



# **Forschungspaket: Lärmarme Be- läge innerorts EP 5: Verbesse- rung der Genauigkeit akusti- scher Messmethoden**

**Paquet de recherche: Revêtements de routes peu-bruyants  
à l'intérieur des localités EP5: Amélioration de la précision  
des méthodes de mesure acoustique**

**Research package: Low noise road surfaces in urban  
situations EP5: Optimisation of the accuracy of acoustic  
measurements**

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

**Forschungsprojekt ASTRA 2010/014 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 Be- läge innerorts EP 5: Verbesse- rung der Genauigkeit akusti- scher Messmethoden**

**Paquet de recherche: Revêtements de routes peu-bruyants  
à l'intérieur des localités EP5: Amélioration de la précision  
des méthodes de mesure acoustique**

**Research package: Low noise road surfaces in urban  
situations EP5: Optimisation of the accuracy of acoustic  
measurements**

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

**Forschungsprojekt ASTRA 2010/014 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)

## **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

<b>Impressum</b> .....	<b>4</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>11</b>
<b>Summary</b> .....	<b>15</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>19</b>
1.1 Anlass .....	19
1.2 Situation und Aufgabenstellung .....	19
1.3 Ziel und Ergebnis des Forschungsprojekts .....	20
1.4 Organisation, Beteiligte .....	21
<b>2 Verbesserung der CPX-Methode</b> .....	<b>23</b>
2.1 CPX-Schalldruckpegel als Funktion der Temperatur .....	23
2.1.1 Ausgangslage .....	23
2.1.2 Arbeitsprogramm, Messort .....	24
2.1.3 Durchführung der Messungen .....	24
2.1.4 Ergebnisse .....	25
2.1.5 Diskussion der Ergebnisse .....	31
2.1.6 Schlussfolgerungen .....	34
2.2 CPX-Schalldruckpegel als Funktion der Fahrgeschwindigkeit .....	36
2.2.1 Ausgangslage .....	36
2.2.2 Durchführung der Messungen .....	37
2.2.3 Ergebnisse .....	40
2.2.4 Schlussfolgerungen .....	50
2.3 Einfluss von Strömungsgeräuschen auf die CPX-Messung .....	51
2.3.1 Ausgangslage .....	51
2.3.2 Randbedingungen und Messdurchführung .....	51
2.3.3 Ergebnisse .....	56
2.3.4 Schlussfolgerungen .....	62
2.4 Qualitätssicherung der CPX-Reifen .....	62
2.4.1 Ausgangslage .....	62
2.4.2 Literaturobwertung .....	63
2.4.3 Vorbereitung der Messungen .....	64
2.4.4 Bestimmung von Shore A Härte und Profiltiefe .....	65
2.4.5 Präparation der Reifen .....	69
2.4.6 Durchführung der CPX-Messungen .....	71
2.4.7 Ergebnisse .....	71
2.4.8 Schlussfolgerungen .....	85
2.5 Genauigkeit der Positionsbestimmung bei CPX-Messungen .....	86
2.5.1 Ausgangslage .....	86
2.5.2 Vorgehen und Ergebnisse .....	86
2.5.3 Schlussfolgerungen .....	88
<b>3 Verbesserung der SPB-Methode</b> .....	<b>89</b>
3.1 Sichtbarkeit des SPB Messaufbaus .....	89
3.1.1 Ausgangslage .....	89
3.1.2 Versuchsdurchführung .....	89
3.1.3 Ergebnisse .....	93
3.1.4 Schlussfolgerungen .....	95
3.2 SPB Messdurchführung und Fahrzeugauswahl .....	96
3.2.1 Ausgangslage .....	96
3.2.2 Arbeitsprogramm und Anonymisierung .....	96
3.2.3 Teilnehmer, Durchführung der Messungen, Messausrüstung .....	98
3.2.4 Ergebnisse .....	100
3.2.5 Schlussfolgerungen .....	112
3.3 Temperaturkorrektur bei SPB-Messungen .....	113

3.3.1	Ausgangslage .....	113
3.3.2	Durchführung der Messungen .....	113
3.3.3	Ergebnisse .....	116
3.3.4	Schlussfolgerungen .....	122
3.4	SPB Geschwindigkeitsmessung .....	124
3.4.1	Ausgangslage .....	124
3.4.2	Durchführung der Messungen .....	124
3.4.3	Auswertung .....	127
3.4.4	Schlussfolgerungen .....	132
<b>4</b>	<b>Verbesserung der Absorptionsgradmessung .....</b>	<b>135</b>
4.1	Ausgangslage .....	135
4.2	Messsystemvarianten .....	135
4.2.1	Hallraummethode.....	135
4.2.2	Impedanzrohrmethode.....	136
4.2.3	Messung des Schallabsorptionsgrads in situ.....	136
4.2.4	Schlussfolgerungen .....	137
4.3	Einzugsbereich von in situ Messungen .....	137
4.3.1	Ausgangslage .....	137
4.3.2	Durchführung der Messungen .....	137
4.3.3	Ergebnisse .....	141
4.3.4	Vergleich mit der Fresnel-Theorie .....	146
4.3.5	Schlussfolgerungen .....	150
4.4	Qualitätssicherung von in situ Absorptionsgradmessungen.....	150
4.4.1	Kalibrierung der Messsonden .....	151
4.4.2	Ergebnisse der Absorptionsmessungen .....	151
4.4.3	Kalibrierungsprozedur.....	152
4.4.4	Schlussfolgerungen .....	157
<b>5</b>	<b>Randbedingungen für akustische Messungen, Trocknungszeiten und Absorptionsgrad .....</b>	<b>159</b>
5.1	Ausgangslage .....	159
5.2	Versuchsdurchführung.....	159
5.3	Ergebnisse des Trocknungsversuchs.....	163
5.4	Exkurs: Theoretische Anmerkungen zur Verdunstung .....	167
5.5	Ergebnisse der Absorptionsgradmessungen.....	171
5.6	Schlussfolgerungen .....	179
<b>6</b>	<b>Empfehlungen .....</b>	<b>181</b>
6.1	Empfehlungen für die Messpraxis .....	181
6.1.1	CPX.....	181
6.1.2	SPB.....	182
6.1.3	Absorptionsgradmessung .....	183
6.1.4	Trocknungszeiten.....	184
6.2	Allgemeine Empfehlungen .....	185
6.2.1	CPX.....	185
6.2.2	SPB.....	185
6.2.3	Absorptionsgradmessung .....	185
	<b>Anhang .....</b>	<b>187</b>
	<b>Glossar .....</b>	<b>189</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>191</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>193</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>203</b>
	<b>Projektabschluss .....</b>	<b>205</b>
	<b>Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen .....</b>	<b>209</b>

# Zusammenfassung

## Anlass und Ziel

Lärmarme Fahrbahnbeläge spielen bei der Sanierung und der Erreichung der Lärm-schutzziele im Strassennetz eine bedeutende Rolle. Damit kommt auch den Messmetho-den zur Bestimmung und Beurteilung der akustischen Belagsgüte eine grosse Bedeutung zu. Die Verfahren der „Statistischen Vorbeifahrtmessung“ (SPB, **S**tatistical **P**ass-**b**y Mes-sung), der „Nahfeldmessung“ des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs (CPX, **C**lose **P**roximity Messung) und die Schallabsorptionsgradmessung auf Fahrbahnbelägen zählen in die-sem Zusammenhang zu den wichtigsten Messmethoden. SPB- und CPX-Messung sind im „Technischen Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen“ [15] als Messmethoden für die Bestimmung der akustischen Belagsgüte festgelegt und in den ISO-Normen 11819-1 [2] und 11819-2 [3] standardisiert.

Unabhängig von der Normierung sind aus der Anwendung der Messverfahren eine Reihe von Fehlerquellen, Umwelteinflüsse und Messsystemeigenschaften bekannt, deren Aus-wirkungen auf die Messergebnisse im Rahmen des Forschungsprojekts EP5 geklärt wer-den sollten. Ziel war insbesondere, die Empfindlichkeit der Messverfahren diesen Ein-flüssen gegenüber zu quantifizieren und Empfehlungen zu geben, mit welchen prakti-schen Massnahmen diese Einflüsse minimiert werden können.

## Untersuchungsumfang

Folgende Einflüsse, die bei CPX-, SPB- und Schallabsorptionsgrad-Messungen auftre-ten können, wurden in umfangreichen systematischen Messkampagnen untersucht:

- CPX-Messungen:
  - Luft- und Fahrbahntemperatur
  - Fahrgeschwindigkeit
  - Strömungsgeräusche zwischen Messanhänger und Fahrbahn
  - Qualität der Reifen
  - Georeferenzierung der Messdaten
- Messung des Schallabsorptionsgrads:
  - Messsystemvarianten
  - Qualitätssicherung (in-situ Messungen)
- SPB-Messungen:
  - Luft- und Fahrbahntemperatur
  - Sichtbarkeit des Messaufbaus
  - Messdurchführung und Fahrzeugauswahl
  - Geschwindigkeitsmessung
- Messumgebung (in-situ Messungen)
- Randbedingungen, Trocknungszeiten

## Ergebnisse – CPX-Messungen

### Temperatureinfluss

Der Schalldruckpegel des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs hängt ab von der Lufttemperatur. Aus den Ergebnissen in EP5 ist abzuleiten, dass der in bisherigen Entwürfen zur ISO 11819-2 [3] [4] [5] diskutierte Koeffizient von 0.03 dB/°C auf dichten und semidichten Be-lägen eine praktikable Wahl darstellt, während auf offenporigen Belägen der Wert aus dem Technischen Merkblatt [15] von 0.05 dB/°C besser geeignet ist.

Für den Vergleich akustischer Spektren gleicht eine frequenzabhängige Korrektur den Temperatureffekt deutlich besser aus als eine nicht frequenzabhängige. Bei Betrachtung A-bewerteter Gesamtschalldruckpegel ist die frequenzabhängige Korrektur vor der Sum-menpegelbildung dagegen nicht notwendig. Eine für alle Fahrbahnbeläge, oder wenig-stens alle Fahrbahnbeläge eines Typs allgemeingültige Temperaturkorrektur ergibt sich nicht. Die Festlegung von Temperaturkorrekturen im Regelwerk bleibt damit immer ein Kompromiss. Temperaturkorrekturen sollten regelmässig, besonders bei Einführung neu-er Bauweisen, messtechnisch überprüft werden.

## Einfluss der Fahrgeschwindigkeit

Die Umrechnung von CPX-Pegeln, die von sehr unterschiedlichen Geschwindigkeitsregimen stammen (z.B. von 50 km/h auf 80 km/h), kann nicht empfohlen werden. Zur Umrechnung moderater Abweichungen der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit  $v$  von der Referenzgeschwindigkeit  $v_{ref}$  bis zu etwa  $\pm 10\%$  kann eine einfache Korrekturformel angegeben werden. Aus dem Projekt EP5 ergibt sich die Korrektur  $c_v$  mit den belags- und reifentypabhängigen Geschwindigkeitskoeffizienten  $B$  aus *Tabelle Z 1* zu:

$$c_v = B \cdot \lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad [dB]$$

**Tab. Z 1** Geschwindigkeitskoeffizienten  $B$  in Abhängigkeit von Belags- und Reifentyp.

Geschwindigkeitsdomäne		30 km/h		50 km/h		80 km/h	
Belagstyp	Reifentyp	P	H	P	H	P	H
SMA11		40	43	33	33	30	24
MR8, MR8+, PA8, PA11		32	36	30	34	22	29
Vorschlag für vereinheitlichte Werte		35		32		26	

## Strömungsgeräusche zwischen Messanhänger und Fahrbahnoberfläche

In einem akustischen Windkanal wurden die in einem geschlossenen CPX-Anhänger entstehenden Strömungsgeräusche mit und ohne Zugfahrzeug untersucht. Mit Zugfahrzeug liegen die Schalldruckpegel der Geräusche bei Strömungsgeschwindigkeiten von 30 km/h, 50 km/h und 80 km/h im Frequenzbereich zwischen 315 Hz und 4 kHz um 15 dB bis 30 dB unter den Schalldruckpegeln der Rollgeräusche für einen lärmarmen Fahrbahnbelag des Typs SDA 8B oder SDA 8C. Ein breites Zugfahrzeug ist allerdings Voraussetzung hierfür. Aufgrund des entstehenden Windschattens reduziert es die Strömungsgeräusche im Anhänger um gut 10 dB bei Fahrgeschwindigkeiten über 50 km/h.

## Qualität der Messreifen

Beim CPX-Messverfahren ist besonders auf die Qualität der Reifen zu achten, weil sie einen unabdingbaren Teil des Messsystems darstellen. In EP5 wurde der Einfluss der Veränderung des Reifenprofils durch Abnutzung und der Nachgiebigkeit der Lauffläche durch Alterung des Reifenmaterials untersucht. EP5 liefert folgende Resultate:

P-Reifen sollten spätestens drei Jahre nach Herstellung ausgemustert werden. Nach Ablauf dieser Zeit kann die Härte bereits um 4 Shore A und der CPX-Pegel um 0.4 dB(A) zugenommen haben. Bei den H-Reifen sind die produktionsbedingten Schwankungen so gross, dass bereits beim Neukauf die Shore A Härte der Reifen geprüft und ihr Einsatz bei Werten über 65 Shore A vermieden werden sollte. In jedem Fall sollte die Shore A-Härte aller Reifen regelmässig überprüft werden. Die Abnutzung des Reifenprofils fällt mit einer Pegelzunahme von rund 0.1 dB pro abgetragenem Profilmillimeter sowohl auf Asphalt- als auch auf Betondeckschichten für P- und H-Reifen vernachlässigbar gering aus. Bevor der Profileinfluss zum Tragen kommt, sollten die Messreifen ohnehin aufgrund der Alterung und der damit einhergehenden Verhärtung ausgemustert worden sein.

## Georeferenzierung der Messdatenerfassung

Die Verortung von CPX-Messungen allein aufgrund von GPS-Positionssignalen ist aufgrund deren eingeschränkter Genauigkeit nicht ratsam. Die Aufzeichnung von an deutlich erkennbaren Wegmarken wie Kilometerschildern, Fahrbahnübergangskonstruktionen an Brücken, Tunnellein- und ausfahrten, usw. manuell ausgelösten Triggersignalen und die Auswertung von plötzlichen Änderungen der Fahrbahneigenschaften, die sich akustisch im Schalldruckpegelverlauf oder in der gemessenen Fahrbahntemperatur als Sprungstellen bemerkbar machen, helfen nachträglich, die Georeferenzierung zu präzisieren.

## Ergebnisse – SPB-Messungen

### Temperatureinfluss

Anhand der im EP5-Projekt erhobenen Daten und unter Berücksichtigung internationaler Untersuchungen sind für eine Überarbeitung des Technischen Merkblatts [15] die in *Tabelle Z 2* angegebenen Faktoren für die Korrektur der Vorbeifahrtpegel bezogen auf eine Lufttemperatur von 20 °C zu empfehlen.

**Tab. Z 2** SPB-Temperaturkorrekturkoeffizienten.

Fahrzeugkategorie	N1 dB/°C	N2 dB/°C
offenporige Beläge	0.05	0.04
dichte Asphaltbeläge	0.11	0.08
Betonbeläge	0.07	0.04

### Sichtbarkeit des Messaufbaus

Durch sichtbare Absicherungen von SPB-Messstellen verändern Verkehrsteilnehmer oft ihr Fahrverhalten, was die Vorbeifahrtmessungen beeinträchtigen kann. Insbesondere durch aussermittiges Fahren liess sich im EP5-Projekt eine Abweichung des Kb-Werts von bis zu 0.4 dB(A) gegenüber dem nicht abgesicherten Zustand nachweisen. Die um 0.4 dB(A) tieferen Werte der Vorbeifahrtpegel hängen mit dem gegenüber der unbeeinflussten Fahrweise grösseren Abstand zwischen Fahrzeug und Mikrofon zusammen, was sich rechnerisch leicht korrigieren lässt. Nicht ohne Weiteres korrigieren lassen sich jedoch Einflüsse durch Unterschiede der akustischen Güte des Fahrbahnbelags in den normalen Radrollspuren und des Belags zwischen den Radrollspuren, der bei Ausweichmanövern befahren wird. Eine Vorwarnung wirkt sich hier also nachteilig aus.

Eine deutlich sichtbare Vorwarnung kann ausserdem eine erhebliche Zunahme nicht verwertbarer Vorbeifahrten bewirken. Wie in EP5 nachgewiesen, kann sich die Messdauer dadurch leicht um ein Vielfaches erhöhen. Zu Gunsten der Qualität der Messergebnisse sowie einer überschaubaren Messdauer sollte nach Möglichkeit auf eine zu deutliche Vorwarnung einer SPB-Messstelle verzichtet werden. Die je nach Sichtbarkeit der Vorwarnung um bis zu 5 % langsamere Vorbeifahrtgeschwindigkeit wird durch das Referenzmodell StL-86+ ausgeglichen, weshalb der Belagsgütwerte Kb nicht beeinflusst ist.

### Messdurchführung und Fahrzeugauswahl

Im Rahmen eines Ringversuchs wurde die Messdurchführung und die Auswahl der Fahrzeuge per Videoaufzeichnung beobachtet. Die von den fünf Teilnehmern ermittelten Kb-Werte wichen für die Personenwagen um bis zu 1.6 dB(A), für die Lastwagen um bis zu 0.8 dB(A) voneinander ab. Gründe hierfür sind in den Unsicherheiten bei der Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Unterschiedlichkeit der Fahrzeugauswahl zu suchen. Insgesamt ergeben sich folgende Empfehlungen für SPB-Messungen:

1. Ausgeprägte personelle und technische Sorgfalt beim Ausmessen der Messpunkte und bei der Geschwindigkeitsmessung der vorbeifahrenden Fahrzeuge.
2. Schulung des Messpersonals und Qualitätssicherung im Hinblick auf die Kategorisierung der Fahrzeuge, Beobachtung des Einhaltens der Rollspur und Ausschluss von Störgeräuschen. Das Technische Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen [15] und das Fachhandbuch zur Projektierung [27] sollten hinsichtlich der Zuordnung der Fahrzeuge zu Fahrzeugkategorien besser aufeinander abgestimmt werden.
3. Ausschluss extrem schneller, langsamer, leiser und lauter Fahrzeuge von der Auswertung. Eine symmetrische Aussortierung von jeweils 5 % der Einzelregistrierungen verbessert die statistische Aussagekraft einer SPB-Messserie deutlich.

### Geschwindigkeitsmessung

Folgende Schlussfolgerungen ergeben sich aus den im EP5-Projekt durchgeführten messtechnischen Untersuchungen:

1. Fehler oder bewusste Abweichungen bei der fahrtrichtungsparallelen Ausrichtung der Geräte zur Geschwindigkeitsmessung führen zu einer Unterschätzung der wahren Fahrgeschwindigkeit und zu einer Überschätzung der Kb-Werte. So können sich nicht rückführbare Fehler ergeben, die die Wiederholgenauigkeit der SPB-Messung einschränken. Ist der Ausrichtungsfehler bekannt, lässt er sich auch nach Abschluss der Messung rechnerisch noch korrigieren.
2. Bei Lastwagen ist der geschwindigkeitsfehlerbedingte Anstieg der Kb-Werte nur etwa halb so gross wie bei Personenwagen, weil die theoretische StL-86+ Modellkurve für Lastwagen als Funktion der Fahrgeschwindigkeit flacher verläuft.
3. Bereits bei Winkelfehlern von nur 5° beeinflusst eine ungenaue Ausrichtung die aus SPB-Messungen abgeleiteten Kb-Werte spürbar; spätestens jenseits von 10° bis 15° wird die resultierende Abweichung inakzeptabel. Freihändige Anwendung von Radarpistolen dürfte in der Praxis zu Winkelfehlern durchaus in dieser Grössenordnung führen und sollte deshalb vermieden werden.

## Ergebnisse – Schallabsorptionsgrad-Messungen

### Messsystemvarianten

Unter den im EP5-Projekt diskutierten in-situ Verfahren (Subtraktionsverfahren mit einem, zwei, oder drei Druckmikrofonen und das p-u-Verfahren) erscheint die zerstörungsfreie Prüfung auf der Strasse mit einem p-u-Messsystem am geeignetsten. Messgeschwindigkeit, Messgenauigkeit und der auswertbare Absorptionsgrad- und Frequenzbereich sind bei diesem Verfahren praxistauglich vereint.

### Messumgebung von in-situ Messungen

Objekte in der Nähe der Messfläche führen zur konstruktiven oder destruktiven Überlagerung von direkt an der Messfläche reflektierten und an Objekten gestreuten Schallwellen und damit zu einer frequenzabhängigen Über- oder Unterschätzung des Absorptionsgrads. Wenn kleinere Hindernisse wie Leitkegel oder Bordsteinkanten gut einen Meter von der p-u-Sonde entfernt sind, werden in situ Absorptionsgradmessungen selbst bei hohen Frequenzen bis 4'000 Hz und gut reflektierender Messfläche nicht wesentlich beeinflusst. Auf einer stark absorbierenden Messfläche wie einem PA-Belag können die Hindernisse noch auf einen Abstand von etwa 0.5 m näher rücken, ohne zu stören. Eine vertikale Wand wirkt sich als Störkörper auf absorbierendem Untergrund stärker aus als kleine Hindernisse, die einzuhaltende Entfernung ist aber nur wenig grösser.

### Qualitätssicherung von in situ Messungen

Im Hauptteil des Berichts wird ein bislang fehlendes Verfahren zur Kalibrierung von p-u Messsonden beschrieben.

### Randbedingungen für akustische Messungen auf hohlraumreichen Strassendeckschichten, Trocknungszeiten

Die Deckschicht muss sich für Schallabsorptionsgradmessungen in einem adäquaten Zustand befinden. Dieser schliesst insbesondere Restfeuchte in den Hohlräumen aus. Im EP5-Projekt wurde anhand von Experimenten zur Zeitabhängigkeit des Schallabsorptionsgrads nach Regenereignissen eine Empfehlung für Trocknungszeiten erarbeitet. Die in *Tabelle Z 3* angegebenen konservativen Werte gelten für den frühestmöglichen Messzeitpunkt nach einem Regenereignis. Diese Zeiten können bei dichten Belägen, intensiver Sonneneinstrahlung und hoher Verkehrsdichte erheblich unterschritten werden.

**Tab. Z 3** *Empfohlene Trocknungszeiten in Stunden nach einem Regenereignis.*

Deckschichttyp	Offenporig			Semidicht		
Lufttemperatur, °C	5	20	32	5	20	32
Trocknungszeit, h	60	30	12	44	26	14

## Résumé

### Conjoncture et objectifs

Les revêtements routiers peu bruyants jouent un rôle important lors des rénovations et pour atteindre les objectifs de réduction du bruit sur les réseaux routiers, et les méthodes de mesures permettant de déterminer et d'évaluer la performance acoustique de la chaussée sont très importantes. Les principales méthodes sont la mesure statistique au passage (SPB, **S**tatistical **P**ass-**b**y Messung), la mesure du bruit de roulement en champ proche (CPX, **C**lose **P**roximity Messung) et la mesure du coefficient d'absorption acoustique de la surface de la route. Les mesures CPX et SPB sont considérées comme des méthodes de choix pour la détermination de la performance acoustique telle qu'établie dans la „Notice technique concernant le mesurage des qualités acoustiques des revêtements“ [15] et sont standardisées dans les normes ISO 11819-1 [2] et 11819-2 [3].

Indépendamment de la normalisation, certaines sources d'erreurs dans l'application des techniques de mesure sont connues, leur influence doit être clarifiée dans le cadre du projet de recherche EP5. L'objectif était de quantifier la sensibilité des méthodes de mesure par rapport aux diverses influences et de faire des recommandations quant aux mesures concrètes à entreprendre afin de minimiser ces effets.

### Champ des recherches

Les influences potentielles suivantes, qui peuvent survenir lors de mesures CPX, SPB ou de coefficient d'absorption acoustique, ont été examinées:

- Mesures CPX :
  - Température de l'air et de la chaussée
  - Vitesse de conduite
  - Bruit de l'écoulement de l'air entre la remorque et la route
  - Qualité des pneus
  - Géo-référencement des mesures
- Mesures SPB :
  - Température de l'air et de la chaussée
  - Visibilité de la station de mesure
  - Mise en oeuvre de la mesure et sélection du véhicule
  - Mesure de la vitesse
- Mesure du coefficient d'absorption acoustique :
  - Variantes du système de mesure
  - Qualité des mesures in situ
  - Environnement (mesures in-situ)
  - Conditions limites, temps de séchage

### Résultats– Mesures CPX

#### Influence de la température

Le niveau de pression acoustique du bruit de roulement dépend de la température de l'air. On peut déduire des résultats du projet que dans les versions précédentes de la norme ISO 11819-2 [3] [4] [5], la valeur discutée de 0.03 dB/°C sur les revêtements imperméables et semi-denses est un choix viable, et la valeur de 0.05 dB/°C sur les revêtements poreux, discutée pour la norme ISO11819-2 et la Notice Technique [15] est la mieux adaptée.

Une correction se basant sur la fréquence compense l'effet de la température sur le spectre acoustique bien mieux qu'une correction ne se basant pas sur la fréquence. En ce qui concerne le niveau de pression sonore total pondéré A, les différences selon l'application des corrections ne sont pas nécessaires. Il n'existe guère de correction de température valable définitivement et universellement pour toutes les surfaces de la route ou du moins pour toutes les surfaces de la route d'un même type. L'adoption de corrections de la température dans le cadre réglementaire reste donc un compromis. Les corrections de température devraient donc régulièrement être vérifiées, en particulier lors de nouvelles constructions ou de modifications de règle des techniques de construction.

## Influence de la vitesse de conduite

La conversion des niveaux CPX, qui proviennent de régimes de vitesse très différentes (par exemple de 50 km/h à 80 km/h) ne peut pas être conseillée ici. Pour la conversion d'écart modéré de la vitesse effective  $v$  par rapport à la vitesse de référence  $v_{ref}$  jusqu'à environ  $\pm 10\%$ , on peut utiliser une formule de correction simple. Dans EP5, on obtient la correction  $c_v$  avec des coefficients de vitesse  $B$  (Tableau Z 1) en fonction du type de revêtement et de pneu :

$$c_v = B \cdot \lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad [dB]$$

**Tab. Z 1** Coefficients de vitesse  $B$  en fonction du type de revêtement et de pneu.

Plage de vitesse		30 km/h		50 km/h		80 km/h	
Type de revêtement	Type de pneu	P	H	P	H	P	H
SMA11		40	43	33	33	30	24
MR8, MR8+, PA8, PA11		32	36	30	34	22	29
Propositions de valeurs unifiées		35		32		26	

## Bruit de l'écoulement de l'air entre la remorque de mesure et la surface de la route

Le bruit de l'écoulement de l'air dans le compartiment de mesure de la remorque CPX a été étudié dans une soufflerie acoustique avec et sans véhicule de remorquage. Avec véhicule de remorquage, le niveau de pression sonore du bruit de l'écoulement aux vitesses de 30 km/h, 50 km/h et 80 km/h se situe, dans la gamme de fréquences comprise entre 315 Hz et 4 kHz, à 15 dB jusqu'à 30 dB en-dessous du niveau de pression acoustique du bruit de roulement pour un revêtement peu bruyant comme le SDA 8B ou le SDA 8C. Un véhicule de remorquage large est une condition essentielle. Il réduit le bruit de par sa protection contre le vent d'au moins 10 dB à des vitesses de plus de 50 km/h.

## Qualité des pneus

Pour les méthodes de mesures CPX, une attention toute particulière doit être accordée à la qualité des pneus car ils représentent une part importante du système de mesure. Dans EP5, l'influence du changement du profil du pneu par une usure et le changement dans la flexibilité de la bande de roulement en raison du vieillissement du pneu a été examiné. Les résultats sont les suivants:

Les pneus de mesure P doivent être mis au rebut après 3 ans. Au-delà, la dureté peut avoir augmenté de 4 Shore A et le niveau CPX de 0.4 dB(A). En ce qui concerne les pneus H, les variations de production sont si grandes que même lors de l'achat de nouveaux pneus, la dureté Shore A doit être vérifiée et l'utilisation de pneus de plus de 65 Shore A doit être évitée. En tous cas, il convient de mesurer et d'enregistrer la dureté Shore A de chaque pneu régulièrement. L'usure de la bande de roulement du pneu, que ce soit sur l'asphalte ou sur le béton, pour les pneus P comme pour les pneus H, montre une augmentation négligeable du niveau de 0.1 dB par millimètre de profil usé. Avant que l'influence du profil ne rentre en ligne de compte, les pneus de mesure doivent de toute façon être abandonnés en raison de leur vieillissement et de leur durcissement.

## Géo-référencement des données de mesure

La localisation des mesures CPX, uniquement à l'aide des signaux GPS est déconseillée. Les signaux supplémentaires constatés manuellement en se basant sur des éléments identifiables comme les bornes kilométriques, les joints de dilatation sur les ponts, les entrées et sorties des tunnels, etc. ainsi que les changements dans les caractéristiques de la route, mesurés acoustiquement sur l'enregistrement du niveau sonore ou les discontinuités de la température de la route aident à améliorer la précision du géoréférencement.

## Résultats – Mesures SPB

### Influence de la température

En se basant sur l'évaluation des résultats des mesures dans le projet EP5 et en tenant compte des recherches internationales, les recommandations pour la révision de la Notice Technique [15] se trouvent dans le *Tableau Z 2* : les facteurs de correction des niveaux au passage sur la base d'une température de l'air de 20 °C.

**Tab. Z 2** Coefficients de correction de la température SPB.

Catégorie de véhicule	N1 dB/°C	N2 dB/°C
Revêtement poreux	0.05	0.04
Revêtement imperméable	0.11	0.08
Revêtement béton	0.07	0.04

### Visibilité de la construction de mesure

Comme les protections sont visibles, les usagers changent souvent leur manière de conduire, cela peut être un préjudice pour les mesures au passage. C'est particulièrement la conduite excentrée des usagers de la route qui montre dans EP5 l'impact du changement de comportement routier d'une valeur Kb allant jusqu'à 0.4 dB(A) de différence par rapport aux valeurs sur un état non sécurisé. Les valeurs plus faibles de 0.4 dB(A) du niveau sonore de mesure au passage sont liées, au-delà du comportement routier qui n'est pas influençable, à la plus grande distance entre le véhicule et le microphone, ce qui peut être corrigé par un calcul simple. Les influences, quand elles sont causées par les différences acoustiques de la surface de la route (conduite sur les traces de pneus ou conduite sur le revêtement entre les traces de pneus lors des manoeuvres d'évitement) ne peuvent pas être corrigées facilement. Un avertissement préalable nuit aux mesures.

Un avertissement visible peut entraîner une augmentation du nombre de mesures au passage non exploitables. Comme prouvé dans EP5, la durée de la mesure peut se rallonger énormément. Pour une qualité de la mesure acoustique et de ses résultats, ainsi qu'une durée de mesure gérable, il convient d'éviter un avertissement trop visible de l'équipement de mesure SPB. La vitesse de passage moyenne plus lente de jusqu'à 5% selon la visibilité de l'avertissement, est compensée par le modèle de référence StL-86+, pour qu'il n'y ait pas d'influence significative sur la valeur de la performance en Kb.

### Mise en oeuvre de la mesure et sélection du véhicule

Lors d'une étude collaborative, la mise en œuvre de la mesure et la sélection du véhicule ont été observés par vidéo. Les valeurs Kb déterminées par les 5 participants diffèrent de 1.6 dB(A) pour les voitures particulières et de 0.8 dB(A) pour les camions. Les raisons sont les incertitudes dans la détermination de la vitesse du véhicule et la diversité des véhicules sélectionnés. Les recommandations pour les mesures SPB sont les suivantes :

4. Plus de soin, humain et technique, apporté lors des mesures aux points de mesure et lors des mesures de la vitesse des véhicules.
5. Meilleure formation du personnel et amélioration de la qualité quant à la catégorisation des véhicules, l'observation du maintien sur la voie de roulement et l'élimination des bruits parasites. La Notice Technique pour les mesures des qualités acoustiques de la chaussée [15] et le Manuel pour la planification [27] devraient être harmonisés concernant la catégorisation des véhicules.
6. Élimination de l'analyse des véhicules excessivement rapides, lents, silencieux et bruyants. Un tri de manière symétrique de 5% des enregistrements individuels améliorerait considérablement la fiabilité statistique des séries de mesures SPB.

### Mesure de la vitesse

Les conclusions suivantes ressortent des recherches effectuées dans le cadre du projet EP5 :

1. Les erreurs ou les écarts délibérés dans le placement de l'appareil mesurant la vitesse du placement parallèle à la direction de la route conduisent dans la pratique à une sous-estimation de la vitesse réelle et à une surestimation des valeurs  $K_b$ . Il en résulte une impossibilité de retrouver ensuite d'où vient l'erreur, ce qui limite la reproductibilité de la mesure SPB. Si l'erreur de placement est reconnu, il peut, même après l'achèvement des mesures, être corrigé mathématiquement.
2. L'augmentation des valeurs  $K_b$  due à l'erreur de vitesse est, pour les camions, seulement de moitié aussi grande que pour les voitures particulières parce que les modèles de courbes théoriques STL-86+ sont plus plates pour les camions en fonction de leur vitesse.
3. Un alignement imprécis des appareils mesurant la vitesse influence sensiblement les valeurs  $K_b$  mesurées par SPB, déjà avec un angle de seulement  $5^\circ$ . Au-delà de  $10^\circ$  à  $15^\circ$ , la déviation est inacceptable. L'utilisation de radars portables peut mener à des angles de déviation de cet ordre et doit donc être évitée.

## Résultats – Mesures du coefficient d'absorption acoustique

### Variantes du système de mesure

Dans le cadre du projet EP5, sur les méthodes in-situ discutées (procédure de soustraction avec un, deux ou trois microphones et méthode p-u), c'est la méthode p-u qui est la plus approprié (analyse non destructive sur route). La vitesse, la précision ainsi que la gamme de degré d'absorption et de fréquence sont réunies et possibles en pratique.

### Environnement des mesures in-situ

Les objets à proximité de la surface de mesure conduisent à une superposition constructive ou destructive d'ondes sonores qui se réfléchissent sur la zone de mesure, ou se dispersent sur ces objets, ce qui donne une sur- ou sous-estimation du coefficient d'absorption acoustique. Si des petits obstacles comme des bordures de trottoir ou des cônes de signalisation sont présents à un bon mètre de la sonde p-u, la mesure du coefficient d'absorption acoustique in situ ne sera pas affectée de manière significative, même à hautes fréquences jusqu'à 4'000 Hz. Sur une surface de mesure hautement absorbante comme un enrobé drainant, les obstacles peuvent être encore plus proches, à distance d'environ 0.5 m, sans pour autant interférer. Une paroi verticale agit comme un corps perturbateur sur une base absorbante, de manière plus forte que ne le feraient de petits obstacles, la distance à respecter est cependant à peine plus grande.

### Qualité des mesures in situ

Une méthode pour le calibrage des sondes de mesure p-u est décrite dans le rapport.

### Conditions aux limites pour les mesures acoustiques sur des revêtements riches en vides, temps de séchage

Le revêtement doit se trouver dans un état adéquat pour les mesures du coefficient d'absorption acoustique. L'humidité résiduelle présente dans les vides est exclue. Dans le cadre du projet EP5, sur la base des expérimentations sur le coefficient d'absorption acoustique soumis au temps après des précipitations, des recommandations concernant le temps de séchage ont été élaborées. Les valeurs données dans le *Tableau Z 3* concernent le moment opportun (le plus tôt possible) pour les mesures après un évènement pluvieux. On peut déroger de ces délais en cas de revêtement imperméable, de rayonnement solaire intense et de forte densité du trafic.

**Tab. Z 3** Temps de séchage recommandé en heures après des précipitations.

Type d'enrobé	Poreux			Semi-dense		
Temperature de l'air, °C	5	20	32	5	20	32
Temps de séchage, h	60	30	12	44	26	14

## Summary

### Motive and objective

Noise reducing pavements play an important role within the framework of road construction and reconstruction and the compliance with legal noise protection regulations. For this reason, measuring methods used to evaluate and to assess the acoustic quality of road surfaces are of great importance. The most important measuring methods are the **Statistical Pass-by** measurement of vehicles (SPB), the **Close Proximity** measurement of tyre/road noise (CPX) and the measurement of the sound absorption coefficient of the road surface. SPB and CPX measurements are part of the Technical Guidelines for the measurement of acoustic characteristics of the road surface [15] and are standardized in ISO 11819-1 [2] and ISO 11819-2 [3].

Independent from standardization a couple of sources of error, environmental influences and specific properties of measuring systems are known concerning the application of the measuring methods. Their effect on measuring results should be clarified in the EP5 project. The EP5 project is intended to quantify the sensitivity of the measuring methods to these effects and to give recommendations for practical measures suitable to minimize these effects.

