



Forschungspaket: Lärmarme Be- läge innerorts / EP 4: Labormetho- den für die Bestimmung aku- stischer Eigenschaften lärmarm- er Beläge

Paquet de recherche: Revêtements de routes peu-bruyants à l'intérieur des localités / EP4: Méthodes d'essai pour la vérification des caractéristiques acoustiques des couches d'enrobé phono-absorbant en laboratoire

Research package: Low noise road surfaces in urban situations / EP4: Laboratory methods for acoustical characteristics of low noise pavements

Müller-BBM Schweiz AG
Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing., Dipl.-Ing. Univ.
Daniel Belcher, Dipl.-Phys.
Guido Kneib, Dr. rer. nat., Geophysiker

IMP Bautest AG
Christian Angst, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH

Forschungsprojekt ASTRA 2010/013 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA)

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts / EP 4: Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge

Paquet de recherche: Revêtements de routes peu-bruyants à l'intérieur des localités / EP4: Méthodes d'essai pour la vérification des caractéristiques acoustiques des couches d'enrobé phono-absorbant en laboratoire

Research package: Low noise road surfaces in urban situations / EP4: Laboratory methods for acoustical characteristics of low noise pavements

Müller-BBM Schweiz AG
Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing., Dipl.-Ing. Univ.
Daniel Belcher, Dipl.-Phys.
Guido Kneib, Dr. rer. nat., Geophysiker

IMP Bautest AG
Christian Angst, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH

Forschungsprojekt ASTRA 2010/013 auf Antrag des Bundesamtes für Strassen (ASTRA)

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung

Thomas Beckenbauer, Dr.-Ing., Dipl.-Ing. Univ.

Projektteam

Daniel Belcher, Dipl. Phys.

Dr. Guido Kneib, Dr. rer.nat.

Manuel Männel, Dipl. Ing. (FH)

Christian Angst, Dr. sc. techn., dipl. Ing. ETH (IMP AG)

Begleitkommission

Präsidentin

Luzia Seiler

Mitglieder

Sabine Würmli

Hans-Peter Beyeler

Sophie Hoehn

André Magnin

Olivier Jacobi

Benedikt Eberle

Cyril Durussel

Nicolas Gouneaud

Martin Bürgi (bis 2014)

Hanspeter Gloor

Dejan Lukic

Yves Pillonel

KO-Finanzierung des Forschungsprojekts

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Antragsteller

Bundesamt für Strassen (ASTRA)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von <http://www.mobilityplatform.ch> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Impressum	4
Zusammenfassung	7
Résumé	11
Summary	15
1 Einleitung	19
1.1 Anlass.....	19
1.2 Ziel und Ergebnis des Forschungsprojekts.....	19
1.3 Organisation, Beteiligte	19
1.4 Situation und Aufgabenstellung	20
2 Rechenmodell SPERoN	23
3 Messverfahren	27
3.1 Anpassung der Texturmessung	27
3.1.1 Ausgangslage.....	27
3.1.2 Rekonstruktion aus kurzen Messprofilen	27
3.1.3 Messmethoden zur Bestimmung einer 3D-Flächentextur.....	28
3.1.4 Entwicklung einer 3D-Flächentextur-Messmethode	35
3.2 Anpassung der Messung des Luft-Strömungswiderstands	39
3.2.1 Vergleichsmessung im Labor	39
3.2.2 Vergleichsmessung auf Strassen.....	42
3.3 Anpassung der Messung des Schallabsorptionsgrads	43
3.3.1 Ausgangslage.....	43
3.3.2 Angepasstes Messverfahren.....	45
3.4 Messung der mechanischen Impedanz	48
4 Validierung der akustischen Prognose	51
4.1 Validierungsmessungen in situ	51
4.1.1 Messprogramm	51
4.1.2 Messorte.....	51
4.1.3 Durchführung der Messungen.....	53
4.1.4 Ergebnisse der Validierungsmessungen	57
4.2 Validierungsmessungen im IMPACT	61
4.2.1 Probeplatten	61
4.2.2 Messresultate aus dem IMPACT	62
4.3 Validierung des Prognoseverfahrens.....	64
5 Evaluierung des Prüfverfahrens	71
5.1 Zeitlicher Ablauf und Umfang der Messungen	71
5.2 Strömungswiderstand	73
5.3 Textur	74
5.3.1 Messdurchführung und -ergebnisse	74
5.3.2 Einzahlwerte als Funktion der Anzahl der Überrollungen.....	81
5.3.3 Rauigkeitsspektren als Funktion der Anzahl der Überrollungen	83
5.3.4 Beschreibung der Texturveränderungen	85
5.4 SPERoN-Berechnungen	86
6 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen	95
6.1 Schlussfolgerungen.....	95
6.2 Ausblick und Empfehlungen.....	95
Anhang	101

Glossar	125
Literaturverzeichnis	127
Abbildungsverzeichnis	129
Tabellenverzeichnis	139
Projektabschluss	141
Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen	145

Zusammenfassung

Anlass und Ziele

Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung der Belagstechnik für lärmarme Fahrbahndeckschichten hat im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit grosse Bedeutung. Der grossflächige Einbau neuer Belagstypen mit unbekanntem Langzeitverhalten stellt jedoch ein erhebliches bautechnisches und finanzielles Risiko dar. Aus diesem Grund besteht seitens der Strassenbauverwaltungen grosses Interesse an Labormethoden, die es erlauben, das akustische Verhalten von Fahrbahnbelägen im Zeitrafferversuch zu testen.

Einzelprojekt EP4 ist ein Verbundprojekt mit Einzelprojekt EP2 "Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit von lärmarmen Belägen". In EP2 fand die mechanische Dauerbeanspruchung von Prüfkörpern mit dem dort entwickelten Prüfstand IMPACT im Labormassstab statt. Das Reifen-Fahrbahn-Geräusch kann im IMPACT Prüfstand jedoch aufgrund der begrenzten Abmessungen der Prüfkörper nicht direkt gemessen werden, sondern wurde in EP4 indirekt über die Messung der Oberflächeneigenschaften und Simulation der Reifen-Fahrbahn-Geräusche berechnet. Ziel von EP4 war, die akustisch relevanten Oberflächeneigenschaften der Prüfkörper im zeitlichen Verlauf der Dauerbeanspruchung wiederholt zu messen und die Messergebnisse in ein bestehendes und validiertes Rechenmodell für Reifen-Fahrbahn-Geräusche einzuspeisen. Damit sollte eine Aussage zum Rollgeräuschpegel in Abhängigkeit von den sich während des Prüfstandsversuchs verändernden Oberflächeneigenschaften getroffen werden.

Projekttablauf

Entwicklung des akustischen Prüfverfahrens

Das für die Rollgeräuschsimulation eingesetzte Müller-BBM Rechenmodell SPERoN[®] berechnet anhand der Messwerte der Oberflächenparameter, vorgegebener Geschwindigkeiten und Reifen den Vorbeifahrtpegel in 7.5 m Abstand und 1.2 m Höhe zu einer gedachten Fahrbahn. Damit steht mit Hilfe der Rollgeräuschsimulation genau die Grösse zur Verfügung, die auch bei Vorbeifahrtmessungen an Strassen ermittelt wird. Rechenresultate können deshalb unmittelbar mit Messresultaten verglichen werden. Die für die Simulation massgeblichen Oberflächenparameter sind Textur, Luftströmungswiderstand im Reifen-Fahrbahn-Kontakt, Schallabsorptionsgrad und mechanische Impedanz. Zum akustischen Prüfverfahren in EP4 zählen deshalb insbesondere die Messungen dieser Oberflächeneigenschaften. Ausgehend von bewährten Methoden für die Messungen auf realen Strassen wurden in EP4 Messvorrichtungen und Messprozeduren entwickelt, die die Messungen auch auf kleinen Probestücken im Laborprüfstand erlauben.

Validierung des akustischen Prüfverfahrens

Die Validierung erfolgte anhand von Messungen der Oberflächeneigenschaften in situ und von Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen auf Deckschichten öffentlicher Strassen. Den Deckschichten wurden anschliessend Probestücke entnommen, um sie in den Prüfstand einzubauen und darin deren Oberflächeneigenschaften mit den spezifischen Labormessmethoden zu bestimmen. So konnte die Übereinstimmung der in situ und im Labor erhobenen Messwerte überprüft werden. Die im Labor gemessenen Oberflächenkennwerte wurden anschliessend in SPERoN eingespeist und Vorbeifahrtpegel für exakt die Geschwindigkeiten und Reifen berechnet, die auch bei den Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen verwendet wurden. So konnte auch die Übereinstimmung der realen Vorbeifahrtmesswerte mit den berechneten Vorbeifahrtpegeln überprüft werden.

Evaluierung des Prüfstandsversuchs

Die Evaluierung des IMPACT Prüfverfahrens erfolgte in einem zwischen EP2 und EP4 übergreifenden Prozess, in dem die Herstellung von Prüfkörpern unterschiedlicher Be-

lagstypen und deren Dauerbeanspruchung im IMPACT Prüfstand (Zeitrafferversuch) über einen längeren Zeitraum erfolgte. Während der Versuchsreihen wurden in dichter zeitlicher Abfolge Messungen der Oberflächeneigenschaften der Prüfkörper vorgenommen, um anhand der Zeitreihen die Wirksamkeit und die Eignung des Prüfstands für den Nachweis der praktischen akustischen Dauerhaftigkeit von Fahrbahnbelägen zu testen.

Projektergebnisse

Texturmessung

Das Simulationstool SPERoN setzt sechs in Fahrtrichtung orientierte parallele Texturprofile von jeweils zwei Metern Länge voraus. Im IMPACT stehen dagegen Probeplatten von nur etwa einem halben Meter Länge zur Verfügung. Folglich können nur Teilabschnitte der benötigten Texturprofile gemessen werden, die zu zwei Meter langen Stücken zusammengesetzt werden müssen. In EP4 wurde eine Vorgehensweise entwickelt, bei der jedes ausgewählte Einzelprofil in Längsrichtung wiederholt gespiegelt wird, so dass jeweils gleiche Endstücke aneinanderstossen. Die im Prüfstand gemessenen Teilprofile sollten parallel zur Abrollrichtung liegen und statistisch möglichst unabhängig voneinander sein. Das bedeutet, dass der Abstand zwischen den Einzelprofilen möglichst grösser sein sollte als die Korrelationslänge senkrecht zur Abrollrichtung. Typischerweise genügt dazu ein Abstand von der maximalen Korngrösse des Belags, wodurch die benötigte Datenmenge auch auf den schmalen Probekörpern im IMPACT Prüfstand zur Verfügung steht. Bei der Entwicklung und Anwendung dieses Verfahrens spielt die Isotropie der Fahrbahnrauigkeit eine wichtige Rolle. Deren Prüfung und Bewertung ist deshalb Voraussetzung für die Rekonstruktion der Textur und erfordert ein hochauflösendes 3D-Texturmessverfahren. In EP4 wurde hierzu ein Streifenlichtprojektionsverfahren eingesetzt.

Strömungswiderstandsmessung

Zum Einsatz kommt ein Luftgleichstromverfahren, bei dem ein Volumenstrom mit konstanter Strömungsgeschwindigkeit durch einen mit einer Vorlast auf der Belagsoberfläche angekoppelten Ring aus Elastomer gepresst wird. Für die Einspeisung der im Prüfstand mit einer rechteckigen Vorrichtung gemessenen Strömungswiderstände in SPERoN genügt eine einfache Umrechnung: $R_{s, \text{SPERoN}} = 1.1748 R_{s, \text{IMPACT}}$.

Schallabsorptionsgradmessung

Die Absorptionsgradmessung im Prüfstand ist von störenden Schallreflexionen aus dem Prüfstandsaufbau selbst und seiner nächsten Umgebung beeinflusst. Der Einfluss der Reflexionen lässt sich mit Hilfe von vergleichenden Freifeldmessungen an den Probekörpern quantifizieren und aus den IMPACT-Messergebnissen so herausrechnen, dass sie in SPERoN eingespeist werden können.

Messung der mechanischen Impedanz

Bei der Bestimmung des mechanischen Widerstands (Impedanz) der Probekörper im IMPACT Prüfstand hat sich gezeigt, dass die Messung zu empfindlich auf die Lagerbedingungen der Probekörper reagiert, um zuverlässige Impedanzwerte der Probekörper selbst ermitteln zu können. Für starre Deckschichten liegen jedoch auch praktische Erfahrungswerte vor. Elastische Deckschichten, für die Impedanzmesswerte wichtig sein könnten, besitzen noch keine praktische Relevanz, weshalb durch die fehleranfälligen Impedanzmesswerte in EP4 kein Nachteil entstanden ist.

Validierung des akustischen Prüfverfahrens

Für die Validierung wurden real auf Strassen eingebaute Beläge des Typs SDA 6B und SDA 8C herangezogen. Insgesamt ergaben sich sehr konsistente Werte. SPERoN simuliert die Vorbeifahrtmessungen auf Basis der auf der Strasse und im IMPACT auf Ausbauplatten gemessenen Oberflächenparameter mit einer Abweichung von maximal 1 dB(A). Die berechneten Vorbeifahrtpegel für die SDA 8B Probeplatte aus der IMPACT-Evaluation ergaben nach rund 4 Mio. Überrollungen vergleichbare Werte. Die Ähnlichkeit der Werte weist darauf hin, dass die Beanspruchung im IMPACT-Prüfstand den realen

Verhältnissen auf der Strasse nahe kommt. Die Pegelerhöhung um 1 dB(A) zwischen dem Zustand der Probeplatte nach 76'000 und nach 3.5 Mio. Überrollungen entspricht dem Erwartungswert hinsichtlich der Verschlechterung derartiger Beläge innerhalb von 1 bis 2 Jahren nach Verkehrsfreigabe. Dies entsprach auch dem Alter des SDA 8C Belags zum Zeitpunkt der Messungen.

Evaluierung des Prüfstandversuchs

Im IMPACT Prüfstand wurde ein Dauerversuch mit über 5 Millionen Überrollungen messtechnisch begleitet. Auf zwei Belagsprobekörpern der Mischguttypen SDAC 4C und SDA 8B konnte über 10 Monate hinweg mit hoher Messdatendichte die Veränderung der akustisch relevanten Oberflächenparameter verfolgt und mit Hilfe von Berechnungen der Rollgeräuschpegel mit SPERoN untersucht werden. Die berechneten Rollgeräuschpegel lassen sich nach mechanischer und luftströmungstechnischer Komponente unterscheiden und zeigen, dass durch die Beanspruchung im IMPACT durchaus signifikante Veränderungen des akustischen Verhaltens der Beläge eintreten können. Eine Texturverschlechterung auf dem SDA 8B Belag führte zu einer Pegelzunahme der mechanisch induzierten Geräusche um rund 1 dB(A). Die luftströmungstechnische Geräuschkomponente blieb nach der Einfahrphase über die Dauer des Versuchs dagegen nahezu unverändert. Die mechanisch induzierte Komponente des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs reagierte insgesamt am empfindlichsten auf die Veränderungen an der Oberfläche der Probekörper. Die Zunahme dieser Geräuschkomponente betrug im Mittel über 16 verschiedenen Reifentypen für den SDA 4C Belag rund 0.1 dB(A) pro 1 Mio. Zyklen und für den SDA 8B Belag rund 0.5 dB(A) pro 1 Mio. Zyklen. Bei einzelnen Reifentypen fiel die Zunahme mit 0.7 dB(A) pro 1 Mio. Zyklen für den SDA 8B Belag noch deutlicher aus.

Schlussfolgerungen

Die Anpassung der Messverfahren für Textur, Strömungswiderstand und Schallabsorptionsgrad an den Prüfstand ist vollumfänglich gelungen und auf ähnliche Prüfstände übertragbar. Die Bestimmung der mechanischen Impedanz der Probekörper im IMPACT war hingegen nicht erfolgreich. Hierfür müsste ein solcher Prüfstand noch erheblich massiver konstruiert werden. Vergleichende Messungen an Belägen in situ und im IMPACT Prüfstand haben gezeigt, dass sowohl die Herstellung der Laborprobekörper als auch die mechanische Beanspruchung der Fahrbahnoberfläche den Gegebenheiten der realen Strasse nahe kommt. Die im IMPACT Prüfstand über eine Anzahl von rund 4 Mio. Überrollungen simulierte mechanische Beanspruchung spiegelt die Verhältnisse des Straßenbetriebs für einen Zeitraum von vielleicht zwei Jahren wider. Dies gilt jedoch nur für tiefe Geschwindigkeiten von bis zu 40 km/h, bei denen alleine die mechanisch induzierte Geräuschkomponente den Rollgeräuschpegel bestimmt. Das Ausmass der akustischen Veränderungen der Oberflächeneigenschaften nach über 5 Millionen Überrollungen blieb, vor dem Hintergrund des damit verbundenen Zeitaufwands von 10 Monaten, jedoch hinter den Erwartungen zurück.

Ausblick und Empfehlungen

Insgesamt hat das Forschungsprojekt gezeigt, dass sich im Prüfstand IMPACT akustisch relevante Oberflächenveränderungen erzeugen lassen. Im gegenwärtigen Ausbauzustand des Prüfstands gehen diese Veränderungen jedoch noch so langsam vor sich, dass im Vergleich zu einer realen Strasse kaum Zeit gewonnen wird. Verbesserungen im Hinblick auf den Zeitraffer der Belagsalterung dürften über eine zusätzliche Nachbildung des natürlichen Wittereinflusses zu erzielen sein. Der Prüfstand sollte funktionell so erweitert werden, dass neben der mechanischen Beanspruchung weitere Alterungsprozesse von Deckschichten auf Innerortsstrassen ausgelöst werden. Dazu zählen thermische Effekte des periodischen Aufheizens und Abkühlens bis unter die Frostgrenze, die das Bindemittel verspröde UV-Sonneneinstrahlung und chemische Veränderungen durch Staub- und Streusalzeintrag. Insbesondere die in der Praxis auftretende allmähliche Versprödung des Bindemittels und die damit einhergehenden Struktur- und Texturveränderungen scheinen bislang zu fehlen. Textur und Strömungswiderstand müssen nur etwa alle zwei Wochen gemessen werden, der Schallabsorptionsgrad - wie in EP4 - wesentlich seltener. Die Messung der mechanischen Impedanz kann künftig, solange elastische Fahrbahndeckschichten keine Rolle spielen, unterbleiben.

Résumé

Conjoncture et objectifs

Le développement et l'amélioration continus des concepts techniques pour les revêtements routiers à faible nuisance sonore ont particulièrement à l'égard de la durabilité une grande importance. L'installation à grande échelle de nouveaux types de revêtement avec un comportement inconnu à long terme engendre un risque technique et financier important. C'est pour cette raison que les administrations routières montrent un vif intérêt pour les méthodes de laboratoire qui permettent de contrôler et d'évaluer le comportement acoustique des revêtements routiers.

EP4 est un projet associé au projet individuel EP2 "Détermination par des techniques de laboratoires de la durabilité des revêtements à faible nuisance sonore". EP2 a développé, avec la plate-forme de test IMPACT, la charge continue mécanique des échantillons à l'échelle de laboratoire. Le bruit de roulement ne peut pas être mesuré directement sur IMPACT à cause des dimensions limitées des échantillons, mais a été calculé dans EP4 de manière indirecte par la mesure des propriétés de revêtement et la simulation du bruit de roulement. L'objectif de EP4 était de réaliser des mesures répétées des propriétés des revêtements des échantillons sur le temps de la charge continue et d'intégrer les résultats des mesures dans un modèle de calcul pour le bruit de roulement existant et fiable. Ceci afin d'obtenir un exposé du bruit de roulement en fonction de l'évolution des propriétés du revêtement sur la plate-forme test.

Déroulement du projet

Développement de la méthode d'essai acoustique

Le modèle de calcul SPERoN[®], utilisé par Müller-BBM pour la simulation du bruit de roulement, calcule à partir des valeurs mesurées des paramètres du revêtement, des vitesses et pneus donnés du niveau de bruit au passage à 7.5 m de distance et 1.2 m de hauteur sur une route fictive. Comme cela et avec l'aide de la simulation du bruit de roulement, on obtient exactement la grandeur qui est également déterminée lors des mesures statistiques au passage sur routes. Les résultats des calculs peuvent donc directement être comparés aux résultats des mesures. Pour la simulation, les paramètres de revêtement déterminants sont la texture, la résistance à l'écoulement de l'air dans le contact pneu-chaussée, le coefficient d'absorption acoustique et l'impédance mécanique. Les méthodes d'essais acoustiques dans EP4 comprennent particulièrement les mesures des propriétés du revêtement. Tenant compte de méthodes ayant fait leurs preuves pour les mesures sur routes réelles, des dispositifs et procédures de mesure ont été développés dans EP4 afin de permettre également les mesures sur de petits échantillons.

Validation de la méthode d'essai acoustique

La validation s'est effectuée de par les mesures des propriétés acoustiques de revêtement in situ et les mesures contrôlées au passage sur les revêtements des routes. Des échantillons de ces revêtements ont ensuite été prélevés, dans le but d'être installés sur la plate-forme test afin de déterminer les caractéristiques acoustiques des revêtements à l'aide des méthodes spécifiques de mesures en laboratoire et de leur confronter les résultats des mesures in-situ. Les caractéristiques des revêtements mesurées en laboratoire ont ensuite été introduites dans le modèle numérique SPERoN et les niveaux de bruit au passage calculés pour les vitesses et les types de pneus utilisés dans les mesures au passage contrôlées. Cela permet de vérifier la concordance entre les valeurs de mesures au passage et les niveaux calculés.

Évaluation de la plate-forme d'essai

L'évaluation de la plate-forme d'essai IMPACT a été réalisée conjointement entre EP2 et EP4 avec la fabrication de spécimens de différents types de revêtements, destinés à une évaluation sur la plate-forme de test IMPACT (test en accéléré) et ce, sur une longue période. Au cours de la série d'expériences, des mesures des propriétés acoustiques des

échantillons d'essai ont été réalisées de manière réciproque et successive pour tester, à l'aide de séries chronologiques, l'efficacité et l'adéquation de la plate-forme test pour la détection de la résistance acoustique des revêtements routiers.

Résultats du projet

Mesure de texture

L'outil de simulation SPERoN requiert six profils de texture parallèles orientés dans le sens de conduite de deux mètres de longueur chacun. La plate-forme IMPACT dispose en revanche de plaques d'échantillons de seulement un demi-mètre de longueur environ. On ne peut donc mesurer que des sections partielles des profils de texture qui doivent être assemblées en morceaux de deux mètres de long. Dans EP4, une procédure a été développée, de manière à ce que chaque profil individuel dans le sens de la longueur soit répété en miroir de sorte que ce soient toujours les mêmes pièces d'extrémité qui soient juxtaposées. Les sections mesurées sur la plate-forme de test et assemblées doivent être parallèles au sens du défilement et être le plus statistiquement possible indépendantes les unes des autres, ce qui signifie que la distance latérale entre les profils individuels doit être aussi grande que la longueur de corrélation perpendiculaire au sens du défilement. La distance équivalente au diamètre maximum des grains de l'enrobé y suffit généralement, de sorte que la quantité de données requises est également disponible sur des échantillons étroits dans IMPACT. L'isotropie de la rugosité de la chaussée joue un rôle important pour le développement et l'utilisation de ce procédé. L'examen de l'isotropie de la texture du revêtement est donc une condition indispensable à la reconstruction de la texture et exige une méthode de mesure de la texture en haute résolution et en 3D. Une technologie de projection de bandes lumineuses a été utilisée dans EP4.

Mesure de la résistance à l'écoulement de l'air

Pour l'utilisation, il s'agit d'une procédure d'air en courant continu : le débit volumétrique de l'air est comprimé à une vitesse d'écoulement imposée à travers un couplage avec une bague circulaire en élastomère. Pour l'introduction dans SPERoN des valeurs de résistance à l'écoulement de l'air mesurées sur la plate-forme de test avec un dispositif rectangulaire, une simple conversion est suffisante: $R_{s, \text{SPERoN}} = 1.1748 R_{s, \text{IMPACT}}$.

Mesure du coefficient d'absorption acoustique

La mesure du coefficient d'absorption acoustique sur la plate-forme de test est influencée par des réflexions sonores perturbantes dues à la structure de la plate-forme elle-même et à son environnement proche. L'influence des réflexions peut être quantifiée à l'aide de mesures sur échantillons en champ libre comparables et calculée sur la base des résultats des mesures IMPACT, afin d'être intégrée dans SPERoN.

Mesure de l'impédance mécanique

Lors de la détermination de l'impédance mécanique sur la plate-forme de test IMPACT, il a été constaté qu'elle est trop sensible aux conditions de support des échantillons pour pouvoir définir des valeurs d'impédance fiables des échantillons. Concernant les revêtements rigides, il existe des valeurs provenant d'expériences pratiques. Les revêtements élastiques, pour lesquelles les valeurs de l'impédance mécanique peuvent être importantes, n'ont pas d'utilité pratique, il n'y a donc pas d'inconvénient causé par les valeurs

Validation de la méthode d'essai acoustique

Pour la validation, des revêtements de type SDA 6B et SDA 8C ont été utilisés sur des routes réelles. Les valeurs sont très cohérentes dans l'ensemble. SPERoN simule la mesure au passage sur la base des paramètres du revêtement mesurés sur la route et sur IMPACT avec un écart maximal de 1 dB(A). Les niveaux de bruit au passage calculés pour la plaque spécimen de mélange type SDA 8B de l'expérience IMPACT montrent des valeurs très similaires après 4 mio. de passages. La similitude des valeurs souligne que les contraintes sur IMPACT se rapprochent de très près des conditions réelles sur la route. L'augmentation du niveau de 1 dB(A) entre l'état de la plaque d'échantillon après 76'000 et après 3.5 mio. de passages correspond à la valeur attendue par rapport à la

détérioration de ce type de revêtement en l'espace de 1 à 2 ans après l'ouverture à la circulation. Celle-ci correspond à l'âge du revêtement SDA 8C au moment de la mesure.

Evaluation de la plate-forme d'essai

Sur la plate-forme IMPACT a été effectué un test d'endurance avec plus de 5 Mio. de passages, accompagné de mesures. Sur deux échantillons du mélange de type SDA 4C et SDA 8B, les changements dans les paramètres acoustiquement pertinents des revêtements ont pu être suivis sur plus de 10 mois et avec une forte densité de données et le bruit de roulement a pu être étudié en complément au moyen de calculs avec SPERoN. Les calculs du niveau de bruit de roulement se distinguent selon les composantes mécanique et aérodynamique et montrent que des changements importants peuvent se produire dans le comportement acoustique des revêtements par les contraintes appliquées dans IMPACT. La dégradation de la texture sur le revêtement SDA 8B a entraîné une augmentation du niveau de la composante mécanique d'environ 1 dB(A). La composante aérodynamique est restée pratiquement inchangée après la phase de démarrage sur la durée de l'expérience. La composante du bruit induit mécaniquement du bruit de roulement est dans l'ensemble la plus sensible aux variations des échantillons de revêtements. L'augmentation de cette composante de bruit pour 16 types de pneus différents est d'environ 0.1 dB(A) pour le revêtement SDA 4C pour 1 million de cycles, et d'environ 0.5 dB(A) pour le revêtement SDA 8B pour 1 million de cycles. Pour les types de pneus analysés individuellement, l'augmentation de 0.7 dB(A) pour 1 million de cycles pour le revêtement SDA 8B est encore plus prononcée.

Conclusions

L'adaptation de la méthode de mesure sur plate-forme d'essai pour la détermination de la texture, de la résistance à l'écoulement de l'air et du coefficient d'absorption acoustique est entièrement aboutie et applicable à des plates-formes d'essais similaires. La détermination de l'impédance mécanique de l'échantillon sur IMPACT n'a pas été performante. Pour y remédier, il faudrait que la plate-forme soit améliorée. Les mesures de validation sur des revêtements comparables in situ et sur IMPACT ont montré que la fabrication d'échantillons-spécimens en laboratoire tout comme la contrainte mécanique sur la surface de la route se rapprochent des conditions réelles de la route. Les contraintes simulées mécaniquement sur la plate-forme de test IMPACT sur un nombre de passages d'environ 4 Mio. reflètent les conditions de l'exploitation des routes pour une période de peut-être deux ans. Cela n'est toutefois valable que pour de faibles vitesses de moins de 40 km/h, où la composante de bruit induit mécaniquement détermine le bruit de roulement à elle seule. L'ampleur des modifications acoustiques dans les caractéristiques du revêtement après plus de 5 Mio. de passages est restée, dans le contexte de la durée de 10 mois sur la plate-forme test, en deçà des attentes.

Perspectives et recommandations

Dans l'ensemble, la recherche a démontré que les modifications des revêtements acoustiquement pertinentes sont possibles sur la plate-forme de test. Dans l'état d'aménagement de la plate-forme test, ces modifications progressent si lentement par rapport aux variations sur les routes réelles qu'on ne distingue pas d'accélération significative sur la plate-forme test. L'objectif qui tend vers une méthode de test plus efficace et une simulation plus réaliste des dégradations est susceptible de conduire à une reproduction de l'influence naturelle du climat dans le cadre d'essais futurs. Le test devrait donc être étendu de telle sorte que, en plus des contraintes mécaniques, d'autres procédés d'usure des revêtements des routes urbaines soient inclus dans le test. Ceux-ci comprennent les effets thermiques de réchauffement et de refroidissement périodiques jusqu'en dessous de la limite de gel, les UV du rayonnement solaire ainsi que les modifications chimiques causées par les poussières et sels de déneigement. Plus particulièrement, la fragilisation progressive du liant, avec ses changements de structure et de texture, semble être manquante jusqu'à présent. Les mesures de texture et de résistance à l'écoulement de l'air ne doivent s'effectuer qu'environ toutes les deux semaines et le degré d'absorption – comme dans EP4 - beaucoup moins fréquemment. La mesure de l'impédance mécanique peut être ignorée aussi longtemps que les revêtements élastiques ne jouent pas un rôle majeur en pratique.

Summary

Purposes and aims

Continuous development and improvement of technological concepts for low noise road pavements are particularly important with respect to the acoustical and mechanical durability. Road pavements with new types of wearing courses that are practically tested on a large scale with unknown long-term behaviour pose a considerable technical and financial risk. Therefore, road administrations do have a major interest in laboratory methods that admit of testing the acoustical behaviour of road surfaces in a time-lapse procedure.

Project EP4 is a joined project with project EP2 "Laboratory assessment of the durability of low noise pavements". In EP2, samples of road surfaces have been subject to long-term stress tests using a newly developed laboratory test stand called IMPACT. However, the limited dimension of the IMPACT test stand precludes the tyre/road noise from being measured directly. The indirect solution to this problem is based on the measurement of the surface characteristics of the samples and the calculation of the tyre/road noise as a function of the measured surface characteristics. EP4 aimed at measuring the surface properties of the road pavement samples, that are acoustically relevant, repeatedly in the course of a time-lapse test and at feeding an existing and validated simulation tool with the measurement results. Conclusions on the acoustical performance of the road surface in terms of rolling noise levels as a function of the altering surface characteristics could be expected.

Project proceedings

Development of the acoustical testing method

The Müller-BBM calculation model for tyre/road noise SPERoN[®] computes the pass-by level at a distance of 7.5 m and 1.2 m height above a virtual road depending on the values of relevant surface parameters. The output quantity of the rolling noise simulation thus corresponds exactly to the acoustic quantity that is generally measured at real roadways. Therefore, calculation results can directly be compared with measurement results. The surface properties that are relevant for the tyre/road noise simulation are texture, air flow resistance within the tyre/road contact, sound absorption coefficient and mechanical impedance. The measurements of these road surface parameters make an important part of the acoustical testing method in EP4. Based on proven methods for measurements on real roads, measuring setups and procedures have been developed in EP4 that make measurements possible also on small samples in the laboratory test stand.

Validation of the acoustical testing method

The validation has been performed by means of measurements of surface properties in situ and of controlled pass-by measurements on pavements of public roads. Afterwards, samples were cut out of these pavements and installed in the test stand in order to measure their acoustic properties by means of the specific laboratory measurement methods again. In such a way the agreement of the in situ measuring values with the measuring values gained in the laboratory could be checked. Subsequently, the SPERoN model has been supplied with the measured surface parameters from the laboratory and the pass-by noise levels have been calculated for exactly those speeds and tyres that had been used for the controlled pass-by measurements. The agreement of the real pass-by levels with the calculated ones could be tested in this manner.

Evaluation of the test stand

The evaluation of the IMPACT testing method has been performed in a process involving both projects EP2 and EP4. The process comprised the production of samples of different pavement types and their endurance in the IMPACT test stand over a long period (time-lapse experiment). During the experiments measurements of the acoustic properties of the samples were taken at short time intervals in order to test the effectiveness and suitability of the test stand to characterize the acoustic durability of pavements.

Project results

Surface texture measurement

The simulation tool SPERoN requires as input six texture profiles oriented in parallel to the driving direction with lengths of two meters. In the IMPACT test stand samples have lengths of about half a meter. Therefore, texture measurements in the test stand can capture portions of the required texture profiles only, which means that the complete profile needs to be assembled from such subprofiles. In the EP4 project a procedure has been developed that mirrors each subprofile repeatedly in rolling direction such that identical ends abut. This ensures a continuous SPERoN profile without discontinuities. The thereby introduced periodicity of twice the length of the pavement sample, i.e. 1 m wave length in the texture spectrum, is acoustically not significant. The subprofiles measured in the test stand should be oriented in parallel with the rolling direction and should be statistically as independent of each other as possible. This requires that the lateral acquisition distance between the subprofiles should be larger than the correlation length perpendicular to the rolling direction. Typically, it suffices to stick to a distance which corresponds to the maximum grain size of the pavement, which means that a sufficient amount of data is available also on the small pavement samples used in the IMPACT test stand. In the context of the development and application of this procedure the isotropy of the road surface roughness plays an important role. Testing and evaluating the isotropy is a prerequisite for the reconstruction of the surface texture and requires a high resolution 3D texture measurement system. In project EP4 a light stripe projection scanner has been applied.

Measurement of the air flow resistance

The constant air flow method is applied such that air with a constant volume flow is pressed through a gauge made of elastomere material which is pressed onto the pavement surface with a defined preload. The air flow resistance has been determined using a rectangular shaped elastic layer that fits to the IMPACT pavement samples. However, SPERoN expects air flow resistance values gained by means of an elastic circular ring. In EP4 a simple conversion rule could be formulated: $R_{s, \text{SPERoN}} = 1.1748 R_{s, \text{IMPACT}}$.

Measurement of the sound absorption

The measurement of sound absorption in the test stand is influenced by unwanted sound reflections from the near surroundings. The impact of the reflections can be quantified by comparative free field measurements of the pavement samples and can be eliminated from the IMPACT measuring results. SPERoN can be supplied with such rectified values.

Measurement of the mechanical impedance

The mechanical impedance measurements in the IMPACT indicated that the measurement is too sensitive for the supporting conditions of the pavement samples. This prevents the measurements from gaining reliable impedance values of the pavement samples themselves. For rigid road surfaces empirical values are available instead. Elastic road surfaces which made measured impedance values necessary are of no relevance in practice. Therefore, no drawback has been caused by the error-proneness of the impedance measurement.

Validation of the acoustical testing method

The comparisons were based both on a SDA 6B pavement and a SDA 8C pavement laid on real roads. The experiment yielded quite consistent values. The SPERoN simulation gave level differences of not more than 1 dB(A) concerning the pass-by noise levels which have been calculated based on the road surface parameters measured in situ (one the road) and measured on dismantled pieces in the IMPACT test stand. The computed pass-by levels for the sample made of mixture type SDA 8B from the IMPACT time-lapse experiment (IMPACT evaluation) gave quite similar values after 2 million rolling cycles (4 million overrollings) compared to the pass-by levels of the naturally worn road surfaces. The similarity of the values indicates that the wear in the IMPACT test stand may come close to the real situation on the road. The increase of the pass-by noise level by 1 dB(A) between the condition after 76,000 overrollings and that after 3.5 million over-

rollings corresponds to the expected value in terms of the acoustical deterioration within a period of 1 to 2 years after the opening to traffic. The latter corresponds also to the age of the SDA 8C pavement at the time when the measurements were taken.

Evaluation of the test stand time-lapse experiment

In the IMPACT test stand a long-term test with more than 5 million overrollings (2.5 million cycles) were tracked by measurements. On two samples made of mixture types SDAC 4C and SDA 8B the change of the acoustically relevant surface parameters could be monitored over a time period of more than 10 months and supplemented by computations of pass-by levels with SPERoN. The calculated rolling noise levels can be differentiated between a mechanical and an air flow related noise component. The SPERoN computations of pass-by levels show that the wear in the IMPACT test stand can yield significant changes in the acoustic behaviour of pavements. The degradation of the texture on the SDA 8B pavement led to an level increase of the mechanically induced noise by about 1 dB(A). The aerodynamic noise component remains nearly unchanged during the experiment. The mechanically induced component of the tyre/road noise reacted most sensitive to the changes at the pavement surface. The increase of this noise component is about 0.1 dB(A) for the SDA 4C pavement per 1 mio. cycles and for the SDA 8B pavement about 0.5 dB(A) per 1 mio. cycles. For specific types of tyre the increase of 0.7 dB(A) per 1 mio. cycles for the SDA 8B pavement is even more prominent.

Conclusions

The adaption of the measurement methods for texture, air flow resistance and the sound absorption coefficient to the test stand has been completed successfully and can be transferred to similar test stands. However, the determination of the mechanical impedance of the pavement samples in the IMPACT was not successful. The mechanical structure of the existing test stand should move on to a heavier one if mechanical impedance of pavement samples is an issue. The validation measurements at comparable pavements in situ and in the IMPACT have shown that the production of samples as well as the mechanical wear of the pavement specimens are approaching the conditions on a real road. The mechanical wear that has been simulated in the IMPACT over a number of 4 million overrollings represent the conditions on a used road for a time interval of about two years. But this statement only holds for low velocities of up to 40 km/h, as far as the mechanically induced noise component dominates the tyre/road noise. The extent of acoustical changes of the surface properties after 5 million overrollings remained behind the expectations, keeping in mind the required time of 10 months.

View ahead and recommendations

All in all, the research project has shown that acoustically relevant alterations of a road surface can be produced in the test stand. However, in the current state of the IMPACT the changes develop so slowly that a considerable time lapse effect compared with changes on a real road can hardly be recognized. Improvements with respect to the time lapse of the aging of pavement samples may be achieved by exposing the samples to stress that simulates natural weather conditions. Therefore, the test stand should be extended functionally such that, apart from the mechanical wear, other aging processes of pavements on urban roads could be provoked. This includes the thermal effect of periodical heating and cooling down to freezing conditions, UV light radiation that stiffens the binder and chemical changes by discharging dust and salt. Particularly the embrittlement of the binder and the thus caused alterations of the surface structure and texture seem to be missing.

Texture and air flow resistance measurements should be performed only about every two weeks and the absorption measurement much less frequently (as it was in EP4). Measuring the mechanical impedance of pavement samples in the test stand is regarded as less promising and should be avoided in the future as long as elastic pavements do not play a major role.

1 Einleitung

1.1 Anlass

Der Strassenverkehr ist eine bedeutende Lärmquelle in der Schweiz, die erhebliche gesundheitliche Beeinträchtigungen und auch Kosten zur Folge hat.

Die Lärmschutzverordnung (LSV) verpflichtet die Vollzugsbehörden in der Schweiz dazu, den schalltechnischen Zustand von Strassen z.B. nach Sanierungen periodisch zu überwachen. Die Überwachungsmessungen vor Ort sind wetterabhängig und im Winterhalbjahr kaum durchführbar. Der grossflächige Einbau neuer Belagstypen mit unbekanntem Langzeitverhalten stellt ein erhebliches bautechnisches und finanzielles Risiko dar. Aus diesem Grund besteht seitens der Strassenbauverwaltung grosses Interesse an Labormethoden, die es erlauben, das akustische Verhalten von Deckbelägen nach dem Einbau und im Laufe der Lebenszeit messtechnisch und simulatorisch an Probekörpern, die im Labor hergestellt werden, zu prüfen und zu bewerten.

1.2 Ziel und Ergebnis des Forschungsprojekts

Im Jahr 2003 wurden vom ASTRA zwei Forschungsprojekte zum Thema „Lärmarme Beläge im Niedergeschwindigkeitsbereich“ initiiert. Darin wurden lärmarme Beläge anhand von ausgewählten bestehenden Strecken und neu eingebauten Teststrecken in der Schweiz untersucht [6] [7]. Die positiven Erfahrungen aus diesen Projekten haben die Bundesämter ASTRA und BAFU dazu bewogen, ein Forschungspaket zum Thema „Lärmarme Beläge innerorts“ zu starten. Dieses soll Kontinuität bei der Behandlung der Fragestellungen zu lärmarmen Belägen gewährleisten.

Ziel des Forschungspaketes „Lärmarme Beläge innerorts“ ist:

- den Einsatz lärmarmen Strassenbeläge zu fördern und einen weiteren Entwicklungsschub bei diesen Belägen zu bewirken;
- die Akzeptanz gegenüber lärmarmen Belägen zu fördern und mit den betroffenen Strasseneigentümern eine Win-Win-Situation zu erreichen.

Ziel des Forschungsprojektes EP 4 als Teilprojekt des Forschungspaketes „Lärmarme Beläge innerorts“ ist es, bestehende Verfahren zur schalltechnischen Charakterisierung von Deckbelägen an den Einsatz im Prüfstand anzupassen und das Reifen-Fahrbahn-Geräusch, das Deckbeläge hervorrufen, die mit den Laborprüfkörpern vergleichbare schalltechnische Eigenschaften aufweisen, zu simulieren.

Ergebnis dieses Forschungsprojektes EP 4 sind angepasste Messverfahren für Prüfstandsuntersuchungen.

1.3 Organisation, Beteiligte

Das Forschungspaket „Lärmarme Beläge innerorts“ ist in drei Teilprojekte untergliedert (Abb. 1):

- TP1: Forschung und Innovation
- TP2: Test und Validierung
- TP3: Langzeitüberwachung

Die Phase 1 im Teilprojekt TP1 beinhaltet fünf Einzelprojekte:

- EP1: Rezepturen für lärmarme Beläge
- EP2: Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit lärmarmen Beläge

- EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge
- EP4: Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge
- EP5: Verbesserung der Genauigkeit akustischer Messmethoden

Die Phase 2 im Teilprojekt TP1 wurde später gestartet und beinhaltet drei Einzelprojekte:

- EP7: Innovative, lärmarme Beläge für den potentiellen Einsatz in der Schweiz
- EP8: Akustische Wirkung betrieblicher Reinigungsmassnahmen bei lärmarmen Belägen
- EP10: Sensitivität der akustischen Eigenschaften lärmarmen Beläge aufgrund der Variabilität bei der Herstellung

Der vorliegende Bericht beschreibt die Ergebnisse des „EP4: Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge“.

Die Einbettung des „EP 4“ innerhalb des Forschungspaketes „Lärmarme Beläge innerorts“ und des Teilprojektes „TP1: Forschung und Innovation“ ist in *Abb. 1* dargestellt.

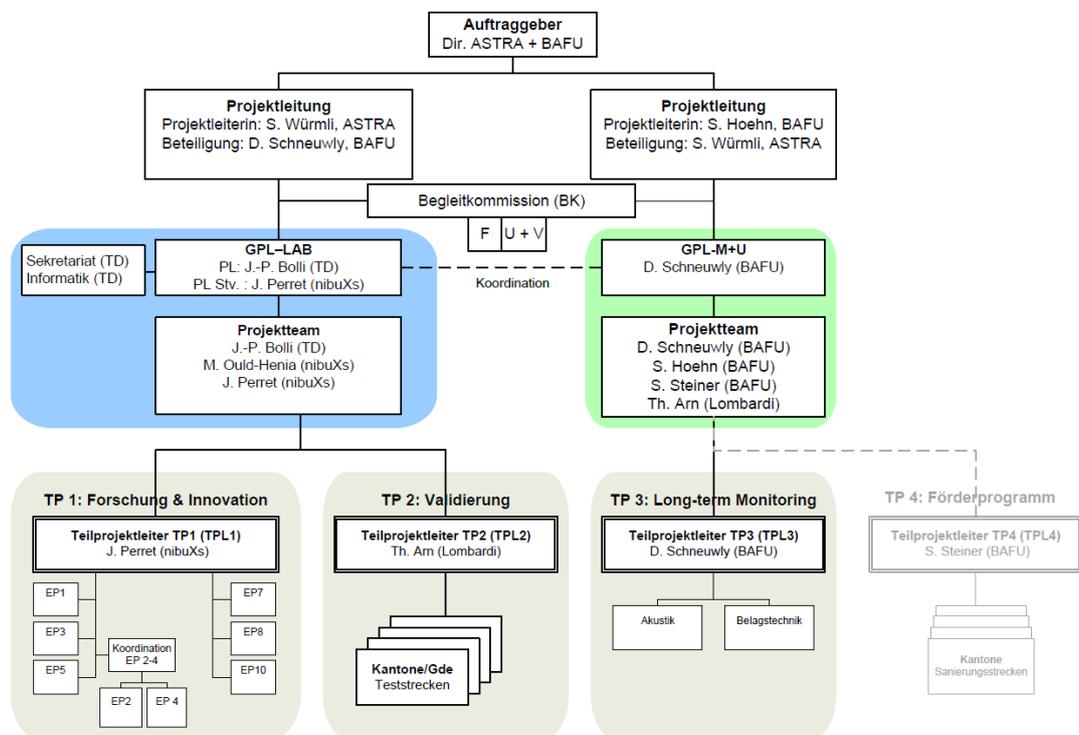


Abb. 1 Organigramm des Forschungspaketes „Lärmarme Beläge innerorts“.

1.4 Situation und Aufgabenstellung

Die Auswirkungen der Reifen-Fahrbahn-Geräusche an einem Empfangsort in einer bestimmten Entfernung werden durch drei akustische Vorgänge bestimmt: Die Schallanregung durch den Rollvorgang des Reifens, die Schallabstrahlung von Schwingungen aus dem Reifen-Fahrbahn-Kontakt und die Schallausbreitung über der Fahrbahnoberfläche. Alle drei Vorgänge werden durch die akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche massgeblich beeinflusst. Hinsichtlich der Schallanregung ist zwischen der Anregung mechanischer Schwingungen des Reifens und der Auslösung aerodynamischer Vorgänge in der Kontaktfläche zu unterscheiden.

Die akustische Wirksamkeit geräuschkindernder Fahrbahnbeläge ist je nach Belagstyp von diversen schalltechnischen Parametern abhängig, die wiederum von der Bautechnik beeinflusst werden. Geräuschkindernde Fahrbahnbeläge weisen Fahrbahneigenschaften auf, die für die Entstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches bzw. dessen Minderung je nach Deckschichttyp unterschiedlich wichtig sind. Im Allgemeinen tragen folgende Parameter bei: Textur, Schallabsorptionsgrad, texturinduzierter Strömungswiderstand und mechanische Impedanz. Jede dieser Eigenschaften können eine oder mehrere Kenngrößen zur Charakterisierung des akustischen Verhaltens einer Fahrbahnoberfläche zugeordnet werden. Jede dieser akustischen Fahrbahnmerkmale kann sowohl an Laborprobekörpern als auch in-situ mit geeigneten Messverfahren und -systemen quantitativ ermittelt werden.

Einzelprojekt EP4 ist in engem Zusammenhang zu sehen mit Einzelprojekt EP2 "Labortechnische Bestimmung der Dauerhaftigkeit von lärmarmen Belägen". EP4 hat die Aufgabe, die akustischen Oberflächeneigenschaften von Laborprüfkörpern in Abhängigkeit von einer realitätsnahen mechanischen Beanspruchung zu ermitteln und die Rollgeräuschpegel mit Hilfe eines geeigneten Simulationsverfahrens als Zeitreihe über der Anzahl von Überrollungen zu prognostizieren und deren Veränderung zu beurteilen. Der in EP2 zu entwickelnde Prüfstand IMPACT stellt gewissermassen das Werkzeug für die realitätsnahe mechanische Beanspruchung von Probekörpern zur Verfügung. Aufgabenstellung beider Projekte ist also, über die Messung der Oberflächeneigenschaften von Probekörpern im Prüfstand und die Simulation der Reifen-Fahrbahn-Geräusche auf Grundlage der Messwerte eine direkte Aussage über die Fahrzeuggeräusche zu treffen, die zu erwarten wären, wenn der entsprechende Belag im jeweiligen Zustand der Beanspruchung auf einer realen Strasse eingebaut wäre.

In EP2 erfolgt die baulabortechnische Auslegung und Erprobung praxisnaher Prüfbedingungen. Im Projekt EP4 wird die Ertüchtigung, Anpassung und Erprobung von Messverfahren zur Bestimmung akustisch relevanter Belageigenschaften hinsichtlich des Einsatzes im Prüfstand durchgeführt. Die Messgrößen sollen geeignet sein, in das Rechenmodell SPERoN für die Vorhersage von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen eingespeist zu werden, um eine direkte Aussage für den Lärminderungswert des Fahrbahnbelages bzw. Prüfkörpers im jeweiligen Zustand zu erhalten.

Von Müller-BBM waren folgende Arbeitspakete zu bearbeiten:

1. Labormessung und Bewertung der Textur
2. Labormessung und Bewertung des Luftströmungswiderstands im Reifen-Fahrbahn-Kontakt
3. Labormessung und Bewertung des Schallabsorptionsgrads
4. Labormessung und bewertung der mechanischen Impedanz
5. Simulation des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs anhand der Labormesswerte für die oben genannten Fahrbahnparameter

2 Rechenmodell SPERoN

Das von Müller-BBM in Zusammenarbeit mit dem Institut für angewandte Akustik der Chalmers Universität Göteborg entwickelte Verfahren zur Berechnung von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen SPERoN[®] ist integraler Bestandteil der Arbeiten in EP4. Das Rechenmodell wird in diesem Kapitel zusammenfassend vorgestellt. Einzelheiten können den Veröffentlichungen [8] [9] [10] und [11] entnommen werden.

SPERoN besteht aus einem deterministischen und einem statistischen Teil. Der Ansatz für dieses Hybridmodell ist in Abb. 2 dargestellt. Es werden zunächst mithilfe von analytischen Rechenmodellen Zwischengrößen generiert, die von der zu berechnenden Größe, der Schallintensität des Reifen-Fahrbahn-Geräusches, linear abhängen. Als Zwischengrößen dienen hierbei unter anderen die Wechselkräfte, die in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn entstehen. Die Kräfte im Reifen-Fahrbahn-Kontakt zu einem bestimmten Zeitpunkt hängen dabei nicht nur von der Textur der Fahrbahnoberfläche, sondern auch vom Schwingungszustand des Reifens zu diesem Zeitpunkt ab. Deshalb beinhaltet SPERoN auch ein analytisches Modell zur Berechnung von Reifenschwingungen in Abhängigkeit von den Reifeneigenschaften. Zielgröße ist schlussendlich der Vorbeirollpegel, d.h. der Maximalwert des zeitabhängigen Schalldruckpegels während der Vorbeifahrt eines Fahrzeugs ohne Antriebsgeräusche. Als Eingangsgrößen dienen die Fahrgeschwindigkeit sowie Parameter der Fahrbahn und des Reifens. Durch die Berechnung von Zwischengrößen ist es möglich, Teilschallintensitäten, die von unterschiedlichen Entstehungsmechanismen des Reifen-Fahrbahn-Geräusches herrühren, getrennt voneinander zu ermitteln. Im statistischen Teil des Hybridmodells werden diese einzelnen Teilschallintensitäten zur Schallintensität des Gesamtgeräuschs superponiert.

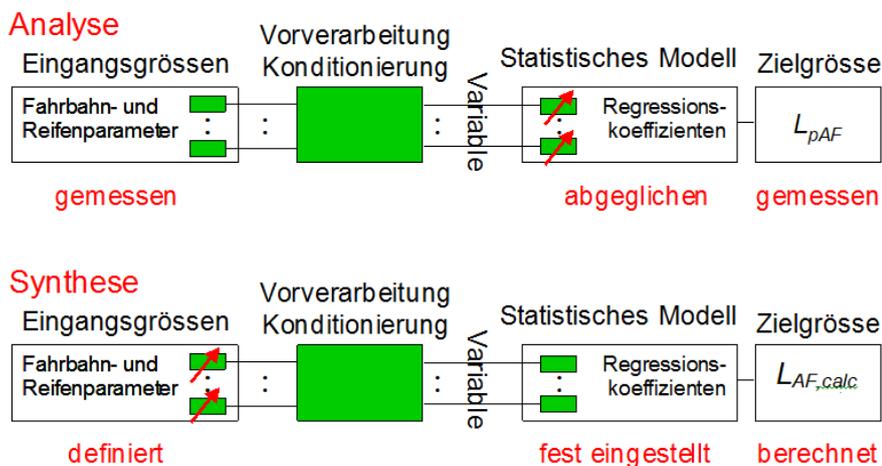


Abb. 2 Schema des Hybridansatzes von SPERoN.

SPERoN lässt sich sowohl zur Analyse als auch zur Synthese von Fahrbahnoberflächen einsetzen. Bei der Analyse liegen die Eingangsgrößen durch Messung vor. Bei der Synthese werden diese frei gewählt bzw. definiert.

Für die Berechnung der in der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn wirkenden Kräfte verwendet SPERoN ein Quasi-3D Modell. Die Kräfte an einem beliebigen Punkt im Reifen-Fahrbahn-Kontakt sind durch die Deformation der Lauffläche und deren Steifigkeit gegeben. Die Modellierung des Kontakts erfolgt mithilfe der Winkler-Bettung. Hierbei wird die elastische Lauffläche des Reifens als eine Lage von untereinander nicht verbundenen Federn betrachtet (Abb. 3). Um dieses Modell auf eine dreidimensionale Lauffläche anwenden zu können, wird der Reifen in Querschnitte diskretisiert. Mithilfe der Winkler-Bettung wird dann in jedem dieser Querschnitte die Kontaktsteife der Lauffläche, abhängig von der Rauheit der Fahrbahn und der Geometrie des Reifenprofils, in einer Kennlinie dargestellt.

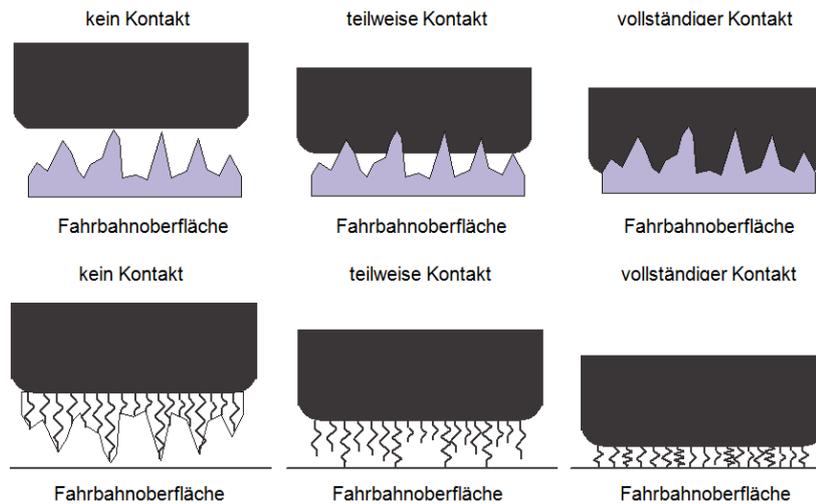


Abb. 3 Schematische Darstellung eines Reifenquerschnitts mit veränderlicher Eindringtiefe (oben) und in seiner Darstellung mit Hilfe der Winkler-Bettung (unten).

Bei der idealisierten Darstellung der Lauffläche eines Reifens als Lage von Federn ist jedoch zu beachten, dass es sich bei Gummi um ein nicht kompressibles Medium handelt. Das bedeutet, dass dieser im Gegensatz zu einer Feder auf Druckbeanspruchung nicht mit einer Volumenänderung, sondern mit einer Formänderung reagiert. Im Modell wird dies durch die Annahme einer proportionalen Änderung der Federsteifigkeit mit der Änderung der Kontaktfläche zwischen Gummi und Fahrbahn berücksichtigt. Die mithilfe der Winkler-Bettung berechneten Kennlinien der einzelnen nebeneinanderliegenden Reifenquerschnitte sind aus diesem Grund nicht linear, sondern bilden die Kontaktsteife als eine Funktion der Eindringtiefe ab. In *Abb. 4* ist ein Beispiel für eine solche Kennlinienschar dargestellt.

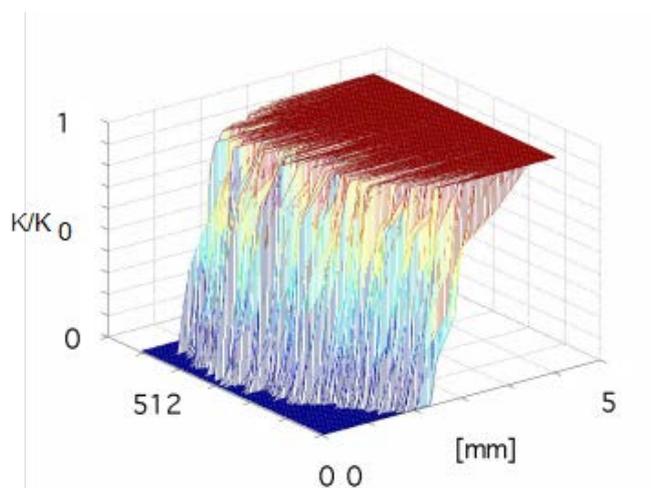


Abb. 4 Beispiel für die nichtlineare Kennlinienschar der normierten Kontaktsteife K/K_0 eines profillosen Reifens als Funktion der Rauheit und der Eindringtiefe (Reifengröße 195/65 R15, Unterteilung in 512 Querschnitte, maximale Eindringtiefe 5 mm).

Aus den Federsteifigkeiten können die in den einzelnen Querschnitten des Reifens wirkenden Kontaktkräfte ermittelt werden. Bedingt durch den Rollvorgang des Reifens sind diese zeitvariant. Diese Veränderung bewirkt, dass die Struktur des Reifens durch die Kontaktkräfte zu Schwingungen angeregt wird (*Abb. 5*).

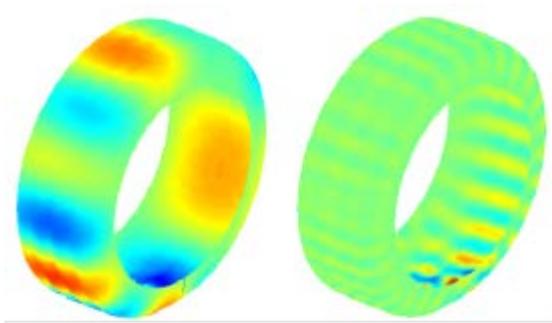


Abb. 5 Schwingungen auf einem rollenden Reifen; 150 Hz-Mode (links) und 1'500 Hz-Mode (rechts).

Die so verursachten Reifenschwingungen wirken sich auf die Geometrie der Kontaktfläche zwischen Reifen und Fahrbahn und damit wiederum auf die in diesem Bereich wirkenden Kräfte aus. Das System ist also nicht rückwirkungsfrei. Daher muss bei der Berechnung der Kontaktkräfte zusätzlich zum Kontaktmodell ein Reifenschwingungsmodell mit einbezogen werden, welches die zeitliche und räumliche Bewegung der Reifenstruktur berechnet.

Die im Reifen induzierten mechanischen Schwingungen bewirken auch Geräusche, die innerhalb des geschlossenen Reifentorus, also dem Raum zwischen Reifeninnenwand und Felge, entstehen. Diese Geräusche sind tieffrequent mit einem ausgeprägten Schalldruckpegelmaximum im Frequenzband bei 500 Hz (Torusresonanz) und können, je nach Fahrbahnoberflächentextur, sehr hohe Schalldruckpegel von 140 dB erreichen. Diese Geräusche werden durch den Reifen sehr gut gedämmt, können im tiefen Frequenzbereich dennoch zu dem im Fernfeld registrierten Reifen-Fahrbahn-Geräusch beitragen. SPERoN enthält ein einfaches Modell, das den Beitrag der Torusresonanz in Abhängigkeit von der Fahrbahntextur berechnet.

Als weiterer wesentlicher Geräuschentstehungsmechanismus wird in SPERoN eine das aerodynamische Geräusch im Reifen-Fahrbahn-Kontakt repräsentierende Komponente berechnet. Das Berechnungsmodul berücksichtigt zwei Größen, die die plötzliche Beschleunigung der Luft in der Kontaktzone beeinflussen. Dies sind die lokale Deformation des Reifenprofils durch die Fahrbahnoberflächentextur als dynamische Grösse und der statische Strömungswiderstand im Reifen-Fahrbahn-Kontakt, wie er auch im vorliegenden Projekt gemessen wird. Das für das vorliegende Projekt benutzte aerodynamische Teilmodell wurde empirisch aus Messungen der Reifen-Fahrbahn-Geräusche in Abhängigkeit von einer Vielzahl von Fahrbahnoberflächen- und Reifenparametern und von der Geschwindigkeit abgeleitet.

SPERoN berechnet im Einzelnen die Teilschallpegel folgender Schallquellen:

- L_{total} Gesamtschalldruckpegel aller Teilschallquellen in dB(A)
- $L_{mech.}$ Teilschallpegel aufgrund mechanischer Anregung in dB(A)
- $L_{aero.}$ Teilschallpegel aufgrund aerodynamischer Anregung in dB(A)
- L_{cavity} Teilschallpegel aufgrund von mechanisch angeregten Hohlraumresonanzen im Inneren des Reifentorus in dB(A)
- $L_{res.}$ Residualanteil, Teilschallpegel aufgrund von Strömungsgeräuschen an der Karosserie in dB(A)

Es gilt:

$$L_{total} = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{mech.}}{10 \text{ dB(A)}}} + 10^{\frac{L_{aero.}}{10 \text{ dB(A)}}} + 10^{\frac{L_{cavity}}{10 \text{ dB(A)}}} + 10^{\frac{L_{res.}}{10 \text{ dB(A)}}} \right) \text{ dB(A)}$$

Für die Berechnung müssen folgende Eingangsdaten in SPERoN eingespeist werden:

- Fahrbahnoberflächentextur in Form von 6 parallelen Texturlängsprofilen mit einer Auflösung von 0.2 mm in Längsrichtung und 0.01 mm in Z-Richtung. Der Querabstand der Längsprofile sollte 20 mm betragen, so dass eine Breite von 100 mm abgedeckt wird. Die Länge der Profile muss 2 m betragen, weshalb die in EP4 mit hoher lateraler Auflösung gemessenen 3D-Texturen aufbereitet werden müssen. Die entsprechende Methodik ist in Kap. 3.1.4 beschrieben.
- Strömungswiderstand, gemessen nach dem in Kap. 3.2 beschriebenen angepassten Verfahren
- Schallabsorptionsgrad, gemessen nach dem in Kap. 3.3 beschriebenen angepassten Messverfahren

Die Berechnungen werden für einzelne Pneus und Geschwindigkeiten nacheinander durchgeführt. In einer Datenbank stehen 36 PW-Pneus zur Auswahl. Alle Pneus wurden durch Messungen der Eingangsimpedanz und des 3D-Reifenprofils charakterisiert und die für SPERoN-Berechnungen notwendigen Parameter wie Biegesteifigkeit in Längs- und Querrichtung, Masse, Spannung, Bettungssteife und Oberflächentextur in einer Datenbank abgelegt. Die Geschwindigkeit kann frei gewählt werden.

3 Messverfahren

Die vorgesehenen Messverfahren bedurften eines unterschiedlichen Grads der Anpassung. Für die Texturmessung wurde ein komplett neues Verfahren entwickelt, die Messung des Strömungswiderstands erforderte das Design und die Kalibrierung eines neuen Messfusses, die Absorptionsgradmessung musste im Hinblick auf kürzere Messabstände und nahegelegene schallreflektierende Hindernisse optimiert werden und die Impedanzmessung erwies sich als prinzipiell wenig geeignet im Prüfstand, so dass das Verfahren nach ersten Testmessungen nicht weiter angewandt wurde.

3.1 Anpassung der Texturmessung

3.1.1 Ausgangslage

Die Textur der Belagsoberfläche muss für verlässliche Aussagen mit dem Rechenmodell SPERoN für die Simulation von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen eine Länge von 2 m aufweisen. Da SPERoN den Rollvorgang berechnet, um dynamische Kontaktkräfte zu ermitteln, müssen Periodizitäten der Eingangsdaten für die Fahrbahntextur innerhalb einer Radumdrehung vermieden werden. Bei 2 m Profillänge der Textur entspricht diese gerade etwa dem Umfang eines PW-Reifens, weshalb die genannten Periodizitäten nicht auftreten.

