit beiden CPX-Normmessreifensätzen (P und H) durchgeführt. Auf den Erprobungsstrecken erfolgten die CPX-Messungen im fließenden Verkehr bei 80 km/h. Die Messungen wurden durch den Projektpartner Müller BBM und die BAST durchgeführt. Bild 5.3-12 zeigt den Messanhänger der BAST.



**Bild 5.3-12:** CPX-Messanhänger der BAST (links), Messrad und Mikrophone (rechts)

Aus den gemessenen ortsabhängigen Schalldruckpegeln  $L_{p,P1}$  und  $L_{p,H1}$  werden durch energetische Mittelung über Fahrbahnabschnitte von 5 m Länge CPX-Pegel  $CPX_{P1,5m}$  und  $CPX_{H1,5m}$  für jede Messmikrofonposition gebildet. Im Anschluss werden die an den obligatorischen Mikrofonpositionen ermittelten CPX-Pegel  $CPX_{x,5m}$  getrennt nach Reifentyp arithmetisch gemittelt.

Die so ermittelten Schalldruckpegel werden gemäß folgender Gleichung bezüglich der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten anhand der Größe  $c_v$  auf die Referenzgeschwindigkeiten korrigiert:

$$c_v = -b \cdot \lg \left( \frac{v}{v_{ref}} \right) \quad \text{Gleichung 9}$$

mit:

$c_v$	Geschwindigkeitskorrektur in dB
$b$	Geschwindigkeitskoeffizient in dB
$v$	tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit in km/h
$v_{ref}$	die Referenzgeschwindigkeit in km/h

Der Norm folgend wird für  $b$  folgender Wert dichte Asphaltdeckschichten angesetzt:

$$b = 30.$$

Weiterhin wird auf die Ergebnisse eine Temperaturkorrektur  $C_{temp}$  gemäß folgender Gleichung angewendet:

$$C_{temp} = 0,03 \cdot (T - 20 \text{ °C}) \tag{Gleichung 10}$$

mit:

- $C_{temp}$  Temperaturkorrektur in dB
- $T$  Lufttemperatur in °C während der Messungen

Somit ergibt sich der temperatur- und geschwindigkeitskorrigierte Schalldruckpegel für die beiden Messreifen zu:

$$\begin{aligned} CPX_{P1,5m,korr} &= CPX_{P1,5m} + C_{temp} + c_v \\ CPX_{H1,5m,korr} &= CPX_{H1,5m} + C_{temp} + c_v. \end{aligned} \tag{Gleichung 11}$$

Die Messungen wurden bei Lufttemperaturen von 27 °C durchgeführt, was zu einer Pegelkorrektur von  $C_{temp} = + 0.2$  dB führt.

Durch arithmetische Mittelung aller für einen Streckenabschnitt relevanten 5 m-Intervalle ergeben sich die CPX-Indizes  $CPX_{P1}$ ,  $CPX_{H1}$  und der Close-Proximity Sound Index CPXI, der einen Fahrzeugmix repräsentiert:

$$\begin{aligned} CPX_{P1} &= CPX_{P1,5m,korr} \\ CPX_{H1} &= CPX_{H1,5m,korr} \\ CPXI &= 0,5 \cdot CPX_{P1} + 0,5 \cdot CPX_{H1} \end{aligned} \tag{Gleichung 12}$$

Zusätzlich kann das mittlere Frequenzspektrum der geschwindigkeits- und temperaturkorrigierten Messergebnisse für die Reifen P1 und H1 ausgewertet werden.

### Texturmessfahrzeug

Nach ISO 13473 können die Texturkenngößen mittlere Texturtiefe MPD und die geschätzte Texturtiefe ETD bestimmt werden. Sie beschreiben die geometrischen Eigenschaften einer Fahrbahnoberfläche. Auf dem Gebiet der Lärmforschung wurden die Abhängigkeiten zwischen Texturparametern und den akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen analysiert. Es wurden weitere Texturkenngößen definiert, die für eine Bewertung des möglichen akustischen Verhaltens der Fahrbahnoberfläche herangezogen werden können. Dazu zählen der Gestaltfaktor und die charakteristische Gestaltlänge.

Das mobile Textur-Laserprofilometer TMF der BASt (Bild 5.3-13) ermöglicht die kontinuierliche zweidimensionale Erfassung der Straßenoberflächentextur im Makro- und Megatexturbereich mit Geschwindigkeiten zwischen 60 und 85 km/h im fließenden Verkehr. Zu diesem Zweck sind an der rechten Fahrzeugseite drei hochauflösende Lasersonden angebracht, die nach dem Triangulationsprinzip arbeiten. Durch dieses Messverfahren kann ein Texturwellenlängenbereich von 5 bis 500 mm erfasst werden [1] [2] [5].

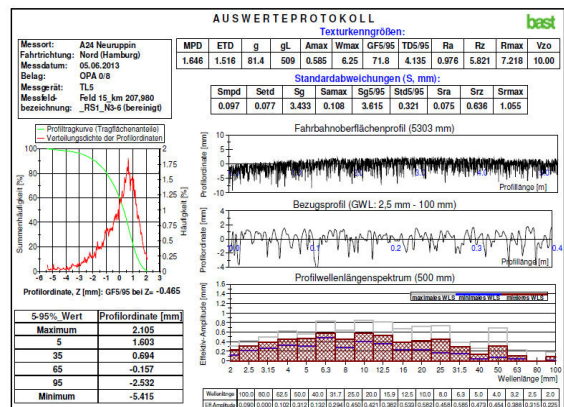


Bild 5.3-13: Textur-Laserprofilometer TMF der BASt (links), Auswerteprotokoll (rechts)

### Griffigkeit

Messtechnisch wird die Straßengriffigkeit durch den Kraftschlussbeiwert  $\mu$  beschrieben, der auch als Reibungsbeiwert oder Reibungskoeffizient bezeichnet wird. Zur Erfassung wird das standardisierte **Seitenkraft-Messverfahren (SKM)** verwendet. Es wird der Kraftschlussbeiwert am schräglaufenden Messrad ( $20^\circ$ ) ermittelt, das mit einer unter statischen Bedingungen definierten Normalkraft in Höhe von 1960 N belastet wird. Der Quotient aus der zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche bei schräglaufendem Rad aktivierten Seitenreibungskraft und der Normalkraft ergibt den Kraftschlussbeiwert. Es wird eine rechnerisch konstante Wasserfilmdicke von 0,5 mm aufgebracht.

Bild 5.3-14 zeigt die SKM der BAST. Die Messungen erfolgen gemäß TP-Griff-StB. Die Messungen erfolgen mit Abstandsführungssystem. Es wurden jeweils Doppelmessungen durchgeführt, wobei die Messungen nur eine Differenz  $< 0,015 \mu$ -SKM aufweisen dürfen, um als gültig betrachtet zu werden.



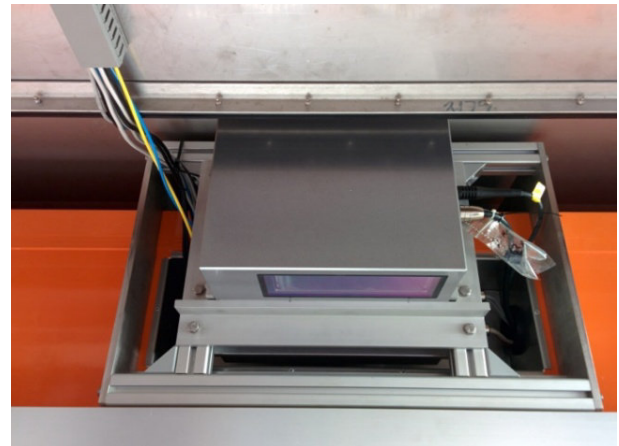
**Bild 5.3-14:** Seitenkraft-Messverfahren (SKM) der BAST

### Ebenheit

Die Ebenheit bzw. Unebenheit kennzeichnet den Wellenlängenbereich oberhalb der Megatextur mit Wellenlängen von 0,5 m bis zu 50 m. Unter Unebenheiten werden geometrische Unregelmäßigkeiten der Fahrbahnoberfläche verstanden, die nicht der Textur oder der Gradienten der Trasse zugerechnet werden können. Demzufolge spricht man bei Unebenheiten im Allgemeinen von Höhenabweichungen von der planmäßigen Oberflächengeometrie.

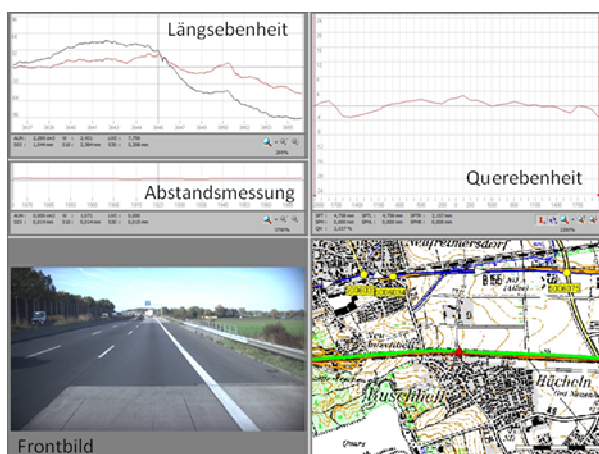
Dabei wird die Ebenheit (Unebenheit) unterschieden in Längs- und Querrichtung. Bei der Betrachtung der Unebenheiten in Längsrichtung erfolgt die Auswertung/Bewertung parallel zur Achse der Straße, während bei Betrachtung in Querrichtung die Unebenheiten rechtwinklig zur Achse der Straße erfasst werden.

Die BAST verfügt über ein kombiniertes Ebenheitsmessfahrzeug MEFA (Bild 5.3-15) zur gleichzeitigen Messung der Längs- und Querebenheit auf Straßen. Die Erfassung der Längsebenheit erfolgt in der rechten Rollspur mittels fünf Lasersensoren nach dem HRM-Prinzip. Die Querebenheit wird durch einen Laserscanner erfasst, der eine Messbreite von 3,2 m abdeckt. Dieser Laserscanner besteht aus einem Laser mit einem rotierenden Oktaederspiegel zur Erfassung der Querebenheit. Damit wird ca. 100mal pro Sekunde ein Querprofil mit je 4000 Messpunkten auf einer Breite von 4 m erfasst. Der Laserscanner ist mit der Einstufung in die Laserklasse 1 ohne weitere Sicherheitsmaßnahmen einsetzbar.



**Bild 5.3-15:** MEFA - Multifunktionales Erfassungssystem zur Fahrbahnoberflächenanalyse MEFA (links) Laserscanner hinter der am Kofferaufbau befindlichen Heckabdeckung (rechts)

Die Messungen erfolgen nach der TP Eben – Berührunglose Messungen. Bild 5.3-16 zeigt beispielhaft ein Messprotokoll der Zustandserfassung der Oberflächeneigenschaft Ebenheit, die mittels der MEFA aufgenommen wurde. Neben der Längs- und Querebenheit wird die Abstandsmessung als seitlicher Abstand der Messlinie zur rechten Fahrbahnmarkierung erfasst. Über ein Frontbild und die dazugehörigen Navigationsdaten ist eine genaue Zuordnung der Messwerte zum Straßennetz möglich.



**Bild 5.3-16:** Messprotokoll der Erfassung der Längs- und Querebenheit mittels MEFA

### 5.3.3 Labortechnische Untersuchungen und Mischgutoptimierung

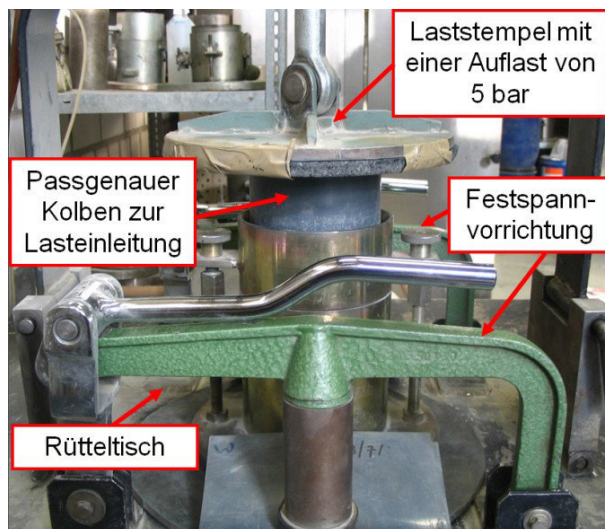
#### 5.3.3.1 Lärmindernde Asphaltdeckschicht LOA 5 D

Bei der Optimierung der bautechnischen Eigenschaften [6] des LOA 5 D soll in erster Linie das Verdichtungsverhalten verbessert werden. Durch eine weitere Reduzierung des Hohlraumgehaltes (ohne dabei die lärmtechnischen Eigenschaften zu verschlechtern) kann die Dauerhaftigkeit der Schichten verlängert werden. Sowohl Untersuchungen vor mehr als 25 Jahren, als auch in der jüngsten Vergangenheit zeigen den negativen Einfluss eines zu geringen Verdichtungsgrades auf die Asphalteeigenschaften [9] [10]. Die Abnahme des Verdichtungsgrades geht mit einer Abnahme des Steifigkeitsmoduls und folglich einer geringeren Beständigkeit gegen bleibende Verformungen und einer geringeren Ermüdungsfestigkeit einher [9].

Zur systematischen Optimierung der Asphaltmischgutzusammensetzung sollen die Einflüsse der verschiedenen Materialkomponenten (Füller, feine und grobe Gesteinskörnung sowie Bindemittel) auf die Verdichtbarkeit untersucht werden. So werden im ersten Schritt die granulometrischen Kenndaten verschiedener Gesteinskörnungen bestimmt und ihr Einfluss auf die Lagerungsdichte von Korngemischen analysiert. Parallel dazu werden die rheologischen Eigenschaften verschiedener Bindemittel und -gemische bestimmt. Im zweiten Schritt wurden Korngemische und Bindemittel zur Herstellung von Marshall-Probekörpern (MPK) zur Bestimmung des Verdichtungswiderstandes und der Verdichtungskurven ausgewählt.

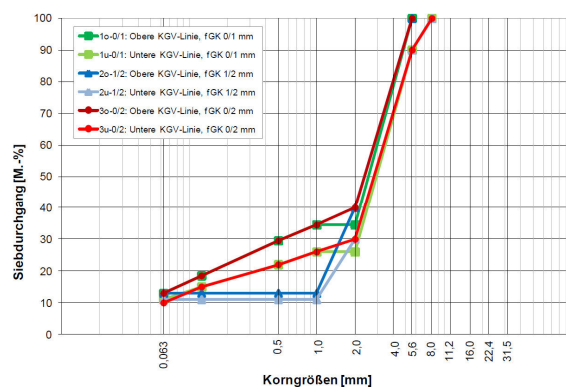
Die Lagerungsdichte verschiedener Korngemische wurde mit dem Rüttelversuch nach [7] bestimmt. Dabei wird der Proctortopf (Durchmesser 100 mm; Höhe 170 mm) zur Probenvorbereitung mit dem zuvor homogenisierten Gesteinskörnungsgemischs bis zu einer Höhe von 14 cm gefüllt. Der gefüllte Proctortopf wird gemäß Bild 5.3-17 auf dem Rütteltisch eingespannt. Über den Laststempel wird zur Verdichtung eine vertikale Druckspannung auf die Probe aufgebracht. Die Verdichtung erfolgt nach den folgenden Bedingungen:

- Rütteldauer: 15 Sekunden
- Auflast: 5 bar
- Rüttelamplitude: 4 mm
- Rüttelfrequenz: 50 Hz



**Bild 5.3-17:** Rütteltisch des Straßenbaulabors der Ruhr-Universität Bochum

Für die Bestimmung des Einflusses der granulometrischen Kenndaten der feinen Gesteinskörnungen auf die Lagerungsdichte wurden sechs LOA 5 D-Korngrößenverteilungen, siehe Bild 5.3-18, ausgewählt.



**Bild 5.3.-18:** Ausgewählte LOA 5 D-Korngrößenverteilungen

Die rot gekennzeichneten Varianten entsprechen den derzeit empfohlenen Grenzen für die Korngrößenverteilung (KGV) eines LOA 5 D. Bei den in grün dargestellten Varianten wurden feine Gesteinskörnungen (fGK) 0,063/1 mm verwendet und bei denen, die in blau dargestellt sind, feine Gesteinskörnungen 1/2 mm. Für die grobe Gesteinskörnung wurde die obere und untere empfohlene Korngrößenverteilungslinie gewählt. Das Über- und Unterkorn jeder Korngruppe wurde abgesiebt.

Neben der Optimierung des Korngemisches und der granulometrischen Eigenschaften wurden auch umfangreiche Bindemitteluntersuchungen durchgeführt, sowie die Zusammensetzung des Asphaltgemisches variiert und analysiert. Für die einzelnen Komponenten wurde folgendes festgestellt:

- Füller: Reduzierung des Hohlraumgehaltes in Abhängigkeit vom Bindemittel im Mittel um ca. 2 Vol.-% durch die Wahl eines gering versteifenden Füllers im Vergleich zu einem stark versteifenden Füller
- Bindemittel: Reduzierung des Hohlraumgehaltes um 0,5 bis 1 Vol.-% durch die Verwendung funktionaler Bindemittelkonzepte
- Grobe Gesteinskörnungen 2/5,6 mm: Ein Einfluss der Kornform auf die Lagerungsdichte von Korngemischen konnte nicht eindeutig quantifiziert werden ( $\leq 15$  .-% scheint ausreichend)
- Feine Gesteinskörnungen 0/2 mm: Durch die Verwendung feiner Gesteinskörnungen mit einem niedrigen Fließkoeffizienten (z.B. Natursand) kann der Verdichtungswiderstand erheblich reduziert werden und der Hohlraumgehalt um bis zu 5,1 Vol.-%

Die größte Verbesserung hinsichtlich des Verdichtungsverhaltens kann somit über die feine Gesteinskörnung 0/2 mm erreicht werden. Die optimierten LOA 5 D-Varianten wurden mit einem Rheinischen Natursand 0/2 mm (NK) hergestellt.

Zur Überprüfung des Einflusses dieser Optimierung auf die Verformungsbeständigkeit und die lärmtechnischen Eigenschaften wurden Walzsegmentverdichter-Platten mit verschiedenen Bindemittelkonzepten hergestellt und zum Vergleich ebenfalls WSV-Platten mit einem LOA 5 D Asphaltmischgut, entsprechend den aktuellen Empfehlungen, mit variierenden Bindemittelkonzepten. Die Optimierung wirkt sich generell nicht negativ auf die Texturparameter aus, diese liegen bei allen Varianten im akustisch günstigen Bereich.

### 5.3.3.2 Porous-Mastic-Asphalt (PMA)

Die Asphaltmischgutart PMA (**Porous-Mastic-Asphalt**) wurde als „dichte“ Asphaltdeckschicht entwickelt, deren lärmtechnische Wirkung im Wesentlichen durch die offenporige Oberflächentextur erreicht wird. Die Dauerhaftigkeit der Oberflächentextur stellt somit eine bedeutende Eigenschaft für den Erhalt der lärmtechnischen Wirkung dar. Um diese neue lärmmindernde Asphaltbauweise, die sowohl im kommunalen Bereich als auch auf Außerortsstraßen eingesetzt wird, in ein Technisches Regelwerk aufnehmen zu können, sind umfangreiche Forschungsarbeiten hinsichtlich der Asphaltmischgutzusammensetzung, Einbaubedingungen, Nutzungsdauer und Langzeitwirkung von funktionalen Gebrauchseigenschaften wie z. B. Lärminderung und/oder Griffigkeit erforderlich.

Im vorliegenden Teilvorhaben wurden im Rahmen von Laboruntersuchungen u.a. Verfahren zur prüftechnischen Ansprache von PMA-Mischgut im Labor entwickelt, die eine Grundlage für das Erarbeiten von praxisbezogenen, charakteristischen Asphaltmischgutkonzepten darstellen. Zur Erarbeitung von Mischgutkonzepten mit hoher Praxisstauglichkeit wurde anschließend auf die Gleichmäßigkeit der Oberflächenbeschaffenheit von PMA beim Einbau mit möglichst wenigen Schwankungen im Hohlraumgehalt und der lärmtechnisch günstigen Hohlraumverteilung im Asphaltgefüge ein bedeutsames Augenmerk gelegt.

Die bisher, aus den Prüfungen von Gussasphalt bekannte Herstellung und Untersuchung von Probewürfeln hat sich für ein PMA-Mischgut als ungeeignet erwiesen. Daher war es erforderlich, ein neues Verfahren zur Herstellung von Laborprobekörpern im Labor zu entwickeln. Folgende Ziele wurden bei der Entwicklung dieses neuen Prüfverfahrens erfolgreich umgesetzt:

- Einfache Handhabung,
- Maschinelle Herstellung mit möglichst geringem Einfluss vom Laborpersonal unter der Nutzung des Verdichtungsgerätes nach Marshall,
- Abbildung der „PMA-Theorie“ (offenporige Oberfläche, dichtes Gefüge im unteren Bereich) im Erscheinungsbild des Probekörpers.

### Auswahl geeigneter Baustoffe und Baustoffgemische

Bei der Auswahl von Gesteinskörnungen und Bindemitteln wurden als Kriterien die regionale Verfügbarkeit und die vorgesehene Eignung für einen PMA zugrunde gelegt. Die Gesteinskörnungen und Bindemitteln wurden jeweils in ausreichender Menge für die anstehenden Laboruntersuchungen beim jeweiligen Lieferanten / Hersteller beschafft. Da zu Beginn des Forschungsprojektes noch nicht eindeutig festgelegt wurde, welche der beiden Asphaltmischgutsorte von PMA im vorliegenden Forschungsprojekt bearbeitet werden sollten, wurden die entsprechenden groben Gesteinskörnungen zunächst in zwei Kornklassen 2/5 mm und 5/8 mm in den Untersuchungsumfang eingeschlossen. Im Laufe der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurde in den Sitzungen des Teilvorhabenausschusses festgelegt, alle Untersuchungen ausschließlich auf die Asphaltmischgutsorte PMA 5 zu beschränken.

### Gesteinskörnungen

Damit eine Auswahl von in Frage kommender Gesteinskörnungen getroffen werden kann, wurden in Vorbereitung auf die Untersuchungen die Kenndaten des jeweiligen Lieferanten aus den Überwachungszeugnissen ausgewertet. Dabei wurden unter Beachtung der vorläufigen Vorgaben des Arbeitspapiers [4] folgende Anforderungen an grobe Gesteinskörnungen gestellt:

- Anteil gebrochener Kornoberflächen C100/0,
- Widerstand gegen Zertrümmerung SZ18 / LA20,
- Widerstand gegen Polieren PSV angegeben (51),
- Kornformkennzahl SI15.

Nach der Auswertung der vorliegenden Daten wurden für die Durchführung der geplanten Untersuchungen im Labor die in Tabelle 5.3-1 aufgeführten feinen und groben Gesteinskörnungen als geeignet ausgewählt. Diese wurden dann jeweils in einer ausreichenden Menge je Lieferkörnung bei dem jeweiligen Lieferanten beschafft und zunächst im Anlieferungszustand untersucht. Anschließend wurden die Gesteinskörnungen entsprechend der jeweiligen Kornklassen aufbereitet, sodass der Über- und Unterkornanteil bei den Kornklassen 2/5 und 5/8 mittels Nasssiebung abgetrennt wurde.

Gesteinsart	Lieferkörnung	Über- / Unterkorn [M.-%]		Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]		Kornform [%]	
		2/5	5/8	2/5	5/8	2/5***	5/8
Gabbro	2/5 und 5/8	8,1 / 4,9		2,903	2,891	10,6	12,6
Granit		5,6 / 7,3		2,742	2,749	5,9	9,7
Diabas		6,3 / 7,9		2,861	2,869	8,4	9,3
Basalt		5,2 / 8,6		2,999	3,008	14,2	14,9
Natursand	0/1	6,0* / 1,7		2,654		---	
Kalkstein-Füller	0/0,063	21,4** / ---		2,723		---	

**Tab. 5.3.1:** Eigenschaften der ausgewählten Lieferkörnungen  
 \*: Anteil feiner Gesteinskörnung (fGk) > 1,0 mm ; \*\*: Anteil der Korngruppe 0,063 / 2 mm  
 \*\*\*: ermittelt an der Kornklasse 4/5 mm

### Bindemittel

Die Auswahl der zu verwendenden Bindemittel wurde unter Beachtung der Vorgaben des Arbeitspapiers [4] getroffen. Für die Herstellung von Asphaltgemischen im Labor wurden gebrauchsfertige viskositätsveränderte Bindemittel verwendet. Die Bindemittel wurden in ausreichenden Mengen bei den jeweiligen Lieferanten beschafft. Anschließend wurden an diesen die allgemeinen Kenndaten gemäß TL Bitumen im Anlieferungszustand ermittelt. In Tabelle 5.3-2 sind die dabei ermittelten Ergebnisse zu den Eigenschaften der vorgesehenen Bindemittel zusammenfassend dargestellt. Des Weiteren wurde in der Projektsitzung vom 01.06.2011 vereinbart, Untersuchungen zum rheologischen Stoffverhalten dieser Bindemittel von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) durchzuführen. Die entsprechenden Teilproben wurden über den Projektpartner Ruhr-Universität Bochum der BASt zu Verfügung gestellt.

Bindemittelart		EP RuK [°C]	Nadelpenetration [1/10 mm]	Brennpunkt nach Fraaß [°C]	Elastische Rückstellung [%]
Hersteller- Bezeichnung	TL Bitumen				
Nypeve PX 25	20/30+VvZ	79,8	24	-9	---
Nypave PX 35	30/45+VvZ	77,4	33	-12	---
Mexphalte S 30/45	30/45+VvZ	71,8	37	-10	---
Cariphalte S 25/55-55	25/55-55 A + VvZ	76,2	30	-12	73
Sübit VR 35	30/45+VvZ	86,0	31	-10	---

**Tab. 5.3-2:** Eigenschaften der verwendeten Bindemittel

### **Untersuchungen zur Asphaltmischgutzusammensetzung**

Die Untersuchungen zur Asphaltmischgutzusammensetzung sollten zunächst für die Asphaltart PMA 5 in drei Schritten gegliedert werden. Im ersten Schritt sollten Versuche zur Optimierung der Korngrößenverteilung des Gesteinskörnungsgemisches im Hinblick auf die optimale Lagerungsdichte im Rüttelversuch unter Variation der Gesteinsart durchgeführt werden. Im zweiten Schritt sollte dann mit der optimalen Kornzusammensetzung des Gesteinskörnungsgemisches die Variation des Bindemittelgehaltes durchgeführt werden. Im dritten Schritt sollten Verfahren zur Herstellung von Probekörpern im Labor, die zur Prüfung von Gebrauchseigenschaften von PMA 5 verwendet werden, unter Beachtung der Hinweise des Arbeitspapiers



res [4] erarbeitet werden. Dabei wurden in den stattgefundenen Sitzungen der Projektbeteiligten die Herstellungsverfahren gemäß Arbeitspapier PMA, modifiziertes Marshall-Verdichtungsverfahren für die Probekörper und für die Probeplatten eine Walzverdichtung im Walzsektorverdichter favorisiert.

Der Einfluss der Gesteinsart auf die Lagerungsdichte des Gesteinskörnungsgemisches von PMA 5 wurde anfangs im Rüttelversuch in Anlehnung an die DIN 18126 untersucht. Für jede Gesteinsart wurden drei Variationen der Korngrößenverteilung innerhalb der Vorgaben des Sieblinienbereiches gemäß Arbeitspapier PMA (oben, Mitte, unten). Dabei wurde als Gesteinsart die Kornklasse 2/5 variiert. Der Einsatz von Natursand und Kalksteinfüller blieb damit unverändert. In den Rüttelversuchen wurden Gesteinskörnungsgemische mit den jeweiligen Anteilen, so wie diese auch bei der Herstellung des Asphaltmischgutes zum Einsatz kommen, verwendet. In Tabelle 5.3-4 sind die Zusammensetzungen der Gesteinskörnungsgemische mit Groben Gesteinskörnungen aus Granit und aus Basalt mit den im Rüttelversuch ermittelten Lagerungsdichten enthalten. In Tabelle 5.3-3 ist die Erklärung zur Bezeichnung der einzelnen Varianten dargestellt.

Bezeichnung der Variante	Bedeutung der verwendeten Abkürzungen
Variante 1-G	obere Grenzlinie gemäß AP PMA, gGk 2/5 aus Granit
Variante 2-G	untere Grenzlinie gemäß AP PMA, gGk 2/5 aus Granit
Variante 3-G	Mitte des Grenzwertes gemäß AP PMA, gGk 2/5 aus Granit
Variante 1-B	obere Grenzlinie gemäß AP PMA, gGk 2/5 aus Basalt
Variante 2-B	untere Grenzlinie gemäß AP PMA, gGk 2/5 aus Basalt
Variante 3-B	Mitte des Grenzwertes gemäß AP PMA, gGk 2/5 aus Basalt

Tab. 5.3-3: Erklärung der verwendeten Bezeichnung bei der Variation der Gesteinskörnungsgemische

Variante	Füller [M.-%]	fGk [M.-%]	gGk [M.-%]	Lagerungsdichte im Rüttelversuch [g/cm <sup>3</sup> ]
Variante 1-G	20	20	60	2,134
Variante 2-G	16	9	75	1,911
Variante 3-G	18	15	67	2,050
Variante 1-B	20	20	60	2,308
Variante 2-B	16	9	75	2,134
Variante 3-B	18	15	67	2,215
Variante 4-G / -B	18	7	75	1,876 / 2,081
Variante 5-G / -B	21	12	67	2,185 / 2,319
Soll-Anteil gemäß [5]	16 – 20	5 – 24	60 – 75	---

Tab. 5.3-4: Eigenschaften der untersuchten Gesteinskörnungsgemische mit groben Gesteinskörnungen aus Granit und Basalt

Um den Einfluss der Gesteinsart festzustellen, wurden die Untersuchungsergebnisse zur Lagerungsdichte im Diagramm der Bild 5.3-19 für Gesteinsarten Granit und Basalt unter Beachtung der jeweiligen Variation der Korngrößenverteilung aufgeführt. Aus dem Diagrammverlauf wird ersichtlich, dass die Gesteinsart keinen Einfluss auf die im Rüttelversuch ermittelten Ergebnisse bewirkt. Die Größe der Lagerungsdichte wird bei der Kornzusammensetzung von PMA 5 überwiegend durch die Anteile der Einzelfraktionen (Füller, feine und grobe Gesteinskörnungen) bestimmt.

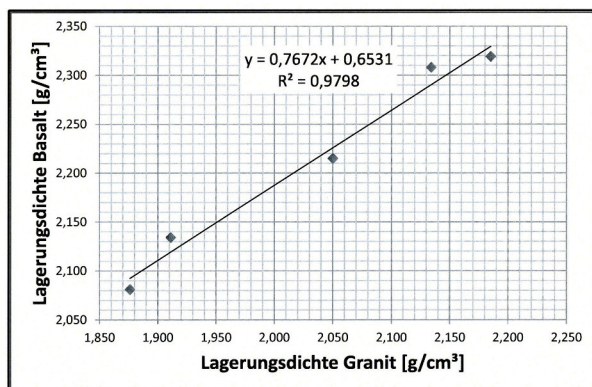


Bild 5.3-19: Zusammenhang zwischen den Lagerungsdichten der Gesteinskörnungsgemische aus groben Gesteinskörnungen aus Granit und Basalt

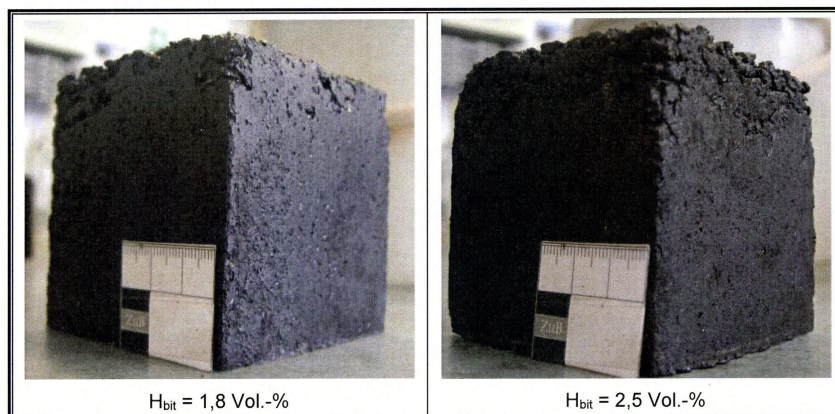
## Untersuchungen zur Herstellung von Probekörpern

### Herstellung Asphaltmischgut und Probewürfel

Die Asphaltmischgutherstellung erfolgte im Labormischer. Dabei wurden zwei unterschiedliche Labormischertypen hinsichtlich ihrer Handhabe und Eignung untersucht. Die durchgeführte Herstellung von Asphaltmischgut im Labor hat sowohl beim konventionellen Gussasphaltmischer als auch beim üblichen Walzasphaltmischer keine Nachteile hinsichtlich der Anwendung auf PMA-Asphaltmischgut ergeben. Beide Labormischertypen haben sich unter der Beachtung der Randbedingungen gemäß TP Asphalt-StB, Teil 35 für die Herstellung von PMA-Asphaltmischgut als geeignet erwiesen. Beide Labormischertypen lieferten Asphaltmischgüter mit augenscheinlich ähnlicher Beschaffenheit und keinen Auffälligkeiten hinsichtlich Entmischung, nicht umhüllten Gesteinskörnungen, Kornzertrümmerungen o.ä. Die Herstellung der Probewürfel im Labor nach der Beschreibung des Arbeitspapiers [4] hat sich hinsichtlich der Gleichmäßigkeit und Homogenität als schwierig erwiesen. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass sich im Vergleich zu der in der Praxis anzutreffenden Beschaffenheit der Asphaltdeckschicht aus PMA 5 beim Probewürfel eine deutlich abweichende Oberflächengestalt einstellt. Des Weiteren wird oft beobachtet, dass es bei der Herstellung der Probewürfel aus ein und derselben Asphaltmischung zum unterschiedliche Aussehen der Probewürfel führen kann. Nachfolgende Bild 5.3-20 zeigt exemplarisch zwei Probewürfel aus ein und demselben Asphaltmischgut gleicher Charge, die bereits augenscheinlich erkennbare Unterschiede in der Beschaffenheit aufweisen. Die aus den Prüfungen von konventionellem Gussasphalt bekannte Herstellung von Probewürfeln hat sich für das Asphaltmischgut PMA als ungeeignet erwiesen, so dass zunächst ein neues Verfahren zur Herstellung von Laborprobekörpern im Labor entwickelt werden musste. Dabei sollte ein Herstellungsverfahren von Probekörpern erarbeitet werden, bei dem im Gegensatz zum Würfel-Verfahren die Verdichtung unter den definierten mechanischen Prüfbedingungen und damit mit möglichst geringem Hand-Einfluss des Laborpersonals durchgeführt werden kann, um Probekörper mit einem praxisadäquaten Erscheinungsbild der Oberfläche sowie des Asphaltgefüges zu erhalten.

Folgende Ziele wurden dabei bei der Entwicklung dieses neuen Prüfverfahrens erfolgreich umgesetzt:

- Einfache Handhabung,
- Maschinelle Herstellung mit möglichst geringem Einfluss vom Laborpersonal Abbildung der „PMA-Theorie“ im Erscheinungsbild des Probekörpers,
- Offenporige Oberflächengestalt / kommunizierende Hohlräume (Poren) in der oberen Hälfte,
- Dichtes Asphaltgefüge in der unteren Hälfte des Probekörpers.



**Bild 5.3-20:** Exemplarische Dokumentation der Beschaffenheit von zwei Probewürfeln aus einem und demselben Asphaltmischgut gleicher Charge

### Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von PMA-Probekörpern

Als Grundlage für die Entwicklung des Herstellungsverfahrens von Probekörpern aus PMA wurde das Verdichtungsgerät nach Marshall verwendet und die Prüf- sowie Herstellungsbedingungen für den PMA optimiert bzw. neu entwickelt. Nachfolgend sind die wesentlichen Entwicklungsschritte zusammenfassend dargestellt:

- Probekörperherstellung erfolgt mit dem Verdichtungsgerät nach Marshall (in Anlehnung an die TP Asphalt-StB, Teil 30)

- Vorwärmen der Verdichtungsformen und des Fallhammers auf eine Betriebstemperatur von etwa 150 °C
- Vorwärmen der Teilproben (in einer für ein PK erforderlichen Menge) auf eine Temperatur von etwa 180 °C im Wärmeschrank
- Weiterführendes Temperieren der Teilprobe unter exakter Homogenisierung (Umrühren) auf einer Heizplatte bis zur Verdichtungstemperatur von 180 °C ( $\pm 5$  °C)
- Herstellung von Probekörpern unter einseitiger Verdichtung und der Variation der Verdichtungsschläge
- gesonderte Handhabung bei der Lagerung der „frisch“ verdichteten Probekörper während der Abkühlphase

Zur Festlegung der erforderlichen Anzahl der Verdichtungsschläge wurden Probekörper nach den oben definierten Prüfbedingungen jedoch unter Variation der Anzahl der Verdichtungsschläge hergestellt. Dabei wurden alle Probekörper aus gleichem Asphaltmischgut (PMA 5), jedoch aus gesonderten Teilproben hergestellt. Anschließend wurden an diesen sogenannten modifizierten MPK die Raumdichte mit dem Verfahren gemäß TP Asphalt-StB, Teil 6 (Verfahren B, SSD) und die Rohdichte gemäß TP Asphalt-StB, Teil 5 bestimmt. Aus diesen beiden Kenngrößen wurden die Hohlraumgehalte der Probekörper ermittelt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in der Tabelle 5.3-5 enthalten. In Tabelle 5.3-6 sind die Kenngrößen hinsichtlich der Zusammensetzung des verwendeten Asphaltmischgutes zusammenfassend dargestellt.

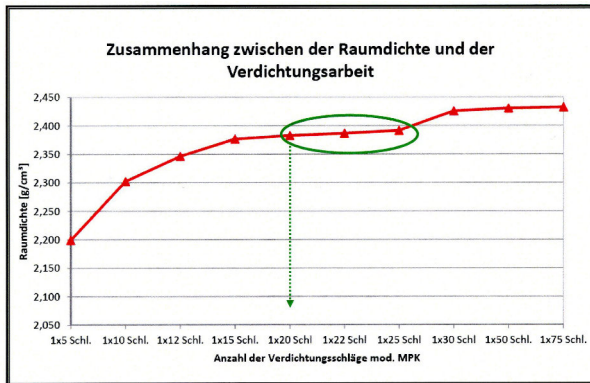
Probekörper-Serie	Anzahl der Verdichtungsschläge [-]	Raumdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Hohlraumgehalt [Vol.-%]
1	1 x 5	2,199	13,0
2	1 x 10	2,302	8,9
3	1 x 12	2,346	7,2
4	1 x 15	2,377	6,0
5	1 x 20	2,383	5,7
6	1 x 22	2,386	5,6
7	1 x 25	2,391	5,4
8	1 x 30	2,425	4,0
9	1 x 50	2,431	3,8
10	1 x 75	2,432	3,7

**Tab. 5.3-5:** Eigenschaften der mod. MPK im Rahmen der Festlegung der Anzahl der Verdichtungsschläge

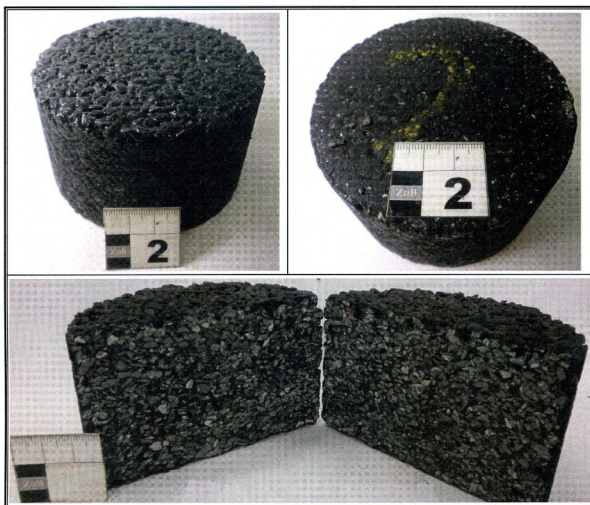
Bezeichnung	Füller [M.-%]	fGk [M.-%]	gGk [M.-%]	BM-Gehalt [M.-%]	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]
PMA 5	19,9	10,7	69,4	7,1	2,527

**Tab. 5.3-6:** Zusammensetzung des Asphaltmischguts PMA 5 für die Untersuchungen hinsichtlich der erforderlichen Anzahl der Verdichtungsschläge

Um eine erforderliche Anzahl der Verdichtungsschläge aus den durchgeführten Untersuchungen abzuleiten, bei welcher einerseits von einer weitgehend erreichten Endverdichtung des Asphaltmischgutes ausgegangen werden kann und andererseits die Oberflächengestalt des Probekörpers sowie das sich eingestellte Asphaltgefüge die Vorgaben aus der Theorie und Praxis der PMA-Bauweise möglichst nahe abbilden, wurde zunächst der Zusammenhang zwischen der Raumdichte, der erbrachten Verdichtungsarbeit und der Beschaffenheit der Hohlraumstruktur untersucht. Auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse und -erkenntnisse wurden für das neuentwickelte Herstellungsverfahren die Prüfbedingungen festgelegt, die es ermöglichen, die Einflüsse aus den Veränderungen in der Asphaltmischgutkonzeption auf die Eigenschaften der mod. MPK festzustellen und diese ausreichend zu differenzieren. In Bild 5.3-21 ist ein typischer Zusammenhang zwischen der Raumdichte von MPKmod. und der aufgebrauchten Verdichtungsarbeit im Herstellungsprozess des Marshall-Verdichtungsgerätes dargestellt. Bild 5.3-22 zeigt die typische Hohlraumstruktur eines PMA-Probekörper (mod. MPK).

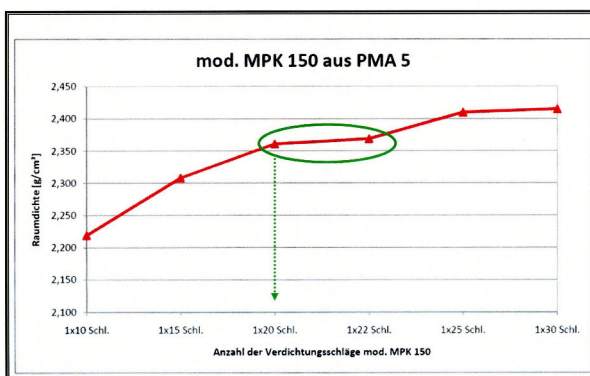


**Bild 5.3-21:** Zusammenhang zwischen der Raumdichte der mod. MPK (d=100 mm) und der aufgetragenen Verdichtungsarbeit im Verdichtungsgerät nach Marshall



**Bild 5.3-22:** Beschaffenheit eines mod. MPK aus PMA 5  
 Links oben: Hohlraumstruktur an der Oberfläche – Rechts oben: dichte Unterseite  
 Unten: Hohlraumstruktur im Querschnitt durch den mod. MPK

Auf Grundlage der Auswertung der Ergebnisse von Untersuchungen hinsichtlich der Variation der Verdichtungsschläge wurde die Anzahl der erforderlichen Verdichtungsschläge sowohl für die mod. MPK mit dem Durchmesser von 100 mm als auch für die MPK mit dem Durchmesser von 150 mm mit 1 x 20 festgelegt.



**Bild 5.3-23:** Zusammenhang zwischen der Raumdichte der mod. MPK (d = 150 mm) und der aufgetragenen Verdichtungsarbeit im Verdichtungsgerät nach Marshall

Wie die Diagramme in den Bildern 5.3-21 und 5.3-23 zeigen, kann bei der Herstellung von mod. MPK zwischen zwei Stufen der Endverdichtung unterschieden werden. Im Bereich der Verdichtungsschlaganzahl zwischen 20 und 30 findet bei der Herstellung von mod. MPK aus PMA 5 die sogenannte erste Phase der

Endverdichtung statt. In diesem Bereich tritt keine wesentliche Zunahme der Raumdichte auf, sodass eine Seite des Probekörpers ein relativ dichtes Asphaltgefüge aufweist und die Probekörperoberfläche eine deutlich hohlraumreiche Textur aufzeigt. Der Kurvenverlauf im Bereich der Verdichtungsschlaganzahl oberhalb von 30 verdeutlicht ebenfalls keine wesentliche Zunahme der Raumdichte am mod. MPK, die Probekörper weisen jedoch ein vollständig dichtes Asphaltgefüge und eine nahezu geschlossene Oberflächentextur auf. Offensichtlich findet bei der Verdichtungsschlagzahl zwischen 20 und 30 ein sogenanntes Hineinpressen des Mörtels in die noch vorhandenen Hohlräume infolge einer deutlichen mechanischen Überverdichtung des Probekörpers statt. Um diese Nachwirkung zu vermeiden, sollte die Endverdichtung des Probekörpers (mod. MPK) in der Phase abgeschlossen werden, bei welcher die Hohlraumfüllung infolge einer Überverdichtung des Probekörpers nicht auftritt. Aus den Untersuchungsergebnissen und den gewonnenen Erkenntnissen bei der Probekörperherstellung wurde ein Vorschlag für die Prüfbedingungen von mod. MPK aus PMA erarbeitet. Nachfolgend sind diese vorläufigen Prüfbedingungen für die Herstellung von mod. MPK aus einem PMA 5-Asphaltnischgut dargestellt.

Des Weiteren zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass mit dem entwickelten Prüfverfahren zur Herstellung von mod. MPK Probekörper hergestellt werden können, deren Eigenschaften, insbesondere im Bezug auf die volumetrischen Kenngrößen, bei unterschiedlichen Asphaltnischgutkonzeptionen deutlich differenzieren. Dadurch ist es möglich, die Einflüsse aus der Asphaltnischgutkonzeption auf die sich daraus ergebende Eigenschaften der mod. MPK vergleichend zu untersuchen.

#### **Prüfbedingungen für die Herstellung modifizierter MPK aus dem Asphaltnischgut PMA**

- Vorwärmen der Verdichtungsformen und des Fallhammers auf eine Betriebstemperatur von etwa 150 °C
- Vorwärmen der Teilproben (in einer für ein PK erforderlichen Menge ca. 1.200 bis 1.250 g) auf eine Temperatur von etwa 180 °C im Wärmeschrank
- Weiterführendes Temperieren der Teilprobe unter exakter Homogenisierung (Umrühren) auf einer Heizplatte bis zur Verdichtungstemperatur von 180 °C ( $\pm 5$  °C)
- Herstellung von Probekörpern unter einseitiger Verdichtung mit Aufbringen von 20 Verdichtungsschlägen im Marshall-Verdichtungsgerät
- Nach Abschluss der Verdichtung unverzügliches Entfernen der Trenneinlage (z. B. Filterpapier) von der Ober- und Unterseite des Probekörpers
- Lagerung des mod. MPK auf der mit Verdichtungsschlägen beanspruchten Seite
- auf einem Abkühlblech bis zur vollständigen Abkühlung (Phase des Sedimentierens des Mörtels im unteren ca. Dreiviertel des Probekörpers)
- Kennzeichnen der Verdichtungsform und des Probekörpers für die weiterführenden Untersuchungen (z.B. Stempelindringtiefe)
- Auspressen von mod. MPK aus der Verdichtungsform mit der prüffertigen Seite nach oben beim Erreichen einer Raumtemperatur (ca. 20 °C)

#### **Einfluss der Kornzusammensetzung auf die volumetrischen Eigenschaften von PMA 5 am modifizierten MPK**

Zur Feststellung des Einflusses der Korngrößenverteilung auf die Eigenschaften der mod. MPK und zur gleichzeitigen Überprüfung vorliegender Prüfbedingungen des Verdichtungsverfahrens hinsichtlich einer Differenzierbarkeit der bewirkten Eigenschaften aus der herbeigeführten Veränderung in der Asphaltnischgutkonzeption wurde nachfolgendes Versuchsprogramm aufgestellt:

- Voruntersuchungen an den vorgesehenen Gesteinskörnungen
- Herstellung des Asphaltnischgutes PMA 5 unter Variation des Bindemittelgehaltes bei gleicher Kornzusammensetzung
- Herstellung von Asphaltnischgut PMA 5 unter Variation der Kornzusammensetzung
- Herstellung von mod. MPK (d=100)
- Bestimmung der Asphaltnischgutrohndichte und Eigenschaften der mod. MPK
- Präparation und augenscheinliche Beurteilung der mod. MPK
- Auswertung und Darstellung der Untersuchungsergebnisse

In Tabelle 5.3-1 sind die Eigenschaften der verwendeten Baustoffe im Anlieferungszustand vor Durchführung der Voruntersuchungen enthalten. Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde bei der groben Gesteinskörnung (gGk) 2/5 das Unterkorn heraus gesiebt, um im Zuge der Veränderung der Kornzusammensetzung diesen kontrolliert zu variieren und dabei den möglichen Einfluss des Unterkorn zu eliminieren.

In Tabelle 5.3-7 sind die Eigenschaften der für diese Untersuchungen verwendeten Baustoffe im Anlieferungszustand zusammenfassend dargestellt. In Tabelle 5.3-8 sind die Asphaltnischguteigenschaften und Untersuchungsergebnisse der Variante 1 mit der Variation des Bindemittelgehaltes enthalten.

Korngrößenverteilung gGk 2/5	0,063	0,125	1,0	2,0	5,6	8,0
Diabas Siebdurchgang [M.-%]	0,3	0,5	1,6	8,9	95,9	100,0
Gesteinsrohichte Diabas [g/cm <sup>3</sup> ]	2,856					
Korngrößenverteilung fGk 0/1	0,063	0,125	0,25	1,0	2,0	
Natursand Siebdurchgang [M.-%]	0,4	8,1	65,3	98,5	100,0	
Korngrößenverteilung fGk 0,063/2	0,5	0,6	0,9	10,8	99,9	
Unterkorn Diabas Siebdurchgang [M.-%]						
Gesteinsrohichte Natursand [g/cm <sup>3</sup> ]	2,651					
EP Ring und Kugel Bindemittel NYPAVE 25 PX [°C]	80,0					

Tab. 5.3-7: Eigenschaften der verwendeten Baustoffe im Anlieferungszustand

KGV Anteil M.-%	Füller	20,0						
	Natursand	12,0						
res. KGV Siebdurchgang	fGk Unterkorn aus 2/5	0,0						
	gGk 2/5*	68,0						
	0,063	0,125	1,0	2,0	5,6	8,0		
	17,8	21,0	31,9	32,1	97,2	100,0		
Eigenschaften der mod. MPK <sub>100</sub>		Bindemittelgehalt in M.-%						
Mittelwert aus 4 MPK		7,0						
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]		2,504						
Raumdichte [g/cm <sup>3</sup> ]		2,435						
Hohlraumgehalt [Vol.-%]		2,8						
Hohlraumfüllungsgrad [%]		85,0						
Eindringtiefe I <sub>max, 30 min, 60 °C</sub> [mm]		0,89						

Tab. 5.3-8: Variante 1, Untersuchungsergebnisse aus der Zielsetzung der Bindemittelvariation  
\* = bereinigt vom Unterkorn 0/2

Bei der systematischen Substitution der feinen Gesteinskörnung 0/1 (Natursand) durch das Unterkorn 0/2 aus der gGk 2/5 wurde die Variation in der Art durchgeführt, dass das Verhältnis von Brechsand zu Natursand systematisch wie folgt eingestellt wurde:

- Variante 1: NS : NS => 0 : 1
- Variante 2: NS : NS => 2 : 1
- Variante 3: NS : NS => 1 : 2
- Variante 4: NS : NS => 1 : 5

In den Tabellen 5.3-12 bis 5.3-14 sind die Asphaltmischguteigenschaften und Untersuchungsergebnisse der Varianten 2 bis 4 mit der Variation der Kornzusammensetzung im Bereich der feinen Gesteinskörnungen (fGk) dargestellt. In Bild 5.3-24 sind die einzelnen Korngrößenverteilungen infolge der Substitution von Natursand und Brechsand in der Korngruppe feine Gesteinskörnungen (fGk) zum Vergleich enthalten. In den Bildern 5.3-25 und 5.3-26 sind die Hohlraumgehalte und Hohlraumfüllungsgrade für die einzelnen Asphaltmischgutvarianten (ermittelt am mod. MPK) dargestellt. Die Beschaffenheit der Hohlraumstruktur und der Oberflächentextur der untersuchten mod. MPK wurde augenscheinlich beurteilt und fotografisch dokumentiert. Eine Auswahl der aufgenommenen Fotografien ist in den Bildern 5.3-27 bis 5.3-29 enthalten.

KGV Anteil M.-% Dosierung	Füller	20,0						
	Natursand	4,0						
res. KGV Siebdurchgang	fGk Unterkorn aus 2/5	8,0						
	gGk 2/5*	68,0						
	0,063	0,125	1,0	2,0	5,6	8,0		
	17,8	20,5	24,9	32,1	97,2	100,0		
Eigenschaften der mod. MPK <sub>100</sub>		Bindemittelgehalt in M.-%						
Mittelwert aus 4 MPK		7,0						
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]		2,526						
Raumdichte [g/cm <sup>3</sup> ]		2,355						
Hohlraumgehalt [Vol.-%]		6,8						
Hohlraumfüllungsgrad [%]		70,3						
Eindringtiefe I <sub>max, 30 min, 60 °C</sub> [mm]		0,81						

Tab. 5.3-9: Variante 2, Asphaltmischguteigenschaften und die Eigenschaften der mod. MPK  
\* = bereinigt vom Unterkorn 0/2

KGV Anteil M.-% Dosierung	Füller	20,0					
	Natursand	8,0					
	fGk Unterkorn aus 2/5	4,0					
	gGk 2/5*	68,0					
res. KGV Siebdurchgang g	0,063	0,125	1,0	2,0	5,6	8,0	
	17,8	20,7	28,4	32,1	97,2	100,0	
Eigenschaften der mod. MPK <sub>100</sub> Mittelwert aus 4 MPK							Bindemittelgehalt in M.-%
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]							2,516
Raumdichte [g/cm <sup>3</sup> ]							2,399
Hohlraumgehalt [Vol.-%]							4,7
Hohlraumfüllungsgrad [%]							77,7
Eindringtiefe I <sub>max</sub> , 30 min, 60 °C [mm]							0,82

Tab. 5.3-10: Variante 3, Asphaltmischguteigenschaften und die Eigenschaften der mod. MPK  
\* = bereinigt vom Unterkorn 0/2

KGV Anteil M.-% Dosierung	Füller	20,0					
	Natursand	10,0					
	fGk Unterkorn aus 2/5	2,0					
	gGk 2/5*	68,0					
res. KGV Siebdurchgang g	0,063	0,125	1,0	2,0	5,6	8,0	
	17,8	20,9	30,1	32,1	97,2	100,0	
Eigenschaften der mod. MPK <sub>100</sub> Mittelwert aus 4 MPK							Bindemittelgehalt in M.-%
Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]							2,505
Raumdichte [g/cm <sup>3</sup> ]							2,424
Hohlraumgehalt [Vol.-%]							3,2
Hohlraumfüllungsgrad [%]							83,8
Eindringtiefe I <sub>max</sub> , 30 min, 60 °C [mm]							0,85

Tab. 5.3-11: Variante 4, Asphaltmischguteigenschaften und die Eigenschaften der mod. MPK  
\* = bereinigt vom Unterkorn 0/2

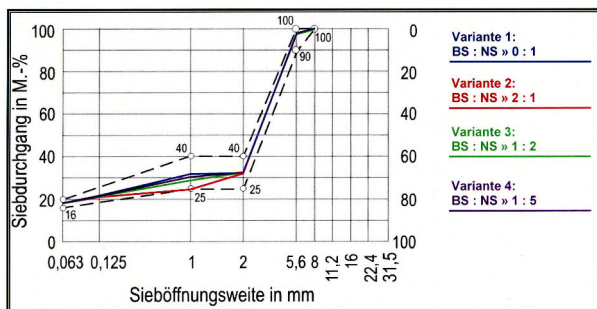


Bild 5.3-24: Korngrößenverteilung der Asphaltmischgutvarianten beim PMA 5 infolge der Substitution (Brechsand und natursand) in der Korngruppe fGk

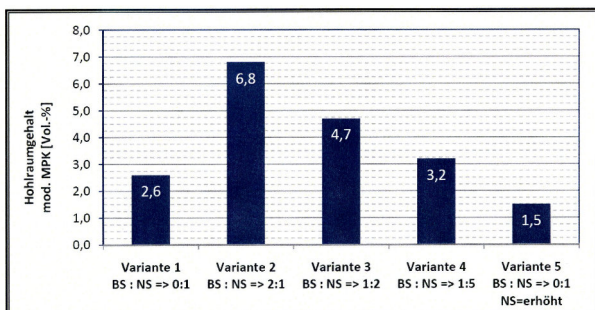
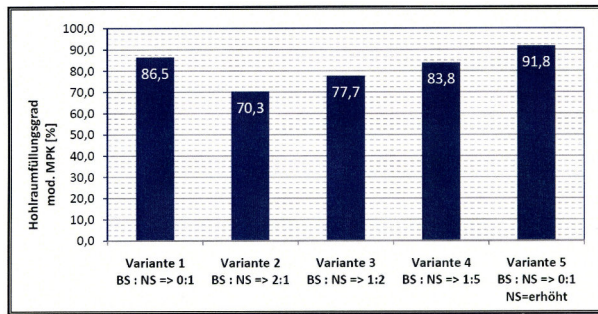


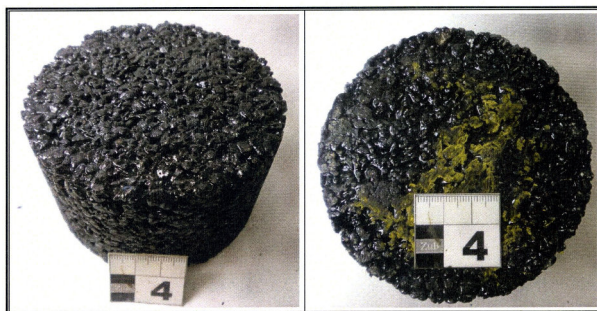
Bild 5.3-25: Hohlraumgehalt am mod. MPK (d = 100 mm)



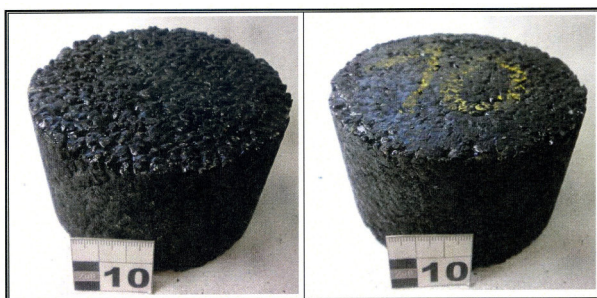
**Bild 5.3-26:** Hohlräumfüllungsgrade am mod. MPK (d = 100 mm)



**Bild 5.3-27:** Beschaffenheit der Oberflächentextur und der Unterseite eines mod. MPK aus Asphaltmischgut PMA 5 der Variante 1 (BS : NS = > 0 : 1)



**Bild 5.3-28:** Beschaffenheit der Oberflächentextur und der Unterseite eines mod. MPK aus Asphaltmischgut PMA 5 der Variante 2 (BS : NS = > 2 : 1)



**Bild 5.3-29:** Beschaffenheit der Oberflächentextur und der Unterseite eines mod. MPK aus Asphaltmischgut PMA 5 der Variante 4 (BS : NS = > 1 : 5)

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen können hinsichtlich des Einflusses der Kornzusammensetzung auf die Eigenschaften der mod. MPK die wesentlichen Erkenntnisse wie folgt abgeleitet werden:

- Mit dem entwickelten Prüfverfahren zur Herstellung von mod. MPK aus einem PMA-Asphaltmischgut können Probekörper hergestellt werden, deren Eigenschaften, insbesondere im Bezug auf die volumetrischen Kenngrößen, bei unterschiedlichen Asphaltmischgutkonzeptionen deutlich differenzieren. Dadurch ist es möglich, die Einflüsse aus der Asphaltmischgutkonzeption auf die sich daraus ergebende Eigenschaften der mod. MPK vergleichend zu untersuchen.



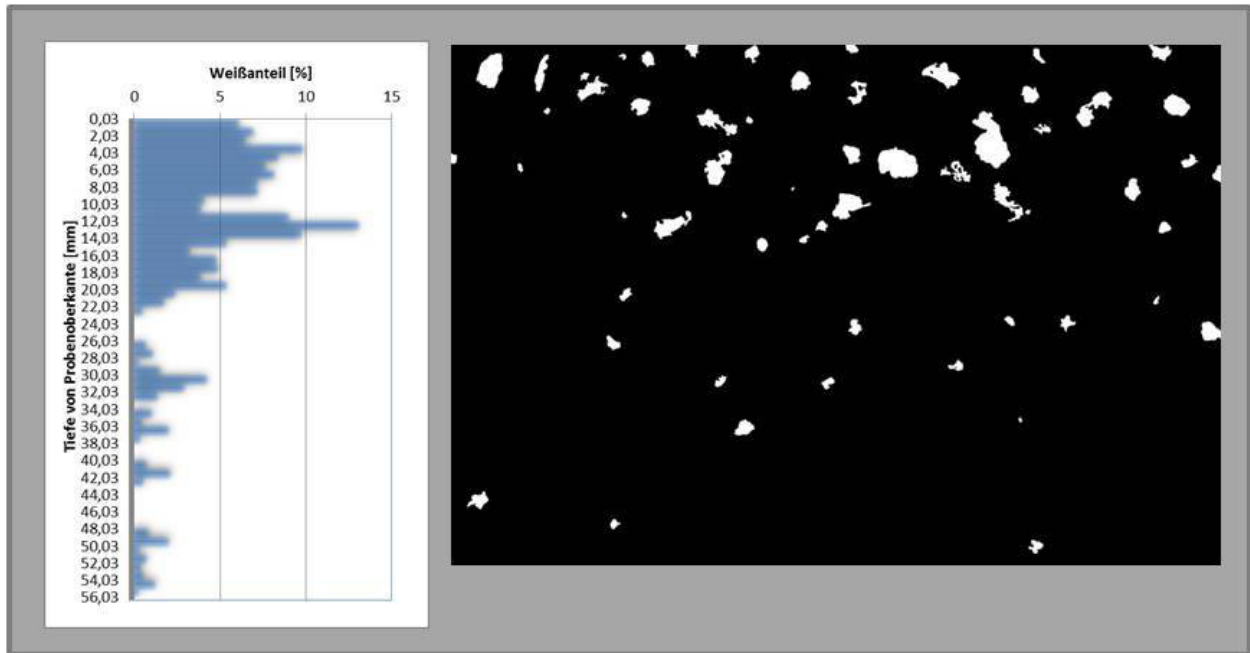
- Die Untersuchungsergebnisse der Variation der Kornzusammensetzung im Bereich der feinen Gesteinskörnungen (Brechsand und Natursand) zeigen zunächst, dass das Verhältnis zwischen Natursand und Brechsand im Bereich der feinen Gesteinskörnungen einen wesentlichen Einfluss auf die Hohlraummorphologie und damit auf den Hohlraumgehalt von mod. MPK beim PMA-Asphaltmischgut bewirkt. Des Weiteren kann festgestellt werden, dass ein zunehmender Anteil an Unterkorn in der Kornklasse 2/5 mm das Absetzen der Mörtelphase beim Asphaltmischgut PMA 5 verhindert und es damit nicht zum gewünschten Konzept der fertigen Schicht dieser Bauweise führt (oben offenporig, unten dicht). Ferner kann aus den ermittelten Untersuchungsergebnissen abgeleitet werden, dass bei einem Unterkornanteil größer als 2 M.-% dieser Effekt deutlich verstärkt wird und der Hohlraumgehalt sowie die Hohlraumstruktur vom Unterkornanteil maßgebend beeinflusst werden.
- Ein Anteil von Natursand 0/1 mm im Bereich zwischen 10 M.-% und 14 M.-% und die Ausfallkörnung mit der Größe zwischen 1 mm und 2 mm sind im PMA-Mischgut zwingend erforderlich, um ein Absetzen der Mörtelphase und damit eine Entmischung des Asphaltmischgut beim Einbau, die zur Herstellung der offenporigen Oberflächenbeschaffenheit erforderlich ist, zu bewirken.
- Die mit dem neu entwickelten Verfahren hergestellten mod. MPK zeigen i.d.R. bei einem Hohlraumgehalt zwischen 2,5 Vol.-% und 4,0 Vol.-% ein dichtes Asphaltgefüge mit geschlossener Unterseite und eine mit offenporiger Struktur gekennzeichnete Oberfläche auf.
- Mod. MPK zeigen bei einem Hohlraumgehalt zwischen 2,5 Vol.-% und 4,0 Vol.-% ein dichtes Asphaltgefüge, insbesondere im unteren Bereich des Probekörpers, mit einer offenporigen Oberflächentextur auf. Die Gleichmäßigkeit der Hohlraumverteilung wird von der Größe der insgesamt zugänglichen Hohlräume im Probekörper beeinflusst. Bei einem Hohlraumgehalt (zugängliche Hohlräume) größer 6 Vol.-% erweist sich die Hohlraumstruktur als homogen mit gleichmäßig verteilten und zugänglichen Hohlräumen innerhalb des Probekörpers. Bei einem Hohlraum ab 2,5 Vol.-% bis etwa 5 Vol.-% wiesen die mod. MPK nach unten hin ein dichtes Asphaltgefüge mit vereinzelt eingeschlossenen Hohlräumen und zur Oberfläche hin eine offenporigere Struktur mit kommunizierenden Hohlräumen.

### **Vertiefe Analyse mittels computergestützter Bildauswertung**

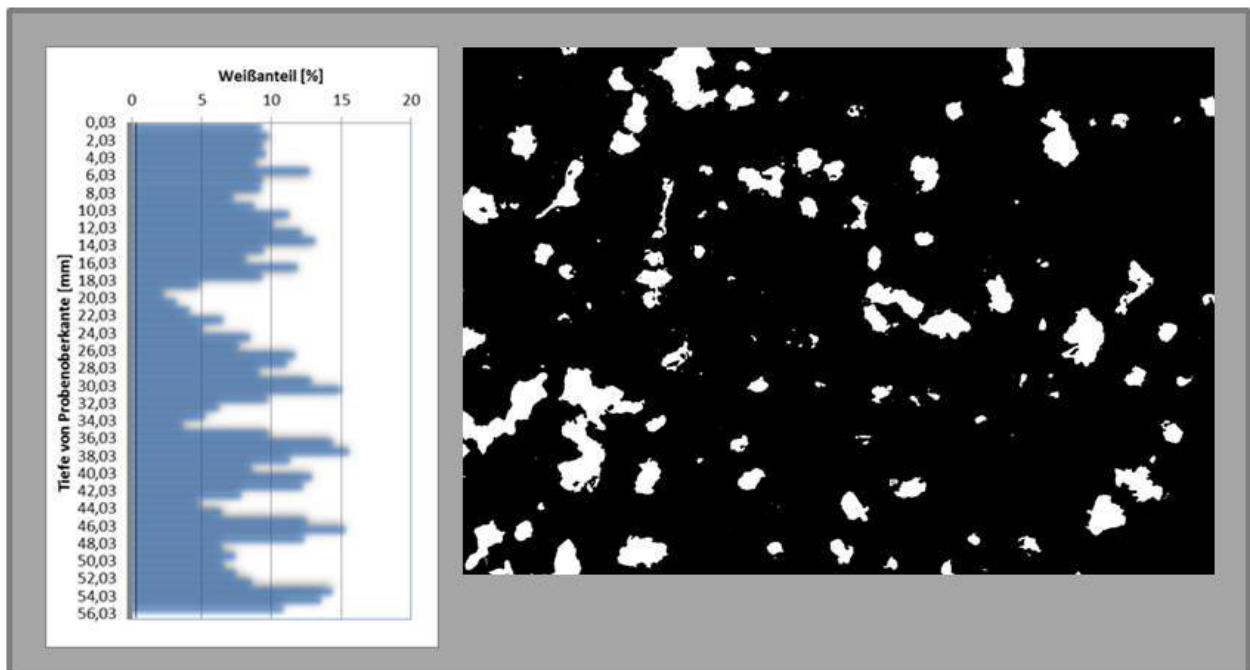
Da aufgrund des geringen Kontrastumfangs im optischen Erscheinungsbild eines Asphaltes eine objektive Beurteilung der Hohlraumverteilung durch Augenschein nach wissenschaftlichen Maßstäben zu subjektiv ist, wurde eine computergestützte Bildauswertung entwickelt. Der Ablauf der Untersuchung gliedert sich wie folgt:

- Herstellung und Sägen der Probekörper
- Hohlräume mit Gips ausspachteln, überstehende Gipsverschmutzungen abschleifen
- Fotografieren der genässten Probe
- Ausrichten, Skalieren, Ausschneiden und Farbraumreduktion (Schwarz/Weiß) mittels Adobe Photoshop ®
- Bestimmung des Weißanteils pro Bildzeile mittels Software
- Weiterverarbeitung in Microsoft Excel®

Zum Vergleich ist in Bild 5.3-30 ein Probekörper mit günstiger Hohlraumverteilung sowie in Bild 5.3-31 einer mit ungünstiger Verteilung gegenübergestellt.



**Bild 5.3-30:** Beispiel günstige Hohlraumverteilung

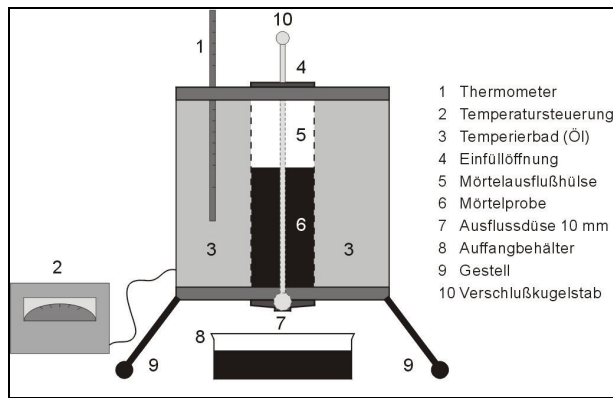


**Bild 5.3-31:** Beispiel ungünstige Hohlraumverteilung

### Einfluss des Füllers auf das Fließverhalten des Mörtels

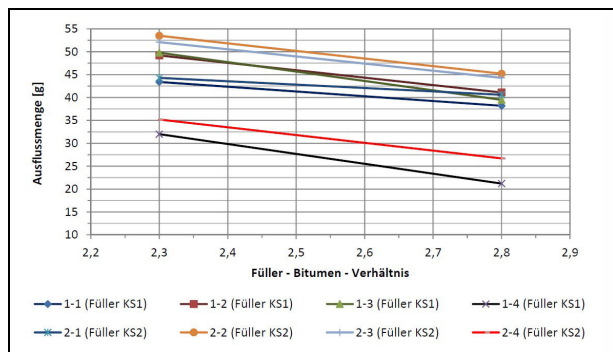
Dem Absetzverhalten des Mörtels kommt während des Einbaus und der damit verbundenen Beschaffenheit der inneren Hohlraumstruktur eine hohe Bedeutung zu. Mit den weitergehenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Fließverhalten des Mörtels mit dem Straßen-Teer-Viskosimeter (Bild 5.3-32) einfach aber dennoch genau ermittelt werden kann.

In diesem für die entsprechende Versuchsdurchführung etwas modifizierten Prüfgerät gemäß DIN 52023 kann das Absetzverhalten von Mörtel (Gemisch aus Bitumen und Füller) für den Einsatz im PMA-Asphaltnischgut untersucht und je nach Zusammensetzung des Mörtels qualifiziert beurteilt werden. Diese Untersuchungsmethode kann beispielsweise bei der Optimierung der Konzeption von Asphaltnischgut PMA im Labor insbesondere im Hinblick auf den Transport und den Einbau eingesetzt werden.



**Bild 5.3-32:** Schematische Darstellung des Straßen-Teer-Viskosimeter

Damit können die das Fließverhalten beeinflussenden Faktoren wie Temperatur, Füllerart und -menge, Bindemittelart und -sorte sehr exakt beschrieben werden. In Bild 5.3-33 sind die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Füller-Bitumen-Verhältnissen und der ausgeflossenen Mörtelmenge nach 20 s Ausflusszeit für verschiedene Füllerarten gegenübergestellt.



**Bild 5.3-33:** Zusammenhang zwischen dem Füller-Bitumen-Verhältnis und der ausgeflossenen Mörtelmenge nach 20 s Ausflusszeit

### 5.3.4 Bau von Demonstratoren auf der NATO-Airbase in Geilenkirchen

#### 5.3.4.1 Asphaltdeckschicht LOA 5 D

Am 08.11.2012 wurden auf der NATO Airbase in Geilenkirchen die drei LOA 5 D-Varianten, auf einer Asphaltbinderschicht der Sorte AC 16 B S, eingebaut:

1. LOA 5 D Standard 25/55-55 C (MF 4)
2. LOA 5 D Optimiert 25/55-55 A (MF 2)
3. LOA 5 D Optimiert 70/100 + 20 % Gummigranulat (MF 1)

	100 m	100 m
3 m	PMA Gummigranulat & Sübit VR 35 MF5	MF4 LOA 5 D Lucobit
3 m	PMA Sübit VR 35	
3 m	MF3	MF2 LOA 5 D polymermodifiziert
3 m	MF1 LOA 5 D gummi-modifiziert	MF1 LOA 5 D gummi-modifiziert
	130 m	70m

**Bild 5.3-34** Lageplan der Testfelder auf dem Versuchsgelände Geilenkirchen

Die erste Variante wurde entsprechend den bis zum damaligen Zeitpunkt üblichen LOA 5 D-Rezepturen zusammengesetzt, d.h. es wurde eine feine Gesteinskörnung mit einem vergleichsweise hohen Fließkoeffizient ( $E_{CS}$  35) verwendet. Bei den Varianten 2 und 3 wurden als feine Gesteinskörnung ein Natursand mit einem Fließkoeffizient  $E_{CS}$  von 28 s verwendet. Zusätzlich wurde bei Variante 3 ein gummimodifiziertes Bitumen eingesetzt. Der Einbau fand bei herbstlicher Witterung (Temperatur teilweise unter 10°C und mäßiger Wind) statt. Damit lagen eher ungünstige Bedingungen zum Einbau von dünn-schichtigen Asphaltbelägen wie einer LOA 5 D vor.

Beim Einbau wurden beim Fertiger folgende Aspekte berücksichtigt:

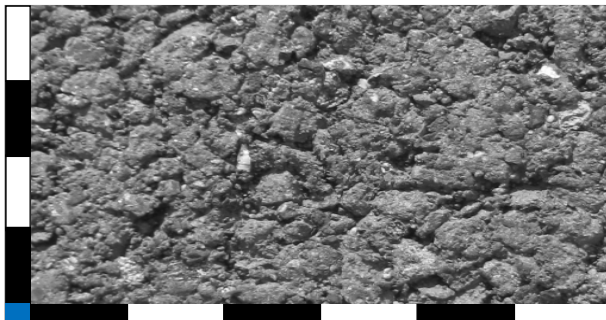
- keine Vibration am Glättblech,
- geringer Tamperhub, ca. 2 mm,
- Tamperdrehzahl zwischen 30 und 50 % der maximal möglichen,
- keine Verwendung der Pressleisten.

Zusätzlich wurden folgende Standardforderungen beim Einbau beachtet:

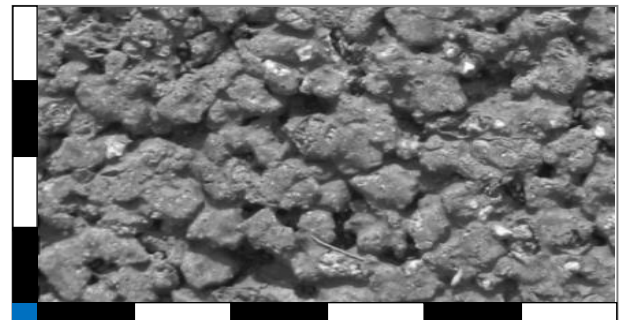
- gleichmäßige Einbaugeschwindigkeit,
- gleichmäßige Beheizung der gesamten Bohle,
- Abstimmung der Geschwindigkeit von Kratzerband und Verteilerschnecken aufeinander, so dass der Schneckenraum i.d.R. bis ca. zur Hälfte gefüllt ist.

Je Variante wurden 18 Tonnen Mischgut eingebaut, so dass kein kontinuierlicher Mischprozess möglich war. Die Einstellungen des Fertigers (Tamperhub und Tamperdrehzahl) wurden durch die Kolonne vor Ort immer wieder auf die verschiedenen Mischgutvarianten abgestimmt. Es kam eine Walze der Fa. Bomag (BW 174 AP AM) mit einem Betriebsgewicht von 11 Tonnen zum Einsatz.

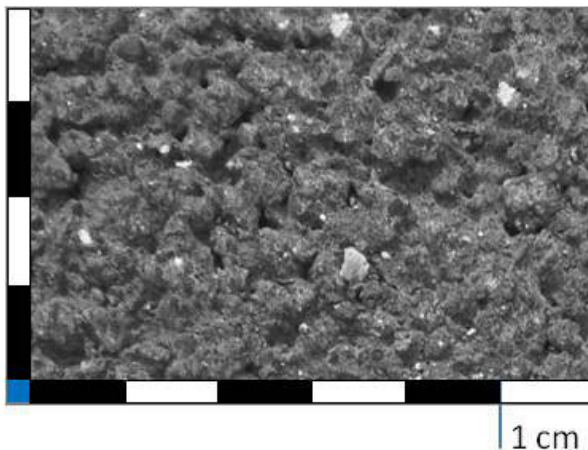
Um ein gutes Verdichtungsergebnis zu erzielen, ist es notwendig mit den Walzen nahe an den Fertiger heran zu fahren, da ansonsten durch den vergleichsweise schnellen Temperaturverlust keine hinreichende Verdichtung mehr möglich ist. Zur Erzielung der gewünschten Verdichtung sind i.d.R. 6 - 8 Walzübergänge erforderlich. In folgender Abbildung sind die erzielten Oberflächentexturen beispielhaft dargestellt.



MF 1 – LOA 5 D gummimodifiziert



MF 2 – LOA 5 D polymermodifiziert



MF 4 – LOA 4 D Lucobit

Bild 5.3-35 Erzielte Oberflächentexturen

### Untersuchungen des eingebauten Asphaltmischguts

Die Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen sind in Tab. 5.3-12 bis Tab. 5.3-14 zusammengefasst. Zusätzlich sind zum Vergleich die Sollwerte nach Erstprüfung angegeben.

Mischgutzusammensetzung und -eigenschaften	Einheit	Variante 1 LOA 5 D Standard 25/55-55 C BK R4I1	Variante 1 LOA 5 D Standard 25/55-55 C BK R4II2	Soll
<b>Zusammensetzung der Gesteinskörnungen</b>				
Anteil Füller	[M.-%]	16,6		11,8
Anteil Feine Gesteinskörnung 0/2 mm	[M.-%]	46,7		32,8
Anteil Grobe Gesteinskörnung 2/5 mm	[M.-%]	53,3		67,2
<b>Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)</b>				
8,0 mm	[M.-%]	100,0		100,0
5,6 mm	[M.-%]	99,3		98,4
2,0 mm	[M.-%]	46,7		32,8
0,125 mm	[M.-%]	19,8		16,1
0,063 mm	[M.-%]	16,6		11,8
<b>Bindemittelanteil und -eigenschaften</b>				
Bindemittelgehalt B	[M.-%]	6,4		5,7
<b>Mischguteigenschaften</b>				
Raumdichte $\rho_b$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,407		2,397
Rohdichte $\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,520		2,550
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	4,5		6,0
<b>Ausbaustück</b>				
Raumdichte $\rho_b$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,236	2,244	
Rohdichte $\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,486	2,554	
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	10,1	12,1	
Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$	[-]	$1,2 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-6}$	
Verdichtungsgrad	[%]	92,9	93,2	

Tab. 5.3-12: Bohrkernuntersuchungen Variante 1 LOA 5 D Standard 25/55-55 C sowie Sollwerte nach Erstprüfung

Mischgutzusammensetzung und -eigenschaften	Einheit	Variante 2 LOA 5 D Optimiert 25/55-55 A BK R2I1	Variante 2 LOA 5 D Optimiert 25/55-55 A BK R2II1	Soll
<b>Zusammensetzung der Gesteinskörnungen</b>				
Anteil Füller	[M.-%]	16,0		10,9
Anteil Feine Gesteinskörnung 0/2 mm	[M.-%]	47,4		30,0
Anteil Grobe Gesteinskörnung 2/5 mm	[M.-%]	52,6		70,0
<b>Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)</b>				
8,0 mm	[M.-%]	100,0		100,0
5,6 mm	[M.-%]	99,2		98,4
2,0 mm	[M.-%]	47,4		30,0
0,125 mm	[M.-%]	19,4		14,8
0,063 mm	[M.-%]	16		10,9
<b>Bindemittelanteil und -eigenschaften</b>				
Bindemittelgehalt B	[M.-%]	6,1		6,0
<b>Mischguteigenschaften</b>				
Raumdichte $\rho_b$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,410		2,414
Rohdichte $\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,514		2,509
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	4,1		3,8
<b>Ausbaustück</b>				
Raumdichte $\rho_b$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,298	2,232	
Rohdichte $\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,497	2,530	
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	8,0	11,8	
Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$	[-]	$2,0 \times 10^{-6}$	$1,4 \times 10^{-6}$	
Verdichtungsgrad	[%]	95,4	92,6	

**Tab. 5.3-13:** Bohrkernuntersuchungen Variante 2 LOA 5 D Optimiert 25/55-55 A sowie Sollwerte nach Erstprüfung

Mischgutzusammensetzung und -eigenschaften	Einheit	Variante 3 LOA 5 D Optimiert 70/100 + 20% GG BK R1II2	Variante 3 LOA 5 D Optimiert 70/100 + 20% GG BK R1III1	Soll
<b>Zusammensetzung der Gesteinskörnungen</b>				
Anteil Füller	[M.-%]	14,7		10,9
Anteil Feine Gesteinskörnung 0/2 mm	[M.-%]	29,3		30,0
Anteil Grobe Gesteinskörnung 2/5 mm	[M.-%]	56,0		70,0
<b>Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)</b>				
8,0 mm	[M.-%]	100,0		100,0
5,6 mm	[M.-%]	99,2		98,4
2,0 mm	[M.-%]	44,0		30,0
0,125 mm	[M.-%]	16,3		14,8
0,063 mm	[M.-%]	14,7		10,9
<b>Bindemittelanteil</b>				
Bindemittelgehalt B	[M.-%]	6,7		7,8 (6,3 70/100 + 1,5 GG)
<b>Mischguteigenschaften</b>				
Raumdicke $\rho_b$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,353		2,296
Rohdicke $\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,450		2,398
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	4,0		4,3
<b>Ausbaustück</b>				
Raumdicke $\rho_b$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,198	2,249	
Rohdicke $\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,420	2,480	
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	9,2	9,3	
Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$	[-]	$9,8 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	
Verdichtungsgrad	[%]	93,4	95,6	

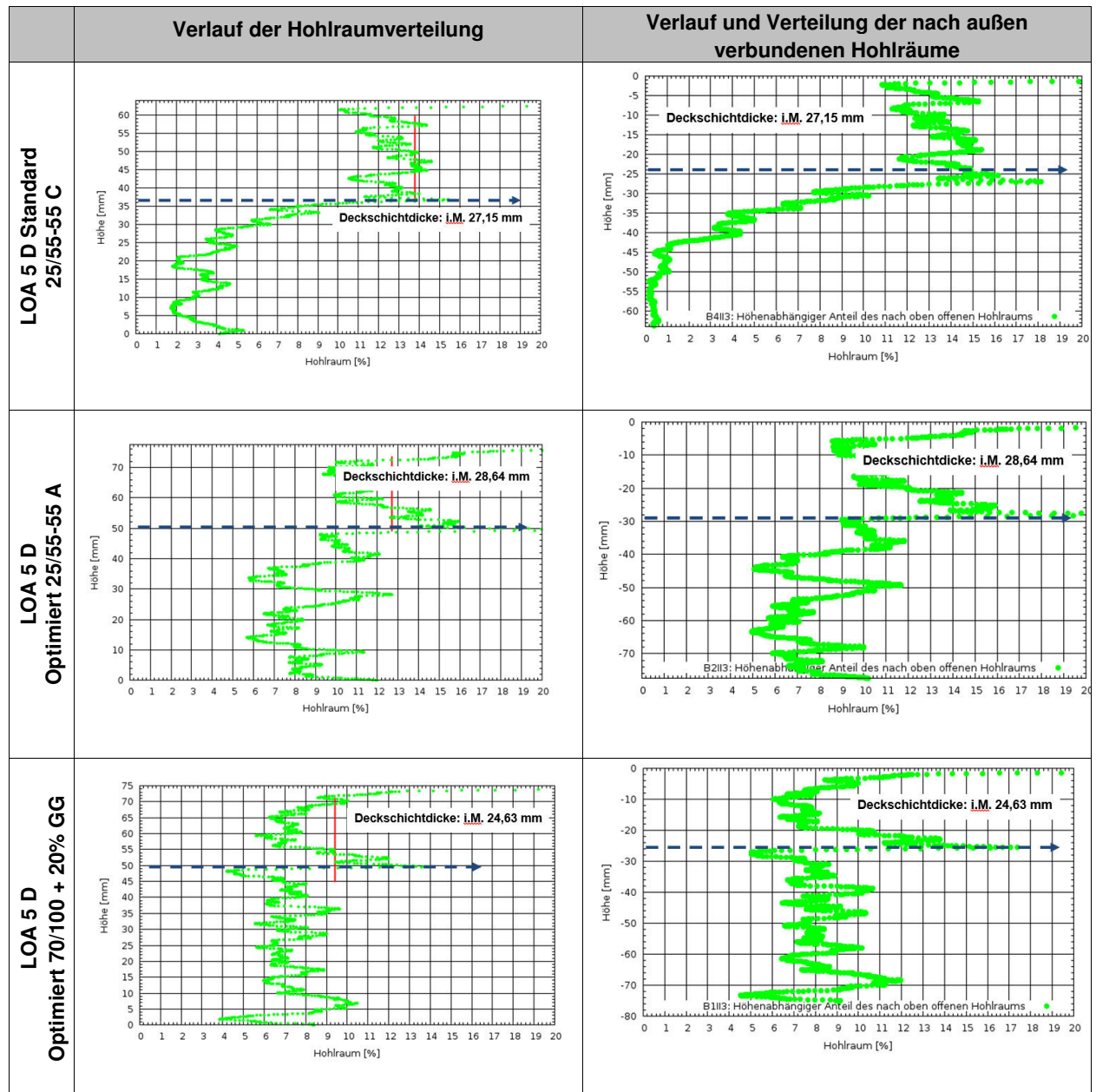
**Tab. 5.3-14:** Bohrkernuntersuchungen Variante 3 LOA 5 D Optimiert 70/100 + 20% GG sowie Sollwerte nach Erstprüfung

Der Fülleranteil, der am Bohrkern bestimmt wurde, ist generell höher als in der Erstprüfung. Dies ist möglicherweise auf den Kornabrieb beim Bohren zurückzuführen, jedoch ist der Fülleranteil auch im Asphaltmischgut, welches direkt beim Einbau entnommen wurde, bei zwei von drei Varianten erhöht.

Bei den Probefeldern konnte eine bessere Verdichtbarkeit der optimierten Varianten nicht eindeutig nachgewiesen werden, da die Verdichtungsgrade in allen Fällen unzureichend sind. Jedoch zeigen die Untersuchungen der Bohrkern, dass mit dem Asphaltmischgut der in der Erstprüfung angegebene Hohlraumgehalt erreicht werden kann. Die Verdichtungsleistung der Walzen in situ war somit nicht ausreichend. Tendenziell erreichen die optimierten Varianten jedoch einen höheren Verdichtungsgrad und geringere Hohlraumgehalte.

### Strukturanalyse mittels Computertomographie

In Tabelle 5.3-15 sind die Verläufe der Hohlraumverteilung sowie die Verläufe und Verteilungen der nach außen verbundenen Hohlräume der drei LOA 5 D-Varianten sowie der Binderschicht gegenübergestellt. Die Verläufe und Verteilungen der nach außen verbundenen Hohlräume zeigen bis zu welcher Schichttiefe und in welchem Volumenanteil (absolut) inneres Hohlraumvolumen mit der äußeren Umgebung verbunden ist - und demnach akustisch mit der Umwelt wechselwirken bzw. „kommunizieren“ kann.



Tab. 5.3-15: Verläufe der Hohlraumverteilung und die Verläufe und Verteilungen der nach außen verbundenen Hohlräume der LOA 5 D Demonstratoren NATO Airbase Geilenkirchen und der zugehörigen Binderschicht

Aus der Analyse des Grauerthistogrammes ergibt sich ein Hohlraumgehalt in der ausgewerteten ROI (region of interest) von i.M. 13,8 Vol.-% bei der Variante LOA 5 D Standard 25/55-55 C, 12,7 Vol.-% bei der Variante LOA 5 D Optimiert 25/55-55 A und 9,4 Vol.-% bei der Variante LOA 5 D Optimiert 70/100 + 20% GG. Die mittels CT-Messung bestimmten Hohlraumgehalte liegen deutlich über den mit der Raumdichte berechneten Werten, bestätigen damit jedoch erneut die unzureichende Verdichtung in situ. Dies zeigen bei allen Varianten auch die visuellen Darstellungen der Schnittebenen. Hier sind deutlich über die Deckschichthöhe viele Hohlräume, die nahezu gleichmäßig über die Höhe verteilt sind, zu sehen.

### 5.3.4.2 Porous Mastic Asphalt (PMA)

#### Herstellung der Testfelder

Auf Grundlage der im Labor gewonnenen Erkenntnisse und unter der Beachtung der Belange zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften der PMA 5 – Bauweise wurden im Verbundprojekt zunächst Testfelder (Demonstratoren) unter realen Praxisbedingungen auf dem Gelände der NATO Air Base in Geilenkirchen hergestellt. Die Vorgehensweise und die Systematik der Herstellung der einzelnen Demonstratoren wurden in Absprache mit allen im Teilvorhaben beteiligten Projektpartnern festgelegt. Die Realisierung von Demonstratoren im Zuge des Teilvorhabens „Anpassung von Materialtechnologien zur Verbesserung der akustischen Eigenschaften von Asphaltbelägen“ erfolgte von der Firma Willi Dohmen GmbH & Co. KG. Für den Bau von Demonstratoren wurde eine Fläche von etwa 300 x 10,5 m<sup>2</sup> (L x B) im westlichen Bereich des zur Verfügung gestellten Geländes vorbereitet. Auf dieser Fläche wurden zwei Bauweisen – PMA 5 und LOA 5 D in unterschiedlichen Variationen (zu je 3) und auf unterschiedlicher Unterlage eingebaut.

Zunächst wurde durch die Firma Willy Dohmen GmbH & Co. KG die vorhandene Befestigung auf eine Tiefe von 8 cm abgefräst. Als Unterlage für die Deckschichten wurde eine 5,5 cm starke Binderschicht aus AC 16 B S eingebaut. Alle PMA Felder wurden mit dem Bindemittel Sübit VR 35, davon eine Variante mit einem Gummigranulat als Sandersatz, hergestellt. Ein PMA-Feld wurde auf einer Betonunterlage mit einer elastischen Gummizwischenschicht hergestellt. Die PMA-Felder wurden am 09.11.2012 (Bild 5.3-36) eingebaut.



**Bild 5.3-36:** Einbau der Testfelder auf der NATO-Airbase



### Untersuchungen des eingebauten Asphaltmischgutes

Der Bau der Testflächen wurde begleitet, Materialproben entnommen und im Labor der Projektpartner untersucht. Bereits nach Fertigstellung der Deckschicht zeigte sich bei der PMA-Variante auf der Betonunterlage mit einer Gummizwischenschicht, dass eine stark begrenzte Dauerhaftigkeit der Konstruktion gegeben war. Bereits nach kurzer Zeit wurden trotz geringer Verkehrsbelastung durch den Flughafenbetrieb Verformungen und Ausbrüche beobachtet. Das Feld wurde im Frühjahr 2013 ausgebaut.

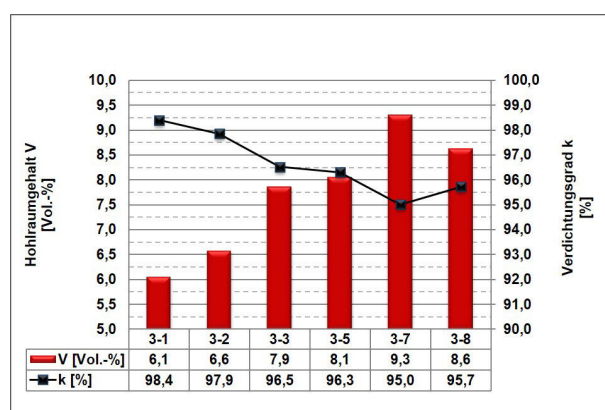
Im Ergebnis der Mischgut- und Bohrkernuntersuchungen der beiden anderen Testfelder zeigte sich, dass die Variante mit Gummigranulat nicht zielführend war. Sowohl die ermittelten Verdichtungsgrade als auch die eingestellten Hohlraumgehalte wichen deutlich von den Anforderungen gemäß Regelwerk ab. Eine weitere bautechnische Umsetzung wurde daher nicht mehr verfolgt.

In Tabelle 5.3-26 sind die Kenndaten der PMA Standard-Variante aus der Erstprüfung, der Kontrollprüfung am Mischgut und am Bohrkern gegenübergestellt.

Mischgutzusammensetzung und -eigenschaften	Einheit	PMA Standard Mischgut	PMA Standard Mischgut aus Bohrkern	Soll
<b>Zusammensetzung der Gesteinskörnungen</b>				
Anteil Füller	[M.-%]	19,8	21,7	17,0
Anteil Feine Gesteinskörnung 0/2 mm	[M.-%]	9,9	11,9	13,0
Anteil Grobe Gesteinskörnung 2/5 mm	[M.-%]	70,3	66,4	70,0
<b>Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)</b>				
8,0 mm	[M.-%]	100,0	100,0	100,0
5,6 mm	[M.-%]	99,2	99,5	98,4
2,0 mm	[M.-%]	29,7	35,5	30,0
1,0 mm	[M.-%]	28,7	33,6	29,2
0,25 mm	[M.-%]	26,5	29,9	27,1
0,125 mm	[M.-%]	22,3	24,8	22,2
0,063 mm	[M.-%]	19,8	21,7	17,0
<b>Bindemittelanteil</b>				
Bindemittelgehalt B	[M.-%]	7,0	6,9	6,9
<b>Mischguteigenschaften</b>				
Raumdicke $\rho_b$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,372	2,381	2,378
Rohdicke $\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,512	2,494	2,479
Hohlraumgehalt	[Vol.-%]	5,6	4,5	4,1

**Tab. 5.3-26:** Kennwerte der Mischgutzusammensetzung der Rückstellproben vom Einbau sowie dem Mischgut aus Bohrkernen PMA Standard mit 30/45 NV und Sollwerte nach der Erstprüfung

Es wurden sechs Bohrkern entnommen und der Hohlraumgehalt sowie der Verdichtungsgrad bestimmt. Diese sind in Bild 5.3-37 dargestellt.



**Bild 5.3-37:** Verdichtungsgrade und Hohlraumgehalte der untersuchten Bohrkern

Der bei den vorausgegangenen Laboruntersuchungen festgestellte Sachverhalt, dass ein Anteil von gewaschenem Natursand 0/1 mm im Bereich zwischen 10 und 14 M.-% und die Ausfallkörnung mit den Größen zwischen 1 und 2 mm (kein Unterkorn aus 2/5 mm) im PMA-Asphaltmischgut zwingend erforderlich sind,

um ein Absetzen der Mörtelphase beim Einbau des Asphaltmischgutes sicher zu gewährleisten, hat sich bei der PMA Standard Variante sowohl bei den Ergebnissen der Soll-Rezeptur als auch bei den Ergebnissen der Untersuchungen der Rückstellproben bestätigt. Bei der Erstellung der Soll-Konzeption wurde zwar die Zugabe von Natursand auf 8 M.-% aufgrund des vorliegenden Überkorns in der Füller-Fraktion beschränkt, durch die starke Begrenzung des Unterkornanteils, die eine gesonderte Vorbereitung der Lieferkörnung 2/5 mm bei der Herstellung des Asphaltmischgutes an der Mischanlage mit sich brachte, konnte jedoch das Sedimentieren der Mörtelphase zumindest bei den mod. MPK erfolgreich umgesetzt werden.

Die Ergebnisse der Untersuchungen an den entnommenen Rückstellproben des eingebauten Asphaltgemisches zeigen hinsichtlich der Asphaltmischgutzusammensetzung, dass die aufgestellte Soll-Rezeptur bei der Herstellung des eingebauten Asphaltmischgutes erfolgreich in der Asphaltmischanlage umgesetzt wurde. Die Ergebnisse weisen sehr geringe Abweichungen von der Soll-Zusammensetzung auf. Somit kann schlussgefolgert werden, dass sich mit besonderer Vorbereitung der zu verwendenden Gesteinskörnungen eine gute Einhaltung der vorgegebenen Soll-Zusammensetzung in einer Asphaltmischanlage umsetzen lässt.

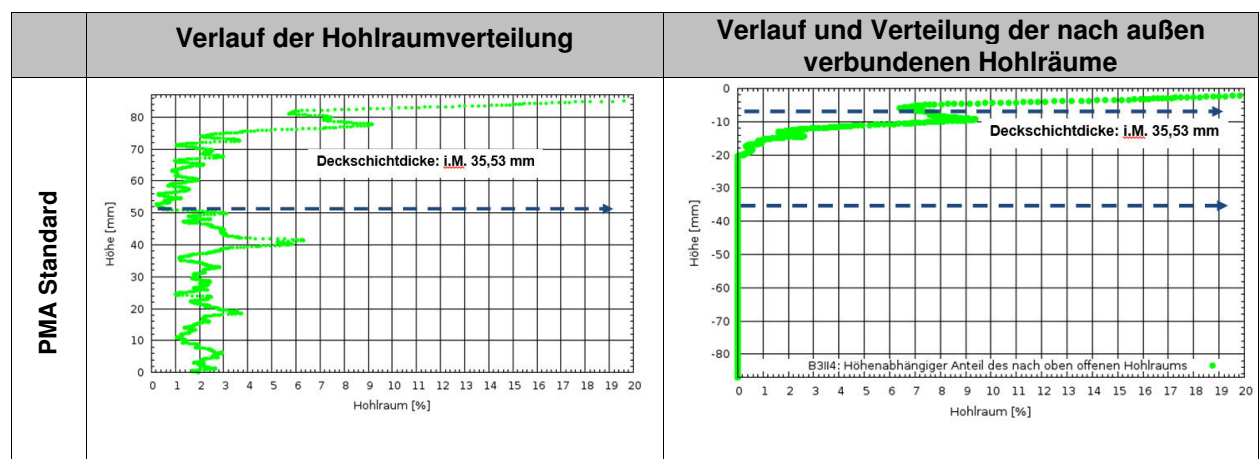
Aus den Ergebnissen der durchgeführten Untersuchungen von den Bohrkernen können die wesentlichen Erkenntnisse wie folgt abgeleitet werden:

Die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes der Bohrkerns weicht von den Vorgaben aus der Soll-Zusammensetzung und von der Zusammensetzung der zugehörigen Rückstellproben des eingebauten Asphaltmischgutes PMA Standard geringfügig ab. Diese Abweichungen können bei der Korngrößenverteilung mit der Kornverfeinerung im Bereich der groben Gesteinskörnungen (Körner > 2 mm), bedingt durch den Einfluss der im Bohrvorgang und Trennschnitt in der Schichtgrenze durchgesägten Körner, erklärt werden. Eine Kornverfeinerung im Bereich der groben Gesteinskörnungen führt erfahrungsgemäß zu Kornanreicherungen im Bereich von feinen Gesteinskörnungen und des Feinkorns, sodass deutliche Abweichungen in der Kornzusammensetzung von der Bezugskonzeption auftreten können.