### Scope of work

The following effects occurring in CPX, SPB and sound absorption measurements are subject of the investigations in the EP5 project:

- CPX measurements:
  - air and road surface temperature
  - driving speed
  - airflow noise between the measurement trailer and the road surface
  - quality of the tyres
  - georeferencing of the data acquisition
- measurement of the sound absorption coefficient:
  - variants of the measuring system
  - quality assurance (in situ measurements)
- SPB measurements:
  - air and road surface temperature
  - visibility of the measurement setup
  - execution of the measurements and choice of measured vehicles
  - measurement of the vehicle's speed
- surroundings (in situ measurements)
- boundary conditions, drying period

### Results – CPX measurements

#### Temperature effect

The sound pressure level of the tyre/road noise depends on the air temperature. From the EP5 project results it can be seen that the temperature correction factor of 0.03 dB/°C for impervious and semi dense asphalts, given in recent drafts of the ISO 11819-2 [3] [4] [5], is a feasible choice. In contrast, it seems that a value of 0.05 dB/°C that is given in the Technical Guidelines [15] is more suitable for porous road surfaces.

For the purposes of comparing acoustic spectra a correction depending on frequency compensates the temperature effect much better than that independent of frequency. In contrast, restricting to A-weighted overall sound pressure levels means that a correction depending on frequency is not needed prior to the summation of spectral noise levels. However, a single and universal temperature correction for all road surfaces or at least all road surfaces of a particular type of pavement cannot be determined. The definition of temperature corrections in rules and standards remains a matter of compromise. Therefore, temperature corrections should periodically be surveyed, particularly when new types of road pavements or changes of technical rules are to be introduced.

### Speed effect

The conversion of CPX noise levels between different speed domains (for example a conversion from 50 km/h to 80 km/h) cannot be recommended. However, a simple correction formula for the tyre/road noise level can be given for moderate deviations of about  $\pm 10\%$  from the reference speed (within a speed domain). By means of the measurement data generated in the EP5 project the correction  $c_v$  for small deviations of the actual driving speed  $v$  from the reference speed  $v_{ref}$  the formula is

$$c_v = B \cdot \lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad [dB]$$

The speed coefficient  $B$  is given for different types of road pavement and tyres (Tab. Z 1).

**Tab. Z 1** Speed coefficients  $B$  depending on the type of road pavement and the tyre.

<i>speed domain</i>		30 km/h		50 km/h		80 km/h	
type of road pavement	tyre type	P	H	P	H	P	H
SMA11		40	43	33	33	30	24
MR8, MR8+, PA8, PA11		32	36	30	34	22	29
<i>Proposal for harmonised values</i>		35		32		26	

### Airflow noise between measurement trailer and road surface

Measurements of the airflow noise occurring inside the measurement compartment of a closed CPX trailer caused by the airflow around the trailer have been made in an acoustic wind tunnel. At 30 km/h, 50 km/h and 80 km/h airflow velocity the sound pressure levels of the airflow noise in the frequency range from 315 Hz to 4 kHz are 15 dB to 30 dB lower than the spectral sound pressure levels of the tyre/road noise on noise reducing pavements like a SDA 8B or SDA 8C. However, a wide towing vehicle is an important prerequisite. The towing vehicle reduces the noise on the lee side by slightly more than 10 dB at speeds above 50 km/h.

### Quality of the measurement tyres

Quality assurance of the tyres is an important issue in the context of CPX measurements because the tyres are an integral part of the measuring system. In the EP5 project the effects of changes of the tyre tread profile due to wear and the tread stiffness due to aging processes have been investigated. EP5 provides the following results:

P tyres should be rejected three years after production. After this period has elapsed the hardness might be increased by 4 Shore A and the CPX levels by 0.4 dB(A). Hardness variations of new H tyres due to varying production conditions are substantial. Thus the Shore A hardness of H tyres has to be examined when purchased and their use has to be avoided if the Shore A hardness exceeds the value of 65. In any case, the Shore A hardness of all tyres should be measured and documented before and after each measuring season. The wear of the tyre tread profile both on asphalt and cement concrete road pavements causes an increase of the CPX levels of not more than 0.1 dB per 1 mm material removed from the profile of the P and the H tyre. The tyres are more likely to be rejected from measurements due to the ageing effect than to the loss of profile depth.

### Georeferencing of the data acquisition

The localization of CPX measurements by means of GPS position signals only is not advisable. The recording of trigger signals that are activated manually when passing easily identifiable waypoints like signposts, expansion joints on bridges, tunnel portals, etc. supports subsequent georeferencing and helps to improve the accuracy of the localization of CPX measurements. That is true as well for the evaluation of sudden changes of road

surface characteristics which become noticeable as pronounced discontinuities along the time history of the sound pressure levels or of the road surface temperature.

## Results – SPB measurements

### Temperature effect

Based on the results from the EP5 project and from international investigations *Tab. Z 2* shows coefficients for the correction of pass-by noise levels with reference to an air temperature of 20 °C. They are recommended for a revision of the Technical Guideline [15].

**Tab. Z 2** *SPB temperature correction coefficients.*

vehicle category	N1 dB/°C	N2 dB/°C
porous asphalts	0.05	0.04
impervious asphalts	0.11	0.08
cement concrete	0.07	0.04

### Visibility of the measurement setup

Often SPB measurements have to be safeguarded for road safety reasons. Because of the visibility of such measures road users usually change their driving behaviour which could affect the outcome of a statistical pass-by measurement. In the EP5 project it could be demonstrated that especially the effect of a deviant driving behaviour that is characterised by off-center driving reduces the pass-by levels and increases the  $K_b$  values by up to 0.4 dB(A). The lower values of the pass-by levels are due to increased distances between the vehicles and the microphone compared to the unaffected driving situation. These differences can be arithmetically corrected. Effects on the SPB measuring results caused by differing characteristics of the road surface within and between the two normal tyre tracks cannot be corrected that easily. This means that warning signs affect the measurements adversely.

Warning signs that are clearly visible could also produce a serious gain of vehicle passings that cannot be made use of. The time needed to register the required number of vehicles typically increases and might even become exceedingly longer than usual. In favour of the quality of the acoustic measurements and their results as well as of a manageable measuring time, prominent warning signs should be avoided. The passing speed which is as much as 5 % lower than usual is compensated by the reference model StL-86+. Thus, no significant effect on the acoustic road surface correction  $K_b$  is incurred.

### Execution of the measurements and choice of measured vehicles

In the framework of a round robin test the way of managing the SPB measurements and the choice of vehicles have been observed by means of video recordings. The  $K_b$  values determined by five participants showed differences of up to 1.6 dB(A) for passenger cars and up to 0.8 dB(A) for trucks. Uncertainties in the detection of the driving speed and differences in the classification of vehicles are the reasons for that. The following can be recommended:

1. Improved gauging of measuring points on the terrain and suitable measurement technique for the determination of the driving speed of the vehicles passing by.
2. Training of the measuring personnel and quality assurance regarding the classification of vehicles, discrimination of deviant driving conditions and the exclusion of interfering noise. The Technical Guideline [15] and the Fachhandbuch zur Projektierung [27] should be harmonized concerning the classification of vehicles.
3. Exclusion of extremely fast, slow, quiet and loud vehicles from the evaluation. A symmetric selection that excludes 5 % of the extreme values improves the significance of SPB measurements considerably and homogenizes existing data sets.

### Measurement of the vehicle's speed

The following conclusions can be drawn from the measurements conducted in EP5:

1. Misalignments of the devices used for speed measurements or intentional deviations from the parallel orientation lead to an underestimation of the true driving speed and to an overestimation of the  $K_b$  values derived from such SPB measurements. Non traceable errors and limited repeat accuracy could be the consequence. Known misalignments can be corrected subsequently thru an arithmetic treatment of the measured speed values.
2. For trucks the increase of the  $K_b$  values due to incorrect speed values is about half as for passenger cars because the theoretical curve of the StL-86+ model for trucks progresses less than that of passenger cars.
3. Even misalignments of speed measuring devices of less than  $5^\circ$  affect the SPB values and thus the derived  $K_b$  values as well. Misalignments beyond a value of  $10^\circ$  or  $15^\circ$  are unacceptable. Freehand operating of radar guns will result in misalignments of that scale and should therefore be avoided.

## Results – Sound absorption measurements

### Variants of the measuring system

Among the in situ methods discussed in the EP5 project (subtractive methods with one, two or three pressure microphones and the p-u technique), the p-u technique turns out to be the most important one for non-destructive in situ measurements on all types of road surfaces. Measurement time, accuracy and the range of evaluable sound absorption coefficients are combined in a suitable measuring procedure for practical applications.

### Surroundings of in situ measurements

The presence of sound reflecting objects in the vicinity of the measuring zone causes constructive or destructive superposition of sound waves which are reflected or scattered at these objects, thus giving an over- or underestimation of the sound absorption coefficient depending on frequency. Provided that small objects like traffic cones or kerbstones hold a distance of at least 1 m from the p-u probe they do not interfere with the sound absorption measurements at high frequencies of up to 4 kHz and well reflecting road surface. On highly sound absorbing road surfaces like porous asphalt the minimum distance can even be reduced to 0.5 m without interference. Vertical walls on a sound absorbing surface affect the measurement more than small obstacles. However, the minimal distance required is even slightly larger.

### Quality assurance of in situ measurements

A procedure for the calibration of p-u probes is described in this report. It did not exist so far.

### Boundary conditions for acoustic measurements on porous road surfaces, drying time intervals

The road surface needs to be in an adequate condition to allow it for sound absorption measurements. Residual moisture in the voids must not exist. In order to make sound absorption measurements more reliable, experiments on the measurement of sound absorption coefficients as a function of time after rainfall and recommendations for drying time intervals were part of the EP5 project. The drying time intervals shown in *Tab. Z 3* can be recommended in terms of a conservative estimation for the earliest possible moment to start with measurements after rainfall. These time intervals may be shorter than listed in case of impervious road surfaces, intensive sunshine and high traffic density.

**Tab. Z 3** Recommended drying time intervals in hours after rainfall.

Type of road surface	porous			semi-dense		
Air temperature, °C	5	20	32	5	20	32
Drying time, h	60	30	12	44	26	14

# 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 ([1], Art. 20). Die Aussagekraft dieser Überwachung steht und fällt mit der Genauigkeit der entsprechenden Messungen von Lärm und Belagseigenschaften, d.h. mit der Messgenauigkeit der Verfahren und der Sorgfalt der Messdurchführung.

## 1.2 Situation und Aufgabenstellung

Messmethoden zur Bestimmung der akustischen Belagsgüte werden seit mehreren Jahrzehnten in der Praxis angewandt und dabei stetig verbessert, dem Stand der Technik und neuen Anforderungen angepasst. Einige Messsysteme haben sich auf Grund der einfachen Interpretierbarkeit der Messergebnisse besonders durchgesetzt. Hierzu zählen unter anderem das CPX- und das SPB-Messverfahren. CPX steht für Close Proximity Method (Nahfeldverfahren). Dabei wird das Fahrgeräusch genormter Messreifen in einem Abstand von wenigen Zentimetern unter Freifeldbedingungen in einem Messanhänger durchgeführt. Bei der Statistischen Vorbeifahrtmethode (Statistical Pass-By, SPB) werden im Normabstand die Schalldruckpegel und Geräuschspektren einzelner Fahrzeuge zusammen mit der Fahrgeschwindigkeit aufgezeichnet. Im Rahmen des Forschungsprojekts geht es um die Bewertung einer Reihe von möglichen Fehlerquellen bei diesem Messverfahren.

CPX- und SPB-Verfahren wurden bzw. werden aktuell durch Normungsgremien vereinheitlicht. Das SPB-Messverfahren ist international über die ISO 11819-1 [2] und national durch den Anhang 1c des „Leitfaden Strassenlärm – Vollzugshilfe für die Sanierung“ [15] geregelt. Das CPX-Verfahren wird im Normenentwurf ISO/CD 11819-2 beschrieben [3] und in Vorgängerversionen ([4], [5]) und in der Schweiz seit kurzem ebenfalls durch den Anhang 1c [15].

Unabhängig von der Normierung ist bei der Anwendung beider Messverfahren eine Reihe von Fehlerquellen bekannt, deren genauer Einfluss im Rahmen dieses Forschungsprojektes geklärt werden soll. Weiterhin stehen verschiedene Umwelteinflüsse und Eigenschaften einzelner Messsysteme unter dem Verdacht, die Genauigkeit der Messergebnisse zu verringern, bzw. deren Vergleichbarkeit mit anderen Messsystemen zu gefährden. Die möglichen Fehlerquellen, die bei CPX- und SPB-Messungen auftreten können, waren im Rahmen dieses Forschungsprojekts zu beleuchten.

Als zusätzliches Verfahren zur Untersuchung der akustischen Eigenschaften semiporöser und poröser Fahrbahnbeläge können Systeme zur zerstörungsfreien Messung des Schallabsorptionsgrads wertvolle Daten liefern. Derartige Systeme werden in der Praxis seit mehreren Jahren erfolgreich eingesetzt, jedoch gibt es weder eine Norm, die die praxisgerechte Verwendung der Systeme noch deren Einsatzgrenzen in der Akustik von Fahrbahnbelägen beschreibt.

CPX-, SPB- und Absorptionsgradmessverfahren ist gemeinsam, dass sie nur auf trockenen Fahrbahnen aussagekräftige Ergebnisse liefern. Doch wann ist eine Fahrbahn aus akustischer Sicht hinreichend trocken? Für die Messplanung und Messdurchführung ist dies eine entscheidende Frage. In den Normen und Verfahrensanweisungen zu den Messverfahren finden sich keine konkreten Angaben zu diesem wichtigen Thema. Deshalb gibt es hier dringenden Forschungsbedarf.

Im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben TP1 und dem Einzelprojekt 5 sind von Müller-BBM folgende Themen zu bearbeiten gewesen [16]:

- CPX-Messsystem:
  - Temperaturkorrektur
  - Geschwindigkeitskorrektur
  - Strömungsgeräusche zwischen Messanhänger und Fahrbahnoberfläche
  - Qualitätssicherung der Reifen
  - Akustik des Innenraums geschlossener CPX-Anhänger
- SPB-Messungen:
  - Sichtbarkeit des Messaufbaus
  - Messungsdurchführung und Fahrzeugauswahl
  - Temperaturkorrektur
  - Geschwindigkeitsmessung
- System zur Messung des Schallabsorptionsgrades
  - Messsystemvarianten
  - Einzugsbereich von in-situ Messungen
  - Qualitätssicherung von in situ Messungen
- Randbedingungen für akustische Messungen, Trocknungszeiten

Trotz intensiver Bemühungen, die Akustik des Innenraums eines geschlossenen CPX-Anhängers in einem Rollenprüfstand zu untersuchen, ist dies im Rahmen des EP5 aus organisatorischen, technischen und Verfügbarkeitsgründen nicht gelungen. Die Anforderungen an akustische Eignung, hinreichende Grösse für den CPX-Anhänger und ein Zugfahrzeug und das Vorhandensein von Laufrollen, auf denen realitätsnahe Texturen aufgebracht werden können erfüllte kaum einer der angefragten Prüfstände. Wo die Bedingungen erfüllt waren, kam es zu unüberwindlichen organisatorischen oder finanziellen Hindernissen. Als Ersatz für dieses Teilprojekt wurde deshalb eine andere Fragestellung in das Forschungsvorhaben aufgenommen, nämlich die Genauigkeit der Ortsbestimmung via GPS im Rahmen von CPX-Messungen. Dies ist ein wichtiger Punkt, weil die CPX-Schallpegel oder davon abgeleitete Grössen oftmals fahrstreifenbezogen in topografischen Karten georeferenziert dargestellt werden und Positionsfehler diese Darstellungen in Frage stellen könnten.

### 1.3 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 [17] [18]. 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 EP5 als Teilprojekt des Forschungspaketes „Lärmarme Beläge innerorts“ ist es, wichtige Verfahren zur schalltechnischen Charakterisierung von Fahrbahnbelägen kritisch auf potenzielle Schwachstellen und Risiken bei der Anwendung hin zu untersuchen. Ergebnis dieses Forschungsprojektes EP5 sind Empfehlungen für eine bessere Mess- und Auswertpraxis.

## 1.4 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 umfasst die Ergebnisse des „EP5: Verbesserung der Genauigkeit akustischer Messmethoden“. Die Einbettung des „EP5“ innerhalb des Forschungspakets „Lärmarme Beläge innerorts“ und des Teilprojektes „TP1: Forschung und Innovation“ ist in Abb. 1 dargestellt.

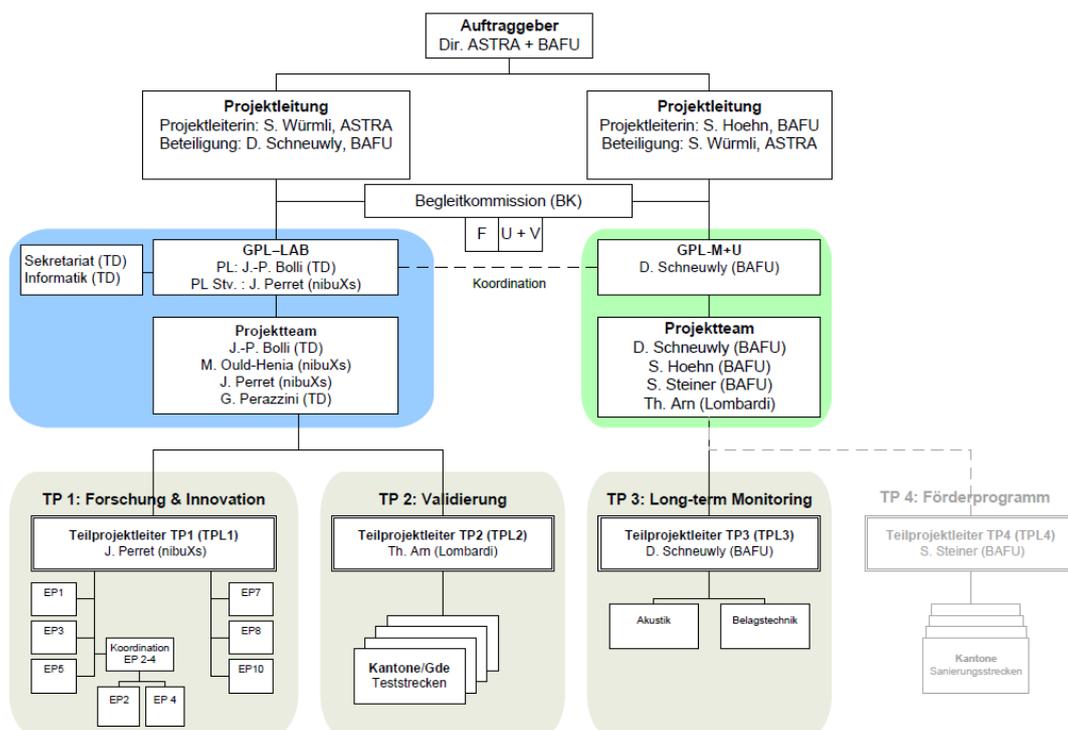


Abb. 1 Organigramm des Forschungsprojekts „lärmarme Beläge innerorts“.



## 2 Verbesserung der CPX-Methode

Mit der Nahfeldmessmethode (Close Proximity Method – CPX) nach ISO/DIS 11819-2:“Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method“ [3] können die Reifen-Fahrbahn-Geräusche kontinuierlich für ganze Strassenabschnitte gemessen und so die Homogenität der akustischen Eigenschaften von Fahrbahnoberflächen gekennzeichnet werden. Im Anhang wird das CPX-Verfahren näher erläutert.

### 2.1 CPX-Schalldruckpegel als Funktion der Temperatur

#### 2.1.1 Ausgangslage

Die Schalldruckpegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche nehmen mit steigender Temperatur während der Messung ab. Der dem Forschungsantrag zugrunde liegende Normentwurf ISO/DIS 11819-2 [3] sieht vor, die gemessenen Pegel auf eine Temperatur von 20°C umzurechnen. In der Praxis ist es im Allgemeinen nicht möglich, nur bei exakt 20°C zu messen, so dass eine Umrechnung der gemessenen Schalldruckpegel von der Mess-temperatur auf die Normtemperatur notwendig wird.

Für die Umrechnung soll laut Norm ISO/DIS 11819-2 auf den gemessenen Schallpegel eine Temperaturkorrektur  $C_T$  gemäss folgender Gleichung addiert werden:

$$\text{Formel 1} \quad C_T = b(T - 20^\circ\text{C})$$

mit:

$C_T$ : Temperaturkorrektur in dB

$b$ : Temperaturkoeffizient in dB/°C

$T$ : Lufttemperatur in °C während der Messungen, rund 1 m über Fahrbahn.

Der Temperaturkoeffizient  $b$  soll für beide Messreifen und alle Belagstypen gelten.

Da die Norm ISO 11819-2 noch nicht veröffentlicht ist, wird darüber in Fachkreisen noch diskutiert. In verschiedenen Entwürfen zur ISO 11819-2 ([4], [5]) wurden verschiedene Korrekturfaktoren für den Einfluss der Temperatur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch vorgeschlagen und schliesslich auf eine bauphysikalische Norm verwiesen (ISO 13471-1), welche noch in Vorbereitung ist. Zuletzt (2012, [3]) wurde ein Gesamtpegelkorrekturwert von 0.03 dB/°C vorgeschlagen und gleichzeitig angegeben, dass dieser Wert vermutlich zu tief ist. In der Praxis wird oft der Wert 0.05 dB/°C benutzt (wie in einer älteren Version der ISO 11819-2). Bühlmann und Ziegler (2013, [18]) finden mittlere Temperaturkoeffizienten um 0.1 dB/°C. Die grosse Datenbasis von Bühlmann und Ziegler [20] weist auf kleinere spektrale Temperaturkoeffizienten für CPX-Messungen auf hohlraumreichen Deckschichten, insbesondere für den P-Reifen und grössere Koeffizienten für dichte Beläge hin. Diese Autoren finden Koeffizientenminima um 800 Hz oder 1000 Hz und kleine Koeffizienten bei Frequenzen unterhalb von 630 Hz. Für Vorbeifahrtmessungen (statistical pass-by, SPB, und coast-by, CPB), die allerdings nicht das akustische Nahfeld untersuchen, werden ähnliche und z.T. belagsabhängige Korrekturfaktoren diskutiert.

In Anlehnung an die ISO/DIS 11819-2 beschreibt der Anhang 1c des Leitfadens Strassenlärm in seiner neuesten Ausgabe [15] ebenfalls die Durchführung und Auswertung von CPX-Messungen. Dort wird ein Temperaturkoeffizient von 0.05 dB/°C empfohlen, wenn keine genaueren Werte vorliegen.

Für starre Fahrbahnbeläge kann davon ausgegangen werden, dass sich eine von der Normtemperatur abweichende Temperatur hauptsächlich auf die materialtechnischen Eigenschaften der Reifen und weniger auf die der Fahrbahn auswirkt. Die umfangreichen Untersuchungen im deutschen Sperenberg-Projekt [21] zeigten, dass die Änderung des

Schalldruckpegels, bezogen auf Vorbeifahrtmessungen, in guter linearer Korrelation zur Lufttemperatur steht. Allerdings sind Luft- und Reifentemperatur im Allgemeinen verschieden. Die beiden für das CPX-Messverfahren zu verwendenden Messreifen könnten sich hinsichtlich der Temperaturkorrektur von dem Sperenberg-Reifenkollektiv unterscheiden.

## 2.1.2 Arbeitsprogramm, Messort

### Arbeitsprogramm

Es wurden auf ausgewählten Abschnitten poröser, semiporöser und dichter Fahrbahnbeläge Messungen mit den beiden normgemässen Messreifentypen P und H durchgeführt. Innerhalb von nicht mehr als 3 Monaten wurden CPX-Messungen an diesen Abschnitten vielfach bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen vorgenommen. Durch die kurze Aufeinanderfolge der Wiederholungsmessungen können signifikante akustische Veränderungen der Fahrbahnbeläge ausgeschlossen werden. Die akustischen Messergebnisse wurden zusammen mit den jeweils mitgemessenen Luft- und Fahrbahntemperaturen einer statistischen Analyse unterworfen. Aus dem Ergebnis der Messungen sollte ein neues, auf die Normmessreifen zugeschnittenes Modell für die Temperaturkorrektur entwickelt werden. Unter Umständen konnte das zu entwickelnde Modell auch reifen-, bzw. fahrbahnbelagsselektiv sein. Das Ziel war aber, eine einfache praxisgerechte Korrekturformel vorzuschlagen.

### Messort

Die CPX-Messungen wurden auf der Nationalstrasse 1 bei Birrhardt und auf der Aaretalstrasse T5 bei Hunzenschwil jeweils auf dem rechten Fahrstreifen in Fahrtrichtung Westen durchgeführt. Auf der N1 ist ein offenporiger PA8 Asphalt im Jahre 2011 eingebaut worden. Die gemessene und ausgewertete Länge des PA8 auf der N1 beginnt bei Kilometer 88 und beträgt 3 Kilometer. Auf der Aaretalstrasse befindet sich bei Kilometer 5.05 ein 400m langes Testfeld mit einem dichten AC MR8 und einem semiporösen AC MR8+ Belag. Alle Beläge haben ein Grösstkorn von 8 mm. Das AC MR8 Testfeld ist 225 m lang, das AC MR8+ Testfeld 175 m. Zur Bildung aussagefähiger Pegelmittelwerte sind diese Strecken hinreichend lang. Die unterschiedlichen Abschnittslängen haben keinen signifikanten Einfluss auf das prinzipielle Temperaturverhalten der Rollgeräusche. Der 3 km lange Abschnitt, der auf der N1 ausgewertet worden ist, weist eine hohe Konstanz auf.

Die Abschnitte befinden sich auf Ausserortsstrassen. Aufgrund des vom Hohlraumgehalt abhängigen Temperaturverhaltens der Rollgeräusche wurden drei Belagstypen ausgewählt, welche in ihrer Gesamtheit eine grosse Bandbreite bezüglich des Hohlraumgehalts für die Untersuchungen zur Verfügung stellen. Offenporige Beläge werden auf Innerortsstrasse praktisch nicht eingesetzt. Zur Zeit der Messdurchführung standen auch kaum semidichte Beläge innerorts zur Verfügung. Aufgrund der geografischen Nähe der Messorte bot sich die Aaretalstrasse mit ihren beiden Testfeldern und der PA8 auf der N1 für die Untersuchungen an. Das bei dieser Untersuchung festgestellte Temperaturverhalten bei 80 km/h lässt sich gemäss [21] auf 50 km/h übertragen.

## 2.1.3 Durchführung der Messungen

Die Messungen wurden bei der Nominalgeschwindigkeit 80 km/h durchgeführt. Es wurden die nach Norm obligatorischen Mikrofonpositionen im rechten Radhaus ausgewertet.

### Ablauf

Die beiden Lokationen wurden über den ansteigenden Temperatur-Tagesgang im kontinuierlichen Wechsel befahren. Eine Runde dauert etwa 35 Minuten, sodass bei einem entsprechenden Temperaturanstieg feine Abstufungen der Temperatur untersucht werden können. Bei der Wahl des Messtages wurde darauf geachtet, dass ein möglichst

grosser Temperaturunterschied zwischen Sonnenaufgang und Nachmittag vorhergesagt wurde. Die Messrunden wurden teilweise an einem weiteren Tag für den anderen Messreifen wiederholt. Um den gesamten Lufttemperaturbereich von 5°C bis 35°C abzudecken, mussten mehrere Messkampagnen gefahren und die Daten für die Auswertung zusammengefügt werden, z. B. im Sommer 15 – 35°C und im Herbst 5 – 15°C.

### **Zeitpunkte der Messfahrten**

Die Messungen fanden in dem Zeitintervall zwischen dem 17.07.2012 und 25.11.2012 statt. Mit dem Messreifentyp P fanden Messkampagnen am 17.07., 31.07., 15.08. und 25.11. statt, mit den Messreifen H wurde am 17.07., 31.07., 14.08. und 16.08. gemessen.

### **Witterung**

Zum Zeitpunkt der Messungen waren die Fahrbahnen jeweils trocken. Auch an den Tagen vor den Messungen waren jeweils keine Niederschläge zu verzeichnen, so dass davon auszugehen ist, dass sich keine Restfeuchtigkeit in den zum Teil hohlraumreichen Belägen befand, die die Messergebnisse hätten beeinflussen können.

Der Bereich der Lufttemperaturen reicht insgesamt von 7°C bis 33°C. Der Temperaturbereich war aber nicht bei beiden Messreifen gleich. Beim P-Reifen betrug der Bereich 7°C bis 33°C auf allen Belagstypen, beim H-Reifen 12°C bis 29°C an der Aaretalstrasse und 13°C bis 28°C auf dem PA8. Die Fahrbahntemperaturen lagen zwischen 4°C und 42°C. Die Witterungsbedingungen entsprachen somit in vollem Umfang den Normanforderungen.

### **Störgeräusche**

Besondere Störgeräusche, beispielsweise durch besonders laute vorbeifahrende Lastwagen, Bahnverkehr etc. sind während der Messungen nicht aufgetreten.

## **2.1.4 Ergebnisse**

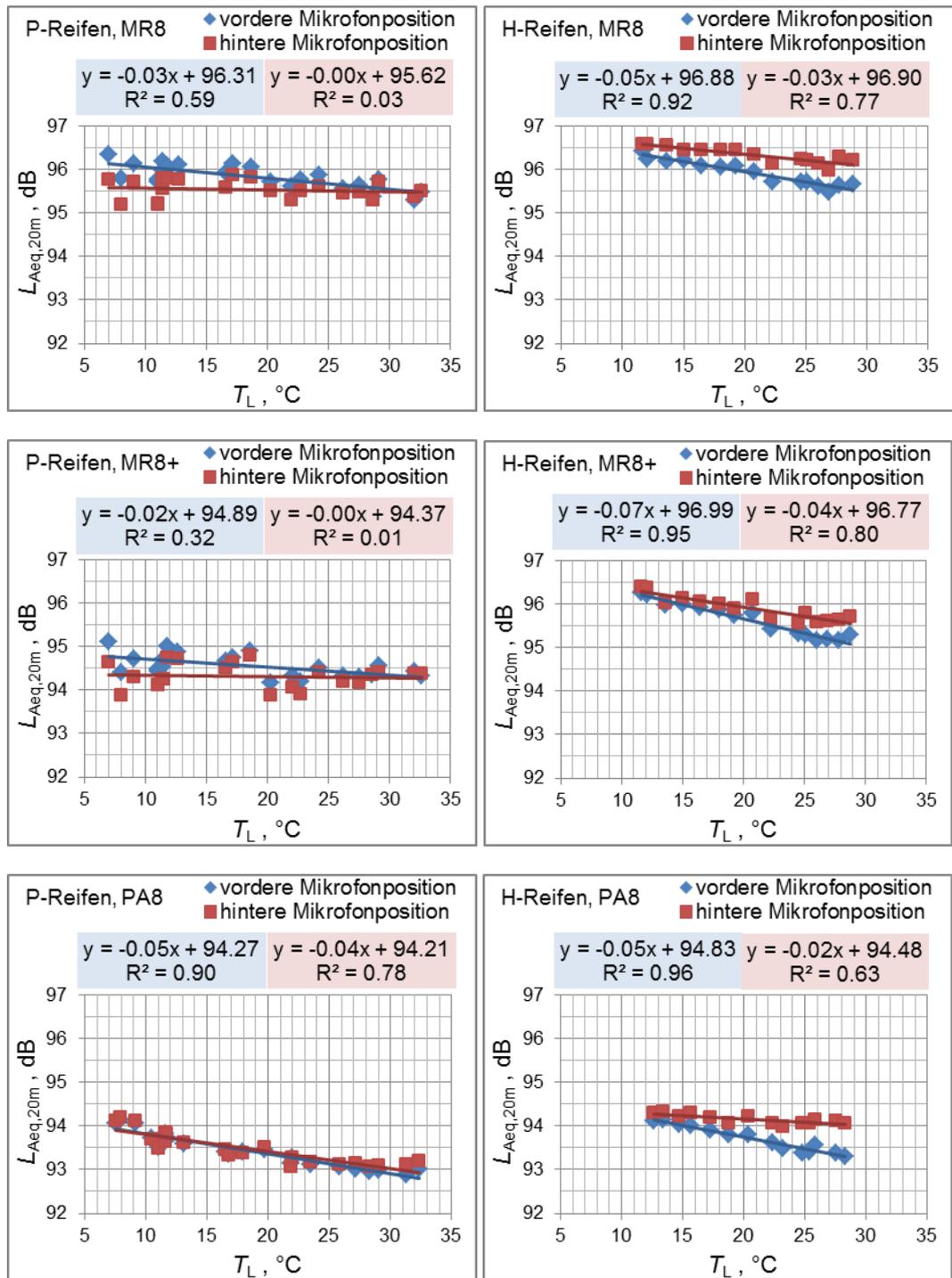
Für eine differenziertere Analyse der Daten wurde die vordere und hintere Mikrofonposition separat ausgewertet., siehe *Abb. 2*. Hinweis: Die in den Diagrammen angegebenen Bestimmtheitsmasse  $R^2$  werden durch das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel automatisch berechnet. Die vermeintlich niedrigen Bestimmtheitsmasse beim Reifentyp P auf der Aaretalstrasse hängen mit der extrem kleinen Steigung zusammen.

Bei den Messungen mit dem Reifentyp P auf der Aaretalstrasse hängt der Gesamtpegel an der hinteren Position sehr wenig von der Temperatur ab. Der Gesamtpegel an der vorderen Mikrofonposition hingegen fällt mit steigender Temperatur ab, bei dem dichten Belag mit 0.026 dB/°C etwas stärker als bei dem semiporösen Belag mit 0.018 dB/°C. Dies spricht gegen die Vermutung, dass ein Belag mit mehr Hohlraum eine grössere Temperaturabhängigkeit der Reifen-Fahrbahn-Geräusche aufweist, wie dies anhand der Vorbeifahrtmessungen im Sperenberg-Projekt nachgewiesen wurde. Die anschliessende spektrale Analyse liefert hier mehr Klarheit. Beim PA8 nimmt der Pegel mit etwa doppelter Rate ab und nahezu gleich stark an beiden Positionen.

Auch beim H Reifen lässt sich keine eindeutige Tendenz für die drei unterschiedlichen Beläge erkennen. Die teils sehr guten Bestimmtheitsmasse deuten jedoch darauf hin, dass weitgehend ein linearer Zusammenhang zwischen dem gemessenen Schalldruckpegel und der Temperatur zu bestehen scheint.

Allein anhand des A-bewerteten Schalldruckpegels lässt sich keine eindeutige Systematik der Temperaturabhängigkeit bei diesen drei Belägen erkennen. Daher sind in *Abb. 3* und *Abb. 4* die Terzspektren aller Messfahrten und beider Mikrofonposition dargestellt. Das Farbspektrum der Kurven entspricht dem Temperaturbereich: die Messfahrt bei der

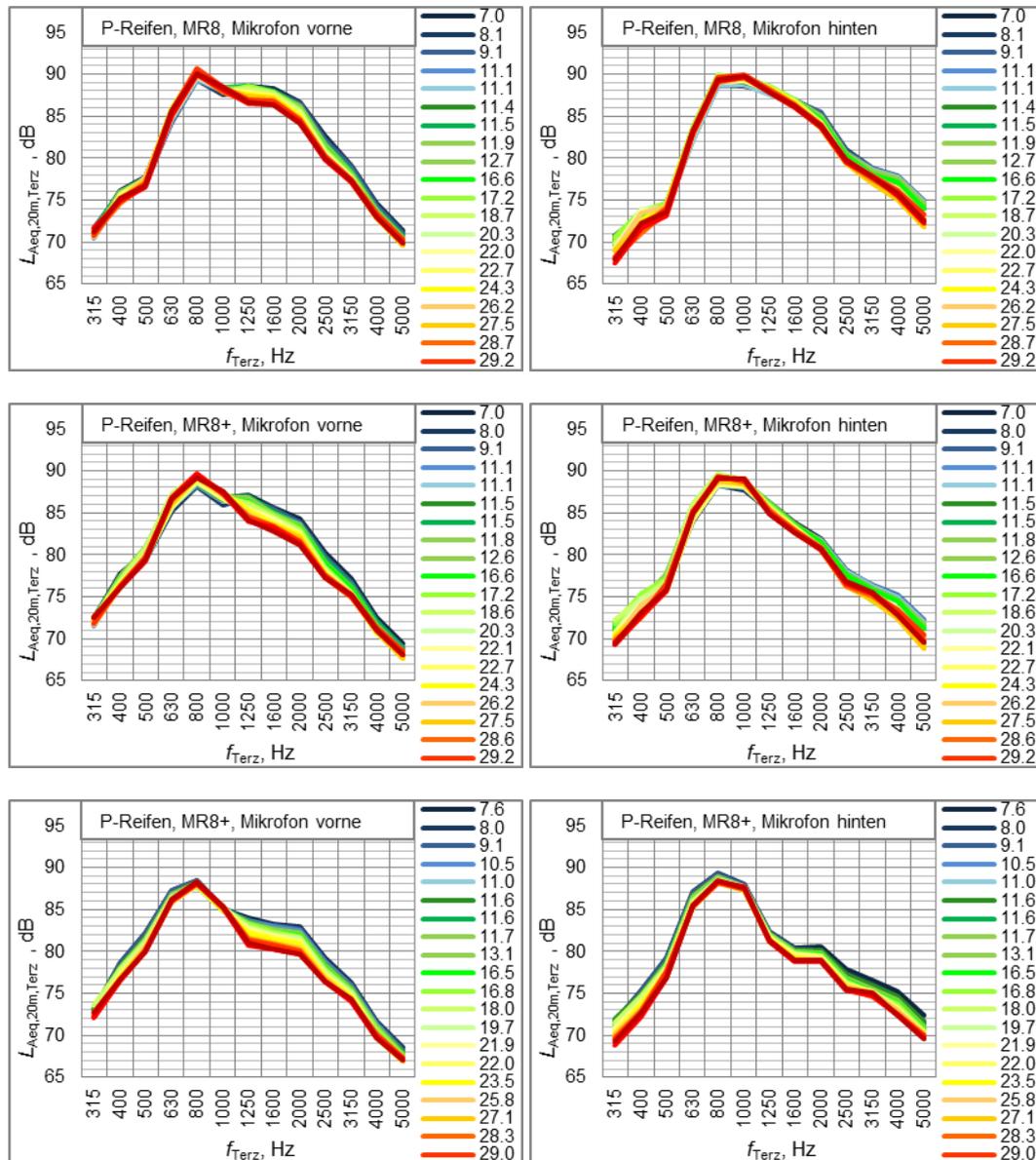
kühlsten Temperatur ist in dunkelblau, die wärmste in beim Reifentyp P rot und H gelb dargestellt.