Im Prüfstand muss davon ausgegangen werden, dass die Einbaulänge der Prüfkörper aus Praktikabilitäts- und Wirtschaftlichkeitsgründen weniger als 2 m beträgt. Ausserdem müssen in Querrichtung des Fahrbahnbelags mehrere parallele Texturprofile aufgenommen werden, um ein quasi dreidimensionales Abbild der Fahrbahnrauigkeit in der Reifenrollspur zu erhalten. Dies erfordert eine repräsentative dreidimensionale Abbildung der Oberfläche des Prüfkörpers unter der Bedingung der gegenüber der Realität verkürzten Abmessungen der Messfläche. Die mit verkürzten Abmessungen erhobene Textur muss so für SPERoN rekonstruiert und aufbereitet werden, dass jeweils ein Datensatz entsteht, der von SPERoN verlässlich berechnet werden kann. Hierbei spielt die Isotropie der Fahrbahnrauigkeit eine Rolle. Isotrope Rauigkeiten, wie sie bei vielen Fahrbahnbelägen vorliegen, lassen es zu, 2 m lange Texturprofile aus kürzeren Einzelprofilen zusammenzusetzen. Das Zusammensetzen muss jedoch ohne Sprungstellen und unter Beibehaltung des Ähnlichkeitsmasses benachbarter Texturabschnitte erfolgen. Anisotrope Texturen, wie sie beispielsweise bei Betonoberflächen auftreten, erfordern eine höhere Auflösung der Texturmessung in Querrichtung und ein anderes Vorgehen bei der Zusammensetzung von Einzelprofilen. Die Prüfung der Isotropie der Oberflächentextur ist deshalb Voraussetzung für die Rekonstruktion der Textur.

3.1.2 Rekonstruktion aus kurzen Messprofilen

Das Simulationstool SPERoN benötigt als Textureingabedaten sechs in Fahrtrichtung orientierte parallele Texturprofile von zwei Metern Länge. Dieses Längenmass entspricht in etwa dem typischen Abrollumfang eines Personenwagenreifens. Im IMPACT Prüfstand stehen Probelplatten von etwa einem halben Meter Länge zur Verfügung. Bei Texturmessungen im Prüfstand kann man folglich nur Teilabschnitte der benötigten Texturprofile messen und muss diese Teilabschnitte am Rechner zu zwei Meter langen Stücken zusammensetzen. Die im Prüfstand gemessenen und zusammensetzenden Teilabschnitte sollten parallel zur Abrollrichtung liegen und statistisch möglichst unabhängig voneinander sein, was bedeutet, dass der laterale Messabstand zwischen den Einzelprofilen möglichst grösser sein sollte als die Korrelationslänge senkrecht zur Abrollrichtung. Typischerweise genügt dazu ein Abstand von der maximalen Korngrösse des Belags, womit die benötigte Datenmenge auch auf schmalen Prüfkörpern messbar ist.

Das direkte Aneinanderhängen der Einzelprofilstücke führt notwendigerweise zu einer Unstetigkeit an den Kontaktpunkten der Teilstücke (*Abb. 6, Variante 1*). Die vertikale Höhe dieser Unstetigkeit wird hauptsächlich von den langwelligen Anteilen des Textur-

spektrums bestimmt. Im Prinzip könnte man diese Anteile mit einem Hochpassfilter entfernen, würde sich aber durch das Einschwingen des Filters am Signalanfang Artefakte einhandeln und das Profilstück verändern. Die numerisch günstigere Variante besteht aus einem glatten Aneinandersetzen der Einzelprofilstücke. Dabei lässt man eine Überlappung der Profilstücke zu und addiert im Überlappungsbereich beide Profile mit einer Wichtungsfunktion, die zum Rand des Einzelstücks hin gegen Null geht. Einige Millimeter Überlappungsbereich verändern erfahrungsgemäss die Gesamtstatistik nicht signifikant und reichen aus, um die Unstetigkeitsstellen zu glätten. Gänzlich ohne Filterung kommt die Vorgehensweise aus, die in *Abb. 6* mit Variante 2 bezeichnet ist. Hier wird jedes ausgewählte Einzelprofil wiederholt gespiegelt, so dass jeweils gleiche Endstücke aneinandertreffen, wodurch ein stetiges SPERoN-Profil garantiert ist. Aus nur sechs kurzen Messprofilen ergeben sich damit sechs SPERoN-Profile. Variante 2 ist daher die empfehlenswerte Vorgehensweise.

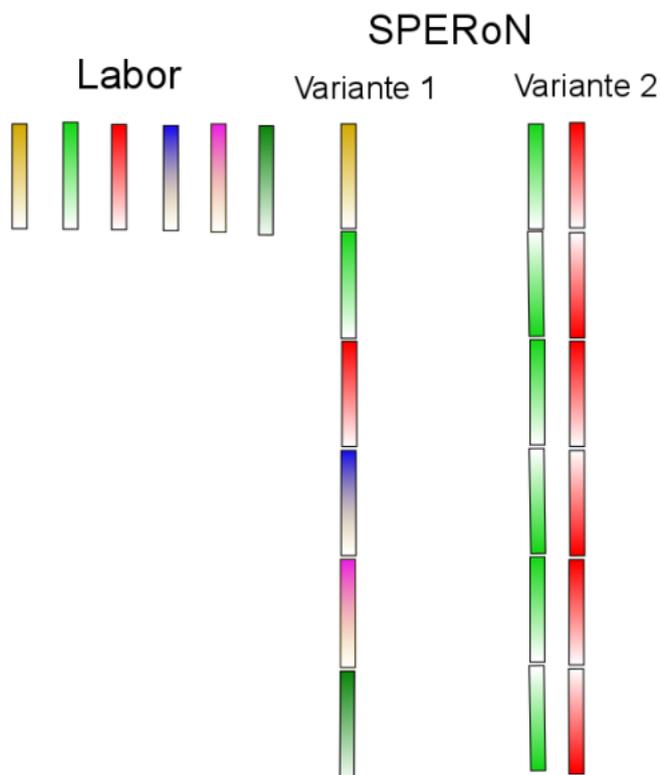


Abb. 6 Schematische Darstellung der Rekonstruktion. An den Kontaktpunkten der Einzelprofile kann es zu Unstetigkeiten kommen (siehe Variante 1), die zu vermeiden sind, z.B. indem man die Einzelprofile wiederholt an ihren Enden spiegelt (Variante 2).

3.1.3 Messmethoden zur Bestimmung einer 3D-Flächentextur

Im Zusammenhang mit akustisch relevanten Oberflächentexturen von Strassen interessieren Messsysteme mit vertikalen Auflösungen von 10 Mikrometern und horizontalen Auflösungen von 200 Mikrometern. Eine Literatursuche weist auf mögliche Messverfahren (*Abb. 7*) hin.

Wegen Wellenlängen von rund 0.5 Mikrometern des sichtbaren Lichts sind optische Verfahren prinzipiell gut geeignet, die angestrebte Auflösung zu erreichen. Triangulation, direkte Messung, Konfokaltechnik und optische Interferometrie sind anwendbar (siehe Graphik unten). In kommerziellen Messsystemen werden die unten kurz beschriebenen Verfahren (Triangulation, Lichtschnittverfahren, Streifenprojektion, Photogrammetrie, Weisslicht-Interferometrie, Konfokaltechnik) oftmals kombiniert.

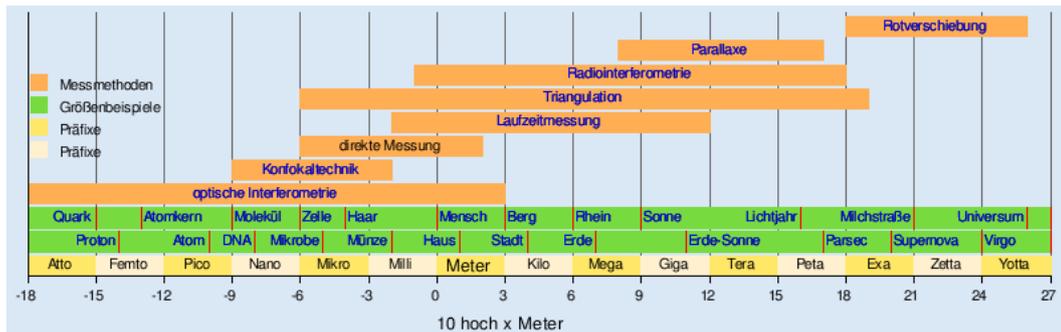


Abb. 7 Messverfahren zur Texturbestimmung auf verschiedenen Skalen (Wikipedia).

Triangulation und Lichtschnittverfahren

Ein gefächerter Lichtstrahl wird unter einem bekannten Winkel auf das Messobjekt projiziert. Die entstehende Lichtebeine schneidet das Objekt entlang einer Profillinie, deren Verlauf aus dem Blickwinkel einer Kamera in Abhängigkeit von der Objekthöhe mehr oder weniger gekrümmt wird. Mit Kenntnis der Geometrie von Lichtstrahl und Kamera kann nach dem Triangulationsprinzip die exakte Höhenlinie des Objekts ermittelt werden (Abb. 8).

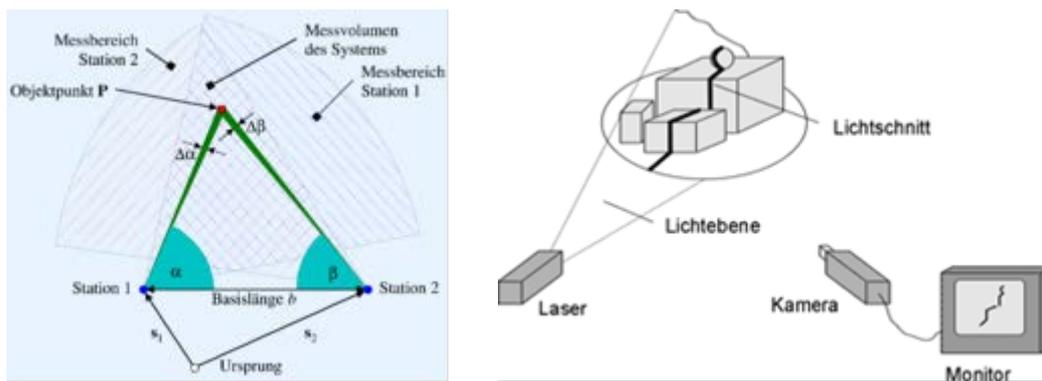


Abb. 8 Triangulationsprinzip (links): Aus Basislänge und Beobachtungswinkeln ergibt sich das Beobachtungsdreieck (Wikipedia). Lichtschnittverfahren (rechts): Die Lichtebeine schneiden das Objekt und erzeugen eine gekrümmte und/oder un stetige Kontur (Fraunhofer IFF).

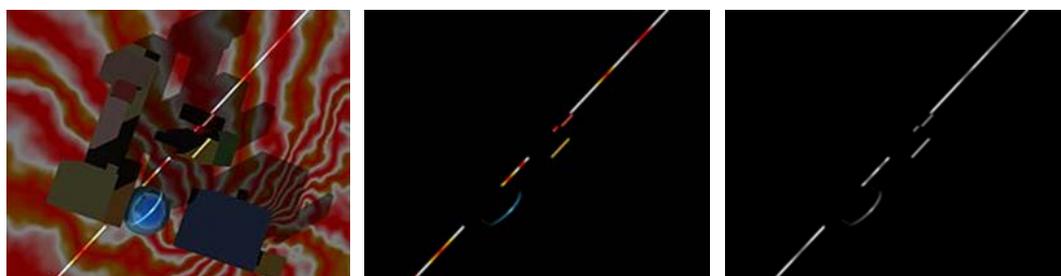


Abb. 9 Lichtschnittverfahren: Ein Lichtstrahl trifft auf ein Objekt und bildet dadurch eine Kontur ab. Sprünge in der Linie gehen auf Niveausprünge des Objektes zurück. Die Hintergrundleuchtung kann die Digitalisierung der Kontur erschweren. In Schwarz-Weiss ist dies am einfachsten (Wikipedia).

Mit zunehmendem Messwinkel zwischen Laser und Kamera steigt die Messgenauigkeit, andererseits können bei grossen Messwinkeln Objektbereiche abgeschattet werden, z.B. steile Kanten und Vertiefungen. Ein gängiger Kompromiss liegt bei Messwinkeln von 25 bis 45 Grad.

Gegenüber mehrfacher Einzelpunkttriangulationen ist eine linienhafte Projektion im Allgemeinen effizienter, weil die Digitalisierung pro Einzelpunkt viel schneller vor sich geht. Zur Erhöhung der Geschwindigkeit hilfreich sind Kameras mit integrierter Signalverarbeitung, welche die Laserlinie im Bild intern erkennen und nur diese ausgeben. Dazu kann senkrecht zum aufgezeichneten Strahlprofil eine lasertypische Gauss-Verteilung der Lichtintensität angenommen werden und somit das Intensitätsmaximum und damit der Messpunkt subpixelgenau interpoliert werden (Abb. 9). Für die Transformation des 2D Fotos in den 3D Raum wird im Allgemeinen die vermessungstechnische Zentralprojektion (wie bei einer Lochkamera) angewandt, wobei die Kollinearitätsgleichungen über eine photogrammetrische Bündelblockausgleichsrechnung gelöst werden.

Grenzen des Verfahrens:

- Beobachtungsapertur (Blendenöffnung der Kamera): bestimmt die Tiefenschärfe, d.h. den räumlichen (vor allem vertikalen) Messbereich.
- Oberflächentextur: Ausgeprägte Riefenstrukturen oder lokal spiegelnde Oberflächen führen zu sehr hohen Dynamikunterschieden in der Bildhelligkeit, so dass Details (Grauabstufungen) verloren gehen können. Das Messsystem wird dann leicht übersteuert.
- Triangulationswinkel: Grosse Winkel verringern die Messunsicherheit, verursachen jedoch Abschattungen an steilen Kanten, wo die Messfehler um eine Grössenordnung höher sein können. Eine Kombination mehrerer Kameras und Winkel kann hier helfen.
- Lichtsensor, Specklerauschen: Bei Beleuchtung mit kohärentem Licht erscheint eine raue Oberfläche nicht gleichmässig hell, sondern weist durch konstruktive und destruktive lokale Interferenz der reflektierten Wellen an ‚Bergen‘ und ‚Tälern‘ eine körnige Struktur (Speckle) auf. Dieses optische Rauschen kann durch eine grössere Apertur der Beobachtungsoptik reduziert werden, dadurch nimmt aber die Schärfentiefe der Kamera und damit der (vertikale) Messbereich des Sensors ab. Eine grössere Anzahl der CCD-Pixel erhöht die Genauigkeit der Konturmessung.

Streifenprojektion

Streifenprojektion bezeichnet die flächenhafte Projektion von Streifenmustern auf einem Objekt, die Aufzeichnung des Schnittlinienbilds der Intensitätsverteilung mit der Objektoberfläche mittels eines flächenhaften Detektors und hierüber die bildhafte Triangulation der gesamten Messszene zur Bestimmung der 3D Koordinaten der Objektoberfläche. Das Objekt bewirkt im Strahlengang eine Phasenmodulation des Streifenmusters (Abb. 10).

Kernstück der Streifenprojektions-Messsysteme ist der Projektor. Wichtige Eigenschaften sind:

- Grosse Schärfentiefe
- Hohe Leuchtdichte
- Möglichkeit variable Muster zu projizieren
- Schnelles Umschalten zwischen den Mustern
- Exakte, reproduzierbare Positionierung der Muster

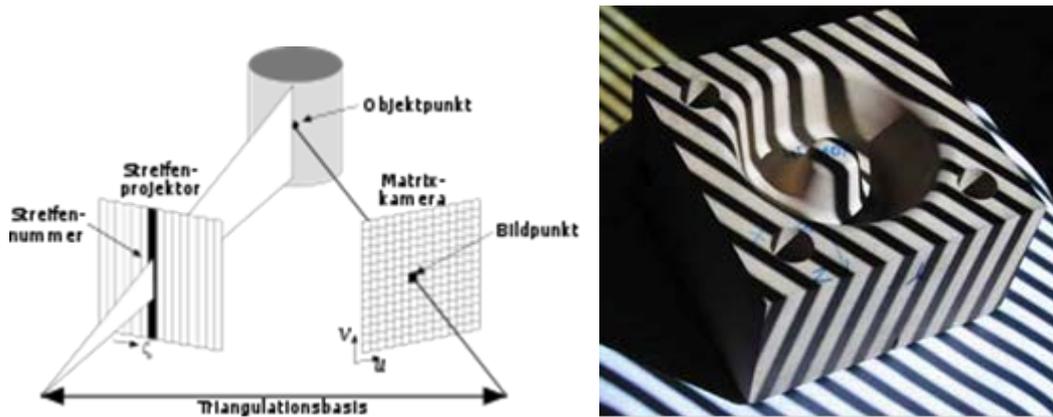


Abb. 10 Prinzip der Streifenprojektion. Die Intensitäten der projizierten Streifen werden vom Objekt phasenmoduliert und von einer Digitalkamera registriert (Wikipedia und Fraunhofer IOF).

Die Streifengitter wurden früher mit optischen Strichplatten erzeugt, heutzutage aber mit Hilfe verschiedener Arten von Mikrodisplays (LCD, LCoS, DMD), und zwar sehr schnell, ohne Phasenschiebefehler, ohne mechanisch bewegte Teile und in Farbe. Die Mikrodisplay-Pixel lassen sich einzeln ansteuern.

Durchlicht-LC-Displays (LC=Liquid Crystal) arbeiten optisch wie ein Transmissionsgitter, wobei die Flüssigkristallschicht die Polarisationsrichtung des Lichtes abhängig von der angelegten Spannung dreht. Da die Elektronik selbst undurchsichtig ist, beträgt der Füllfaktor nur 50 Prozent und eine vergleichsweise aufwendige Kühlung ist notwendig, um Überhitzung und optische Fehler zu vermeiden.

Reflektive LCoS-Displays (LCoS=Liquid Crystal on Silicon) sind reflektierende LCDs. Auf der Rückseite des LC-Displays (wohinter sich die Steuerelektronik befindet) reflektiert eine Aluminiumschicht Licht vorgegebener Polarisation. Dadurch sind eine spannungsgesteuerte Helligkeitsmodulation bei einem Füllfaktor von 90 Prozent und hohe Lichtausbeuten möglich.

DMD-Displays (DMD=Digital Mirror Device) bestehen aus einem Array mechanisch kippbarer Mikrospiegel, die durch elektrostatische Kräfte um einige Grad ausgelenkt werden. Der Strahlengang des Projektors ist so justiert, dass die Spiegel das Licht entweder zur Projektionsoptik oder auf einen Absorber lenken. Graustufen werden durch binäre Pulsmodulation erzeugt. Mittels Farbrädern können auch Farbmuster projiziert werden. DMD-Displays sind leicht kühlbar und schnell schaltbar.

Bei der Streifenprojektion misst die Matrixkamera ortsabhängige Intensitätsänderungen der Form

$$I_M = I_0 (1 + m \cos(\Phi_M + \Delta_k))$$

Mit m =Modulation durch das Objekt ($0 \leq m \leq 1$), I_0 =mittlere Intensität, I_M =Intensität am Messpunkt, Φ_M = Intensität am Messpunkt, Δ_k = vorgegebene Phasenverschiebung, z.B. für k Mehrfachmessungen.

Die Phasenmessung mit Phasenverschiebungen hat den Vorteil, dass Fehlereinflüsse durch unterschiedliche Reflektions- und Streueigenschaften der Oberfläche oder inhomogene Beleuchtung stark reduziert werden können.

Die Phasenbestimmung ist nicht eindeutig, weil sie nur Modulo(2π) erfolgen kann. Um absolute Phasenmessung zu ermöglichen, werden bestimmte Bildsequenzen projiziert (via Graycode-Algorithmen (z.B. Verdoppelung der Streifendichte von Bild zu Bild), Farbkodierungen und Mehrwellenlängenverfahren (Heterodynphasenschiebverfahren)). Eine

Selbstkalibrierung des Messsystems ist möglich, z.B. durch das Projizieren einer um 90 Grad verdrehten Sequenz und anschließender photogrammetrischer Auswertung.

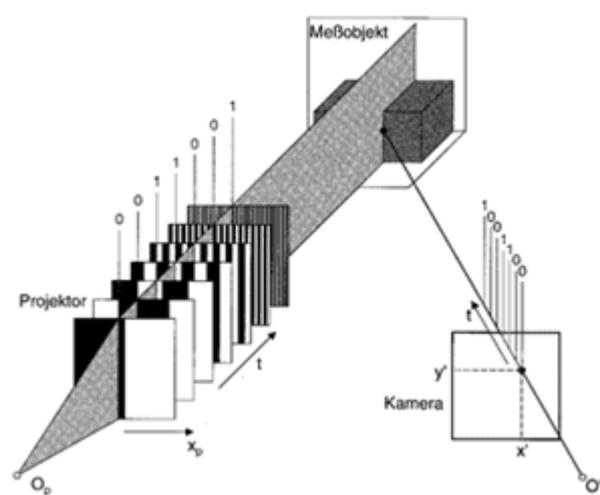


Abb. 11 Gray-Code Modulation: Eine feste Folge von leicht veränderten Bildern wird nacheinander projiziert, um die Phasenmehrdeutigkeit aufzuheben (Fraunhofer IOF).

Photogrammetrie

Unter Photogrammetrie versteht man die Registrierung und räumliche Rekonstruktion von räumlichen Objekten anhand von fotografischen Abbildungen. Zur Umrechnung werden die Betrachtungswinkel der einzelnen Bildpunkte und die Abstände zu den Aufnahmepunkten benötigt. Hier interessiert der Teilbereich der Nahfeldphotogrammetrie.

Bekannt sein muss die räumliche Position und Orientierung der Kamera (äußere Orientierung) und die Abbildungsgeometrie der Kamera mit ihren Verzerrungsfehlern (innere Orientierung), letzteres damit der jedem Bildpixel zugeordnete Einfallswinkel korrigiert werden kann (mittels der Korrekturdatei des Herstellers). Wird das traditionelle rechtwinklige Koordinatensystem (welches von der Bildprojektion auf einer Ebene ausgeht und auf 180 Grad Bildwinkel beschränkt ist) durch sphärische Koordinaten ersetzt (d.h. benachbarte Pixel haben eine konstante Winkeldifferenz und 360-Grad Bilder können im Prinzip entstehen) so ist eine schnellere und verlustärmere Datenverarbeitung möglich.

Im Allgemeinen sind mindestens zwei Aufnahmen von verschiedenen Standorten notwendig, um die räumliche Rekonstruktion zu ermöglichen. Ein Spezialfall ist die stereoskopische Aufnahme, bei der zwei Aufnahmen gleichzeitig unter verschiedenen Winkeln erfolgen (Abb. 12). Mittels Triangulation (z.B. vorgegeben sei der Abstand der beiden Beobachtungspunkte und gemessen wird jeweils der Beobachtungswinkel) lässt sich die Position des Objektpunktes berechnen. Ein komplexes Image-Matching ist notwendig, um die Zusammengehörigkeit zweier Aufnahme-pixel von verschiedenen Fotos zu erkennen. Das Matching wird für bestimmte Geometrien sehr vereinfacht, z.B. für eine gleichmässig bewegte Kamera und feste zeitliche Aufnahmeabstände. Eine weitere Vereinfachung ergibt sich bei Verwendung von Zeilenkameras, die für quasi-endlose bewegte Objekte nicht nur schnell sind, sondern auch optisch sehr gut kalibrierbar.

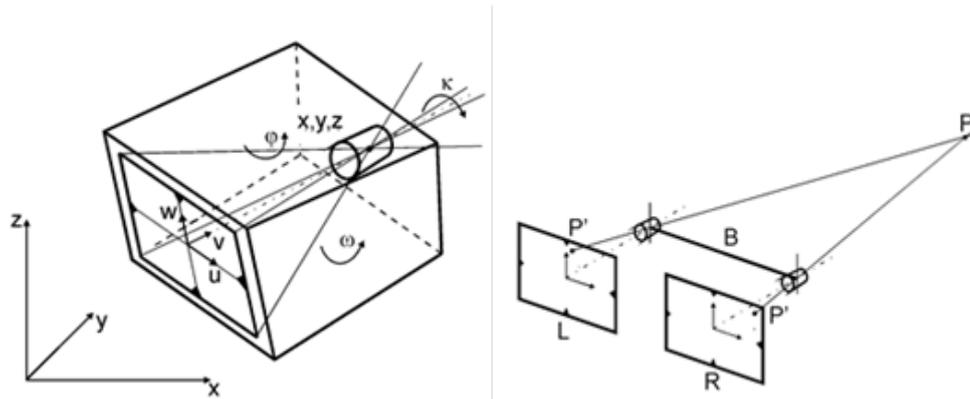


Abb. 12 Innere Orientierung (links) und Prinzip der Stereoskopie (rechts) (Dr. Causs GmbH).

Eine Sonderform der Zeilenkamera ist die programmierbare Line-Array Kamera, bei der auf einem CMOS-Flächensensor einzelne, in der Fläche ‚verschiebbare‘, Zeilensensoren ausgelesen werden können. Sie kann als Zeilenkamera oder vollwertige Matrixkamera benutzt werden (Abb. 13).

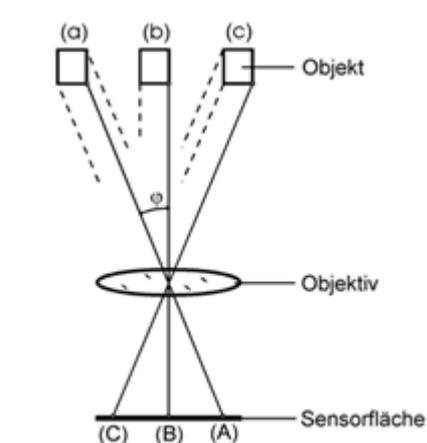


Abb. 13 Line-Array-Kamera: Das Objekt wird an verschiedenen Positionen (a, b, c) unter verschiedenen Perspektiven auf unterschiedlichen Pixeln des Sensors abgebildet (A,B,C) (Dr. Causs GmbH).

Weisslichtinterferometrie

Moderne Weisslicht-Interferometer bestehen aus einer Lichtquelle mit einer Kohärenzlänge im μm -Bereich, einem Strahlteiler, einem Referenzspiegel und einer CCD-Kamera mit Objektivsystem (Abb. 14). Objekt- und Referenzstrahl interferieren miteinander konstruktiv, wenn der Weg zwischen Strahlteiler und Objekt exakt dem Weg zwischen Strahlteiler und dem Referenzspiegel entspricht. Weisses Licht besitzt gegenüber farbigem Licht die kürzere Kohärenzlänge und erlaubt damit eine höhere Auflösung.

Der mikroskopische Aufbau des Weisslicht-Interferometers (Abb. 15) erlaubt eine bessere laterale Auflösung, aber nur kleine Messfelder und einen kleinen vertikalen Messbereich. Der telezentrische Aufbau erlaubt laterale Auflösungen von einigen (zehn) Mikrometern bei einem vertikalen Messbereich von einigen Zentimetern.

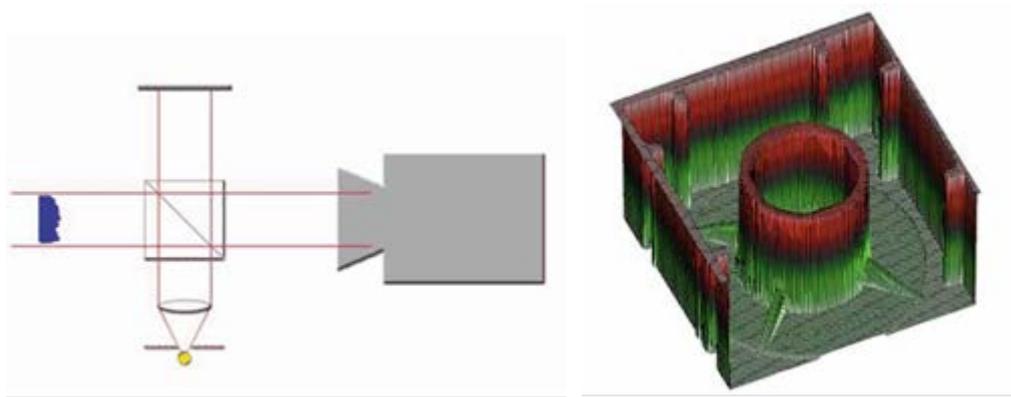


Abb. 14 Schema eines telezentrischen Aufbaus eines Weisslicht-Interferometers (links, Polytec GmbH) und beispielhafte 3-D Darstellung eines vermessenen Spritzgusstelements (rechts, Polytec GmbH).

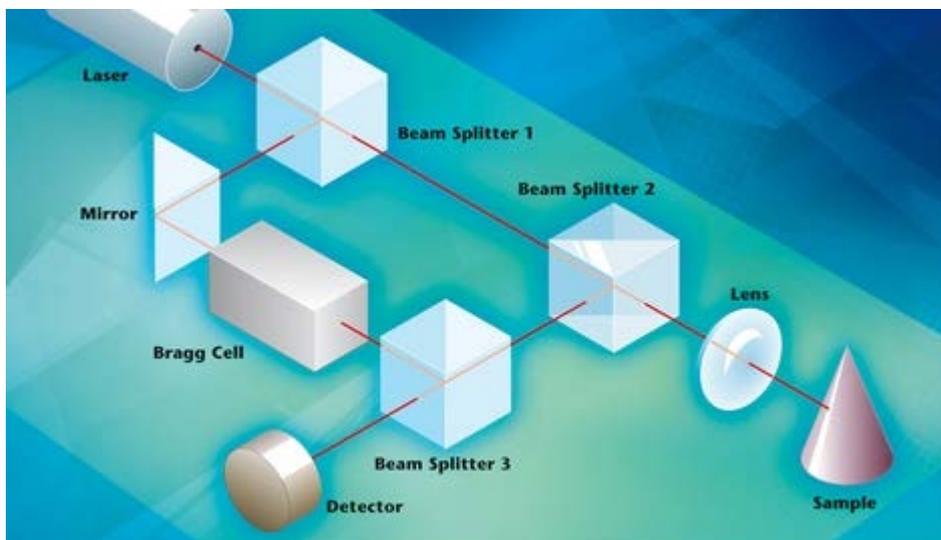


Abb. 15 Prinzipieller Aufbau eines Interferometers. Die Bragg-Zelle lässt nur eine bestimmte Bandbreite von Wellenlängen durch (Polytec GmbH).

Konfokaltechnik

Konfokaltechnik nutzt die Tatsache, dass Beleuchtungsstrahlengang und Beobachtungsstrahlengang einen gemeinsamen Brennpunkt besitzen, wenn ein Objekt fokussiert ist. Blenden (Pinholes) werden benutzt, um Beleuchtungs- und Beobachtungsbereich einzuschränken. An den Sensor wird nur dann ein Signal gegeben, wenn der Messpunkt genau im Fokus der Messoptik liegt, wozu das Objekt oder die Messoptik verschoben wird und die Verschiebung mit einem Referenzwert verglichen wird. Im Prinzip misst man bei der Konfokaltechnik immer punktwise (Abb. 16). Konfokale Elemente können in verschiedenen Messtechniken enthalten sein. Laser-Scanning Mikroskope und konfokale Mikroskope sind typische Anwendungen der Konfokaltechnik.

Chromatisch konfokale Sensoren kombinieren weisses Licht und eine dispersive Optik, bei der unterschiedliche Farben einen unterschiedlichen Fokus haben. Dadurch benötigt ein chromatisch konfokaler Sensor im Prinzip keine Abtastbewegung entlang der optischen Achse.

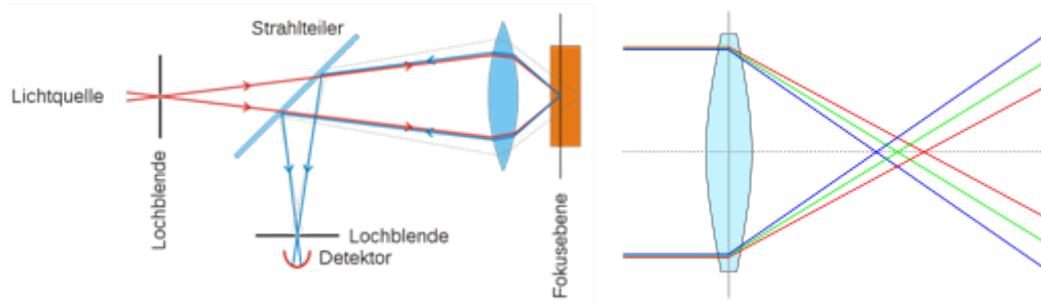


Abb. 16 Schema eines konfokalen Punktsensors (links, Wikipedia) und eines chromatisch konfokalen Sensors, der unterschiedliche Farben an verschiedenen Punkten fokussiert (rechts, Wikipedia).

Bei der konfokalen Profilometrie nutzt man die Gemeinsamkeit aller konfokalen Messverfahren aus, nämlich dass sie im Idealfall (bei einer deutlich definierten Objektoberfläche) die unten dargestellte Antwortfunktion über der Objekthöhe erzeugen. Diese Funktion nennt man daher auch *Konfokalkurve* (Abb. 17). Ihre Halbwertsbreite (*full width half maximum*, FWHM) ist im Wesentlichen von der numerischen Apertur des Objektivs abhängig. Die Objekthöhe ergibt sich aus dem Ort des Maximums auf der z-Achse. Zur Bestimmung des Maximums verwendet man ein mit den Intensitätswerten gewichtetes Mittel der z-Position. Damit lässt sich eine Genauigkeit der Positionsbestimmung erreichen, die bei wenigen Nanometern liegt. Diese ist um ein Vielfaches besser als die optische Auflösung entlang der z-Achse, die in etwa der Halbwertsbreite der Konfokalkurve entspricht und bei sichtbarem Licht mindestens 500 Nanometern entspricht.

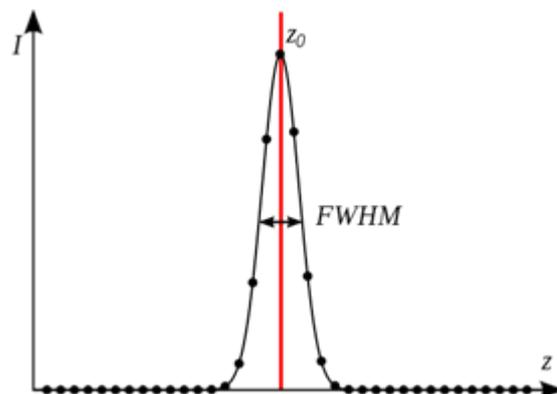


Abb. 17 Schema einer Konfokalkurve mit der Intensität I und der Tiefencoordinate z (Wikipedia).

3.1.4 Entwicklung einer 3D-Flächentextur-Messmethode

Nach ausgiebiger Marktforschung hat sich die Müller-BBM Schweiz AG für ein modernes 3-D Texturmesssystem auf Basis der Streifenprojektionstechnik entschieden. Solche Systeme werden überwiegend im industriellen Bereich angewandt, etwa zur automatischen Qualitätskontrolle in der Fertigung. Sie wurden bisher jedoch noch nie auf Strassenfahrbahnbelägen oder anderen ähnlich strukturierten Oberflächen eingesetzt. Aus diesem Grund hat Müller-BBM mit dem Hersteller eine Kooperation vereinbart, die es erlaubt, die Hardware in ein auf die Zwecke von EP4 angepasstes System zu integrieren. Das System erlaubt flächenhafte Aufnahmen von Strassenoberflächen, wobei die Einzelbilder Bereiche von gut einem halben Quadratdezimeter abdecken. Das Zusammensetzen von Einzelbildern erlaubt die Rekonstruktion und statistische Untersuchung grösserer Belagsbereiche.

Der Messvorgang und die Auswertung erfolgt in mehreren Schritten. Nach der Ausrichtung der 3-D Kamera und der Grundeinstellung des Messsystems wird zunächst eine

Folge von Streifen auf die Fahrbahnoberfläche projiziert. Die einzelnen Streifenbilder werden von der Systemsoftware analysiert, woraus eine Punktwolke von Oberflächenpunkten als (x,y,z)-Triplets generiert und abgespeichert wird (Abb. 18). Diese Punktwolke wird dann mittels eines im Projekt entwickelten Algorithmus auf ein Rechteckgitter abgebildet (Abb. 19). Dieser Interpolationsschritt (erneut illustriert in Abb. 20) ist wichtig, damit effiziente Algorithmen der digitalen Signal- und Bildbearbeitung für die statistische Untersuchung der Textur eingesetzt werden können. Da die 3-D Kamera nur kleine Objekte mit einer Einzelaufnahme erfassen kann, ist es notwendig, die Gittermodelle von Dutzenden von Einzelaufnahmen jeweils zu einem 3-D Oberflächenmodell für jede Probepalette oder in situ Messstrecke zusammenzusetzen. Positionierungsfehler oder ungenaue Ausrichtung des Sensors führen dabei zu Fehlern, die sich rechnerisch nur teilweise ausgleichen lassen. Die Qualität der Punktwolke nimmt zum Rand jeder Einzelaufnahme hin ab, u.a. weil die Punktdichte und optische Abbildungsschärfe dort geringer ist (siehe auch Abb. 18). Es hat sich bewährt, beim Abscannen der Oberfläche eine Überlappung der Einzelaufnahmen zuzulassen und Datenpunkte von den äussersten Rändern der Einzelgitter zu verwerfen. Das Abscannen sollte einer vorgegebenen Messmatrix folgen. Die Überlappung der Einzelaufnahmen bei einer typischen Messung der 3-D Textur im Prüfstand zeigt (Abb. 21). Hier wurden Einzelbilder der Grösse 44 mm mal 64 mm nach einem Aufnahmeschema von 13 mal 2 Aufnahmen kombiniert. An den Rändern überlappen die Aufnahmen geringfügig, so dass die Überdeckung dort meist den Wert zwei annimmt, an den Ecken der Einzelbilder überlagern sich bis zu vier Aufnahmen.

Um Eingangsdaten für das Simulationswerkzeug SPERoN zu generieren, werden aus dem flächenhaft zusammengesetzten Gittermodell Einzelprofile entnommen und durch wiederholte Spiegelung auf eine Länge von zwei Metern verlängert (siehe Abschnitt 3.1.2). Liegen die Daten auf einem regulären Gitter vor, lassen sich entlang beliebiger Orientierungen, linien- oder flächenhaft statistische Parameter der Texturoberfläche berechnen. Dazu gehören die Standardwerte wie die Mean Profile Depth (MPD), Estimated Texture Depth (ETD) und der Effektivwert der Rauigkeit (Root Mean Square, RMS). Aber auch der Gestaltfaktor, das Terzspektrum, Korrelationslängen oder die fraktale Dimension der Textur und andere Grössen lassen sich berechnen (Abb. 22). Anstatt der Textur selbst lassen sich auch die Zwischenergebnisse zur Berechnung charakteristischer Kennwerte darstellen. So ergibt sich der MPD-Wert als Mittelwert über die Mean Segment Depth (MSD), die über Profilabschnitte der Länge 100 mm berechnet wird. Auch der Gestaltfaktor kann jeweils für 100 mm Abschnitte berechnet und räumlich dargestellt werden (Abb. 23).

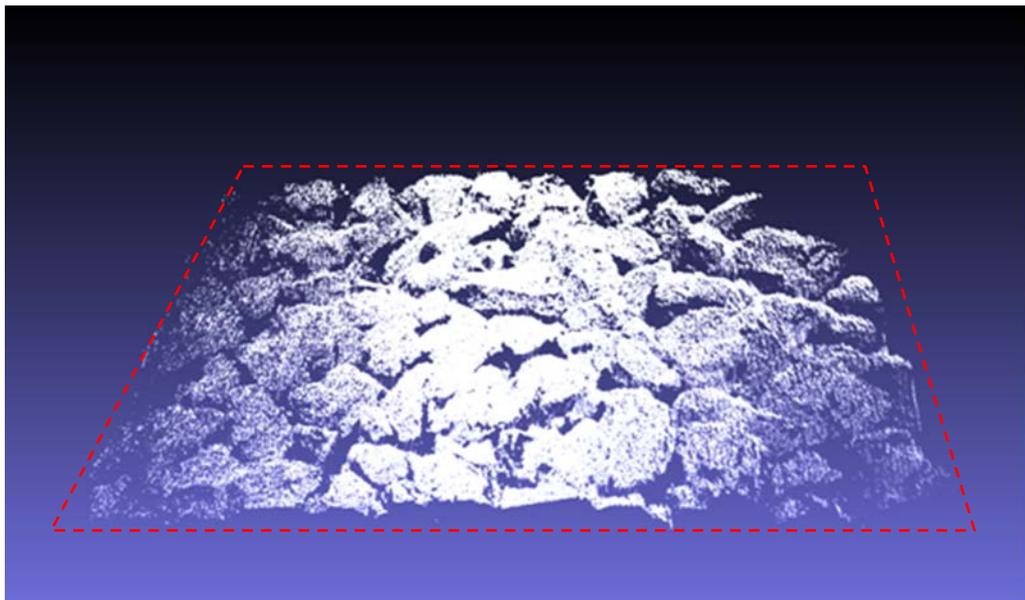


Abb. 18 Perspektivische Punktwolke einer grobkörnigen Fahrbahnoberfläche der Dimension 6 mal 12 Zentimeter (rot gestrichelte Linie).

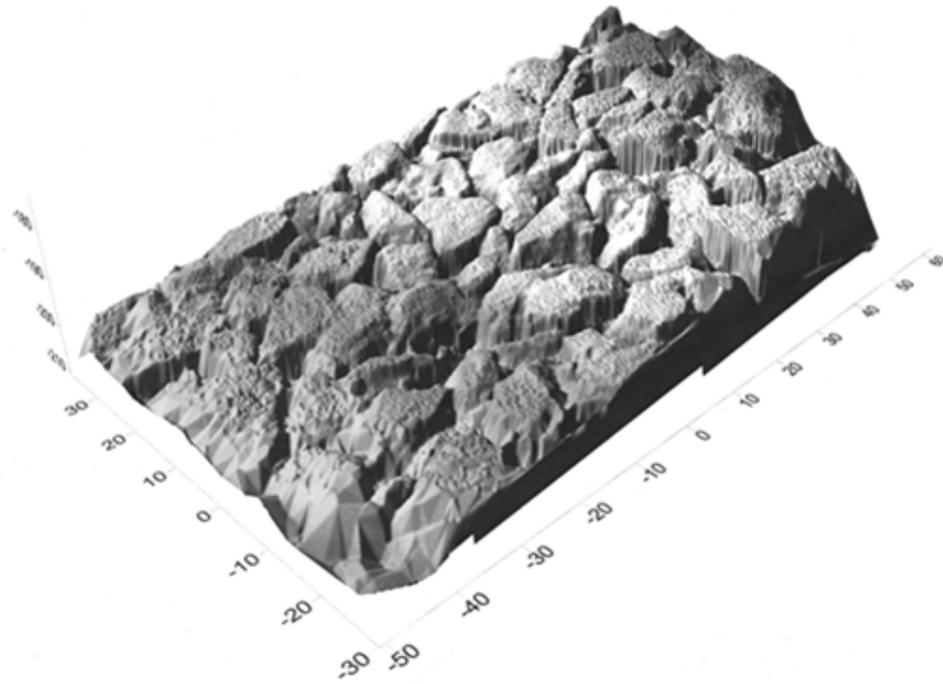


Abb. 19 Texturoberfläche von Abb. 18 nach Interpolation auf ein Rechteckgitter.

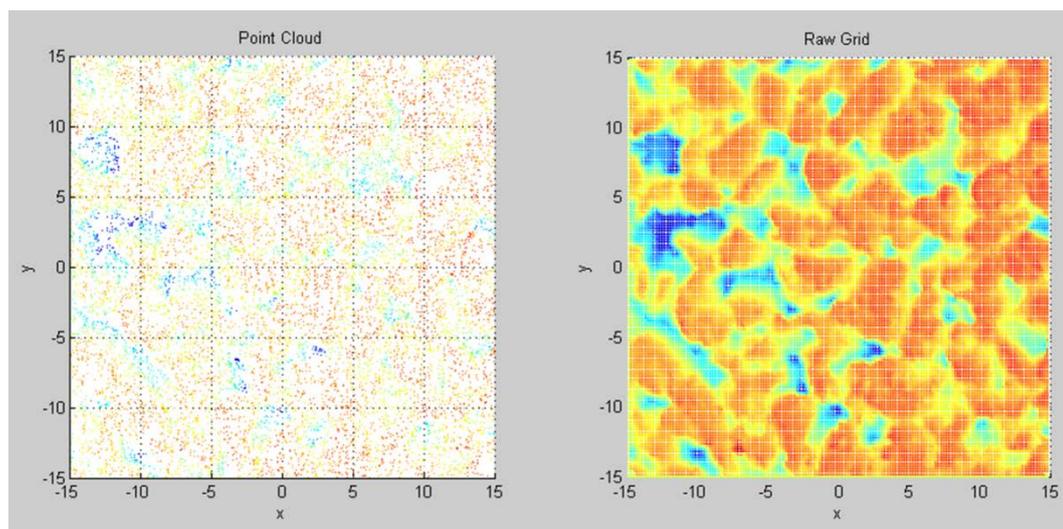


Abb. 20 Illustration des Interpolationsschrittes von der irregulären Punktwolke (links) auf ein reguläres Gitter (rechts) auf einer Fläche von 30 mal 30 Millimetern.

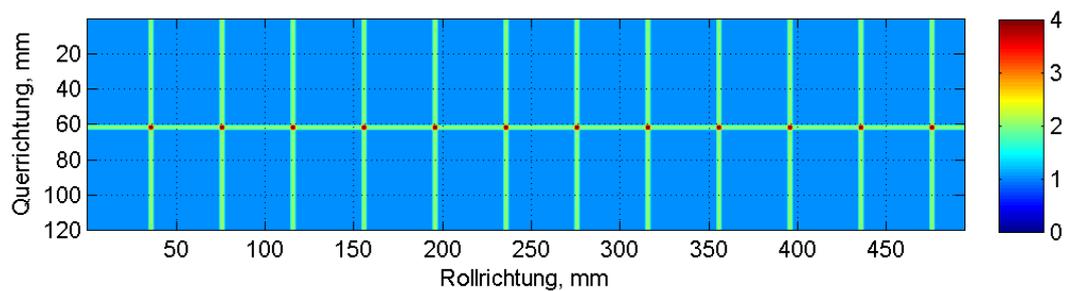


Abb. 21 Überdeckungsschema für das Erfassen einer Probeplatte mit Hilfe von 13 mal 2 Einzelaufnahmen. Die Farbe zeigt die Anzahl der überlappenden Einzelaufnahmen an.

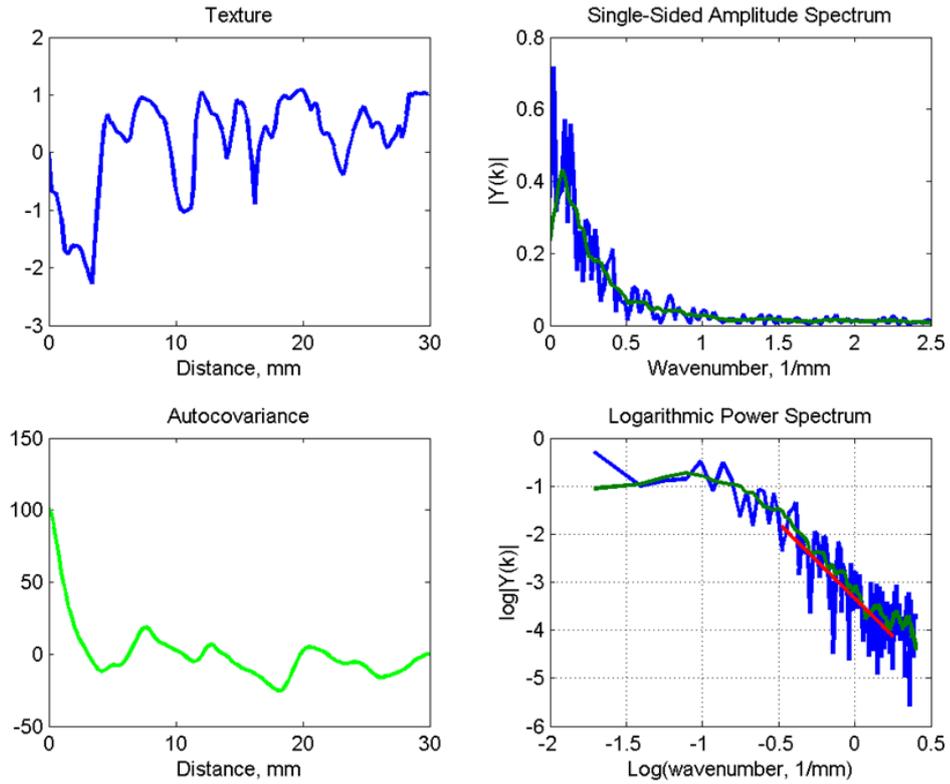


Abb. 22 Beispiele für linienhafte Analysen der Texturdaten von Abb. 20 auf einem Gitter.

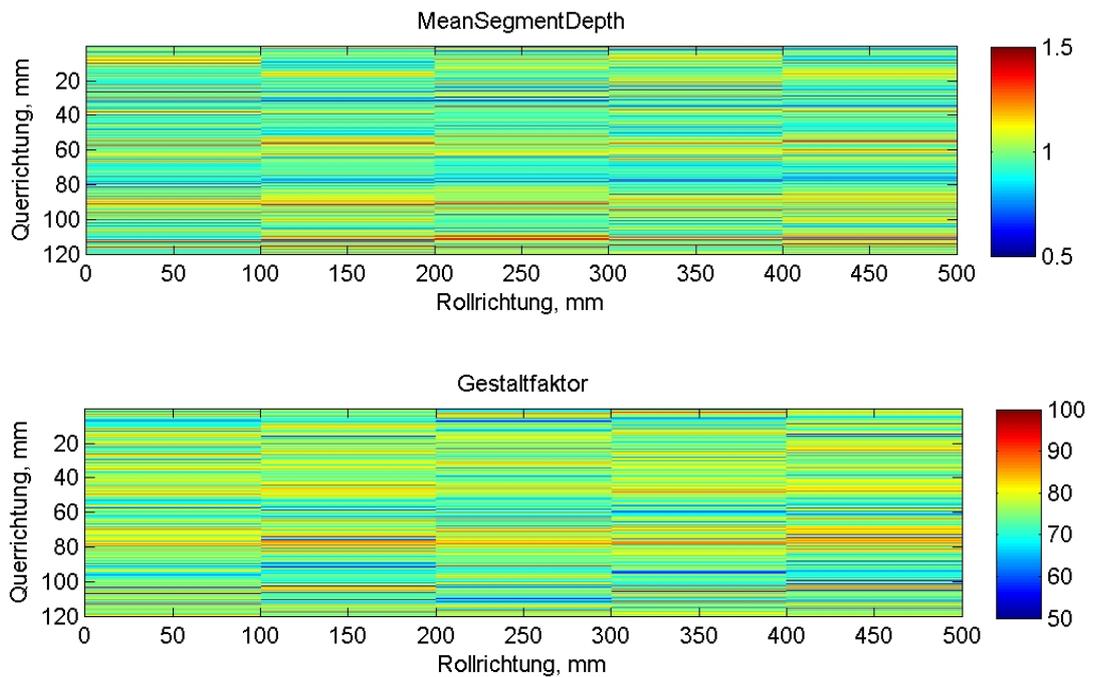


Abb. 23 Flächenhafte Darstellung der Mean Segment Depth (MSD, oben) und des Gestaltfaktors (unten) für eine entnommene Deckbelagsplatte aus Fülenbach (siehe auch Abb. 55).

3.2 Anpassung der Messung des Luft-Strömungswiderstands

Das standardmässige Messsystem für den Strömungswiderstand (in-situ) verwendet einen kreiszylinderförmigen Messfuss. Sein äusserer Durchmesser ist grösser als die Breite der IMPACT Asphalt-Prüfkörper, d.h. das abdichtende PU-Elastomer würde nicht mit der vollen Fläche aufliegen. Da somit die Messbedingungen für die Methode nicht erfüllt wären, würden die Ergebnisse an Aussagekraft verlieren.

Im Rahmen dieses Projektes wurde eine rechteckige Messapparatur angefertigt, die genau auf die Dimensionen der Probekörper zugeschnitten ist (Abb. 24). Dabei wurde darauf geachtet, dass die zu durchströmende und die abdichtende Fläche gleich gross wie bei der runden Messapparatur sind.



Abb. 24 Rechteckiger Messfuss mit Elastomer-Dichtung zur Messung des Luft-Strömungswiderstands auf einem Prüfkörper im IMPACT-Prüfstand.

In einer vergleichenden Messreihe auf unterschiedlichen Belägen wurde ermittelt, ob und auf welche Weise sich die Messwerte unterscheiden. Mithilfe einer Korrektur sollten sich die Werte umrechnen lassen.

3.2.1 Vergleichsmessung im Labor

Für den Vergleich der eckigen mit der runden Messapparatur wurden zwei neue Apparaturen aus Edelstahl mit jeweils neuem Sylomer-Ring angefertigt. Damit wurde eine Verzerrung des Vergleichs aufgrund unterschiedlich gealterter PU-Elastomere ausgeschlossen.

Für einen ersten vergleichenden Test wurde ein (nicht gealterter) Asphalt-Prüfkörper an drei Stellen mit beiden Messfüssen gemessen. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 wiedergegeben.

Tab. 1 Strömungswiderstand R_s^* in Pa·s/m eines IMPACT-Prüfkörpers bei einem Durchfluss von $q = 6$ l/min.

Topf	links	mittig	rechts
eckig	22443	27704	28517
rund	26848	27287	36148

Da die Werte insgesamt recht hoch erscheinen, wurden zusätzlich zwei Asphalt-Prüfkörper (50 mm Dicke) mit bereits bekanntem Strömungswiderstand verglichen. Die Ergebnisse sind in *Tab. 2* wiedergegeben.

Tab. 2 Strömungswiderstand R_s^* in Pa·s/m zweier bekannter Prüfkörper bei einer Strömungsgeschwindigkeit (Ablesewert) von $u = 0.0125$ m/s.

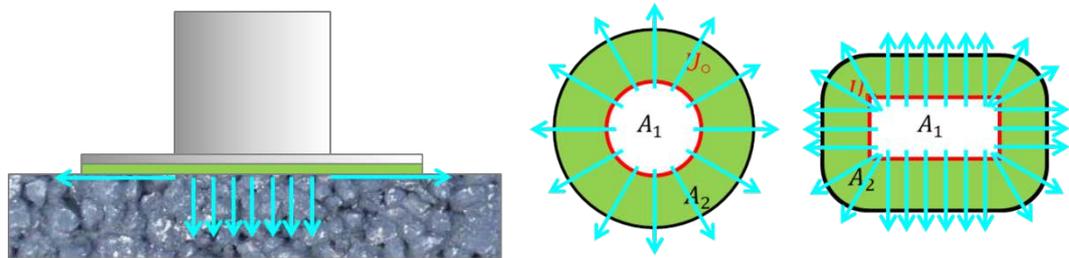
Prüfkörper	1		2	
	1	2	1	2
eckig	753	767	649	649
rund	846	850	711	706

Die ermittelten Werte stimmen hervorragend mit den bekannten Messdaten der runden Apparatur überein. Die Widerstandswerte der eckigen Apparatur sind in der Regel kleiner als bei der runden. Da die Flächenverhältnisse der beiden Apparaturen gleich sind, das Sylomer bei der runden aber nicht vollständig aufliegt bzw. abdichtet, hätte man das Ergebnis auch umgekehrt erwarten können. Eine Messung auf dichtem rauhem Beton (an selber Stelle) ergab grosse Unterschiede mit derselben Tendenz:

$$R_{s\circ}^* = 2808 \text{ Pa}\cdot\text{s/m} \quad R_{s\Box}^* = 2024 \text{ Pa}\cdot\text{s/m}$$

Da der Beton sehr dicht ist und keine zugänglichen Hohlräume aufweist, dafür aber eine raue Oberfläche, werden die tiefen Werte hauptsächlich durch die Textur bestimmt. Somit liegt die Vermutung nahe, dass sich die gemessenen Strömungswiderstände massgeblich im texturinduzierten Anteil unterscheiden.

Um dies genauer zu überprüfen, wurde zunächst die Geometrie beider Messfüsse vermessen und verglichen. Der grösste Unterschied der beiden Messfüsse liegt im Umfang der durchströmten Fläche. In *Abb. 25* sind Einzelheiten hierzu dargestellt.



$$U_{\text{rund}} = 31.4 \text{ cm} \quad U_{\text{eckig}} = 37.6 \text{ cm}$$

Apparatur	$A_1, \text{ cm}^2$	$A_2, \text{ cm}^2$	$U, \text{ cm}$
eckig	80.5	314.3	37.6
rund	78.5	308.5	31.4
Unterschied, %	2.5	1.9	19.7

Abb. 25 Vergleich der Messfuss-Geometrien.

Anschliessend wurde auf einem PVC-Belag mit gleich- und regelmässigen Rillen gemessen, siehe *Abb. 26* bis *Abb. 28*.



Abb. 26 Rillen im Detail.



Abb. 27 Aufbau rund.



Abb. 28 Markierung rund.

Aufgrund der isotropen Struktur werden umso mehr „Kanäle“ von innen nach aussen gebildet, je mehr Rillen vom inneren Umfang überquert werden. Bei der eckigen Apparatur hängt dies von der Ausrichtung zu den Rillen ab. Mit der kurzen/langen Seite quer zu den Rillen wird ein hoher/tiefer Wert gemessen (Tab. 3).

Tab. 3 Vergleich der Strömungswiderstände zwischen rundem und eckigem Messfuß bei unterschiedlicher Ausrichtung der Rillen.

R_s^* , Pa-s/m	rund	eckig		
		quer	längs	diagonal
Ausrichtung	mittig	quer	längs	diagonal
1	1824	1224	2292	1314
2	1835	1229	2327	1321

In der Tabelle bedeutet die Ausrichtung „quer“ bzw. „längs“ der rechteckigen Apparatur, dass die längeren Seiten rechtwinklig bzw. parallel zu den Rillen verlaufen. Bei der Ausrichtung „diagonal“ ist die Diagonale des inneren Rechtecks senkrecht zu den Rillen angeordnet, sodass eine maximale Anzahl von Rillen überquert wird.

Somit wurde erstmals ein Widerstandswert mit der eckigen Apparatur ermittelt, der deutlich höher als der mit der runden ist. Dies erklärt sich dadurch, dass die kürzere Seite des inneren Umfangs der eckigen Apparatur kleiner ist als der Durchmesser bei der runden.

Zur Überprüfung wurden 100 Rillen abgezählt. Sie sind insgesamt 292 mm breit, d.h. eine Rille hat eine Breite von 2.92 mm, bzw. es bestehen 3.42 Rillen pro Zentimeter. Da mit steigender Anzahl an durchströmten Rillen der Strömungswiderstand sinkt, sollte das Produkt von Rillenzahl und Strömungswiderstand in etwa konstant sein. In Tab. 4 sind die Ergebnisse dieses Vergleichs wiedergegeben.

Tab. 4 Strömungswiderstand bei Variation der Anzahl der durchströmten Rillen. *l*: Länge, *b*: Breite, *d*: Diagonallänge der rechteckigen Öffnungsfläche; \varnothing : Durchmesser der runden Öffnungsfläche

Apparatur	Relevante Grösse	Anzahl Rillen	$R_s^* \cdot n_{Rillen}$, Pa·s/m
eckig	<i>l</i> = 122 mm	41.8	51163
	<i>b</i> = 66 mm	22.6	51799
	<i>d</i> = 139 mm	47.4	62476
rund	\varnothing = 100 mm	34.2	62381

Bei der eckigen Apparatur ist die Übereinstimmung zwischen quer und längs hervorragend (oberste beiden Zeilen in Tab. 4). Allerdings liegen die Produktwerte bei dessen diagonaler Ausrichtung und der runden Apparatur deutlich höher (unterste beiden Zeilen in Tab. 4). Dies liegt am jeweils längeren Weg der Kanäle vom Inneren der Apparaturen nach aussen: Beim runden Messfuss ist die Breite des Sylomer-Rings grösser als beim Eckigen. Bei diagonaler Ausrichtung der eckigen Apparatur ist die mittlere Kanallänge ebenfalls grösser als bei paralleler Ausrichtung.

3.2.2 Vergleichsmessung auf Strassen

Um herauszufinden, ob und wie der mit der eckigen Apparatur gemessene Luft-Strömungswiderstands-Wert in einen „runden“ umgerechnet werden kann, wurden in 2012 Vergleichsmessungen auf einer breiten Variation von unterschiedlichen Deckbelägen durchgeführt ([15]). Das Datenensemble deckt Strömungswiderstände zwischen rund 4000 Pa·s/m und 40000 Pa·s/m ab und Innerortsbeläge von einem acht Jahre alten ACMR4 bis zu einem einjährigen SDA 8 C. Die Messwerte sind in Abb. 29 direkt einander gegenübergestellt. Wären die Werte gleich, würden sie auf der ersten Winkelhalbierenden liegen (im Diagramm die graue Gerade).

Bis auf kleine Ausreisser liegen die Werte auf einer Geraden. Das bedeutet, sie können mit einem einfachen Faktor umgerechnet werden. Der Mittelwert der Verhältnisse der eckigen zu runden Werten ist 0.851. Der Umrechnungsfaktor ist dessen Reziprok:

$$R_s^* = 1.175 \cdot R_{\square, gemessen}$$

Die Abweichung der umgerechneten von den runden Werten beträgt im Mittel etwa 5%, ohne Ausreisser sogar nur 3%.

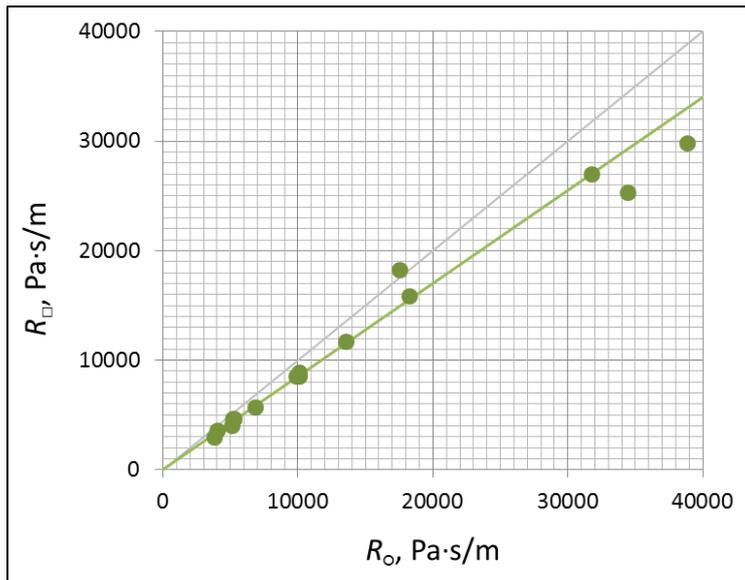


Abb. 29 Strömungswiderstand der eckigen Apparatur aufgetragen gegen den der runden, gemessen an exakt der selben Stelle.