Die Streuung der Hohlraumgehalte kann zunächst durch den in Bild 5.3-43 dargestellten Zusammenhang zwischen dem Hohlraumgehalt und dem Verdichtungsgrad der fertigen Schicht begründet werden. Da die untersuchten Bohrkerns jedoch aus einer relativ geringen Untersuchungsfläche entnommen wurden, trifft der Sachverhalt einer unzureichenden Verdichtung weniger zu. Vielmehr können die festgestellten großen Schwankungen des Hohlraumgehaltes von bis zu ca. 3 Vol.-% der fertigen PMA-Schicht durch die ständige Entmischung des Asphaltmischgutes sowohl beim Transport als auch beim Einbau im Fertigerkübel und in der Fertigerbohle begründet werden.

### Strukturanalyse mittels Computertomographie

Aus der Analyse des Grauerthistogrammes ergibt sich ein Hohlraumgehalt in der ausgewerteten ROI (region of interest) von i.M. 3,8 Vol.-%. Dieser Wert liegt deutlich unter den berechneten Hohlraumgehalten und entspricht dem gewünschten Ergebnis. Die visuellen Darstellungen der Schnittebenen über die Deckschichthöhe zeigen wenige Hohlräume, die im oberen Bereich angeordnet sind, so dass die gewünschte Hohlraumverteilung erreicht wurde. In Tabelle 5.3-27 sind der Verlauf der Hohlraumverteilung und der Verlauf und die Verteilung der nach außen verbundenen Hohlräume des PMA Demonstrators NATO Airbase Geilenkirchen und der zugehörigen Binderschicht dargestellt.



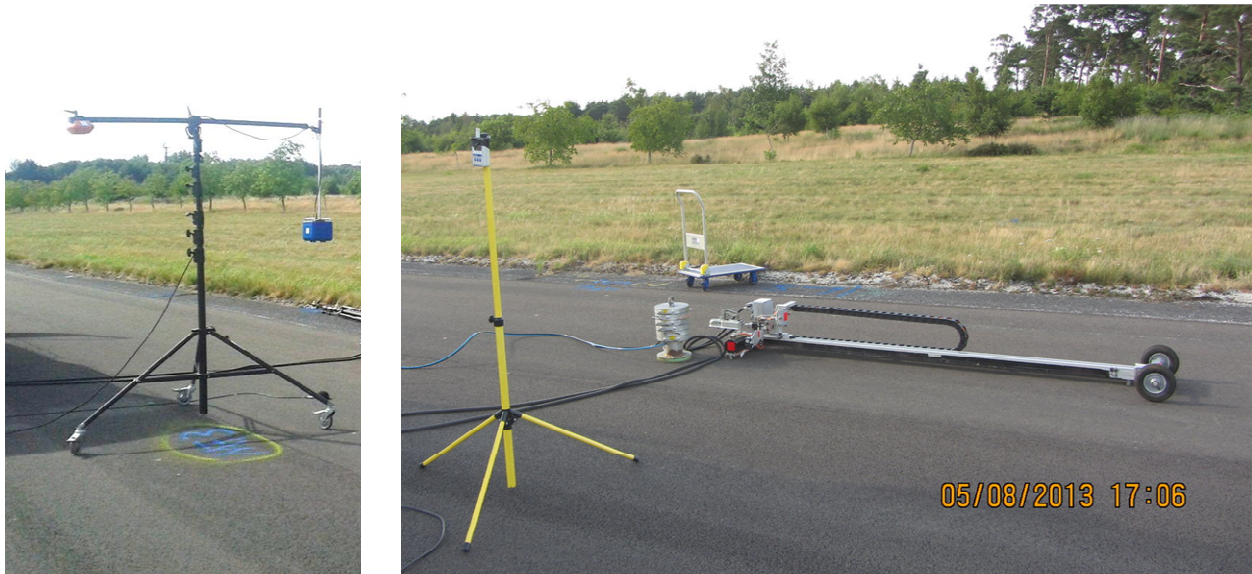
**Tab. 5.3-27:** Verlauf der Hohlraumverteilung und der Verlauf und die Verteilung der nach außen verbundenen Hohlräume des PMA Demonstrators NATO Airbase Geilenkirchen und der zugehörigen Binderschicht

### 5.3.4.3 Erfassung und Bewertung der akustischen Eigenschaften auf der NATO-Airbase

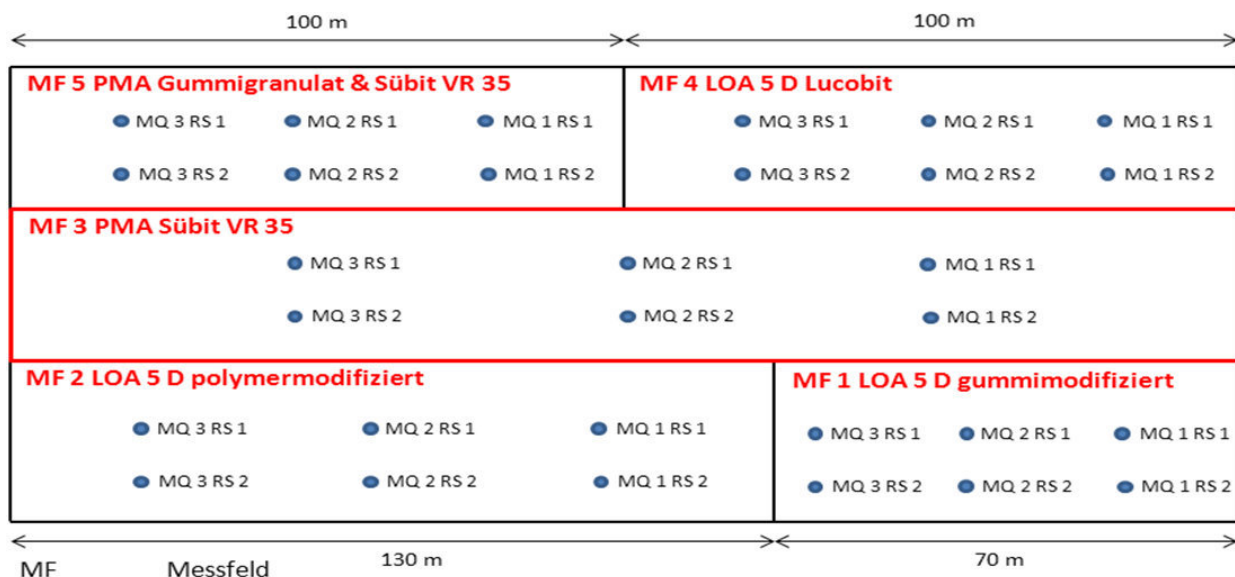
Auf den Testfeldern mit den Deckschichtvarianten LOA 5 D und PMA in Geilenkirchen wurden zur Bewertung der akustischen Eigenschaften folgende Messungen durchgeführt:

- Fahrbahnoberflächentextur
- Texturinduzierter Strömungswiderstand
- Schallabsorptionsgrad

Die Aufstellung der Messsysteme ist in Bild 5.3-38 wiedergegeben. Auf jedem der Testfelder wurden jeweils drei Messpunkte in der rechten und linken Radrollspur eingerichtet, wodurch sich insgesamt jeweils 30 Messungen der Textur, des Strömungswiderstands und des Schallabsorptionsgrads ergaben. Die Anordnung der Messpunkte ist Bild 5.3-39 zu entnehmen.

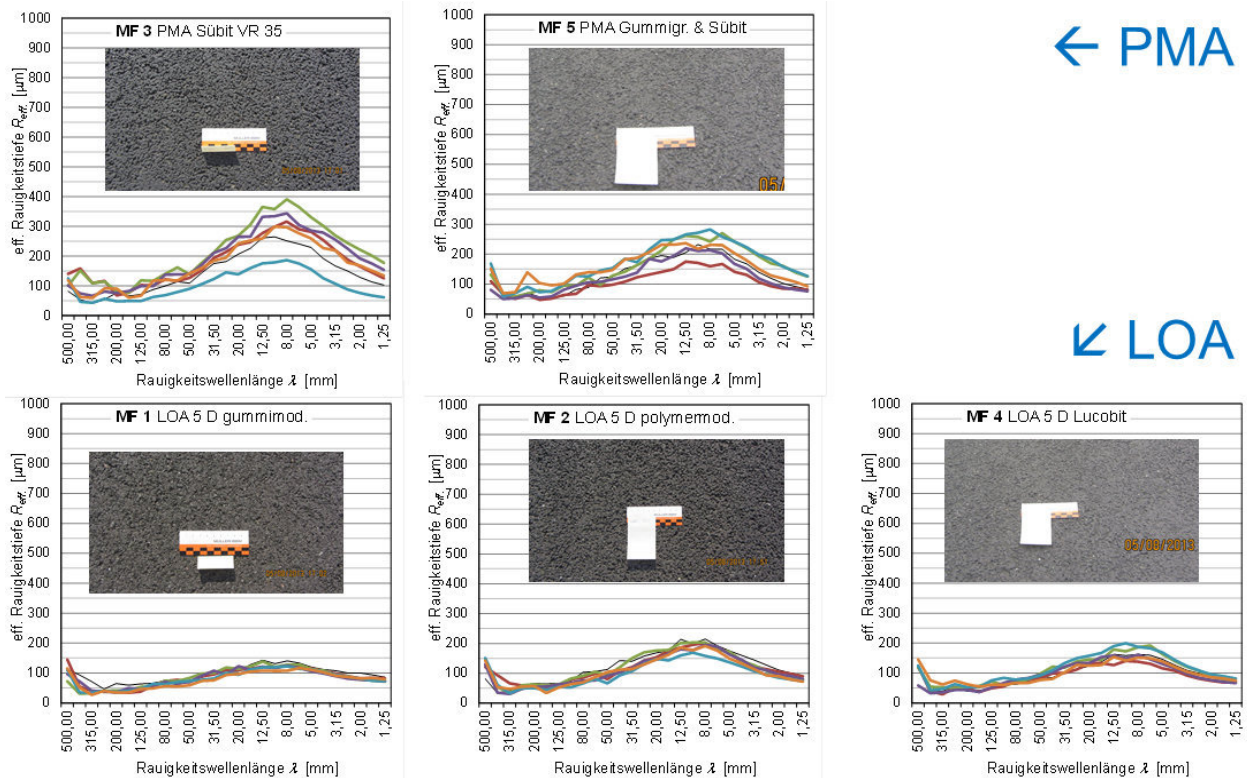


**Bild 5.3-38:** Aufstellung der Messsysteme. Links: Schallabsorptionsgradmessung auf Testfeld 3, rechts: Textur- und Strömungswiderstandsmessung auf Testfeld 5.



**Bild 5.3-39:** Anordnung der Messquerschnitte für die in situ Messungen auf den Messfeldern.

In Bild 5.3-40 sind die Wellenlängenspektren der Textur aller Einzelmessungen dargestellt.



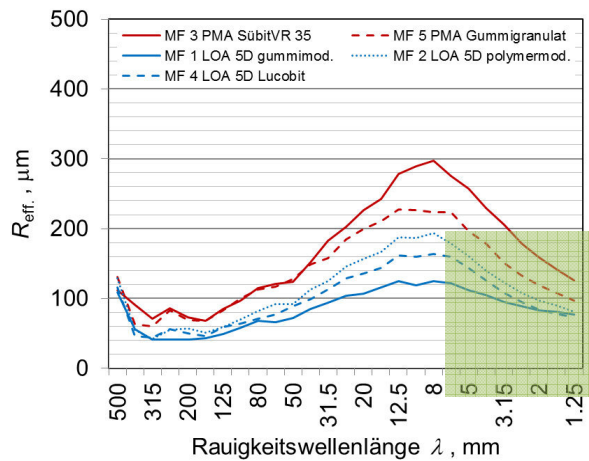
**Bild 5.3-40:** Texturspektren der Einzelmessungen auf den Testfeldern: Messfelder MF1, MF2 und MF4 (LOA 5 D).

Die Bauweise LOA 5 D führt in allen Fällen zu ähnlichen Texturspektren mit einem spektralen Maximum zwischen 8 mm und 12,5 mm Wellenlänge bei einer Rauigkeitstiefe zwischen 100  $\mu\text{m}$  und 210  $\mu\text{m}$ . Die Rauigkeitstiefe im spektralen Maximum liegt zwischen 170  $\mu\text{m}$  und 400  $\mu\text{m}$ , wobei die dazugehörige Wellenlänge im Erwartungsbereich für dichten Asphalt mit 5 mm Größtkorn von 8 mm bis 12,5 mm liegt. Der enge Wertebereich der Rauigkeitstiefe für die Bauweise LOA 5 D weist auf gute Einbauqualität und gute Reproduzierbarkeit hin. Während die Bauweise LOA in allen Fällen zu ähnlichen Texturspektren führt, streuen die Spektren bei der Bauweise PMA erheblich. Der enge Wertebereich der Rauigkeitstiefe für die Bauweise LOA weist auf gute Einbauqualität und gute Reproduzierbarkeit hin, wogegen die Dynamik von 230  $\mu\text{m}$  für die Bauweise PMA ein Merkmal schlechter Homogenität und schlechter Reproduzierbarkeit beim Einbau ist. Die Fotografien der PMA-Deckschichten an ausgewählten Stellen in Bild 5.3-41 machen diesen Sachverhalt deutlich.



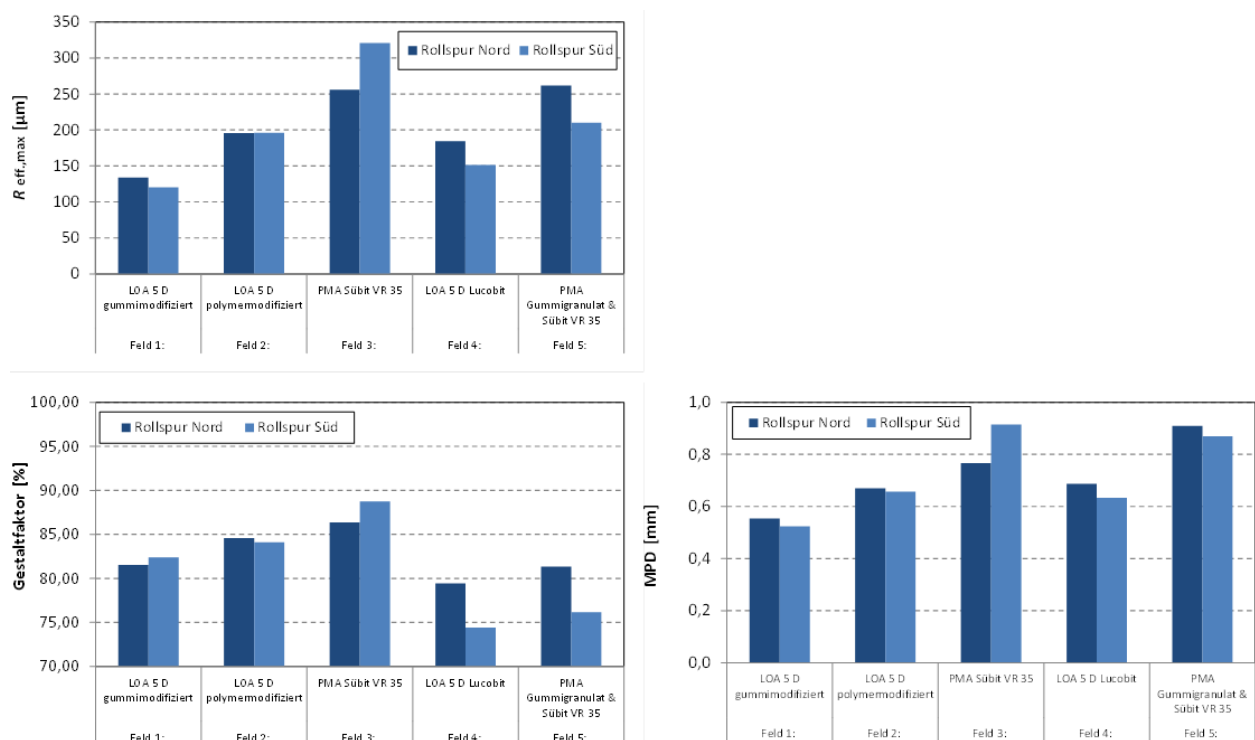
**Bild 5.3-41:** Fotografien der Oberflächentextur an ausgewählten Stellen der PMA-Testfelder.

In Bild 5.3-41 sind die Texturspektren für die fünf Testfelder nach Mittelung über jeweils alle sechs Einzelmessungen dargestellt. Die grüne Rechteckfläche kennzeichnet den Bereich optimaler Werte für das Maximum des Texturspektrums, die per se zu akustisch günstigen Oberflächentexturen führen. Aus der Darstellung geht hervor, dass das Texturspektrum des PMA-Testfelds mit Bindemittel Sübit VR35 selbst nach der Mittelung noch deutlich außerhalb des optimalen Bereiches liegt, wogegen das zweite PMA-Testfeld mit gummimodifiziertem Bindemittel und alle drei LOA-Testfelder innerhalb des optimalen Bereiches liegen.



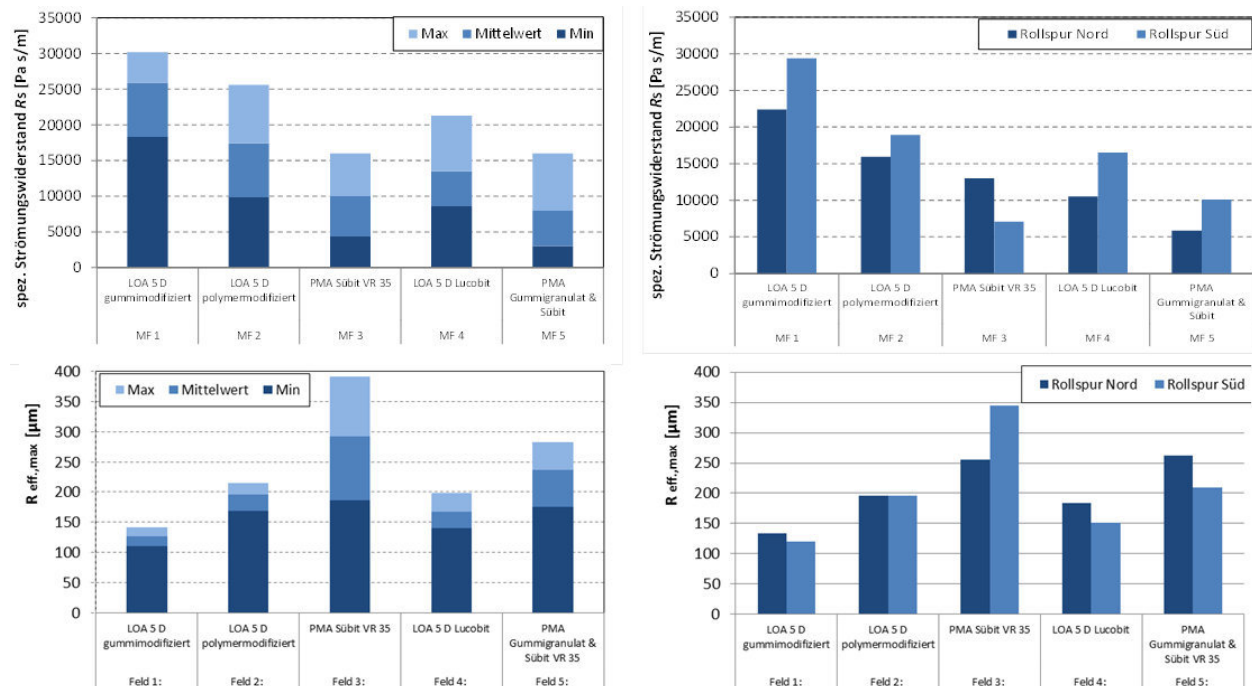
**Bild 5.3-42:** Mittlere Texturspektren der fünf Testfelder. Das grün transparente Rechteck kennzeichnet den Bereich akustisch optimaler Werte für Wellenlänge und Rauigkeit.

In Bild 5.3-43 sind die mittleren Rauigkeitstiefen, Gestaltfaktoren und MPD-Werte für alle Testfelder getrennt nach Radrollspuren aufgetragen. Der Gestaltfaktor  $g$ , als weitere texturkennzeichnende Größe, weist über alle Testfelder hinweg akustisch günstige Werte zwischen 74 % und 88 % auf, wobei das LOA-Testfeld mit Bindemittel Lucobit und das PMA-Testfeld mit gummodifiziertem Bindemittel in der südlichen Radrollspur mit 74 % bzw. 76 % die niedrigsten Gestaltfaktoren aufweisen. Dies weist darauf hin, dass sich die Oberflächentextur in diesen beiden Fällen von einer plateauartigen, konkaven Gestalt entfernt und eine konvexere Gestalt mit niedrigeren Gestaltfaktoren annimmt als in den anderen Fällen. Bei Gestaltfaktoren von 60 % und weniger ergeben sich im Allgemeinen akustisch ungünstigere Texturen. Mit einer effektiven Rauigkeitstiefe von etwa 125  $\mu\text{m}$  und einer Wellenlänge von 12,5 mm im spektralen Maximum, gekoppelt mit einem Gestaltfaktor von rund 82 %, ergeben sich für das LOA-Testfeld mit gummodifiziertem Bindemittel die günstigsten Voraussetzungen für eine wirksame geräuschkindernde Fahrbahnoberfläche. Die bautechnisch bedeutsamen MPD-Werte werden hier nur informativ mitgeführt, da sie akustisch nur eine geringe Aussagekraft haben.



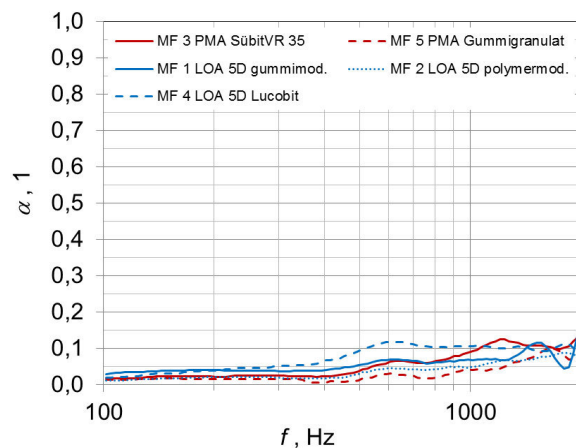
**Bild 5.3-43:** Einzelkennwerte der Oberflächentexturen als Mittelwerte über die Messpunkte in der rechten und linken Radrollspur. Oben: Rauigkeitseffektivwert des spektralen Maximums, unten links: Gestaltfaktor, unten rechts: Mittlere Profiltiefe (MPD).

Bild 5.3-44 zeigt die Ergebnisse der Strömungswiderstandsmessungen im Vergleich zu den Rauigkeitswerten (spektrales Maximum) der fünf Testfelder. Auf der linken Seite sind die Minimal-, Mittel- und Maximalwerte über alle sechs Messungen pro Testfeld aufgetragen. Auf der rechten Seite die Mittelwerte über die jeweils drei Messwerte pro Radrollspur und Testfeld. Die PMA-Testfelder weisen die insgesamt niedrigsten Strömungswiderstandswerte aller Testfelder auf und sind etwa halb so groß wie die der LOA-Testfelder. Die Unterschiede zwischen Maximal- und Minimalwert betragen durchweg rund 10.000 Pa s/m. Die grobraueren Oberflächen der PMA-Testfelder weisen mit Mittelwerten unter 10.000 Pa s/m erwartungsgemäß auch die niedrigsten Strömungswiderstände auf. Der höchste Strömungswiderstand ergibt sich mit im Mittel 25.000 Pa s/m für das LOA-Testfeld mit gummi-modifiziertem Bindemittel. Dies hängt unmittelbar mit der feinrauen Oberfläche zusammen, deren Rauigkeit im spektralen Maximum nur 125  $\mu\text{m}$  effektiv beträgt und ein Entweichen der im Reifen-Fahrbahn-Kontakt komprimierten Luft kaum zulässt, was sich positiv, das heißt pegelmindernd auf die Rollgeräuschenstehung auswirkt.



**Bild 5.3-44:** Texturinduzierter Strömungswiderstand und spektrales Rauigkeitsmaximum. Links: Minimal-, Mittel- und Maximalwerte über alle Messungen auf einem Testfeld, rechts: Mittelwerte über die Messungen in der linken und rechten Radrollspur pro Testfeld.

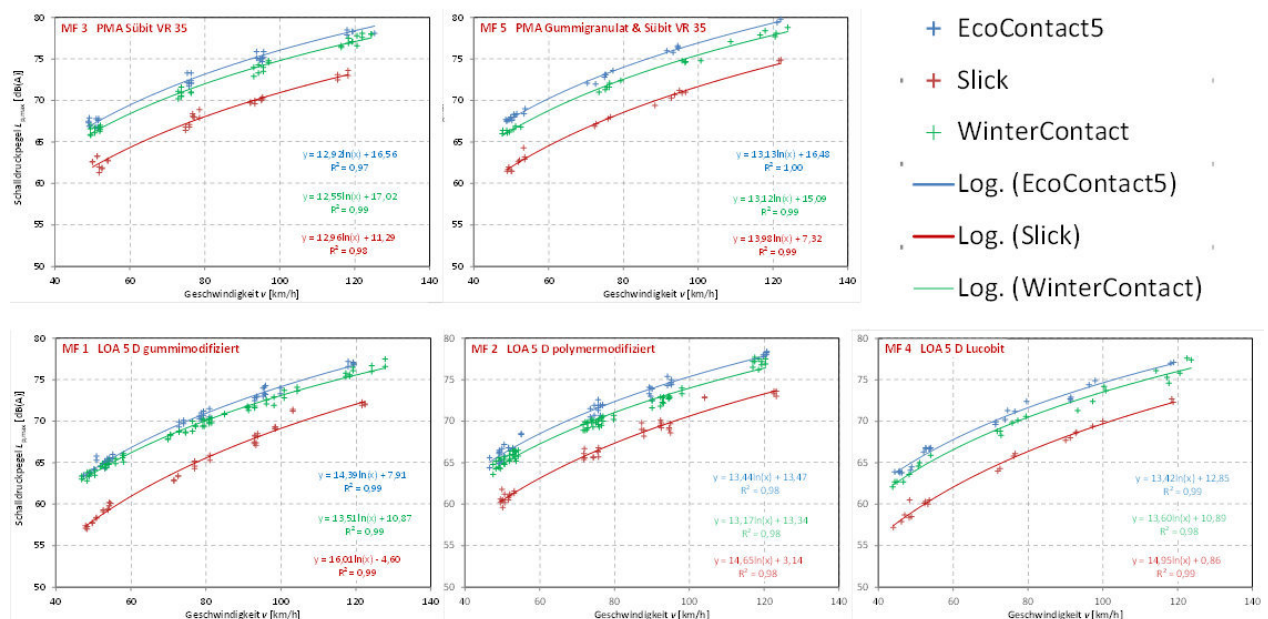
In Bild 5.3-45 sind die Ergebnisse der Schallabsorptionsgradmessungen als Mittelwerte über alle Messpunkte pro Testfeld dargestellt. In dem für die Reifen-Fahrbahn-Geräusche wichtigen Frequenzbereich von 300 Hz bis 3 kHz beträgt der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad über alle Testfelder nicht mehr als 17 %. Es handelt es sich damit also nicht nur bei der Bauweise PMA, sondern auch bei der Bauweise LOA um dichte Deckschichten, die nur sehr wenig zugängliche Hohlräume aufweisen und deshalb auch nicht schallabsorbieren. Pegelminderungen des Reifen-Fahrbahn-Geräusches sind damit ausschließlich auf texturbedingte Effekte zurückzuführen. Diese Aussage, die weiter oben bereits für die Bauweise PMA getroffen wurde, gilt damit auch für die Bauweise LOA.



**Bild 5.3-45:** Schallabsorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ .

### CPB-Messungen

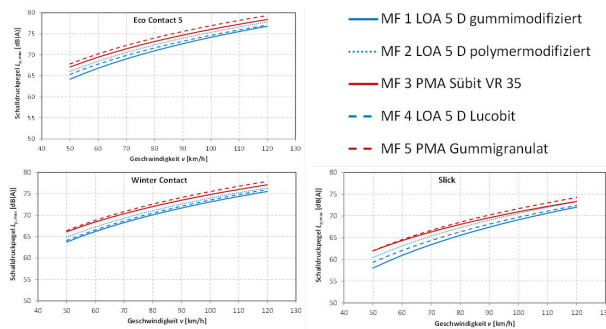
In Bild 5.3-46 sind die gemessenen Vorbeifahrpegel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit getrennt nach Reifen und Testfelder dargestellt. Erwartungsgemäß entstehen mit dem profillosen Reifen die niedrigsten Vorbeifahrpegel. Der Conti WinterContact Reifen erzeugt systematisch niedrigere Pegel als der EcoContact Reifen, was damit zusammenhängt, dass der Reifen-Fahrbahn-Kontakt des Winterreifens aufgrund seiner auf niedrige Temperaturen abgestimmten Gummimischung bei den sommerlichen Temperaturen während der Messungen deutlich weicher ist als der des Sommerreifens.



**Bild 5.3-46:** Vorbeifahrpegel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für alle Messreifen und Testfelder.

Die Vorbeifahrpegel der beiden PMA-Testfelder liegen systematisch etwas höher als die der LOA-Testfelder, wogegen die mittlere Geschwindigkeitsabhängigkeit der Vorbeifahrpegel mit einem Geschwindigkeits-exponenten von 3,0 bis 3,2 vergleichbar ist. Dieses Ergebnis bestätigt die Analyse der Texturmessungen. Beide PMA-Testfelder weisen im Vergleich zu den LOA-Testfeldern – bei gleichem Größtkorn – höhere Rauigkeitstiefen auf. Die Rauigkeitstiefe ist in diesem Fall auch die einzige Größe, die deutliche Unterschiede aufweist, wogegen die übrigen Oberflächenmerkmale wie Gestaltfaktor und Schallabsorptionsgrad vergleichbare Werte aufweisen. Aufgrund der fehlenden zugänglichen Hohlräume und der vergleichbaren Texturgestalt hängt der, gegenüber den LOA-Testfeldern, bei den PMA-Testfeldern festgestellte niedrigere Strömungswiderstand unmittelbar mit der größeren Rauigkeitstiefe zusammen. Der Reifen-Fahrbahn-Kontakt ist durch die größere Rauigkeitstiefe auch besser entlüftet, was im Falle rein texturinduzierter Strömung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt die Anregung strömungsinduzierter Geräusche (air pumping)

begünstigt und dieser Anteil am Reifen-Fahrbahn-Geräusch im Pegel zunimmt. Dies gilt insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten. Bei niedrigen Geschwindigkeiten spielt die mechanische Anregung der Reifen durch die rauere Oberfläche die entscheidende Rolle.

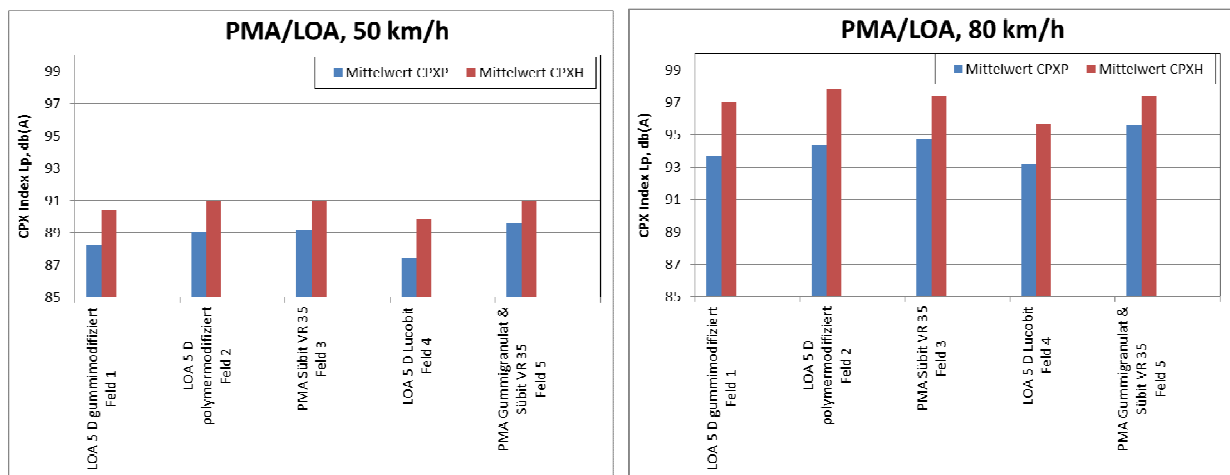


**Bild 5.3-47:** Interpolierte Funktion des Vorbeifahrtpegels in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

In Bild 5.3-47 sind die Vorbeifahrtpegel nochmals als Mittelwerte getrennt nach den drei Reifen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit aufgetragen. Hier wird deutlich, dass die PMA-Testfelder bei den Profilreifen systematisch um etwa 1 bis 2 dB höhere Vorbeifahrtpegel hervorrufen als die LOA-Testfelder. Innerhalb der Gruppe der LOA-Testfelder treten - je nach Bindemittel - ebenfalls Pegelunterschiede auf. Diese führen insbesondere bei niedrigen Geschwindigkeit zu einer Spreizung des Pegelbereichs von 1 bis 2 dB, wobei die Variante mit Gummi-modifizierung zu den niedrigsten Pegeln führt. Dies hängt mit der im Vergleich zu den anderen Varianten feinraueren Oberfläche zusammen. Bei niedrigen Geschwindigkeit vermindert die feinraue Oberfläche von Testfeld MF 1 die mechanische Geräuschanregung, wogegen sich bei höheren Geschwindigkeiten die aerodynamischen Geräusche im Reifen-Fahrbahn-Kontakt kompensierend auswirken und die Vorbeifahrtpegel bei ähnlichen texturinduzierten Strömungswiderständen ähnlichere Werte annehmen können. Die Effekte sind jedoch marginal, weshalb aus diesen Ergebnisse keine Rückschlüsse auf ein optimales Bindemittel gezogen werden können.

**CPX-Messungen**

Die CPX-Messungen wurden in beiden Fahrtrichtungen (Ost/West), bei zwei Geschwindigkeiten (50 und 80 km/h) und mit beiden CPX-Normmessreifensätzen (P und H) durchgeführt. Bild 5.3-48 zeigt die Ergebnisse für alle fünf Testfelder. In Bild 5.3-49 sind die dazugehörigen Terzspektren für die Geschwindigkeiten 50 km/h bzw. 80 km/h dargestellt.



**Bild 5.3-48:** Mittlerer Schalldruckpegel  $L_p$  in dB(A) für die Reifen P und H auf den fünf Testfeldern. Links: Geschwindigkeit  $v = 50$  km/h, rechts: Geschwindigkeit  $v = 80$  km/h.

Im Ergebnis ist festzustellen, dass sich die für die CPB-Messungen beschriebenen Unterschiede, trotz der unterschiedlichen Reifentypen, zwischen den Testfeldern in etwa auch in den CPX-Messungen wider-



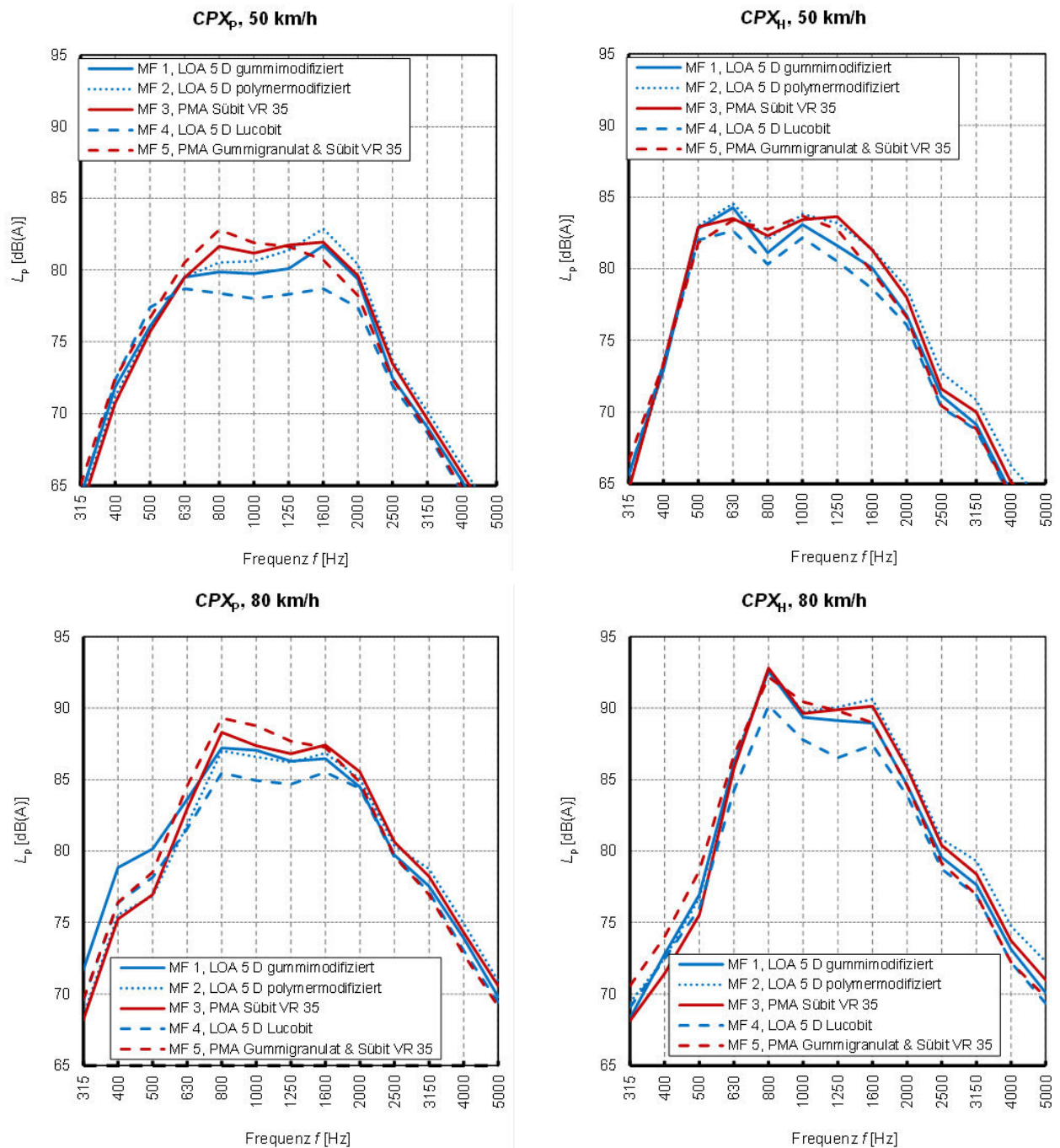
spiegeln. Das polymermodifizierte LOA-Testfeld schneidet innerhalb der Gruppe der drei LOA-Testfelder auch bei den CPB-Messungen am schlechtesten ab. Innerhalb der LOA-Gruppe wechseln die Testfelder MF 1 und MF 4 gegenüber den CPB-Messungen die Rangfolge. Das Testfeld MF 4 mit Bindemittel Lucobit ist bei den CPX-Messungen etwa 1 dB leiser als das gummimodifizierte Testfeld MF 1.

Der Lkw-ähnliche CPX Reifen H ruft bei 50 km/h systematisch um 2 dB höhere Pegel und bei 80 km/h um etwa 3 dB höhere Pegel hervor als der CPX P-Reifen. Dies hängt mit der Eigenart der Geräuschenstehung bei Reifen mit Blockprofil, wie es auch auf Traktionsreifen für Lkw zu finden ist, zusammen. Die Blockharmonische, deren Rollgeräuschfrequenz von der Anzahl der Blöcke über den Reifenumfang und der Rollgeschwindigkeit abhängt, fällt im vorliegenden Fall des CPX H-Reifens bei 80 km/h exakt in die Terz mit der Mittenfrequenz von 800 Hz. Die Geschwindigkeit der Anregung steigt mit zunehmender Frequenz an, bzw. anders ausgedrückt: je höher die Geschwindigkeit desto höher die Frequenz des entstehenden Rollgeräuschs. Das Verhältnis der Terzmittenfrequenz  $f_T$  zur Geschwindigkeit der Anregung  $v_{\text{anr}}$  ist konstant. Das Produkt dieses Verhältnisses mit dem Umfang  $U$  des jeweiligen Messreifens ergibt die Anzahl  $N$  der Profilblöcke des Reifens. Diese Anregung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche hängt somit mit dem periodischen Eintritt und Austritt der Profilblöcke in die Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche zusammen und ist somit auf geometrische Eigenschaften der Reifen zurückzuführen. Der Zusammenhang ist in Tab. 5.3-28 für einen Reifen P und zwei H-Reifen, deren Rollgeräuschspektren anhand von Nahfeldmessungen (CPX-Messungen) spektral analysiert wurden, für einige Terzen beschrieben. Die sich aus den Rollgeräuschspektren ergebende Anzahl der Profilblöcke wird abgeleitet und mit der tatsächlichen Anzahl verglichen.

Die Abhängigkeit des Pegels und damit der Quellstärke von der Geschwindigkeit mit einem Exponenten von etwa 4 ist jedoch ein Indiz dafür, dass die Rollgeräuschenstehung weniger mit der mechanischen Schwingungsanregung des Reifens als mit Strömungsvorgängen im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zusammenhängt. Insbesondere beim H-Reifen entstehen offensichtlich sehr effektive pulsierende Strömungsvorgänge, deren Frequenz mit der Abfolge der Profilklötze zusammenhängt. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Schallleistung von Exponent 4 weist ebenfalls auf eine solche Volumenquelle (Monopol) hin. Erst mit einer deutlichen Erhöhung des Strömungswiderstands bei dichten Deckschichten oder hohlraumreichen schallabsorbierenden Fahrbahnbelägen kann deshalb dafür gesorgt werden, dass eine Pegelmin-derung dieses Rollgeräuschanteils eintritt.

$f_T$	$v_{\text{anr P}}$	$v_{\text{anr H1}}$	$v_{\text{anr H2}}$	$f_T/v_{\text{anr P}}$	$f_T/v_{\text{anr H1}}$	$f_T/v_{\text{anr H2}}$
Hz	km/h	km/h	km/h	1/m	1/m	1/m
315	31	32	-	36.6	35.4	-
400	37	41	-	38.9	35.1	-
500	46	54	-	39.1	33.3	-
630	62	65	33	36.6	34.9	68.7
800	-	82	41	-	35.1	70.2
1000	-	-	54	-	-	66.7
Mittelwert $f_T/v_{\text{anr}}$ , 1/m				37.8	34.8	68.5
Faktor 1/2 für Harmonische						34.3
Reifenumfang $U$ , m				2.14	2.09	2.09
$N_{\text{Profilblöcke}} = f_T/v_{\text{anr}} \cdot U$				80.9	72.7	71.6
$N_{\text{Profilblöcke}}$ tatsächlich				81	72	72

**Tab. 5.3-28:** Reifenspezifisches Spektrum der Geräuschanregung mit der Fahrgeschwindigkeit  $v_{\text{anr}}$  bei bestimmten Terzmittenfrequenzen  $f_T$ .



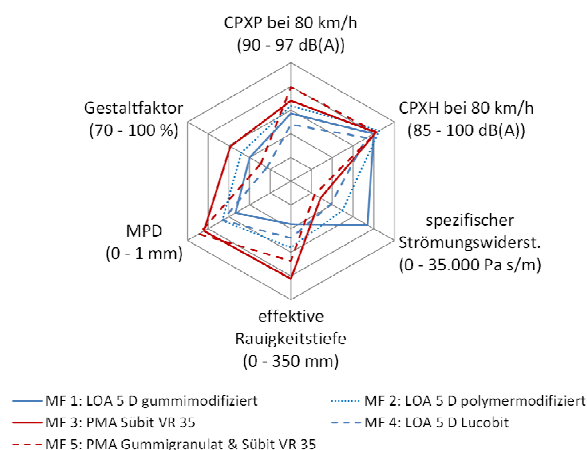
**Bild 5.3.49:** Spektren des mittleren Schalldruckpegels  $L_p$  in dB(A) für die Reifen P und H auf den fünf Testfeldern; oben: Geschwindigkeit  $v = 50$  km/h, unten:  $v = 80$  km/h, links: Reifen P, rechts: Reifen H.

Die Unterschiede der Fahrbahnoberflächentextur wirken sich beim CPX P-Reifen im Wesentlichen auf den Frequenzbereich von 800 Hz bis 1.600 Hz aus. Aufschlussreich ist jedoch die Auffächerung der tieffrequenten Flanke des Rollgeräuschspektrums für den P-Reifen bei 80 km/h. Im tieffrequenten Bereich unter 630 Hz findet eine Umkehrung der Rangfolge der Oberflächen statt. Das Testfeld MF 1, das im mittleren Frequenzbereich moderate Pegel hervorruft, führt im tiefen Frequenzbereich zu den höchsten Pegeln.

### Schlussfolgerungen hinsichtlich der akustischen Eigenschaften

Die Ergebnisse, die in Bild 5.3-50 grafisch zusammengefasst sind, lassen sich wie folgt beschreiben:

- Die geräuschkindernde Wirkung ist allein auf texturbedingte Effekte zurückzuführen.
- Zugängliche Hohlräume, die schallabsorbierend und dadurch zusätzlich geräuschkindernd wirken würden, sind bei keiner der beiden Bauweisen feststellbar.
- Die Bauweise PMA führt bei vergleichbarer Texturgestalt zu größeren Rauigkeitstiefen und niedrigeren Strömungswiderständen, was sich bei niedrigen Geschwindigkeiten durch eine etwas stärkere mechanische Anregung und bei mittleren und hohen Geschwindigkeiten durch eine etwas stärkere aerodynamische Anregung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs bemerkbar macht.
- Der Pegelunterschied der Bauweise PMA zur Bauweise LOA beträgt auf Basis der hier untersuchten Testfelder rund +1 dB.
- Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Vorbeifahrtpegel ist für beide Bauweisen gleich.
- Die Bindemittelvarianten führen in beiden Testfeldgruppen nur zu marginalen Unterschieden der Rollgeräuschpegel. Nichtsdestotrotz scheinen die LOA-Varianten mit Gummimodifizierung und Lucobit über alle Testfelder und Messmethoden hinweg die akustisch günstigsten Varianten darzustellen.
- Für ausgeprägte Blockprofile von Reifen, wie sie bei dem für CPX-Messungen verwendeten Reifen H, aber auch bei Traktionsreifen von Lkw vorkommen, stellen die feinrauen texturoptimierten Oberflächen einen Nachteil dar. Die Rollgeräuschpegel steigen ab 800 Hz mit zunehmender Geschwindigkeit in schmalen Frequenzbändern, die den Blockharmonischen bei der jeweiligen Geschwindigkeit entsprechen, extrem an. Aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit mit Exponent 4 ist dies auf Strömungsvorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zurückzuführen.



**Bild 5.3-50:** Zusammenfassung der Messergebnisse

### 5.3.5 Bau und Bewertung von Erprobungsstrecken

#### 5.3.5.1 Erprobungsstrecke BAB A 553 bei Brühl

##### Beschreibung der Erprobungsstrecke

In Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb Straßen.NRW wurden auf einem Abschnitt der BAB A 553 zwischen den Anschlussstellen Bliesheim und Brühl-Süd die Umsetzung verschiedener PMA-Konzepte realisiert. Insgesamt standen je Fahrtrichtung etwa 5 km Streckenlänge zur Verfügung. Der Abschnitt in Fahrtrichtung Köln weist einen Anteil an Schwerverkehr von 6,1 % (803 Kfz/24 h) und in Fahrtrichtung Euskirchen von 6,0 % (811 Kfz/24 h) auf.

Im Fokus der Untersuchungen stand der Einfluss des Bindemittels und der Mörtelphase auf das Asphaltmischgut und den damit verbundenen prozesssicheren Einbau.

Die Ruhr-Universität Bochum hat im Auftrag des Landesbetriebs Straßen.NRW verschiedene Bindemittelkonzepte entworfen, labortechnisch untersucht und die entsprechenden Erstprüfungen durchgeführt. Mit Zustimmung des Landesbetriebs Straßen.NRW wurden die Untersuchungen in das Verbundprojekt LeiStra3 einbezogen. Dadurch konnten umfangreiche Erkenntnisse für die Optimierung des PMA-Asphaltmischguts und die erforderlichen Einbaubedingungen gewonnen werden. Vertreter aus dem Landesbetrieb Straßen.NRW waren aktiv in die Forschungsarbeiten einbezogen.

Insgesamt wurden acht verschiedene PMA Varianten auf Testfeldern mit einer Länge von 450 bis 1800 m gebaut. Als Binder wurde ein AC 16 B S verwendet. Die Varianten V1, V2, und V6 wurden im Juni 2012 in Fahrtrichtung Köln eingebaut. Im Mai 2013 erfolgte dann der Bau der Varianten V4, V5, V7 und V8 in Fahrtrichtung Euskirchen. Variante 1 wurde in beiden Richtungen gebaut und diente als Referenz. Tabelle 5.3-19 und Tabelle 5.3-20 beinhalten die verschiedenen Bindemittelkonzepte der Varianten.

	Kilometrierung	Bindemittel
Variante 1	0.027 – 1.880	Sübit VR 35
	3.730 – 4.880	
Variante 2	1.880 – 2.517	Mexphalte RMplus + vZ
Variante 6	2.517 – 3.730	B 30/45 + Trinidad

Tab. 5.3-19: PMA Varianten – BAB A 553 FR Köln

	Kilometrierung	Bindemittel
Variante 1	4.892 – 3.600	Sübit VR 35
	0.500 – 0.063	
Variante 4	3.600 – 2.563	50/70 + Viatop plus CT 40
Variante 5	2.563 – 1.895	50/70 + Lucobit + Sasobit
Variante 7	1.895 – 1.165	BP Olexobit
Variante 8	1.165 – 0.500	Nynas Nypave 25

Tab. 5.3-20: PMA Varianten – BAB A 553 FR Euskirchen

Die Erstprüfungen der Varianten sind V4, V5, V7 und V8 in Tab. 5.3-21 zusammengefasst.

#### Asphaltanalyse und Strukturanalyse

Die Eigenschaften des Asphaltmischguts sind anhand der Ergebnisse der Erstprüfungen in Tabelle 5.3-21 zusammengefasst.

Asphaltmischgutzusammensetzung und -eigenschaften	Einheit	V 4	V 5	V 7	V 8
<b>Zusammensetzung der Gesteinskörnungen</b>					
Anteil Füller	[M.-%]	17,5	17,5	17,5	17,5
Anteil Feine Gesteinskörnung 0/2 mm	[M.-%]	29,8	29,8	29,8	29,8
Anteil Grobe Gesteinskörnung 2/5 mm	[M.-%]	70,2	70,2	70,2	70,2
<b>Kornverteilungslinie (Siebdurchgang)</b>					
8,0 mm	[M.-%]	100,0	100,0	100,0	100,0
5,6 mm	[M.-%]	97,3	97,3	97,3	97,3
2,0 mm	[M.-%]	29,8	29,8	29,8	29,8
1,0 mm	[M.-%]	26,6	26,6	26,6	26,6
0,25 mm	[M.-%]	20,5	20,5	20,5	20,5
0,125 mm	[M.-%]	19,1	19,1	19,1	19,1
0,063 mm	[M.-%]	17,5	17,5	17,5	17,5
<b>Mischguteigenschaften</b>					
Bindemittelsorte	[-]	50/70	50/70	10/40-65 A NV	20/30 NV
Zusätze	[M.-%]	0,5 Faserstoffe 0,3 Haftverbesserer	0,44 ECB 0,22 FT-Wachs	-	-
Zugegebenes Bindemittel	[M.-%]	7,2	6,7	7,4	7,4
Bindemittel aus Zusätzen	[M.-%]	0,2	0,66	-	-
Gesamt-Bindemittelgehalt B	[M.-%]	7,4	7,44	7,4	7,4
Raumdichte $\rho_b$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,254	2,247	2,236	2,221
Rohdichte der Asphaltprobe $\rho_m$	[g/cm <sup>3</sup> ]	2,395	2,400	2,389	2,407
Hohlraumgehalt der Asphaltprobe	[Vol.-%]	5,9	6,4	6,4	7,7

Tab. 5.3-21: Mischgutkenndaten PMA-Demonstratoren BAB A 553 Variante V4, V 5, V 7, V 8

Im Zuge der Standstreifenerneuerung in Richtung Euskirchen konnten erste Varianten vorab getestet werden. Die Einbauarbeiten wurden durch die Ruhr-Universität Bochum begleitet. Neben Mischgut- und Bohrkernuntersuchungen wurden auch die Einbautemperaturen mittels Wärmebildkamera erfasst.

Anhand der Temperaturmessungen konnten große Inhomogenitäten der Oberflächentemperatur über den Standstreifenquerschnitt festgestellt werden. Aufgrund der nicht optimalen Witterungsverhältnisse hatten sich zudem Wasserdampfblasen in der PMA-Schicht gebildet, die gilt insbesondere für die Variante 7. Die Aufnahmen der Thermographie-Kamera sind in Bild 5.3-51 dargestellt.

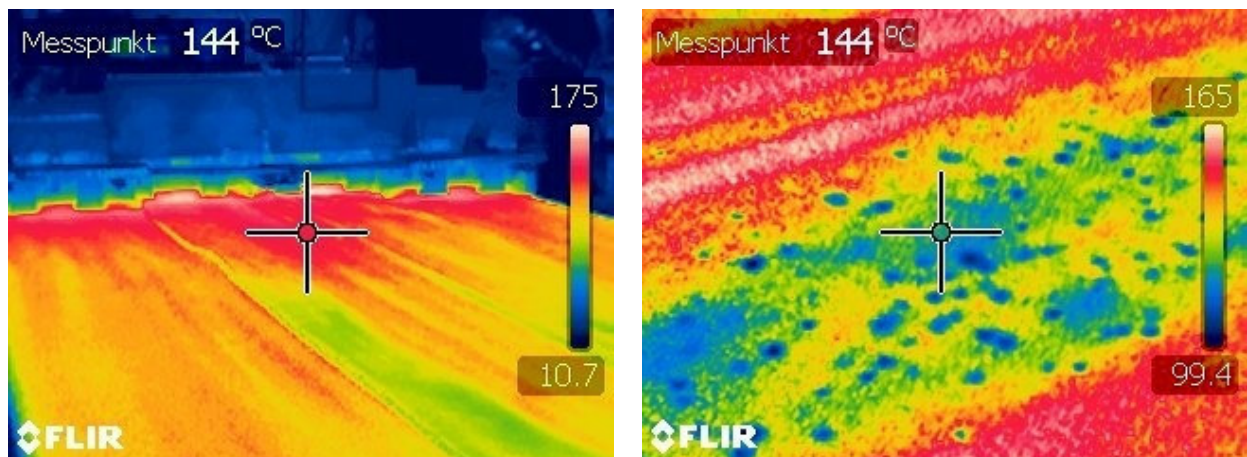
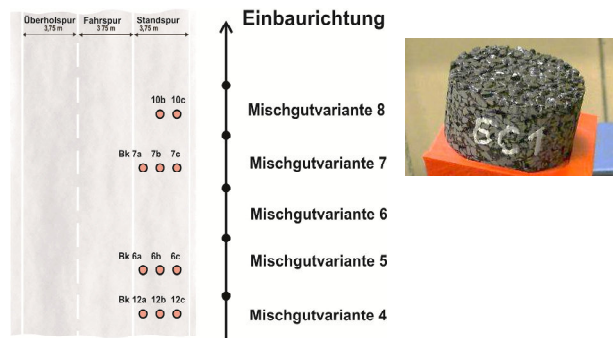


Bild 5.3-51: Temperaturverteilung in °C beim Einbau der PMA-Deckschicht auf dem Standstreifen der BAB 553 in Richtung Euskirchen am 22. Mai 2013. Die Aufnahmen zeigen exemplarisch die Temperaturverteilung über den Standstreifenquerschnitt beim Einbau von Variante 5 (a) und die Temperaturverteilung eines Ausschnitts beim Einbau von Variante 7 (b)

Der Schwerpunkt der Erprobung von verschiedenen Bindemittelkonzepten auf der BAB A 553 war die Untersuchung, inwieweit unter Variation der Mörtelphase eine zielsichere Herstellung einer PMA Deckschicht nach dem beschriebenen Wirkprinzip realisiert werden kann. Aus diesem Grund wurden Bohrkernentnommen und die Hohlraumverteilung mittels Computertomographie bei der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) analysiert. Mit Hilfe der CT-Analyse ist es möglich zu prüfen, ob sich die gewünschte Hohlraumverteilung über den Querschnitt eingestellt hat, also ein oberer offenporiger Bereich und ein unterer dichter Bereich.

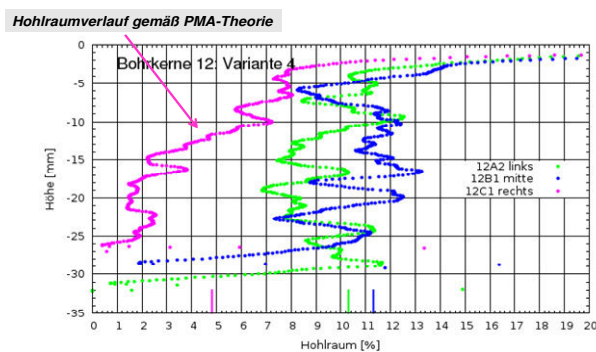
Die Bohrkernentnahme erfolgte an insgesamt vier Stationen. Je Entnahmestelle wurden drei Bohrkernscheiben mit der Kennzeichnung „a“, „b“ oder „c“ der BAM übergeben. Die Bohrkern wurden dabei jeweils auf der linken Seite, in der Mitte und auf der rechten Seite der Fahrspur entnommen, um Unterschiede über die Fertigerbreite aufzeigen zu können (Bild 5.3-52).



**Bild 5.3-52:** Entnahmeschema der Bohrkern auf der BAB A 553 (Quelle: BAM)

Die detaillierten Analysen der BAM sind im Schlussbericht zum Teilvorhaben VI.II beschrieben. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt.

Bild 5.3-53 zeigt die Hohlraumverteilungen an den Bohrkernen der Mischgutvariante 4. Es wird deutlich, dass die Bohrkern 12a (Links) und 12b (Mitte) praktisch keinen Verlauf der Hohlraumverteilung über den Querschnitt aufweisen. Über den gesamten Querschnitt hat sich ein Hohlraumgehalt zwischen 8 Vol.-% und 11 Vol.-% eingestellt. Lediglich Probe 12c (Rechts) zeigt einen Hohlraumverlauf, der der ursprünglichen Wirktheorie von PMA entspricht.



**Bild 5.3-53:** Lokale Hohlraumverteilung – Variante 4 (Quelle: BAM)

In Bild 5.3-54 sind die Ergebnisse der Mischgutvariante 5 dargestellt. Hier zeigen alle Proben Unterschiede bei der Hohlraumverteilung über den Probenquerschnitt, wobei Bohrkern 6a (Links) erst im oberflächennahen Bereich eine Zunahme des Hohlraumgehaltes aufweist.

Hohlraumverlauf gemäß PMA-Theorie

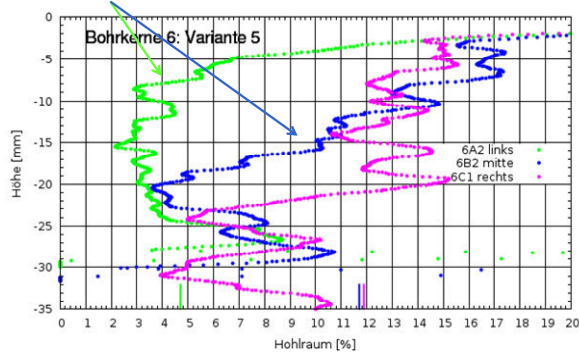
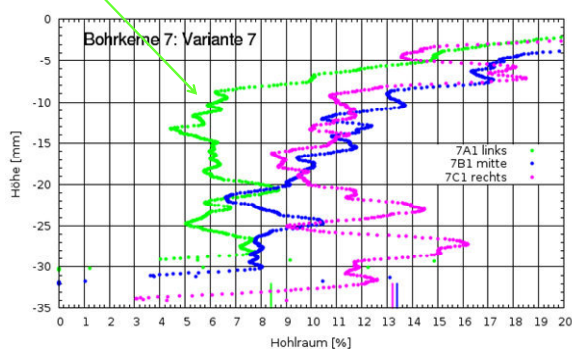
**Bild 5.3-54:** Lokale Hohlraumverteilung – Variante 5 (Quelle: BAM)

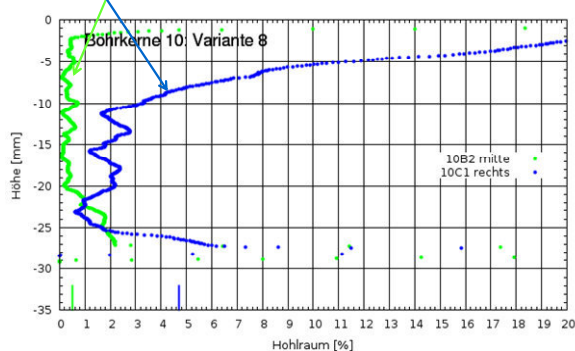
Bild 5.3-55 zeigt die Ergebnisse der CT-Untersuchungen der Mischgutvariante 7. Die Bohrkern 7b (Mitte) und 7c (Rechts) zeigen wiederum keine deutliche Änderung der Hohlraumverteilung über den Querschnitt. Auch hier stellen sich Hohlraumgehalte zwischen 7 Vol.-% und 15 Vol.-% ein. Der untere Bereich zeigt nicht die gewünschte dichte Struktur. Im oberen Bereich weisen alle Proben eine deutlich offenporige Struktur mit Hohlraumgehalten zwischen 16 Vol.-% und 19 Vol.-% auf. Lediglich Bohrkern 7c (Links) zeigt einen Hohlraumverlauf, wie er im PMA-Prinzip angestrebt wird. Allerdings ist der untere Bereich der Probe mit einem Hohlraumgehalt von etwa 6 Vol.-% zu „offen“.

Hohlraumverlauf gemäß PMA-Theorie

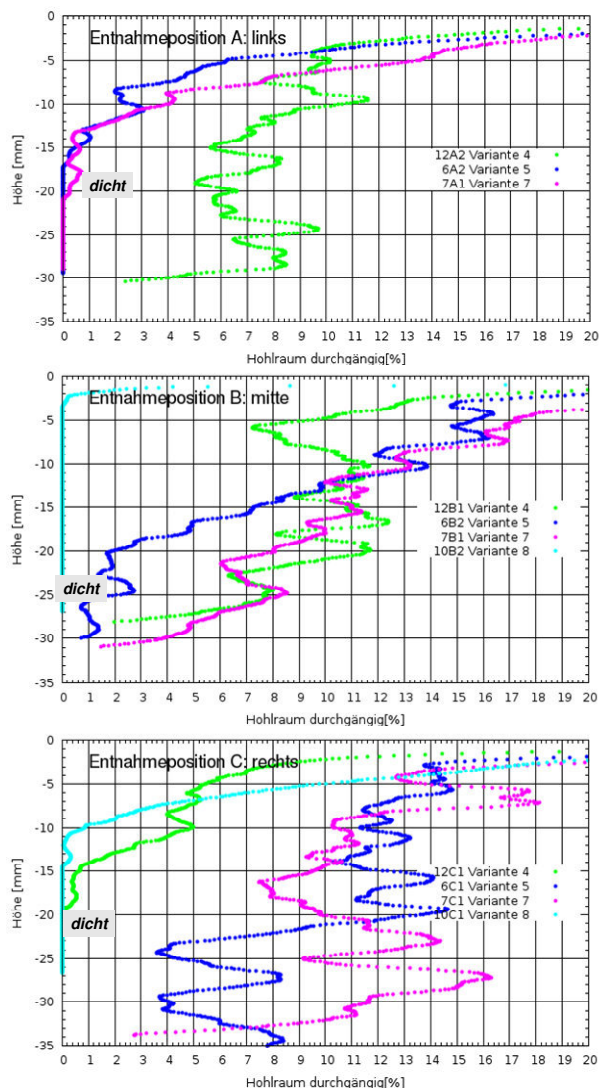
**Bild 5.3-55:** Lokale Hohlraumverteilung – Variante 7 (Quelle: BAM)

Aus der Hohlraumverteilung über die Probenhöhe der Mischgutvariante 8 (Bild 5.3-56) zeigt sich, dass sowohl Messprobe 10b (Mitte) als auch 10c (Rechts) einen Hohlraumverlauf aufweisen, der der ursprünglichen Wirktheorie von PMA entspricht.

Hohlraumverlauf gemäß PMA-Theorie

**Bild 5.3-56:** Lokale Hohlraumverteilung V8 (Quelle: BAM)

Für eine vergleichende Bewertung der Hohlraumstruktur wurden die Ergebnisse aller Entnahme-Stationen für die Positionen „Links“, „Mitte“ und „Rechts“ zusammenfassend dargestellt (Bild 5.3-57).



**Bild 5.3-57** Aufklärung nach außen kommunizierender Hohlräume

#### Entnahmeposition Links

Varianten 5 und 7 zeigen eine Hohlraumverteilung nach PMA-Prinzip.

#### Entnahmeposition Mitte

Variante 5 zeigt eine Hohlraumverteilung nach PMA-Prinzip. Alle anderen Varianten zeigen im unteren Bereich Hohlräume zwischen 6 Vol.-% und 11 Vol.-%.

#### Entnahmeposition Rechts

Variante 4 zeigt einen Hohlraumverlauf, der der ursprünglichen Wirktheorie von PMA entspricht. Alle anderen Varianten zeigen eine Hohlraumverteilung über den Querschnitt zwischen 6 Vol.-% und 14 Vol.-%.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass keine der untersuchten Varianten eine prozesssichere Herstellung des PMA-Prinzips zeigt. Über die Fahrbahnbreite zeigen die Bohrkern, die links entnommen wurden, eine deutlichere Tendenz hinsichtlich einer Ausbildung der Hohlraumverteilung nach dem PMA-Prinzip. Ein Abgleich der Ergebnisse mit den Mischguttemperaturen während des Einbaus zeigt, dass Inhomogenitäten im Temperaturverlauf zu ungünstigen Hohlraumverteilungen führen. Die Ergebnisse sind ausführlich im Bericht zum Teilvorhaben VI.II beschrieben. Neben der Mischgutkonzeption tragen vor allem die Einbaubedingungen wesentlich zur Herstellung der gewünschten Hohlraumstruktur bei.

### Fahrbahnoberflächeneigenschaften

Zur Beurteilung der Oberflächeneigenschaften der Fahrbahnbeläge wurden die Griffigkeit, die Längs- und Querebenheit, die Geräuschemission und die Texturkenndaten erfasst. Die Ergebnisse für die Erprobungsstrecke BAB A 553 sind nachfolgend dargestellt.

#### Griffigkeit

In 2014 erfolgten die Griffigkeitsmessungen mit dem SKM-Verfahren gemäß TP Griff-StB (SKM) bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h. In den nachfolgenden Tabellen sind die Ergebnisse für die einzelnen Testfelder aufgeführt, wobei die Ergebnisse den Mittelwert aus zwei Messfahrten darstellen.



	Kilometrierung	$\mu_{SKM,80}$
Variante 1	0.027 – 1.880	0,716
	3.730 – 4.880	
Variante 2	1.880 – 2.517	0,658
Variante 6	2.517 – 3.730	0,723

Tab. 5.3-22: PMA Varianten – BAB A 553 FR Köln

	Kilometrierung	$\mu_{SKM,80}$
Variante 1	4.892 – 3.600	0,717
	0.500 – 0.063	
Variante 4	3.600 – 2.563	0,621
Variante 5	2.563 – 1.895	0,577
Variante 7	1.895 – 1.165	0,601
Variante 8	1.165 – 0.500	0,623

Tab. 5.3-23: PMA Varianten – BAB A 553 FR Euskirchen

Insgesamt zeigen alle Versuchsabschnitte auch nach einem bzw. zwei Jahren Verkehrsbelastung sehr gute Griffigkeiten. Der Anforderungswert gemäß ZTV Asphalt-StB [22] von  $\mu_{SKM,80} = 0,46$  wird deutlich überschritten. Erwartungsgemäß stellen sich bei den verschiedenen Varianten Unterschiede in der Griffigkeit ein. Neben der Gesteinsart und dem Grobkornanteil hat auch die Mörtelkomponente, bestehend aus Bindemittel und Feinanteilen, einen Einfluss auf die Ausbildung der Mikrotextrur und damit auf die Griffigkeit der Fahrbahnoberfläche.

### Längs- und Querebenheit

Die Längsebenheit auf der BAB A 553 in Fahrtrichtung Köln weist im Mittel einen AUN von 0,53 cm<sup>3</sup> bis 0,87 cm<sup>3</sup> für die verschiedenen Varianten auf. Zu Beginn der Baumaßnahme (Variante 1) wurde die schlechtere Ebenheit (0,87 cm<sup>3</sup>) erzielt; dies kann auf anfängliche Schwierigkeiten bei der Einstellung der Verdichtungsarbeit zurückgeführt werden. Sowohl die Einstellungen am Fertiger als auch an den Walzen müssen für den Einbau eines PMA optimiert werden. Dafür spricht auch der in Bild 5.3-58 dargestellte Verlauf der Ebenheit. Dieser zeigt deutlich, dass bei der Variante 1 am Anfang merklich schlechtere Längsebenheiten erzielt wurden. Trotzdem erreichen alle Varianten bei einer Wertung nach der Systematik der ZEB eine Zustandsnote von 1,0.

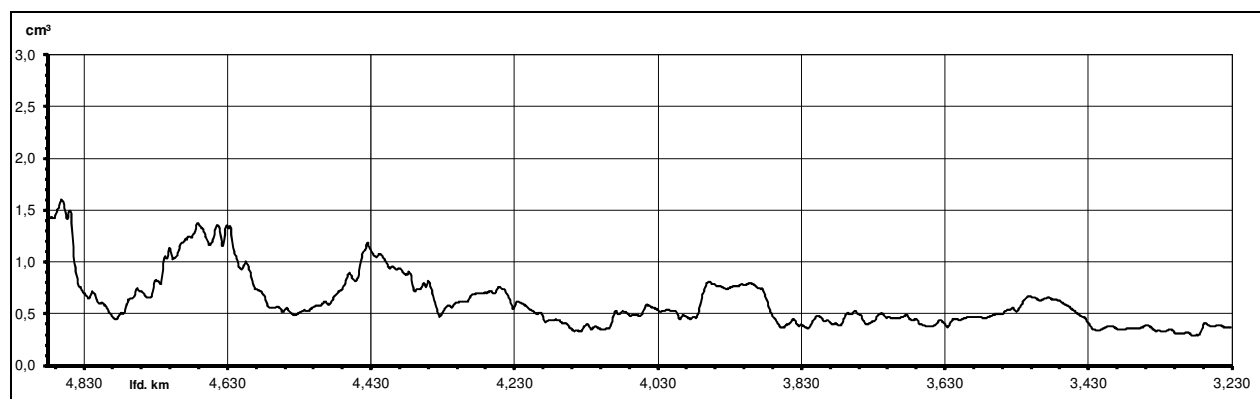
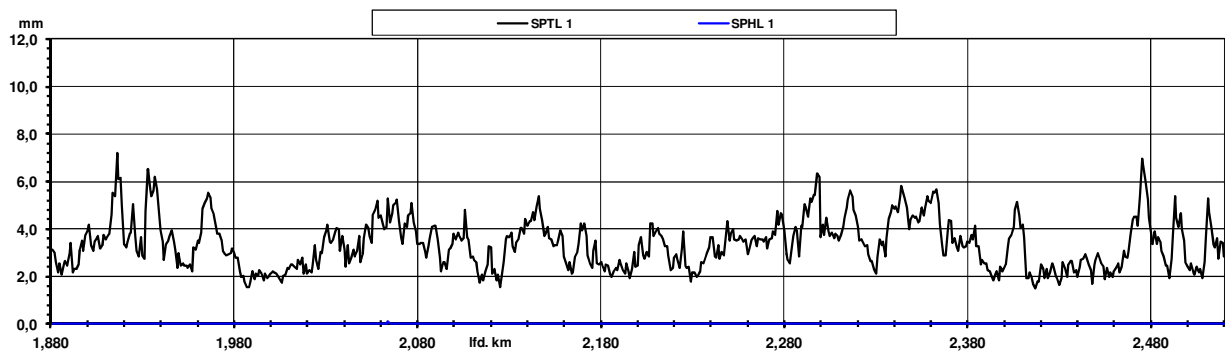


Bild 5.3-58: Verlauf der Längsebenheit auf der BAB A 553 für die Variante 1 in Fahrtrichtung Köln

In Bild 5.3-59 sind exemplarisch die Verläufe des Querebenheitsmerkmals SPT und SPH für die linke Rollspur der Variante 2 in Fahrtrichtung Köln dargestellt. Im Mittel liegt die Spurrinnentiefe unter 4 mm und die fiktive Wassertiefe bei 0 mm. Dies entspricht bei einer Beurteilung nach der ZEB einer Zustandsnote

von 1,0. Aber einzelne Abschnitte überschreiten auch den Grenzwert von 4,0 mm der für die Zustandsnote 1,0 vorgegeben ist.



**Bild 5.3-59:** Verlauf der Querebenheit auf der BAB A553, Variante 2 in Fahrtrichtung Köln

Tabelle 5.3-24 und Tabelle 5.3-25 enthalten eine Zusammenfassung der Ebenheitskenngrößen für die BAB A 553. Insgesamt können die erreichten Ebenheiten für die BAB A 553 in Fahrtrichtung Köln noch als gut bezeichnet werden, gegenüber den Teststrecken auf der BAB A 3 und BAB A 5 fallen sie aber deutlich schlechter aus.

	Kilometrierung	AUN [cm <sup>3</sup> ]	MSPT [mm]	MSPH [mm]
Variante 1	0,027 – 1,880	0,87	2,09	0,00
	3,730 – 4,880	0,62	2,17	0,00
Variante 2	1,880 – 2,517	0,55	3,35	0,00
Variante 6	2,517 – 3,730	0,53	2,14	0,00

**Tab. 5.3-24:** Ebenheiten der Erprobungsstrecke BAB A 553 Fahrtrichtung Köln

	Kilometrierung	AUN [cm <sup>3</sup> ]	MSPT [mm]	MSPH [mm]
Variante 1	0,500 - 0,000	0,55	2,40	0,00
	4,900 - 3,660	0,51	1,28	0,02
Variante 8	1,220 - 0,500	0,58	1,94	0,00
Variante 7	1,860 - 1,220	0,34	1,25	0,00
Variante 5	2,520 - 1,860	0,42	1,25	0,00
Variante 4	3,660 - 2,520	0,41	0,95	0,00

**Tab. 5.3-25:** Ebenheiten der Erprobungsstrecke BAB A 553 Fahrtrichtung Euskirchen

### Geräuschemission

Die Messfahrten zur Bewertung der akustischen Eigenschaften erfolgten auf der BAB A 553 im März 2013 mit dem CPX-Anhänger der BASt gemäß ISO/DIS 11819-2. Die Messungen wurden bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h durchgeführt. Die Ergebnisse sind auf Basis des vorliegenden Messberichtes [11] in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt.

	Kilometrierung	CPX P [dB(A)]	CPX H [dB(A)]	CPX I [dB(A)]
Variante 1	0.027 - 1.880	94,4	96,0	95,2
	3.730 - 4.880	94,2	95,9	95,1
Variante 2	1.880 - 2.517	94,6	96,5	95,6
Variante 6	2.517 - 3.730	94,0	95,7	94,9

**Tab. 5.3-26:** CPX-Messungen der Erprobungsstrecke BAB A 553 Fahrtrichtung Köln

	Kilometrierung	S <sub>CPXP</sub> [dB(A)]	S <sub>CPXH</sub> [dB(A)]	S <sub>CPXI</sub> [dB(A)]
Variante 1	0.027 - 1.880	0,4	0,5	0,4
	3.730 - 4.880	0,5	0,3	0,44
Variante 2	1.880 - 2.517	0,4	0,4	0,4
Variante 6	2.517 - 3.730	0,9	0,8	0,8

**Tab. 5.3-27:** Standardabweichungen CPX-Messungen BAB A 553 Fahrtrichtung Köln

	Kilometrierung	CPX P [dB(A)]	CPX H [dB(A)]	CPX I [dB(A)]
Variante 1	4.892 - 3.600	94,0	96,2	95,1
	0.500 - 0.063	94,2	96,0	95,1
Variante 4	3.600 - 2.563	94,7	96,9	95,8
Variante 5	2.563 - 1.895	94,5	96,3	95,4
Variante 7	1.895 - 1.165	94,7	96,5	95,6
Variante 8	1.165 - 0.500	94,5	96,4	95,5

**Tab. 5.3-28:** CPX-Messungen der Erprobungsstrecke BAB A 553 Fahrtrichtung Euskirchen

	Kilometrierung	S <sub>CPXP</sub> [dB(A)]	S <sub>CPXH</sub> [dB(A)]	S <sub>CPXI</sub> [dB(A)]
Variante 1	4.892 - 3.600	0,4	0,4	0,4
	0.500 - 0.063	0,4	0,4	0,4
Variante 4	3.600 - 2.563	0,2	0,2	0,2
Variante 5	2.563 - 1.895	0,3	0,4	0,3
Variante 7	1.895 - 1.165	0,4	0,4	0,4
Variante 8	1.165 - 0.500	0,3	0,3	0,3

**Tab. 5.3-29:** Standardabweichungen CPX-Messungen BAB A 553 Fahrtrichtung Köln

Die ermittelten CPX-Pegel liegen in beiden Fahrtrichtungen beim Reifen P1 zwischen 94,0 dB(A) bei den Varianten 1 und 6 und 94,7 dB(A) bei der Variante 7. Die Unterschiede sind als sehr gering zu betrachten. Beim Reifen H1 wurden CPX-Pegel zwischen 95,7 dB(A) (Variante 6) und 96,9 dB(A) (Variante 4) ermittelt. Die Standardabweichungen liegen zwischen 0,2 dB(A) bzw. 0,5 dB(A) und weisen auf eine unterschiedlich ausgeprägte Homogenität der Testfelder hin, wobei Variante 6 eine deutlich schlechtere Homogenität als die restlichen Varianten aufweist.

Unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten aus bereits durchgeführten CPX-Messungen auf lärmarmen Waschbetonstrecken und Fahrbahnbelägen aus Splittmastixasphalt zeigen die im Nahfeld erzielten Schall-

druckpegel (CPX- Pegel) auf der BAB A 553 für den Referenzreifen P1 (Pkw-Reifen) eine Pegelminderung zwischen 2,8 dB(A) und 3,5 dB(A) gegenüber den lärmarmen dichten Bauweisen SMA und WB.

SPB-Messungen, die einen direkten Vergleich zu den DStrO-Werten gemäß RLS 90 zulassen, konnten aufgrund der örtlichen Randbedingungen nicht durchgeführt werden.

### Textur

Die Texturkenndaten wurden mit dem schnellfahrenden Textur-Laserprofilometer TMF der BASt erfasst. Die Ergebnisse sind für jede Fahrtrichtung getrennt in der Tabelle 5.3-30 und Tabelle 5.3-31 dargestellt.

Variante	Km	MPD [mm]	ETD [mm]	Amax [mm]	g [%]	gL [mm]
Variante 1	0.027 - 1.880	0,680	0,744	0,170	70,3	1115
	3.730 - 4.880	0,680	0,744	0,171	70,9	1125
Variante 2	1.880 - 2.517	0,574	0,659	0,147	72,4	1150
Variante 6	2.517 - 3.730	0,936	0,951	0,191	56,8	901

**Tab. 5.3-30:** Texturkenndaten der Erprobungsstrecke BAB A 553 Fahrtrichtung Köln

Variante	Km	MPD [mm]	ETD [mm]	Amax [mm]	g [%]	gL [mm]
Variante 1	4.892 - 3.600	0,641	0,713	0,165	71,8	1139
Variante 4	3.600 - 2.563	0,534	0,627	0,14	74,0	740
Variante 5	2.563 - 1.895	0,728	0,782	0,186	71,3	1132
Variante 7	1.895 - 1.165	0,728	0,782	0,172	68,7	881
Variante 8	1.165 - 0.500	0,677	0,731	0,161	69,7	1106

**Tab. 5.3-31:** Texturkenndaten der Erprobungsstrecke BAB A 553 Fahrtrichtung Euskirchen

Gemäß dem Arbeitspapier „Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken“ [5] liegen die mittlere Texturtiefe MPD und die geschätzte Texturtiefe ETD für einen PKW im akustisch günstigen Bereich (0,4 mm bis 0,8 mm). Dies gilt auch für die ermittelten Werte für den Gestaltfaktor  $g$ . Der Gestaltfaktor  $g$  auf dem Abschnitt der Variante 6 liegt mit 56,8 % etwas unter dem angestrebten Wert von 60 %. Hinsichtlich der Gestaltlänge  $gL$  liegen die ermittelten Werte aller Varianten außerhalb des akustisch günstigen Bereiches von 400 mm bis 700 mm.

### 5.3.5.2 Erprobungsstrecke BAB A 3 bei Lohmar

#### Beschreibung der Erprobungsstrecke

Im September 2013 wurde auf der BAB A 3 in Höhe Lohmar eine Erprobungsstrecke für die Bauweise PMA (Porous Mastic Asphalt) über eine Länge von insgesamt 6 km gebaut. Bild 5.3-61 zeigt den Lageplan. Der Streckenabschnitt befindet sich zwischen den Anschlussstellen Lohmar Nord und Siegburg. Hier wurde eine Deckschichterneuerung sowohl in Fahrtrichtung Köln (Nord) als auch Fahrtrichtung Frankfurt a.M. (Süd) durchgeführt.

Der Fokus lag bei dieser Erprobungsstrecke vor allem auf der Isolierung des Einflusses der groben Gesteinskörnung auf die Lärmentwicklung. Dazu wurden zwei im Straßenbau häufig eingesetzte Gesteinsarten in jeweils einer Fahrtrichtung eingebaut. In Fahrtrichtung Köln kam ein Basanit zum Einsatz, in Fahrtrichtung Frankfurt wurde ein Diabas verwendet.

Der Abschnitt weist in Fahrtrichtung Köln einen Anteil des Schwerverkehrs von 13,5 % (5.273 Kfz/24 h) und in Fahrtrichtung Süd von 13,8 % (5.421 Kfz/24 h) auf.

## Asphaltuntersuchungen

Die Baumaßnahme auf der BAB A 3 wurde intensiv durch Straßen.NRW überwacht. Gemäß Regelwerk wurden Mischgutproben und Bohrkerne entnommen und umfangreiche Kontrollprüfungen durchgeführt. Die Ergebnisse wurden der BAST zur Verfügung gestellt, so dass auf eine weitere Bohrkernentnahme verzichtet werden konnte, um die Strecke nicht weiter zu schädigen. Die Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt zusammenfassend dargestellt.

In Fahrtrichtung Frankfurt erfolgte der Einbau der PMA-Deckschicht mit einer Schichtdicke von etwa 3,5 cm. Die ermittelten Hohlraumgehalte der Deckschichtproben lagen zwischen 8,7 Vol.-% und 8,9 Vol.-%. Die Prüfung des Schichtenverbundes zwischen Deck- und Binderschicht zeigte, dass die Anforderungen gemäß ZTV Asphalt-StB eingehalten wurden.

In Fahrtrichtung Köln liegen die Ergebnisse aus sieben Entnahmestellen vor. Die ermittelten Hohlraumgehalte zeigen hier deutlich größere Schwankungen. Sie liegen zwischen 3,9 Vol.-% und 10,2 Vol.-%, wobei auch die Schichtdicken Schwankungen zwischen 3,0 cm und 4,5 cm aufweisen.

Insgesamt ist die Bewertung der PMA-Bauweise hinsichtlich des Hohlraumgehaltes in der fertigen Deckschicht noch als schwierig zu bewerten, da sich die Hohlraumverteilung über den Probenquerschnitt stark ändert. Im Forschungsprojekt hat sich gezeigt, dass über das CT-Verfahren der BAM detaillierte Aussagen darüber möglich sind, ob die gewünschte Hohlraumverteilung erreicht wurde. Diese Prüfung ist derzeit noch vergleichsweise aufwendig und teuer, so dass langfristig noch ein geeignetes Prüfverfahren für die Praxis entwickelt werden muss.

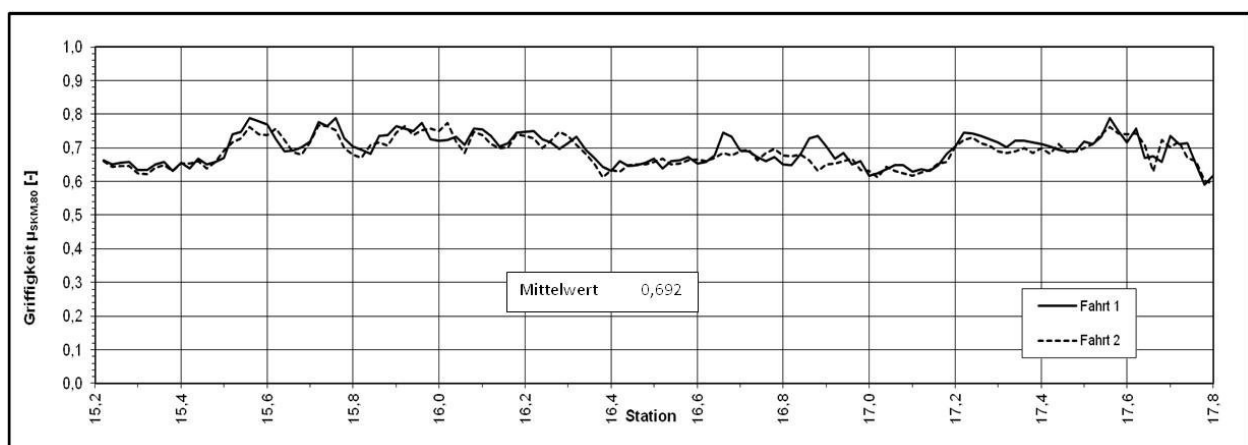
## Fahrbahnoberflächeneigenschaften

Zur Beurteilung der Oberflächeneigenschaften der Fahrbahnbeläge wurden die Griffigkeit, die Längs- und Querebenheit, die Geräuschemission und die Texturkenndaten erfasst. Die Ergebnisse für die Erprobungsstrecke BAB A 3 sind nachfolgend dargestellt.

### Griffigkeit

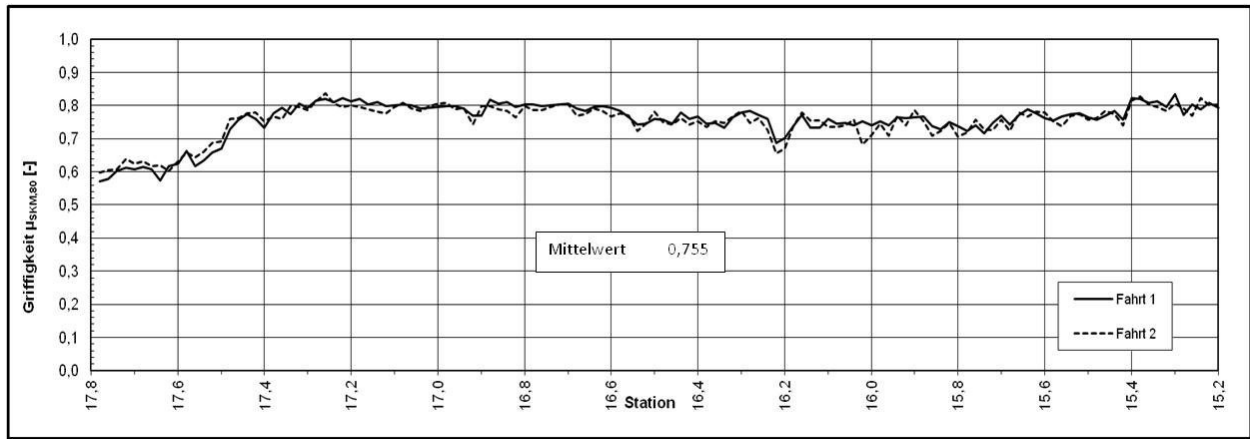
Nach Fertigstellung der Deckschicht wurden durch die BAST Griffigkeitsmessungen mit dem SKM-Verfahren gemäß TP Griff-StB [21] in Anlehnung an eine Bauvertragsmessung durchgeführt. Dabei sind jeweils Doppelmessungen vorgeschrieben, die eine Toleranz für Wiederholmessungen von  $\Delta\mu_{SKM} = \pm 0,015$  einhalten müssen.

Bild 5.3-60 zeigt den Griffigkeitsverlauf in Fahrtrichtung Süd (Frankfurt a.M.). Der Mittelwert  $\mu_{SKM(80)}$  liegt bei 0,692 und damit deutlich über dem geforderten Anforderungswert gemäß ZTV Asphalt-StB 07/13 von  $\mu_{SKM,80} = 0,46$ .



**Bild 5.3-60:** Griffigkeitsmessungen (SKM) BAB A 3 Fahrtrichtung Frankfurt

Bild 5.3-61 zeigt den Griffigkeitsverlauf in Fahrtrichtung Nord. Der Mittelwert  $\mu_{SKM,80}$  liegt mit 0,755 auch deutlich über dem o.g. Anforderungswert.

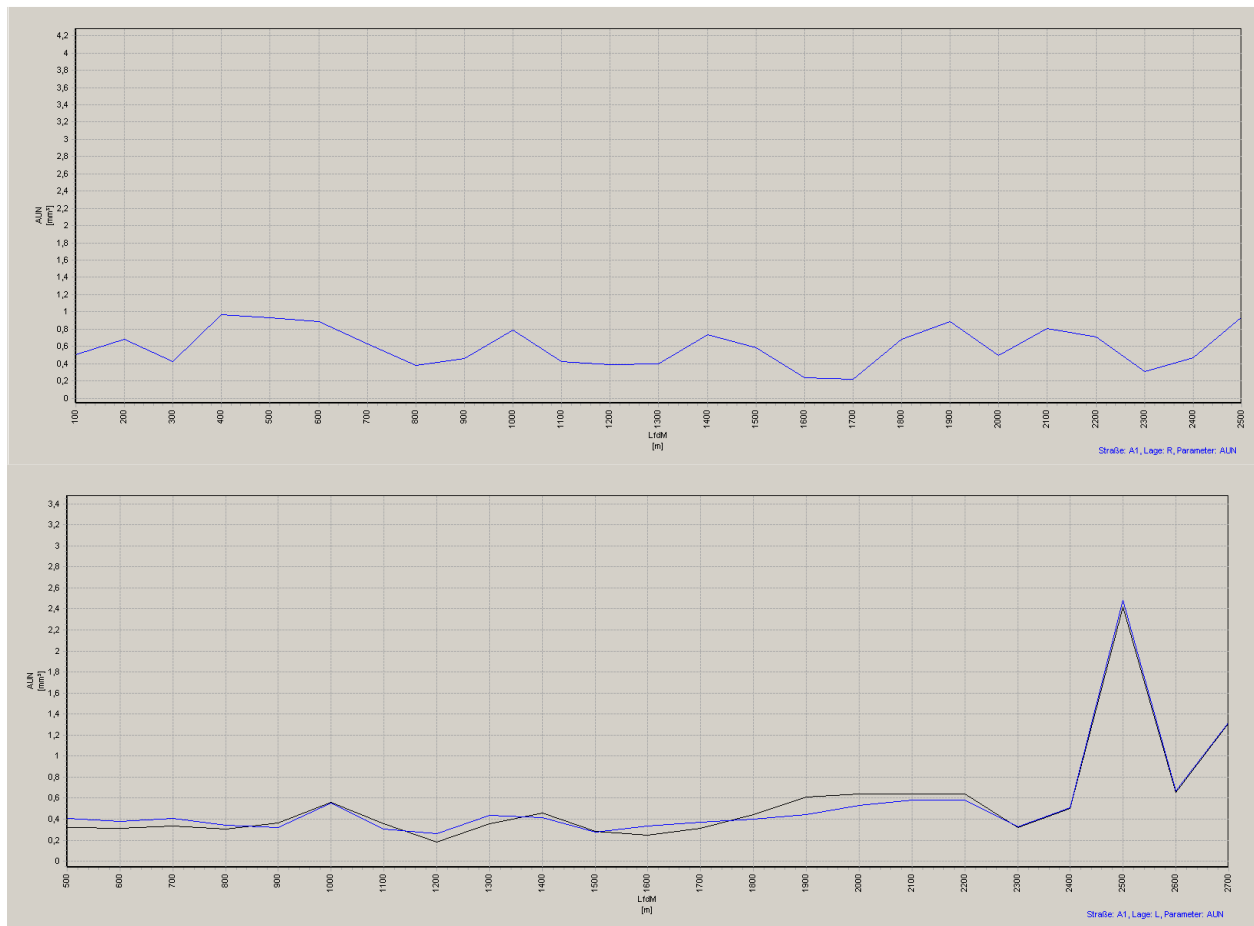


**Bild 5.3-61:** Griffigkeitsmessungen (SKM) BAB A 3 Fahrtrichtung Köln

Insgesamt sind die Griffigkeitswerte sehr hoch und liegen über dem Anforderungswert. Der Vergleich der Griffigkeitswerte zeigt, dass in Fahrtrichtung Köln mit dem verwendeten Basanit etwas höhere Griffigkeiten erzielt wurden.

### Längsebenheit

Zum gleichen Zeitpunkt wie die Griffigkeitsmessungen erfolgte auch die Erfassung der Längs- und Querunebenheiten mit der MEFA. Die Verläufe des Längsebenheitsmerkmals AUN sind in Bild 5.3-62 dargestellt.



**Bild 5.3-62** Längsebenheitsmerkmal AUN in Fahrtrichtung Frankfurt a.M. (oben) und in Fahrtrichtung Köln (unten)

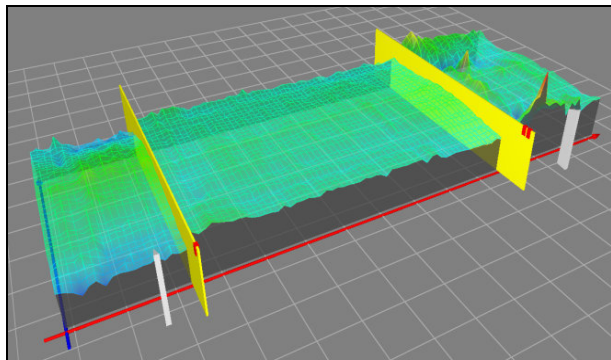
In beiden Fahrrichtungen liegt die Längsunebenheit in einem sehr guten Bereich. Bei einer Wertung nach der ZEB wurde für nahezu alle Abschnitte eine Note von 1,0 erreicht. Nur in der Fahrrichtung Köln ist ab dem laufenden Meter 2.000 eine sprunghafte Erhöhung des AUN zu sehen. Dies wurde durch einen Wechsel des Fahrbahnbelages ausgelöst.

Ein Jahr nach der Verkehrsfreigabe erfolgte nochmals die Erfassung der Längsebenheit. Erwartungsgemäß zeigt sich nach einem Jahr Verkehrsbelastung keine Veränderung in der Längsebenheit. Sie liegt fast ausschließlich in einem sehr guten Bereich und erfüllt somit die Erwartungen an eine neu gebaute Strecke die erst seit kurzem unter Verkehr liegt.

### Querebenheit

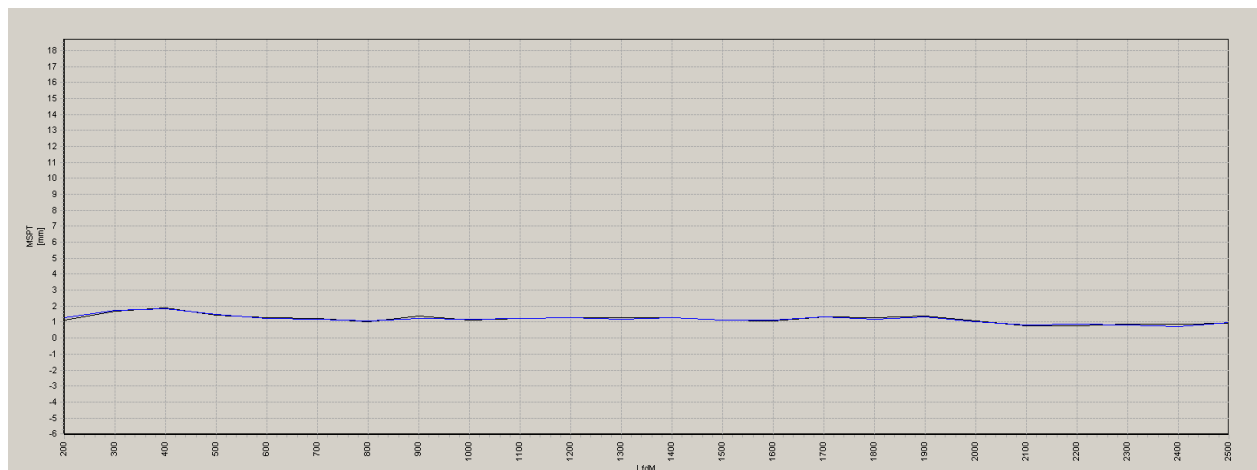
Mehrere erfasste Querprofile sind in einer dreidimensionalen Ansicht in Bild 5.3-63 dargestellt. Gut zu erkennen sind die Übergänge zwischen der neuen Asphaltdecke (zwischen den zwei gelben Markierungen) und den alten Fahrbahnbelägen (stärker verformt).

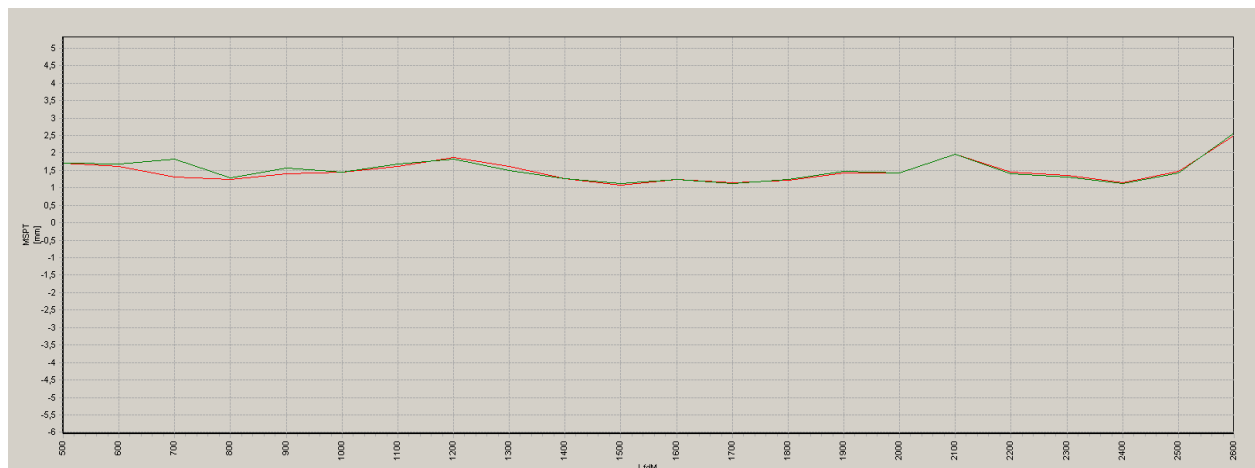
Die Entwicklung der Messtechnik ist in den letzten 3 bis 5 Jahren sehr rasant vorangeschritten. So wurde hinsichtlich der Bewertung der Straßenebenheit der Schritt von der zwei- in die dreidimensionale Abbildung der Straßenoberfläche mit schnell fahrenden Messsystemen ermöglicht. Ziel dieser neuen Erfassungstechnik ist es immer realere geometrische Abbildungen der Fahrbahnoberfläche zu ermöglichen.