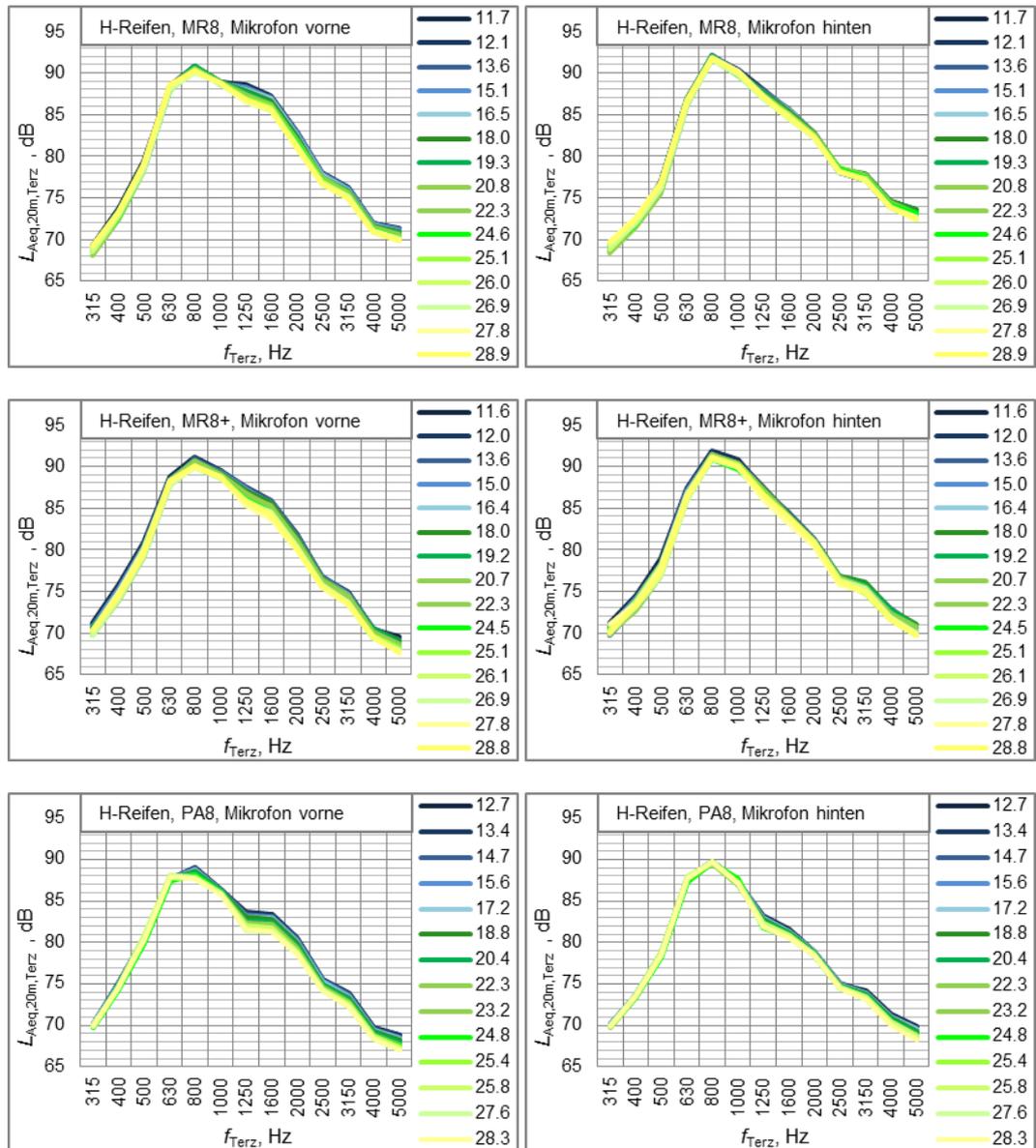
**Abb. 2** 20 m-Mittelwert der CPX-Pegel  $L_{Aeq,20m}$  in Abhängigkeit von der Lufttemperatur  $T_L$  für beide Mikrofonpositionen, oben: T5 ACMR8, Mitte: T5 ACMR8+, unten: N1 PA8, links: Reifentyp P, rechts: Reifentyp H.

Es ist sofort erkennbar, dass die Temperaturabhängigkeit frequenzabhängig ist. Grob eingeteilt fallen die Pegel oberhalb von 1 kHz ab, wohingegen die tieferen Frequenzen nahezu keine Änderung aufweisen. Genauer betrachtet gibt es an der vorderen Mikrofonposition auf dem dichten AC MR8 Belag auch Terzen mit geringer Pegelzunahme. Das Maximum bei 800 Hz der blauen Kurven ist tiefer als das der roten. Aufgrund der stärkeren Gewichtung des Maximums bei der energetischen Summierung des Spek-

trums, kompensieren sich die gegenläufigen Temperaturabhängigkeiten der Terzen teilweise bei der Berechnung des Gesamtpegels. An der hinteren Mikrofonposition ist eine insgesamt geringere Temperaturabhängigkeit zu verzeichnen.



**Abb. 3** Terzspektren des CPX-Pegels  $L_{Aeq,20m,terz}$  aller Temperaturen, Reifentyp P, oben: T5 ACMR8, Mitte: T5 ACMR8+, unten: N1 PA8, links: Mikrofon vorne, rechts: Mikrofon hinten.



**Abb. 4** Terzspektren des CPX-Pegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  aller Temperaturen, Reifentyp H, oben: T5 ACMR8, Mitte: T5 ACMR8+, unten: N1 PA8, links: Mikrofon vorne, rechts: Mikrofon hinten.

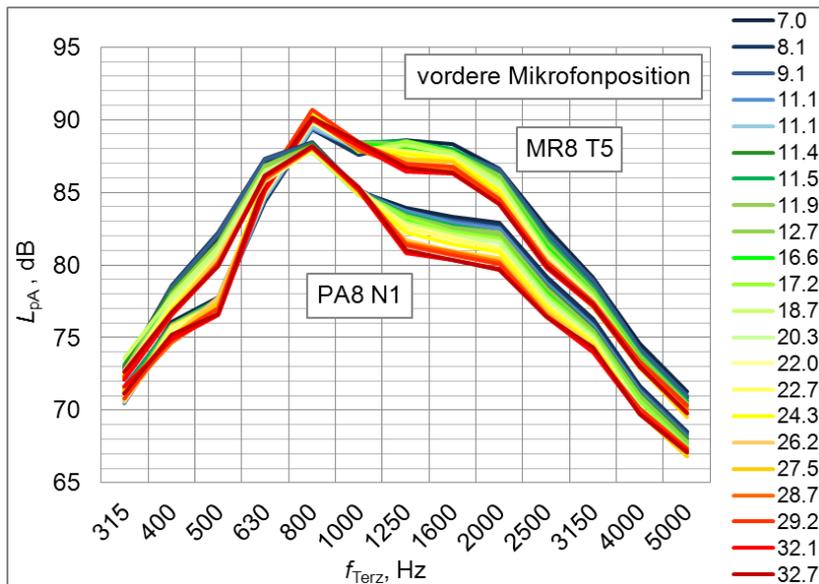
Beim semiporösen Asphalt MR8+ ist die Temperaturabhängigkeit insgesamt stärker, sowohl in den Terzen mit fallenden Pegeln (massgeblich 1.25 kHz, 1.6 kHz und 2 kHz), als auch in denen mit steigenden (630 Hz, 800 Hz, 1'000 Hz). Im Gegensatz zum MR8 sind diese oberen drei Terzen auch leiser als das Maximum, was die unterschiedliche akustische Wirkung der beiden Beläge zeigt. Dies führt auch dazu, dass der Gesamtpegel mehr von der Pegelzunahme im Maximum bestimmt wird, als von der stärkeren Pegelabnahme im Hochtonbereich.

Beim offenporigen Asphalt auf der N1 gibt es auch bei den tieferen Frequenzen Pegelabnahmen und keine ausgeprägten Pegelzunahmen. Die Auffächerung der Kurven in den oberen drei Terzen 1.25 – 2 kHz ist nochmals etwas grösser.

Auch beim Reifentyp H zeigt sich in *Abb. 4* eine grössere Temperaturabhängigkeit an der vorderen Mikrofonposition und bei Zunahme des Hohlraumgehalts.

Da sich die Form des Spektrums mit der Temperatur verändert, werden Vergleiche unterschiedlicher Strecken, die bei verschiedenen Temperaturen gemessen wurden, er-

schwert. Die Grösse der Veränderungen und der Frequenzbereich hängen vom Hohlraum ab, der gerade auch für die akustische Wirkung massgeblich ist. Bei der Zusammenstellung der Spektren des Reifentyps P der beiden Beläge ACMR8 und PA8 in Abb. 5 wird dies besonders deutlich. Beispielsweise beträgt der Pegelunterschied der 1.6 kHz Terzbänder bei 20°C etwa 5 dB. Würde der PA8 bei 33°C und der ACMR8 bei 7°C verglichen werden, betrüge der Unterschied ohne Temperaturkorrektur 8 dB, mit 0.03 dB/°C 7.2 dB und mit 0.05°C 6.7 dB. Würde der PA8 bei 7°C und der ACMR8 bei 33°C verglichen werden, betrüge der Unterschied ohne Temperaturkorrektur 3 dB, mit 0.03 dB/°C 3.8 dB und mit 0.05°C 4.3 dB.

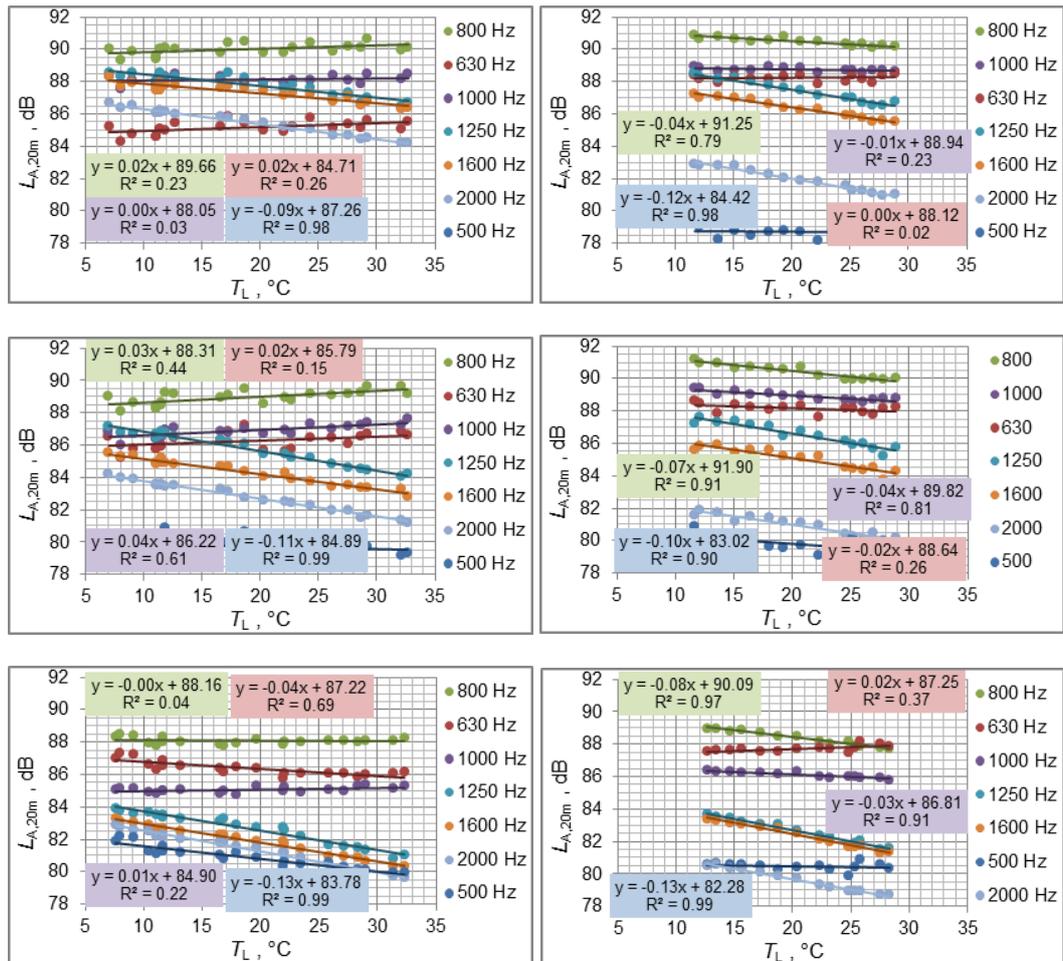


**Abb. 5** Terzspektren des CPX-Pegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  für alle Temperaturen, Reifentyp P, T5 MR8 und N1 PA8, vordere Mikrofonposition.

In Abb. 6 sind für die vordere Mikrofonposition die massgeblichen Terzpegel über der Temperatur aufgetragen. Bei dem dichten MR8 Belag dominiert die 800 Hz Terz und zeigt eine mit +0.02 dB/°C zunehmende Abhängigkeit. Bei geringerem Pegel steigen auch die benachbarten Terzen unterschiedlich mit steigender Temperatur an. Die Terzpegel oberhalb von 1 kHz fallen hingegen ab mit einem Gradienten von bis zu -0.09 dB/°C. Die unterschiedlichen Steigungen der Terzpegel ist die Ursache für die Veränderung der Form der Spektren mit der Temperatur. Anmerkung: die Pegel der 500 Hz Terz sind kleiner als 78 dB, daher liegen die Datenpunkte ausserhalb des Diagrammbereichs. Zu Gunsten einer besseren Vergleichbarkeit sind die Y-Achsen der Diagramme jedoch jeweils gleich.

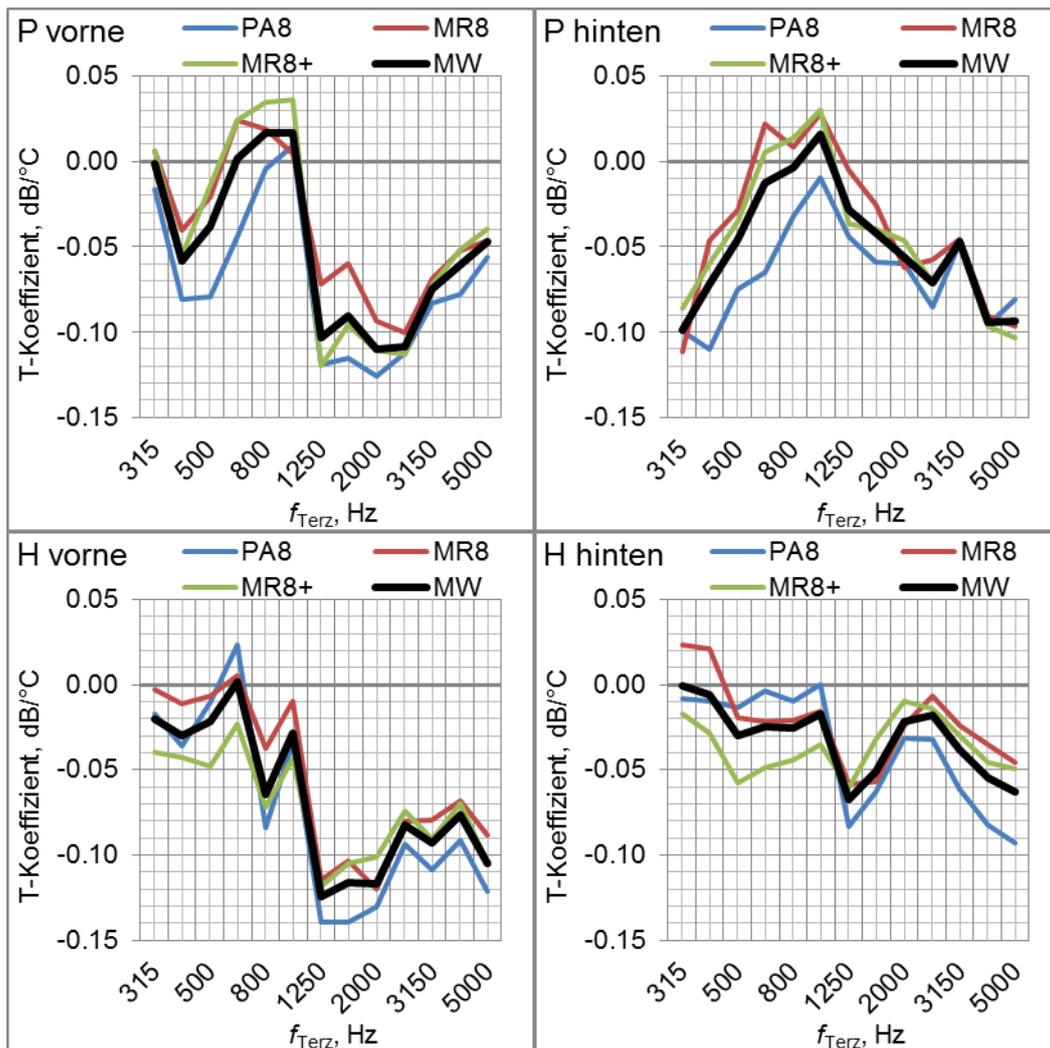
Auf dem semiporösen MR8+ Belag fällt auf, dass die Terzen etwas verteilter sind. Das liegt zum Teil daran, dass sich die akustische Wirksamkeit des Hohlraums hauptsächlich auf den Bereich 1 – 2.5 kHz auswirkt und daher die zugehörigen Geraden etwas tiefer liegen. Die Zunahme des 800 Hz Terzpegels ist mit 0.035 dB/°C grösser als beim ACMR8. Bei den höheren Terzen ist die Abnahme ebenfalls stärker, bis zu -0.12 dB/°C.

Bei dem PA8 auf der N1 sind keine so starken Pegelzunahmen mit der Temperatur feststellbar, z. B. ist die 800 Hz Terz nahezu unabhängig von der Temperatur (0.004 dB/°C). Die Terzen oberhalb von 1 kHz liegen nochmals tiefer und zeigen wiederum starke Temperaturabhängigkeiten mit einem Gradienten von -0.12 dB/°C. Wie beim MR8+ ist der Pegel der 500 Hz Terz höher als beim dichten Belag, was auf eine stärkere mechanische Anregung des Reifens bei hohlraumreichen, dadurch auch aber grobrauheren Asphalteschichten lässt.



**Abb. 6** Einzelne Terzpegel des CPX-Pegels  $L_{A,20m}$  in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, Mikrofon vorne, oben: T5 ACMR8, Mitte: T5 ACMR8+, unten: N1 PA8, links: Reifentyp P, rechts: Reifentyp H.

Im Gegensatz zum P Reifen fallen beim Reifentyp H fast alle Terzpegel bei steigender Temperatur, schwache Pegelzunahmen kommen bei den tiefsten Terzen vor (Abb. 4, Abb. 5, Abb. 6). Die detaillierte Analyse verdeutlicht, dass der Zusammenhang des mit dem CPX-Verfahren gemessenen Reifen-Fahrbahn-Geräusches und der Temperatur stark frequenzabhängig ist. Da die akustische Wirkung lärmmindernder Fahrbahndeckschichten ebenfalls frequenzabhängig ist, kann eine spektrale Temperaturkorrektur mit unterschiedlichen Koeffizienten bezüglich Mikrofonposition, Reifentyp und Belag sinnvoll erscheinen. Die spektralen Temperaturkoeffizienten sind für jeden Belag einzeln und deren arithmetischer Mittelwert in Abb. 7 grafisch dargestellt. Die Kurven können am besten bezüglich der Beläge gruppiert werden, da sich deren Kurven am meisten ähneln – die Unterschiede zwischen der vorderen und hinteren Mikrofonposition sowie den beiden Reifentypen sind deutlich grösser!



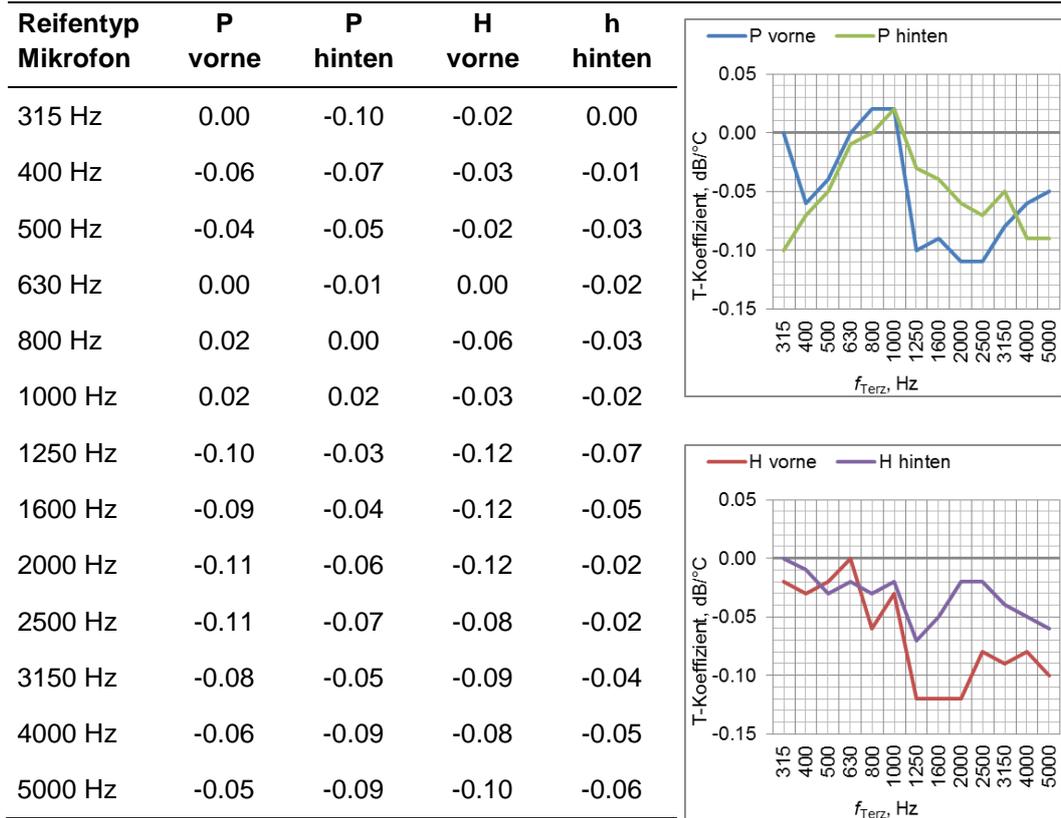
**Abb. 7** Spektrale Temperatur-Koeffizienten, oben: Reifentyp P, unten: Reifentyp H, links: vordere Mikrofonposition, rechts: hintere Mikrofonposition, (MW = arithmetischer Mittelwert).

### 2.1.5 Diskussion der Ergebnisse

Das Deformationsverhalten eines visko-elastischen Materials ist immer stark temperatur- und frequenzabhängig. Ebenfalls stark von der Frequenz und vom Reifentyp abhängig ist die Anregung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs. Vor diesem Hintergrund spricht vieles für eine frequenz- und reifenabhängige Korrektur des Temperatureinflusses. Da mechanische und aerodynamische Schallentstehungsmechanismen vor und hinter dem Reifen physikalisch unterschiedlich stark ausgeprägt sind, kann man auch eine positionsabhängige Korrektur erwarten. Gegen eine spektrale Korrektur sprechen die höhere Komplexität bei der Durchführung der Korrektur und eine grössere Unsicherheit einzelner spektraler Temperaturkoeffizienten aufgrund einer derzeit noch beschränkteren Datenbasis.

Aus den Untersuchungen in diesem Teilprojekt ergeben sich die in Tab. 1 eingetragenen spektralen Temperaturkorrekturen für CPX-Messungen. Die Temperaturkoeffizienten sind für die drei untersuchten Beläge arithmetisch gemittelt. Die Koeffizienten sind angegeben für jede Terzmittenfrequenz, beide Normreifen und für beide Mikrofonpositionen. Sie sind rechts der Tabelle in Abb. 8 grafisch dargestellt.

**Tab. 1** Temperaturkoeffizienten für CPX-Messungen in dB/°C.



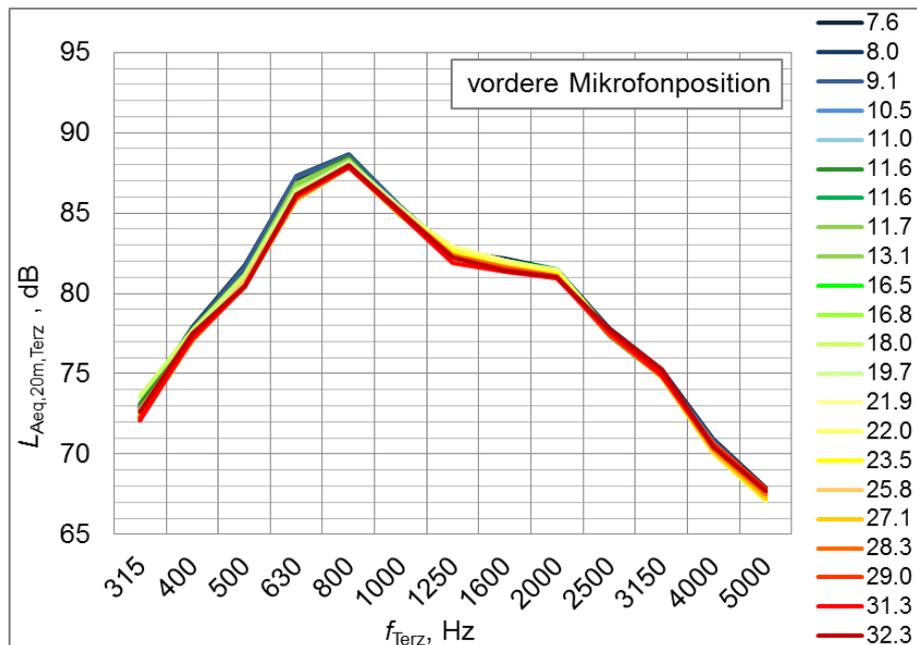
**Abb. 8** Spektrale Temperatur-Koeffizienten in dB/°C, oben: Reifentyp P, unten: Reifentyp H, jeweils vordere und hintere Mikrofonposition.

Abb. 9 und Abb. 10 geben beispielhaft Terzspektren des CPX-Pegels aus Messungen im gesamten Temperaturbereich von 7°C bis 32°C mit dem Reifentyp P auf einem PA8 wieder: Abb. 9 zeigt die Terzspektren nach Temperaturkorrektur mit Hilfe der spektralen Temperaturkoeffizienten; Abb. 10 zeigt die Spektren bei Anwendung der bisherigen Temperaturkorrektur mit 0.05 dB/°C nach dem Anhang 1c [15]. Wie die letzte Abbildung zeigt, gelingt die Kompensation des Temperatureinflusses anhand der bisherigen Temperaturkorrektur weit weniger gut als für die spektrale Temperaturkorrektur.

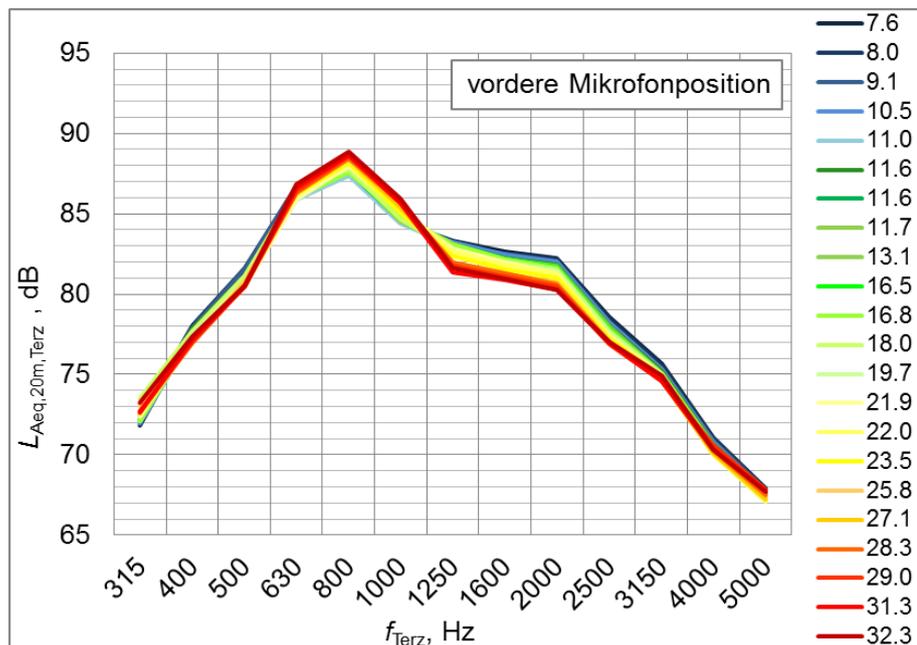
Ein Problem der hier gefundenen Temperaturkorrekturen liegt darin, dass gerade dort, wo die meiste spektrale akustische Energie vorhanden ist, nämlich im Bereich der 800 Hz und 1000 Hz Terzbänder, eine Sprungstelle der Koeffizienten vorhanden ist. Besonders deutlich ist das bei der vorderen Mikrofonposition. Mögliche Ungenauigkeiten wirken sich hier besonders stark aus. Spektrale Sprünge in den Korrekturfaktoren um 1000 Hz finden auch Bühlmann und Ziegler [20]. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass sich die mechanische Anregung des Reifens bei tieferen Frequenzen zeigt und tendenziell weniger temperaturabhängig ist, weil der Reifen dort eher als starr betrachtet werden darf und als Ganzes Eigenschwingungen durchführt. Bei Frequenzen über 1 kHz wird die lokale Deformation der kleinen Blockeinheiten zunehmend wichtiger, weshalb sich die temperaturabhängige Deformation stark auswirkt und eher grosse Korrekturfaktoren erfordert.

Bei Messungen wenige Grad unter- oder oberhalb von 20°C erübrigt sich die Diskussion über die Details der Temperaturkorrektur, weil sie dann in der allgemeinen Messunsicherheit untergeht. Bei zunehmendem Temperaturabstand vom 20°C Bezugswert wirkt sich die Frequenzabhängigkeit jedoch immer stärker aus.

Bei realistischen Lufttemperaturmessbereichen zwischen 5°C und 35°C kann der Temperaturkorrekturwert einzelner Terzbänder bis zu etwa 2 dB betragen.



**Abb. 9** Nach dem Vorschlag spektral temperaturkorrigierte Terzspektren des CPX-Pegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  für alle Temperaturen, N1 PA8, Mikrofon vorne, Reifen P. Bezugstemperatur für die Korrektur: 20°C.



**Abb. 10** Terzspektren des CPX-Pegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  für alle Temperaturen mit der Temperaturkorrektur nach Anhang 1c des Leitfadens Strassenlärm [15], N1 PA8, Mikrofon vorne, Reifen P. Bezugstemperatur für die Korrektur: 20°C.

In der Praxis liegt das Augenmerk auf dem Gesamtpegel. Da sich die Auswirkungen der unterschiedlichen spektralen Koeffizienten bei der energetischen Aufsummierung der Terzpegel zum Gesamtpegel vermitteln, liegt die Vermutung nahe, dass die effektiven Unterschiede zwischen der hier ermittelten spektralen Korrektur und der mit einem Koeffizienten, welche auf den Gesamtpegel angewendet wird, gering sind. Für eine Gegen-

überstellung werden die Terzpegel aller temperaturkorrigierten Spektren über beide Mikrofonpositionen energetisch gemittelt und dann zum jeweiligen Gesamtpegel aufsummiert. Anschliessend werden die Absolutwerte der Differenzen zum Gesamtpegel-Wert gemittelt, dessen Messung am nächsten bei 20°C liegt. Die Werte für die Gegenüberstellung sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Der arithmetische Mittelwert der absoluten Abweichung aller Spektren beträgt sowohl für die Temperaturkorrektur nach Norm [3] mit 0.03 dB/°C als auch für die spektrale Korrektur 0.15 dB. Mit einem Koeffizient von 0.05 dB/°C ergibt sich eine mittlere absolute Abweichung von 0.18 dB nach Anhang 1c [15]. Es zeigt sich kein signifikanter Unterschied der Restabweichung beim Gesamtpegel und die Unterschiede liegen innerhalb der Messgenauigkeit der Methode.

Die Differenzen der grössten und kleinsten Gesamtpegel jedes Reifen- und Belagstyps und deren arithmetische Mittelwerte unterscheiden sich ebenfalls nicht signifikant. Ein tendenzieller Unterschied lässt sich bei der Korrektur nach Norm erkennen: Die Verringerung des Koeffizienten von 0.05 dB/°C auf 0.03 dB/°C bewirkt für die im vorliegenden Projekt untersuchten Reifen/Fahrbahn-Kombinationen gesamtheitlich eine Verbesserung.

**Tab. 2** Gegenüberstellung Gesamtpegel-Korrektur nach Norm und spektral  
Norm 0.05: Korrektur nach [15] mit 0.05 dB/°C,  
Norm 0.03: Korrektur nach [3] mit 0.03 dB/°C.

Reifentyp Belag	P MR8	P MR8+	P PA8	H MR8	H MR8+	H PA8	Mittel wert
$L_{A,20m,20^{\circ}C}$ , dB(A)	95.6	94.0	93.5	96.2	95.9	94.0	-
Mittelwert Norm 0.05, dB(A)	95.6	93.4	95.8	94.4	96.2	94.0	-
Mittelwert Norm 0.03, dB(A)	95.7	93.4	95.8	94.4	96.2	94.0	-
Mittelwert spektral, dB(A)	95.7	94.4	93.4	96.2	95.8	94.0	-
mittl.Abw. Norm 0.05, dB(A)	0.27	0.13	0.08	0.34	0.09	0.08	0.18
mittl.Abw. Norm 0.03, dB(A)	0.17	0.14	0.14	0.25	0.07	0.05	0.15
mittl.Abw. spektral, dB(A)	0.16	0.22	0.22	0.08	0.10	0.05	0.15
Max – Min Norm 0.05, dB(A)	1.30	1.45	0.66	0.37	0.33	0.32	0.74
Max – Min Norm 0.03, dB(A)	0.88	1.02	0.65	0.31	0.53	0.21	0.60
Max – Min spektral, dB(A)	0.82	0.96	0.86	0.31	0.35	0.23	0.59

## 2.1.6 Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zu anderen Arbeiten, welche zahlreiche Messungen von verschiedenen Orten, auf verschiedenen Belägen und Belagsklassen unterschiedlichen Alters statistisch untersuchen und daraus Temperaturkoeffizienten ableiten, wurden hier drei Messstrecken innerhalb kurzer Zeit bei verschiedenen Temperaturen mit der gleichen Fahrgeschwindigkeit, der selben Messausrüstung und dem selben Messpersonal abgefahren. Unter diesen, abgesehen von der Temperatur, konstanten Randbedingungen konnte die reine Temperaturabhängigkeit besonders gut herausgearbeitet werden.