3.3 Anpassung der Messung des Schallabsorptionsgrads

Der Schallabsorptionsgrad eines Körpers ist ein frequenzabhängiges Maß für den Anteil der absorbierten Schallenergie im Vergleich zu der einfallenden Schallenergie. Nach der Beschallung eines Probekörpers mit einem definierten Signal wird die Stärke oder Abklingrate des reflektierten Signals ausgewertet. Im Rahmen des EP5-Projektes [14] wurden verschiedene Messvarianten beschrieben und der Einzugsbereich der Absorptionsgradmessungen genauer bestimmt. Aufgrund dieser vergleichenden Untersuchungen können folgende Aussagen getroffen werden:

1. Das Hallraumverfahren nach DIN EN ISO 354 [19] benötigt Probenflächen von einigen Quadratmetern und Hallraumvolumina über 100 m^3 und ist damit für Messungen im Prüfstand ungeeignet. Eine Messvariante unter Verwendung von Hallkabinen würde eine so drastische Miniaturisierung der Hallkabinen erfordern, dass der für den Strassenverkehr relevante Frequenzbereich nicht mehr abgebildet werden könnte.
2. Die Schallabsorptionsgradmessung von Prüfkörpern im Impedanzrohr nach Norm DIN EN ISO 10534-2 [2] erfordert Probekörper, z.B. Bohrkern in das Rohr zu schieben und in diesem zu beschallen. In diesem Sinne ist das Verfahren nicht zerstörungsfrei. Das in der Literatur häufig beschriebene „Sealed Tube Verfahren“, bei dem ein Impedanzrohr direkt auf einen Fahrbahnbelag gestellt wird, ist hier ebenfalls nicht zielführend, da mit dem „Sealed Tube Verfahren“ nur Schallabsorptionsgrade $\alpha < 0.15$ mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können.
3. Das von Müller-BBM entwickelte und seit Jahren erfolgreich eingesetzte in-situ Verfahren, das eine spezielle Messsonde zur gleichzeitigen Messung von Schalldruck und Schalleschnelle einsetzt (pu-Sonde) ist eine vielversprechende Ausgangsbasis für eine Adaption an den Prüfstand [12].

3.3.1 Ausgangslage

Systeme zur zerstörungsfreien Messung des Schallabsorptionsgrades werden in der Praxis seit mehreren Jahren erfolgreich eingesetzt. Deshalb wurden im Rahmen des EP 5-Projektes verschiedene Messvarianten beschrieben und der Einzugsbereich der Absorptionsgradmessungen genauer bestimmt [14]. Aufgrund dieser Untersuchungen können folgende Aussagen getroffen werden:

Als „in-situ“-Systeme werden Messsysteme bezeichnet mit deren Hilfe es möglich ist, den Schallabsorptionsgrad von Prüfflächen im eingebauten Zustand zerstörungsfrei zu be-

stimmen. Derartige Messsysteme (unter anderem auch als „extended-surface method“ bezeichnet) bestehen aus einem Lautsprecher, von dem oberhalb der Prüffläche ein Prüfsignal ausgestrahlt wird und einem akustischen Sensor, der den Direktschall und den von der Prüffläche reflektierten Schall misst. Aus dem Verhältnis des Direktschalls und des reflektierten Schalls kann auf den Schallabsorptionsgrad der Prüffläche geschlossen werden. Der Aufbau solcher Messsysteme kann z.B. hinsichtlich des verwendeten akustischen Sensors variieren: Es sind Messsysteme mit einem einzelnen Mikrofon, mit zwei oder drei phasenkalibrierten Mikrofonen (pp- bzw. ppp-Sonde) oder einer Kombination aus einem Mikrofon und einem Schallschnellesensor verfügbar, wobei die Messgenauigkeit und der auswertbare Frequenzbereich in der genannten Reihenfolge zunimmt. Bestehende Normen beschreiben jedoch weder die praxisgerechte Verwendung der in situ Systeme noch deren Einsatzgrenzen, weshalb hier auf ein System zurückgegriffen wurde, dass bereits bewährt, wohl bekannt und gut untersucht ist.

Das Müller-BBM System verwendet einen kombinierten Schalldruck- und Schallschnellesensor (pu-Sonde). Die untere Grenzfrequenz ist von der kleinsten Abmessung der Prüffläche abhängig und liegt z.B. für eine 30 cm breite Platte bei einer Frequenz von 500 Hz. Bei dem System wird ein deterministisches Schallsignal (Sinus Sweep) auf die Prüffläche von einem Lautsprecher abgestrahlt. Die Messsonde für Schalldruck und Schallschnelle befindet sich direkt über der Oberfläche. Durch die verwendete Signalverarbeitung kann die Impulsantwort des ausgestrahlten Nutzsignals und dessen Reflexion errechnet werden. Aus den Impulsantworten kann die akustische Impedanz der Prüffläche und somit deren Schallabsorptionsgrad bestimmt werden. Mit dieser Messanordnung können alle, auch auf Fahrbahnoberflächen vorkommende Schallabsorptionsgrade von 0 bis 1 bestimmt werden.

Im Prüfstand unterscheidet sich die Situation von der Messung auf der Strasse in zweierlei Hinsicht:

1. Die Prüffläche ist kleiner
2. Es können Reflexionen aus der Nähe nicht komplett vermieden werden.

Eine kleine Prüffläche und das Bestreben, Reflexionen aus der Umgebung zu vermeiden, implizieren einen geringen Abstand zwischen Lautsprecher und Probe. Zu gering darf der Abstand aber auch nicht sein, weil sonst theoretische Annahmen des Verfahrens verletzt werden (z.B. Ausbildung einer kugelförmigen Wellenfront) und messtechnische Schwierigkeiten auftreten (z.B. wird bei der Berechnung der Schallschnelle der räumliche Gradient des Schalldrucks durch eine Differenzmessung bestimmt).

Wenn das Lautsprechersignal nicht nur auf direktem Wege die Prüffläche erreicht, sondern auch nach der Reflexion an einer Fläche aus der Nähe, so überlagern sich beide Wellen bei der Messsonde. Das Interferenzmuster von direkter und reflektierter Welle unterscheidet sich in Abhängigkeit von der jeweiligen Signalfrequenz und verfälscht damit den wahren Absorptionsgrad der Proben zu einem scheinbaren Absorptionsvermögen (*Abb. 30*). Wie gross das Raumvolumen ist, aus welchem reflektierte und gestreute Wellen die Absorptionsgradbestimmung beeinflussen ist von der Frequenz und dem Abstand zwischen Lautsprecher und Messsonde abhängig und lässt sich mit der Fresneltheorie berechnen. Zusätzlich zur theoretischen Abschätzung wurde dies im Rahmen des EP 5 für typische in situ Messparameter auch in Versuchsreihen geprüft [14]. Für die in situ Messgeometrie sollte danach im Abstand von bis zu rund einem Meter kein Streukörper vorhanden sein, bei starker Absorption darf dieser maximale Abstand etwas geringer sein. Im IMPACT-Prüfstand beträgt der Abstand der nächstgelegenen Kanten und Streuflächen nur einige Zentimeter, grössere Streuflächen sind nur wenige Dezimeter entfernt, daraus ergibt sich der methodische Anpassungsbedarf.

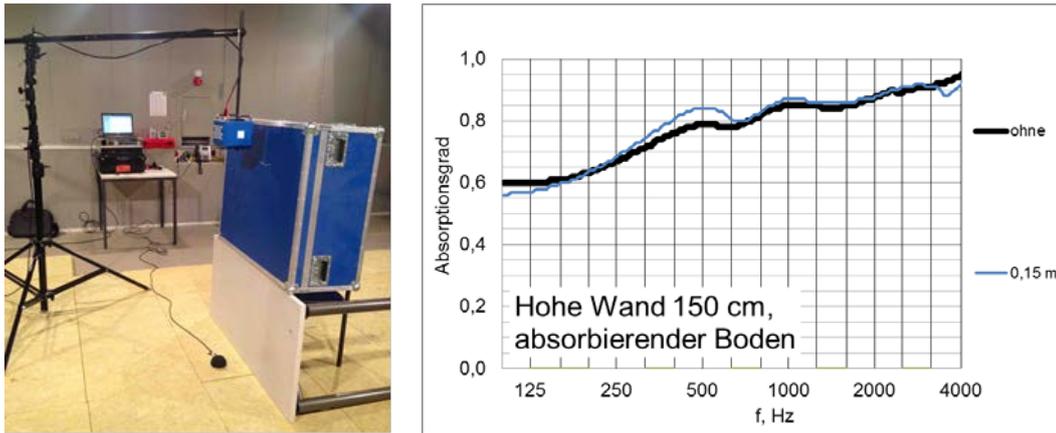


Abb. 30 Schallabsorptionsgradmessung mit dem in situ System im Labor zur Ermittlung des Einflusses einer streuenden Wand (links) und Messergebnis (rechts). Die Wand führt zu Undulationen des Absorptionsgrads als Funktion der Frequenz (aus [16]).

3.3.2 Angepasstes Messverfahren

Wie oben dargelegt, lässt sich der Einfluss von Streuwellen aus der Umgebung der Prüfkörper bei der Absorptionsgradmessung im IMPACT nicht ausschliessen. Dabei bildet die grösste und sehr komplexe Störfläche der Versuchsstand selbst mit dem Prüfrad, seiner Aufhängung und der zu seiner Bewegung und Steuerung notwendigen Aggregate. Ein Umbau des Versuchsstands würde das Reflexionsmuster der Schallwellen auf den Prüfkörpern ändern und somit das gemessene scheinbare Absorptionsvermögen, welches folglich im Nachhinein nur schwer reproduzierbar wäre. Es ist daher notwendig, das Innere des Prüfstands bei der Absorptionsgradmessung abzuschirmen. Dies erfolgt am einfachsten durch das Einfügen einer vertikalen Trennwand. Damit wird zwar ein wirksamer Reflektor eingeführt mit entsprechend deutlichem Einfluss auf das Messergebnis, dieser Einfluss ist aber einfacher Art und vor allem reproduzierbar. Zudem dürfte die Verfälschung der gemessenen Absorptionswerte nur wenig von den Oberflächeneigenschaften der Prüfkörper abhängen, denn die Schallreflexion von der vertikalen Trennwand und damit das Interferenzmuster auf der Oberfläche der Prüfkörper ist bei fixer Position von Lautsprecher und Sonde jeweils das gleiche. Die Lautsprechermembran muss unterhalb der Trennwandoberkante platziert werden um Streuung von dort zu vermeiden, aber andererseits darf sie nicht zu dicht an die Prüfkörperoberfläche heranrücken, damit die Randbedingungen für das Verfahren nicht verletzt werden.

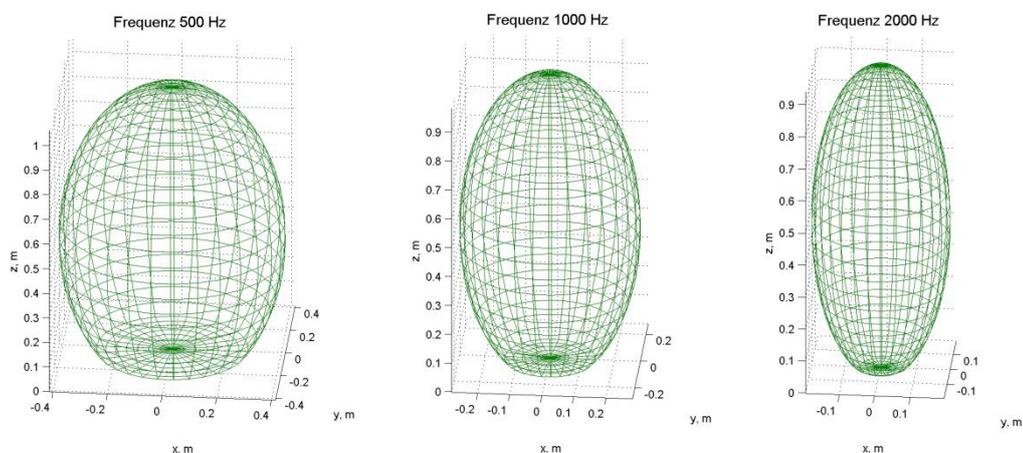


Abb. 31 Kritische Volumina (erste Fresnelzonen) für ausgewählte Frequenzen, in welchen Streuflächen die Absorptionsgradmessung auf der „Aufstandsfläche“ der dargestellten Ellipsoidstümpfe negativ beeinflussen können.

Die Ellipsenstümpfe in *Abb. 31* zeigen die ersten Fresnelzonen für ausgewählte Frequenzen und einen Lautsprecherabstand von 900 mm. Sie stellen diejenigen Volumina dar, in welchen Streuflächen zu Störreflexionen signifikanter Stärke führen können. Beachte, dass die Durchmesser der Grundflächen der Ellipsenstümpfe bei 500 Hz und 1000 Hz mehr als 180 mm betragen, also über die Breite der Probeplatten im IMPACT hinausgehen. Einflüsse vom Montagerand des IMPACT sind damit bei tiefen Frequenzen prinzipiell gegeben. Da sich unerwünschte Streuwellen bei der Messung im Prüfstand nicht völlig vermeiden lassen, muss man versuchen, ihren Einfluss in den Messdaten zu rekonstruieren. Im Fall einfacher Reflexionsflächen ist dies im Prinzip anhand theoretischer Ansätze möglich, für den allgemeinen und den vorliegenden Fall gibt es aber einen direkteren und robusteren schrittweisen Ansatz:

1. Messung des Absorptionsgrads von Probekörpern im IMPACT mit vertikaler Trennwand zum Prüfstand hin (*Abb. 32*).
2. Messung des Absorptionsgrads derselben Probekörper im Quasi-Freifeld, z.B. auf dem Boden eines Laborraums ohne Streuflächen im Umkreis von weniger als einem Meter (*Abb. 33*).
3. Subtraktion der jeweils gemessenen Absorptionsgradkurven zur Ableitung einer Korrekturfunktion als Funktion der Frequenz.
4. Addieren der Korrekturfunktion auf die IMPACT-Absorptionsgrade, um die entsprechende Freifeldabsorption zu erhalten.

Die solchermassen abgeleitete Korrekturfunktion hängt nur wenig von den Absorptionseigenschaften der Prüfkörper ab, weil die Unterschiede zwischen beiden Messungen im Wesentlichen durch die Geometrie der Streuflächen im IMPACT bedingt sind und diese nach Austausch der Prüfplatten unverändert bleiben.



Abb. 32 Schallabsorptionsgradmessung einer Prüfplatte im IMPACT bei heruntergelassener Trennwand.



Abb. 33 Schallabsorptionsgradmessung mit dem *in situ* System und einer Prüfplatte auf dem Laborboden als Referenz zur IMPACT-Messung.

In einer Versuchsreihe Anfang März 2013 wurde das oben skizzierte Verfahren anhand verschiedener Probeplatten getestet, die eine breite Palette von Absorptionseigenschaften erwarten liessen:

- SDA 4D, hoher Hohlraumgehalt, hohe Absorption
- SDA 6B, geringer Hohlraumgehalt, mittlere Absorption
- AC MR 8, geringer Hohlraumgehalt, mittlere Absorption (keine IMPACT-Messung)
- ohne Platte auf dem Laborboden, bzw. Stahlplatte im IMPACT (keine Absorption).

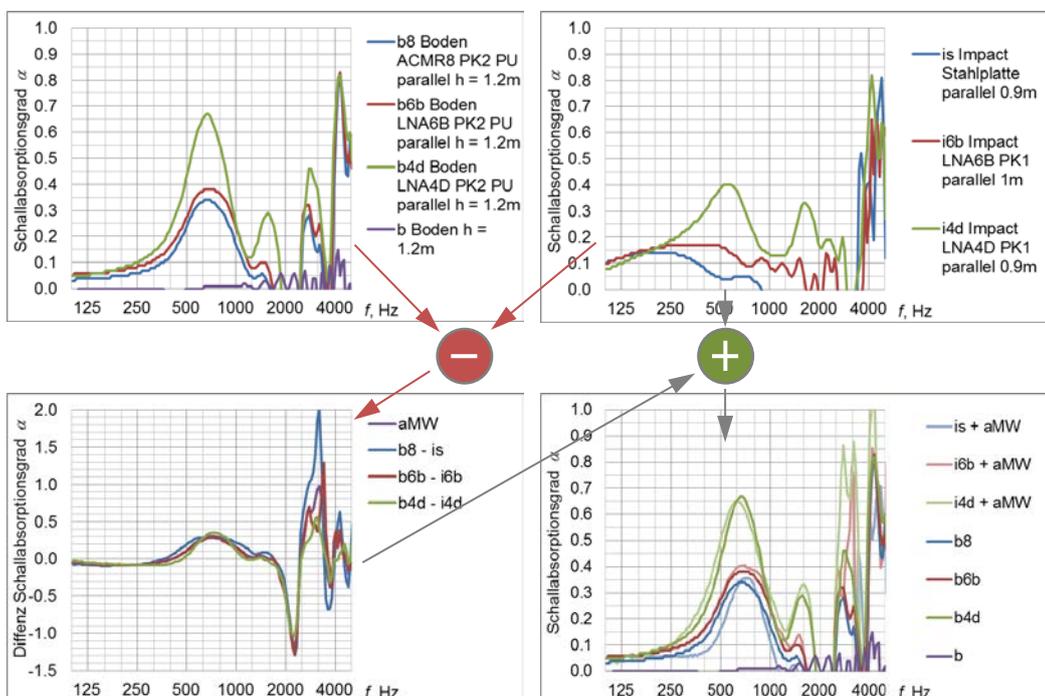


Abb. 34 Schallabsorptionsgradmessung von Prüfplatten auf dem schallharten Laborboden (oben links), im IMPACT (oben rechts) und Differenz beider Messungen (unten links). Die Summen von IMPACT-Ergebnis und der gemittelten Differenzkurve ergeben in guter Näherung die Absorptionsgradkurven, die auf dem Laborboden bestimmt wurden (unten rechts).

Die Ergebnisse der Messungen im IMPACT und auf dem Laborboden zeigen deutliche Unterschiede, sowohl zwischen den einzelnen vermessenen Belagsproben als auch zwischen den Messorten (Abb. 34). Damit bestätigt sich der erhebliche Einfluss des Prüfstands auf die Absorptionsgradmessungen. Die Differenzkurven zwischen Laborboden- und IMPACT-Ergebnissen sind aber trotz der recht unterschiedlichen Absorptionseigenschaften der Prüfplatten recht ähnlich (Abb. 34, unten links). Darin bestätigt sich die These, dass die Differenzen zwischen beiden Messserien im Wesentlichen auf Streuwellen im IMPACT zurückzuführen sind, welche unabhängig vom eingebauten Prüfkörper die Absorptionsgradmessung in ähnlicher Art und Weise beeinträchtigen. Mittelt man die Differenzkurven erhält man eine Korrekturreferenzkurve, die man auf die IMPACT-Messkurven aufaddieren kann und es ergibt sich in guter Näherung das Absorptionsgradspektrum, wie es auf dem Laborboden gemessen wurde und wie es auf der Strasse gemessen werden würde (Abb. 34, unten rechts). Lediglich bei Frequenzen oberhalb von gut 3000 Hz, bei welchen das Messverfahren grundsätzlich weniger robust ist, finden sich grössere Unterschiede in den Korrekturkurven zwischen den Belagstypen. Im verkehrakustisch wichtigen Bereich bis gut 2'000 Hz lassen sich IMPACT-Absorptionsgradmessungen einfach in Freifeldmessungen umrechnen und sind damit mit Feldmessungen direkt vergleichbar. Der Frequenzbereich bis 2'000 Hz reicht auch aus, um die gemessenen Absorptionsgrade als Eingangsdaten für SPERoN-Berechnungen zu verwenden, das SPERoN ebenfalls bis zu einer oberen Frequenzgrenze von 2'000 Hz rechnet.

3.4 Messung der mechanischen Impedanz

Die mechanische Impedanz ist das Verhältnis der komplexen Grössen Wechselkraft und Schnelle der durch die Wechselkraft in Schwingung versetzten Oberfläche einer elastischen Struktur:

$$Z_{\text{mech.}} = \underline{F} / \underline{v} \text{ in N s/m}$$

Die Schnelle v ist die erste Ableitung der Auslenkung ξ der durch die Kraft angeregten Struktur nach der Zeit. Im logarithmischen Massstab wird der Betrag der Impedanz angegeben mit:

$$L_{Z_{\text{mech.}}} = 20 \lg (|Z_{\text{mech.}}| / 1 \text{ N s/m}) \text{ dB}$$

Die mechanische Impedanz kann ein auch für das Reifen-Fahrbahn-Geräusch wichtiger Parameter der Deckschicht sein, wenn die Steifigkeit der Deckschicht in die Grössenordnung der Steifigkeit des Profilgummis des Reifens kommt [16] [9]. Strassentaugliche dichte semidichte und offenporige Deckschichten weisen jedoch immer eine im Vergleich zum Reifenprofil um deutlich mehr als eine Grössenordnung höhere mechanische Impedanz auf. Im IMPACT Prüfstand sollen per se alle Typen von lärmarmen Deckbelägen geprüft werden können. Aus diesem Grund war auch die Untersuchung der mechanischen Impedanz in diesem Einzelprojekt vorgesehen. Die Bedeutung dieser Untersuchung musste jedoch im Laufe des Projekts heruntergestuft werden, da nicht abesehbar war, dass auch elastische oder poroelastische Deckbeläge Dauerbelastungsversuchen in IMPACT unterzogen werden. Ausserdem lagen mittlerweile auch Berichte aus den Niederlanden vor, wonach die im Nachgang zum IPG-Projekt [9] auf öffentlichen Strassen, die dem normalen Strassenverkehr ausgesetzt sind, eingebauten poroelastischen Deckschichten nach kürzester Zeit verschlissen waren und durch herkömmliche Deckbeläge ersetzt werden mussten.

Dennoch wurde im April 2013 eine orientierende Versuchsreihe mit einem möglichen Ablauf und zu den Grenzen von mechanischen Impedanzmessungen im Prüfstand IMPACT durchgeführt.

Abb. 35 zeigt den Versuchsaufbau für die Messungen der mechanischen Impedanz mit Shakeranregung. Für die Messungen wurde ein elektrodynamischer Hochleistungsschwingererregter mit einer statischen Gesamtmasse von 21 kg und einer bewegten Masse von 0.4 kg verwendet. Die Steifigkeit der Aufhängung des Dynamos beträgt 5 kN/m bei einer Resonanzfrequenz von 18 Hz. Anregesignal ist Weisses Rauschen mit einer Band-

breitenbegrenzung von 50 Hz bis 12 kHz. Der Shakerkolben wurde über einen Impedanzmesskopf mit einer Empfindlichkeit von 10.14 mV/m/s^2 für den Beschleunigungsaufnehmer und von 22.4 mV/N für den Kraftaufnehmer an die Oberfläche des Probekörpers angekoppelt. Die Ankopplung erfolgte mit einem $3.1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ grossen Aluminiumplättchen, das vollflächig mit einer im unausgehärteten Zustand plastisch verformbaren Klebmasse in eine entsprechende Vertiefung in die raue Oberfläche des Probekörpers geklebt wurde (Abb. 36). Durch Verwendung eines Grösstkorns von nur 5 mm Durchmesser für die Deckschicht, ergab sich eine feinraue Oberfläche, an die der Impedanzmesskopf über das Plättchen sehr gut angekoppelt werden konnte.

In Abb. 37 ist das Ergebnis jeweils dreier Messungen an Prüfkörpern des Typs SDA 4D und SDA 6B dargestellt. Die Messungen wurden in den Zuständen fester Einspannung der Prüfkörper und gelockerter Einspannung durchgeführt. Beide Zustände führen zu wesentlichen Unterschieden in den Messergebnissen. Mit fester Einspannung, wie sie auch auf den in der Strasse eingebauten Zustand zutrifft, ergeben sich Abweichungen gegenüber dem Zustand mit lockerer Einspannung von gut 10 dB. Die Prüfstandsmechanik geht also massiv in das Messergebnis ein. Sollten in Zukunft elastische oder poroelastische Deckbeläge zur Prüfung in IMPACT wichtig werden, muss der Einfluss der Prüfstandsmechanik genauer untersucht werden. Wie die Wiederholmessung im eingespannten Zustand zeigt, sind die Messungen jedoch gut reproduzierbar.



Abb. 35 Messung der mechanischen Impedanz einer Prüfplatte im IMPACT.



Abb. 36 Applikation der Kraftverteilungsplättchen auf SDA 8B und AC MR 8+ Prüfplatten

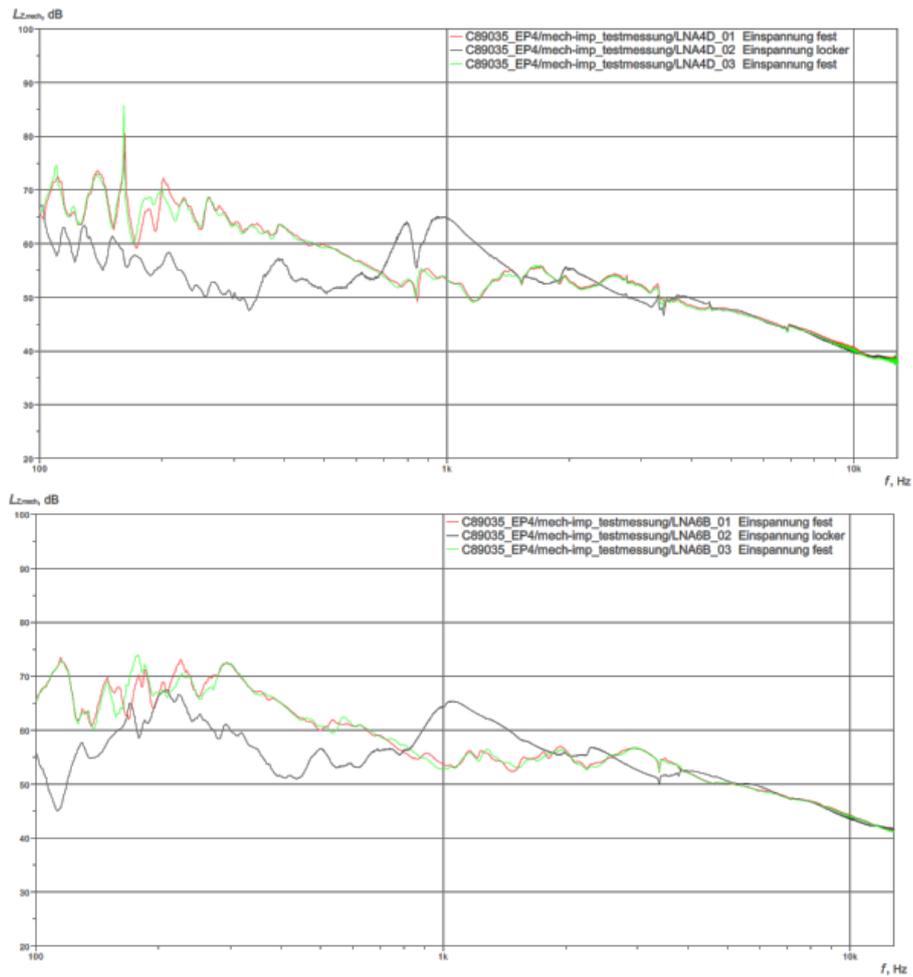


Abb. 37 Frequenzgang der mechanischen Impedanz für den Probekörper SDA 4D (oben) und SDA 6B (unten). Grüne und rote Linien: fest eingespannter Prüfkörper; graue Linie: locker eingespannter Prüfkörper

4 Validierung der akustischen Prognose

Bei der Validierung des akustischen Prüfverfahrens geht es darum, in situ Messungen auf eingebauten Deckschichten durchzuführen, um Referenzmessungen von den Strassen zur Verfügung zu haben, welche anschliessend mit akustischen Labor-Messungen an aus der Strasse ausgebauten Probekörpern und an nachträglich aus dem Mischgut der Fahrbahnbeläge hergestellten Probekörpern verglichen werden können. Letzteres sollte nach Beanspruchung der Probekörper im IMPACT wiederholt geschehen.

4.1 Validierungsmessungen in situ

4.1.1 Messprogramm

Das Programm der in situ Messungen umfasste folgende Verfahren:

- Bestimmung der Oberflächentextur
- Messung des Strömungswiderstands
- Bestimmung des Schallabsorptionsgrads
- Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen (controlled pass-by, CPB)

4.1.2 Messorte

Nach der Durchführung erster in situ Messungen im September und Oktober 2011 in Sargans, Zuchwil, Gurmels und Kestenholz wurde Müller-BBM bekannt, dass aus dem TP2 nur Mischgutrückstellproben von der Evaluierungsstrecke in Kestenholz vorliegen. Es wurde daraufhin zusammen mit IMP beschlossen, nur die Strecken Kestenholz (allerdings an einem anderen Messort) und eine weitere in Fülenbach zu evaluieren. Die Beläge in Kestenholz und Fülenbach werden im Rahmen des TP3 einer Langzeitbeobachtung unterzogen [13], welche auch Messungen der Oberflächentextur, des Strömungswiderstands und der Absorptionseigenschaften beinhaltet. Da im Rahmen des EP4 eine Entnahme von Probekörpern geplant war, musste jeweils ein von den TP3-Messpunkten abweichender Mess- und Entnahmepunkt auf den gleichen Belägen gefunden werden. Die Festlegung der Entnahmepunkte erfolgte in Verhandlungen mit dem zuständigen Tiefbauamt des Kantons Solothurn und konnte nicht alle Wünsche nach einem aus akustischer Sicht optimalen Messpunkt berücksichtigen, insbesondere am Messpunkt Kestenholz liess sich die Nähe kleinerer Streuflächen nicht vollständig vermeiden.

In Fülenbach (SO) liegt der Messpunkt in der Boningerstrasse (Verlängerung der Dorfstrasse) in Fahrtrichtung Boningen, ebenfalls am nordöstlichen Ende der Einbaustrecke (Abb. 38; CH1903/LV03-Koordinaten 630'126; 236'408). Eingebaut wurde dort in 2011 ein SDA 8C, der nach TP3-Messungen einen Hohlraumgehalt im Bohrkern um 16 Vol.-% aufweist [13]. Die Gäustrasse in Kestenholz (SO) ist mit einem SDA 6B-Belag aus dem Jahre 2011 versehen. Er hat nach den Messungen im Rahmen des TP3 ([13]) einen Hohlraumgehalt im Bohrkern um 13 Vol.-%. Der Messpunkt für die in situ und CPB-Messung liegt nahe am nordöstlichen Ende der Einbaustrecke in Fahrtrichtung Niederbuchsiten (Abb. 39; CH1903/LV03-Koordinaten 624'028; 237'136). In Kestenholz war die Fahrbahn durch landwirtschaftlichen Verkehr teilweise erheblich verschmutzt, einzelne offene Poren liessen sich aber dort, wie auch in Fülenbach, erkennen (Abb. 40).



Abb. 38 Lage des Messpunkts auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach (roter Punkt in Bildmitte) und des Entnahmepunkts (grünes Rechteck).



Abb. 39 Lage des Messpunkts auf dem SDA 6B Belag in Kestenholz (roter Punkt in Bildmitte) und des Entnahmepunkts (grünes Rechteck).



Abb. 40 Detailfotos von der Deckschicht SDA 8C in Fulenbach (links, mit Messfuss der Strömungswiderstandsapparatur) und SDA 6B in Kestenholz (rechts).

4.1.3 Durchführung der Messungen

Messzeitpunkt, äussere Bedingungen

Die in situ Messungen (Textur, Strömungswiderstand, Absorptionsgrad) wurden am 08.11.2013 sowohl in Kestenholz als auch in Fulenbach durchgeführt. Die kontrollierten Vorbeifahrtmessungen wurden am 08.11.2013 mit zwei Pnetypen durchgeführt, mit dem dritten Pnetypt wurde die Messserie am 12.11.2013 vervollständigt. Da möglichst kurze Zeit vor dem Ausbau der Probestücke gemessen werden sollte, konnte erst recht spät in der Messsaison gemessen werden.

Den Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen wurde das Verfahren der Statistischen Vorbeifahrtmessung nach DIN EN ISO 11819-1 [4] sinngemäss zugrunde gelegt. Das Wetter war jeweils trocken und es wehte nur ein sehr schwacher Wind. Die normgemässen Anforderungen an die jeweiligen Messungen waren erfüllt. Bei den CPB-Messungen traten keine Störgeräusche auf. Zeiten und Messbedingungen sind in *Tab. 5* wiedergegeben. Die *Abb. 41* bis *Abb. 43* zeigen die Messorte im Foto.

Tab. 5 Zeitraum und Witterungsbedingungen der Evaluationsmessungen (Lufttemperatur T_L und Fahrbahntemperatur T_{Fb} , in situ steht für Textur-, Absorptionsgrad- und Strömungswiderstandsmessung, CPB=Controlled Pass-By, Angabe des Messreifentyps).

Datum	Belag	Messstrecke	Verfahren	Zeitraum	T_L °C	T_{Fb} °C
08.11.2013	SDA8C	Fulenbach	in situ	14:30-15:30	16	15
08.11.2013	SDA6B	Kestenholz	in situ	12:00-13:00	16	15
08.11.2013	SDA6B	Kestenholz	CPB, Premium	11:30-12:00	15	14
08.11.2013	SDA6B	Kestenholz	CPB, Winter	16:30-17:00	14	11
08.11.2013	SDA8C	Fulenbach	CPB, Premium	13:30-14:00	16	15
08.11.2013	SDA8C	Fulenbach	CPB, Winter	15:30-16:00	16	14
12.11.2013	SDA6B	Kestenholz	CPB, Eco	12:00-12:30	8	5
12.11.2013	SDA6B	Fulenbach	CPB, Eco	13:00-13:30	9	6

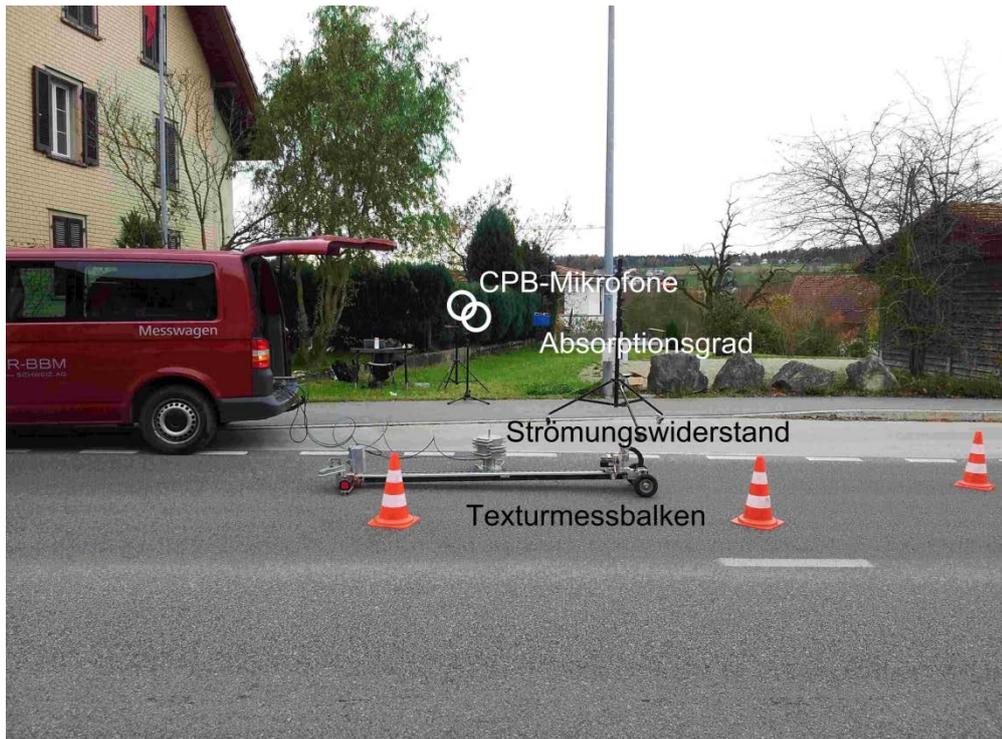


Abb. 41 Situation am Messstandort des SDA 8C Belags in Fülenbach. Im Vordergrund der Texturmessbalken, der Messtopf für den Strömungswiderstand und das Stativ mit dem blauen Lautsprecher zur Absorptionsgradbestimmung. Im Hintergrund sind die Messmikrofone für die CPB-Messung aufgebaut.



Abb. 42 Situation am Messstandort des SDA 6B Belags in Kestenholz. Der Messpunkt lag bei dem Campingtisch in der Bildmitte. Blumenkübel und ein Brunnen als mögliche Streukörper liessen sich nicht vermeiden, erwiesen sich aber im Nachhinein nicht als signifikant störend bei der CPB-Messung.



Abb. 43 Messaufbau bei der CPB-Messung am SDA 8C Belag in Fuluibach. Das Vorbeifahrtgeräusch des Messfahrzeugs (rechts) wird von zwei Messmikrofonen aufgenommen, während die Fahrgeschwindigkeit via Radar gemessen wurde.

Messdurchführung, Messausrüstung

Die in situ Messungen wurden jeweils in der rechten Rollspur und zusätzlich zwischen den Rollspuren durchgeführt. Dabei wurde der Strömungswiderstand punktuell und mit dem runden Messfuss und die Oberflächentextur mit dem Lasertexturmesssystem auf einer Länge von zwei Metern je einmal bestimmt und der Absorptionsgrad je viermal im Abstand von 20 cm parallel versetzt entlang der Fahrtrichtung, um die Redundanz zu erhöhen. Pro Lasertexturmessstelle wurden im Abstand von jeweils 20 mm 6 parallele Texturprofile mit einer Länge von 2 m aufgenommen. Offensichtlich verschmutzte Stellen wurden bei der Auswahl der Messpunkte vermieden. Auf Details der Messverfahren und Messapparaturen wird hier nicht eingegangen.

Die Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen mit konstanter Geschwindigkeit wurden mit einem VW Passat 1.4 TSi (118 kW, Leergewicht 1.5 t) durchgeführt. Dabei wurde der Vorbeifahrtpegel, analog der statistischen Vorbeifahrtmessung (SPB) nach Leitfaden Straßenlärm, im Abstand von 5 m bei einer Mikrofonhöhe von 1.5 m und im Abstand von 7.5 m bei einer Mikrofonhöhe von 1.2 m bestimmt. Im Unterschied zur SPB-Messung, bei der zufällig vorbeifahrende Fahrzeuge registriert werden, fährt bei der CPB-Messung wiederholt dasselbe Fahrzeug vorbei, wobei sowohl die Fahrgeschwindigkeit in festen Stufen und der montierte Pneu typ variiert werden. Der Pneuinnendruck wird auf Konstanz hin laufend überprüft. So ergeben sich kontrollierte Messbedingungen. Da zudem die 3D-Textur (Pneuprofil) und die strukturdynamischen Pneuereigenschaften messtechnisch in der Vergangenheit von Müller-BBM bereits ermittelt wurden, stehen zusammen mit den in situ Messresultaten von den Deckschichten alle Eingangsparameter für Berechnungen mit dem Simulationstool SPERoN zur Verfügung.

Im vorliegenden Fall wurden folgende Pneuere typen für die Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen verwendet:

1. Continental EcoContact 5
2. Continental PremiumContact 2
3. Continental WinterContact TS 850

Alle Pneuere haben die Abmessungen 205/55 R16.

Die unterschiedlichen Pneuprofile sind in *Abb. 44* dargestellt, die gemessenen Pneutexturen, wie sie in das Rechenmodell SPERoN eingegangen sind, zeigt *Abb. 45*.



Abb. 44 Messpneus Premium Contact, Winter Contact und Eco Contact für die Kontrollierte Vorbeifahrt (CPB).

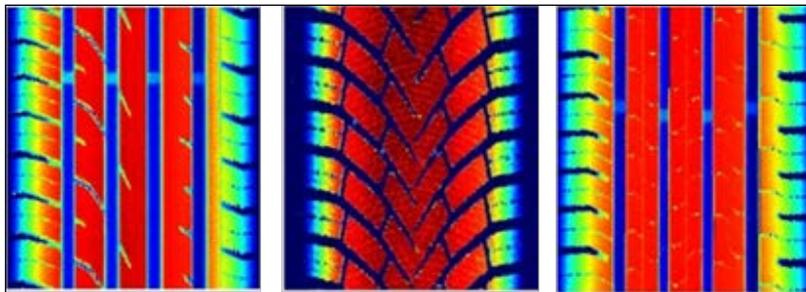


Abb. 45 Gemessene Texturprofile der Messpneus Continental Premium, Winter und Eco Contact für die kontrollierte Vorbeifahrt. Für alle Messungen wurde das gleiche Serienfahrzeug vom Typ Volkswagen Passat Kombi verwendet (siehe *Abb. 43*).

Kontrollierte Vorbeifahrtmessungen auf öffentlichen Strassen müssen aus Sicherheitsgründen bei laufendem Motor durchgeführt werden. Die Messungen erfolgten jedoch im Leerlauf, um die Beeinflussung der Messergebnisse durch Motorgeräusche soweit wie möglich zu minimieren. Bei dem im Motorraum gut gedämmten Testfahrzeug und den hier untersuchten Fahrgeschwindigkeiten von 40 km/h und 60 km/h sind die Antriebsgeräusche im Leerlauf nicht pegelrelevant, so dass eine Beeinflussung der Messergebnisse hierdurch vermieden werden konnte. Die vorgesehenen Fahrgeschwindigkeiten konnten näherungsweise eingehalten werden, was in Fulenbach nicht so einfach war, da die Anfahrt zum Messpunkt bergauf und in eine Kurve führte. Einige zehn Meter vor Erreichen des Messpunkts wurde der Antrieb ausgekuppelt und das Fahrzeug rollte an den Messmikrofonen während der Messung vorbei. Weder auf dem gemessenen Fahrstreifen noch auf der Gegenseite war ein anderes Fahrzeug in Hörweite. In Kestenholz musste der nahegelegene Wasserbrunnen für die Dauer der Messungen jeweils ausser Betrieb gesetzt

werden, um Hintergrundrauschen zu verhindern. Die Fahrtgeschwindigkeit wurde etwa auf Höhe der Mikrofone bestimmt, verringerte sich aber geringfügig um etwa 2 km/h während des Vorbeifahrens. An jedem Messort und für jeden Messpunkt wurden jeweils mehr als ein Dutzend Vorbeifahrten aufgezeichnet. Für die Auswertung wurden die drei Vorbeifahrten hinzugezogen, bei denen die Zielgeschwindigkeit am besten erreicht worden war.

4.1.4 Ergebnisse der Validierungsmessungen

In situ Messergebnisse

Der Absorptionsgrad an den Messpunkten in Fülenbach und Kestenholz ist in *Abb. 46* dargestellt. Neben den Kurven der vier Einzelmessungen ist auch die Kurve der Mittelwerte angezeigt. Die Absorption ist in Kestenholz – trotz des nominell tieferen Hohlraumgehalts – etwas höher, an beiden Orten jedoch als tief anzusehen. In der Rollspur zeigt sich ein rampenartiger Anstieg mit dem Logarithmus der Frequenz, während zwischen den Rollspuren ein nahezu konstant tiefes Niveau angetroffen wird. In der Abbildung wie auch in *Tab. 6* ist der mittlere Absorptionsgrad im Frequenzband von 500 Hz bis 3000 Hz aufgelistet. Die gemessenen Strömungswiderstände sind ebenfalls in *Tab. 6* aufgelistet. *Abb. 47* zeigt die Spektren der in den Radrollspuren und zwischen den Rollspuren gemessenen Texturen.

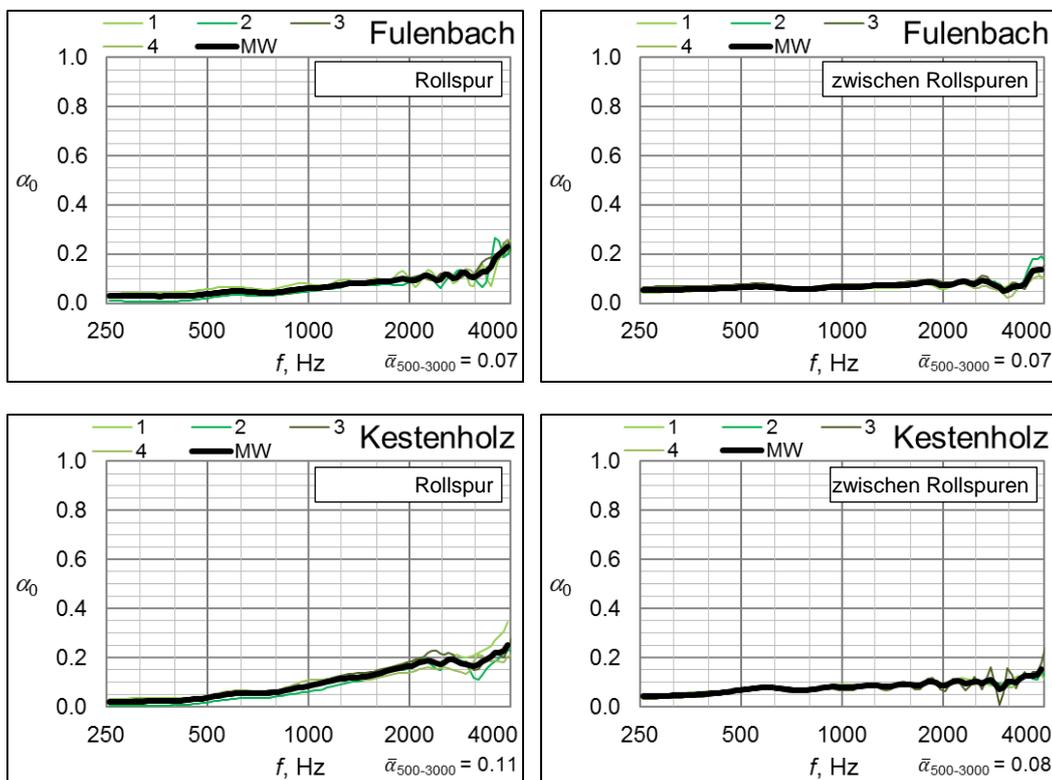


Abb. 46 Absorptionsgrad für den Messpunkt auf dem SDA 8C Belag in Fülenbach (oben) und auf dem SDA 6B Belag Kestenholz (unten). Links: Messung in der Rollspur, rechts: Messung zwischen den Rollspuren.

Die Strömungswiderstände in Fülenbach (8 mm Grösstkorn) sind deutlich tiefer als in Kestenholz (6 mm Grösstkorn). Zwischen den Rollspuren sind die Strömungswiderstände jeweils höher als in der rechten Rollspur, was durch eine geringere Reinigungswirkung wegen fehlender Zwangsdurchlüftung durch überfahrende Reifen erklärt werden kann. Kennwerte der Oberflächentextur listet *Tab. 6* ebenfalls auf. Gezeigt ist die Mean Profile Depth (MPD), der Effektivwert oder Root Mean Square Wert (RMS), die maximale Rauigkeitswellenlänge (λ_{max}) und die maximale Rauigkeitstiefe ($R_{eff,max}$). Der grobkörnigere Belag in Fülenbach besitzt erwartungsgemäss die rauere Oberfläche mit höherer Rauigkeitstiefe und längeren Rauigkeitswellenlängen als die etwas feinkörnigere Deckschicht

in Kestenhholz. Zwischen den Rollspuren ist die Rauigkeit jeweils systematisch etwas geringer und auch der Gestaltfaktor nimmt ab.

Tab. 6 Zusammenfassung der in situ Messergebnisse in Fulenbach und Kestenhholz (α =mittlerer Absorptionsgrad zwischen 500 Hz und 3000 Hz, R_s^* =spezifischer Strömungswiderstand, MPD =Mean Profile Depth, RMS =Effektivwert, g =Gestaltfaktor, λ_{max} = Rauigkeitwellenlänge im spektralen Maximum, $R_{eff,max}$ =maximale Rauigkeitstiefe).

Messort	SDA 8C, Fulenbach		SDA 6B, Kestenhholz	
	rechts	zwischen	rechts	zwischen
α	0.07	0.07	0.11	0.08
R_s^* , Pa s/m	4659	6813	13098	22695
MPD , mm	0.87	0.78	0.58	0.52
RMS , mm	0.64	0.55	0.40	0.37
g , %	79	71	83	79
λ_{max}	16	16	8	8
$R_{eff,max}$, μm	203	182	125	123

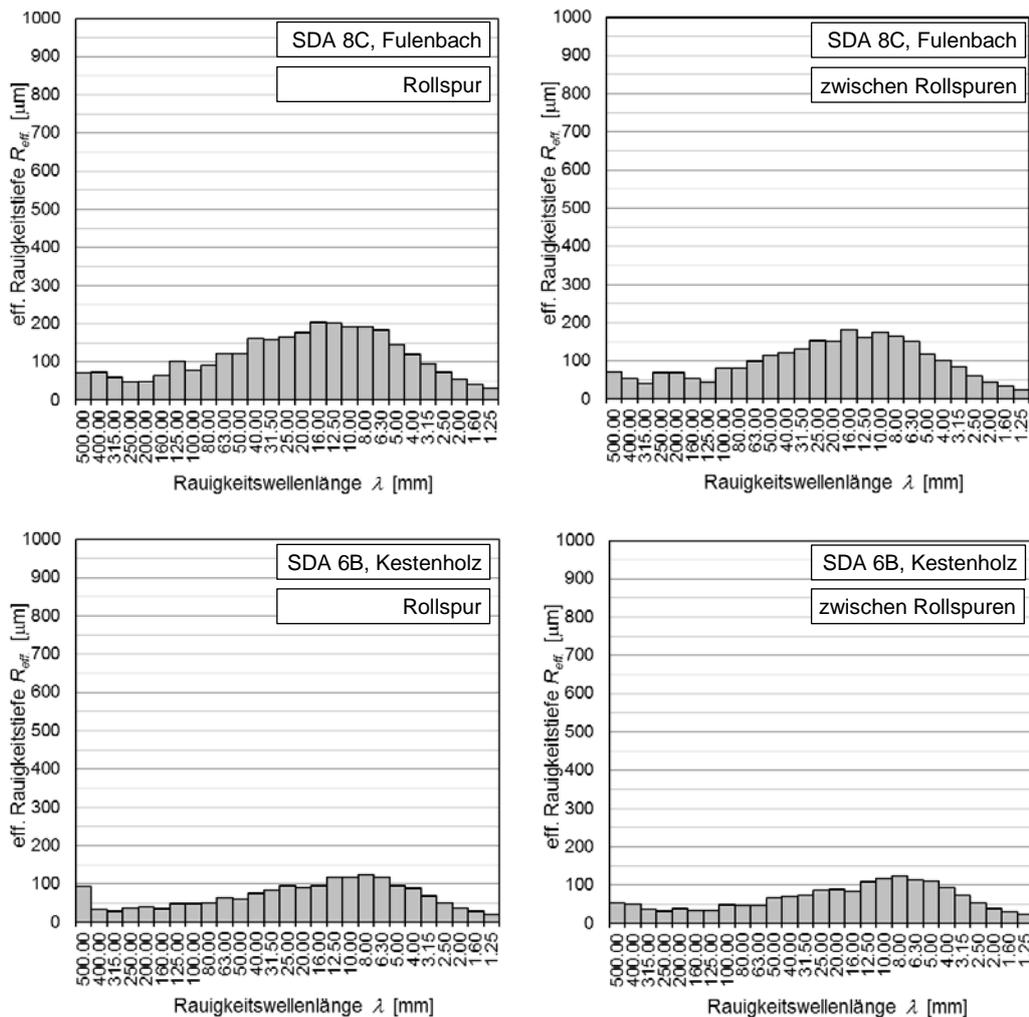


Abb. 47 Rauigkeitsspektren für den Messpunkt auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach (oben) und auf dem SDA 6B Belag Kestenhholz (unten). Links: Messung in der Rollspur, rechts: Messung zwischen den Rollspuren.

Die in situ Messwerte stehen, bis auf den Absorptionsgrad, im Einklang mit den Erwartungen für die eingebauten Belagstypen und die Unterschiede zwischen Messwerten aus der Rollspur oder dem Raum dazwischen lassen sich gut durch den unterschiedlichen Verschmutzungsgrad der Poren erklären, der in der Rollspur geringer ist. Da die Deckschicht zwischen den Radrollspuren von den Reifen nicht überrollt wird, findet in diesem Bereich auch keine Selbstreinigung der Poren durch das mit den Reifen mitgeführte Wasser bei Regen bzw. durch die mit den Reifen mitgeführte Luft bei trockenem Wetter statt.

CPB-Messergebnisse

Die Ergebnisse der CPB-Messungen auf den Versuchsstrecken Kestenholz und Fulenbach sind nachfolgend durch die Übersichtstabelle (Tab. 7) und die registrierten Terzspektren grafisch dargestellt (Abb. 48 bis Abb. 50). In Tab. 7 sind jeweils die auf die nominelle Lufttemperatur von $T_L = 20^\circ\text{C}$ und die beiden Nominalgeschwindigkeiten referenzierten Werte der Vorbeifahrtpegel für den jeweiligen Messpneu angegeben. Die Pegel in den Terzspektren sind nicht temperaturreferenziert, sondern gelten für die Temperatur zum Messzeitpunkt. Alle Werte beziehen sich auf den Messpunkt in 7.5 m Abstand und 1.2 m Höhe, da der an diesem Messpunkt gemessene Vorbeifahrtpegel $L_{AFmax,7.5m}$ mit SPERoN-Berechnungsergebnissen verglichen werden kann.

Tab. 7 Vorbeifahrtpegel $L_{AFmax,7.5m}$ der CPB Messungen. Alle Werte in dB(A), geschwindigkeits- und temperaturreferenziert ($T_{L,ref.} = 20^\circ\text{C}$).

Fahrgeschwindigkeit	40 km/h		60 km/h	
Messort	Fulenbach SDA 8C	Kestenholz SDA 6B	Fulenbach SDA 8C	Kestenholz SDA 6B
<i>Pneutyp</i>				
EcoContact	67.6	67.5	72.8	70.0
Premium Contact	66.5	63.6	71.6	68.9
WinterContact	66.0	63.1	70.8	68.5

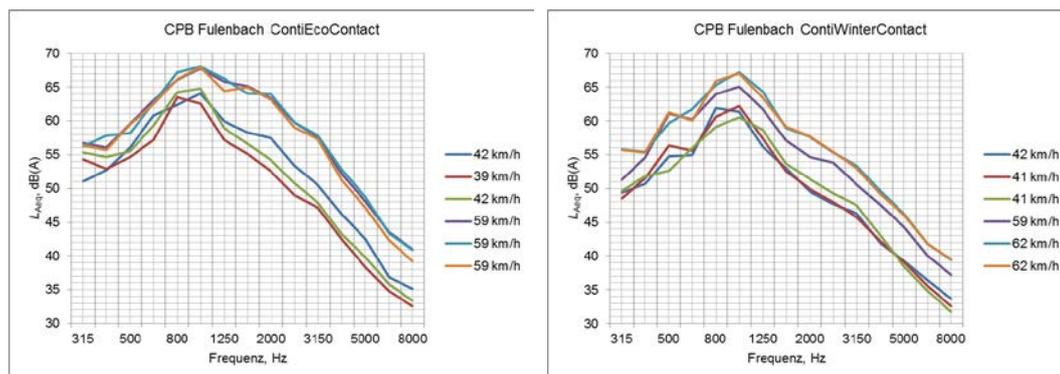


Abb. 48 Terzspektren der CPB-Messung auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach mit dem Continental EcoContact (links) und dem Continental WinterContact (rechts) bei den Zielgeschwindigkeiten von 40 km/h und 60 km/h. Werte nicht temperaturreferenziert.

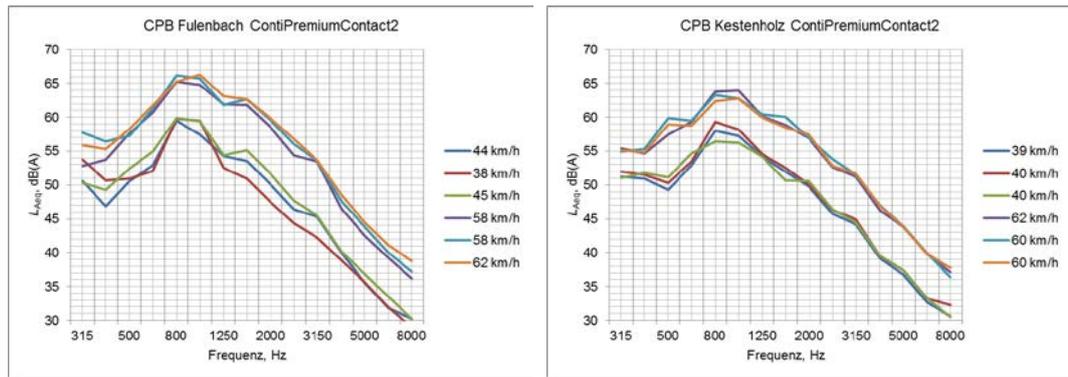


Abb. 49 Terzspektren der CPB-Messung auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach (links) und auf dem SDA 6B Belag in Kestenholz (rechts) mit dem Continental PremiumContact 2 bei den Zielgeschwindigkeiten von 40 km/h und 60 km/h. Werte nicht temperaturreferenziert.

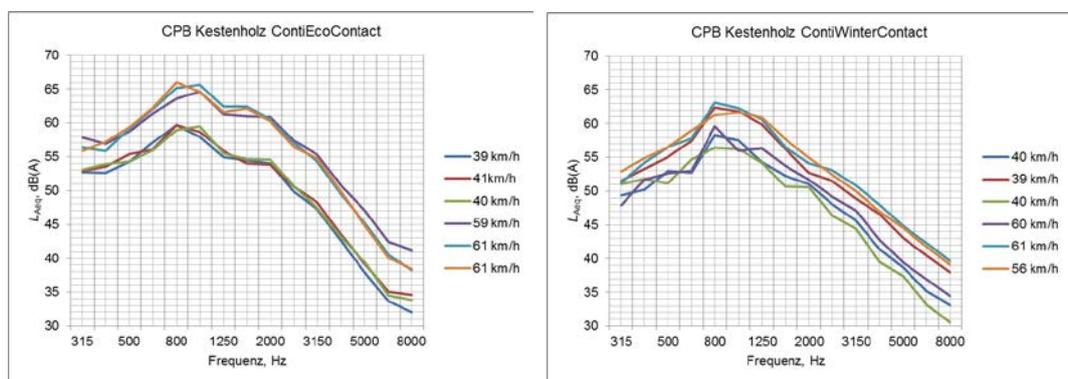


Abb. 50 Terzspektren der CPB-Messung auf dem SDA 6B Belag in Kestenholz mit dem Continental EcoContact (links) und dem Continental WinterContact (rechts) bei den Zielgeschwindigkeiten von 40 km/h und 60 km/h. Werte nicht temperaturreferenziert.

Der Vergleich der Spektren ergibt folgendes:

- Jeder Reifentyp entwickelt seine individuelle Signatur. Der EcoContact ist der lauteste Pneu und strahlt ein breitbandiges Frequenzspektrum ab. Der WinterContact ist am leisesten, was auf die im Verhältnis zu den Sommerreifen deutlich weichere Gummimischung zurückzuführen ist. Winterpneus müssen bei tiefen Temperaturen weit unter 5°C noch gute Handlungseigenschaften und gute Griffigkeit aufweisen, weshalb der Reifengummi bei höheren Temperaturen deutlich weicher wird als bei einem Sommerreifen. Der weichere Reifen-Fahrbahn-Kontakt führt zu tieferen Pegeln des Reifen-Fahrbahn-Geräusches, unabhängig von den Oberflächeneigenschaften. Der PremiumContact liegt in seinen akustischen Eigenschaften dazwischen.
- Der Übergang von 40 km/h auf 60 km/h bewirkt einen Pegelanstieg von rund 5 dB in allen Fällen. Das spektrale Maximum verschiebt sich tendenziell zu höheren Frequenzen hin, was darauf hinweist, dass die mechanisch induzierte Geräuschkomponente in diesem Geschwindigkeitsbereich pegelbestimmend ist. Nur die mechanische Geräuschanregung führt zu spektralen Verschiebungen in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit und damit von der Rollgeschwindigkeit des Pneus.
- Die Deckschicht in Kestenholz (SDA 6B) führt im Vergleich zur Deckschicht in Fulenbach (SDA 8C) zu rund 2 dB(A) bis 3 dB(A) tieferen Pegeln. Da die Schallabsorptionsgrade bei beiden Belägen sehr tiefe Werte aufweisen und sich auch nicht nennenswert voneinander unterscheiden, sind die tieferen Rollgeräuschpegel für die Deckschicht in Kestenholz ausschliesslich auf die akustisch günstigere Textur aufgrund des kleineren Grösstkorns zurückzuführen.

4.2 Validierungsmessungen im IMPACT

Nahe an den in situ Messpunkten in Kestenholz und Fülenbach wurden aus dem Fahrstreifen zwischen den Rollspuren Strassenkörper entnommen und daraus passende vier Probekörper der Dimensionen 500 mm mal 180 mm ausgeschnitten. Je einer dieser Platten aus Fülenbach und Kestenholz wurde in den IMPACT-Prüfstand eingebaut und dort akustisch vermessen.

4.2.1 Probepplatten

Die Positionen der Entnahmepunkte und der vorhergehenden in situ und CPB Evaluationsmessungen unterschieden sich in Kestenholz. Der Entnahmepunkt lag rund 10 m nordöstlich der in situ Messposition auf demselben Fahrstreifen. In Fülenbach waren in situ Messpunkt und Entnahmepunkt identisch. Um die zu entnehmende Platte herum musste grosszügig ausgeschnitten werden, damit die mehrere hundert Kilogramm wiegende Platte herausgehoben werden konnte. Dies geschah im Dezember 2013. Im Februar 2015 wurden aus der Mitte der herausgehobenen Probekörper (der ehemaligen Zwischenrollspur) zwei Probepplatten im Format 180 mm mal 500 mm ausgeschnitten. Die 50 kg schweren Platten wurden sehr exakt mit einer Präzision von ± 0.3 mm zu Probekörpern ausgeschnitten. Am Rand waren dennoch kleinere Fugen und Ausbrüche nicht zu vermeiden (*Abb. 51* und *Abb. 52*). Im Vergleich zu den Strassenbelägen in situ (*Belagsdetailfotos Abb. 40*) sind die Platten im Prüfstand sauberer. Die Schnittflächen der entnommenen Körper zeigen sehr deutlich die feinkörnige Zusammensetzung der Deckschicht in Kestenholz gegenüber der grobkörnigen Sieblinie in Fülenbach (*Abb. 53*).



Abb. 51 Probekörper SDA 8C aus Fülenbach im IMPACT mit 180 mm Breite.



Abb. 52 Probekörper SDA 6B aus Kestenholz im IMPACT.



Abb. 53 Schnittfläche der untersuchten Probekörper. Links: SDA 8C Fulenbach; rechts: SDA 6B, Kestenholz.

4.2.2 Messresultate aus dem IMPACT

Am 26.2.2015 fanden auf den Ausbauplatten im IMPACT Messungen des Strömungswiderstands und der Textur statt. Die Absorptionsgradmessungen im IMPACT wurden am 30. Juni 2015 durchgeführt. Der Strömungswiderstand wurde mit dem eckigen Messfuss jeweils in der Mitte der Probeplatten bestimmt (Abb. 54), die Oberflächentextur mit der 3-D Kamera. Zur Texturmessung wurde die 3-D Kamera auf ein Gestell montiert und nach jeder Aufnahme verschoben, um jede Probeplatte mit 13 mal 2 Einzelaufnahmen zu beleuchten (Abb. 54). Die resultierende Belichtungsüberdeckung ist in Abb. 21 dargestellt. Der Absorptionsgrad wurde mit der in situ Apparatur in einem geringeren Abstand des Lautsprechers von den Untersuchungsplatten von 0.9 m und der an den Prüfstand angepassten und in Abschnitt 3.3 beschriebenen Auswertestrategie ermittelt.

Die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen der beiden Beläge in Fulenbach und Kestenholz zeigen sich deutlich in der Darstellung der zusammengesetzten Oberflächentexturaufnahmen (Abb. 55). Auf die höhere topografische Dynamik in der grobkörnigeren Struktur von Fulenbach weist eine breitere Farbpalette hin. Die Mean Segment Depth (MSD) und der Gestaltfaktor jedes gescannten 100 mm Abschnitts des Fulenbachprobekörpers sind flächenhaft in Abb. 23 abgebildet. In Fulenbach dominieren höhere Rauigkeitswellenlängen zwischen 6.3 mm und 20 mm mit Rauigkeitstiefen über 200 µm, in Kestenholz sind die Rauigkeitswellenlängen zwischen 5 mm und 16 mm am stärksten ver-

treten mit Rauigkeitstiefen um $150\ \mu\text{m}$ (Abb. 56). Entsprechend wurde der Strömungswiderstand auf dem Fulenbachprobekörper mit $R_{s\ \square} = 2'555\ \text{Pa s/m}$ mit einem deutlich tieferen Wert gemessen als auf dem Kestenholtprobekörper mit $R_{s\ \square} = 10'230\ \text{Pa s/m}$. Die Absorptionsgradmessung lieferte im Mittel etwas tiefere Absorptionsgrade als in situ (vergleiche Abb. 103 unten rechts mit Abb. 92).