**Bild 5.3-63:** Darstellung der dreidimensionalen Ebenheit Fahrtrichtung Köln

In den Diagrammen Bildes 5.3-64 sind die Verläufe des Querebenheitsmerkmals MSPT aufgeführt.





**Bild 5.3-64:** Querebenheitsmerkmal MSPT in Fahrtrichtung Düsseldorf (oben) und in Fahrtrichtung Köln (unten)

Auch die Querunebenheiten sind mit durchschnittlich 1,11 mm (Fahrtrichtung Frankfurt), bzw. 1,37 mm (Fahrtrichtung Köln) nur gering ausgeprägt. Bei einem Grenzwert von 4 mm in der ZEB fallen alle Abschnitte in den sehr guten Bereich des Zielwertes (1,5). Tabelle 5.3-32 enthält eine Zusammenfassung der Ebenheitskenngrößen des Bundesautobahnabschnittes auf der BAB A 3.

	AUN [cm <sup>3</sup> ]	MSPT [mm]	MSPH [mm]
Fahrtrichtung Frankfurt a.M.	0,69	1,11	0,00
Fahrtrichtung Köln	0,56	1,37	0,17

**Tab. 5.3-32:** Zusammenfassung der Ebenheitskennwerte BAB A 3

### Geräuschemission

Die Messfahrten zur Bewertung der akustischen Eigenschaften wurden auf der BAB A 3 im Juni 2014 mit dem CPX-Anhänger der BAST gemäß ISO/DIS 11819-2 bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Tabellen zusammengestellt.

	CPX P [dB(A)]	CPX H [dB(A)]	CPX I [dB(A)]
Fahrtrichtung Frankfurt a.M.	95,1	96,6	96,1
Fahrtrichtung Köln	95,2	96,6	96,2

**Tab. 5.3-33:** CPX-Messungen der Erprobungsstrecke BAB A 3

	S <sub>CPXP</sub> [dB(A)]	S <sub>CPXH</sub> [dB(A)]	S <sub>CPXI</sub> [dB(A)]
Fahrtrichtung Frankfurt a.M.	0,2	0,2	0,2
Fahrtrichtung Köln	0,2	0,3	0,3

**Tab. 5.3-34:** Standardabweichungen CPX-Messungen BAB A 3

Die ermittelten CPX-Pegel liegen beim Reifen P1 bei 95,1 dB(A) und beim Reifen H1 bei 96,1 dB(A). Die Standardabweichungen liegen bei 0,2 dB(A) bzw. 0,3 dB(A) und weisen auf eine gute Homogenität der Messstrecke hin.

Im Rahmen von BAST-internen Forschungsprojekten wurden in den letzten Jahren Fahrbahnbeläge aus Splittmastixasphalt (SMA) und Waschbetonoberflächen (WB) hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften



mittels SPB- und CPX-Messungen untersucht. Beide dichten Bauweisen gelten gemäß RLS 90 als lärmarm.

Für eine erste Beurteilung der erzielten Ergebnisse auf der BAB A 3 wurden die Erfahrungswerte der CPX-Messungen herangezogen. Der Mittelwert des CPX-Pegels aller Waschbetonstrecken und Fahrbahnbeläge aus Splittmastixasphalt liegt bei etwa 97,5 dB(A) für den Referenzreifen P1 (Pkw-Reifen).

Damit ergibt sich für diesen Reifen eine Pegelminderung im Nahfeld von etwa 2 dB(A) gegenüber den lärmarmen dichten Bauweisen SMA und WB. SPB-Messungen, die einen direkten Vergleich zu den  $D_{StO}$ -Werten gemäß RLS 90 zulassen, konnten aufgrund der örtlichen Randbedingungen nicht durchgeführt werden.

### Textur

Die Texturkenndaten wurden mit dem schnellfahrenden Textur-Laserprofilometer TMF erfasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3-35 dargestellt.

Fahrtrichtung	MPD [mm]	ETD [mm]	Amax [mm]	g [%]	gL [mm]
Frankfurt a.M. (km 18,0-15,0)	0,59	0,68	0,175	77,9	1236
Köln (km 15,0-18,0)	0,78	0,83	0,189	67,9	888

Tab. 5.3-35: Texturkenndaten der Erprobungsstrecke BAB A 3

Gemäß dem Arbeitspapier „Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken“ [5] liegen die mittlere Texturtiefe MPD und die geschätzte Texturtiefe ETD für Pkw im akustisch günstigen Bereich. Auch die ermittelten Werte für den Gestaltfaktor  $g$  sind als akustisch günstig zu bewerten. Die Gestaltlänge  $gL$  sollte gemäß Arbeitspapier im Bereich zwischen 400 mm und 700 mm liegen. Dies wurde auf dem Testabschnitt nicht erreicht.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Bau der Erprobungsstrecke auf der BAB A 3 erfolgreich verlaufen ist. Die Ergebnisse der Messungen der Fahrbahnoberflächeneigenschaften Griffigkeit und Ebenheit weisen sehr gute Werte auf und erfüllen die Anforderungen gemäß Regelwerk. Hinsichtlich der akustischen Eigenschaften zeigen die Messergebnisse eine um etwa 2 dB(A) reduzierte Lärminderung im Nahfeld im Vergleich zu den lärmarmen Bauweisen Splittmastixasphalt und Waschbeton. Die ermittelten Texturkenndaten weisen überwiegend Werte im akustisch günstigen Bereich gemäß dem Arbeitspapier „Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken“ [5] auf. Die Erprobungsstrecke wird im Langzeitmonitoring der BAST hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Fahrbahneigenschaften in den nächsten Jahren weiterhin untersucht.

### 5.3.5.3 Erprobungsstrecke BAB A 5 bei Friedberg

#### Beschreibung der Erprobungsstrecke

Die Baumaßnahme an der BAB A 5 umfasst eine Ertüchtigung des Standstreifens und die Erneuerung des ersten Fahrstreifens. Die Einbauarbeiten begannen im Mai 2013, der Einbau der PMA-Deckschicht erfolgte Anfang Juli 2013.

Der betrachtete Streckenabschnitt befindet sich zwischen der Anschlussstelle Ober-Mörlen und der Anschlussstelle Friedberg (Betriebskilometer 459,3 bis 470,1) in Fahrtrichtung Frankfurt a.M. Der Abschnitt weist in dieser Fahrtrichtung einen Anteil des Schwerverkehrs von 13,9 % (6720 Kfz/24 h) auf.

Eine Besonderheit bei diesem Bauvorhaben war, dass die grobe Gesteinskörnung 2/5 mm für die Herstellung des Asphaltmischgutes im Vorfeld gesondert aufbereitet wurde. Diese wurde vom Unterkorn bereinigt und in ausreichender Menge an zwei Asphaltmischanlagen bevorratet. So konnte sichergestellt werden, dass das Sedimentieren der Mörtelphase während des Einbaus vom Unterkorn nicht negativ beeinflusst wurde.

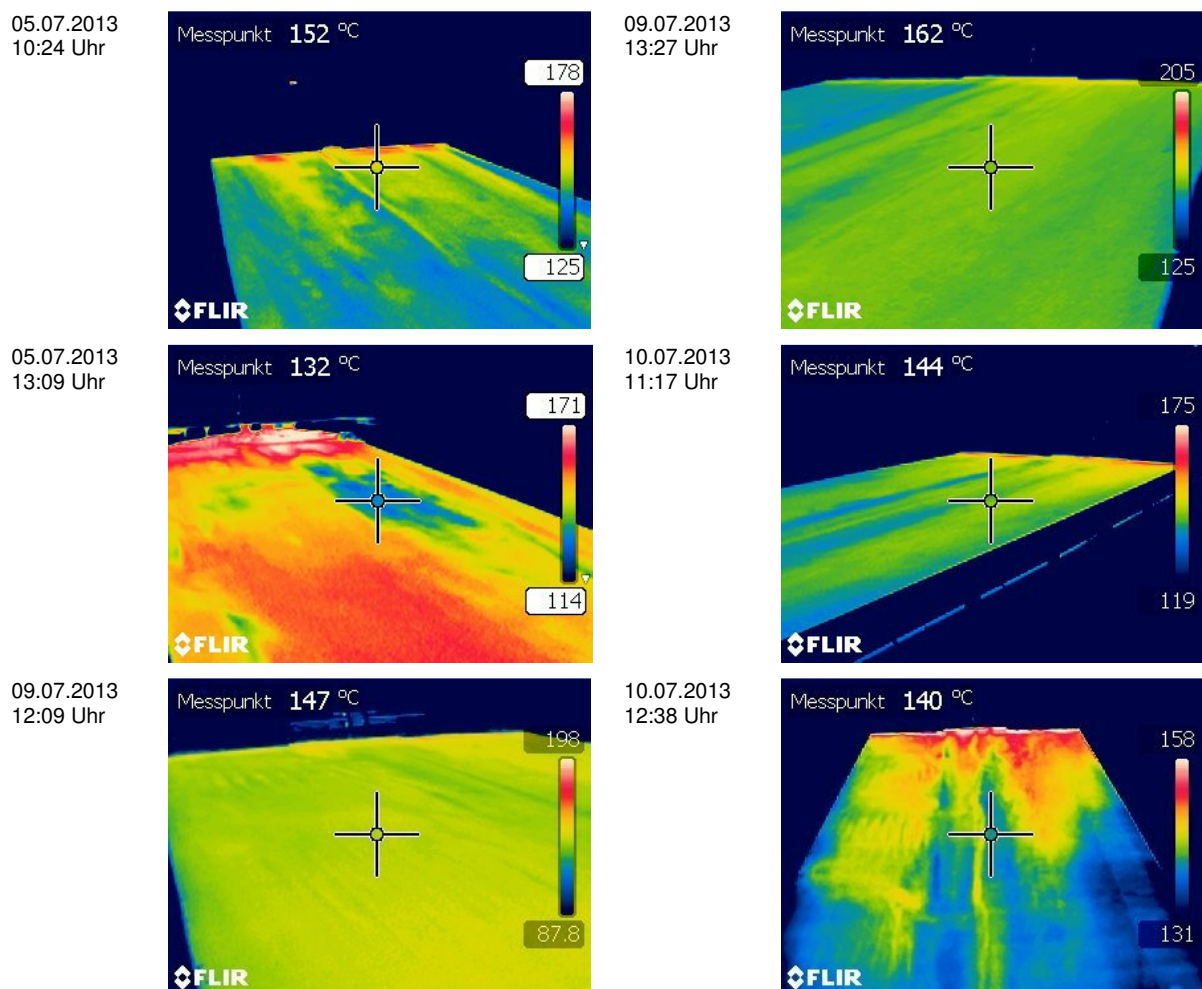
Um eine kontinuierliche Asphaltmischgutzufuhr zu gewährleisten und eine zusätzliche Homogenisierung des Asphaltmischgutes nach der Anlieferung auf der Baustelle zu erreichen, wurde ein Nachmisch-Beschicker eingesetzt. In Vorbereitung auf die Baumaßnahme wurden die Beteiligten der Erprobungsmaß-

nahme BAB A 5 mit den zum damaligen Zeitpunkt vorliegenden Erfahrungen mit der PMA Bauweise im Rahmen des Forschungsprojektes unterstützt.

### Asphaltuntersuchungen und Strukturanalyse

Der Einbau der PMA-Deckschicht erfolgte mit konventionellem Asphaltstraßenbaugerät. Zur Erzielung einer guten Oberflächenebenheit wurde eine leichte Glattmantelwalze eingesetzt, die keine Verdichtungsfunktion hatte. Zur Sicherstellung eines möglichst gleichmäßigen Mischguts (Temperatur, Zusammensetzung) wurde ein Nachmischbeschicker verwendet, der das Mischgut von den Transportfahrzeugen übernahm, in einer Nachmischeinheit homogenisierte und dem Straßenfertiger übergab.

Seitens der BAST und der Projektpartner erfolgte eine Begleitung des Einbaus. Mittels Wärmebildkamera wurden die Mischguttemperaturen während des Einbaus ermittelt. Die mittleren Mischguttemperaturen an der Fertigerbohle lagen zwischen 163 °C und 167 °C. Die Homogenität der Oberflächentemperatur wurde mit einer Thermographie-Kamera aufgezeichnet. Bild 5.3-68 zeigt einen Überblick. Einzelne Stellen wiesen Unterschiede von ca. 20 °C auf, die erfahrungsgemäß jedoch auch beim Einbau von normalem Walzasphalt auftreten. Beim Vergleich von Thermographie-Aufnahmen muss immer die am Bildrand angegebene Temperaturspanne berücksichtigt werden. Bei kleinen Spannen werden relativ kleine Temperaturunterschiede durch starke Farbunterschiede dargestellt.



**Bild 5.3-65:** Temperaturverteilung in °C beim Einbau der PMA-Deckschicht auf dem ersten Fahrstreifen der der BAB A 5 in Richtung Frankfurt im Juli 2013

Vom Projektpartner ZuB (Ingenieurgesellschaft für Zuschlag- und Baustofftechnologie mbH) wurden Asphaltuntersuchungen durchgeführt.

Die Ergebnisse der Eigenschaften der fertigen Schicht sind hinsichtlich des Hohlraumgehaltes und Verdichtungsgrades von PMA 5 der untersuchten Bohrkern in Tabelle 5.3-45 und 5.3-46 zusammenfassend dargestellt.

Bezeichnung	Rohdichte Mischgut [g/cm <sup>3</sup> ]	Raumdichte BK [g/cm <sup>3</sup> ]	Raumdichte MPK [g/cm <sup>3</sup> ]	Hohlraum-Gehalt [Vol.-%]	Verdichtungs-grad [%]
BK1	2,521	2,369	2,373	6,0	99,8
BK2		2,375		5,8	100,1
BK3		2,401		4,8	101,2
BK4		2,402		4,7	101,2
BK5	2,519	2,290	2,397	9,1	95,5
BK6		2,289		9,1	95,5
BK7		2,301		8,7	96,0
BK8		2,307		8,4	96,2
BK9	2,536	2,407	---	5,1	---
BK10	2,524	2,394	2,411	5,2	99,3
BK11		2,400		4,9	99,5
BK12	2,511	2,430	2,423	3,2	100,3
BK13		2,432		3,1	100,4
BK14	2,516	2,396	---	4,8	---

**Tab. 5.3-36:** Eigenschaften der fertigen Asphaltdeckschicht PMA 5 der untersuchten Bohrkern BK1 bis BK14 (BAB A5)  
--- = Es erfolgte keine Bestimmung, da ein Einzelbohrkern je Stelle vorliegt.

Bezeichnung	Rohdichte Mischgut [g/cm <sup>3</sup> ]	Raumdichte BK <sub>SSo</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	Raumdichte MPK [g/cm <sup>3</sup> ]	Hohlraum-Gehalt [Vol.-%]	Verdichtungs-grad [%]
BK1-1	2,526	2,337	2,361	7,5	99,0
BK1-2a		2,385		5,6	101,0
BK1-2b		2,393		5,3	101,4
BK1-3		2,345		7,2	99,3
BK2-1	2,509	2,409	2,426	4,0	99,3
BK2-2a		2,431		3,1	100,2
BK2-2b		2,432		3,1	100,2
BK2-3		2,376		5,3	97,9
BK3-1	2,512	2,316	2,402	7,8	96,4
BK3-2a		2,334		7,1	97,2
BK3-2b		2,342		6,8	97,5
BK3-3		2,347		6,6	97,7

**Tab. 37:** Eigenschaften der fertigen Asphaltdeckschicht PMA 5 der untersuchten Bohrkern BK1-1 bis BK3-3 (BAB A5)



**Bild 5.3-66:** Beschaffenheit der Asphaltdeckschicht PMA 5 des Bohrkerns BK1 (im Bild 41) bei einem Hohlraumgehalt von 6,0 Vol.-%



**Bild 5.3-67:** Beschaffenheit der Asphaltdeckschicht PMA 5 des Bohrkerns BK8 (im Bild 48) bei einem Hohlraumgehalt von 8,4 Vol.-%



**Bild 5.3-68:** Beschaffenheit der Asphaltdeckschicht PMA 5 des Bohrkerns BK11 (im Bild 51) bei einem Hohlraumgehalt von 4,9 Vol.-%



**Bild 5.3-69:** Beschaffenheit der Asphaltdeckschicht PMA 5 des Bohrkerns BK13 (im Bild 53) bei einem Hohlraumgehalt von 3,1 Vol.-%

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen der Asphaltmischgut- und Bohrkernproben des Demonstrators BAB A 5 können die wesentlichen Erkenntnisse wie folgt abgeleitet werden:

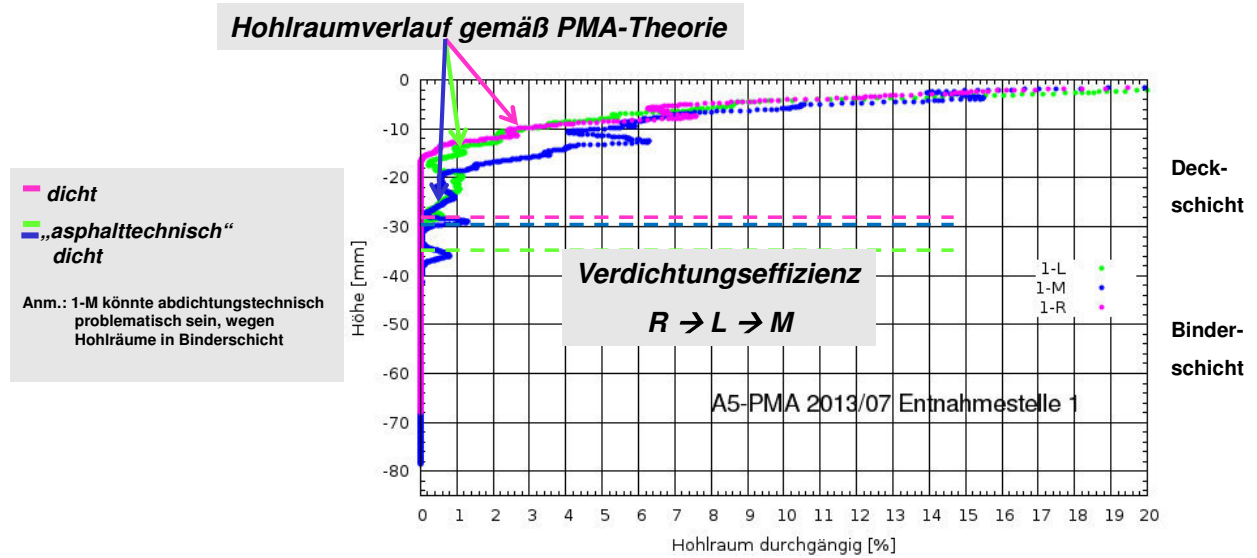
Die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes der Bohrkernproben weicht von den Vorgaben aus der Soll-Zusammensetzung des vorliegenden Eignungsnachweises bei der Korngrößenverteilung geringfügig ab. Diese Abweichungen können, wie auch bei den Untersuchungen des Demonstrators in Geilenkirchen, durch die Kornverfeinerung im Bereich der groben Gesteinskörnungen durch den Bohrvorgang und Trennschnitt in der Schichtgrenze erklärt werden. Da beim Asphaltmischgut mit dem Größtkorn von 5,6 mm nur eine Kornklasse 2/5 mm im Bereich der groben Gesteinskörnungen vertreten ist, erweist sich der Einfluss der Kornverfeinerung durch die Probenahme und Vorbereitung (Trennschnitt zwischen den Schichten) für die anschließende Beurteilung der Untersuchungsergebnisse als maßgebend. Deshalb sollten für die Untersuchungen der Asphaltmischgutzusammensetzung von PMA 5 ausschließlich Rückstellproben von Asphaltmischgut, die beim Einbau zu entnehmen sind, verwendet werden.

Die Zusammensetzung des Asphaltmischgutes wurde so konzipiert, dass der Bezugshohlraumgehalt am mod. MPK bei 5,5 Vol.-% liegt. Hiermit wird ein Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht im Bereich zwischen 4,5 Vol.-% und 7,5 Vol.-% bei einem anforderungsgerechten Verdichtungsgrad von min. 98,0 % angestrebt, der einerseits den lärmtechnischen Belangen gerecht wird und andererseits eine vertretbare Nutzungsdauer erzielt. Die Hohlraumgehalte der untersuchten Bohrkernproben, die an unterschiedlichen Stellen der durchgeführten Baumaßnahme entnommen wurden, weisen Ergebnisse zwischen 3,1 Vol.-% und 7,8 Vol.-% auf. Die Hohlraumgehalte im Bereich von 7 Vol.-% gehören zu den Bohrkernen, die eine Unterschreitung des Mindestverdichtungsgrades von 98,0 % aufweisen. Die vorliegenden Ergebnisse der Baumaßnahme BAB A 5 zeigen, dass die relativ hohen Hohlraumgehalte in der fertigen Schicht bei einer optimierten Zusammensetzung des Asphaltmischgutes im Wesentlichen durch eine unzureichende Verdichtung herbeigeführt werden. Somit verdeutlichen die Ergebnisse, dass es sich beim Asphaltmischgut PMA 5 nicht um ein „selbstverdichtendes“ Asphaltmischgut handelt, sondern um ein Asphaltmischgut, welches im Vergleich zum konventionellen Walzasphalt eine besondere Anpassung der Verdichtungsleistung erfordert. Des Weiteren zeigen die ermittelten Untersuchungsergebnisse, dass ab dem anforderungsgerechten Mindestverdichtungsgrad von 98,0 % ein Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht auf einem Niveau von 5 Vol.-% erzielt werden kann, bei dem von einer angemessenen Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht PMA 5 ausgegangen werden kann.

Für die Gleichmäßigkeit der Oberfläche von PMA und einen Hohlraumgehalt mit möglichst geringen Schwankungen sowie eine lärmtechnisch günstige Hohlraumverteilung im Asphaltgefüge scheint es zwingend erforderlich zu sein, die groben Gesteinskörnungen vor dem Mischprozess der Asphaltmischanlage im Vorfeld in ausreichenden Mengen aufzubereiten und dabei das Unterkorn (Körner < 2 mm) möglichst umfassend abzusieben. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass im Gesteinskörnungsgemisch die Korngröße zwischen 1 und 2 mm weitgehend ausfällt (s.g. Ausfallkorn). Bei der Verwendung von Natursand 0/1 mm (ohne Überkorn) wird das zügige Sedimentieren der Mörtelphase in der Einbaubahn nach dem Fertiger vor der Walzverdichtung positiv beeinflusst.

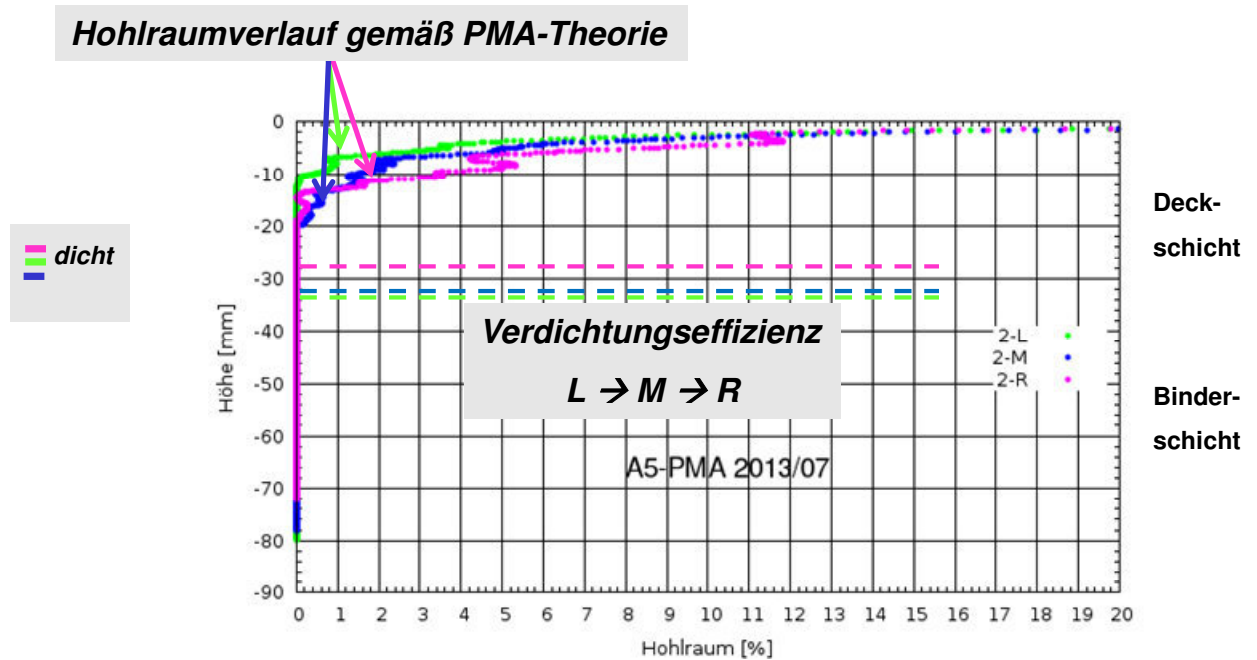
Um Aussagen zur Hohlraumverteilung über den Probenquerschnitt machen zu können, wurden analog zu dem Vorgehen auf der BAB A 553 Bohrkernproben entnommen und mittels CT-Analyse von der BAM untersucht. Dabei wurden an drei Entnahmestationen jeweils drei Bohrkernproben im ersten Fahrstreifen entnommen. Die Bohrkernproben erhielten die Kennzeichnung „L“ (Links), „M“ (Mitte) und „R“ (Rechts). Die wichtigsten Ergebnisse sind nachfolgend zusammenfassend dargestellt.

Die Bilder 5.3-70 bis 5.3-72 zeigen die Hohlraumverteilungen der entnommenen Bohrkernproben je Entnahmestation. Insgesamt zeigt sich an allen Entnahmestationen ein sehr ähnliches Bild. Alle Proben weisen eine gute Hohlraumverteilung über den Querschnitt auf. Auch quer der Fahrbahn zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede in Abhängigkeit von der Entnahmeposition.



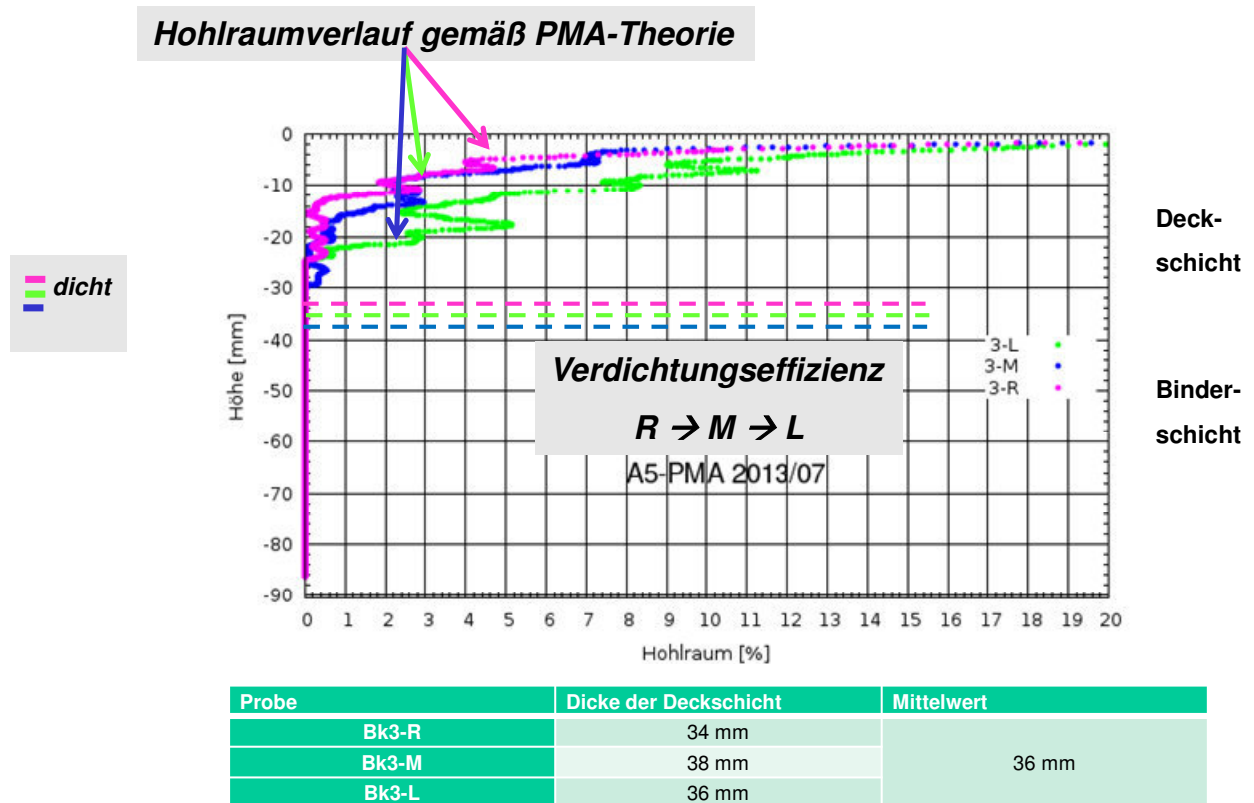
Probe	Dicke der Deckschicht	Mittelwert
Bk1-R	28 mm	31 mm
Bk1-M	30 mm	
Bk1-L	35 mm	

Bild 5.3-70: Lokale Hohlraumverteilung der Messproben MQ 1 (Quelle: BAM)



Probe	Dicke der Deckschicht	Mittelwert
Bk2-R	28 mm	31 mm
Bk2-M	32 mm	
Bk2-L	33 mm	

Bild 5.3-71: Lokale Hohlraumverteilung der Messproben MQ 2 (Quelle: BAM)



**Bild 5.3-72:** Lokale Hohlraumverteilung der Messproben MQ 3 (Quelle: BAM)

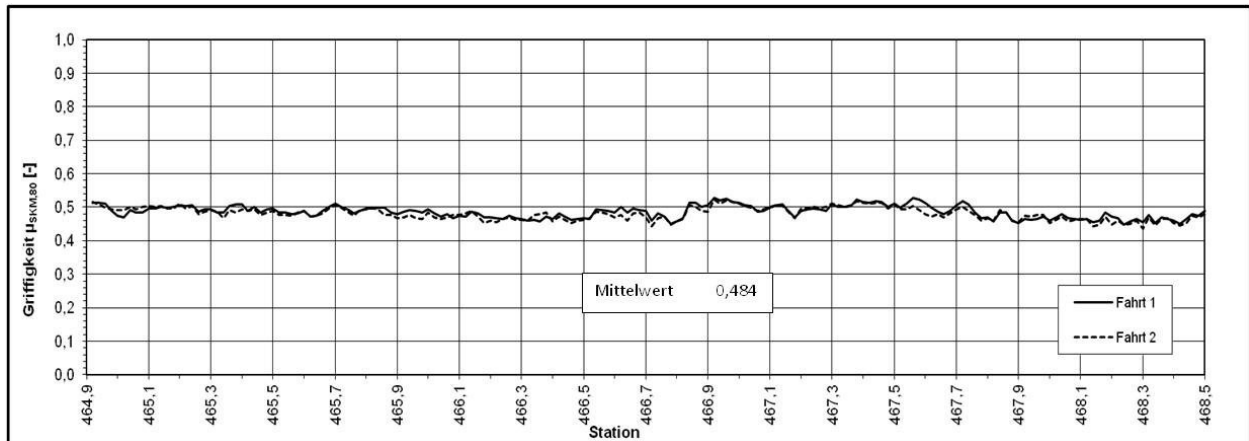
Aus den CT-Untersuchungen zur Dichteverteilung wird ersichtlich, dass die Hohlraumverteilung über die Probenhöhe aller untersuchten Proben einen Hohlraumverlauf aufweisen, der den ursprünglichen theoretischen Vorstellungen von der Wirkungsweise von PMA bzw. der Erwartungshaltung/Vorstellung für derartiges Asphaltmaterial sehr gut entspricht. Im oberflächennahen Bereich sind durchgängige, nach außen kommunizierende Hohlräume nachgewiesen. Im unteren Bereich der Deckschicht ist bei nahezu allen Messproben von gussasphaltähnlicher Dichtigkeit auszugehen.

### Erfassung und Bewertung der Fahrbahnoberflächeneigenschaften

Zur Beurteilung der Oberflächeneigenschaften wurden die Griffigkeit, die Längs- und Querebenheit, die Geräuschemission und die Texturkenndaten ermittelt. Die Ergebnisse für die Erprobungsstrecke BAB A 5 sind nachfolgend dargestellt.

#### Griffigkeit

In 2014 erfolgten die Griffigkeitsmessungen mit dem SKM-Verfahren etwa ein Jahr nach Verkehrsfreigabe. Es wurde eine Doppelmessung analog einer Bauvertragsmessungen gemäß TP Griff-StB (SKM) durchgeführt. Der Griffigkeitsverlauf ist in Bild 5.3-73 dargestellt.



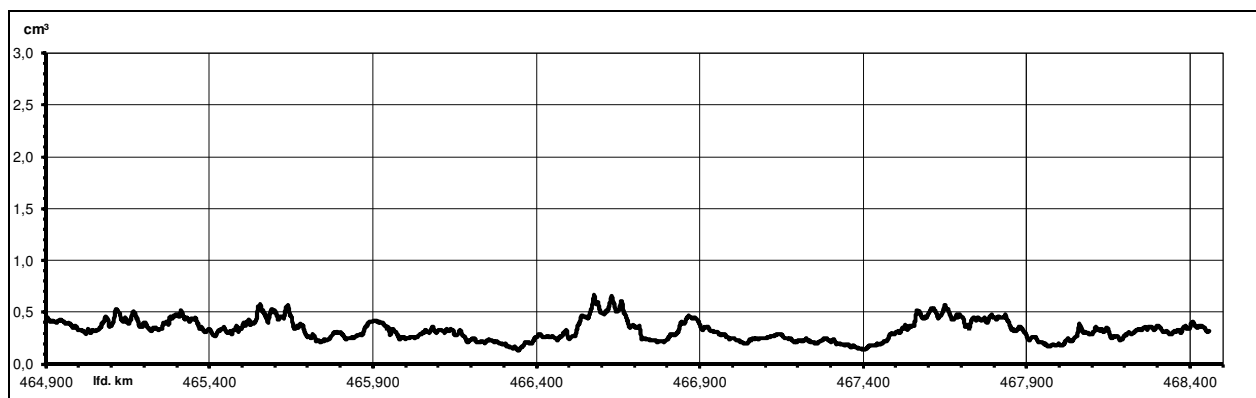
**Bild 5.3-73:** Griffigkeitsmessungen auf der BAB A 5 bei Messgeschwindigkeit 80 km/h

Der Mittelwert  $\mu_{SKM(80)}$  von 0,484 liegt über dem geforderten Anforderungswert in der ZTV Asphalt-StB 07/13 von  $\mu_{SKM,80} = 0,46$  bei der Bauabnahme. Insgesamt zeigt sich ein sehr homogener Griffigkeitsverlauf über den gesamten Abschnitt von etwa 11 km Länge.

Im Vergleich zu anderen PMA-Strecken liegt die Griffigkeit auf dieser Erprobungsstrecke etwas niedriger. Dies könnte mit der Absiebung des Unterkorns (< 2 mm) der groben Gesteinskörnung im Vorfeld der Asphaltherstellung zusammenhängen.

#### Längs- und Querebenheit

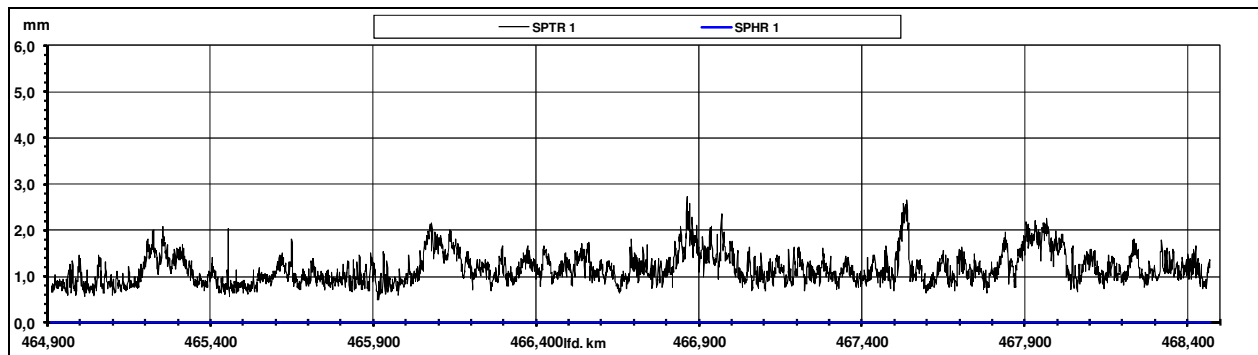
Die Längsebenheit auf der BAB A 5 in Fahrtrichtung Friedberg ist mit einem AUN von  $0,33 \text{ cm}^3$  als sehr gut zu bewerten. Bei einer Wertung nach der Systematik der ZEB erreichen alle Abschnitte eine Note von 1,0. Die Erwartungen an eine neu gebaute Strecke, die erst seit kurzem unter Verkehr liegt, werden somit in hohem Maße erfüllt (Bild 5.3-74).



**Bild 5.4-74:** Verlauf der Längsebenheit auf der BAB A 5

Bild 5.3-75 zeigt exemplarisch die Verläufe des Querebenheitsmerkmals SPT und SPH für die rechte Rollspur. In allen Abschnitten liegt die Spurrinntiefe unter 4 mm sowie die fiktive Wassertiefe bei 0 mm. Dies entspricht bei einer Beurteilung nach der ZEB einer Zustandsnote von 1,0.





**Bild. 5.3-75:** Verlauf der Querebenheit auf der BAB A 5

Tabelle 5.3-38 enthält eine Zusammenfassung der Ebenheitskenngrößen des Erprobungsabschnittes auf der BAB A 5, der in PMA ausgeführt wurde.

	Kilometrierung	AUN [cm <sup>3</sup> ]	MSPT [mm]	MSPH [mm]
Fahrtrichtung Friedberg	464,9 - 468,5	0,33	1,96	0,00

**Tab. 5.3-38:** Zusammenfassung der Ebenheitskennwerte BAB A 5

### Geräuschemission

Die Messfahrten zur Bewertung der akustischen Eigenschaften wurden auf der BAB A 5 im März 2014 mit dem CPX-Anhänger der BAST gemäß ISO/DIS 11819-2 bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h durchgeführt [11].

Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

	CPX-P [dB(A)]	CPX-H [dB(A)]	CPX-I [dB(A)]
Fahrtrichtung Frankfurt a.M.	94,8	96,0	95,4

**Tab. 5.3-39:** CPX-Messungen der Erprobungsstrecke BAB A 5

	S <sub>CPXP</sub> [dB(A)]	S <sub>CPXH</sub> [dB(A)]	S <sub>CPXI</sub> [dB(A)]
Fahrtrichtung Frankfurt a.M.	0,2	0,3	0,2

**Tab. 5.3-40:** Standardabweichungen CPX-Messungen BAB A 5

Die ermittelten CPX-Pegel liegen beim Reifen P1 (CPXP- Wert) bei 94,8 dB(A) und beim Reifen H1 bei 96,0 dB(A). Die Standardabweichungen liegen bei 0,2 dB(A) bzw. 0,3 dB(A) und weisen ebenfalls auf eine gute Homogenität der Messstrecke hin.

Unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten aus vorangegangenen CPX-Messungen auf lärmarmen Waschbetonstrecken und Fahrbahnbelägen aus Splittmastixasphalt zeigen die erzielten CPX-Pegel auf der BAB A 5 für den Reifen P1 eine Pegelminderung von etwa 2,5 dB(A) gegenüber den lärmarmen dichten Bauweisen SMA und WB.

SPB-Messungen, die einen direkten Vergleich zu den D<sub>Stro</sub>-Werten gemäß RLS 90 zulassen, konnten aufgrund der örtlichen Randbedingungen nicht durchgeführt werden.

### Textur

Die Texturkenndaten wurden mit dem schnellfahrenden Textur-Laserprofilometer TMF erfasst. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.3-41 dargestellt.

Fahrtrichtung	MPD [mm]	ETD [mm]	Amax [mm]	g [%]	gL [mm]
Fahrtrichtung Frankfurt a.M.	0,69	0,75	0,136	-	-

**Tab. 5.3-41:** Texturkenndaten der Erprobungsstrecke BAB A 5

Gemäß dem Arbeitspapier „Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken“ [15] liegen die mittlere Texturtiefe MPD und die geschätzte Texturtiefe ETD für einen PKW im akustisch günstigen Bereich (0,4 mm bis 0,8 mm). Dies gilt auch für die Gestaltlänge  $gL$  (400 mm bis 700 mm). Der Gestaltfaktor  $g$  konnte vom Auswerteprogramm nicht kalkuliert werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Bau der Erprobungsstrecke auf der BAB A 5 erfolgreich verlaufen ist. Die Ergebnisse der Messungen der Gebrauchseigenschaften Griffigkeit und Ebenheit weisen gute Werte auf und erfüllen die Anforderungen gemäß Regelwerk. Hinsichtlich der akustischen Eigenschaften zeigen die Messergebnisse eine um etwa 2,5 dB(A) reduzierte Lärminderung im Vergleich zu den lärmarmen dichten Bauweisen Splittmastixasphalt und Waschbeton. Die ermittelten Texturkenndaten weisen Werte im akustisch günstigen Bereich auf. Die Erprobungsstrecke wird im Langzeitmonitoring der BASt hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung der Fahrbahneigenschaften in den nächsten Jahren weiterhin untersucht.

#### 5.3.5.4 Erprobungsstrecke LOA 5 D in Düren (innerorts)

##### **Beschreibung der Erprobungsstrecke**

Im Mai 2013 erfolgte der Bau einer Erprobungsstrecke auf der K 30, Ortsdurchfahrt Winden-Kreuzau im Kreis Düren. Aufgrund der hohen Lärmbelastung an der Ortsdurchfahrt sollte ein LOA 5 D als lärmarme Deckschicht eingebaut werden. Die Ortsdurchfahrt Winden wurde voll gesperrt, so dass der Einbau der Deckschicht nahtlos erfolgen konnte.

##### **Asphaltuntersuchungen**

Die Ergebnisse in Geilenkirchen zeigten bei allen LOA-Varianten Hohlraumgehalte zwischen 8 Vol.-% und 12 Vol.-%. Die dazugehörigen Verdichtungsgrade lagen mit 92 % bis 95 % weit unter den geforderten 98 % gemäß Regelwerk. Aus diesem Grund wurde erneut eine Mischgutoptimierung hinsichtlich der Bindemittelkonzipierung und der Zusammensetzung der feinen Gesteinskörnung im Labor vorgenommen. Dabei hat sich gezeigt, dass bei der Verwendung einer feinen Gesteinskörnung mit einem Fließkoeffizienten  $< 30$  eine Verringerung des maximalen Hohlraumgehaltes um 2 Vol.-% erreicht wird. Durch die Verwendung von Natursand mit einem deutlich geringeren Fließkoeffizienten konnte eine Reduzierung des Hohlraumgehaltes um bis zu 4,9 Vol.-% erreicht werden.



**Bild 5.3-76:** Bau der Erprobungsstrecke LOA 5 D in Düren

Die Deckschicht wurde mit einer angestrebten Dicke von 2 cm eingebaut (Bild 5.3-76). Besonderes Augenmerk wurde auf die Verdichtung gelegt. Bereits in der Bauvorbereitung wurde der Walzeneinsatz genau geplant. Ziel war es, ohne Vibration verdichten zu können. Insgesamt kamen drei schwere Walzentypen.

Durch die Ruhr-Universität Bochum wurden Mischgutproben vor Ort entnommen und nach Fertigstellung der Deckschicht Bohrkerne gezogen. Diese wurden anschließend hinsichtlich ihrer Materialkennwerte im Labor untersucht. Die Ergebnisse sind im Bericht zum Teilvorhaben VII aufgeführt.

Insgesamt wurden 12 Bohrkerne an zwei Stationen entnommen. Je Station wurden jeweils 3 Bohrkerne links (L1 bis L3) und rechts (R1 bis R2) der Fahrbahn entnommen, um Aussagen zum jeweiligen Verdichtungsgrad, aber auch zur Homogenität über den Streckenabschnitt machen zu können.

In Tabelle 5.3-42 sind die Ergebnisse der Ruhr-Universität Bochum (Hohlraumgehalte und Verdichtungsgrade) aller Bohrkerne aufgeführt.

BK-Nr.	Hohlraumgehalt	Verdichtungsgrad
	[Vol.-%]	[%]
BK 140L1	4,8	100,3
BK 140L2	5,9	99,1
BK 140L3	5,1	100,0
BK 140R1	3,6	101,6
BK 140R2	3,8	101,3
BK 140R3	3,6	101,6
BK 149L1	5,5	99,5
BK 149L2	5,8	99,2
BK 149L3	5,8	99,2
BK 149R1	5,5	99,5
BK 149R2	5,6	99,4
BK 149R3	6,2	98,8

**Tab. 5.3-42:** Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verwendung von Natursand als feine Gesteinskörnung sehr gute Verdichtungsgrade erreicht werden können. Im Mittel liegt der Verdichtungsgrad bei 100 %. Bei allen Bohrkernen liegt er über den gemäß im Regelwerk geforderten 98 %.

Die ermittelten Hohlraumgehalte schwanken um 5,0 Vol.-% und weisen somit nur geringe Schwankungen auf. Die vergleichsweise hohen Hohlraumgehalte zwischen 5,5 Vol.-% und 6,2 Vol.-% bei Station 149 sind als unproblematisch zu betrachten, da die erzielten Verdichtungsgrade nahe 100 % liegen und somit keine Nachverdichtung zu erwarten ist. Möglicherweise sind Unregelmäßigkeiten in der Unterlage (gefräste Fläche) eine Ursache dieser Abweichungen.

Aufgrund der Länge des Streckenabschnittes waren Messungen mit schnellfahrenden Messsystemen zur Erfassung der Griffigkeit, Ebenheit und Geräuschemission nicht möglich.

### 5.3.6 Zusammenfassung

Das Teilvorhaben VI II befasste sich mit der Optimierung der lärmtechnischen und bautechnischen Wirksamkeit der dichten Asphaltbeläge PMA und LOA 5 D. Da der Straßenverkehrslärm die größte Lärmbelastung in der Bundesrepublik Deutschland darstellt, erhalten die beiden Asphaltdeckschichten einen immer größer werdenden Stellenwert bei Neubau- und Sanierungsmaßnahmen.

Bei der Deckschicht LOA 5 D stand die bessere Verdichtbarkeit des Asphaltmischgutes im Focus der Entwicklungen. Eine Verbesserung der Verdichtbarkeit durch die Verwendung feiner Gesteinskörnung mit  $E_{CS} < 30s$  konnte bei den Demonstratoren in Geilenkirchen aufgrund einer unzureichenden Bauausführung nicht eindeutig nachgewiesen werden. Tendenziell weisen die optimierten Varianten einen höheren Verdichtungsgrad und geringere Hohlraumgehalte auf. Der Demonstrator in Düren zeigt hingegen deutlich eine Verbesserung des Verdichtungsverhaltens. Bei allen untersuchten Bohrkernen wurden Verdichtungsgrade über 98 % erreicht, im Mittel liegt der Verdichtungsgrad bei 100 %. Maßgeblichen Einfluss auf die Lagerungsdichte des Gesteinskörnungsgemischs hat die feine Gesteinskörnung.

Beim PMA wurde neben der Herstellung von modifizierten Marshall-Probekörpern, ein Laborverfahren entwickelt, mit dem der Absinkprozess des Mörtels im Labor einfach und schnell bewertet werden kann.

Die Ergebnisse der Mischgut- und Bohrkernuntersuchungen der Baumaßnahme BAB A 5 zeigen, dass die relativ hohen Hohlraumgehalte in der fertigen Schicht bei einer optimierten Zusammensetzung des Asphaltmischgutes im Wesentlichen durch eine unzureichende Verdichtung herbeigeführt werden. Somit verdeutlichen die Ergebnisse, dass es sich beim Asphaltmischgut PMA 5 nicht um ein „selbstverdichtendes“ Asphaltmischgut handelt, sondern um ein Asphaltmischgut, welches im Vergleich zum konventionellen Walzasphalt eine besondere Anpassung der Verdichtungsleistung erfordert. Des Weiteren zeigen die ermittelten Untersuchungsergebnisse, dass ab dem anforderungsgerechten Mindestverdichtungsgrad von 98,0 % ein Hohlraumgehalt in der fertigen Schicht auf einem Niveau von 5 Vol.-% erzielt werden kann. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für eine lange Nutzungsdauer der Asphaltdeckschicht. Die Strukturaufklärung zeigt, dass in situ Unterschiede in der Hohlraumverteilung durch verschiedene Bindemittelkonzepte aber auch Unterschiede entlang der Fertigerbohle festzustellen sind. Ein gutes Einbauergebnis mit hoher Prozesssicherheit kann durch das Absieben des Unterkorns aus der groben Gesteinskörnung 2/5 mm erzielt werden, da hierdurch ein besseres Sedimentieren des Mörtels gewährleistet werden kann. Für die Untersuchungen zum Einfluss der Asphaltmischgutzusammensetzung auf die Hohlraumverteilung hat sich die innovative Strukturanalyse der BAM-Methode bewährt, mit ihrer Hilfe kann der Zusammenhang zwischen Einbautechnik, Asphaltmischgutzusammensetzung und u.a. Hohlraumverteilung detailliert analysiert werden.

Insgesamt konnte im Rahmen der PMA Erprobung festgestellt werden, dass durch eine relativ geringfügige labortechnische Optimierung der Mörtelphase ein stabiles Absinken des Mörtels während des Einbauprozesses sichergestellt werden kann. Darüber hinaus zeigte sich, dass für die Herstellung homogener PMA-Oberflächen die Mischguttemperaturen, die Einstellungen am Fertiger und das Walzenschema sehr wichtige Faktoren sind.

Hinsichtlich der Untersuchungen der akustischen Wirksamkeit zeigen die Ergebnisse auf den Testflächen der NATO Airbase, dass die Vorbeifahrtpegel der beiden PMA-Testfelder systematisch etwas höher liegen als die der LOA-Testfelder, wogegen die mittlere Geschwindigkeitsabhängigkeit der Vorbeifahrtpegel mit einem Geschwindigkeitsexponenten von 3,0 bis 3,2 vergleichbar ist. Dieses Ergebnis bestätigt die Analyse der Texturmessungen. Beide PMA-Testfelder weisen im Vergleich zu den LOA-Testfeldern - bei gleichem Größtkorn - höhere Rauigkeitstiefen auf. Die Rauigkeitstiefe ist in diesem Fall auch die einzige Größe, die deutliche Unterschiede aufweist, wogegen die übrigen Oberflächenmerkmale wie Gestaltfaktor und Schallabsorptionsgrad vergleichbare Werte aufweisen. Aufgrund der fehlenden zugänglichen Hohlräume und der vergleichbaren Texturgestalt hängt der, gegenüber den LOA-Testfeldern, bei den PMA-Testfeldern festgestellte niedrigere Strömungswiderstand unmittelbar mit der größeren Rauigkeitstiefe zusammen. Der Reifen-Fahrbahn-Kontakt ist durch die größere Rauigkeitstiefe auch besser entlüftet, was im Falle rein textur-induzierter Strömung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt die Anregung strömungsinduzierter Geräusche (air pumping) begünstigt und dieser Anteil am Reifen-Fahrbahn-Geräusch im Pegel zunimmt. Dies gilt insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten. Bei niedrigen Geschwindigkeiten spielt die mechanische Anregung der Reifen durch die rauere Oberfläche die entscheidende Rolle.

Insgesamt zeigten in der Bewertung der akustischen Eigenschaften alle PMA- und LOA 5 D-Varianten sehr gute Pegelminderungspotenziale im Nahfeld.

Die Erprobungsstrecken wurden durch die BAST und die Projektpartner begleitet und bewertet. Nach der Fertigstellung der Deckschichten wurde auf allen Bundesautobahnen die Griffigkeit mit dem SKM-Verfahren gemäß TP-Griff-StB [21] ermittelt. Die Griffigkeit einer Straßenoberfläche übt einen großen Einfluss auf die Verkehrssicherheit bei Nässe aus. Im Technischen Regelwerk ist deshalb für die Griffigkeit einer Fahrbahndeckschicht zum Zeitpunkt der Abnahme ein Grenzwert von  $\mu_{SKM,80} = 0,46$  festgelegt. Dieser Anforderungswert wurde auf allen Strecken erfüllt.

Neben der Griffigkeit ist die Ebenheit der Straße eine wichtige Oberflächeneigenschaft. Die Ebenheit bestimmt den Fahrkomfort und beeinflusst die Verkehrssicherheit sowie die Straßenbeanspruchung der gesamten Oberbaukonstruktion. Die Messungen der Längs- und Querebenheit erfolgten auf allen Erprobungsstrecken nach der TP Eben – Berührungslose Messungen [19]. Alle Erprobungsstrecken zeigten sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung sehr gute Ebenheiten.

Das Reifen-Fahrbahn-Geräusch des neuen Fahrbahnbelages wurde mit dem CPX-Verfahren (Nahfeldmethode) gemäß ISO/CD 11819-2 [14] ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass im Vergleich zu Asphaltdeckschichten aus Splittmastixasphalt und Gussasphalt nach ZTV Asphalt-StB [22] geringere CPX-Pegel erreicht wurden.

Insgesamt wurden zahlreiche Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen, die u. a. Eingang in das FGSV-Arbeitspapier „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeck-

schichten aus AC D LOA und SMA LA gefunden haben. Derzeit wird an einem Arbeitspapier für die Ausführung von Asphaltdeckschichten aus PMA gearbeitet. Auch hier konnten im Rahmen des Projektes wichtige Erkenntnisse gewonnen werden, die in der Erarbeitung dieser Unterlagen berücksichtigt werden. Das Langzeitmonitoring der Erprobungsstrecken wird zukünftig wichtige Erkenntnisse zur Dauerhaftigkeit und akustischen Lebensdauer der neu konzipierten Asphalte liefern.

## Literatur

- [1] BECKENBAUER, T., KROPP, W.: „Typisierung von Reifen und Fahrbahnbelägen“. Tagungsband DAGA 2010, Paper Nr. 392, Deutsche Gesellschaft für Akustik DEGA, Berlin, 2010.
- [2] BECKENBAUER, T., et al.: „Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 847, August 2002
- [3] FGSV-Arbeitspapier Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten AC D LOA und SMA LA, FGSV-Verlag, 2014
- [4] FGSV-Arbeitspapier PMA, Entwurf der Bearbeitergruppe aus AK 7.3.2 Gussasphalt, Stand 2011/2012
- [5] FGSV-Arbeitspapier Textureinfluss auf die akustischen Eigenschaften von Fahrbahndecken FGSV-Verlag, 2013
- [6] GÄRTNER, K.; HARTMANN, B.; GRAF, K.; RADENBERG, M.; RIPKE, O.: „Möglichkeiten und Grenzen lärmarmer Asphaltdeckschichten in bebauten Gebieten“ Straßen und Autobahn 62 (2011), Heft 4
- [7] RADENBERG, M. und SANDER, R.: „Lärmtechnisch optimiert - Asphaltdeckschichten für den kommunalen Straßenbau, ASPHALT, Heft 8/2007, Giesel Verlag GmbH
- [8] RADENBERG, M., NYTUS, N.: „Schalltechnische Optimierung dichter Asphaltbeläge und Erhöhung der bautechnischen Nutzungsdauer (FE 07.0248/2011/HRB) im Auftrag des Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014
- [9] RENKEN, P.: „Verdichtbarkeit von Asphaltbetongemischen und ihr Einfluss auf die Standfestigkeit. Schriftenreihe des Instituts für Straßenwesen, Technische Universität Braunschweig, Heft 3, Braunschweig 1980
- [10] SIVAPATHAM, P.: „Einfluss des Verdichtungsgrades auf das Gebrauchsverhalten von Asphaltstraßen – Gebrauchsverhaltensorientierte Vergütungsmethode. Schriftenreihe des Fachzentrums Verkehr, Bergische Universität Wuppertal, Heft 11, Shaker Verlag, Aachen, 2012
- [11] ZÖLLER, M.: „Leiser Straßenverkehr 3 - CPX-Messungen auf den Erprobungsstrecken BAB A5, A553, BAB A3, Messbericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2014

Der Schlussbericht zum vorliegenden Teilvorhaben VI-II (Förderkennzeichen 19U10016 A, 19U10016 C, 19U10016 J und 19U10016 K) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.

## 5.4 Teilvorhaben VI-III

### Reduzierung der Reifen-/Fahrbahngeräusche durch Dämpfung des durch den Verkehr induzierten Körperschalls mit Hilfe einer elastischen Dämpfungsschicht

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer  
Müller-BBM GmbH, Planegg

Prof. Dr.-Ing. Martin Radenberg, Dipl.-Ing. Ricarda Manke  
Ruhr-Universität Bochum

Dipl.-Ing. Rainer Pöppel, Dipl.-Ing. Karl-Heinz Gückler  
BSW Berleburger Schaumstoffwerk GmbH, Berleburg

Dr.-Ing. Manfred Hase, Dipl.-Ing. Katja Küntzelmann  
Hansa-Nord-Labor, Pinneberg

Dipl.-Ing. Christian Gottaut, Dr.-Ing. Ulrike Stöckert  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

#### Inhalt

<b>5.4.1</b>	<b>Zielsetzung .....</b>	<b>383</b>
<b>5.4.2</b>	<b>Vorbetrachtungen und Untersuchungsansatz.....</b>	<b>384</b>
<b>5.4.3</b>	<b>Entwicklung von Dämpfungsschichten.....</b>	<b>391</b>
5.4.3.1	Bautechnische Untersuchungen .....	391
5.4.3.2	Lärmtechnische Untersuchungen .....	393
5.4.3.3	Konzepte elastischer Dämpfungsschichten.....	395
<b>5.4.4</b>	<b>Ergebnisse der Laboruntersuchungen.....</b>	<b>397</b>
5.4.4.1	Untersuchungen an einzelnen Asphalt-dämpfungsschichten.....	397
5.4.4.2	Untersuchungen an Mehrschichtsystemen.....	397
5.4.4.3	Voruntersuchungen für die Errichtung der Erprobungsfelder .....	402
<b>5.4.5</b>	<b>Bau von Erprobungsfeldern .....</b>	<b>406</b>
5.4.5.1	Ergebnisse der bautechnischen Untersuchungen .....	409
5.4.5.2	Ergebnisse der lärmtechnischen Untersuchungen .....	419
<b>5.4.6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>434</b>
	<b>Literatur.....</b>	<b>435</b>

### 5.4.1 Zielsetzung

Die Lärmbelastung des Straßenverkehrs resultiert zu einem großen Teil aus Effekten, die aus dem Kontakt zwischen dem Reifen und der Fahrbahn entstehen. Die bisherigen Ansätze zur Reduzierung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche im Bereich Asphaltfahrbahn zielen daher hauptsächlich auf die Optimierung der Eigenschaften der Asphaltdeckschicht ab. Den aktuellen Stand der Technik stellen hierbei dichte Asphaltdeckschichten, die ihre Lärmreduzierung durch eine optimierte Oberflächentextur erreichen, und offenporige Asphaltdeckschichten, die durch ihre Offenporigkeit den Schall absorbieren, dar.

Durch dynamische Achslasten auf den Straßen kommt es darüber hinaus zu Schwingungen innerhalb des gesamten Asphaltaufbaus, welche eine zusätzliche Schwingungsanregung des Fahrzeugreifens und eine Lärmabstrahlung der gesamten Asphaltkonstruktion zur Folge haben. Der Straßenoberbau als Gesamtsystem und das Potenzial einzelner Schichten zur Dämpfung dieser Schwingungen bleiben bisher weitgehend unberücksichtigt.

Die Eigenschaften des Straßenoberbaus zur Dämpfung werden mit der Nachgiebigkeit beschrieben. Die Nachgiebigkeit der Fahrbahn stellt demnach neben den bisher bekannten lärmtechnisch relevanten Fahrbahnparametern, der Oberflächentextur und der Offenporigkeit, einen weiteren Einflussfaktor dar.

Bei Untersuchungen an Teststraßenabschnitten sowohl im sogenannten „Sperenberg-Projekt“ [1] als auch im späteren nationalen niederländischen Forschungsprojekt „Innovatie programma geluid“ [2] hat sich herausgestellt, dass die mechanischen Eigenschaften der Unterlage einer Fahrbahndeckschicht oder der Fahrbahndeckschicht selbst einen Einfluss auf die Entstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches haben.

Bislang ist jedoch nicht klar, welche strukturdynamischen Parameter des Fahrbahnbelages in welchem Maße zur Geräuschminderung beitragen, welche Vorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zur Geräuschminderung führen und wie diese physikalisch beschrieben werden können. Damit fehlt eine wichtige Voraussetzung, derartige Fahrbahnbelagssysteme sowohl akustisch als auch bautechnisch und ökonomisch zu optimieren. Dies wirft die Frage auf, inwieweit vorgefertigte elastische Schichten, die entweder auf die Fahrbahndeckschicht geklebt und direkt befahren werden oder als Zwischenschicht in den Deckschichtaufbau integriert werden, geeignet sind, gezielt für die Minderung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches eingesetzt bzw. dahingehend optimiert zu werden.

Das Ziel des Teilvorhabens VI.III ist es zu prüfen, inwieweit eine Erhöhung der lärmtechnischen Wirksamkeit von Asphaltkonstruktionen durch die Nutzung der schwingungsdämpfenden Eigenschaften des Straßenoberbaus als Gesamtsystem durch Integration einer elastischen Dämpfungsschicht realisierbar ist. Diese Schicht ist so zu bemessen, dass sie mit hohen Dämpfungseigenschaften einen lärmtechnisch positiven und keinen bautechnisch negativen Einfluss auf die technische Nutzungs- und Lebensdauer der Konstruktion hat. Die Asphaltkonstruktion soll sowohl in bautechnischer Hinsicht den erhöhten Belastungen in Ballungsräumen standhalten als auch mit einer Lärmreduzierung einhergehen.

Im Labormaßstab soll zunächst ermittelt werden, welche elastischen Schichten (z. B. besondere Asphaltgemische oder vorgefertigte Elastomerelemente) grundsätzlich ein ausreichendes Dämpfungspotenzial aufweisen, um die lärmreduzierende Wirkung der Asphaltkonstruktion zu verbessern. Weiterhin soll die Wirkung und der Einfluss der Dämpfungsschichten in einem Mehrschichtsystem auf die lärmtechnischen und bautechnischen Eigenschaften untersucht werden.

Die im Labor gewonnenen Erkenntnisse werden anhand von Erprobungsfeldern und -strecken unter Praxisbedingungen überprüft. Die geräuschmindernde Wirksamkeit der Asphaltkonstruktionen mit elastischer Dämpfungsschicht soll durch geeignete Messverfahren in situ nachgewiesen werden. Durch die anschließende Entnahme von Ausbauproben soll die Gebrauchstauglichkeit der innovativen Konstruktionen überprüft werden.

Das Projekt umfasst zwei unterschiedliche Ansätze zur Erhöhung der Nachgiebigkeit von Asphaltfahrbahnen durch Einbau elastischer Zwischenschichten unter einer herkömmlichen Asphaltdeckschicht. Der Projektpartner Hansa-Nord-Labor verfolgte ein Konzept, das den Einbau von vorgefertigten elastischen Matten des Projektpartners Berleburger Schaumstoffwerke (BSW) als Zwischenschichten in unterschiedlicher Tiefe unter einer herkömmlichen Asphaltdeckschicht vorsieht. Hansa-Nord-Labor und der Lehrstuhl für Verkehrswegebau der Ruhr-Universität Bochum sahen außerdem die Elastifizierung der Fahrbahn durch eine entsprechende Konditionierung des Asphaltmischguts für die Zwischenschicht selbst vor. Hierbei ging es um die Frage, inwieweit es gelingt, die mechanische Impedanz der Fahrbahn durch eine drastische Erhöhung des Anteils von elastischen Partikeln im Bindemittel oder als Ersatz von Kornfraktionen der groben Gesteinskörnung soweit herabzusetzen, dass sie besser an die des Reifens angepasst ist. Die Konzepte lehnten sich insgesamt an das Konzept der elastischen Lagerung von Fahrwegen des Schienenverkehrs an, mit der die Körperschallübertragung der vom Rollkontakt über die Schiene und das Gleisbett in den Untergrund übertragenen Schwingungen gemindert wird.

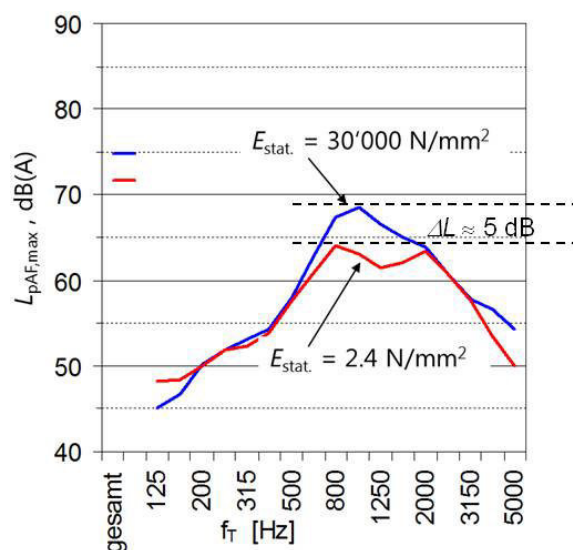
In das Teilvorhaben sind Ergebnisse des FE-Projektes „Asphaltkonstruktionen mit geräuschmindernder Wirkung“ [11] der Ruhr-Universität Bochum eingeflossen, das im Auftrag der BASt durchgeführt wurde.

Die erzielbare Minderung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche mit einem derartigen Konzept war aus schalltechnischer Sicht von Beginn des Projekts an ungewiss, da Entstehung und Abstrahlung der Rollgeräusche beim Reifen-Fahrbahn-System punktuell im Reifen-Fahrbahn-Kontakt erfolgen und eine Beeinflussung der Entstehungsmechanismen im Sinne der Geräuschminderung nur dann erfolgreich ist, wenn die Reifenschwingungen und die Schallabstrahlung aus dem Rollkontakt vermindert werden. Dazu ist es notwendig, dass der Reifen unmittelbar an der Fahrbahnoberfläche mit dem elastischen Körper in Kontakt kommt. Anders als beim Rad-Schiene-System erfolgt beim Reifen-Fahrbahn-System keine bzw. nur eine schalltechnisch vernachlässigbare Schallabstrahlung von Rollgeräuschen durch die Schwingungsanregung der Fahrbahn. Die Untersuchungen zum Konzept der elastischen Zwischenlagen dienen deshalb im Wesentlichen dem Nachweis bzw. der Bestätigung der Vorkenntnisse und einer Abklärung inwieweit die bautechnisch positiv zu bewertende tiefere Lage der elastifizierten Schicht realisierbar ist.

Durch den Einbau entsprechender Testfelder auf dem Versuchsgelände der NATO Air Base Geilenkirchen sollten alle Oberflächeneigenschaften der elastifizierten Deckschichten umfassend gemessen und den Ergebnissen der Rollgeräuschmessungen gegenübergestellt werden. Die Erfassung aller Oberflächeneigenschaften, also nicht nur der mechanischen Impedanz, sondern auch der Textur, des Strömungswiderstands und des Schallabsorptionsgrads ist unabdingbare Voraussetzung für die eindeutige Zuordnung und Gewichtung der Beiträge dieser Parameter zur Rollgeräuschminderung. Insofern bot das Teilvorhaben den erforderlichen Rahmen für derartige Entwicklungen und Untersuchungen.

#### 5.4.2 Vorbetrachtungen und Untersuchungsansatz

Die physikalische Modellierung des Kontakts zwischen Reifen und Fahrbahn geht zunächst von einer starren Fahrbahndeckschicht aus, mit unendlich großer bzw. gegenüber der mechanischen Impedanz des Reifens weitaus höherer mechanischer Impedanz der Fahrbahndeckschicht. Mit einer Reduzierung der Steifigkeit der Fahrbahndeckschicht kann jedoch auch die Kontaktsteife des Rollkontakts beeinflusst werden. Im sogenannten Sperenberg-Projekt [1] konnte experimentell gezeigt werden, dass eine wesentliche Reduzierung der Steifigkeit der Fahrbahndeckschicht zu einer wesentlichen Verminderung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche führt. In diesem Projekt wurden zwei Testfelder mit einer Länge von jeweils 25 m auf einer Straßenbetondeckschicht aufgebaut. Beide Testfelder wiesen dieselbe Textur auf, was durch vollflächiges Verkleben von Sandpapier mit der Körnung P24 (Korngrößen 0,6 mm bis 1,0 mm) bewerkstelligt wurde. Die Betonoberfläche wurde vor Verklebung des Sandpapiers mit einer Nivelliermasse verspachtelt. Bei einem der beiden Testfelder wurde das Sandpapier direkt auf dem Betonuntergrund verklebt. Bei dem anderen Testfeld wurde zuerst eine 15 mm dicke elastische Fallschutzmatte mit einem statischen E-Modul von 2.4 N/mm<sup>2</sup> auf den Betonuntergrund geklebt und anschließend das Sandpapier auf dem elastischen Material verklebt. Der statische E-Modul der Betonunterlage betrug etwa 30'000 N/mm<sup>2</sup>. Bild 5.4-1 zeigt das Ergebnis der Vorbeirollpegelmessungen als mittleres Terzspektrum über ein Kollektiv von 12 handelsüblichen Pkw-Reifen unterschiedlichen Typs für eine Geschwindigkeit von  $v = 80$  km/h.



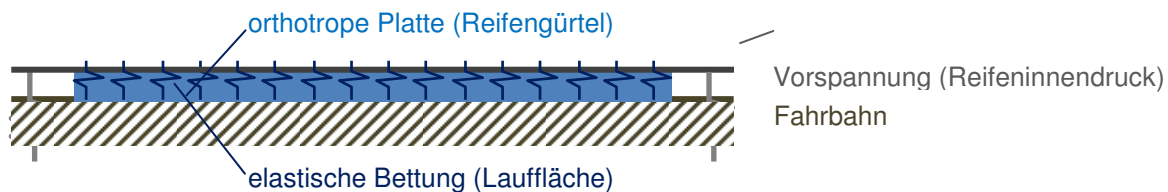
**Bild 5.4-1:** Mittlerer A-bewerteter Vorbeirollpegel  $L_{pAF,max}$  für ein Kollektiv von Pkw-Reifen in Abhängigkeit von der Terzmittelfrequenz  $f_T$ , Geschwindigkeit  $v = 80$  km/h.  $f_T$ : Terzmittelfrequenz [3]



Mit der gegenüber der Betonunterlage deutlich weicherer Deckschicht konnte der Vorbeifahrtmaximalpegel im mittleren Frequenzbereich um etwa 5 dB(A) gesenkt werden. Wie diese Pegelminderung zustande kommt wird nachfolgend beschrieben.

Die Steifigkeiten von Reifen und Fahrbahn in der Kontaktfläche beeinflussen die mechanische Eingangsimpedanz  $\underline{Z}_e$  von Reifen und Fahrbahn. Die mechanische Impedanz wiederum bestimmt die Schnelle  $\underline{v}$  der Reifenschwingungen, die durch die Kraft  $\underline{F}$ , die im Reifen-Fahrbahn-Kontakt übertragen wird, angeregt werden. Das mechanisch induzierte Schnellefeld an der Oberfläche des Reifens ist letztlich dafür verantwortlich, dass die den Reifen umgebende Luft zu Schwingungen angeregt wird und im Fernfeld zu hörbarem Schall führt. Dieser stellt dann neben den aerodynamischen Geräuschen, die aus dem Reifen-Fahrbahn-Kontakt abgestrahlt werden, die mechanisch induzierte Geräuschkomponente des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs dar.

Zur Modellierung des dynamischen Verhaltens des Reifens, also der Schwingantwort des Reifens auf dynamische Kraftanregung, sind Materialdaten erforderlich. Materialeigenschaften, insbesondere frequenzabhängige Materialeigenschaften sind nur mit großem Aufwand zu ermitteln, wenn individuelle Komponenten des Reifenaufbaus beschrieben werden müssen. Dies ist beispielsweise bei Finite Elemente Modellen der Fall. Das in SPERoN implementierte analytische Modell zur Berechnung der Schwingantwort im Zeitbereich erlaubt dagegen die Verwendung lediglich makroskopischer Reifendaten. Diese Daten repräsentieren nicht die Details der Reifenstruktur, sondern beschreiben die dynamischen Eigenschaften globaler Teilstrukturen im Modell, auf die das Schwingungsverhalten des Reifens zurückgeführt werden kann. Zu diesen Teilstrukturen zählen zum Beispiel Biegebalken und Platten. Die Teilstrukturen werden dann durch charakteristische, makroskopische bzw. globale Größen wie Biegesteifigkeit, Masse usw. beschrieben. Diese Vorgehensweise bedeutet aber auch, dass diese Größen bereits die Interaktion unterschiedlicher Schichten des Reifenaufbaus und den Einfluss des Reifeninnendruck auf das Schwingverhalten des Reifens beinhalten. Aus diesem Grund ist es nicht möglich, die dynamischen Eigenschaften einzelner Materialproben, die aus dem Reifen herausgeschnitten werden, zu untersuchen, sondern es muss immer der komplette Reifen gemessen werden.



**Bild 5.4-2:** Schema des mechanischen Reifenmodells mit starrer Fahrbahn

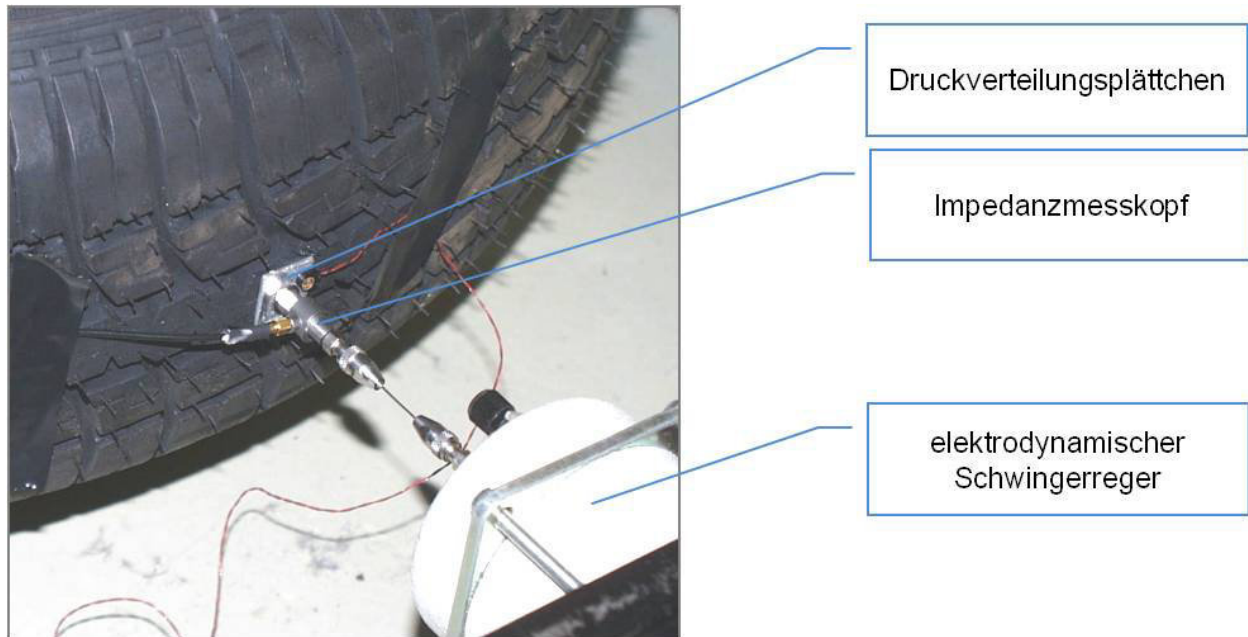
Dem mechanischen Teilmodell in SPERoN liegt das Konzept der orthotropen, elastisch gebetteten und vorgespannten Platte zugrunde [5] (Bild 5.4-2). Die Bettung entsteht durch die elastische Gummischicht der (profilierten) Lauffläche, die den Gürtel umgibt und mit der Fahrbahn direkt in Kontakt kommt. Die Vorspannung ergibt sich durch den Innendruck des mit Luft gefüllten Reifens. Dieses Modell wird sowohl dazu benutzt, die Materialdaten aus den gemessenen Schwingantworten des Reifens abzuleiten (Analyse) als auch die Schwingantworten des Reifens zu berechnen, sobald die Materialdaten bekannt sind (Synthese). Das Modell der orthotropen, gebetteten und vorgespannten Platte erfordert folgende Daten:

- Flächenbezogene Masse  $m''$  der Reifenstruktur
- Radiale Bettungszahl  $K$  in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck und der Steifigkeit der Seitenwand
- Spannung  $T$  in Umfangs- und Querrichtung in Abhängigkeit vom Reifeninnendruck
- Biegesteifigkeit  $B_x$ ,  $B_y$  und  $B_{xy}$  in Umfangs- und Querrichtung und als Mischsteife
- Dämpfung  $\eta$  für die verschiedenen Steifigkeitsterme

Diese makroskopischen Eigenschaften des Reifens werden durch Messung der radialen Eingangsadmittanz  $\underline{Y}$  des Reifens anhand der in Bild 5.4-3 dargestellten Anordnung ermittelt. Einzelheiten hierzu können (2) entnommen werden. Die Eingangsadmittanz  $\underline{Y}$  stellt den Kehrwert der Eingangsimpedanz  $\underline{Z}$  dar und ist folgendermaßen definiert:

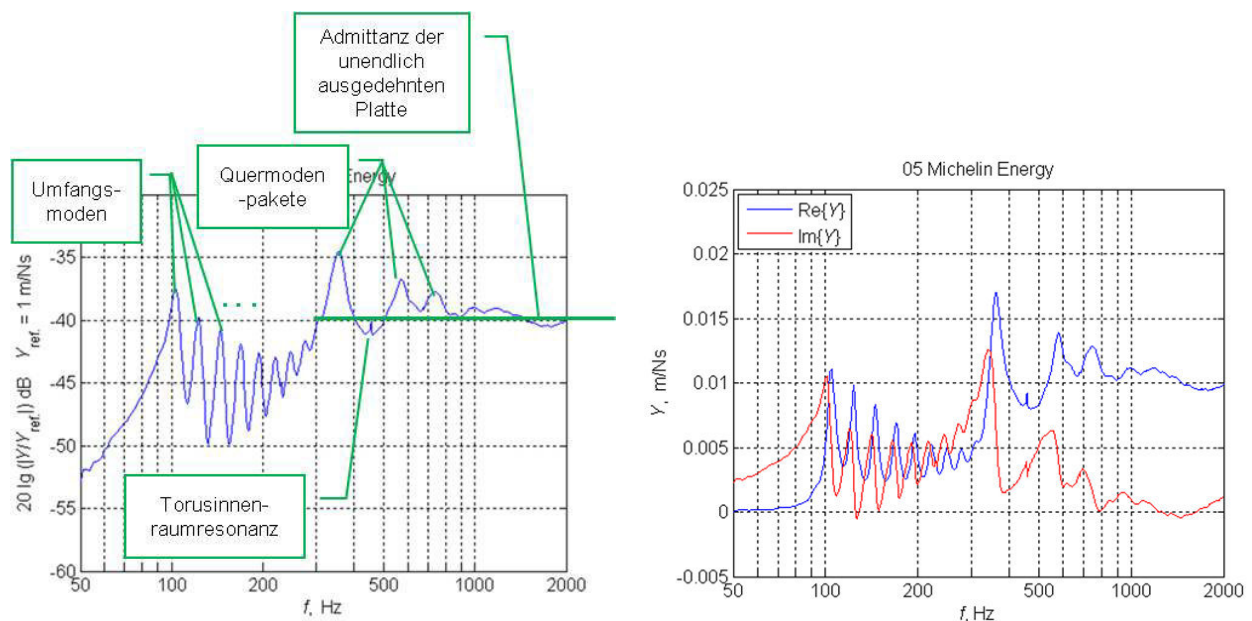
$$(1) \quad \underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{\underline{v}}{\underline{F}}$$

wobei  $\underline{v}$  die Schnelle in radialer Richtung am Ort der Anregung und  $\underline{F}$  die anregende Kraft ist.



**Bild 5.4-3:** Messanordnung zur Ermittlung der radialen Eingangsadmittanz  $Y$  eines Reifens nach Kropp [4]

Bild 5.4-4 zeigt das Ergebnis einer derartigen Messung am Beispiel eines Pkw-Serienreifens (Michelin Energy). Aus dem Frequenzverlauf der Admittanz geht hervor, dass das Schwingverhalten des Reifens ab einer Frequenz von etwa 300 Hz dem einer unendlich ausgedehnten Platte gleicht. Die Reifenoberfläche ist dann nicht mehr partialschwingungsfrei. Es entstehen auch quer zur Umfangsrichtung unterschiedliche Schwingungszustände. Zwischen 300 Hz und etwa 1.000 Hz machen sich diese Quermoden bemerkbar, die mit zunehmender Frequenz abklingen. Der Vergleich von Realteil und Imaginärteil zeigt, dass der Eingangswiderstand der Platte aber nicht rein reell ist, wie dies für die unendlich ausgedehnte Platte zu erwarten wäre [6]. Der imaginäre Anteil entsteht durch die kleinräumige, das heißt lokale Nachgiebigkeit und das lokale Ausweichen des Laufflächenmaterials in tangentialer Richtung an der Anregestelle. Nachgiebigkeit und Ausweichen des Materials hängen von der lokalen Steife und vom Schubmodul ab.



**Bild 5.4-4:** Gemessene radiale Eingangsadmittanz  $Y$  eines Pkw-Serienreifens (Michelin Energy) in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Links: Betrag  $|Y|$  der Admittanz; rechts: Realteil  $\text{Re}\{Y\}$  und Imaginärteil  $\text{Im}\{Y\}$  der Admittanz

Für Pkw-Serienreifen ergeben sich Werte des Betrags der Plattenadmittanz zwischen -35 dB und -45 dB re. 1m/Ns. Die Admittanz liegt also in einem Bereich zwischen 0,006 m/Ns und 0,018 m/Ns. Für die Admittanz  $\underline{Y}$  in m/Ns der Platte auf elastischer Bettung gilt für Punktanregung in der Mitte der Platte ((6), S. 315):

$$(2) \quad \underline{Y} = \frac{1}{8\sqrt{B}m''} \begin{cases} \sqrt{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}} & \text{für } \omega > \omega_0 \\ j \sqrt{\frac{\omega_0^2}{\omega^2} - 1} & \text{für } \omega < \omega_0 \end{cases} \quad \text{mit } \omega_0^2 = \frac{s''}{m''}$$

mit  $B'$  als Biegesteifigkeit der Platte in Nm,  $m''$  als flächenbezogene Masse der Platte in kg/m<sup>2</sup> und  $s''$  als Steifigkeit pro Flächeneinheit in N/m<sup>3</sup>. Für Kreisfrequenzen  $\omega \gg \omega_0$  gilt:

$$(3) \quad \underline{Y} = \frac{1}{8\sqrt{B}m''} = \frac{1}{8\sqrt{B_{xy}m''}}$$

Die Bettung, die die elastischen Eigenschaften der Lauffläche wiedergibt, ist in SPERoN als Anordnung diskret verteilter entkoppelter Federn realisiert. Die Berechnung der durch die Auslenkung der Federn entstehenden Kraft (Gegenkraft, reactio)  $F_e$  in N genügt dabei zu jedem Zeitpunkt  $t_i$  des Rollvorgangs dem Hookeschen Gesetz:

$$(4) \quad F_c|_{t=t_i} = s_e \cdot \Delta y_e|_{t=t_i}$$

mit  $s_e$  als Federsteife in N/m und  $\Delta y_e$  als Auslenkung in m.

Nachteil dieser Anordnung ist, dass sie keine Scherkräfte überträgt und lokale Effekte wie die Abhängigkeit der Federsteife von der Größe der Anregefläche, die im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zu jedem Zeitpunkt des Rollvorgangs anders ist, zunächst nicht berücksichtigt ist. Die Änderung der Größe der Anregefläche kommt dadurch zustande, dass der Reifengummi zwar elastisch, aber nicht kompressibel ist und deshalb bei Krafteinwirkung keine Volumenänderung (wie die Hookesche Feder) sondern eine Formänderung erfährt. Mit zunehmender Kraft bzw. radialer Auslenkung wird deshalb die Anregefläche größer. Die Kraft wiederum wächst proportional zur Anregefläche, was zu einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Kraft und Auslenkung führt. Durch „Hinterlegung“ einer nichtlinearen Kennlinie für die Federsteife in Abhängigkeit von der Auslenkung wird dieser Tatsache im Modell Rechnung getragen.

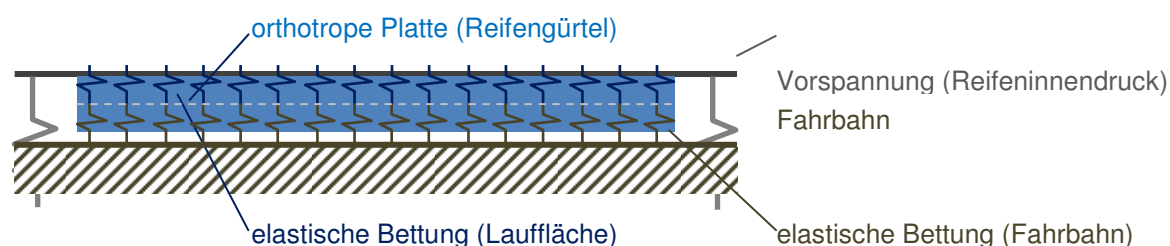
Die Steife der Federn  $s_e$  des Bettungsmodells ist festgelegt durch die auf die Höhe  $h$  der Bettungsschicht (Länge der Federn) bezogene Bettungsziffer  $K/h$  in N/m<sup>3</sup> und die Fläche  $S$  in m<sup>2</sup>, die die Feder repräsentiert:

$$(5) \quad s_e = \frac{K}{h} S$$

Die längenbezogene Bettungsziffer  $K/h$  ergibt sich unter der Annahme eines linienförmigen Kontaktes zwischen Reifen und Fahrbahn und einer starren Fahrbahndeckschicht aus dem Elastizitätsmodul zu ((4), S.100):

$$(6) \quad \frac{K}{h} = 1,18 \left( \frac{E}{1-\nu^2} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{1}{2} \left( \frac{b\pi}{R P} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$E$  in N/m<sup>2</sup> ist der Elastizitätsmodul des unendlich ausgedehnten Mediums,  $\nu$  die Poissonsche Querkontraktionszahl,  $b$  die Länge der Kontaktlinie bzw. des endlich langen Zylinders in m,  $R$  der Krümmungsradius des Zylinders in m und  $P$  die Radlast in N.



**Bild 5.4-5:** Schema des mechanischen Reifenmodells mit elastischer Fahrbahn

Mit Einführung der elastischen Fahrbahn wird eine Ankopplung der Bettung an einen endlich großen Widerstand eingeführt (Bild 5.4-5). Bei lokaler Reaktion der Fahrbahnoberfläche auf punktförmige Anregung entsteht durch Elastifizierung der Fahrbahn eine zweite Feder mit der Steifigkeit  $s_F$ , die der Steifigkeit der Lauffläche des Reifens  $s_e$  in Serie geschaltet ist. Dies entspricht auch dem Modell des unendlichen isotropen Halbraums [6]. Für die resultierende Steifigkeit  $s_e'$  gilt:

$$(7) \quad s_e' = \frac{s_e s_F}{s_e + s_F}$$

Im Ergebnis von Untersuchungen zur Schallabstrahlung gibt Kropp [4] den Zusammenhang des mittleren Schalldrucks in 1 m Abstand zur Radachse mit der Steifigkeit  $s_e$  an zu:

$$(8) \quad p \sim s_e^{0.75}$$

Wendet man diese Modellansätze auf die Ergebnisse des zuvor beschriebenen Sperenberg-Experiments an, kann man Rückschlüsse ziehen auf die elastischen Verhältnisse im realen Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Für den Betonuntergrund (Straßenbeton) und das für die elastische Schicht verwendete Material Regupol® 8012, auf dem das Schleifband bzw. die elastische Schicht mit Schleifband aufgeklebt wurde sind die in Tabelle 5.4-1 angegebenen Materialparameter anzusetzen:

Parameter	Größe	Einheit	Wert	
			Beton	Regupol® 8012
Reifen				
E-Modul	$E$	N/m <sup>2</sup>	2,0·10 <sup>7</sup>	
Querkontraktionszahl	$\nu$	1	0,45	
Länge des Zylinders (Reifen)	$b$	m	0,10	
Krümmungsradius des Zylinders (Reifens)	$R$	m	0,30	
Radlast (Mittelwert)	$P$	N	3.600	
Fahrbahn				
statischer E-Modul	$E_{\text{stat}}$	N/m <sup>2</sup>	3,0·10 <sup>10</sup>	2,4·10 <sup>6</sup>
dynamischer E-Modul	$E_{\text{dyn}}$	N/m <sup>2</sup>	3,4·10 <sup>10</sup>	18,2·10 <sup>6</sup>
Querkontraktionszahl	$\nu$	1	0,20	0,35

**Tab. 5.4-1:** Materialparameter des elastischen Testfelds und der Reifen im Sperenberg-Projekt

Mit den in Tabelle 5.4-1 eingetragenen Werten ergibt sich die längenbezogene Bettungsziffer  $K/h$  und die Steifigkeit  $s_e$  der Bettung für den Fall des Reifens auf der starren Fahrbahn zu:

$$K/h = 1,26 \cdot 10^9 \text{ N/m}^3$$

$$s_e = 2,25 \cdot 10^5 \text{ N/m.}$$

$s_e$  stellt einen Mittelwert über ein Kollektiv von Pkw-Serienreifen aus dem Sperenberg-Projekt [1] dar. Die äquivalente Federfläche  $S$  (Gleichung (11)) ergibt sich zu:

$$S = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Wird die Betonfahrbahn an der Oberfläche mit der elastischen Schicht belegt, ändern sich die elastischen Eigenschaften der Bettung. Bei gleichbleibender Federfläche ändert sich die Steifigkeit der Bettung. Mit den Daten aus Tabelle 5.4-1 ergibt sich dann:

$$s_e' = 9,65 \cdot 10^4 \text{ N/m,}$$

wobei der dynamische E-Modul des Regupol-Materials zugrundeliegt. Das Verhältnis der Steifigkeiten der Bettung mit und ohne elastische Fahrbahnschicht beträgt:

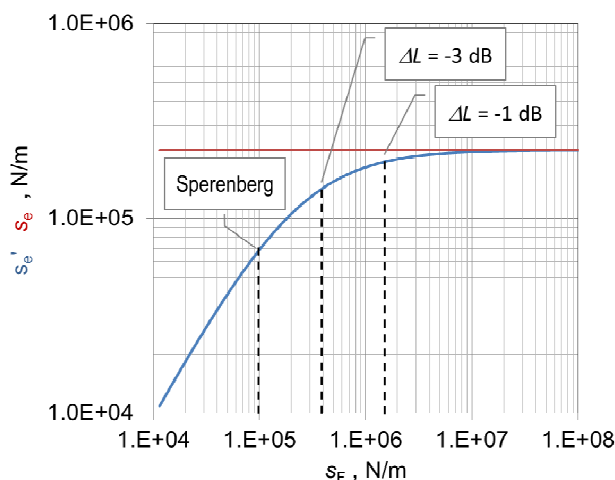
$$s_e' / s_e = 0,43.$$

Die Steifigkeit der Bettung wird also auf etwas weniger als die Hälfte reduziert. Mit Gleichung (14) beträgt die Schalldruckpegeldifferenz:

$$\Delta L = 20 \cdot \lg((s_e'/s_e)^{0.75}) \text{ dB} = -5,5 \text{ dB.}$$

Das Ergebnis stimmt damit sehr gut mit dem Messergebnis bei mittleren Frequenzen um 1.000 Hz überein. Die fehlende Übereinstimmung bei höheren Frequenzen ist der zusätzlichen Komponente der aerodynamischen Geräusche geschuldet, die dann dominieren, in den Berechnungen aber nicht berücksichtigt sind.

Mit diesem Ergebnis wird deutlich, um welche Größenordnung sich die resultierende Steifigkeit durch Änderung der elastischen Eigenschaften der Fahrbahn ändern muss, dass sich nennenswerte Pegelminderungen der Rollgeräusche ergeben. Legt man eine Pegelminderung von nur 1 dB zugrunde, ist bereits eine Reduzierung der Steifigkeit der Fahrbahn auf etwa  $1,4 \cdot 10^6$  N/m erforderlich. Ausgehend von Asphalt mit einem stark temperaturabhängigen dynamischen E-Modul zwischen  $2 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup> bei hohen Temperaturen und  $1,1 \cdot 10^{10}$  N/m<sup>2</sup> bei tiefen Temperaturen sowie einer Querkontraktionszahl  $\nu$  von 0,50 bei hohen Temperaturen und 0,25 bei tiefen Temperaturen ergeben sich Steifigkeiten der Fahrbahn von  $2,5 \cdot 10^8$  N/m bei hohen Temperaturen und  $2,3 \cdot 10^9$  N/m bei tiefen Temperaturen. Diese Steifigkeiten sind um 2 bis 3 Größenordnungen (!) zu reduzieren, um eine Pegelminderung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs von wenigstens 1 dB zu erzielen. In Bild 5.4-6 ist dieser Sachverhalt nochmals zusammengefasst wiedergegeben.



**Bild 5.4-6:** Resultierende Steifigkeit der Bettung  $s_e'$  bei Linienkontakt in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Fahrbahn  $s_F$ .  $s_e'$  ist die Steifigkeit der Bettung der orthotropen Platte (Reifengürtel) bei starrer Fahrbahn als Mittelwert über ein Kollektiv von Pkw-Serienreifen aus dem Sperenberg-Projekt [1]. Die gestrichelten Linien markieren auf der x-Achse die Werte der Fahrbahnsteifigkeit, die erforderlich sind, um Schalldruckpegelminderungen  $\Delta L$  des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs von 1 dB bzw. 3 dB zu erzielen.

Die Admittanz der Fahrbahn, die ausschlaggebend ist für die an der Oberfläche entstehenden Schnellepegel, lässt sich basierend auf der Vorstellung des unendlichen, isotropen elastischen Halbraums und senkrechter Anregung auf einer kleinen Kreisfläche wie folgt angeben [6]:

$$(9) \quad \underline{Y} = \frac{v}{F} \approx \frac{\omega k_T}{G} (1 - \nu) \left[ 0,19 + j \frac{0,3}{k_T a} \right]$$

mit  $k_T$  in 1/m als Kreiswellenzahl für Schubwellen,  $G$  in N/m<sup>2</sup> als Schubmodul,  $\nu$  als Querkontraktionszahl und  $a$  in m als Radius der kreisförmigen Anregefläche. Der Imaginärteil der Admittanz

$$(10) \quad \text{Im}\{\underline{Y}\} \approx j \frac{\omega k_T}{G} (1 - \nu) \frac{0,3}{k_T a} = j \frac{0,3 (1 - \nu)}{G a} \omega$$

entspricht dem Kehrwert der Impedanz, also der Admittanz  $\underline{Y}_S^*$  einer Feder mit der Steifigkeit  $s_F^*$

$$(11) \quad \underline{Y}_S = j \frac{\omega}{s_F}$$

Die lokale Steifigkeit der Fahrbahn für kleine kreisförmige Auslenkungen  $s_F^*$  entspricht damit näherungsweise einer Feder mit der Steifigkeit

$$(12) \quad s_F^* \approx 3,33 \frac{G a}{1 - \nu}$$

Der Schubmodul beträgt für „Regupol 8012“  $G = 6,7 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$ , die Querkontraktionszahl  $\nu = 0,35$ . Mit der oben angegebenen äquivalenten Federfläche von  $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$  ergibt sich ein Wert für die Steifigkeit der Fahrbahn bei punktförmigem Kontakt von

$$s_F^* = 2,61 \cdot 10^5 \text{ N/m.}$$

In Bild 5.4-8 ist der Betrag der Admittanz in Abhängigkeit von der Frequenz für elastische Schichten aus Regupol 8012 und Standardasphalt aufgetragen. Die zugrundeliegenden Materialparameter gehen aus Tabelle 5.4-2 hervor.

Parameter	Größe	Einheit	Wert	
			Asphalt	Regupol® 8012
dynamischer Elastizitätsmodul	$E_{\text{dyn}}$	N/m <sup>2</sup>	$6,5 \cdot 10^9$	$18,2 \cdot 10^6$
dynamischer Schubmodul	$G_{\text{dyn}}$	N/m <sup>2</sup>	$2,4 \cdot 10^9$	$6,7 \cdot 10^6$
Querkontraktionszahl	$\nu$	1	0,375	0,35
Dichte	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1.800	390
Schubwellengeschwindigkeit	$c_T$	m/s	1.100	130

Tab. 5.4-2: Materialparameter für Regupol 8012 und Standardasphalt für mittlere Temperaturen um 20°C

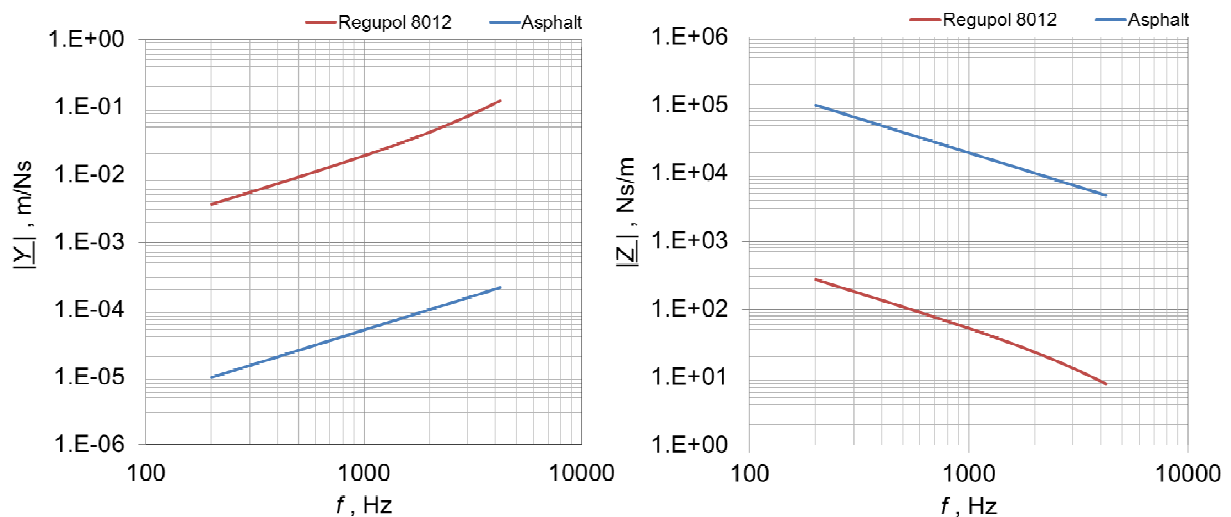


Bild 5.4-7: Betrag der Admittanz  $|Y|$  und der Impedanz  $|Z|$  des elastischen Halbraums bei kleiner kreisförmiger Anregung mit Radius  $a = 1 \text{ cm}$  in Abhängigkeit von der Frequenz für Regupol und Asphalt als homogenes Medium

Fasst man die Admittanz  $Y$  auf als die auf eine Kraft von  $F = 1 \text{ N}$  bezogene Schnelle  $v$ , wird anhand von Bild 5.4-7 deutlich, um wie viel kleiner die Beweglichkeit der Asphaltoberfläche im Vergleich zum Regupol-Material ist. Auch aus dieser Betrachtung geht ein Unterschied von zwei bis drei Größenordnungen hervor, der notwendig ist, um die Beweglichkeit der dem Reifen zur Verfügung stehenden Oberfläche wirksam zu erhöhen.