Dadurch, dass jeweils nur ein Abschnitt eines bestimmten Belagstyps gemessen wurde, sind die Ergebnisse nicht in dem Sinne auf die Gesamtheit aller Beläge einer Bauart oder gar auf alle Strassen übertragbar. Vielmehr war das Ziel dieser Untersuchung, den reinen

Einfluss der Temperatur auf die Rollgeräusche im Detail zu untersuchen, indem alle anderen Einflussgrößen möglichst konstant gehalten oder unterbunden wurden. Nur auf diese Weise liess sich die grundsätzliche bislang in der Praxis angewandte Art der Korrektur überprüfen. Hierbei wurde die generelle Modellformel mit einer linearen Abhängigkeit des energetisch gemittelten Schalldruckpegels von der Lufttemperatur bestätigt. Allerdings wird festgestellt, dass das Temperaturverhalten von

- der Frequenz,
- den Normmikrofonpositionen,
- den Normreifentypen und
- den Belagstypen

abhängig ist. Aus physikalischen Gründen sind diese Abhängigkeiten zu erwarten, denn zum einen ist die Anregung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs abhängig von der Frequenz und zum anderen ist der Reifen als visko-elastischer Körper in Kompositbauweise in seinen dynamischen Eigenschaften stark temperaturabhängig, was zur Folge hat, dass auch die Stärke der jeweiligen Anregung frequenzabhängig ist. Da die Anregung des Reifens auch vom Reifenprofil und von Oberflächeneigenschaften der Deckschicht abhängt und sich Einlauf und Auslauf des Reifens akustisch unterscheiden folgen daraus im Prinzip auch getrennte Koeffizienten für jeden Messreifen, die beiden Mikrofonpositionen und jeweils für offene und dichte Beläge.

Mit steigender Temperatur nimmt der Schalldruckpegel bei Frequenzen oberhalb des Energiemaximums deutlich ab, bei einer teilweisen Zunahme der Pegel beim Energiemaximum und niedrigeren Frequenzen. Diese gegenläufigen Temperaturabhängigkeiten kompensieren sich teilweise bei der Bildung des Gesamtpegels. Das vordere Mikrofon zeigt im energetisch bedeutsamsten Frequenzbereich den grösseren Temperatureffekt gegenüber dem hinteren Mikrofon. Im energetisch wichtigsten Bereich zwischen 800 Hz und 1250 Hz haben die Koeffizienten für beide Messreifen betragsmässig kleine Werte mit z.T. entgegengesetztem Vorzeichen.

Eine frequenzabhängige Korrektur gleicht den Temperatureffekt auf das akustische Spektrum deutlich besser aus, als eine nicht frequenzabhängige Korrektur, wie sie in den Normentwürfen vorgeschlagen wird. Allerdings sind die Unterschiede des Gesamtpegels bei der Anwendung der Korrekturen sehr gering und liegen trotz der prinzipiell hohen Wiederholgenauigkeit dieser Messungen im Rahmen der Messgenauigkeit. Die frequenzunabhängigen Temperaturkoeffizienten sind beim H-Reifen betragsmässig etwas grösser als beim P-Reifen, der Unterschied ist aber moderat. Daher wird von einer Unterscheidung nach dem Reifentyp abgesehen.

Es deutet sich aus der vorliegenden Untersuchung an, dass der in bisherigen Entwürfen zur ISO 11819-2 diskutierte Koeffizient von 0.03 dB/°C auf dichten und semiporösen Belägen eine praktikable Wahl darstellt, während auf offenporigem Belag der früher ebenfalls für die ISO11819-2 diskutierte Wert aus dem Anhang 1c [15] von 0.05 dB/°C besser geeignet ist. Allerdings stehen diese Werte im Widerspruch zu den Ergebnissen von Bühlmann und van Blokland [28], die für dichte Beläge einen Wert von 0.1 dB/°C gefunden haben. Die vorliegende Untersuchung in EP5 hat damit ein Problem bei der Festlegung von Temperaturkorrekturen für die CPX-Messung verdeutlicht, das gut mit der Literatur übereinstimmt: die Temperaturkorrektur ist sehr empfindlich gegenüber Unterschieden und Veränderungen in den Fahrbahnbelägen. Im EP5-Bericht und bei Bühlmann/Ziegler [18] wird übereinstimmend festgestellt, dass die Spektralanteile der Reifen-Fahrbahn-Geräusche im Frequenzbereich zwischen 630 Hz und 1'600 Hz die höchsten Beiträge zum A-bewerteten Schalldruckpegel des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs liefern (*Abb. 3 bis Abb. 6; Bühlmann/Ziegler: Figure 1*). Die frequenzabhängige Temperaturkorrektur ist jedoch gerade in diesem Frequenzbereich sehr unterschiedlich. Im vorliegenden Projekt ergeben sich für die ausgewählten Beläge und den Reifen P Einzelwerte zwischen +0.03 dB/°C und -0.12 dB/°C (*Abb. 7*), bei Bühlmann/Ziegler globale Mittelwerte zwischen -0.04 dB/°C und -0.13 dB/°C (*Figure 1*). Dies wirkt sich auch auf die für den A-bewerteten Gesamtpegel anzusetzende Temperaturkorrektur aus.

Bei Bühlmann/Ziegler ist nur der globale Mittelwert über alle Reifen/Fahrbahn/Geschwindigkeits-Kombinationen angegeben (*Table 3, Figure 1*) und nicht der Wertebereich, den die Einzelwerte umspannen. Deshalb geht aus dieser Veröffentlichung nicht hervor, dass es zwischen den Fahrbahnbelagstypen (dicht, semidicht oder offenporig), aber auch zwischen Fahrbahnbelägen gleichen Typs grosse Unterschiede der zutreffenden Temperaturkorrektur gibt, gerade in dem für den A-bewerteten Schalldruckpegel wichtigen Frequenzband. Diese Tatsache führt dann auch zu den grossen Wertebereichen der Temperaturkorrekturen wie sie oben beschrieben sind. Bei 1'000 Hz liegt ein steilflankiger Übergang vor (*Abb. 3 bis Abb. 6*), der die Temperaturkorrektur anfällig gegen Abweichungen der Fahrbahnoberflächeneigenschaften macht.

Die Einschränkung, die im Zusammenhang mit den vorliegenden Untersuchungen zu machen ist, ist die, dass jeweils nur ein Belag dreier unterschiedlicher Bauweisen in die Messungen einbezogen wurde. Damit kann keine Aussage zur Repräsentativität der Ergebnisse getroffen werden. Die abgeleiteten Temperaturkorrekturen sind mehr oder weniger zufällig. Sie kommen jedoch so auch in den von Bühlmann und van Blokland [28] angegebenen Wertebereichen der in der Literatur veröffentlichten Temperaturkorrekturen in Abhängigkeit vom Belagstyp vor und sind damit bestätigt. Es ist vielmehr festzustellen, dass es eine einzige end- und für alle Fahrbahnbeläge oder wenigstens alle Fahrbahnbeläge eines Typs allgemeingültige Temperaturkorrektur nicht geben kann. Selbst innerhalb von Bauweisen führen Unterschiede in den Oberflächeneigenschaften der realen Beläge zu Abweichungen der anzusetzenden Temperaturkorrektur. Insofern sind also nicht die in der Veröffentlichung von Bühlmann/van Blokland angegebenen Mittelwerte, sondern die in *Figure 1* in [18] eingetragenen Wertebereiche von ausschlaggebender Bedeutung für die Diskussion von Temperaturkorrekturen. Insgesamt ergibt sich für die A-bewerteten Gesamtpegel offenporiger Asphalte eine Spannweite von 0.02 dB/°C bis 0.1 dB/°C und für dichte Fahrbahnbeläge von 0.05 dB/°C bis 0.16 dB/°C.

Die Festlegung von Temperaturkorrekturen im Regelwerk bleibt damit immer ein Kompromiss. Die für eine spezifische Reifen/Fahrbahn/Geschwindigkeits-Kombination einer CPX-Messung gültige Temperaturkorrektur kann von einer festgelegten mittleren Temperaturkorrektur mehr oder weniger abweichen. Temperaturkorrekturen sollten daher regelmässig, besonders bei Einführung neuer Bauweisen oder Änderungen des bautechnischen Regelwerks, überprüft werden.

## 2.2 CPX-Schalldruckpegel als Funktion der Fahrgeschwindigkeit

### 2.2.1 Ausgangslage

Die Schalldruckpegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche sind stark von der Fahrgeschwindigkeit abhängig. Aus diesem Grund sind im Normenentwurf ISO/DIS 11819-2 Referenzgeschwindigkeiten angegeben, bei denen CPX-Messungen durchgeführt werden sollen (40 km/h, 50 km/h, 80 km/h und 100 km/h). So soll sichergestellt werden, dass die Datensätze unterschiedlicher Strecken und Messkampagnen alle bei denselben Referenzgeschwindigkeiten erhoben werden und so einfach miteinander verglichen werden können. CPX-Messungen erfolgen in der Schweiz aber bei Fahrtgeschwindigkeiten von 30 km/h, 50 km/h oder 80 km/h. Allerdings kann die Referenzgeschwindigkeit nicht in jedem Fall genau eingehalten werden. Aufgrund der starken Abhängigkeit der Schalldruckpegel von der tatsächlichen Geschwindigkeit muss der ermittelte Schalldruckpegel für geringe Abweichungen der Messgeschwindigkeit von der Referenzgeschwindigkeit mit einer Korrektur verrechnet werden. Der Normenentwurf [3] gibt für die Berechnung der Geschwindigkeitskorrektur  $c_v$  in Dezibel folgenden Zusammenhang an:

$$\text{Formel 2} \quad c_v = B \cdot 10 \lg \left( \frac{v}{v_{ref}} \right) \quad [dB]$$

Dabei ist  $v$  die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit und  $v_{ref}$  die Referenzgeschwindigkeit. Der Faktor  $B$  ist als Geschwindigkeitskonstante gemäss älteren Normentwürfen der ISO 11819-2 auf einen Wert von 35 festgelegt. Nach der ISO/DIS 11819-2 von 2012 können Geschwindigkeitskoeffizienten zwischen 20 und 40 auftreten und es werden belagsspezifische Empfehlungen gegeben:  $B=25$  auf offenporigen Deckschichten, die kaum oder gar nicht verschmutzt sind;  $B=30$  auf verschmutzten porösen, semi-porösen oder dichten

Belägen und  $B=35$  auf nicht-porösen Betonfahrbahnen. Physikalisch bietet sich ein logarithmischer Ansatz an, denn die Stärke der Anregung geht je nach Mechanismus mit einer unterschiedlichen Potenz der Geschwindigkeit ein (Reifeneigenschwingungen  $\sim v^2$ , Air-Pumping  $\sim v^4$ , Windgeräusche  $\sim v^6$ ). Ein Geschwindigkeitskoeffizient  $B$  steht somit für die effektive (gemittelte) Anregungspotenz multipliziert mit Faktor 10.

Es muss festgehalten werden, dass oben genannte Koeffizienten empirischer Natur sind und für ein mittleres Reifenkollektiv gelten. Es wird bei einer so durchgeführten Geschwindigkeitskorrektur weder der Tatsache Rechnung getragen, dass mit den Messreifensätzen P und H zwei völlig unterschiedliche Reifentypen zum Einsatz kommen, noch dass je nach Fahrbahnbelag und Geschwindigkeitsbereich unterschiedliche Anregungsmechanismen für das Reifen-Fahrbahn-Geräusch verantwortlich sind. Deshalb wurde der Geschwindigkeitsabhängigkeit an unterschiedlichen Reifen und Fahrbahnbelagstypen in systematischen Untersuchungen nachgegangen.

## 2.2.2 Durchführung der Messungen

Zur Entwicklung eines auf die beiden Teststreifen P und H zugeschnittenen Zusammenhangs zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Reifen-Fahrbahn-Geräusch wurden zahlreiche Messungen durchgeführt. Auf geeigneten Streckenabschnitten wurden in einem Geschwindigkeitsbereich von 25 km/h bis 85 km/h in Abstufungen von 5 km/h Schritten CPX-Messungen vorgenommen. Für jede Geschwindigkeit und jeden Reifen wurde die Messung 1- bis 2-mal wiederholt. Die Messungen wurden auf zwei dichten, einem semi-porösen und zwei offenporigen Fahrbahnbelägen mit jeweils beiden Messreifen durchgeführt und getrennt nach Mikrofonposition (vorne, hinten) ausgewertet. Insgesamt ergeben sich so 468 Messfahrten. Aus den Ergebnissen kann eine Geschwindigkeitskorrektur erarbeitet werden, die im Vergleich zum bisher bekannten Zusammenhang genauer ist.

### Messstrecken

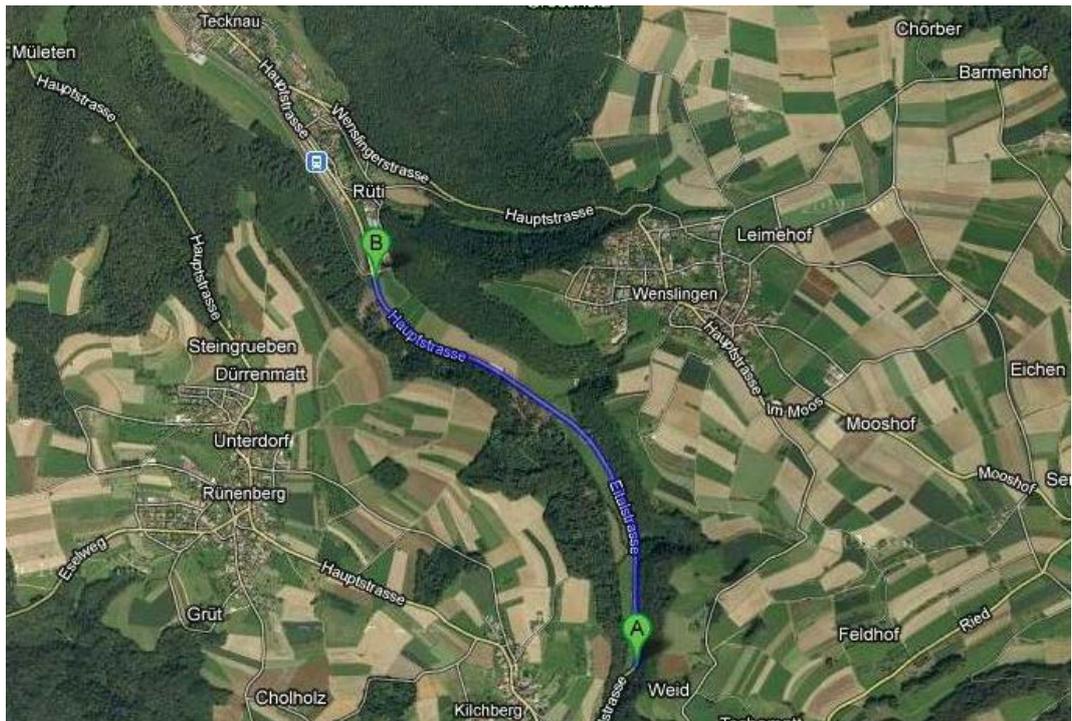
Zunächst wurde nach geeigneten Teststrecken gesucht. Diese müssen eben sein und zulässige Messgeschwindigkeiten zwischen 25 km/h und 85 km/h erlauben und dies möglichst ohne Absicherung durch zusätzliches Personal. Aussichtsreich erscheinen verkehrsarme Strassen ausserorts, bevorzugt in ländlichen Gebieten. Praktische Gesichtspunkte, wie gute Wendemöglichkeiten und leichte Erreichbarkeit spielen ebenfalls eine Rolle.

Im Sommer 2011 wurden verschiedene Experten bei Bauämtern nach geeigneten Messstrecken für das beabsichtigte Messprogramm befragt und aus den zahlreichen Antworten eine Auswahl unter den prinzipiell geeigneten Strecken getroffen. In Tab. 3 sind die Messstrecken aufgelistet. Selbst nach einer erneuten intensiven Suche im Jahr 2013 wurde nur ein eingebauter semiporöser Belag gefunden. Die rechte Spalte beschreibt die Eignung der Strecke für die Messung des Schalldruckpegels als Funktion der Temperatur  $L(T)$  und der Geschwindigkeit  $L(V)$ .

Die erste Messstrecke liegt im Kanton Basel-Landschaft auf dem Grund der Gemeinden Tecknau und Kilchberg und folgt im Eital von Kilchberg (Eitalstrasse) dem Eibach entlang bis zum Ortseingang von Tecknau (siehe Abb. 11). Auf der etwa 2.1 km langen Strecke wurde im Jahr 2010 ein SMA 11 Belag eingebaut (Abb. 12, Tab. 3).

**Tab. 3** Messstrecken für die CPX-Messungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten; Eignung bezieht sich auf CPX-Messungen als Funktion der Lufttemperatur  $T$  und der Geschwindigkeit  $v$ .

Strasse, Ort	Belag	Art	Baujahr	Eignung
Tecknau-Kilchberg, (BL, Tecknau)	SMA11	dicht	2010	$L(T)$ , $L(V)$
Aaretalstrasse T5 (AG, Aarau)	ACMR8	dicht	2011	$L(T)$ , $L(V)$
Aaretalstrasse T5 (AG, Aarau)	ACMR8+	semiporös	2011	$L(T)$ , $L(V)$
Lausen-Sissach H2 (BL)	PA8	offenporig	2010	$L(T)$ , $L(V)$
Lausen-Sissach H2 (BL)	PA11	offenporig	2010	$L(T)$ , $L(V)$



**Abb. 11** Messstrecke Tecknau.



**Abb. 12** Detail der Belagsoberfläche.

Auf der kantonalen Aaretalstrasse T5 in Aargau zwischen Aarau und Hunzenschwil ist ein Probefeld mit zwei Belägen direkt nach einander eingebaut. Bei einer Messfahrt wurden 175 m eines dichten ACMR8 und 225 m eines semiporösen ACMR8+ Belags erfasst, siehe *Abb. 13*.



**Abb. 13** Messstrecke Aaretalstrasse mit MR8+ zwischen A und B und MR8 zwischen B und C.

Die dritte Messstrecke befindet sich ebenfalls im Kanton Basel-Landschaft. Auf der kantonalen Hochleistungsstrasse H2 zwischen Lausen und Sissach bei Itingen (Abb. 14) befindet sich ein Belagswechsel zweier offenporiger Asphalte mit Grösstkorn 8 und 11 mm, von denen jeweils etwa 300 m gemessen wurden.



**Abb. 14** Messstrecke bei Lausen mit PA8 zwischen A und B und PA11 zwischen B und C.

Die unterschiedlichen Abschnittslängen haben keinen signifikanten Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten der Rollgeräusche. Der lange Abschnitt bei Tecknau weist eine hinreichend hohe akustische Konstanz auf.

### Zeitraum und meteorologische Bedingungen der Messreihen

Die erste Messserie bei Tecknau wurde im Herbst 2011 ausgeführt, die restlichen im Jahr 2013. Zum Zeitpunkt der Messungen war es jeweils niederschlagsfrei und die Fahrbahnen trocken. Auch an den Tagen vor den Messungen waren keine Niederschläge zu verzeichnen, so dass davon auszugehen ist, dass sich keine Restfeuchtigkeit in den Hohlräumen der Beläge befand, die die Messergebnisse hätten beeinflussen können. Messzeitpunkte, Luft- und Fahrbahntemperaturen sind in Tab. 4 aufgeführt.

Damit sich die Messfahrten und der Verkehr möglichst wenig behindern, wurden die Messungen überwiegend nachts durchgeführt. Zusätzlich fuhr bei den langsamen Geschwindigkeiten unter 60 km/h ein Sicherungsfahrzeug der NSNW mit etwas Abstand hinter dem Messzug.

**Tab. 4** Zeitraum und Witterungsbedingungen (Lufttemperatur  $T_L$  und Fahrbahn-temperatur  $T_{Fb}$ ).

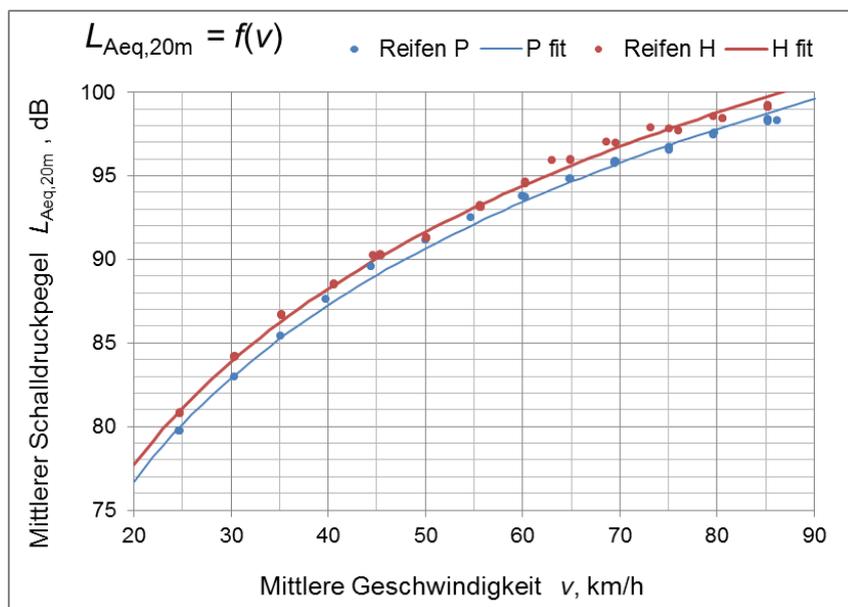
Datum	Messstrecke	Reifen	Zeitraum	$T_L$ , °C	$T_{Fb}$ , °C
12.08.2011	Tecknau	H	20:05 – 23:10	18 – 23	19 – 29
13.08.2011	Tecknau	H, P	11:55 – 18:35	23 – 27	19 – 39
23. – 24.04.2013	Aaretalstrasse	P	21:15 – 02:20	6 – 12	4 – 10
24. – 25.04.2013	Aaretalstrasse	H	22:00 – 01:40	10 – 14	9 – 14
12. – 13.08.2013	H2 Sissach	P	21:40 – 00:55	16 – 20	15 – 20
13.08.2013	H2 Sissach	H	01:40 – 04:20	16 – 19	14 – 19

### Störgeräusche

Störgeräusche, beispielsweise durch besonders laute vorbeifahrende Lastwagen, Bahnverkehr etc. sind während der Messungen nicht aufgetreten.

### 2.2.3 Ergebnisse

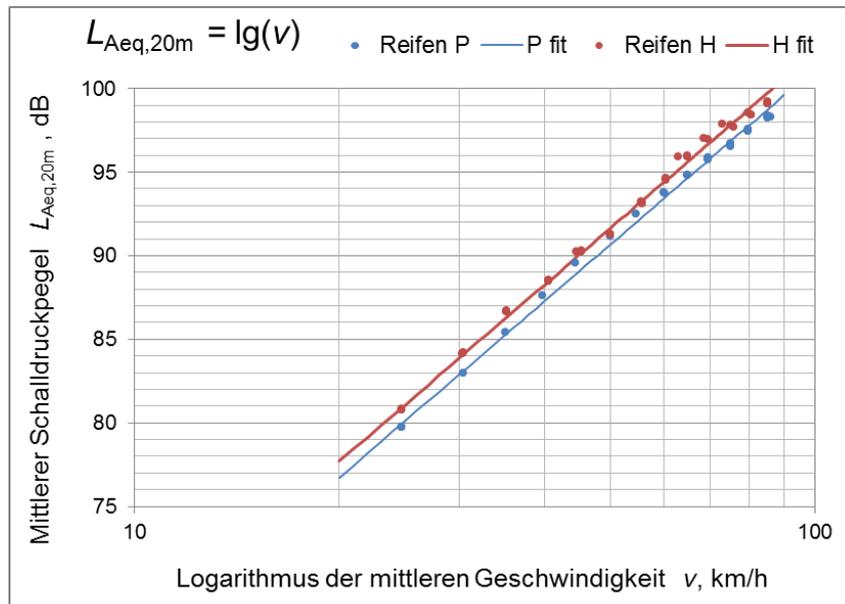
Bei der Analyse der Daten werden zunächst die gemittelten Gesamtpegel der Messfahrten, anschliessend die Terzpegel betrachtet. In Abb. 15 sind die einzelnen gemittelten Gesamtschalldruckpegel jeder Fahrt über die gemittelte Geschwindigkeit samt Ausgleichskurve für beide Reifen der Messstrecke bei Tecknau aufgetragen.



**Abb. 15** Gemittelter Schalldruckpegel  $L_{Aeq,20m}$  als Funktion der Geschwindigkeit, Messreifen P und H, Messstrecke bei Tecknau, SMA11.

Die Ausgleichskurven wurden gemäss der geltenden Geschwindigkeitskorrektur mit einem Geschwindigkeitskoeffizienten  $B = 35$  an die Messpunkte angepasst. Im Groben nähern sich die Kurven den Messdaten an. Im Detail und bei der logarithmischen Auftragung über der Geschwindigkeit in Abb. 16 lassen sich allerdings bereits an diesem Bei-

spiel Abweichungen erkennen, welche diese Art der Korrektur nicht zu berücksichtigen vermag. Über den erfassten Geschwindigkeitsbereich bilden die Datenpunkte des P-Reifens in der doppel-logarithmischen Darstellung keine Gerade und liegen im mittleren Geschwindigkeitsbereich über der Ausgleichskurve/gerade.



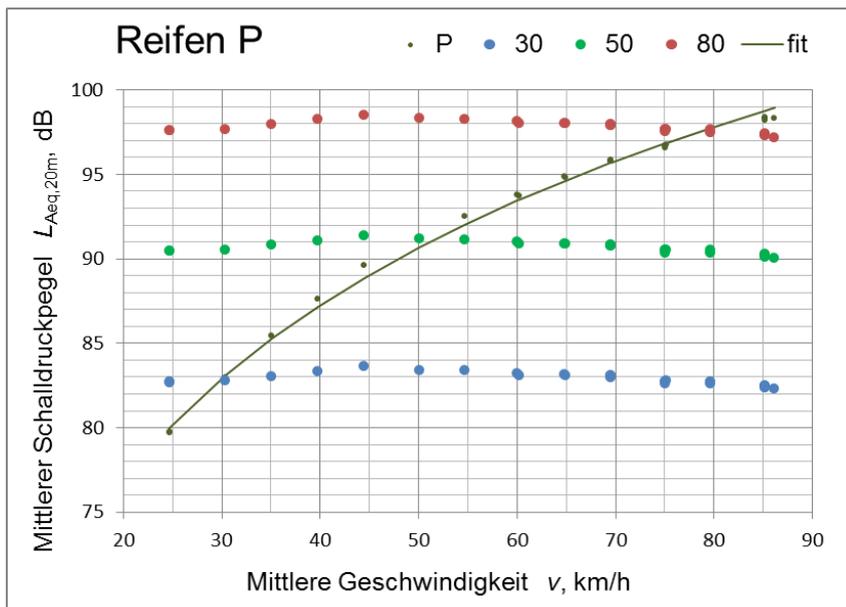
**Abb. 16** Gemittelter Schalldruckpegel  $L_{Aeq,20m}$  als Funktion des Logarithmus der Geschwindigkeit, Messreifen P und H, Messstrecke bei Tecknau, SMA11.

In *Abb. 17* und *Abb. 18* sind, getrennt für beide Reifen, alle Messpunkte auf jeweils drei Referenzgeschwindigkeiten 30, 50 und 80 km/h mit der oben genannten Geschwindigkeitskorrektur umgerechnet und dargestellt. Üblicherweise würde man die Werte nicht über so grosse Bereiche „korrigieren“. Im Idealfall liegen die korrigierten Werte auf einer Waagrechten, welche die Ausgleichskurve bei der jeweiligen Referenzgeschwindigkeit schneidet. In diesem Fall ergäben sich drei parallel versetzte, nahezu waagrechte Punktlinien, weil die Korrektur in allen Geschwindigkeitsbereichen dieselbe ist.

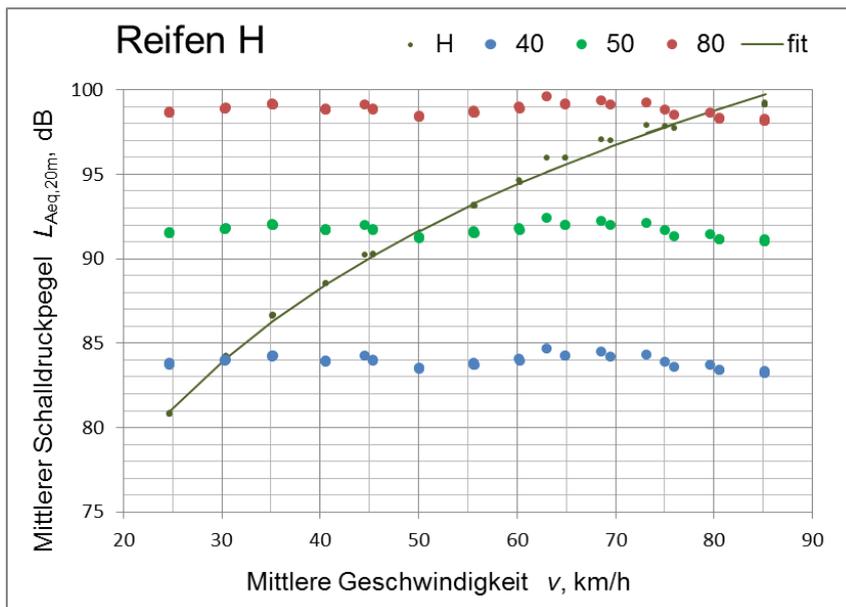
Bei der *Abb. 17* (Reifen P) lässt sich ein Knick bei etwa 45 km/h erkennen. Der untere Geschwindigkeitsbereich steigt stärker an und bedarf eines grösseren Geschwindigkeitskoeffizienten  $B > 35$ . Dahingegen fällt der obere Bereich über 45 km/h leicht ab und wäre mit einem kleineren Koeffizienten  $B$  besser kompensiert.

Bei Reifen H in *Abb. 18* lässt sich ebenfalls ein Knick bei 50 km/h erkennen. Allerdings verlaufen die Punkte in den jeweiligen Bereichen darüber und darunter nicht geradlinig. Bereits bei der Betrachtung der Gesamtpegel deutet sich an, dass der physikalische Zusammenhang zwischen dem Schalldruckpegel des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs und der Geschwindigkeit komplexer ist als nach Formel 2.

Das Ziel dieser Untersuchung einer genaueren Geschwindigkeitskorrektur hat zwei Aspekte: Zum einen soll die Empfindlichkeit der CPX-Messung für geringe, aber praxisübliche Abweichungen von einer nominellen Fahrgeschwindigkeit und zum anderen eine Vergleich- und Umrechenbarkeit von CPX-Ergebnissen, die aus Messungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten gewonnen werden, erarbeitet werden.



**Abb. 17** Gemittelter Schalldruckpegel  $L_{Aeq,20m}$  als Funktion der Geschwindigkeit zusammen mit drei Umrechnungen auf die Geschwindigkeiten 30, 50 und 80 km/h nach der geltenden Korrekturformel Formel 2 mit  $B=35$ , Messreifen P, Messstrecke bei Tecknau, SMA11.



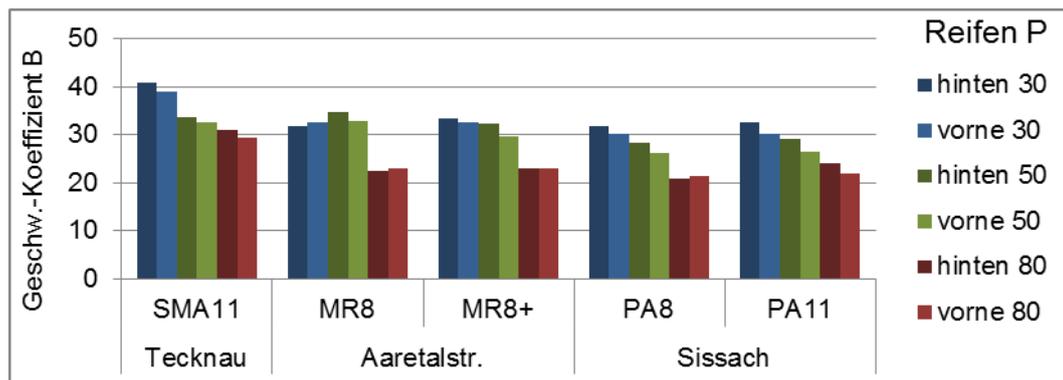
**Abb. 18** Gemittelter Schalldruckpegel  $L_{Aeq,20m}$  als Funktion der Geschwindigkeit zusammen mit drei Umrechnungen auf die Geschwindigkeiten 30, 50 und 80 km/h nach der geltenden Korrekturformel Formel 2 mit  $B=35$ , Messreifen H, Messstrecke bei Tecknau, SMA11.

### Sensitivitätsanalyse geringer Abweichungen von einer Referenzgeschwindigkeit

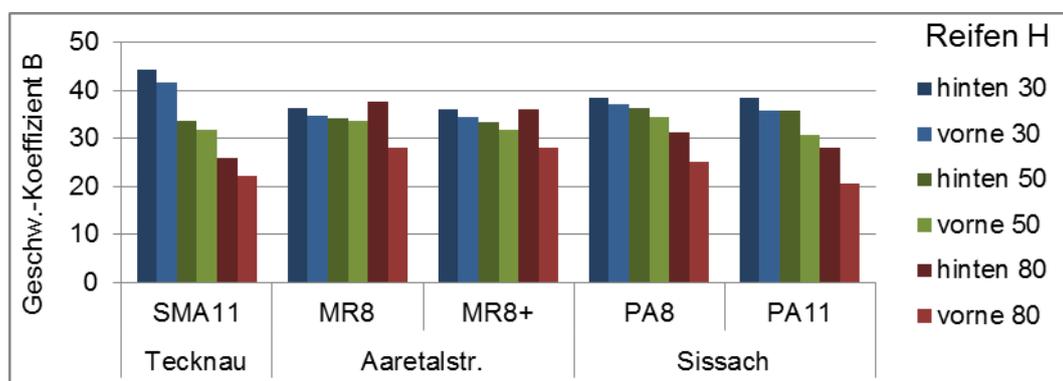
CPX-Messungen können einerseits nicht mit der jeweiligen mathematisch exakten Referenzgeschwindigkeit, andererseits nicht immer mit konstanter Geschwindigkeit durchgeführt werden. Gemäss Formel 2 führt bereits eine Geschwindigkeitsabweichung von 3% zu einem Pegelunterschied von knapp 0.5 dB.

Da die Messungen in der vorliegenden Untersuchung mit einer feinen Abstufung von 5 km/h erfolgten, können die Abweichungen, die sich durch das Nichteinhalten einer Referenzgeschwindigkeit ergeben, direkt angegeben werden. Allerdings ist deren Vergleichbarkeit durch die starke Auswirkung bereits geringfügig unterschiedlicher tatsächlicher Messgeschwindigkeiten nicht gegeben. Zudem sind aufgrund der konstanten Abstufung die relativen Geschwindigkeitsunterschiede bei den drei Referenzgeschwindigkeiten nicht gleich.

Für eine Vergleichbarkeit über alle Messstrecken und Referenzgeschwindigkeiten wurden „lokale“ Geschwindigkeitskoeffizienten  $B$  für Nominalgeschwindigkeiten von  $80 \pm 5$  km/h,  $50 \pm 5$  km/h und  $30 \pm 5$  km/h berechnet und in *Abb. 19* und *Abb. 20* für die vordere und hintere Mikrofonposition separat dargestellt.



**Abb. 19** „Lokale“ Geschwindigkeitskoeffizienten  $B$  für Reifen P, die Referenzgeschwindigkeiten 80, 50 und 30 km/h, getrennt für Mikrofonposition vorne und hinten.



**Abb. 20** „Lokale“ Geschwindigkeitskoeffizienten  $B$  für Reifen H, die Referenzgeschwindigkeiten 80, 50 und 30 km/h, getrennt für Mikrofonposition vorne und hinten.