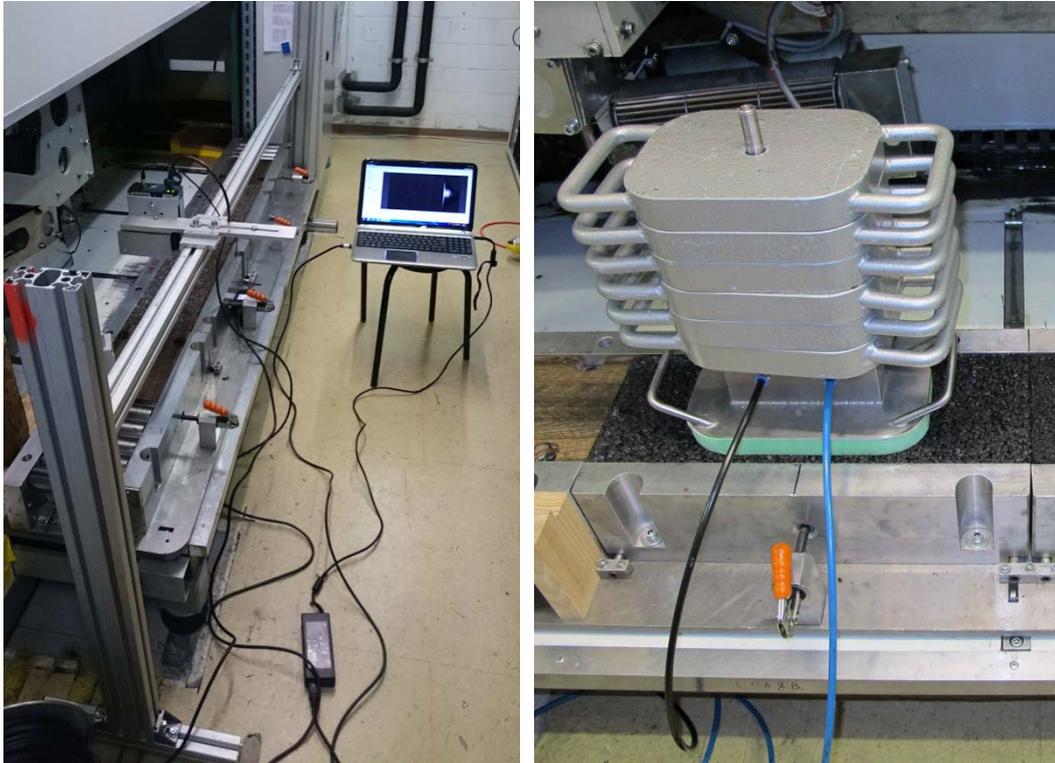


Abb. 54 Messaufbau bei der Textur- und Strömungswiderstandsmessung im IMPACT. Die Texturkamera (mittig links) wird nach jeder Aufnahme mit Hilfe des Messrahmens verschoben und das Bild über LAN-Kabel an den Messrechner übertragen.

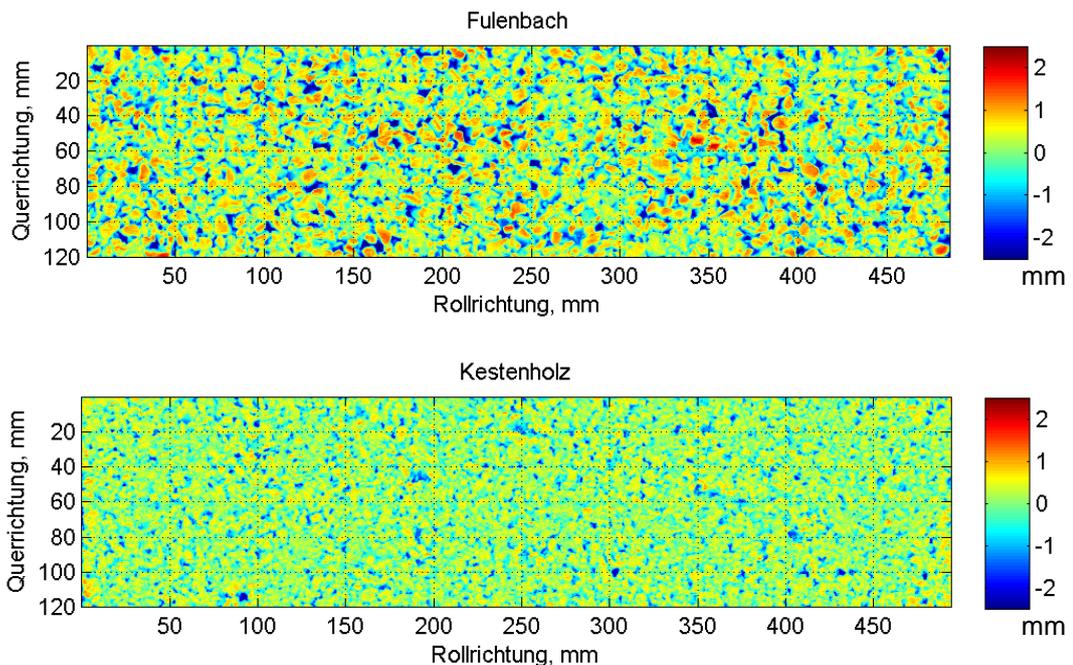


Abb. 55 Dreidimensionale Oberflächentexturen der aus der Strasse entnommenen Probenkörper im Prüfstand IMPACT. Oben: SDA 8C, Fulenbach; unten: SDA 6B, Kestenholt.

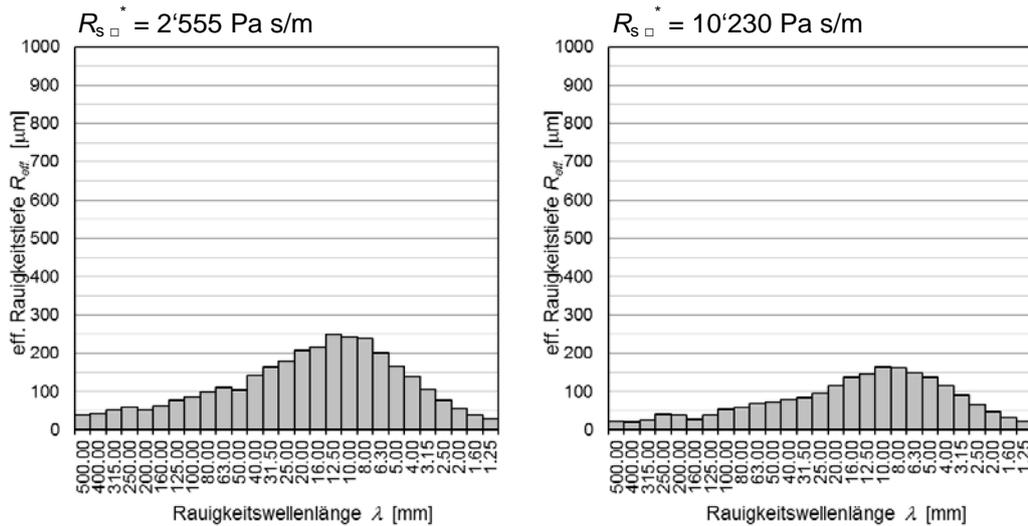


Abb. 56 Strömungswiderstände $R_{s, \square}^*$ und Rauigkeitsspektren der aus der Strasse entnommenen Probekörper. Links: SDA 8C, Fulenbach; rechts: SDA 6B, Kestenholz.

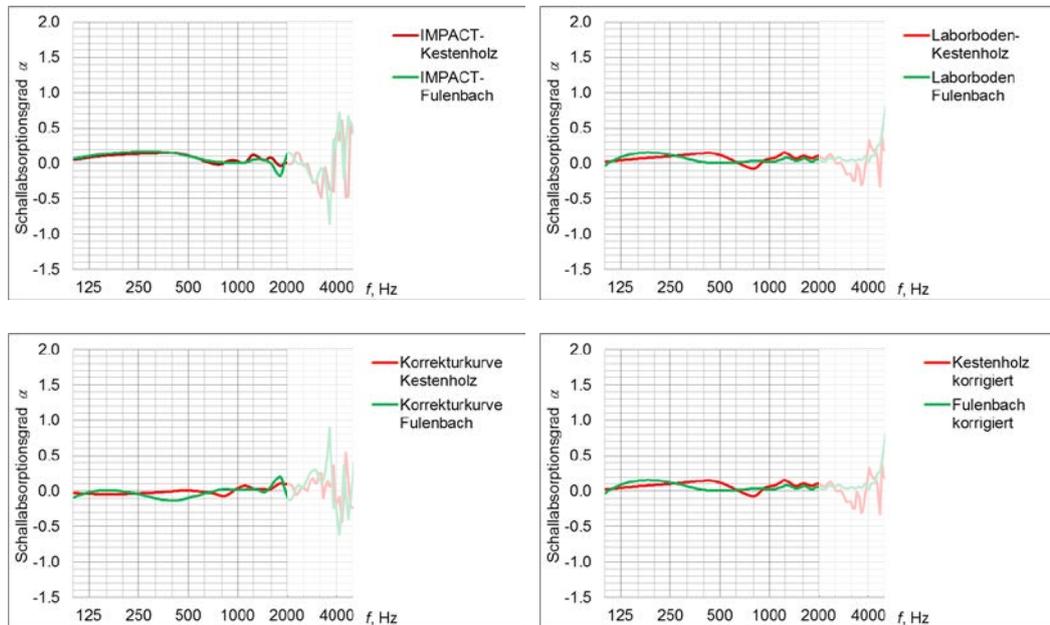


Abb. 57 Schallabsorptionsgrade der Probekörper SDA 8C aus Fulenbach (grüne Kurven) und SDA 6B aus Kestenholz (rote Kurven) auf dem schallharten Laborboden (oben rechts), im IMPACT (oben links) und Differenz beider Messungen (unten links). Die Summen von IMPACT-Ergebnis und der Differenzkurve ergeben die Absorptionsgradkurven, die auf dem Laborboden bestimmt wurden (unten rechts).

4.3 Validierung des Prognoseverfahrens

Die bestimmten Eigenschaftsparameter der Deckschicht an den aus der Strasse entnommenen und im IMPACT eingebauten Platten werden in Tab. 8 präsentiert und den Ergebnissen aus der in situ Messung zwischen den Rollspuren gegenübergestellt. Obwohl der Entnahmepunkt in Kestenholz gegenüber dem in situ Messpunkt versetzt ist, sollte die Größenordnung der Oberflächenparameter vom selben Ort trotzdem übereinstimmen. Im Fall von Fulenbach ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen in situ Ergebnissen und IMPACT Resultaten, im Fall von Kestenholz sind die Unterschiede etwas kleiner. In beiden Fällen ergeben die Labormessungen der Textur und des Strö-

mungswiderstands Werte, die auf eine rauhere und durchlässigere Oberfläche hinweisen. Diese Beobachtung gilt für alle Wellenlängen, die kleiner als ein paar Zentimeter sind (und daher mit der 3-D Kamera zuverlässig bestimmt werden können), wie *Abb. 58* zeigt. Die Absorptionsgradmessung im IMPACT führt zu etwas tieferen Absorptionsgradwerten als in situ. Bei der Interpretation der beobachteten tiefen Absorptionsgrade sollte man berücksichtigen, dass sich statistische Schwankungen der Messergebnisse bei der Bildung der Differenz zwischen Messungen auf dem Laborboden und im IMPACT stärker bemerkbar machen.

Sowohl im IMPACT als auch in situ wurde der Strömungswiderstand $R_{s\ \square}^*$ mit dem eckigen Messfuss gemessen. Der für SPERoN-Berechnungen massgebliche Strömungswiderstand $R_s^* = R_{s\ \text{rund}}^*$ wurde anhand der in Abschnitt 3.2.2 angegebenen Umrechnungsformel aus dem Messwert für $R_{s\ \square}^*$ berechnet.

Tab. 8 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Messergebnisse aus Fulenbach und Kestenholz von den in situ Messungen und den Entnahmeplatten im IMPACT, jeweils zwischen den Rollspuren (α =mittlerer Absorptionsgrad zwischen 500 Hz und 3000 Hz, $R_{s\ \square}^*$ =spezifischer Strömungswiderstand mit eckigem Messfuss, $R_{s\ \text{rund}}^*$ =spezifischer Strömungswiderstand für einen runden Messfuss, MPD=Mean Profile Depth, RMS=Effektivwert, λ_{max} =maximale Rauigkeitswellenlänge, $R_{\text{eff,max}}$ =Rauigkeitstiefe im Maximum des Texturspektrums).

Messort	SDA 8C, Fulenbach		SDA 6B, Kestenholz	
	IMPACT	in situ	IMPACT	in situ
α	0.04	0.07	0.05	0.08
$R_{s\ \square}^*$, Pa s/m gemessen	2'555	6'813	10230	22695
$R_{s\ \text{rund}}^*$, Pa s/m berechnet	3'002	8'005	12'020	26'667
MPD, mm	1.0	0.78	0.66	0.52
RMS, mm	0.7	0.55	0.45	0.37
g, %	74	71	79	79
λ_{max}	12.5	16	10	8
$R_{\text{eff,max}}$, μm	250	182	163	123

Eine mögliche Erklärung für die höhere Rauheit der entnommenen Platten könnte darin liegen, dass die in Fulenbach und Kestenholz ausgebauten Probekörper vor oder nach dem Zurechtschneiden gereinigt wurden, bevor sie in den IMPACT eingebaut wurden.

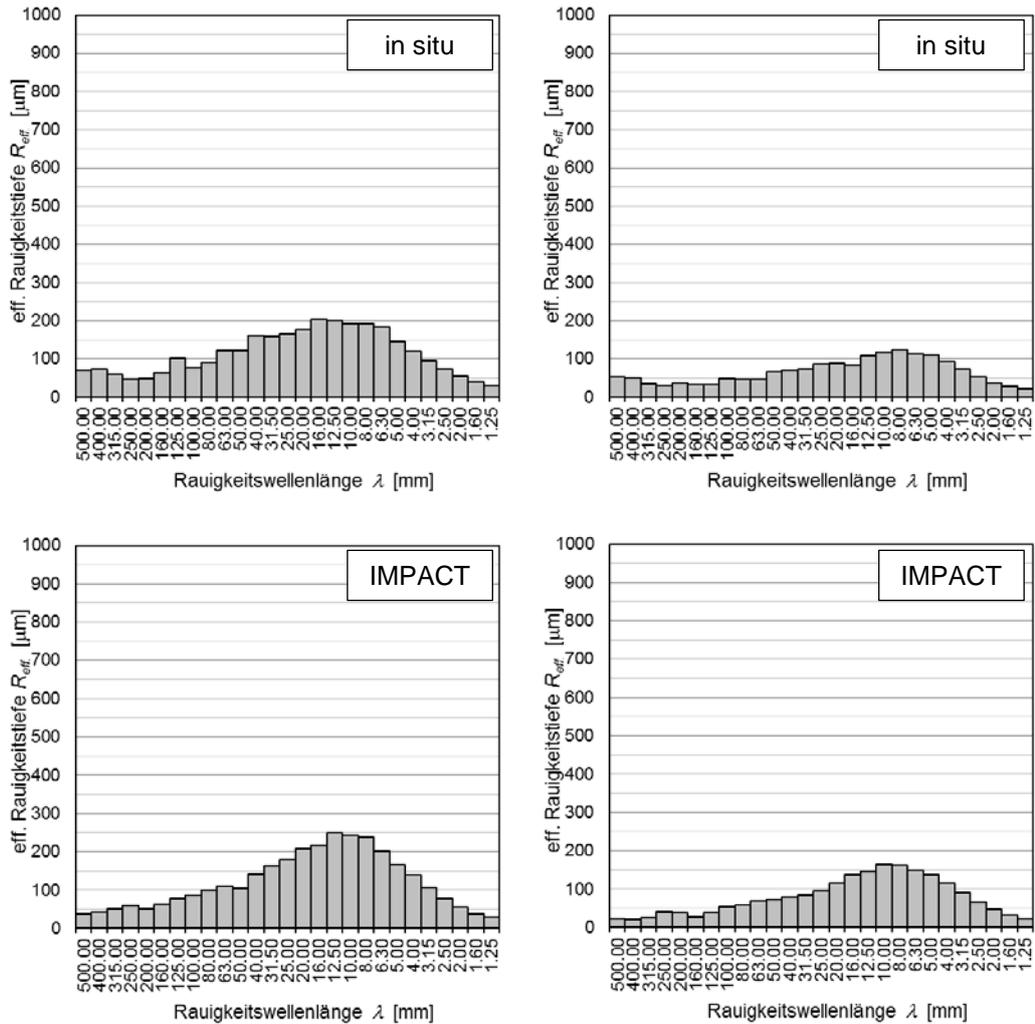


Abb. 58 Rauigkeitsspektrum der entnommenen Probekörper. Links: SDA 8C aus Fulenbach; rechts: SDA 6B aus Kestenholz. In situ Ergebnisse (oben) und IMPACT Ergebnisse (unten).

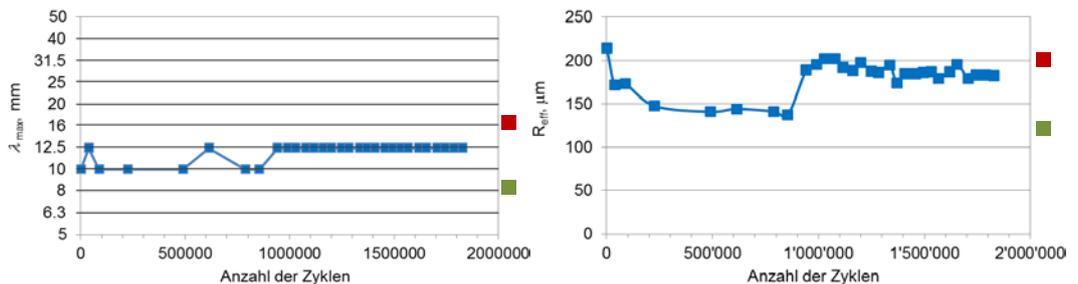


Abb. 59 Wellenlänge λ_{max} (links) und effektive Rauigkeit $R_{eff} |_{\lambda_{max}}$ (rechts) im Maximum des Texturspektrums des SDA 8B Probekörpers als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen im IMPACT-Dauerversuch. ■ Werte der in situ Messung für den SDA 8C in Fulenbach; ■ Werte der in situ Messung für den SDA 6B in Kestenholz.

Zum Vergleich sind die Texturspektren aus dem IMPACT Dauerversuch für den Probekörper SDA 8B aus Abb. 98 hier nochmals in Abb. 59 dargestellt, zusammen mit den Werten aus den in situ Messungen auf den Fahrbelägen in Fulenbach und Kestenholz. Daran wird deutlich, dass die Veränderung der Oberflächentextur des Probekörpers bis zum Ende des Dauerversuchs im Einklang steht mit der Textur der Strassenoberfläche des bereits über zwei Jahre hinweg durch den Verkehr beanspruchten SDA 8C Be-

lages in Fulenbach. Beide Mischgutzusammensetzungen weisen ein Grösstkorn von 8 mm auf. Das spektrale Maximum der Textur des Laborprobekörpers liegt anfangs bei einer Wellenlänge von 10 mm und pendelt sich über die gesamte Dauer des Versuchs durch die mechanische Beanspruchung im IMPACT-Prüfstand auf einen höheren Wert von 12.5 mm ein. Die Texturen der Strassenoberflächen weisen sowohl in situ und als auch auf den Ausbaustücken ein Maximum bei 12.5 mm bis 16 mm auf. Die Rauigkeitstiefe $R_{\text{eff}} / \lambda_{\text{max}}$ im spektralen Maximum des Texturspektrums für den SDA 8B Probekörper weicht am Ende des Dauerversuchs im IMPACT-Prüfstand mit einem Wert von 200 μm überhaupt nicht vom Wert für die in situ gemessene Strassenoberfläche in Fulenbach ab. Der tatsächliche Hohlraumgehalt des Belags in Fulenbach betrug anfänglich im Mittel über vier Bohrkern 15.9 Vol.-%, wobei die vier Werte in einem Bereich von 14 Vol.-% bis 20 Vol.-% streuten. Im Einzelprojekt EP2 wurde für den Probekörper SDA 8B für den Dauerversuch anfänglich ein Hohlraumgehalt am Bohrkern aus der fertigen Schicht von 13.5 Vol.-% ermittelt. Beide Beläge sind sich also auch hinsichtlich des Hohlraumgehalts am Bohrkern im mittleren Bereich von 12 Vol.-% bis 16 Vol.-% sehr ähnlich.

Damit kann davon ausgegangen werden, dass sowohl die Herstellung der Laborprobekörper als auch die Beanspruchung im IMPACT-Prüfstand den realen Gegebenheiten des Einbaus und des Strassenbetriebs nahe kommen. Die im IMPACT-Prüfstand über eine Anzahl von rund 4'000'000 Überrollungen simulierte Beanspruchung spiegelt damit die Verhältnisse des Strassenbetriebs für einen Zeitraum von vielleicht 2 Jahren mit einer Verkehrsbelastung in Fulenbach von rund 5'400'000 Mio Fahrzeugen in diesem Zeitraum wider. Die Durchschnittliche Tägliche Verkehrsstärke in Fulenbach beträgt 7'500 Fahrzeuge/24h.

Zur Untermauerung dieses Sachverhalts sind in nachfolgender Tab. 9 die SPERoN-Rechenergebnisse für den IMPACT-Laborprobekörper am Ende des Dauerversuchs, die SPERoN-Rechenergebnisse für die auf der Deckschicht in Fulenbach in situ gemessenen Oberflächenparameter und die Ergebnisse sowohl der Kontrollierten Vorbeifahrtmessungen im Projekt TP1 EP4 als auch der Statistischen Vorbeifahrtmessungen im Projekt TP3 [13] auf der Deckschicht in Fulenbach wiedergegeben. Die Deckbeläge weisen dasselbe Grösstkorn von 8 mm auf. Die Mischgutzusammensetzung ist unterschiedlich (SDA 8B bzw. SDA 8C). Die Berechnungen wurden in allen Fällen mit dem für die CPB-Messungen verwendeten repräsentativen Continental EcoContact Reifen durchgeführt.

Tab. 9 Vorbeifahrtpegel $L_{AFmax,7.5m}$ aus den SPERoN-Berechnungen bzw. den CPB Messungen auf den Deckbelägen mit 8 mm Grösstkorn, bezogen auf die nominelle Lufttemperatur von 20°C. Reifen: Continental EcoContact. Alle Werte in dB(A) wenn nicht anders angegeben.

Fahrgeschwindigkeit v	40 km/h	50 km/h	60 km/h	Mittelwert
SPERoN IMPACT Dauerversuch SDA 8B Probepatte nach 38'181 Überrollungszyklen	67.5		71.1	69.3
SPERoN IMPACT Dauerversuch SDA 8B Probepatte nach 1'743'968 Überrollungszyklen	68.4		71.2	69.8
SPERoN mit in situ Messwerten der Oberflächenparameter für die rechte Radrollspur SDA 8C, Fulenbach	68.6		72.7	70.7
Kontrollierte Vorbeifahrtmessung SDA 8C, Fulenbach	67.6		72.8	70.2

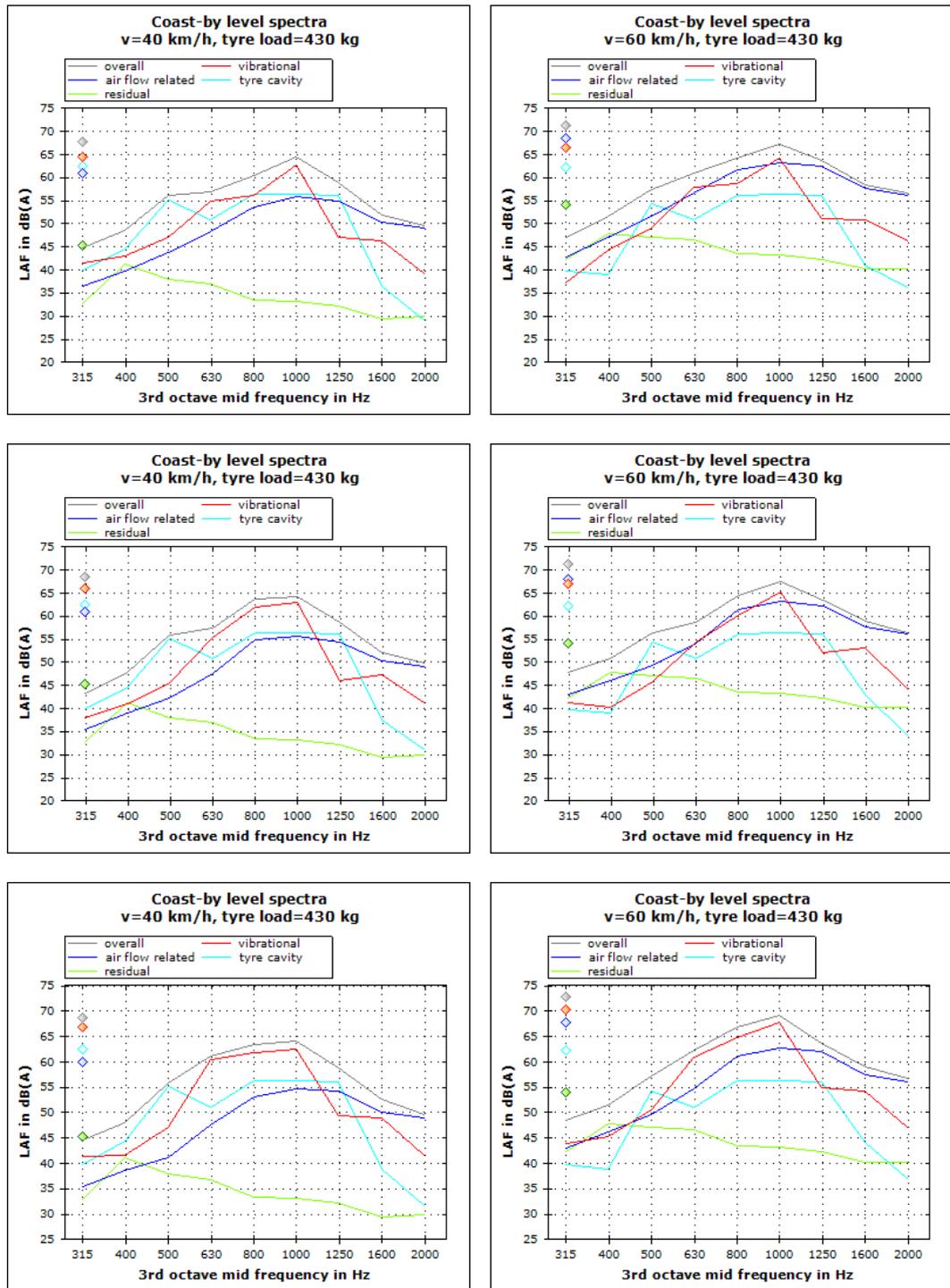


Abb. 60 Terzspektren des Vorbeifahrtpegels für den EcoContact Pneu bei 40 km/h (links) und 60 km/h (rechts). Oben: SPERoN-Rechneregebnis für den IMPACT-Probekörper SDA 8B nach 38'181 Überrollungszyklen; Mitte: dito nach 1'743'968 Überrollungszyklen; unten: SPERoN-Rechneregebnis für die in situ gemessenen Oberflächenparameter der Strassenoberfläche der SDA 8C Deckschicht in Fulenbach. Grau: Gesamtpegel L_{total} , rot: $L_{mech.}$, dunkelblau: $L_{aero.}$, hellblau: L_{cavity} , grün: $L_{res.}$ (zu den Pegelgrößen siehe Abschnitt 2).

Wie Tab. 9 zu entnehmen ist, ergeben sich insgesamt sehr konsistente Werte. SPERoN simuliert die kontrollierte Vorbeifahrtmessung mit einer Abweichung von maximal 1 dB(A), was der Vorhersageunsicherheit von SPERoN bezogen auf den A-bewerteten Gesamtpegel entspricht. Die berechneten Vorbeifahrtpegel für die Probeplatte aus dem IMPACT-Dauerversuch ergeben nach rund 2 Mio. Überrollungszyklen, was 4 Mio. Überrollungen

entspricht, ganz ähnliche Werte. Eine vollständige Übereinstimmung mit den Werten für die Deckschicht in Fulenbach innerhalb der Vorhersageunsicherheit kann nicht erwartet werden, da es sich bei der Probeplatte um einen etwas anderen Belagstyp handelt als bei dem Belag in Fulenbach. Die Ähnlichkeit der Werte weist aber eindeutig darauf hin, dass die Beanspruchung im IMPACT-Prüfstand den realen Verhältnissen auf der Strasse nahe kommt. Die Pegelerhöhung bei 40 km/h um 1 dB(A) zwischen dem Zustand der Probeplatte nach 38'181 Überrollungszyklen und nach 1'743'968 Überrollungszyklen entspricht dem Erwartungswert hinsichtlich der Verschlechterung derartiger Beläge nach 1 bis 2 Jahren nach Verkehrsfreigabe. Letzteres entspricht auch dem Alter des Belags in Fulenbach zum Zeitpunkt der Messungen.

Die Pegelerhöhung um nur 0.1 dB(A) bei 60 km/h weicht allerdings deutlich von diesem Erwartungswert ab. Mit zunehmender Geschwindigkeit kommt der Strömungswiderstand bzw. die davon bestimmte aerodynamische Geräuschkomponente stärker ins Spiel und beeinflusst den Rollgeräuschpegel wesentlich mit. An dieser Stelle könnte die im IMPACT-Prüfstand fehlende Bewitterung und dadurch fehlende Bindemittelveränderung der semidichten Deckschichten, wie sie hier realisiert wurden, zu einer deutlichen Abweichung von den physikalischen Beanspruchungsprozessen im praktischen Strassenbetrieb führen. Diese Abweichung führt dazu, dass sich die Oberflächentextur im IMPACT-Prüfstand durch die mechanische Beanspruchung nicht so stark verändert wie in Realität, die akustisch relevante Änderung des Luftströmungswiderstands dagegen weitgehend nachgebildet wird. Die beanspruchungsbedingte Veränderung von Textur und Strömungswiderstand verlaufen in IMPACT noch nicht gleichlaufend mit der Realität. Diesen Sachverhalt belegen die SPERoN-Rechenergebnisse anhand der Messung der Oberflächeneigenschaften im IMPACT-Dauerversuch und auf der Strassenoberfläche in Fulenbach (Abb. 60).

Bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h spielt der aerodynamische Geräuschanteil L_{aero} noch keine Rolle, der Rollgeräuschpegel L_{total} ist nahezu ausschliesslich mechanisch von $L_{mech.}$ und L_{cavity} dominiert. Realität und IMPACT liefern übereinstimmende Ergebnisse. Bei 60 km/h liegt die aerodynamische Geräuschkomponente L_{aero} im IMPACT bis in den mittleren Frequenzbereich bei 1 kHz mit der mechanischen Komponente $L_{mech.}$ gleichauf. Oberhalb von 1 kHz bestimmt die aerodynamische Geräuschkomponente $L_{aero.}$ anders als bei der tieferen Geschwindigkeit von 40 km/h, den Gesamtpegel nahezu alleine. Letzteres gilt auch für den realen Fahrbahnbelag in Fulenbach. Im tiefen Frequenzbereich bis 1 kHz besteht allerdings ein deutlicher Unterschied zwischen dem IMPACT Probekörper und dem realen Belag. Auf dem realen Belag überwiegt die mechanische Geräuschkomponente deutlich. Die Texturveränderung im IMPACT führt also zu einem moderateren Anstieg der mechanischen Geräuschkomponente mit der Geschwindigkeit als in Realität und entspricht damit noch nicht ganz den Beanspruchungsprozessen auf der Strasse. Aus Sicht des Forschungsnehmers hängt dies aber nicht mit zu geringer mechanischer Beanspruchung der Probekörper zusammen, sondern vielmehr mit der noch fehlenden Simulation der Bewitterung mit hoher Temperaturwechselbeanspruchung und UV-Lichtbestrahlung des Belagsmaterials an der Oberfläche und deren Auswirkungen auf die feinkörnigen Anteile in der Textur zwischen der groben Gesteinskörnung. Ob dies notwendig ist, muss noch entschieden werden, da es im Wesentlichen die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Simulationsergebnisse betrifft. Das IMPACT-Ergebnis für die tiefe Geschwindigkeit von 40 km/h stimmt bereits sehr gut mit der Realität überein.

5 Evaluierung des Prüfverfahrens

In diesem Arbeitsschritt wird untersucht, ob und inwieweit das akustische Prüfverfahren seinen angestrebten Zweck erfüllt und im Prüfstand IMPACT Zeitrafferversuche zur akustischen Dauerhaftigkeit von lärmarmen Belägen durchgeführt werden können.

5.1 Zeitlicher Ablauf und Umfang der Messungen

Von 11.08.2014 bis 23.06.2015 lief im IMPACT-Prüfstand ein Dauerversuch, bei dem eine SDA 4C-Probeplatte und eine SDA 8B-Probeplatte durch Überrollungen beansprucht wurden.



Abb. 61 Oberfläche der Probeplatte SDA 8B am 30.03.2015 nach 4'288'492 Überrollungen.



Abb. 62 Oberfläche der Probeplatte SDA 4C am 30.03.2015 nach 4'288'492 Überrollungen.

Die Probeplatten wurden anhand von Rückstellproben aus Mischgut hergestellt, das bereits in anderen Projektzusammenhängen für die Herstellung von Deckschichten verwenden

det wurde. Dem Schlussbericht für das Einzelprojekt EP2, Abschn. 5.1, nach handelt es sich im Einzelnen um folgende Projekte:

- SDA 8B
Teststrecke in Näfels, Einbau 2012
Projekt TP3
- SDA 4C
Teststrecke in Beinwil am See (AG), Einbau 2013
Monitoring der Strecke durch das Tiefbauamt Kanton Aargau

Die Überrollungen fanden, abgesehen von Wartungs- und Messpausen, durchgängig statt. Am 23.06.2015 waren 2'534'517 Zyklen, d.h. 5'069'034 Überrollungen erreicht. Der Zustand der Deckschichtoberflächen zu diesem Zeitpunkt ist aus *Abb. 61* und *Abb. 62* ersichtlich. Abgesehen von einer mehrwöchigen Wartungspause im Oktober/November nach rund 800'000 Zyklen und der Weihnachtspause (nach rund 1'335'000 Zyklen) wurde in der Regel zweimal wöchentlich sowohl der Strömungswiderstand als auch die Oberflächentextur gemessen (am Montag und Freitag). Zwischen den Einzelmessungen liegen damit jeweils einige zehntausend Überrollungen. Der zeitliche Ablauf des Dauerversuchs geht aus *Abb. 63* hervor.

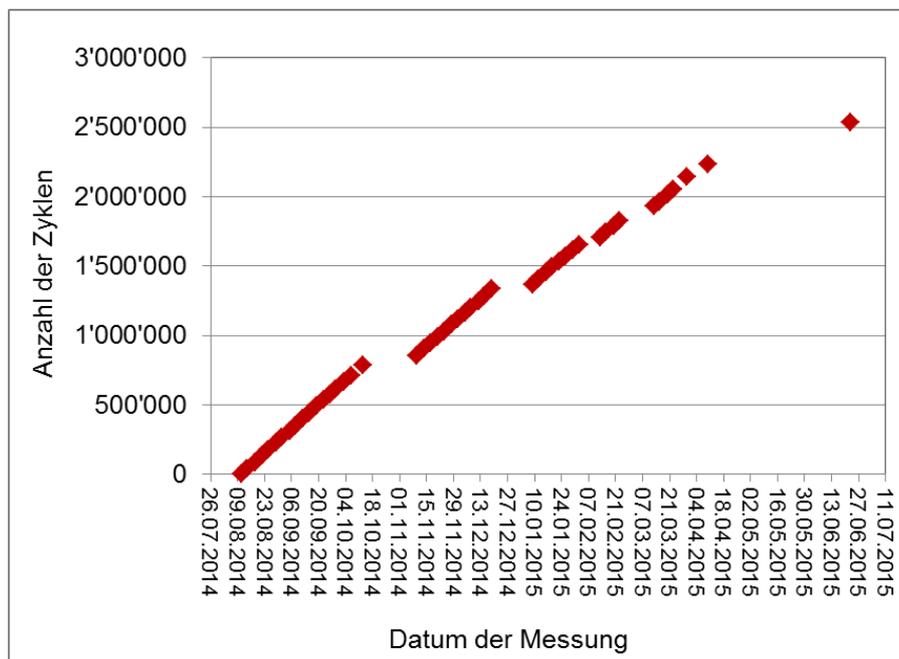


Abb. 63 Zeitlicher Verlauf der Messserie im IMPACT.

Die Strömungswiderstände und Oberflächentexturen beider Belagsplatten wurden jeweils 38 mal erfasst. Messungen des Schallabsorptionsgrads wurden von der Entwicklung des Luftströmungswiderstands abhängig gemacht. In der Praxis ist davon auszugehen, dass signifikante Änderungen des Strömungswiderstands bei hohlraumreichen Deckschichten mit nennenswerten Änderungen des Schallabsorptionsgrads einhergehen, da zugängliche Hohlräume in der Deckschicht den Strömungswiderstand deutlich herabsetzen, der Wert des Strömungswiderstands jedoch stark vom Hohlraumgehalt abhängt. Ein abnehmender Hohlraumgehalt führt zu höheren Strömungswiderständen. Wie die nachfolgend dargestellten Messreihen für den Strömungswiderstand zeigen, hat sich dieser auf beiden Probekörpern nach einer anfänglich stärkeren Veränderung ab etwa 200'000 Überrollungszyklen kaum noch verändert. Diese akustisch unbedeutenden Veränderungen des Strömungswiderstands ab 200'000 Überrollungszyklen gab Anlass, auf die Schallabsorptionsgradmessungen zu verzichten.

In diesem Kapitel wird die zeitliche Entwicklung des Strömungswiderstands und der Oberflächentexturen zusammengefasst, die Ergebnisse werden aus akustischer Sicht interpretiert und die Erfahrungen mit den Messverfahren erläutert.

5.2 Strömungswiderstand

Der Strömungswiderstand $R_{s\Box}^*$ wurde mit dem in Kap. 3.2 beschriebenen rechteckigen Messfuss und Messsystem (Müller-BBM interne Bezeichnung „mjars“) jeweils auf jeder Probeplatte zumindest einmal in jeder Messkampagne gemessen und automatisch ausgewertet. Pro Belagstyp liegen 38 Messwerte vor. Wie aus *Abb. 64* hervorgeht, liegt der Strömungswiderstand des feinkörnigeren SDA 4C deutlich unter dem des grobkörnigen SDA 8B. Es bedarf weniger zehntausend Überrollungen, um die initiale Makrotextur aus den Belagsprobekörpern zu entfernen und den Strömungswiderstand auf eine Art „Einfahrniveau“ zu erhöhen. Dieses liegt knapp unterhalb des doppelten Strömungswiderstandswerts zu Beginn der Beanspruchung. Von da an steigt der Strömungswiderstand langsam (logarithmisch oder nach einem Potenzgesetz) mit der Anzahl der Überrollungen an. Nach etwa 400'000 Zyklen hat sich der Strömungswiderstand verdoppelt, danach ist er nur noch um 20 bis 25 Prozent gewachsen. Während der letzten 300'000 Zyklen ist eine signifikante Veränderung zu höheren Strömungswiderstandswerten hin festzustellen. Bei der Messung am 10.11.2014 nach 855'237 IMPACT-Zyklen ist ein systematischer Messfehler aufgetreten, weshalb die entsprechenden Messergebnisse für beide Probeplatten verworfen werden mussten. An diesem Punkt der Zeitreihe ist eine entsprechende Datenlücke entstanden.

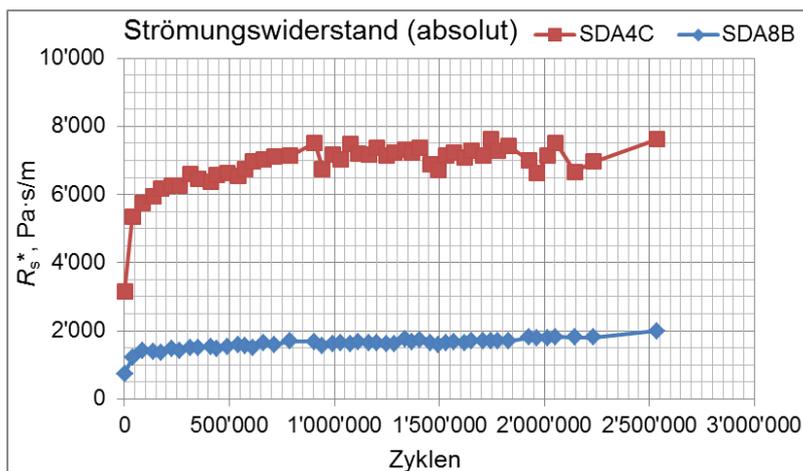


Abb. 64 Strömungswiderstand $R_{s\Box}^*$ der Probeplatten als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.

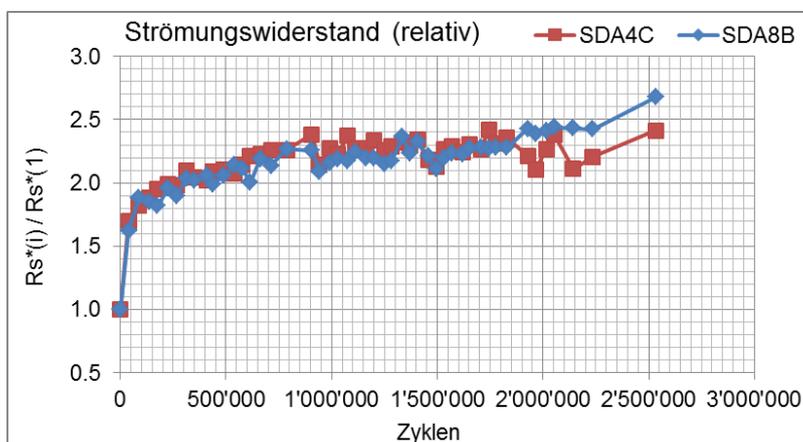


Abb. 65 Strömungswiderstand $R_{s\Box}^*$ der Probeplatten als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen normiert auf den Ausgangszustand nach 1'000 Zyklen.

Die relative Entwicklung beider Beläge ist sehr ähnlich. Dies wird besonders deutlich, wenn man den Strömungswiderstand jeweils auf das nach 1'000 Zyklen ermittelte Ausgangsniveau bezieht (Abb. 65).

5.3 Textur

5.3.1 Messdurchführung und -ergebnisse

Zur Texturmessung wurde eine 3-D Kamera eingesetzt. Abb. 66 zeigt den Messaufbau. Primär erzeugt die Kamera Fotografien von projizierten Streifenmustern, welche in 3-D Punktwolken der Einzelaufnahmen umgerechnet werden. Das eingesetzte Messsystem entspricht in vollem Umfang dem in Abschnitt 3.1.4 beschriebenen Verfahren. Die einzelnen Punktwolken werden editiert und auf ein reguläres Rechteckgitter interpoliert. Die Gittermodelle der zwanzig bis dreissig Einzelaufnahmen werden jeweils zu einem 3-D Oberflächenmodell für jede Probeplatte und jeden Überrollungszustand zusammengesetzt. Um Eingangsdaten für das Simulationswerkzeug SPERoN zu generieren, wurden aus dem flächenhaften Gittermodell Einzelprofile entnommen und durch wiederholte Spiegelung auf eine Länge von zwei Metern verlängert.

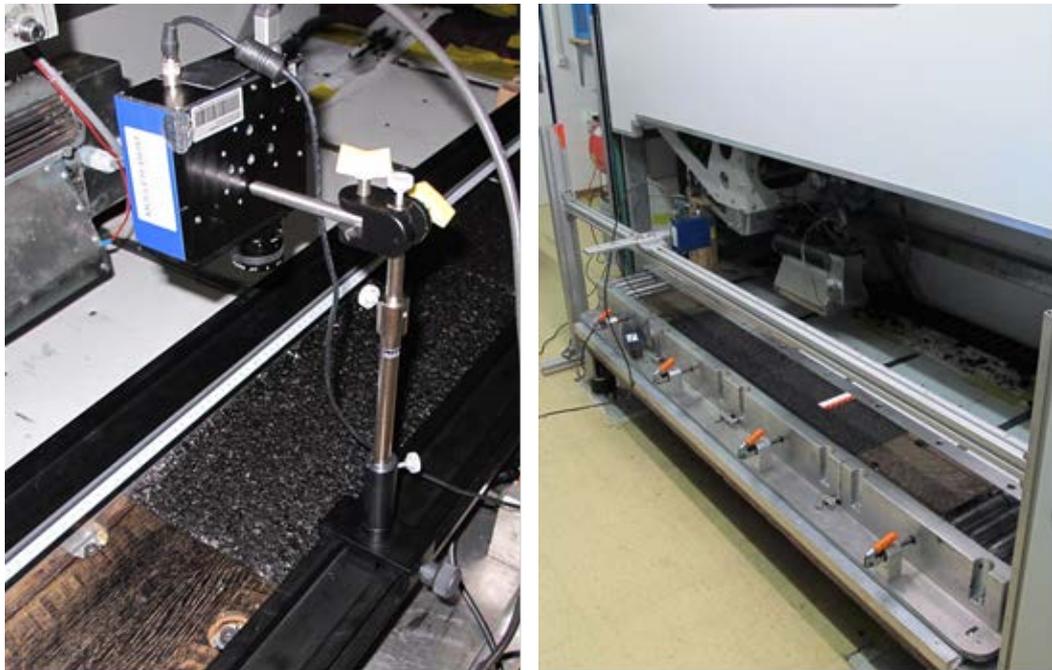


Abb. 66 Messaufbau zur Bestimmung der Oberflächentextur im IMPACT. Bis zum 21.11.2014 wurde die Kamera parallel zur Rollrichtung orientiert (links), ab dem 24.11.2014 mit einem anderen Gestell senkrecht zur Rollrichtung (rechts).

Einige Hundert solcher Profile wurden hier jeweils für beide Probeplatten nach unterschiedlichen Anzahlen von Überrollungen statistisch ausgewertet. Nur 26 der insgesamt 38 Messungen wurden ausgewertet, weil die Messungen bis Mitte November in einem ungünstigen Datenformat abgespeichert wurden, welches eine aufwendige händische Umformatierung der Einzelaufnahmen erfordern würde.

In den nachfolgenden Abbildungen Abb. 67 bis Abb. 79 ist jeweils ein gleicher Ausschnitt der zusammengesetzten Texturoberflächen der SDA 4C-Probeplatten von der Dimension 40 mm x 150 mm dargestellt, in Abb. 80 bis

Abb. 91 ist jeweils ein gleichgrosser Ausschnitt für den SDA 8B-Prüfkörper gezeigt. Bei diesem Massstab lässt sich einerseits noch ein flächenhafter Eindruck gewinnen, andererseits sind einzelne Körner noch deutlich zu unterscheiden. Die gezeigten Ausschnitte liegen jeweils in der rechten oberen Ecke des jeweiligen Probekörpers wenn man den IMPACT unmittelbar hinter den Prüfplatten sieht.

Die Serien von Abbildungen beginnen jeweils nach 1'000 Überrollungszyklen und enden bei 1'828'579 Zyklen. Abgesehen von der intensiver dargestellten Anfangsphase, beträgt das Intervall zwischen den dargestellten Aufnahmen rund 200'000 Zyklen. Die Farbskalen sind für die Belagstypen jeweils identisch, so dass man die mit den Überrollungen abnehmende Rauheit im direkten Vergleich erkennen kann. Beim SDA 4C erkennt man die Entstehung einer relativen Spurerhöhung (horizontaler gelber Streifen etwas oberhalb der Mitte). Veränderungen der Kornlagerung und -orientierung verändern die Struktur etwas, vergleiche insbesondere Abb. 71 bis Abb. 76, wo sich aus einer Vertiefung links unten schrittweise ein kleiner Steg entwickelt ((x,y)-Koordinaten (18,22)). Beim SDA 8B fällt ein Kornverlust auf (vergleiche Abb. 85 und Abb. 86 bei den (x,y)-Koordinaten (40,30) bzw. innerhalb der schwarzen Kreise).

Interessant ist hier auch die Genese des Kornverlusts innerhalb des in Abb. 80 bis Abb. 86 jeweils durch einen schwarzen Kreis gekennzeichneten Gebietes. Zunächst kommt es zu kleineren Verschiebungen während derer das betreffende Korn abgesenkt wird, bis die lokalen Spannungen offenbar so gross werden, dass das Korn aus seinem Verband herausgerissen (abgeschert) wird. Gleichzeitig wird die ehemalige Nachbarschaft des Kornes angehoben. Man kann sich diesen Vorgang analog zu einem Weitspringer vorstellen, der mit Anlauf in eine Sandgrube springt und bei der Landung zunächst den Sand unter seinen Füßen zusammendrückt und den Sand neben seinen Füßen aufschiebt und einen kleinen Wall um sein Landungsgebiet hinterlässt, wenn er die Grube wieder verlässt.

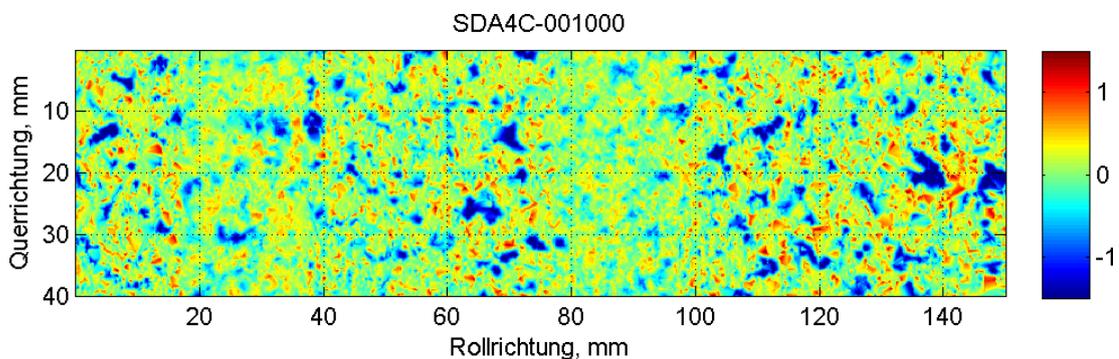


Abb. 67 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'000 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

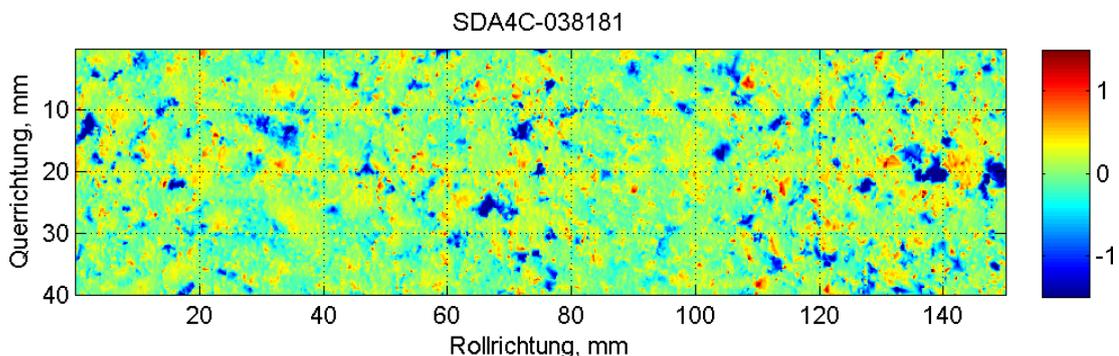


Abb. 68 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 38'181 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

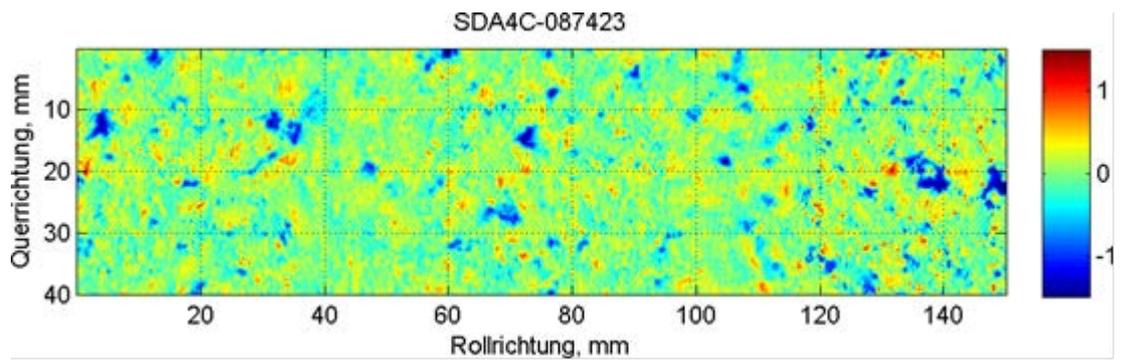


Abb. 69 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 87'423 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

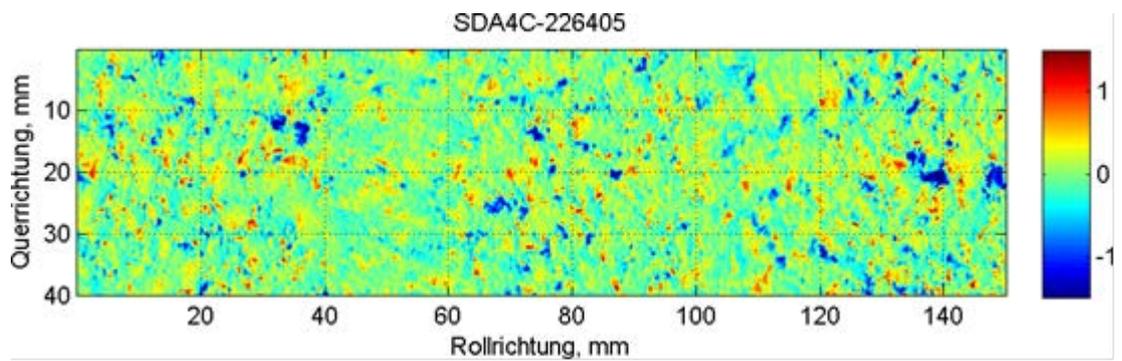


Abb. 70 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 226'405 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

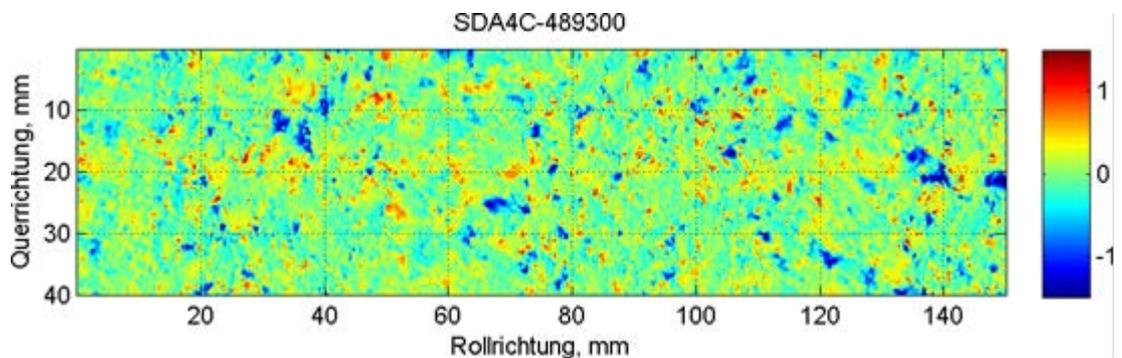


Abb. 71 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 489'300 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

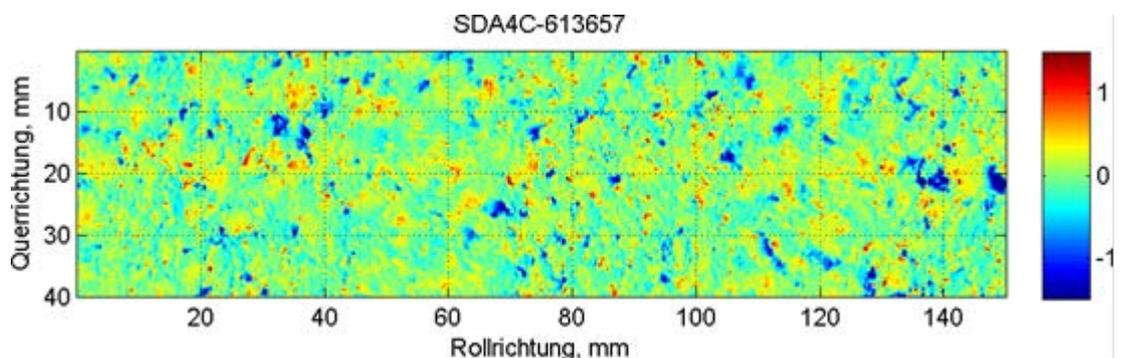


Abb. 72 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 613'657 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

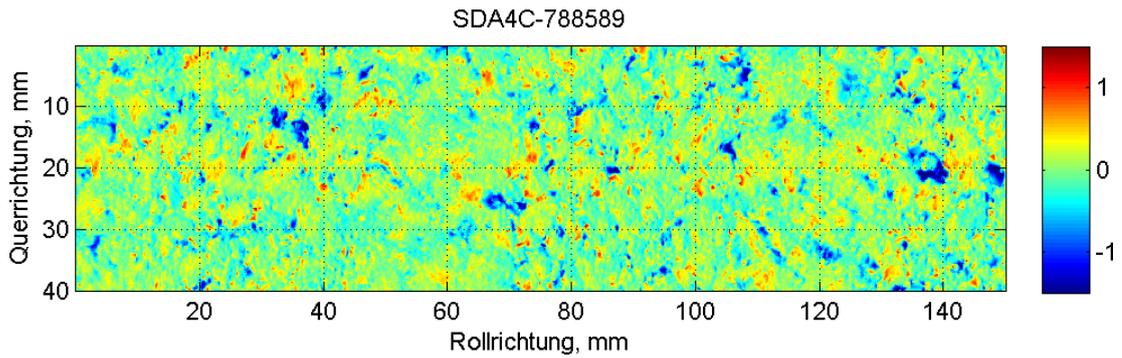


Abb. 73 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 788'589 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

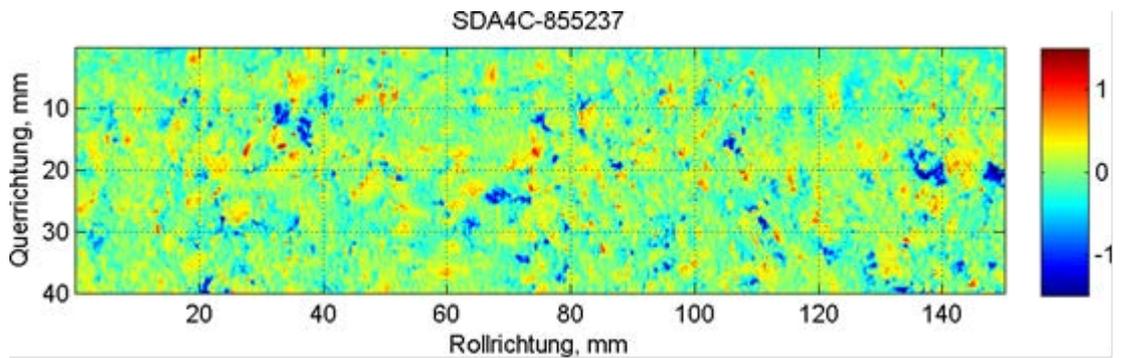


Abb. 74 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 855'237 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

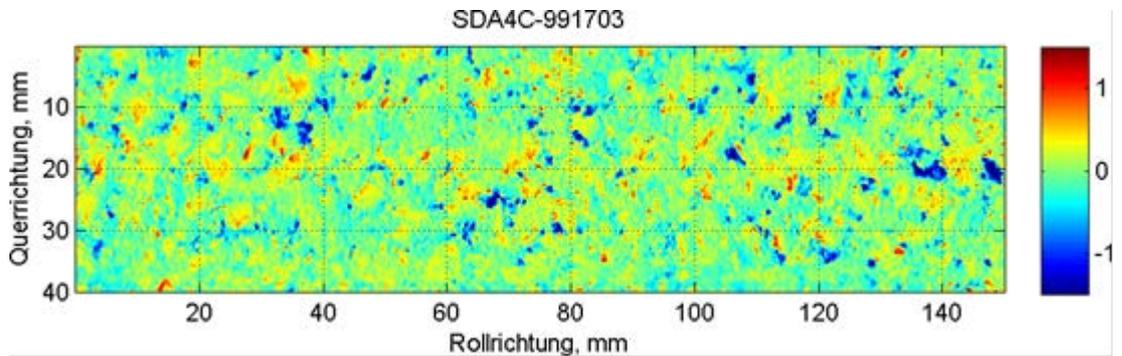


Abb. 75 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 991'703 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

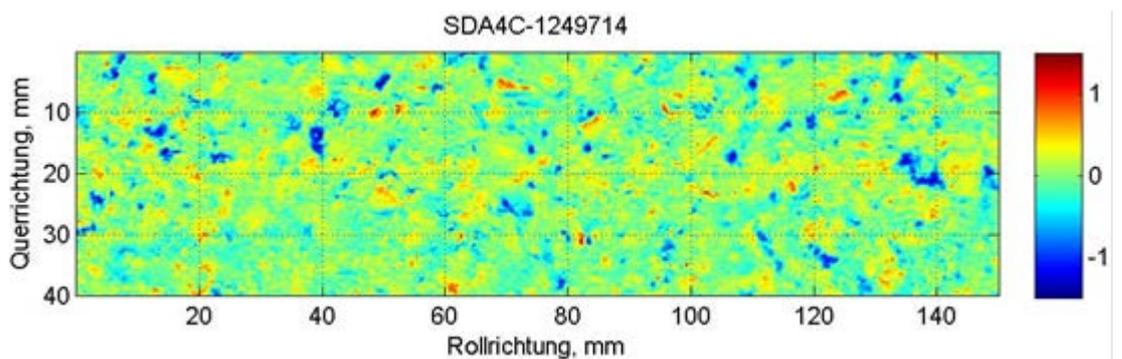


Abb. 76 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'249'714 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

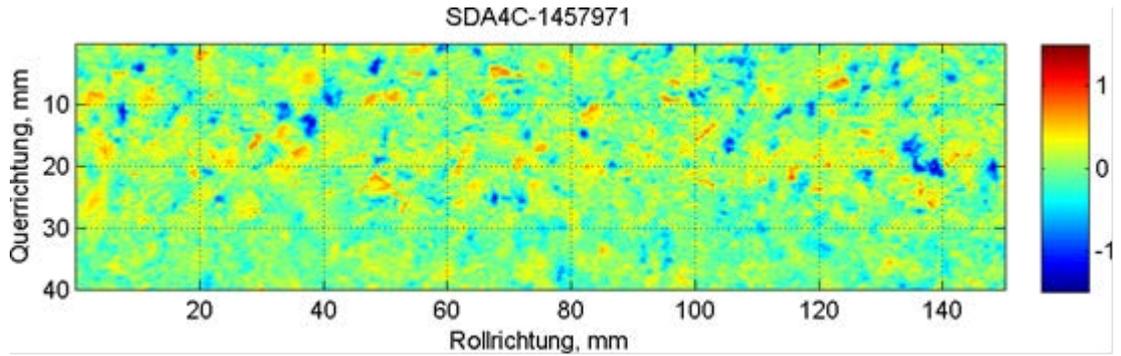


Abb. 77 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'457'971 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

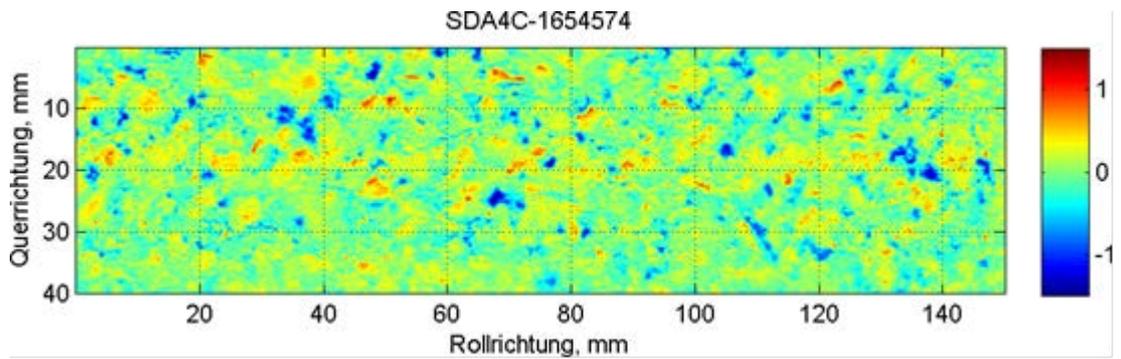


Abb. 78 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'654'574 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

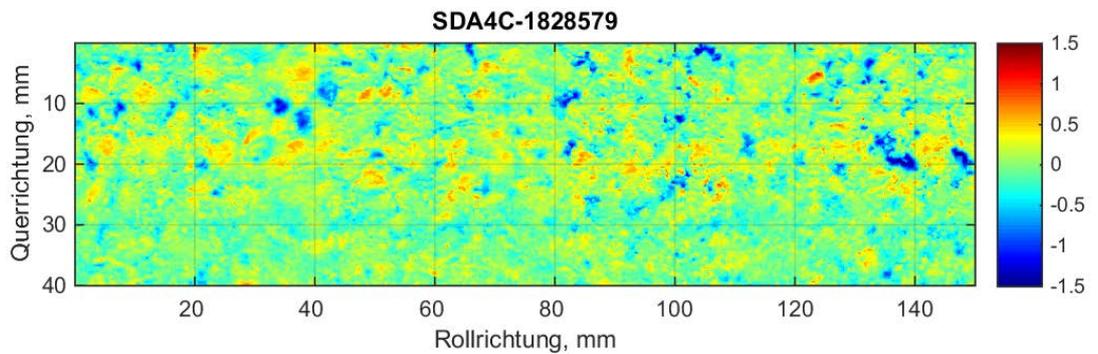


Abb. 79 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'828'579 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.