### Untersuchungsansatz

In diesem Teilvorhaben wird die Frage aufgeworfen, inwieweit nicht auch die Fahrbahnoberfläche durch den Rollvorgang zu Schwingungen angeregt wird und dadurch ihrerseits mechanisch induzierten Schall abstrahlt, der wesentlich zum Reifen-Fahrbahn-Geräusch beiträgt und durch Änderung des Schichtaufbaus der Fahrbahn reduziert bzw. bedämpft werden könnte. Die bautechnischen Ansätze gehen dabei davon aus, dass dies entweder, in Anlehnung an das Experiment im Sperenberg-Projekt [1], durch eine gewisse Elastifizierung des Mischguts durch Beimischung von Gummi oder aber auch durch elastische Zwischenschichten im Fahrbahnaufbau erreicht werden könnte. Aus akustischer Sicht ergeben sich daraus drei Fragestellungen:

- Elastische Zwischenlagen

Die Deckschicht besteht aus einer dünnen, aber weitgehend starren Deckschicht auf einer elastischen Zwischenlage.

Reichen die an der Oberfläche der Fahrbahn generierten Schnellepegel aus, um nennenswert Schall abzustrahlen?

Trägt das Konzept der Schwingungsdämmung für Schwingungen, die durch den Rollvorgang über die Fahrbahn auf den Boden übertragen werden auch für die Dämmung von Schwingungen an der Oberfläche?

- Beimengung von elastischen Festkörperpartikeln

Anders als bei elastischen Zwischenlagen kommt der Reifen bei elastifizierten Deckschichten mit der nachgiebigen Fahrbahnoberfläche direkt in Kontakt. Dies entspricht dem im Sperenberg-Projekt untersuchten Fall und verspricht entsprechende Wirkung.

Reicht die Erhöhung der Nachgiebigkeit aus, um die Steifigkeit im Reifen-Fahrbahn-Kontakt so zu verringern, dass nennenswerte Pegelminderungen des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs zustande kommen?

- Sonstige akustische Eigenschaften

Die Fahrbahnoberfläche ist akustisch nur dann vollständig beschrieben, wenn neben der Steife auch Textur und Schallabsorptionsgrad bestimmt werden.

Wie werden diese akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche durch den Einbau von Asphaltdeckschichten auf elastischen Zwischenlagen oder mit elastifiziertem Mischgut beeinflusst?

Wie tragen sie im Verhältnis zur Steife zur Rollgeräuschenstehung bei?

Aus diesen Fragestellungen ergab sich der Untersuchungsumfang in diesem Teilvorhaben. Auf, auf dem Versuchsgelände in Geilenkirchen nachvollziehbar hergestellten, Asphaltdeckschichten mit und ohne elastischer Modifizierung wurden in situ Messungen aller akustisch maßgeblichen Oberflächenparameter durchgeführt. Dazu zählten insbesondere auch mit der Reifen-Admittanzmessung vergleichbare mechanische Admittanz- bzw. Impedanzmessungen der Fahrbahn sowie Schallabsorptionsgradmessungen, obwohl es sich bei den hergestellten Asphaltdeckschichten um dichte, hohlraumarme und dementsprechend per se nicht schallabsorbierende Fahrbahnbeläge handelte. Mit den Schallabsorptionsgradmessungen sollte gegebenenfalls auftretenden Verdichtungsproblemen beim Einbau der Asphaltdeckschichten auf elastischen Unterlagen nachgegangen werden.

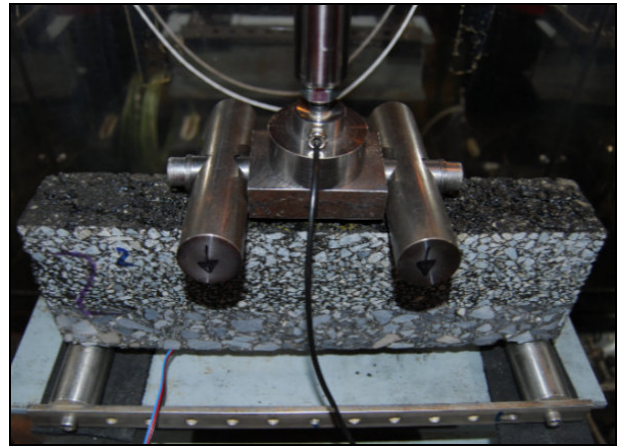
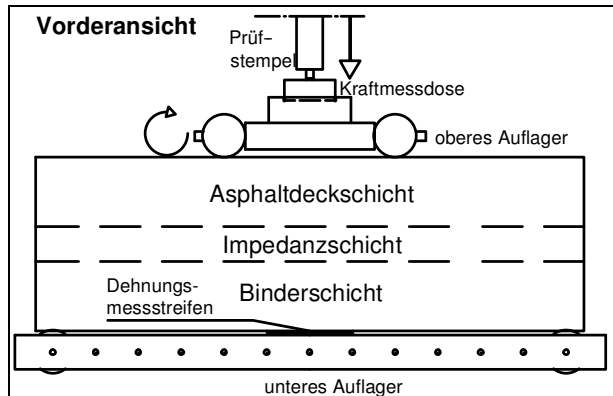
Desweiteren wurden auf allen Testfeldern Nahfeldmessungen der Reifen-Fahrbahn-Geräusche mit der CPX-Methode und Messungen der Vorbeifahrtgeräusche durchgeführt.

Das Konzept der Testfelder sah vor, alle Deckschichten mit einem Größtkorndurchmesser von nur 5 mm in hohlraumarmer Bauweise herzustellen. Die Fahrbahnoberflächentextur, die sich bei heiß gewalzten Fahrbahnbelägen daraus ergibt, ist akustisch sehr günstig und minimiert die rauhigkeitsbedingte mechanische Anregung des Reifens. Unterschiede im Pegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche können dadurch leichter auf mechanische Impedanzunterschiede der Fahrbahn zurückgeführt werden.

### 5.4.3 Entwicklung von Dämpfungsschichten

#### 5.4.3.1 Bautechnische Untersuchungen

Zur Ermittlung der Dauerhaftigkeit wurde in Anlehnung an die [DIN EN 12697, Teil 24, 2012] ein Versuchsaufbau für einen Vierpunkt-Biegeversuch entwickelt. Bild 5.4-8 gibt einen Überblick über den Versuchsaufbau, sowohl als Prinzipskizze als auch als fotografische Darstellung. Die Prüfung wurde bei einer Temperatur von 20 °C durchgeführt. Dabei wurden aus den Mehrschichtsystemen prismatische Probekörper mit einer Länge von 320 mm und einer Breite von 50 mm herausgesägt. Die Höhe variierte je nach Dicke der Dämpfungsschicht.



**Bild 5.4-8:** Versuchsaufbau – Vierpunkt-Biegeversuch

Bei der Prüfung wurde auf die Probenoberseite eine sinusförmige Druckbelastung eingebracht und neben den Lastzyklen und der vertikalen Verformung die Dehnung an der Unterseite der Probe gemessen. Die der Prüfung zugrunde liegenden Prüfparameter sind in der folgenden Tabelle 5.4-3 aufgeführt.

Unterspannung [MPa]	Oberlast [MPa]	Frequenz [Hz]
0,035	0,15	10

**Tab. 5.4-3:** Prüfparameter – Vierpunkt-Biegeversuch

Die Haftzugfestigkeit wurde in Anlehnung an die [ZTV-Ing, Teil 3, 2012] bestimmt, um den Schichtenverbund zwischen zwei Schichten zu überprüfen. Dabei wurde eine Ringnut, die ebenso wie der Prüfstempel einen Durchmesser von 50 mm aufweist, bis in die Dämpfungsschicht und in die Binderschicht des Mehrschichtsystems vorgebohrt. Anschließend wurde der Prüfstempel kraftschlüssig mit einer vollflächigen Verklebung aufgebracht und die Probe bei einer Temperatur von 20 °C mit einer Geschwindigkeit von 300 N/s einaxial gezogen, um die Haftzugfestigkeit zu bestimmen. Es handelt sich um die Spannung, die aus der maximal erreichten Zugkraft bezogen auf den Querschnitt der Probe ermittelt wird. Die gewählte Geschwindigkeit des Kraftanstieges gilt gemäß Norm für elastische und thermoplastische Flächen.



**Bild 5.4-9:** Versuchsaufbau - Haftzugprüfgerät



### 5.4.3.2 Lärmtechnische Untersuchungen

Um das Geräuschkinderungspotenzial durch Dämpfung eines Asphaltüberbaus zu beschreiben, muss die Nachgiebigkeit der einzelnen Asphalte und des Gesamtsystems bekannt sein. Im Asphaltstraßenbau existieren bisher keine standardisierten Messverfahren zur Bestimmung der Nachgiebigkeit bzw. der Dämpfungseigenschaften. Aus der Asphaltprüftechnik und der Akustik kommen verschiedene Ansätze zur Bestimmung von Dämpfungseigenschaften bzw. Dämpfungsfaktoren in Frage:

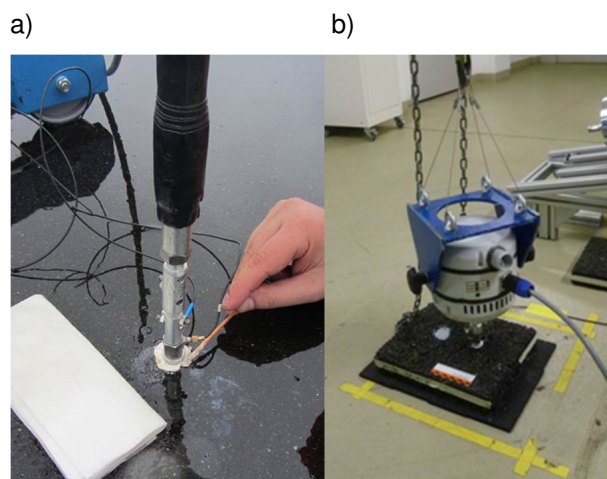
1. Ableitung von Kennwerten aus dynamischen Asphaltprüfungen (Steifigkeitsmodul, Phasenwinkel) wie der Spaltzug-Schwellversuch
2. Messung der mechanischen Impedanz von Asphaltsschichten mit Hilfe eines Impulshammers oder eines elektrodynamischen bzw. eines hydraulischen Shakers

Das Messprinzip Shaker beruht auf der Einleitung elektrodynamischer Impulse in die Prüfaufbauten zur Simulation der Vibrationsbeanspruchung einer Asphaltstraße durch einen PKW-Reifen. Die Reaktion der Prüfaufbauten auf die Schwingungsanregung wird mittels Messwertaufnehmer ermittelt und durch den Indikator „mechanische Eingangsimpedanz“ beschrieben. Die Messung der mechanischen Impedanz der Fahrbahn und der Probekörper erfolgt mit einer kleinen kreisförmigen Anregefläche mit einem Radius von  $a = 1 \text{ cm}$  (siehe hierzu Abschnitt 4.) oder – wie in der Admittanzmessung an Reifen – mit einer quadratischen Anregefläche. Die Fläche des runden bzw. des quadratischen Plättchens ergibt sich zu

$$S_{\circ} = 3,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2,$$

$$S_{\square} = 4,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

Die Unterschiede hinsichtlich Anregung und Schwingantwort des Reifens sind vernachlässigbar. Die Ankopplung des Druckverteilungsplättchens an die raue Oberfläche der Fahrbahn ist schwierig. Um die Zufälligkeit der Ankopplung des Plättchens an einzelne Gesteinskörner an der Asphaltoberfläche, Hohlräume zwischen Plättchen und Asphaltoberfläche, ein Abheben und Kippbewegungen des Plättchens zu vermeiden, wird die Kontaktstelle mit Zweikomponenten-Klebstoff gespachtelt, um die Oberflächentextur einzuebnen. Der Klebstoff ist im nicht ausgehärteten Zustand plastisch verformbar. Anschließend wird das Plättchen auf die Kontaktstelle geklebt (Bild 5.4-10a). Begünstigt wird diese Vorgehensweise durch Wahl eines kleinen Größtkorndurchmessers von 5 mm für das Asphaltmischgut, der zu einer sehr feinrauen und ebenen Oberfläche führt und eine gute Ankopplung des Plättchens erlaubt.



**Bild 5.4-10:** a) Klebung des Anregeplättchens auf der Fahrbahnoberfläche;  
b) Messanordnung mit aufgehängtem elektrodynamischem Schwingerreger

Für die Messungen wird ein Hochleistungsschwingerreger mit einer Gesamtmasse von 21 kg und einer bewegten Masse von 0,4 kg verwendet. Anregesignal ist Weißes Rauschen mit einer Bandbreitenbegrenzung von 50 Hz bis 12 kHz. Der Shakerkolben wird über einen Impedanzmesskopf mit einer Empfindlichkeit von 10,14 mV / m/s<sup>2</sup> für den Beschleunigungsaufnehmer und von 22,4 mV/N für den Kraftaufnehmer an die Oberfläche des Probekörpers angekoppelt (Bild 5.4-10b).

Es wurden Annahmen für die Belastung der Fahrbahn durch unterschiedliche PKW-Fahrzeugtypen als Grundlage für die einzustellende Vorlast getroffen (siehe Tabelle 5.4-4).

	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Mittelwert
Fahrzeug in kg	1990	2400	1750	
Belastung Reifen in N	4880	5886	4292	
Aufstandsfläche Reifen in mm <sup>2</sup>	24000	20000	20300	
Anteil Aufstandsfläche Profilrillen in %	40	34	37	
Effektive Aufstandsfläche Reifen in mm <sup>2</sup>	14311	13286	12799	
Belastung pro Fläche in N/mm <sup>2</sup>	<b>0,34</b>	<b>0,44</b>	<b>0,34</b>	<b>0,37</b>

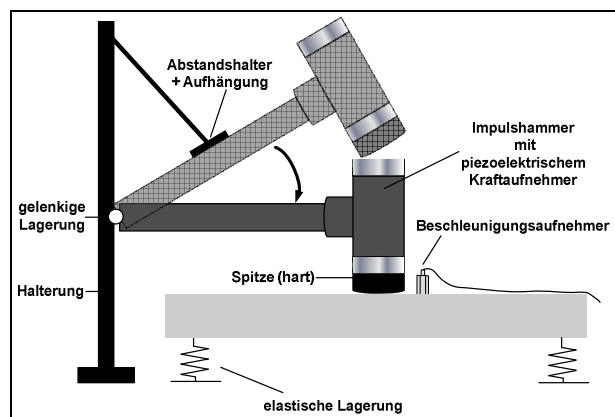
**Tab. 5.4-4:** Bemessung der Vorlast durch einen PKW-Reifen

Messfläche:  $S = 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$

Vorlast:  $F = 280 \text{ N}$

Zur Ermittlung der mechanischen Impedanz wurden ebenfalls Messungen mit dem Impulshammer durchgeführt. Die experimentelle Modalanalyse mittels Impulshammer ist ein Verfahren zur Überprüfung dynamischer Systemeigenschaften.

Der Impulshammer ist ein mit einem integrierten piezoelektrischen Kraftsensor ausgestatteter Hammer, der die aufgebrachte Last aufzeichnet. Der Kraftsensor befindet sich direkt hinter der so genannten Kalotte, welche über einen kurzen Kontakt während des Schlages den Lastimpuls auf das System aufbringt. Die Antwort des Lastimpulses in Form einer frequenzabhängigen Schwingungsresonanz wird mit Hilfe eines Beschleunigungsgebers ermittelt. Um die Asphaltplatte in dem Frequenzspektrum der mechanischen Schwingungen des Reifens anregen zu können, wurde eine entsprechende harte Spitze verwendet. Die Messung der mechanischen Impedanz erfolgt nach dem in Bild 5.4-11 schematisch dargestellten Versuchsaufbau. Die Einleitung der Hammerimpulse erfolgt in Plattenmitte mit definierter Fallhöhe. Dabei hat sich eine elastische 3-Punkt-Lagerung der Asphaltplatten als sinnvoll herausgestellt. Die mit der mechanischen Impedanz messbare Nachgiebigkeit stellt bei Asphalt eine temperaturabhängige Größe dar und führt bei abnehmender Temperatur zu erhöhten Emissionswerten. Daher wurden die Messungen mit dem Impulshammer an unterschiedlich temperierten Asphaltproben (-10, 0, 10, 20 und 30 °C) durchgeführt.



**Bild 5.4-11:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zur Messung der mechanischen Impedanz mit dem Impulshammer

Zur Bestimmung der akustischen Wirkung der Oberflächen und zur Datengewinnung für die Weiterentwicklung des Rechenmodells SPERoN wurden an den Testfeldern auf dem Versuchsgelände Geilenkirchen folgende Messungen durchgeführt:<sup>1</sup>

- Messmethode der Kontrollierten Vorbeifahrt (CPB-Methode)
- Nahfeldmessverfahren (CPX-Messverfahren)

<sup>1</sup> Auf die Beschreibung der Messverfahren wird verzichtet. Diese sind in dem Bericht zum Teilvorhaben VI.II detailliert beschrieben.

Mit Hilfe des Nahfeldmessverfahrens für Reifen-Fahrbahn-Geräusche nach ISO/DIS 11819-2 (CPX-Messverfahren) werden Messungen der schalltechnischen Oberflächenqualität der Deckschichten vorgenommen.

- Texturmessung

Das eingesetzte berührungslose lasergestützte Messverfahren ermöglicht eine zerstörungsfreie Ermittlung der Oberflächenrauigkeit (Makrotextur) von Fahrbahndeckschichten im fertig eingebauten Zustand.

- Messung des Schallabsorptionsgrads

Für die Prüfung des Schallabsorptionsgrads von Probekörpern (Bohrkernen) steht das Verfahren mit Impedanzrohr nach DIN ISO 10534-2 zur Verfügung.

- Messung des Strömungswiderstands

Für die Prüfung des Strömungswiderstands von Probekörpern (Bohrkernen) steht das Verfahren nach DIN EN 29053 "Akustik - Materialien für akustische Anwendungen, Bestimmung des Strömungswiderstandes" zur Verfügung.

### 5.4.3.3 Konzepte elastischer Dämpfungsschichten

Im Rahmen des Teilvorhabens wurden die folgenden Konzepte einer elastischen Dämpfungsschicht in der Asphaltkonstruktion im Labormaßstab erprobt:

- Sonderasphalt mit gummimodifiziertem Bitumen (IA 5)
- Sonderasphalt mit gummimodifiziertem Gesteinskörnungsgemisch
- Bitumen-Gummi-Gemisch
- vorgefertigte Elastomerelemente

#### Sonderasphalt mit gummimodifiziertem Bitumen (IA 5)

Aus im Laufe des Forschungsprojektes gewonnenen Erkenntnissen wurde resultierend die Asphaltämpfungsschicht IA 5 entwickelt. Die Zusammensetzung der Asphaltämpfungsschichten IA 5 - dicht und IA 5 - offen entsprechen der Tabelle 5.4-5. Um einen möglichst hohen Modifizierungs- und auch Elastifizierungsgrad zu erreichen, wurde als Basis für die Modifikation ein Straßenbaubitumen der Sorte 160/220 verwendet, welches dann mit 30 M.-% Gummigranulat modifiziert wurde. Der Gesamtbindemittelgehalt betrug beim IA 5 - offen 7,0 M.-%, welcher sich aus 4,9 M.-% 160/220 (Anteil 70 %) und 2,1 M.-% Gummigranulat (Anteil 30 %) zusammensetzte. Beim IA 5 - dicht sind die Bitumen- und Gummigehalte im Vergleich zum IA 5 - offen verdoppelt worden. Zusätzlich wurden beim IA 5 - dicht zur Stabilisierung des Mörtels 0,5 M.-% Faserstoff beigemischt. Die Herstellung der Asphaltgemische erfolgte im Trockenverfahren gemäß den [E GmBA, 2012].

Asphaltkonzept		IA 5 - dicht	IA 5 - offen
<b>Zusammensetzung der Gesteinskörnung</b>			
Anteil Gesteinskörnung 2/5	[M.-%]	100	100
<b>Bindemittel und Zusätze</b>		160/220+30GG	160/220+30GG
Bitumen	[M.-%]	9,8	4,9
Gummigranulat	[M.-%]	4,2	2,1
Faserstoff	[M.-%]	0,5	-
<b>Mischguteigenschaften</b>			
Rohdichte der Asphaltprobe	[g/cm³]	2,271	2,525
Raumdichte MPK	[g/cm³]	2,103	1,935
Hohlraumgehalt MPK	[Vol.-%]	7,3	23,4
Bindemittelvolumen	[Vol.-%]	29,0	13,2

Tab. 5.4-5: Zusammensetzungen IA 5 - dicht und IA 5 - offen

### Sonderasphalt mit gummimodifiziertem Gesteinskörnungsgemisch

Weiterhin wurde als Dämpfungsschichtvariante Gummiasphalt eingesetzt. Bei diesem Mischgutkonzept wurden Gesteinskörnungen durch grobes Gummigranulat ersetzt.

Die Herstellung einer Variante einer elastischen Schicht in Form eines Sonderasphaltes 0/5 mit gummimodifiziertem Gesteinskörnungsgemisch erfolgte unter Zugabe von 8,1 M.-% Gummigranulat (2/5) und 0,4 M.-% Polyoctenamer; eine weitere Variante wurde unter Zugabe von 16,3 M.-% Gummigranulat (2/5) und 0,7 M.-% Polyoctenamer hergestellt. Als Bindemittel wurde ein polymermodifiziertes Bitumen der Sorte 45/80-50 A verwendet.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen der Varianten mit gummimodifiziertem Gesteinskörnungsgemisch wurde eine dritte Variante mit 26 M.-% Gummigranulat (2/4) unter Zugabe von 1 M.-% Polyoctenamer für den Einbau (in situ) auf den Erprobungsfeldern entwickelt, im Folgenden mit „26 % GG“ bezeichnet.

### Bitumen-Gummi-Gemisch

Des Weiteren wurden als elastische Schicht zwei Bitumen-Gummi-Gemische hergestellt. Die eine Mischung wurde aus 57,6 M.-% Gummimehl (0/2) mit 30 M.-% Gummigranulat (2/5) unter Zugabe von 3,9 M.-% Polyoctenamer hergestellt; eine weitere Variante wurde mit 57,5 M.-% Gummimehl (0/2) und 34,0 M.-% Gummigranulat (2/5) gefertigt.

### Vorgefertigte Elastomerelemente

Neben den Asphalt-Dämpfungsschichtkonzepten wurden zusätzlich noch zwei verschiedene reine Elastomerelemente eingesetzt. Voruntersuchungen zur Spannungsverteilung mittels PaDesTo ergaben, dass die gestellten Regupol-Dämmstoffe mit niedrigeren Steifigkeiten den bautechnischen Anforderungen (harte Asphalt-schicht auf weicher Unterlage) zur Spannungsaufnahme nicht genügen konnten. Lediglich Typen höherer Steifigkeitsgruppen waren in der Lage, die ermittelten Spannungen aufzunehmen.

Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Voruntersuchungen wurden einerseits die Regupol-Matte vom Typ XHT mit offener Struktur und die harte Regupol-Matte vom Typ MF mit geschlossener Struktur gewählt und weitergehend die Regupol-Matten vom Typ MIS 1 und Typ MIS 2 mit erhöhten dynamischen Steifigkeiten entwickelt (Bild 5.4-12 und Bild 5.4-13). Diese unterscheiden sich in ihrer Struktur dahingehend, dass das Regupol MIS 1 eine harte, dichte Struktur, während das Regupol MIS 2 eine weichere, offene Struktur aufweist. Im Folgenden werden diese Elastomerelemente mit „Regupol dicht“ bzw. Regupol 09 und „Regupol offen“ bzw. Regupol 19 bezeichnet.



**Bild 5.4-12:** Regupol MIS 1, Dicke: 6 mm



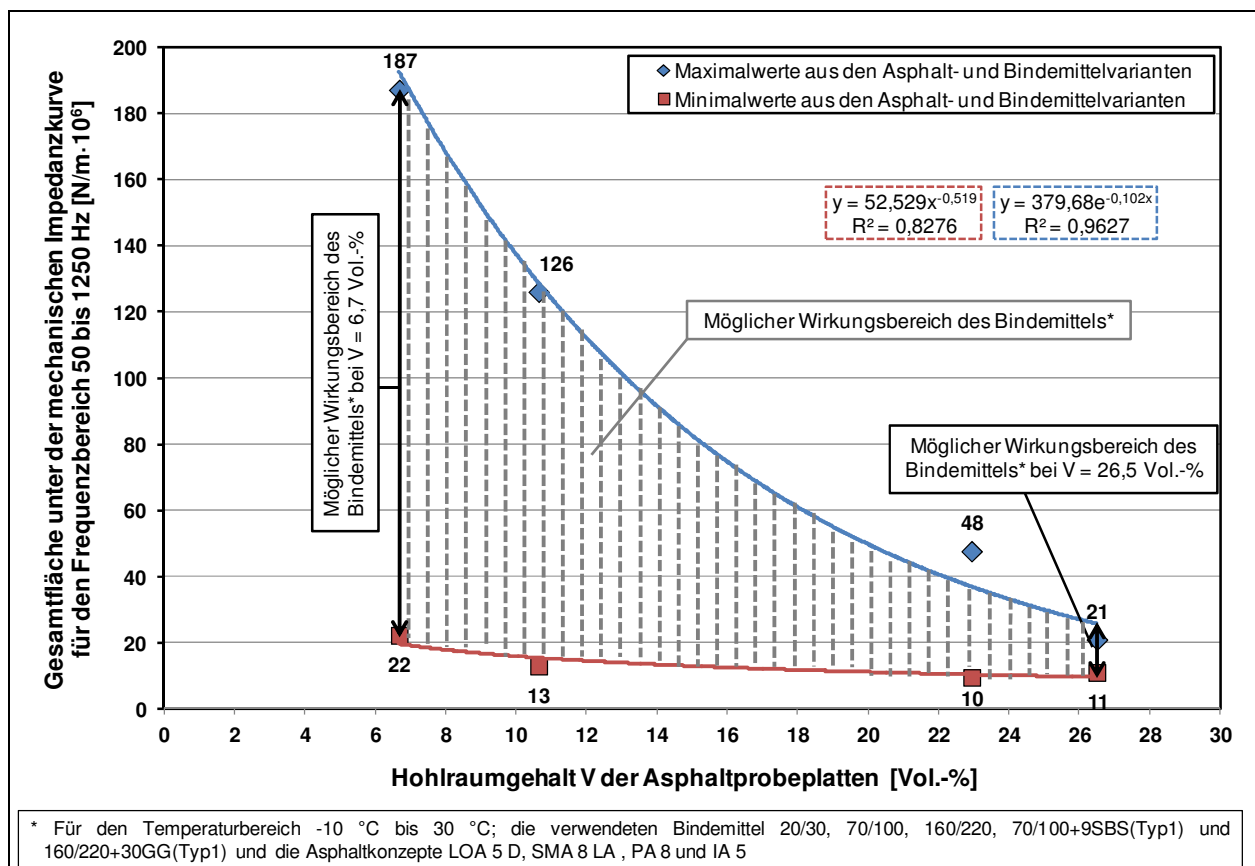
**Bild 5.4-13:** Regupol MIS 2, Dicke: 6 mm

## 5.4.4 Ergebnisse der Laboruntersuchungen

### 5.4.4.1 Untersuchungen an einzelnen Asphalt­dämpfungsschichten

Die im Labormaßstab durchgeführten Untersuchungen bezogen sich zunächst nur auf die einzelne Asphalt­dämpfungsschicht. Zur Umsetzung einer Asphalt­schicht mit hohem Dämpfungsverhalten wurden dichte und offene Asphalt­konzepte untersucht und dabei Gesteinskörnungen durch Gummigranulat substituiert und Bindemittel mit hohem Modifizierungsgrad an Gummigranulat und Polymeren eingesetzt.

Die Eigenschaften des Straßenoberbaues zur Dämpfung werden mit der Nachgiebigkeit beschrieben, die sich mit der Messung der mechanischen Impedanz mit Hilfe des Impulshammers quantifizieren lässt. Als Bewertungskriterium der mechanischen Impedanz in Bezug auf das Dämpfungspotenzial wurde die Gesamtimpedanz durch Integration der Fläche unter der Impedanzkurve herangezogen. Bild 5.4-14 zeigt die in diesem Zusammenhang ermittelten Flächenwerte in Abhängigkeit von dem jeweiligen Hohlraumgehalt der Asphalt­probekplatten als bindemittel- und temperaturabhängige Darstellung. Es zeigte sich, dass hohlraumreiche Schichten deutlich geringere Flächen unter der mechanischen Impedanzkurve erzeugen und somit akustisch prinzipiell günstiger sind als dichte Schichten. Diesbezüglich konnten die besten Ergebnisse für die Kombination aus einer hohlraumreichen Schicht und einem weichen Bindemittel mit hoher Gummimodifizierung erzielt werden. Mit dem weichen Basisbitumen 160/220 und einem hohen Modifizierungsgrad an Gummigranulat (30 M.-%) konnten somit vielversprechende Ergebnisse bezüglich des Dämpfungsverhaltens nachgewiesen werden.



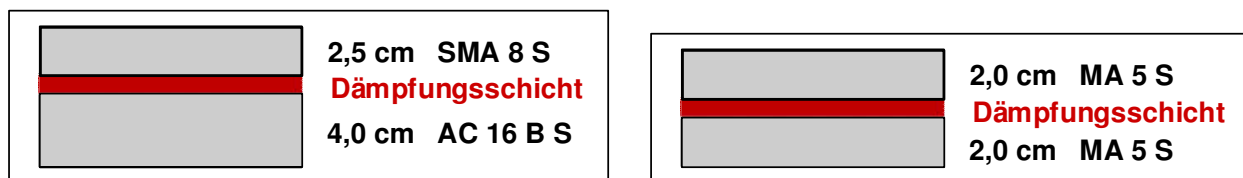
**Bild 5.4-14:** Möglicher Wirkungsbereich des Bindemittels bezogen auf die Gesamtläche unter der mechanischen Impedanzkurve in Abhängigkeit von dem Hohlraumgehalt der Asphaltplatten in Anlehnung an [10]

### 5.4.4.2 Untersuchungen an Mehrschichtsystemen

Um die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen an Asphalteinzelplatten in einem Schichtsystem zu überprüfen, wurden im Labormaßstab die Wirkung und der Einfluss der Asphalt­dämpfungsschichten in einem Mehrschichtsystem (drei- und zweischichtig) untersucht. Die Mehrschichtsysteme teilten sich auf in Schichtsysteme mit gleichen Schichtdicken, aber variierenden Eigenschaften der Dämpfungsschicht und Schichtsysteme mit variierenden Schichtdicken und variierenden Eigenschaften der Dämpfungsschichten. Die Mischgutzusammensetzung der Dämpfungsschichten wurde aus den vorhandenen Erkenntnissen ausgewählt.

Als Asphaltbinderschicht (unterste Schicht) wurde ein AC 16 B S mit einer Dicke von 4,0 cm eingesetzt, als Asphaltdeckschicht ein SMA 8 S mit einer Dicke von 2,5 cm. Für vergleichende Untersuchungen wurde ein Referenzsystem hergestellt, welches ausschließlich aus einem AC 16 B S (6,0 cm) und einem SMA 8 S (4,0 cm) besteht. Um einen Einfluss des Verdichtungsgrades weitestgehend auszuschließen, wurden im weiteren Untersuchungsprogramm dreikomponentige Schichtsysteme hergestellt, bei denen sowohl die unterste als auch die oberste Asphaltdeckschicht als Gussasphalt ausgeführt wurde. Die jeweiligen Dämpfungsschichten wurden ebenfalls so konzipiert, dass sie verdichtungsfrei eingebaut werden konnten.

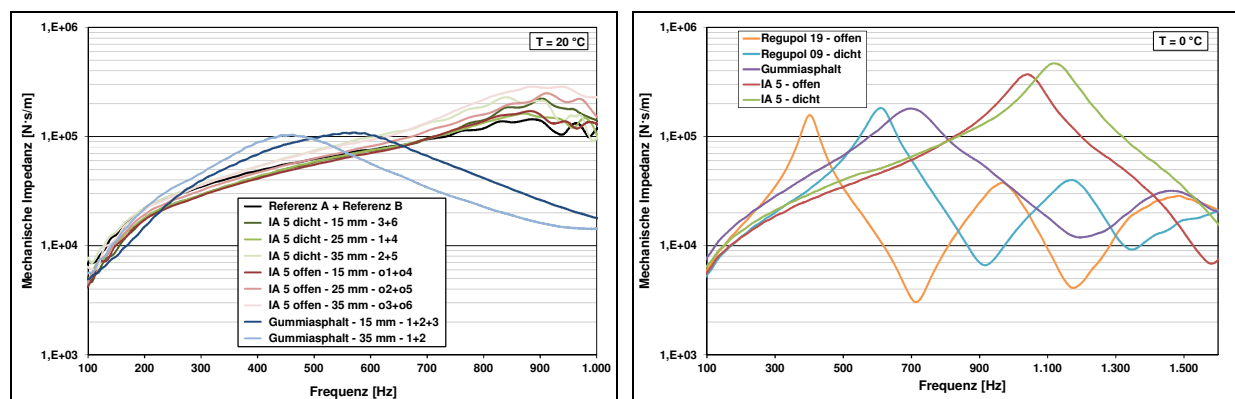
Im Rahmen des Untersuchungsprogrammes wurden an der Ruhr-Universität Bochum demnach folgende Mehrschichtsysteme untersucht:



**Bild 5.4-15:** Mehrschichtsystem, Teil 1 (links) und Mehrschichtsystem, Teil 2 (rechts) – Prinzipskizze

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen an Mehrschichtsystemen mit integrierter elastischer Dämpfungsschicht deuten darauf hin, dass im Vergleich zu Ergebnissen aus den Einzelplattenuntersuchungen keine eindeutigen Auswirkungen hinsichtlich der mechanischen Impedanz und des Lärminderungsverhaltens zu erreichen sind, wenn auch gleichzeitig ein bautechnisch akzeptables Konzept vorliegt.

Bei den mechanischen Impedanzen der dreikomponentigen Mehrschichtsysteme, Teil 1 (Bild 5.4-16, links) ist auffällig, dass sich das Mehrschichtsystem mit Gummi-asphalt als dämpfende Zwischenschicht mit einem positiven Dämpfungsverhalten deutlich von den übrigen Systemen abhebt. Die übrigen Verläufe zeigen ansonsten keine deutliche Rangfolge und Unterscheidung in der Wirksamkeit der Dämpfung über den dargestellten Frequenzverlauf. Die mechanischen Impedanzkurven der dreikomponentigen Mehrschichtsysteme, Teil 2 sind in Bild 5.4-16 (rechts) dargestellt.

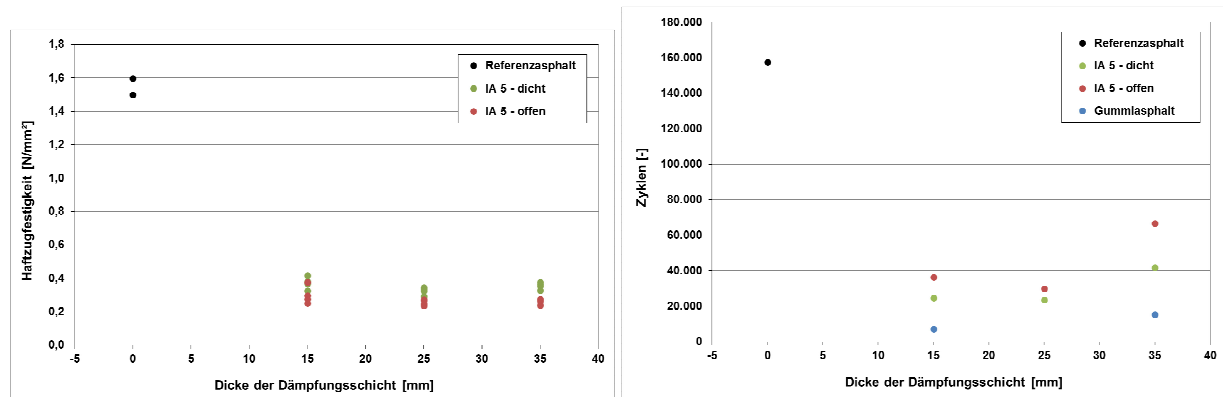


**Bild 5.4-16:** Mechanische Impedanz - bei 20 °C Mehrschichtsysteme, Teil 1 (links) und bei 0 °C Mehrschichtsysteme, Teil 2 (rechts)

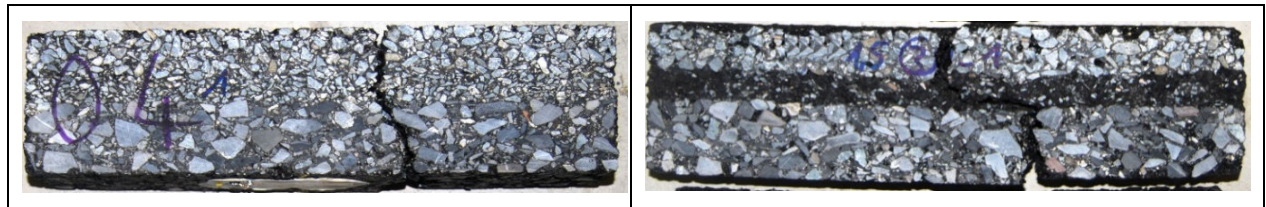
Die Haftzugfestigkeiten der Mehrschichtsysteme, Teil 1 sind in nachfolgendem Bild 5.4-17 (links) in Abhängigkeit von der jeweiligen Dämpfungsschicht und der zugehörigen Schichtdicke aufgeführt. Der Referenzasphalt ohne Dämpfungsschicht erreicht mit  $>1,0 \text{ N/mm}^2$  die größten Festigkeiten, während die Schichtsysteme mit dem IA 5 (dicht und offen) Werte unter  $0,5 \text{ N/mm}^2$  aufweisen. An den Mehrschichtsystemen mit Gummi-asphalt als Dämpfungsschicht konnten keine messbaren Haftzugfestigkeiten gemessen werden. Das Material hat aufgrund seines hohen Gummigranulatanteils und der dadurch sehr hohen Elastizität schon bei den Vorbohrungen nicht standgehalten.

Um die Mehrschichtsysteme vergleichend hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit (Vierpunkt-Biegeversuch) betrachten zu können, wurde die Anzahl der Zyklen ermittelt, bei der der erste Riss innerhalb des Systems eintrat (vgl. Bild 5.4-17, rechts), bestimmt. Der erste Riss tritt am Wendepunkt des Verlaufes der Verformung auf. Die Mehrschichtsysteme mit Gummi-asphalt versagen nach verhältnismäßig wenigen Zyklen der Belastung, gefolgt vom IA 5, dicht und offen. Der Referenzasphalt ohne Dämpfungsschicht hat mit ca. 160.000 Lastzyklen die deutlich höchste Dauerhaftigkeit.

Bild 5.4-18 dokumentiert exemplarisch zwei Bruchbilder infolge der aufgetragenen sinusförmigen Belastung. Auf der linken Seite ist der ausgebreitete Riss des Systems mit dem offenen IA 5 als Dämpfungsschicht dargestellt. Auf der rechten Seite ist das Bruchbild des Mehrschichtsystems mit Gummi-asphalt als Dämpfungsschicht abgebildet. Während bei dem System mit dem IA 5 - offen der Riss gleichmäßig durch alle drei Schichten verläuft, ist bei dem System mit Gummi-asphalt ein Rissbild entstanden, das durch die sehr hohe Elastizität und dem damit verbundenen schlechten Haftverbund zwischen Binder- und Dämpfungsschicht beeinflusst wurde.



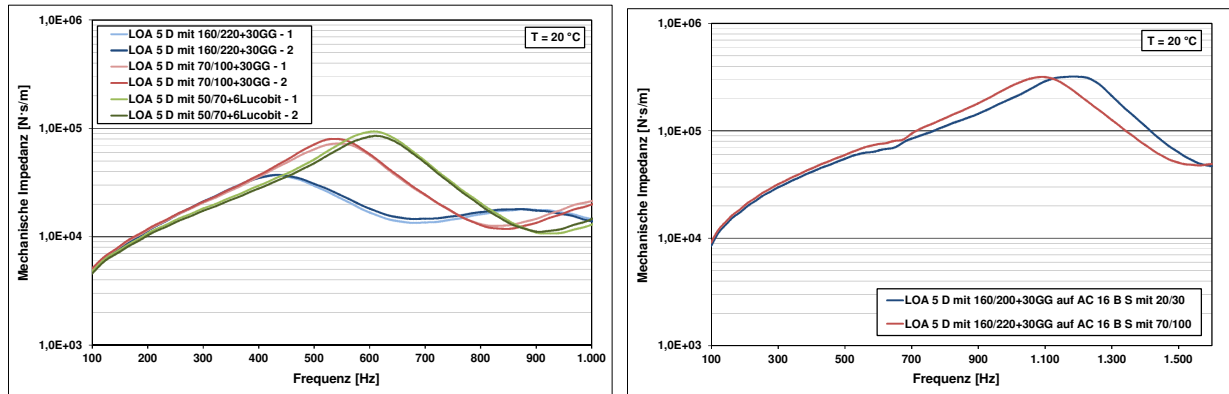
**Bild 5.4-17:** Haftzugfestigkeit (links) und Zyklen bis zum Riss (rechts) – Mehrschichtsysteme, Teil 1



**Bild 5.4-18:** Bruchbilder – Vierpunkt-Biegeversuch – Mehrschichtsysteme, Teil 1

Tendenziell lässt sich feststellen, dass mit den Elastomerelementen Regupol und dem Gummi-asphalt im Gegensatz zu den IA 5 - Konzepten ein hohes Dämpfungspotenzial zu erzielen ist, womit ein erhöhtes Lärm-minderungspotenzial erwartet wird. Allerdings konnten diese Konzepte den bautechnischen Anforderungen in den Laborprüfungen nicht hinreichend genügen. Die Asphalt-dämpfungsschichten IA 5 entsprechen im Gebrauchsverhalten am ehesten einem konventionellen Asphalt. Jedoch weisen diese Konzepte, integriert in einem Mehrschichtsystem, keine besondere lärmtechnische Wirkung auf. Als Fazit lässt sich aus den Untersuchungen an Mehrschichtsystemen mit einer elastischen Dämpfungsschicht als Zwischenschicht ableiten, dass bautechnisch und lärmtechnisch gleichermaßen wirksame Ansätze nicht erkennbar sind.

Daher wurden mit dreikomponentigen Schichtsystemen keine weiteren Prüfungen durchgeführt, sondern der Ansatz verfolgt, dass die Deckschicht als elastische Schicht ausgebildet wird. So wurden Zweischichtsysteme analysiert, bei denen eine elastische Schicht auf einer Binderschicht AC 16 B S aufgebracht wurde. Als elastische Schicht wurden drei verschiedene LOA 5 D - Varianten, die sich im Bindemittelkonzept unterscheiden, entwickelt. Zur Charakterisierung dieser Schicht wurden die einzelnen Varianten zunächst separat hinsichtlich ihrer lärmtechnischen Wirkung untersucht. Die Impedanzkurven demonstrieren eine deutliche Rangfolge über den Frequenzverlauf (Bild 5.4-19, links). So zeigt die Variante LOA 5 D mit 50/70+6Lucobit (entspricht 25/55-55 C) die größte mechanische Impedanz, wohingegen die geringste mechanische Impedanz die Variante LOA 5 D mit 160/220+30GG aufweist. Dazwischen ordnet sich der LOA 5 D mit 70/100+30GG ein. Es deutet sich somit an, dass mit dem weicheren Basisbitumen 160/220 und dem hohen Modifizierungsgrad von 30 M.-% eine weitere Optimierung des Dämpfungspotenzials zu erzielen ist, womit sich eine weitere Lärm-minderung ergeben könnte. Nach der Charakterisierung der Einzelplatten wurde das LOA 5 D - 2 - Konzept mit dem Bindemittel 160/220+30GG aufgrund der hohen dämpfenden Eigenschaften als potentiell wirksamste Variante der Dämpfungsschicht ausgewählt und in Kombination mit der Binderschicht als Zweischichtsystem durch Messung der mechanischen Impedanz mit dem Impulshammer untersucht. Zur Überprüfung des Einflusses von unterschiedlich steifer Unterlage, wurde die Binderschicht mit einem harten Bindemittel 20/30 und einem weichen Bindemittel 70/100 ausgebildet. Die zwei geprüften Systeme weisen ein nahezu identisches Verhalten in Bezug auf die Nachgiebigkeit in Form der mechanischen Impedanz auf (Bild 5.4-19, rechts).



**Bild 5.4-19:** Mechanische Impedanz – LOA 5 D für unterschiedliche Bindemittelvarianten (links) und Mehrschichtsysteme, Teil 3 (rechts)

Die Abschätzung des akustischen Potenzials der elastischen Schichten im Labor erfolgte an weiteren mehrschichtigen Probeplatten (Hansa-Nord-Labor), die nach separater Herstellung im Walzsektor-Verdichtungsgerät zusammengestellt wurden. Als Referenzaufbau wurden die folgenden konventionellen Asphalte zusammengefügt: Asphaltdeckschicht AC 8 D S ( $d = 3$  cm), Asphaltbinderschicht AC 16 B S ( $d = 6$  cm) und Asphalttragschicht AC 32 T S ( $d = 10$  cm). Des Weiteren wurden Probeplatten von elastischen Schichten mit gummimodifiziertem Gesteinskörnungsgemisch (Variante mit 8,1 M.-% Gummigranulat und 16,3 M.-% Gummigranulat) hergestellt. Durch die Einlage der elastischen Schichten in gefertigte Referenzaufbauten bzw. auch als oberste Schicht konnte der Einfluss relevanter Parameter (z. B. Lage, Härte, Dicke) der elastischen Schichten im Asphaltaufbau (im Labormaßstab) auf das Lärminderungspotenzial untersucht werden. Bild 5.4-20 zeigt beispielhaft einen Asphaltaufbau im Labormaßstab - hier mit einem vorgefertigten Elastomerelement.



**Bild 5.4-20:** Schichtsystem mit elastischer Zwischenschicht

Zur Quantifizierung der Dämpfungseigenschaften der so konzipierten Schichtsysteme im Labor wurde das Messsystem Shaker unter Aufbringen einer Vorlast zur Simulation eines PKW-Reifens verwendet. Ziel war es, die mechanische Eingangsimpedanz  $Z_E$  der Asphaltkonstruktion mit elastischer Schicht oberhalb von 500 Hz gegenüber der Eingangsimpedanz des Reifens zu minimieren.

Um den Herstellungsaufwand für die Probeplatten/Schichtaufbauten gering zu halten, sollte zunächst der Einfluss der Verklebung der Platten auf die Messergebnisse der Impedanzmessung untersucht werden. Die Untersuchungen der Schichtsysteme ohne Verklebung der einzelnen Schichten haben im Vergleich zu den Aufbauten „mit Verklebung“ eine geringere (bessere) mechanische Eingangsimpedanz ergeben. Bei den Schichtsystemen „ohne Verklebung“ kommt es aufgrund geometrischer Wölbung der einzelnen Platten (Schichten) zu punktuellen Auflagerungen und damit zu einer „Federwirkung“, die eine Verringerung der mechanischen Eingangsimpedanz zur Folge hat. Alle im Folgenden ermittelten Messwerte an Schichtaufbauten im Labormaßstab wurden an Schichtsystemen „ohne Verklebung“ durchgeführt und weisen damit geringfügig vorteilhaftere Werte der mechanischen Eingangsimpedanz (bessere Dämpfungseigenschaften) im Vergleich zu Schichtsystemen mit Verklebung der einzelnen Schichten auf.

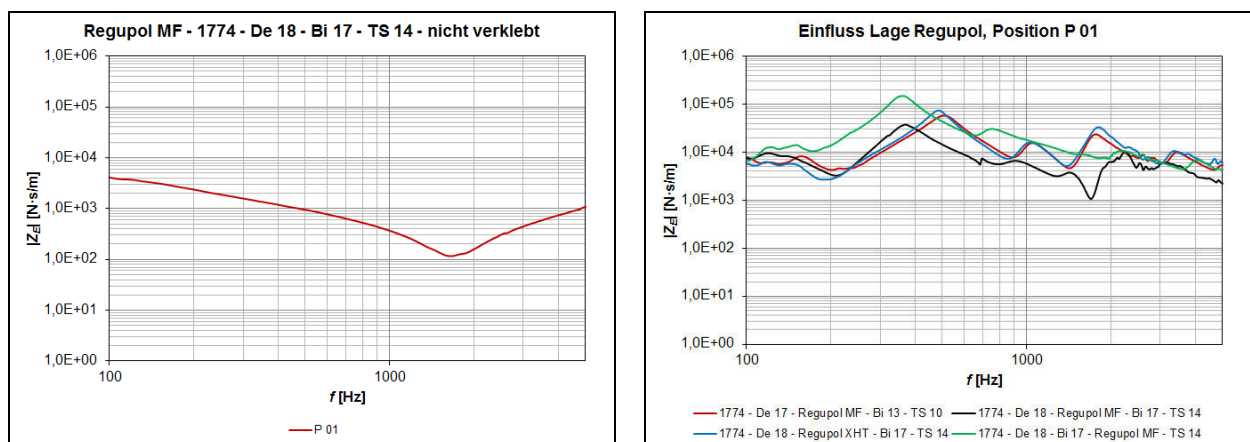


Des Weiteren sollte in Vorversuchen der Einfluss einer unterschiedlichen Positionierung der Masse sowie einer unterschiedlichen Belastung (Vorlast = simulierte Belastung durch PKW-Reifen; Belastung = Anordnung eines (Flächen-)Gewichtes auf der Asphaltdeckschicht zur Reduzierung geometrischer Wölbungen der Platten) von Schichtaufbauten mit elastischer Zwischenschicht bei der Messung der mechanischen Eingangsimpedanz geklärt werden. Dazu wurden drei unterschiedliche Belastungsvarianten getestet und die mechanische Eingangsimpedanz ermittelt (Vorlast (28 kg) ohne Belastung der Asphaltdeckschicht, Vorlast (28 kg) mit Belastung der Asphaltdeckschicht (20 kg) und reduzierter Vorlast (8 kg) mit Belastung der Asphaltdeckschicht (20 kg)). Die Ergebnisse zeigen, dass der ermittelte Wert der mechanischen Eingangsimpedanz praktisch unabhängig von der aufgetragenen Größe der Vorlast bzw. Belastung ist.

In den nachfolgenden Bildern sind die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluss der Parameter: Lage, Härte, Dicke und Anzahl von elastischen Schichten in Schichtaufbauten (Labormaßstab) auf das Messergebnis der mechanischen Eingangsimpedanz wiedergegeben.

Bild 5.4-21 zeigt u. a. den Einfluss der Lage einer elastischen Schicht im Schichtsystem auf eine wirksame Reduzierung der mechanischen Eingangsimpedanz, hier anhand einer vorgefertigten Regupol-Matte vom Typ MF als elastische Schicht. In Bild 5.4-21 (links) ist das Ergebnis der mechanischen Eingangsimpedanz mit Regupol MF als oberste Lage des Schichtsystems dargestellt. In Bild 5.4-21 (rechts) wurde Regupol MF als Unterlage der Asphaltdeckschicht (schwarze Linie) und unterhalb der Asphaltdeck-, Asphaltbinderschicht (grüne Linie) angeordnet. Der Vergleich der Kurvenverläufe zeigt eine Verringerung der mechanischen Eingangsimpedanz je höher die elastische Schicht im Schichtsystem angeordnet ist.

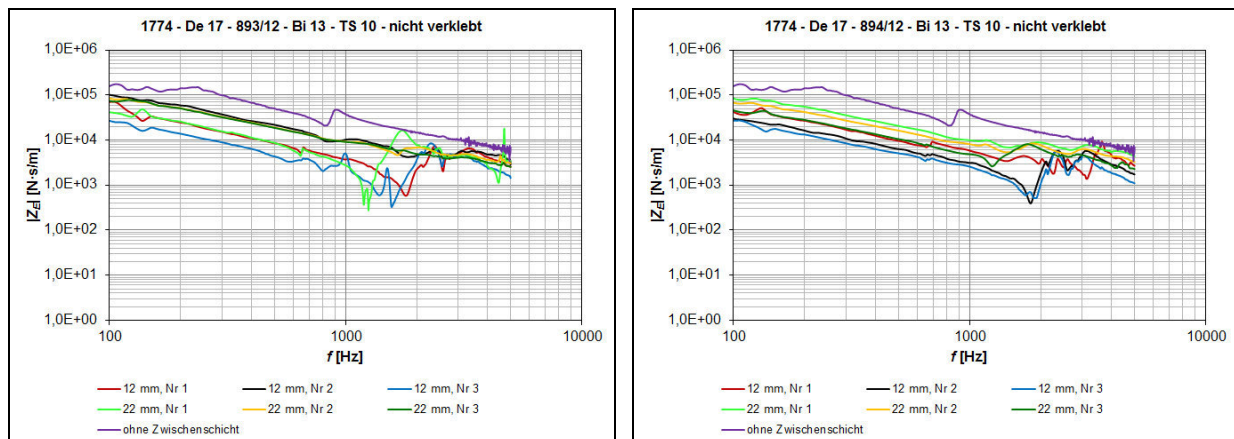
Zur Überprüfung des Einflusses der Härte der elastischen Schicht auf das Ergebnis der mechanischen Eingangsimpedanz wurden u. a. die zwei Regupol-Matten vom Typ XHT (weich) und Typ MF (hart) mit deutlich unterschiedlichen Steifigkeiten verwendet. Der Kurvenverlauf von Regupol XHT (weich) als oberste Lage weist eine deutlich geringere mechanische Eingangsimpedanz im Vergleich zu Regupol MF (hart) auf. Bezüglich der Messergebnisse mit Regupol-Matten als Deckschicht soll darauf hingewiesen werden, dass die ermittelte Resonanzfrequenz jedoch nicht die Interaktion zwischen Asphalt und elastischer Schicht zeigt, sondern die Interaktion zwischen schwingender Masse des Shakers und der elastischen Schicht. Der genannte Aspekt ist bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu berücksichtigen.



**Bild 5.4-21:** Mechanische Eingangsimpedanz mit Regupol MF als oberste Lage des Schichtsystems (links) und Mechanische Eingangsimpedanz mit Regupol MF als Unterlage der Asphaltdeckschicht und als Unterlage der Asphaltdeckschicht, Asphaltbinderschicht (rechts)

Die Untersuchungen an Schichtaufbauten im Labormaßstab haben weiterhin zu der Erkenntnis geführt, dass eine Verringerung der dynamischen Steifigkeit der elastischen Schicht bzw. eine Erhöhung der Dicke der elastischen Schicht eine Verringerung der Resonanzfrequenz zur Folge hat – es kommt zu einer Verringerung der mechanischen Eingangsimpedanz oberhalb des massedominierenden Frequenzbereiches.

Die Auswirkungen einer zunehmenden Dicke der elastischen Schicht im Schichtsystem auf die mechanische Eingangsimpedanz sind in Bild 5.4-22 wiedergegeben. Hier wurden zum einen die Sonderasphalte 8,1 M.-% GG und 16,3 M.-% GG als Unterlage der Deckschicht in jeweils 12 mm und 22 mm Dicke gemessen. Bei den Sonderasphalten 8,1 % GG und 16,3 % GG (elastische Schichten) führt die Modifizierung mit Gummi offensichtlich noch nicht zu der gewünschten elastischen Wirkung im Schichtsystem – die Erhöhung der Dicke der „elastischen“ Schicht führt hier vermutlich zur Erhöhung der Steifigkeit des Systems. Die Erhöhung der Dicke der Regupol-Matte XHT im Schichtaufbau führte zu nicht eindeutigen Ergebnissen mit unterschiedlichen Tendenzen.



**Bild 5.4-22:** Mechanische Eingangsimpedanz des Schichtsystems mit Sonderasphalt 8,1 M.-% GG als Unterlage der Asphaltdeckschicht in 12 mm / 22 mm Dicke (links) und  
Mechanische Eingangsimpedanz des Schichtsystems mit Sonderasphalt 16,3 M.-% GG als Unterlage der Asphaltdeckschicht in 12 mm / 22 mm Dicke (rechts)

Mit dem Ziel einer Reduzierung der mechanischen Eingangsimpedanz an Schichtsystemen wurden weitere Messungen zum Einfluss der Anzahl elastischer Schichten im Schichtsystem durchgeführt. Des Weiteren wurde die Anordnung einer zweiten elastischen Schicht im Schichtaufbau lärmtechnisch untersucht. Die Anordnung der Sonderasphalte 8,1 % GG und 16,3 % GG (elastische Schichten) als Deckschicht mit darunter liegender elastischer Schicht (hier: Regupol MF) im Schichtaufbau zeigen keine signifikante Wirkung in Form einer Reduzierung der mechanischen Impedanz. Auch hier zeigt sich keine „elastische“ Wirkung der Sonderasphalte 8,1 % GG und 16,3 % GG.

Als Ergebnis der akustischen Messungen der mechanischen Eingangsimpedanz an Schichtsystemen, die im Labormaßstab hergestellt worden sind, haben sich die folgenden Punkte im Hinblick auf die lärmmindernde Wirkung als am wirkungsvollsten herausgestellt:

- Anordnung der elastischen Schicht im oberen Bereich des Schichtsystems,
- Minimierung der Biegesteifigkeit der Asphaltdeckschicht,
- Minimierung der flächenbezogenen Masse der Asphaltdeckschicht,
- Minimierung der Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems aus Deckschicht (Auflast) und elastischer Schicht (Feder) durch Minimierung der dynamischen Steifigkeit der elastischen Schicht.

#### 5.4.4.3 Voruntersuchungen für die Errichtung der Erprobungsfelder

Zur Charakterisierung der akustischen Eigenschaften erster Probekörper der Ruhr-Universität Bochum wurden im Berichtszeitraum Messungen des textur- und hohlrauminduzierten Strömungswiderstands und der mechanischen Impedanz mit dem Shaker durchgeführt. Messungen der Oberflächentextur wurden von RUB selbst vorgenommen. In Tab. 5.4-6 bis Tab. 5.4-8 sind die Deckschichtkonzepte, Bindemittel und Gesteinsarten der Probekörper aufgeführt.

Asphaltdeckschichtkonzepte			Verwendetes Bindemittel
LOA 5 D	Lärmoptimierte Asphaltdeckschicht 0/5	dicht	20/30
			25/55-55 A
			160/220 + 30 % Gummigranulat
SMA 8 LA	Lärmarter Splittmastixasphalt 0/8	semi-porös	20/30
			25/55-55 A
			160/220 + 30 % Gummigranulat
PA 8	Offenporige Asphaltdeckschicht 0/8	offenporig	20/30
			25/55-55 A
			160/220 + 50 % Gummigranulat

**Tab. 5.4-6:** Probekörper der Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswegebau für Impedanzmessungen mit dem Shaker

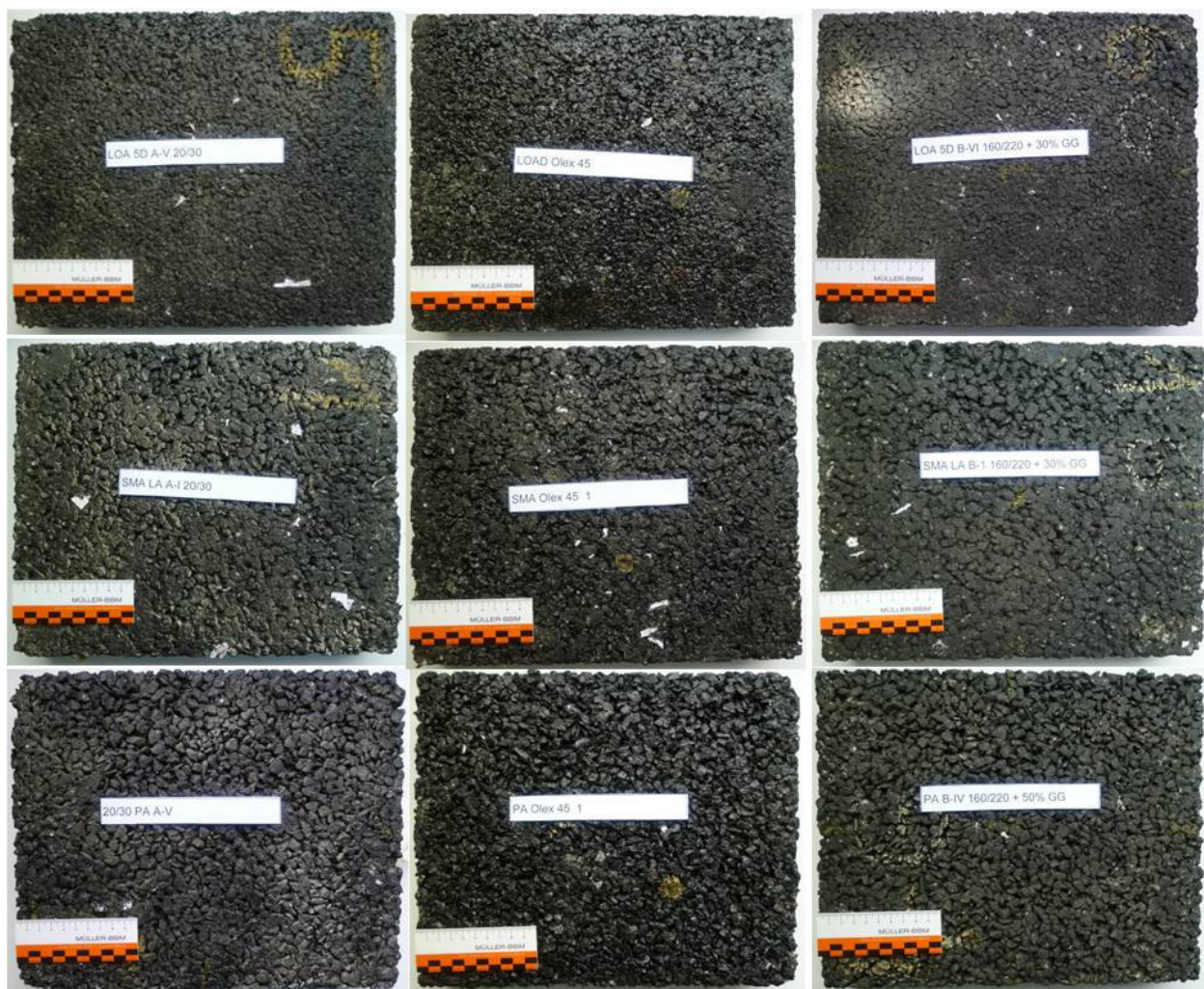
Bezeichnung	Beschreibung
20/30	Straßenbaubitumen
25/55-55 A	Gebrauchsfertiges polymermodifiziertes Bitumen
160/220 + 50 % Gummigranulat	Hergestelltes gummi-modifiziertes Bitumen

**Tab. 5.4-7:** Für die Herstellung der Probekörper verwendete Bindemittel

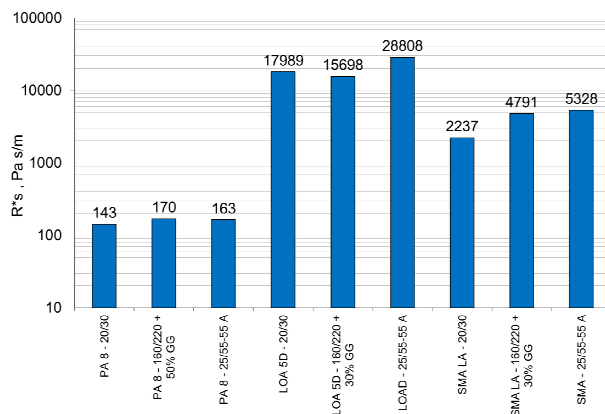
Kornklasse [mm]	Feine Gesteinskörnung	Grobe Gesteinskörnung
< 0,063	Kalksteinmehl	---
0/2	Moräne (gewaschen)	---
2/5	---	Grauwacke
5/8	---	Grauwacke

**Tab. 5.4-8:** Für die Herstellung der Probekörper verwendete Gesteinsarten

Die Oberflächen der Probekörper sind in Bild 5.4-23 dargestellt.



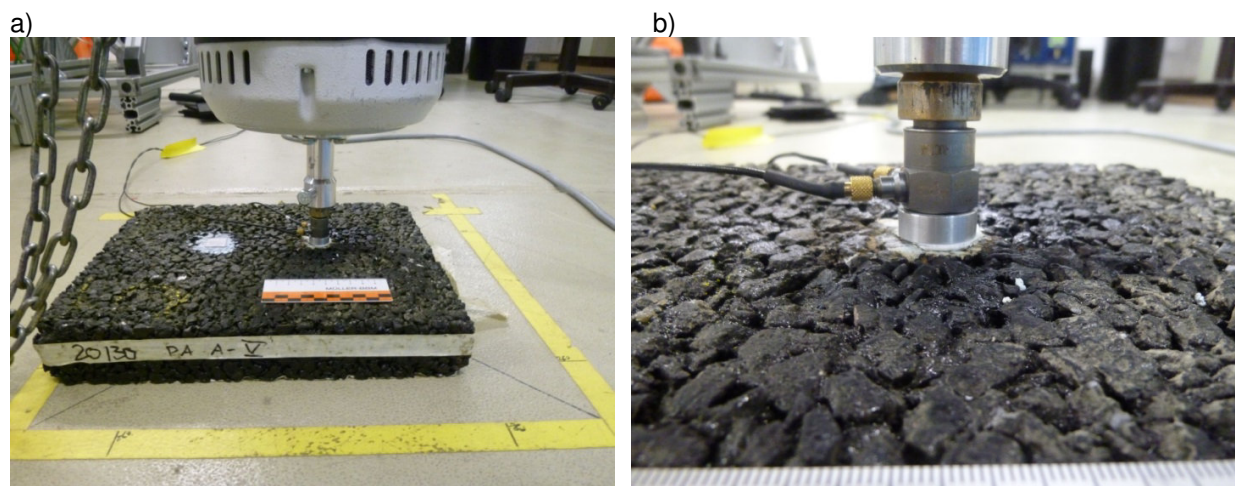
**Bild 5.4-23:** Oberflächen der Probekörper



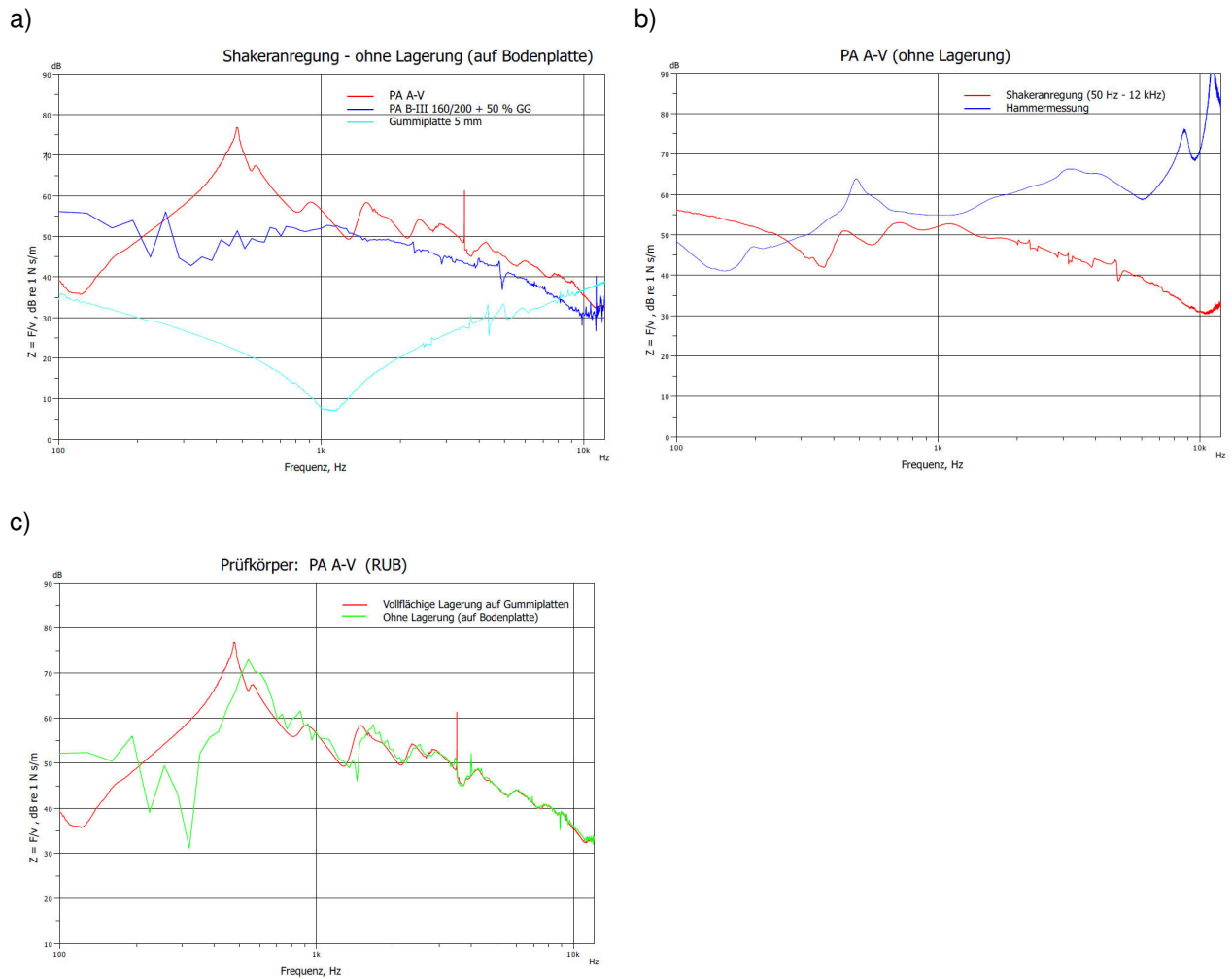
**Bild 5.4-24:** Textur- und hohlrauminduzierter Strömungswiderstand der Probekörper mit elastischen Deckschichtmodifizierungen. Die Bezeichnungen der Probekörper an der horizontalen Achse entsprechen denen in Tab. 5.4-6

In Bild 5.4-24 sind die gemessenen Strömungswiderstände der Probekörper dargestellt. Erwartungsgemäß bestimmt der Deckschichttyp das Niveau des Strömungswiderstandes, wobei die Werte für die offenporigen Probekörper mit etwa 160 Pa s/m am niedrigsten ausfallen. Die Werte sind mit denen anderer offenporiger Deckschichten vergleichbar. Die Strömungswiderstände für die semi-porösen Mischgutkonzepte liegen mit Werten zwischen rund 2.200 Pa s/m und rund 5.400 Pa s/m um eine Größenordnung höher als die offenporigen Probekörper und um eine Größenordnung niedriger als die dichten Probekörper. Die Bindemittelvariationen innerhalb der Deckschichttypen haben dagegen kaum einen Einfluss auf den Strömungswiderstand. Sie fällt beim SMA LA mit einer Verdoppelung des Wertes (Probekörper mit Bindemittel 25/55-55 A im Vergleich zu Bindemittel 20/30) am größten aus. SPERoN-Berechnungen zeigen, dass sich dieser Unterschied im Strömungswiderstand bei diesem Deckschichttyp akustisch mit einem Unterschied von rund 1 dB im Reifen-Fahrbahn-Geräusch auswirkt, wobei der niedrigere Strömungswiderstand zu einem höheren Pegel der air pumping Komponente führt. Die Texturunterschiede sind klein und wirken sich kaum auf die mechanische Komponente des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs aus. Niedrigere Strömungswiderstände zeigen grundsätzlich auch eine offenzelligere Hohlraumstruktur an, die das Schallabsorptionsvermögen dieses Fahrbahnbelagstyps verbessert. Ein höherer Schallabsorptionsgrad führt zu einer Verminderung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche, was bei obiger Betrachtung unberücksichtigt geblieben ist.

Bild 5.4-25 zeigt den Versuchsaufbau für die Messungen der mechanischen Impedanz mit Shakeranregung.



**Bild 5.4-25:** Versuchsaufbau zur Messung der mechanischen Impedanz mit Shakeranregung. a) Aufhängung des Schwingerreger über dem Probekörper; b) Ankopplung des Impedanzmesskopfs an die Oberfläche des Asphaltprobekörpers



**Bild 5.4-26:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  der Probekörper mit elastischen Deckschichtmodifizierungen. a) Impedanzfrequenzgänge für die Probekörper PA 8 – 20/30, PA 8 – 160/220 + 50 % Gummigranulat und eine 5 mm dicke Matte aus Regupol 8012; b) Impedanzfrequenzgänge bei Shakeranregung und Impedanzhammeranregung des Probekörpers PA 8 – 20/30; c) Impedanzfrequenzgänge bei Lagerung des Probekörpers PA 8 – 20/30 lose auf ebenem Betonuntergrund und lose auf elastischen Matten (Regupol 8012)

Bild 5.4-26 zeigt Ergebnisse der Messungen der mechanischen Impedanz  $Z$  an Probekörpern der RUB im Vergleich mit unterschiedlichen Messkonfigurationen. In Teilabbildung a) wird der Frequenzverlauf der mechanischen Impedanz des Prüfkörpers PA 8 – 20/30 mit dem des Prüfkörpers PA 8 – 160/220 + 50 % Gummigranulat und dem einer 5 mm dicken Platte aus elastischem Material des Typs Regupol 8012 verglichen. Der Frequenzverlauf der mechanischen Impedanz für die 5 mm dicke Regupol-Platte zeigt bei der gewählten Konfiguration für Vorlast und bewegte Masse eine Resonanzfrequenz von etwas mehr als 1 kHz, wobei die Impedanz von tiefen Frequenzen her mit steigender Frequenz abnimmt, was einem Steifigkeitsverhalten entspricht. Oberhalb der Resonanz nimmt die Impedanz stetig zu, die Impedanz zeigt Masseverhalten, die Masse wird mit zunehmender Frequenz immer unbeweglicher. Die Frequenzverläufe für die beiden PA Prüfkörper zeigen bei der gewählten losen Lagerung auf ebenem Betonuntergrund bis 1 kHz undefiniertes, zufälliges Verhalten. Erst oberhalb von 1 kHz wird der Steifigkeitsverlauf deutlich. Bei dem Probekörper PA 8 – 20/30 wird die Resonanzstelle am Ende des betrachteten Frequenzbereichs bei etwas mehr als 10 kHz gerade noch sichtbar. Mit dem Bindemittel mit einem Anteil von 50 % Gummigranulat liegt die Resonanzfrequenz knapp oberhalb von 10 kHz und geringfügig unterhalb der des Probekörpers PA 8 – 20/30.

Der Vergleich in Teilabbildung b) zwischen der Messung der mechanischen Impedanz mit Shakeranregung und mit Anregung durch einen Impedanzhammer am selben Probekörper PA 8 – 20/30 zeigt, dass die Kräfteinleitung ohne Übersteuerung der Kraftmesszelle oberhalb von 1 kHz zu gering ist, um die Impedanz nachvollziehbar bestimmen zu können. Teilabbildung c) zeigt den Vergleich von Messergebnissen bei unterschiedlicher Lagerung des Probekörpers PA 8 – 20/30. Unterschiede der mechanischen Impedanz gehen bei Frequenzen unterhalb von 1 kHz nur auf Unterschiede in der Lagerung zurück.

Die Ergebnisse der Impedanzmessungen mit Shakeranregung zeigen, dass die Lagerung der Asphaltprobekörper bei Frequenzen unterhalb von 1 kHz eine ausschlaggebende Rolle spielt und Unterschiede sowie Merkmale des Impedanzverlaufs in diesem Frequenzbereich nicht auf Unterschiede der mechanischen Eigenschaften der Probekörper selbst zurückgeführt werden können. Bei Messungen mit dem Impedanzhammer stellt die Kraftimpulsenergie bei hohen Frequenzen einen limitierenden Faktor für diese Messmethode dar.

Im Anhang sind die Ergebnisse der Impedanzmessungen an allen Probekörpern dargestellt. Die Messungen wurden je Probekörper an drei Stellen durchgeführt. Die Probekörper waren dabei auf einer elastischen Schicht aus Regupol gelagert.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Messergebnisse aufgrund der endlichen Größe der Probekörper stark durch nicht zu rekonstruierende Eigenfrequenzen beeinflusst sind. Sie können unregelmäßig verteilt sein und sind unterschiedlich gedämpft. Die Impedanzniveaus im mittleren Frequenzbereich stimmen auch in keiner Weise mit dem Erwartungswert von 75 dB bis 85 dB für nicht elastifizierte Asphaltdeckschichten überein. Aus diesen Gründen mussten die Untersuchungen den Feldversuchen überlassen werden.

#### **5.4.5 Bau von Erprobungsfeldern**

Da die gewonnenen Erkenntnisse ausschließlich auf im Labor durchgeführten, indirekten Lärmessungen durch die Messung der mechanischen Impedanz mit dem Impulshammer und dem Shaker und Untersuchungen, die die bautechnischen Eigenschaften charakterisieren, beruhen, sollte ein Abgleich der Ergebnisse anhand von in situ-Messungen durchgeführt werden.

Für erste Praxisversuche, bei denen die Reduktion des emittierten Lärms durch das Einbringen einer dämpfenden Zwischenschicht unter der Asphaltoberdecke erfolgen sollte, wurden auf der NATO Air Base Geilenkirchen acht Erprobungsfelder mit unterschiedlichen Dämpfungsschichten eingebaut und untersucht. Das Ziel der Untersuchungen auf den Erprobungsfeldern war es, die bestmögliche Schichtzusammenstellung bezüglich der mechanischen Impedanz zu finden. Bild 5.4-27 gibt einen Überblick über den Aufbau der einzelnen Felder und die eingesetzten Varianten der möglichen Dämpfungsschichten. Damit die Ergebnisse dieser Felder untereinander vergleichbar sind und um den Einfluss der Oberflächentextur hinsichtlich der Lärmessungen zu minimieren, sind die Zusammensetzungen von Deckschicht und Binderschicht überall identisch. Nur die Abmessungen und die Zusammensetzungen der Dämpfungsschicht wurden variiert. Damit jedes Erprobungsfeld dieselbe Bauhöhe erreicht, ist die Dicke der Asphaltbinderschicht mit der Dicke der dämpfenden Zwischenschicht verknüpft. Die Summe der Dicken beider Schichten ergibt immer 65 mm. Jedes Erprobungsfeld ist dabei 3 m breit und 60 m lang. Die Asphaltbinderschicht besteht dabei aus Asphaltbeton mit einem Größtkorn von 16 mm zur Verwendung für Verkehrsflächen mit besonderer Beanspruchung (AC 16 B S). Die Deckschicht besteht aus 25 mm Splittmastixasphalt mit einem Größtkorn von 5 mm ebenfalls zur Verwendung für Verkehrsflächen mit besonderer Beanspruchung (SMA 5 S). Eines der Felder wurde zu Vergleichszwecken ohne Dämpfungsschicht hergestellt. Dort besteht die Fahrbahn nur aus der Deckschicht und einer 65 mm dicken Binderschicht (Feld R - Referenz).

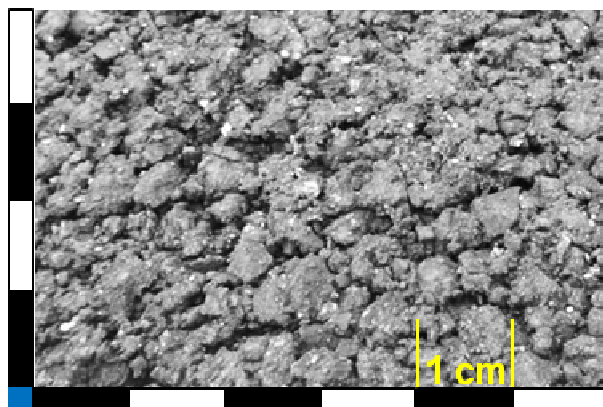
	60 m				60 m			
3 m	<b>RUB</b> IA 5 - dicht	2,5 cm SMA 5 1,5 cm IA 5 - dicht 5,0 cm AC 16 B S	<b>Feld 6</b>	<b>RUB</b> IA 5 - offen	2,5 cm SMA 5 1,5 cm IA 5 - offen 5,0 cm AC 16 B S	<b>Feld 7</b>		
3 m	<b>HNL/KEMNA</b> Sonderasphalt	2,5 cm SMA 5 1,5 cm Sonderasphalt 5,0 cm AC 16 B S	<b>Feld 4</b>	<b>HNL/KEMNA</b> Sonderasphalt	2,5 cm SMA 5 2,5 cm Sonderasphalt 4,0 cm AC 16 B S	<b>Feld 5</b>		
3 m	<b>Referenz</b>	2,5 cm SMA 5 6,5 cm AC 16 B S	<b>Feld R</b>	<b>HNL/KEMNA</b> Bitumen- Gummi- Gemisch	2,5 cm SMA 5 0,6 cm Bit.-Gummi-G. 5,9 cm AC 16 B S	<b>Feld 3</b>		
3 m	<b>BSW</b> Regupol - dicht Version I	2,5 cm SMA 5 0,6 cm Regupol I 5,9 cm AC 16 B S	<b>Feld 2</b>	<b>BSW</b> Regupol - offen Version II	2,5 cm SMA 5 0,6 cm Regupol II 5,9 cm AC 16 B S	<b>Feld 1</b>		

**Bild 5.4-27:** Aufbau der Erprobungsfelder – NATO Air Base Geilenkirchen

Im Bereich der Erprobungsfelder wurde zunächst der vorhandene, alte Asphaltbau durch Fräsen in einer Tiefe von 90 mm entfernt. Nach dem Einbau einer Asphaltbinderschicht (Dicke abhängig von der darüber einzubauenden elastischen Dämpfungsschicht) wurden die Dämpfungsschichten eingebaut. Anders als beim Einbau der elastischen Dämpfungsschichten im Bereich der Felder 3 bis 7 erfolgte der Einbau der vorgefertigten Elastomerelemente (Feld 1 und 2) auf der Asphaltbinderschicht per Hand durch stoßweises Abrollen / Verlegen der Matten (Mattengröße ca. 1,25 m Breite und ca. 30 m Länge). Zur Herstellung des Schichtenverbundes wurde bei den Feldern 1 bis 3 (vorgefertigte Elastomerelemente, Bitumen-Gummi-Gemisch) ein polymermodifiziertes Bitumen der Sorte 25/55-55 A eingesetzt; bei den Feldern 4 bis 8 kam eine polymermodifizierte Bitumenemulsion C60BP1-S zur Anwendung. Die Verdichtung der elastischen Schichten sowie der Asphaltdeckschicht SMA 5 S erfolgte durch eine Kombination aus statischer und oszillierender Verdichtung. Insbesondere beim Einbau der Asphaltdeckschicht kam eine oszillierende Verdichtung zum Tragen, um möglichen Problemen der Verdichtbarkeit einer Asphaltsschicht auf elastischer Unterlage (Dämpfungsschicht) zu begegnen.

In Bild 5.4-28 sind die Oberflächenstrukturen des Sonderasphaltes 26 % GG (Feld 4 / 5), des Sonderasphaltes IA 5 - offen (Feld 7) und des Bitumen-Gummi-Gemisches (Feld 3) abgebildet.

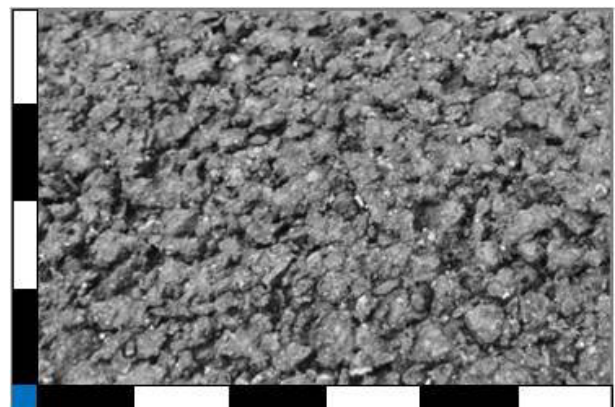
a)



Feld 1 – SMA 5 auf BSW Regupol II

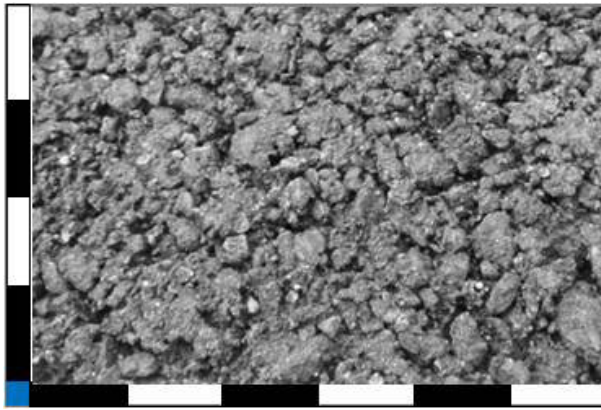
c)

b)



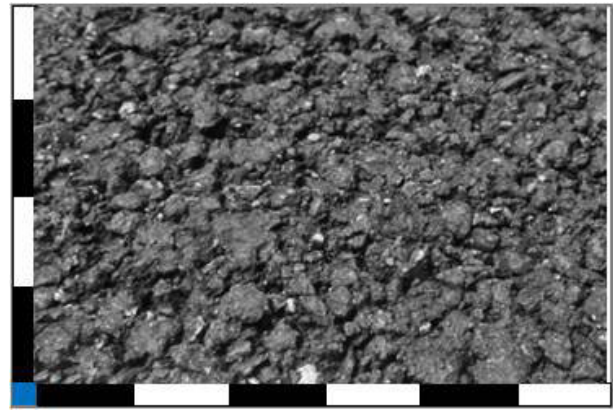
Feld 2 – SMA 5 auf BSW Regupol II

d)



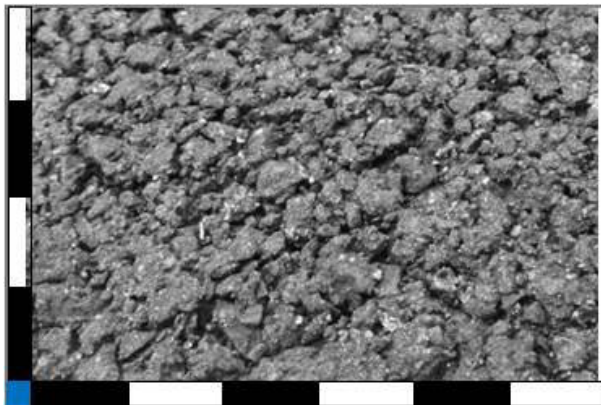
Feld 3 – SMA 5 mit HNL Einstreugummi

e)



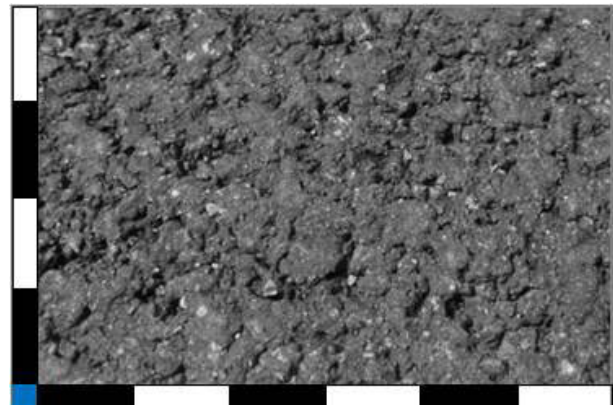
Feld 4 – SMA 5 auf 1,5 cm HNL Spezialasphalt

f)



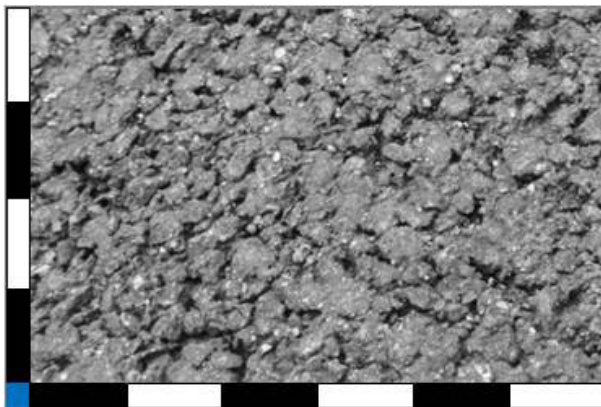
Feld 5 – SMA 5 auf 2,5 cm HNL Spezialasphalt

g)

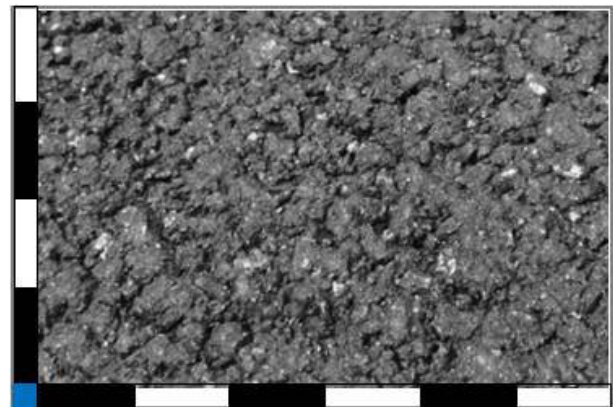


Feld 6 – SMA 5 RUB IA5 dicht

h)



Feld 7 – SMA 5 RUB IA5 offen



Referenzfeld – SMA 5 Standardbauweise

**Bild 5.4-28:** Fotos der Oberflächen der Testfelder auf dem Versuchsgelände Geilenkirchen

Der Einbau der Erprobungsfelder auf dem Gelände der NATO Air Base ist in folgenden Bildern exemplarisch dokumentiert.





**Bild 5.4-29:** Einbau der Erprobungsfelder – NATO Air Base Geilenkirchen

#### 5.4.5.1 Bautechnische Untersuchungen

Im weiteren Schritt erfolgen die Untersuchungen zur Charakterisierung der Materialeigenschaften aus bautechnischer Sicht anhand von detaillierten Bohrkernuntersuchungen. Zur Ermittlung der konventionellen Asphalteeigenschaften sowie von Performance-Kennwerten wurden Asphaltmischgutproben sowie Bohrkernkerne aus den Erprobungsfeldern entnommen. In der Tabelle 5.4-5 sind die für die einzelnen Prüfungen erforderliche Bohrkernanzahl sowie eine Zuordnung zu den durchgeführten Prüfungen dargestellt.

Asphaltmischgutproben wurden von den „konventionellen“ Asphalten (SMA 5 S, AC 16 B S) sowie von den Sonderasphalten (26 % GG, IA 5 - dicht, IA 5 - offen) entnommen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich die Entnahmen der Bohrkernkerne in den Erprobungsfeldern 1, 2, 4 und 5 mit elastischer Zwischenschicht nach Aussagen der BAST, die die Entnahmen durchgeführt hat, als schwierig erwiesen hat. Aufgrund der Verklebung des Gummis in der Bohrkrone konnten die Bohrkernkerne teilweise nur mit erhöhter Beanspruchung bzw. auch gar nicht entnommen werden. Die Untersuchungen zur Kälteflexibilität wurden entgegen der Planung aus Tabelle 5.4-9 an Prüfkörpern aus Labormischungen hergestellt. Gleichmaßen wurden die Prüfkörper zur Untersuchung des Steifigkeitsverhaltens aus Labormischungen hergestellt. Bei der Herstellung der walzsektor-verdichteten Asphalt-Probepfatten sollten die Verdichtungsgrade denen der eingebauten Schichten entsprechen. Die vorgesehenen Verdichtungsgrade konnten aufgrund des Einflusses des Gummianteils auf die Verdichtungsleistung nicht zielgenau erreicht werden.

Prüfung	Vorschrift/Norm	Anzahl der Bohrkerne	BK – ø [mm]
Verdichtung	[TP Asphalt-StB, Teil 8, 2012]	2	150
Schichtenverbund	[TP Asphalt-StB, Teil 80, 2012]	2	150
Steifigkeitsverhalten	[AL Sp-Asphalt, 2009]	0	150
Ermüdungsverhalten	[AL Sp-Asphalt, 2009]	2	150
Kälteflexibilität	[DIN EN 12697, Teil 46, 2012]	1	300
Verformungsverhalten	[TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1, 2012]	3	100
<b>Summe der BK je Erprobungsfeld</b>		<b>10</b>	

Tab. 5.4-9: Durchgeführte Prüfungen und Bohrernanzahl je Erprobungsfeld

### Asphaltmischgutanalysen

Die Bestimmung der Eigenschaften der eingebauten Asphalte erfolgt gemäß [ZTV Asphalt-StB, 2007] und [TL Asphalt-StB, 2007] für die „konventionellen“ Asphalte.

Bestimmt wurden folgende Eigenschaften an den eingebauten konventionellen Asphalten SMA 5 S und AC 16 B S sowie den Sonderasphalten 26 % GG, IA 5 dicht und IA 5 offen:

- Beschaffenheit des Mischgutes nach Augenschein
- Bindemittleigenschaften am rückgewonnenen Bindemittel [TP Asphalt-StB, Teil 3, 2007]:
  - Bindemittelgehalt gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 1, 2012]
  - Erweichungspunkt Ring und Kugel gemäß [DIN EN 1427, 2007]
  - ggf. elastische Rückstellung bei 25 °C gemäß [DIN EN 13398, 2010]
- Korngrößenverteilung gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 2, 2007]
- Asphaltmischguteigenschaften:
  - Rohdichte gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 5, 2012]
  - Raumdichte am Asphalt-Probekörper gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 6, 2012]
  - Hohlraumgehalt am Asphalt-Probekörper gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 8, 2012]

Die Asphaltmischgutanalysen der auf der NATO Air Base in Geilenkirchen eingebauten Asphalte haben für das Asphaltdeckschichtmischgut des Splittmastixasphaltes SMA 5 S Abweichungen im Bindemittelgehalt und dem berechneten Hohlraumgehalt ergeben. Die Analyse hat einen mittleren Bindemittelgehalt von 6,5 M.-% ergeben. Der Soll-Wert nach Erstprüfungsnachweis ist mit 7,5 M.-% (Toleranz nach [ZTV Asphalt-StB, 2007/2013]:  $\pm 0,4$  M.-%) angegeben, so dass im Rahmen der zulässigen Abweichung nach [ZTV Asphalt-StB, 2007/2013] eine Abweichung von -0,6 M.-% festgestellt wurde.

Des Weiteren lag der für den Marshall-Probekörper berechnete Hohlraumgehalt im Mittel bei 7,6 Vol.-% und damit um 3,6 Vol.-% (Soll-Bereich gemäß Erstprüfung: 2,0 - 3,0 Vol.-%; Toleranz nach [ZTV Asphalt-StB, 2007/2013]:  $\pm 1,0$  V.-%) über dem zulässigen Wert. Der berechnete, erhöhte Hohlraumgehalt am Marshall-Probekörper ist ein Indiz für die schlechte Verdichtbarkeit der Asphaltdeckschicht SMA 5 S.

Die Ergebnisse der Mischgutanalyse des Asphaltbinders AC 16 B S zeigen keine „Auffälligkeiten“.

Die Sonderasphalte IA 5 (dicht und offen) bestehen aus einem „Ein-Korn-Gemisch“ der Kornklasse 2/5. Entsprechend der Zugabemenge an gummimodifiziertem Bindemittel wird unterschieden zwischen „IA 5 - dicht“ (Anteil gummimodifiziertes Bitumen (Soll): 12,0 M.-%) und „IA 5 - offen“ (Anteil gummimodifiziertes Bitumen (Soll): 7,0 M.-%). Die Mischgutanalyse hat für den Sonderasphalt IA 5 - offen, mit gummimodifiziertem Bitumen, für das Bindemittel im Vergleich zu dem ermittelten Wert des Sonderasphalts IA 5 - dicht (mittlerer Erweichungspunkt Ring und Kugel von 50,1 °C) einen erhöhten Wert für den Erweichungspunkt Ring und Kugel von 82,5 °C ergeben. Möglicherweise ist diese vorzeitige „Alterung“ des Bitumens auf eine Überhitzung des Asphaltmischgutes zurückzuführen. Ebenfalls wurde ein leicht erhöhter Bindemittelgehalt in Form einer unzulässigen Abweichung von 0,5 M.-% in der Wiederholung der Mischgutanalyse festgestellt. Der Hohlraumgehalt dieses Sonderasphaltes lag bei 27,9 Vol.-% (Mittelwert).

Am Mischgut des Sonderasphaltes IA 5 - dicht wurde abweichend zu den Angaben der Erstprüfung ein Bindemittelgehalt von durchschnittlich 10,4 M.-% (Soll: 8,4 M.-%) festgestellt. Vermutlich wurde hier die vollständige Extraktion des Bindemittels durch das enthaltene Gummigranulat erschwert.

Für die Herstellung des Sonderasphaltes mit 26 M.-% Gummigranulat aus einer bestehenden Rezeptur einer Sonderbauweise „Tapisable 0/5 mm in Diabas“ wurden Teile der Gesteinskörnung „Diabas“ durch Gummigranulat 2/4 ersetzt. Weiterhin wurde abweichend von der Ausgangsrezeptur die Zugabe von Bin-

demittel erhöht. Die Ergebnisse der Mischgutanalyse des Sonderasphaltes 26 % GG, mit gummimodifiziertem Körnungsgemisch, entsprechen den in der Erstprüfung angegebenen Werten, bis auf Abweichungen im Grobkornanteil, dem Bindemittelgehalt sowie dem Wert für die elastische Rückstellung.

Der ermittelte Grobkornanteil (2,0 mm – 5,6 mm) der Gesteinskörnung lag dabei mit durchschnittlich 2,9 M.-% oberhalb des zulässigen Bereiches von 40,7 M.-% – 50,7 M.-%; für die elastische Rückstellung bei 25 °C des eingesetzten polymermodifiziertem Bitumens der Sorte 45/80-50 A wurde ein Wert von 29 % unterhalb der Mindestvorgabe von 40 % ermittelt. Weiterhin lag der berechnete Hohlraumgehalt abweichend von den Angaben der Erstprüfung bei 26,3 Vol.-% (Soll: 18,0 Vol.-%).

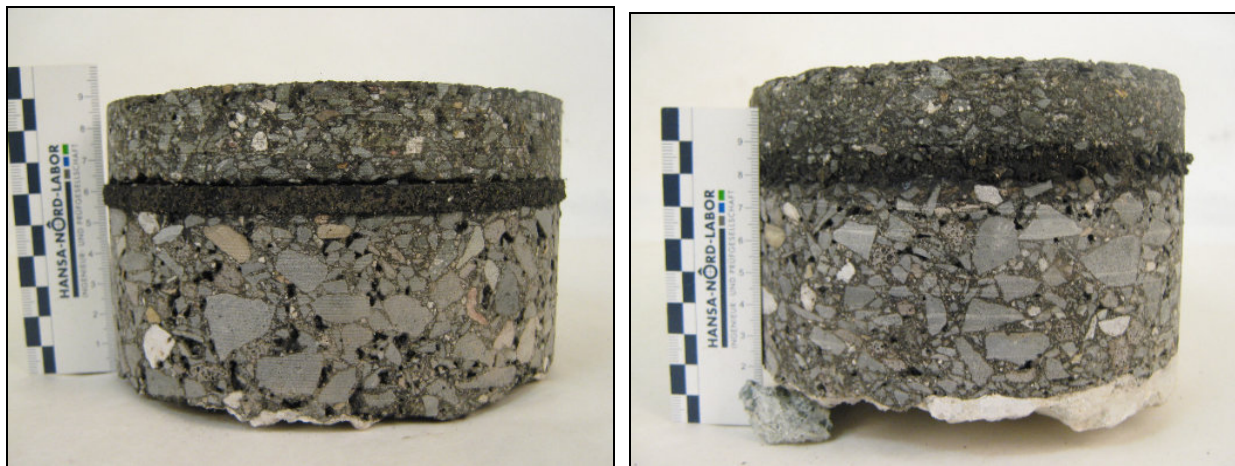
Es muss festgestellt werden, dass die Abweichungen der ermittelten Prüfergebnisse der beiden Mischgutanalysen des Sonderasphaltes 26 % GG teilweise über der zulässigen Wiederholpräzision liegen. Offensichtlich führt der erhöhte Gummianteil im Gesteinskörnungsgemisch zu einer erschwerten Extraktion der Mischgutbestandteile. Die ermittelten Prüfergebnisse sind deshalb als Anhaltwerte zu verstehen und erheben nicht den Anspruch einer „Präzision“.