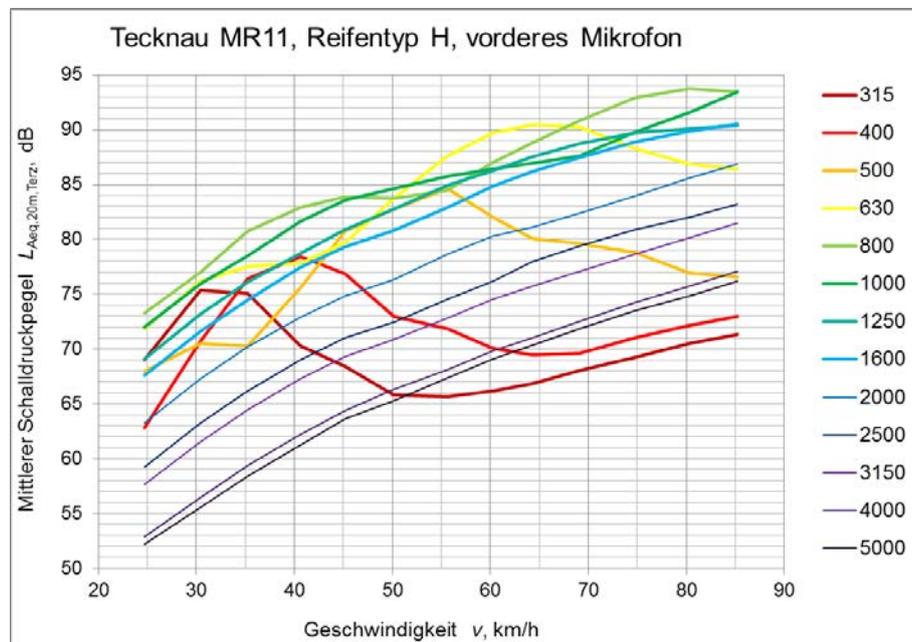
Mit wenigen Ausnahmen zeichnet sich in allen Fällen ab, dass der Geschwindigkeitskoeffizient  $B$  mit steigender Geschwindigkeit abnimmt. An der hinteren Mikrofonposition sind die Koeffizienten tendenziell grösser als an der vorderen, wobei die Unterschiede beim P-Reifen durchweg gering sind und beim H-Reifen auch grössere vorkommen. Abgesehen von dem groben dichten Belag in Tecknau, ähneln sich die Koeffizienten der verschiedenen Belagstypen. Beim P-Reifen sind sie für 80 km/h und 30 km/h sogar auf demselben Niveau; die offenporigen sind bei 50 km/h etwas niedriger. Beim H-Reifen sind die Verhältnisse ähnlich, allerdings ist die Bandbreite insgesamt etwas grösser.

### Vergleichbarkeit bei unterschiedlichen Referenzgeschwindigkeiten

Um CPX-Ergebnisse über einen weiten Geschwindigkeitsbereich umrechnen und vergleichen zu können, muss der physikalische Zusammenhang zwischen dem Schalldruckpegel der Reifen-Fahrbahn-Geräusche und der Geschwindigkeit untersucht werden.

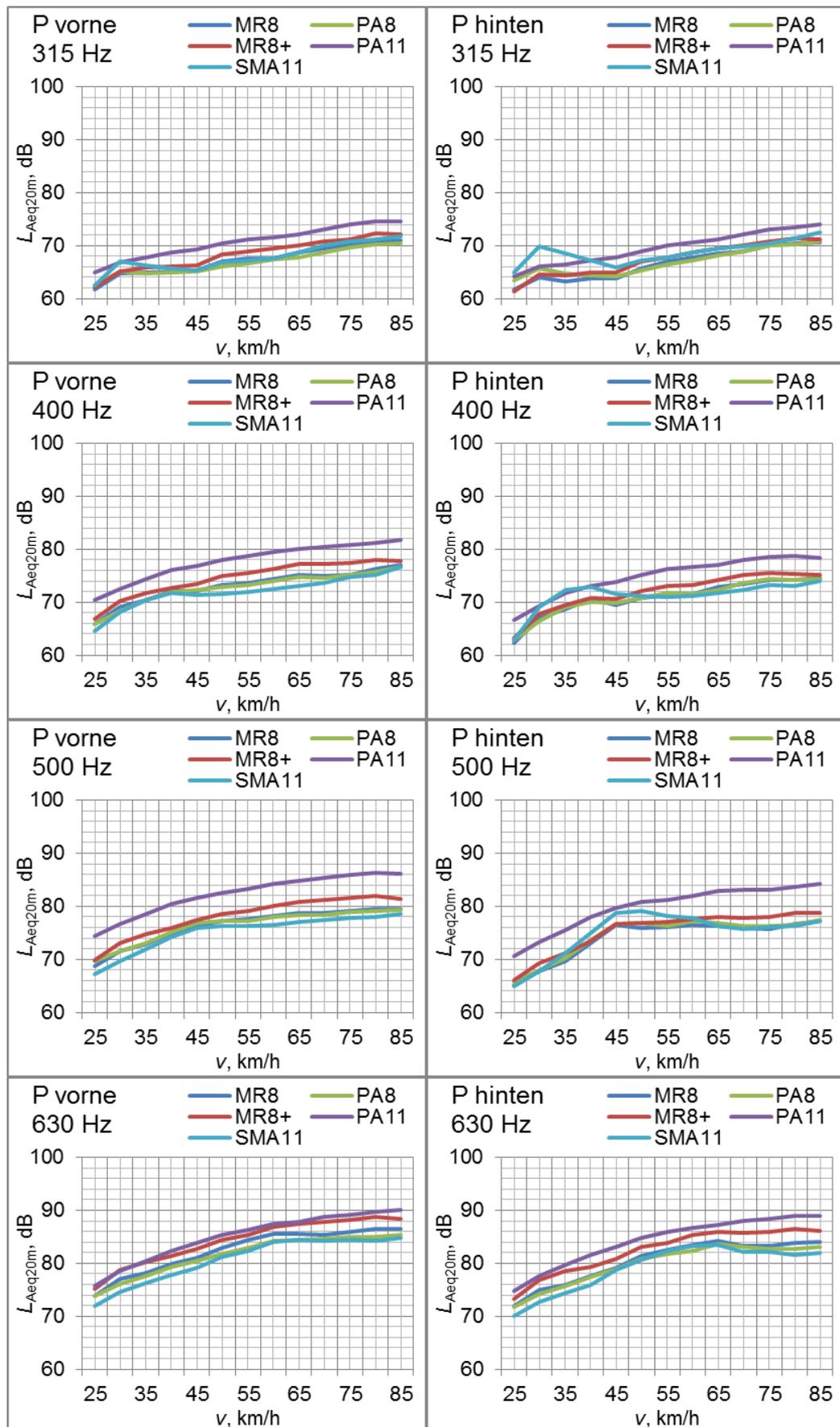
Ermittelt man den mittleren Schalldruckpegel nicht nur als Funktion der Fahrgeschwindigkeit, sondern auch für verschiedene Frequenzbänder, zeigt sich eine deutliche Frequenzabhängigkeit, siehe *Abb. 21*. Dies deutet auf die frequenzabhängigen Mechanismen der Schallentstehung hin und darauf, dass die übliche Geschwindigkeitskorrektur nur in erster Näherung die physikalischen Prozesse der Schallentstehung berücksichtigt.

Aus *Abb. 21* geht hervor, dass bis zu einer Terzmittenfrequenz von 800 Hz eine mit der zunehmenden Geschwindigkeit einhergehende Umverteilung der Schallenergie von tiefen zu höheren Frequenzbändern stattfindet. Dieser Effekt hängt also eindeutig mit der Geschwindigkeit und dementsprechend mit der Drehzahl des Reifens zusammen und ist damit der mechanischen Rollgeräuschenentstehung zuzuordnen. Wesentlich dabei ist, dass der Schalldruckpegel in bestimmten Terzen aufgrund der spektralen Umverteilung der Schallenergie mit zunehmender Geschwindigkeit auch wieder abnehmen kann. In den Terzbändern oberhalb von 800 Hz Mittenfrequenz nimmt der Schalldruckpegel mit der Geschwindigkeit stetig zu. Bei diesen Frequenzen ist die Rollgeräuschenentstehung nur noch bestimmt durch aerodynamische Vorgänge im Reifen-Fahrbahn-Kontakt.



**Abb. 21** A-bewertete Terzpegel  $L_{Aeq,20m, Terz}$  als Funktion der Geschwindigkeit  $v$ , Messreifen H, Messstrecke bei Tecknau, SMA11 (die Mikrofonaufnahmen vor und hinter dem Reifen wurden gemittelt).

Vergleiche der geschwindigkeitsabhängigen Terzpegel der verschiedenen Messstrecken zeigen in den unteren Terzen bis etwa 1 kHz Anregungen der Messreifen. Spektrale Lage und Form der Anregung sind nahezu unabhängig vom Fahrbahnbelag, teilweise sogar deren Pegel! Beim Messreifentyp H (*Abb. 23*) sind diese deutlich ausgeprägter als beim Reifentyp P (*Abb. 22*). Ihr Einfluss auf die hintere Mikrofonposition ist etwas grösser als auf die vordere und nimmt oberhalb von 1 kHz auch beim H-Reifen ab. Die mittleren Geschwindigkeiten der Anregungen steigen mit jeder Terz an. Das Verhältnis  $f_{Terz} / v_{res}$  der Terzmittenfrequenz  $f_{Terz}$  zur mittleren Geschwindigkeit  $v_{res}$  ist konstant. Das Produkt dieses Verhältnisses mit dem Umfang  $U$  des jeweiligen Messreifens ergibt die Anzahl  $N$  der Profilblöcke des Reifens, siehe *Tab. 5*. Diese mechanische Anregung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche geht somit mit dem periodischen Eintritt und Austritt der Profilblöcke in die Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche einher und ist somit auf Eigenschaften der Reifen zurückzuführen.



**Abb. 22** Terzpegel  $L_{Aeq,20m}$  für 315 Hz bis 1000 Hz als Funktion der Geschwindigkeit  $v$  für verschiedene Beläge, Reifen  $P$ , links vordere und rechts hintere Mikrofonposition.

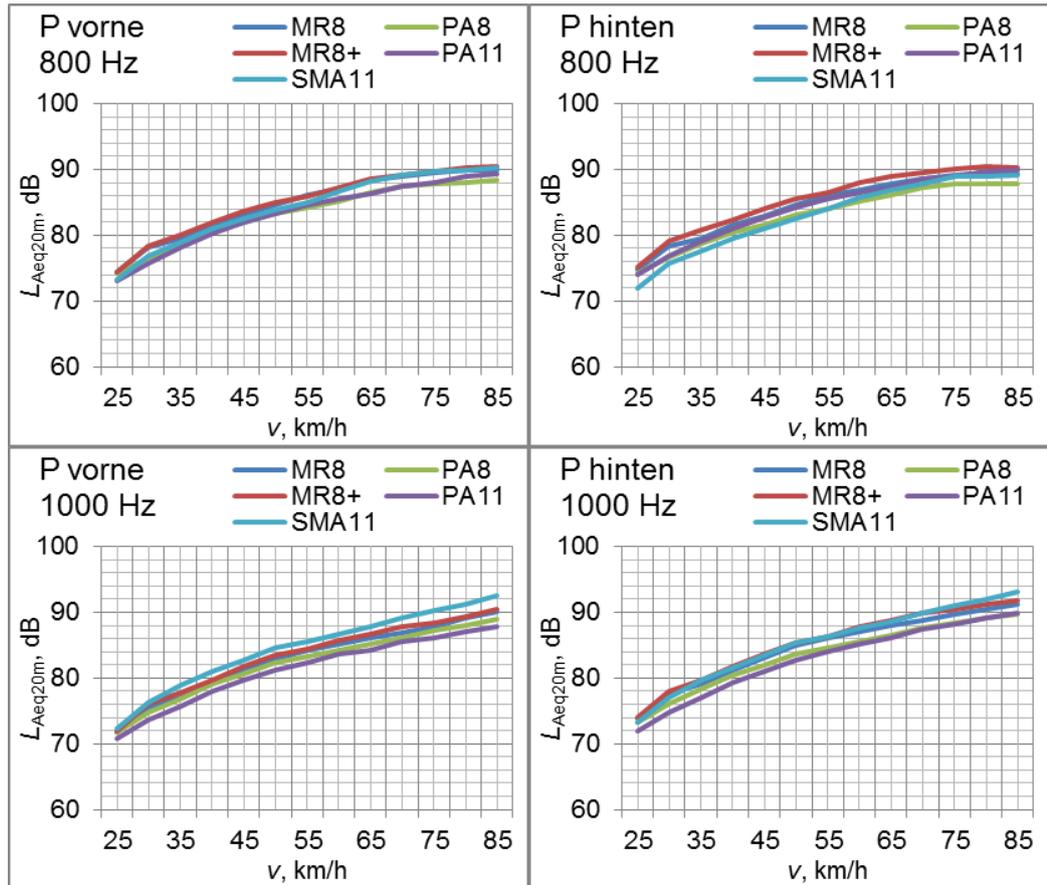
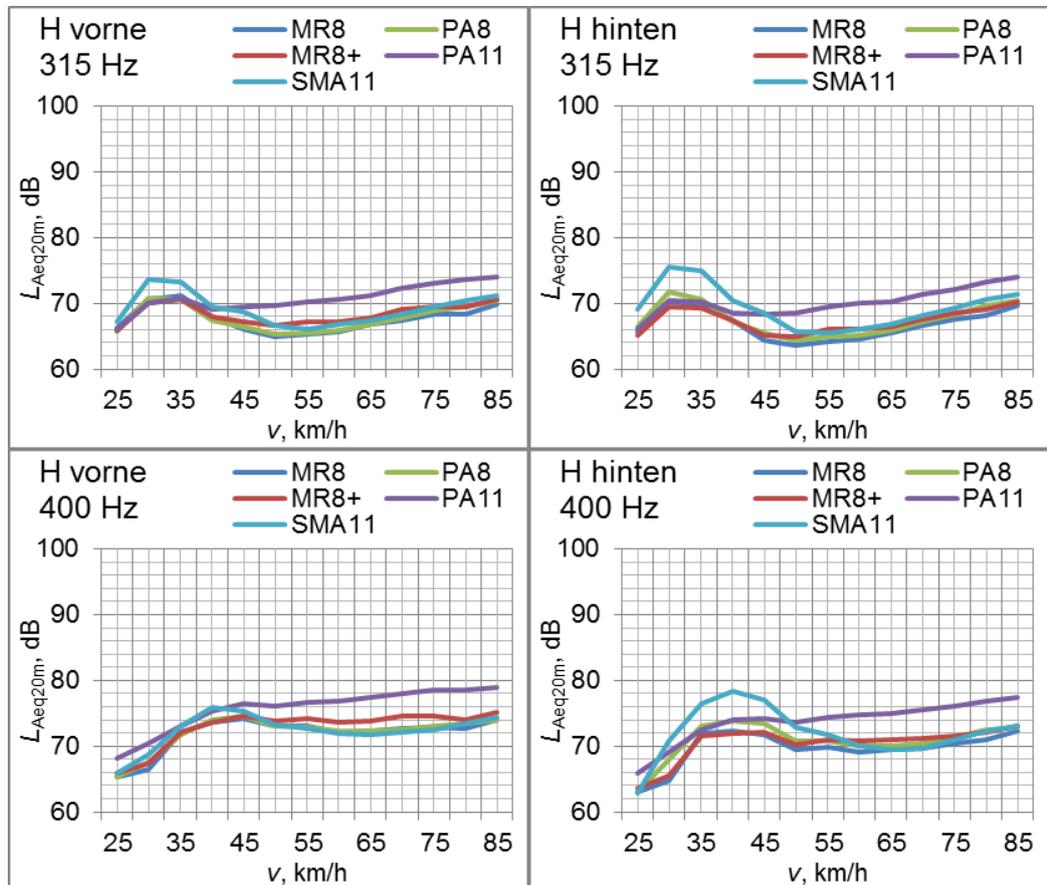
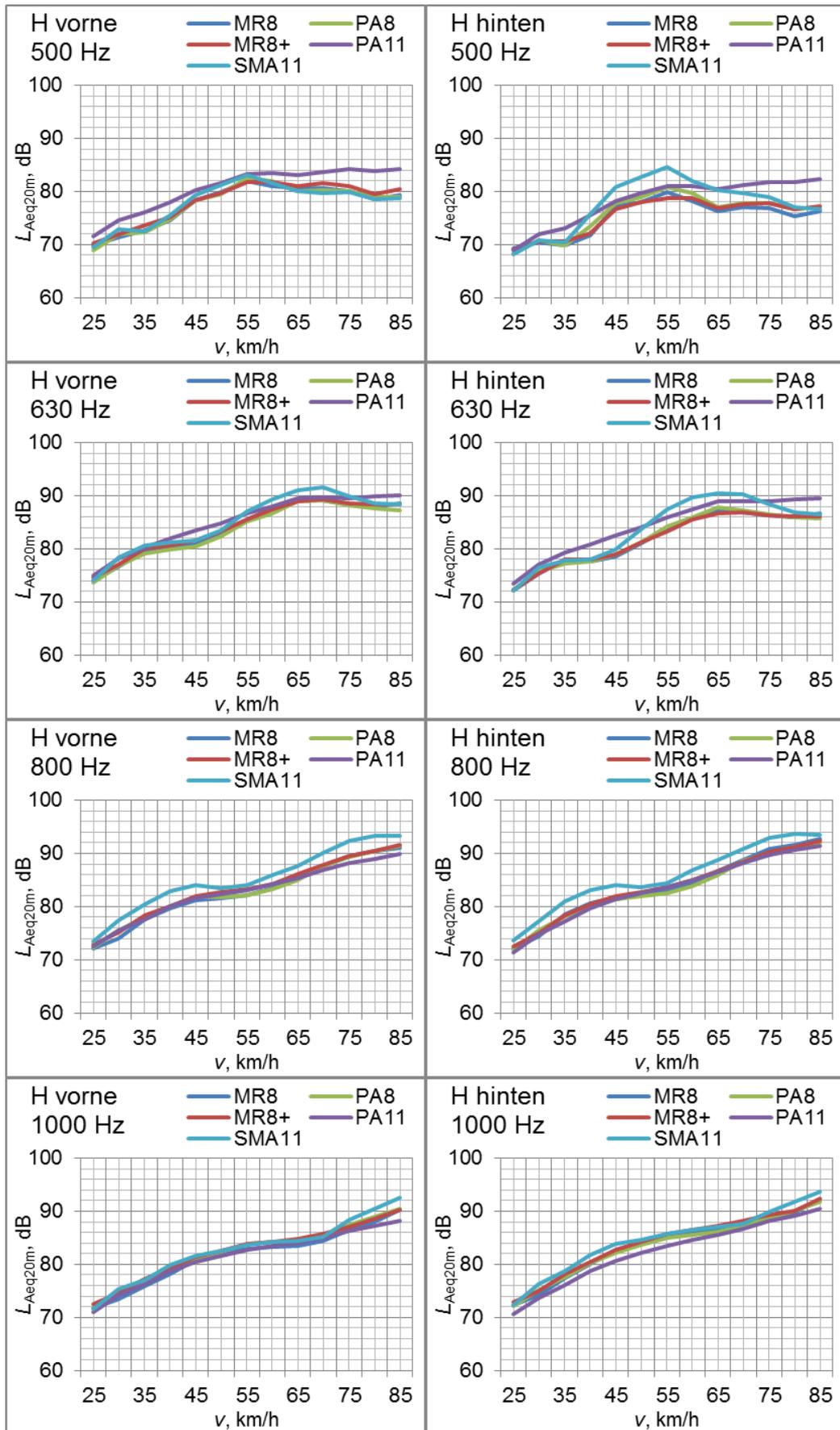


Abb. 22 (Forts.) Terzpegel  $L_{Aeq,20m}$  für 315 Hz bis 1000 Hz als Funktion der Geschwindigkeit für verschiedene Beläge, Reifen P, links vordere und rechts hintere Mikrofonposition.





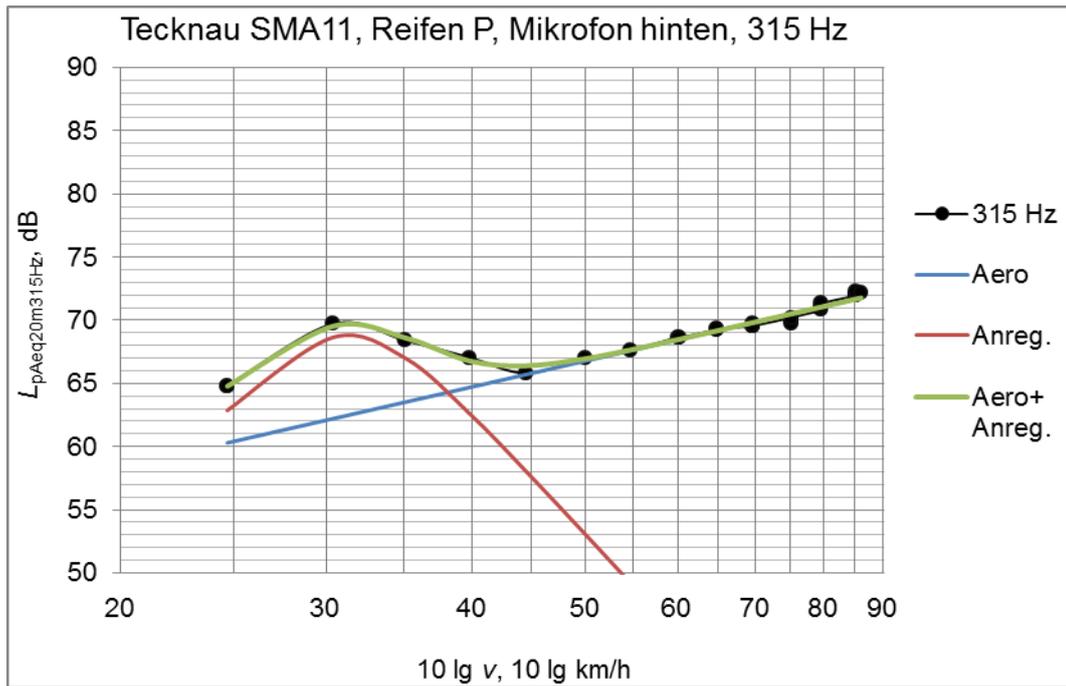
**Abb. 23** Terzpegel  $L_{Aeq20m}$  für 315 Hz bis 1000 Hz als Funktion der Geschwindigkeit  $v$  für verschiedene Beläge, Reifen H, links vordere und rechts hintere Mikrofonposition.

**Tab. 5** Reifenspezifisches Spektrum der mechanischen Geräuschanregung mit der Fahrgeschwindigkeit  $v_{\text{anr}}$  bei bestimmten Terzfrequenzen  $f_{\text{Terz}}$ .

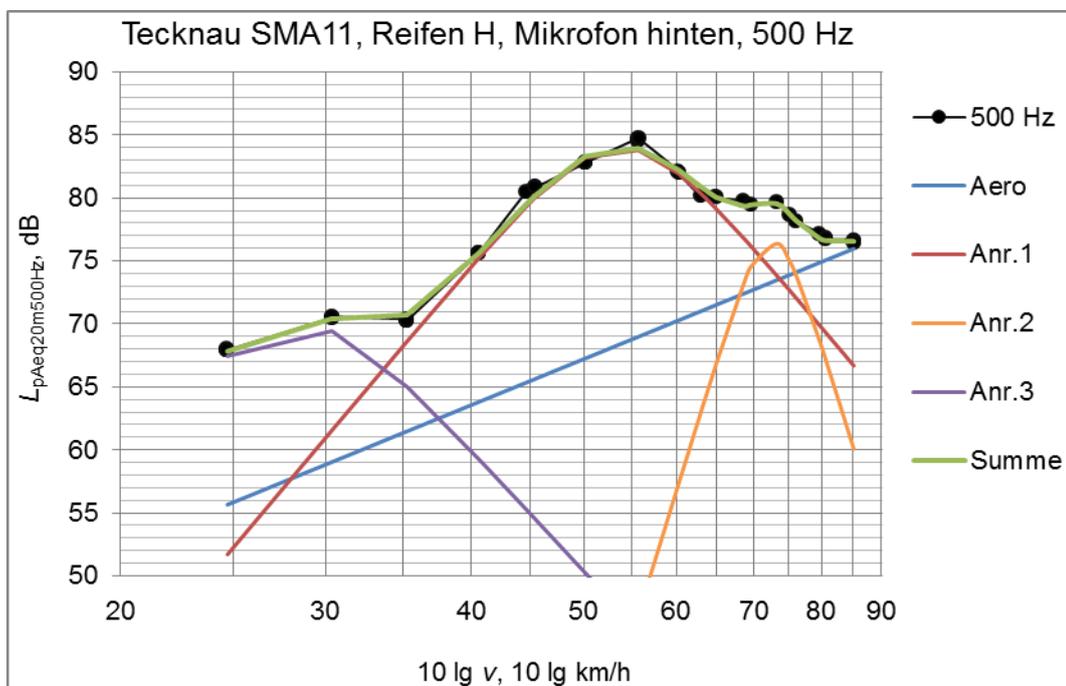
$f_{\text{Terz}}$ Hz	$v_{\text{anr}}$ P km/h	$v_{\text{anr}}$ H1 km/h	$v_{\text{anr}}$ H2 km/h	$f_{\text{Terz}}/v_{\text{anr}}$ P 1/m	$f_{\text{Terz}}/v_{\text{anr}}$ H1 1/m	$f_{\text{Terz}}/v_{\text{anr}}$ H2 1/m
315	31	32	-	36.6	35.4	-
400	37	41	-	38.9	35.1	-
500	46	54	-	39.1	33.3	-
630	62	65	33	36.6	34.9	68.7
800	-	82	41	-	35.1	70.2
1000	-	-	54	-	-	66.7
Mittelwert $f_{\text{Terz}}/v_{\text{res}}$ , 1/m				37.8	34.8	68.5
Faktor 1/2 für Harmonische						34.3
Reifenumfang $U$ , m				2.14	2.09	2.09
$N_{\text{Profilblöcke}} = f_{\text{Terz}}/v_{\text{anr}} \cdot U$				80.9	72.7	71.6
$N_{\text{Profilblöcke}}$ tatsächlich				81	72	72

Um diese komplexe Geschwindigkeitsabhängigkeit der Terzpegel beschreiben zu können, muss ein Modell zugrunde gelegt werden, das die aerodynamischen und mechanischen Anteile separat berücksichtigt. In *Abb. 24* ist ein solches Modell exemplarisch an den 315 Hz Terzpegel des Reifentyps P an der hinteren Mikrofonposition der Messserie bei Tecknau (SMA11) angepasst. Die Summenkurve lässt sich hierbei bereits mit einer mechanischen Anregung alleine gut an die Messdaten anpassen. Ohne Abweichungen ist das nicht bei jeder Terz der Fall, wie in *Abb. 25* zu sehen ist. Um den 500 Hz Terzpegel für den H-Reifen an der hinteren Mikrofonposition auf dem SMA11 modellieren zu können sind drei mechanische Anregungskomponenten zu berücksichtigen. Die Anregungen bei 54 km/h und 28 km/h sind direkt auf die Anzahl der Profilblöcke zurückzuführen, siehe *Tab. 5*. Weitere spektrale Komponenten, die auf mechanische Reifenschwings- und Geräuschanregung zurück zu führen sind, entstehen aufgrund der stark nichtlinearen Zusammenhänge im zeitabhängigen Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Für eine ausreichend genaue Bestimmung der Koeffizienten eines solchen physikalischen Modells ist die im Rahmen von EP5 erhobene Datenbasis jedoch nicht ausreichend.

Die Schalleistung der in *Abb. 24* und *Abb. 25* dargestellten aerodynamischen Geräuschkomponente nimmt mit der vierten Potenz der Geschwindigkeit zu und steht damit mit dem sogenannten air pumping im Reifen-Fahrbahn-Kontakt in Zusammenhang. Die Geschwindigkeitsabhängigkeit  $v^4$  (12 dB Zunahme pro Geschwindigkeitsverdoppelung) entspricht dem akustischen Verhalten einer Volumenquelle.



**Abb. 24** Terzpegel bei einer Frequenz von 315 Hz als Funktion der Geschwindigkeit, Messwerte schwarz, Modellfit mit aerodynamischen und mechanischen Anteilen und der energetischen Summe, Tecknau SMA11, Reifen P, hintere Mikrofonposition.



**Abb. 25** Terzpegel bei einer Frequenz von 500 Hz als Funktion der Geschwindigkeit, Messwerte schwarz, Modellfit mit aerodynamischen und mechanischen Anteilen und der energetischen Summe, Tecknau SMA11, Reifen H, hintere Mikrofonposition.

## 2.2.4 Schlussfolgerungen

- Ähnlich wie bei der Temperaturkorrektur herrscht in Bezug auf die Geschwindigkeitsabhängigkeit von CPX-Pegeln z.B. im Rahmen der Entwicklung der Norm ISO 11819-2 eine Unsicherheit und es werden verschiedene Zahlenwerte für Korrekturfaktoren diskutiert. Die hier festgestellten Geschwindigkeitskoeffizienten liegen zwischen 20 und 43 und damit in etwa in der Spannbreite, die im Normentwurf angegeben ist.
- Bei dieser Untersuchung wurden je zwei Vertreter eines bestimmten Belagtyps erfasst, daher sind die Ergebnisse nicht in dem Sinne auf die Gesamtheit aller Beläge einer Bauart oder gar auf alle Strassen übertragbar. Vielmehr war es das Ziel, den reinen Einfluss der Geschwindigkeit auf die Rollgeräusche im Detail zu untersuchen, indem alle anderen Einflussgrößen möglichst konstant gehalten oder unterbunden wurden. Nur auf diese Weise liess sich der komplexe Zusammenhang zwischen Rollgeräusch und Fahrgeschwindigkeit genau untersuchen.
- Es konnte gezeigt werden, dass die bislang in der Praxis angewandte Korrektur physikalisch nicht exakt ist. Mit einem einzigen Geschwindigkeitskoeffizienten können die Messwerte nicht bei allen Referenzgeschwindigkeiten hinreichend genau korrigiert werden. Daher wird eine Unterscheidung in Geschwindigkeitsdomänen empfohlen.
- Der Geschwindigkeitskoeffizient nimmt mit steigender Geschwindigkeit ab, insbesondere ist er bei 80 km/h deutlich kleiner als bei 30 km/h und 50 km/h.
- An der hinteren Mikrofonposition sind die Koeffizienten tendenziell grösser als an der vorderen und die Unterschiede vorne/hinten sind beim P-Reifen klein, beim H-Reifen z.T. beträchtlich, besonders bei 80 km/h.
- Je offenerporiger der Belag, desto kleiner ist der Geschwindigkeitskoeffizient.
- Die Anregung des Reifen-Fahrbahn-Geräuschpegels als Funktion der Geschwindigkeit folgt nicht exakt einem logarithmischen Gesetz. Durch den Ein- und Austritt der Reifenprofilblöcke in den Reifen-Fahrbahn-Kontakt entwickelt sich ein schmalbandiges Signal, welches sich als Funktion der Fahrgeschwindigkeit durch den Frequenzbereich schiebt und gegenüber den restlichen Geräuschanteilen dazu führt, dass der Geräuschpegel in einzelnen schmalen Frequenzbändern mit zunehmender Geschwindigkeit auch wieder abnehmen kann.
- Für die Umrechnung von CPX-Geräuschpegeln, die von sehr unterschiedlichen Geschwindigkeitsregimen stammen (z.B. von 50 km/h auf 80 km/h) kann hier keine Empfehlung gegeben werden, denn eine solche Umrechnung müsste frequenz- und reifenabhängig erfolgen, wie hier anhand der Eingriffsfrequenz der Reifenprofilblöcke illustriert wurde. Die vorliegende Datenbasis reicht zur Formulierung einer derart komplexen Rechenvorschrift jedoch nicht aus.

**Tab. 6** Geschwindigkeitskoeffizienten als Funktion der Fahrgeschwindigkeit  $v$ .

$v$ , km/h		30		50		80	
		P	H	P	H	P	H
Belagtyp	Reifentyp						
SMA11		40	43	33	33	30	24
MR8, MR8+, PA8, PA11		32	36	30	34	22	29
Vorschlag		35		32		26	

- Zur Korrektur moderater Abweichungen von der Referenzgeschwindigkeit bis zu etwa  $\pm 10\%$ , wie sie während der Messfahrt z.B. verkehrsbedingt vorkommen kann, sollte eine einfache Korrekturformel angestrebt werden, möglichst ohne Abhängigkeit von der Frequenz und vom Reifentyp. Da bei kleinen Geschwindigkeitsabweichungen auch die Magnitude der Korrekturterme klein ist, erscheint eine vereinfachte Vorgehensweise gerechtfertigt. Bei fünf Prozent Abweichung von der Referenzgeschwindigkeit ergibt ein um fünf Einheiten falsch gewählter B-Koeffizient einen um rund 0.1 dB falsch korrigierten Geräuschpegel. Stellt man andere Messfehler in Rechnung, so erscheint eine moderate Mittelung der B-Koeffizienten gerechtfertigt. Mit den aus den

hier gewonnenen Messdaten durch Mittelung über die Mikrofonposition, den Reifentyp und die Belagsart bestimmten Geschwindigkeitskoeffizienten aus Tab. 6 lässt sich eine vereinfachte Korrektur für kleine Geschwindigkeitsabweichungen vornehmen. Die gegenwärtige Empfehlung der ISO/DIS 11819-2 für unbekannte, dichte oder semiporöse Beläge mit  $B=30$  liegt in der Mitte der Spannweite aus Tab. 6.

## 2.3 Einfluss von Strömungsgeräuschen auf die CPX-Messung

### 2.3.1 Ausgangslage

CPX-Messungen erfolgen meist bei Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h [3]. Bei diesen Geschwindigkeiten ist die Luftströmung an Fahrzeugen deutlich hörbar, wie die Alltagserfahrung zeigt. Die Normpositionen der Messmikrofone bei CPX-Messungen liegen dicht über dem Boden und sind damit der Luftströmung potenziell ausgesetzt. Insbesondere nach der Umstellung der im Normentwurf festgelegten Messreifen vor einigen Jahren auf grössere Durchmesser unter Beibehaltung des festgelegten Abstands von der Fahrbahnoberfläche ist nicht klar, inwieweit die Luftströmung die Schallpegelmessungen beeinflusst. Um den Einfluss von Strömungsgeräuschen am CPX-Anhänger, am Reifen und eventuell auch an den Mikrofonen auf die Messung des Reifen-Fahrbahn-Geräusch isoliert untersuchen zu können, wurden CPX-Messungen in einem Akustik-Windkanal der BMW AG in München durchgeführt.



**Abb. 26** Messung im BMW Akustik-Windkanal mit Zugfahrzeug.

### 2.3.2 Randbedingungen und Messdurchführung

Aeroakustische Windkanäle sind so konstruiert, dass sie im Schallmessraum sehr geringe Eigengeräusche verursachen und der Schallmessraum reflexionsarm ausgerüstet ist. Dadurch lassen sich Schallmessungen an einem Untersuchungsobjekt selbst bei hohen Windgeschwindigkeiten (bis zu 250 km/h) durchführen. Der für die CPX-Messungen interessante Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 100 km/h wurde in Schritten von 10 km/h abgefahren. Bei jeder Geschwindigkeit wurden die Strömungsgeräusche 30 Sekunden lang gemessen und gemittelt.

Die Strömungsgeräusche wurden mit insgesamt acht Mikrofonen aufgenommen, vier in jedem Radhaus. Die vier Positionen verteilen sich auf nah und fern sowie vorne und hinten. Das nahe Mikrofon vorne/hinten befindet sich 10 cm vor/hinter der Radnabe in 10 cm Abstand zum Reifen und Boden. Für die entfernten Mikrofone gilt dasselbe mit jeweils 20 cm Abstand.

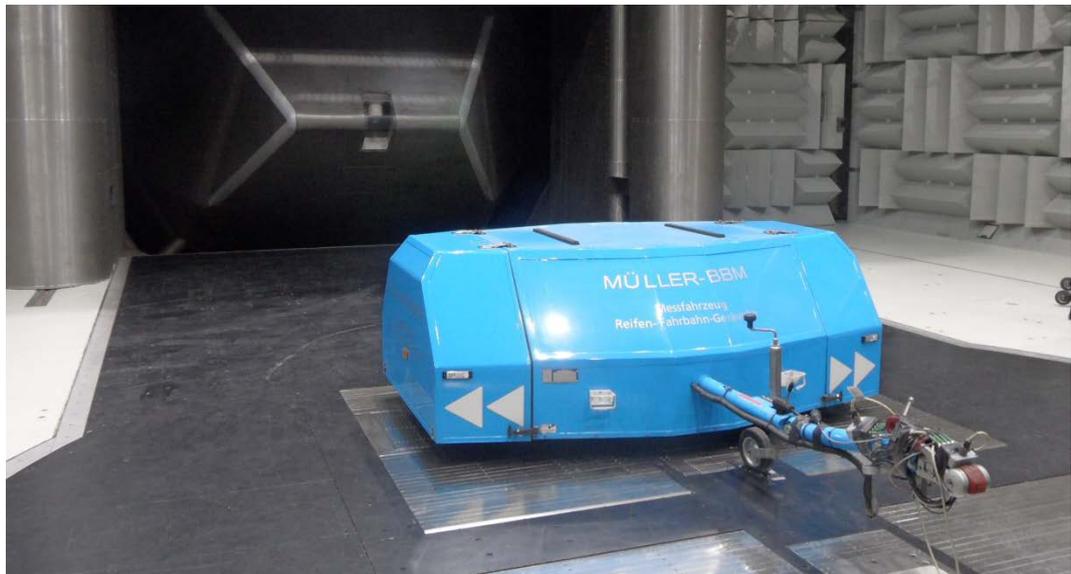


**Abb. 27** Anzeige im Windkanal für Luftdruck, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit.

Durch eine Verbindung zur Steuerelektronik des Windkanals wurde die genaue Geschwindigkeit der Luftströmung über die Mittelungszeit eines Messpunkts erfasst. Die Temperatur wurde anhand einer internen Anzeige im Messraum protokolliert (Abb. 27).