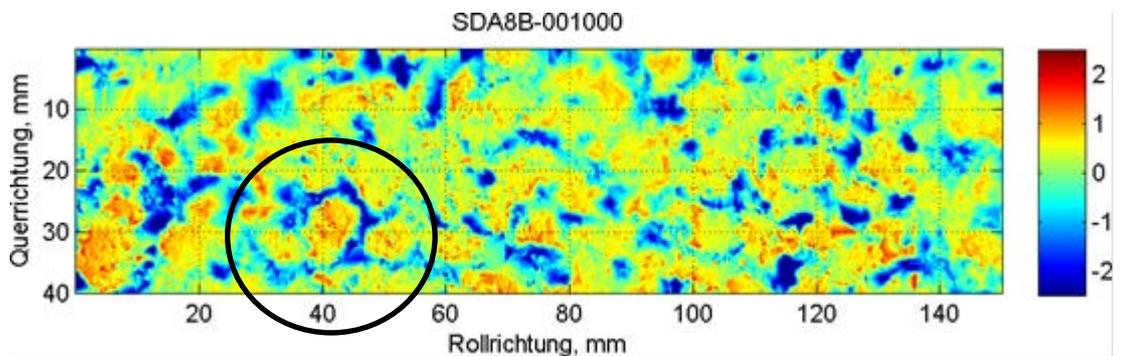


Abb. 80 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'000 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.

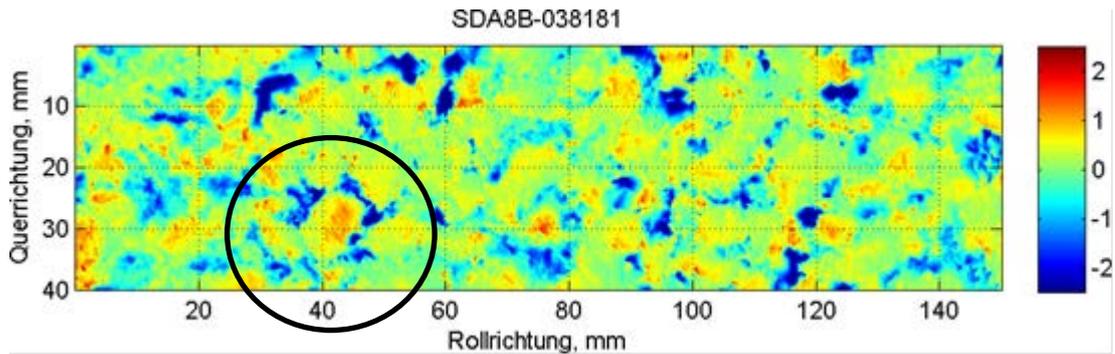


Abb. 81 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 38'181 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.

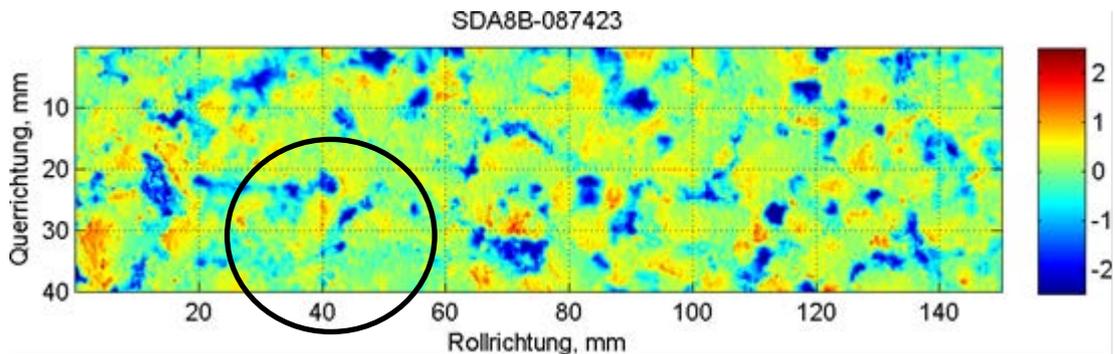


Abb. 82 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 87'423 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.

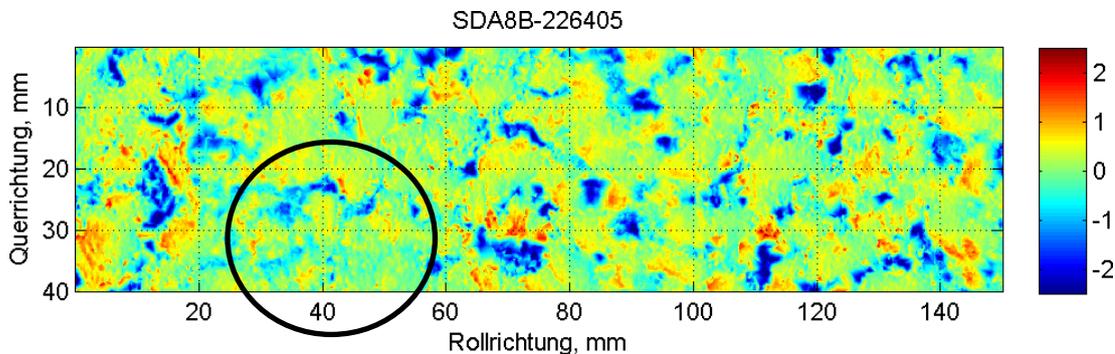


Abb. 83 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 226'405 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.

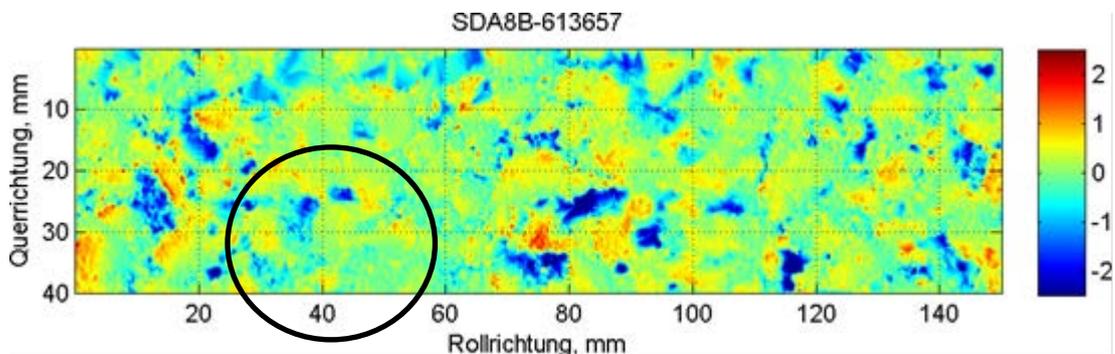


Abb. 84 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 613'657 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.

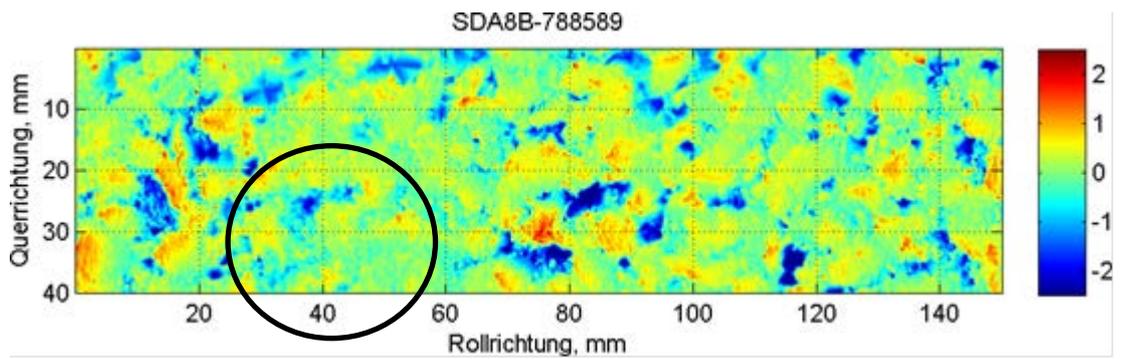


Abb. 85 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 788'589 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.

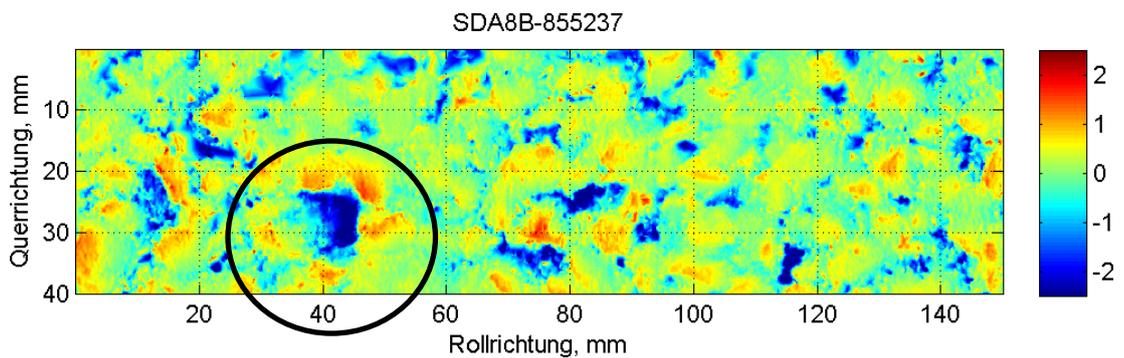


Abb. 86 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 855'237 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.

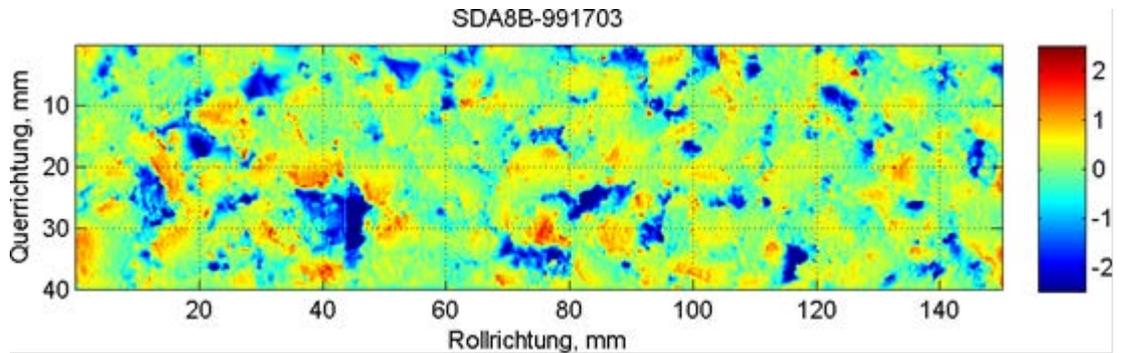


Abb. 87 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 991'703 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.

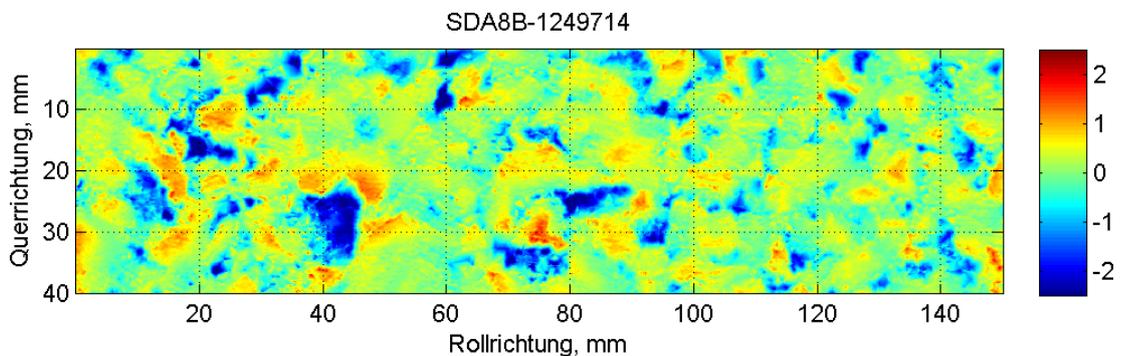


Abb. 88 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'249'714 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.

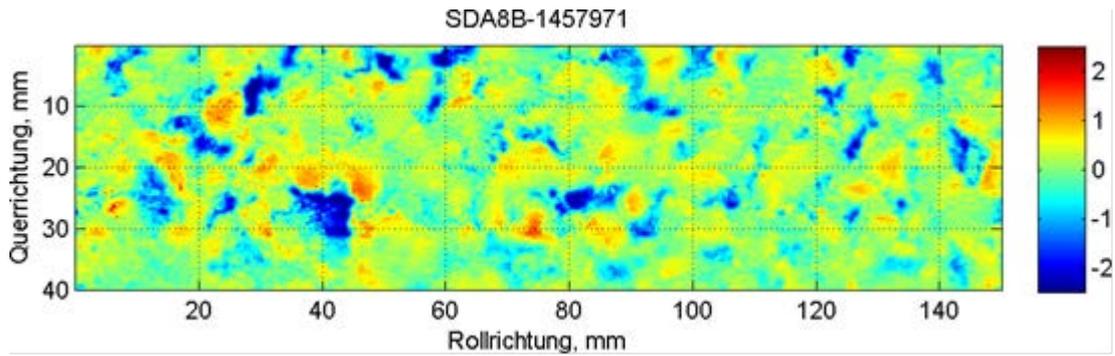


Abb. 89 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'457'971 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.

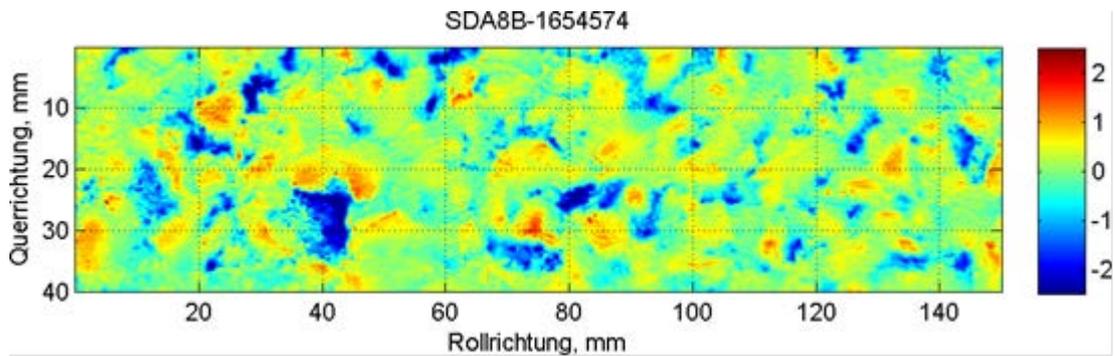


Abb. 90 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'654'574 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.

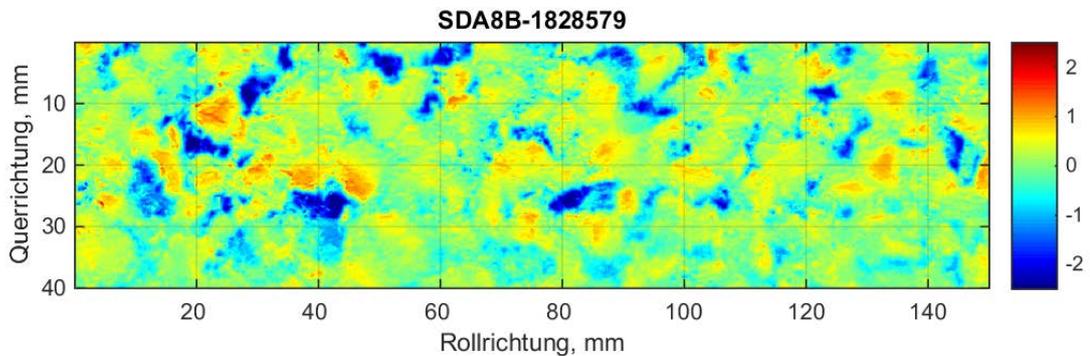


Abb. 91 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'828'579 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.

5.3.2 Einzahlwerte als Funktion der Anzahl der Überrollungen

In Abb. 92 bis Abb. 96 sind die statistischen Kennwerte MPD (Mean Profile Depth), RMS (Root Mean Square, quadratisches Mittel der Texturfluktuationen), der Gestaltfaktor g (Formfaktor der Welligkeit, konkav oder konvex), die effektive Rauigkeitstiefe $R_{eff}(\lambda_{max})$ und die Wellenlänge λ_{max} im spektralen Maximum als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen dargestellt. Die Messergebnisse werden in Abschnitt 5.3.4 diskutiert.

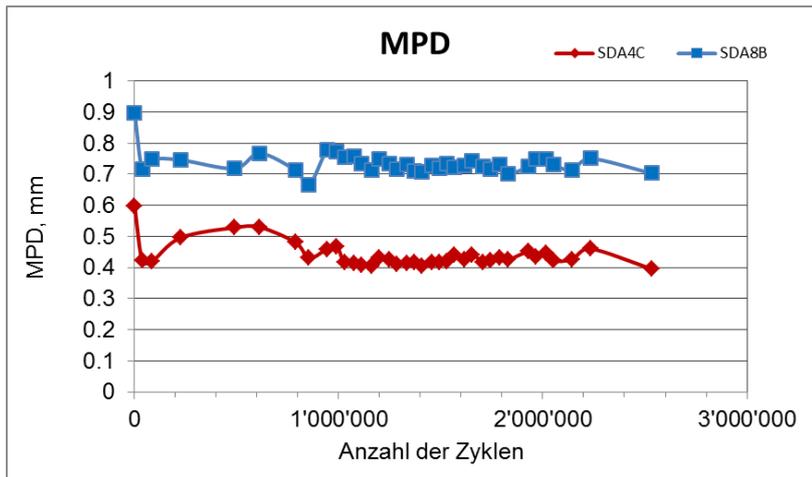


Abb. 92 MPD-Wert als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.

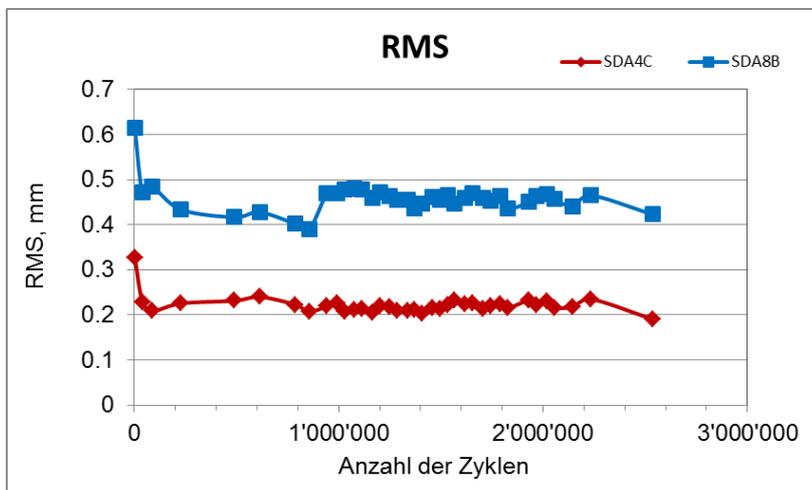


Abb. 93 RMS-Wert als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.

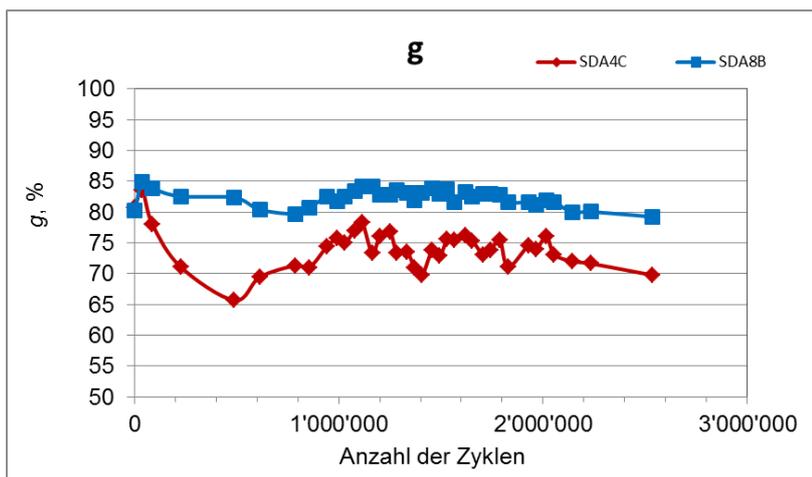


Abb. 94 Gestaltfaktor als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.

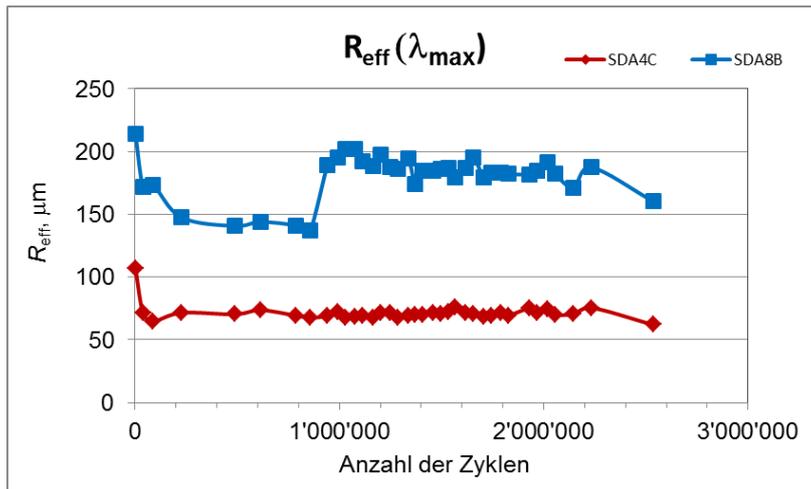


Abb. 95 Rauigkeitstiefe bei der Wellenlänge des Rauigkeitsmaximums als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.

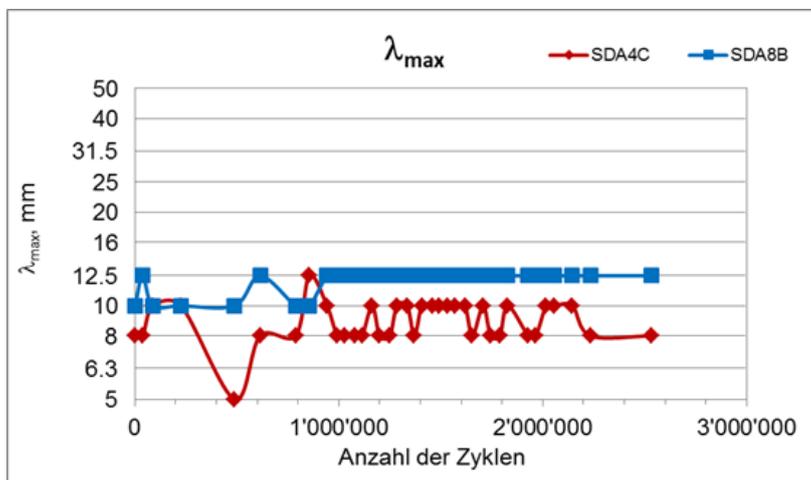


Abb. 96 Wellenlängen im Maximum des Texturspektrums als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.

5.3.3 Rauigkeitsspektren als Funktion der Anzahl der Überrollungen

Neben den Einzahlwerten ist auch eine Betrachtung der Rauigkeitsspektren wichtig, d.h. die Betrachtung der Verteilung der Rauigkeit auf die räumlichen Wellenlängen und die Veränderung dieser Verteilung mit der Anzahl der Überrollungen. Das flachere Terzspektrum des SDA 4C weist ein breites Maximum auf. Das Maximum im Spektrum des SDA 8B ist ausgeprägter, was darauf hinweist, dass im Fall des SDA 4C-Belages eine gleichmässige Verteilung unterschiedlicher Korngrössen und auch mehr Bindemittel- bzw. Mörtelanteile zwischen der groben Gesteinskörnung an der Texturbildung beteiligt sind als im Fall des SDA 8B-Belages.

Abb. 97 und Abb. 98 zeigen die effektive Rauigkeitstiefe in Abhängigkeit von der Texturwellenlänge. Parameter in diesen Darstellungen ist die Anzahl der Überrollungszyklen. In Abb. 99 und Abb. 100 sind dieselben Texturspektren in einer dreidimensionalen Darstellung zusammengefasst.

Die Messergebnisse werden in Abschnitt 5.3.4 diskutiert.

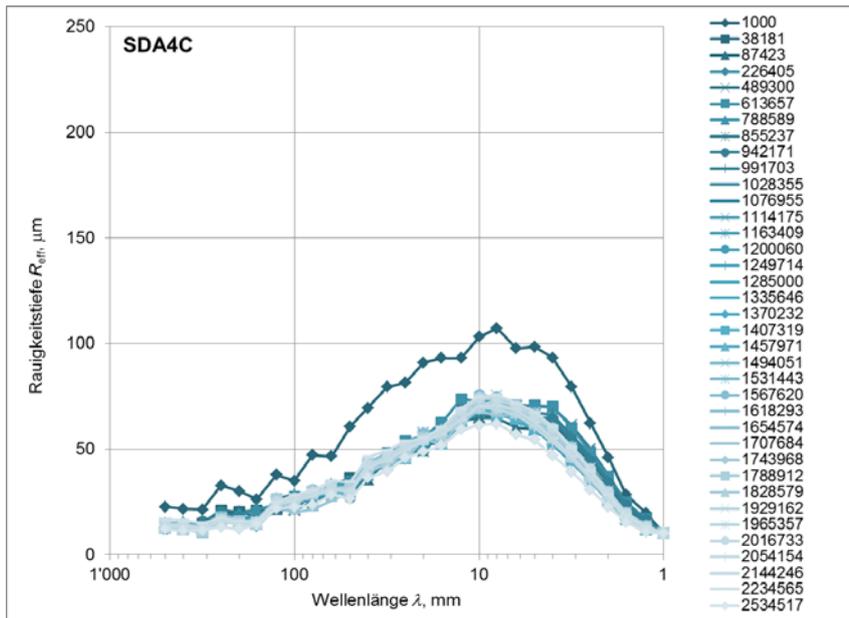


Abb. 97 Raugkeitsspektrum des SDA 4C als Funktion der Anzahl der Überrollungen.

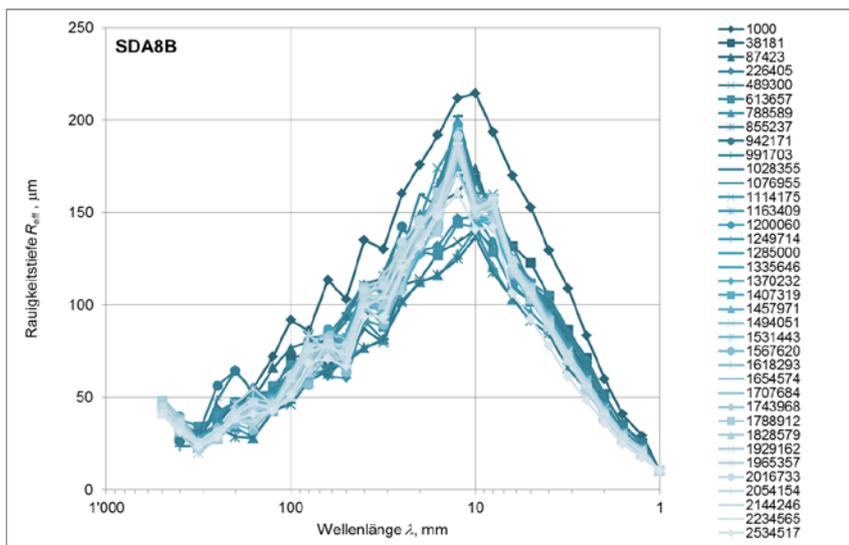


Abb. 98 Raugkeitsspektrum des SDA 8B als Funktion der Anzahl der Überrollungen.

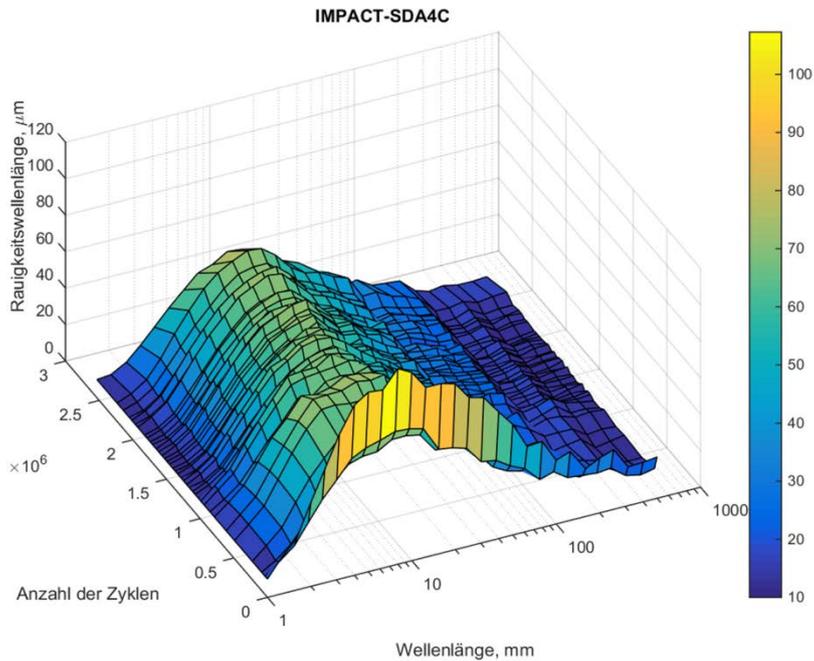


Abb. 99 Dreidimensionale Darstellung des Rauigkeitsspektrums des SDA 4C als Funktion der Anzahl der Überrollungen.

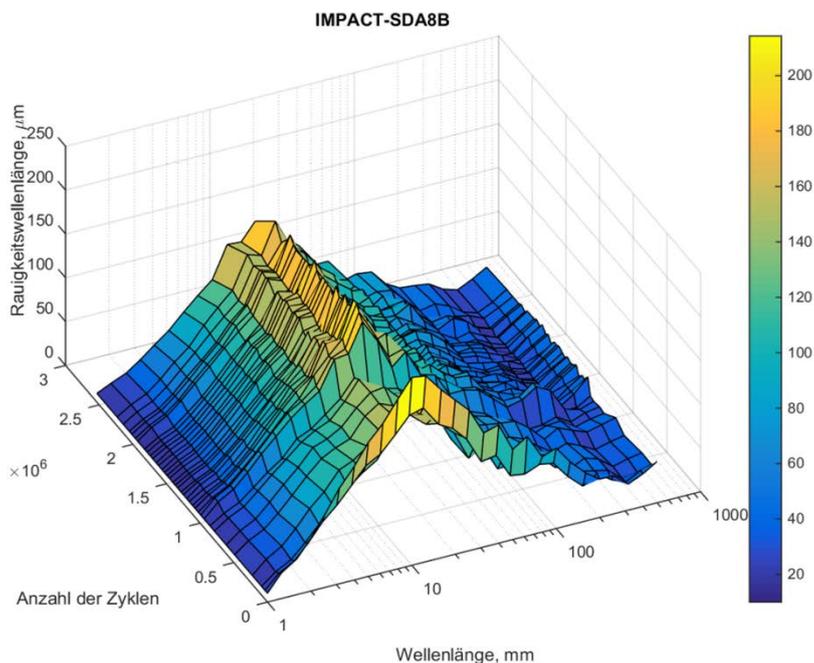


Abb. 100 Dreidimensionale Darstellung des Rauigkeitsspektrums des SDA 8B als Funktion der Anzahl der Überrollungen.

5.3.4 Beschreibung der Texturveränderungen

Im Gegensatz zum Strömungswiderstand zeigen die Texturparameter keinen einfachen durchgängigen Trend. Wie beim Strömungswiderstand, so zeigt sich auch bei der Textur allerdings ein „Einfahrverhalten“. Über die ersten einige zehntausend Zyklen nehmen MPD-Wert (Abb. 92), RMS-Wert (Abb. 93) und Rauigkeitstiefe (Abb. 95) deutlich ab, während der Gestaltfaktor (Abb. 94) zunimmt. Teilweise wird anschliessend ein „Überschwin-

gen“ beobachtet, welches in jeweils etwa konstante Niveaus einmündet. Nach gut 500'000 Zyklen haben MPD- und RMS-Wert und die Rauigkeit ein erstes Maximum und der Gestaltfaktor des SDA 4C ein deutliches Minimum. Der Gestaltfaktor des SDA 8B erreicht sein weniger ausgeprägtes Minimum nach rund 700'000 Zyklen. Unmittelbar vor oder nach der Wartungspause weisen alle Kennwerte (mit Ausnahme des SDA 4C-Gestaltfaktors) ein Minimum auf. Danach streben Gestaltfaktor und RMS-Wert nach oben, ebenso wie die Rauigkeitstiefe des SDA 8B. Die anderen Kennwerte verharren im Wesentlichen auf konstantem Niveau. Fast alle Kennwerte erreichen nach 1.65 Millionen Zyklen eine Grössenordnung wie unmittelbar nach dem „Einfahren“. In den letzten 300'000 Überrollungszyklen scheint eine Tendenz zu tieferen MPD- und RMS-Werten hin zu bestehen. Dies bestätigt auch die Tendenz der Entwicklung des Strömungswiderstands gegen Ende der Versuchsreihe. Der Strömungswiderstand steigt bei beiden Belägen stärker an als in den vorangegangenen 2 Mio. Zyklen (*Abb. 64* und *Abb. 65*).

Wie beim Strömungswiderstand (*Abb. 64* und *Abb. 65*) fällt auch in der zeitlichen Entwicklung der Texturkennwerte eine Unstetigkeit auf. Dieses Ergebnis lässt sich durch die ab etwa 850'000 Zyklen einsetzende Kornumlagerung und den im Falle des SDA 8B zusätzlich auftretenden Kornverlust erklären. Der Strömungswiderstand nimmt aufgrund der durch umgelagerte oder fehlende Körner zunehmenden Grobheit der Oberfläche ab, wogegen die auf die Rauigkeit der Oberfläche bezogenen Texturkennwerte zunehmen.

Die Kornumlagerung macht sich beim SDA 8B und, mit Abstrichen, auch beim SDA 4C auch durch eine leichte Verschiebung des Maximums im Texturspektrum zu längeren Wellenlängen hin bemerkbar (*Abb. 96*). Dies deutet auf ein Auseinanderstreben der groben Gesteinskörnung, also eben eine Umlagerung der Gesteinskörner hin.

Insgesamt sind die Magnituden der beobachteten Texturveränderungen beim SDA 4C-Belag eher gering, wogegen der grobkörnigere SDA 8B-Belag gravierenderen Texturveränderungen unterworfen ist, bis hin zu einzelnen Kornverlusten. Da im IMPACT Prüfstand der Schlupf so gesteuert wird, dass er in der Vorwärts- und Rückwärtsbewegung des Reifens in der gleichen Richtung wirkt, kommt es durch die gleichgerichtete Schlupfbeanspruchung generell zu Kornverschiebungen.

5.4 SPERoN-Berechnungen

Mit den im IMPACT-Prüfstand gemessenen Texturen, Strömungswiderstands- und Absorptionsgradmessungen lässt sich mit Hilfe von SPERoN der Schalldruckpegel simulieren, wie er bei einer statistischen Vorbeifahrtmessung zu erwarten ist. Dazu ist in der Praxis die Berechnung von Einzelvorbeifahrtpegeln mit einem Kollektiv von Pneu notwendig, um die bei statistischen Vorbeifahrtmessungen entstehende zufällige Stichprobe von Pneu-Fahrzeug-Kombinationen nachzustellen. *Tab. 10* weist die für die SPERoN-Berechnungen verwendeten Pneu aus. Im vorliegenden Falle geht es jedoch nicht um die Nachbildung der in der Praxis üblichen Streuungen, sondern um die gezielte Analyse der Entwicklung der Schallpegel unter konstanten Laborbedingungen. Die Verwendung des Reifenkollektives führt infolge der Streuung zwischen den einzelnen Reifen zu einer Unschärfe, welche die Bewertung der Schallpegelentwicklung im Prüfstand erschwert. Aus diesem Grunde wurden in den folgenden Auswertungen die Daten eines einzelnen Reifens ausgewählt.

Für zahlreiche Messdatenensembles, d.h. bei ausgewählten Anzahlen der Überrollungszyklen wurden SPERoN-Simulationen durchgeführt. Berechnet wurden die A-bewerteten Schalldruckpegel in 7.5 m Entfernung und in 1.2 m Höhe über der Strasse für 50 km/h und 80 km/h, sowohl für den SDA 4C als auch für den SDA 8B-Prüfkörper. Die Berechnungen beginnen bei 226'405 Überrollungszyklen und enden bei 2'534'517 Zyklen. Die Zeit des Einfahrens wurde bewusst ausgeklammert, um die akustische Verschleisswirkung der Beanspruchung der Prüfkörper im IMPACT-Prüfstand realistisch veranschaulichen zu können. In der Praxis werden die initialen Messungen nach Einbau einer neuen Deckschicht auch erst nach etwa einem Monat nach Verkehrsfreigabe durchgeführt.

Tab. 10 Liste der den SPERoN-Berechnungen zugrundegelegten Pneus.

Pneotyp	Dimension	Pneotyp	Dimension
Michelin Energy E3A	195/60 R15	Goodyear Eagle F1 GS-D3	205/55 ZR16
Goodyear Energy GT3	175/65 R14	Dayton D110	175/70 R14
Michelin Energy	175/65 R14	Sportiva G70	175/70 R14
Pirelli P3000 Energy	175/65 R14	Barum Brillantis	185/65 R15
Continental EcoContact EP	175/65 R14	Goodyear Excellence	195/65 R15
Vredestein Hi-Trac	195/65 R15	Continental PremiumContact	195/65 R15
Uniroyal Ultragrip	175/65 R14	Toyo Proxes T1	205/70 ZR16
Goodyear Eagle NCT5 EMT	195/55 R16	Continental EcoContact	195/65 R15

In den Darstellungen *Abb. 101* bis *Abb. 104* sind die mit SPERoN berechneten Vorbeifahrtpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungen aufgetragen. Die Pegelwerte ergeben sich durch energetische Mittelung der Einzelpegelwerte aller Pneus aus *Tab. 10*. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den im Schlussbericht zu Projekt EP2 dargestellten SPERoN-Rechnungsergebnissen sind den Ergebnissen für den Mittelwert des Gesamtpegels auch die Gesamtpegel für den Einzelreifen Goodyear Eagle F1 GS-D3 gegenübergestellt. Die Abbildungen enthalten jeweils auch Trendlinien für die jeweilige Geräuschkomponente, die sich aus einer linearen Regression der errechneten Pegel über der Anzahl der Zyklen ergeben. Ausreisser wurden in diesen Regressionsmodellen durch Entfernen des jeweils höchsten und tiefsten Wertes im jeweiligen Datensatz ausgeschlossen. Bei den hier zugrunde liegenden Datensätzen von jeweils 20 Werten entspricht dieser Ausschluss einer Schranke von jeweils 5 % der höchsten und tiefsten Werte. Die aus den Regressionsmodellen ausgeschlossenen Ausreisser sind in den Diagrammen durch gelbe Farbe gekennzeichnet.

Die Vorhersageunsicherheit von SPERoN liegt, bezogen auf den A-bewerteten Gesamtpegel, bei +/- 0.5 dB(A). Das bedeutet, dass Pegelunterschiede zwischen einzelnen SPERoN-Rechnungsergebnissen erst ab einem Wert von 1 dB(A) als wesentlich bezeichnet werden können.

Neben dem (mittleren) Gesamtpegel (grau) werden auch die mechanischen Anteile (durch Reifenschwingungen und Hohlraumresonanzen im Reifentorus induziert, rot) und die aerodynamische Komponente (blau) als Mittelwerte über alle Pneus gezeigt. Alle nachfolgend beschriebenen SPERoN-Ergebnisse beinhalten jedoch nicht die pegelmindernde Wirkung der Schallabsorption, die bei beiden Belägen aufgrund des erhöhten Hohlraumgehalts soweit ausgeprägt ist, dass sie zu einer nennenswerten Minderung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche bei allen Geschwindigkeiten beiträgt. Eine Veränderung der Schallabsorption geht bei hohlraumreichen Deckschichten auch immer einher mit einer Veränderung des hohlrauminduzierten Strömungswiderstands. Die Ergebnisse der Strömungswiderstandsmessungen auf den beiden Prüfkörpern während des Dauerversuchs zeigen jedoch, dass nach dem anfänglichen "Einfahren" der Oberflächen keine wesentliche Änderung des Strömungswiderstands mehr eintritt. Insoweit kann davon ausgegangen werden, dass sich auch der Schallabsorptionsgrad über alle Überrollungszyklen hinweg nicht wesentlich verändert hat. Deshalb wurde auf die Berücksichtigung des Schallabsorptionsgrads hier verzichtet. Die nachfolgend diskutierten Schalldruckpegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche fallen rechnerisch damit zu hoch aus, was jedoch keinen Nachteil darstellt, da die fehlende Schallabsorption nur eine absolute Verschiebung der

Schalldruckpegel bedeutet. Relative, texturbedingte Unterschiede und Verschiebungen lassen sich ohne Einschränkung ablesen.

In allen Fällen zeigt sich eine Zunahme der Schallpegel mit der Anzahl der Überrollungen. Die Zunahme ist augenscheinlich etwa linear und kann näherungsweise durch lineare Regression beschrieben werden. Die Zunahme des Gesamtpegels für den Einzelreifen Goodyear Eagle F1 ist in allen Fällen grösser als für den Mittelwert des Gesamtpegels über alle Reifen. Die Zunahme des Gesamtpegels für den Goodyear Eagle F1 ist auf dem Belag SDA 8B bei 50 km/h mit 0.7 dB(A) pro 1 Mio. Zyklen am grössten. Die Pegelsumme von mechanischer und aerodynamischer Geräuschkomponente ist kleiner als der Gesamtpegel, denn der Gesamtpegel enthält als Residualkomponente, die nichts mit dem Reifen-Fahrbahn-Geräusch zu tun hat, dennoch aber im Zusammenhang mit dem Vorbeifahrtgeräusch von Fahrzeugen nicht vernachlässigt werden kann, zusätzlich noch das Karosserieströmungsgeräusch.

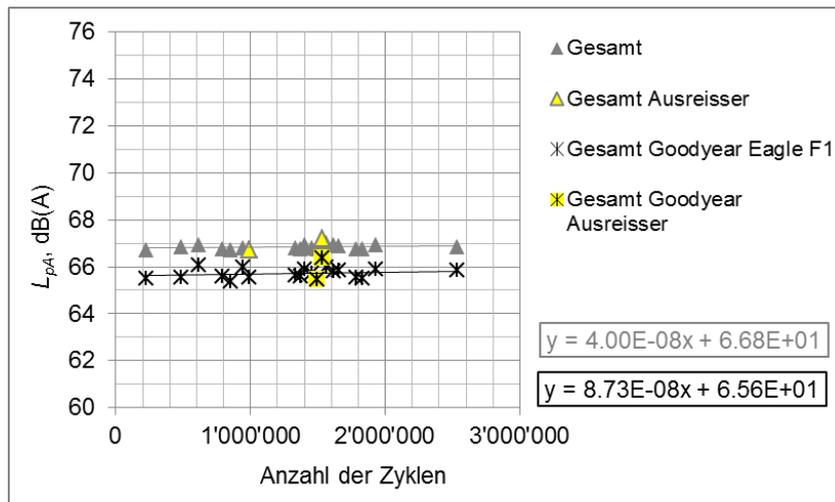
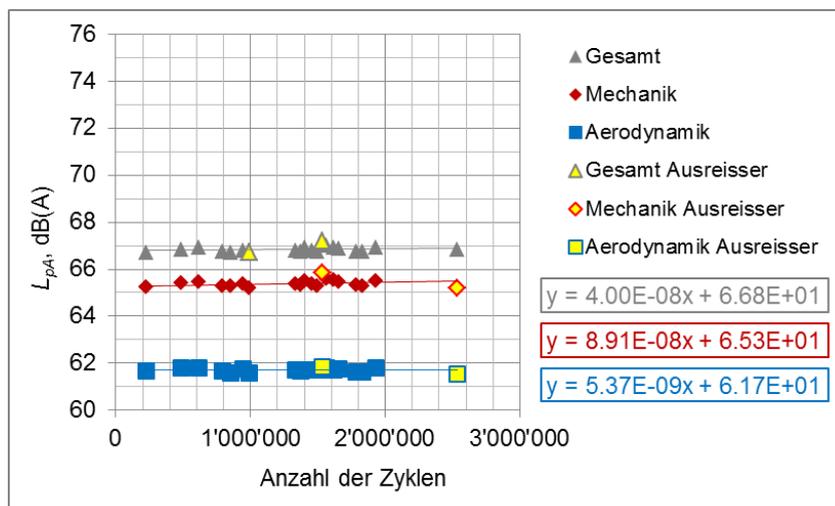


Abb. 101 A-bewerteter SPERoN-Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen für den SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Oben: Mittelwerte für das gewählte Reifenkollektiv der mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamische Komponente (blau) und der Gesamtpegel (grau) und die zugehörigen Regressionsgeraden; unten: Mittelwert des Gesamtpegels über alle Pneu des Kollektivs und Gesamtpegel für den Einzelpneu Goodyear Eagle F1 mit den zugehörigen Regressionsgeraden.

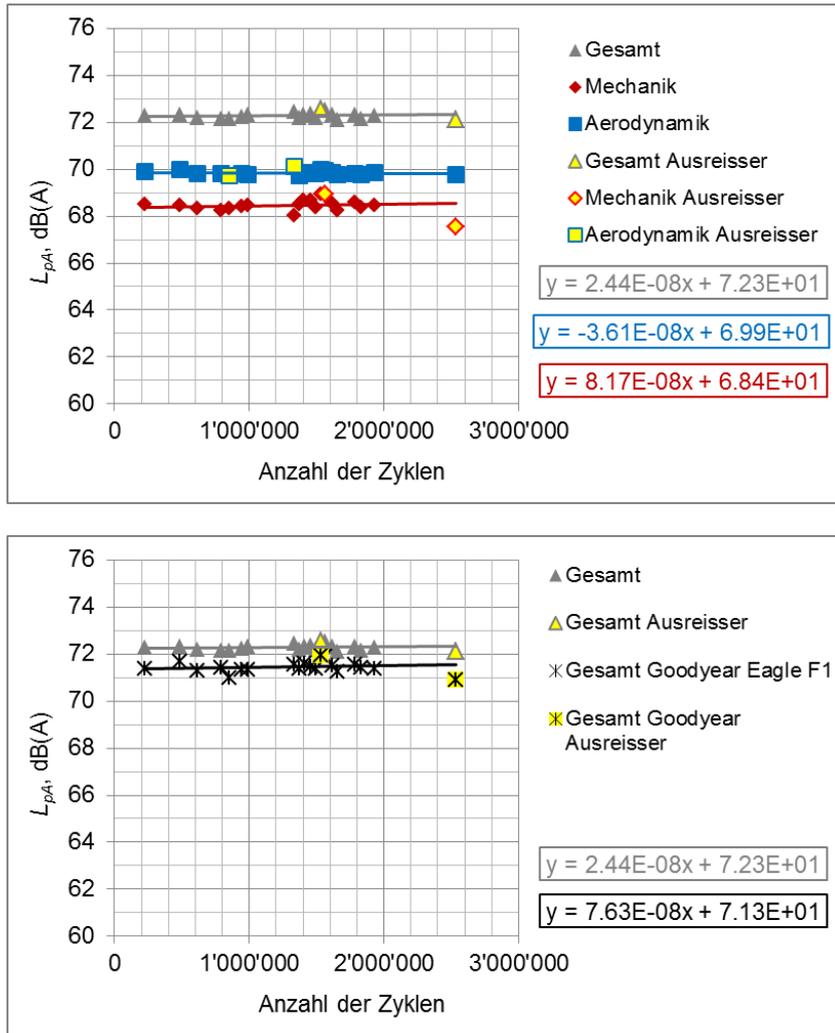


Abb. 102 A--bewerteter SPERoN-Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen für den SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Oben: Mittelwerte für das gewählte Reifenkollektiv der mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamische Komponente (blau) und der Gesamtpegel (grau) und die zugehörigen Regressionsgeraden; unten: Mittelwert des Gesamtpegels über alle Pneus des Kollektivs und Gesamtpegel für den Einzelpneu Goodyear Eagle F1 mit den zugehörigen Regressionsgeraden.

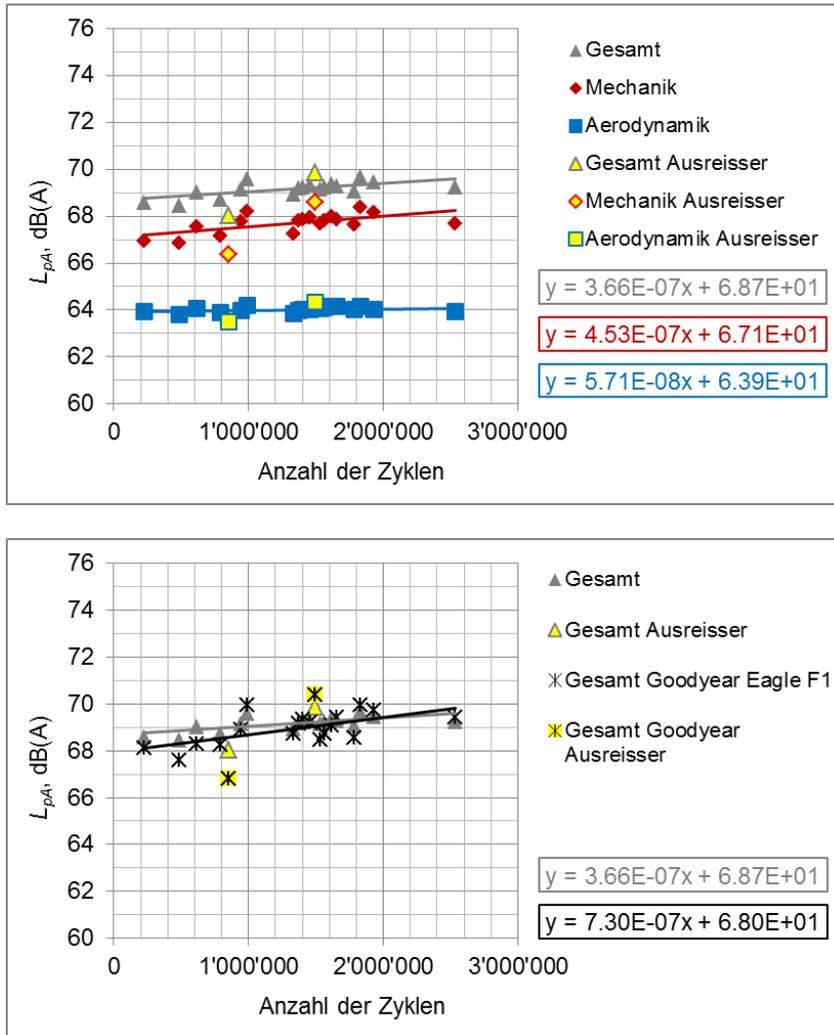


Abb. 103 A-bewerteter SPERoN-Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen für den SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Oben: Mittelwerte für das gewählte Reifenkollektiv der mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamische Komponente (blau) und der Gesamtpegel (grau) und die zugehörigen Regressionsgeraden; unten: Mittelwert des Gesamtpegels über alle Pneus des Kollektivs und Gesamtpegel für den Einzelpneu Goodyear Eagle F1 mit den zugehörigen Regressionsgeraden.

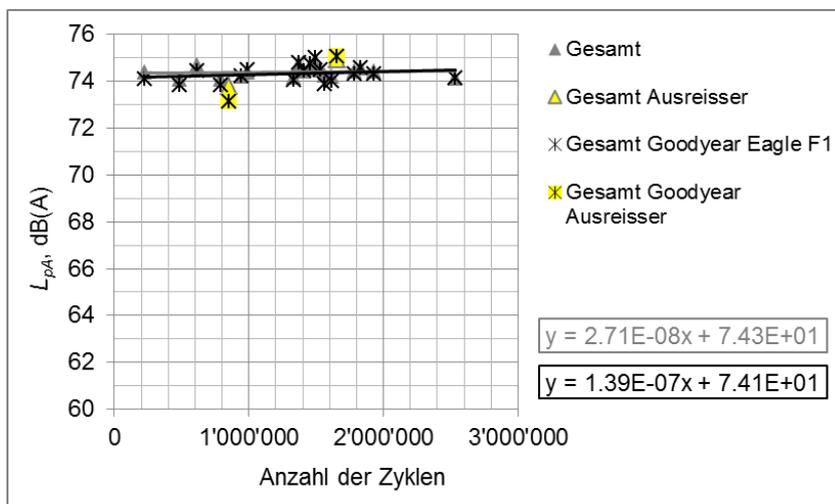
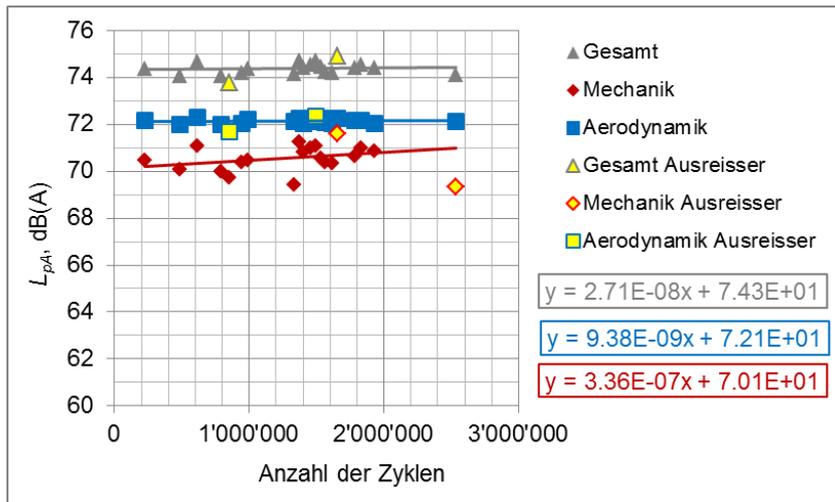


Abb. 104 A-bewerteter SPERoN-Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen für den SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Oben: Mittelwerte für das gewählte Reifenkollektiv der mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamische Komponente (blau) und der Gesamtpegel (grau) und die zugehörigen Regressionsgeraden; unten: Mittelwert des Gesamtpegels über alle Pneus des Kollektivs und Gesamtpegel für den Einzelpneu Goodyear Eagle F1 mit den zugehörigen Regressionsgeraden.

Folgendes lässt sich beobachten:

1. Der Pegelanstieg mit der Anzahl der Überrollungen wird im Wesentlichen durch die mechanisch angeregten Geräuschanteile verursacht.
2. Die mechanische Anregung dominiert bei tiefen Fahrgeschwindigkeiten. Dies gilt sowohl für den feinrauen SDA 4C Belag als auch den grobrauheren SDA 8B Belag.
3. Bei 80 km/h liegt die errechnete Pegelzunahme nur bei rund 40 Prozent der Zunahme bei 50 km/h.
4. Die Veränderungen an der Oberfläche des SDA 4C Belags tendieren eher zu einer Verfeinerung des Textur als zu einer Vergrößerung. Da der Strömungswiderstand im Laufe der Versuchsreihe ansteigt und sich die Texturkennwerte kaum verändern, ist davon auszugehen, dass die Beanspruchung der Oberfläche im IMPACT Prüfstand zu einer "Verschmierung" der Textur ohne wesentliche strukturelle Beanspruchung führt, was sich akustisch eher vorteilhaft als nachteilig auswirkt. Die mechanische Komponente bleibt nahezu unverändert, die aerodynamische Komponente nimmt dagegen ganz leicht ab (man beachte hierzu das negative Vorzeichen der Trendlinie für die aerodynamische Komponente bei 80 km/h).

5. Auf dem SDA 8B Belag wirkt sich die Beanspruchung im Prüfstand dagegen deutlich negativer auf die Textur und damit auf das Geräuschverhalten aus als auf dem SDA 4C Belag. Dies führt zu einem signifikanten Anstieg der mechanischen Geräuschkomponente und schlägt selbst bei 80 km/h noch auf den Gesamtpegel durch, obwohl die aerodynamische Komponente bei dieser Geschwindigkeit auch auf dem SDA 8B Belag ein leichtes Übergewicht gegenüber der mechanischen Geräuschkomponente aufweist.

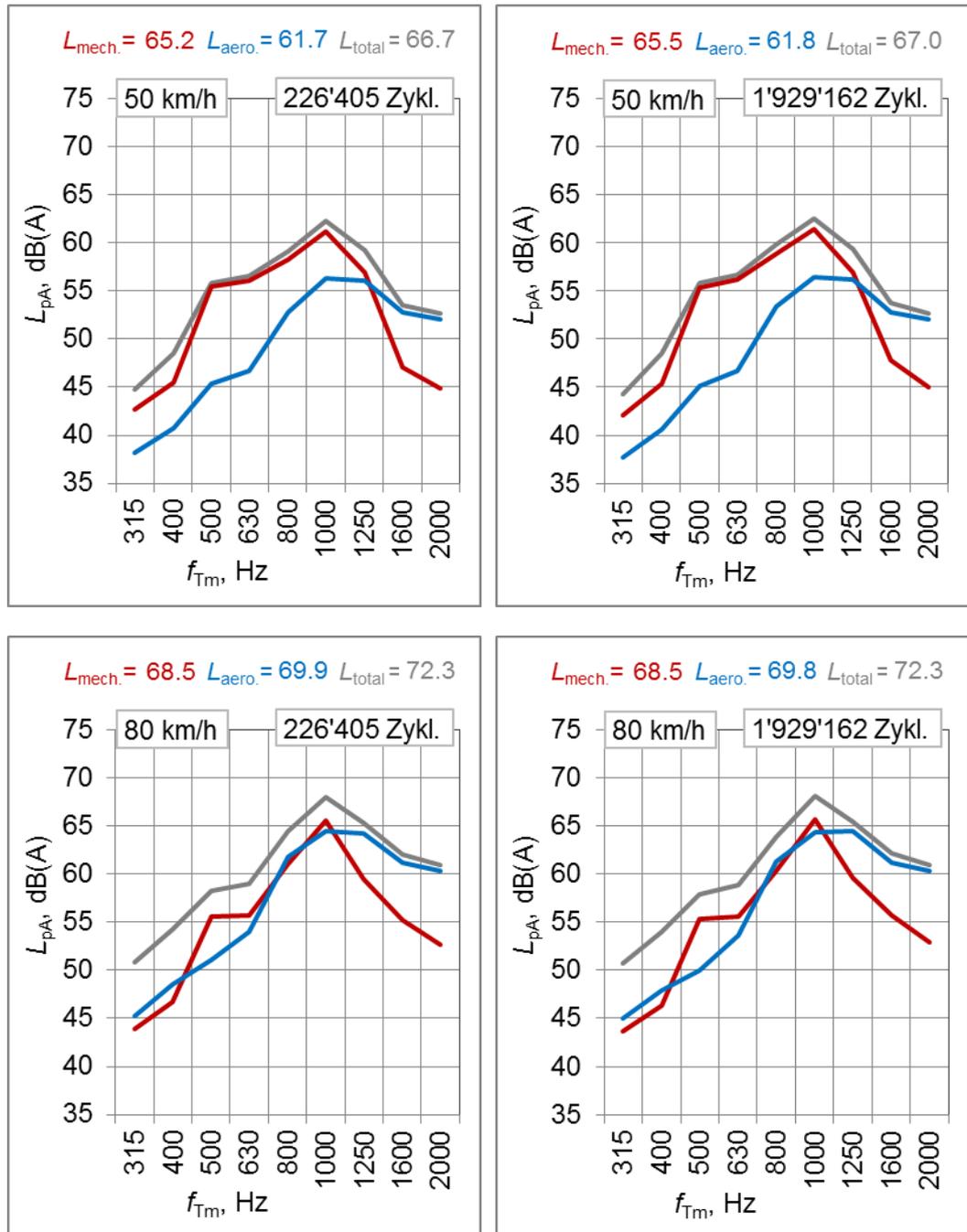


Abb. 105 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für die Überrollungszyklenanzahlen zu Beginn und am Ende des IMPACT-Dauerversuchs. Prüfkörper SDA 4C; obere Reihe: $v = 50$ km/h, untere Reihe: $v = 80$ km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

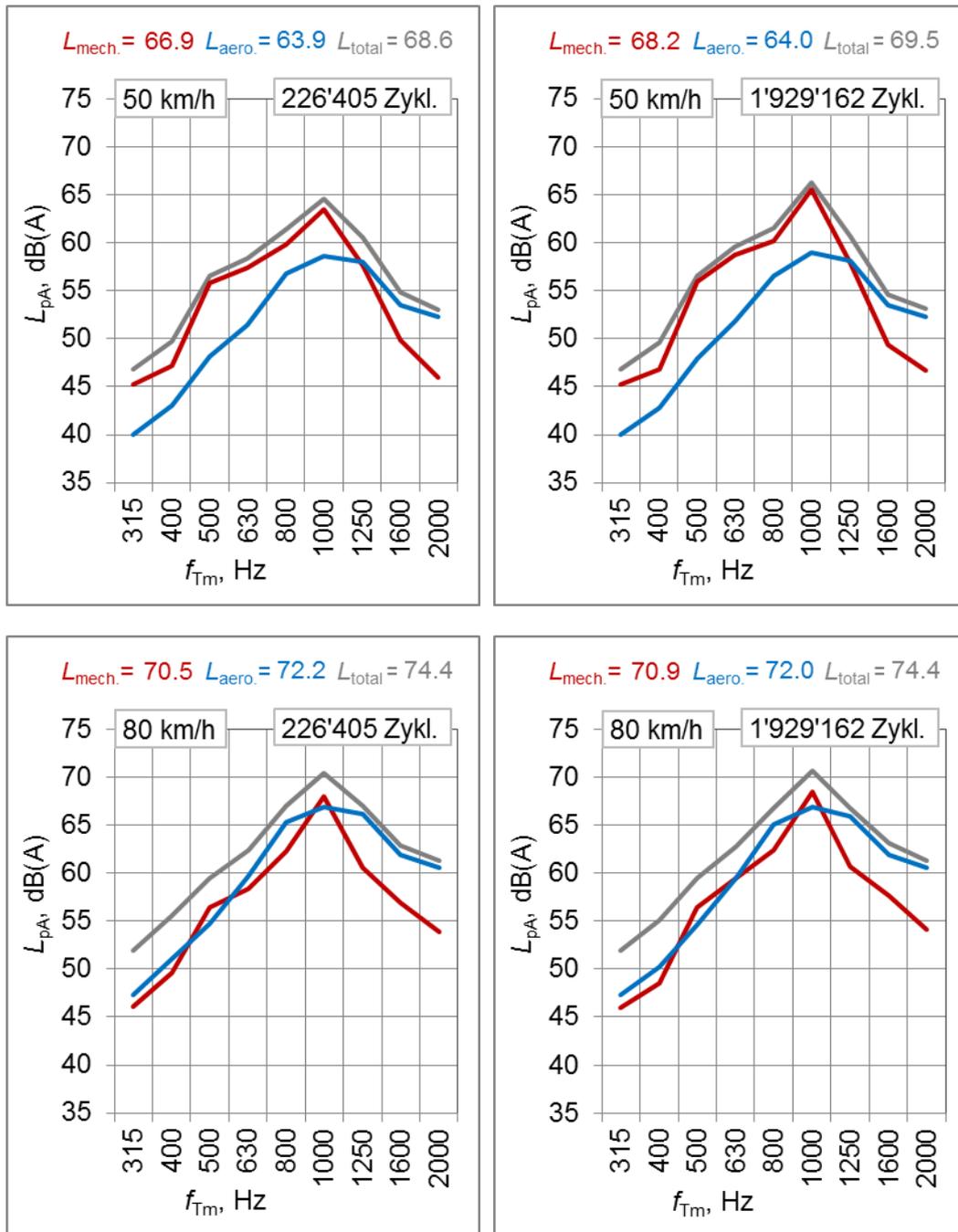


Abb. 106 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für die Überrollungszyklenanzahlen zu Beginn und am Ende des IMPACT-Dauerversuchs. Prüfkörper SDA 8B; obere Reihe: $v = 50$ km/h, untere Reihe: $v = 80$ km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

In den Abbildungen Abb. 105 und Abb. 106 sind jeweils Terzspektren des Vorbeifahrtpegels für die Geschwindigkeiten $v = 50$ km/h und 80 km/h zu Beginn und gegen Ende der akustischen Dauerversuchsreihe dargestellt. Da die Rechenergebnisse für die letzte Zykluszahl von 2'534'517 Zyklen einige Ausreisser enthalten (siehe oben), sind die Ergebnisse für die Zykluszahl von 1'929'162 Zyklen wiedergegeben. Neben dem Gesamtpegel (grau) werden auch die mechanischen Anteile (durch Reifenschwingungen und Hohlraumresonanzen im Reifentorus induziert, rot) und die aerodynamische Komponente (blau) gezeigt. Die Pegelsumme von mechanischer und aerodynamischer Geräuschkom-

ponente kann kleiner sein als der dargestellte Gesamtpegel, da der Gesamtpegel zusätzlich noch das Karosserieströmungsgeräusch, das hier nicht als Einzelkomponente dargestellt ist, enthält. Der Anhang enthält die SPERoN-Rechenergebnisse aller Überrollungszyklenanzahlen.