Die Mischung der Sonderasphalte 26 % GG, IA 5 - dicht und IA 5 - offen stellt für die Mischwerke eine Herausforderung dar. Im Vergleich zu den konventionellen Asphalten führt der Einsatz von Gummibestandteilen im Asphaltmischgut zu erhöhten Anforderungen an die Verarbeitungsbedingungen. Unter Praxisbedingungen muss die Abfolge der Mischvorgänge, Temperatureinstellungen und Reifezeiten genauestens eingehalten werden. Für die Herstellung der Sonderasphalte ist das weitestgehend gelungen.

### Konventionelle Asphalteigenschaften der eingebauten Schicht (Bohrkerne)

Die Bohrkerne der Erprobungsfelder wurden zunächst fotografiert und ausgemessen. Dabei wurden die äußere Beschaffenheit der Schichten (Schichtdicke) sowie der Schichtenverbund visuell beurteilt. Im Anschluss wurde der Schichtenverbund gemäß [TP Asphalt-StB, Teil 80, 2012] mittels Abscherversuch geprüft. Weiterhin wurde für die Schichten am Bohrkern die Raumdichte nach [TP Asphalt-StB, Teil 6, 2012] ermittelt und der Verdichtungsgrad nach [TP Asphalt-StB, Teil 8, 2012] bestimmt.

Die Bilder 5.4-30 und 5.4-31 zeigen beispielhaft Bohrkerne mit vier unterschiedlichen elastischen Dämpfungsschichten.



**Bild 5.4-30:** Bohrkerne mit Dämpfungsschicht - Regupol (dicht), Bitumen-Gummi-Gemisch, (von links)



**Bild 5.4-31:** Bohrkern mit Dämpfungsschicht - Sonderasphalt 26 M.-% GG, Sonderasphalt IA 5 – dicht, (von links)

Untersucht wurde, inwieweit sich die Anordnung einer elastischen Zwischenschicht auf die Verdichtbarkeit der darüber angeordneten „starrten“ Schicht (hier Asphaltdeckschicht SMA 5 S) auswirkt. Hauptaugenmerk lag überdies auf einer kraftschlüssigen Verklebung (Schichtenverbund) der Dämpfungsschichten mit den angrenzenden Asphalttschichten. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass der Schichtenverbund teilweise bereits durch die Probenahme geschädigt bzw. beeinflusst worden sein kann.

Anhand der entnommenen Bohrkern wurden für die Dämpfungsschichten im Bereich der Erprobungsfelder 3 bis 7 Unterschreitungen von maximal 1 mm von den Soll-Schichtdicken gemessen. Dieses Ergebnis zeigt, dass das Soll praktisch erreicht wurde. Für die vorgefertigten Regupol-Matten verdeutlichen die festgestellten Abweichungen von 1 bis 2 mm, dass das Anspritzen mit heißen Bitumen bzw. das Aufbringen der heißen Asphaltdeckschicht ein Quellen der Matten hervorgerufen hat.

Die gemessenen Schichtdicken der Asphaltdeckschicht SMA 5 S betragen zwischen 2,4 cm und 2,0 cm. Hier tritt einmal mehr der Einfluss der elastischen Unterlage zu Tage. Während beispielsweise die weichere Unterlage mit Regupol in Feld 1 eine abweichende Schichtdicke von 3 mm verursacht, bewirkt die festere Unterlage mit Regupol in Feld 2 eine Abweichung von lediglich 1 mm. Für das Feld 6 mit dem Sonderasphalt IA 5 - dicht wurde die Dicke der Deckschicht mit 2 cm (Soll: 2,5 cm) gemessen.

Unter Praxisbedingungen ist für konventionelle Asphalte nach den [ZTV Asphalt-StB, 2007/2013] in der Regel ein Mindestverdichtungsgrad von 98 % vorgeschrieben. In Ausnahmefällen (z. B. für offenporige Asphalte) gilt ein Mindestverdichtungsgrad von 97 %, der für die Interpretation der Ergebnisse gewählt wurde. Dieser „Orientierungswert“ konnte für die Sonderasphalte der Erprobungsfelder 4, 5 und 7 erreicht werden. Der Verdichtungsgrad des Sonderasphaltes IA 5 - dicht (Feld 6) wurde mit 91,8 % bestimmt. Hier führt der hohe Bindemittelgehalt vermutlich zu einer Übersättigung des Mischgutes und in der Folge zu einer verringerten Verdichtbarkeit.

Für die Asphaltdeckschicht SMA 5 S im Bereich des Referenzfeldes (Aufbau ohne elastische Zwischenschicht) wurde ein Verdichtungsgrad von 96,0 % bestimmt. Mögliche Ursachen für diesen geringen Verdichtungsgrad können hier auch auf das Asphaltmischgut zurückgeführt werden. Aus den Ergebnissen für das Asphaltdeckschichtmischgut kann entnommen werden, dass am im Laboratorium mit definierter Verdichtungsarbeit hergestellten Marshall-Probekörper der zulässige Wert für den Hohlraumgehalt überschritten wird, was auf ein eher „ungünstiges“ Verdichtungsverhalten (Verdichtbarkeit) hinweist. Vergleichbar mit den im Bereich des Referenzfeldes ermittelten Werten für den Verdichtungsgrad der Asphaltdeckschicht sind die erzielten Verdichtungsgrade im Bereich der Erprobungsfelder 6 und 7. Im Bereich der Erprobungsfelder 6 (Sonderasphalt IA 5 - dicht) und 7 (Sonderasphalt IA 5 - offen) sind Dämpfungsschichten mit vergleichsweise geringen „elastischen Anteilen“ eingebaut.

Mit zunehmendem Gummianteil in den Dämpfungsschichten konnten abnehmende Verdichtungsgrade der darüber angeordneten Asphaltdeckschicht SMA 5 S dokumentiert werden. Für die Asphaltdeckschicht SMA 5 S auf den Erprobungsfeldern 2 (elastische Schicht: Regupol dicht), 4 (elastische Schicht: Sonderasphalt 26 % GG in 1,5 cm Dicke) und 5 (elastische Schicht: Sonderasphalt 26 % GG in 2,5 cm Dicke) wurden Verdichtungsgrade von 94,5 % (Feld 5) und 94,9 % (Feld 2, 4) bestimmt.

Verhältnismäßig geringe Werte für den Verdichtungsgrad der Asphaltdeckschicht wurden im Bereich der Erprobungsfelder 1 (91,3 %) und 3 (91,9 %) erzielt. Die geringen Werte für die Verdichtungsgrade können hier durch die elastischen Unterlagen mit hohem Gummianteil in Verbindung mit einer offenen Struktur begründet werden.

Die Prüfung des Schichtenverbundes wurde in Anlehnung an die [TP Asphalt-StB, Teil 80, 2012] mit dem Abscherversuch durchgeführt. Abweichend von den Technischen Prüfvorschriften wurden die Prüfungen an „dünnere“ Bohrkernscheiben durchgeführt, da die Mindestdicken (gemäß TP: abzuscherende Schicht 20 mm; darunter liegende Schicht 70 mm) nicht gegeben war. Des Weiteren kann eine mögliche Schädigung des Schichtenverbundes aufgrund der „erschweren“ Bohrkernentnahme nicht ausgeschlossen werden.

Als Orientierungswerte zur Einordnung der Ergebnisse dient der nach [ZTV Asphalt-StB, 2007] vorgegebene Mindestwert für die maximale Scherkraft zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht von 15,0 kN. Für die Erprobungsfelder 1 bis 7 wurden für die maximale Scherkraft im Mittel Werte zwischen 2,2 kN und 13,5 kN für die Scherkraft zwischen Asphaltdeckschicht und Dämpfungsschicht sowie zwischen Dämpfungsschicht und Asphaltbinderschicht ermittelt. Im Vergleich dazu wurde im Abscherversuch als maximale Scherkraft zwischen Asphaltdeck- und Asphaltbinderschicht ein Wert von 36,8 kN bestimmt.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die für die maximale Scherkraft ermittelten Einzelwerte eines Erprobungsfeldes teilweise deutliche Unterschiede aufweisen. Die Herstellung eines stabilen Haftverbundes zwischen elastischer Zwischenschicht und den angrenzenden Schichten stellt aufgrund unterschiedlicher Materialeigenschaften weiterhin eine Herausforderung dar.

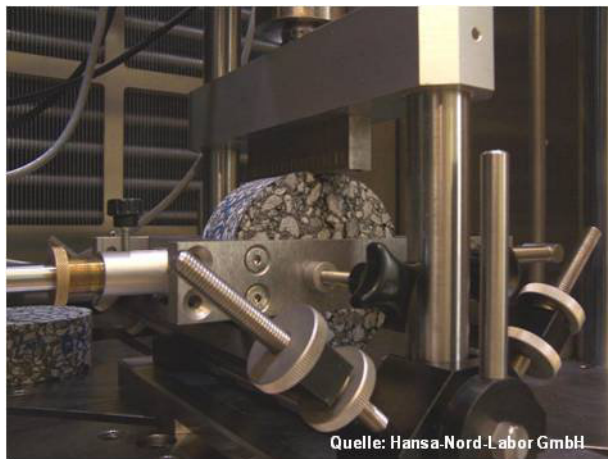
### **Steifigkeitsverhalten**

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Steifigkeit für Heißasphalt ist in der [DIN EN 12697, Teil 26, 2012] geregelt. Das Steifigkeitsverhalten von Asphalten wird mit dem Spaltzug-Schwellversuch nach der [AL Sp-Asphalt, 2009] bestimmt.

Zu diesem Zweck werden zylindrische Probekörper mit Abmessungen in Abhängigkeit vom eingesetzten Größtkorn (z. B. Durchmesser Größtkorn  $\leq 16$  mm: Probekörper  $d=100 \pm 3$  mm,  $h=40 \pm 2$  mm) aus mit dem Walzsektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphalt-Probepplatten oder aus Bohrkernproben herausgeschnitten (Bild 5.4-41). Die Bestimmung der Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktion erfolgt anhand von Multistage-Versuchen, wobei die Prüftemperatur und die Belastungsfrequenz variiert werden. Als Prüftemperaturen werden 20, 10, 0 und  $-10$  °C und als Belastungsfrequenzen 0,1, 1, 5 und 10 Hz gewählt. Die Ober-spannung ist in Abhängigkeit von der Prüftemperatur und der Belastungsfrequenz so zu wählen, dass der Wert für die anfängliche elastische horizontale Dehnung in Probekörpermitte zwischen 0,05 und 0,10 % beträgt. Während des Versuchs darf der Probekörper keine Schädigung erfahren. Der Versuch wird nach einer definierten Anzahl von Lastwechseln, die abhängig von der Belastungsfrequenz ist, beendet.

Für den Splittmastixasphalt SMA 5 S wurde das Steifigkeitsverhalten an Probekörpern, die aus entsprechend der Erstprüfung des Splittmastixasphaltes SMA 5 S zusammengesetzten Labormischungen aus walzsektor-verdichteten Asphalt-Probepplatten hergestellt worden sind, bestimmt. Aus den zuvor dargestellten Ergebnissen für die eingebaute Asphaltdeckschicht SMA 5 S kann entnommen werden, dass die über den unterschiedlichen Dämpfungsschichten angeordnete Asphaltdeckschicht SMA 5 S in den verschiedenen Erprobungsfeldern mit deutlich unterschiedlichen Verdichtungsgraden eingebaut worden ist bzw. Unterschiede hinsichtlich des Verdichtungsgrades festzustellen sind. Um den Einfluss der hier festgestellten Spannweite auf die Steifigkeit zu dokumentieren, wurden Probekörper (aus walzsektor-verdichteten Asphalt-Probepplatten) mit Verdichtungsgraden von 94 % sowie 98 % hergestellt und untersucht.

Weiter wurden Steifigkeiten für die Sonderasphalte IA 5 - dicht und IA 5 - offen ermittelt, auch für diese beiden Varianten wurden zur Bestimmung des Steifigkeitsverhaltens Probekörper (aus walzsektor-verdichteten Asphalt-Probepplatten) aus Labormischungen hergestellt.

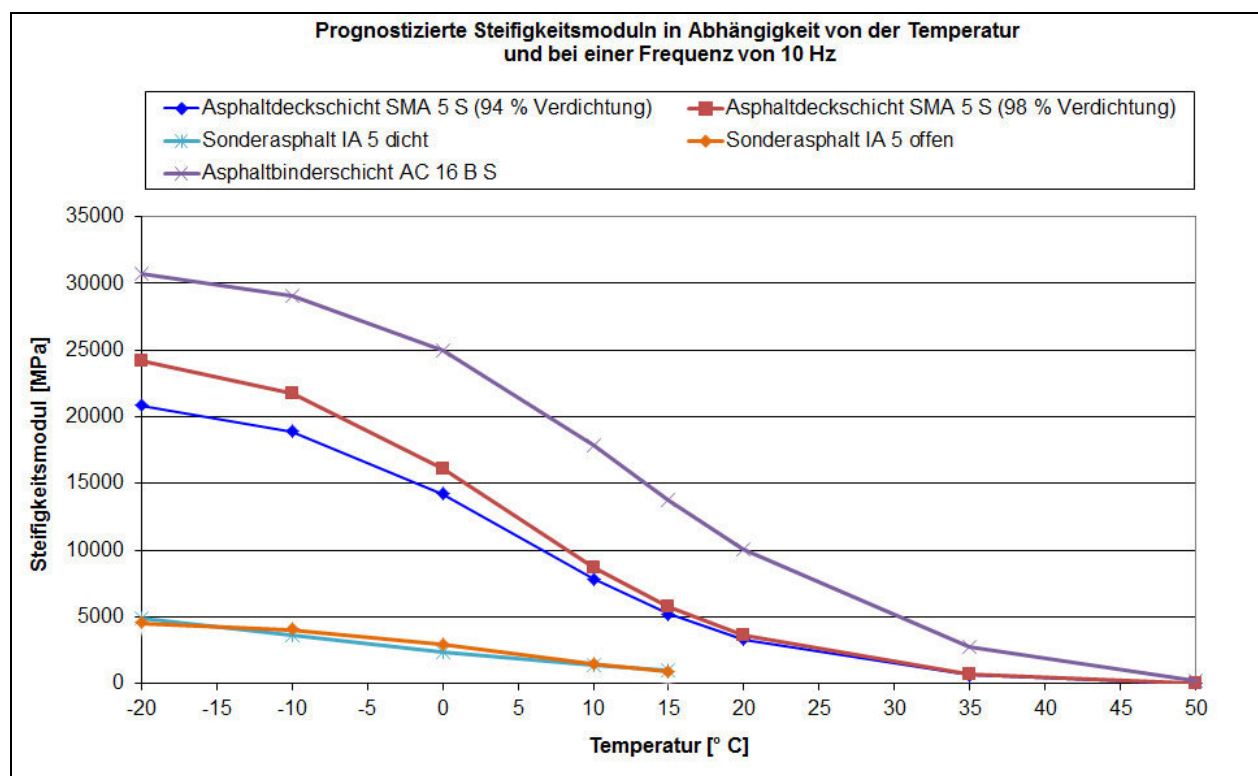


**Bild 5.4-32:** Prüfvorrichtung Spaltzug-Schwellversuch

In Bild 5.4-33 sind die jeweils ermittelten Steifigkeitsmoduln für die Asphaltdeckschicht SMA 5 S (mit Verdichtungsgraden von 94 % und 98 %), für die Sonderasphalte IA 5 - dicht und IA 5 - offen sowie für die Asphaltbinderschicht AC 16 B S angegeben.

Die Ermittlung „verwertbarer“ Ergebnisse ab einer Prüftemperatur von > 10 °C für die Sonderasphalte IA 5 - dicht und IA 5 - offen war aufgrund zu hoher Dehnungen bereits beim Aufbringen sehr geringer Oberspannungen prüftechnisch nicht möglich (Wert bei 15 °C extrapoliert).

An den elastischen Zwischenschichten mit erhöhtem Gummianteil wie der Sonderasphalt 26 % GG, dem Bitumen-Gummi-Gemisch sowie den Regupol-Matten dicht und offen konnten mittels dem Spaltzug-Schwellversuch (und den gegebenen Prüfbedingungen) Steifigkeitsmoduln nicht bestimmt/angesprochen werden.



**Bild 5.4-33:** Steifigkeitsmoduln bei einer Frequenz von 10 Hz in Abhängigkeit von der Temperatur für SMA 5 S (Verdichtungsgrad 94 % und 98 %), Asphaltbinder AC 16 B S und Sonderasphalte IA 5 - dicht und IA 5 - offen

Für die Einschätzung des Dämpfungspotenzials der Konstruktion sind Kenntnisse über das Steifigkeitsverhalten der eingebauten Schichten wichtig. Aus diesem Grund wurden für die eingesetzten konventionellen Asphalte (SMA 5 S, AC 16 B S) sowie die Sonderasphalte (elastische Zwischenschichten) -

soweit möglich - die Steifigkeitsmodul-Temperaturfunktionen bestimmt. Die geprüfte Asphaltbinderschicht AC 16 B S liefert plausible Werte. Sie liegt mit einer maximal-bestimmten Steifigkeit von 30.709 MPa bei -20 °C im Bereich der zu erwartenden Steifigkeiten. Für die Asphaltdeckschichtvarianten wurden u. a. Steifigkeiten von 20.871 MPa (94 % Verdichtung) und 24.182 MPa (98 % Verdichtung) bei -20 °C bestimmt. Der Vergleich der geprüften Varianten verdeutlicht hier den Einfluss der Verdichtung auf die Steifigkeit der Asphaltdeckschicht, der sich insbesondere im Temperaturbereich von -20 °C bis +15 °C bemerkbar macht.

Die Prüfung der gummimodifizierten Sonderasphalte gestaltete sich schwierig. Für die Sonderasphalte IA 5 - dicht und IA 5 - offen konnten lediglich für den Temperaturbereich von -20 °C bis +10 °C plausible Werte ermittelt werden. Bei -20 °C wurde die Steifigkeit des Sonderasphaltes IA 5 - dicht mit 4.885 MPa bestimmt, für den IA 5 - offen mit 4.583 MPa. Die ermittelten Ergebnisse der Sonderasphalte IA 5 - dicht und IA 5 - offen prognostizieren für den Temperaturbereich von > 10 °C eine rapide Entwicklung der Steifigkeiten gegen null.

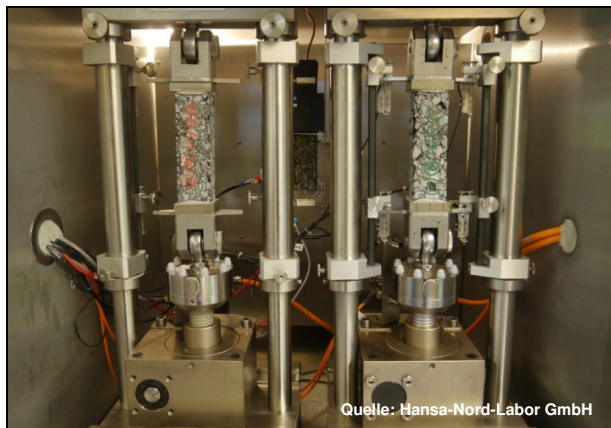
Der Sonderasphalt 26 % GG lieferte aufgrund seines hohen Gummianteils keine verwertbaren Prüfergebnisse. Eine Belastung der Prüfkörper mit minimalen Spannungen führte nicht zu dem gewünschten Dehnungsbereich, im höheren Spannungsbereich versagte der Prüfkörper. Im Vergleich zu dem Sonderasphalt IA 5 - dicht und IA 5 - offen mit deutlich geringerem Gummianteil, ist von minimalen Steifigkeiten auszugehen.

Die durchgeführten Untersuchungen zum Steifigkeitsverhalten belegen einmal eindrucksvoll die Temperaturabhängigkeit des Asphaltmoduls. Die wenigen Ergebnisse zu den Sonderasphalten prognostizieren eine Abnahme des Temperatureinflusses sowie eine Abnahme der Steifigkeiten mit zunehmendem Gummianteil. Für die höher modifizierten Gummivarianten der Asphaltdeckschicht stellt die Prüfung der Steifigkeiten mit dem Spaltzug-Schwellversuch kein geeignetes Prüfsystem dar.

#### Kälteflexibilität

Die Vorgehensweise zur Prüfung der Kälteflexibilität von Heißasphalten ist in [DIN EN 12697, Teil 46, 2012] geregelt sowie in den [TP Asphalt StB, Teil 46 A, 2013] beschrieben.

Für die Durchführung der Abkühlversuche werden prismatische Probekörper mit Abmessungen in Abhängigkeit vom eingesetzten Größtkorn (z. B. Durchmesser Größtkorn  $\leq 11$  mm: Probekörper  $h=40$  mm,  $b=40$  mm,  $l=160$  mm) der jeweiligen Schicht aus mit dem Walsektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphalt-Probekörpern herausgeschnitten. Die Probenlängsachse soll dabei orthogonal zur Verdichtungsrichtung verlaufen.



**Bild 5.4-34:** Prüfvorrichtung für Zug- und Abkühlversuche

Bei dem Abkühlversuch wird ein Asphaltprobekörper auf konstanter Länge gehalten und beginnend bei einer Temperatur von 20 °C mit einem Temperaturgradienten von -10 K/h abgekühlt. In dem auf konstanter Länge gehaltenen Probekörper bauen sich kryogene Zugspannungen auf, bis der Probekörper reißt. Neben den kontinuierlich erfassten, durch Abkühlung entstehenden kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur werden die Bruchtemperatur  $T_{Br}$  sowie die Bruchspannung  $\sigma_{Br}$  zum Zeitpunkt des Probekörperversagens (Spannungsabfall) erfasst.

Die Prüfungen zur Kälteflexibilität der Asphaltdeckschicht SMA 5 S und der Sonderasphalte wurden an Probekörpern, die aus mit dem Walsektor-Verdichtungsgerät hergestellten Asphalt-Probekörpern (aus

Labormischungen) heraus gesägt worden sind, durchgeführt (Bild 5.4-34). Die Prüfung der Asphaltbinder-schicht AC 16 B S erfolgte an aus Bohrkernen herausgesägten Prüfkörpern.



**Bild 5.4-35:** Prüfkörper SMA 5 S, Sonderasphalt 26 % GG, Sonderasphalt IA 5 - dicht, Sonderasphalt IA 5 - offen, AC 16 B S (von links)

In Bild 5.4-36 sind die Ergebnisse der Abkühlversuche dargestellt. Das Kälteverhalten der Sonderasphalte IA 5 - dicht und IA 5 - offen konnte nur in Einzelfällen prüftechnisch angesprochen werden, da sich im Prüfkörper kein Spannungszustand einstellte. Bei der Prüfung des Sonderasphaltes 26 % GG wurden minimale Spannungen aufgezeichnet. Von der Prüfung der Varianten mit Regupol (dicht und offen) sowie des Bitumen-Gummi-Gemischs wurde aufgrund der erhöhten elastischen Eigenschaften abgesehen.

Der Verlauf der kryogenen Zugspannungen der Asphaltdeckschichtvarianten mit 94 % Verdichtung und 98 % Verdichtung verdeutlicht den Einfluss des Verdichtungsgrades auf das Tieftemperaturverhalten von Asphalt. Hier führt eine höhere Verdichtung in der Folge zu höheren kryogenen Zugspannungen.

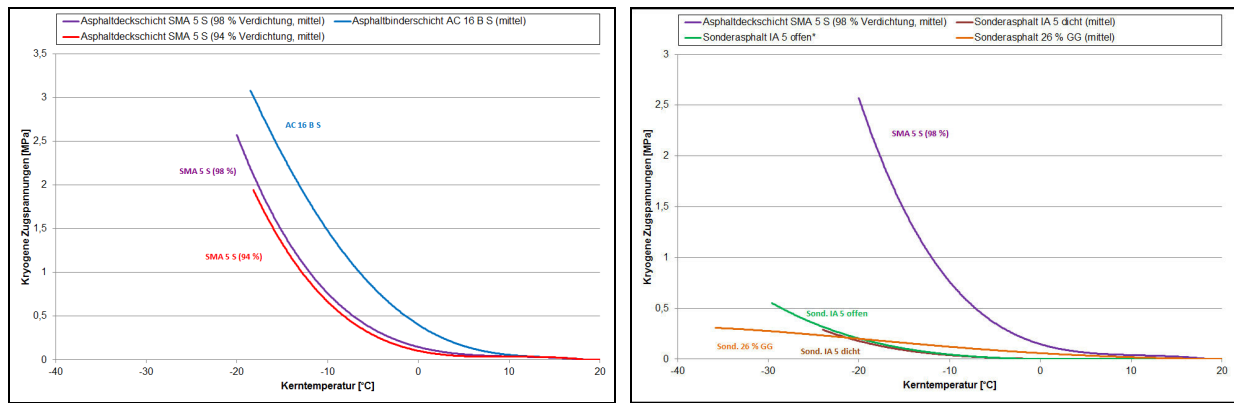
Die Kurvenverläufe (kryogene Zugspannung in Abhängigkeit von der Temperatur) der elastischen Zwischenschichten unterscheiden sich deutlich von den Verläufen „konventioneller“ Asphalte (hier untersucht: SMA 5 S, AC 16 B S). Mit sinkender Temperatur bauen sich kryogene Zugspannungen nur sehr langsam auf. Die untersuchten gummimodifizierten Sonderasphalte haben - hervorgerufen durch den Gummianteil - nicht unmittelbar das Bestreben sich durch Abkühlen so stark zusammenzuziehen, dass sich mit abnehmender Temperatur kryogene Zugspannungen in der Größenordnung aufbauen wie beispielsweise an den hier untersuchten „konventionellen“ Asphalten.

Anhand der kryogenen Zugspannungsverläufe der Sonderasphalte IA 5 - offen und IA 5 - dicht kann erkannt werden, dass sich kryogene Zugspannung erst bei Temperaturen unter  $-5\text{ °C}$  aufbauen. Mit abnehmender Temperatur bauen sich diese Zugspannungen vergleichsweise langsam auf und bleiben auf einem insgesamt sehr niedrigen Niveau (Bruchtemperatur: IA 5 - dicht =  $-26,2\text{ °C}$  (Mittel), IA 5 - offen =  $-29,6\text{ °C}$ ; Bruchspannungen: IA 5 - dicht =  $0,367\text{ MPa}$  (Mittel), IA 5 - offen =  $0,512\text{ MPa}$ ).

Bei dem Sonderasphalt mit 26 % Gummianteil fällt der Verlauf der sogenannten Abkühlkurve auf: Zwischen der Prüftemperatur und den Zugspannungen ist ein annähernd linearer Zusammenhang zu erkennen (Bruchtemperatur =  $-35,8\text{ °C}$ , Bruchspannung =  $0,311\text{ MPa}$ ).

Der Zusatz von Gummi verursacht offensichtlich einen verringerten Spannungsaufbau - thermisches Schrumpfen wird durch die elastischen Elemente praktisch verhindert. Für die Praxis stellt das Kälteverhalten gummimodifizierter Asphalte gegenüber den konventionellen Asphalten einen Vorteil dar.





\*Ein plausibles Prüfergebnis

**Bild 5.4-36:** Verlauf der kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur - SMA 5 S (Verdichtungsgrad 94 % und 98 %), AC 16 B S (links) und

Verlauf der kryogenen Zugspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur - SMA 5 S (Verdichtungsgrad 98 %), Sonderasphalt 26 % GG, Sonderasphalt IA 5 - dicht, Sonderasphalt IA 5 - offen (rechts)

### Verformungsverhalten

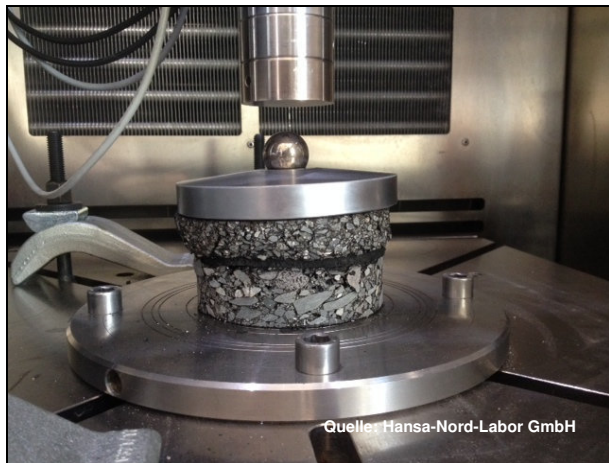
Die Vorgehensweise bei der Ermittlung des Verformungsverhaltens bei Wärme mit dem Druck-Schwellversuch ist für Heißasphalt in der [DIN EN 12697, Teil 25, 2005] geregelt. Die Durchführung des einaxialen Druck-Schwellversuches zur Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalten bei Wärme ist in den [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1, 2012] beschrieben.

Zur Ansprache des Verformungsverhaltens mit dem einaxialen Druck-Schwellversuch werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von  $100 \pm 5$  mm und einer Höhe von  $60 \pm 1$  mm hergestellt bzw. aus Bohrkernproben herausgeschnitten. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Systemprüfungen an zweischichtigen (Referenzaufbau) und dreischichtigen Ausbauproben (mit elastischer Zwischenschicht) durchgeführt.

Entsprechend den [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1, 2012] sind als Unterspannung 0,025 MPa und als Oberspannung 0,35 MPa vorzusehen. Die Lastimpulse dauern 0,2 Sekunden, gefolgt von jeweils 1,5 Sekunden Lastpause.

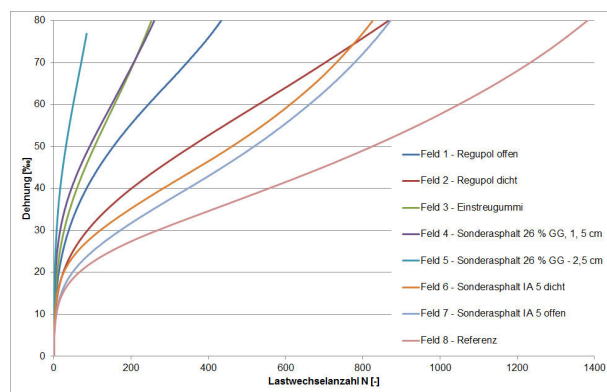
Der Versuch wird nach 10.000 Belastungszyklen oder bei Überschreitung einer Dehnung von 40 % beendet. Aufgrund der elastischen Eigenschaften der elastischen Zwischenschichten wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes abweichend zu den Versuchsbedingungen der [TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1, 2012] das Abbruchkriterium „Dehnung“ auf 80 % erhöht. Die bleibende Verformung des Probekörpers wird nach jedem Belastungszyklus erfasst. Zur Beurteilung des Verformungsverhaltens ist der Verlauf der Dehnungskurve von Bedeutung. Als Versuchsergebnis sind die Lastimpulsanzahl im Wendepunkt  $n_w$ , die Dehnung im Wendepunkt  $\epsilon_w$  sowie als maßgebendes Kriterium die Dehnungsrate im Wendepunkt  $\dot{\epsilon}_w$  zu erfassen.

Das Verformungsverhalten bei Wärme wurde mit dem Druck-Schwellversuch für die in situ eingebauten Schichtensysteme der acht Erprobungsfelder an Probekörpern aus den entnommenen Bohrkernen (Schichtensysteme) durchgeführt. Die Probekörper wurden mit einer einheitlichen Dicke (Höhe) von 6 cm hergestellt. Bild 5.4-37 zeigt beispielhaft einen Probekörper (Schichtensystem mit einem Aufbau aus Asphaltdeckschicht SMA 5 S, elastischer Zwischenschicht (hier: Regupol dicht) und Asphaltbinderschicht AC 16 B S).



**Bild 5.4-37:** Prüfung an Ausbauproben mit dem Druck-Schwellversuch – System mit Regupol dicht (Feld 2)

An allen untersuchten Varianten (Schichtensystem der verschiedenen Erprobungsfelder) wurde der Druck-Schwellversuch „vorzeitig“ (aufgebrachte Lastwechselzahl: < 10.000) beim Erreichen einer Dehnung von hier 80 ‰ beendet. In Bild 5.4-38 sind die Ergebnisse zum Verformungsverhalten in Form von Impulskriechkurven für die geprüften Schichtsysteme der Erprobungsfelder 1 bis 8 grafisch dargestellt.



**Bild 5.4-38:** Impulskriechkurven (Druck-Schwellversuch) – Feld 1 bis Feld 8

Das Verformungsverhalten der neu konzipierten Asphaltkonstruktionen mit elastischer Zwischenschicht wurde mit dem Druck-Schwellversuch am Schichtsystem untersucht. Erfahrungswerte aus der Literatur zu den Prüfungen am System sind nicht bekannt.

Die Darstellung des Dehnungsverlaufes in Abhängigkeit von der Lastwechselanzahl (Impulskriechkurven) veranschaulicht den Einfluss von Schichtdicke, Gummianteil, Struktur und Verklebung der elastischen Zwischenschichten auf die Verformung des Gesamtsystems.

Die Aufbauten mit den Sonderasphalten IA 5 - dicht und IA 5 - offen mit vergleichsweise geringem Gummianteil halten der Belastung im Vergleich zum Referenzaufbau am längsten stand. Hier liegen die Dehnraten bei 558,8 ‰/ 104n für den IA 5 - dicht und 594,6 ‰/ 104n für den IA 5 - offen. Im Ranking der erreichten Dehnung im Wendepunkt ( $\epsilon_w$  in ‰) in Abhängigkeit von der erreichten Lastwechselanzahl (nw) im Wendepunkt folgen dann die Prüfaufbauten mit Regupol und Einstreugummi mit dem höchsten Gummianteil der elastischen Schichten sowie einer geringen Schichtdicke von 6 mm, wobei die Prüfaufbauten mit Regupol offen gefolgt vom Einstreugummi vermutlich aufgrund ihrer offenen Struktur deutlich weniger Belastung standhalten als Regupol dicht. Die Prüfaufbauten mit dem Sonderasphalt 26 % GG bilden den Abschluss. Hier ist möglicherweise der hohe Gummianteil in Verbindung mit der vergleichsweise hohen Schichtdicke der elastischen Zwischenschicht verantwortlich für die hohen Dehnungen.

Bei den hier durchgeführten Druck-Schwellversuchen kam als maßgebendes Abbruchkriterium die Überschreitung einer Dehnung von 80 ‰ zum Tragen. Insbesondere konnte am Versuchsende ein Versagen der Asphaltdeckschicht beobachtet werden. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass das Versagen aller Prüfkörper mit elastischer Zwischenschicht sowie die des Referenzaufbaus in einem frühen Stadium des

Versuchsverlaufes stattfanden. Gegebenenfalls müssen hier die Randbedingungen/Eingangsgrößen des Versuches überdacht werden.

#### 5.4.5.2 Ergebnisse der lärmtechnischen Untersuchungen

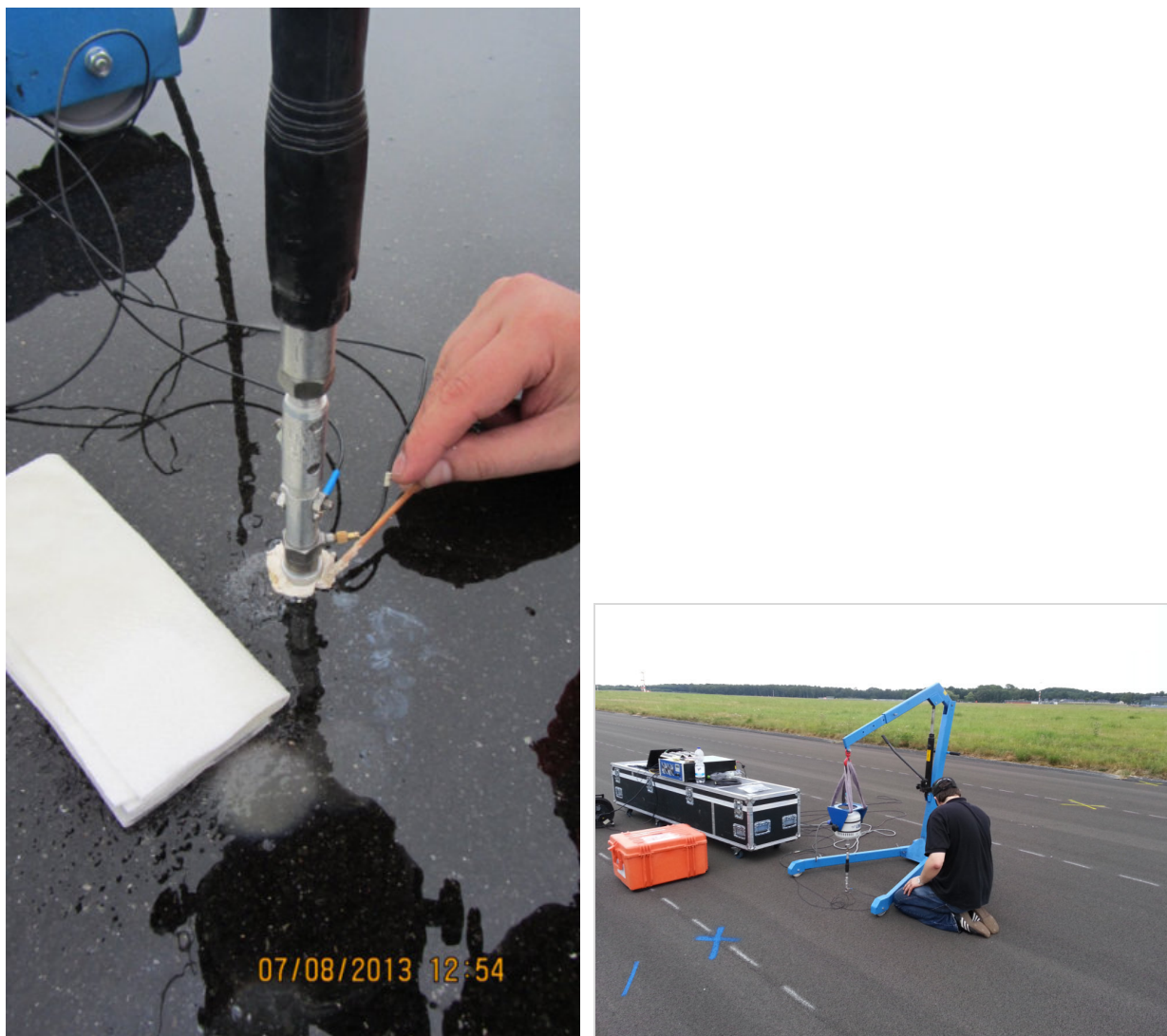
Auf den acht Testfeldern wurden folgende Messungen durchgeführt:

- Fahrbahnoberflächentextur
- Strömungswiderstand
- Schallabsorptionsgrad

Anschließend erfolgten CPB- und CPX-Messungen. Die Messverfahren sind im Teilvorhaben VI-II (Kapitel 5.3.2.3) beschrieben.

Darüber hinaus wurden mechanische Impedanzmessungen durchgeführt. Die Aufstellung des Systems geht aus Bild 5.4-39 hervor. Bild 5.4-40 zeigt die Aufstellung der übrigen Messsysteme auf anderen Testfeldern auf dem Versuchsgelände Geilenkirchen.

Auf jedem der acht Testfelder wurden jeweils drei Messpunkte in der rechten und linken Radrollspur eingerichtet, wodurch sich insgesamt jeweils 48 Messungen der Textur, des Strömungswiderstands und des Schallabsorptionsgrads ergaben. Die Messungen der mechanischen Impedanz wurden wegen des hohen Aufwands nur in der Mitte der Testfelder zwischen den Messpunkten der linken und rechten Radrollspur in Messquerschnitt MQ2 jedes Testfelds durchgeführt. Die Anordnung der Messpunkte ist Bild 5.4-41 zu entnehmen.



**Bild 5.4-39:** Aufstellung der Messsysteme auf Testfeldern auf dem Versuchsgelände Geilenkirchen

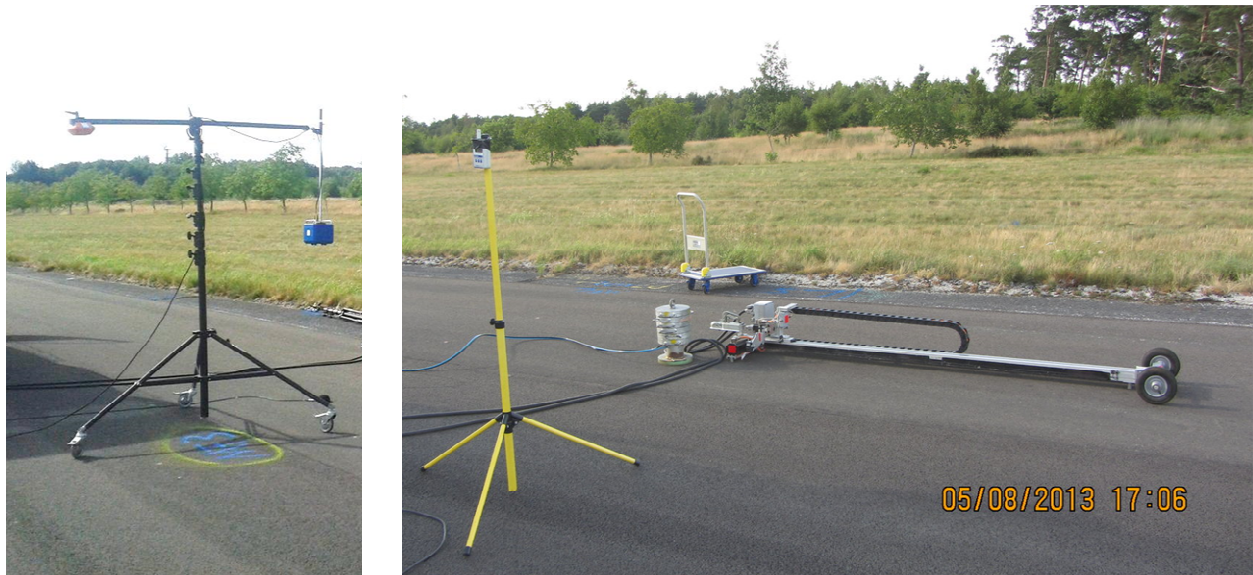


Bild 5.4-40: Aufstellung der Messsysteme auf Testfeldern auf dem Versuchsgelände Geilenkirchen

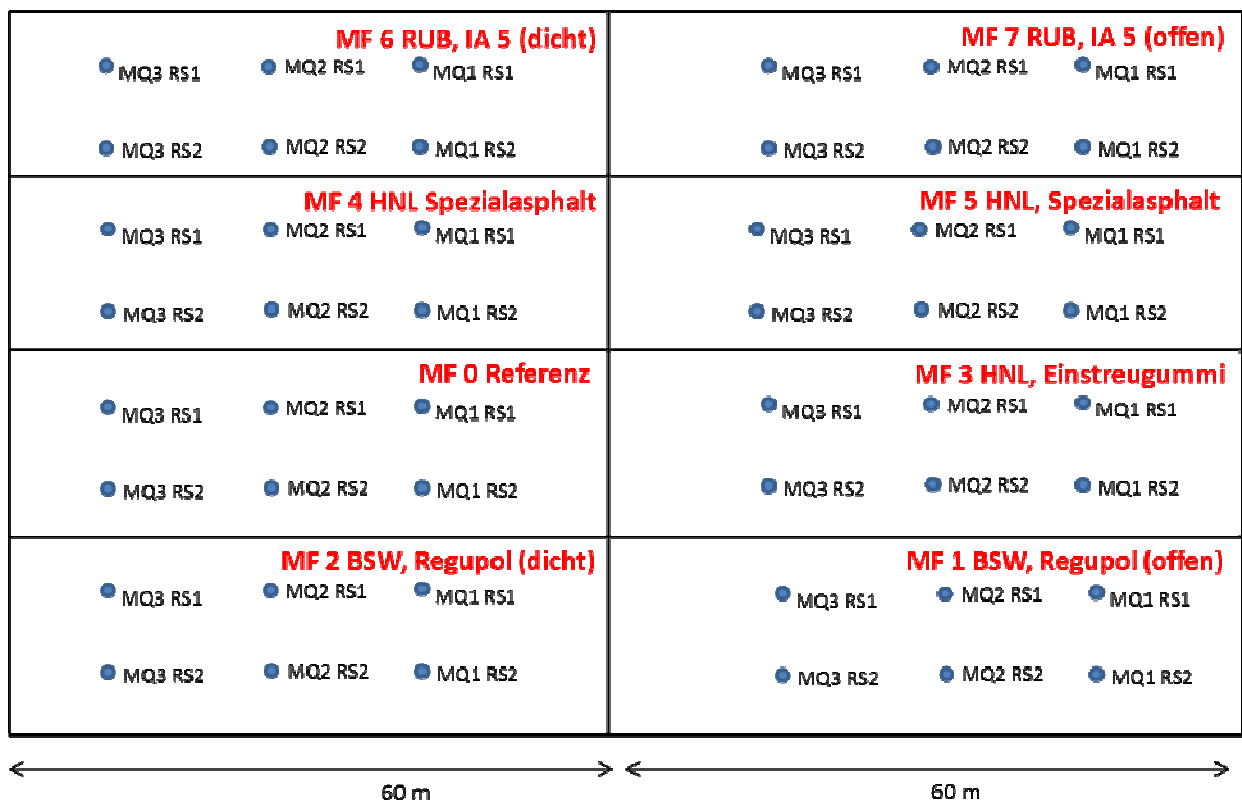
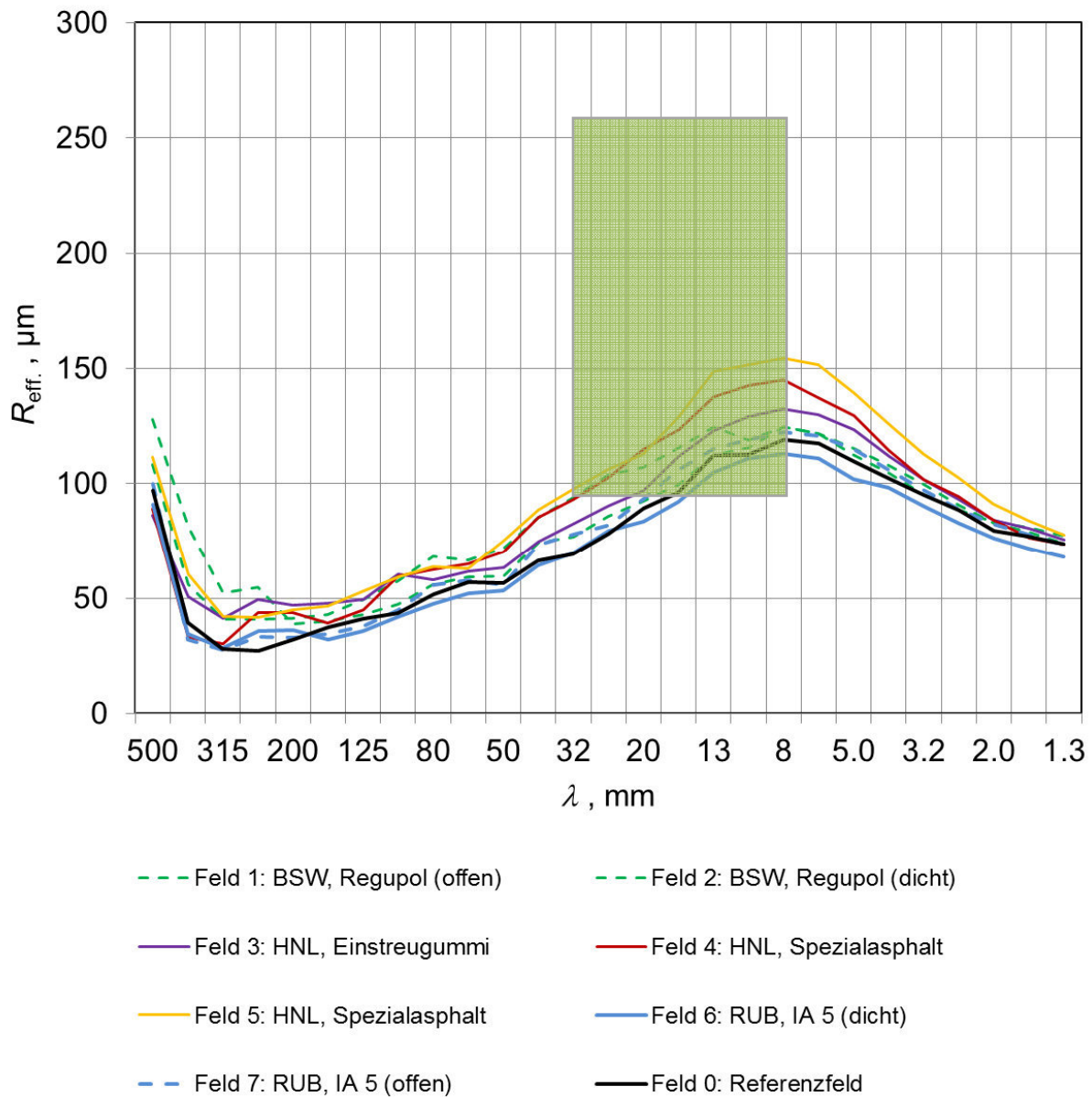


Bild 5.4-41: Anordnung der Messquerschnitte für die in situ Messungen auf den acht Testfeldern

### Texturmessungen

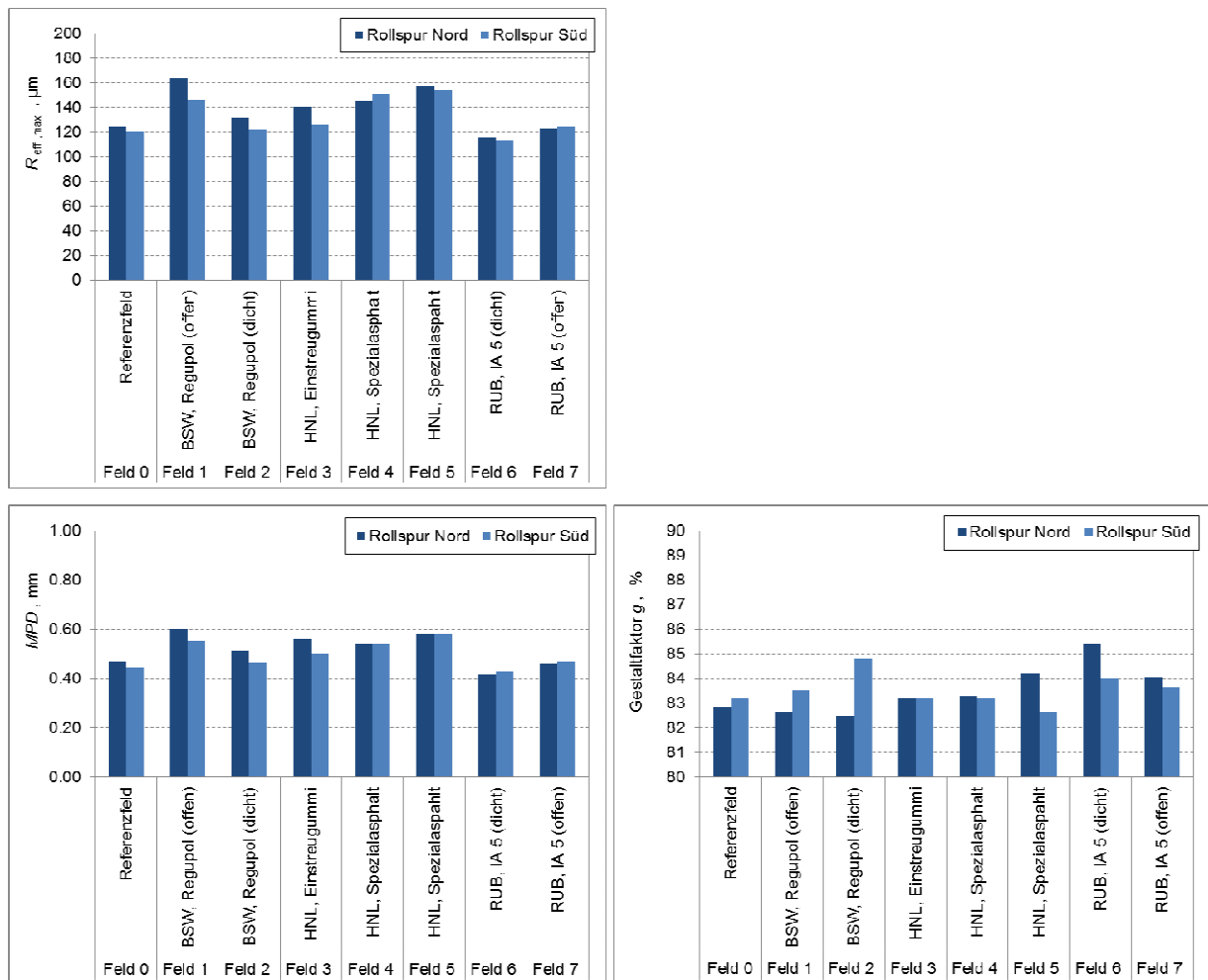
In Bild 5.4-42 sind die Texturspektren für die acht Testfelder nach Mittelung über jeweils alle sechs Einzelmessungen dargestellt. Die Texturspektren entsprechen den Erwartungen an Fahrbahnbeläge des Mischguttyps SMA 5. Die grüne Rechteckfläche kennzeichnet den Bereich optimaler Werte für Rauigkeitstiefe und Wellenlänge im Maximum des Texturspektrums, die per se zu akustisch günstigen Oberflächentexturen führen. Aus der Darstellung geht hervor, dass das Texturspektrum der SMA 5 S Deckschichten in allen Fällen nahezu identisch ist. Die effektiven Rauigkeitstiefen im spektralen Maximum unterscheiden sich um maximal 40  $\mu\text{m}$  bei einem mittleren Niveau von 130  $\mu\text{m}$ . Die Wellenlänge im Maximum beträgt 8 mm und liegt damit ebenfalls im Erwartungsbereich. Dies weist auf eine sehr gute Homogenität der Fahrbahnbeläge hin – so wie es beabsichtigt war, um keine texturbedingten Unterschiede

der Reifen-Fahrbahn-Geräusche zu provozieren, sondern nahezu identische Fahrbahnoberflächentexturen bereitzustellen und Unterschiede im Rollgeräuschpegel leichter auf Unterschiede in den elastischen Eigenschaften der Fahrbahnbeläge zurückführen zu können.



**Bild 5.4-42:** Mittlere Texturspektren der acht Testfelder. Das grün transparente Rechteck kennzeichnet den Bereich akustisch optimaler Werte für Wellenlänge und Rauigkeit

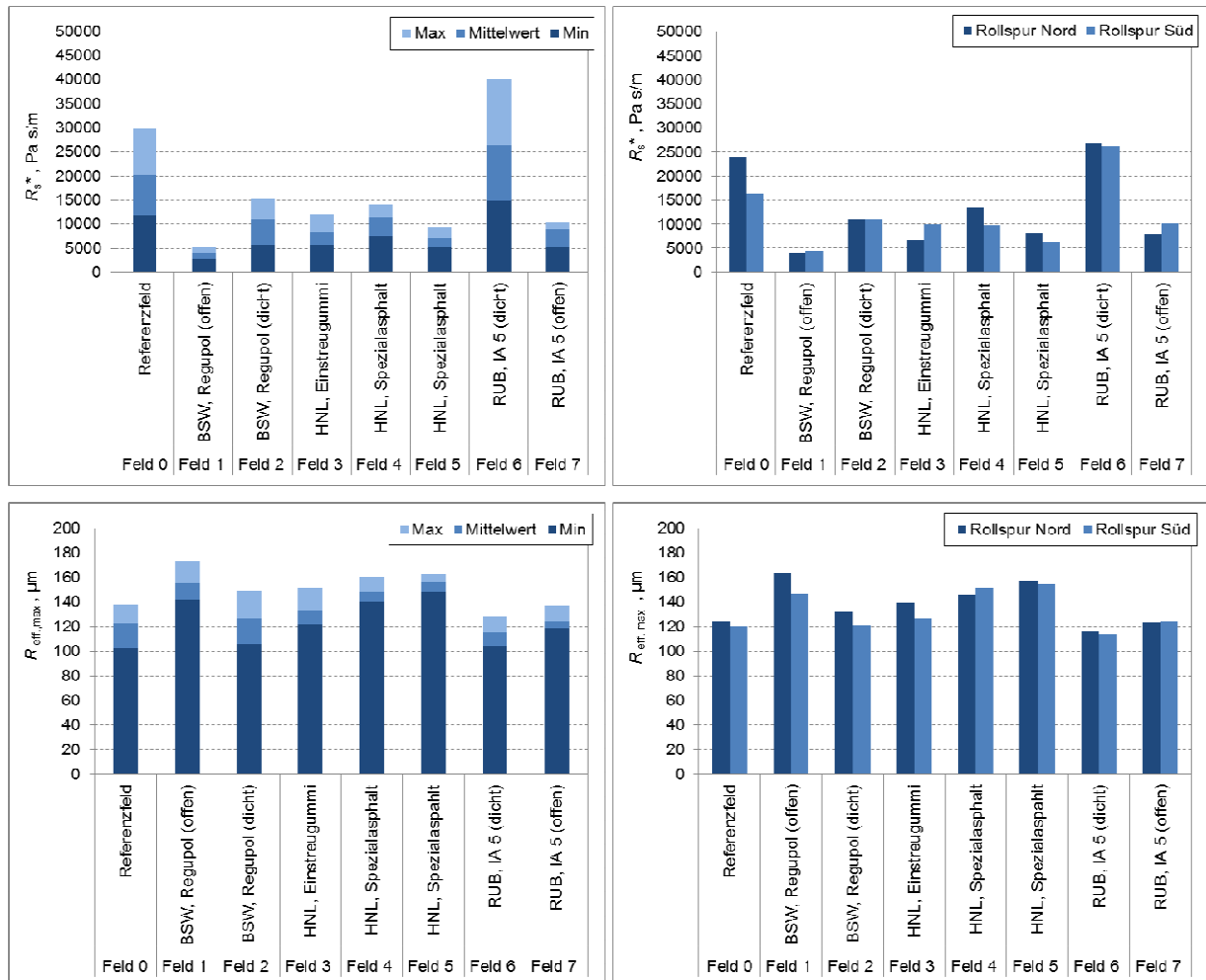
Alle weiteren akustisch bedeutsamen Kennwerte der Oberflächentexturen liegen ebenfalls eng beieinander. Die Rauigkeitstiefe im Maximum des Texturspektrums liegt (Mittelwert aller sechs Messpunkte pro Testfeld) zwischen 115  $\mu\text{m}$  und 160  $\mu\text{m}$ . Der Gestaltfaktor liegt in einem sehr engen Bereich zwischen 83% und 86% (Bild 5.4-43).



**Bild 5.4-43:** Einzelkennwerte der Oberflächentexturen als Mittelwerte über die Messpunkte in der rechten und linken Radrollspur. Oben: Rauigkeitseffektivwert des spektralen Maximums  $R_{eff,max}$ , unten rechts: Gestaltfaktor  $g$ , unten links: Mittlere Profiltiefe (MPD)

## Strömungswiderstand

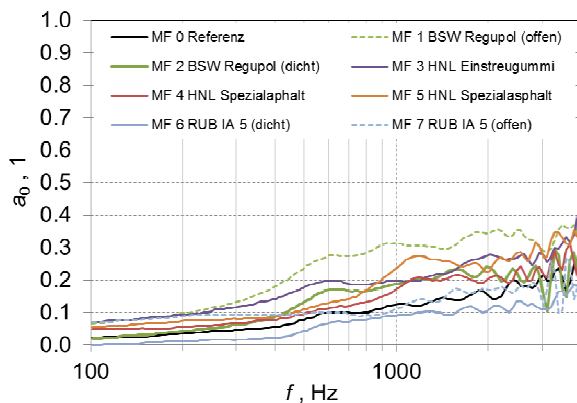
Der Strömungswiderstand unterliegt allerdings größeren Schwankungen. Wie Bild 5.4-44 zeigt, betragen die Mittelwerte 4.000 Pa s/m bis 26.000 Pa s/m, im Maximum sogar 40.000 Pa s/m. Damit streuen die Strömungswiderstände über alle Testfelder um Faktor zehn, also eine Größenordnung. Das ist akustisch von erheblicher Relevanz. Die Strömungswiderstände aller Testfelder mit elastischer Zwischenschicht liegen auch – mit Ausnahme von Testfeld 6 (Zwischenschicht RUB IA 5 dicht) – deutlich niedriger als die Strömungswiderstände für das Referenzfeld (Testfeld 0) aus Standard SMA 5 S. Testfeld 1 mit Regupol als Zwischenschicht führt dabei zu extrem niedrigen Werten des Strömungswiderstands. Nur Testfeld 6 weist Strömungswiderstände auf, die mit denen des Referenzfelds vergleichbar sind. Dieser Befund ist ein erster Hinweis darauf, dass die Deckschichten teilweise einen erheblichen Anteil zugänglicher Hohlräume aufweisen, obwohl es sich um dichte, hohlraumarme Fahrbahnbeläge handeln sollte.



**Bild 5.4-44:** Strömungswiderstand  $R_s^*$  und Rauigkeit  $R_{eff,max}$  im spektralen Maximum. Links: Minimal-, Mittel- und Maximalwerte über alle Messungen auf einem Testfeld, rechts: Mittelwerte über die Messungen in der linken und rechten Radrollspur pro Testfeld

### Schallabsorptionsgrad

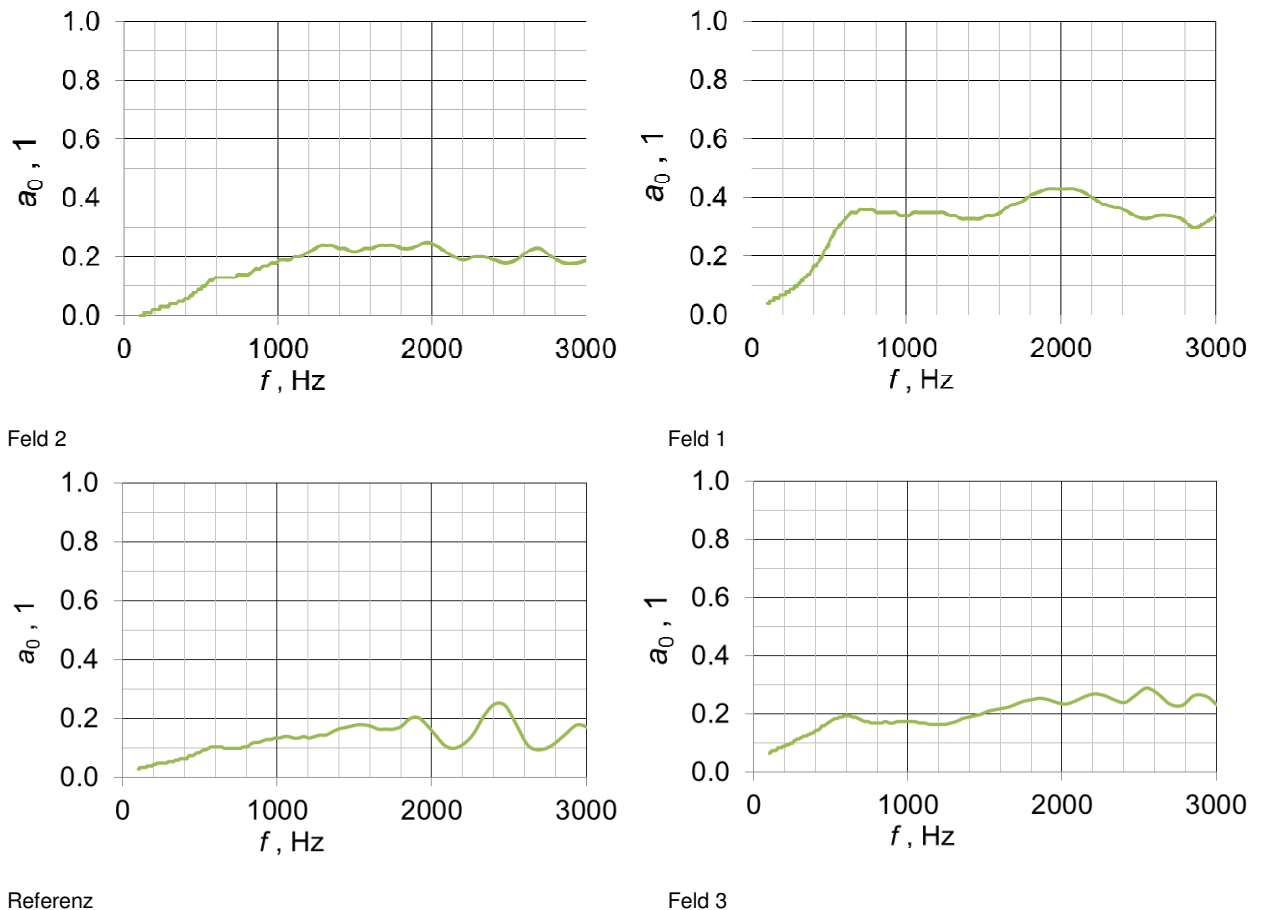
Auch die Auswertung der Schallabsorptionsgrade ergibt ein uneinheitliches, in Verbindung mit den Strömungswiderständen aber schlüssiges Bild. Bild 5.4-45 zeigt die Frequenzgänge des Schallabsorptionsgrads für die acht Testfelder, die in Bild 5.4-46 zum besseren Vergleich nochmals in Einzeldarstellungen wiedergegeben sind.



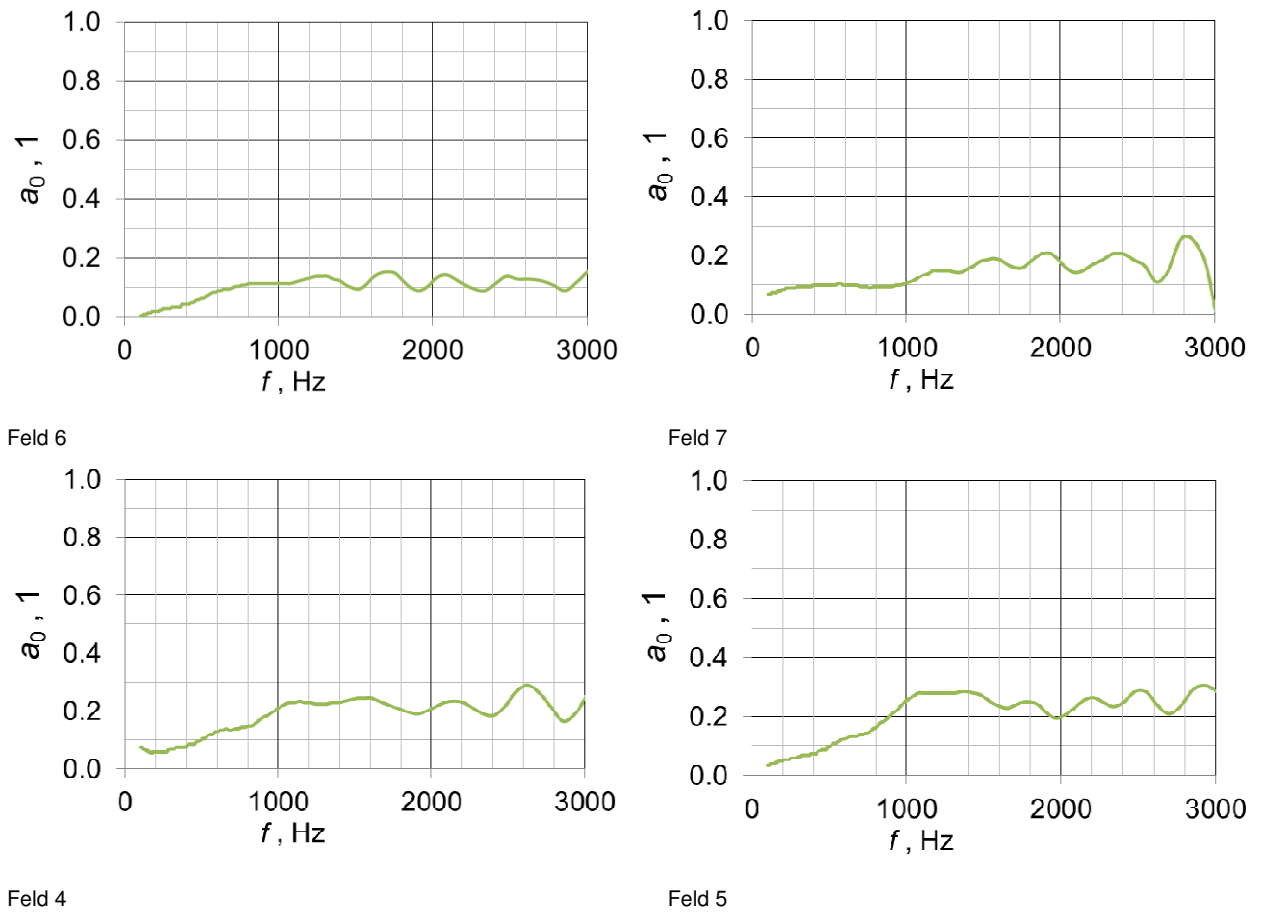
**Bild 5.4-45:** Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall  $a_0$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$

In dem für die Reifen-Fahrbahn-Geräusche maßgeblichen Frequenzbereich ab 300 Hz bis 3 kHz streuen die Schallabsorptionsgrade zwischen 0,1 und 0,35. Auch dies ist akustisch relevant. Schallabsorptionsgrade ab etwa 0,2 führen zu einer deutlichen Verminderung der Schallabstrahlung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche aus dem Kontakt. Das Testfeld 1 mit offenzelligem Regupol als Zwischenschicht weist dabei mit Werten zwischen 0,2 und 0,35 die höchsten Schallabsorptionsgrade in dem genannten Frequenzbereich auf. Dieses Ergebnis schließt lückenlos an den für dieses Testfeld ermittelten niedrigen Strömungswiderstand von 4.000 Pa s/m an. Auch andere Testfelder wie Nr. 3 und Nr. 5 führen zu Schallabsorptionsgraden deutlich über 0,2 bei entsprechend niedrigen Strömungswiderständen von 7.500 Pa s/m bzw. 7.000 Pa s/m. Das Referenzfeld erreicht dagegen bei keiner Frequenz den Wert von 0,2 für den Schallabsorptionsgrad. Der Schallabsorptionsgrad des Testfelds 6 bleibt deutlich unter diesem Schwellwert, was wiederum sehr gut mit dem Ergebnis für den Strömungswiderstand von 26.000 Pa s/m (Mittelwert) übereinstimmt.

Damit ist ein wichtiger Befund für die Beurteilung der akustischen Wirkung dieser Testfelder festzuhalten. Die Deckschichten mehrerer Testfelder weisen einen gegenüber dem Referenzfeld in dem für die Reifen-Fahrbahn-Geräusche wichtigen Frequenzbereich zwischen 600 Hz und 2 kHz deutlich erhöhten Schallabsorptionsgrad auf, der zwangsläufig mit einem erhöhten Hohlraumgehalt in der Deckschicht zusammenhängen muss. Da es sich bei dem Deckschichtmaterial in allen Fällen um dasselbe Mischgut handelt, kann der erhöhte Hohlraumgehalt nur durch eine schlechtere Verdichtung verursacht sein. Die schlechtere Verdichtung wiederum wird durch die elastischen Zwischenschichten hervorgerufen, die der Walze aufgrund ihrer Nachgiebigkeit beim Verdichtungsvorgang einen geringeren Widerstand entgegensetzen und damit den Verdichtungsgrad verringern.



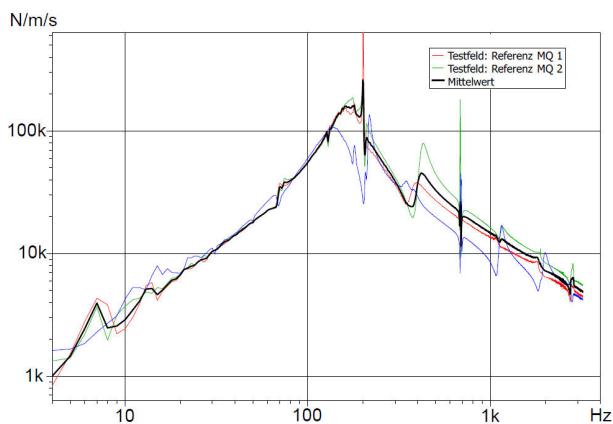




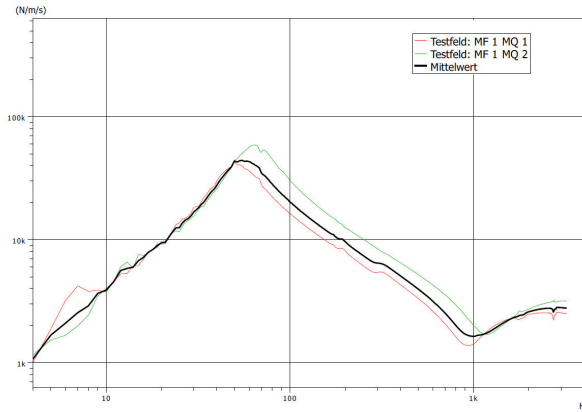
**Bild 5.4-46:** Einzeldarstellung der Schallabsorptionsgrade für senkrechten Schalleinfall  $a_0$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$

### Mechanische Impedanz mittels elektrodynamischem Shaker

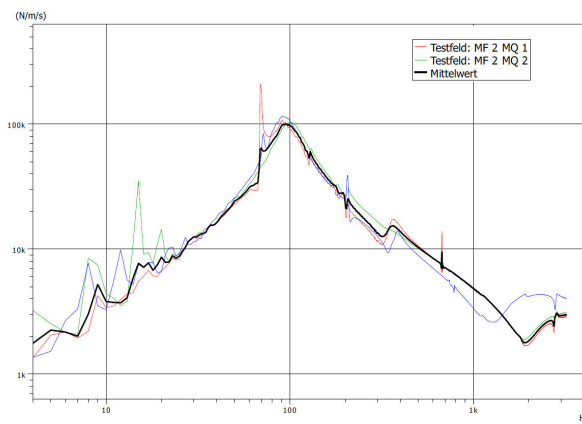
In Bild 5.4-47 bis Bild 5.4-54 sind die Frequenzgänge der mechanischen Impedanz (Betrag) über einen Bereich von 600 N s/m bis 600.000 N s/m im Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 4 kHz aufgetragen. Die Impedanzkurven weisen einen unteren massebedingten Ast auf, der in eine Antiresonanz (Pseudoresonanz) mündet, um in einen zweiten Abschnitt überzugehen, der einen steifigkeitsbedingten Abfall und in drei Fällen auch eine Resonanz aufweist (Feld 1, Feld 4 und Feld 5), an der die Impedanz ein Minimum annimmt. Der untere Abschnitt bis zur Antiresonanz ist messsystembedingt, der obere Abschnitt wird durch die mechanische Impedanz des Fahrbahnbelags getrieben, die sich aufgrund der unterschiedlichen Zwischenschichten entsprechend unterschiedlich darstellt. Der Vergleich von Feld 4 mit einer Dicke der elastischen Schicht von 1,5 cm und Feld 5 mit einer Dicke von 2,5 cm zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Erwartung der Abnahme der Resonanzfrequenz des Feder-Masse-Systems.



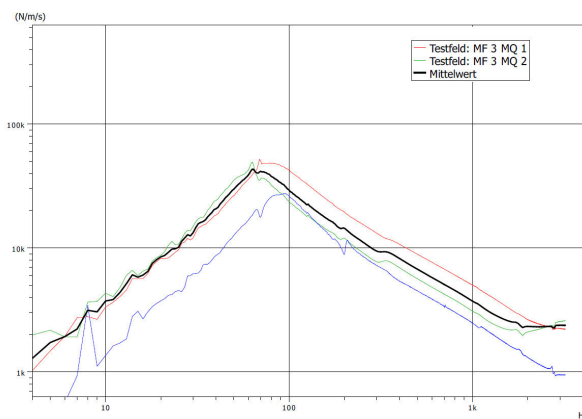
**Bild 5.4-47:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Referenzfeld SMA 5



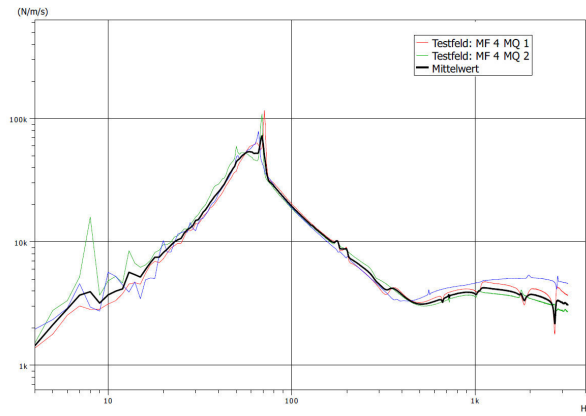
**Bild 5.4-48:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Testfeld 1 SMA 5 auf BSW Regupol II (Schichtdicke 0,6 cm)



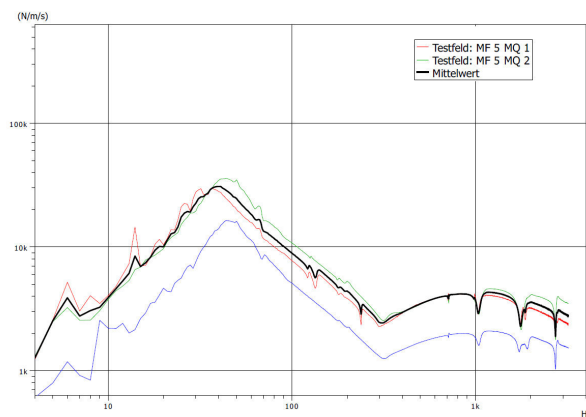
**Bild 5.4-49:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Testfeld 2 SMA 5 auf BSW Regupol I (Schichtdicke 0,6 cm)



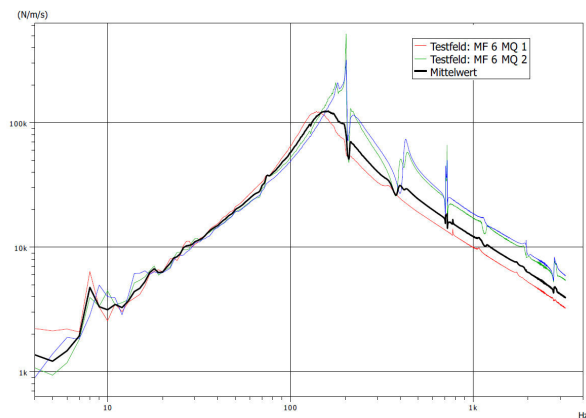
**Bild 5.4-50:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Testfeld 3 SMA 5 mit HNL Einstreugummi (Schichtdicke 0,6 cm)



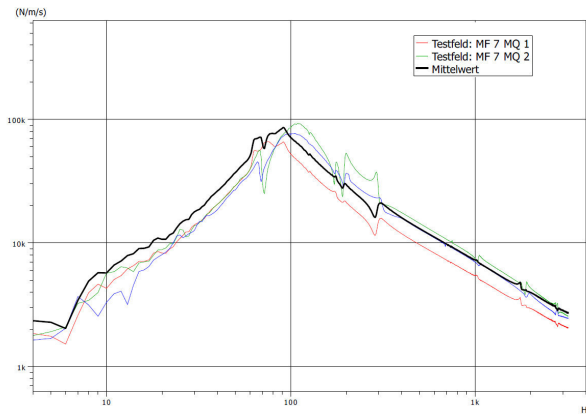
**Bild 5.4-51:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Testfeld 4 SMA 5 auf HNL Spezialasphalt (Schichtdicke 1,5 cm)



**Bild 5.4-52:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Testfeld 5 SMA 5 auf HNL Spezialasphalt (Schichtdicke 2,5 cm)



**Bild 5.4-53:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Testfeld 6 SMA 5 auf RUB IA 5 (dicht)



**Bild 5.4-54:** Mechanische Impedanz  $|Z|$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$ . Testfeld 7 SMA 5 auf RUB IA 5 (offen)

Insgesamt ist jedoch festzuhalten, dass die Impedanzen in keinem Fall Werte unter 1.000 Ns/m annehmen, so dass sie hinsichtlich der Reifen-Fahrbahn-Geräusche akustisch wirksam werden könnten. Die elastischen Zwischenschichten können die Eingangsimpedanz der Fahrbahn nicht soweit reduzieren, dass eine Reaktion des Reifens zu erwarten wäre. Erst mit elastischen Schichten an der Fahrbahnoberfläche, mit denen der Reifen direkt in Kontakt kommen kann, lässt sich dies erzielen.

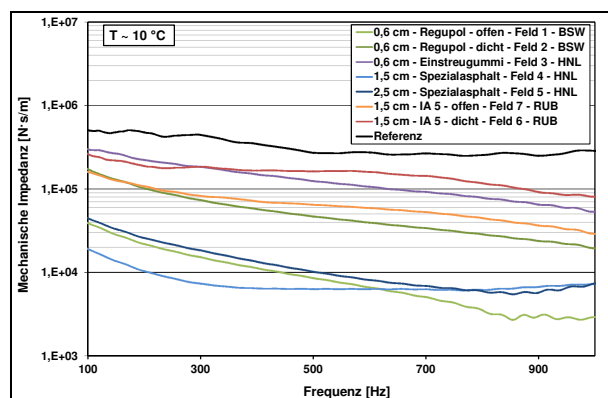
Die Verhältnisse im vorliegenden Projekt werden auch im Vergleich mit dem niederländischen IPG-Projekt [9], in dem ganz explizit oberflächenwirksame elastische und poroelastische Fahrbahndeckschichten untersucht wurden, nochmals besonders deutlich. Während im IPG-Projekt an der Resonanzstelle im Bereich von 1 kHz Impedanzen in der Größenordnung von einigen 10 Ns/m erzielt wurden, liegen die Impedanzen im vorliegenden Projekt um mindestens zwei Größenordnungen darüber. Der Reifen wird dementsprechend kaum darauf reagieren.

### Mechanische Impedanz mittels Impulshammer

Parallel dazu wurden durch die Ruhr-Universität Bochum Messungen der mechanischen Impedanz mit dem Impulshammer durchgeführt [11].

Nach dem Einbau der Erprobungsfelder wurde die mechanische Impedanz mit dem Impulshammer bei einer Oberflächentemperatur von ungefähr 10 °C gemessen. Als erstes Bewertungskriterium der mechanischen Impedanz in Bezug auf das Dämpfungspotenzial wird die Betrachtung der gesamten Impedanzkurve über den dargestellten Frequenzbereich herangezogen. Die Ergebnisse der gemittelten Impedanzkurven lassen sich in Bild 5.4-38 erkennen. Die schwarze Kurve zeigt die Impedanzkurve des Referenzfeldes ohne Dämpfungsschicht. Erwartungsgemäß ist dies auch die oberste Kurve, die die höchste mechanische Impedanz aufweist. Somit stellt, bezüglich der hier verwendeten Messtechnik, jede der untersuchten Dämpfungsschichten eine Verbesserung hinsichtlich der mechanischen Impedanz der Fahrbahn und der zu erwartenden Lärmemission dar, verglichen mit dem Einbau ohne Dämpfungsschicht.

Der Unterschied zwischen den einzelnen Erprobungsfeldern ist dabei signifikant und lässt sich nicht aufgrund von Streuungen innerhalb einer Messung erklären, d.h. es lässt sich eine eindeutige Rangfolge der unterschiedlichen Dämpfungsschichten hinsichtlich der Impedanz erstellen. Wird die Kohärenz aller Messungen der einzelnen Erprobungsfelder betrachtet, so lässt sich erkennen, dass diese grundsätzlich nicht unter 0.975 fällt. Dies lässt auf eine hohe Plausibilität der einzelnen Ergebnisse schließen.



**Bild 5.4-55:** Mechanische Impedanz – Erprobungsfelder NATO Air Base Geilenkirchen

Als Bewertungskriterium der mechanischen Impedanz wurde desweiteren der Flächeninhalt unter der Impedanzkurve verglichen. In Tabelle 5.4-10 ist das Integral der Impedanzkurven der einzelnen Erprobungsfelder im Bereich von 100 bis 1000 Hz aufsteigend sortiert. Je niedriger das Integral der Impedanz, desto geringer ist der zu erwartende emittierte Lärmpegel eines vorbeifahrenen Kraftfahrzeuges.

Es lassen sich annähernd vier verschiedene Bereiche erkennen. Der erste Bereich mit den niedrigsten Impedanzkurven ergibt sich dabei für die Felder 1,4,5. Der Flächeninhalt in dem relevanten Frequenzbereich von 100 bis 1000 Hz beträgt hierbei maximal  $20 \cdot 10^6$  N/(m/s). Ein zweiter Bereich rangiert um  $100 \cdot 10^6$  N/(m/s) und ein dritter um  $240$  N/(m/s). Die Messung ohne eine Dämpfungsschicht führt zu einem Wert von knapp unter  $700$  N/(m/s) und liegt somit mehr als doppelt so hoch, wie die nächstliegende Fahrbahn mit Dämpfungsschicht. Hier sei jedoch erwähnt, dass einige der untersuchten Konzepte für die Zusammensetzung der Dämpfungsschichten ausschließlich auf ein Höchstmaß an dämpfender Wirkung konzipiert wurden, was deutlich zulasten der einbautechnischen Eigenschaften und vermutlich der Dauerhaftigkeit des Systems führt.

Auffällig ist außerdem, dass die gemittelte Impedanzkurve für das Erprobungsfeld 4 deutlich unterhalb derjenigen des Erprobungsfeldes 5 liegt, obwohl beide Felder dieselbe Dämpfungsschicht besitzen und Feld 5 sogar eine um 1 cm dickere Dämpfungsschicht besitzt. Dies lässt vermuten, dass es eine für das jeweilige Schichtsystem optimale Schichtdicke gibt.

Allgemeingültige Aussagen bezüglich der Lärmwirkung müssen allerdings mit Hilfe von Feldversuchen mit kombinierten Nachgiebigkeits- und direkten Lärmmessungen getroffen werden. Für repräsentative Ergebnisse müssen gleichbleibende Bedingungen, wie die Temperatur, eine feststehende Mischgutzusammensetzung, vergleichbare Verdichtungsgrade (Hohlraumgehalte) und Oberflächentexturen der Asphaltdeckschicht vorausgesetzt werden. Die Untersuchungen zur Überprüfung der lärmetechnischen Wirksamkeit erfolgten durch umfangreiche akustische Messungen hinsichtlich der Messung der Lärmpegel.

Erprobungsfeld	Material der Dämpfungsschicht	Dicke der Dämpfungsschicht [cm]	Flächeninhalt der Impedanz von 100 - 1000 Hz [ $10^6$ N·s/m]
4	Spezialasphalt	1,5	12.167
1	Regupol - offen	0,6	17.151
5	Spezialasphalt	2,5	20.385
2	Regupol - dicht	0,6	82.986
7	IA 5 - offen	1,5	112.559
3	Einstreugummi	0,6	235.556
6	IA 5 - dicht	1,5	241.791
R	-	-	692.140

Tab. 5.4-10: Integral der Impedanzkurven in einem Frequenzbereich von 100-1000 Hz

### CPB- und CPX-Messungen

Die Vorbeifahrtpegelmessungen wurden ohne Antrieb durchgeführt. Dazu wurde das Fahrzeug bis etwa dreißig Meter vor der Messstelle auf etwas mehr als die Nominalgeschwindigkeit beschleunigt. Danach wurde ausgekuppelt und der Motor ausgeschaltet. Auf diese Weise sind die gemessenen Vorbeifahrtgeräusche nicht durch Antriebsgeräusche beeinflusst.

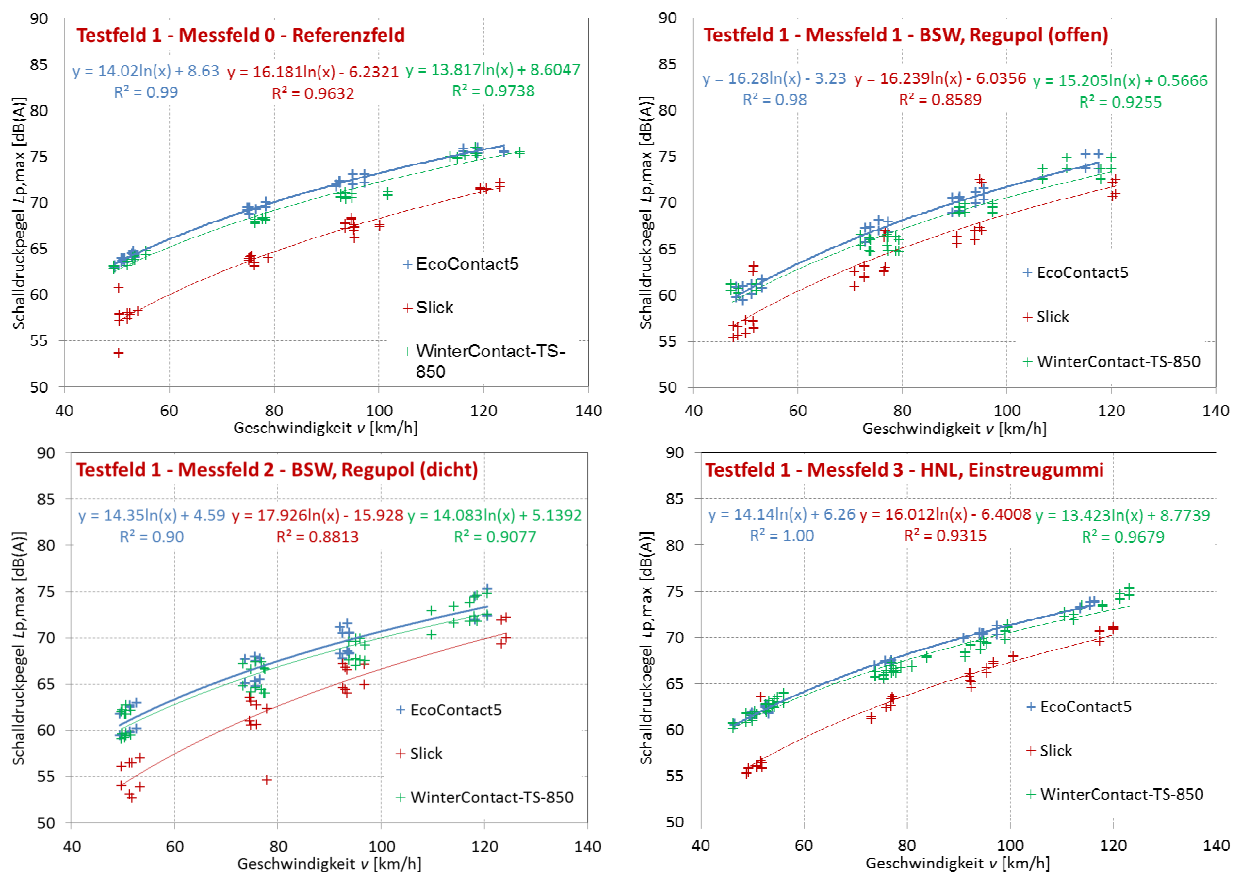
Wie Bild 5.4-66 oben zeigt, standen die südlich der Testfelder positionierten Mikrofone bei den Messungen an den Feldern 0, 1, 2 und 3 in der südlich an die Testfeldfläche angrenzenden Grasfläche. Bei den Feldern 4 bis 7 war dies bei den nördlich positionierten Mikrofonen der Fall. Derartige Flächen wirken schallabsorbierend, was einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse von Vorbeifahrtmessungen hat. Die Unterschiede der Vorbeifahrtpegel bei normgerechter Positionierung der Mikrofone auf der schallreflektierenden Oberfläche zu der Messung auf der Grasfläche betragen bis zu 4 dB. Aus diesem Grund mussten die Ergebnisse an einzelnen Mikrofonpositionen verworfen werden. In allen anderen Fällen waren die Mikrofone normgerecht auf einer schallreflektierenden Oberfläche positioniert.

In Bild 5.4-68 sind die gemessenen Vorbeifahrtpegel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit getrennt nach Reifen und Feldern dargestellt. Bild 5.4-69 zeigt die aus den Messwerten interpolierten Funktionen des Vorbeifahrtpegels in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Erwartungsgemäß entstehen mit dem profillo-

sen Reifen die niedrigsten Vorbeifahrtpegel. Der Conti WinterContact Reifen erzeugt systematisch etwas niedrigere Pegel als der EcoContact Reifen, was damit zusammenhängt, dass der Reifen-Fahrbahn-Kontakt des Winterreifens aufgrund seiner auf niedrige Temperaturen abgestimmten Gummimischung bei den sommerlichen Temperaturen während der Messungen deutlich weicher ist als der des Sommerreifens. Die in die Diagramme eingetragenen Werte enthalten keine Temperaturkorrektur mit Bezug auf die Standardlufttemperatur von 20°C, da die Lufttemperaturen während der Messungen in einem engen Band zwischen 16°C und 26°C lagen.

Die in Bild 5.4-58 und Bild 5.4-59 aufgetragenen Vorbeifahrtpegel der beiden Profilreifen weisen bei niedrigen Geschwindigkeiten über alle Felder Werte zwischen 61 und 65 dB(A) auf. Bei hohen Geschwindigkeiten zwischen 73 und 77 dB(A). Das Referenzfeld führt zu Vorbeifahrtpegeln, die in der Mitte der Wertebereiche über alle Testfelder liegen. Es gibt also Felder, die zu höheren Pegeln als das Referenzfeld führen und Felder, die zu niedrigeren Pegeln führen. Bild 5.4-67 macht deutlich, dass die Felder 1 und 3 systematisch kleinere Vorbeifahrtpegel als das Referenzfeld hervorrufen, das Feld 6 dagegen systematisch etwas höhere.

Die Shorehärte A wurde zwischen den Messungen an Seitenwand, Profilklotz und Laufband an allen vier Reifen gemessen. Für den EcoContact Reifen ergab sich durchgängig ein Wert von 64. Für den WinterContact Reifen wurden dagegen Werte zwischen 55 und 61 gemessen mit einem Mittelwert von 59.