### Blockierung der Strömung durch das Zugfahrzeug

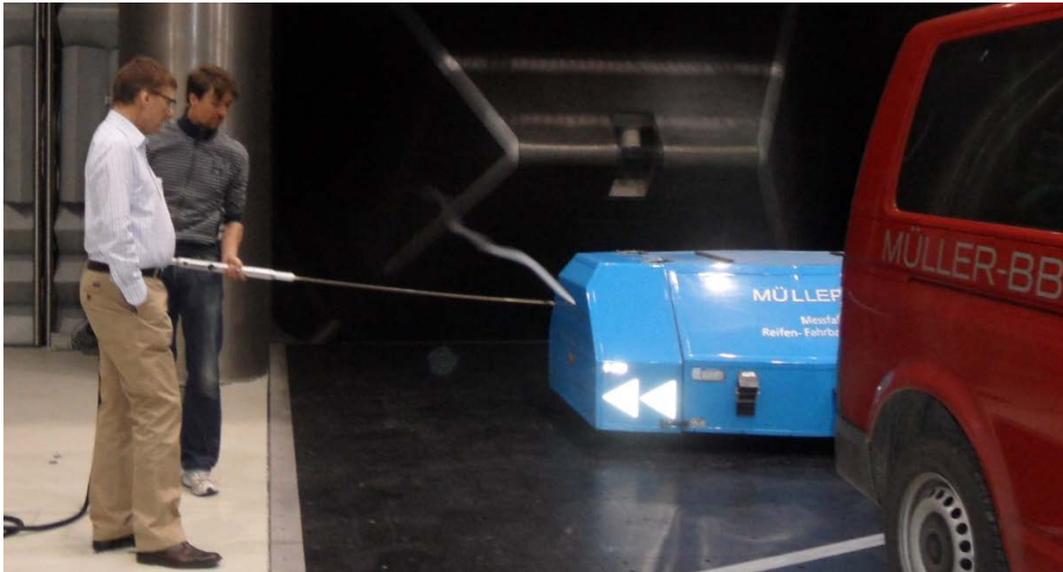
Es ist davon auszugehen, dass das Zugfahrzeug die Anströmung des Anhängers erheblich verändert. Um den Einfluss des Zugfahrzeugs auf die Anströmung zu untersuchen, wurden auch Messungen ohne Zugfahrzeug durchgeführt.



**Abb. 28** Messung ohne Zugfahrzeug.

### Sichtbarmachung der Strömung

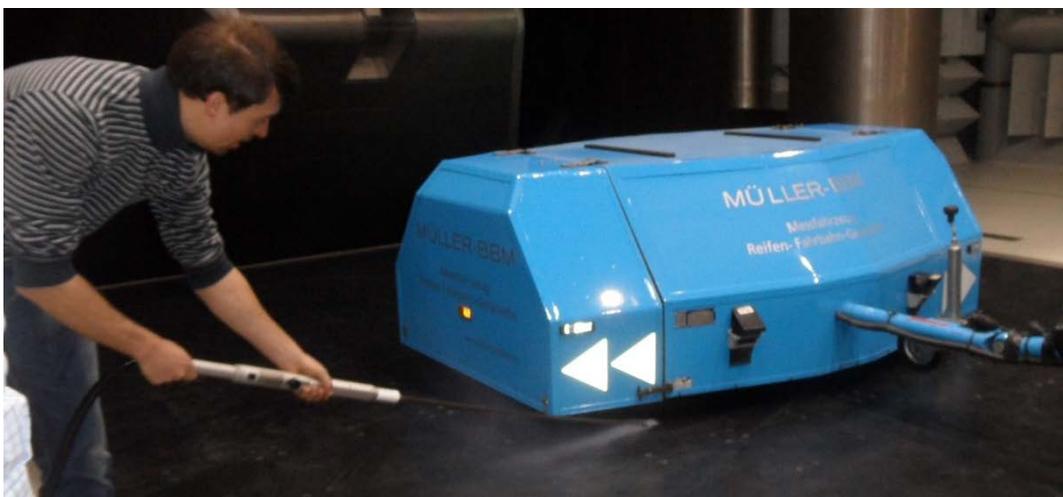
Um die Strömungen sichtbar zu machen wurde ein Verdampfer mit Lanze verwendet, der in laminarer Strömung die Erzeugung gut sichtbarer Dampffäden zulässt.



**Abb. 29** Deutlicher Dampffaden in laminarer Strömung neben dem Fahrzeuggespann.



**Abb. 30** Turbulente Strömungsverhältnisse hinter dem Zugfahrzeug bei 30 km/h.



**Abb. 31** Die Unterströmung des Anhängers ist ebenfalls turbulent (30 km/h).

Wie auf den *Abb. 30* und *Abb. 31* zu sehen ist, ist die Strömung hinter dem Zugfahrzeug bereits bei niedrigen Geschwindigkeiten turbulent.

### **Ehemalige kleinere Messreifen**

Seit einer Änderung des CPX-Norm-Entwurfs im Jahr 2008 werden grössere Messreifen verwendet, als sie bei der Konstruktion des Anhängers vorgesehen waren. Dadurch ist der gesamte Anhänger inklusive Bodenfreiheit um den Unterschied der Radien höher, wodurch sich eine andere Unterströmung ergibt. Da aber die Abstände der Mikrofone zum Boden immer gleich eingestellt werden, sind sie mit der grösseren Bodenfreiheit weniger von der Anhängerschürze abgedeckt und mehr der Unterströmung ausgesetzt. Daher wurde eine Messreihe mit einem ehemaligen, kleinen Messreifensatz durchgeführt.

### **Unterschiedliche Kantengeometrien**

Abschliessend wurden drei unterschiedliche Kantengeometrien aus Terostat an der rechten Vorderseite des Anhängers modelliert, sodass sich Unterschiede der Strömungsgeräusche mit veränderter Kantengeometrie zu den Strömungsgeräuschen im Originalzustand untersuchen lassen.

Die erste Variante verlängert die Schürze um knapp 3 cm nach unten, wodurch die nahen Mikrofone in etwa denselben „Windschutz“ erhalten sollten, wie bei den kleinen Messreifen. Zudem ist die modellierte Kante stärker verrundet.

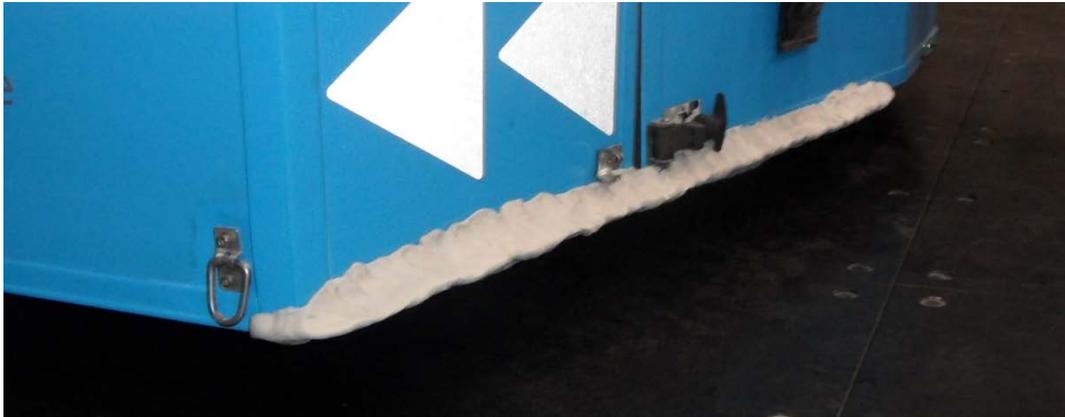


**Abb. 32** *Kantengeometrie 1: Verlängerte Schürze an der rechten Vorderkante.*

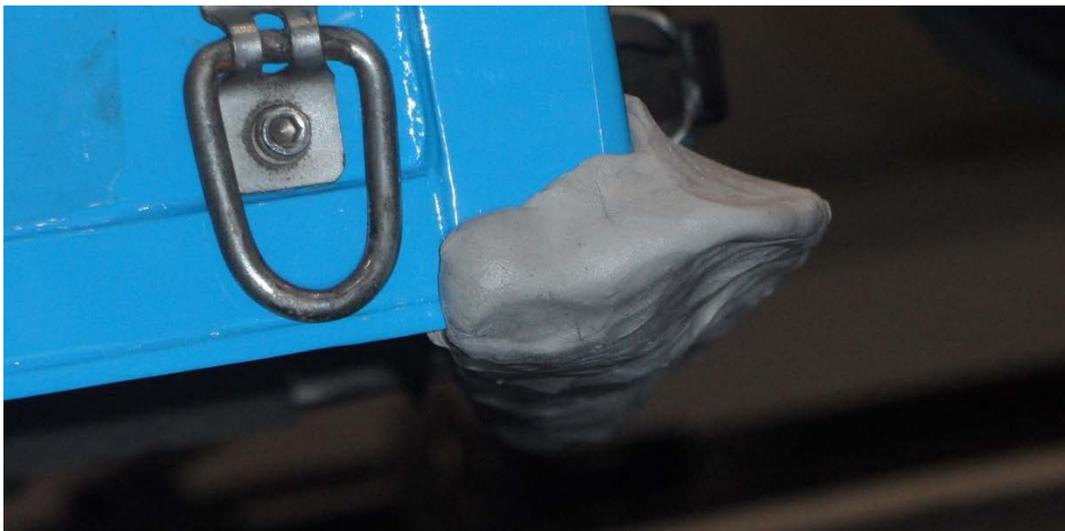


**Abb. 33** *Kantengeometrie 1: Detailbild von unten.*

Die Zweite Variante ist spitz nach vorne gerichtet, verläuft mit einer 90° Krümmung nach oben und ist nach unten hin leicht verrundet. Die anströmende Luft wird im oberen Teil nach oben geleitet anstatt frontal auf eine senkrechte Fläche zu stossen. Im unteren Teil wird der Luftstrom um die scharfe Kante herumgeleitet.



**Abb. 34** Kantengeometrie 2: nach vorne gezogene Spitze mit Verrundung nach oben und unten.



**Abb. 35** Kantengeometrie 2: Detailbild von der Seite.



**Abb. 36** Kantengeometrie 3: Verrundung der nach unten gerichteten Kante.

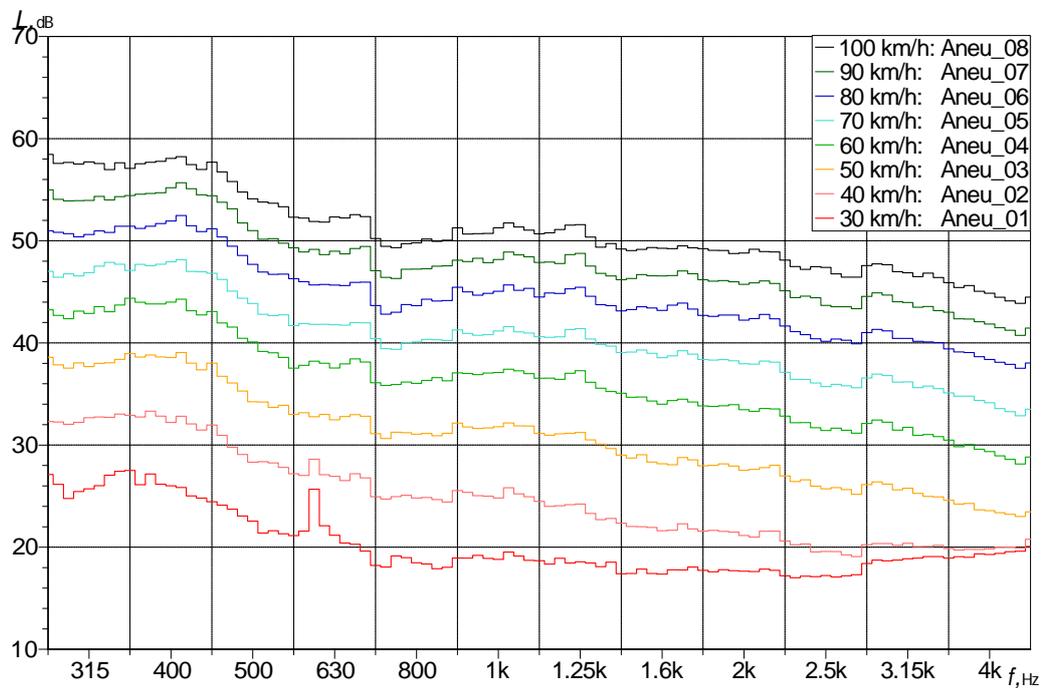


**Abb. 37** Kantengeometrie 3: Detailbild der Verrundung nach unten.

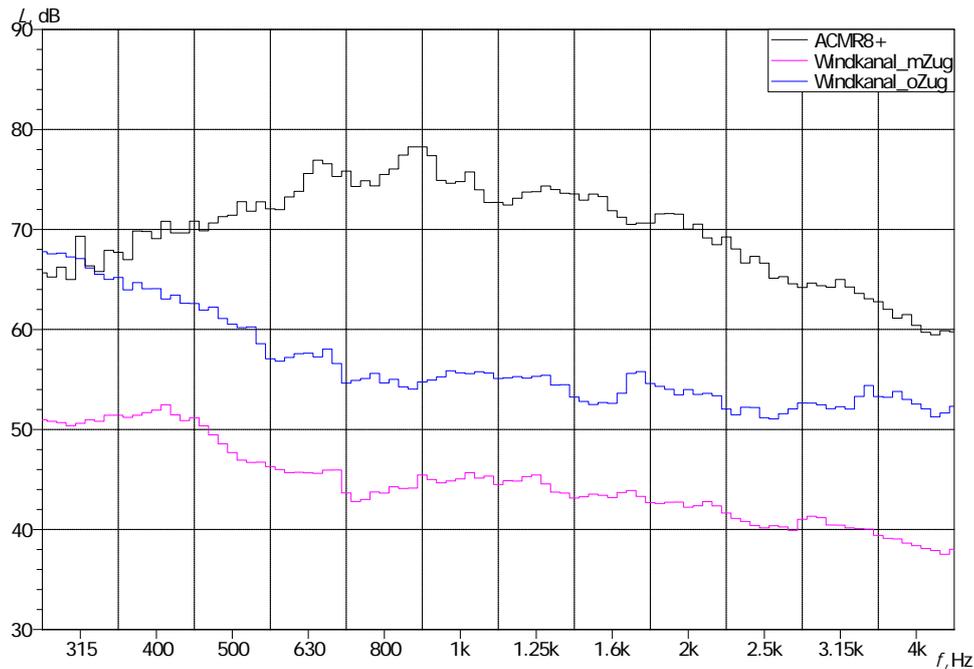
Als letzte Variante wurde die waagrechte Kantenfläche, die zum Boden gerichtet ist, halbrund verrundet. Strömungsgeräusche, die durch Reibung an der scharfen Kante des Anhängers entstehen, sollen durch die Verrundung verringert werden.

### 2.3.3 Ergebnisse

Die Messungen werden als Schmalbandspektren im Bereich von 300 bis 5000 Hz für unterschiedliche Geschwindigkeiten dargestellt. In *Abb. 38* sind für die vordere nahe Mikrofonposition im rechten Radhaus exemplarisch die Spektren aller Geschwindigkeiten abgebildet. Die spektrale Verteilung ist mit einer Ausnahme sehr ähnlich. Bei 30 km/h ist der Schalldruckpegel insgesamt sehr niedrig (teilweise kleiner 20 dB), sodass Fremdgeräusche das Spektrum zu hohen Frequenzen hin anheben.



**Abb. 38** Schmalbandspektrum der Mikrofonposition rechts vorne nah bei allen Geschwindigkeiten.



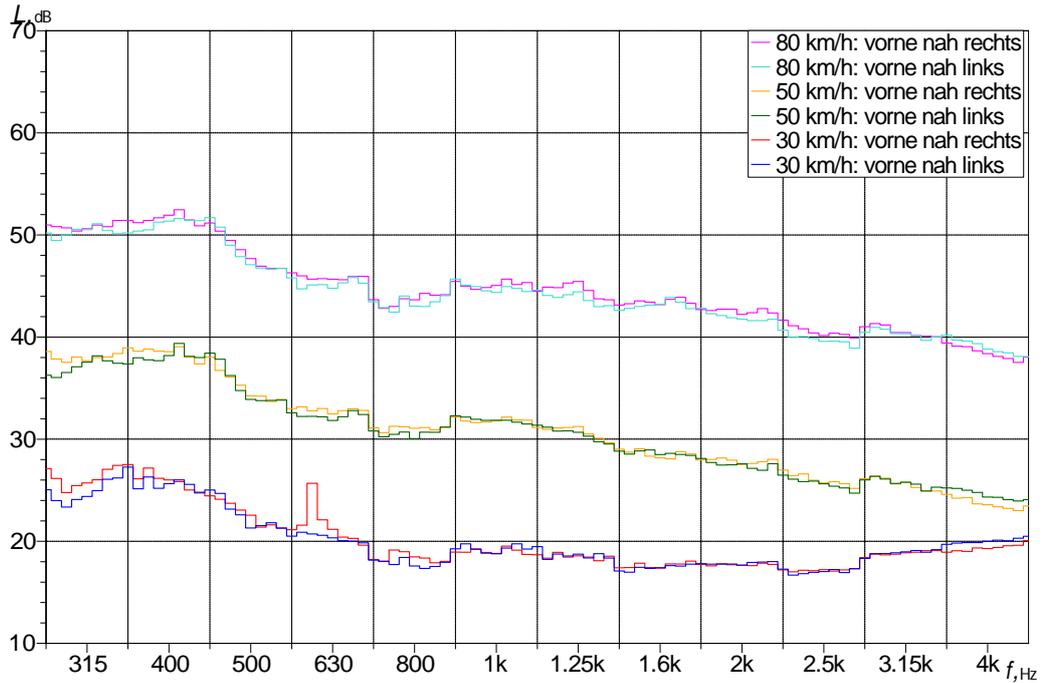
**Abb. 39** Vergleich der Messungen im Windkanal mit und ohne Zugfahrzeug zu einer Messfahrt auf einem ACMR8+ Belag, jeweils bei 80 km/h (Mikrofon rechts, vorne, nah).

Insgesamt sind die reinen Strömungsgeräusche deutlich leiser (15 - 30 dB) als die Reifen-Fahrbahn-Geräusche während einer CPX-Messung auf einem geräuschmindernden Fahrbahnbelag, siehe Abb. 39. Das bedeutet, dass der Einfluss auf die CPX-Messung höchstens 3 % in den unteren Terzen, etwa 0.1 % um 1 kHz und 0.6 % zu den hohen Frequenzen hin beträgt. Die Zweite Kurve in Abb. 39 (blau) wurde ebenfalls im Windkanal bei derselben Windgeschwindigkeit und Mikrofonposition, jedoch ohne Zugfahrzeug gemessen. Es wird deutlich, dass die Strömungsgeräusche ohne die Abschattung eines Zugfahrzeuges Einfluss auf das Messsignal haben können.

Da die Form der Kurven sehr ähnlich ist, werden zur besseren Übersicht in den weiteren Diagrammen die Spektren bei den Referenzgeschwindigkeiten 30, 50 und 80 km/h abgebildet. Um die Vielzahl von Mikrofonpositionen, Windgeschwindigkeiten und Messkonfigurationen übersichtlich gegenüberstellen zu können, werden die einzelnen Ergebnisse im Folgenden stets mit der vorderen nahen Mikrofonposition im rechten Radhaus verglichen. Dabei ist die Farbe der Kurven in allen Diagrammen dieselbe:

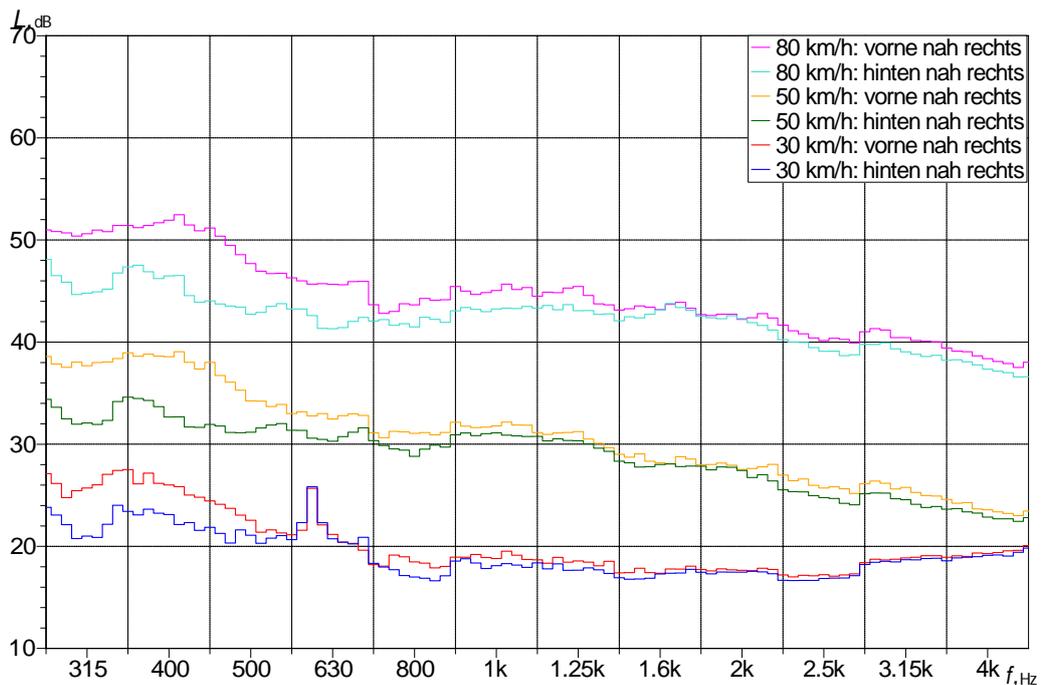
Geschwindigkeit $v$	rechts, vorne, nah	Gegenübergestelltes
80 km/h	Pink	Cyan
50 km/h	Orange	Grün
30 km/h	Rot	Blau

Der erste Vergleich in Abb. 40 zwischen dem rechten und linken Radhaus zeigt kaum einen Unterschied (jeweils für die vordere nahe Mikrofonposition). Lediglich fällt rechts ein einzelner Ton bei etwa 600 Hz in der 30 km/h Kurve auf, der bei höheren Geschwindigkeiten nicht mehr vorkommt. Dieser Effekt muss prinzipiell behoben werden. Allerdings ist der Schalldruckpegel des tonalen Anteils so gering, dass er das Nutzsignal des Reifen-Fahrbahn-Geräuschs nicht beeinträchtigt. Insgesamt ist das Ergebnis sehr zufriedenstellend, da es zeigt, dass die beidseitige Kalibrierung des Messanhängers, die in Terzbändern erfolgt, selbst bei schmalbandiger Analyse zu gleichen Messbedingungen führt.

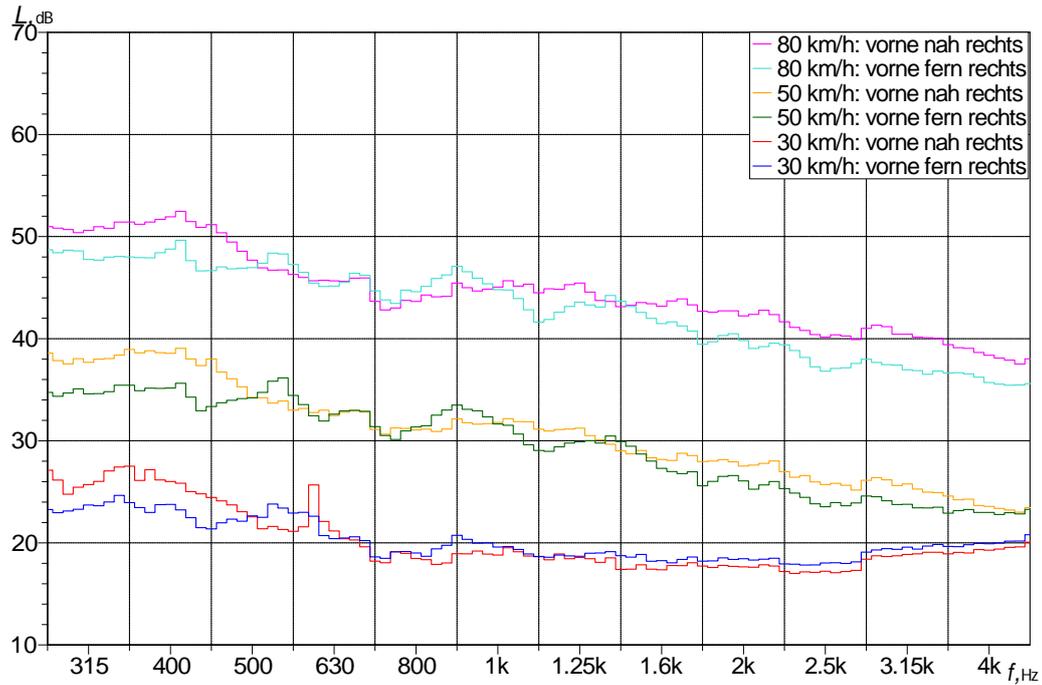


**Abb. 40** Unterschied zwischen linken und rechten Radhaus (vorne, nah).

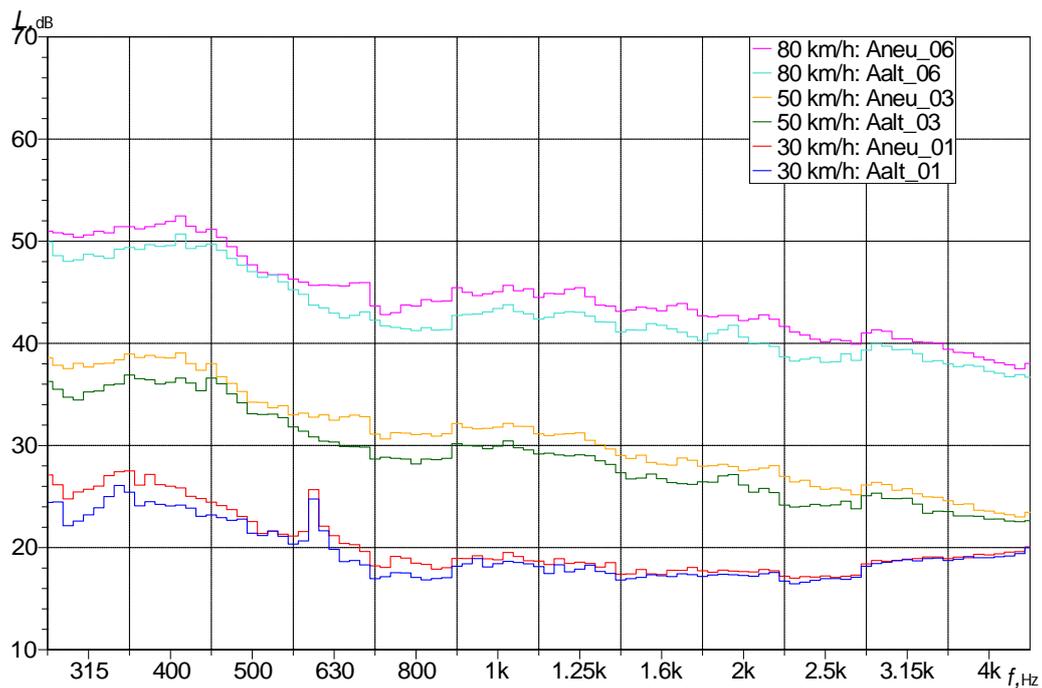
In *Abb. 41* und *Abb. 42* werden die Mikrofonpositionen vorne mit hinten und nah mit fern jeweils im rechten Radhaus verglichen. Der Unterschied zu dem hinteren Mikrofon zeigt sich vor allem in den tieferen Frequenzen, aber auch im mittleren Frequenzbereich liegen die Kurven bis zu 2 dB tiefer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das hintere Mikrofon stärker abgeschattet ist und weiter von der vorderen, angeblasenen Kante der Anhängerschürze entfernt ist. Zu dem fernen Mikrofon ergeben sich ebenfalls Pegeldifferenzen, die aber nicht einheitlich verteilt sind. Es kann also nicht davon ausgegangen werden, dass der Pegel aufgrund des doppelten Abstands zum Boden stets geringer ist. Richtwirkung könnte hier eine Rolle spielen.



**Abb. 41** Unterschied zwischen vorderem und hinterem Mikrofon (rechts, nah).



**Abb. 42** Unterschied zwischen Mikrofon nah und fern (rechts, vorne).



**Abb. 43** Unterschied zum kleineren Messreifensatz (rechts, vorne, nah).

Die Fragestellung bezüglich der ehemaligen, kleineren Messreifen wird in *Abb. 43* eindeutig beantwortet: Die geringere Bodenfreiheit und damit verbundene bessere Abschattung der Mikrofone verringert den Pegel über das gesamte Spektrum um bis zu 4 dB bei 80 km/h und 2 dB bei 30 km/h. Es zeigt sich, dass dieser Punkt in Zukunft grundsätzlich beachtet werden sollte. Allerdings gilt auch hier wieder, dass die Schalldruckpegel der Strömungsgeräusche insgesamt so niedrig sind, dass sie das Nutzsignal der Reifen-fahrbahn-Geräusche nicht beeinflussen.

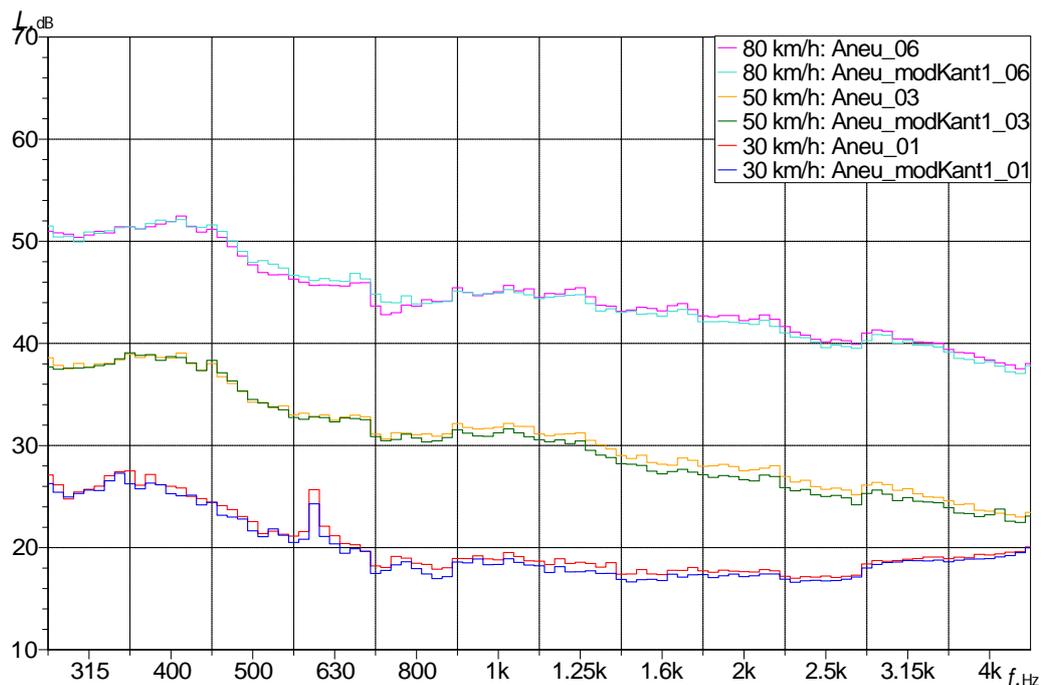
Die Ergebnisse der unterschiedlichen Kantengeometrien sind in *Abb. 44* bis *Abb. 46* gezeigt. Die erste Modifikation ist im Wesentlichen eine Verlängerung der Schürze des Anhängers nach unten, sodass die Mikrofone besser von der Strömung abgeschattet werden. Allerdings zeigen sich nur geringe Unterschiede. Bei 50 km/h in der oberen Hälfte des Spektrums ist eine Absenkung von etwa 1 dB zu verzeichnen. Bei 80 km/h wird dieser Unterschied wieder kleiner, was durch Geräusche an der wenig verrundeten modellierten Kante verursacht werden kann.

Die Absicht der zweiten Modifikation ist eine Strömungsumleitung um die scharfe Kante des Anhängers. Auch hier sind die Unterschiede marginal.

Bei der dritten Modifikation zeigen sich die grössten Unterschiede. Sie verlängert die Kante noch etwas weiter nach unten als Modifikation 1 und ist grosszügig verrundet. Die Absenkung ist über das gesamte Spektrum zu beobachten und wird mit steigender Windgeschwindigkeit grösser. Dies liegt hauptsächlich an der Kantenverlängerung und dadurch grösseren Abschattung der Mikrofone, ähnlich wie mit den kleineren Messreifen.

Das letzte Diagramm *Abb. 47* zeigt den Vergleich mit und ohne Zugfahrzeug. Die Schalldruckpegel ohne Zugfahrzeug sind so gross, dass deren Kurven gewissermassen in eine höhere Geschwindigkeitsklasse rutschen! Die spektrale Verteilung unterscheidet sich nur in Details und spielt ob der sehr grossen absoluten Unterschiede keine Rolle.

Aufgrund dieser drastischen Unterschiede stellt sich die Frage, wie sich die Strömungsgeräusche mit anderen Zugfahrzeugen darstellen. Wenn zum Beispiel ein schmaleres Fahrzeug den Anhänger zieht, wird er mehr dem Fahrtwind ausgesetzt, was zu einem kleineren Windschatten und höheren Strömungsgeräuschen an den Messmikrofonen führen könnte. Auch die Bodenfreiheit des Zugfahrzeugs könnte ein wichtiger Parameter sein. Das Müller-BBM Zugfahrzeug des Typs VW T5 ist mit gut 1.9 m recht breit und hat mit gut 0.2 m eine relativ grosse Bodenfreiheit und dürfte einen vergleichsweise grossen Windschatten erzeugen. Insbesondere bei niedrigen Frequenzen wo der Geräuschabstand zwischen Luftströmung und Reifen-Fahrbahn-Geräusch ohne Zugfahrzeug unter 10 dB liegen kann, könnte die Datenqualität bei Messung mit kleineren Zugfahrzeugen beeinträchtigt sein.



**Abb. 44** Kantenmodifikation 1 (rechts, vorne, nah).

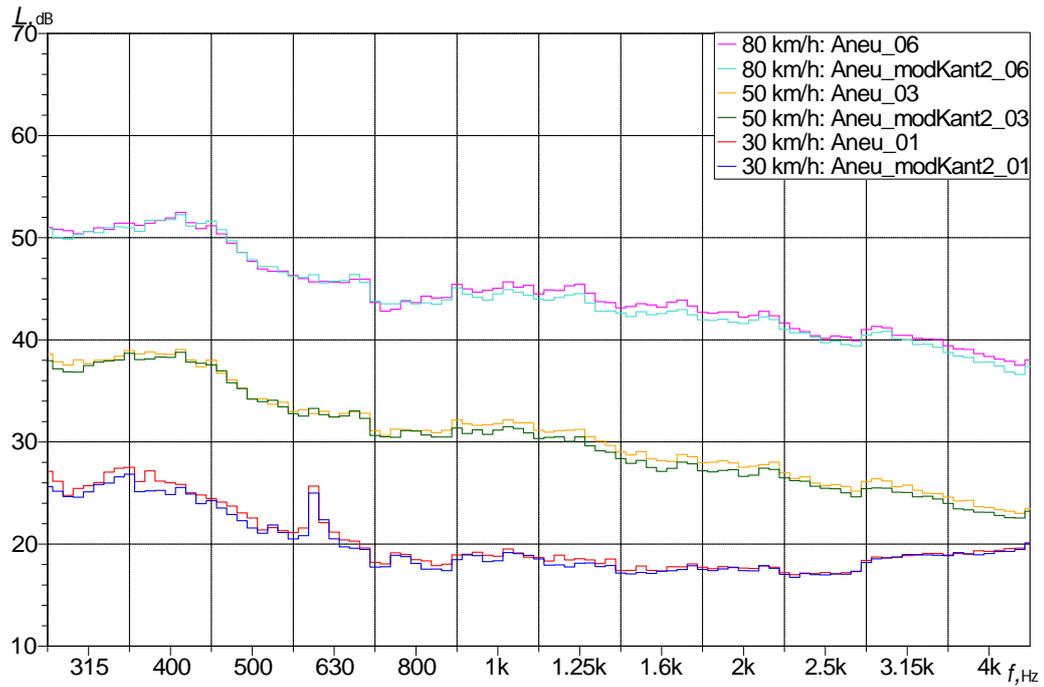


Abb. 45 Kantenmodifikation 2 (rechts, vorne, nah).