Die Ergebnisse der Messungen der Oberflächeneigenschaften spiegeln sich auch in den Spektren wieder. Bei tiefen Geschwindigkeiten sind die Reifen-Fahrbahn-Geräusche im Wesentlichen durch die mechanische Geräuschanregung bestimmt. Veränderungen der Textur wirken sich deshalb gravierender aus als bei höheren Geschwindigkeiten, bei denen die aerodynamische Geräuschkomponente pegelbestimmend wirkt. Strömungswiderstandsänderungen wirken sich unmittelbar auf die aerodynamische Geräuschkomponente aus. Die Veränderungen des Strömungswiderstands im Laufe des Dauerversuchs sind jedoch so klein, dass keine wesentliche Änderung des Pegels der aerodynamischen Komponente eintritt. Dieses Ergebnis zeigt letztlich aber auch, dass sich ungünstige Veränderungen der Oberflächentextur gerade bei Innerortsgeschwindigkeiten negativ auswirken. Im Falle des SDA 8B Belags macht sich dies immerhin mit einer Pegelerhöhung der mechanischen Geräuschkomponente von rund 1 dB(A) bei 50 km/h im Laufe des Dauerversuchs bemerkbar.

6 Schlussfolgerungen, Ausblick und Empfehlungen

6.1 Schlussfolgerungen

Einzelprojekt EP4 ist in engem Zusammenhang mit Einzelprojekt EP2 zu sehen. EP4 liefert die Mess- und Berechnungswerkzeuge, um die im Prüfstand IMPACT, der Ergebnis der Forschungsarbeit in EP2 ist, beanspruchten Laborprobekörper lärmarmen Beläge auf die Veränderung der akustischen Performance hin zu überprüfen. Die Anpassung der Messverfahren an den Prüfstand zur Bestimmung der Textur, des Strömungswiderstands und des Schallabsorptionsgrads ist vollumfänglich gelungen und auf ähnliche Prüfstände übertragbar. Die Bestimmung der mechanischen Impedanz von Probekörpern im IMPACT war nicht erfolgreich, weil diese zu empfindlich auf die Auflagebedingungen der Probekörper reagiert, die ohne grösseren konstruktiven Umbau des Prüfstands nicht zu verbessern waren. Da die mechanische Impedanz jedoch sowieso nur bei den derzeit für die Strassenbaupraxis bedeutungslosen Deckschichten aus poroelastischem Mischgut eine Rolle spielt, war dies kein Nachteil.

SPERoN ist geeignet, die Rollgeräuschpegel mit einer Genauigkeit von +/- 0.5 dB(A), bezogen auf den Gesamtpegel aller berechneten Geräuschkomponenten, vorherzusagen. Damit lassen sich mit SPERoN die in der Strassenbaupraxis langfristig heute zu erwartenden Veränderungen der akustischen Eigenschaften lärmarmen Beläge innerorts von 2 dB(A) bis 5 dB(A) in 5 Jahren nach Verkehrsfreigabe [7] abbilden. Die SPERoN-Berechnungen für die im IMPACT beanspruchten Probekörper lärmarmen Beläge lagen, in Abhängigkeit vom Reifen, zwischen 0 dB(A) und 0.7 dB(A) für einen Probekörper aus Mischgut SDA 4C und zwischen 0.3 dB(A) und 1.6 dB(A) für einen Probekörper aus Mischgut SDA 8B. Die Abhängigkeit des Rollgeräuschpegels vom Reifentyp entspricht der Praxis [16]. Der Reifentyp Goodyear Eagle F1 GS-D3 lieferte in EP4 die im Vergleich zu 15 anderen Reifen grösste Veränderung der berechneten Rollgeräuschpegel.

Validierungsmessungen an vergleichbaren Belägen in situ und im IMPACT haben gezeigt, dass sowohl die Herstellung der Laborprobekörper als auch die mechanische Beanspruchung der Fahrbahnoberfläche den Gegebenheiten der realen Strasse nahe kommt, bislang aber noch nicht vollständig wiedergibt. Die im IMPACT-Prüfstand über eine Anzahl von rund 4'000'000 Überrollungen simulierte mechanische Beanspruchung spiegelt die Verhältnisse des Strassenbetriebs für einen Zeitraum von vielleicht 2 Jahren wider. Dies gilt jedoch nur für tiefe Geschwindigkeiten von nicht mehr als 40 km/h, bei denen alleine die mechanische induzierte Geräuschkomponente den Rollgeräuschpegel bestimmt. Das Ausmass der akustischen Veränderungen der Oberflächeneigenschaften nach über 5 Millionen Überrollungen blieb, vor dem Hintergrund des dem damit verbundenen Zeitaufwands von 10 Monaten im Prüfstand, jedoch noch hinter den Erwartungen zurück. Zusätzliche, nicht mechanische Anpassungen der Prüfbedingungen im IMPACT sind notwendig.

6.2 Ausblick und Empfehlungen

Prüfbedingungen

Insgesamt hat das Forschungsvorhaben gezeigt, dass sich im Prüfstand akustisch relevante Oberflächenveränderungen erzeugen lassen. Im gegenwärtigen Ausbauzustand des IMPACT gehen diese Veränderungen jedoch so langsam vor sich, dass gegenüber der Veränderung auf einer realen Strasse im Prüfstand keine signifikante Beschleunigung zu erkennen ist. Da mit dem Prüfverfahren IMPACT jedoch keine substantielle Beanspruchung von Strassendeckschichten beabsichtigt ist, sondern ausschliesslich eine realitätsnahe Veränderung der akustisch relevanten Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche

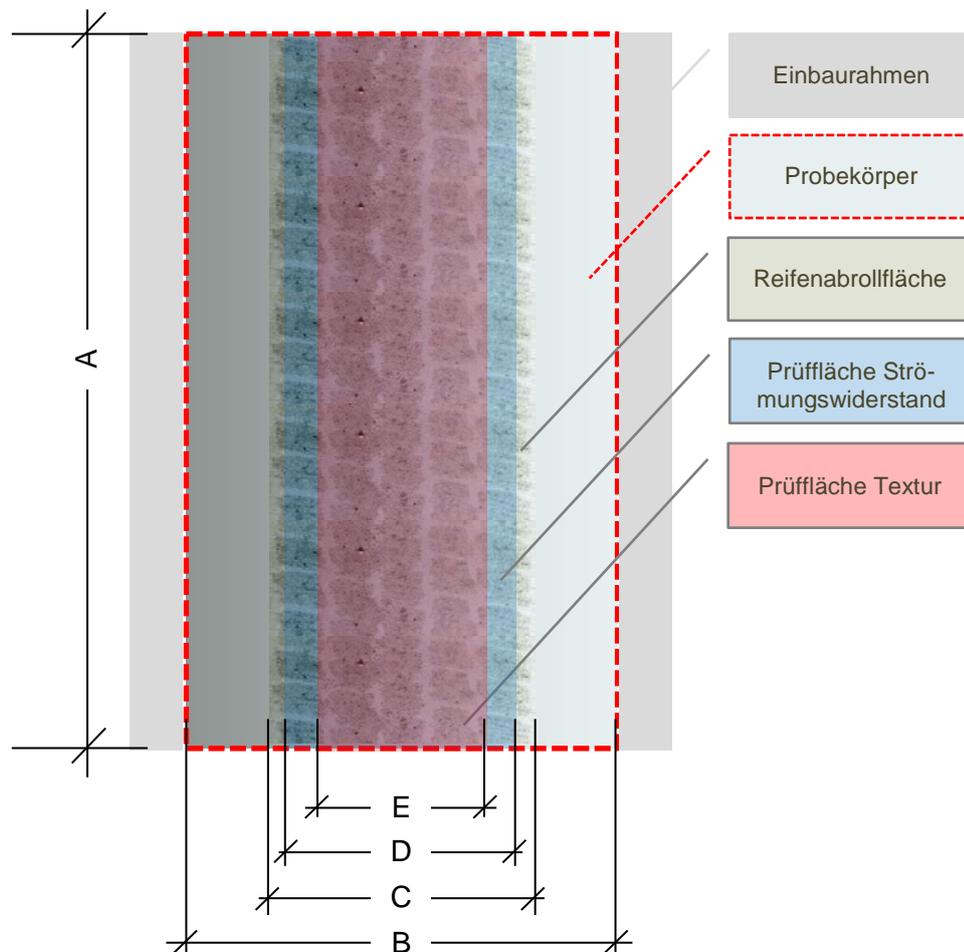
im Fokus steht, sollten sich notwendige Anpassungen im Rahmen halten. Der Weg zu einem effizienteren Prüfverfahren und einer realistischeren Alterungssimulation dürfte dabei über eine Nachbildung des natürlichen Klimaeinflusses führen.

Die Oberflächenstrukturveränderungen im IMPACT entsprechen offenbar noch nicht in jeder Hinsicht dem Verschleiss durch den Strassenbetrieb. Der Prüfstand sollte deshalb funktionell so erweitert werden, dass neben der mechanischen Beanspruchung weitere Alterungsprozesse von Deckschichten auf Innerortsstrassen mit in den Prüfstandsversuch einbezogen werden. Dazu zählen thermische Effekte des periodischen Aufheizens und Abkühlens bis unter die Frostgrenze, die das Bindemittel versprödende UV-Sonneneinstrahlung und chemische Veränderungen durch Staub- und Streusalzeintrag. Insbesondere die allmähliche Versprödung des Bindemittels scheint bislang zu fehlen. Anstatt einer Ausmagerung der Bindemittelmatrix und dadurch zu erwartenden Vergröberung der Textur erfolgte eine Verschmierung des Bindemittels in der Oberflächenstruktur, besonders bei der feinrauen Deckschicht SDA 4C. Eine starke, zeituhrgesteuerte UV- und Infrarotheizung und eine periodische Bestäubung sollten sich mit geringem technischen Aufwand ergänzen lassen. Reinigung, Bewässerung und Frost könnte man vielleicht am Einfachsten durch periodischen Ausbau, Abspritzen und stundenweise Lagerung in einem Gefrierschrank bewerkstelligen. Nach einem solchermassen erweiterten Belagsalterungsprogramm ist mit grösseren und schnelleren Veränderungen der Belageigenschaften und einer schnelleren akustischen Alterung zu rechnen.

Prüfstand

Die Abmessungen der Probekörper im Prüfstand mit einer Länge von 50 cm (2 Probekörper mit jeweils 50 cm Länge) und einer Breite von 18 cm müssen als untere Limite für die beabsichtigten akustischen Prüfungen angesehen werden. Die Messung des Strömungswiderstands der Belagsoberfläche erfordert ein planebenes Aufliegen des elastischen Rings, mit dem der Messfuss des Messsystems an die Oberfläche angekoppelt wird. Entstehen im Prüfstand über den Querschnitt der Probekörper beanspruchte und unbeanspruchte Bereiche führt dies zu Querunebenheiten. Der Messfuss liegt dann nicht mehr planeben auf, der Luftstrom während der Messung entweicht unabsichtlich und das Messergebnis wird verfälscht. Die Abmessungen des Messfusses für die Bestimmung des Luftströmungswiderstands können jedoch nicht beliebig verkleinert werden, da sonst die Vergleichbarkeit mit standardisierten Messungen in situ auf Strassenoberflächen nicht mehr herzustellen ist und die Messwerte in SPERoN nicht mehr eingespeist werden können. Aus diesen Anforderungen ergibt sich die in *Abb. 107* dargestellte Empfehlung für den Aufbau des Prüfstands.

Sollte zukünftig die Prüfung poroelastischer oder elastischer Fahrbahnbeläge in Frage kommen, ist zu beachten, dass die Vorrichtung zur Aufnahme der Probekörper bei schlechter, das heisst nicht formschlüssiger Ankopplung des Probekörpers an den Untergrund, also die Probekörperwanne, und eine zu geringe mechanische Impedanz der Probekörperwanne im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 2 kHz nicht rückwirkungsfrei ist und damit die Messung der mechanischen Impedanz des Probekörpers stört. Eine für mechanische Impedanzmessungen an elastischen Probekörpern geeignete Vorrichtung muss als schwere, durch entsprechende Messungen der mechanischen Impedanz überprüfte Konstruktion ausgeführt werden. Der Probekörper muss mindestens formschlüssig mit dem Boden der Probekörperwanne verbunden sein.



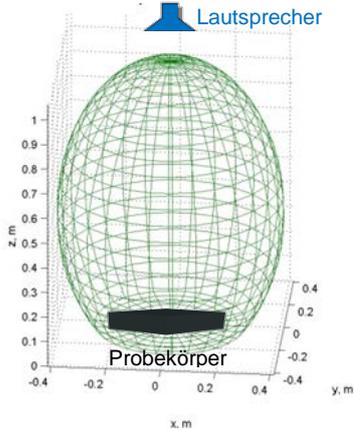
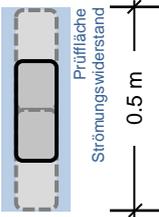
	Nennbreite des Reifens	≥ 205 mm
A:	Länge des Probekörpers	0.5 m ... 2.0 m
B:	Breite des Probekörpers	≥ 1.3 · C
C:	Breite der Reifenabrollfläche bei korrektem Reifeninnendruck und unter fahrzeugadäquater Belastung	Reifeninnendruck C 205 mm 155 mm 215 mm 160 mm 225 mm 180 mm
D:	Breite der Prüffläche für den Strömungswiderstand	150 mm
E:	Breite der Prüffläche für die Texturmessung	100 mm
	(für die Messung von 6 parallelen Texturlängsprofilen in einem Abstand von 20 mm)	

Abb. 107 Empfohlene Eigenschaften des Prüfstandaufbaus.

Prüfungen

Den Erkenntnissen aus dem EP4 Projekt nach finden zu Beginn der Beanspruchung der Probekörper stärkere Veränderungen der akustischen Eigenschaften statt als zu späteren Zeitpunkten des Dauerversuchs. Dies entspricht den Erfahrungen mit geräuschkindernden Fahrbahnbelägen in der Praxis, weshalb eine Anpassung der Stichprobenmessungen für Textur, Strömungswiderstand und Schallabsorptionsgrad gegenüber dem in EP4 gewählten Ablauf sinnvoll erscheint. Das in Tab. 11 und Abb. 108 wiedergegebene Prüfschema wird empfohlen. Es orientiert sich insbesondere an den auch nach Verbesserung der Prüfbedingungen und der Beanspruchung der Probekörper zu erwartenden Veränderungen des Strömungswiderstands als eine der wichtigen Größen für die Entstehung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs. Hierbei werden zwei Aspekte berücksichtigt: die relative Änderung des Strömungswiderstands zum Wert der vorhergehenden Stichprobe und die Empfindlichkeit der Reifen-Fahrbahn-Geräusche gegenüber Änderungen des Strömungswiderstandes. Jede Stichprobe soll eine signifikante Veränderung gegenüber dem vorhergehenden Wert aufweisen.

Tab. 11 Ablauf der akustischen Prüfungen im IMPACT.

Prüfschritt	Inhalt	Zweck	Aufbau und Prüfbedingungen
V (Vorhermessung)	Messung des Schallabsorptionsgrads der Probekörper auf schallhartem Boden in reflexionsfreier Umgebung (siehe hierzu Kap. 3.3.2 und Abb. 33) vor der Beanspruchung im IMPACT	Ermittlung des Schallabsorptionsgrads im nicht eingebauten Zustand (Referenzzustand)	<p>Ebenflächiger, nicht schallabsorbierender (schallharter) Untergrund am Boden der Fresnelzone</p> <p>Hindernisfreiheit innerhalb der Fresnelzone um den Prüfkörper</p> <p>Höhe des Lautsprechers: 1.0 m über Boden</p> <p>Volumen innerhalb dessen sich keine schallreflektierenden Objekte befinden dürfen (Fresnelzone):</p> 
			<p>Raumlufttemperatur: 15°C – 25°C</p> <p>Probekörper im trockenen Zustand</p>
P0 (Nullmessung)	<p>Akustische Prüfungen zu Beginn der Beanspruchung</p> <p>Messung des Schallabsorptionsgrads der Probekörper im IMPACT und Überprüfung der Korrekturkurve für den Frequenzgang des Schallabsorptionsgrads nach Kap. 3.3.2</p>	<p>Ermittlung des Schallabsorptionsgrads im eingebauten Prüfzustand und Bildung der Differenzkurve der Frequenzgänge des Schallabsorptionsgrads aus Prüfung V und Prüfung P0. Die Differenzkurve dient zur Korrektur der im IMPACT gemessenen Frequenzgänge in den Prüfschritten P1 bis P7 (siehe hierzu Kap. 3.3.2 und Abb. 34 links unten)</p>	<p>Raumlufttemperatur: 15°C – 25°C</p> <p>Probekörper im trockenen Zustand</p> <p>Prüfzeitpunkt: 0 Überrollungen</p> <p>Messaufbau: siehe Abb. 32, 1 Aufstellung, Aufhängung des Lautsprechers und Auflage der Messsonde am Mittelpunkt des Probekörpers</p> <p>IMPACT Seitenwand geschlossen</p>
	Messung des Strömungswiderstands der Probekörper	Ermittlung des Strömungswiderstands im eingebauten Prüfzustand mit dem rechteckigen Messfuss an drei Stellen auf 0,5 m Länge entlang des Probekörpers (siehe hierzu Kap. 3.2.1)	<p>Prüfzeitpunkt: Zwischen 0 und 120 Überrollungen</p> <p>Messaufbau:</p>  <p>3 Aufstellungen des Messfusses entlang des Probekörpers auf 0,5 m Länge</p>

P0 (Null- messung)	Messung der Textur der Probekörper	Ermittlung der Oberflächen- textur im eingebauten Prüf- zustand mit Hilfe eines Laserprofilometers.	<p>Prüfzeitpunkt: Zwischen 0 und 120 Überrollungen</p> <p>Isotrope Belagstextur</p> <p>Messaufbau: 6 parallele Längsprofile über die gesamte Länge des Probekörpers in einem Querabstand von jeweils 20 mm innerhalb der Prüffläche Tex- tur, Auflösung in Längsrichtung: 0.2 mm Auflösung in vertik. Richtg.: 0.02 mm</p> <p>Präparation der unbeanspruchten Asphaltoberfläche der Probekörper mit Texturpuder zur Vermeidung störender Lichtreflexionen am glän- zenden Bindemittel</p> <p>Eingabedaten:</p> <p>Frequenzabhängiger Schallabsorptionsgrad $\alpha(f)$ $\alpha(f)$ ergibt sich durch fre- quenzabhängige Korrektur des gemessenen Absorptionsgrads mit Hilfe der Differenzkurve, die in den Prüfschritten V und P0 ermittelt wurde (zur Vorge- hensweise siehe Abb. 34)</p> <p>Strömungswiderstand R_s^*:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Bildung des arithmetischen Mittelwertes der drei Einzel- werte aus den Messungen, Ergebnis: $R_{\square, \text{gemessen}}$ 2. Umrechnung mit $R_s^* = 1.175 \cdot R_{\square, \text{gemessen}}$ <p>Texturprofile:</p> <p>Zusammensetzung der kurzen Messprofile zu jeweils 6 paral- lelen und jeweils 2 m langen Texturprofilen (siehe hierzu Variante 2 in Abb. 6)</p> <p>Berechnungsparameter:</p> <p>$v = 50$ km/h Reifen Goodyear Eagle F1 GS-D3</p>
	SPERoN Berechnung	Ermittlung des Rollge- räuschpegels anhand der Messwerte der Oberflä- cheneigenschaften	
P1	Messung des Schallab- sorptionsgrads Messung des Strömungswiderstands Messung der Textur SPERoN Berechnung	Ermittlung der Oberflächen- eigenschaften und des Rollgeräuschpegels für die beanspruchten Probekörper	Prüfzeitpunkt: Zwischen 200 und 300 Überrollungen Messbedingungen, Messungen und Berechnungen wie in P0
P2	wie in P1	wie in P1	Prüfzeitpunkt: Zwischen 1'200 und 2'000 Überrollungen
P3	wie in P1	wie in P1	Prüfzeitpunkt: Zwischen 6'300 und 10'000 Überrollungen
P4	wie in P1	wie in P1	Prüfzeitpunkt: Zwischen 32'000 und 52'000 Überrollungen

P5	wie in P1	wie in P1	Prüfzeitpunkt: Zwischen 160'000 und 260'000 Überrollungen
P6	wie in P1	wie in P1	Prüfzeitpunkt: Zwischen 640'000 und 1'000'000 Überrollungen
P7	wie in P1	wie in P1	Prüfzeitpunkt: Zwischen 3'200'000 und 5'200'000 Überrollungen

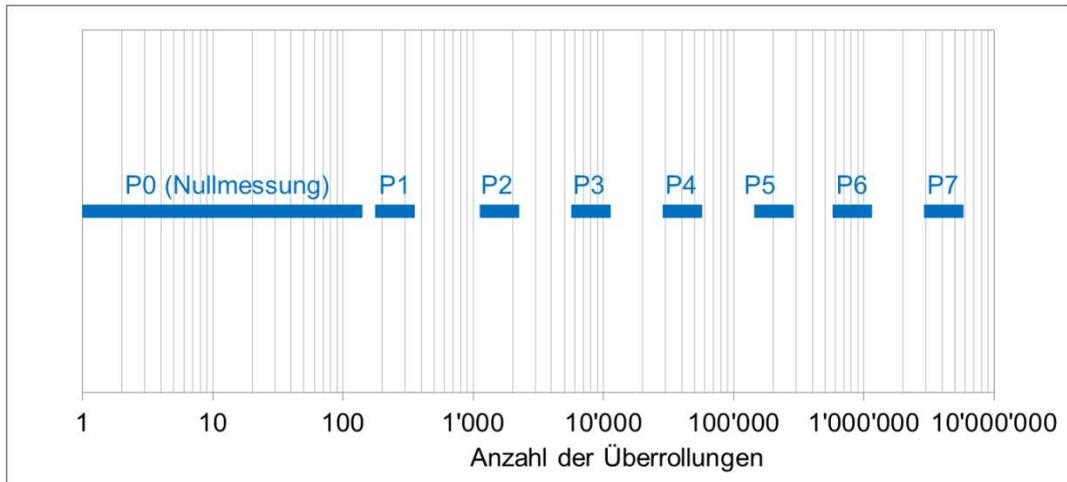


Abb. 108 Empfohlene Intervalle für die Prüfung der akustischen Oberflächeneigenschaften.

Prüfreifen

Die Prüfreifen dürfen keine durchgehenden Längsrillen oder Stege aufweisen, da die Lage der Überrollungen im IMPACT so seitenstabil ist, dass kaum seitliche Abweichungen zwischen den einzelnen Überrollungen entstehen. Ansonsten würde dies dazu führen, dass die Probekörperoberfläche unterschiedlich stark beansprucht wird. Sie würde entlang der durchgehenden Rillen überhaupt nicht und entlang durchgehender Stege unterbrechungsfrei beansprucht. In Rollrichtung sorgt die in EP2 entwickelte Lösung zur Schlupfregelung dafür, dass gleiche Profilabschnitte bei der folgenden Überrollung nicht synchron wieder an derselben Belagsstelle auftreten. Dadurch ist in Rollrichtung eine ausreichend grosse Varianz der Profillage gegeben. *Abb. 109* zeigt einige Beispiele für empfehlenswerte und ungeeignete Reifenprofile.



Abb. 109 Empfehlenswerte und ungeeignete Reifenprofile.

Anhang

I	Verwendete Messmittel	103
II	SPERoN-Berechnungsergebnisse	105

I Verwendete Messmittel

Folgend sind die für alle beschriebenen Messungen verwendeten Messmittel angegeben, die dem Müller BBM Qualitätsmanagement-System unterliegen.

Tab. A 1 Verwendete Messmittel für SPB-Messungen.

Beschreibung	Mp	d, m	h, m	Hersteller	Typ	SN
½"-Mikrofone	1	7.5	1.2	Brüel & Kjær	4189	2719899
	2	5.0	1.5			2719900
½"-Mikrofon-Vorverstärker	1	7.5	1.2	Microtech Gefell	MV210	1907
	2	5.0	1.5			1908
4-Kanal Messkarte				National Instruments	NI 9234	16D4C0D
Kalibrator				Brüel & Kjær	4231	3004713
Software zur Datenerfassung				Müller BBM	SPB	1.4.4534
Radar-Geschwindigkeitsmessgerät				via traffic controlling GmbH	Viacount II	12VZZ0133
Wetterstation (u. A. Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit)				Reinhardt	MWS 4M	SN1022759
Fahrbahntemperaturmessgerät (Infrarot-Thermometer)				Greisinger electronic GmbH	GIM-530S	-
Präzisions Hygro-/Thermo-/Barometer				Greisinger electronic GmbH	GFTB100	-

Tab. A 2 Verwendete Messmittel für CPX-Messungen.

Beschreibung	MP	Position	Typ	Hersteller	Seriennummer
Mikrofone ½"	1	links vorne	4189	Brüel&Kjær	2719896
	2	links hinten			2719897
	3	rechts hinten			2748297
	4	rechts vorne			2719899
Vorverstärker	1	links vorne	MV210	Microtech Gefell	1904
	2	links hinten			1905
	3	rechts hinten			1906
	4	rechts vorne			1907
Messreifen	P	rechts links	Tiger Paw SRTT AP X0 EVUU	Uniroyal	0512 P-R-muc 0512 P-L-muc
	H	rechts links	AV4 AT J8 PC	Avon	4013 H-R-bsl 4013 H-L-bsl
Messanhänger			Geschlossen	Müller-BBM	XL9CPX75009095 476
Kalibrator			4231	Brüel & Kjær	1821045
Datenerfassungssystem			PAK Mobil MKII	Müller-BBM VAS	1211M8320
Lufttemperaturmessgerät			PT100 2-L	Electrotherm	-
Fahrbahntemperaturmessgerät			IN 3000	Impac Infrared	12469
GPS-Sensor			Regular	ublox	604419

Tab. A 3 *Verwendete Messmittel für die Messung des Schallabsorptionsgrads in situ.*

Beschreibung	Hersteller	Typ	Seriennummer
Messsonde	Microflown	Regular PU inkl. Signalkonditionierung	900249-1r
Lautsprecher	Gradient	80 RW/40	1346862
Soundkarte Frontend	RME	Hammerfall DSP Multiface II	22457923

II SPERoN-Berechnungsergebnisse

Neben dem Gesamtpegel (grau) sind die mechanische (rot) und aerodynamische Geräuschkomponente (blau) als Terzspektren dargestellt. Die Pegelsumme von mechanischer und aerodynamischer Geräuschkomponente kann kleiner sein als der Gesamtpegel, da der Gesamtpegel zusätzlich noch das Karosserieströmungsgeräusch enthält.

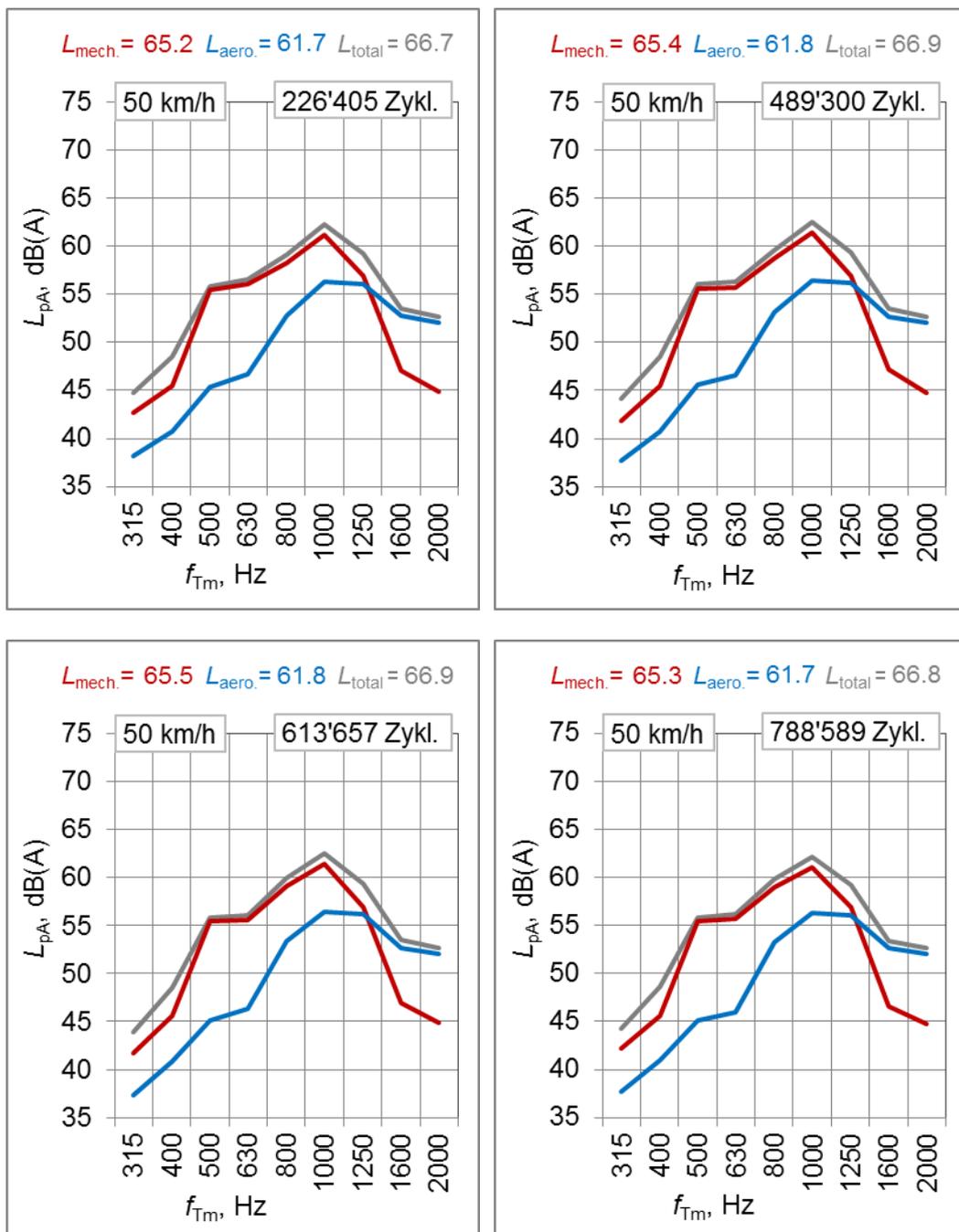


Abb. A 1 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittelfrequenz.