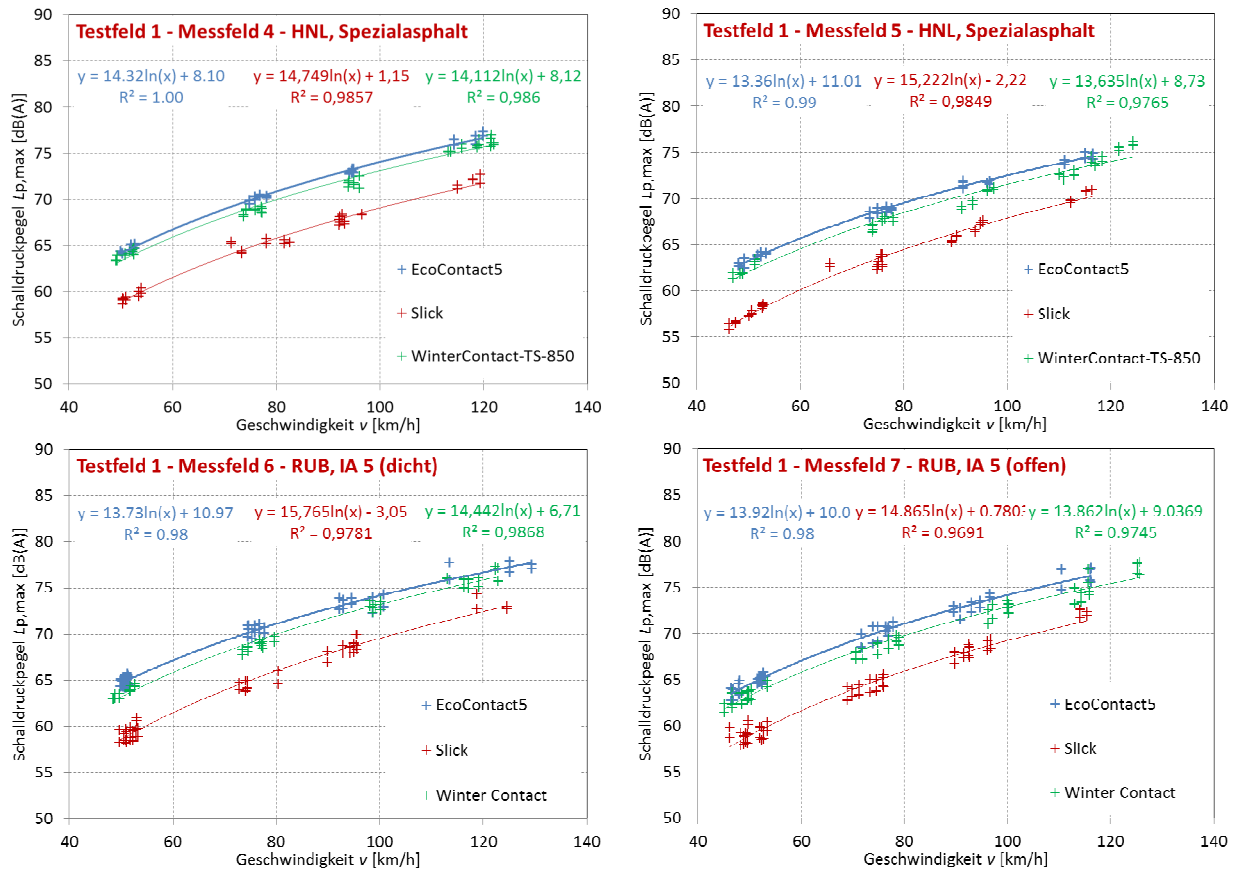


Bild 5.4-56: Vorbeirollpegel in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit v

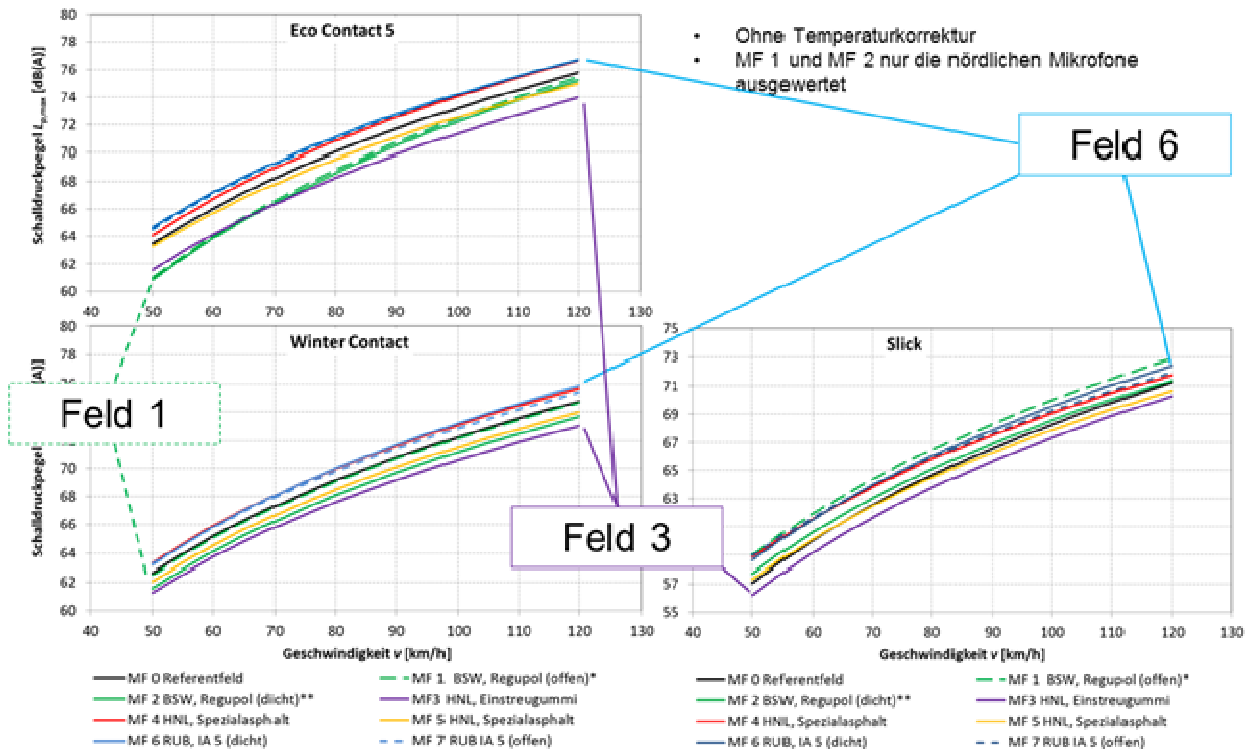
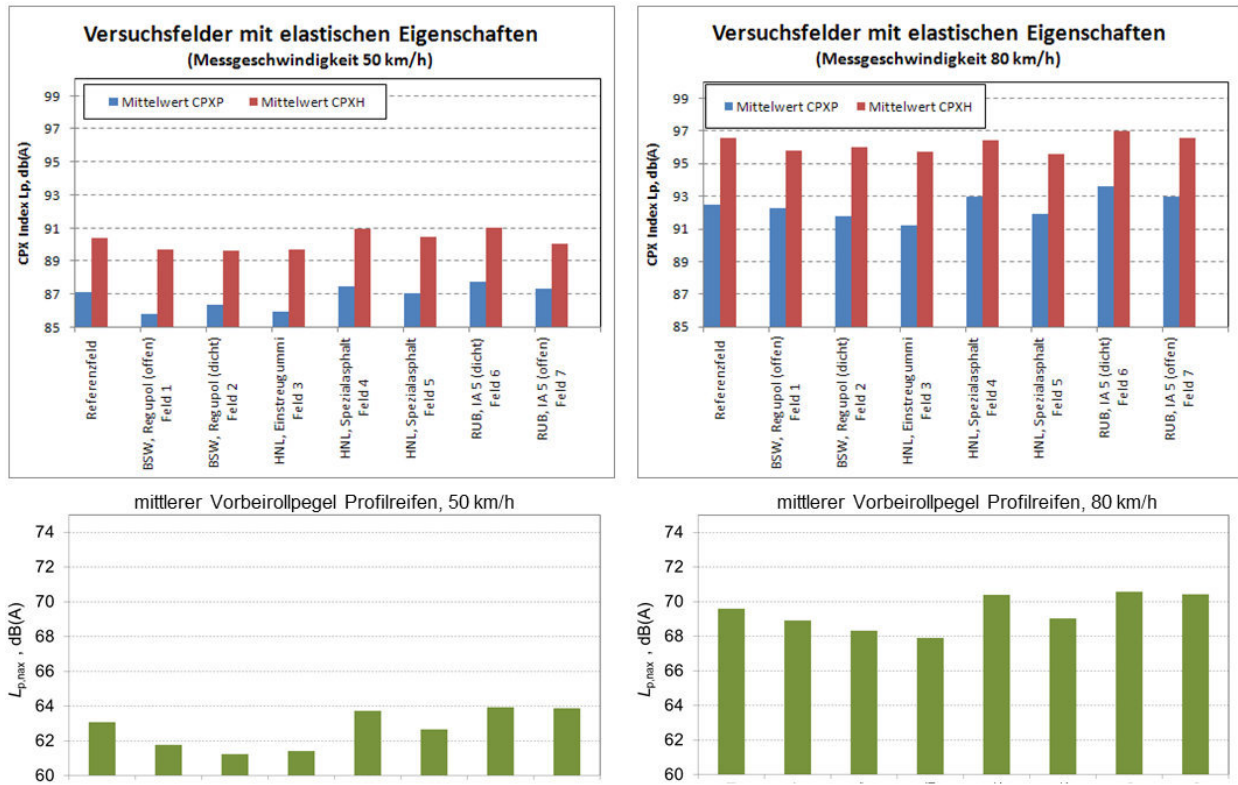
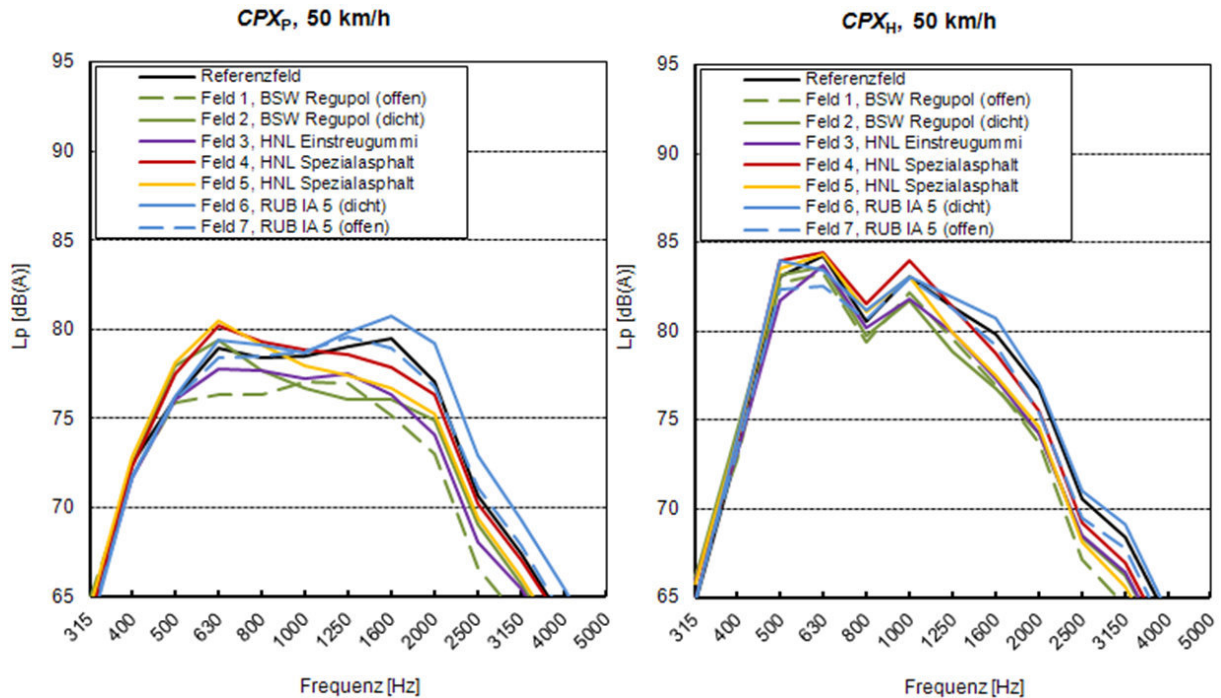


Bild 5.4-57: Interpolierte Funktion des Vorbeirollpegels in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

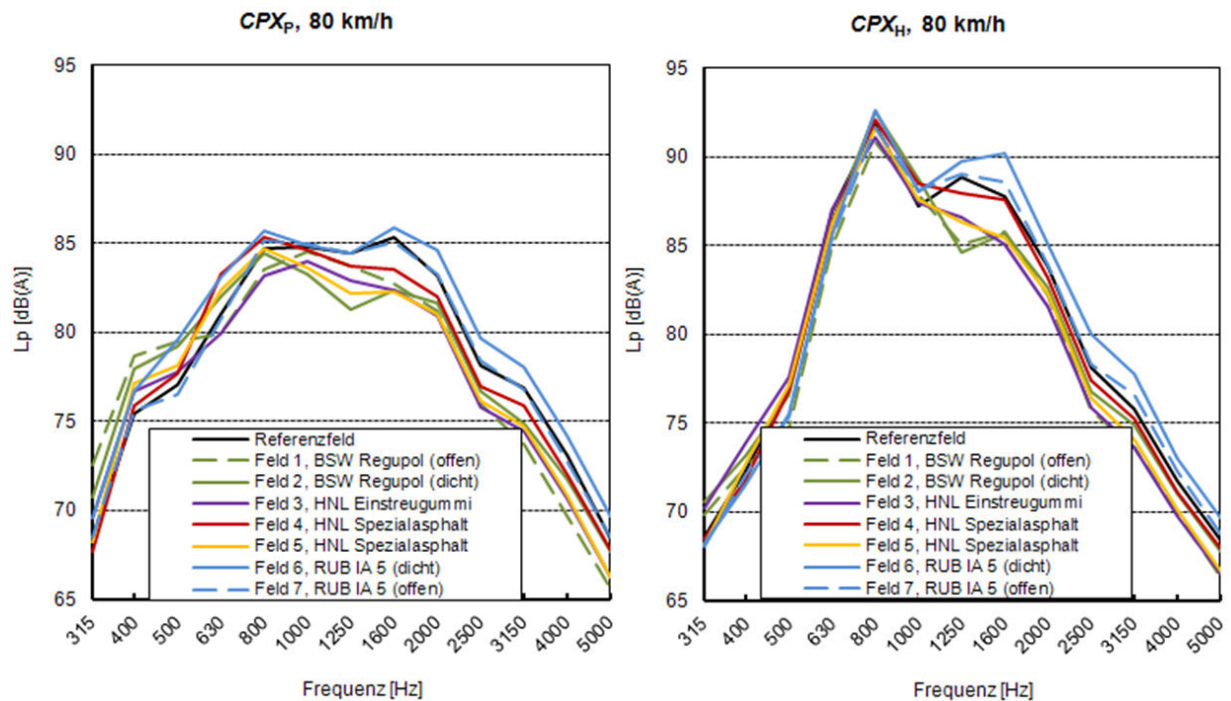


**Bild 5.4-58:** Oben: Mittlerer Schalldruckpegel  $L_p$  in dB(A) für die Reifen P und H auf den acht Testfeldern; links: Geschwindigkeit  $v = 50$  km/h, rechts: Geschwindigkeit  $v = 80$  km/h. Unten: Mittlere Vorbeirollpegel der Profilreifen auf den acht Testfeldern als Ergebnis der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen; links: Geschwindigkeit  $v = 50$  km/h, rechts: Geschwindigkeit  $v = 80$  km/h



**Bild 5.4-59** Spektren des mittleren Schalldruckpegels  $L_p$  in dB(A) für die Reifen P und H auf den acht Testfeldern, Geschwindigkeit  $v = 50$  km/h. Links: Reifen P, rechts: Reifen H





**Bild 5.4-60:** Spektren des mittleren Schalldruckpegels  $L_p$  in dB(A) für die Reifen P und H auf den acht Testfeldern, Geschwindigkeit  $v = 80$  km/h. Links: Reifen P, rechts: Reifen H

Bild 5.4-58 zeigt die Ergebnisse für alle acht Testfelder zusammen mit den Ergebnissen aus den Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen. In Bild 5.4-59 und Bild 5.4-60 sind die dazugehörigen Terzspektren für die Geschwindigkeiten 50 km/h bzw. 80 km/h dargestellt. Wie Bild 5.4-58 zu entnehmen ist, bilden die CPX-Pegel für den Reifen P die Vorbeifahrtpegel sowohl für 50 km/h als auch 80 km/h in nahezu idealer Weise ab. Das Ranking der Oberflächen ist bei beiden Messmethoden gleich.

Die SMA 5 S Referenzoberfläche Feld 0 ist so gut gelungen, dass mit etwa 92,5 dB(A) CPX-Pegel (Reifen P,  $v = 80$  km/h) entstehen, die gegenüber der Referenzoberfläche nach RLS-90 eine Pegelminderung von 8 dB erwarten lässt. Dies ist alleine auf die sehr gute Textur zurück zu führen, da der Schallabsorptionsgrad im gesamten Frequenzbereich der Reifen-Fahrbahn-Geräusche unter 0,2 liegt.

Die Unterschiede der CPX-Pegel sowohl für Reifen P als auch Reifen H und der Vorbeifahrtpegel der übrigen Felder zur Referenzoberfläche bewegen sich bei beiden Geschwindigkeiten in einem Bereich von -1,5 dB bis +1 dB. In die Pegelunterschiede fließen dabei weniger die Unterschiede in den mechanischen Impedanzen als im Schallabsorptionsgrad und im Strömungswiderstand ein. Der Strömungswiderstand resultiert auf diesen Testfeldern aus einem texturinduzierten und einem hohlrauminduzierten Anteil, die sich messverfahrensbedingt nicht getrennt angeben lassen. Dies erschwert die Interpretation der Ergebnisse insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten, da sich niedrige texturinduzierte Strömungswiderstände ungünstig auf den Rollgeräuschpegel auswirken, niedrige hohlrauminduzierte Strömungswiderstände dagegen positiv. Dass trotz deutlich erhöhtem Schallabsorptionsgrad auf Feld 1, das bei 50 km/h in der CPX-Messung für Reifen P auch den niedrigsten Rollgeräuschpegel hervorruft, ein deutlicher Pegelanstieg bis 80 km/h auftritt als bei den anderen Testfeldern (siehe Bild 5.4-69), könnte einem Anteil niedrigen texturinduzierten Strömungswiderstands geschuldet sein, so dass der in Bild 5.4-54 ausgewiesene niedrige Strömungswiderstand für Feld 1 nicht alleine auf den erhöhten Hohlraumgehalt, sondern auch auf eine rauhere Textur zurückzuführen ist. Dies stimmt auch mit dem Ergebnis der Texturmessung überein, die für Feld 1 den im Vergleich zu den anderen Testfeldern höchsten Rauheitswert im Maximum des Texturspektrums ausweist (Bild 5.4-4). Bei niedrigen Geschwindigkeiten ist das Ergebnis eindeutiger. Die höher schallabsorbierenden Testfelder führen insgesamt auch zu niedrigeren Rollgeräuschpegeln.

Für den lkw-ähnlichen Reifen H in der CPX-Messung lässt sich feststellen, dass die Rollgeräuschpegel stark durch eine fahrbahnunabhängige, also reifenbestimmte Komponente im Frequenzbereich zwischen 500 Hz und 800 Hz beeinflusst sind. Dies führt beim Reifen H zu noch kleineren Pegelunterschieden zwischen den einzelnen Testfeldern als beim Reifen P.

#### 5.4.6 Zusammenfassung

Ziel dieses Teilverbundes war es, eine Erhöhung der lärmtechnischen Wirksamkeit von Asphaltkonstruktionen durch die Nutzung schwingungsdämpfender Eigenschaften des Straßenoberbaus als Gesamtsystem durch Integration einer elastischen Dämpfungsschicht zu erreichen. Diese Schicht war so zu bemessen, dass sie mit hohen Dämpfungseigenschaften einen lärmtechnisch positiven und keinen bautechnisch negativen Einfluss auf die technische Nutzungs- und Lebensdauer hat.

Im Labormaßstab wurden zunächst unterschiedliche Konzepte einer elastischen Dämpfungsschicht entwickelt und hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit sowie des Dämpfungspotenzials getestet. Aus den Ergebnissen an den einzelnen Asphalt-Dämpfungsplatten geht hervor, dass sowohl die Mischgutzusammensetzung (Hohlraumgehalt) und die Wahl des Bindemittels als auch unterschiedliche Temperaturen einen wesentlichen Einfluss auf das Dämpfungsverhalten in Form der mechanischen Impedanz von Asphalt-schichten haben. So nimmt mit größerem Hohlraumgehalt und elastischerem Bindemittel die mechanische Impedanz ab und die Nachgiebigkeit steigt.

Weiterhin wurden die Wirkung und der Einfluss von verschiedensten Asphalt-Dämpfungsschichten in einem Mehrschichtsystem (drei- und zweischichtig) auf ihre relevanten Eigenschaften untersucht. Zur Charakterisierung der Eigenschaften der verschiedenen Asphalt-systeme, besonders hinsichtlich der Nachgiebigkeit bzw. der Dämpfung, wurden einerseits lärmtechnische Untersuchungen durch die Messung der mechanischen Impedanz mit dem Impulshammer und andererseits bautechnische Untersuchungen (Haftzugprüfung, Vierpunkt-Biegeversuch) durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Untersuchungen an Mehrschichtsystemen mit integrierter elastischer Dämpfungsschicht deuten darauf hin, dass im Vergleich zu Ergebnissen aus Einzelplattenuntersuchungen keine eindeutigen Auswirkungen hinsichtlich der mechanischen Impedanz und des Lärm-minderungsverhaltens zu erreichen sind, wenn auch gleichzeitig ein bautechnisch akzeptables Konzept vorliegt.

Akustische Messungen an Schichtaufbauten im Labormaßstab mit dem Shaker haben in diesem Zusammenhang zu der Erkenntnis geführt, dass eine Verringerung der dynamischen Steifigkeit der elastischen Schicht bzw. eine Erhöhung der Dicke der elastischen Schicht eine Verringerung der Resonanzfrequenz zur Folge hat; es kommt zu einer Verringerung der mechanischen Eingangsimpedanz oberhalb des massedominierten Frequenzbereiches. Des Weiteren konnte anhand der Ergebnisse der mechanischen Eingangsimpedanz an Schichtaufbauten mit unterschiedlicher Lage der elastischen Schicht ermittelt werden, dass, je höher die elastische Schicht im Schichtaufbau angeordnet ist, desto tendenziell geringere Werte für die mechanische Eingangsimpedanz festzustellen sind.

Die im Labor gewonnenen Erkenntnisse wurden anhand von Erprobungsfeldern unter Praxisbedingungen auf der NATO Air Base in Geilenkirchen überprüft. Dabei wurden die Dämpfungseigenschaften in situ durch die Bestimmung der mechanischen Impedanz mit Hilfe des Impulshammers quantifiziert. Die lärmtechnische Wirksamkeit wurde anhand umfangreicher Messungen (u.a. Lärmpegel) untersucht. An Ausbauproben sowie Asphaltmischgutproben wurden „konventionelle“ Asphalteigenschaften bestimmt. Des Weiteren wurden Performance-Prüfungen zur Ansprache des Steifigkeitsverhaltens, des Ermüdungsverhaltens, der Kälteflexibilität und des Verformungsverhaltens durchgeführt. Für die Prüfung der Steifigkeiten und der Kälteflexibilität wurden zusätzlich zu den in situ entnommenen Proben Labormischungen hergestellt.

Die Untersuchungen haben grundsätzlich gezeigt, dass eine Lärmreduzierung von nahezu 3 dB(A) durch eine Asphaltkonstruktion mit elastischer Zwischenschicht erreicht werden kann (siehe Lärm-messungen). Ein belastbarer Nachweis konnte jedoch aufgrund einer stark heterogenen Oberfläche der Deckschicht der hergestellten Erprobungsfelder nicht erbracht werden. Hierzu müssen noch weitere Untersuchungen folgen.

Der Stellenwert der Nachgiebigkeit bei der Entstehung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche ist bisher noch nicht eindeutig bekannt und die mechanische Impedanz gibt dabei nur einen Teilbereich wieder. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Einflussfaktoren auf die Nachgiebigkeit einer Asphalt-schicht, wie Bindemittelart, -menge, Hohlraumgehalt, Temperatur, mit Labormethoden sehr gut beschrieben werden können. Der Grad der Wirksamkeit sowie die bau- und lärmtechnisch sinnvollste Lage einer Dämpfungsschicht konnten in situ allerdings noch nicht eindeutig bestimmt werden.

Allgemeingültige Aussagen bezüglich der Lärmwirkung können erst anhand von Feldversuchen mit kombinierten Impulshammer- und direkten Lärm-messungen getroffen werden. Für repräsentative Ergebnisse müssen gleichbleibende Bedingungen hinsichtlich Temperatur, Mischgutzusammensetzung, Verdichtungsgrad (Hohlraumgehalt) und Oberflächentextur aber auch Schichtdicke der Asphaltdeckschicht vorausgesetzt werden.

In bautechnischer Hinsicht wurden Varianten angewendet, von denen zu erwarten ist, dass bei weiterer Optimierung eine ausreichende Gebrauchstauglichkeit insbesondere des Schichtenverbundes und der

Verdichtung der eingebauten Schichten hergestellt werden kann. Die Ergebnisse lassen allerdings vermuten, dass die Deckschicht wahrscheinlich der lärmtechnisch sinnvollste Ansatz für eine elastische Dämpfungsschicht ist.

Gegenüber dem Referenzbelag SMA 5 S wurden mit den Testfeldern mit elastischen Zwischenlagen Rollgeräuschpegel erzielt, die sich von den Rollgeräuschpegeln auf dem Referenzbelag um nicht mehr als etwa 1 dB unterscheiden. Der Vergleich der elastischen Schichten mit dem Referenzbelag wird durch die Tatsache, dass die SMA 5 S Deckschichten auf den elastischen Schichten nicht schallabsorptionsfrei ausgeführt werden konnten, beeinträchtigt. Durch die offenbar schlechtere Verdichtbarkeit des SMA 5 S Mischguts auf den elastischen Zwischenschichten entstehen zugängliche Hohlräume, die sich durch einen akustisch wirksamen Schallabsorptionsgrad bemerkbar machen. Insofern muss davon ausgegangen werden, dass die gegenüber dem Referenzbelag niedrigeren Werte einiger Testfelder mit elastischen Zwischenschichten auf das Schallabsorptionsvermögen der Deckschichten und nicht auf die Wirkung einer veränderten mechanischen Impedanz zurückzuführen sind.

Eine geräuschmindernde Wirkung durch Anpassung der mechanischen Impedanz wird im vorliegenden Fall auch noch dadurch erschwert, dass die Deckschichten aus SMA 5 S – unabhängig von der zusätzlich auftretenden Schallabsorption in einigen Fällen – bautechnisch sehr gut gelungen sind und Texturen aufweisen, die gegenüber der Referenz nach RLS-90 eine deutliche Pegelminderung erwarten lassen. Für weitere Untersuchungen wäre es deshalb von Interesse, anstelle dieser feinrauen Deckschicht einen Fahrbelag zu wählen, der ohne elastische Modifikation deutlich höhere Rollgeräuschpegel hervorruft, um relativ stärker von den elastischen Modifikationen zu profitieren.

## Literatur

- [1] BECKENBAUER, T., et al.: „Einfluss der Fahrbanntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch“. Forschungsberichte aus dem Forschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen und der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Heft 847, August 2002
- [2] SCHWANEN, W., et al.: „Acoustic Optimization Tool - RE3: Measurement data Kloosterzande test track.“ Bericht M+P.DWW.06.04.8 im Rahmen des Forschungsprojekts „Innovation Program Noise“ (IPG) des Niederländischen Verkehrsministeriums, Vught, Niederlande, November 2007.
- [3] BECKENBAUER, T., KROPP, W.: „Typisierung von Reifen und Fahrbelägen“. Tagungsband DAGA 2010, Paper Nr. 392, Deutsche Gesellschaft für Akustik DEGA, Berlin, 2010.
- [4] KROPP, W.: „Ein Modell zur Beschreibung des Rollgeräusches eines unprofilierten Gürtelreifens auf rauer Straßenoberfläche“. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 11, Nr. 166, VDI Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [5] KROPP, W.: „Structure-borne Sound on a Smooth Tyre“. Journal of Applied Acoustics, Vol. 26, S. 181-192, 1989.
- [6] CREMER, L., HECKL, M.: „Körperschall“. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1996.
- [7] HAMET, J.-F.: „Estimation of the attenuation of rolling noise by acoustic absorption“. EU-Projekt SILVIA, Forschungsbericht SILVIA-INRETS-013-00-WP2-09/06/2004, Bron Cedex, France, 2004
- [8] KROPP, W., SABINIARZ, P., BRICK, H., et al.: „On the sound radiation of a rolling tyre“. Journal of Sound and Vibration, 331 (8), S. 1789-1805, 2012.
- [9] KUIJPERS, A., PEETERS, B., KROPP, W., BECKENBAUER, T.: „Acoustic Optimization Tool - Modeling refinements in the SPERoN framework.“ Bericht M+P.DWW.06.04.7 im Rahmen des Forschungsprojekts „Innovation Program Noise“ (IPG) des Niederländischen Verkehrsministeriums, Vught, Niederlande, November 2007.
- [10] GOGOLIN, D.: Untersuchungen zur Rheologie bitumenhaltiger Bindemittel und deren Einfluss auf die lärmtechnischen Eigenschaften von Asphaltdeckschichten, Dissertation, Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Ruhr-Universität Bochum, 2012
- [11] RADENBERG, M., MANKE, R.: „Asphaltkonstruktion mit geräuschmindernder Wirkung“ (FE 09.0166/2010/HRB) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014

Der Schlussbericht zum Teilvorhaben VI-III (Förderkennzeichen 19U10016 A, 19U10016 C, 19U10016 H und 19U10016 I) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.

## 5.5 Teilvorhaben VI-IV

### Entwicklung und Optimierung einer dauerhaft lärmarmen Oberbetonschicht mit offenporiger Struktur (COPS)

Dr.-Ing. Thomas Beckenbauer  
Müller-BBM GmbH, Planegg

Dipl.-Ing. Andreas Tiemann, Dipl.-Ing. (FH) Thorsten Britz  
Schnorpfeil Bau GmbH, Treis-Karden

Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher, M.Sc. Christoph Schulte-Schrepping  
Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Baustofftechnik

M. Eng. Christoph Becker  
Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

#### Inhalt

<b>5.5.1 Zielsetzung .....</b>	<b>437</b>
<b>5.5.2 Konzeptionierung eines Betons mit offenporiger Oberfläche .....</b>	<b>437</b>
<b>5.5.3 Grundlagenuntersuchungen .....</b>	<b>440</b>
<b>5.5.4 Großtechnische Herstellungen .....</b>	<b>458</b>
5.5.4.1 Demonstrator .....	458
5.5.4.2 Akustische Untersuchungen .....	459
5.5.4.3 Bau einer Versuchsstrecke.....	464
5.5.4.4 Struktureller Aufbau der Oberbetonschicht „COPS“ .....	468
5.5.4.5 Akustische Untersuchungen .....	470
<b>5.5.5 Bau einer zweiten Versuchsstrecke .....</b>	<b>475</b>
5.5.5.1 Struktureller Aufbau der Oberbetonschicht „COPS“ .....	479
5.5.5.2 Akustische Untersuchungen .....	481
<b>5.5.6 Zusammenfassung .....</b>	<b>487</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>489</b>

### 5.5.1 Zielsetzung

Ziel der im Rahmen dieses Teilverbundes durchgeführten Untersuchungen war es, einen Fahrbahndeckenbeton zu entwickeln und zu optimieren, welcher durch seine definierte offenporige, oberflächennahe Struktur und einer angepassten Oberflächentextur zu einer Reduktion der Schallemissionen infolge des fließenden Verkehrs um mehr als 4 dB (A) gegenüber herkömmlichen, akustisch nicht bearbeiteten Fahrbahndecken führt. Primäres Ziel war, die akustisch wirksame Oberflächengestalt ohne einen zusätzlichen Arbeitsschritt unmittelbar nach Herstellung zu erreichen. Gleichzeitig soll ein solcher Beton die Attribute eines dauerhaften Fahrbahndeckenbetons innehaben. Dieser Beton ist im Folgenden benannt als „Lärmarme Betondecke mit offenporiger Oberfläche“ (engl.: **Concrete with Open Porous Surface**). Im Rahmen dieses Berichtes findet die Kurzbezeichnung COPS Anwendung. Der innerhalb dieses Forschungsprojektes entwickelte, an der Oberfläche offenporige Beton ist klar von dem bekannten Drainbeton abzugrenzen und gesondert zu definieren. Ein klassischer Drainbeton, welcher als Ort beton im Bau von Verkehrsflächen zum Einsatz kommt, zeichnet sich durch ein über die gesamte Querschnittshöhe vorhandenes Hohlraumsystem aus [1]. Hingegen weist der hier entwickelte Beton ein nur oberflächennahes und lokal begrenztes Hohlraumsystem auf. Der untere Bereich des Betons ist durch ein vergleichsweise dichtes Gefüge gekennzeichnet. Diese strukturelle Differenzierung führt dazu, dass solche Betone nicht, wie etwa versickerungsfähige Verkehrsflächen aus Beton oder Asphalt [2], die Aufgabe der Entwässerung der Fahrbahn übernehmen können und somit klassische Entwässerungssysteme Anwendung finden müssen.

Die Grundidee des COPS folgt den im Asphaltstraßenbau bereits erfolgreich etablierten akustischen Systemen. Die akustische Wirksamkeit des zu konzeptionierenden Betons soll durch einen hohlraumreichen oberen Bereich (rd. 1 cm) (Gesamtdicke: ca. 6 cm) erreicht werden. Zur Erreichung dieser strukturellen Anforderungen ist es notwendig, dass der Leim während des Einbaus infolge aufgebrachtener Verdichtungsenergie - unabhängig ob statisch oder dynamisch, absinkt und so die geforderten Hohlraumgehalte und die strukturelle Differenzierung der Oberbetonschicht realisiert werden können. Der neben dem betontechnologischen Konzept zusätzlich maßgebende Faktor auf die Hohlraumbildung ist die verwendete Einbautechnik und die dabei aufgebrachte Verdichtungsintensität. Der Einbau einer solchen Oberbetonschicht soll mit einem Gleitschalungsfertiger erfolgen. Darüber hinaus bedarf die Oberfläche aus akustischer Sicht einer hohen Ebenheit, was schlussendlich zu einer Oberflächengestalt gemäß dem Prinzip „Plateau mit Schluchten“ führt. In Kombination charakterisieren das kommunizierende Makroporensystem, verantwortlich für die Schallabsorption und die Reduzierung des Air-Pumping-Effektes sowie die hohe Ebenheit, verantwortlich für die Verringerung von Reifenschwingungen die maßgebenden Parameter zur Schallreduktion. Neben den akustischen Eigenschaften sind insbesondere die mechanische Widerstandsfähigkeit sowie eine ausreichende Griffbarkeit für eine wirtschaftlich sinnvolle Betonkonzeption relevant. Entsprechend bedarf die oberste Kornreihe nicht nur einer punktuellen Verklebung sondern einer sicheren Einbindung in den Zementstein. Die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Betons bei gleichzeitig hoher akustischer Wirksamkeit laufen einander entgegen. Innerhalb dieses Forschungsprojektes wurden laborseitig Betone entwickelt und deren Eignung bzgl. der geforderten Ausbildung einer akustisch wirksamen Oberflächengestalt unmittelbar nach Verlassen des Fertigers anhand großtechnischer Herstellungen eruiert.

In das Teilvorhaben sind Ergebnisse des FE-Projektes „Entwicklung und Optimierung von COPS (Beton mit offenporiger Oberfläche) [4] der Ruhr-Universität Bochum eingeflossen, das im Auftrag der BAST durchgeführt wurde.

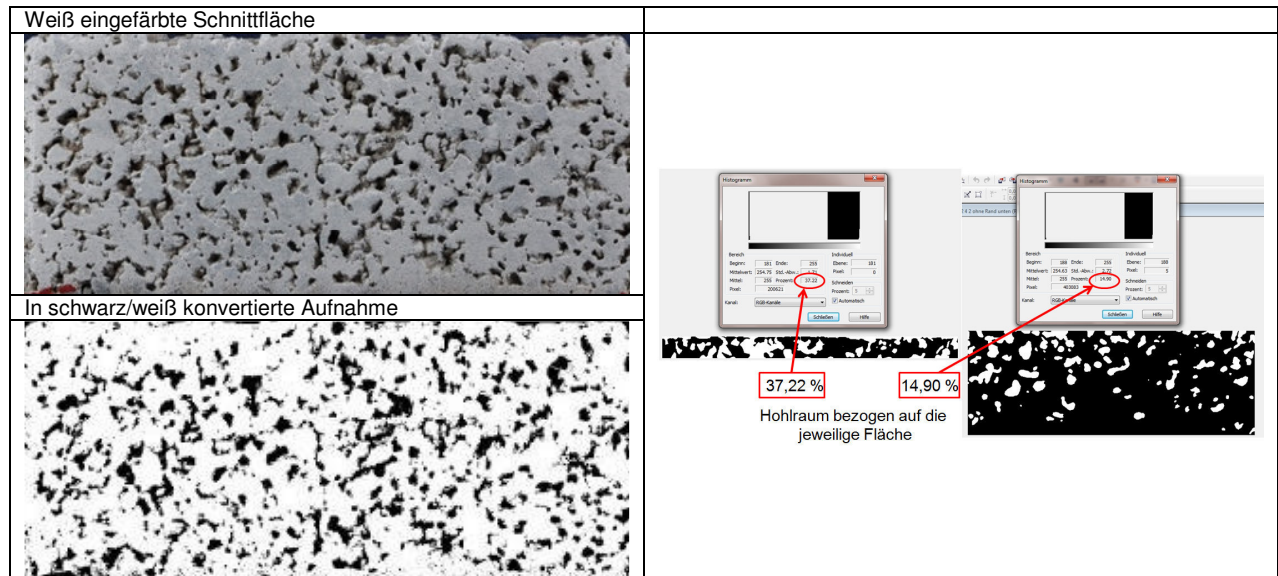
### 5.5.2 Konzeptionierung eines Betons mit offenporiger Oberfläche

#### Quantifizierung des Hohlraumsystems

Neben der Entwicklung geeigneter Betonrezepturen für einen lärmarmen Beton, der durch ein oberflächennahes Makroporensystem zu einer Schallreduktion führt, ist die quantitative Einordnung des Makroporensystems in Form seines vorhandenen Hohlraumgehaltes und dessen Verteilung über die Querschnittshöhe notwendig. Zur Quantifizierung dieser Parameter wurden im Laufe des Projektes mehrere Verfahren entwickelt und auf den Baustoff Beton und die vorhandenen Probekörpergeometrien abgestimmt. Nachfolgender Abschnitt gibt einen Überblick über die verwendeten Methoden. Dabei ist anzumerken, dass die aufgezeigten Methoden ausschließlich die Aufnahme der Makroporen erlauben.

Zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes laborseitig hergestellter Proben wurde die manuelle Bildbearbeitung gewählt. Durch Bearbeitung abfotografierter Schnittflächen von Betonprobekörpern in einem Bildbearbeitungsprogramm und Ausschneiden der Hohlräume und anschließender Konvertierung der bearbeiteten Fotoaufnahmen in eine 1-bit-Strichgrafik (schwarz-weiß) kann ein maximaler Kontrast zwischen den vorhandenen Hohlräumen (Makroporen) und dem Material geschaffen werden. Diese Methode zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes wurde im Laufe des Projektes fortwährend weiterentwickelt. Dabei

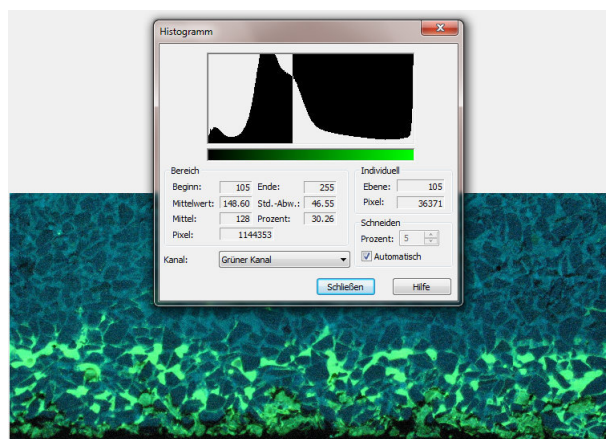
wurde der Arbeitsschritt „Weißfärbung der Schnittflächen der Betonprobekörper“ zur Erhöhung des Kontrastes hinzugefügt. Infolge dessen entfällt der Arbeitsschritt der zusätzlichen rechnerbasierten Bearbeitung der Fotoaufnahmen zur Trennung von Hohlraum und Material. Untenstehende Abbildung zeigt eine bearbeitete Schnittfläche. Links in der Abbildung ist eine weiß eingefärbte Schnittfläche eines Betonprobekörpers dargestellt. Durch Konvertierung in eine 1-bit Grafik (Bild 5.5-1, unten links) kann darauffolgend mittels Histogrammfunktion des verwendeten Bildbearbeitungsprogrammes der gesuchte Hohlraumgehalt (Anteil weiß) in unterschiedlichen Bereichen bestimmt werden (Bild 5.5-1, rechts).



**Bild 5.5-1:** Oben: Hohlraumbestimmung „manuelle Bildbearbeitung“ – Präparation der Schnittflächen, Unten: Auswertung mit Histogrammfunktion (Gezeigt: Z=330 kg/m<sup>3</sup>; 1,0 % FM; 0,1 % LP-Bildner)

Das genannte Verfahren zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes erlaubt es zudem, den Hohlraumgehalt in Abhängigkeit der Schichtdicke abzubilden. Alternativ zu der genannten Vorgehensweise wurden die offeneren Probekörper unter Vakuum mit einem eingefärbten Epoxidharz getränkt. Durch das Vakuumtränken konnten alle zugänglichen Hohlräume gefüllt werden, allerdings war der Kontrast nicht ausreichend groß.

Darauf aufbauend wurde als weitere Methode das fluoreszierende Tränken erprobt. Hierbei wird die fluoreszierende Farbe ebenfalls mit Hilfe eines Vakuums in den Probekörper eingebracht. Anschließend wird von einer Schnittfläche unter Bestrahlung mit UV-Licht eine Fotoaufnahme erstellt. Die dabei entstandene Fotoaufnahme (Bild 5.5-2) kann mit Hilfe einer Bildbearbeitungssoftware und der Histogrammfunktion ausgewertet werden.



**Bild 5.5-2:** Bestimmung des Hohlraumgehaltes durch Vakuumtränken mit einem fluoreszierendem Fluid

Da hierfür jedoch eine spezielle Flüssigkeit verwendet werden muss und sich die Fotodokumentation als sehr aufwendig herausgestellt hat, ist diese Methode für die Auswertung einer Vielzahl von Proben nicht geeignet.

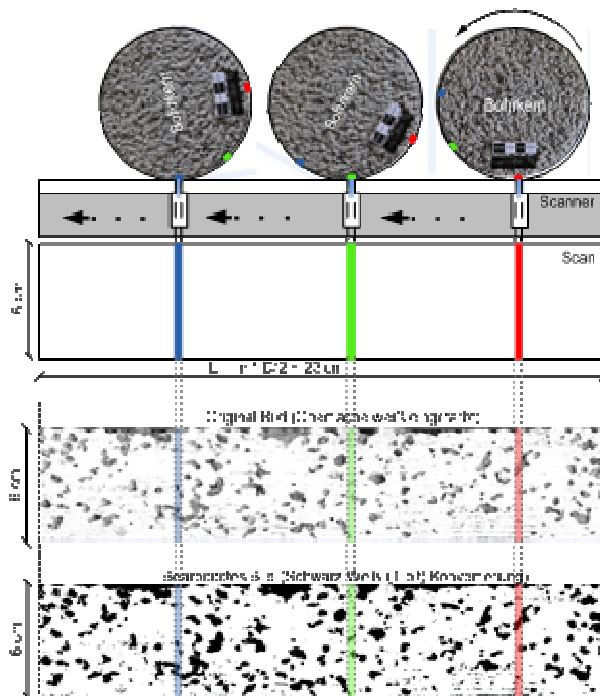
Zur Validierung des Verfahrens zur Hohlraumbestimmung mittels Bildbearbeitungsprogramm (Bild 5.5-1) wurde vergleichend am Beispiel eines Bohrkerns die Ermittlung des Hohlraumgehaltes und der Hohlraumverteilung mit Hilfe eines CT-Scans bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) durchgeführt (Tabelle 5.5-1).

Verfahren	Bildbearbeitungsprogramm [%]	CT-Scan [%]	Abweichung zu CT-Scan [%]
Bohrkern	19,9	19,7	0,2

**Tab. 5.5-1:** CT-Scan eines COPS-Bohrkerns (Ø: 50 mm) (Durchgeführt bei der BAM)

Dabei ergaben sich nahezu idente Werte. Mit Hilfe des CT-Scans wurde ein Hohlraumgehalt von 19,7 Vol.-% ermittelt. Unter Verwendung der Bildbearbeitung wurde dieser zu 19,9 Vol.-% bestimmt. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass hier die Auswertung der Schnittflächen in der zweidimensionalen Ebene hinsichtlich der Genauigkeit des Hohlraumgehaltes mit den Ergebnissen des CT-Scans gleichzusetzen ist. Somit liefern die genannten Methoden repräsentative Aussagen über die Hohlräume in den einzelnen Schichten. Allerdings erlaubt ein CT-Scan aufgrund dessen dreidimensionalen Darstellung jedoch tiefergreifende Rückschlüsse auf die Gefügestruktur solcher offenporiger Probekörper.

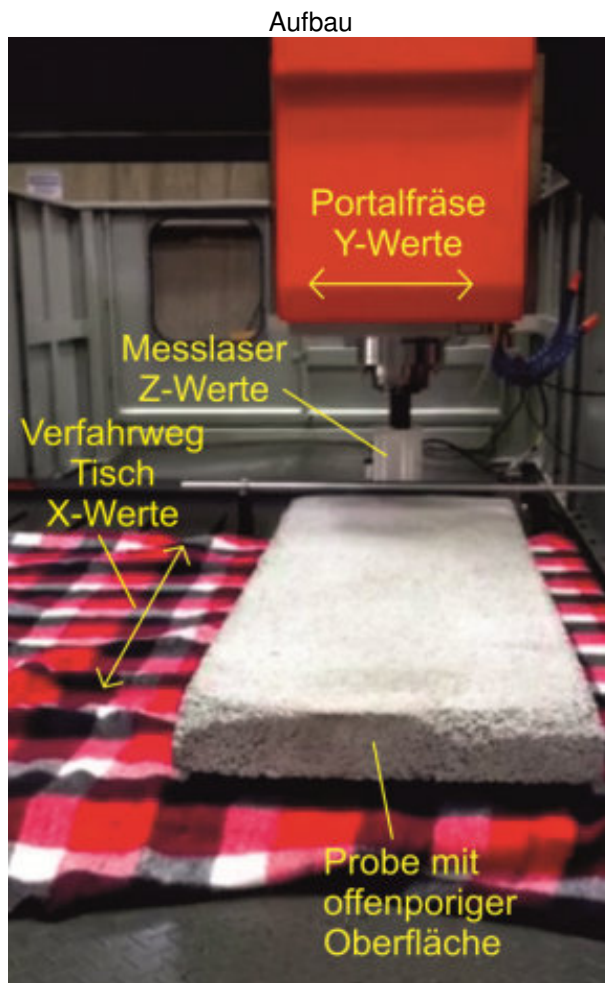
Im Rahmen weiterführender Untersuchungen wurde eine weitere Methodik entwickelt, welche eine zerstörungsfreie Aufnahme der Hohlräume ermöglicht, sodass an den entsprechenden Bohrkernen weitere Untersuchungen möglich waren. Dazu wurden die Probekörper an der Mantelfläche weiß eingefärbt und auf einem handelsüblichen Flachbettscanner durch Mitrollen mit dem Lesekopf digitalisiert. Mit Hilfe eines aufgebrachten Messstreifens mit einer vorab definierten Länge wurden die ermittelten Scans auf Genauigkeit bzw. auf mögliche Verzerrungen überprüft. Dabei waren keine Abweichungen in Form von Verzerrungen zwischen dem digitalen Scan und der tatsächlichen Länge des Referenzstreifens festzustellen. Bild 5.5-3 zeigt schematisch den Prüfablauf.



**Bild 5.5-3:** Digitalisiertes Hohlraumsystem einer offenporigen Schicht

### Verfahren zur Erfassung der Oberflächentextur

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Rahmen der Untersuchungen eines offenporigen Betons sind die Untersuchungen der akustischen Eigenschaften. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde diese mit Hilfe numerischer Verfahren (Teilprojekt Fa. Müller-BBM) bestimmt. Hierfür sind detaillierte dreidimensionale Kenntnisse der Oberflächentextur als Eingangsgrößen für die späteren Berechnungen von entscheidender Bedeutung. Vor diesem Hintergrund wurde am Lehrstuhl für Baustofftechnik ein Oberflächen-Scan-Verfahren entwickelt, das in der Lage ist, Proben mit einer maximalen Größe von  $2,0 \times 2,0 \text{ m}^2$  zu vermessen. Als Trägersystem wurde eine Portalfräse eingesetzt, mit der X- und Y-Werte mit einer Genauigkeit von  $0,1 \text{ mm}$  angesteuert werden können. Die Z-Werte, die die eigentliche Textur beschreiben, wurden mit Hilfe eines Messlasers (Genauigkeit  $2 \text{ }\mu\text{m}$ ) berührungslos erfasst. In Bild 5.5-4 ist eine Übersicht des verwendeten Messaufbaus dargestellt.



### Prinzipskizze - Messkopf

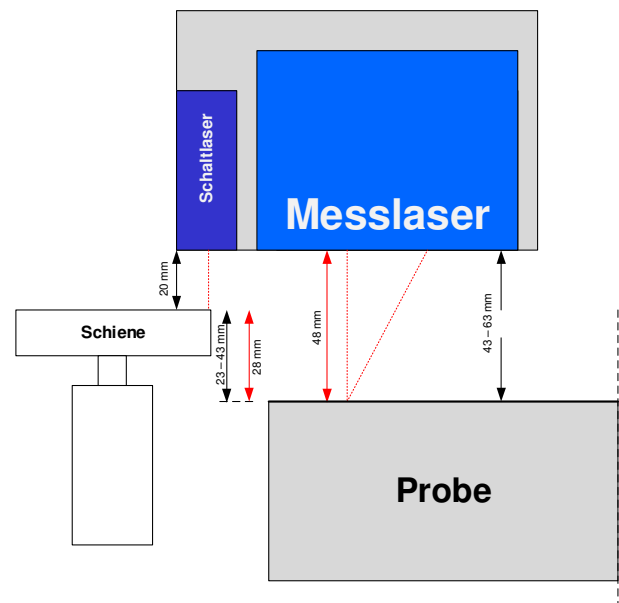


Bild 5.5-4: Funktionsprinzip des Oberflächenscanners

Ferner wurde eine LabView® basierte Steuersoftware für den Oberflächenscanner programmiert, mit der die X-Y-Z Koordinaten erfasst und zu einem dreidimensionalen Modell weiterverarbeitet werden können.

### 5.5.3 Grundlagenuntersuchungen

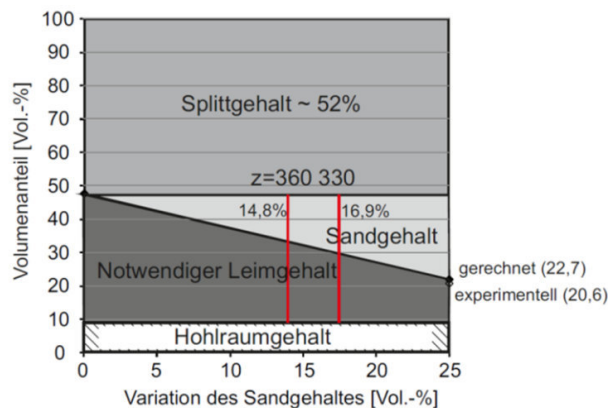
Vor der Festlegung der eigentlichen Untersuchungsparameter wurden zunächst Vorversuche mit unterschiedlichen Betonrezepturen durchgeführt. Ziel war es, die Volumenanteile der Betonausgangsstoffe, die für die Herstellung eines Betons mit offenporiger Oberfläche aufeinander abzustimmen sind, grundlegend zu ermitteln. In einem ersten Schritt wurden hierzu Schüttversuche zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes mit verschiedenen groben Gesteinskörnungen durchgeführt. Die groben Gesteinskörnungen wurden im Rahmen der Schüttversuche in ein definiertes Volumen gefüllt. Im Anschluss daran wurde die Masse des Wassers ermittelt, die benötigt wurde, um die verbliebenen Hohlräume vollständig auszufüllen. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Tabelle 5.5-2 dargestellt.



Kornbezeichnung	Hohlraumgehalt [Vol.-%]	Werk/Firma
LiDonit 2/5	46,26	ThyssenKrupp MillServices & Systems GmbH
LiDonit 5/8	46,96	ThyssenKrupp MillServices & Systems GmbH
Basalt 2/5	47,74	Steinbruch Schwarzlay/Schnorpfel
Basalt 5/8	48,20	Steinbruch Schwarzlay/Schnorpfel

**Tab. 5.5-2:** Hohlraumgehalte unterschiedlicher grober Gesteinskörnungen

Im Weiteren wurde dann exemplarisch dem Basalt ein Sandgehalt von 25 Vol.-% bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung hinzugegeben, wobei ein Quarzsand mit einer Korngröße zwischen 0,2 bis 2 mm zum Einsatz kam. Der verbleibende Hohlraumgehalt wurde rechnerisch und experimentell ermittelt. Rechnerisch würde sich der Hohlraumgehalt durch Zugabe von 25 Vol.-% Sand ( $\rho = 2,65 \text{ kg/dm}^3$ ) auf 22,7 Vol.-% verkleinern. Im Versuch wurde hierfür ein Hohlraumgehalt von 20,6 Vol.-% bestimmt. Der verbleibende Hohlraumgehalt wird im Rahmen weiterer Versuche - abzüglich des gezielt einzustellenden Hohlraumgehaltes im obersten Schichtbereich (Bild 5.5-5) - mit Zementleim aufgefüllt. Im Bereich von ca. 50 bis 100 Vol.-% des Bildes 5.5-5 ist der Splittgehalt (Basalt 2/5 mm) - basierend auf den ersten Schüttversuchen aufgetragen. Der nächste Bereich stellt die Änderung des Sandgehaltes dar. Dieser wirkt sich bei einem konstanten Hohlraumgehalt (hier: rd. 9 %) auf den Leimgehalt aus. Der Leim besteht zum einen aus Zement und zum anderen aus Wasser, die in einem konstanten Verhältnis (w/z-Wert) gemischt werden.



**Bild 5.5-5:** Übersicht über die Volumenanteile der Betonausgangsstoffe bei Variation der Mörtelzusammensetzung (ausgehend von einer Schichthöhe von 6 cm und 1 cm Offenporigkeit); hier dargestellt für Basalt 2/5 mit Markierung zweier später ausgeführter Mischungen ( $z=360$  und  $z=330$ )

Werden der Splitt-Sand-Gehalt und der Hohlraum als gesetzte Größen betrachtet, ist durch das Diagramm (Bild 5.5-5) möglich, den erforderlichen Leimgehalt zu ermitteln. Für die weiteren betontechnologischen Untersuchungen wurde aufbauend auf den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen als Sand der Natursand (Quarzsand) mit der Korngruppe 0/2 mm und der Basalt (Korngruppe 2/5 mm aus dem Steinbruch Schwarzlay) ausgewählt, da die genannten Kornfraktionen nahezu überall verfügbar sind. Die dazugehörigen Sieblinien sind im Anhang Tabelle A 1 des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV dokumentiert.

### Betonuntersuchungen

In Tabelle 5.5-3 sind nachfolgend die verwendeten Betonausgangsstoffe aufgeführt. Diese wurden sowohl bei der labortechnischen Entwicklung der Betone als auch bei der Herstellung des Demonstrators und der Teststrecken verwendet. Die dazugehörigen Datenblätter sind im Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV hinterlegt.

Material	Bezeichnung	Firma	Werk	Regelwerk
Zement	CEM I 42,5 R	HeidelbergCement	Mainz-Weisenau	DIN EN 197-1 [N 9]
Sand	Natursand 0/2 mm	Kann Baustoff-Werke	Urmitz	DIN EN 12620 [N10]
Basalt	Basalt-Splitt 2/5 mm	Schnorpfel	Schwarzlay	DIN EN 12620 [N 10]
Luftporenbildner	Sika LPS A 94	Sika	-	DIN EN 934-2 [N 11]
Fließmittel	Sika FM 31 (FM 0) Techniflow11 (FM 1) Powerflow1637 (FM 2)	Sika Österreich GmbH MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG	-	DIN EN 934-2 [N 11]

Tab. 5.5-3: Betonausgangsstoffe

Aufbauend auf den Grundlagenuntersuchungen war das Ziel der ersten Voruntersuchungen die Verdichtungswilligkeit und die Hohlraumbildung im oberflächennahen Bereich von verschiedenen Betonzusammensetzungen zu erfassen. Hierzu wurde der Volumenanteil der groben Gesteinskörnung und des Feinanteiles (Sand und Zement) verändert. Ein Hohlraumsystem im oberflächennahen Bereich, wie es für COPS angestrebt wird, konnte annähernd erst ab einem Gesteinskörnungs-Feinanteil-Verhältnis von 3/1 erzielt werden. Dieses Verhältnis wurde als Richtwert für die weiteren Betonrezepturen genutzt. Da der Leimanteil und seine Absetzfähigkeit eine große Rolle in der Erstellung des COPS spielen, wurde eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen Zementgehalten durchgeführt. Der Zementgehalt wurde zwischen  $300 \text{ kg/m}^3$  und  $400 \text{ kg/m}^3$  variiert. In Bild 5.5-6 und Bild 5.5-7 sind als Beispiel Probekörper mit unterschiedlichen Zementgehalten dargestellt.

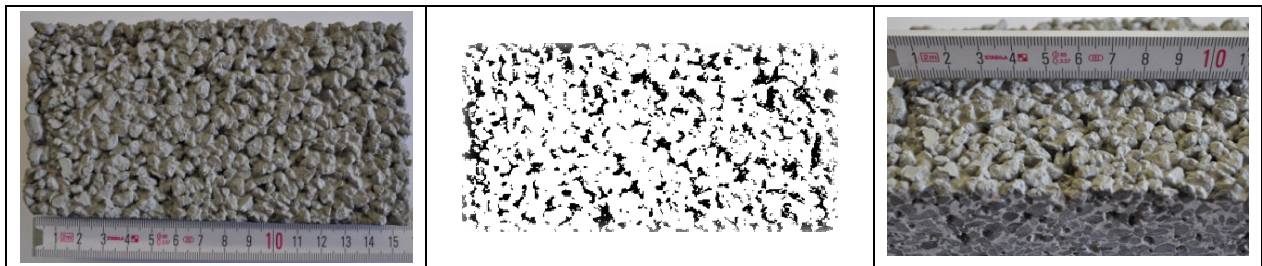


Bild 5.5-6: COPS-Probekörper mit offenporiger Struktur (Zementgehalt  $350 \text{ kg/m}^3$ )

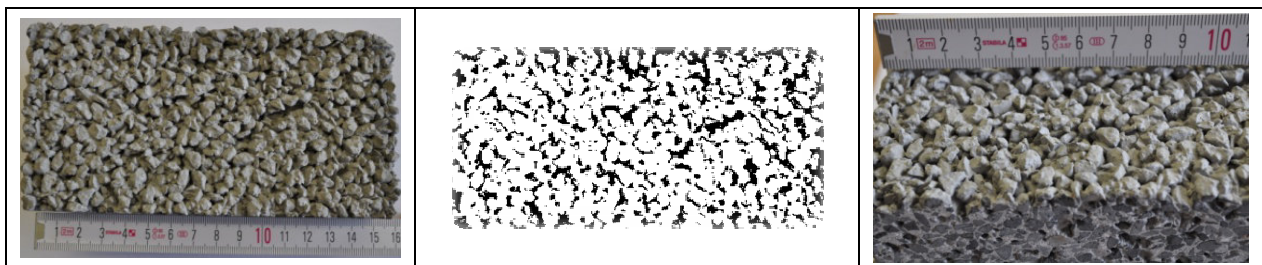
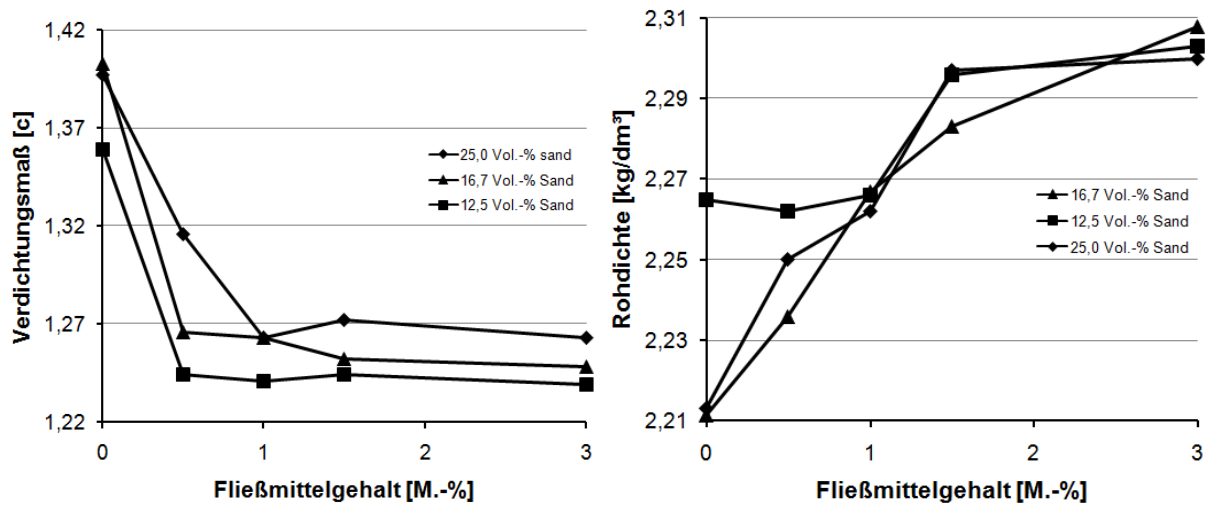


Bild 5.5-7: COPS-Probekörper mit offenporiger Struktur (Zementgehalt  $300 \text{ kg/m}^3$ )

Überprüft wurden die einzelnen Betone auf ihre Rohdichte bzw. den Gesamthohlraumanteil. Weitere Voruntersuchungen wurden zum Absetzen des Leimes durchgeführt. Hierbei wurde die Konsistenz der Betone durch den Einsatz von Fließmittel verändert. Der Parameter „Fließmittelgehalt“ wurde als Steuergröße ausgewählt, da die Zugabe von Fließmitteln einen erwartungsgemäß großen Effekt auf die rheologischen Eigenschaften von Betonen durch die Modifikation der Fließeigenschaften des Leimes hervorruft und der Leim entsprechend des geforderten Absetzverhaltens eingestellt werden kann. Die Konsistenz der Betone lag bei Werten des Verdichtungsmaßes zwischen 1,40 und 1,20 sowohl im steifen (C1) als auch im plastischen (C2) Bereich (Bild 5.5-8). In einem weiteren Schritt wurden Probemischungen hergestellt, in denen das Verhältnis zwischen grober und feiner Gesteinskörnung, im Folgenden als Sand-Basalt-Verhältnis bezeichnet und damit indirekt der Hohlraum variiert wurde. Die Mischungen wurden mit 12,5 Vol.-%, 16,7 Vol.-% und 25 Vol.-% Sand durchgeführt. Der Zementgehalt wurde je Variationsdurchgang von  $340 \text{ kg/m}^3$  über  $360 \text{ kg/m}^3$  auf  $380 \text{ kg/m}^3$  gesteigert. Neben dieser Variation wurde bei  $340 \text{ kg/m}^3$  Zement ebenfalls der Fließmittelgehalt als weitere Variationsmöglichkeit geändert. Hierbei wurden 0 M.-%,

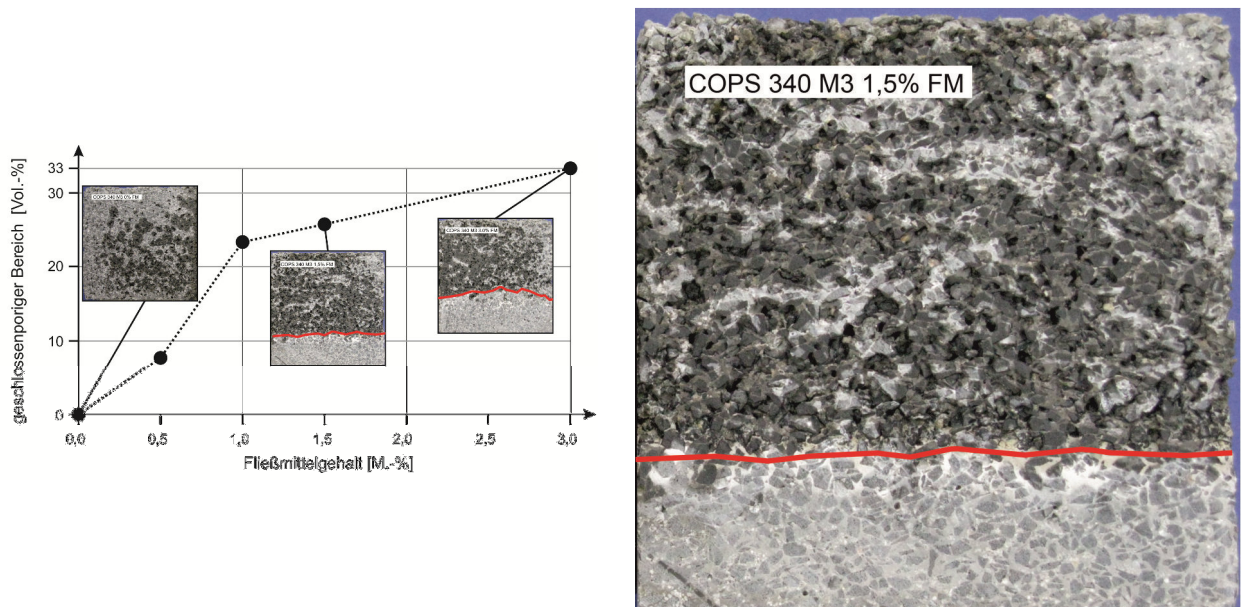
0,5 M.-%, 1 M.-%, 1,5 M.-% und 3 M.-% des Zementgehaltes verwendet. Als Fließmittel kam das FM 0 zum Einsatz (Tabelle 5.5-3). In den nachfolgenden Diagrammen ist sowohl das Verdichtungsmaß als auch die Rohdichte der Mischungen in Abhängigkeit vom Fließmittelgehalt angegeben.



**Bild 5.5-8:** Verdichtungsmaß und Rohdichte bei 340 kg/m<sup>3</sup> Zement in Abhängigkeit des Fließmittelgehaltes

Anhand des Verdichtungsmaßes gemäß DIN EN 12350-4 ist ersichtlich, dass sich mit steigendem Fließmittelgehalt erwartungsgemäß eine weichere Konsistenz einstellt. Zudem wird der Beton mit geringeren Sandgehalten fließfähiger, da weniger Oberfläche vom vorhandenen Wasser benetzt werden muss. Die Rohdichte nimmt mit steigendem Fließmittelgehalt hingegen zu. Hieraus lässt sich ableiten, dass eine weichere Konsistenz zu einer engeren Kornlagerung führt.

Im Nachfolgenden (Bild 5.5-9) sind die Schnittflächen der Prüfkörper mit einem Sandgehalt von 12,5 Vol.-%, einem Zementgehalt von 340 kg/m<sup>3</sup> und einer Variation der Fließmittelmenge abgebildet. Rechtsseitig ist die Schnittfläche für 1,5 % Fließmittel gezeigt.



**Bild 5.5-9:** links: Absetzverhalten des Leimes bei veränderter Fließmittelzugabe; rechts: Schnittfläche des Probekörpers mit 340 kg/m<sup>3</sup> Zement, 12,5 Vol.-% Sand und 1,5 % Fließmittel

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass sich der Mörtel durch die Erhöhung des Fließmittelgehaltes an der Unterseite anreichert. Bei keiner Fließmittelzugabe ergibt sich ein vollständig offenporiger Querschnitt. Werden 3 % Fließmittel hinzugegeben, so erhält man rd. 67 % an offenporigem Volumen. Bei einer geforderten Schichtdicke von 6 cm, bei der 1 cm offenporig sein soll, dürften jedoch nur ca. 17 % erreicht werden. Dies lässt den Schluss zu, dass mit einem Zementgehalt von 340 kg/m<sup>3</sup> bei dieser Betonzusammensetzung dies nicht vollumfänglich zu erreichen ist. Aus den Voruntersuchungen geht hervor, dass neben der Steuergröße „Sieblinie“ der Fließmittelgehalt in Korrelation mit dem Zementgehalt maßgeblich das Absetzverhalten und somit die strukturelle Ausbildung des COPS beeinflussen.

Aufbauend auf den Grundlagenuntersuchungen wurden im weiteren Verlauf die Parameter

- Zementgehalt
- Fließmittelgehalt
- Zugabe von Luftporenbildner
- Variation der Anteile von Sand und Basalt

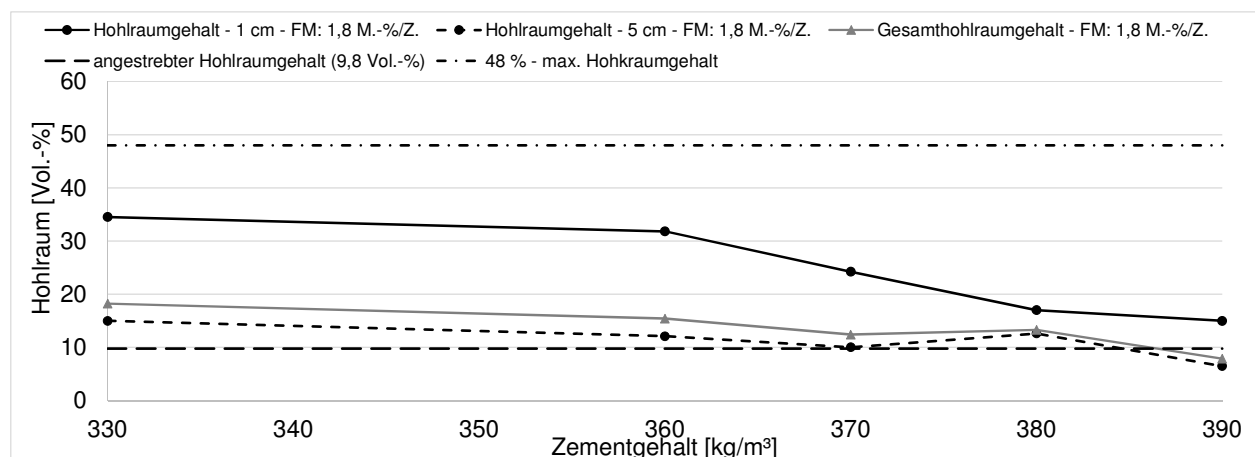
untersucht und ausgewertet.

Die zugehörige Versuchsmatrix ist im Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV dargestellt.

Bei diesen Betonen wurden folgende Kenngrößen konstant gehalten:

- w/z-Wert: 0,38
- Zement: CEM I 42,5 R
- Fließmittel FM 1
- Luftporenbildner
- Basaltsplitt: 2/5 mm
- Natursand, zusammengesetzt zu gleichen Teilen aus:
  - Microsil 0/0,2 mm
  - Quarzsand 0,2/2 mm.

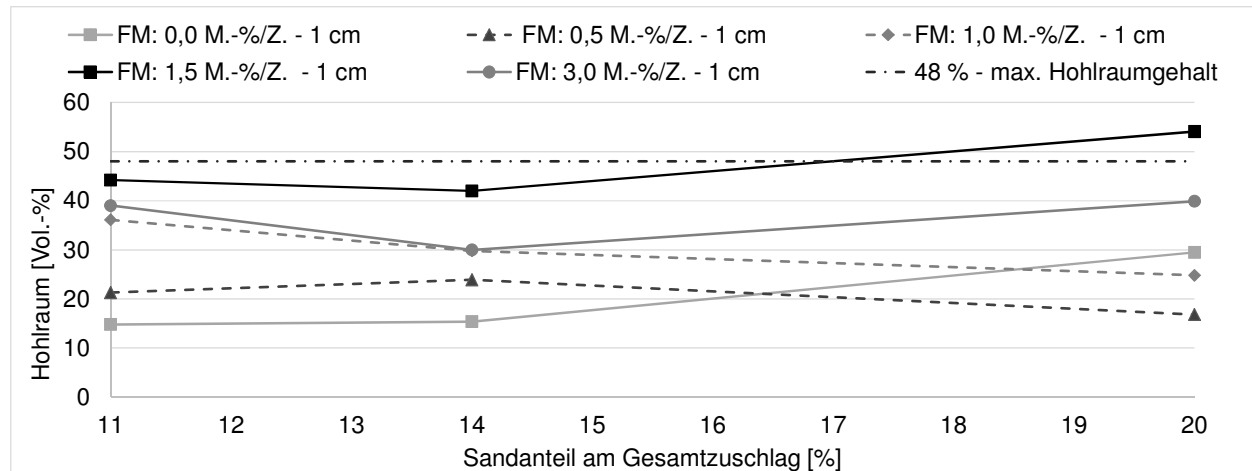
Im Nachfolgenden ist die Auswertung der Variation des Zementgehaltes mit 7,5 % Sand, 1,8 M.-%/Z. Fließmittel und unter Zugabe von Luftporenbildner an Einzelproben dargestellt (Bild 5.5-10). Dabei ist zu erkennen, dass mit zunehmendem Zementgehalt das Gesamthohlraumvolumen abnimmt. Als maximaler Gesamthohlraumgehalt ist - bezogen auf die hier vorliegende Einbaudicke von 6 cm und einem Hohlraumgehalt in der obersten Schicht (1 cm) von max. 48 Vol.-% - ein über den gesamten Querschnitt gemittelter Hohlraumgehalt von ca. 9,8 Vol.-% anzustreben. Dabei ist zu beachten, dass der Hohlraumgehalt in der oberen Schicht kleiner dem angestrebten Wert von 48 Vol.-% einzustellen ist, da die Notwendigkeit besteht, die Gesteinskörner im oberen Bereich des COPS aufgrund der angestrebten Widerstandsfähigkeit lastaufnahmefähig miteinander zu „verkleben“. Dies setzt voraus, dass der Leimgehalt in dem oberflächennahen Bereich nach dem Verdichten in ausreichender Fülle vorhanden sein muss, um einen kraftschlüssigen Verbund zwischen den jeweiligen Körnern, welche direkt mit der Verkehrsbelastung in Kontakt treten, zu gewährleisten.



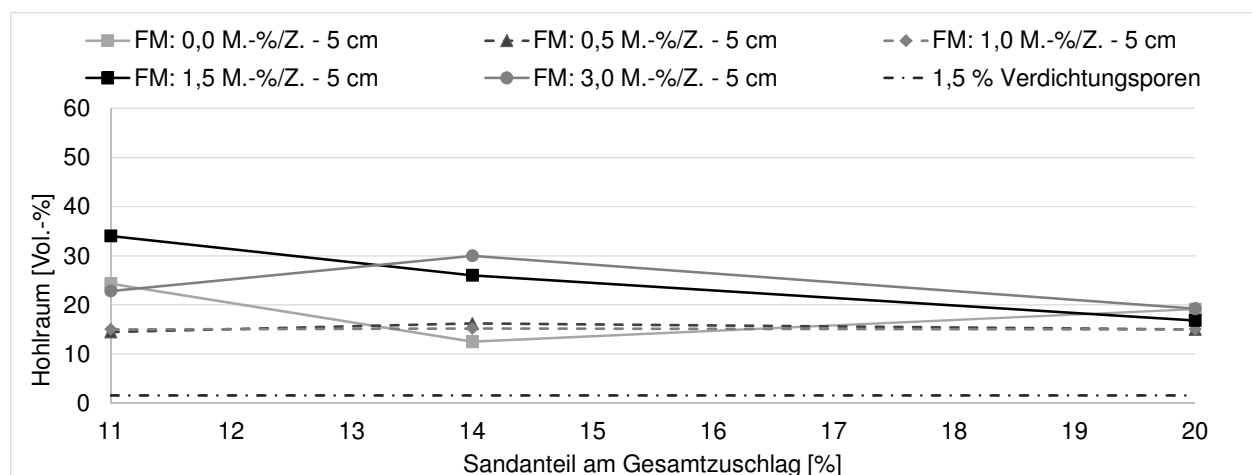
**Bild 5.5-10:** Entwicklung des Gesamthohlraumgehaltes und des Hohlraumgehaltes im oberen und unteren Bereich des COPS in Abhängigkeit des Zementgehaltes. Konstante Kennwerte: Sand-Basalt-V.: 7,5/92,5; 1,8 M.-%/Z. FM, Einsatz von LP-Bildner. Betonzusammensetzung: Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV, Tabelle A 4.

In Bild 5.5-9 sind der Gesamthohlraumgehalt sowie der Hohlraumgehalt, getrennt für den oberen und unteren Bereich dargestellt. Es wird ersichtlich, dass sich im unteren Bereich der Probe der Hohlraumgehalt nur wenig ändert, während im obersten 1 cm der Einfluss eines höheren Zementgehaltes auf einen geringeren Hohlraumgehalt klar zur Geltung kommt und dieser mit steigendem Zementgehalt drastisch abfällt.

In Bild 5.5-11 ist der Hohlraumgehalt für den oberen, in Bild 5.5-12 für den unteren Bereich in Abhängigkeit des Sandgehaltes vom Gesamtzuschlag und unter Variation der Fließmitteldosierung am Beispiel der Rezeptur mit  $340 \text{ kg/m}^3$  angegeben.



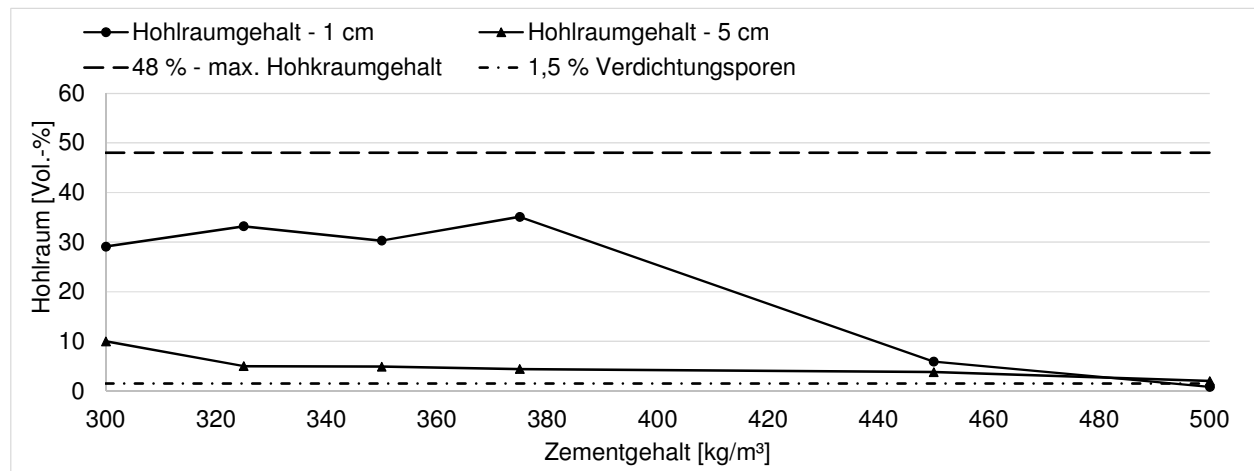
**Bild 5.5-11:** Hohlraumgehalt in Abhängigkeit des Sandgehaltes und bei Verwendung zweier unterschiedlicher Fließmitteldosierungen am Beispiel von  $Z=340 \text{ kg/m}^3$  im oberen Bereich



**Bild 5.5-12:** Hohlraumgehalt in Abhängigkeit des Sandgehaltes und bei Verwendung zweier unterschiedlicher Fließmitteldosierungen am Beispiel von  $Z=340 \text{ kg/m}^3$  im unteren Bereich

Die Ergebnisse in Bild 5.5-11 und Bild 5.5-12 verdeutlichen, dass insbesondere bei keiner Fließmittelzugabe in der oberen Schicht mehr Leim enthalten ist, als zum punktuellen, minimal lastaufnahmefähigen Zusammenhalt des Basaltsplittes nötig ist. Hieraus resultiert auch der zu geringe Leimgehalt in der unteren Schicht, sodass neben den Verdichtungs-poren auch größere Hohlräume zu finden sind. Weiterhin wird ersichtlich, dass ein Fließmittelgehalt von 1,5 M.-%/Z. zu einer deutlichen Steigerung des Hohlraumgehaltes im oberen Bereich führt. Für den unteren Bereich beträgt das Minimum der Makroporen und somit der angestrebte Bereich für eine optimal verdichtete Schicht analog zu herkömmlichen Betonen rd. 1,5 Vol.-%. Die im unteren Bereich trotz Fließmittelzugabe bei geringen Sandgehalten festgestellten hohen Hohlraumgehalte lassen sich durch die Sperrwirkung des Basaltsplittes erklären, die durch das Fließmittel nicht beeinflussbar ist. Der Zementgehalt bzw. Leimgehalt ist zu gering, um die Hohlräume auszufüllen, sodass hier der Hohlraumgehalt primär von der Anordnung der Basaltsplittkörner abhängt. Bei einer günstigen Anordnung sind Werte bis 14 % möglich. Aus diesen Versuchen lässt sich ableiten, dass der Sandanteil zwischen ca. 15 – 20 %, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung, liegen sollte. Mit dieser veränderten

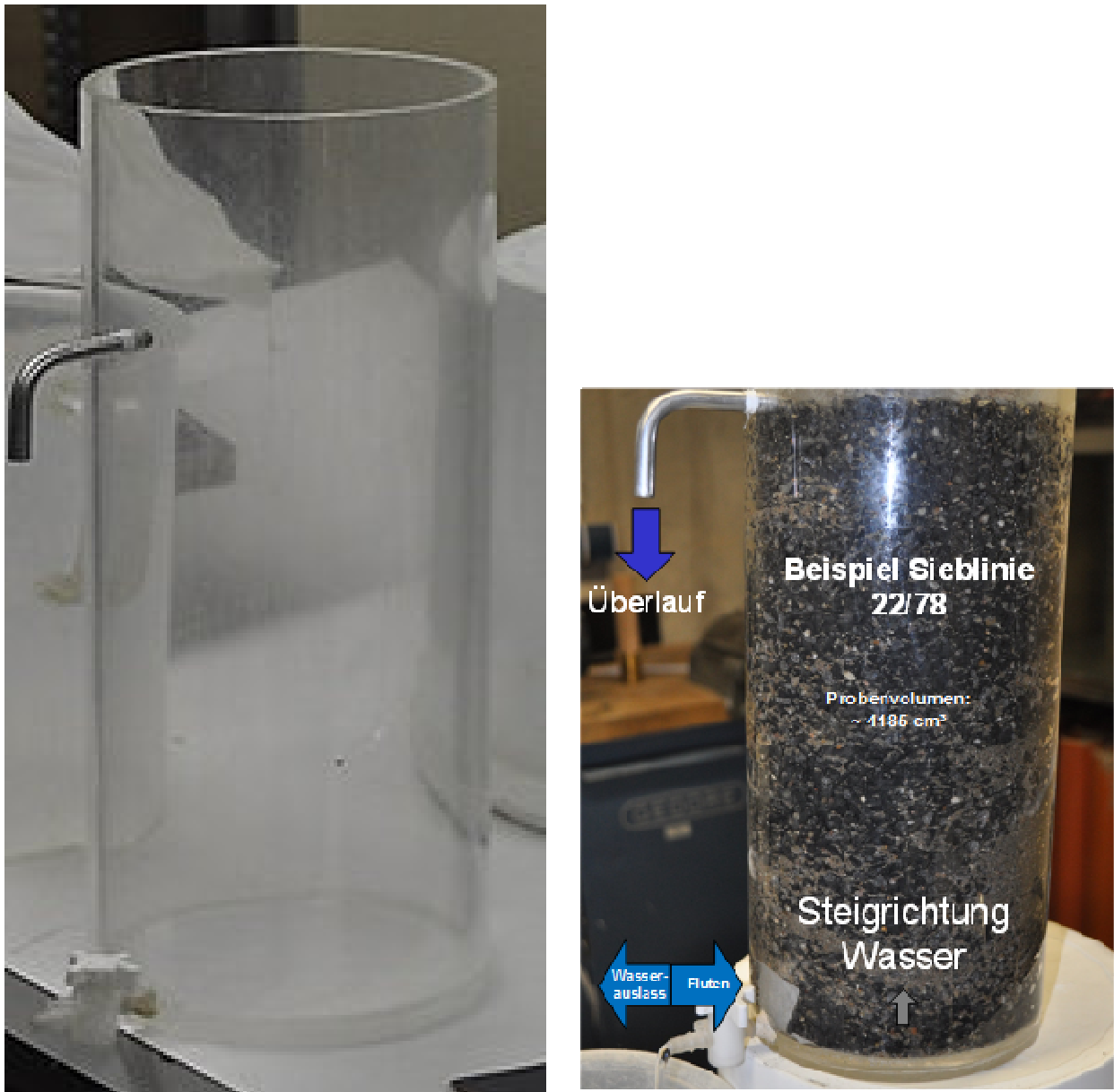
Zusammensetzung der Gesteinskörnung wurde der Zementgehalt erneut variiert (Bild 5.5-13). Aus den Versuchen lässt sich für diese Betone mit einem Sandgehalt von 20 % und einem Fließmittelgehalt von 1 % ein günstiger Zementgehalt zwischen etwa 325 und 375 kg/m<sup>3</sup> ableiten.



**Bild 5.5-13:** Variation des Zementgehaltes bei einem Sandgehalt von 20 %, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung. Betonzusammensetzung: Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV, Tabelle A 6

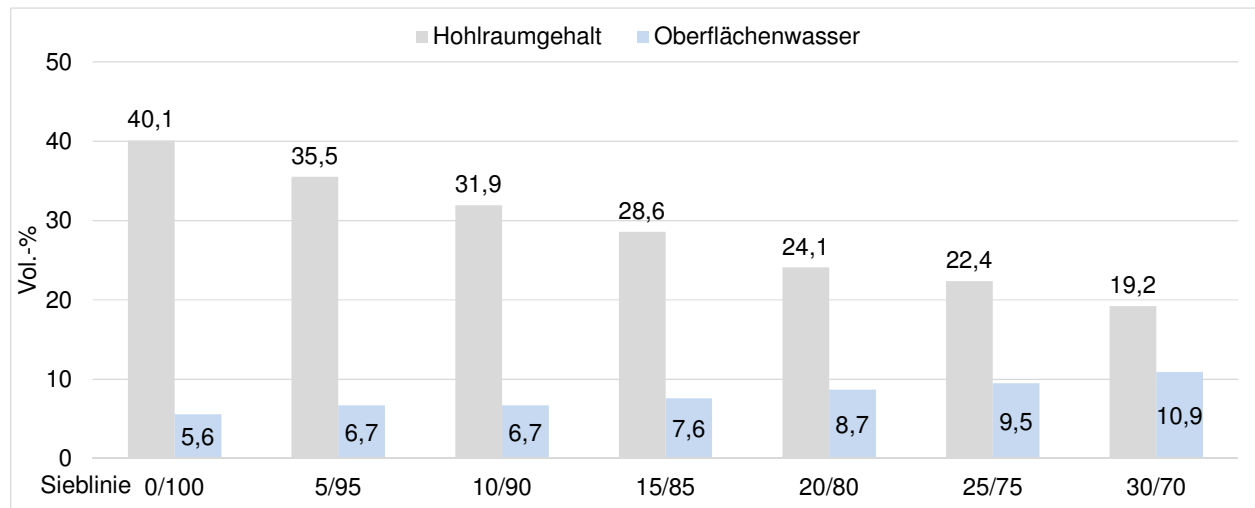
Aufbauend auf den zuvor genannten Ergebnissen wurde der Beton V3/8, der später in der Teststrecke von 2012 eingebaut wurde, entwickelt. Der Beton V3/8 besitzt ein Sand-Basalt-Verhältnis von 20/80, einen Zementgehalt von 350 kg/m<sup>3</sup> und einen w/z-Wert von 0,43. Zur Schaffung des Makroporensystems wurde in der Stoffraumrechnung ein Luftvolumen von 0,07 m<sup>3</sup> angesetzt. Die Betonzusammensetzung ist in Tabelle 5.5-7 aufgezeigt.

Durch die im Rahmen der vorhergegangenen Betonuntersuchungen gewonnenen Erfahrungen und den Erkenntnissen aus der Herstellung eines ersten Demonstrators sowie aus einem großtechnischen Einbau des COPS wurde in den weiteren Betonuntersuchungen das Korngerüst der eingesetzten Sieblinie im verdichteten Zustand als Basis für die Weiterentwicklung der Rezeptur verwendet. Dabei wurde das notwendige Luftvolumen, welches innerhalb der Stoffraumrechnung zu berücksichtigen ist, im verdichteten Zustand untersucht und bei der Konzeptionierung des Betons herangezogen. Folgend wurde die Annahme getroffen, dass der Basaltsplitt das Korngerüst im verdichteten Zustand definiert. Der Verdichtungsgrad im Rahmen der Untersuchungen wurde so gewählt, dass keine Scherung des Kornhaufwerks mehr möglich war, was einer maximalen Verdichtung entspricht. Es sollte eruiert werden, wie viel Hohlraum der verwendete Basaltsplitt im eingebauten Zustand, also nach der Verdichtung zur Verfügung stellt. Darüber hinaus sollte durch die Betrachtung des verdichteten Kornhaufwerks als Ausgang für die Dimensionierung des Leimgehaltes einer Mörtelanreicherung an der Oberfläche während des Einbaus und somit dem Verlust relevanter akustischer Eigenschaften entgegengewirkt werden. Es sollte so eine gewisse „Robustheit“ des COPS gegenüber variierender Einbaubedingungen z.B. infolge zu starker Verdichtung geschaffen werden. Den Untersuchungen wurde fortlaufend eine Schichtdicke des offenporigen Betons von 6 cm zu Grunde gelegt. Im Rahmen dieser Untersuchungen zur Bestimmung des Hohlraumgehaltes wurden mehrere, sich im Verhältnis der Anteile von Sand zu Basalt unterscheidende Sieblinien untersucht. Dabei wurde ausgehend von einer ausschließlichen Verwendung von Basalt (0/100) der Gehalt an Sand in Schritten von 5 % bis auf ein Sand-Basalt-Verhältnis von 30/70 fortwährend gesteigert. Durch Fluten einer verdichteten Gesteinskörnungsschüttung und anschließendem Ablassen des Wassers konnten die Volumina zur Verfüllung der Hohlräume sowie für das Benetzen der Oberfläche der Gesteinskörnung ermittelt werden.



**Bild 5.5-14:** Versuchsaufbau zur Bestimmung des Hohlraumvolumens und des Volumens zur Benetzung der Oberflächen eines verdichteten Kornhaufwerkes

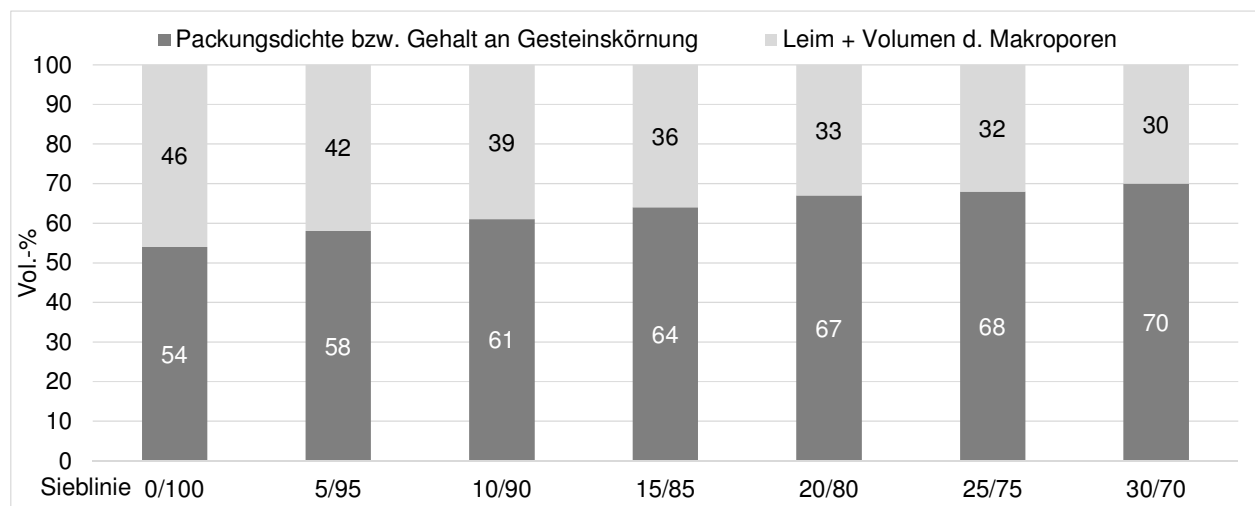
Bild 5.5-15 zeigt die ermittelten Volumina für den Anteil „Hohlraum“ sowie den Anteil des Wassers, welcher für die Benetzung der Oberfläche notwendig ist. Eine tabellarische Auflistung der Ergebnisse befindet sich im Anhang, Tabelle A 8 des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV [ ].



**Bild 5.5-15:** Volumen des Hohlraumes und Volumen des Oberflächenwassers der untersuchten Sieblinien im verdichteten Zustand

Anhand der Ergebnisse für die verdichteten Kornhaufwerke (Bild 5.5-15) wird wie zu erwarten ersichtlich, dass mit steigendem Sandgehalt der Hohlraumgehalt der Schüttung des Kornhaufwerks abnimmt. Gleichzeitig nimmt mit steigendem Sandanteil der Volumenanteil zu, welcher für die Benetzung der Oberflächen der Feststoffe verantwortlich ist. Dies entspricht den Erwartungen, da infolge des geringeren Korndurchmessers des Sandes die Zwischenräume des durch den Basaltspalt vorgegebenen Korngerüsts ausgefüllt werden und entsprechend der Gesamthohlraumgehalt reduziert wird. Durch die Zugabe von Sand steigt die Oberfläche des Korngemisches, was eine Zunahme des an der Oberfläche anhaftenden Wassers zur Folge hat. Die gewonnenen Ergebnisse lassen sich durch das Verhältnis von Feststoff zu Hohlraum formulieren bzw. als „Packungsdichte“ ausdrücken. Die Packungsdichte beschreibt wie dicht die Gesteinskörner gelagert sind. Je höher die Packungsdichte eines Gesteinskörnungsgemisches ist, umso geringer ist der im Beton verbleibende Porenraum, welcher mit Zementleim, Zusatzstoffen und Zusatzmitteln ausgefüllt werden muss. Im Rahmen der Erfassung der Packungsdichte werden in Ergänzung zur Sieblinienbetrachtung für das gesamte Korngemisch neben den Korngrößen auch die Kornform und die Oberflächenbeschaffenheit der Gesteinskörner erfasst.

Da das Oberflächenwasser neben dem ermittelten Hohlraumvolumen in Summe einen Teil des Gesamthohlraumvolumens beschreibt, muss dieses mit in der Berechnung der Packungsdichte berücksichtigt werden. Zum Übertrag der Packungsdichte und dessen Verwendung als Entwurfshilfe bei der Entwicklung eines offenporigen Betons wird diese zur Veranschaulichung in Vol.-% angegeben werden. Ein solcher Wert der Packungsdichte, ausgedrückt in Vol.-% liefert einen orientierenden Wert für den Gehalt der Gesteinskörnung am Gesamtsystem eines offenporigen Betons. Durch die Bildung der Differenz zu 100 % wird der Gesamthohlraumgehalt angegeben, bzw. eben der Anteil am System „offenporiger Beton“, welcher den Gehalt an Leim (Wasser/Zement/ggf. Füller) sowie das notwendige Luftvolumen zur Herstellung des oberflächennahen Makroporensystems beinhaltet (Bild 5.5-16).



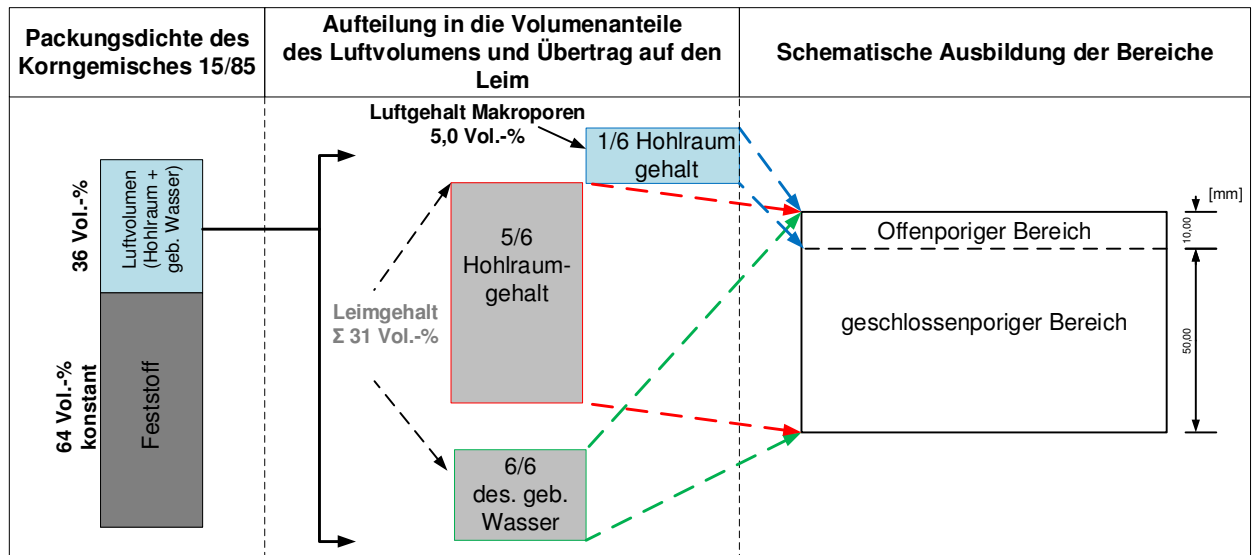
**Bild 5.5-16:** Packungsdichte der verdichteten Proben (Sieblinien) in Vol.-% und Gehalt an Luft im gemessenen Gesamtsystem



Anhand von Bild 5.5-16 kann somit der für das Makroporensystem maximal mögliche Hohlraumgehalt ermittelt werden. Dies entspricht bei der Sieblinie 5/95 im verdichteten Zustand rd. 42 Vol.-%. Anhand der gewonnenen Ergebnisse lassen sich in Abhängigkeit der Sieblinie Bereiche für das in der Stoffraumrechnung anzusetzende Luftvolumen herleiten. Dazu wird folgend beispielhaft das Ergebnis der Sieblinie 15/85 herangezogen. Das Feststoffvolumen beträgt 64 Vol.-%. Der Hohlraumgehalt setzt sich aus dem Volumenanteil des Oberflächenwassers und aus dem Volumenanteil, welcher für die Verfüllung der Hohlräume des Kornhaufwerkes von Nöten ist, zusammen. Das Volumen des gebundenen Wassers geht zu 100 % in den anzusetzenden Leimgehalt mit ein. Das Volumen der Hohlräume hingegen nur zu 83 % bzw. 5/6 der Schichthöhe. Zur Schaffung eines hohlraumreichen oberen Bereiches (1 cm) und eines geschlossenporigen, unteren Bereiches (5 cm) können die Volumina gemäß den nachfolgenden drei Schritten bestimmt werden.

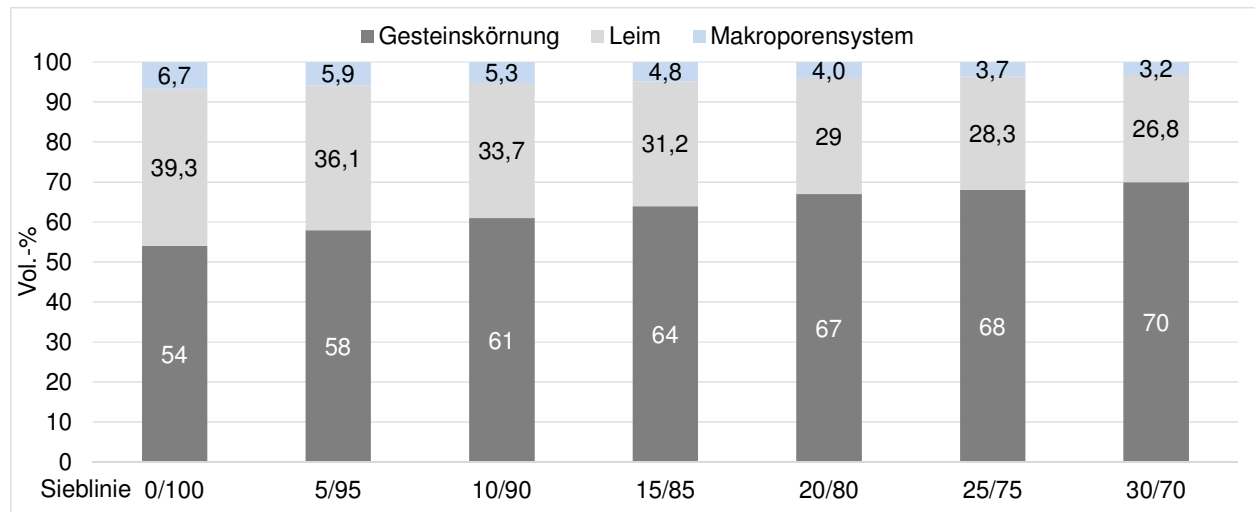
1. Volumen der Gesteinskörnung entspricht dem Wert der Packungsdichte in Vol.-%.
2. Notwendiger Leimgehalt:  $\frac{6}{6} \cdot \text{Volumen des Oberflächenwassers} + \frac{5}{6} \cdot \text{Hohlraumvolumen}$ .
3. Luftgehalt:  $\frac{1}{6} \cdot \text{Hohlraumgehalt}$ .

Daraus folgt für die Sieblinie 15/85 ein notwendiger, rechnerischer Leimgehalt zur Benetzung aller Gesteinskörner und zum Ausfüllen der Hohlräume bis zu einer Schichtdicke von 5 cm von rd. 31 Vol.-%. Das Luftvolumen zur Schaffung der Makroporen beträgt rd. 5,0 %. Die den anderen untersuchten Sieblinien zugehörigen Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle A 10 im Schlussbericht zum Teilvorhaben VI-IV dokumentiert. Die Aufteilung bzw. Berechnung der jeweiligen volumetrischen Anteile ist ebenfalls in Bild 5.5-17 dargestellt.



**Bild 5.5-17:** Schematisch dargestellte Aufteilung der Feststoff-, Leim- und Luftvolumina am Beispiel der Sieblinie 15/85

Bild 5.5-18 stellt die orientierenden Werte für den Betonentwurf auf Grundlage der untersuchten Sieblinien hinsichtlich Leimgehalts, Gehalt an Gesteinskörnung und Luftvolumen graphisch dar.



**Bild 5.5-18:** Betonkonzeption auf Grundlage der Packungsdichte

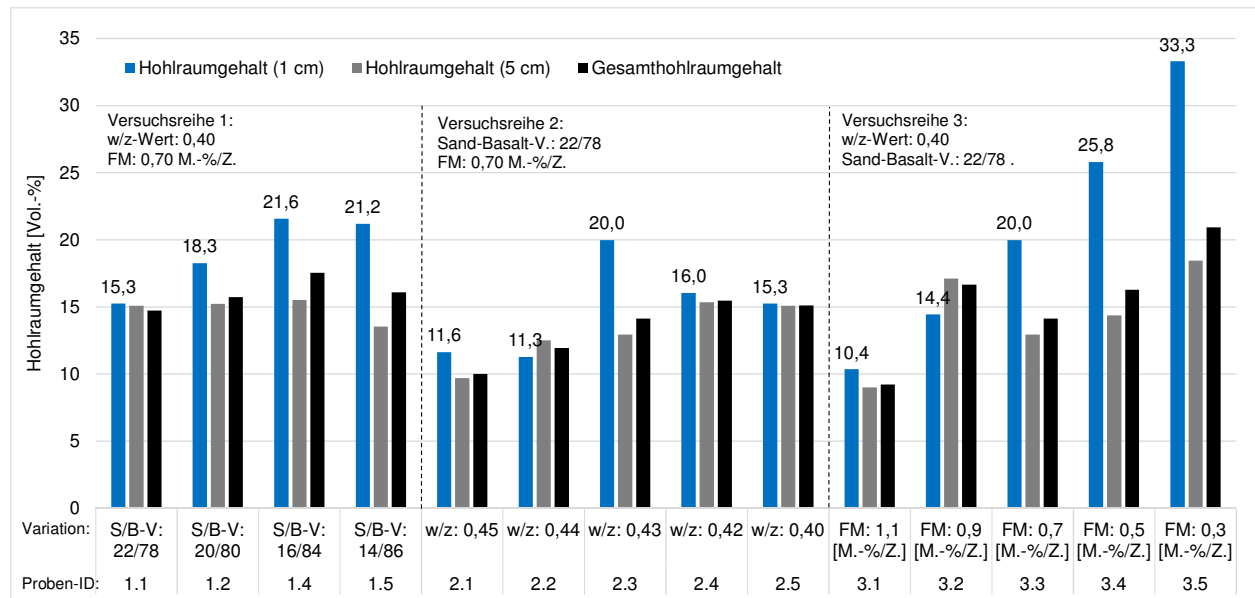
Anhand der Ergebnisse lassen sich die Ausgangsstoffe entsprechend den in Bild 5.5-18 angegebenen Volumenanteilen zusammenstellen. Folgende Tabelle beinhaltet ein Beispiel für eine Betonzusammensetzung, resultierend aus den Volumina der Sieblinie 15/85.