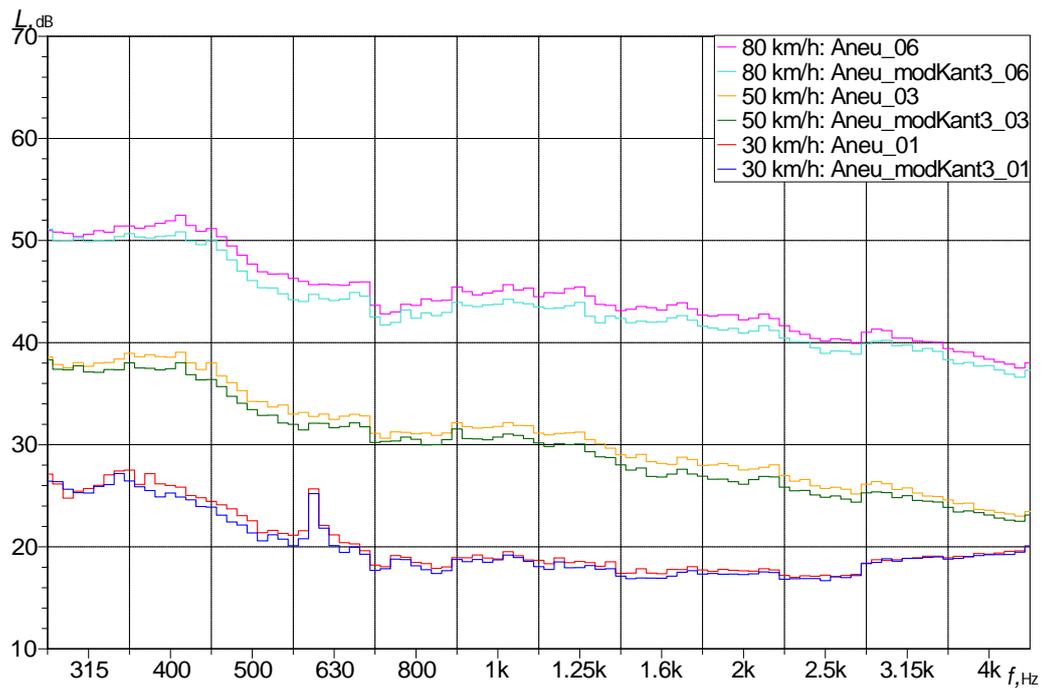


Abb. 46 Kantenmodifikation 3 (rechts, vorne, nah)

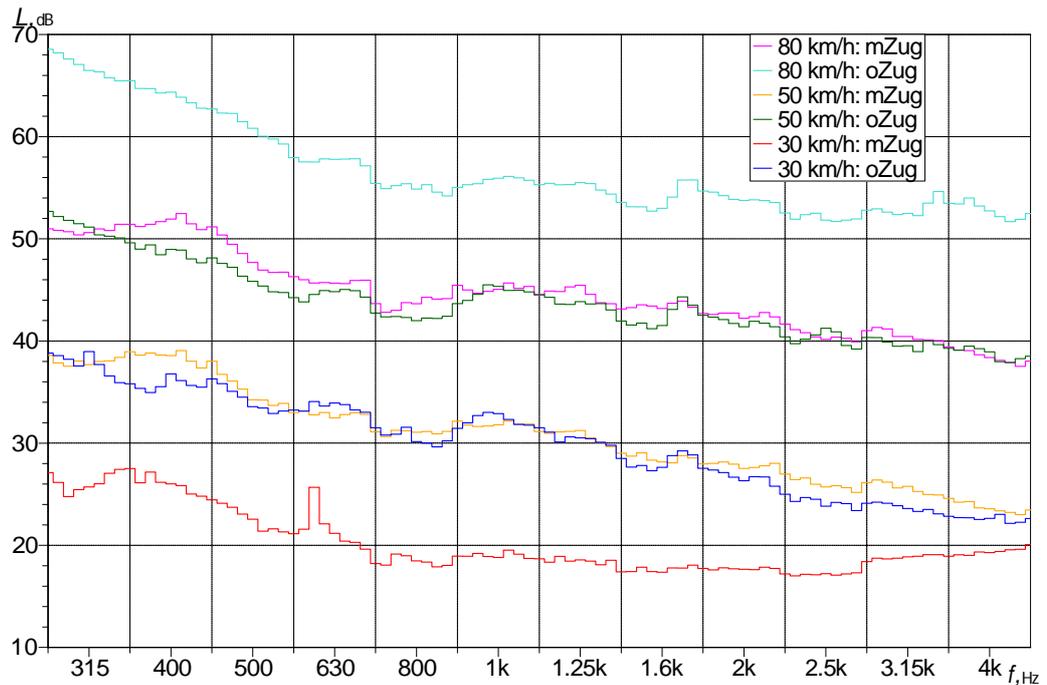


Abb. 47 Vergleich mit und ohne Zugfahrzeug (rechts, vorne, nah).

### 2.3.4 Schlussfolgerungen

- Die im akustischen Windkanal gemessenen Strömungsgeräusche fallen mit steigender Frequenz ab und liegen jeweils um 15 bis 30 dB unter den geschwindigkeitsabhängigen CPX-Pegeln, wobei dieser Abstand bei den niedrigsten Terzbändern auch am kleinsten ist. Damit sind die Strömungsgeräusche im Prinzip vernachlässigbar.
- Die Pegel der Strömungsgeräusche am hinteren Mikrofon sind um bis zu 2 dB tiefer als am vorderen Mikrofon, weil es besser abgeschattet ist.
- Eine geringere Bodenfreiheit, etwa durch kleinere Messreifen, wie sie früher in Gebrauch waren, reduziert die Strömungsgeräusche um 4 dB bei 80 km/h.
- Variationen in der Form der Anhängerseite in Fahrtrichtung bewirken wenig veränderte Geräusche und dies im Wesentlichen durch eine bessere Abschattung.
- Eine gute Abschattung des Messanhängers durch ein breites Zugfahrzeug wie den VW T5 ist Voraussetzung dafür, dass die Strömungsgeräusche insgesamt vernachlässigt werden können. Das Zugfahrzeug reduziert die Geräusche um gut 10 dB bei Fahrgeschwindigkeiten über 50 km/h. Bei kleineren Zugfahrzeugen könnten die untersten Terzbänder durch vorbeiströmende Luft beeinflusst werden.
- Messanhänger mit grösserer Bodenfreiheit oder anderweitig schlechterem Schutz der Mikrofone vor der Fahrtluftströmung und Messsysteme mit kleineren Zugfahrzeugen könnten überhöhte Schalldruckpegel liefern, insbesondere bei niedrigen Frequenzen von wenigen hundert Hertz.

## 2.4 Qualitätssicherung der CPX-Reifen

### 2.4.1 Ausgangslage

Beim CPX-Messsystem ist ein besonderes Augenmerk auf die Qualitätssicherung der Reifen zu legen, weil sie als Schallquelle einen wesentlichen Teil des Messsystems bilden. So ergibt sich mit den Messreifensätzen und deren zeitlicher Veränderung eine zusätzliche Komponente, die zu einem systematischen Fehler beim Vergleich von Messergebnissen mit anderen CPX-Messsystemen führen kann und deshalb einem strengen und kontinuierlichen Qualitätsmanagement unterworfen werden muss. Im nachfolgend

beschriebenen Experiment (2.4.6) geht es in erster Linie um den Einfluss der Profiltiefe auf den CPX-Geräuschpegel im Nahfeld. Aus Veröffentlichungen ist bereits bekannt, dass die Härte des Reifens mit seinem Alter zunimmt und dies zu anwachsenden Geräuschpegeln führt (siehe Abschnitt 2.4.2). So wird im Technischen Merkblatt [15] vorgeschrieben, die CPX-Reifen nach zwei Jahren zu ersetzen. Im Experiment wurde die Shore Härte regelmässig bestimmt, um ihren Einfluss gegebenenfalls mit zu erfassen.

## 2.4.2 Literaturlauswertung

Im Rahmen des Forschungsprojekts sollten die Einflüsse der Reifenalterung und der Reifenabnutzung genauer untersucht werden. In dem umfassenden EU-Projekt Silence [22] zeigte sich folgendes:

- Im Labor nahm der Lärmpegel für ein Ensemble von sechs typischen Personenwagenreifen vom neuen (8 mm Profiltiefe) zum abgefahrenen (2 mm) Zustand im Mittel um 4-5 dB(A) auf einer sehr rauen Texturoberfläche ab, fast gar nicht auf einer ISO-Oberfläche (die recht glatt ist) und 3-4 dB(A) auf einer besonders glatten Oberfläche. Auf der ISO-Oberfläche veränderte sich aber das Spektrum: Es wurde im Bereich 800 Hz bis 2000 Hz flacher (weisser) mit zunehmendem Abrieb, wobei die typische Spitze um 1000 Hz in der Amplitude gegenüber dem Neuzustand reduziert wurde und die hochfrequenten spektralen Amplituden zunahmten.
- Bei coast-by Messungen nahm der Geräuschpegel für ein Ensemble von typischen Personenwagenreifen vom neuen (8 mm Profiltiefe) zum abgefahrenen (2 mm) Reifen im Mittel um gut 1 dB zu.
- Bei künstlicher Alterung der Reifen durch Erwärmung in der Klimakammer wurden die Reifen härter und der Geräuschpegel erhöhte sich auf der ISO-Oberfläche um 0.1 dB pro Shore A und auf rauer Oberfläche gut 0.2 dB pro Shore A.

Eine Studie von TRL Limited, Grossbritannien [23], führte zu folgenden Ergebnissen:

- Ein Anstieg der Shore A Härte von 62 auf 70 für den CPX-Messreifen vom Typ A innerhalb von 24 Monaten führte zu einem Anstieg des Geräuschpegels um 2.4 dB(A) auf Hot-rolled Asphalt (HRA) mit Grösstkorn von 14 bis 20 mm und von 2.0 dB(A) auf einem SMA 0/10.
- Innerhalb von 24 Monaten erhöhte sich die Shore A Härte des Messreifens H von 57 auf 68. Leider wurden keine vergleichenden akustischen Messungen durchgeführt.

In einer Studie von M+P, Niederlande [24] wurden die CPX-Geräuschpegel für den P-Reifen für ein Kollektiv verschiedenen Alters und verschiedener Profiltiefen (d.h. verschiedener Shore Härten) verglichen. Auf einer ISO-Oberfläche variierten die Pegel über einen Bereich von 2.0 dB(A), der zu 70 Prozent durch die unterschiedliche Gummihärte erklärt werden konnte (der Rest durch Produktionstoleranzen und Fehler bei der Shore Härtemessung).

Nach dem ASTM-Standard (ASTM=American Society for Testing and Materials) soll die Härte des P-Reifens (Standard Reference Test Tyre (SRTT) nach ISO TS 11819-3) innerhalb von  $64 \pm 2$  Shore-A liegen (F2493-06). M+P empfiehlt, die Messreifen jedes Jahr zu ersetzen (E-mail an Kunden vom 24.12.2012), um die alterungsbedingte Verhärtung zu umgehen und berichtet, dass die Lagerung der Reifen grossen Einfluss auf ihre Härte hat:

- Wenn Reifen kühl gelagert (0 – 7 °C) und nicht benutzt werden, erhöht sich die Härte um 0 bis 1 Einheit pro Jahr;
- Wenn Reifen kühl gelagert (0 – 7 °C) und periodisch zum Messen benutzt werden, erhöht sich die Härte um etwa 2 Einheiten pro Jahr;
- Wenn Reifen nicht kühl gelagert werden, erhöht sich die Härte um 3 bis 4 Shore-A pro Jahr (egal, ob benutzt oder nicht).

In einem Konferenzbeitrag [25] berichten Bühlmann und Koautoren von einer Zunahme der Shore-A Härte während der Messsaison von 0.05 Einheiten pro Messtag für den P-Reifen und von 0.1 Einheiten für den H-Reifen. In einer aktuellen Studie zur Alterung des P-Reifens des Dänischen Strassendirektorates [26] wird eine Erhöhung des CPX-Schalldruckpegels mit dem Alter und der Härte der Reifen berichtet mit einem Gradienten von 0.09 dB per Shore A. Die Ergebnisse aus der Literatur sprechen dafür, dass abnehmende Profiltiefe den Geräuschpegel erhöht und das Geräuschspektrum leicht verändert. Der wichtigere Faktor ist aber offenbar die Shore-Härte, welche schnell mit der Alterung zunimmt.

Eine Messserie sollte diese Zusammenhänge klären.

## 2.4.3 Vorbereitung der Messungen

### Arbeitsprogramm

Für ein Ensemble von P- und H-Messreifen sollte der Einfluss von Profiltiefe und Shore-A Härte auf den Schalldruckpegel mit einer Messserie bestimmt werden. Das Arbeitsprogramm umfasste folgende Teilschritte:

- Einkauf neuer Messreifen (Typ P und H)
- Aussuchen einer geeigneten Messtrecke
- Einfahren der neuen Messreifen
- Bestimmung der Shore A Härte und der Profiltiefen der neuen Reifen
- CPX-Nullmessung auf der ausgewählten Messstrecke mit P- und H-Reifen
- Abschälen der Messreifen nach einem vorgegebenen Schema
- Künstliches Abnutzen der Messreifen in einem Prüfstand
- Wiederholung der CPX-Messung auf der ausgewählten Messstrecke mit allen Messreifen
- Auswertung der Ergebnisse

### Messreifen

Der Einkauf der sechs P-Messreifen erfolgte im Juli 2012 (Lieferung aus den USA) und der H-Reifen (hergestellt in Grossbritannien) im April 2012. Die P-Reifen tragen alle das Produktionsdatum KW 5/2012, vier der H-Reifen KW 26/2010 und die beiden anderen H-Reifen KW 49/2011.

### Messstrecke

Die Messtrecke sollte folgende Kriterien erfüllen:

- mindestens zwei verschiedene und dokumentierte Belagstypen (damit diese am Stück gemessen werden konnten)
- gute Messbedingungen über ganze Tage hinweg (z.B. geringe Stauwahrscheinlichkeit, tendenziell stabiles Sommerwetter)
- keine geplante Dauerbaustelle im Messzeitraum
- ausreichende Länge für eine zuverlässige Pegelmittelwertbildung, auch wenn es notwendig werden sollte, bei Teilen der Messung bestimmte Bereiche (lokale temporäre Baustellen, etc.) von der Analyse auszuschliessen

Diese Kriterien erfüllte die gewählte Prüfstrecke. Es handelt sich um den rechten Fahrstreifen der Autobahn A5 südlich von Karlsruhe bis Baden-Baden, Deutschland, in Fahrtrichtung Süden. Der Beginn der Messungen fällt mit dem Konzessionsbeginn der Firma Via Solutions GmbH & Co KG in Bühl zusammen, welche seit einigen Jahren den Autobahnabschnitt südlich von Karlsruhe bewirtschaftet. Im Norden ab Autobahnkilometer 641.2 befindet sich ein langer Abschnitt Zementbeton aus den Jahren 2007 und 2011. Über eine Länge von 6.9 km wurden CPX-Messungen durchgeführt und ausgewertet. Im

Süden schliesst sich an den Zementbeton ein Drainbelag (PA8) aus dem Jahr 2011 an. Von diesem wurde eine zusammenhängende Strecke von insgesamt 5.4 km vermessen und ausgewertet, wobei einige Abschnitte mit Brücken etc. aus der Analyse jeweils auszuschliessen waren (siehe Abb. 48).

### BAB A5 . AD Karlsruhe - AS Achern

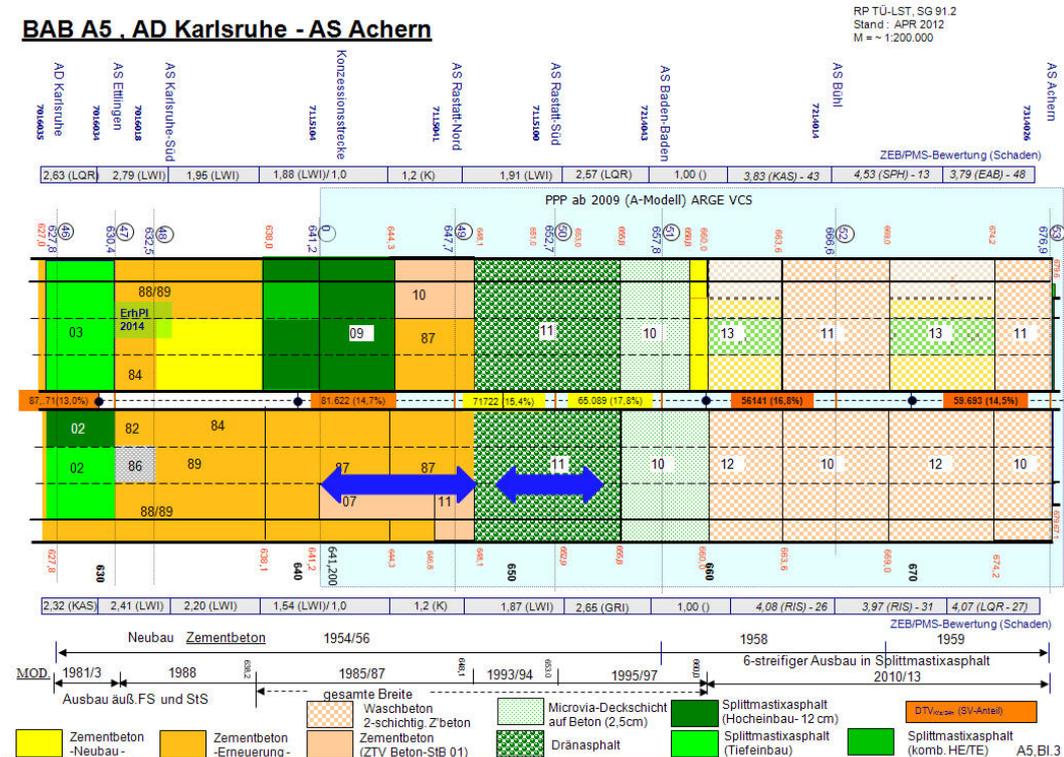


Abb. 48 Belagskarte des Messabschnitts auf der A5 südlich von Karlsruhe. Die blauen Doppelpfeile markieren die Messstrecken des rechten Fahrstreifens nach Süden auf Zementbeton (links) und dem PA8 (rechts). (Quelle: Regierungspräsidium Freiburg (D)).

### Einfahren

Die Messreifen wurden vor der eigentlichen Messserie auf einer Autobahnfahrstrecke von gut 100 km eingefahren, z.T. bei der Anfahrt zum Messort.

### 2.4.4 Bestimmung von Shore A Härte und Profiltiefe

Im Mai 2012 wurde zunächst die Profiltiefe und die Shore-A Härte der H-Reifen bestimmt. Die Profiltiefe wurde mit einem Messschieber manuell bestimmt. Dies geschah durch Mehrfachmessung an fünf radialen Positionen. An jeder Radialposition wurden Profiltiefen in den Rinnen und die Shore-Härten auf den Blöcken bestimmt. Die Shore-Härte misst die Eindringtiefe einer genormten Nadelspitze, die mit fester Kraft (12,5 Newton für Shore-Messungen vom Typ A, wie sie bei Reifen angewandt werden) in ein Elastomer gedrückt wird. Eindringtiefen von 2.5 mm und mehr entsprechen einem weichen Material mit 0 Shore und sehr harte Materialien, in welche die Nadel nicht eindringen kann, bekommen die Härte 100 Shore zugewiesen. Winterreifen haben typischerweise Shore-Werte zwischen 58 und 63 und Sommerreifen zwischen 60 und 70. Zur Messung wurde ein Handgerät verwandt, wie in Abb. 49 dargestellt.



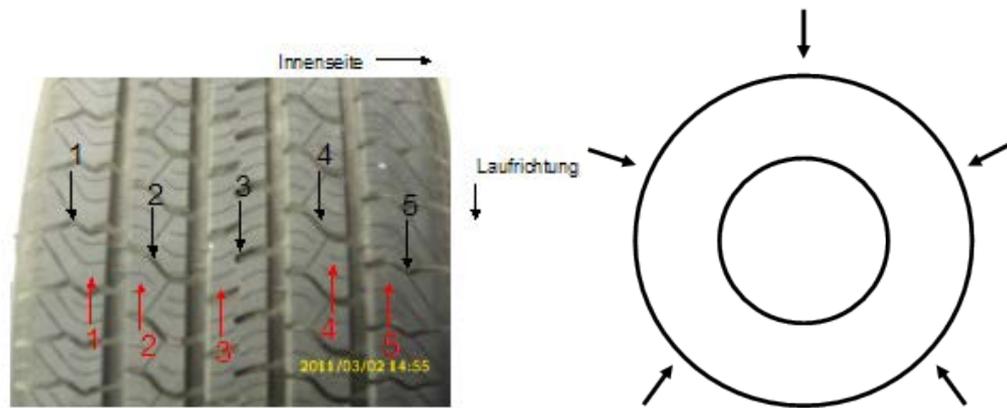
**Abb. 49** Handgerät zur normgerechten Messung der Shore-Härte (links) und Profilmesser (rechts).

Die Profiltiefe wurde mit einem Messschieber an jedem einzelnen H-Reifen bis zu 20mal ermittelt. *Abb. 50* stellt die Messpunkte schematisch dar. Die unten angegebenen Werte sind die gerundeten Mittelwerte der Messreihen für jeden einzelnen Reifen. Die Shore Härte vom Typ A wurde mit einem dafür genormten Messgerät an jedem einzelnen Reifen ebenfalls bis zu 20 mal ermittelt und zu einem gerundeten Mittelwert zusammengefasst. *Abb. 50* stellt auch die Messpunkte für die Shore Härte schematisch dar.



**Abb. 50** Messpunkte für Reifen vom Typ H (links) und Verteilung der Messprofile (rechts).

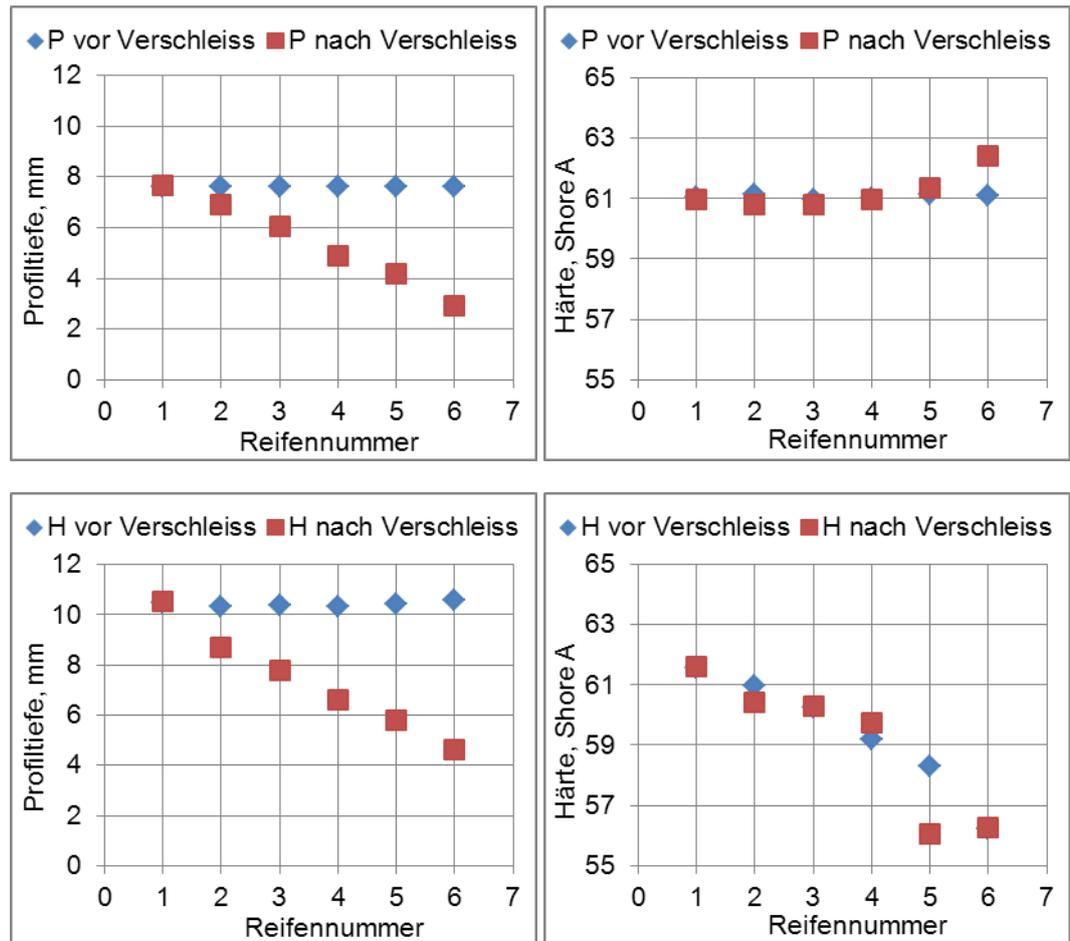
Die gleiche Prozedur wurde für die P-Reifen wiederholt. Wegen der fünfgliedrigen Profilgeometrie in Querrichtung wurde die Profiltiefe und die Shore-A Härte an jedem einzelnen Reifen diesmal bis zu 25 mal ermittelt. Ansonsten war die Messung analog zum H-Reifen. *Abb. 51* stellt die Messpunkte schematisch dar. Die unten angegebenen Werte sind die gerundeten Mittelwerte der Messreihen für jeden einzelnen Reifen.



**Abb. 51** Messpunkte für Reifen vom Typ P (links), Verteilung der Messprofile (rechts).

Die Profiltiefen der Messreifen waren nach dem Einfahren nahezu konstant mit Werten von 7.6 mm für die P-Reifen und 10,4 mm für die H-Reifen (siehe *Abb. 52* und *Tab. 7*). Die Standardabweichung lag jeweils bei rund 0.1 mm. Die Shore A Härte betrug für das Ensemble von P-Reifen einheitlich 61 Shore A mit kleinsten Abweichungen. Bei den H-Reifen unterscheiden sich die gemessenen Härten im Nullzustand erheblich und liegen zwischen 56.2 Shore A und 61.6 Shore A, bei Standardabweichungen zwischen 0.9 und 1.9 Shore A. Selbst wenn man die etwas älteren Reifen H-5 und H-6 (die eigentlich aber eher härter sein sollten) ausser Betracht lässt, schwanken die Härten der H-Reifen noch zwischen 59.2 und 61.6. Hier ist zu beachten, dass sich die grobklotzigen H-Reifen offensichtlich nicht so genau messen lassen, was die hohen Standardabweichungen nahelegen. Es mag aber auch eine Rolle spielen, dass die H-Reifen als normales Serienprodukt offenbar keinen so strengen Fertigungsrichtlinien unterliegen, wie die explizit als Messreifen produzierten P-Reifen.

Nach Schälen und künstlichem Abnutzen war eine geplante Profilabnahme in 1 mm Schritten angepeilt worden. Aus technischen Gründen konnte dies nur näherungsweise erreicht werden, so dass die Profiltiefen für die P-Reifen am Ende in unregelmässigen Schrittweiten von 7.6 mm auf 2.9 mm abnahmen, Die Standardabweichungen erhöhten sich gegenüber der Nullmessung auf bis zu 0.3 mm. Die Shore Härten veränderten sich durch den Verschleiss nicht signifikant, mit Ausnahme des am stärksten abgenutzten Reifens mit 2.9 mm Restprofil, welcher um 1.3 Shore A härter wurde. Der erste zu schälende H-Reifen wurde um 2 mm abgenutzt, danach konnte die Abnutzung in etwa in 1 mm Schritten erfolgen. Unter Berücksichtigung der erheblichen Unsicherheiten bei der Shore Härtemessung sind die Veränderungen durch die Abnutzung nicht signifikant, obwohl Sprünge um mehr als 2 Shore A (Abnahme bei Reifen H-5) zu beobachten sind. In der Regel sind die Veränderungen aber unterhalb von 0.5 Shore A. Daraus folgt auch, dass Reifen, die im Nullzustand eher weich waren dies auch nach Abnutzung noch sind und sich damit die individuelle Verschiedenheit der Reifen bestätigt.



**Abb. 52** Vergleich von Profiltiefe (links) und Shore A Härte (rechts) für das Messreifenensemble vor und nach der Reifenabnutzung.

Eine interessante Frage ist, warum die Standardabweichungen bei Shore Härtemessung und Profiltiefenmessung nach dem Verschleiss grösser werden. Bei den Profilmessungen deutet sich an, dass der Verschleiss beim P-Reifen in der Profilmitte um 0.1 bis 0.2 mm höher ist, beim H-Reifen um 0.2 bis 0.3 mm. Das könnte auf zu hohen Luftdruck im Abnutzungsprüfstand hindeuten. In jedem Fall erhöht sich durch diesen systematischen Trend die Standardabweichung über einen statistischen Messfehler hinaus. Das gleiche gilt für die Härte. Für den P-Reifen und für den H-Reifen ergeben sich im Mittel auf der Profilmitte rund 0.5 Shore A mehr als am Rand. Beim H-Reifen war dies allerdings schon bei der Nullmessung der Fall.

**Tab. 7** Profiltiefen und Shore Härten des Messreifenensembles.

Reifenbezeichnung	Profiltiefe, mm				Härte, Shore A			
	vorher		Nachher		vorher		nachher	
	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
P-1	7.6	0.1	7.6	0.1	61.1	0.9	61.0	0.9
P-2	7.6	0.1	6.9	0.3	61.2	0.9	60.8	1.3
P-3	7.6	0.1	6.0	0.1	61.0	1.0	60.8	1.2
P-4	7.6	0.1	4.9	0.2	61.0	0.7	61.0	0.7
P-5	7.6	0.1	4.2	0.3	61.1	0.7	61.3	0.8
P-6	7.6	0.1	2.9	0.3	61.1	0.8	62.4	0.8
H-1	10.5	0.2	10.5	0.2	61.6	1.9	61.6	1.2
H-2	10.3	0.1	8.7	0.4	61.0	1.6	60.4	1.0
H-3	10.4	0.1	7.8	0.4	60.3	0.9	60.3	1.9
H-4	10.3	0.1	6.6	0.6	59.2	1.3	59.8	1.0
H-5	10.4	0.1	5.8	0.4	58.3	1.5	56.0	1.4
H-6	10.6	0.1	4.6	0.4	56.2	0.9	56.3	0.9

## 2.4.5 Präparation der Reifen

### Abschälen

Das Abschälen wurde bei der Firma Reifen Ihle (einem Reifenrunderneuerer) in Günzburg, Deutschland, durchgeführt. Beide Reifen (H und P) wurden dort geschält (bzw. "abgeraut", wie die Fachleute dort dazu sagen). Der Reifen dreht sich dabei, das "Messer" steht. Der Vorgang dauerte etwa 10-20 Minuten pro Reifen (natürlich je nach Höhe des zu entfernenden Profils). Die Einstellung der Schälwerkzeuge erfolgt graduell. Aus technischen Gründen wurden beim H-Reifen im ersten Schritt bereits 2 mm abgeschält, ansonsten konnte die geplante Schrittweite von 1 mm näherungsweise umgesetzt werden. Nach dem Schälen weisen die Profilklotze eine unnatürliche Struktur mit Längsrillenartigen Schnittspuren auf (siehe Foto *Abb. 53*).

### Verschleissen

Das Herstellen einer realistisch aussehenden Reifenoberfläche erfolgte nach dem Abrauen in einem Reifenprüfstand am KIT (Karlsruhe Institute of Technology). In einer grossen Prüftrommel wurden die Reifen nacheinander auf einer grobrauen Oberfläche um jeweils weniger als 1 mm abgenutzt. Dabei wurde die Belastung so gering wie möglich gehalten, d.h. es wurden nur sehr kleine Schräglaufwinkel eingestellt. Die Reifen sind dabei nur etwa handwarm geworden. Die Dauer war bei den H-Reifen viel kürzer als bei den P-Reifen. Jeder P-Reifen benötigte mehrere Stunden im Prüfstand. Am Ende ergab sich jeweils eine realistisch aussehende Reifenoberfläche (siehe *Abb. 54*). Im Vergleich mit einem nach zwei Messsaisons ausgemusterten Prüfreifen vom Typ H (Abbildungsmitte) ergibt sich schon nach der niedrigsten Verschleissstufe eine deutliche stärkere Abnutzung. Man beachte die runden Nippel beim Neureifen (rechts), die sich bei dem alten Messreifen nach einigen tausend Kilometern immer noch schwach abzeichnen (mittig), aber nicht mehr nach dem Abtrag von 2 mm.



**Abb. 53** Frisch geschälter Reifen H mit Längsrillen durch den Schälvorgang und daher unrealistischer Reifenoberfläche.



**Abb. 54** Messreifen H unmittelbar nach dem Einfahren (rechts), in der geringsten Verschleissstufe (2 mm, links) und ein alter Messreifen nach Ausmusterung aufgrund der Alterung (mittig).

## 2.4.6 Durchführung der CPX-Messungen

Die Messungen wurden bei der Nominalgeschwindigkeit 80 km/h durchgeführt. Es wurden die nach Norm obligatorischen Mikrofonpositionen im rechten Radhaus ausgewertet.

### Ablauf

Die Messvorbereitungen inklusive der periodischen Reifenwechsel fanden jeweils am Ende der Messstrecke auf dem Autobahnrastplatz Baden-Baden statt, sodass während der Anfahrt zum Anfang der Messstrecke der jeweilige Reifensatz warm gefahren und die Gesamtzeit so effektiv ausgenutzt wurde. Das Verkehrsaufkommen während der Messungen war jeweils moderat, weshalb die vorgesehene Messfahrgeschwindigkeit von 80 km/h gut eingehalten werden konnte.

Das Prozedere wurde an einem weiteren Tag für den anderen Messreifen wiederholt. Einzelheiten zum zeitlichen Ablauf gehen aus *Tab. 8* hervor.

**Tab. 8** Luft- und Fahrbahntemperaturen  $T_L$ ,  $T_{Fb}$  während der Messungen.

Reifen- typ	Messkampagne	Datum	Zeitraum	$T_L$ , °C	$T_{Fb}$ , °C
P	vor Verschleiss	17.08.2012	10 <sup>00</sup> – 15 <sup>00</sup>	23 – 32	25 – 43
	nach Verschleiss	19.11.2012	11 <sup>00</sup> – 17 <sup>00</sup>	3 – 6	2 – 4
H	vor Verschleiss	14.05.2012	11 <sup>00</sup> – 18 <sup>00</sup>	17 – 22	19 – 27
	nach Verschleiss	02.08.2012	14 <sup>00</sup> – 19 <sup>00</sup>	26 – 29	28 – 39

### Zeitraum und Witterung bei den Messfahrten

Zum Zeitpunkt der Messungen war es trocken und klar. Die Fahrbahnen waren trocken. Auch an den Tagen vor den Messungen waren keine Niederschläge zu verzeichnen, so dass davon auszugehen ist, dass sich keine Restfeuchtigkeit in den zum Teil hohlraumreichen Belägen befand, die die Messergebnisse hätten beeinflussen können.

Bei den Messungen herrschten die in *Tab. 8* eingetragenen Luft- und Fahrbahntemperaturen.

Die Witterungsbedingungen entsprachen somit in vollem Umfang den Normanforderungen.

### Störgeräusche

Besondere Störgeräusche, beispielsweise durch besonders laute vorbeifahrende Lastwagen, Bahnverkehr etc. sind während der Messungen nicht aufgetreten.

## 2.4.7 Ergebnisse

Die Messdaten wurden getrennt für den Asphalt- und Beton-Belag ausgewertet. Gemäss Norm [3] wurden jeweils 20 m Mittelwerte der A-bewerteten FAST Schalldruckpegel gebildet und diese sorgfältig editiert. Bereiche mit kurzfristigen Belagswechseln etwa auf Brücken und andere Unstetigkeiten wurden von der Bewertung ausgeschlossen und zeigen sich in den nachfolgenden Diagrammen als Datenlücken. Es wurden bei allen Messungen gleichen Reifentyps, d.h. auch bei den vorher/nachher Vergleichen) jeweils die gleichen Wegstrecken ausgeschlossen, um eine maximale Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Die Pegel-Ortsverläufe zeigen kohärente sehr dicht beieinander liegende Kurven für die Wiederholungsmessungen mit verschiedenen Reifen (*Abb. 55* bis *Abb. 58*). Erwartungsgemäss ist die Kohärenz bei den jeweiligen Nullmessungen am grössten, und zwar be-

sonders bei den P-Reifen, die ein besonders homogenes Ensemble darstellten (siehe Bestimmung der Shore Härte oben). Für den P-Reifen ist die Kohärenz zwischen den Reifen bei der Nullmessung auf Asphalt am grössten, für den H-Reifen auf Beton. Die individuellen Unterschiede zwischen den einzelnen H-Reifen (siehe Shore Härtemessungen oben) zeigen sich bereits deutlich bei der Nullmessung durch eine Parallelverschiebung der Messkurven gegeneinander, insbesondere auf dem stärker texturierten Asphalt. Das Abnutzen der Messreifen führt im Allgemeinen zu erhöhten Pegeln. Noch deutlicher als das Anheben ist die Aufspreizung der Pegel-Ortsverläufe nach der Verschleissprozedur. Offensichtlich hat sich die Verschiedenheit der Reifen durch die Abnutzung erhöht. Auch die Kohärenz der Kurvenverläufe nimmt deutlich ab.