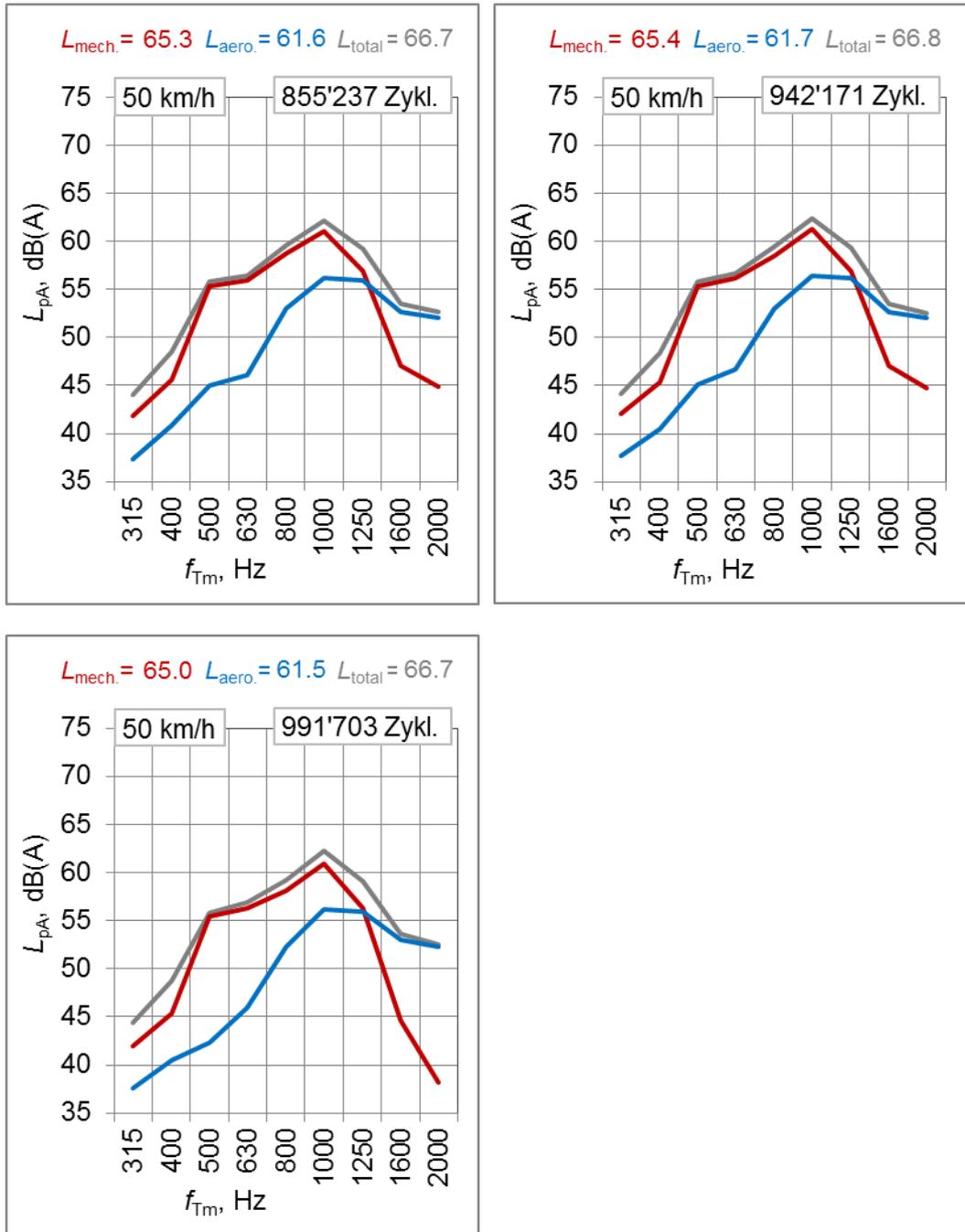


Abb. A 2 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

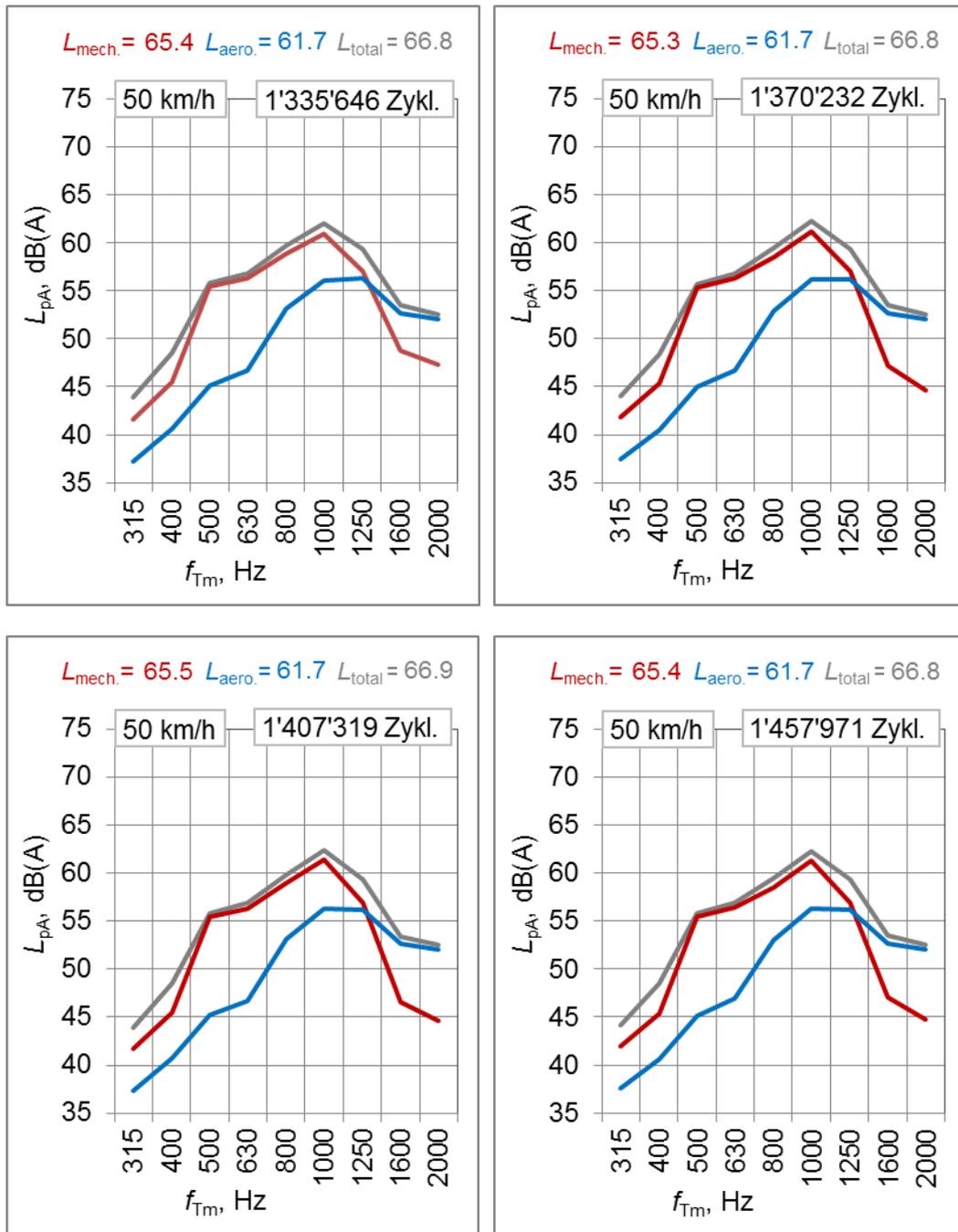


Abb. A 3 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

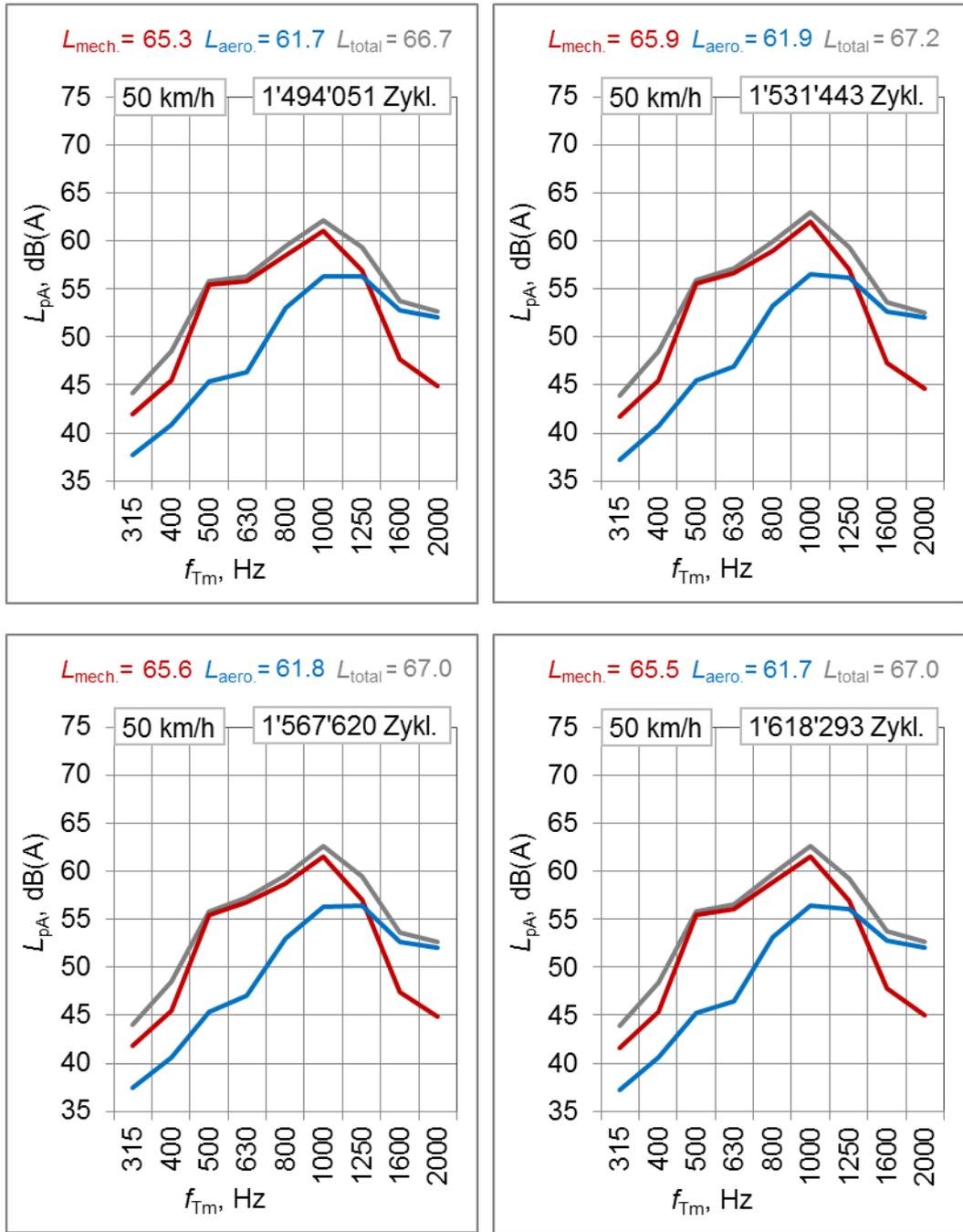


Abb. A 4 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

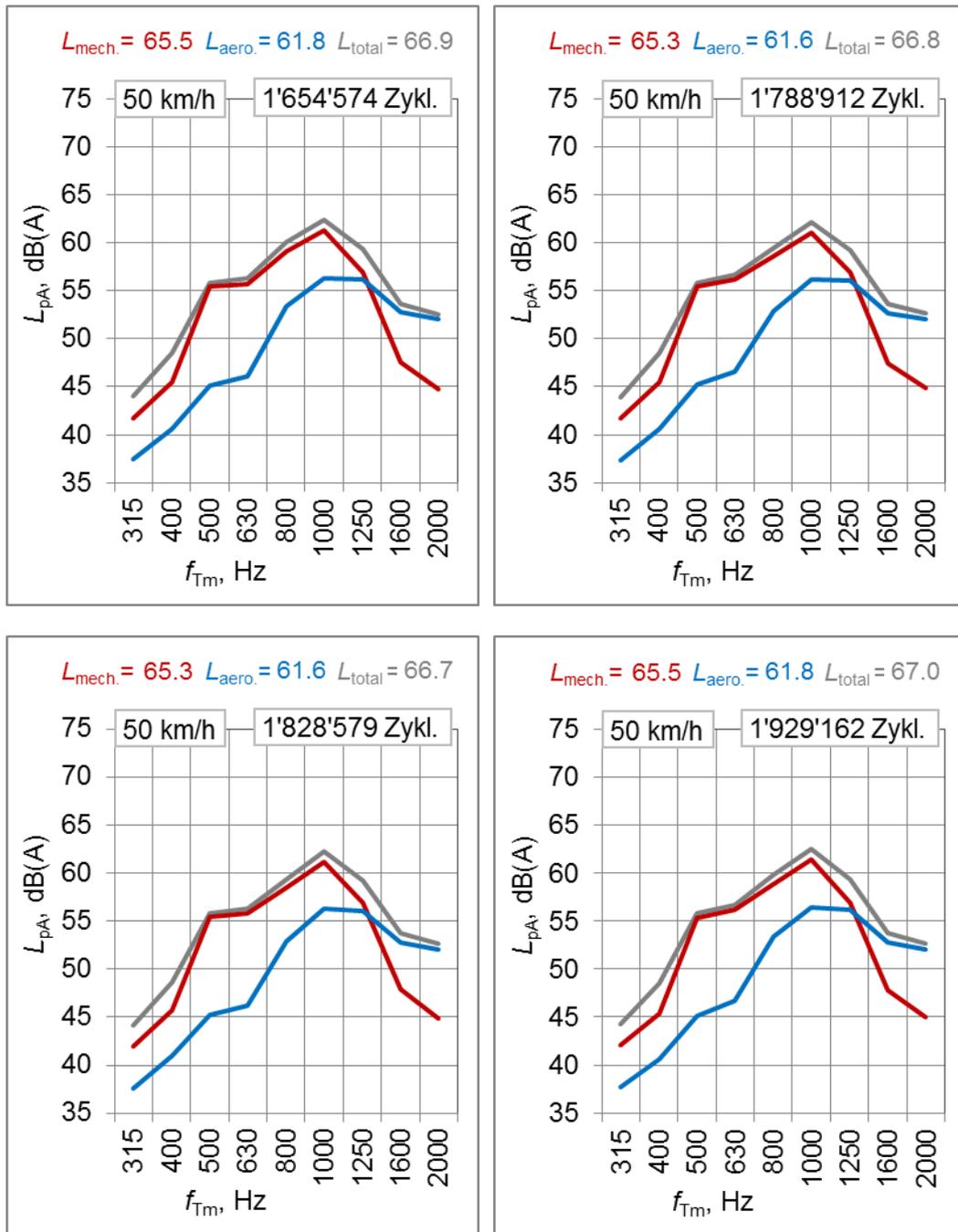


Abb. A 5 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

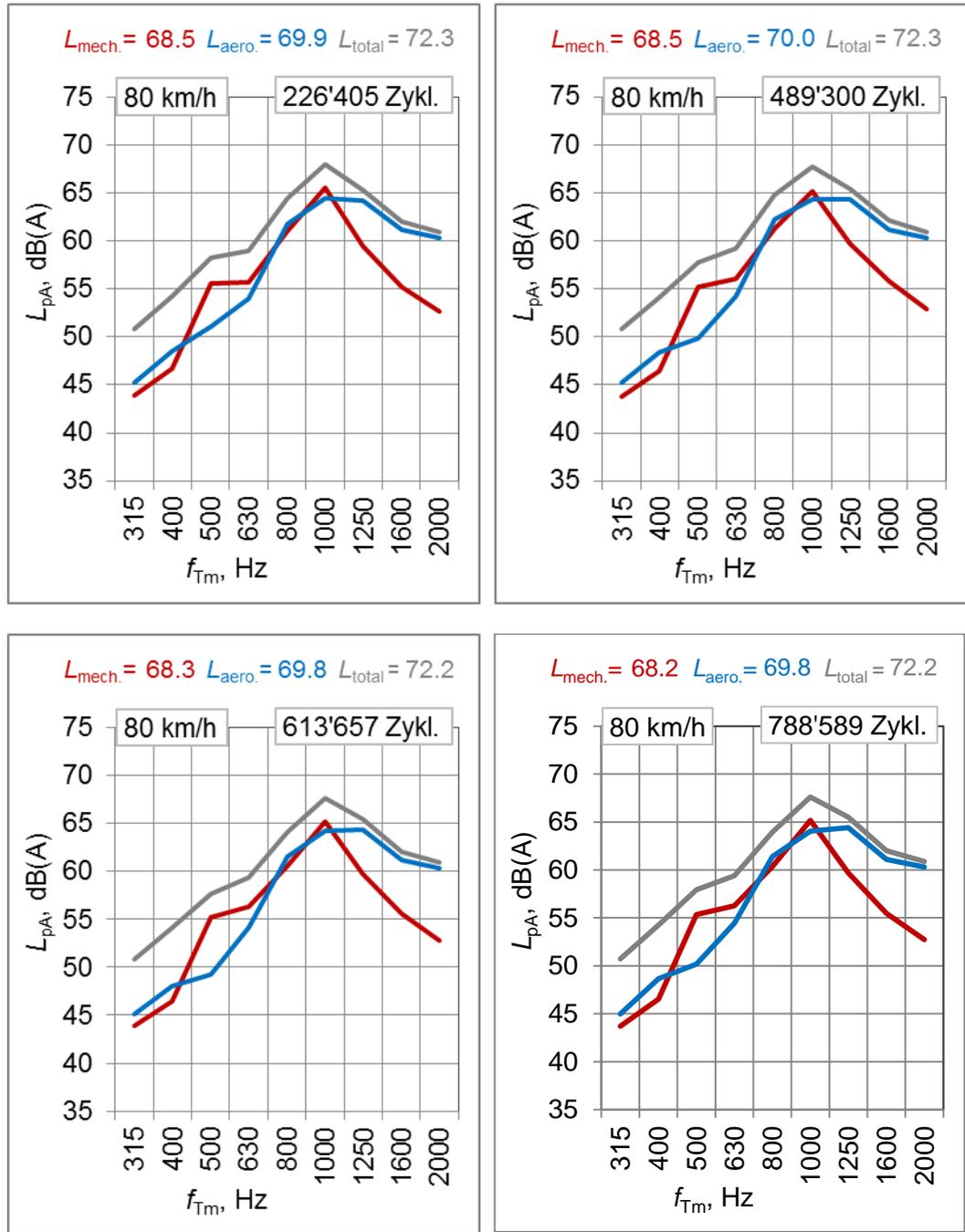


Abb. A 6 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

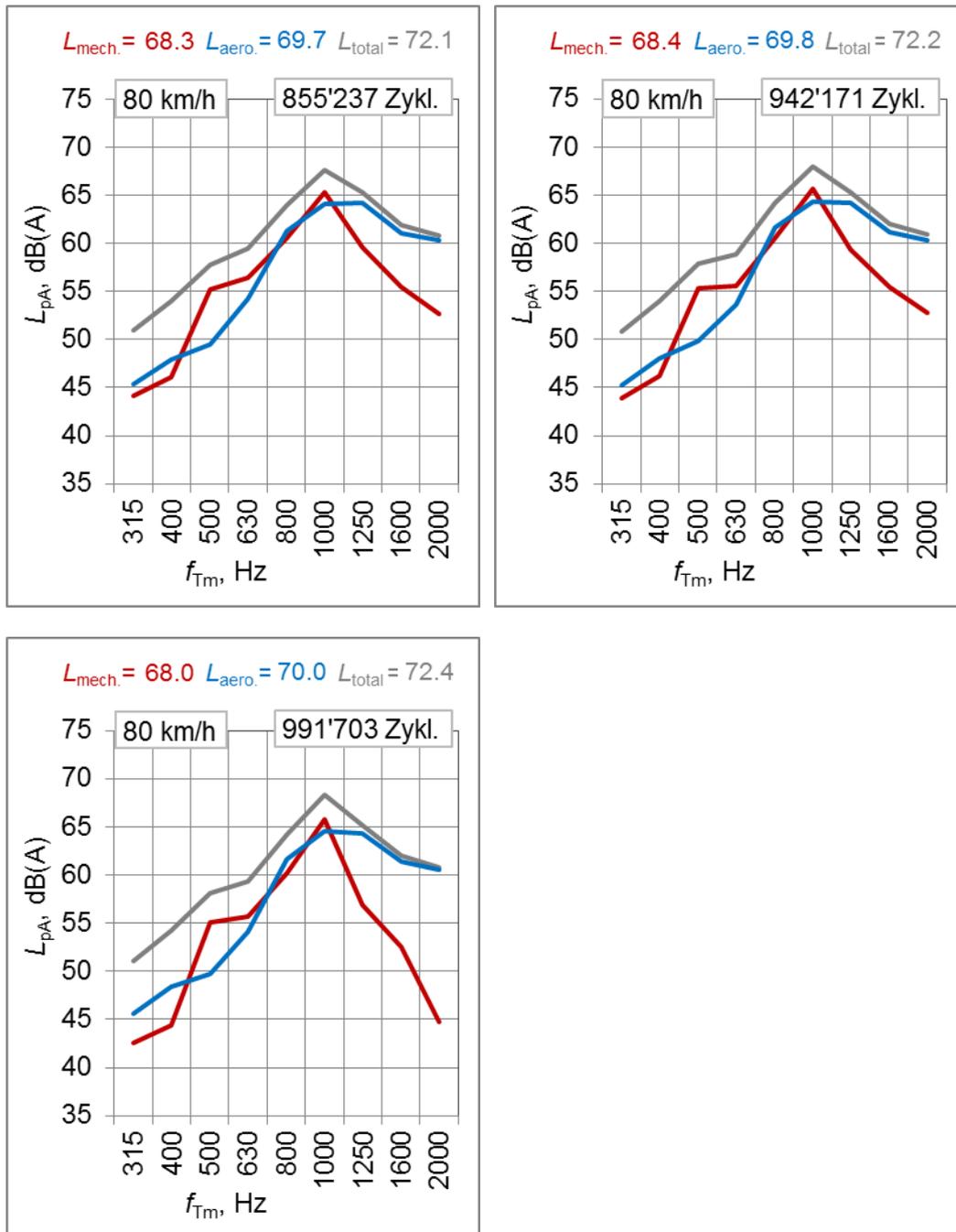


Abb. A 7 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

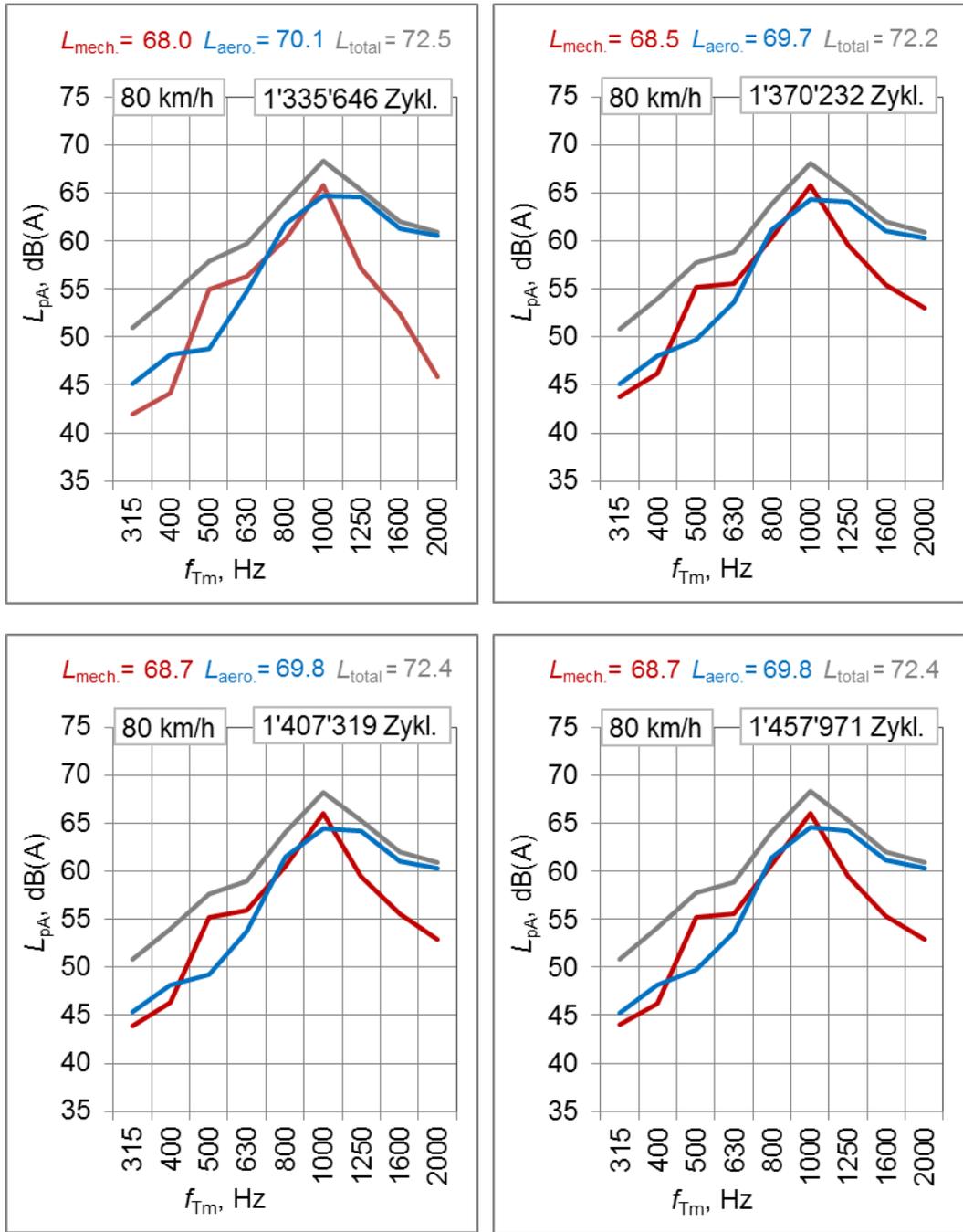


Abb. A 8 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

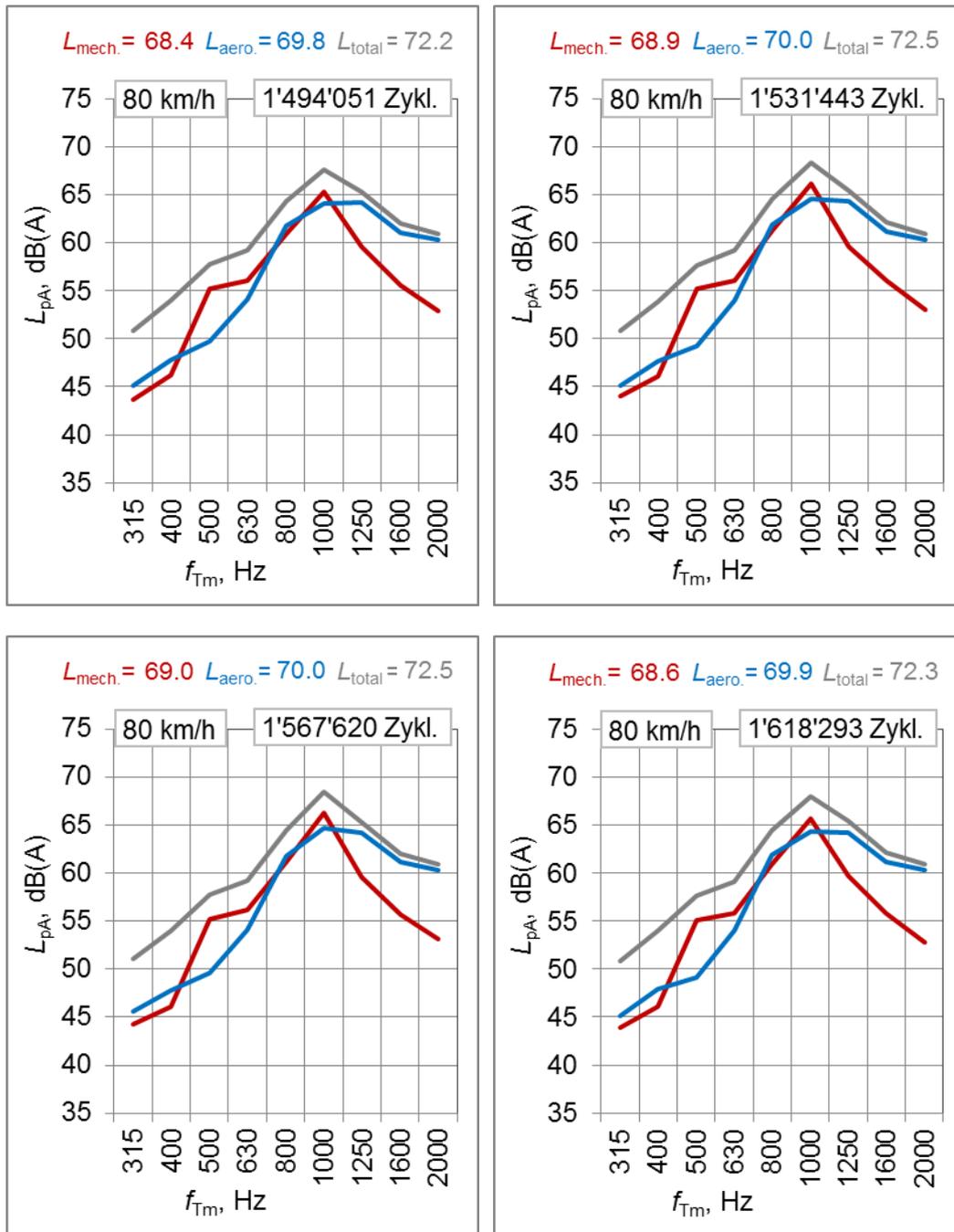


Abb. A 9 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

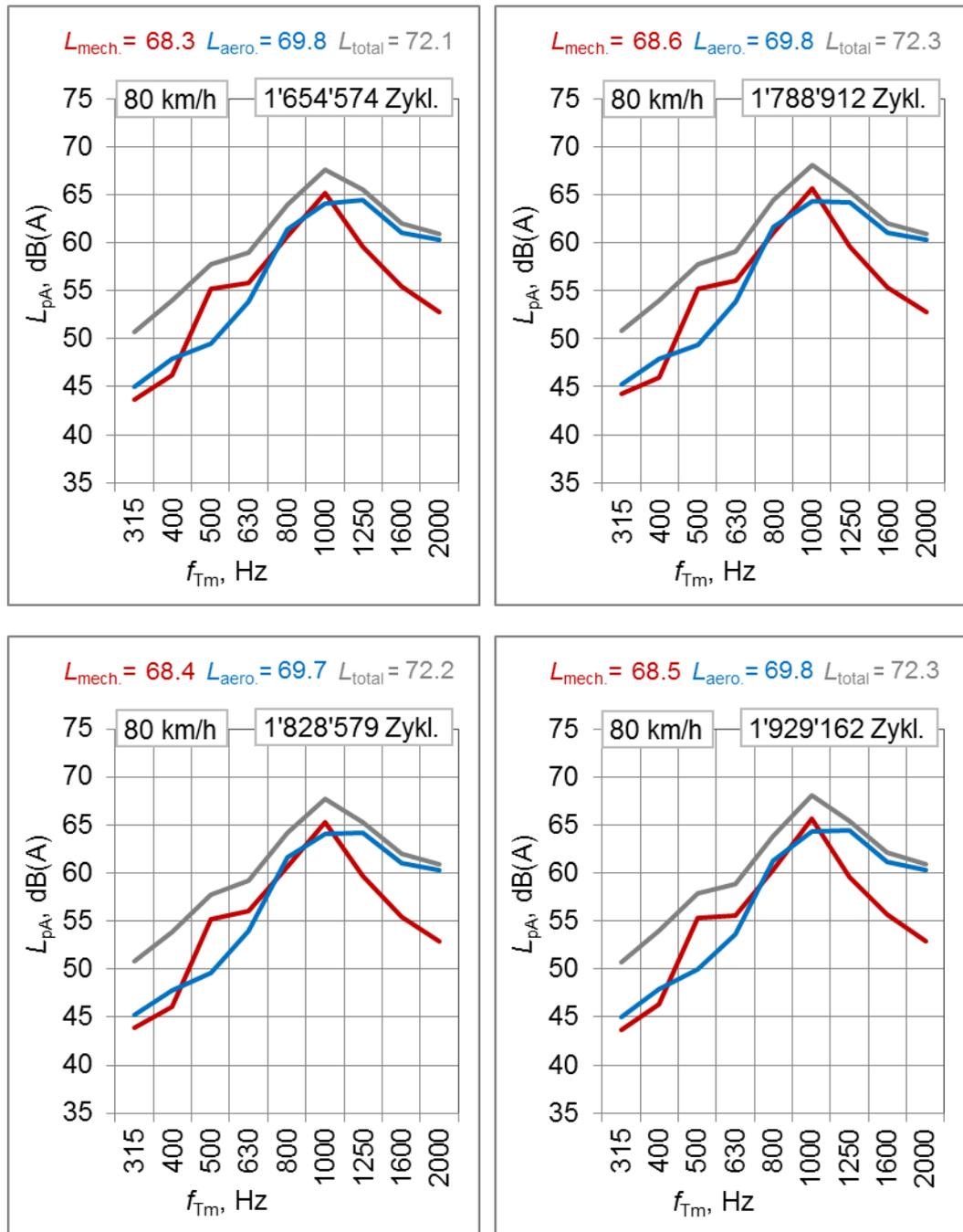


Abb. A 10 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

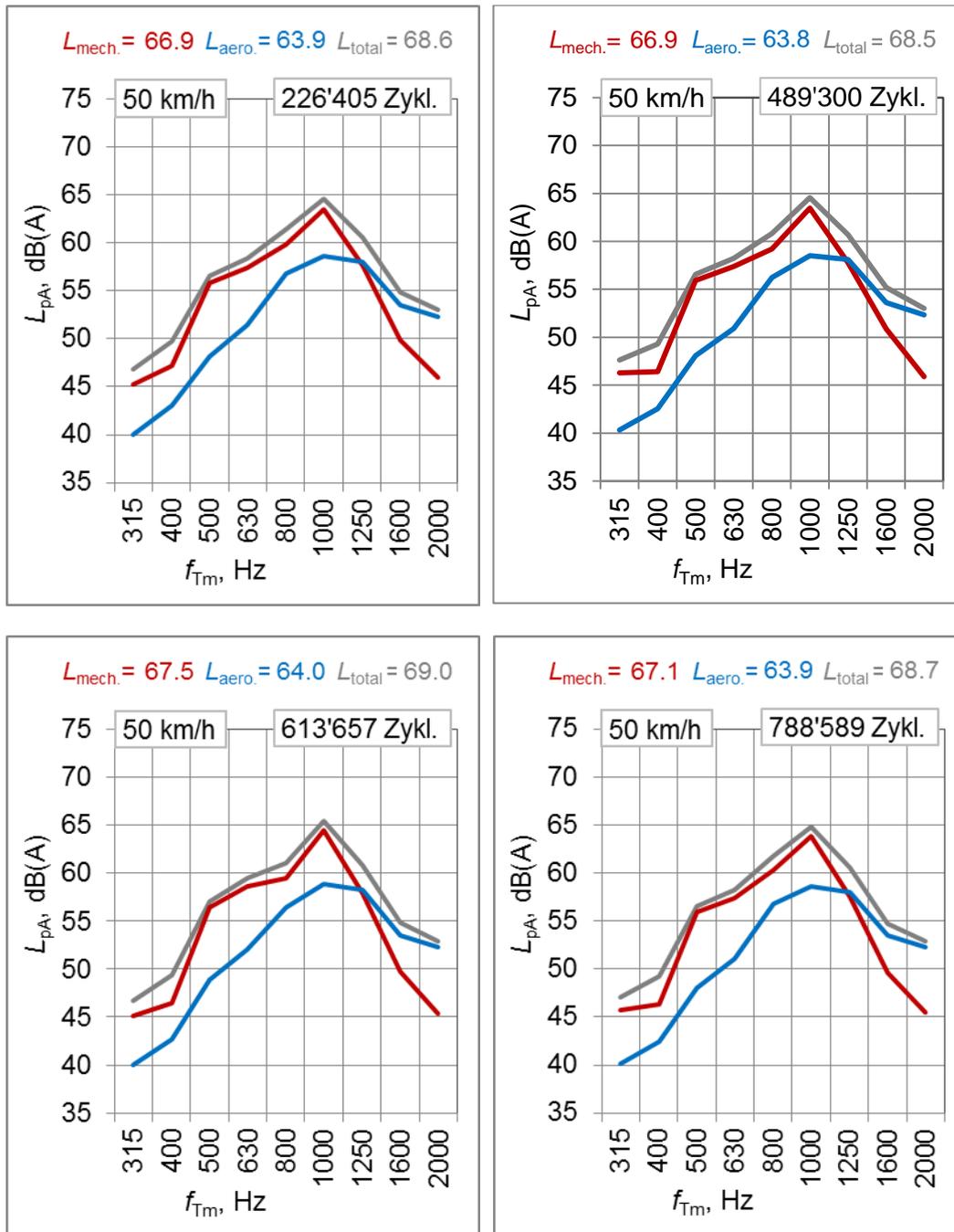


Abb. A 11 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

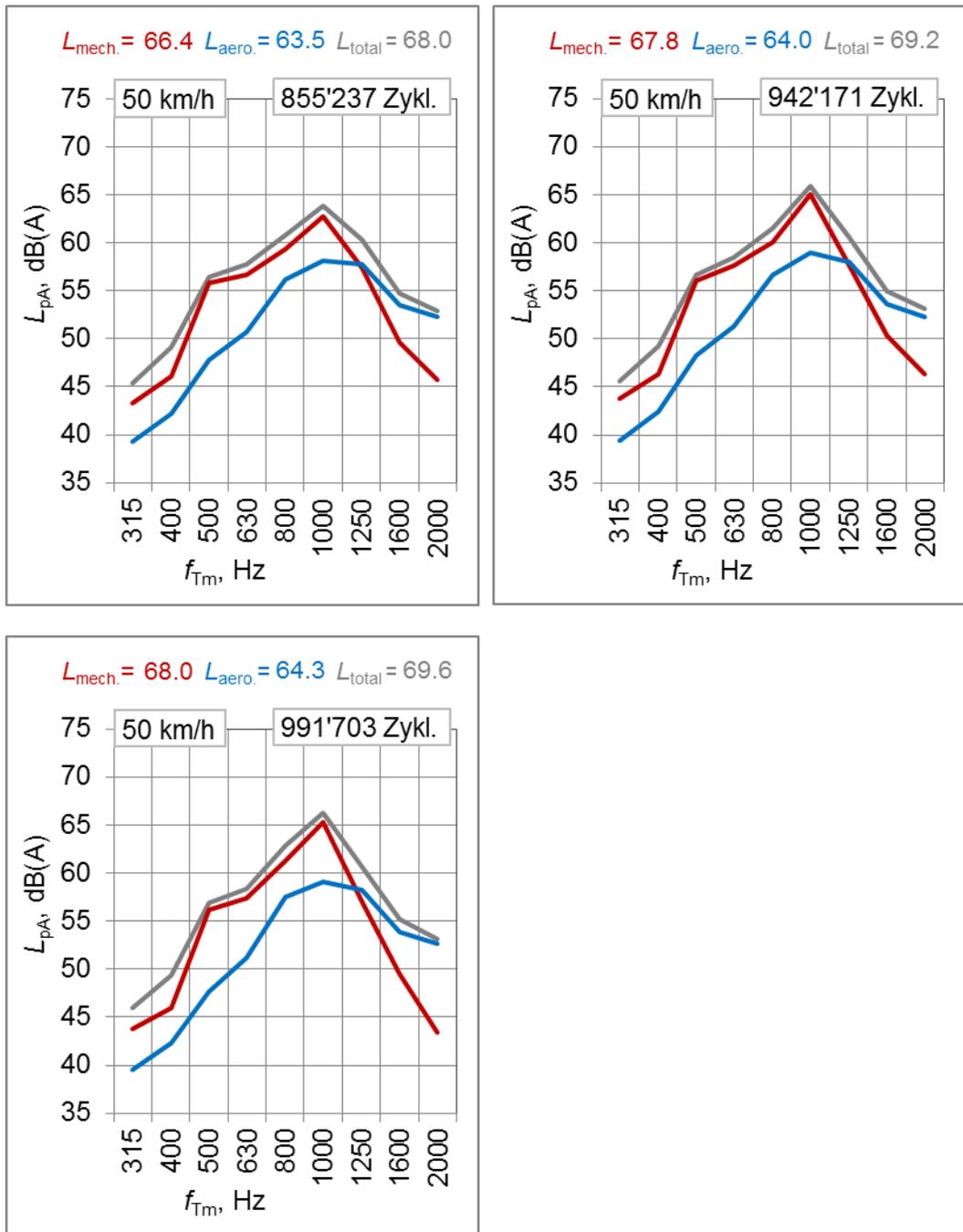


Abb. A 12 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

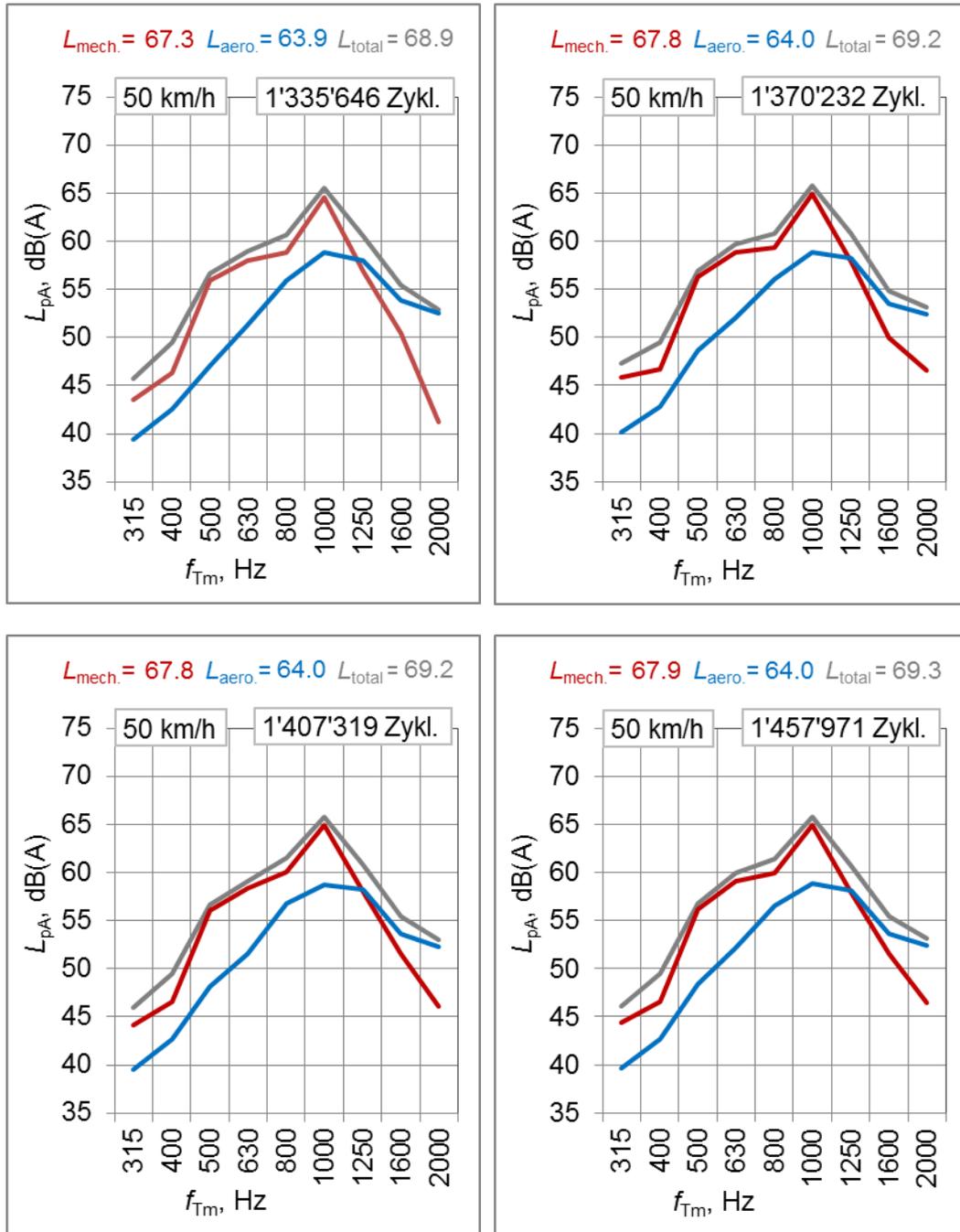


Abb. A 13 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

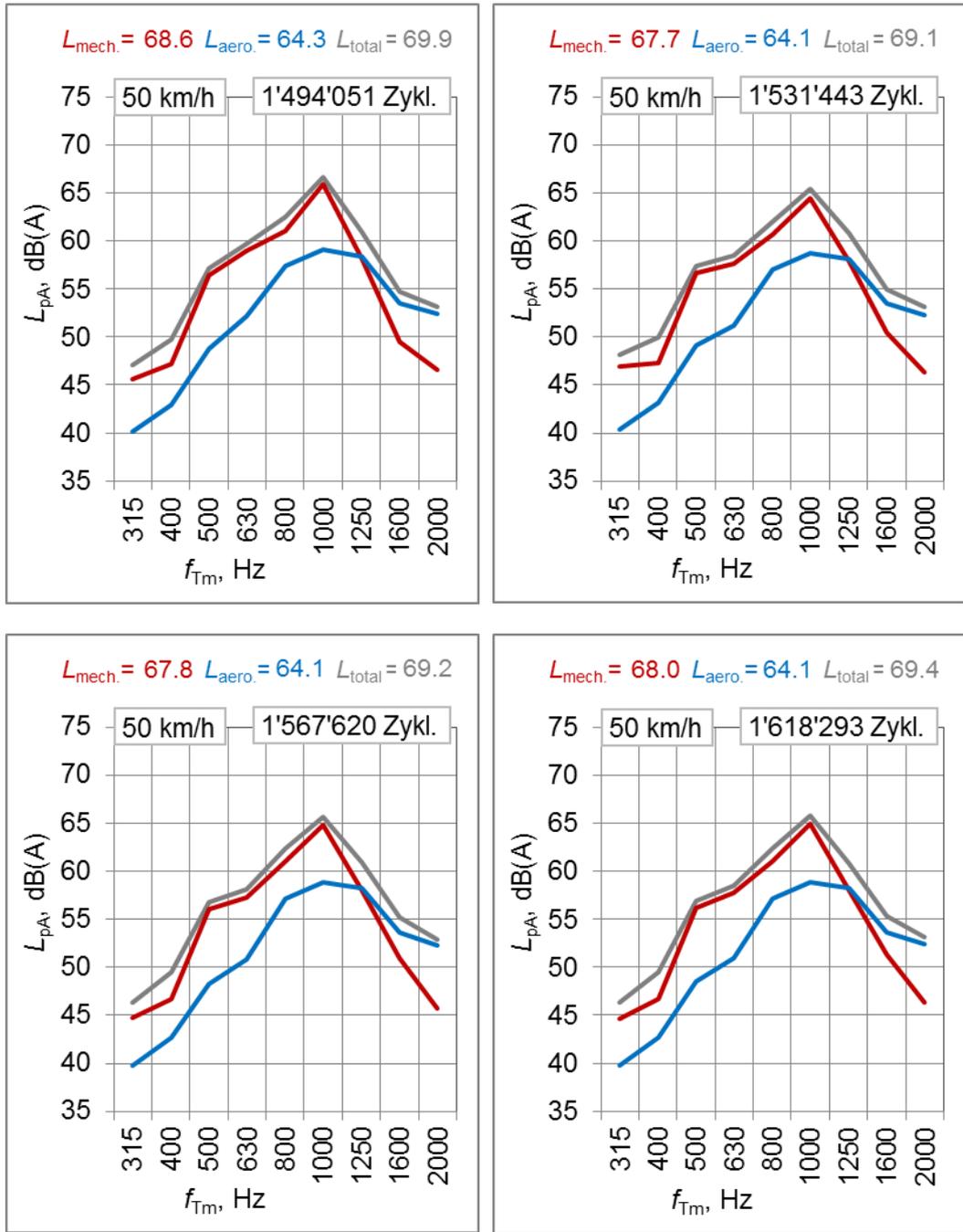


Abb. A 14 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

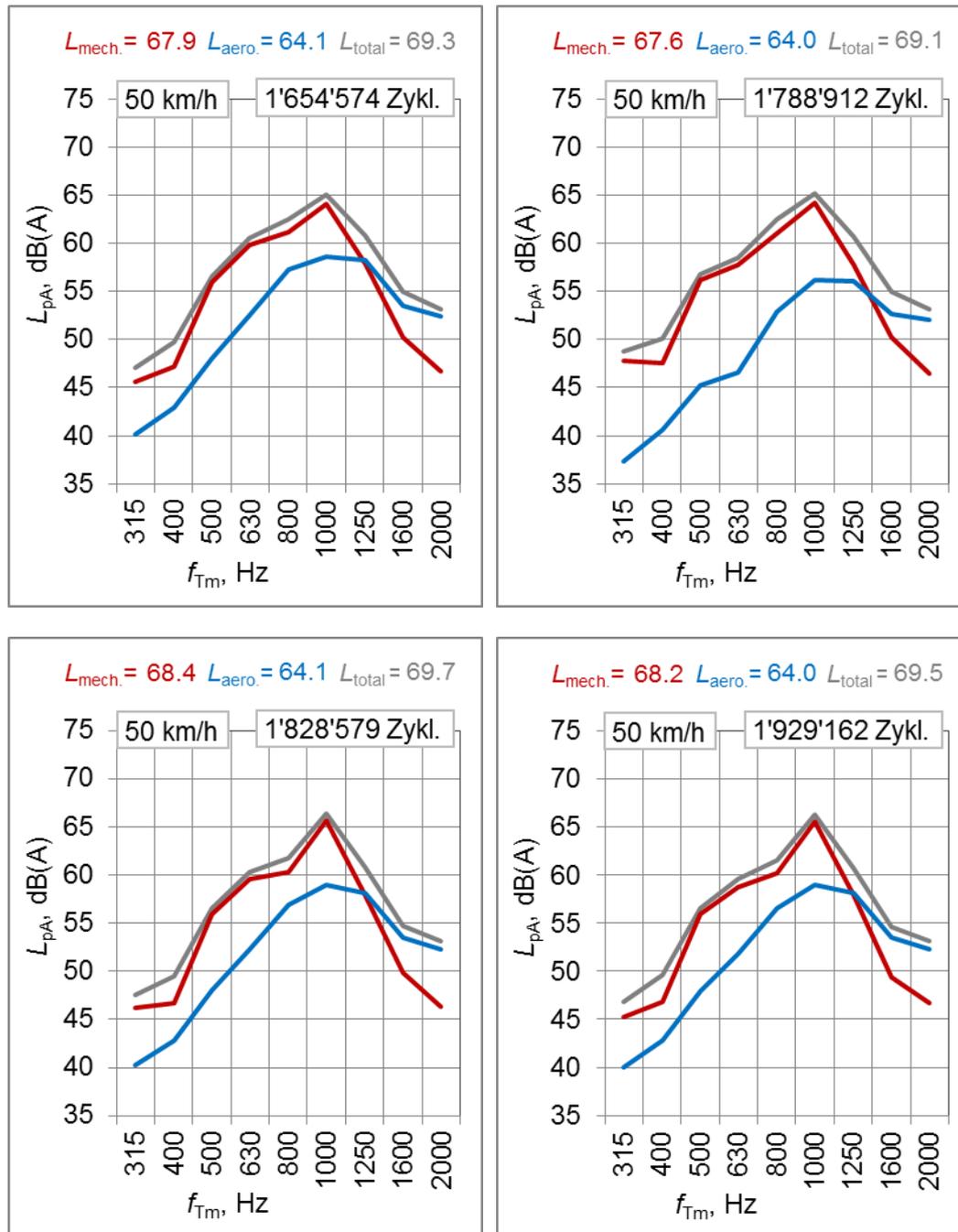


Abb. A 15 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

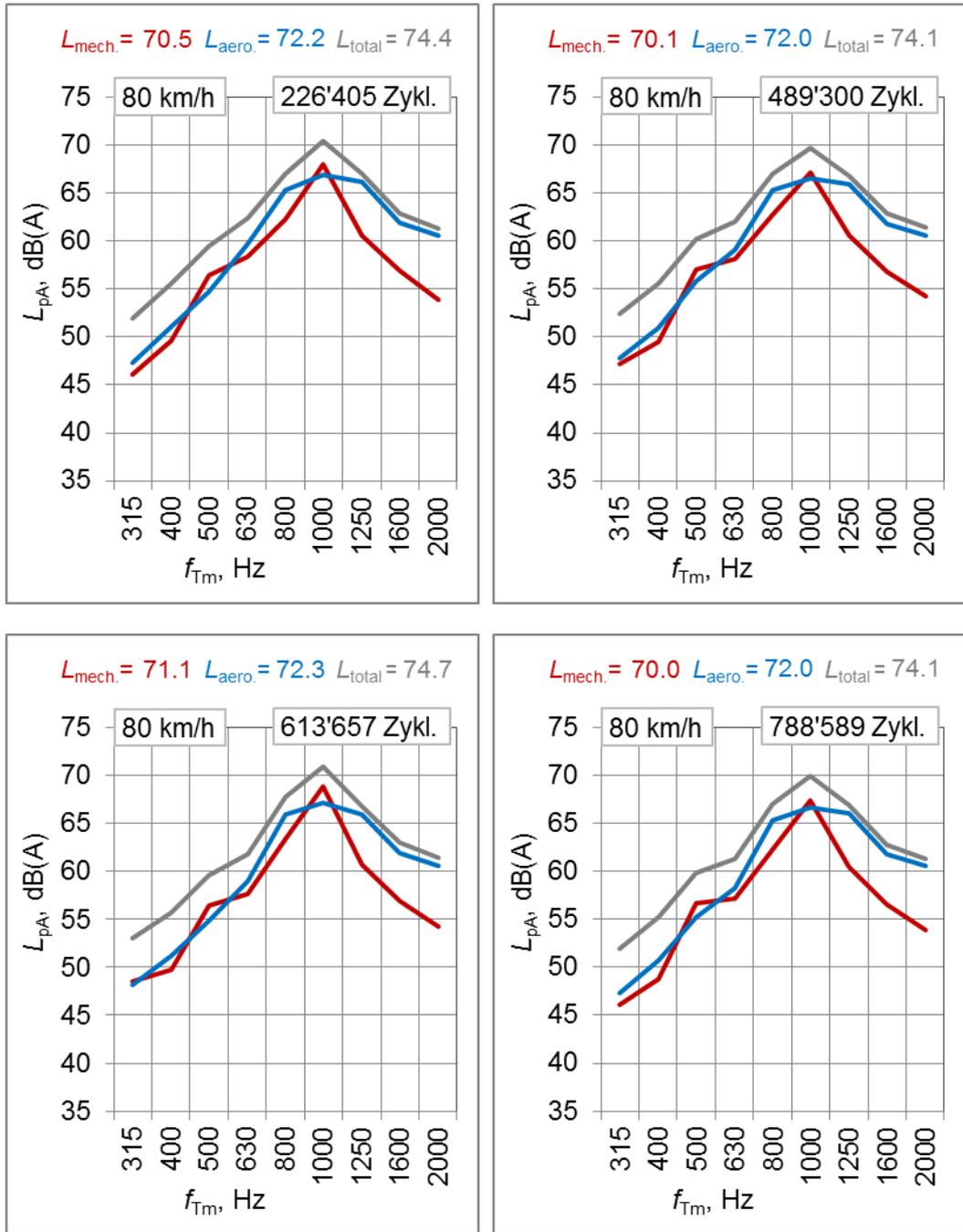


Abb. A 16 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

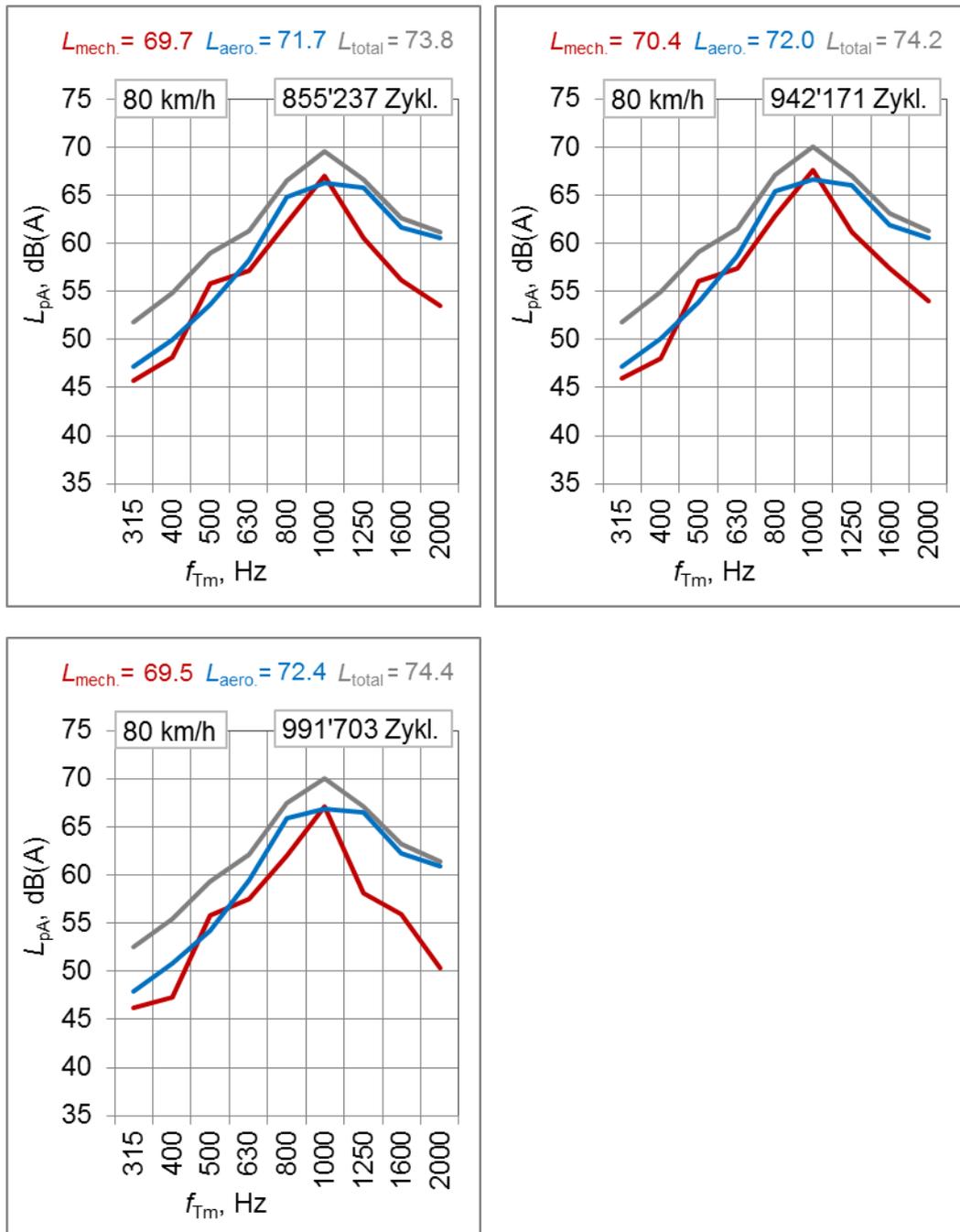


Abb. A 17 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

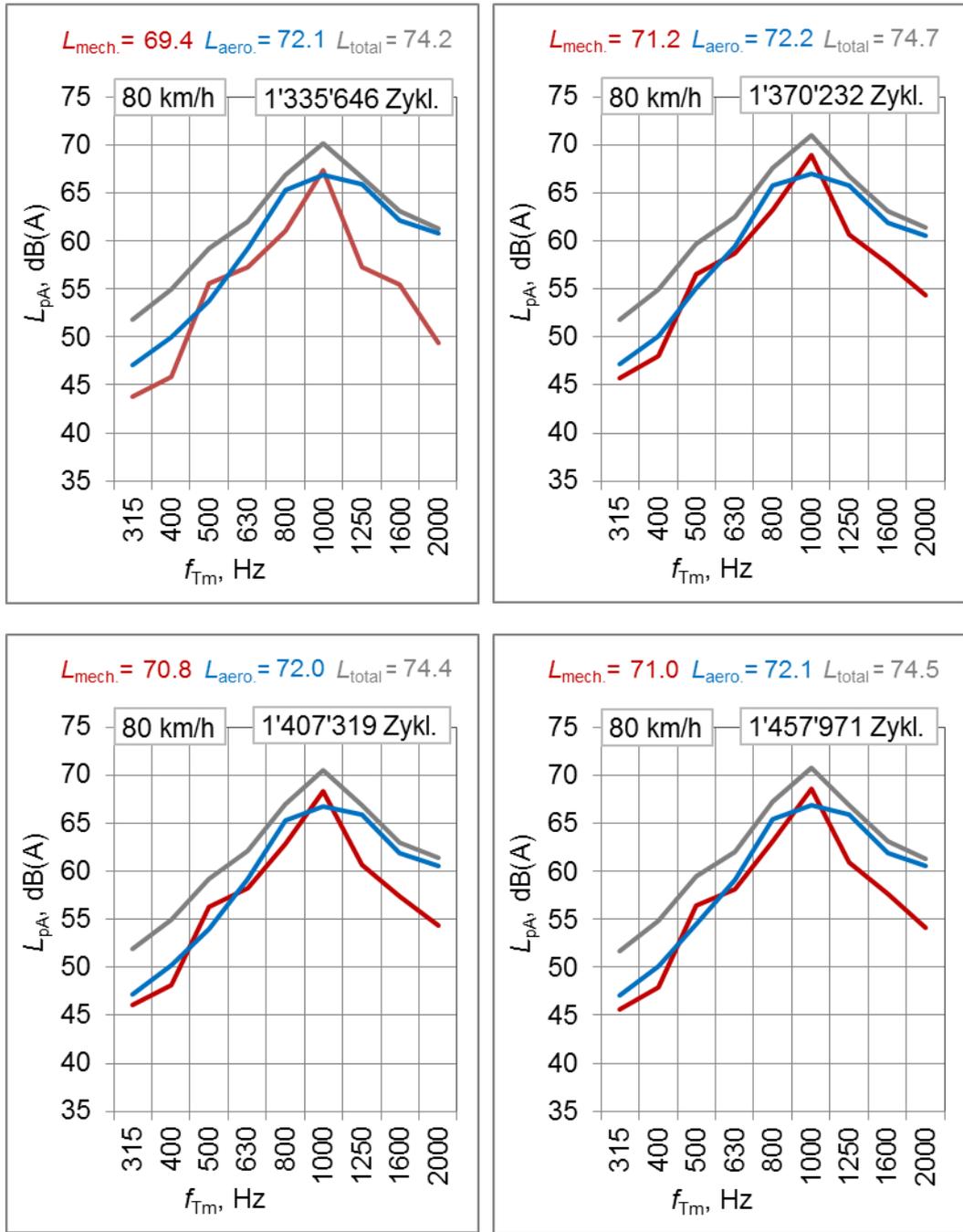


Abb. A 18 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

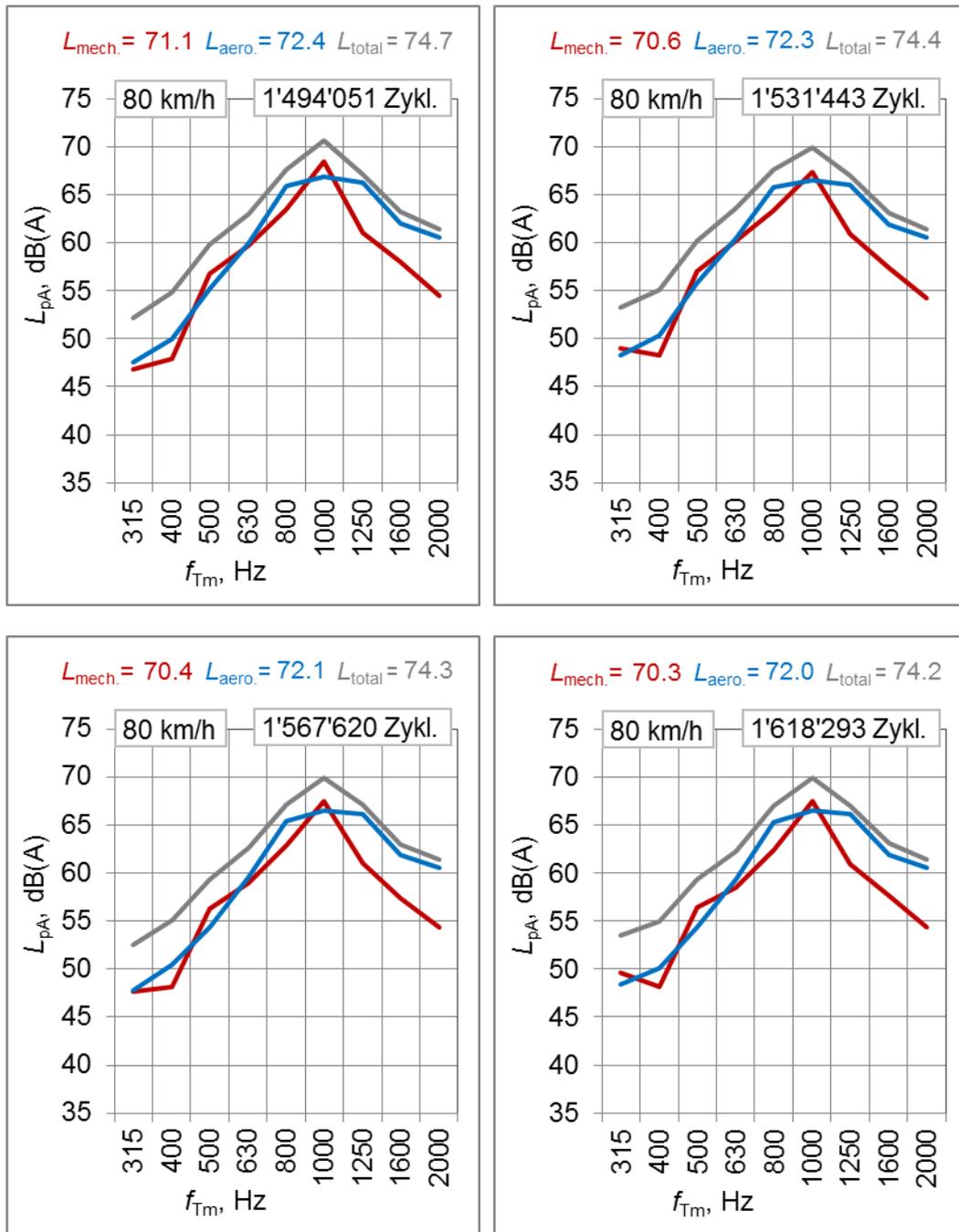


Abb. A 19 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

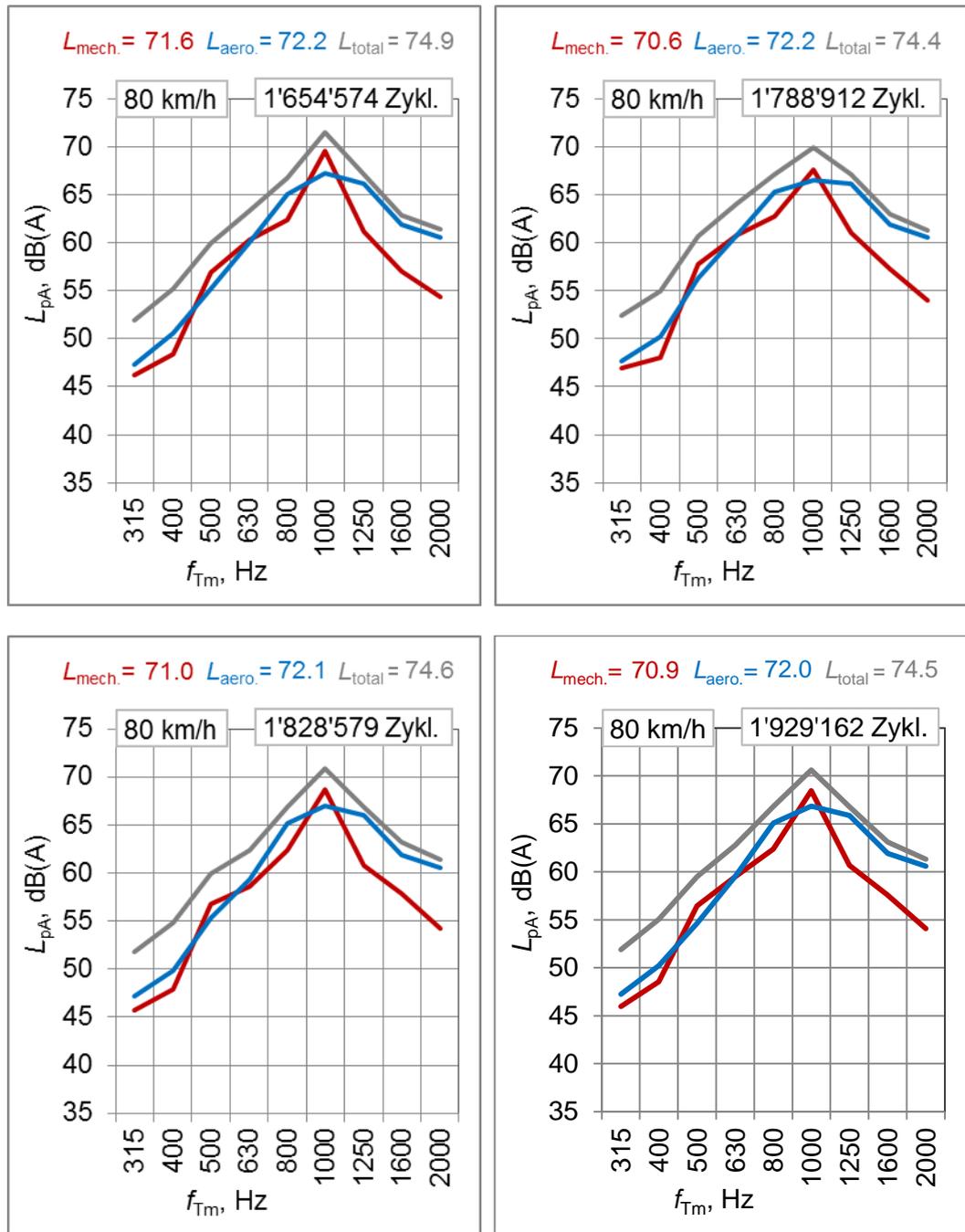


Abb. A 20 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz.

Glossar

Begriff	Bedeutung
Admittanz $Y, Y_{\text{mech.}}$	Kehrwert der Impedanz Z bzw. der mechanischen Impedanz $Z_{\text{mech.}}$ (siehe dort). Formelzeichen: Y , mechanische Impedanz: $Y_{\text{mech.}}$ Einheit: $\text{m} / (\text{N s})$
Biegesteifigkeit $B_x, B_y, B_{x,y}$	Verhältnis des Biegemoments zur Krümmung eines mit einer Kraft F belasteten Balkens. Formelzeichen: B , in Längsrichtung: B_x , in Querrichtung: B_y , Mittelwert aus B_x und B_y : $B_{x,y}$ Einheit: N m^2
CPB	Kontrollierte Vorbeifahrtmessung (C ontrolled P ass- B y M easurement) Vorbeifahrtmessung mit bekannten und definierten Reifen sowie bekannten und definierten Fahrzeugen in Anlehnung an das Verfahren zur Statistischen Vorbeifahrtmessung (SPB) [4].
Frequenzbewertung A	Die Frequenzbewertung A (A-Bewertung) ist die gehörbezogene Bewertung des Spektrums eines Geräuschs. Tiefe und hohe Frequenzen werden vom menschlichen Gehör weniger gut wahrgenommen als mittlere Frequenzen im Bereich zwischen 1'000 Hz und 3'000 Hz. Aus diesem Grund werden gemessene Geräuschspektren oft der sogenannten A-Bewertung unterzogen, die bewirkt, dass die Schallpegel der tief- und hochfrequenten Schallanteile dem Gehörempfinden ähnlich abgesenkt werden. Der Einzahlwert des Schalldruckpegels L_p , der sich durch anschliessende energetische Summation aller Spektralanteile ergibt, enthält damit eine gehörähnliche Abhängigkeit von der spektralen Zusammensetzung des Geräuschs.
Frequenzgang	Verhältnis der Stärke eines Eingangssignals zu einem Ausgangssignal in Abhängigkeit von der Frequenz, hier bezogen auf den Schallabsorptionsgrad und das Verhältnis der absorbierten zur Gesamtschallintensität in Abhängigkeit von der Frequenz.
Impedanz $Z, Z_{\text{mech.}}$	Widerstand, der der Ausbreitung von Schwingungen in einem Medium entgegenwirkt. Bei Festkörpern als Medium ergibt sich der Widerstand aus dem Verhältnis von aufgebrachtener Kraft F zu entstehender Schnelle v als mechanische Impedanz mit $Z_{\text{mech.}} = F / v$. Formelzeichen: Z , mechanische Impedanz: $Z_{\text{mech.}}$ Einheit: N s/m
in situ	Vor Ort, auf der Strasse, auf dem eingebauten Fahrbahnbelag
Rauhigkeitstiefe $R, R_{\text{eff.}}$	Der senkrechte Abstand eines Punktes auf der Fahrbahnoberfläche von einer gedachten horizontalen Ebene über der Fahrbahnoberfläche. Formelzeichen: R , bei quadratischem Mittelwert (Effektivwert) über ein Wellenlängenband: $R_{\text{eff.}}$ Einheit: m
Rauhigkeitswellenlänge λ	Der kleinste Abstand zweier Punkte mit gleicher Höhenlage in einer räumlich periodischen Abfolge der Oberflächenwelligkeit (Rauhigkeit) einer Deckschicht. Formelzeichen: λ Einheit: m
Reifen-Fahrbahn-Geräusch (Rollgeräusch)	Geräusch, das beim Abrollen des Fahrzeugreifens auf der Fahrbahnoberfläche entsteht (Rollgeräusch). Schalldruckpegel und Spektrum des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs hängen sowohl von den statischen und dynamischen Eigenschaften des Reifens, von den belagstechnischen Eigenschaften der Deckschicht und den akustischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche, als auch von der Geschwindigkeit v ab
Schallabsorptionsgrad α	Verhältnis der in der Deckschicht absorbierten Schallintensität zur gesamten auf die Deckschicht einfallenden Schallintensität. Dimensionslose Grösse, deren Wert zwischen 0 und 1 liegen kann. Der Schallabsorptionsgrad ist abhängig von der Frequenz und vom Schalleinfallswinkel. In EP4 wurde ausschliesslich bei senkrechtem Schalleinfall gemessen. Formelzeichen: α , zur Angabe der Abhängigkeit von der Frequenz f : $\alpha(f)$ Einheit: <i>dimensionslos</i>
Schalldruckpegel L_p, L_{pA}	Logarithmiertes Verhältnis eines Schalldruckes p zum Bezugsschalldruck $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ Formelzeichen: L_p , bei Frequenzbewertung A: L_{pA} Einheit: dB , bei Frequenzbewertung A: oft dB(A)

Schalldruckpegel der Rollgeräuschanteile $L_{vib.}, L_{aero.}, L_{cav.}, L_{res.}$	Die mit SPERoN berechneten Schalldruckpegel der Geräuschanteile des Vorbeirollgeräuschs. $L_{vib.}$: Pegelanteil der mechanisch induzierten Geräuschkomponente aufgrund von Reifenschwingungen $L_{aero.}$: Pegelanteil der aerodynamisch induzierten Geräusche im Reifen-Fahrbahn-Kontakt $L_{cav.}$: Pegelanteil der durch die mechanisch induzierten Reifenschwingungen hervorgerufenen und nach aussen abgestrahlten Geräusche im Inneren des Reifentorus $L_{res.}$: Pegelanteil der durch die während der Vorbeifahrt auftretenden Strömungsgeräusche an der Fahrzeugkarosserie (Residualkomponente ohne Zusammenhang mit den Reifen-Fahrbahn-Geräuschen)
SDA	Semi-Dichter Asphalt gemäss [5]
Spektrum	Frequenzverteilung eines Geräusches (Schalles). Die meisten der von technischen und natürlichen Schallquellen erzeugten Geräusche setzen sich aus vielen Schallanteilen unterschiedlicher Frequenz zusammen. Die Summe der Schallanteile, jeder gekennzeichnet durch einen bestimmten Schallpegel und eine bestimmte Frequenz, bildet das Spektrum des Geräuschs. Werden die Schallanteile in aneinander gereihten terzbreiten Bändern zusammengefasst, spricht man von Terzspektrum. Oft werden die Schallanteile auch in oktavbreiten Bändern zu Oktavspektren zusammengefasst. Bei Terzbändern entspricht das Verhältnis der oberen zur unteren Grenze des Frequenzbandes ungefähr dem musikalischen Tonintervall einer Grossen Terz von 5:4. Bei Oktavbändern stimmt das Verhältnis mit dem einer musikalischen Oktave überein: 2:1. SPERoN berechnet das Terzspektrum des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs im Frequenzbereich zwischen 315 Hz und 2 kHz Terzmittenfrequenz.
SPERoN®	Für Müller-BBM registrierte Marke für das in EP4 benützte Rechenmodell zur Simulation von Reifen-Fahrbahn-Geräuschen. SPERoN ist ein Akronym und steht für S tatistical P hysical E xplanation of R olling N oise (Statistisch physikalische Erklärung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs)
Strömungswiderstand $R_s^*, R_{\square}^*, \Xi$	Verhältnis der Differenz Δp des Luftdrucks innerhalb eines von Luft durchströmten Volumens und dem umgebenden statischen Luftdruck zu einer gegebenen Strömungsgeschwindigkeit u der Luft. Formelzeichen: $R_s^* = \Xi$ bei rundem Querschnitt und R_{\square}^* bei rechteckigem Querschnitt des Messfusses Einheit: Pa s/m
Textur	geometrische Gestalt der Fahrbahnoberfläche
v	Fahr- bzw. Rollgeschwindigkeit. Auch Schallschnelle. Formelzeichen: v Einheit: m/s oder km/h
Vorbeifahrtgeräusch Vorbeirollgeräusch	Geräusch, das ein Fahrzeug bei der Vorbeifahrt an einem Messpunkt (in EP4 1.2 m über Fahrbahnoberkante und in 7.5 m Abstand von der Fahrstreifenmitte) hervorruft. Ist der Motor bei der Vorbeifahrt ausgeschaltet oder im Leerlaufzustand spricht man auch von Vorbeirollgeräusch.
Vorbeifahrtpegel	Maximaler Schalldruckpegel L_{max} , den ein Fahrzeug bei der Vorbeifahrt an einem Messpunkt (in EP4 1.2 m über Fahrbahnoberkante und in 7.5 m Abstand von der Fahrstreifenmitte) hervorruft. Der Vorbeifahrtpegel wird meist A-bewertet angegeben. SPERoN berechnet ebenfalls A-bewertete Vorbeifahrtpegel.

Literaturverzeichnis

Normen

-
- | | |
|-----|--|
| [1] | DIN EN ISO 354 (2003), „ Akustik. Messung der Schallabsorption in Hallräumen “. |
| [2] | DIN EN ISO 10534-2 (2001), „ Akustik. Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion “. |
| [3] | DIN EN 29053 (1993), „ Akustik. Materialien für akustische Anwendungen; Bestimmung des Strömungswiderstands “. |
| [4] | DIN EN ISO 11819-1 (2002), „ Akustik. Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgläusche. Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren “. |
-

Technische Regeln

-
- | | |
|-----|---|
| [5] | SNR 640 436 (2013), „ Semidichtes Mischgut und Deckschichten. Festlegungen, Anforderungen, Konzeption und Ausführung “ |
|-----|---|
-

Dokumentation

-
- | | |
|------|--|
| [6] | Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU (2008), „ Lärmarme Strassenbeläge innerorts: Schlussbericht 2007 “, http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/00704/index.html?lang=de . |
| [7] | Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU (2011), „ Lärmarme Strassenbeläge innerorts: Jahresbericht 2010 “, http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01612/index.html?lang=de |
| [8] | Beckenbauer, T., Kropp, W. (2006), „ A hybrid model for analysis and design of low noise road surfaces “, Proc. EuroNoise conference, Tampere, Finland, paper no. 228. |
| [9] | Kuijpers A., Peeters B., Kropp W., Beckenbauer T. (2007), „ Acoustic Optimization Tool. RE4 – Modelling refinements in the SPERoN framework “, Report M+P, http://www.innovatieprogrammagemeluid.nl . |
| [10] | Beckenbauer, T., Klein, P., Hamet, J.-F., Kropp, W. (2008), „ Tyre/road noise prediction: A comparison between the SPERoN and HyRoNE models – Part 1 “, Proc. Acoustics'08 conference, Paris. |
| [11] | Klein, P., Beckenbauer, T., Hamet, J.-F., Kropp, W. (2008), „ Tyre/road noise prediction: A comparison between the SPERoN and HyRoNE models – Part 2 “, Proc. Acoustics'08 conference, Paris. |
| [12] | Männel, M., (2005), „ Entwicklung eines in-situ Systems zur Messung des komplexen Reflexionsfaktors von Fahrbahnbelägen für den fahrenden Einsatz “, Diplomarbeit, Universität Stuttgart. |
| [13] | Bühlmann, E., Bürgisser, P., Beckenbauer, T., Schulze, S., Ziegler, T., Angst, C. (2013), „ Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts: Teilprojekt 3: Langzeitmonitoring. Jahresbericht 2013 “, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU. |
| [14] | Beckenbauer, T., Belcher, D., Kneib, G. (2015), „ Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts: Teilprojekt 1, Einzelprojekt 5: Verbesserung des Genauigkeitsgrads akustischer Messmethoden “, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU. |
| [15] | Bühlmann, E., Bürgisser, P., Beckenbauer, T., Schulze, S., Ziegler, T., Angst, C. (2012), „ Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts: Teilprojekt 3: Langzeitmonitoring. Jahresbericht 2012 “, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bundesamt für Umwelt BAFU. |
| [16] | Beckenbauer, et al. (Aug. 2002), „ 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, Bergisch Gladbach. |
-

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Organigramm des Forschungspakets „Lärmarme Beläge innerorts“.....	20
Abb. 2 Schema des Hybridansatzes von SPERoN.....	23
Abb. 3 Schematische Darstellung eines Reifenquerschnitts mit veränderlicher Eindringtiefe (oben) und in seiner Darstellung mit Hilfe der Winkler-Bettung (unten).....	24
Abb. 4 Beispiel für die nichtlineare Kennlinienschar der normierten Kontaktsteife K/K_0 eines profillosen Reifens als Funktion der Rauheit und der Eindringtiefe (Reifengrösse 195/65 R15, Unterteilung in 512 Querschnitte, maximale Eindringtiefe 5 mm).....	24
Abb. 5 Schwingungen auf einem rollenden Reifen; 150 Hz-Mode (links) und 1'500 Hz-Mode (rechts).....	25
Abb. 6 Schematische Darstellung der Rekonstruktion. An den Kontaktpunkten der Einzelprofile kann es zu Unstetigkeiten kommen (siehe Variante 1), die zu vermeiden sind, z.B. indem man die Einzelprofile wiederholt an ihren Enden spiegelt (Variante 2).....	28
Abb. 7 Messverfahren zur Texturbestimmung auf verschiedenen Skalen (Wikipedia). ...	29
Abb. 8 Triangulationsprinzip (links): Aus Basislänge und Beobachtungswinkeln ergibt sich das Beobachtungsdreieck (Wikipedia). Lichtschnittverfahren (rechts): Die Lichtebene schneidet das Objekt und erzeugt eine gekrümmte und/oder un stetige Kontur (Fraunhofer IFF).	29
Abb. 9 Lichtschnittverfahren: Ein Lichtstrahl trifft auf ein Objekt und bildet dadurch eine Kontur ab. Sprünge in der Linie gehen auf Niveausprünge des Objektes zurück. Die Hintergrundbeleuchtung kann die Digitalisierung der Kontur erschweren. In Schwarz-Weiss ist dies am einfachsten (Wikipedia).	29
Abb. 10 Prinzip der Streifenprojektion. Die Intensitäten der projizierten Streifen werden vom Objekt phasenmoduliert und von einer Digitalkamera registriert (Wikipedia und Fraunhofer IOF).	31
Abb. 11 Gray-Code Modulation: Eine feste Folge von leicht veränderten Bildern wird nacheinander projiziert, um die Phasenmehrdeutigkeit aufzuheben (Fraunhofer IOF).	32
Abb. 12 Innere Orientierung (links) und Prinzip der Stereoskopie (rechts) (Dr. Causs GmbH).	33
Abb. 13 Line-Array-Kamera: Das Objekt wird an verschiedenen Positionen (a, b, c) unter verschiedenen Perspektiven auf unterschiedlichen Pixeln des Sensors abgebildet (A,B,C) (Dr. Causs GmbH).	33
Abb. 14 Schema eines telezentrischen Aufbaus eines Weisslicht-Interferometers (links, Polytec GmbH) und beispielhafte 3-D Darstellung eines vermessenen Spritzgusselements (rechts, Polytec GmbH).....	34
Abb. 15 Prinzipieller Aufbau eines Interferometers. Die Bragg-Zelle lässt nur eine bestimmte Bandbreite von Wellenlängen durch (Polytec GmbH).	34

Abb. 16 Schema eines konfokalen Punktsensors (links, Wikipedia) und eines chromatisch konfokalen Sensors, der unterschiedliche Farben an verschiedenen Punkten fokussiert (rechts, Wikipedia).	35
Abb. 17 Schema einer Konfokalkurve mit der Intensität I und der Tiefenkoordinate z (Wikipedia).	35
Abb. 18 Perspektivische Punktwolke einer grobkörnigen Fahrbahnoberfläche der Dimension 6 mal 12 Zentimeter (rot gestrichelte Linie).	36
Abb. 19 Texturoberfläche von Abb. 18 nach Interpolation auf ein Rechteckgitter.	37
Abb. 20 Illustration des Interpolationsschrittes von der irregulären Punktwolke (links) auf ein reguläres Gitter (rechts) auf einer Fläche von 30 mal 30 Millimetern.	37
Abb. 21 Überdeckungsschema für das Erfassen einer Probeplatte mit Hilfe von 13 mal 2 Einzelaufnahmen. Die Farbe zeigt die Anzahl der überlappenden Einzelaufnahmen an.	37
Abb. 22 Beispiele für linienhafte Analysen der Texturdaten von Abb. 20 auf einem Gitter.	38
Abb. 23 Flächenhafte Darstellung der Mean Segment Depth (MSD, oben) und des Gestaltfaktors (unten) für eine entnommene Deckbelagsplatte aus Fulenbach (siehe auch Abb. 55).	38
Abb. 24 Rechteckiger Messfuss mit Elastomer-Dichtung zur Messung des Luft-Strömungswiderstands auf einem Prüfkörper im IMPACT-Prüfstand.	39
Abb. 25 Vergleich der Messfuss-Geometrien.	40
Abb. 26 Rillen im Detail.	41
Abb. 27 Aufbau rund.	41
Abb. 28 Markierung rund.	41
Abb. 29 Strömungswiderstand der eckigen Apparatur aufgetragen gegen den der runden, gemessen an exakt der selben Stelle.	43
Abb. 30 Schallabsorptionsgradmessung mit dem <i>in situ</i> System im Labor zur Ermittlung des Einflusses einer streuenden Wand (links) und Messergebnis (rechts). Die Wand führt zu Undulationen des Absorptionsgrads als Funktion der Frequenz (aus [14]).	45
Abb. 31 Kritische Volumina (erste Fresnelzonen) für ausgewählte Frequenzen, in welchen Streuflächen die Absorptionsgradmessung auf der „Aufstandsfläche“ der dargestellten Ellipsoidstümpfe negativ beeinflussen können.	45
Abb. 32 Schallabsorptionsgradmessung einer Prüfplatte im IMPACT bei heruntergelassener Trennwand.	46
Abb. 33 Schallabsorptionsgradmessung mit dem <i>in situ</i> System und einer Prüfplatte auf dem Laborboden als Referenz zur IMPACT-Messung.	47
Abb. 34 Schallabsorptionsgradmessung von Prüfplatten auf dem schallharten Laborboden (oben links), im IMPACT (oben rechts) und Differenz beider Messungen (unten links). Die Summen von IMPACT-Ergebnis und der gemittelten Differenzkurve ergeben in guter Näherung die	

<i>Absorptionsgradkurven, die auf dem Laborboden bestimmt wurden (unten rechts).....</i>	<i>47</i>
<i>Abb. 35 Messung der mechanischen Impedanz einer Prüfplatte im IMPACT.....</i>	<i>49</i>
<i>Abb. 36 Applikation der Kraftverteilungsplättchen auf SDA 8B und AC MR 8+ Prüfplatten</i>	<i>49</i>
<i>Abb. 37 Frequenzgang der mechanischen Impedanz für den Probekörper SDA 4D (oben) und SDA 6B (unten). Grüne und rote Linien: fest eingespannter Prüfkörper; graue Linie: locker eingespannter Prüfkörper.....</i>	<i>50</i>
<i>Abb. 38 Lage des Messpunkts auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach (roter Punkt in Bildmitte) und des Entnahmepunkts (grünes Rechteck).....</i>	<i>52</i>
<i>Abb. 39 Lage des Messpunkts auf dem SDA 6B Belag in Kestenholz (roter Punkt in Bildmitte) und des Entnahmepunkts (grünes Rechteck).....</i>	<i>52</i>
<i>Abb. 40 Detailfotos von der Deckschicht SDA 8C in Fulenbach (links, mit Messfuss der Strömungswiderstandsapparatur) und SDA 6B in Kestenholz (rechts).....</i>	<i>53</i>
<i>Abb. 41 Situation am Messstandort des SDA 8C Belags in Fulenbach. Im Vordergrund der Texturmessbalken, der Messtopf für den Strömungswiderstand und das Stativ mit dem blauen Lautsprecher zur Absorptionsgradbestimmung. Im Hintergrund sind die Messmikrofone für die CPB-Messung aufgebaut.....</i>	<i>54</i>
<i>Abb. 42 Situation am Messstandort des SDA 6B Belags in Kestenholz. Der Messpunkt lag bei dem Campingtisch in der Bildmitte. Blumenkübel und ein Brunnen als mögliche Streukörper liessen sich nicht vermeiden, erwiesen sich aber im Nachhinein nicht als signifikant störend bei der CPB-Messung.....</i>	<i>54</i>
<i>Abb. 43 Messaufbau bei der CPB-Messung am SDA 8B Belag in Fulenbach. Das Vorbeifahrtgeräusch des Messfahrzeugs (rechts) wird von zwei Messmikrofonen aufgenommen, während die Fahrgeschwindigkeit via Radar gemessen wurde.</i>	<i>55</i>
<i>Abb. 44 Messpneus Premium Contact, Winter Contact und Eco Contact für die Kontrollierte Vorbeifahrt (CPB).....</i>	<i>56</i>
<i>Abb. 45 Gemessene Texturprofile der Messpneus Continental Premium, Winter und Eco Contact für die kontrollierte Vorbeifahrt. Für alle Messungen wurde das gleiche Serienfahrzeug vom Typ Volkswagen Passat Kombi verwendet (siehe Abb. 43).....</i>	<i>56</i>
<i>Abb. 46 Absorptionsgrad für den Messpunkt auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach (oben) und auf dem SDA 6B Belag Kestenholz (unten). Links: Messung in der Rollspur, rechts: Messung zwischen den Rollspuren.....</i>	<i>57</i>
<i>Abb. 47 Rauigkeitsspektren für den Messpunkt auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach (oben) und auf dem SDA 6B Belag Kestenholz (unten). Links: Messung in der Rollspur, rechts: Messung zwischen den Rollspuren.....</i>	<i>58</i>
<i>Abb. 48 Terzspektren der CPB-Messung auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach mit dem Continental EcoContact (links) und dem Continental WinterContact (rechts) bei den Zielgeschwindigkeiten von 40 km/h und 60 km/h. Werte nicht temperaturreferenziert.....</i>	<i>59</i>
<i>Abb. 49 Terzspektren der CPB-Messung auf dem SDA 8C Belag in Fulenbach (links) und auf dem SDA 6B Belag in Kestenholz (rechts) mit dem Continental</i>	

<i>PremiumContact 2 bei den Zielgeschwindigkeiten von 40 km/h und 60 km/h. Werte nicht temperaturreferenziert.....</i>	60
<i>Abb. 50 Terzspektren der CPB-Messung auf dem SDA 6B Belag in Kestenholz mit dem Continental EcoContact (links) und dem Continental WinterContact (rechts) bei den Zielgeschwindigkeiten von 40 km/h und 60 km/h. Werte nicht temperaturreferenziert.....</i>	60
<i>Abb. 51 Probekörper SDA 8C aus Fulenbach im IMPACT mit 180 mm Breite.....</i>	61
<i>Abb. 52 Probekörper SDA 6B aus Kestenholz im IMPACT.....</i>	62
<i>Abb. 53 Schnittfläche der untersuchten Probekörper. Links: SDA 8C Fulenbach; rechts: SDA 6B, Kestenholz.....</i>	62
<i>Abb. 54 Messaufbau bei der Textur- und Strömungswiderstandsmessung im IMPACT. Die Texturkamera (mittig links) wird nach jeder Aufnahme mit Hilfe des Messrahmens verschoben und das Bild über LAN-Kabel an den Messrechner übertragen.....</i>	63
<i>Abb. 55 Dreidimensionale Oberflächentexturen der aus der Strasse entnommenen Probekörper im Prüfstand IMPACT. Oben: SDA 8C, Fulenbach; unten: SDA 6B, Kestenholz.....</i>	63
<i>Abb. 56 Strömungswiderstände $R_{s\Box}^*$ und Rauigkeitsspektren der aus der Strasse entnommenen Probekörper. Links: SDA 8C, Fulenbach; rechts: SDA 6B, Kestenholz.....</i>	64
<i>Abb. 57 Schallabsorptionsgrade der Probekörper SDA 8C aus Fulenbach (grüne Kurven) und SDA 6B aus Kestenholz (rote Kurven) auf dem schallharten Laborboden (oben rechts), im IMPACT (oben links) und Differenz beider Messungen (unten links). Die Summen von IMPACT-Ergebnis und der Differenzkurve ergeben die Absorptionsgradkurven, die auf dem Laborboden bestimmt wurden (unten rechts).....</i>	64
<i>Abb. 58 Rauigkeitsspektrum der entnommenen Probekörper. Links: SDA 8C aus Fulenbach; rechts: SDA 6B aus Kestenholz. In situ Ergebnisse (oben) und IMPACT Ergebnisse (unten).....</i>	66
<i>Abb. 59 Wellenlänge λ_{max} (links) und effektive Rauigkeit $R_{eff \lambda_{max}}$ (rechts) im Maximum des Texturspektrums des SDA 8B Probekörpers als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen im IMPACT-Dauerversuch. Werte der in situ Messung für den SDA 8C in Fulenbach; Werte der in situ Messung für den SDA 6B in Kestenholz.....</i>	66
<i>Abb. 60 Terzspektren des Vorbeifahrtpegels für den EcoContact Pneu bei 40 km/h (links) und 60 km/h (rechts). Oben: SPERoN-Rechenergebnis für den IMPACT-Probekörper SDA 8B nach 38'181 Überrollungszyklen; Mitte: dito nach 1'743'968 Überrollungszyklen; unten: SPERoN-Rechenergebnis für die in situ gemessenen Oberflächenparameter der Strassenoberfläche der SDA 8C Deckschicht in Fulenbach. Grau: Gesamtpegel L_{total}, rot: $L_{mech.}$, dunkelblau: $L_{aero.}$, hellblau: L_{cavity}, grün: $L_{res.}$ (zu den Pegelgrößen siehe Abschnitt 2).....</i>	68
<i>Abb. 61 Oberfläche der Probeplatte SDA 8B am 30.03.2015 nach 4'288'492 Überrollungen.....</i>	71
<i>Abb. 62 Oberfläche der Probeplatte SDA 4C am 30.03.2015 nach 4'288'492 Überrollungen.....</i>	71
<i>Abb. 63 Zeitlicher Verlauf der Messserie im IMPACT.....</i>	72