Ausgangsstoffe	Menge [kg]	Dichte [kg/m³]	Volumen [Vol.-%]		Σ
Zement [kg/m³]	430	3100	13,9	Leim	31,2
Wasser [kg/m³]	172	1000	17,2		
w/z-Wert [-]	0,42	-			
Luftgehalt [Vol.-%]	5	-	5	Luft	5
Gesteinskörnung [kg/m³]	1830	2860	63,8	Gesteinskörnung	64

**Tab 5.5-4:** Beispiel für eine Mischungszusammensetzung eines offenporigen Betons auf Grundlage experimenteller Untersuchungen

Vergleichsweise wurde für die Sieblinie 15/85 analog zu dem Vorgehen im Rahmen der Betonuntersuchungen Teil 1 der Hohlraumgehalt mit Hilfe eines Gefäßes mit definiertem Volumen bestimmt. Dazu wurde die Gesteinskörnung 3-lagig unter Einwirkung von Rüttelenergie eingefüllt und anschließend von oben geflutet. Durch Wägung vor und nach der Wasserzugabe kann so der Hohlraumgehalt inkl. des Volumenanteils des zur Benetzung der Oberfläche notwendigen Wassers bestimmt werden. Es wurde ein Hohlraumgehalt von rd. 34 Vol.-% ermittelt. Bezogen auf eine Schichtdicke von 6 cm und einem angestrebten, offenporigen Bereich von 1 cm ergibt sich der notwendige, zu verrechnende Hohlraumgehalt zu  $34 \text{ Vol.-%} / 6 = 5,7 \text{ Vol.-%}$ , welcher entsprechend in der Stoffraumrechnung mit  $0,057 \text{ m}^3$  verrechnet werden muss. Dieser Wert liegt im Bereich der in Bild 5.5-18 angegebenen orientierenden Werte. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei dem genannten Verfahren der Volumenanteil des Wassers bzw. Leimes, welcher für den oberen cm der Schicht angerechnet werden muss, nicht berücksichtigt wird.

Unter Berücksichtigung dieser orientierenden Ergebnisse wurden laborseitig weitere Probekörper hergestellt. Die Randbedingungen bei der Herstellung der Probekörper wurden stets konstant gehalten. So erfolgte die Verdichtung auf einem Rütteltisch (40 Hz) mit einer Dauer von 15 Sekunden je Lage, in Summe bei zwei Einbauschichten 30 Sekunden. Im Rahmen der folgenden Untersuchungen wurden das Sand-Basalt-Verhältnis, der w/z-Wert sowie die Variation des Fließmittelgehaltes (FM 2) untersucht. Bild 5.5-3 zeigt die im Rahmen der genannten Untersuchungen ermittelten Hohlraumgehalte. Die dazugehörigen Betonzusammensetzungen und Frischbetonkennwerte sind im Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV, Tabelle A 11 bis Tabelle A 16 dokumentiert.

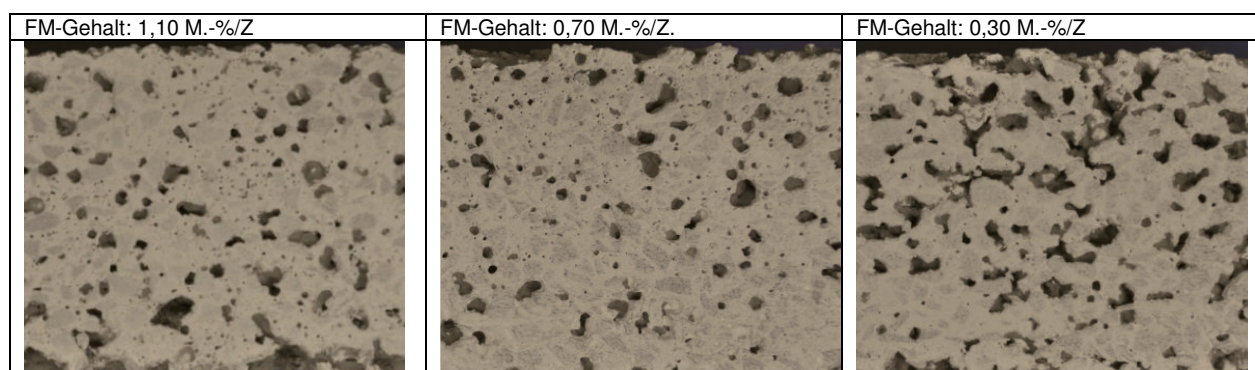


**Bild 5.5-19:** Hohlraumgehalte laborseitig hergestellter Probekörper (Versuchsreihen 1- 3)

In Summe zeigen die untersuchten Parameter unterschiedlich starke Wirkung auf die Ausbildung der angestrebten Struktur des Betongefüges. So hat sich gezeigt, dass die eingesetzte Sieblinie grundlegend die Eigenschaften der strukturellen Durchbildung des COPS beeinflusst (Versuchsreihe 1). Zum einen wird dadurch der maximal mögliche Hohlraumgehalt im oberen Bereich der Schicht im verdichteten Zustand bestimmt und zum anderen die Viskosität des Leimes beeinflusst. Die veränderten Fließeigenschaften des Leimes führen dazu, dass sich dieser während des Einbaus unter Verdichtung unterschiedlich stark absetzt.

Die Variation des w/z-Wertes (Versuchsreihe 2) zeigt, dass dieser auch im Sinne der Dauerhaftigkeit nicht als Steuergröße für eine angepasste Viskosität herangezogen werden kann, da eine Veränderung des w/z-Wertes den Gesamthohlraumgehalt zwar beeinflusst, aber bei steigendem Wassergehalt kein verbessertes Absetzverhalten erzielt werden kann.

Der Einfluss des Fließmittelgehaltes (Versuchsreihe 3) hingegen bewirkt eine deutliche Veränderung der Betonstruktur. So hat sich gezeigt, dass ein hoher Fließmittelgehalt entgegen den Erwartungen nicht zu einer deutlichen Differenzierung der Schichten geführt hat, sondern der Hohlraumgehalt in Summe reduziert wurde. Auch die Differenz zwischen oberem und unterem Bereich wurde nahezu negiert. Ein Fließmittelgehalt  $\geq 0,90$  M.-%/Z führt zu einem relativ dichten Betongefüge über den Gesamtquerschnitt und zu niedrigen Hohlraumgehalten, sowohl im oberen als auch im unteren Bereich des Probekörpers. Ein Fließmittelgehalt von  $0,70$  M.-%/Z stellt bzgl. der beiden geforderten Parameter „dichtes Betongefüge“ und „oberflächlich zugängliches Hohlraumsystem“ einen günstigen Kompromiss dar. Demzufolge führt entgegen den Erwartungen ein hoher Fließmittelgehalt zu einem geringen Hohlraumgehalt, wohingegen die Viskosität bei steigendem Fließmittelgehalt erwartungsgemäß geringer wird und der Leim somit ein günstigeres Absetzverhalten zeigen müsste. Die in Bild 5.5-20 dargestellten Schnittbilder weiß eingefärbter Schnittflächen beschreiben den starken Einfluss des Fließmittels sehr deutlich.



**Bild 5.5-20:** Schnittbilder der Betonprobekörper der Versuchsreihe 3

Bei der Betrachtung des oberen Bereiches (1cm) des COPS mit 1,1 M.-%/Z. und 0,3 M.-%/Z. wird der Einfluss des Fließmittelgehaltes auf die Oberflächengestalt weiter deutlich.

Fließmittelgehalt: 1,1 M.-%/Z.



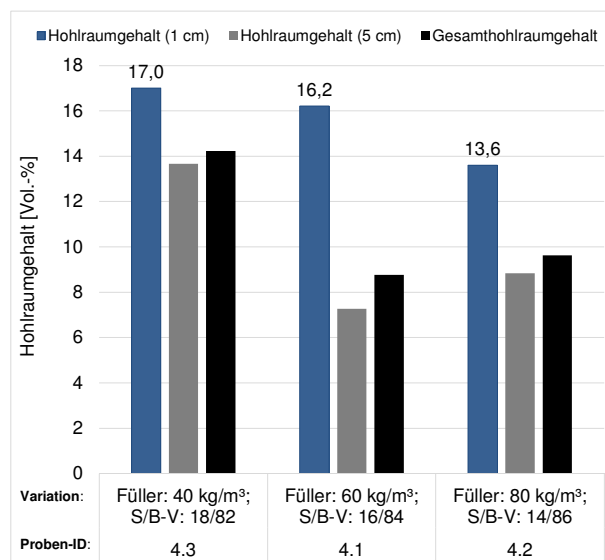
Fließmittelgehalt: 0,3 M.-%/Z.



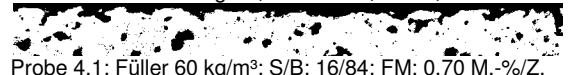
**Bild 5.5-21:** Schnittbilder (1bit) des oberen cm der Schichten – Variation des Fließmittelgehaltes

Abschließend kann festgehalten werden, dass eine Zugabe größer-gleich 0,9 M.-%/Z. des verwendeten Fließmittels und einer zu einer Leimanreicherung im Bereich der obersten Kornreihe führt. Ein geringerer Fließmittelgehalt von 0,5 M.-%/Z. führt zu einem insgesamt sehr hohlräumreichen Betongefüge. Im Rahmen der Versuchsreihe 3 zeigte sich ebenfalls, dass eine geringe Viskosität des Leimes zu Inhomogenitäten der Oberflächentextur führt. Ein Fließmittelgehalt von 0,70 M.-%/Z. führt zu einem Hohlräumgehalt im oberen Bereich von rd. 20 Vol.-%.

Es lässt sich also festhalten, dass die maßgebende Steuergröße zur Ausbildung der geforderten Struktur die Gesteinskörnung bzw. der Anteil des Sandes ist. Aufbauend auf Versuchsreihe 1 - 3 wurde in einem weiteren Schritt durch Zugabe eines Basalt-Füllers der Leimgehalt erhöht und die Viskosität als direkte Folge der gesteigerten spezifischen Oberfläche und der damit einhergehenden erhöhten physikalischen Wasserbindung an den im Leim enthaltenen Feststoffen sukzessiv gesteigert wird. Der Sandgehalt wurde mit zunehmendem Fülleranteil reduziert. Nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Hohlräumbestimmung sowie die Schnittbilder des obersten 1 cm der hergestellten Proben in Versuchsreihe 4. Die Betonzusammensetzung ist im Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV in Tabelle A 17 aufgeführt.



Probe 4.3: Füller 40 kg/m³; S/B: 18/82; FM: 0,70 M.-%/Z.



Probe 4.1: Füller 60 kg/m³; S/B: 16/84; FM: 0,70 M.-%/Z.



Probe 4.2: Füller 80 kg/m³; S/B: 14/86; FM: 0,70 M.-%/Z.



**Bild 5.5-22:** links: Hohlräumgehalte der Probekörper aus Versuchsreihe 4, rechts: Schnittbilder (Versuchsreihe 4) des obersten 1 cm der Schichten.

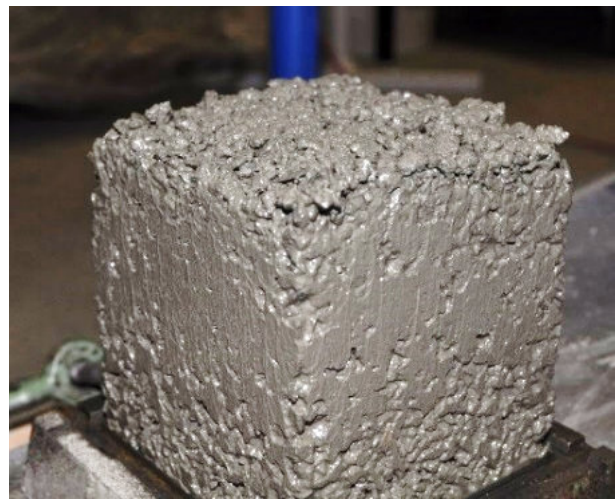
Anhand der in Bild 5.5-22 (links) dargestellten Ergebnisse der Hohlräumbestimmung wird deutlich, dass mit steigendem Fülleranteil der Hohlräumgehalt in der obersten Schicht abnimmt. Damit einhergehend erfolgt ebenfalls eine Reduktion des Hohlräumgehaltes der unteren Schicht. In Bild 5.5-22 (rechts) sind die Profile der bearbeiteten Schnittflächen der Versuchsreihe 4 aufgezeigt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei einem Anteil von 80 kg/m³ Füller ein homogenes Profil mit einer hohen Ebenföchigkeit entsteht (Bild 5.5-24).

Füller 80 kg/m<sup>3</sup>; S/B: 14/86; FM: 0,70 M.-%/Z.



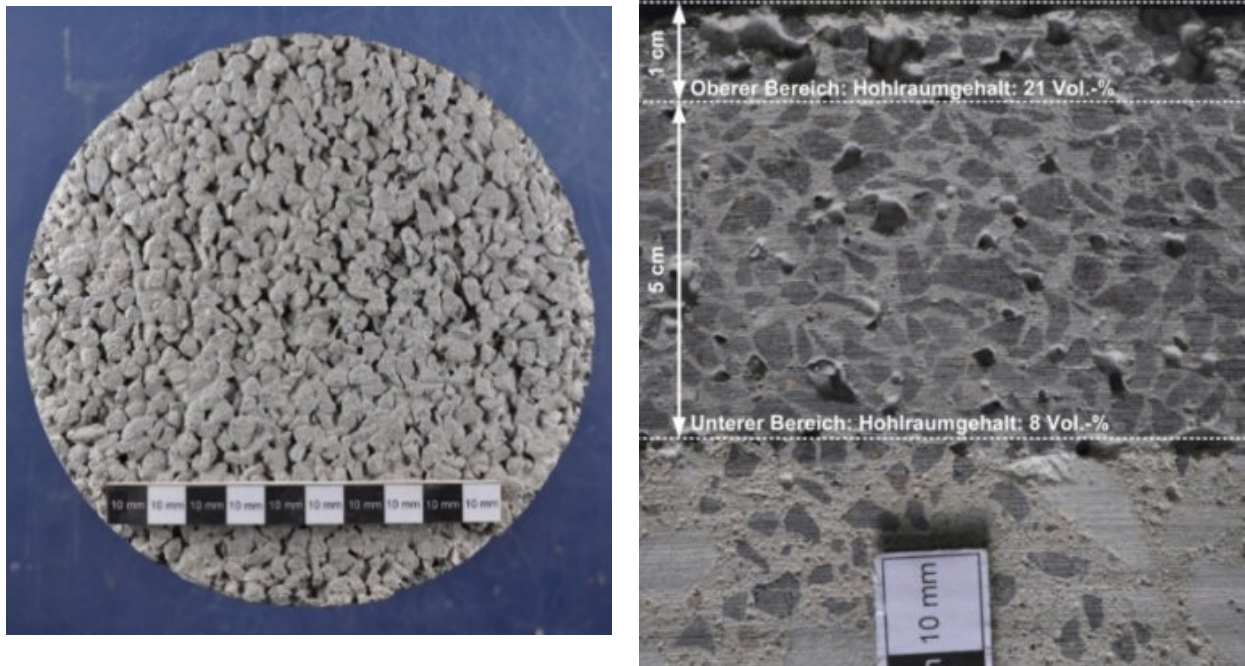
**Bild 5.5-23:** Schnitt des obersten 1 cm (Probe 4.2)

Verglichen mit den anderen Profilen wird allerdings deutlich, dass der Gesamthohlraumgehalt des oberen Bereiches und damit direkt verbunden die Möglichkeit einer Kommunikation der Makroporen untereinander reduziert wird. In Anbetracht einer dauerhaften Fahrbahndecke jedoch, lässt ein Beton mit einem Anteil von 80 kg/m<sup>3</sup> Füller bei einem Sand-Basalt-Verhältnis von 14/86 auf einen erhöhten Widerstand der obersten Kornreihe gegenüber Verkehrsbelastung schließen. Im Zuge der Entwicklung eines Betons, welcher eine gewisse „Robustheit“ gegen Schwankungen während des Einbaus und gleichzeitig eine ausreichende Dauerhaftigkeit aufweist wurde ein Füllergehalt von 80 kg/m<sup>3</sup> für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Ein Beton mit einem Fülleranteil von rd. 80 kg/m<sup>3</sup> neigte bei übermäßiger Verdichtung zu wenig bis keinen Mörtelanreicherungen an der Oberfläche. Weiterhin bedingt ein höher-viskoser Leim eine für den Einbau mittels Gleitschalungsfertiger notwendige Formstabilität. Nachfolgendes Bild zeigt den Beton mit einem Fülleranteil von 80 kg/m<sup>3</sup> (Probe 4.2 Bild 5.5-22) unmittelbar nach der Verdichtung auf einem Rütteltisch.



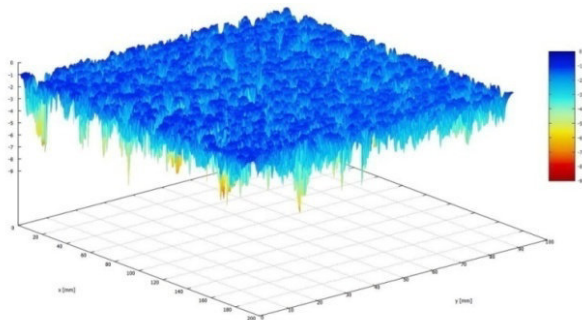
**Bild 5.5-24:** Unmittelbar nach Verdichtung entformter COPS - Mischung V4/1

Auf Grundlage der zuvor beschriebenen Untersuchungen wurde ein weiterer Beton neben der modifizierten Rezeptur „V3/8“ (w/z-Wert: 0,40 anstatt 0,43) für den Einbau auf der Teststrecke 2013 ausgewählt und vorab als großformatige Platte im Labor hergestellt. Dieser Beton hatte die Kurzbezeichnung V4/1. Der Fließmittelgehalt beträgt 0,7 M.-%/Z., das Sand-Basalt-Verhältnis 14/86 und der Füllergehalt 80 kg/m<sup>3</sup>. Bei einem Zementgehalt von 350 kg/m<sup>3</sup> und einem w/z-Wert von 0,40 ergibt sich ein Leimgehalt von rd. 283 l/m<sup>3</sup>. Gemäß den Untersuchungen zur Bestimmung des notwendigen Leimgehaltes anhand eines verdichteten Korngerüstes ergibt sich bei einem Sand-Basalt-Verhältnis von 14/86 ein rechnerisch notwendiger Leimgehalt von rd. 31 Vol.-% und ein Hohlraumvolumen zur Schaffung des Makroporensystems von 5 Vol.-%. Der in der Stoffraumrechnung berücksichtigte Luftgehalt des Makroporensystems wurde bei der laborseitigen Herstellung der Platten zu 5,7 Vol.-% gewählt. Der Leimgehalt wurde zu 280 l/m<sup>3</sup> gewählt. Nachfolgendes Bild 5.5-25 zeigt die Oberfläche eines Bohrkerns (links) und die Ansicht der Mantelfläche (rechts).



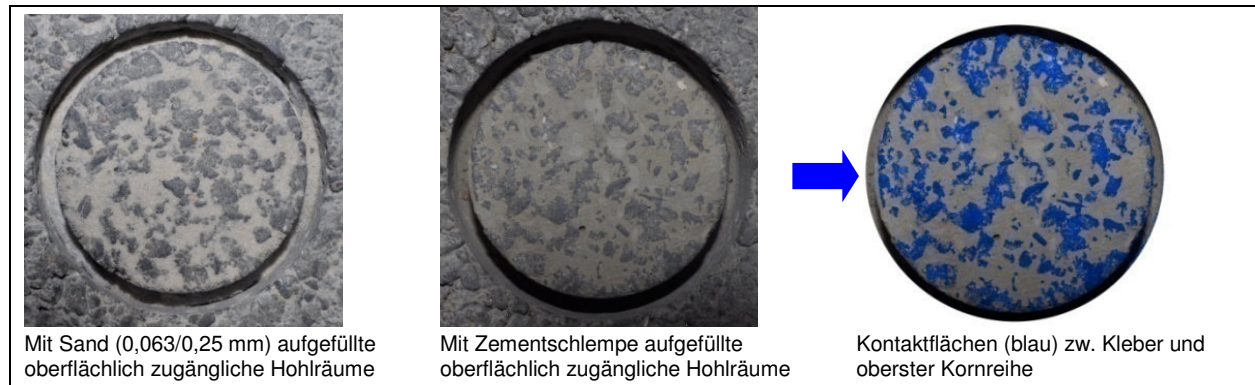
**Bild 5.5-25:** Beton V4/1 - Bohrkernaufnahme: links: Aufsicht, rechts: Mantelfläche

Bei der Auswertung des Hohlraumgehaltes, bei welcher die gesamte Mantelfläche der COPS-Schicht zugrunde gelegt wurde, hat sich für den oberen, offenporigen Teil der Schicht ein Hohlraumgehalt im Mittel von rd. 21 Vol.-% und für den unteren Bereich von 8 Vol.-% ergeben. Der maximal mögliche Hohlraumgehalt der obersten Schicht beträgt bei dem gewählten Sand/Basalt-Verhältnis rd. 36 Vol.-%. Bei Verrechnung des notwendigen Leimgehaltes zur punktuellen Verklebung der Gesteinskörner im oberflächennahen Bereich von rd. 7,6 Vol.-% beträgt der zu erwartende Hohlraumgehalt im oberen 1 cm der Schicht ca. 28,4 Vol.-%. Der ermittelte Hohlraumgehalt liegt mit 21 Vol.-% rund 7,4 Vol.-% unter dem rechnerisch möglichen Hohlraumgehalt. Somit ist die obere Gesteinskörnung stärker im Zementstein eingebunden, was einen erhöhten Widerstand gegenüber typischen Verkehrsbelastungen erwarten lässt. Bild 5.5-26 zeigt eine mittels Laser-Triangulation digitalisierte Oberflächentextur der Laborprobe des Betons V4/1. Es wurde eine maximale Rautiefe von 9 mm ermittelt. Ebenfalls wird anhand der Abbildung ersichtlich, dass gleichmäßig verteilte „Schluchten“ vorliegen und dass die geforderte Ebenheit gegeben ist.



**Bild 5.5-26:** digitalisierte Oberflächentextur des Betons V4/1

An diesem Beton wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, welche die Abschätzung der Eignung als dauerhafte Fahrbahndecke innehalten. Zur Bestimmung der Qualität der Einbettung der obersten Kornreihe wurde das Verfahren zur Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit gemäß ZTV-ING modifiziert. Um ausschließlich die Einbettung der Körner zu bestimmen, wurden vor Aufkleben des Stempels die oberflächlich zugänglichen Hohlräume mit einem überwässerten, niederfesten Zementleim oder mit Feinsand der Korngruppe 0,063/0,25 mm aufgefüllt. Anschließend wurde die Prüfoberfläche durch Schleifen angeraut. Durch die Verfüllung der Hohlräume haftet der aufzubringende Kleber ausschließlich an der obersten Kornreihe bzw. an den nach oben gerichteten Oberflächenanteilen der Basaltkörner (Bild 5.5-27).

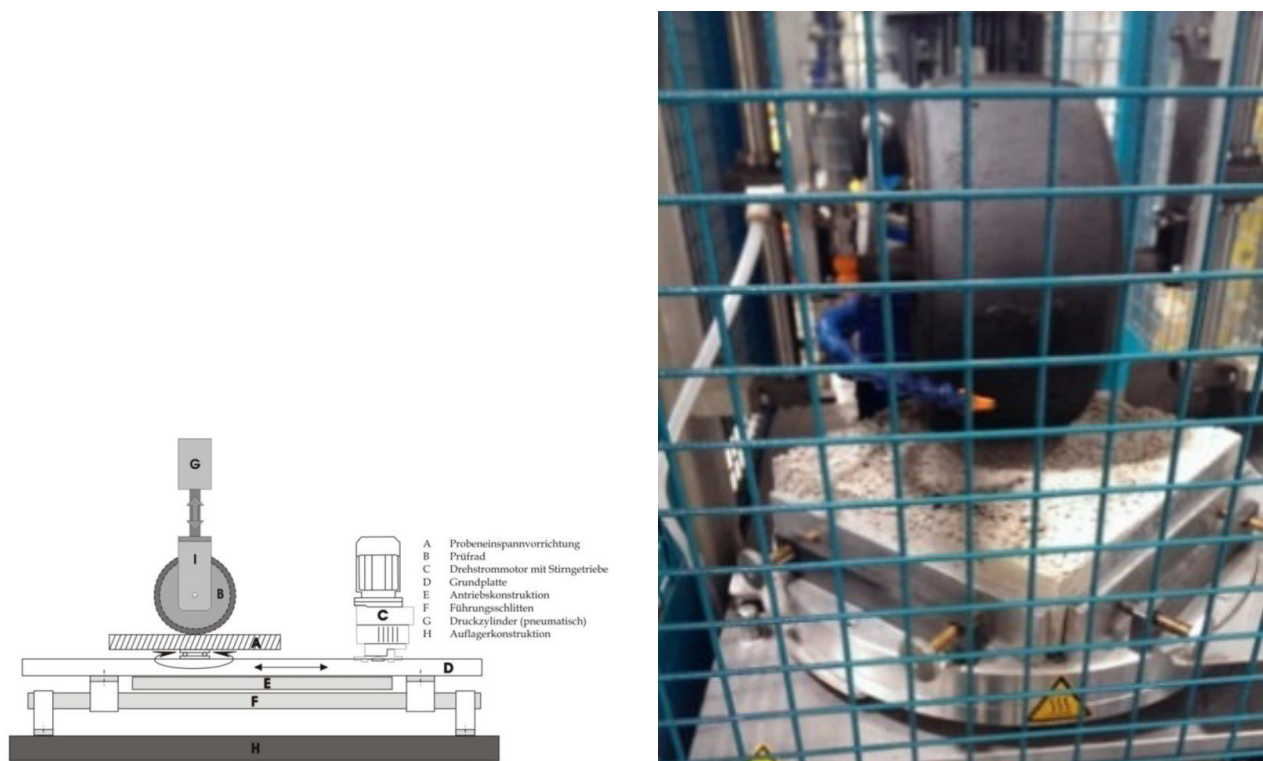


**Bild 5.5-27:** Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit – Beton V4/1 - Vorbereitete Messstellen

Die Prüfung der Oberflächenzugfestigkeit wurde an einer Platte mit den Abmessungen von 120 cm x 80 cm x 16 cm an 6 Messstellen durchgeführt. Im Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV, Tabelle A 18 sind die ermittelten Festigkeiten tabellarisch aufgeführt. Die Größenordnung der ermittelten Oberflächenzugfestigkeiten (Bruchbild: 100% im Beton  $\approx 2,5 \text{ N/mm}^2$ , geringster Wert:  $1,8 \text{ N/mm}^2$ ) verdeutlichen, dass der Verbund der Körner in der Zementmatrix und untereinander ausreichend vorhanden ist.

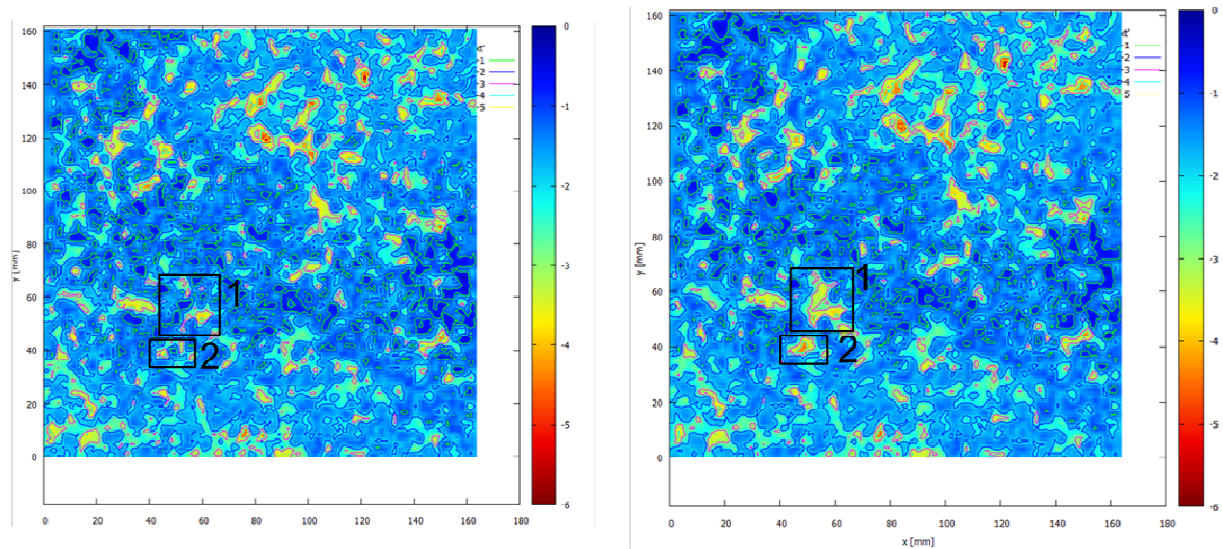
Zusätzlich wurden an den Betonen „mod. V3/8“ und „V4/1“ Überrollversuche nach [3] durchgeführt. Dabei wird die Beständigkeit gegen scherende Beanspruchung untersucht. Der Überrollversuch ist im ursprünglichen Sinne ein Verfahren zur Beurteilung des Widerstandes von Asphaltsschichten gegen Schubbeanspruchungen an der Oberfläche.

Der Prüfkörper ( $26 \times 26 \times 6 \text{ cm}^3$ ) wird durch eine oszillierende Drehbewegung mit vertikalbelastetem Prüfrad, ohne Profilierung, mechanisch beansprucht. Dadurch können zwei Belastungszustände simuliert werden. Die richtungswechselnde Drehbeanspruchung ohne Abrollen des Reifens entspricht einem Lenkvorgang im Stillstand. Durch die zusätzliche oszillierende Verschiebung in der Horizontalachse wird ein Abrollen des Prüfrades während der Schubwechselbelastung simuliert. Dieser Belastungsfall kann mit dem Rangieren eines PKWs aus einem Parkstand gleichgesetzt werden oder im Übertrag auf das Einsatzgebiet von COPS auf Reifenbewegungen im Falle eines Staus. Es wurden 20 Doppelschubzyklen (DSZ) mit oszillierender Verschiebung und mit einer festgelegten Auflast von 1000 N durchgeführt. Bild 5.5-28 zeigt den schamtischen Aufbau des Versuchsstandes nach prEN 12697-50:2011 (links) sowie einen laufenden Versuch (rechts).



**Bild 5.5-28:** Links: schematische Darstellung des Überrollversuch, rechts: laufender Versuch

Der Substanzverlust, durch Wägung vor und nach der Prüfung bestimmt, war sowohl bei Beton „V3/8“ mit 0,8 g und bei Beton „V4/1“ mit 1,7 g sehr gering. Zum Vergleich erfährt ein Wasserdurchlässiger Asphalt (WDA) mit einem Bitumen 50/70 nach 5 Doppelschubzyklen einen Substanzverlust von 136,88 g [11]. Zur Beurteilung möglicher Kornausbrüche wurden die Probekörperoberflächen vor und nach der Prüfung mit Hilfe des Laserscan-Verfahrens digitalisiert. Dies erlaubt eine qualitative Beurteilung der Schädigungen infolge der im Überrollversuch aufgetragenen spezifischen Belastung. Bild 5.5-29 zeigt die Vorher-Nachher-Aufnahmen des Betons V4/1.



**Bild 5.5-29:** Digitalisierte Oberfläche vor (links) und nach (rechts) 20 DSZ (Beton V4/1)

Anhand der obenstehenden Abbildung ist zu erkennen, dass bei Beton V4/1 an zwei Stellen Kornausbrüche stattgefunden haben, insgesamt aber keine weiteren Schädigungen zu erkennen sind. Diese Prüfung liefert neben der modifizierten Oberflächenzugfestigkeitsprüfung einen weiteren Indikator zur Einordnung der Widerstandsfähigkeit des offenporigen Bereiches gegenüber Verkehrsbelastung. Insgesamt kann eine ausreichende Einbindung der obersten Kornreihe abgeleitet werden.

Neben der oben beschriebenen Methode zur Entwicklung eines offenporigen Betons wurden zwei weitere Ansätze erprobt. Zum einen sollte der Leim so eingestellt werden, dass dieser unter Ausschluss von Verdichtungsenergie selbstständig nach unten absinkt. In untenstehender Abbildung ist ein, mittig aus einer Platte mit den Abmessungen 1200 x 800 mm<sup>2</sup> entnommener Bohrkern sowie dessen Oberfläche dargestellt. Dabei wurde ein Beton mit einem entsprechend niedrig-viskosen Leim verwendet. Zur Erzielung des selbständigen Absinkens wurde das Sand-Basalt-Verhältnis auf 6/94 reduziert, was zu einer geringeren physikalischen Wasserbindung an der Oberfläche der Feststoffe und demnach zu einem erhöhten Anteil an freiem Wasser führt. Dies bedingt in Kombination mit einer erhöhten Fließmittelzugabe (FM 2) von 1,7 M.-%/Z. einen sehr fließfähigen Leim. Die Mischgutzusammensetzung ist im Anhang in Tabelle A 19 im Schlussbericht zum Teilvorhaben VI-IV dokumentiert.

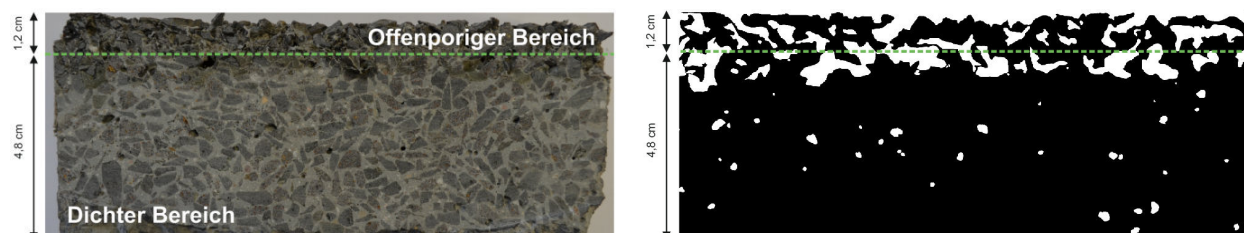




**Bild 5.5-30:** COPS-Testplatte: Methode: „Selbstständiges Absinken des Leimes“

Zu erkennen ist, dass sich im unteren Bereich (5/6 der Probenhöhe) infolge des fließfähigen Leimes ein geschlossenes Betongefüge ausgebildet hat, die oberste Kornreihe hingegen nur unzureichend eingebunden ist. Die unzureichende Einbettung der obersten Kornreihe zeigte sich bereits bei der Bohrkernentnahme anhand von starkem Kornverlust bei Erstkontakt zwischen drehender Bohrkronen und Beton (Bild 5.5-30). Infolge Verkehrsbelastung wäre mit erhöhtem Abrieb in Form von Kornausbrüchen zu rechnen. Eine weitere Erhöhung des Leimgehaltes und somit einer Einbettung der obersten Kornreihe „bis zur Schulter“ wurde nicht weiter verfolgt. Bei einem Einbau mittels Gleitschalungsfertiger, bedingt durch die zu geringe Viskosität des Leimes aufgrund der nicht allseitigen Schalung und der geringen Zeit in welcher der COPS in der Schalung verbleiben kann, würde sich die Problematik des „Auslaufens“ des Leimes ergeben. Um eine sichere Einbaubarkeit mittels Gleitschalungsfertiger zu gewährleisten, müssen der COPS eine entsprechend angepasste Viskosität des Leimes und der Beton als Ganzes eine ausreichend steife Konsistenz besitzen.

Die zweite Methode beinhaltete die Reduktion der Sieblinie auf einen Korngrößenbereich von 4 bis 5 mm. Als Grundlage wurde die Rezeptur V3/8 verwendet. Dazu wurde durch Siebung der Gesteinskörnung der Anteil kleiner 4 mm abgetrennt. Dies hatte eine Erhöhung des Hohlraumgehaltes zur Folge. Zugleich wird der Wasseranspruch des Korngemisches reduziert und der Leim kann aufgrund der weniger dichten Packung der Gesteinskörnung besser nach unten absinken. Nachfolgende Abbildung zeigt eine laborseitig hergestellte Probe mit einer solchen Sieblinie.



**Bild 5.5-31:** Probe eines offenporigen Betons bei Verwendung einer variierten Sieblinie des Basaltes der Korngruppe 4/5

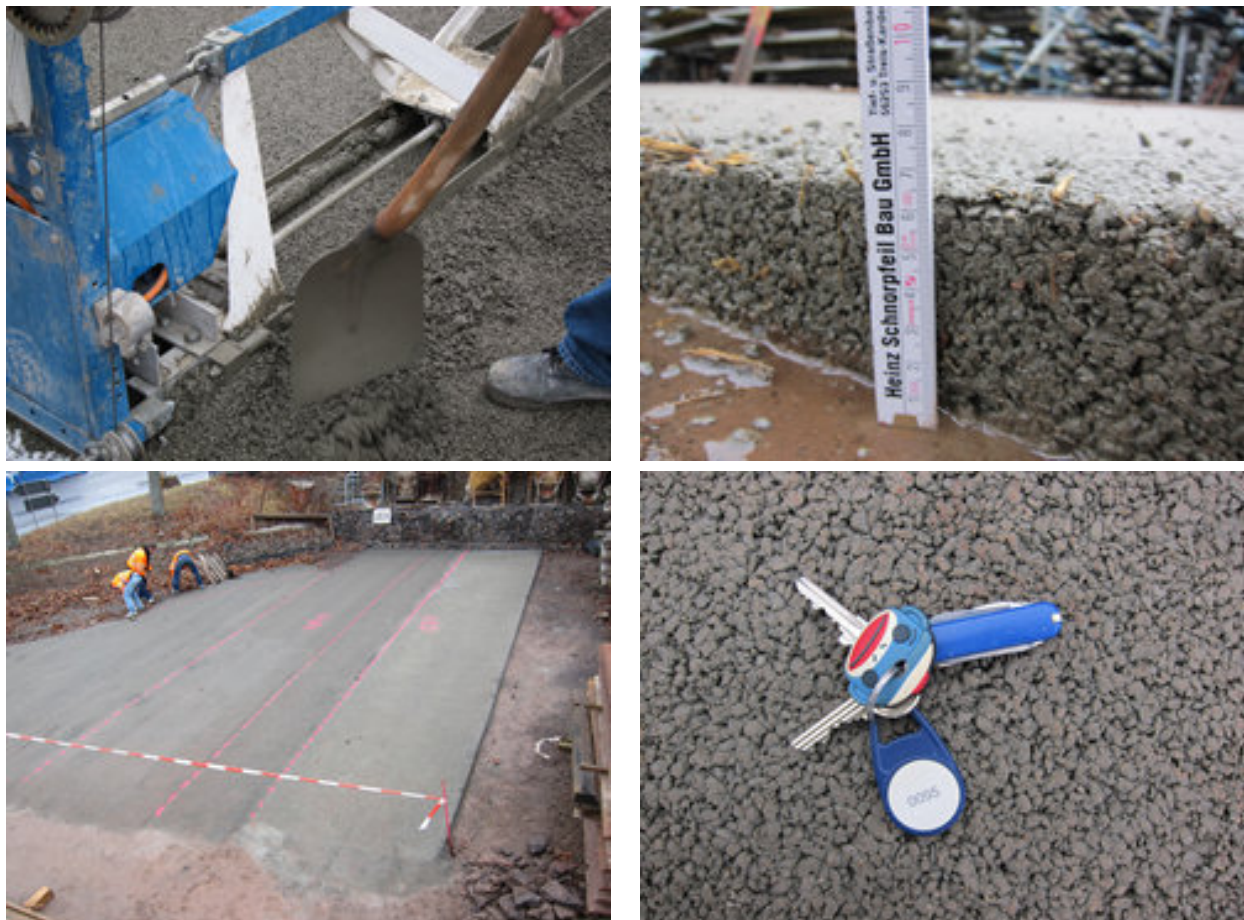
Bei der hier betrachteten Probe konnte im oberen Bereich ein Hohlraumgehalt von rd. 42 % erreicht werden. Der Hohlraumgehalt im unteren Bereich beträgt 8,5 %. Die Ergebnisse zeigen, dass dieser Ansatz vielversprechend ist. Allerdings bedarf die Herstellung einer solchen Korngruppe 4/5 mm enormen Aufwand, was unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit dazu führte, dieses Konzept vorerst nicht weiter zu verfolgen.

## 5.5.4 Großtechnische Herstellungen

### 5.5.4.1 Demonstrator

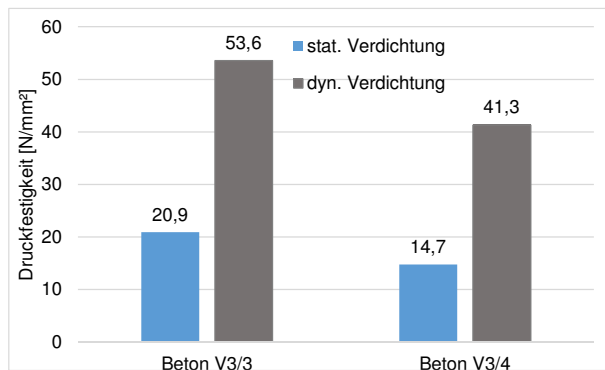
Auf dem Betriebsgelände der Fa. Schnorpfel Bau GmbH wurden zwei Versuchsmischungen in die Praxis umgesetzt. Die Betonzusammensetzung ist im Anhang in Tabelle A 21 im Schlussbericht zum Teilvorhaben VI-IV hinterlegt. Hierfür wurde der Beton nach Zusammensetzung mit einem Größtkorn von 5 mm in einem Transportbetonwerk hergestellt und dann mittels Trommelmischern angeliefert.

Die eingesetzten Betone wurden im Rahmen der Voruntersuchungen entwickelt. Diese unterscheiden sich sowohl im Zementgehalt und w/z-Wert, also im Leimgehalt als auch im Sand-Basalt-Verhältnis. Der Beton V3/4 besitzt einen um  $40 \text{ kg/m}^3$  höheren Zementgehalt bei geringerem w/z-Wert als der Beton V3/3. In Kombination mit dem um rd. 9,5 % höheren Splittanteil und entsprechend reduziertem Sandanteil gegenüber dem Beton V3/3 ist bei Beton V3/4 eine wesentlich offenporigere Struktur zu erwarten. Beide Betone wurden mit einem Fließmittelgehalt von 0,7 M.-%/Z. (FM 0) hergestellt. Der Einbau mittels Rüttelbohle erfolgte in zwei Bahnen mit einer Breite von ca. 2 m, einer Länge von rd. 15 m und einer Stärke von 7 cm im verdichteten Zustand (Bild 5.5-32). Je eingebauten Beton kamen zwei unterschiedliche Verdichtungsarten – dynamisch und statisch – zum Einsatz. Da die Verdichtungswirkung der eingesetzten Rüttelbohle nicht ausreichend war, wurde im Anschluss mit einer Bomag-Walze vom Typ BW 90 AD sowohl statisch und als auch mit Vibration nachverdichtet. Nachfolgendes Bild 5.5-32 zeigt die laufende Herstellung (oben links), die fertige COPS-Schicht (oben rechts, unten links) sowie eine Nahaufnahme der Oberfläche (unten rechts).



**Bild 5.5-32:** Herstellung des Demonstrators

Bei der Ermittlung der Druckfestigkeiten zeigt sich deutlich die Auswirkung der Verdichtungsart. Die Proben wurden in der Prüfmaschine so angeordnet, dass sie senkrecht zur Einfüllrichtung auf Druck beansprucht wurden. Durch den Einsatz dynamischer Verdichtungsenergie im Vergleich zu einer rein statischen Verdichtung stieg die Druckfestigkeit um mehr als das Doppelte an (Bild 5.5-33).



**Bild 5.5-33:** 28-Tages-Druckfestigkeiten der Betone V3/3 und V3/4 in Abhängigkeit der Verdichtungsart (Demonstrator)

In Anbetracht der angestrebten langen Liegezeit eines solchen Oberbetons ist eine dyn. Verdichtung zu präferieren. Auch die Ergebnisse der Haftzugfestigkeiten mit einer Verdopplung der gemessenen Festigkeit bei dynamischer Verdichtung bestätigen dies. Eine Zusammenstellung der ermittelten Festigkeiten ist im Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV, Tabelle 23 aufgezeigt. Nachfolgende Tabelle zeigt eine qualitative Gegenüberstellung der Festigkeiten der Betone V3/3 und V3/4.

Mischung	V3/3	V3/4
Würfel-Druckfestigkeit am BK	++	+
Zylinder-Druckfestigkeit am BK	++	+
Oberflächenhaftzugfestigkeit	+	0/-

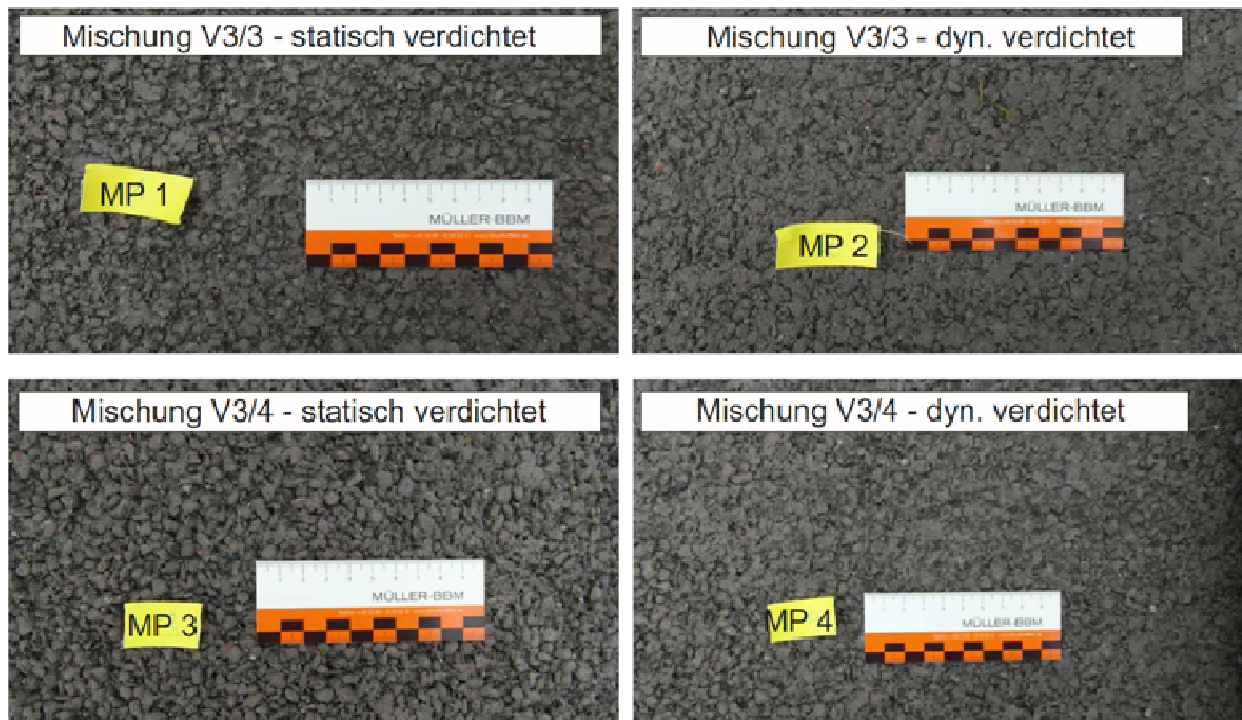
**Tab. 5.5-5:** Qualitative Beurteilung der Festigkeiten der Betone V3/3 und V3/4 (++: geeignet; + ausreichend geeignet; 0: bedingt geeignet; -: nicht geeignet)

Aus bautechnischer Sicht wurde bezüglich der zu erwartenden Dauerhaftigkeit der Versuchsmischung V 3/3 ein größeres Potential eingeräumt.

### 5.5.4.2 Akustische Untersuchungen

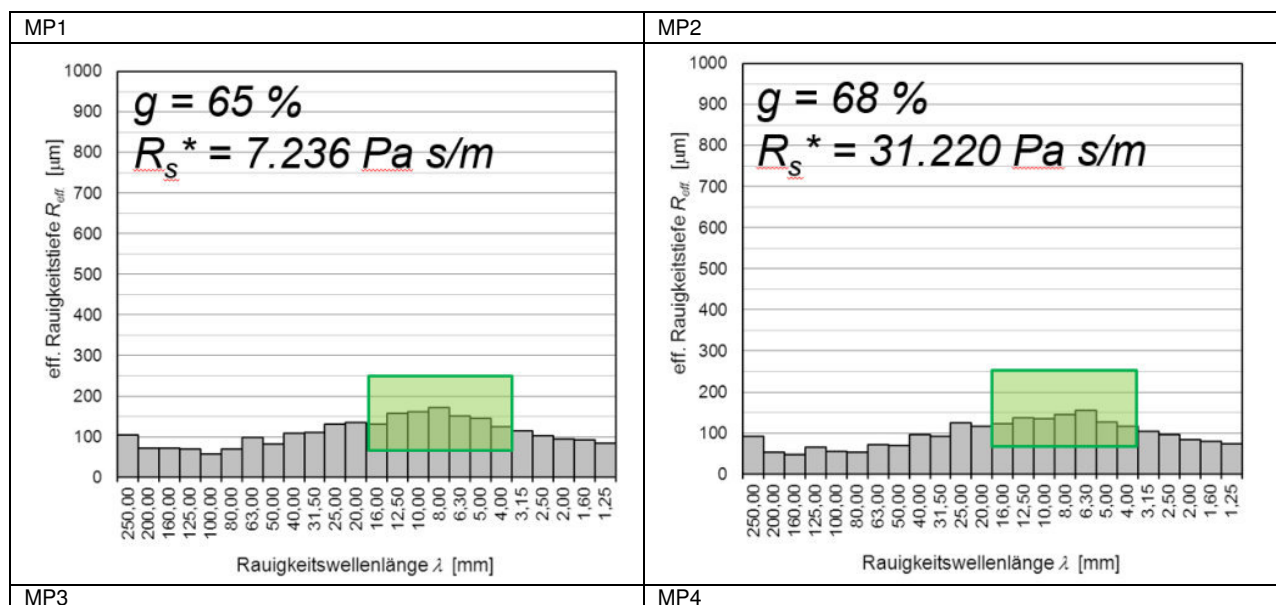
Neben den betontechnischen Untersuchungen wurde der Demonstrator gemäß der Aufteilung in Bild 5.5-34 akustisch vermessen. Folgende akustischen Parameter wurden ermittelt:

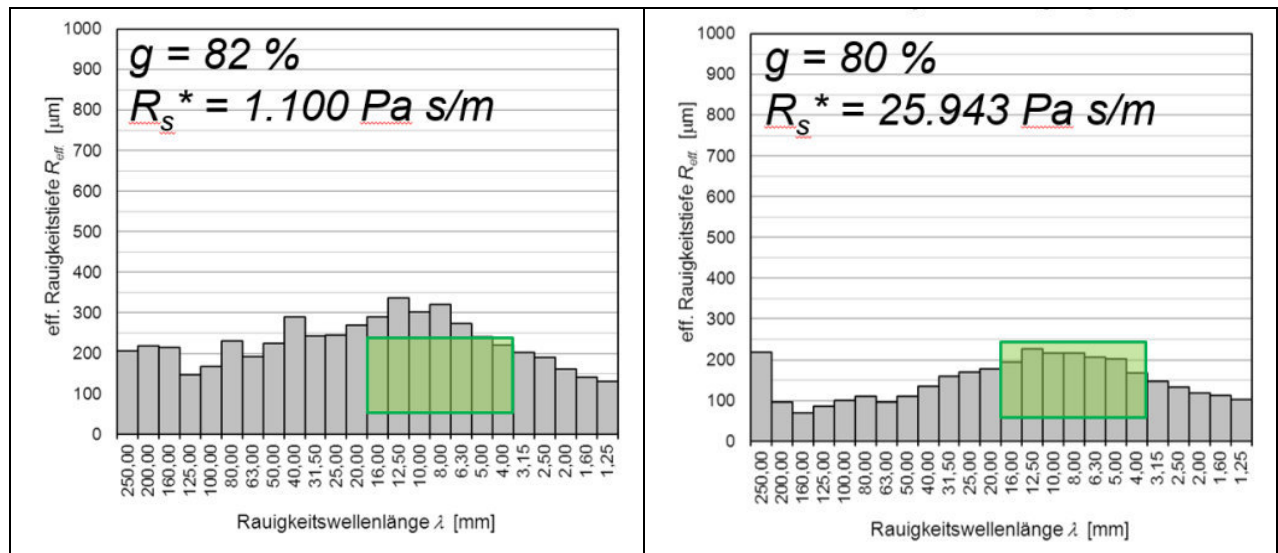
- Oberflächentextur
  - Aufnahme von 6 parallelen Texturprofilen pro Testfeld mit einer Länge von jeweils 2 m
- Texturinduzierter Strömungswiderstand
- Schallabsorptionsgrad
  - Messung mit Bestimmung der akustischen Impedanz der Oberflächen mit Hilfe einer pu-Sonde.



**Bild 5.5-34:** Aufteilung des Demonstrators in die Versuchsflächen MP1-MP4

Die Texturmessergebnisse der in Bild 5.5-34 dargestellten Messfelder des Demonstrators sind in Form von Texturspektren im Wellenlängenbereich zwischen 1,25 und 250 mm in Bild 5.5-35 dargestellt. Dabei markiert das grün eingefärbte Rechteck den Wertebereich optimaler Texturparameter. Weiter sind in untenstehender Abbildung die Ergebnisse des Strömungswiderstandes  $R_s^*$  angegeben.





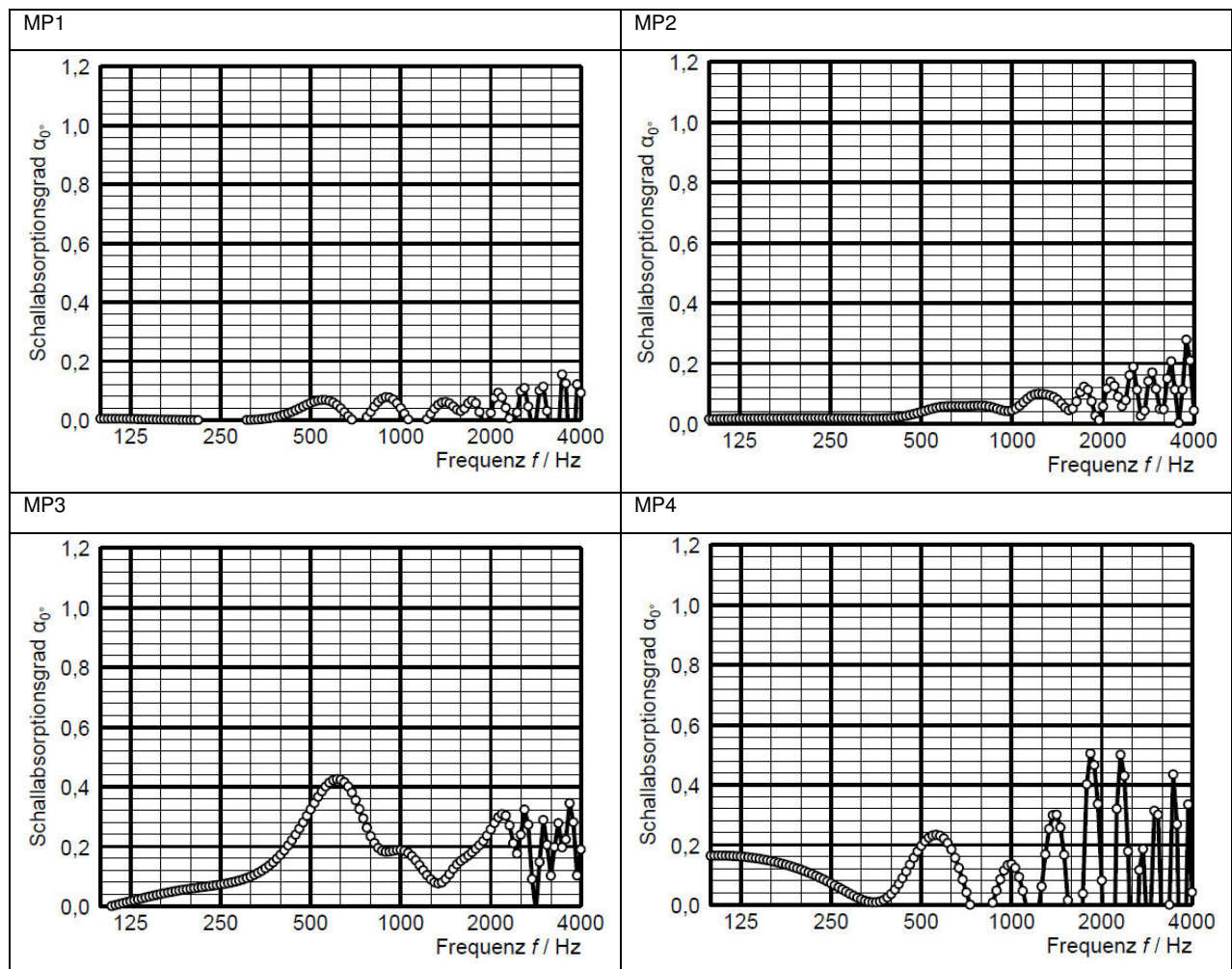
**Bild 5.5-35:** Texturkennwerte der Felder MP1, MP2, MP3 und MP4 des Demonstrators.

Wie Bild 5.5-35 entnommen werden kann, bestehen deutliche Unterschiede im Strömungswiderstand  $R_s^*$  der vier Testfelder. Während der offenzelligere Beton V3/4 bei statischer Verdichtung einen wesentlich geringeren Strömungswiderstand als der dichtere Beton V3/3 hervorruft, verringert sich das Verhältnis der Strömungswiderstände bei dynamischer Verdichtung deutlich. Die intensivere Verdichtungsarbeit bei dyn. Verdichtung führt also zu einer Verschiebung des Strömungswiderstandes gegenüber der statischen Verdichtung um mehr als Faktor 4 bei Beton V3/3 (MP1 im Vergleich zu MP2) und mehr als Faktor 20 bei Mischgut V3/4 (MP3 im Vergleich zu MP4).

Die Texturmessergebnisse zeigen bei Beton V3/3, dass dessen spektrales Maximum sowohl bei stat. als auch dyn. Verdichtung im günstigen Bereich (grünes Rechteck) liegt (Bild 5.5-35). Mit Werten von 60 - 65 % liegen die Gestaltfaktoren ebenfalls gerade noch im günstigen Bereich über 60 %, in dem Texturen mit für die Rollgeräuschminderung günstiger konkaver Gestalt angesiedelt sind. Damit sind die Texturen dieses Betons - unabhängig der eingesetzten Verdichtungsart - mit Texturen anderer geräuschmindernder dichter Bauweisen wie lärmarmen Gussasphalt (MA LA) vergleichbar.

Beton V3/4 führt hinsichtlich der Textur mit Werten von 82 bis 85 % zu noch besseren Gestaltfaktoren, jedoch zu ungünstigeren Wertepaaren für die Rauigkeitstiefe und die Rauigkeitwellenlänge. Demzufolge fällt auch der Strömungswiderstand geringer aus. Die durch „Plateaus“ und „Schluchten“ gekennzeichnete und für die Rollgeräuschminderung günstige Gestalt ist noch ausgeprägter als bei dem Beton V3/3. Der geringe Sandanteil führt jedoch offenbar zu einer offeneren Textur mit größeren Vertiefungen und damit auch zu einer größeren Rauigkeitstiefe, die im Fall von stat. Verdichtung im spektralen Maximum nahezu doppelt so hoch ausfällt wie bei dem dichteren Beton V3/3 (Vergleich MP3 mit MP1). Dadurch fällt auch der Strömungswiderstand bei diesem Testfeld am niedrigsten aus. Dieses Ergebnis kann mit dem hohlraumreichen Deckschichttyp SMA LA verglichen werden. Die tendenziell ungünstigere Textur dieser COPS-Schicht wird durch das mit dem erhöhten Hohlraumgehalt einhergehende Schallabsorptionsvermögen akustisch mehr als kompensiert. Bei dynamischer Verdichtung des Betons V3/4 findet eine stärkere Einebnung der Textur statt, was zu einer geringeren Rauigkeitstiefe führt.

Die Frequenzgänge des Schallabsorptionsgrades zeigen, dass der Beton V3/4 nicht nur zu geringeren Strömungswiderständen, sondern auch ein nennenswertes zugängliches Hohlraumsystem besitzt. Bei statischer Verdichtung beträgt der Absorptionsgrad im spektralen Maximum 42 % (MP3), wogegen der Beton V3/3 hier zu vernachlässigbar geringeren Schallabsorptionsgraden geführt hat (MP1). Bei dynamischer Verdichtung reduziert sich der Schallabsorptionsgrad um etwa die Hälfte, was auf einen geringeren Hohlraumgehalt zurückzuführen ist.



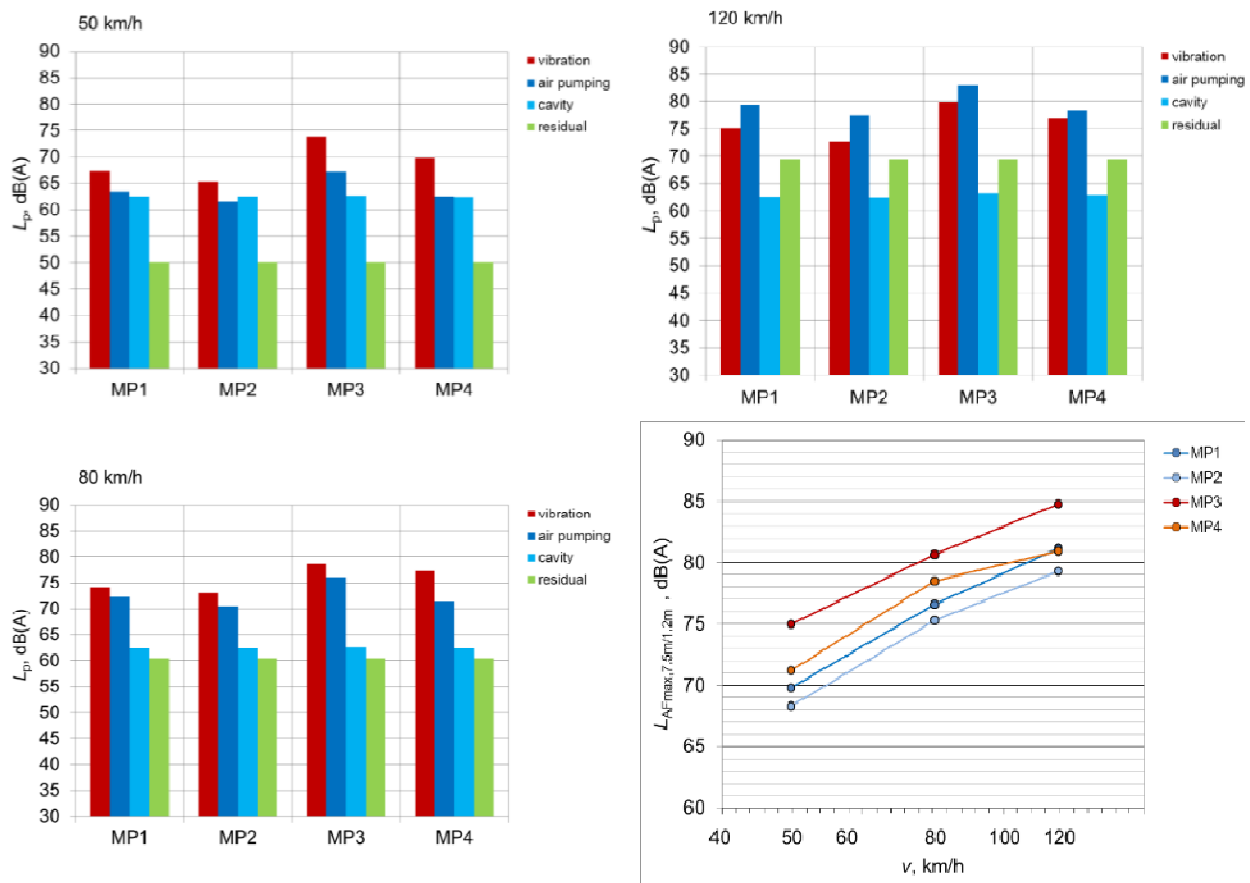
**Bild 5.5-36:** Schallabsorptionsgrade der Testfelder MP1 bis MP4

Aufgrund der vollständigen Erhebung der akustisch relevanten Oberflächeneigenschaften war es möglich, Vorhersagen der zu erwartenden Vorbeifahrtpegel der COPS-Schichten, deren Eigenschaften denen der Testfelder entsprechen, vorzunehmen. Hierzu wurde das SPERoN-Modell, Version S3 herangezogen. Den Berechnungen liegen die gemessenen Texturen und Strömungswiderstände an den Messpunkten MP1 bis MP4 zugrunde. Nicht berücksichtigt wurde der frequenzabhängige Schallabsorptionsgrad, weshalb die berechneten Vorbeifahrtpegel insbesondere für MP3 und MP4, an welchen ausgeprägte Schallabsorptionsgrade gemessen wurden, etwas zu hoch ausfallen.

Die Berechnungen wurden mit dem in der SPERoN-Datenbank vorhandenen Profil und den vibroakustischen Eigenschaften eines Reifens des Typs Michelin Energy mit den Dimensionen 195/65R15 durchgeführt. Dieser Reifen stellt einen repräsentativen Pkw-Reifen dar, der hinsichtlich des Pegels der durch diesen Reifen hervorgerufenen Reifen-Fahrbahn-Geräusche im Mittelfeld vieler Pkw-Reifen liegt.

Bild 5.5-37 zeigt die Ergebnisse der Modellberechnung für alle vier Testfelder unterschieden in die Geschwindigkeiten 50 km/h, 80 km/h und 120 km/h in Form von Terzspektren im Mittelfrequenzbereich von 315 Hz bis 2 kHz. Die Spektren zeigen alle vier Geräuschkomponenten, die zum Vorbeifahrtpegel (Vorbeifahrt bei ausgeschaltetem Motor) beitragen. Dies sind:

- Mechanische Geräuschkomponente, hervorgerufen durch die mechanisch angeregten Schwingungen des Reifens,
- Aerodynamische Geräuschkomponente, hervorgerufen durch Strömungsvorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt, insbesondere dem Air-Pumping-Effekt,
- Geräusche im Reifeninnenraum, hervorgerufen durch die Interaktion des Reifenprofils mit der rauen Fahrbahnoberfläche, die über Seitenwand und Lauffläche des Reifens nach außen abgestrahlt werden,
- Strömungsgeräusche, hervorgerufen durch die Luftströmung entlang der Fahrzeugaußenhülle.



**Bild 5.5-37:** Geräuschanteile bei einer Geschwindigkeit von 50, 80 und 120 km/h und Gesamtpegel aus den vier Geräuschanteilen (unten rechts) (SPERoN Berechnung)

Die hohlraumreichen COPS-Schichten auf den Testfeldern 3 und 4 (Beton V3/4) rufen etwa 2 bis 4 dB(A) höhere Vorbeirollpegel hervor als die dichteren COPS-Schichten auf den Testfeldern 1 und 2 (Beton V3/3). Dies hängt mit der deutlichen Erhöhung der mechanischen Geräuschregung insbesondere auf Testfeld 3 (MP3) zusammen. Das Feld MP3 besitzt die größte eff. Rauigkeitstiefe. Dieser Unterschied führt zu einer Erhöhung des Pegels der mechanischen Geräuschkomponente um rund 5 dB(A), unabhängig von der Geschwindigkeit. Der sehr niedrige Strömungswiderstand trägt außerdem zu einer Erhöhung des Pegels der aerodynamischen Geräuschkomponente bei.

Hierbei ist jedoch der geräuschmindernde Effekt der Schallabsorption, der speziell bei den Feldern MP3 und MP4 zum Tragen kommt, nicht berücksichtigt. Entgegen den Ergebnissen aus den Texturmessungen zeigen die Felder MP1 und MP2 mit dem Beton V3/3 konstant geringere Lärmpegel als die Felder MP3 und MP4 (Beton V3/4). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass bei der Berechnung der Geräuschpegel die ermittelten Schallabsorptionsgrade, welche bei Beton V3/4 wesentlich stärker ausgeprägt sind nicht angerechnet wurden, kann angenommen werden, dass der Gesamtpegel des Betons V3/4, sowohl mit statischer als auch dynamischer Verdichtung etwas zu hoch ausfällt. Es gilt festzuhalten, dass der Einsatz von dyn. Verdichtung zu einer akustischen Verbesserung gegenüber der statischen Verdichtung von rd. 2 dB(A) bei Beton V3/3 und rd. 4 dB(A) bei Beton V3/4 führt.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine dynamische Verdichtung zu einer akustisch wirksameren Oberflächen-gestalt führt. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass der Beton V3/4 auf Basis der Kenngröße des Gestalt-faktors (rd. 80 %) gegenüber dem Beton V3/3 günstigere Textureigenschaften zeigt, dieser jedoch die ungünstigeren Werte für die Rauigkeitstiefe und Rauigkeitswellenlänge aufweist. Grundsätzlich gilt festzuhalten, dass der Einsatz von dyn. Verdichtung eine stärkere Einebnung der obersten Kornreihe zur Folge hat. Tabelle 5.5-6 zeigt eine qualitative Einordnung der akustischen Eigenschaften der eingebauten Betone V3/3 und V3/4.

Mischung		V3/3	V3/4
Akustik	Strömungswiderstand	+	+
	Schallabsorptionsgrad	0/-	0/-
	Textur	++	0

**Tab. 5.5-6:** Akustische Eigenschaften der Betone V3/3 und V3/4 (++: geeignet; + ausreichend geeignet; 0: bedingt geeignet; -: nicht geeignet)

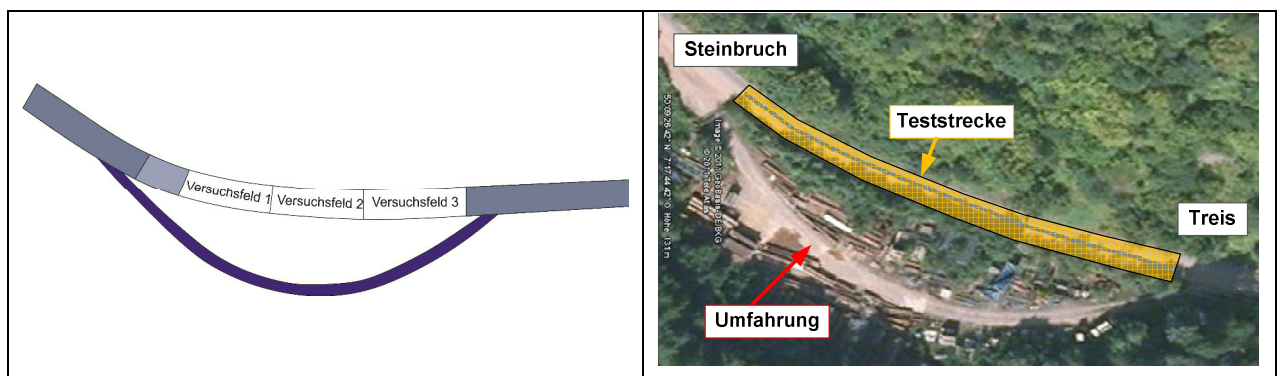
Abschließend kann festgehalten werden, dass COPS-Schichten ein hohes Potential für die Herstellung gräusmindernder Fahrbahnen aufweisen. Die zuvor aufgezeigten Ergebnisse entsprechen denen eines hohlraumreichen (MP3 und MP4) und eines dichten (MP1 und MP2) Betons. Unter Berücksichtigung des Aufgabenbereiches des COPS und der angestrebten langen Liegezeit dieser Schichten ist die Konzeptionierung hinsichtlich der Geräuschkürzung infolge Schallabsorption (hohlraumreiche Variante) und der ausreichenden Widerstandsfähigkeit gegenüber Verkehrsbelastungen (dichte Variante) als eine Optimierungsaufgabe zu verstehen. Hohlraumreiche Varianten führten im Rahmen der zuvor aufgezeigten Untersuchungen zu einer rauerer Oberflächentextur, welche sich deutlich schlechter akustisch bemerkbar machen, gleichzeitig kann durch die Schallabsorption eine Überkompensierung stattfinden, welche wiederum zu einer deutlichen Geräuschkürzung führt. Weiter gilt bei hohlraumreichen Fahrbahndecken die Gefahr der Verschmutzung und den geringeren mechanischen Widerstand gegenüber Scherkräften zu berücksichtigen. Dichtere Varianten können im Vergleich zu hohlraumreichen Varianten als standfester und mechanisch widerstandsfähiger deklariert werden. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen beträgt der Gewinn aufgrund der günstigeren Oberflächentextur der dichten Variante gegenüber der hohlraumreichen Variante rd. 2 bis 4 dB(A) und liegt damit durchaus in der Größenordnung der zusätzlichen Pegelminderung aufgrund von Schallabsorption bei der hohlraumreichen Variante. Demzufolge wurde im Rahmen weiterer Untersuchungen der dichteren Variante größeres Potential eingeräumt.

#### 5.5.4.3 Bau einer Versuchsstrecke

Für die Auswahl einer geeigneten Versuchsfläche waren folgende Kriterien maßgebend:

- Vorerst nicht im öffentlichen Verkehrsraum
- Verkehrsumlegung sollte problemlos möglich sein
- Wahl der Fahrbahnbreite zur Vermeidung von Kanalisation
- Die Verkehrsbelastung (Frequenz, Achslasten) sollte über den Nutzungszeitraum bekannt sein
- Möglichst geradlinige Linienführung
- Möglichst geringe Längs- und Querneigung
- Keine Einmündungsbereiche
- In der Nähe zum Firmenstandort, um Transportkosten etc. möglichst gering zu halten

Diese Kriterien wurden von einem Teilstück innerhalb der Zufahrt zum Steinbruch Treis erfüllt, so dass dort drei unterschiedliche Versuchsfelder à 25 m samt erforderlicher Anrampungs- und Aufstellflächen in 2012 hergestellt werden konnten.



**Bild 5.5-38:** Versuchsstrecke mit Umfahrung innerhalb der Zufahrt zum Steinbruch Treis



Im Rahmen der ersten großtechnischen Herstellung einer Versuchsstrecke wurde der Beton V3/8 im Zufahrtbereich zum Steinbruch Treis eingebaut. Dieser Beton liegt bzgl. dessen Zusammensetzungen in etwa im Mittel der Betone V3/3 und V3/4 (Tabelle 5.5-7). Somit sollte ein Kompromiss aus ausreichender Festigkeit (Beton V3/3) und guter akustischer Wirksamkeit (Beton V 3/4) erreicht werden.

	Einheit		Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Einwaage [kg/m <sup>3</sup> ]
Zement CEM I 42,5 R	kg/m <sup>3</sup>		3,1	350
Wasser	kg/m <sup>3</sup>		1	150
w/z-Wert	[-]	0,43		
Natursand 0/2 mm	kg/m <sup>3</sup>		2,63	351 (345)
Basalt 2/5 mm	kg/m <sup>3</sup>		2,9	1548
PP - Fasern	Vol.-%	0,22 %	0,91	(2)
Sika FM 31	M.-% v.Z.	0,6 %	1,05	2,1
Sika LPS A 94	M.-% v.Z.	0,36 %	1	1,26

Tab. 5.5-7: Betonzusammensetzung - Beton V3/8

Im Zuge der Herstellung dieses Versuchsfeldes sollte die Umsetzbarkeit mit der eingesetzten Maschinenteknik überprüft und Erfahrungen zur Optimierung des Bauablaufs gewonnen werden. Als Einbauart wurde die Variante „Frisch in Frisch“ gewählt. Vor Herstellung der Teststrecke wurden an dem oben aufgezeigten Beton die wesentlichen Festigkeiten (Tabelle 5.5-8) bestimmt.

Beton	V3/8		Probekörper- Geometrie	Regelwerk
	7	28		
Prüfalter [d]				
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	27,1	35,8	Würfel (150 mm )	DIN EN 12390-1 [N 12]; DIN EN 12390-2 [N 13].
Spaltzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	2,92	-	Zylinder (150/300 mm)	DIN EN 12390-2 [N 13]; 12390-6 [N 14].

Tab. 5.5-8: Beton V3/8 – Druckfestigkeiten (7d/28d) und Spaltzugfestigkeit (28d)

Die Verdichtung des Betons erfolgte bei der Herstellung der Probekörper für die Festigkeitsuntersuchungen lediglich per Hand, indem die Mischung mit einer Kelle heruntergedrückt wurde. Dies sollte eine ähnliche Verdichtung wie beim Gleitschalungsfertiger simulieren, mit der Einschränkung, dass die maschinelle Auflast größer ist, als die durch den Laboranten aufgebrachte Last. Dies dürfte auch maßgebliche Ursache dafür sein, dass an diesen Proben nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von im Mittel nur 35,8 N/mm<sup>2</sup> festgestellt wurde. Für den Einbau selbst wurde davon ausgegangen, dass der Beton durch die maschinelle Auflast stärker verdichtet wird und somit höhere Festigkeiten erzielt werden.

Neben den einschlägigen Festigkeitsuntersuchungen wurde an dem Beton V3/8 ebenfalls der Frost-Tausalz-Widerstand mit Hilfe des CDF-Tests gemäß DIN CEN/TS 12390-9 untersucht. Die Abwitterungsmenge als arithmetisches Mittel der Probenserie liegt mit 700 g/m<sup>2</sup> deutlich unter dem Grenzwert von 1500 g/m<sup>2</sup> für tefloneschaltete Flächen (Bild 5.5-39). Resultierend aus diesen Ergebnissen wurde der Beton V3/8 auch hinsichtlich seines Frost-Taumittel-Widerstands als für die Teststrecke geeignet angesehen.

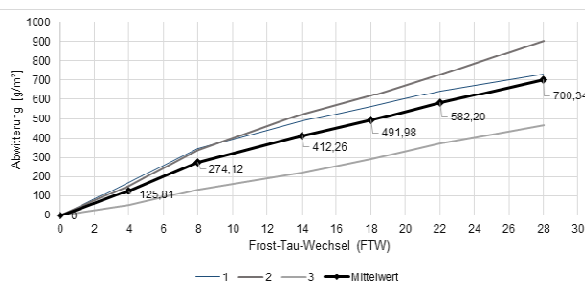
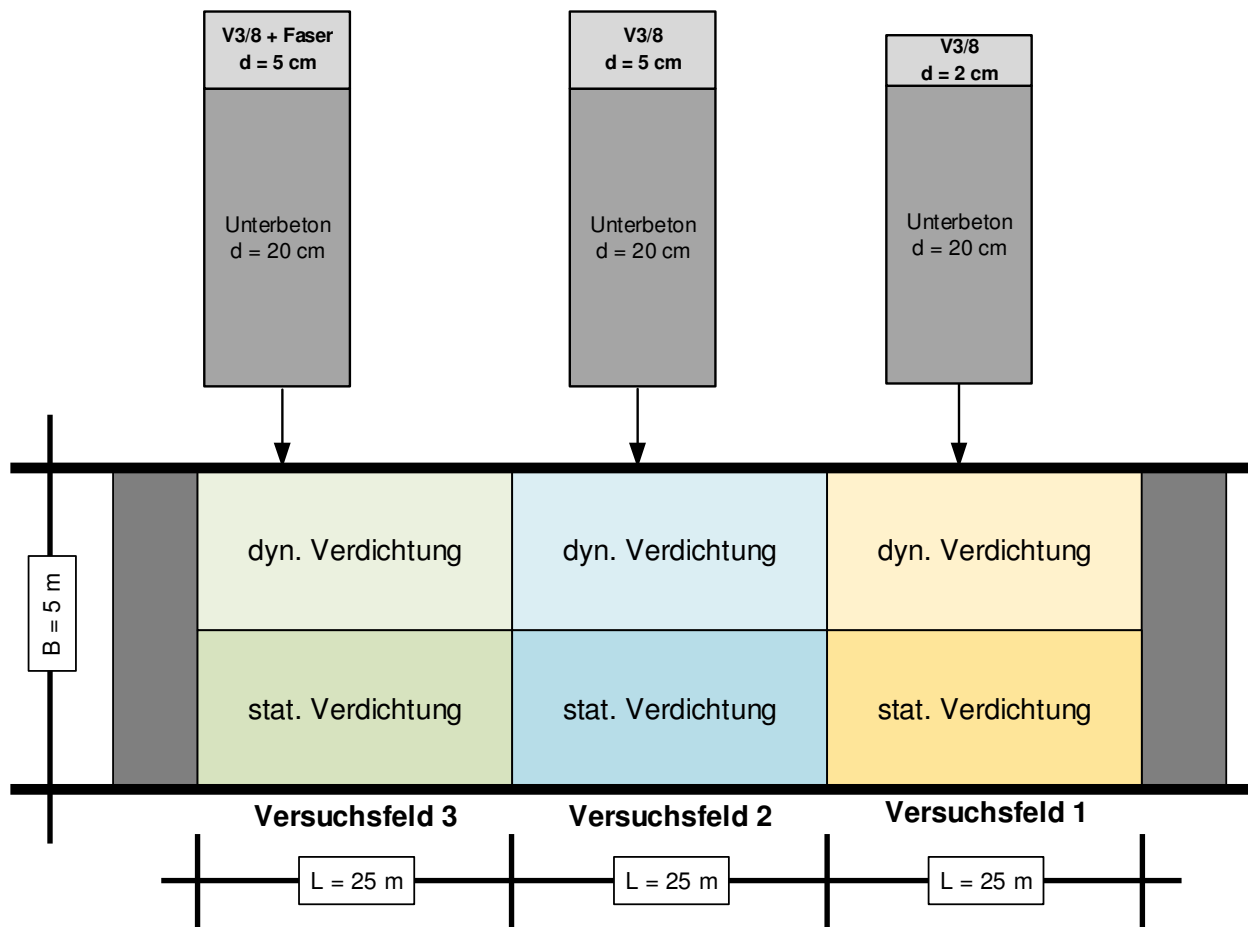


Bild 5.5-39: Beton V3/8 - Abwitterungsmengen im CDF-Versuch

Der Einbau des herkömmlichen Unterbetons erfolgte mittels Walzenfertiger und seitlicher Schalung in einer Stärke von ca. 20 cm. Die Zusammensetzung des Unterbetons ist im Anhang, Tabelle A 22 des Schlussbe-

richtes zum Teilvorhaben VI-IV dokumentiert. Der Oberbeton wurde mit einem Gleitschalungsfertiger in einer Einbaustärke von 2 und 5 cm „frisch in frisch“ eingebaut.



**Bild 5.5-40:** Aufteilung der Felder der Teststrecke 2012

Hinsichtlich der verwendeten Mischungsrezepturen des Oberbetons wurde beim letzten Einbaufeld (Feld 3) variiert, indem in Abstimmung auf das eingesetzte Größtkorn von nur 5 mm, kurze Polypropylen-Spleissfasern mit  $2,0\text{ kg/m}^3$  zur Verbesserung der Grünstandfestigkeit hinzugefügt wurden. In Querrichtung wurde die Fläche hinsichtlich der eingesetzten Verdichtungstechnik getrennt, indem auf einer Seite lediglich statisch und auf der anderen Seite mit dyn. Verdichtung durch T-Rüttler und anschließender statischer Auflast verdichtet wurde. Die Anlieferung des Fahrbahnbetons erfolgte mittels Trommelmischer aus dem Werk Völkneroth (Sternanlage) der Kann Beton GmbH & Co. KG. Kurz vor dem Einbau des Unterbetons wurde die Unterlage vorgeässt, um einen nachteiligen Wasserentzug hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung zu verhindern. Aufgrund der asphaltischen Unterlage konnte auf die Verwendung einer Zwischenschicht aus Vliesstoffen verzichtet werden. Um eine gleichmäßige Rissbildung zu erreichen, wurden im Abstand von 5 m Querscheinfugen angeordnet. Entsprechend den ZTV Beton-StB 07 wurden hier zur Lastübertragung, wie beim Bau von herkömmlichem Fahrbahnbeton, Dübel vorgesehen.

Die Verdichtung des Unterbetons wurde zusätzlich durch Flaschenrüttler, welche am Baggerlöffel befestigt waren, bewerkstelligt (Bild 5.5-41, links). Direkt im Anschluss wurde der Oberbeton eingebaut. Dieser wurde mittels Baggerschaufel auf den verdichteten Unterbeton aufgelegt und dann mit dem Schwert vom Gleitschalungsfertiger verteilt (Bild 5.5-41, rechts). Das Versuchsfeld 1, mit einer Einbaustärke des Deckenoberbetons von 1 cm, ließ sich in dieser Konstellation des Fahrbahnaufbaus mit der Konsistenz des Betons und der eingesetzten Maschinenteknik, nicht erfolgreich umsetzen.



**Bild 5.5-41:** Einbau von Unterbeton (links) und Oberbeton (rechts)

Während des Einbaus der COPS-Schicht (Bild 5.5-42, links) stellte sich vor dem Querglätter keine „Mörtelwalze“ für den Oberflächenschluss, wie es bei einem Waschbeton vorzufinden ist, (Bild 5.5-42, rechts) ein.



**Bild 5.5-42:** COPS vor dem Querglätter (links), Herstellung eines Waschbetons (rechts); Einbaurichtung nach links

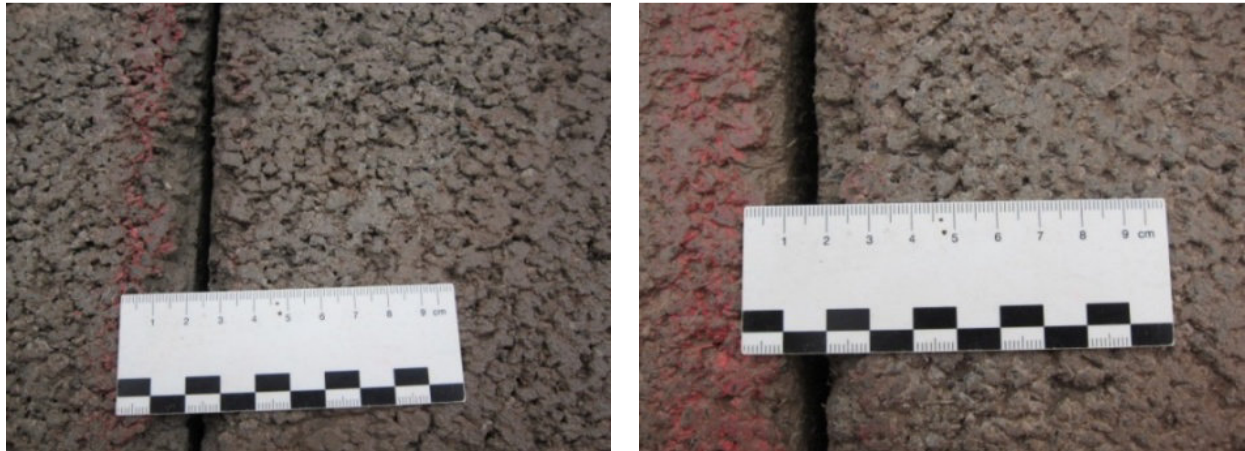
Bedingt durch die eingesetzte Maschinenteknik ergaben sich augenscheinlich aufgeraute Bereiche, welche nicht während des Einbauprozesses abgestellt werden konnten. Die Fahrbahnränder waren direkt hinter dem Gleitschalungsfertiger senkrecht, bröckelten dann jedoch nachfolgend etwas ab (Bild 5.5-43).



**Bild 5.5-43:** Oberfläche nach dem Einbau (links), Randausbildung (rechts)

Um die Wasserabgabe des jungen Betons an der Oberfläche zu vermindern wurde ein Nachbehandlungsmittel gemäß TL NBM-StB 09 eingesetzt.

Hinsichtlich einer exakten Fugenausbildung erwies sich die Versuchsmischung V 3/8 unter Hinzugabe von Faserstoffen aufgrund der geringeren Anzahl an Kornausbrüchen als vorteilhaft (Bild 5.5-14).

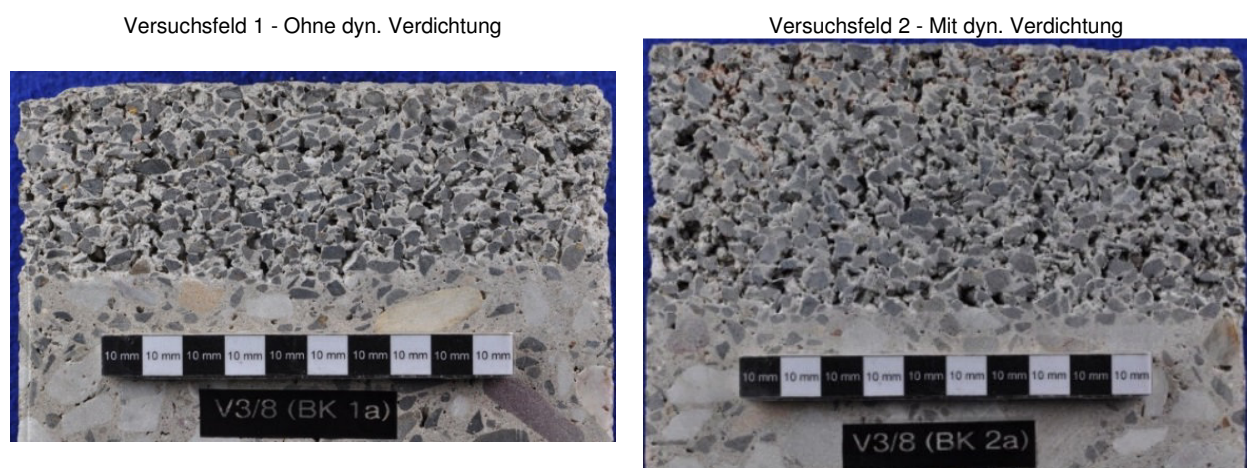


**Bild 5.5-44:** Fugenschnitt V3/8 ohne Fasern (links), Fugenschnitt V3/8 mit Fasern (rechts)

Die Prüfung der 28-Tage-Druckfestigkeiten der baubegleitend hergestellten Würfel zeigte, dass im Gegensatz zu den im Labor hergestellten Prüfkörpern die geforderte Druckfestigkeit bei dem Beton V3/8 mit im Mittel rd. 50,5 N/mm<sup>2</sup> sicher erreicht wurde. Ferner zeigte sich, dass die Zugabe von kurzen Polypropylen-Spleissfasern mit einer Menge von 2,0 kg/m<sup>3</sup> zu einer Abnahme der Druckfestigkeit auf rd. 40 N/mm<sup>2</sup> führt.

#### 5.5.4.4 Struktureller Aufbau der Oberbetonschicht „COPS“

Zur Beurteilung der akustischen Eigenschaften und demzufolge insbesondere des strukturellen Aufbaus der Schicht wurden Bohrkernentnommen, an welchen die Hohlraumgehalte bestimmt wurden. Beispielfhaft sind in Bild 5.5-45 die Schnittflächen zweier Bohrkernentnommen der Fahrbahn mit dem Beton V3/8 mit unterschiedlichen Verdichtungsarten - ohne/mit dyn. Verdichtung - dargestellt.

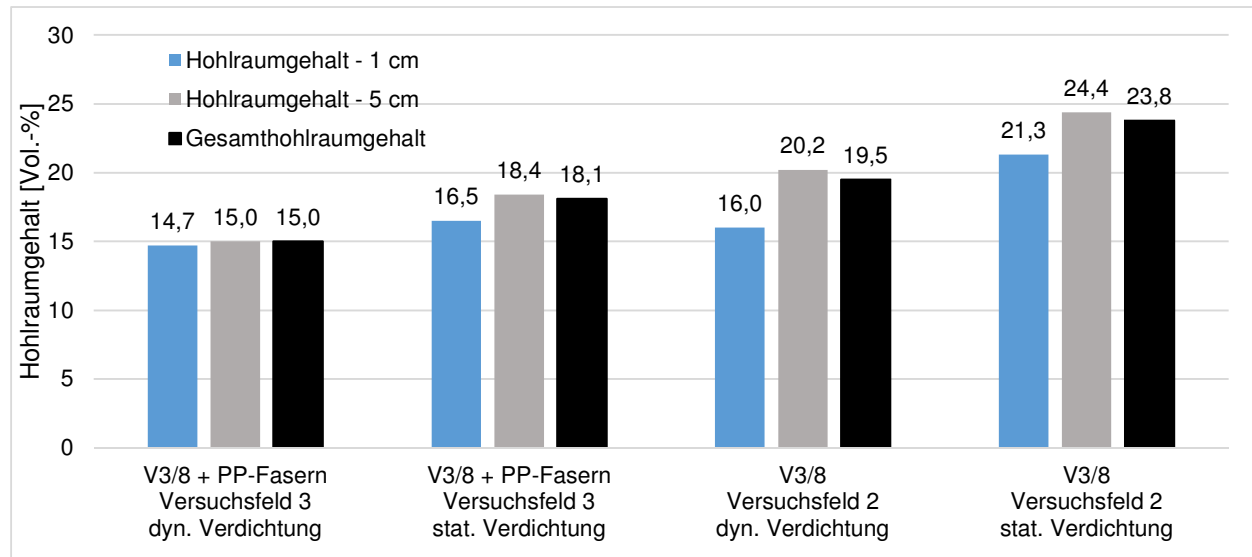


**Bild 5.5-45:** Beton V3/8 - Schichtdicke 5 cm –ohne (links)/ mit (rechts) dyn. Verdichtung

Weitere Fotoaufnahmen der entnommenen Bohrkernentnommen sind im Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV in Tabelle A 25 und Tabelle A 26 des Schlussberichtes zum Teilverbund VI-IV hinterlegt. Bereits anhand der in Bild 5.5-45 gezeigten Schnittflächen wird makroskopisch ersichtlich, dass die

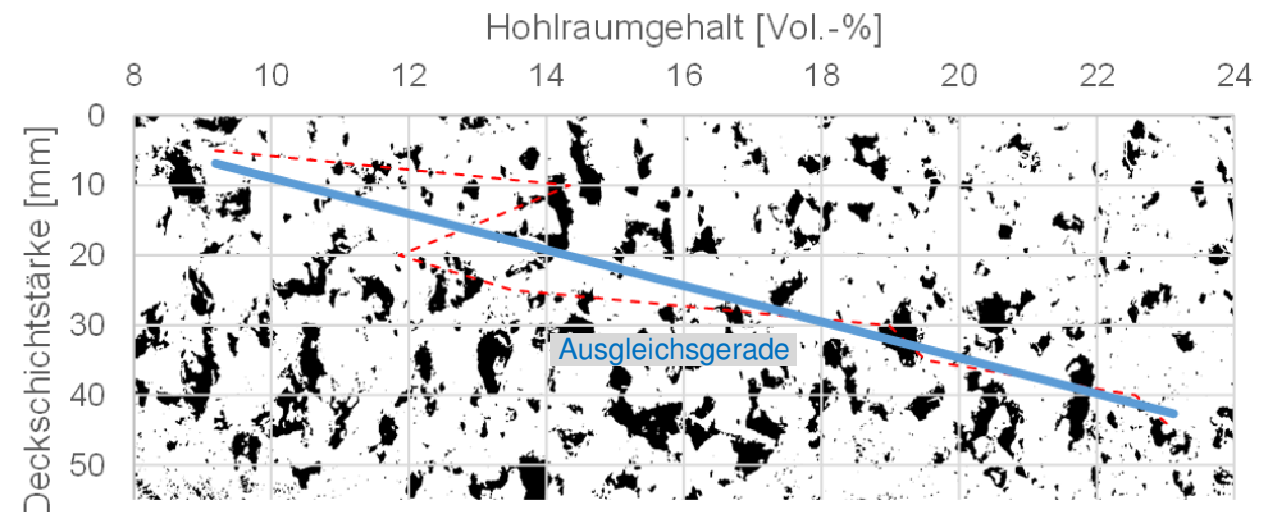
Struktur über die gesamte Schichthöhe mit Makroporen durchsetzt ist. Es ist augenscheinlich keine Differenzierung zwischen oberem (1 cm) und unterem Bereich zu erkennen.

Im Rahmen der Hohlraumauswertung (Bild 5.5-46) wird erkennbar, dass der Hohlraumgehalt im unteren Bereich gegenüber dem Hohlraumgehalt im oberflächennahen Bereich sogar geringfügig erhöht ist.



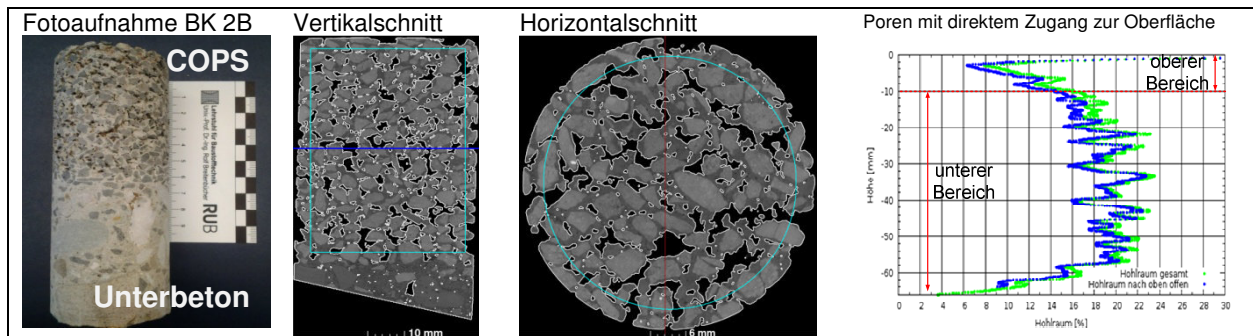
**Bild 5.5-46:** Hohlraumgehalte des Betons V3/8 (Einzelwerte im Anhang des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV, Tab. A 24)

Es zeigt sich, analog zum Demonstrator, dass mit dyn. Verdichtung der Hohlraumgehalt im Vergleich zur stat. Verdichtung deutlich geringer ausfällt. Die ermittelte Verteilung der Hohlräume ist auf das fehlende Widerlager aufgrund des noch frischen Unterbetons während der Verdichtung zurückzuführen. Die Verdichtungsenergie wird nur lokal in den oberen Bereich des COPS eingebracht, was eine nur unzureichende Verdichtung des Betons im unteren Bereich bedingt. Bild 5.5-47 zeigt ergänzend die digital bearbeitete Schnittfläche des Bohrkerns 3c. Die rote Linie entspricht dem in Abständen von 10 mm gemessenen Hohlraumgehalt. Die blaue Linie ist die dazugehörige Ausgleichsgerade.



**Bild 5.5-47:** Verteilung der Hohlraumgehalte über die Querschnittshöhe am Beispiel des Bohrkerns 3c

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Hohlraumgehalt mit zunehmender Tiefe steigt. Am Beispiel des Bohrkerns BK 2B (ohne dyn. Verdichtung) wurde exemplarisch die Ermittlung des Hohlraumgehaltes und der Hohlraumverteilung mit Hilfe eines CT-Scans bei der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Bild 5.5-48 dargestellt.



**Bild 5.5-48:** CT-Scan des Bohrkerns 2B und Darstellung des Anteils der nach oben geöffneten Poren

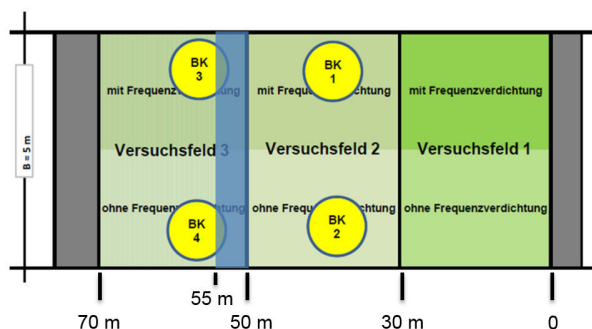
Dabei wurde ein Gesamthohlraumgehalt von 19,7 % ermittelt. Bei der Ermittlung des Anteils der Makroporen, welche direkt oder indirekt einen Zugang zur Oberfläche haben, wurde ersichtlich, dass nahezu alle Poren über die gesamte Schichthöhe Zugang zur Oberfläche besitzen, was die augenscheinliche Beurteilung des Porensystems bestätigt. In Bild 5.5-48 (rechts) sind die Kurven des Gesamthohlraumgehaltes (grün) und der nach oben offenen Hohlräume (blau) dargestellt. Der Anteil der nach oben geöffneten Poren folgt der Kurve des Gesamthohlraumgehaltes mit geringer Differenz. Auch bestätigt sich hier, dass der obere 1 cm des COPS einen deutlich geringeren Hohlraumgehalt aufweist als der untere Bereich.

Hinsichtlich einer Wasserableitungsfunktion wirkt sich die hohe Anzahl an nach oben offenen und miteinander kommunizierenden Poren positiv aus. Auch die Akustik bzw. die Schallabsorption wird dadurch begünstigt. In Anbetracht des Aufgabenbereiches des COPS als vielbefahrene und dauerhafte Fahrbahndecke wirkt sich die große Anzahl der Hohlräume, insbesondere im unteren Bereich negativ aus. Es lässt sich insgesamt ableiten, dass die verwendete Betonrezeptur V 3/8 in Verbindung mit der angewandten Einbauart „Frisch in Frisch“ die strukturellen Anforderungen an eine klare Trennung zwischen hohlraumreichem, oberem und dichtem, unterem Bereich in der Schicht nicht ausreichend erfüllt.

#### 5.5.4.5 Akustische Untersuchungen

Im Rahmen der Akustikmessungen der Teststrecke 2012 wurden die Felder 2 und 3 untersucht. Das ebenfalls in COPS-Bauweise vorgesehene Versuchsfeld 1 wurde aufgrund bautechnischer Probleme durch ein PMA-Testfeld ersetzt, weshalb schließlich nur zwei COPS-Versuchsfelder zur Verfügung standen. Die Versuchsfelder wurden jeweils über die volle Fahrbahnbreite von 5 m eingebaut. Während des Einbaus mit einem Gleitschalungsfertiger waren die Rüttelflaschen in der linken Hälfte vom Fahrbahnrand bis zur Mitte der Versuchsfelder ausgeschaltet, in der rechten Hälfte dagegen eingeschaltet. Das bedeutet, dass die beiden Fahrbahnhälften unterschiedlich verdichtet wurden. Die Art der Verdichtung ist jedoch nicht zu vergleichen mit der Verdichtung der Probefelder des Demonstrators. Die Verdichtung bei der Herstellung der Probefelder des Demonstrators fand statisch und vibrierend mit entsprechenden Walzen statt.

Zu bemerken ist noch, dass die Unterbetonschicht vor Aufbringen des Oberbetons frisch eingebaut worden war. Der Einbau des Oberbetons erfolgte dann „frisch in frisch“. Der Unterbeton war also noch entsprechend weich. Bild 5.5-49 zeigt die Anordnung, die Unterteilung und die Abmessungen der Versuchsfelder.



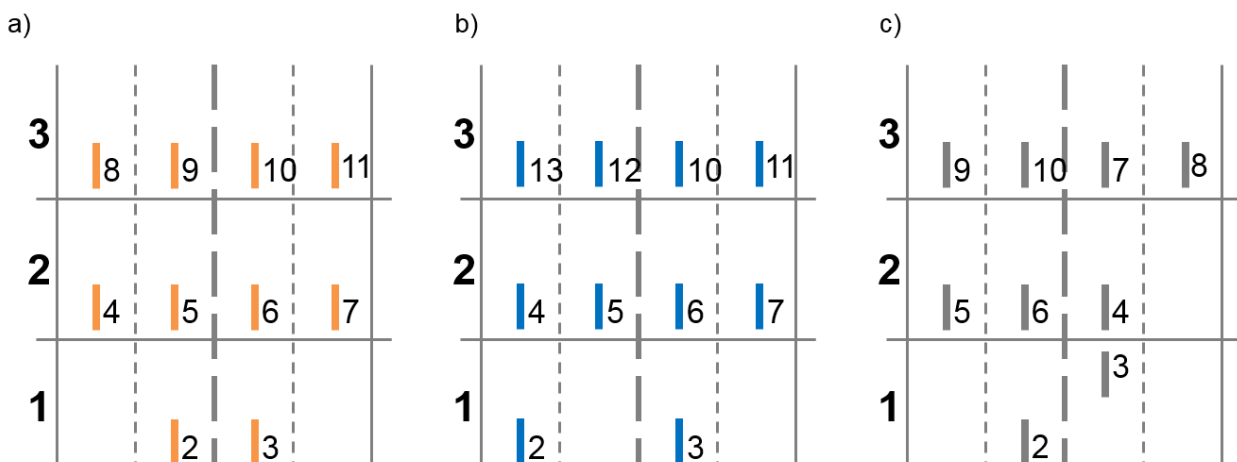
**Bild 5.5-49:** Anordnung und Abmessung der Versuchsfelder der Teststrecke 2013

In Bild 5.5.-50 sind Fotos der Oberflächen der Versuchsfelder dargestellt. Am rechten unteren Bildrand des Bildes 5.5-50, Teil b ist die Entnahmestelle BK 1 der Bohrkern in Versuchsfeld 2 zu erkennen. In Versuchsfeld 3 (Bild 5.5-50, Teil c) ist eine Reparaturstelle am Übergang zwischen Versuchsfeld 2 und 3 bei m 50 dargestellt und am rechten oberen Bildrand ist die Entnahmestelle BK 3 und in der Mitte des oberen Bildrandes die Entnahmestelle BK 4 der Bohrkern in Versuchsfeld 3 zu erkennen.



**Bild 5.5-50:** Fotos der Oberflächen der Versuchsfelder. a) Versuchsfeld 1 (Bauweise PMA), b) Versuchsfeld 2 (Bauweise COPS), c) Versuchsfeld 3 (Bauweise COPS)

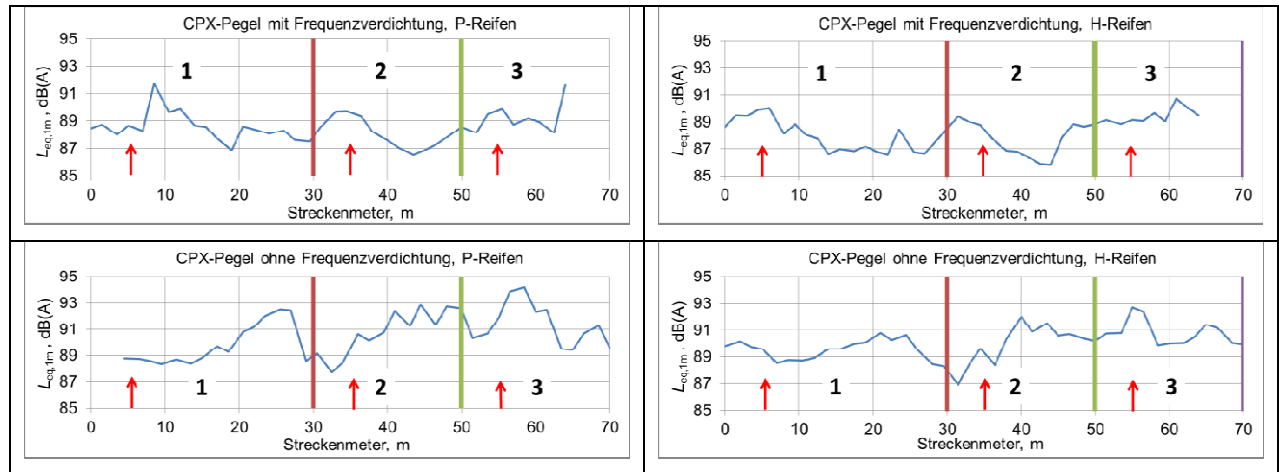
In Bild 5.5-51 ist die Anordnung und Lage der in situ Messstellen für die Textur-, die Strömungswiderstands- und Schallabsorptionsgradmessungen schematisch dargestellt. Pro Fahrbahnhälfte wurde auf den Versuchsfeldern 2 und 3 je eine Messstelle in der linken und rechten Radrollspur eingerichtet.



**Bild 5.5-51:** Anordnung der in situ Messstellen für die a) Textur-, b) Strömungswiderstands- und c) Schallabsorptionsgradmessungen

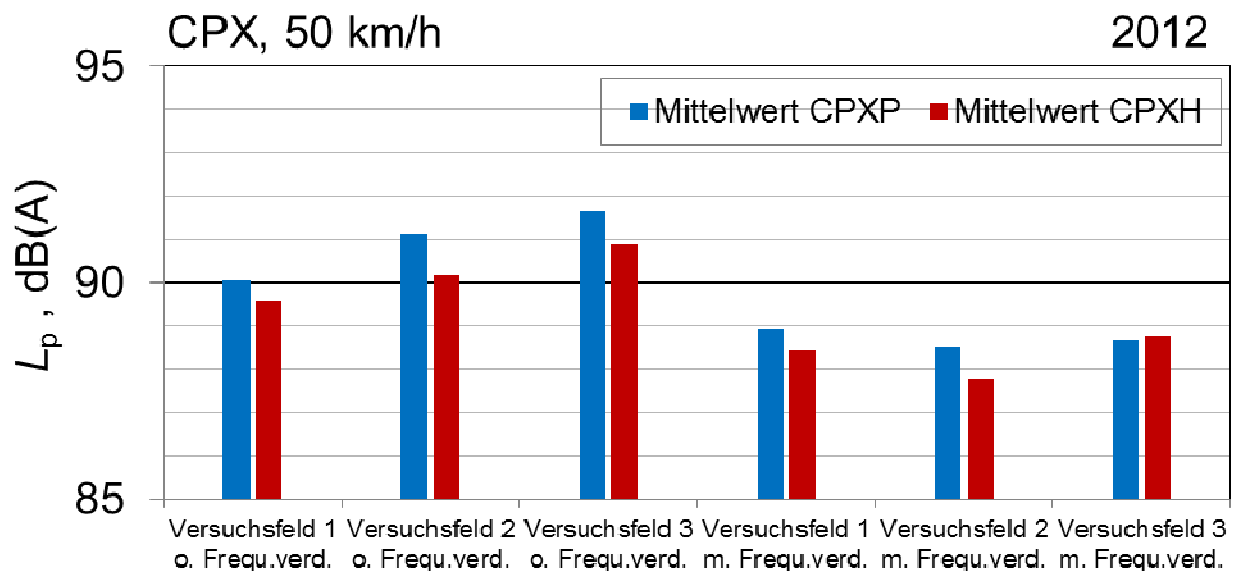
### Durchführung und Ergebnisse der CPX-Messungen

Mit Hilfe der Nahfeldmessmethode (CPX-Messungen) wurden die Versuchsfelder auf beiden Fahrbahnhälften mit 50 km/h befahren. Für die Messungen wurde der geschlossene Müller-BBM/M+P CPX-Messanhänger eingesetzt. Die Messungen wurden sowohl mit Reifen P als auch Reifen H durchgeführt. Ausgewertet wurden die Mikrofonsignale an den Normpositionen nach ISO 11819-2 im rechten Radhaus. Bild 5.5-52 zeigt den Streckenverlauf der CPX-Pegel für den Reifen P (links) und den Reifen H (rechts).



**Bild 5.5-52:** Streckenverlauf der CPX-Pegel für den Reifen P und den Reifen H, rechtes Radhaus,  $v = 50$  km/h. Die roten Pfeile kennzeichnen die in situ Messstellen

In Bild 5.5-53 sind die die mittleren Schalldruckpegel der CPX-Messungen bei 50 km/h mit den Reifen P und H über den einzelnen Versuchsfeldern aufgetragen. Für den Reifen P ergeben sich für die Versuchsfelder ohne dyn. Verdichtung Werte zwischen 90 und 92 dB(A), wogegen die Pegel auf den Versuchsfeldern mit dyn. Verdichtung bei etwa 88,5 dB(A) liegen. Durch die dyn. Verdichtung ergeben sich also deutlich günstigere CPX-Werte, die aufgrund der niedrigeren Werte insbesondere für den Reifen P auf schalltechnisch wesentlich bessere Oberflächentexturen hinweisen.



**Bild 5.5-53:** Mittlere Schalldruckpegel  $L_p$  der CPX-Pegel für Reifen P und Reifen H und alle sechs Versuchsfelder,  $v = 50$  km/h.

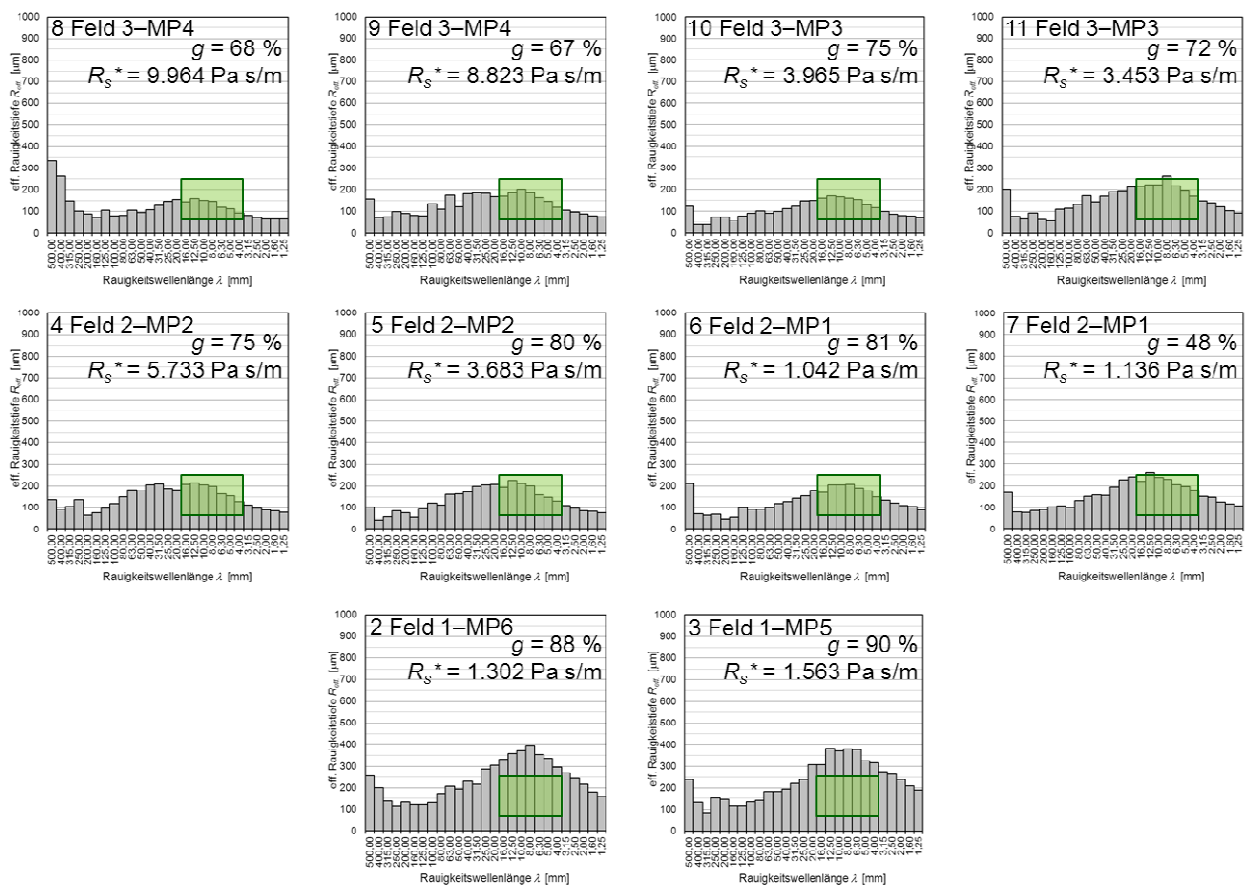


## Durchführung und Ergebnisse der in situ-Messungen

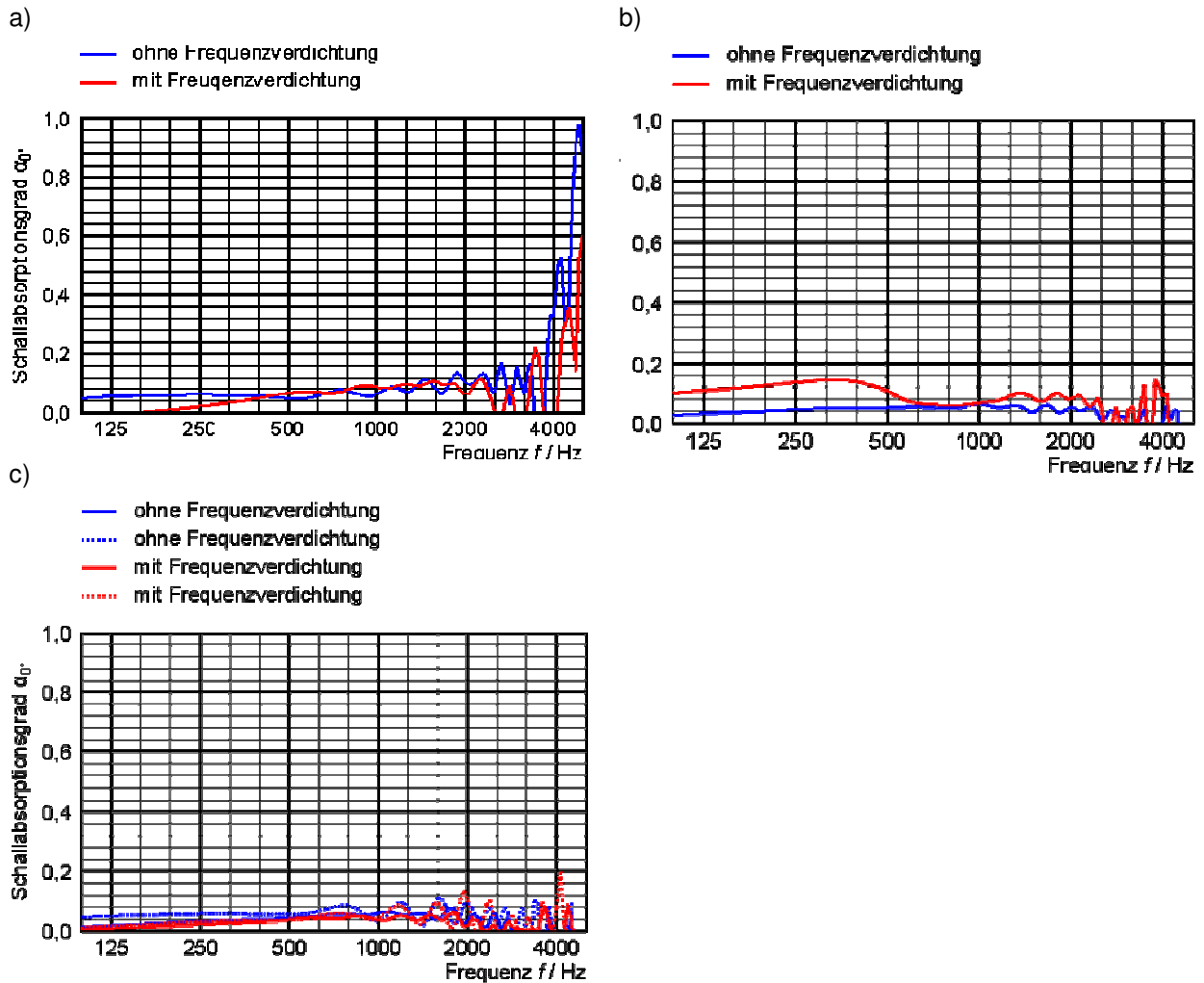
Folgende akustischen Parameter wurden gemessen:

- Oberflächentextur  
Aufnahme von 6 parallelen Texturprofilen pro Testfeld mit einer Länge von jeweils 2 m.
- Texturinduzierter Strömungswiderstand
- Schallabsorptionsgrad  
Messungen mit Bestimmung der akustischen Impedanz der Oberflächen mit Hilfe einer pu-Sonde.

Das Bild 5.5-54 zeigt die Ergebnisse der Texturmessungen in Form von Texturspektren im Wellenlängenbereich zwischen 1,25 mm und 250 mm. Zusätzlich sind die Werte für den Gestaltfaktor  $g$  und den texturinduzierten Strömungswiderstand  $R_s^*$  in die Diagramme eingetragen. In Bild 5.5-55 sind die Ergebnisse der Schallabsorptionsgradmessungen dargestellt.



**Bild 5.5-54:** Texturspektren an den in situ Messpositionen gemäß Bild 5.5-3a auf den vier Versuchsabschnitten. Die grün eingefärbten Flächen geben den Parameterraum optimaler Wellenlängen und Rauigkeitstiefen wieder. Die Diagramme enthalten auch die Ergebnisse für den texturinduzierten Strömungswiderstand  $R_s^*$  und den Gestaltfaktor  $g$



**Bild 5.5-55:** Frequenzgang des Schallabsorptionsgrads. a) in situ Messstelle Versuchsfeld 1 (PMA), b) in situ Messstelle Versuchsfeld 2 (COPS ohne Fasern), c) in situ Messstelle Versuchsfeld 3 (COPS mit Fasern)

### Bewertung der Messergebnisse

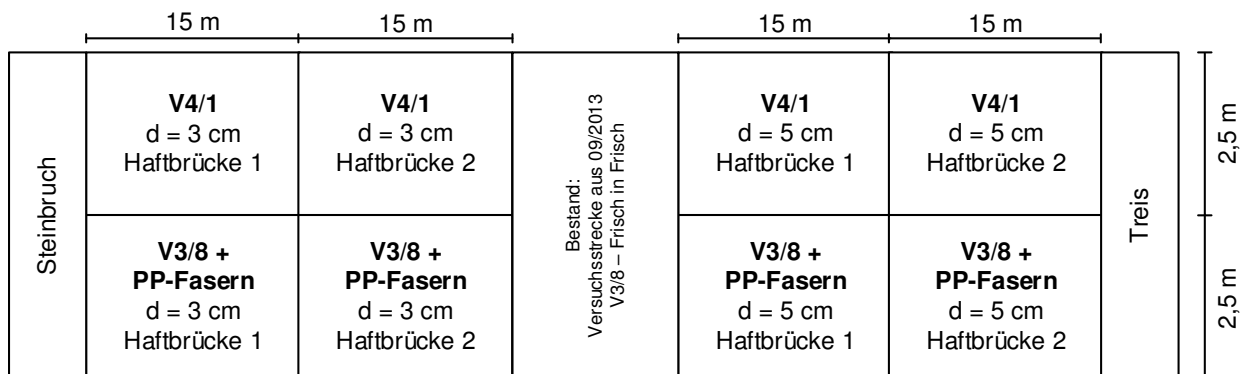
Anhand der Messergebnisse für die zwei COPS-Versuchsfelder 2 und 3 ist als wichtigste Erkenntnis festzuhalten, dass die dyn. Verdichtung des Betons mit Hilfe der Rüttelflaschen (Fahrbahnhälfte „mit dyn. Verdichtung“) zu einer deutlich besseren Homogenität der akustischen Oberflächeneigenschaften führt und zu insgesamt um etwa 2 dB(A) niedrigeren Rollgeräuschpegeln gegenüber dem Fall „ohne dyn. Verdichtung“. Wie bei der Asphaltbauweise PMA ist auch die daran angelehnte Bauweise COPS keine Bauweise, die in dem für die Reifen-Fahrbahn-Geräusche wichtigen Frequenzbereich von 300 Hz bis 3.000 Hz zu einer nennenswerten Schallabsorption der Schicht führt. Die Geräuschminderung kommt also ausschließlich durch Textureffekte zustande. Allerdings weisen die COPS-Oberflächen neben dem texturinduzierten Strömungswiderstand offenbar auch einen nicht zu vernachlässigenden Anteil hohlrauminduzierten Strömungswiderstands auf. Dies ist zum einen an den verhältnismäßig niedrigen Strömungswiderstandswerten abzulesen, zum anderen aber an der Tatsache, dass die gegenüber der Fahrbahnhälfte „ohne dyn. Verdichtung“ systematisch niedrigeren Strömungswiderstände auf der Fahrbahnhälfte „mit dyn. Verdichtung“ zu tendenziell niedrigeren CPX-Pegeln führen.

### 5.5.5 Bau einer zweiten Versuchsstrecke

Aufbauend auf den Erfahrungen aus der ersten Fahrbahndeckenherstellung in Treis-Karden erfolgte im November 2013 eine erneute Herstellung der Schicht auf ausgewählten Versuchsfeldern der bestehenden Teststrecke. Entgegen der ersten Herstellung auf genannter Teststrecke wurde hier die Einbauvariante „Frisch auf Fest“ durchgeführt, um ein ausreichendes Widerlager in Form des erhärteten Unterbetons für die Verdichtung des COPS sicherzustellen. Im Rahmen der Herstellung der neuen Teststrecke sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Einbau des Betons „frisch auf fest“  
→ Verdichtung aufgrund der starren Unterlage besser regelbar
- Verwendung von zwei unterschiedlichen Mischungsvarianten  
→ direkter Vergleich möglich
- Unterschiedliche Soll-Einbaustärken (3 cm und 6 cm)  
→ Prüfung der Hohlraumverteilung im Querschnitt
- Verwendung von zwei verschiedenen Haftbrücken  
→ Zementschlämme / Polymerdispersion
- Einbau erfolgt im Zuge der Zufahrt zum Steinbruch Treis  
→ Umfahrmöglichkeit gegeben, Unterbeton aus erster Versuchsfläche vorhanden
- Herstellen des Oberbetons vor Ort mittels mobiler, kleiner Betonmischanlage  
→ kurzfristiger Eingriff auf die Rezeptur möglich, so gut wie keine Transportzeiten, Unabhängig von Transportbetonwerken (Blockierung des Tagesgeschäfts)
- Einbau nach Möglichkeit ohne Walzverdichtung
- Keine Fugenausbildung im Oberbeton, wilde Risse werden toleriert

Nachfolgende Abbildung zeigt die Einteilung der Teststrecke 2013. Es wurden zwei Schichtenstärken von 3 cm und 6 cm erprobt. Zur Verbesserung des Verbundes zwischen Unterbeton und frischer COPS-Schicht kamen zwei Haftbrücken (Haftbrücke 1: Kunststoffdispersion; Haftbrücke 2: Zement-Füller-Suspension) zum Einsatz.



**Bild 5.5-56:** Einteilung der Teststrecke 2013

Bei der Herstellung kam eine Modifikation des Betons V3/8 (Teststrecke 2012), im Folgenden als mod. V3/8 bezeichnet sowie dessen Weiterentwicklung, Beton V4/1 zum Einsatz. Die Zusammensetzung beider Betone ist in den nachfolgend aufgeführten Tabellen aufgezeigt.

Material	Menge [kg]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Zement CEM I 42,5 R	350	3100
Wasser (w/z-Wert: 0,40)	140	1000
Polypropylenfasern	2	910
Natursand 0/2 mm	352	2630
Basalt 2/5 mm	1614	2900
Sika LPS A 94 [M.-%/Z]	0,20	1050
Powerflow 1637 (FM2) [M.-%/Z]	0,7	1000
angesetzter Luftgehalt [m <sup>3</sup> ]		0,07

**Tab. 5.5-9:** Betonzusammensetzung - Beton mod. V3/8

Material	Menge [kg]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
Zement CEM I 42,5 R	350	3100
Wasser (w/z-Wert: 0,40)	140	1000
Basalt-Füller	80	2850
Natursand 0/2 mm	200	2630
Basalt 2/5 mm	1475	2900
Sika LPS A 94 [M.-%/Z]	0,20	1050
Powerflow 1637 (FM2) [M.-%/Z]	0,7	1000
rechn. Hohlraumgehalt [m <sup>3</sup> ]		0,057
Verdichtungsstellen [m <sup>3</sup> ]		0,020
Angestrebte Luftporen (infolge Luftporenbildner) [m <sup>3</sup> ]		0,055

**Tab. 5.5-10:** Betonzusammensetzung - Beton V4/1

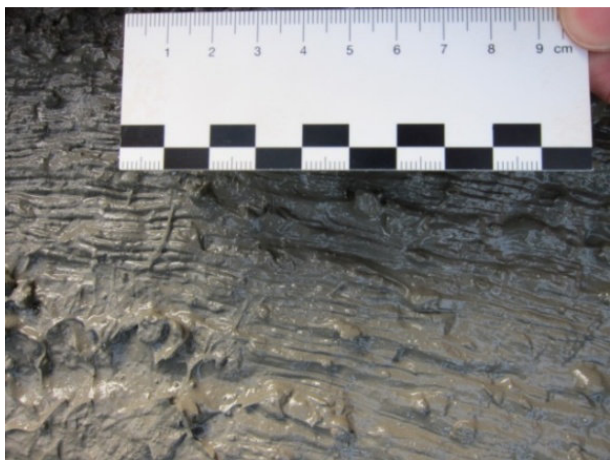
Bild 5.5-57 und Bild 5.5-58 zeigen die Vorbereitung des Untergrundes sowie die Einrichtung der Baustelle. In Bild 5.5-59 sind die genannten Haftbrücken unmittelbar nach Aufbringen auf den vorbereiteten Altbeton gezeigt.



**Bild 5.5-57:** Vorbereiten der Einbaufäche (links), gefräster Unterbeton (rechts)



**Bild 5.5-58:** Aufbau der mobilen Mischanlage (links) und Einrichtung des Baustellenlabors (rechts)



**Bild 5.5-59:** Zement-Haftbrücke (links), Polymerdispersionshaftbrücke (rechts)

Nachfolgend sind in Tabelle 5.5-11 die Ergebnisse der einbaubegleitenden Prüfung der Frischbetonkennwerte der beiden Betone aufgeführt. Die dazugehörigen Einzelwerte sind im Anhang, Tabelle A 27 im Schlussbericht zum Teilvorhaben VI-IV dokumentiert.

Parameter		mod. V3/8	V4/1	Regelwerk
Dichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	2,33	2,43	DIN EN 12350-6 [N 20]
Verdichtungsmaß	[-]	1,25 (C2)	1,29 (C1)	DIN EN 12350-4 [N 21]
Luftporengehalt	[Vol.-%]	5,4	4,7	DIN EN 12350-7 [N 21]

**Tab. 5.5-11:** Frischbetonkennwerte der Betone mod. V3/8 und V4/1

Analog zu der Herstellung der Teststrecke 2012 zeigten beide in 2013 eingebauten Betone eine ausreichende Grünstandfestigkeit (Bild 5.5-60, links). Auch die Oberfläche des frisch eingebauten Betons zeigte eine hohe Ebenheit. Es waren makroskopisch keine Unebenheiten in Form emporstehender Gesteinskörner zu erkennen (Bild 5.5-60, rechts).



Beton mod. V3/8



Beton V4/1



**Bild 5.5-60:** Nahtflanke des COPS mit Fasern (oben links), Detailaufnahme einer frischen COPS-Oberfläche (oben rechts). Unten: Hergestellte COPS-Schichten

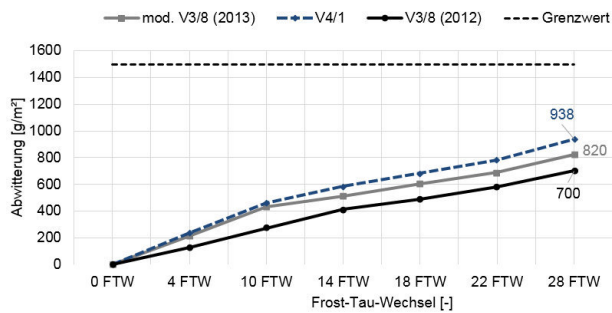
Nachfolgende Tabelle zeigt die im Rahmen der Festigkeitsuntersuchungen ermittelten Werte der Betone mod. V3/8 und V4/1.

Beton		mod. V3/8 (2013)			V4/1 (2013)			Regelwerk	
Prüfalter	[d]	2	7	28	2	7	28		
Druckfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	26,5	38	48,2	25,5	42,5	58,5	DIN EN 12390-2	[N 13]
Spaltzugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	-	2,7	3,2	-	2,7	2,9	DIN 12390-6	[N 14]
Biegezugfestigkeit	[N/mm <sup>2</sup> ]	4,6	6,6	6,8	5,3	6,5	6,7	DIN EN 196-1	[N 15]

**Tab. 5.5-12:** Festigkeiten: mod. V3/8 (2013) und V4/1

Die ermittelten Druckfestigkeiten bestätigen, dass mit den eingesetzten Betonen mod. V3/8 und V4/1 bei der Teststrecke 2013 die geforderte Festigkeitsklasse C30/37 erreicht werden konnte. Zur Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes wurden die in 2013 eingebauten Betone mod. V3/8 und V4/1 dem CDF-Test unterzogen.

Aus den untersuchten Betonzusammensetzungen wurden drei Probekörper in Anlehnung an DIN EN 12390-1 hergestellt. Der Beton mod. V3/8 wies eine Abwitterungsmenge von 820 g/m<sup>2</sup> und der Beton V4/1 von 982 g/m<sup>2</sup> auf (Bild 5.5-61). Die fotografische Dokumentation ist im Anhang in Tabelle A 28 im Schlussbericht zum Teilvorhaben VI-IV aufgezeigt.



**Bild 5.5-61:** Ergebnisse des CDF-Tests der Betone mod. V3/8 und V4/1: Abwitterungen

Die ermittelten Abwitterungsmengen liegen deutlich unter dem normativ geforderten Grenzwert von 1500 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln. Die Luftporenkennwerte im Festbeton gemäß DIN EN 480-11 sind im Anhang Tabelle A 29 des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV aufgeführt. Weiterhin wurde an der Testfläche die Verbundfestigkeit in Anlehnung an die ZTV-ING ermittelt (Bild 5.5-62). Es wurden jeweils für beide Betone die Haftzugprüfung in den Feldern der Versuchsstrecke mit der Haftbrücke auf Basis einer Kunststoffdispersion als auch mit einer Zement-Füller-Haftbrücke durchgeführt.

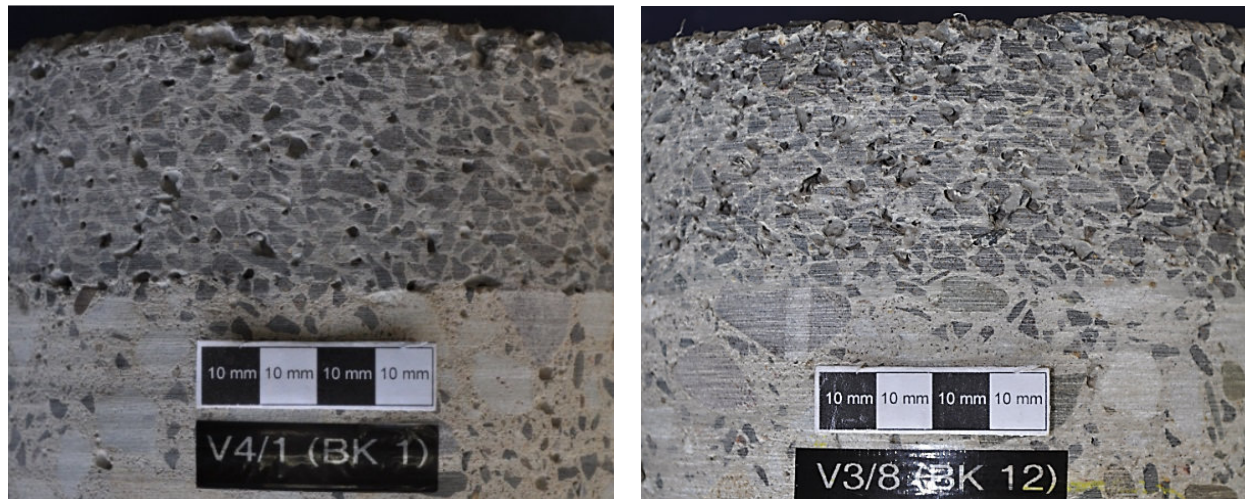


**Bild 5.5-62:** Ermittlung der Haftzugfestigkeit an der Teststrecke

Der Bruch erfolgte bei allen Messstellen im Bereich der Verbundzone oder im Unterbeton. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Haftbrücke auf Basis der Kunststoffdispersion mit im Mittel rd. 0,9 N/mm<sup>2</sup> deutlich geringere Werte als die Zement-Füller-Haftbrücke mit rd. 1,5 N/mm<sup>2</sup> aufweist. Daraus lässt sich ableiten, dass bei einem Einbau einer offenporigen Schicht zur Sicherstellung eines ausreichenden Verbundes bei der Einbauart „Frisch auf Fest“ die Verwendung einer festigkeitsbildenden Haftbrücke vorteilhaft ist.

### 5.5.5.1 Struktureller Aufbau der Oberbetonschicht „COPS“

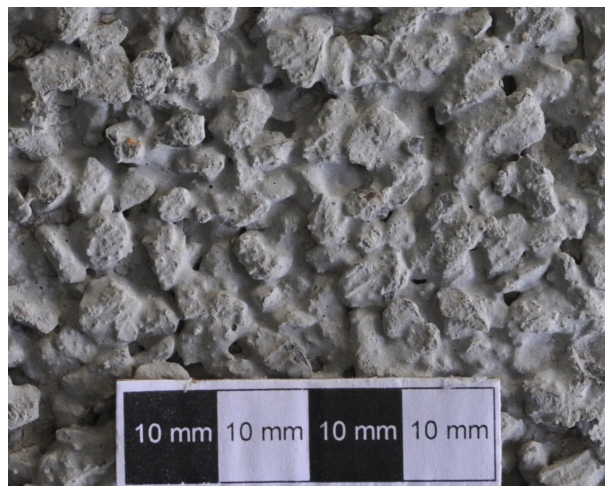
Zur Ermittlung des Hohlraumgehaltes wurden aus der Teststrecke Bohrkern, gemäß dem im Anhang in Abbildung A 1 des Schlussberichtes zum Teilvorhaben VI-IV gezeigten Plan entnommen. Dabei zeigte sich anhand der Mantelflächen der Bohrkern augenscheinlich eine unterschiedliche Porenstruktur der Betone (Bild 5.5-63). Beton mod. V3/8 (Bild 5.5-63, rechts) weist einen ausgeprägteren Hohlraumanteil über die gesamte Schichthöhe auf als der Beton V4/1.



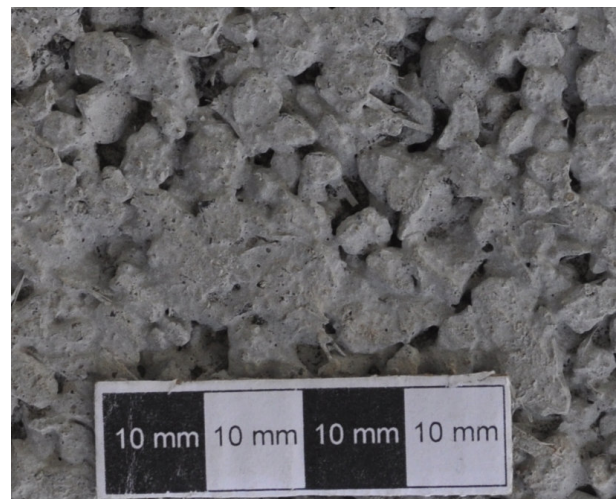
**Bild 5.5-63:** Bohrkernaufnahme der Betone V4/1 und mod V3/8. Ansicht Mantelfläche (Teststrecke 2013)

Die Oberflächentextur zeigte bei makroskopischer Betrachtung gleichermaßen wesentliche Unterschiede (Bild 5.5-64) hinsichtlich der Offenporigkeit und somit indirekt der Einbindung der obersten Kornreihe.

Beton V4/1 - BK 1



Beton mod. V3/8 – BK 12

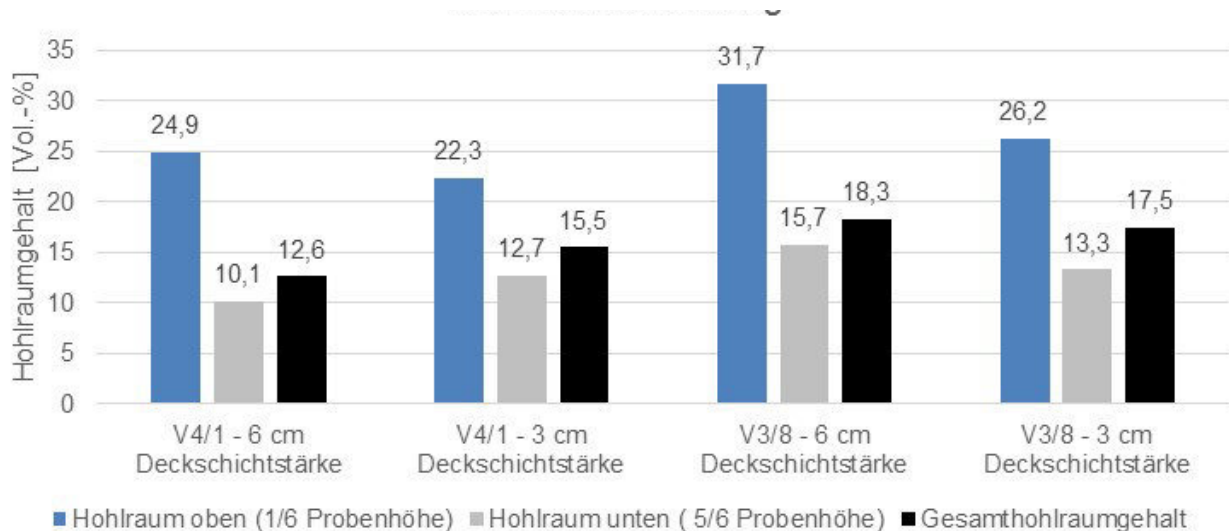


**Bild 5.5-64:** Bohrkernaufnahme der Betone V4/1 und mod V3/8. Ansicht Stirnseiten (Teststrecke 2013)

Es ist zu erkennen, dass bei Beton V4/1 (Bild 5.5-64, links) der Leim weiter oben ansteht und somit die oberste Kornreihe bis über die Hälfte im Zementstein eingebunden ist. Vergleichend dazu zeigen sich bei Beton mod. V3/8 mehr Hohlräume mit einer größeren Tiefe.

Die Ermittlung der Hohlräume des COPS und deren Verteilung erfolgte mit der in Bild 5.5-3 dargestellten Methode. Die Einzelwerte der Hohlraumgehalte der ausgewerteten Bohrkern sind im Anhang in Tabelle A 32 im Schlussbericht zum Teilvorhaben VI-IV dokumentiert.





**Bild 5.5-65:** Hohlraumgehalte der Beton mod. V3/8 und V4/1 der Teststrecke 2013

Anhand der Ergebnisse der Hohlraumauswertung lässt sich entgegen den Ergebnissen der Testfläche 2012 erkennen, dass eine differenzierte Verteilung der Hohlräume erreicht werden konnte. Es zeigt sich, dass der Beton V4/1 einen geringeren Hohlraumgehalt im oberen 1 cm der Schicht, gleichzeitig aber auch einen reduzierten Hohlraumanteil im unteren Bereich als der Beton V3/8 aufweist. Da der Beton V3/8 konstant größere Hohlraumanteile als der Beton V4/1 besitzt, lässt sich insbesondere für den unteren Bereich auf dessen geringen Leimgehalt zurückführen. Der größte Hohlraumgehalt im oberen Bereich wurde bei Beton V3/8 mit einer Einbaustärke von 6 cm bestimmt. Das für den Beton mod. V3/8 verwendete Sand-Basalt-Verhältnis erlaubt gemäß den Betonuntersuchungen im verdichteten Zustand (Bild 5.5-15) mit Abzug des Volumenanteils, welcher eine punktuelle Verklebung der Gesteinskörner sicherstellt, ein maximal mögliches Hohlraumvolumen im oberen Bereich von rd. 24,1 Vol.-%. Ermittelt wurden 31,7 Vol.-%. Dies lässt darauf schließen, dass durch die alleinige Verwendung statischer Verdichtung in Kombination mit der Einbauart „Frisch auf Fest“ zu einer unzureichenden Einbettung der obersten Kornreihe führt. Bei einer Einbaustärke von rd. 3 cm wurden sowohl für den oberen als auch den unteren Bereich geringere Hohlraumgehalte ermittelt. Hier ist anzunehmen, dass die Schicht aufgrund ihrer geringeren Dicke eine stärkere Verdichtung über die gesamte Höhe erfahren hat und der Hohlraumgehalt durch stärkere Kornumlagerungen reduziert wurde. Bei Beton mod. V3/8 nimmt der Hohlraumgehalt im unteren Bereich gleichermaßen zur Abnahme des Hohlraumvolumens im oberen Bereich ab. Bei Beton V4/1 steigt jedoch der Hohlraumgehalt im unteren Bereich geringfügig an.

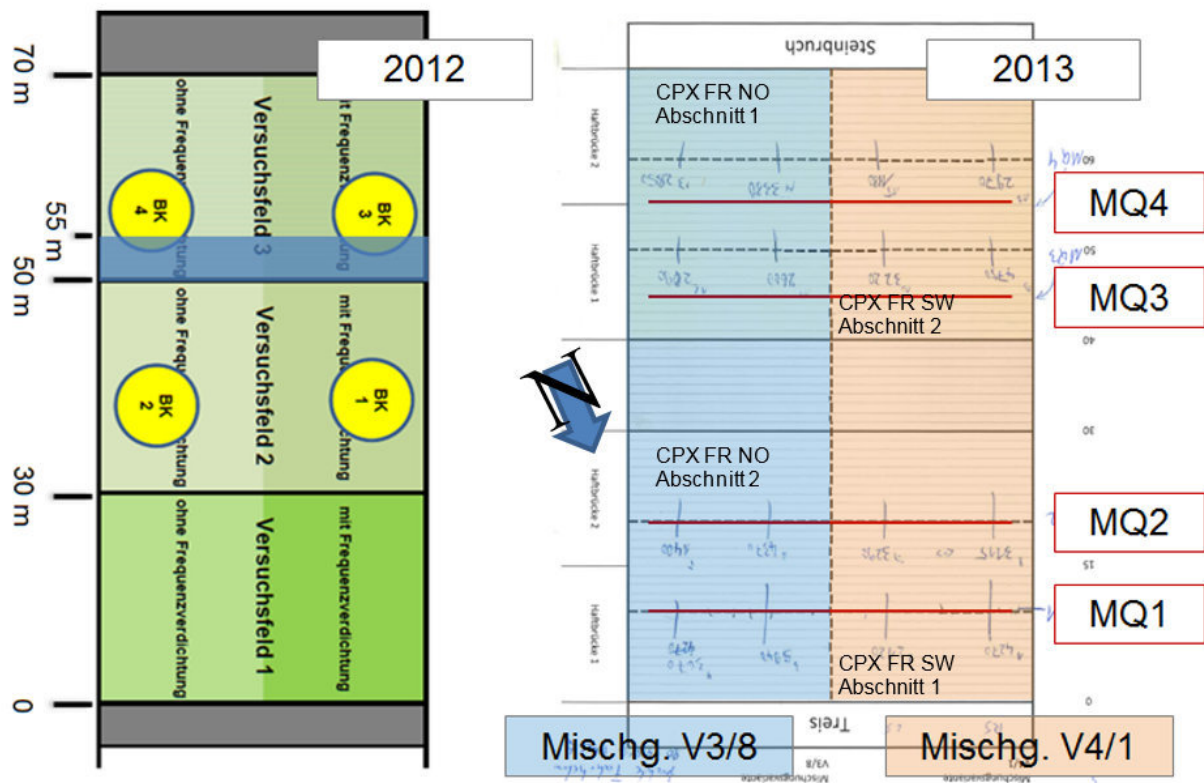
Der ermittelte Hohlraumgehalt des Betons V4/1 (Schichtstärke: 6 cm) im oberen 1 cm liegt mit 24,9 Vol.-% bei Berücksichtigung des notwendigen Volumens zur Verklebung der einzelnen Körner rd. 4 Vol.-% unter dem maximal möglichen Hohlraumgehalt von 28,6 Vol.-%. Es kann somit bei Beton V4/1 von einer ausreichenden Einbettung der obersten Kornreihe in den Zementstein ausgegangen werden. Vergleichend dazu ist bei Beton mod. V3/8 eine geringere Einbindung der obersten Kornreihe zu erwarten. Anhand der Ergebnisse lässt sich ableiten, dass sich der Beton V4/1 bei gleicher Verdichtungstechnik besser komprimieren lässt. Grund dafür kann der höhere Leimgehalt und dem damit verbundenem erleichterten Abgleiten der Körner untereinander sein. Da der größere Sandanteil des Betons mod. V3/8 keine positiven Effekte auf die Verdichtbarkeit des Betons ausübt, kann damit begründet werden, dass dessen Anteil in Kombination mit dem vergleichsweise geringen Leimgehalt noch zu gering gewählt ist. Somit kann bei dem durch die sperrigen Basaltkörner dominierten Korngerüst keine Verbesserung der Umlagerung der einzelnen Körner hervorgerufen werden.

Aus bautechnischer Sicht wurde bezüglich der zu erwartenden Haltbarkeit dem Beton V 4/1 ein größeres Potential eingeräumt.

### 5.5.5.2 Akustische Untersuchungen

Zum Nachweis der schalltechnischen Eigenschaften der Versuchsfelder wurden wiederum umfangreiche in situ Messungen und CPX-Messungen durchgeführt. Bild 5.5-66 zeigt die Anordnung der Versuchsfelder und Messquerschnitte im Vergleich zu den Versuchsfeldern des ersten Versuchs im November 2012.

Vor Ort wurde festgestellt, dass die Oberflächen der Versuchsfelder teilweise Inhomogenitäten aufwiesen. In Bild 5.5-67 und Bild 5.5-68 sind Fotos der Oberflächen in verschiedenen Querschnitten dargestellt.



**Bild 5.5-66:** Anordnung und Abmessungen der Versuchsfelder im Steinbruch der Fa. Schnorpfel. Links: Versuchsfeldanordnung der ersten Versuchsreihe im November 2012; rechts: Versuchsfeldanordnung der zweiten Versuchsreihe im Dezember 2013.

a)



b)



c)



d)



**Bild 5.5-67:** Fotos der Oberflächen der Versuchsfelder an ausgewählten Stellen. a) b) Versuchsfeld mit Mischgutvariante V3/8 bei m +25,0; c) d) Versuchsfeld mit Mischgutvariante V4/1 bei m 65,0.

Wie aus den Fotos in Bild 5.5-67 hervorgeht, hat der Einbau zu sehr unterschiedlichen Oberflächenstrukturen geführt. Bei m +25,0 entstand eine sehr unregelmäßige Anordnung der groben Gesteinskörner auf unterschiedlichem Niveau, wogegen bei m +65,0 eine geschlossenerere Struktur entstand, bei der sich die Spitzen der groben Gesteinskörner auf einheitlichem Niveau befinden. Bei m +20,0 und m +30,0 (Bild 5.5-68) ergab sich eine inhomogene Oberflächenstruktur aufgrund einer ungleichmäßigen Verteilung der groben Gesteinskörnung. Dicht gepackte Kornverteilungen wechseln sich mit Flächen, in denen die groben Gesteinskörner deutliche Abstände zueinander aufweisen ab.

+25 m



+20 m



+65 m



+30 m

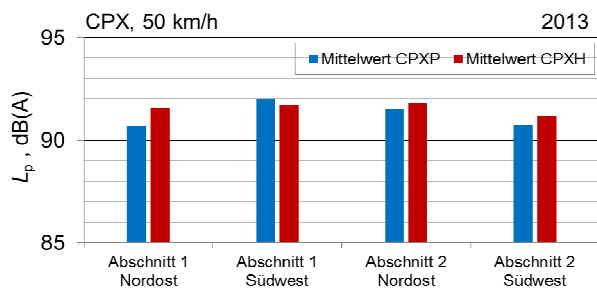


**Bild 5.5-68:** Fotos der Oberflächen der Versuchsfelder an ausgewählten Stellen

### Durchführung und Ergebnisse der CPX-Messungen

Mit Hilfe der Nahfeldmessmethode (CPX-Messungen) wurden die Versuchsfelder auf beiden Fahrbahnhälften mit 50 km/h befahren. Für die Messungen wurde der geschlossene Müller-BBM/M+P CPX-Messanhänger eingesetzt. Die Messungen wurden sowohl mit Reifen P als auch Reifen H durchgeführt. Ausgewertet wurden die Mikrofonsignale an den Normpositionen nach ISO 11819-2 im rechten Radhaus. Die Messungen fanden unter sehr ungünstigen Bedingungen statt. Zum einen stand aufgrund der winterlichen Witterung kaum Messzeit mit trockener Fahrbahn zur Verfügung, auf der anderen Seite konnte auch nicht auf bessere Witterung gewartet werden, da die Versuchsfelder wieder dem Baustellenverkehr übergeben werden mussten. Auch die Lufttemperaturen waren mit -1 C für Rollgeräuschmessungen nicht mehr geeignet.

Die Ergebnisse der CPX-Messungen bieten kein differenziertes Bild. Die Werte liegen auf demselben Niveau wie diejenigen für die Versuchsfelder ohne dyn. Verdichtung des Versuchs vom November 2012. Schalltechnisch ist auf Grundlage der durchgeführten Messungen durch die Modifikation des Betons und die Variation bzgl. der Einbauart keine Verbesserung zu erkennen.



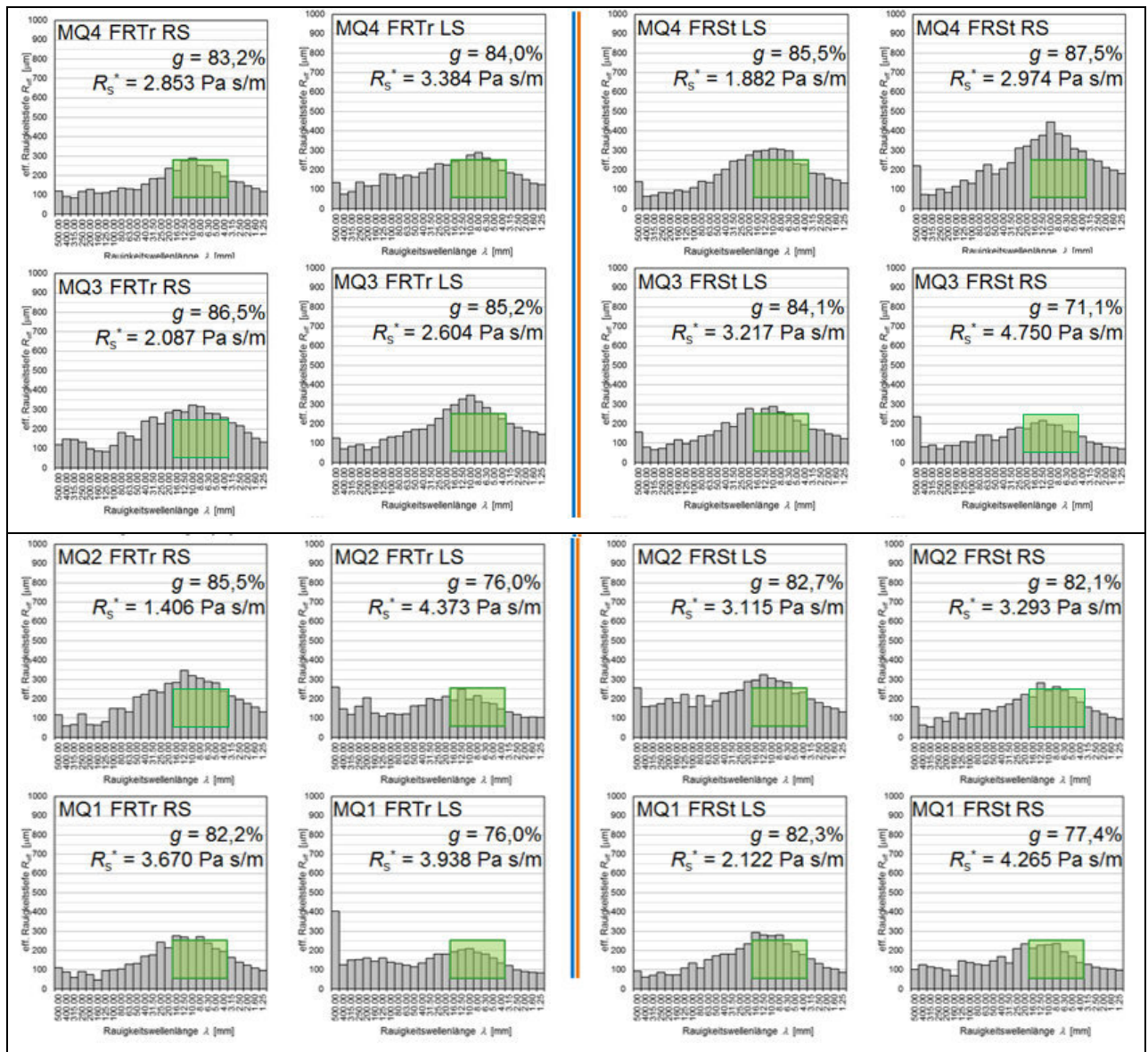
**Bild 5.5-69:** Mittlere Schalldruckpegel  $L_p$  der CPX-Pegel für Reifen P und Reifen H und die vier Versuchsfeldabschnitte in Fahrtrichtung Nordost bzw. Südwest,  $v = 50$  km/h

### Durchführung und Ergebnisse der in situ-Messungen

Folgende akustischen Parameter wurden gemessen:

- Oberflächentextur
  - Aufnahme von 6 parallelen Texturprofilen pro Testfeld mit einer Länge von jeweils 2 m
- Texturinduzierter Strömungswiderstand

In Bild 5.5-70 sind die Ergebnisse der Texturmessungen in Form von Texturspektren im Wellenlängenbereich zwischen 1,25 mm und 250 mm dargestellt. Zusätzlich sind die Werte für den Gestaltfaktor  $g$  und den texturinduzierten Strömungswiderstand  $R_s$  in die Diagramme eingetragen. Die Messungen des Schallabsorptionsgrads wurden nicht mehr durchgeführt, da anhand der im Rahmen der ersten Messkampagne gewonnenen Ergebnisse davon ausgegangen werden konnte, dass die Versuchsfelder nicht schallabsorbierend wirken.



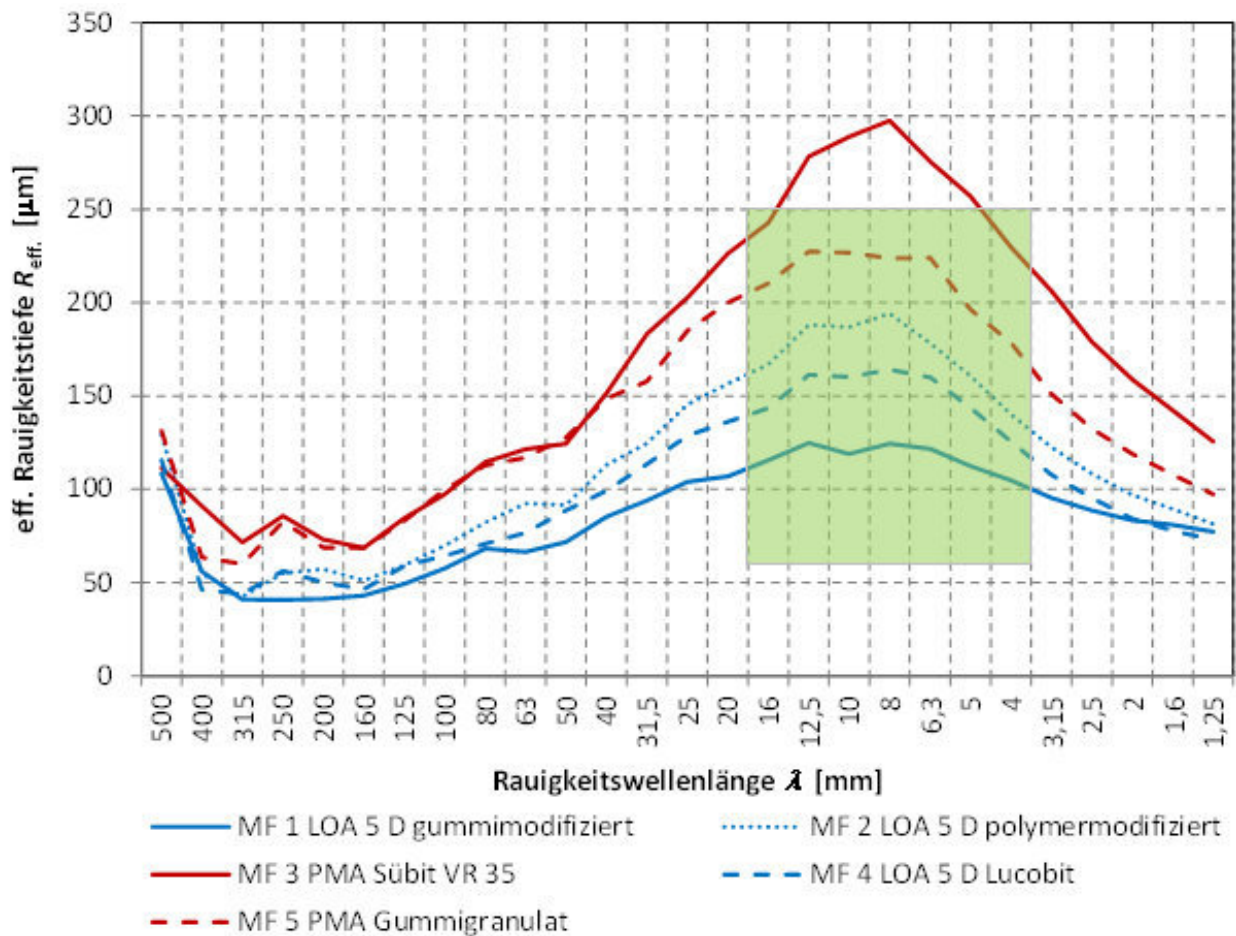
**Bild 5.5-70:** Texturspektren an den in situ Messpositionen der Versuchsfelder 2013. Die grün eingefärbten Flächen geben den Parameterraum optimaler Wellenlängen und Rauigkeitstiefen wieder

Aus den Wellenlängenspektren geht hervor, dass Wellenlängen und Rauigkeiten im spektralen Maximum der Fahrbahnoberflächen mit wenigen Ausnahmen außerhalb des für geräuschmindernde Oberflächen günstigen Fensters (grüne Rechtecke) liegen. Es ergeben sich diesbezüglich auch keine Unterschiede zwischen den beiden Betonen. Die Gestaltfaktoren  $g$  liegen in den meisten Fällen über 80 %, was auf eine schalltechnisch günstige Form der Oberflächenbeschaffenheit, also eine gute Ebenföchigkeit im Makrotexturbereich, hinweist. Die Strömungswiderstände schwanken im Bereich zwischen etwa 1.900 Pa s/m und 4.800 Pa s/m und bilden damit gut das Ergebnis der visuellen Inspektion der Oberflächen ab, auf denen sich Bereiche dicht gepackter Gesteinskörner, die zu erhöhten Strömungswiderständen führen, mit Bereichen aufgelockert nebeneinandergefügter Gesteinskörner mit geringerem Strömungswiderstand abwechseln.

### Vergleichende Bewertung der Akustik der Teststrecken

In Bild 5.5-71 sind die Texturspektren der im Rahmen von LeiStra3 auf dem Versuchsgelände in Geilenkirchen entstandenen PMA- und LOA-Versuchsfelder (Teilvorhaben VI-II / Kapitel 5.3) dargestellt. Die spektralen Maxima der drei LOA Versuchsfelder liegen vollständig in dem Fenster für optimale Texturparameter. Eines der PMA-Versuchsfelder liegt außerhalb mit einer Rauigkeitstiefe von 300  $\mu\text{m}$  bei einer Wellenlänge von 8 mm, das andere ebenfalls innerhalb des Fensters. Ein Vergleich mit den Texturspektren der COPS-Versuchsfeldabschnitte in Bild 5.5-70 zeigt, dass an sechs von achtzehn Messstellen des COPS-Versuchsfelds Rauigkeitstiefen zwischen 250  $\mu\text{m}$  und 300  $\mu\text{m}$  im spektralen Maximum erreicht

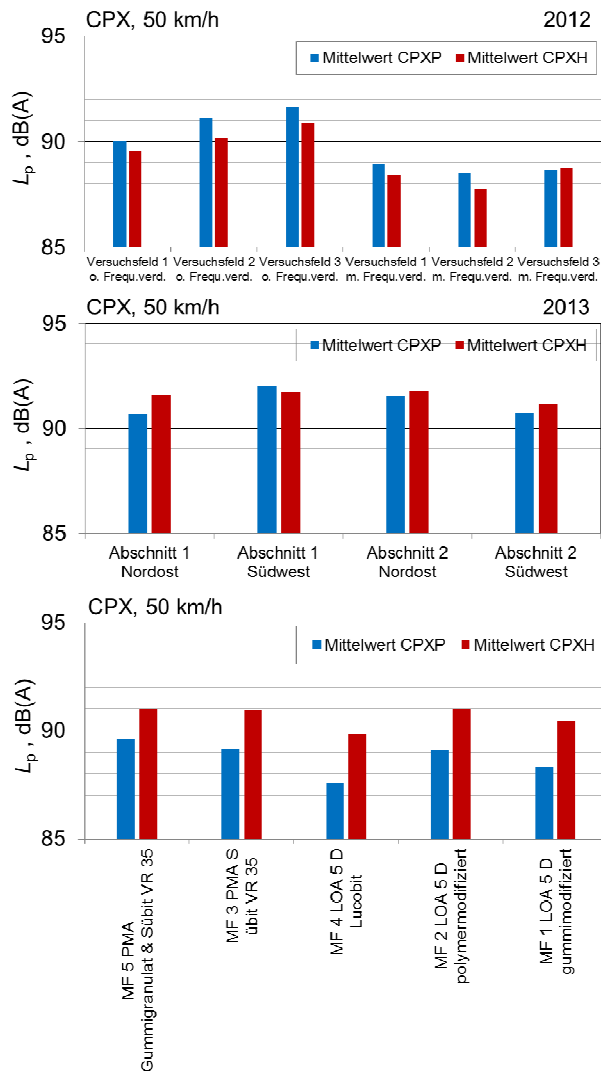
werden, an sechs Messstellen größere Rauigkeitstiefen von über 300  $\mu\text{m}$  bis zu 450  $\mu\text{m}$  und an nur vier Messstellen niedrige Rauigkeitstiefen, die im Fenster optimaler Texturparameter liegen.



**Bild 5.5-71:** Texturspektren der LOA 5 D und PMA Versuchsfelder auf dem LeiStra3-Versuchsgelände Geilenkirchen. Die grün eingefärbte Fläche gibt den Parameterraum optimaler Wellenlängen und Rauigkeitstiefen im spektralen Maximum wieder

Dies äußert sich unmittelbar in den Rollgeräuschpegeln der CPX-Messungen. Die LOA-Testfelder rufen im direkten Vergleich aller Versuchsfelder (Bild 5.5-72) die niedrigsten CPX-Pegel hervor. Die Werte für den P-Reifen liegen zwischen 87,5 dB(A) und 89 dB(A). Der LKW-ähnliche H-Reifen wird durch die sehr feinraue Textur zu tendenziell höheren Rollgeräuschpegeln angeregt, weshalb für diesen Reifen CPX-Pegel zwischen 90 dB(A) und 91 dB(A) entstehen. Die CPX-Pegel für die PMA-Versuchsfelder unterscheiden sich kaum. Die etwas rauere Oberfläche mit Bindemittel Sübit VR 35 ruft einen etwas höheren Rollgeräuschpegel des texturempfindlichen P-Reifens hervor, als das andere PMA-Versuchsfeld. Der grobstollige H-Reifen reagiert darauf nicht.

Bei den COPS-Versuchsfeldern schneiden die Abschnitte mit dyn. Verdichtung der Teststrecke aus dem Jahr 2012 am besten ab. Es werden, wie bei den LOA-Versuchsfeldern, CPX-Pegel von nicht mehr als 89 dB(A) für den Reifen P hervorgerufen. Der Reifen H erzeugt ebenfalls niedrige Rollgeräuschpegel, die deutlich niedriger liegen als für die LOA-Versuchsfelder. Dies hängt offensichtlich mit einer andersartigen Oberflächengestalt der COPS-Versuchsfelder zusammen. Die Gestaltfaktoren der COPS-Versuchsfelder mit dyn. Verdichtung liegen deutlich unter 80 % bei kleinen Rauigkeitstiefen. Dies bedeutet, dass - wie beabsichtigt - an der Fahrbahnoberfläche eine offene, zerklüftete Struktur bei schalltechnisch günstigen Rauigkeitstiefen und Rauigkeitswellenlängen entstanden ist. Dies äußert sich auch in den gegenüber den Versuchsabschnitten ohne dyn. Verdichtung deutlich niedrigeren Strömungswiderständen. Die Profilklotze des grobstolligen H-Reifens kommen damit nicht vollflächig, sondern an vielen einzelnen Kontaktpunkten mit der Fahrbahnoberfläche in Berührung, wodurch die Verformung der Profilklotze weit weniger ausgeprägt ist als bei den LOA-Versuchsfeldern. In der zweiten Versuchsreihe der COPS-Bauweise konnte das Ergebnis, wahrscheinlich aufgrund der widrigen meteorologischen Umstände Anfang Dezember, bautechnisch jedoch nicht verbessert, oder zumindest reproduziert werden.



**Bild 5.5-72:** Mittelwerte der CPX-Pegel für den Reifen P und den Reifen H auf den COPS-Versuchsfeldern der ersten und zweiten Teststrecke und auf den PMA- und LOA-Versuchsfeldern ( $v = 50 \text{ km/h}$ )

### 5.5.6 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes haben gezeigt, dass die Herstellung einer Fahrbahndecke, welche ohne zusätzlichen Bearbeitungsschritt zur Schaffung einer akustisch wirksamen Oberflächengestalt auskommt, grundsätzlich möglich ist. Dabei hat sich herauskristallisiert, dass die wirtschaftliche Betrachtung über den Rand der Betontechnologie hinaus einen Kompromiss hinsichtlich akustischer Wirksamkeit und langer Liegezeit der Schicht bzw. einer ausreichenden Dauerhaftigkeit bzgl. witterungstechnischer und mechanischer Expositionen verlangt. Im Rahmen der Laboruntersuchungen hat sich bei der Konzeptionierung offenerporiger Betone gezeigt, dass mehrere miteinander agierende Parameter aufeinander abgestimmt werden müssen, um den betontechnologischen aber auch den bautechnischen Anforderungen gerecht zu werden. Eine wesentliche Voraussetzung dafür ist das Einbinden des Parameters „Luftvolumen“ zur Schaffung des Makroporensystems in der Betonkonzeptionierung und als numerische Größe in der Stoffraumrechnung. Die Größenordnung des zu verrechnenden Luftvolumens ist abhängig von der eingesetzten Gesteinskörnung und liegt bei den untersuchten Sieblinien im Bereich von rd. 5 bis 8 Vol.-%. Hinzukommend bedarf es einer feinen Abstimmung der Leimviskosität auf die verwendete Sieblinie. Ein geeigneter Leim muss zur Ausbildung des zweischichtigen Aufbaus der Schicht unter Einwirkung von Verdichtungsenergie nach unten absinken. Durch den Einbau mittels herkömmlicher Fertigungstechniken und der damit einhergehenden geringen Zeit, in welcher der Beton in der Schalung ausharren kann, darf die Viskosität des Leimes nicht zu gering eingestellt sein. Zudem haben Laboruntersuchungen sowie die Herstellung der Versuchsfelder gezeigt, dass es bei zu starker dyn. Verdichtung zu einer oberflächlichen Mörtelanreicherung kommt. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit der Fahrbahndecke muss die hohlraumreiche Schicht in der Lage sein, die Verkehrsbelastung in all seinen Facetten aufnehmen zu können. Die oberste Kornreihe der Schicht muss über eine punktuelle Verklebung hinaus lastaufnahmefähig im Zementstein eingebunden sein. Hinsichtlich des oberflächennahen Makropo-

rensystems kann als lärmtechnisch wirksamer Wert etwa ein Hohlraumgehalt von 20 Vol.-% angesehen werden.

Die Akustikmessungen haben grundlegend gezeigt, dass COPS-Schichten ein hohes Potential für die Herstellung gräuschmindernder Fahrbahnen aufweisen. Im Rahmen der Akustikmessungen des Demonstrators wurde ersichtlich, dass ein hohlraumreicher Beton mit entsprechend rauer Oberflächentextur zu einer Verschlechterung der Geräuschminderung führt, dies aber gleichzeitig durch eine ausgeprägtere Schallabsorption mindestens kompensiert werden kann. Eine dichte COPS-Schicht, deren Oberflächentextur akustisch günstig wirkt, führt trotz sehr geringem Schallabsorptionsvermögens in etwa zu der gleichen Pegelminderung wie eine hohlraumreiche Schicht. In Anbetracht der Verschmutzungsgefahr und dem geringen Widerstand gegenüber Scherkräften hohlraumreicher Betone wurde aufbauend auf den Ergebnissen für die folgenden Betonkonzeptionierungen der dichteren und wahrscheinlich standfesteren Betonvariation der Vorzug gegeben. Grundsätzlich konnte im Rahmen der Untersuchungen des Demonstrators festgestellt werden, dass unabhängig ob statische oder dynamische Verdichtung eingesetzt wurde, eine akustisch wirksame Oberflächengestalt gemäß dem Muster „Plateau mit Schluchten“ erreicht werden kann.

Neben der Wahl der Verdichtungsart spielt die Einbauart eine wesentliche Rolle auf die strukturelle Differenzierung der COPS-Schichten. Der Beton V3/8 (Teststrecke 2012) wurde unmittelbar nach Herstellung des Unterbetons, also „Frisch in Frisch“ eingebaut. Dies hatte zur Folge, dass während der Verdichtung ein Großteil der eingebrachten Energie durch den Unterbeton kompensiert wurde. Somit konnte sich keine differenzierte Struktur über die Querschnittshöhe der Schicht ausbilden. Sowohl der obere als auch der untere Bereich wiesen einen großen Hohlraumgehalt auf. Anhand der CPX-Messungen und den ermittelten Oberflächenparametern konnte detektiert werden, dass eine dynamische Verdichtung zu geringeren Schallpegeln mit im Mittel rd. 88,5 dB(A) infolge einer deutlich besseren Homogenität der Oberflächeneigenschaften führt als die stat. Verdichtung mit Werten zwischen 90 und 92 dB(A). Nach der ersten großtechnischen Herstellung einer Teststrecke hat sich herausgestellt, dass wie auch bei der Asphaltbauweise PMA die Bauweise COPS keine Bauweise ist, die in dem für die Reifen-Fahrbahn-Geräusche wichtigen Frequenzbereich von 300 Hz bis 3.000 Hz zu einer nennenswerten Schallabsorption der Schicht führt. Die Geräuschminderung kommt primär durch Textureffekte zustande.

Für die Herstellung der zweiten Teststrecke wurde die Einbauart „Frisch auf Fest“ gewählt. Es wurde eine Modifikation des Betons V3/8 sowie eine Weiterentwicklung eingebaut. Durch die gewählte Einbauart sollte sichergestellt werden, dass der offenporige Beton durch den Unterbeton als Widerlager die für das Absinken des Leimes notwendige Verdichtungsenergie erfährt und sich ein zugängliches Makroporensystem im oberflächennahen Bereich ausbildet. Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass bei der genannten Einbauart eine klare, strukturelle Differenzierung des dichten und offenporigen Bereiches erreicht werden kann. Die Ergebnisse der CPX-Messungen des COPS zeigten im Vergleich zur ersten Teststrecke und zu den Ergebnissen der PMA/LOA-Versuchsfelder in Geilenkirchen geringfügig höhere Schallpegel. Hierbei gilt jedoch zu berücksichtigen, dass zum Zeitpunkt des Einbaus des COPS als auch bei den akustischen Untersuchungen widrige meteorologische Umstände vorlagen. Die Werte liegen zwischen 90 und 92 dB(A) und somit auf demselben Niveau wie diejenigen für die Versuchsfelder ohne Frequenzverdichtung der Teststrecke 2012.

Im Rahmen der großtechnischen Herstellung der Schichten hat sich herauskristallisiert, dass die Einbau- / Maschinenteknik für den COPS gesondert zu definieren ist. Der Einbau unterscheidet sich grundsätzlich zu dem eines klassischen Fahrbahndeckenbetons. Nachdem alle gängigen Einbautechniken (Rüttelbohle, Walzenfertiger, Gleitschalungsfertiger, Asphaltstraßenfertiger mit variabler Bohle) im Versuchsprogramm Anwendung gefunden hatten, haben sich folgende Methoden als günstig herausgestellt:

- Einbau des Unterbetons mittels Walzenfertiger / Gleitschalungsfertiger
- Einbau COPS zeitversetzt auf bereits erhärteten Unterbeton mittels Gleitschalungsfertiger

Aus der Kombination aller durchgeführten Versuche mit unterschiedlicher Maschinen- und Einbautechnik wird voraussichtlich ein Gleitschalungsfertiger mit Verdichtungsaggregaten analog zur Verdichtungstechnik eines Asphaltstraßenfertigers mit starrer (nicht variabler) Bohle das günstigste Einbauergebnis liefern. Hierdurch lassen sich Schichten mit einer kontinuierlichen Einbaubreite herstellen. Durch die regelbare Verdichtung kann der Füllgrad der Oberflächentextur nachgesteuert werden. Schwankungen der Konsistenz des Liefermaterials führen durch Vorgabe der Einbauhöhe beim Einbau mittels Gleitschalungsfertiger zu keinen Unebenheiten der Schicht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein entsprechend konzeptionierter Beton in Kombination mit der präferierten Einbauart „Frisch auf Fest“ mit hoher Wahrscheinlichkeit den Anforderungen der angestrebten Schallreduktion über eine lange Liegezeit genügen wird. Dahingehend bedarf es einer ersten großtechnischen Herstellung, bei welcher ein solcher Beton durch reale Verkehrsbelastungen und reale witterungsbedingte Expositionen beansprucht wird.



## Literatur

- [1] BOLLMANN, K., et al: Waschbeton - neue Bauweise für Betonfahrbahndecken, Beton-Informationen 2/2007, S. 32 - 35
- [2] BECKENBAUER, T.; Reifen-Fahrbahn-Geräusch - Minderungspotenziale der Straßenoberfläche. Müller-BBM GmbH, Planegg
- [3] ROOT, V.: „Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Beurteilung des Widerstandes von Asphaltdeckschichten gegen Schubbeanspruchungen an der Oberfläche“ (Dissertation), 2008
- [4] BREITENBÜCHER, R.: „Entwicklung und Optimierung von COPS (Beton mit offenporiger Oberfläche), (FE 89.0253/2010/AP) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2014

Der Schlussbericht zum vorliegenden Teilvorhaben VI-III (Förderkennzeichen 19U10016 A, 19U10016 C und 19U10016 M) ist abrufbar über die Technische Informationsbibliothek Hannover.

## 6. Zusammenfassende Bewertung

Aus dem Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung wurden über zehn Jahre die Verbundprojekte *Leiser Straßenverkehr* gefördert. Nach vierjähriger Forschungsarbeit wurde das dritte und letzte Verbundprojekt *Leiser Straßenverkehr* abgeschlossen. Aufbauend auf den Erkenntnissen und Ergebnissen der vorangegangenen Forschungsarbeiten haben 18 Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft an der Entwicklung von Maßnahmen zur Minderung des Straßenverkehrslärms in Ballungsräumen gearbeitet. Dabei wurden verschiedene Forschungsansätze verfolgt, die die Geräuschemission an der Lärmquelle nachhaltig reduzieren sollen. Die Geräuschemission des fließenden Verkehrs wird maßgeblich durch Wechselwirkungen an der Kontaktstelle von rollendem Reifen und Fahrbahn bestimmt, so dass die Reifen-Fahrbahn-Geräusche im Fokus der Untersuchungen standen.

Die Forschungsaktivitäten gliederten sich in die drei Arbeitspakete Grundlagen, Reifen und Fahrzeug sowie Fahrbahnbeläge. Sie umfassten insgesamt zehn Teilvorhaben, die von den Verbundpartnern interdisziplinär bearbeitet wurden. Alle Teilprojekte waren inhaltlich aufeinander abgestimmt und auf vielfältige Weise miteinander verknüpft.

Im Arbeitspaket *Grundlagen* sollte das Geräuschprognosemodell SPERoN umfassend erweitert werden, um auf der Basis theoretischer Analysen sowohl Fahrbahnbeläge als auch Reifen gezielt weiterentwickeln zu können. Auch sollte die Möglichkeit geschaffen werden, das Potenzial vollkommen neuartiger Fahrbahnbeläge und Reifenkonstruktionen zur Geräuschreduzierung ausloten zu können.

SPERoN ist ein sogenanntes Hybridmodell. Der hybride Ansatz entsteht durch Kombination eines analytischen Rechenmodells mit einem statistischen Modell. Grundsätzlich werden bei der Schallanregung zwei Mechanismen unterschieden: die Anregung infolge mechanischer Schwingungen des Reifens und die Auslösung aerodynamischer Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn. Beide Entstehungsmechanismen konnten mit SPERoN zwar abgebildet werden, Teile des Modells wurden jedoch empirisch beschrieben. Insbesondere die aerodynamische Rollgeräuschentstehung konnte bis dahin nicht physikalisch beschrieben werden. Systematische Analysen von experimentell aufgenommenen Geräuschspektren mit dem SPERoN-Modell zeigten jedoch, dass neben der Anregung von Reifenschwingungen aerodynamische Effekte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt maßgeblich an der Geräuschentstehung beteiligt sein müssen.

Um insbesondere diese aerodynamischen Effekte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zu charakterisieren und die physikalischen Zusammenhänge aufklären zu können, mussten genau definierte Modelloberflächen hergestellt werden. Die Texturen mussten so entworfen werden, dass die Entstehungsmechanismen des Rollgeräusches weitgehend getrennt und unabhängig zur Wirkung kamen. Um störende mechanische Anregungen des Reifens zu vermeiden, sollte als Basis eine glatte Oberfläche ausgeführt werden (geschliffener Gussasphalt). Derartige Oberflächen können aus Gründen der Verkehrssicherheit nur auf nichtöffentlichen Bereichen hergestellt werden. Das Gelände der NATO-Airbase bot hierfür hervorragende Voraussetzungen.

Diese durchgeführten Studien im Arbeitspaket bildeten die Grundlage für die Entwicklung eines tragfähigen physikalischen Modells zur Beschreibung der aerodynamischen Effekte. Mit dem in *LeiStra3* erweiterten SPERoN 2020 lassen sich die zugrundeliegenden Mechanismen und physikalischen Zusammenhänge im Detail aufklären, so dass Fahrbahnbeläge mit lärmindernder Wirkung zielgerichtet optimiert und die Möglichkeiten vollkommen neuartiger Deckschichten abgeschätzt werden können. Als Eingangsgrößen benötigt das Rechenmodell die Textur der Straßenoberfläche, die Schwingungseigenschaften und das Profil der Reifen, die Steife von Reifen und Fahrbahn, die Absorptionseigenschaften der Fahrbahnoberfläche und den Strömungswiderstand im Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn. Das Modell ist geeignet, Reifen-Fahrbahn-Geräusche auf Basis von Fahrbahn- und Reifeneigenschaften für beliebige Geschwindigkeiten zu berechnen. Es lassen sich nun reale Fahrbahnoberflächen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Reifen-Fahrbahn-Geräusche quantitativ analysieren.

Darüber hinaus wurde ein leistungsfähiges Modul zur Reifenoptimierung entwickelt, mit dem der Einfluss der Profilierung und des Reifenaufbaus auf die Schallabstrahlung und den Rollwiderstand untersucht werden kann. Im Fokus stand dabei die Auswahl und Anwendung geeigneter numerischer Verfahren zur Verkürzung der Rechenzeiten, um ein praxistaugliches Optimierungstool bereit zu stellen. Dies ermöglicht eine effiziente Bestimmung von Schallabstrahlung und Rollwiderstand ohne aufwendigen Prototypenbau.

Mit einem weiteren Modul zur Auralisierung können jetzt auch die Rollgeräuschprognosen hörbar gemacht werden. Auf diese Weise lassen sich erstmals die simulierten Vorbeifahrtgeräusche hinsichtlich ihrer subjektiven Wahrnehmung untersuchen und psychoakustisch bewerten.

Im Arbeitspaket *Reifen und Fahrzeug* sollten in den Bereichen der Reifen- und Fahrzeugtechnik effektive Maßnahmen zur Lärmreduzierung entwickelt werden. Anders als im Fernverkehr, wo die Lkw auf eine Ge-

schwindigkeit beschleunigen und diese über lange Zeiten beibehalten, treten im Regionalverkehr häufige Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge sowie Kurvenfahrten auf. Um die nötige Traktion zu gewährleisten, müssen die Antriebsachsreifen Profile mit einem hohen Anteil an Querrillen aufweisen. Diese Blockprofile neigen zu einer starken Schwingungsanregung auf der Fahrbahn und damit zu einer höheren Geräuschemission. In *LeiStra3* wurden technologische Ansätze erarbeitet, um Rollgeräusche blockprofilierter Lkw-Reifen über die gesetzlichen Grenzwerte hinaus zu reduzieren. Im Straßenversuch hat eine Entwicklungsvariante einen Schalldruckpegel von 74,4 dB(A) erreicht. Gegenüber den aktuellen Produkten wurde damit eine Geräuschreduzierung von etwa 4 bis 5 dB(A) erzielt. Diese Variante konnte in 2015 auf dem Markt eingeführt werden.

Bei Elektrofahrzeugen entfällt das typische Verbrennungsmotorengeräusch. Mit ihrem Einsatz wird es daher vor allem in innerstädtischen Bereichen, wo Anfahr- und Beschleunigungsvorgänge dominieren, leiser. Um jedoch die Wahrnehmbarkeit der leisen Elektrofahrzeuge, beispielsweise in Kreuzungsbereichen, zu steigern und damit das innerstädtische Unfallrisiko gering zu halten, wird von der Europäischen Kommission vorgeschlagen, Elektro- und Hybridfahrzeuge je nach Geschwindigkeit und Fahrzeugverhalten akustisch zu betonen. Für die Geräuscherzeugung können Soundgeneratoren eingesetzt werden. In *LeiStra3* wurde aufgezeigt, wie stattdessen Reifenprofile gestaltet werden können, um eine gezielte Geräuschabstrahlung zu erzeugen.

Schallabsorbierende Unterbodenverkleidungen am Fahrzeug können Rollgeräusche effizient absorbieren. Zudem begünstigen sie die Aerodynamik des Fahrzeugs und mindern so den CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Um das Lärminderungspotential von Unterbodenverkleidungen zu ermitteln, sind in *LeiStra3* verschiedene Materialaufbauten und Konstruktionen untersucht worden. Im Ergebnis lässt sich der Vorbeifahrtpegel von Lastwagen und Transportern um bis zu 3 dB(A) reduzieren, wenn sie mit geeigneten Unterbodenkonstruktionen ausgestattet werden.

Die Entwicklung leiserer Fahrbahnoberflächen stellte den Schwerpunkt im Arbeitspaket *Fahrbahnen* dar. Modellrechnungen belegen, dass die Oberflächengestalt einen starken Einfluss auf die Schwingungsanregung des Reifens und die aerodynamischen Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn hat. Aus akustischer Sicht ist es günstig, wenn alle Profilspitzen auf einer Ebene liegen und sich plateauartige Texturen mit schluchtenförmigen Vertiefungen ausbilden.

Die lärmtechnisch optimierte Asphaltdeckschicht AC D LOA stellt eine neue Entwicklung in der Straßenbautechnik dar und greift diesen Ansatz auf. Die Deckschicht wurde auf Basis einer dichten Asphaltzusammensetzung konzipiert und zeichnet sich durch eine Korngrößenverteilung aus, die auf eine lärmtechnisch wirksame Oberflächentextur abgestimmt ist. Der erste Einbau von AC D LOA erfolgte 2007 in Düsseldorf im Bereich der kommunalen Straßen. In *LeiStra3* wurde daran gearbeitet, die Verdichtungswilligkeit des Asphaltmischgutes zu verbessern. Auf diese Weise lassen sich die Dauerhaftigkeit der Deckschicht und damit ihr lärmtechnischer Nutzen erhöhen. Die Erkenntnisse flossen in die „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten - E LA D“ ein, die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen in 2014 herausgegeben wurden.

Der Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche (engl.: Porous Mastic Asphalt, PMA) zeigt ebenfalls lärmmindernde Effekte. Im Vergleich zum herkömmlichen Gussasphalt enthält der PMA einen wesentlich höheren Anteil grober Gesteinskörnung. Es entsteht eine Deckschicht, die im unteren Bereich dicht und im oberen Bereich offenporig strukturiert ist. Die akustische Wirksamkeit ergibt sich aus der günstigen Oberflächentextur und einem hohen Hohlraumgehalt. In 2009 wurden erste Erprobungsstrecken auf den Bundesautobahnen A 44 und A 24 gebaut. Schallpegelmessungen nach der Statistischen Vorbeifahrtmethode zeigten auf diesen Strecken für Pkw bei einer Geschwindigkeit von 120 km/h Minderungen von bis zu 3 dB(A) gegenüber dem Referenzwert. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden in *LeiStra3* weiterführende Untersuchungen durchgeführt, um die Ausführungssicherheit des PMA zu erhöhen. Zu diesem Zweck wurden die Mischgutzusammensetzung optimiert und Laborverfahren zur Herstellung von praxisnahen Probekörpern für die Mischgutkonzeption entwickelt.

Außerdem wurde in *LeiStra3* untersucht, inwieweit der Herstellungsprozess von Elektroofenschlacke (EOS) verbessert werden kann, um bestimmte Kornformen und Korngrößen gezielt zu erzeugen und damit einen hochwertigen Ausgangswerkstoff für den Asphaltstraßenbau zu gewinnen. Im ersten Schritt wurden dazu EOS-Körnungen hinsichtlich ihrer bautechnischen Eignung geprüft und darauf aufbauend das Potential verschiedener Prozessrouten bewertet. Mit einer ausgewählten EOS-Körnung (EloMinit®) konnten zwei Asphaltdeckschichtvarianten konzipiert und im Mai 2014 auf einem Testfeld eingebaut werden.

Die Nachgiebigkeit bestimmt neben der Oberflächentextur und der Offenporigkeit die akustischen Eigenschaften eines Fahrbahnbelags. Ein Ziel in *LeiStra3* war es, Asphaltkonstruktionen durch die Nutzung der schwingungsdämpfenden Eigenschaften des Straßenoberbaus geräuschmindernd zu gestalten. Dabei wurden verschiedene Ansätze wie die Integration einer elastischen Dämpfungsschicht oder die Konzeption eines Asphaltmischgutes mit schwingungsdämpfenden Eigenschaften verfolgt.

Im Bereich Betonbauweisen stand die Herstellung einer Betondecke mit offenporiger Oberfläche (COPS) im Vordergrund. Die Grundidee des Systems COPS greift die im Asphaltstraßenbau bereits erfolgreich eingesetzte Mischgutkonzipierung mit hohem Grobkornanteil und einer feinkörnigen standfesten Bindemittel-/Mörtelphase auf. Während des Einbauvorganges sinkt der feinkörnige Mörtel nach unten ab, so dass innerhalb der oberen 10 mm der Deckschicht eine offenporige Oberfläche entsteht. In Laborversuchen wurde die Betonrezeptur so eingestellt, dass ein kontrolliertes Absetzverhalten des Zementleimes erreicht wird. Die Betonrezeptur muss möglichst stabil gegenüber Einflüssen von Witterung und Einbau sein, um die vorteilhaften akustischen Eigenschaften der fertigen Betondeckschicht sicherzustellen.

Eine Voraussetzung für die Umsetzung der Forschungsergebnisse der Verbundprojekte *Leiser Straßenverkehr* in die Straßenbaupraxis ist die Erprobung und Bewertung der optimierten Fahrbahnbeläge unter möglichst praxisnahen Bedingungen. Zu diesem Zweck wurden nach dem Abschluss der Laborentwicklung Testfelder gebaut, um zu prüfen, ob die Herstellung der neuen Fahrbahnbeläge bzw. -aufbauten mit herkömmlichen Methoden möglich ist und, ob die erzielten Gebrauchs- und Oberflächeneigenschaften (z. B. Griffigkeit, Ebenheit, Textur) den Erwartungen entsprechen. Für den Bau von Testfeldern standen der BAST in *LeiStra3* Flächen auf dem NATO-Gelände in Geilenkirchen zur Verfügung. Weitere Testflächen entstanden auf Werksgeländen in Treis-Karden und in Freilassing.

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse wurden die Erprobungsstrecken mit den dichten Asphaltbelägen PMA und LOAD hergestellt. Die Ergebnisse, die in den anderen Teilvorhaben vorliegen, zeigen ein deutliches Lärminderungspotenzial. Hier sind jedoch weiterführende Untersuchungen erforderlich, bevor der Bau von Erprobungsstrecken im Bundesfernstraßennetz realisiert werden kann.

Auf den Bundesautobahnen A 553 bei Brühl, A 3 bei Lohmar und A 5 bei Friedberg konnten Erprobungsstrecken mit verschiedenen PMA-Varianten hergestellt werden. Diese wurden hinsichtlich der Mischgut- und Einbauparameter untersucht. Nach Fertigstellung der Deckschichten wurden die Fahrbahnoberflächeneigenschaften messtechnisch erfasst. Der weiterentwickelte AC D LOA wurde auf einer Teststrecke bei Düren eingebaut und erprobt. Um ihre bau- und lärmtechnische Nutzungsdauer zu verfolgen, werden die Strecken in den nächsten Jahren durch die BAST längerfristig messtechnisch untersucht und begleitet.

Im Verbundprojekt *LeiStra3* haben Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft in einer interdisziplinär angelegten Forschungsarbeit gemeinsam Lösungen erarbeitet, mit denen das Lärminderungspotential von Reifen, Fahrzeug und Fahrbahn weiter ausgeschöpft werden kann. In allen Arbeitspaketen wurden zahlreiche Ergebnisse und Erkenntnisse gewonnen, die dazu beigetragen haben, bestehende Technik zu verbessern, die Impulse zur Entwicklung neuer Technologien gesetzt haben und auf deren Basis das Technische Regelwerk fortgeschrieben wurde.

## Technische Regelwerke

<b>AL Sp-Asphalt, 2009:</b>	Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Eingangsgröße in die Dimensionierung (AL Sp-Asphalt 09), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2009
<b>ARS Nr. 5/2006:</b>	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau, Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
<b>DIN CEN/TS 12390-9:</b>	Prüfung von Festbeton, Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung, Ausgabe 2006
<b>DIN EN 12350-4:2009:</b>	Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß
<b>DIN EN 12350-6:2009:</b>	Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte
<b>DIN EN 12350-7:2009:</b>	Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren
<b>DIN EN 12390-1:2012:</b>	Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen
<b>DIN EN 12390-2:2009:</b>	Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
<b>DIN EN 12390-6:</b>	Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern
<b>DIN EN 12620:2002+A1:2008:</b>	Gesteinskörnung für Beton
<b>DIN EN 12697, Teil 24:</b>	Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 24: Beständigkeit gegen Ermüdung, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2012
<b>DIN EN 12697, Teil 25:</b>	Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 25: Druckschwellversuch, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2005
<b>DIN EN 12697, Teil 26:</b>	Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 26: Steifigkeit, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2012
<b>DIN EN 12697, Teil 46:</b>	Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 46: Widerstand gegen Kälterisse und Tieftemperaturverhalten bei einachsigen Zugversuchen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2012
<b>DIN EN 13398:</b>	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2010
<b>DIN EN 196-1:2005:</b>	Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit
<b>DIN EN 197-1:2011-11</b>	Zement: Teil 1. Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement (Deutsche Fassung prEN 197-1:2014)
<b>DIN EN 480-11:2005:</b>	Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren - Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton
<b>DIN EN 934-2:</b>	Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Teils: Betonzusatzmittel - Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung; Deutsche Fassung EN 934-2:2009+A1:2012
<b>DIN ISO 13473</b>	Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen, Teil 1 - 3 (2004-07), Beuth Verlag
<b>DIN ISO 13473-2:2002</b>	Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen - Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen.
<b>DIN EN 1427:</b>	Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin, Ausgabe 2007
<b>E GmBA</b>	Empfehlungen zu Gummimodifizierten Bitumen und Asphalten, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2012
<b>M OB</b>	Merkblatt für die Herstellung von Oberflächentexturen auf Verkehrsflächen aus Beton, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (Hrsg.), Köln, 2009
<b>M VV</b>	Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (Hrsg.): Köln, 2013

<b>prEN 12697-50:2011</b>	(E) Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 50: Widerstand gegen Steinverlust 2011-09
<b>RILEM Recommendation TC117-FDC:</b>	CDF Test - Testmethode zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton – Prüfung mit einer Natriumchloridlösung (CDF). Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Materials and Structures Vol. 29(1996), p. 523-528
<b>RLS-90</b>	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-90): Der Bundesminister für Verkehr (Hrsg.). Bonn, 1990
<b>Schriftenreihe Spezialbetone - Band 2:</b>	Faserbeton, Porenleichtbeton, Dränbeton. Nußbaum, G.; Vißmann, H.-W.; Grahke, C.; Drinkoern, G.; Verlag Bau + Technik GmbH, 1999
<b>TL Asphalt-StB 2007:</b>	Technische Lieferbedingungen für Asphaltgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2007
<b>TL NBM-StB 09:</b>	Technische Lieferbedingungen für flüssige Beton-Nachbehandlungsmittel
<b>TP Asphalt-StB, Teil 1:</b>	Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 1: Bindemittelgehalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2012
<b>TP Asphalt-StB, Teil 2:</b>	Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 2: Korngrößenverteilung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2007
<b>TP Asphalt-StB, Teil 3:</b>	Technische Prüfvorschrift für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels - Rotationsverdampfer, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2007
<b>TP Asphalt-StB, Teil 5:</b>	Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 5: Rohdichte von Asphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2012
<b>TP Asphalt-StB, Teil 6:</b>	Technische Prüfvorschriften für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 35: Raumdichte von Asphaltprobekörpern, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2012
<b>TP Asphalt-StB, Teil 8:</b>	Technische Prüfvorschrift für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 8: Volumetrische Kennwerte von Asphalt-Probekörpern und Verdichtungsgrad Korngrößenverteilung, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2012
<b>TP Asphalt StB, Teil 46 A:</b>	Technische Prüfvorschrift für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 46 A: Kälteeigenschaften: Einaxialer Zugversuch und Abkühlversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2013
<b>TP Asphalt-StB, Teil 25 B1:</b>	Technische Prüfvorschrift für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 25 B 1: Einaxialer Druck-Schwellversuch – Bestimmung des Verformungsverhaltens von Walzasphalt bei Wärme, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2012
<b>TP Asphalt-StB, Teil 80:</b>	Technische Prüfvorschrift für Asphalt – TP Asphalt-StB, Teil 80: Abscherversuch, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2012
<b>TP Eben - Berührende Messungen</b>	Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil TP Eben – Berührende Messungen
<b>TP Eben - Berührungslose Messungen</b>	Technische Prüfvorschriften für Ebenheitsmessungen auf Fahrbahnoberflächen in Längs- und Querrichtung, Teil: Berührungslose Messungen
<b>TP Griff-StB 07 (SKM)</b>	Technische Prüfvorschriften für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau; Teil: Seitenkraftmessverfahren (SKM), Ausgabe 2007, TP Griff-StB 07
<b>ZTV Asphalt-StB:</b>	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen aus Asphalt, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Ausgabe 2007/Fassung 2013
<b>ZTV Beton-StB 07:</b>	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton
<b>ZTV-ING</b>	Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag Borgmann, März 2003
<b>ZTV-ING – Teil 3:</b>	Zusätzliche Technische Lieferbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten: Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 2007