Abb. 64	Strömungswiderstand $R_{s\Box}^*$ der Probepplatten als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.	73
Abb. 65	Strömungswiderstand $R_{s\Box}^*$ der Probepplatten als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen normiert auf den Ausgangszustand nach 1'000 Zyklen.....	73
Abb. 66	Messaufbau zur Bestimmung der Oberflächentextur im IMPACT. Bis zum 21.11.2014 wurde die Kamera parallel zur Rollrichtung orientiert (links), ab dem 24.11.2014 mit einem anderen Gestell senkrecht zur Rollrichtung (rechts).	74
Abb. 67	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'000 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	75
Abb. 68	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 38'181 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	75
Abb. 69	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 87'423 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	76
Abb. 70	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 226'405 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	76
Abb. 71	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 489'300 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	76
Abb. 72	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 613'657 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	76
Abb. 73	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 788'589 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	77
Abb. 74	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 855'237 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	77
Abb. 75	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 991'703 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	77
Abb. 76	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'249'714 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	77
Abb. 77	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'457'971 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	78
Abb. 78	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'654'574 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	78
Abb. 79	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 4C nach 1'828'579 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -1.5 bis 1.5 mm.	78
Abb. 80	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'000 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.	78
Abb. 81	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 38'181 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.	79
Abb. 82	Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 87'423 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.	79

Abb. 83 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 226'405 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.....	79
Abb. 84 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 613'657 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.....	79
Abb. 85 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 788'589 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.....	80
Abb. 86 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 855'237 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm. Schwarzer Kreis: Gebiet des Kornverlustes.....	80
Abb. 87 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 991'703 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.....	80
Abb. 88 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'249'714 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.....	80
Abb. 89 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'457'971 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.....	81
Abb. 90 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'654'574 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.....	81
Abb. 91 Ausschnitt der Oberflächentextur des SDA 8B nach 1'828'579 Überrollungszyklen. Die Farbskala reicht von -2.5 bis 2.5 mm.....	81
Abb. 92 MPD-Wert als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.....	82
Abb. 93 RMS-Wert als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.....	82
Abb. 94 Gestaltfaktor als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.....	82
Abb. 95 Rauigkeitstiefe bei der Wellenlänge des Rauigkeitsmaximums als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.....	83
Abb. 96 Wellenlängen im Maximum des Texturspektrums als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen.....	83
Abb. 97 Rauigkeitsspektrum des SDA 4C als Funktion der Anzahl der Überrollungen... ..	84
Abb. 98 Rauigkeitsspektrum des SDA 8B als Funktion der Anzahl der Überrollungen... ..	84
Abb. 99 Dreidimensionale Darstellung des Rauigkeitsspektrums des SDA 4C als Funktion der Anzahl der Überrollungen.....	85
Abb. 100 Dreidimensionale Darstellung des Rauigkeitsspektrums des SDA 8B als Funktion der Anzahl der Überrollungen.....	85
Abb. 101 A-bewerteter SPERoN-Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen für den SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Oben: Mittelwerte für das gewählte Reifenkollektiv der mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamische Komponente (blau) und der Gesamtpegel (grau) und die zugehörigen Regressionsgeraden; unten: Mittelwert des Gesamtpegels über alle Pneu des Kollektivs und Gesamtpegel für den Einzelpneu Goodyear Eagle F1 mit den zugehörigen Regressionsgeraden.....	88

- Abb. 102 A--bewerteter SPERoN-Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen für den SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Oben: Mittelwerte für das gewählte Reifenkollektiv der mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamische Komponente (blau) und der Gesamtpegel (grau) und die zugehörigen Regressionsgeraden; unten: Mittelwert des Gesamtpegels über alle Pneus des Kollektivs und Gesamtpegel für den Einzelpneu Goodyear Eagle F1 mit den zugehörigen Regressionsgeraden..... 89
- Abb. 103 A-bewerteter SPERoN-Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen für den SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Oben: Mittelwerte für das gewählte Reifenkollektiv der mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamische Komponente (blau) und der Gesamtpegel (grau) und die zugehörigen Regressionsgeraden; unten: Mittelwert des Gesamtpegels über alle Pneus des Kollektivs und Gesamtpegel für den Einzelpneu Goodyear Eagle F1 mit den zugehörigen Regressionsgeraden..... 90
- Abb. 104 A-bewerteter SPERoN-Schalldruckpegel als Funktion der Anzahl der Überrollungszyklen für den SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Oben: Mittelwerte für das gewählte Reifenkollektiv der mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamische Komponente (blau) und der Gesamtpegel (grau) und die zugehörigen Regressionsgeraden; unten: Mittelwert des Gesamtpegels über alle Pneus des Kollektivs und Gesamtpegel für den Einzelpneu Goodyear Eagle F1 mit den zugehörigen Regressionsgeraden..... 91
- Abb. 105 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für die Überrollungszyklenanzahlen zu Beginn und am Ende des IMPACT-Dauerversuchs. Prüfkörper SDA 4C; obere Reihe: $v = 50$ km/h, untere Reihe: $v = 80$ km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz..... 92
- Abb. 106 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für die Überrollungszyklenanzahlen zu Beginn und am Ende des IMPACT-Dauerversuchs. Prüfkörper SDA 8B; obere Reihe: $v = 50$ km/h, untere Reihe: $v = 80$ km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz..... 93
- Abb. 107 Empfohlene Eigenschaften des Prüfstandaufbaus..... 97
- Abb. 108 Empfohlene Intervalle für die Prüfung der akustischen Oberflächeneigenschaften..... 100
- Abb. 109 Empfehlenswerte und ungeeignete Reifenprofile..... 100
- Abb. 110 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 105
- Abb. 111 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 106
- Abb. 112 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 107

- Abb. 113 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 108
- Abb. 114 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 109
- Abb. 115 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 110
- Abb. 116 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 111
- Abb. 117 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 112
- Abb. 118 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 113
- Abb. 119 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 4C Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 114
- Abb. 120 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 115
- Abb. 121 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 116
- Abb. 122 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 117
- Abb. 123 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 118
- Abb. 124 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 50 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 119

Abb. 125 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 120

Abb. 126 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 121

Abb. 127 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 122

Abb. 128 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 123

Abb. 129 A-bewertete SPERoN-Schalldruckpegelspektren für verschiedene Überrollungszyklenanzahlen auf dem SDA 8B Prüfkörper bei 80 km/h. Gezeigt sind die mechanischen Geräuschanteile (rot), die aerodynamischen Anteile (blau) und der Gesamtpegel (grau) als Funktion der Terzmittenfrequenz. 124

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Strömungswiderstand R_s^* in Pa·s/m eines IMPACT-Prüfkörpers bei einem Durchfluss von $q = 6$ l/min.	39
Tab. 2 Strömungswiderstand R_s^* in Pa·s/m zweier bekannter Prüfkörper bei einer Strömungsgeschwindigkeit (Ablesewert) von $u = 0.0125$ m/s.	40
Tab. 3 Vergleich der Strömungswiderstände zwischen rundem und eckigem Messfuss bei unterschiedlicher Ausrichtung der Rillen.	41
Tab. 4 Strömungswiderstand bei Variation der Anzahl der durchströmten Rillen. l : Länge, b : Breite, d : Diagonallänge der rechteckigen Öffnungsfläche; \varnothing : Durchmesser der runden Öffnungsfläche.	42
Tab. 5 Zeitraum und Witterungsbedingungen der Evaluationsmessungen (Lufttemperatur T_L und Fahrbahntemperatur T_{Fb} , in situ steht für Textur-, Absorptionsgrad- und Strömungswiderstandsmessung, CPB=Controlled Pass-By, Angabe des Messreifentyps).	53
Tab. 6 Zusammenfassung der in situ Messergebnisse in Fulenbach und Kestenholz (α =mittlerer Absorptionsgrad zwischen 500 Hz und 3000 Hz, R_s^* =spezifischer Strömungswiderstand, MPD=Mean Profile Depth, RMS=Effektivwert, g =Gestaltfaktor, λ_{max} = Rauigkeitswellenlänge im spektralen Maximum, $R_{eff,max}$ =maximale Rauigkeitstiefe).	58
Tab. 7 Vorbeifahrtpegel $L_{AFmax,7.5m}$ der CPB Messungen. Alle Werte in dB(A), geschwindigkeits- und temperaturreferenziert ($T_{L,ref} = 20^\circ\text{C}$).	59
Tab. 8 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Messergebnisse aus Fulenbach und Kestenholz von den in situ Messungen und den Entnahmeplatten im IMPACT, jeweils zwischen den Rollspuren (α =mittlerer Absorptionsgrad zwischen 500 Hz und 3000 Hz, $R_{s\Box}^*$ =spezifischer Strömungswiderstand mit eckigem Messfuss, $R_{s\text{rund}}^*$ =spezifischer Strömungswiderstand für einen runden Messfuss, MPD=Mean Profile Depth, RMS=Effektivwert, λ_{max} =maximale Rauigkeitswellenlänge, $R_{eff,max}$ =Rauigkeitstiefe im Maximum des Texturspektrums).	65
Tab. 9 Vorbeifahrtpegel $L_{AFmax,7.5m}$ aus den SPERoN-Berechnungen bzw. den CPB Messungen auf den Deckbelägen mit 8 mm Grösstkorn, bezogen auf die nominelle Lufttemperatur von 20°C. Reifen: Continental EcoContact. Alle Werte in dB(A) wenn nicht anders angegeben.	67
Tab. 10 Liste der den SPERoN-Berechnungen zugrundegelegten Pneus.	87
Tab. 11 Ablauf der akustischen Prüfungen im IMPACT.	98
Tab. 12 Verwendete Messmittel für SPB-Messungen.	103
Tab. 13 Verwendete Messmittel für CPX-Messungen.	103
Tab. 14 Verwendete Messmittel für die Messung des Schallabsorptionsgrads in situ..	104

Projektabschluss



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Strassen ASTRA

FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Version vom 09.10.2013

Formular Nr. 3: Projektabschluss

erstellt / geändert am: 23.10.2015

Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2010/013
Projekttitel: EP4: Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge
Enddatum: 30.09.2013

Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

EP4 diente dazu, die akustischen Oberflächeneigenschaften von Laborprüfkörpern in Abhängigkeit von der mechanischen Beanspruchung durch ein Prüfrad in dem in EP2 entwickelten Prüfstand IMPACT zu erfassen und die Rollgeräuschpegel mit Hilfe des Rechenmodells SPERoN als Zeitreihe über der Anzahl von Überrollungen darzustellen und deren Veränderung zu beurteilen. Der Ermittlung der akustischen Oberflächeneigenschaften Textur, Luftströmungswiderstand im Reifen-Fahrbahn-Kontakt und Schallabsorptionsgrad wurden geeignete Messverfahren zugrundegelegt und an die spezifischen Bedingungen im Prüfstand angepasst. Die 3D-Texturmessung mit Streifenlichtprojektionskamera liefert eine vollflächige und detaillierte Texturdarstellung. Diese Texturmessung diente dazu, die für die Modellberechnungen der Rollgeräuschpegel notwendigen 2 m langen Texturprofilprofile aus den im Prüfstand erfassten 0.5 m langen 3D-Texturen zu rekonstruieren. Der Strömungswiderstand wurde im Prüfstand auf den 18 cm x 50 cm grossen Prüfkörpern praktischerweise mit einem rechteckigen Messfuss bestimmt. Anhand von Vergleichsmessungen konnten die Werte auf Ergebnisse mit dem runden Standardmessfuss zurückgeführt werden. Die Absorptionsgradmessung im Prüfstand ist von störenden Schallreflexionen aus dem Prüfstandsaufbau selbst und seiner nächsten Umgebung beeinflusst. Der Einfluss der Reflexionen lässt sich mit Hilfe von vergleichenden Freifeldmessungen an den Probekörpern quantifizieren und aus den IMPACT-Messergebnissen herausrechnen. Bei der Bestimmung der mechanischen Impedanzwerte der Probekörper müsste der Prüfstand erheblich massiver konstruiert werden. Neben Vorversuchen mit verschiedenen Reifen und Probekörpern wurde ein Dauerversuch im Prüfstand mit über 5 Millionen Überrollungen messtechnisch begleitet. Auf zwei Belagsprobekörpern der Mischguttypen SDAC 4C und SDA 8B konnte über 10 Monate hinweg mit hoher Messdatendichte die Veränderung akustisch relevanter Oberflächenparameter verfolgt und mit Hilfe von Berechnungen der Rollgeräuschpegel mit dem Simulationsverfahren SPERoN ergänzend untersucht werden. Nach einer Einfahrphase von einigen zehntausend Zyklen erfolgte eine allmähliche Verschlechterung des akustischen Zustands. Der Strömungswiderstand blieb nach der Einfahrphase bei beiden Prüfläufen über lange Zeit weitgehend stabil, nahm aber während der letzten 500'000 Überrollungen um 5% zu. Die Texturwerte MPD, RMS, Gestaltfaktor und Rauigkeitstiefe nahmen um einige Prozentpunkte ab, während die Texturwellenlängenverteilung im Wesentlichen unverändert blieb. Die Erhöhung des Strömungswiderstands gegen Ende der Versuchsreihe ist auf eine teilweise Schliessung der Poren der semidichten Beläge durch die Beanspruchung im Prüfstand zurückzuführen. Dabei spielt die Umlagerung von Gesteinskörnern und das Verreiben des Bindemittels, ggf. unter Beteiligung von Reifenabrieb, zwischen der groben Gesteinskörnung eine Rolle. Beim SDA 8B Prüfkörper kam es nach rund 1.8 Mio. Überrollungen zu einem ersten Kornausbruch. Die SPERoN-Berechnungen der Rollgeräuschpegel zeigen, dass durch die Beanspruchung im IMPACT durchaus signifikante Veränderungen des akustischen Verhaltens der Beläge eintreten können. Dies macht sich insbesondere in der mechanisch induzierten Schallkomponente des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs bemerkbar. Die Zunahme dieser Geräuschkomponente beträgt für den SDA 4C Belag rund 0.1 dB(A) pro 1 Mio. Zyklen und für den SDA 8B Belag rund 0.5 dB(A) pro 1 Mio. Zyklen. Bei einzelnen Reifentypen wie beispielsweise dem Goodyear Eagle F1 fällt die Zunahme mit 0.7 dB(A) pro 1 Mio. Zyklen in der Simulation noch deutlicher aus. Validierungsmessungen an vergleichbaren Belägen in situ und im IMPACT haben gezeigt, dass sowohl die Herstellung der Laborprobekörper als auch die Beanspruchung im IMPACT-Prüfstand den Gegebenheiten der realen Strasse nahe kommt. Die im IMPACT-Prüfstand über eine Anzahl von rund 4'000'000 Überrollungen simulierte Beanspruchung spiegelt die Verhältnisse des Strassenbetriebs für einen Zeitraum von vielleicht 2 Jahren wider. Dies gilt jedoch nur für tiefe Geschwindigkeiten von nicht mehr als 40 km/h, bei denen alleine die mechanische induzierte Geräuschkomponente den Rollgeräuschpegel bestimmt. Insgesamt hat das Forschungsvorhaben gezeigt, dass sich im Prüfstand akustisch relevante Oberflächenveränderungen erzeugen lassen. Im gegenwärtigen Ausbaustand des IMPACT gehen diese Veränderungen jedoch so langsam vor sich, dass gegenüber der Veränderung auf einer realen Strasse im Prüfstand keine signifikante Beschleunigung zu erkennen ist. Der Weg zu einem effizienteren Prüfverfahren und realistischerer Alterungssimulation dürfte über eine Nachbildung des natürlichen Klimaeinflusses im Rahmen künftiger Versuchsreihen führen.



Zielerreichung:

Die Anpassung der Messverfahren an den Prüfstand zur Bestimmung der Textur, des Strömungswiderstands und des Schallabsorptionsgrads ist vollumfänglich gelungen und auf ähnliche Prüfstände übertragbar. Die Bestimmung der mechanischen Impedanz der Probekörper im IMPACT war nicht erfolgreich, weil diese zu empfindlich auf die Auflagebedingungen der Probekörper reagiert. Gemäss dem Projektvorschlag wurden Validierungsmessungen auf zwei Innerortsstrassen durchgeführt und mit Labormessungen an entnommenen Probekörpern verglichen. Ein Dauerversuch im Prüfstand zur Evaluierung des Prüfstandsversuchs konnte wie geplant mit hoher Messdatendichte verfolgt und mit Hilfe von SPERoN-Berechnungen begleitet werden. Das Vorhaben wurde - abgesehen von zeitlichen Verzögerungen - wie geplant durchgeführt. Das Ausmass der akustischen Veränderungen der Oberflächeneigenschaften nach über 5 Millionen Überrollungen und dem damit verbundenen Zeitaufwand von 10 Monaten im Prüfstand blieb hinter den Erwartungen zurück.

Folgerungen und Empfehlungen:

Der Prüfstand sollte funktionell erweitert werden, um den Alterungsprozess von Innerortsstrassen realistischer simulieren zu können. Die Oberflächenstrukturveränderungen im IMPACT entsprechen offenbar noch nicht in jeder Hinsicht dem Verschleiss durch den Strassenbetrieb. Neben der bisher realisierten mechanischen Beanspruchung sollten thermische Effekte des periodischen Aufheizens und Abkühlens bis unter die Frostgrenze, die das Bindemittel versprödende UV-Sonneneinstrahlung und chemische Veränderungen durch Staub- und Streusalzeintrag im IMPACT berücksichtigt werden. Insbesondere die allmähliche Versprödung des Bindemittels scheint bislang zu fehlen. Anstatt einer Ausmagerung der Bindemittelmatrix erfolgt eine Verschmierung des Bindemittels in der Oberflächenstruktur, besonders bei der feinrauen Deckschicht SDA 4C. Eine starke zeituhrgesteuerte UV- und Infrarotheizung und eine periodische Bestäubung sollten sich mit geringem technischen Aufwand ergänzen lassen. Reinigung, Bewässerung und Frost könnte man am Einfachsten durch periodischen Ausbau, Abspritzen und stundenweise Lagerung in einer Gefriertruhe bewerkstelligen. Nach einem solchemmassen erweiterten Belagsalterungsprogramm ist mit grösseren und schnelleren Veränderungen der Belageigenschaften und einer schnelleren akustischen Alterung zu rechnen. Die Messgrössen Textur und Strömungswiderstand sollten bei einer Neuaufgabe des Versuchsprogramms aus wirtschaftlichen Gründen nur etwa alle zwei Wochen gemessen werden, der Absorptionsgrad - wie bisher - wesentlich seltener. Die Messung der mechanischen Impedanz von Probeplatten im Prüfstand wird als wenig aussichtsreich bewertet und sollte künftig, solange elastische Fahrbahndeckschichten noch keine Rolle spielen, unterbleiben.

Publikationen:

noch keine.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Beckenbauer

Vorname: Dr. Thomas

Amt, Firma, Institut: Müller-BBM Schweiz AG, Gewerbestrasse 25, 4123 Allschwil

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



FORSCHUNG IM STRASSENWESEN DES UVEK

Formular Nr. 3: Projektabschluss

Beurteilung der Begleitkommission:

Beurteilung:

Die Messverfahren für die drei Inputparameter des SPERoN-Modells (Textur, Strömungswiderstand und Schallabsorption) wurden anhand der Laborprüfkörper der IMPACT-Maschine aus dem EP2 angepasst und erfolgreich geprüft. Es ist nun möglich diese Parameter an Proben zuverlässig zu messen und Modellrechnungen mit SPERoN durchzuführen.

Die Ergebnisse der SPERoN-Berechnungen konnten anhand von in situ Messungen auf zwei Teststrecken validiert werden.

Die zeitliche Entwicklung der akustischen Eigenschaften von Deckbelägen konnten mit den Modellrechnungen aus SPERoN ermittelt werden. Prüfkörper des Mischguttyps SDA8 weisen nach 5 Millionen Überrollungen eine Verschlechterung der akustischen Eigenschaften von 2dB(A) auf. Für Prüfkörper des Mischguttyps SDA4 konnte kein akustischer Effekt beobachtet werden.

Umsetzung:

Mit den getesteten Anpassungen der Messverfahren kann das SPERoN-Modell verwendet werden, um Lärmemissionen von im Labor hergestellten und belasteten Belägen vorherzusagen.

Die Eigenschaften der Prüfkörper konnten im Rahmen des EP2 mit der IMPACT-Maschine nur ungenügend beschädigt werden, um beweiskräftige Ergebnisse für die zeitliche Entwicklung der akustischen Eigenschaften von Deckbelägen zu erhalten.

weitergehender Forschungsbedarf:

Ein gesamtheitliches Verfahren für die Bestimmung der akustischen Dauerhaftbarkeit von Belägen im Labor fehlt weiterhin.

Einfluss auf Normenwerk:

Keine

Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Seiler

Vorname: Luzia

Amt, Firma, Institut: ASTRA

Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

28.1.2016

Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

Stand: 15.03.2016

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1557	SVI 2010/001	Reklame im Strassenverkehr	2016
1555	SVI 2004/049	Sichere Schulwege – Gefahrenanalyse und Massnahmenplanung	2016
1554	VSS 2011/501	Evaluation des Frosttaumittelwiderstands von Beton – Vergleich von vier Prüfverfahren	2016
1551	VSS 2012/207	Akustische Installationen im Strassentunnel	2016
1550	VSS 2012/311	SERFOR: Voranalyse "Self Explaining and Forgiving Roads"	2016
1549	SVI 2011/015	Anforderungen an zukünftige Mobilitätshebungen	2016
1548	VSS 2010/404	Grundlagen für die Anforderungen an Schutzgeokunststoffe auf der Basis von neuen EN-Prüfmethoden	2016
1547	ASTRA 2011/012_OBF	Development of a self-healing asphalt road via induction heating	2015
1545	ASTRA 2011/013_OBF	Vergleich verschieden starker Asphalt-Belagsaufbauten: Ermittlung der Versagensgrenze eines T3-Normbelages mit der mobilen Grossversuchsanlage MLS10	2015
1544	VSS 2007/302	Rampenbewirtschaftung: Anforderungen an Regelungsverfahren	2015
1543	VSS 2012/402	Machbarkeitsstudie zur Reduktion von Feinstaub oder seiner Vorläufergase mittels spezieller Strassenbeläge	2015
1542	VSS 2011/713	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP3: Transformationskonzepte zwischen Bezugssystemen	2015
1541	VSS 2010/301	Verkehrssicherheit zweistreifiger Kreisel	2015
1540	AGE 2013/001_ENG	TOSA - Transport par bus avec Optimisation du Système d'Alimentation	2015
1539	FGU 2010/007	Modelling of anhydritic swelling claystones	2015
1538	SVI 2011/021	Forschungspaket Verkehr der Zukunft (2060): Initialprojekt	2015
1537	FGU 2010/007	Geotechnischer Indexwert für die Beurteilung des Potentials zur Quarzstaubbilastung	2015
1536	VSS 2012/201	Wirkungskontrolle von Strassenprojekten	2015
1535	VSS 2012/403	Einfluss der Gesteinskörnung auf den Chloridwiderstand von Beton	2015
1534	VSS 2009/102	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 2: Methoden der Verkehrsbeobachtung	2015
1533	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Synthesebericht	2015
1532	VSS 2009/101	Forschungsbündel Erhebung verkehrsplanerischer Grundlagedaten: Teilprojekt 1: Systematik und Glossar	2015
1531	VSS 2011/906	Datenaustausch zwischen Strasseninformationssystemen und Verkehrsmodellen	2015
1530	VSS 2010/402	Einfluss biogener Öle auf die Ökobilanz von Strassenbaubindemittel	2015
1529	VSS 2005/404	Beschleunigte Alterungsmethode von heiss verarbeitbaren Fugenmassen zur Simulation des Einbaus	2015
1528	VSS 2011/308	Verkehrsablauf an ungesteuerten Knoten innerorts unter Berücksichtigung der verschiedenen Verkehrsarten; Ermittlung repräsentativer Richtwerte und Zusammenhänge	2015
1527	VSS 2006/510	Forschungspaket Brückenabdichtungen: Synthesebericht	2015
1526	VSS 2005/456	Paquet de recherche de recyclage des matériaux bitumineux de démolition des routes dans des enrobés à chaud : EP5: Formulation des enrobés avec matériaux recyclés	2015
1525	SVI 2004/058	Verträglichkeitskriterien für den Strassenraum innerorts	2015
1524	ASTRA 2012/003	Erarbeitung von Grundlagen zur Bemessung von Steinschlagschutzdämmen	2015
1523	VSS 2011/104	Monetarisierung des statistischen Lebens im Strassenverkehr	2015
1522	VSS 2011/106	Normierte gesamtverkehrliche Erschliessungsqualitäten - Grundlagenbericht	2015
1521	VSS 2006/514_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP4 - Zerstörungsfreie Prüfungen von Verbund und Oberflächen	2015
1520	ASTRA 2008/013_OBF	Nächtliche Immissionsprognosen von Strassenlärm (Hochleistungsstrassen)	2015
1519	VSS 2009/201	Lärmimmissionen bei Knoten und Kreiseln	2015
1518	SVI 2011/024	Langsamverkehrsfreundliche Lichtsignalanlagen	2015

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1517	VSS 2011/103	Bemessungsverkehrsstärken: Ein neuer Ansatz	2015
1516	VSS 2011/711	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP1: Zeitaspekte und Historisierung	2015
1515	SVI 2011/034	Längere Umsteigezeiten und Haltestellenaufenthaltszeiten - Auswirkungen und Massnahmen	2015
1514	VSS 2006/513_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP3 - Langzeitverhalten des Verbundes	2015
1513	VSS 2005/403	Fliesskoeffizienten von feinen Gesteinskörnungen aus der Schweiz	2015
1512	SVI 2004/069	Veloverkehr in den Agglomerationen - Einflussfaktoren, Massnahmen und Potenziale	2015
1511	VSS 2012/601	Die Physik zwischen Salz, Schnee und Reifen	2015
1510	VSS 2005/453	Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP2: Mehrfachrecycling von Strassenbelägen	2015
1509	ASTRA 2010/022	Markt- und Nutzermonitoring Elektromobilität (MANUEL)	2015
1508	VSS 2011/716	Forschungspaket Nutzensteigerung für die Anwender des SIS: EP6: Schnittstellen aus den Auswertungssystemen SIS (SIS-DWH)	2015
1507	FGU 2007/004	TBM Tunneling in Faulted and Folded Rocks	2015
1506	VSS 2006/512_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP2 - Flüssigkunststoff-Abdichtungen, Erfassen der Verbundproblematik	2015
1505	VSS 2006/509	Abdichtungssysteme und bitumenhaltige Schichten auf Betonbrücken - Initialprojekt	2014
1504	VSS 2005/504	Druckschwellversuch zur Beurteilung des Verformungsverhaltens von Belägen	2014
1503	VSS 2006/515_OBF	Research Package on Bridge Deck Waterproofing Systems: EP5-Mechanisms of Blister Formation	2014
1502	VSS 2010/502	Road – landside interaction : Applications	2014
1501	VSS 2011/705	Grundlagen zur Anwendung von Lebenszykluskosten im Erhaltungsmanagement von Strassenverkehrsanlagen	2014
1500	ASTRA 2010/007	SURPRICE (Sustainable mobility through road user charging) - Swiss contribution: Equity effects of congestion charges and intra-individual variation in preferences	2015
1499	ASTRA 2011/010	Stauprognoseverfahren und -systeme	2014
1498	VSS 2011/914	Coordinated Ramp Metering Control with Variable Speed Limits for Swiss Freeways	2014
1497	VSS 2009/705	Verfahren zur Bildung von homogenen Abschnitten der Strassenverkehrsanlage für das Erhaltungsmanagement Fahrbahnen	2014
1496	VSS 2010/601	Einfluss von Lärmschutzwänden auf das Raumnutzungsverhalten von Reptilien	2014
1495	VSS 2009/703	Zusammenhang Textur und Griffigkeit von Fahrbahnen und Einflüsse auf die Lärmemission	2014
1494	VSS 2010/704	Erhaltungsmanagement der Strassen - Erarbeiten der Grundlagen und Schadenkataloge zur systematischen Zustandserhebung und -bewertung von zusätzlichen Objekten der Strassen	2014
1493	VSS 2006/001	Neue Methoden zur Beurteilung der Tieftemperatureigenschaften von bitumenhaltigen Bindemitteln	2014
1492	SVI 2004/029	Kombiniertes Verkehrsmittel- und Routenwahlmodell	2014
1491	VSS 2007/704	Gesamtbewertung von Kunstbauten	2014
1490	FGU 2004/002	Langzeit-Beständigkeit von Tunnel-Abdichtungssystemen aus Kunststoffen (Best TASK)	2014
1489	VSS 2006/516_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP6 - Anschlüsse von Brückenabdichtungen	2014
1488	SVI 2007/020	Methodik zur Nutzenermittlung von Verkehrsdosierungen	2014
1487	SVI 2008/001	Erfahrungsbericht Forschungsbündel	2014
1486	SVI 2004/005	Partizipation in Verkehrsprojekten	2014
1485	VSS 2007/401	Anforderungen an Anschlussfugensysteme in Asphaltdecken - Teil 1: Praxiserfahrung	2014
1484	FGU 2010/003	Misestimating time of collision in the tunnel entrance due to a disturbed adaptation	2014
1483	VSS 2005/452	Forschungspaket Recycling von Ausbausphal in Heissmischgut: EP1: Optimaler Anteil an Ausbausphal	2014
1482	ASTRA 2010/018	SURPRICE: Sustainable mobility through road user charges Swiss contribution: Comprehensive road user charging (RUC)	2015
1481	VSS 2001/702	Application des méthodes de représentation aux données routières	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1480	ASTRA 2008/004	Prozess- und wirkungsorientiertes Management im betrieblichen Strassenunterhalt Modell eines siedlungsübergreifenden Unterhalts	2014
1479	ASTRA 2005/004	Entscheidungsgrundlagen & Empfehlungen für ein nachhaltiges Baustoffmanagement	2014
1478	VSS 2005/455	Research Package on Recycling of Reclaimed Asphalt in Hot Mixes - EP4: Evaluation of Durability	2014
1477	VSS 2008/503	Feldversuch mit verschiedenen Pflasterungen und Plattendecken	2014
1476	VSS 2011/202	Projet initial pour la conception multi-usagers des carrefours	2014
1475	VSS 1999/125	Ringversuch "Eindringtiefe eines ebenen Stempels, statische Prüfung an Gussasphalt"	2014
1474	VSS 2009/704	Wechselwirkung zwischen Aufgrabungen, Zustand und Alterungsverhalten im kommunalen Strassennetz-Entwicklung eines nachhaltigen Aufgrabungsmanagement	2014
1473	VSS 2011/401	Forschungspaket "POLIGRIP - Einfluss der Polierbarkeit von Gesteinskörnungen auf die Griffigkeit von Deckschichten - Initialprojekt"	2014
1472	SVI 2010/003	Einfluss der Verlässlichkeit der Verkehrssysteme auf das Verkehrsverhalten	2014
1471	ASTRA 2008/011	Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr Forschungspaket UVEK/ASTRA - Synthese	2014
1470	VSS 2011/907	Initialprojekt für ein Forschungspaket "Kooperative Systeme für Fahrzeug und Strasse"	2014
1469	VSS 2008/902	Untersuchungen zum Einsatz von Bewegungssensoren für fahrzeitbezogene Verkehrstelematik-Anwendungen	2014
1468	VSS 2010/503	Utilisation des géostructures énergétiques pour la régulation thermique et l'optimisation énergétique des infrastructures routières et ouvrages d'art	2014
1467	ASTRA 2010/021	Sekundärer Feinstaub vom Verkehr	2014
1466	VSS 2010/701	Grundlagen zur Revision der Normen über die visuelle Erhebung des Oberflächenzustands	2014
1465	ASTRA 2000/417	Erfahrungen mit der Sanierung und Erhaltung von Betonoberflächen	2014
1464	VSS 2002/403	Récupération de liants modifiés aux polymères issus d'échantillons d'enrobés	2014
1463	VSS 2006/511_OBF	Forschungspaket Brückenabdichtungen: EP1 – Standfester Gesamtaufbau, Prüfung und Bewertung	2014
1462	ASTRA 2011/004	Ermittlung der Versagensgrenze eines T2 Norm-Belages mit der mobiles Grossversuchsanlage MLS10	2014
1461	VSS 2001/506	Einfluss der Verdichtungstemperatur auf die Ergebnisse der Marshall-Prüfung und der Einbaukontrolle	2014
1460	SVI 2007/017	Nutzen der Verkehrsinformation für die Verkehrssicherheit	2014
1459	VSS 2002/501	Leichtes Fallgewichtgerät für die Verdichtungskontrolle von Foundationsschichten	2014
1458	VSS 2010/703	Umsetzung Erhaltungsmanagement für Strassen in Gemeinden - Arbeitshilfen als Anhang zur Norm 640 980	2014
1457	SVI 2012/006	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 5: Medizinische Folgen des Strassenunfallgeschehens	2014
1456	SVI 2012/005	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 4: Einflüsse des Wetters auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1455	SVI 2012/004	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 3: Einflüsse von Fahrzeugeigenschaften auf das Strassenunfallgeschehen	2014
1454	SVI 2012/003	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 2: Einflüsse von Situation und Infrastruktur auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1453	SVI 2012/002	Forschungspaket VeSPA Teilprojekt 1: Einflüsse von Mensch und Gesellschaft auf das Strassenunfallgeschehen: Phase 1	2014
1452	SVI 2012/001	Forschungspaket VeSPA: Synthesebericht Phase 1	2014
1451	FGU 2010/006	Gasanalytik zur frühzeitigen Branddetektion in Tunneln	2013
1450	VSS 2002/401	Kaltrecycling von Ausbausasphalt mit bituminösen Bindemitteln	2014
1449	ASTRA 2010/024	E-Scooter - Sozial- und naturwissenschaftliche Beiträge zur Förderung leichter Elektrofahrzeuge in der Schweiz	2013
1448	SVI 2009/008	Anforderungen der Güterlogistik an die Netzinfrastruktur und die langfristige Netzentwicklung in der Schweiz. Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt C	2014

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1447	SVI 2009/005	Informationstechnologien in der zukünftigen Gütertransportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA "Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz", Teilprojekt E	2013
1446	VSS 2005/454	Forschungspaket Recycling von Ausbauspalt in Heissmischgut: EP3: Stofffluss- und Nachhaltigkeitsbeurteilung	2013
1445	VSS 2009/301	Öffnung der Busstreifen für weitere Verkehrsteilnehmende	2013
1444	VSS 2007/306	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von Anlagen des leichten Zweirad- und des Fussgängerverkehrs	2013
1443	VSS 2007/305	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit des strassengebundenen ÖV	2013
1442	SVI 2010/004	Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie	2013
1441_2	SVI 2009/010	Zielsystem im Güterverkehr. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz - Teilprojekt G	2013
1441_1	SVI 2009/010	Effizienzsteigerungspotenziale in der Transportwirtschaft durch integrierte Bewirtschaftungsinstrumente aus Sicht der Infrastrukturbetreiber Synthese der Teilprojekte B3, C, D, E und F des Forschungspakets Güterverkehr anhand eines Zielsystems für den Güterverkehr	2013
1440	SVI 2009/006	Benchmarking-Ansätze im Verkehrswesen	2013
1439	SVI 2009/002	Konzept zur effizienten Erfassung und Analyse der Güterverkehrsdaten Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz von Verkehrsmitteln im Güterverkehr der Schweiz TP A	2013
1438_2	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 2. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1438_1	SVI 2009/011	Ortsbezogene Massnahmen zur Reduktion der Auswirkungen des Güterverkehrs - Teil 1. Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP H	2013
1437	VSS 2008/203	Trottoirüberfahrten und punktuelle Querungen ohne Vortritt für den Langsamverkehr	2013
1436	VSS 2010/401	Auswirkungen verschiedener Recyclinganteile in ungebundenen Gemischen	2013
1435	FGU 2008/007_OBF	Schadstoff- und Rauchkurzschlüsse bei Strassentunneln	2013
1434	VSS 2006/503	Performance Oriented Requirements for Bituminous Mixtures	2013
1433	ASTRA 2010/001	Güterverkehr mit Lieferwagen: Entwicklungen und Massnahmen Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B3	2013
1432	ASTRA 2007/011	Praxis-Kalibrierung der neuen mobilen Grossversuchsanlage MLS10 für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen in der Schweiz	2013
1431	ASTRA 2011/015	TeVeNOx - Testing of SCR-Systems on HD-Vehicles	2013
1430	ASTRA 2009/004	Impact des conditions météorologiques extrêmes sur la chaussée	2013
1429	SVI 2009/009	Einschätzungen der Infrastrukturnutzer zur Weiterentwicklung des Regulativs Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP F	2013
1428	SVI 2010/005	Branchenspezifische Logistikkonzepte und Güterverkehrsaufkommen sowie deren Trends Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP B2	2013
1427	SVI 2006/002	Begegnungszonen - eine Werkschau mit Empfehlungen für die Realisierung	2013
1426	ASTRA 2010/025_OBF	Luftströmungsmessung in Strassentunneln	2013
1425	VSS 2005/401	Résistance à l'altération des granulats et des roches	2013
1424	ASTRA 2006/007	Optimierung der Baustellenplanung an Autobahnen	2013
1423	ASTRA 2010/012	Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts EP3: Betrieb und Unterhalt lärmarmen Beläge	2013
1422	ASTRA 2011/006_OBF	Fracture processes and in-situ fracture observations in Gipskeuper	2013

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1421	VSS 2009/901	Experimenteller Nachweis des vorgeschlagenen Raum- und Topologiemodells für die VM-Anwendungen in der Schweiz (MDATrafo)	2013
1420	SVI 2008/003	Projektierungsfreiräume bei Strassen und Plätzen	2013
1419	VSS 2001/452	Stabilität der Polymere beim Heisseinbau von PmB-haltigen Strassenbelägen	2013
1418	VSS 2008/402	Anforderungen an hydraulische Eigenschaften von Geokunststoffen	2012
1417	FGU 2009/002	Heat Exchanger Anchors for Thermo-active Tunnels	2013
1416	FGU 2010/001	Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D	2013
1415	VSS 2010/A01	Wissenslücken im Infrastrukturmanagementprozess "Strasse" im Siedlungsgebiet	2013
1414	VSS 2010/201	Passive Sicherheit von Tragkonstruktionen der Strassenausstattung	2013
1413	SVI 2009/003	Güterverkehrsintensive Branchen und Güterverkehrsströme in der Schweiz Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz Teilprojekt B1	2013
1412	ASTRA 2010/020	Werkzeug zur aktuellen Gangliniennorm	2013
1411	VSS 2009/902	Verkehrstelematik für die Unterstützung des Verkehrsmanagements in ausserordentlichen Lagen	2013
1410	VSS 2010/202_OBF	Reduktion von Unfallfolgen bei Bränden in Strassentunneln durch Abschnittsbildung	2013
1409	ASTRA 2010/017_OBF	Regelung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2013
1408	VSS 2000/434	Viellissement thermique des enrobés bitumineux en laboratoire	2012
1407	ASTRA 2006/014	Fusion des indicateurs de sécurité routière : FUSAIN	2012
1406	ASTRA 2004/015	Amélioration du modèle de comportement individuel du Conducteur pour évaluer la sécurité d'un flux de trafic par simulation	2012
1405	ASTRA 2010/009	Potential von Photovoltaik an Schallschutzmassnahmen entlang der Nationalstrassen	2012
1404	VSS 2009/707	Validierung der Kosten-Nutzen-Bewertung von Fahrbahn-Erhaltungsmassnahmen	2012
1403	SVI 2007/018	Vernetzung von HLS- und HVS-Steuerungen	2012
1402	VSS 2008/403	Witterungsbeständigkeit und Durchdrückverhalten von Geokunststoffen	2012
1401	SVI 2006/003	Akzeptanz von Verkehrsmanagementmassnahmen-Vorstudie	2012
1400	VSS 2009/601	Begrünte Stützgitterböschungssysteme	2012
1399	VSS 2011/901	Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Incentivierung	2012
1398	ASTRA 2010/019	Environmental Footprint of Heavy Vehicles Phase III: Comparison of Footprint and Heavy Vehicle Fee (LSVA) Criteria	2012
1397	FGU 2008/003_OBF	Brandschutz im Tunnel: Schutzziele und Brandbemessung Phase 1: Stand der Technik	2012
1396	VSS 1999/128	Einfluss des Umhüllungsgrades der Mineralstoffe auf die mechanischen Eigenschaften von Mischgut	2012
1395	FGU 2009/003	KarstALEA: Wegleitung zur Prognose von karstspezifischen Gefahren im Untertagbau	2012
1394	VSS 2010/102	Grundlagen Betriebskonzepte	2012
1393	VSS 2010/702	Aktualisierung SN 640 907, Kostengrundlage im Erhaltungsmanagement	2012
1392	ASTRA 2008/008_009	FEHRL Institutes WIM Initiative (Fiwi)	2012
1391	ASTRA 2011/003	Leitbild ITS-CH Landverkehr 2025/30	2012
1390	FGU 2008/004_OBF	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Belchentunnel	2012
1389	FGU 2003/002	Long Term Behaviour of the Swiss National Road Tunnels	2012
1388	SVI 2007/022	Möglichkeiten und Grenzen von elektronischen Busspuren	2012
1387	VSS 2010/205_OBF	Ablage der Prozessdaten bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1386	VSS 2006/204	Schallreflexionen an Kunstbauten im Strassenbereich	2012
1385	VSS 2004/703	Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1384	VSS 1999/249	Konzeptuelle Schnittstellen zwischen der Basisdatenbank und EMF-, EMK- und EMT-DB	2012
1383	FGU 2008/005	Einfluss der Grundwasserströmung auf das Quellverhalten des Gipskeupers im Chienbergtunnel	2012
1382	VSS 2001/504	Optimierung der statischen Eindringtiefe zur Beurteilung von harten Gussasphaltsorten	2012
1381	SVI 2004/055	Nutzen von Reisezeiteinsparungen im Personenverkehr	2012
1380	ASTRA 2007/009	Wirkungsweise und Potential von kombinierter Mobilität	2012
1379	VSS 2010/206_OBF	Harmonisierung der Abläufe und Benutzeroberflächen bei Tunnel-Prozessleitsystemen	2012
1378	SVI 2004/053	Mehr Sicherheit dank Kernfahrbahnen?	2012
1377	VSS 2009/302	Verkehrssicherheitsbeurteilung bestehender Verkehrsanlagen (Road Safety Inspection)	2012
1376	ASTRA 2011/008_004	Erfahrungen im Schweizer Betonbrückenbau	2012
1375	VSS 2008/304	Dynamische Signalisierungen auf Hauptverkehrsstrassen	2012
1374	FGU 2004/003	Entwicklung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens für Schweissnähte von KDB	2012
1373	VSS 2008/204	Vereinheitlichung der Tunnelbeleuchtung	2012
1372	SVI 2011/001	Verkehrssicherheitsgewinne aus Erkenntnissen aus Datapooling und strukturierten Datenanalysen	2012
1371	ASTRA 2008/017	Potenzial von Fahrgemeinschaften	2011
1370	VSS 2008/404	Dauerhaftigkeit von Betonfahrbahnen aus Betongranulat	2011
1369	VSS 2003/204	Rétention et traitement des eaux de chaussée	2012
1368	FGU 2008/002	Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen?	2011
1367	VSS 2005/801	Grundlagen betreffend Projektierung, Bau und Nachhaltigkeit von Anschlussgleisen	2011
1366	VSS 2005/702	Überprüfung des Bewertungshintergrundes zur Beurteilung der Strassengriffigkeit	2010
1365	SVI 2004/014	Neue Erkenntnisse zum Mobilitätsverhalten dank Data Mining?	2011
1364	SVI 2009/004	Regulierung des Güterverkehrs Auswirkungen auf die Transportwirtschaft Forschungspaket UVEK/ASTRA Strategien zum wesensgerechten Einsatz der Verkehrsmittel im Güterverkehr der Schweiz TP D	2012
1363	VSS 2007/905	Verkehrsprognosen mit Online -Daten	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung	2012
1360	VSS 2010/203	Akustische Führung im Strassentunnel	2012
1359	SVI 2004/003	Wissens- und Technologientransfer im Verkehrsbereich	2012
1358	SVI 2004/079	Verkehrsanbindung von Freizeitanlagen	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer?	2012
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhang D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis	2011
1354	VSS 2003/203	Anordnung, Gestaltung und Ausführung von Treppen, Rampen und Treppenwegen	2011
1353	VSS 2000/368	Grundlagen für den Fussverkehr	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen)	2011
1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene	2011
1347	VSS 2000/455	Leistungsfähigkeit von Parkieranlagen	2010
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung	2010
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS"	2011
1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr	2011

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren	2010
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr	2011
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts-Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten	2010
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit	2009
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors	2010
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labor-massstab	2011
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen	2011
1333	SVI 2007/001	Standards für die Mobilitätsversorgung im peripheren Raum	2011
1332	VSS 2006/905	Standardisierte Verkehrsdaten für das verkehrsträgerübergreifende Verkehrsmanagement	2011
1331	VSS 2005/501	Rückrechnung im Strassenbau	2011
1330	FGU 2008/006	Energiegewinnung aus städtischen Tunneln: Systemevaluation	2010
1329	SVI 2004/073	Alternativen zu Fussgängerstreifen in Tempo-30-Zonen	2010
1328	VSS 2005/302	Grundlagen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Sicherheitsdefiziten	2011
1327	VSS 2006/601	Vorhersage von Frost und Nebel für Strassen	2010
1326	VSS 2006/207	Erfolgskontrolle Fahrzeugrückhaltesysteme	2011
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes.	2010
1324	VSS 2004/702	Eigenheiten und Konsequenzen für die Erhaltung der Strassenverkehrsanlagen im überbauten Gebiet	2009
1323	VSS 2008/205	Ereignisdetektion im Strassentunnel	2011
1322	SVI 2005/007	Zeitwerte im Personenverkehr: Wahrnehmungs- und Distanzabhängigkeit	2008
1321	VSS 2008/501	Validation de l'oedomètre CRS sur des échantillons intacts	2010
1320	VSS 2007/303	Funktionale Anforderungen an Verkehrserfassungssysteme im Zusammenhang mit Lichtsignalanlagen	2010
1319	VSS 2000/467	Auswirkungen von Verkehrsberuhigungsmassnahmen auf die Lärmimmissionen	2010
1318	FGU 2006/001	Langzeitquellversuche an anhydritführenden Gesteinen	2010
1317	VSS 2000/469	Geometrisches Normalprofil für alle Fahrzeugtypen	2010
1316	VSS 2001/701	Objektorientierte Modellierung von Strasseninformationen	2010
1315	VSS 2006/904	Abstimmung zwischen individueller Verkehrsinformation und Verkehrsmanagement	2010
1314	VSS 2005/203	Datenbank für Verkehrsaufkommensraten	2008
1313	VSS 2001/201	Kosten-/Nutzenbetrachtung von Strassenentwässerungssystemen, Ökobilanzierung	2010
1312	SVI 2004/006	Der Verkehr aus Sicht der Kinder: Schulwege von Primarschulkindern in der Schweiz	2010
1311	VSS 2000/543	VIABILITE DES PROJETS ET DES INSTALLATIONS ANNEXES	2010
1310	ASTRA 2007/002	Beeinflussung der Luftströmung in Strassentunneln im Brandfall	2010
1309	VSS 2008/303	Verkehrsregelungssysteme - Modernisierung von Lichtsignalanlagen	2010
1308	VSS 2008/201	Hindernisfreier Verkehrsraum - Anforderungen aus Sicht von Menschen mit Behinderung	2010
1307	ASTRA 2006/002	Entwicklung optimaler Mischgüter und Auswahl geeigneter Bindemittel; D-A-CH - Initialprojekt	2008
1306	ASTRA 2008/002	Strassenglätte-Prognosesystem (SGPS)	2010
1305	VSS 2000/457	Verkehrserzeugung durch Parkieranlagen	2009
1304	VSS 2004/716	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen	2008
1303	ASTRA 2009/010	Geschwindigkeiten in Steigungen und Gefällen; Überprüfung	2010

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1302	VSS 1999/131	Zusammenhang zwischen Bindemittleigenschaften und Schadensbildern des Belages?	2010
1301	SVI 2007/006	Optimierung der Strassenverkehrsunfallstatistik durch Berücksichtigung von Daten aus dem Gesundheitswesen	2009
1300	VSS 2003/903	SATELROU Perspectives et applications des méthodes de navigation pour la télématique des transports routiers et pour le système d'information de la route	2010
1299	VSS 2008/502	Projet initial - Enrobés bitumineux à faibles impacts énergétiques et écologiques	2009
1298	ASTRA 2007/012	Griffigkeit auf winterlichen Fahrbahnen	2010
1297	VSS 2007/702	Einsatz von Asphaltbewehrungen (Asphalteinlagen) im Erhaltungsmanagement	2009
1296	ASTRA 2007/008	Swiss contribution to the Heavy-Duty Particle Measurement Programme (HD-PMP)	2010
1295	VSS 2005/305	Entwurfsgrundlagen für Lichtsignalanlagen und Leitfaden	2010
1294	VSS 2007/405	Wiederhol- und Vergleichspräzision der Druckfestigkeit von Gesteinskörnungen am Haufwerk	2010
1293	VSS 2005/402	Détermination de la présence et de l'efficacité de dope dans les bétons bitumineux	2010
1292	ASTRA 2006/004	Entwicklung eines Pflanzenöl-Blockheizkraftwerkes mit eigener Ölmühle	2010
1291	ASTRA 2009/005	Fahrmuster auf überlasteten Autobahnen Simultanes Berechnungsmodell für das Fahrverhalten auf Autobahnen als Grundlage für die Berechnung von Schadstoffemissionen und Fahrzeitgewinnen	2010
1290	VSS 1999/209	Conception et aménagement de passages inférieurs et supérieurs pour piétons et deux-roues légers	2008
1289	VSS 2005/505	Affinität von Gesteinskörnungen und Bitumen, nationale Umsetzung der EN	2010
1288	ASTRA 2006/020	Footprint II - Long Term Pavement Performance and Environmental Monitoring on A1	2010
1287	VSS 2008/301	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit von komplexen ungesteuerten Knoten: Analytisches Schätzverfahren	2009
1286	VSS 2000/338	Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Strassen ohne Richtungstrennung	2010
1285	VSS 2002/202	In-situ Messung der akustischen Leistungsfähigkeit von Schallschirmen	2009
1284	VSS 2004/203	Evacuation des eaux de chaussée par les bas-cotés	2010
1283	VSS 2000/339	Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen	2008
1282	VSS 2004/715	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmaßnahmen	2010
1281	SVI 2004/002	Systematische Wirkungsanalysen von kleinen und mittleren Verkehrsvorhaben	2009
1280	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit Verkehrspsychologischer Teilbericht	2010
1279	VSS 2005/301	Leistungsfähigkeit zweistreifiger Kreisel	2009
1278	ASTRA 2004/016	Auswirkungen von fahrzeuginternen Informationssystemen auf das Fahrverhalten und die Verkehrssicherheit - Verkehrstechnischer Teilbericht	2009
1277	SVI 2007/005	Multimodale Verkehrsqualitätsstufen für den Strassenverkehr - Vorstudie	2010
1276	VSS 2006/201	Überprüfung der schweizerischen Ganglinien	2008
1275	ASTRA 2006/016	Dynamic Urban Origin - Destination Matrix - Estimation Methodology	2009
1274	SVI 2004/088	Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Güterverkehrs- und Transportplanung	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1273	ASTRA 2008/006	UNTERHALT 2000 - Massnahme M17, FORSCHUNG: Dauerhafte Materialien und Verfahren SYNTHESE - BERICHT zum Gesamtprojekt "Dauerhafte Beläge" mit den Einzelnen Forschungsprojekten: - ASTRA 200/419: Verhaltensbilanz der Beläge auf Nationalstrassen - ASTRA 2000/420: Dauerhafte Komponenten auf der Basis erfolgreicher Strecken - ASTRA 2000/421: Durabilité des enrobés - ASTRA 2000/422: Dauerhafte Beläge, Rundlaufversuch - ASTRA 2000/423: Griffigkeit der Beläge auf Autobahnen, Vergleich zwischen den Messergebnissen von SRM und SCRIM - ASTRA 2008/005: Vergleichsstrecken mit unterschiedlichen oberen Tragschichten auf einer Nationalstrasse	2008
1272	VSS 2007/304	Verkehrsregelungssysteme - behinderte und ältere Menschen an Lichtsignalanlagen	2010
1271	VSS 2004/201	Unterhalt von Lärmschirmen	2009
1270	VSS 2005/502	Interaktion Strasse Hangstabilität: Monitoring und Rückwärtsrechnung	2009
1269	VSS 2005/201	Evaluation von Fahrzeurückhaltesystemen im Mittelstreifen von Autobahnen	2009
1268	ASTRA 2005/007	PM10-Emissionsfaktoren von Abriebsparkeln des Strassenverkehrs (APART)	2009
1267	VSS 2007/902	MDAinSVT Einsatz modellbasierter Datentransfernormen (INTERLIS) in der Strassenverkehrstelematik	2009
1266	VSS 2000/343	Unfall- und Unfallkostenraten im Strassenverkehr	2009
1265	VSS 2005/701	Zusammenhang zwischen dielektrischen Eigenschaften und Zustandsmerkmalen von bitumenhaltigen Fahrbahnbelägen (Pilotuntersuchung)	2009
1264	SVI 2004/004	Verkehrspolitische Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung	2009
1263	VSS 2001/503	Phénomène du dégel des sols gélifs dans les infrastructures des voies de communication et les pergélisols alpins	2006
1262	VSS 2003/503	Lärmverhalten von Deckschichten im Vergleich zu Gussasphalt mit strukturierter Oberfläche	2009
1261	ASTRA 2004/018	Pilotstudie zur Evaluation einer mobilen Grossversuchsanlage für beschleunigte Verkehrslastsimulation auf Strassenbelägen	2009
1260	FGU 2005/001	Testeinsatz der Methodik "Indirekte Vorauserkundung von wasserführenden Zonen mittels Temperaturdaten anhand der Messdaten des Lötschberg-Basistunnels	2009
1259	VSS 2004/710	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Synthesebericht	2008
1258	VSS 2005/802	Kaphaltestellen Anforderungen und Auswirkungen	2009
1257	SVI 2004/057	Wie Strassenraumbilder den Verkehr beeinflussen Der Durchfahrtswiderstand als Arbeitsinstrument bei der städtebaulichen Gestaltung von Strassenräumen	2009
1256	VSS 2006/903	Qualitätsanforderungen an die digitale Videobild-Bearbeitung zur Verkehrsüberwachung	2009
1255	VSS 2006/901	Neue Methoden zur Erkennung und Durchsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	2009
1254	VSS 2006/502	Drains verticaux préfabriqués thermiques pour la consolidation in-situ des sols	2009
1253	VSS 2001/203	Rétention des polluants des eaux de chaussées selon le système "infiltrations sur les talus". Vérification in situ et optimisation	2009
1252	SVI 2003/001	Nettoverkehr von verkehrintensiven Einrichtungen (VE)	2009
1251	ASTRA 2002/405	Incidence des granulats arrondis ou partiellement arrondis sur les propriétés d'adhérence des bétons bitumineux	2008
1250	VSS 2005/202	Strassenabwasser Filterschacht	2007
1249	FGU 2003/004	Einflussfaktoren auf den Brandwiderstand von Betonkonstruktionen	2009
1248	VSS 2000/433	Dynamische Eindringtiefe zur Beurteilung von Gussasphalt	2008
1247	VSS 2000/348	Anforderungen an die strassenseitige Ausrüstung bei der Umwidmung von Standstreifen	2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
1246	VSS 2004/713	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen: Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert	2009
1245	VSS 2004/701	Verfahren zur Bestimmung des Erhaltungsbedarfs in kommunalen Strassennetzen	2009
1244	VSS 2004/714	Massnahmenplanung im Erhaltungsmanagement von Fahrbahnen - Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen	2008
1243	VSS 2000/463	Kosten des betrieblichen Unterhalts von Strassenanlagen	2008
1242	VSS 2005/451	Recycling von Ausbauasphalt in Heissmischgut	2007
1241	ASTRA 2001/052	Erhöhung der Aussagekraft des LCPC Spurbildungstests	2009
1240	ASTRA 2002/010	L'acceptabilité du péage de congestion : Résultats et analyse de l'enquête en Suisse	2009
1239	VSS 2000/450	Bemessungsgrundlagen für das Bewehren mit Geokunststoffen	2009
1238	VSS 2005/303	Verkehrssicherheit an Tagesbaustellen und bei Anschlüssen im Baustellenbereich von Hochleistungsstrassen	2008
1237	VSS 2007/903	Grundlagen für eCall in der Schweiz	2009
1236	ASTRA 2008/008_07	Analytische Gegenüberstellung der Strategie- und Tätigkeitsschwerpunkte ASTRA-AIPCR	2008
1235	VSS 2004/711	Forschungspaket Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen - Standardisierte Erhaltungsmassnahmen	2008
1234	VSS 2006/504	Expérimentation in situ du nouveau drainomètre européen	2008
1233	ASTRA 2000/420	Unterhalt 2000 Forschungsprojekt FP2 Dauerhafte Komponenten bitumenhaltiger Belagsschichten	2009
676	AGB 2011/002	Modelling the corrosion initiation of reinforced concrete exposed to deicing salts	2016
674	AGB 2010/006	Einfluss des Asphaltbelages auf die Dynamik von Fussgängerbrücken aus Beton und Stahl	2015
673	AGB 2006/017	Dynamic structural capacity of reinforced concrete slabs due to rockfall	2015
671	AGB 2009/008	Résistance à l'effort tranchant de dalles de roulement sous actions statiques et de fatigue	2015
670	AGB 2012/013	Optimierung und Validierung von Verfahren zur Bestimmung der Korrosionsgeschwindigkeit in Stahlbeton	2015
669	AGB 2008/007	Zentrale Dokumentation der mechanischen Eigenschaften alter Bewehrungen	2015
668	AGB 2009/004_OBF	Multifunktionaler Hochleistungsoberflächenschutz für Kunstbauten	2015
667	AGB 2008/004	Résistance au déversement des poutres métalliques de pont	2015
666	AGB 2012/015	Structural Identification for Condition Assessment of Swiss Bridges	2015
665	AGB 2011/001	Wirksamkeit und Prüfung der Nachbehandlungsmethoden von Beton	2014
664	AGB 2009/005	Charges de trafic actualisées pour les dalles de roulement en béton des ponts existants	2014
663	AGB 2003/014	Seismic Safety of Existing Bridges	2014
662	AGB 2008/001	Seismic Safety of Existing Bridges - Cyclic Inelastic Behaviour of Bridge Piers	2014
661	AGB 2010/002	Fatigue limit state of shear studs in steel-concrete composite road bridges	2014
660	AGB 2008/002	Indirekt gelagerte Betonbrücken - Sachstandsbericht	2014
659	AGB 2009/014	Suizidprävention bei Brücken: Follow-Up	2014
658	AGB 2006/015_OBF	Querkraftwiderstand vorgespannter Brücken mit ungenügender Querkraftbewehrung	2014
657	AGB 2003/012	Brücken in Holz: Möglichkeiten und Grenzen	2013
656	AGB 2009/015	Experimental verification of integral bridge abutments	2013
655	AGB 2007/004	Fatigue Life Assessment of Roadway Bridges Based on Actual Traffic Loads	2013
654	AGB 2005-008	Thermophysical and Thermomechanical Behavior of Cold-Curing Structural Adhesives in Bridge Construction	2013
653	AGB 2007/002	Poinçonnement des pontsdalles précontraints	2013
652	AGB 2009/006	Detektion von Betonstahlbrüchen mit der magnetischen Streufeldmethode	2013
651	AGB 2006/006_OBF	Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken	2013
650	AGB 2005/010	Korrosionsbeständigkeit von nichtrostenden Betonstählen	2012
649	AGB 2008/012	Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen	2012

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
648	AGB 2005/023 + AGB 2006/003	Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung	2011
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges	2011
646	AGB 2005/018	Interactin sol-structure : ponts à culées intégrales	2010
645	AGB 2005/021	Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat	2010
644	AGB 2005/004	Hochleistungsfähiger Faserfeinkornbeton zur Effizienzsteigerung bei der Erhaltung von Kunstbauten aus Stahlbeton	2010
643	AGB 2005/014	Akustische Überwachung einer stark geschädigten Spannbetonbrücke und Zustandserfassung beim Abbruch	2010
642	AGB 2002/006	Verbund von Spanngliedern	2009
641	AGB 2007/007	Empfehlungen zur Qualitätskontrolle von Beton mit Luftpermeabilitätsmessungen	2009
640	AGB 2003/011	Nouvelle méthode de vérification des ponts mixtes à âme pleine	2010
639	AGB 2008/003	RiskNow-Falling Rocks Excel-basiertes Werkzeug zur Risikoermittlung bei Steinschlag-schutzgalerien	2010
638	AGB2003/003	Ursachen der Rissbildung in Stahlbetonbauwerken aus Hochleistungsbeton und neue Wege zu deren Vermeidung	2008
637	AGB 2005/009	Détermination de la présence de chlorures à l'aide du Géoradar	2009
636	AGB 2002/028	Dimensionnement et vérification des dalles de roulement de ponts routiers	2009
635	AGB 2004/002	Applicabilité de l'enrobé drainant sur les ouvrages d'art du réseau des routes nationales	2008
634	AGB 2002/007	Untersuchungen zur Potenzialfeldmessung an Stahlbetonbauten	2008
633	AGB 2002/014	Oberflächenschutzsysteme für Betontragwerke	2008
632	AGB 2008/201	Sicherheit des Verkehrssystem Strasse und dessen Kunstbauten Testregion - Methoden zur Risikobeurteilung Schlussbericht	2010
631	AGB 2000/555	Applications structurales du Béton Fibré à Ultra-hautes Performances aux ponts	2008
630	AGB 2002/016	Korrosionsinhibitoren für die Instandsetzung chloridverseuchter Stahlbetonbauten	2010
629	AGB 2003/001 + AGB 2005/019	Integrale Brücken - Sachstandsbericht	2008
628	AGB 2005/026	Massnahmen gegen chlorid-induzierte Korrosion und zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit	2008
627	AGB 2002/002	Eigenschaften von normalbreiten und überbreiten Fahrbahnübergängen aus Polymerbitumen nach starker Verkehrsbelastung	2008
626	AGB 2005/110	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Baustellensicherheit bei Kunstbauten	2009
625	AGB 2005/109	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen bei Kunstbauten	2009
624	AGB 2005/108	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Risikobeurteilung für Kunstbauten	2010
623	AGB 2005/107	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten	2009
622	AGB 2005/106	Rechtliche Aspekte eines risiko- und effizienzbasierten Sicherheitskonzepts	2009
621	AGB 2005/105	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Szenarien der Gefahrenentwicklung	2009
620	AGB 2005/104	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Effektivität und Effizienz von Massnahmen	2009
619	AGB 2005/103	Sicherheit des Verkehrssystems / Strasse und dessen Kunstbauten / Ermittlung des Netzrisikos	2010
618	AGB 2005/102	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten: Methodik zur vergleichenden Risikobeurteilung	2009

1564 | Forschungspaket: Lärmarme Beläge innerorts / EP 4:
Labormethoden für die Bestimmung akustischer Eigenschaften lärmarmen Beläge

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Jahr
617	AGB 2005/100	Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten Synthesebericht	2010
616	AGB 2002/020	Beurteilung von Risiken und Kriterien zur Festlegung akzeptierter Risiken in Folge aussergewöhnlicher Einwirkungen bei Kunstbauten	2009