Eine direkte Gegenüberstellung der mittleren Schalldruckpegel vor und nach dem Abnutzungsexperiment zeigt für den P-Reifen auf Asphalt keinen klaren Trend (*Abb. 59*). Die Hälfte der Messreifen wurde lauter, die andere Hälfte leiser. Reifen P-6 war bei der Nullmessung der leiseste, nach Abnutzung ist er der Lauteste. Der Mittelwert der Differenzen nachher/vorher für jeden Reifen beträgt Null. Auf Beton werden die Reifen im Mittel um 0.3 dB leiser. Aber auch hier ist zunächst kein Trend sichtbar. Plottet man die gemittelten Pegel als Funktion der gemessenen Profiltiefe und lässt Ausreisser aussen vor, ergibt sich eine leichte Abnahme mit der Profiltiefe, d.h. eine leichte Zunahme mit der Abnutzung. Ein entsprechender linearer Fit weist aber noch eine erhebliche Unsicherheit auf. Eine einfache Proportionalität zur Shore Härte der P-Reifen zeichnet sich in den Plots (*Abb. 59*) nicht ab, bei der geringen Schwankungsbreite der Shore Härte ist das aber auch nur schwer möglich. Bemerkenswert ist aber, wie sich ein charakteristisches Auf und Ab der Pegelkurve von Messreifen zu Messreifen bei jeder Messfahrt, d.h. sowohl auf Asphalt, als auch auf Beton in ähnlicher Weise abzeichnet, obwohl der offenporige Asphalt und der dichte Beton sich in ihrer akustischen Wirkung beim Reifen-Fahrbahnkontakt deutlich unterscheiden. Es ist, als ob mit jedem Reifenwechsel ein konstanter (aber leicht belagsabhängiger) Faktor die Einzelmessungen um einen Betrag von wenigen Zehnteln Dezibel verschiebt. Dies ist ein Mass für die allgemeine Messunsicherheit der CPX-Methode. Man beachte in diesem Zusammenhang, dass zwischen den Reifenwechseln weder die Mikrofone neu justiert noch eine Kalibrierung durchgeführt wurde.

Der H-Reifen weist höhere Schwankungsbreiten in Bezug auf die Pegelmittelwerte und die Shore Härten auf (*Abb. 60*). Der Reifen H-1 fällt etwas aus dem Rahmen, mit hohen Pegeln und der grössten Härte. Die Pegelmittelwerte liegen von dem Ausreisserreifen H-1 abgesehen, innerhalb von 1 dB, und zwar auf Asphalt und Beton vor und nach der Abnutzung. Auch mit zunehmender Profiltiefe der H-Reifen, d.h. mit geringerer Abnutzung nimmt der Pegel jeweils ab. Die Qualität der linearen Regressionen ist allerdings nicht sehr hoch. Schon im Neuzustand liegen die Härten der H-Reifen zwischen 56 und fast 62 Shore A. Zunehmende Härte führt tendenziell zu höheren Pegeln. Bei den Nullmessungen war dies deutlicher zu sehen als bei den Verschleissmessungen.

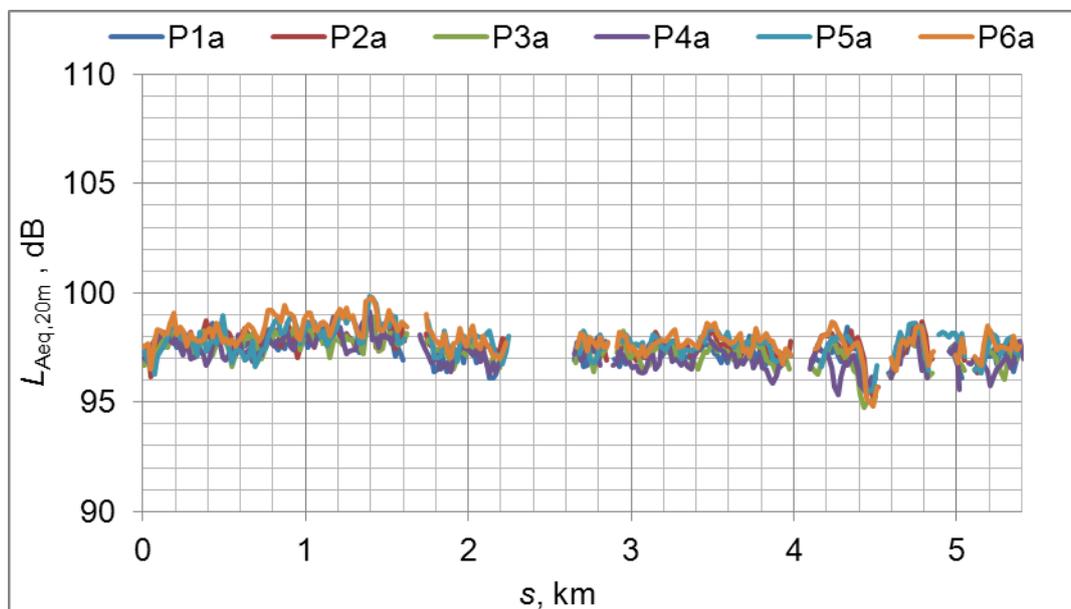
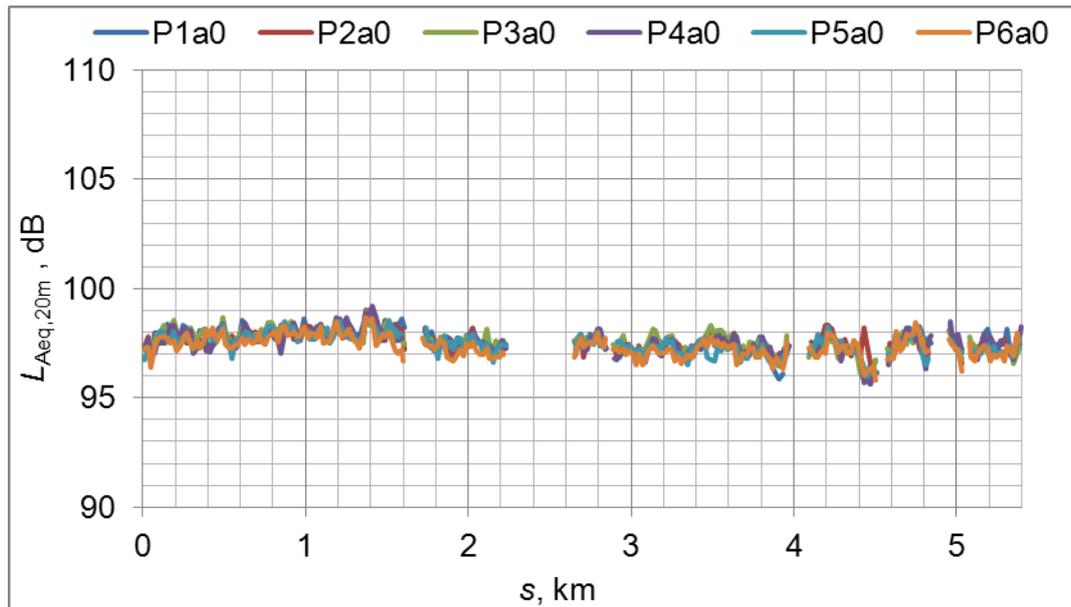
Illustrativ ist auch eine Histogrammdarstellung der Schalldruckpegel für beide Reifen vorher/nachher (*Abb. 61* und *Abb. 62*). Graphisch eingetragen auf den Balken ist die Standardabweichung der Pegel entlang der Asphalt-, bzw. Betonmessstrecke. Dies ist ein Mass für die räumliche Variabilität der Pegel-Ortskurve, die überwiegend durch den Einbau bedingt sein dürfte und weniger als ein echter Fehlerbalken anzusehen ist. Folgendes ist zu beobachten:

- Auf Asphalt sind die Pegel für P-Reifen 1 bis 2 dB niedriger als auf Beton, die Homogenität ist aber auf Beton grösser.
- Die Standardabweichung nimmt für jeden Reifen nach der Abnutzung zu.
- Unter Berücksichtigung der Standardabweichung nimmt der P-Reifengesamtpegel auf Asphalt insgesamt nicht signifikant zu, am ehesten noch nach sehr starkem Verschleiss. Im Gegensatz dazu scheint er bei geringer Abnutzung (2 bis 3 mm) sogar abzunehmen.
- Auf Beton verändert sich der P-Reifenpegel nicht signifikant nach starkem Verschleiss, nimmt aber offenbar bei geringem Verschleiss (2 bis 3 mm) ab.
- Der H-Reifen führt auf Beton zu Pegeln, die um rund 1 dB höher sind als auf Asphalt.

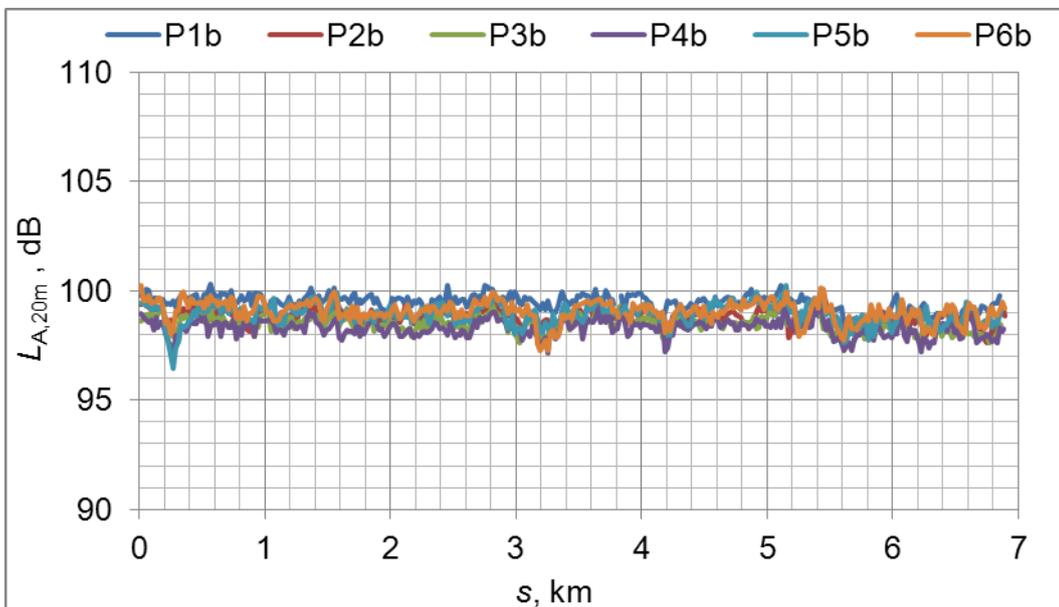
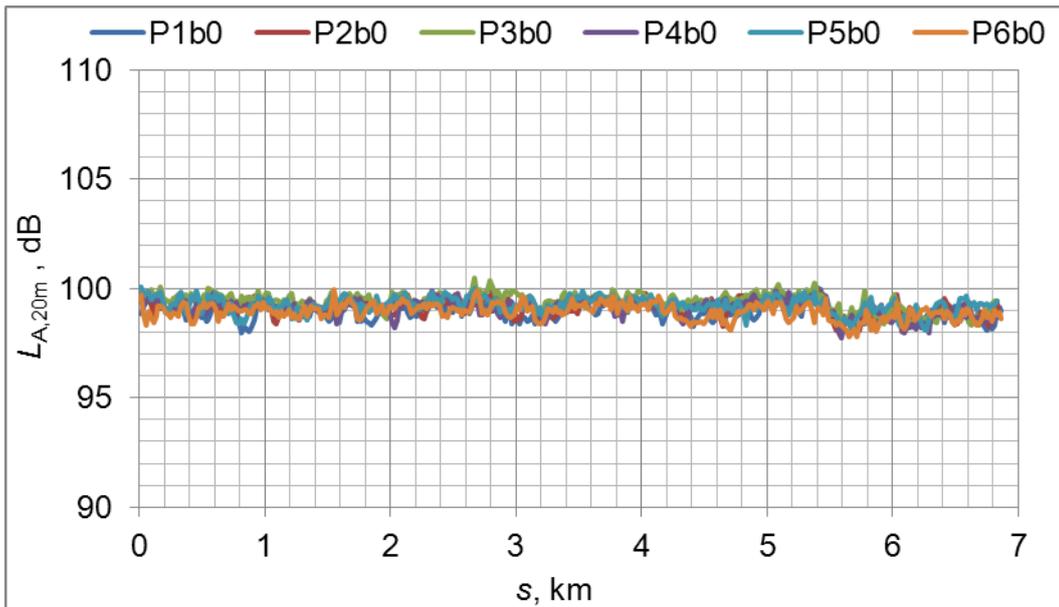
- Der H-Reifen im Originalzustand weist bei der Zweitmessung zu hohe Pegel auf und ist deshalb mit Vorsicht zu interpretieren.
- Nach schwacher Abnutzung (1 bis 2 mm) nehmen die Pegel für den H-Reifen auf beiden Belägen etwas ab, nach starker Abnutzung sind sie nicht signifikant verändert.

Die Betrachtung der Gesamtpegel liefert keine eindeutige Interpretation. Dazu ist es besser, die Terzspektren zu betrachten (*Abb. 63 bis Abb. 70*). Hier wird für die Messungen mit P-Reifen zwischen den Mikrofonpositionen in Fahrtrichtung vor dem Reifen (Kanal 4) und der Normposition hinter dem Reifen (Kanal 3) unterschieden. Die Amplitudenspektren beider Messpositionen unterscheiden sich in Form und Niveau. Hinter dem Reifen wird ein ausgeprägtes, davor ein etwas breitbandigeres Spektrum gemessen. Die Unterschiede zwischen den Messreifen sind jeweils gering. Nach der Reifenabnutzung lassen sich zwei Effekte beobachten:

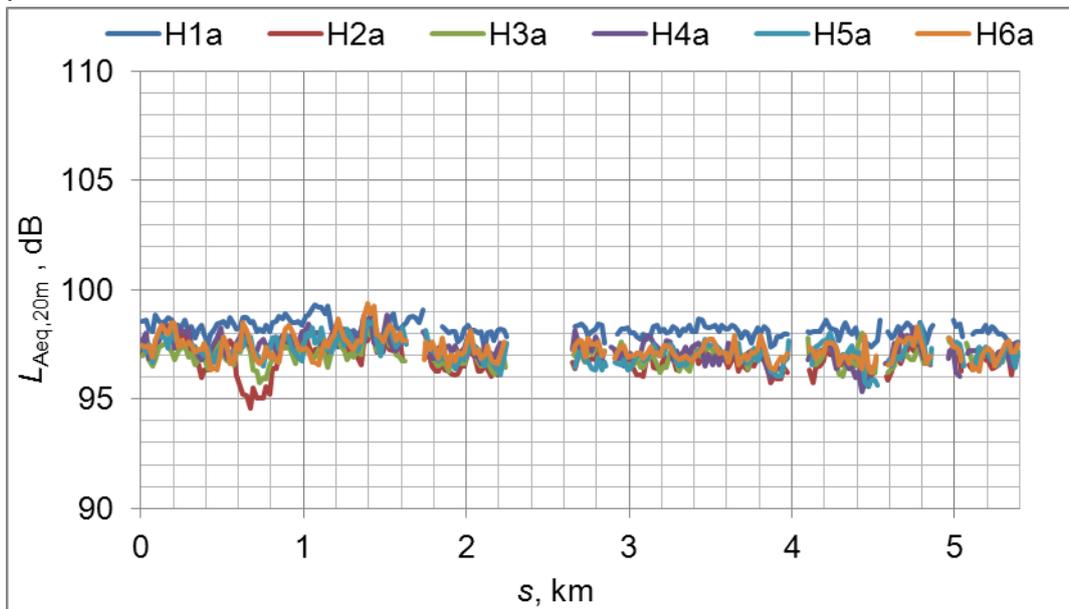
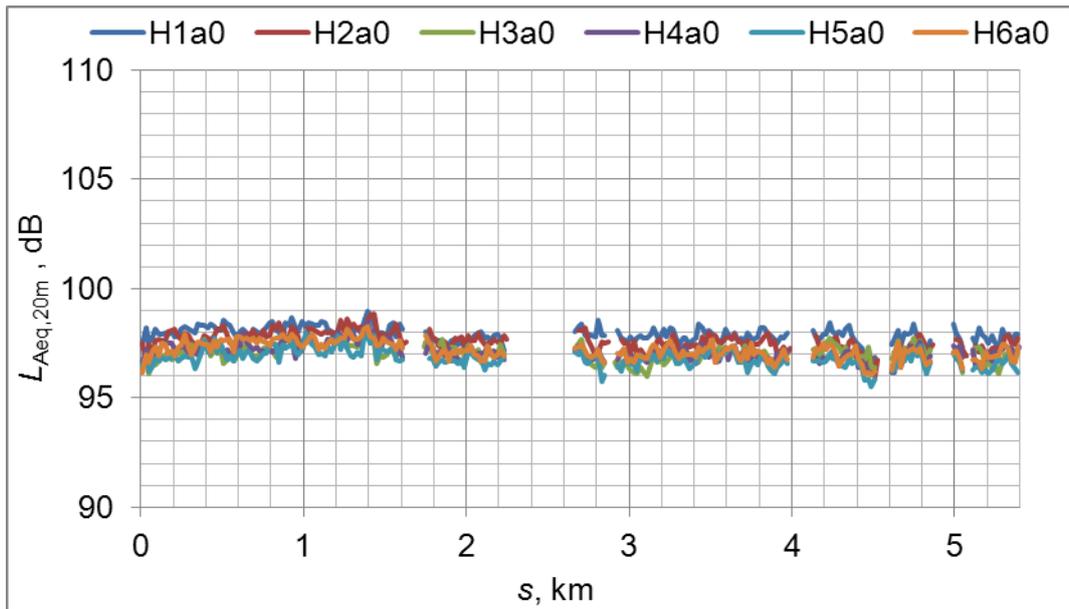
- Die Spektren vor und hinter dem Reifen gleichen sich der Form nach an.
- Die Reifen ohne gänzliche und mit sehr geringer Abnutzung folgen oft nicht dem Trend der vier anderen Reifen, die in der Regel ein konsistentes Ensemble bilden.
- Die Spektren der P-Reifenmessung bewegen sich auseinander. Mit stärkerer Abnutzung wird die spektrale Amplitude im Bereich um 1250 Hz grösser und hohe Frequenzen über 2000 Hz verlieren an Energie, gleichzeitig verlieren niedrigere Frequenzen geringfügig an spektraler Amplitude.
- Der Trend der Amplitudenzunahme bei den Messungen mit P-Reifen von Abnutzungsgrad zu Abnutzungsgrad ist nur zwischen 1000 Hz und etwa 1250 Hz eindeutig, die Terzen von 630 Hz und 800 Hz zeigen eine leicht gegenläufige Tendenz und die beobachteten Veränderungen in Frequenzbändern über 1250 Hz zeigen keinen klaren Trend.
- Die Spektren der P-Reifenmessung auf Beton bewegen sich noch stärker auseinander und zeigen auch einen klareren Trend, insbesondere an der hinteren Mikrofonposition. Mit erhöhter Abnutzung verlieren die Amplituden von 630 Hz bis 1000 Hz deutlich (bei 800 Hz um 2 dB) und gewinnen jenseits von 1250 Hz mit zunehmendem Verschleiss systematisch an spektraler Amplitude, bei 2000 Hz vorne um fast 3 dB. Bei 1000 Hz (Mikrofon vorne) und bei 1250 Hz (Mikrofon hinten) ergibt sich jeweils keine Veränderung.



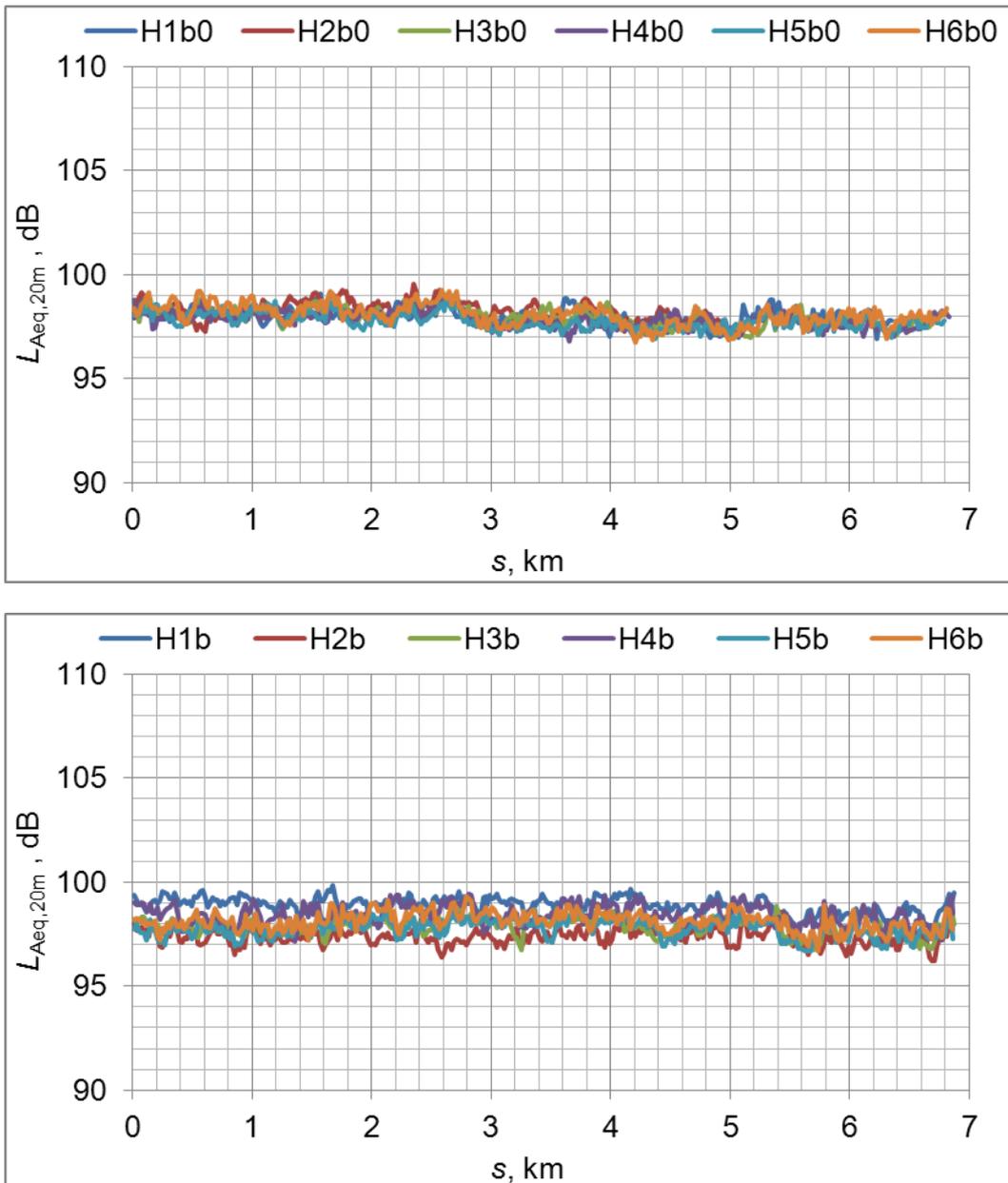
**Abb. 55** Ortspegelverläufe für den CPX-Pegel  $L_{A,20m}$  des P-Reifens auf Asphalt für die Reifen P-1 bis P-6 vor dem Verschleiss (oben) und danach (unten).  $s$ : zurückgelegte Distanz.



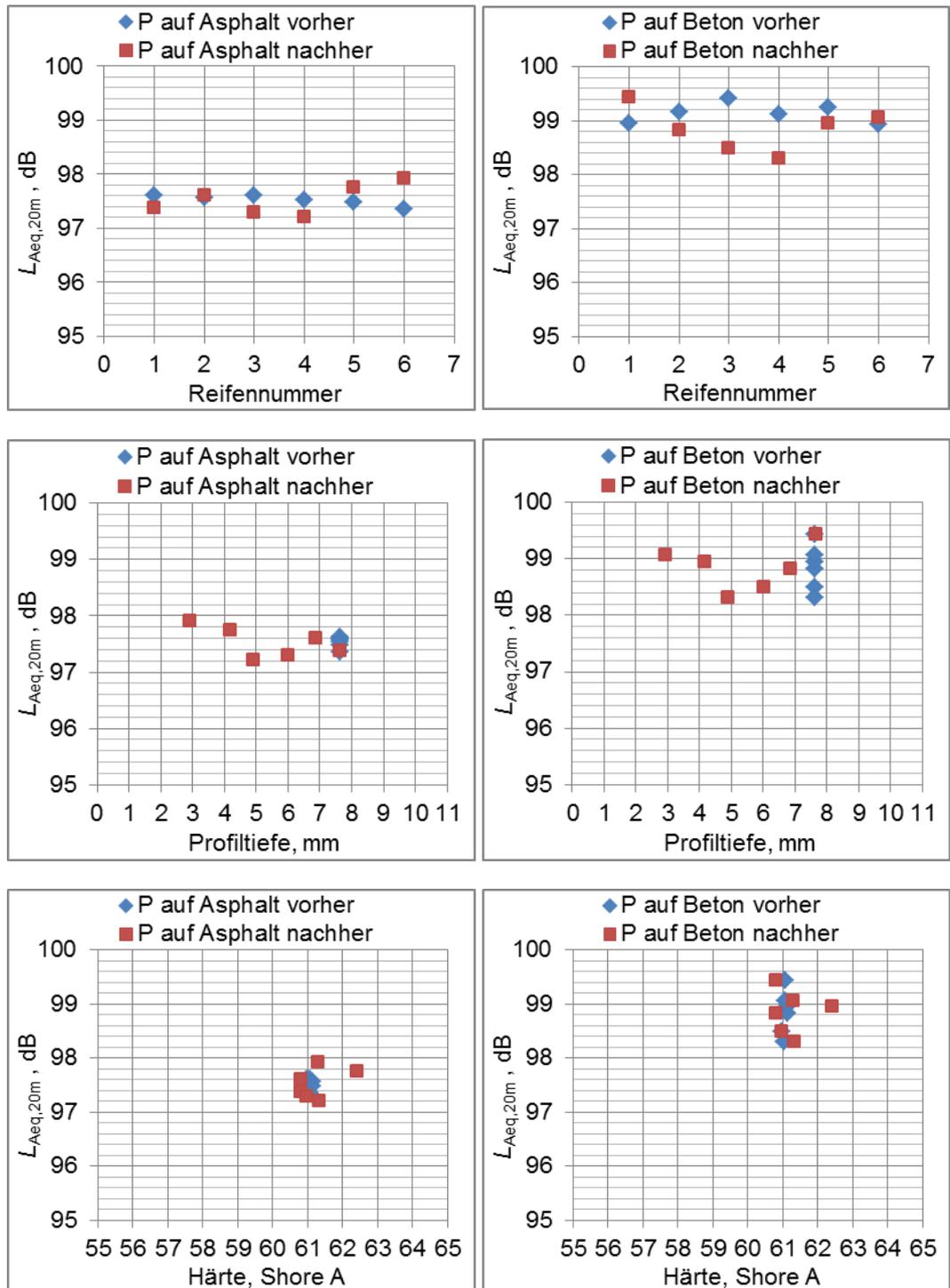
**Abb. 56** Ortspegelverläufe für den CPX-Pegel  $L_{A,20m}$  des P-Reifens auf Beton für die Reifen P-1 bis P-6 vor dem Verschleiss (oben) und danach (unten).  $s$ : zurückgelegte Distanz.



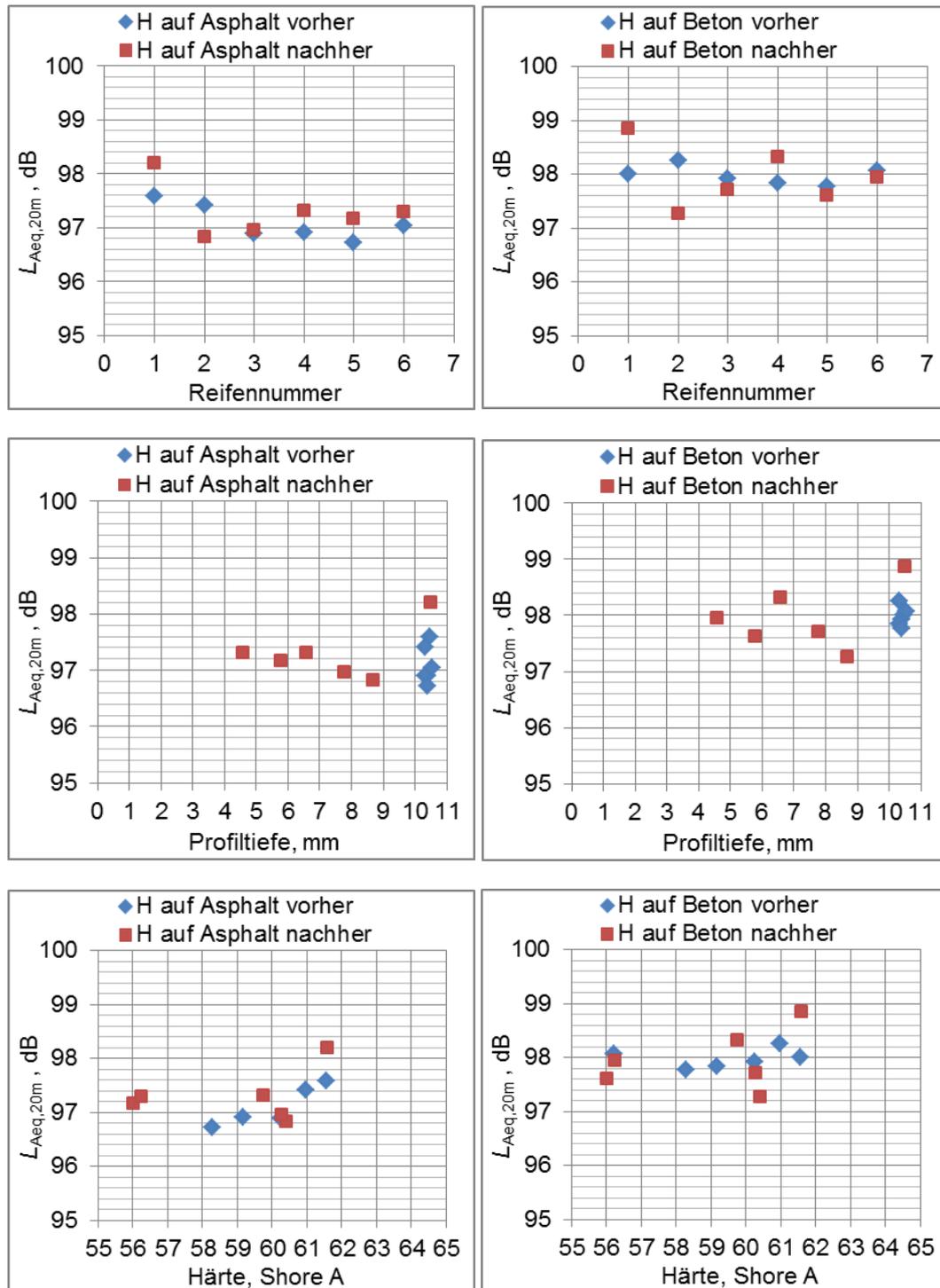
**Abb. 57** Ortspegelverläufe für den CPX-Pegel  $L_{A,20m}$  des H-Reifens auf Asphalt für die Reifen H-1 bis H-6 vor dem Verschleiss (oben) und danach (unten).  $s$ : zurückgelegte Distanz.



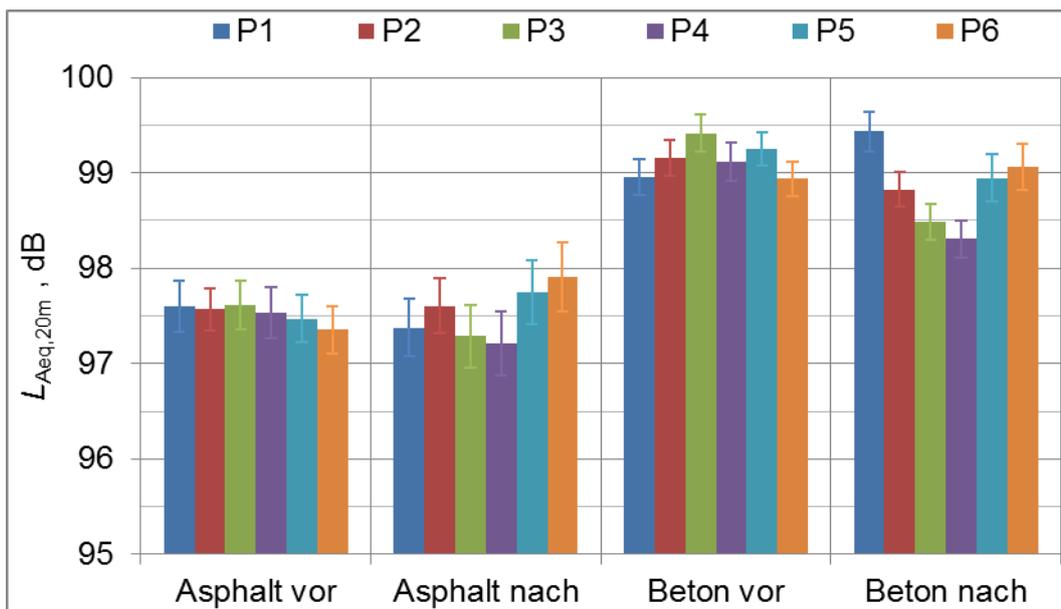
**Abb. 58** Ortspegelverläufe für den CPX-Pegel  $L_{A,20m}$  des H-Reifens auf Beton für die Reifen H-1 bis H-6 vor dem Verschleiss (oben) und danach (unten).  $s$ : zurückgelegte Distanz.



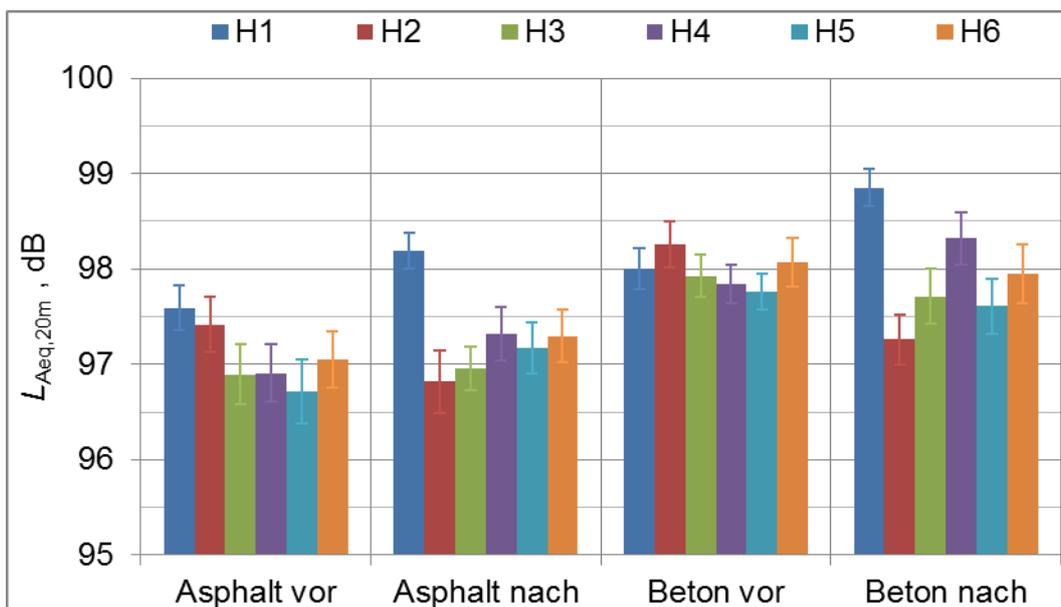
**Abb. 59** Gemittelter CPX-Pegel  $L_{Aeq,20m}$  für den P-Reifen in Abhängigkeit von der Reifennummer, der Profiltiefe und der Shore A Härte.



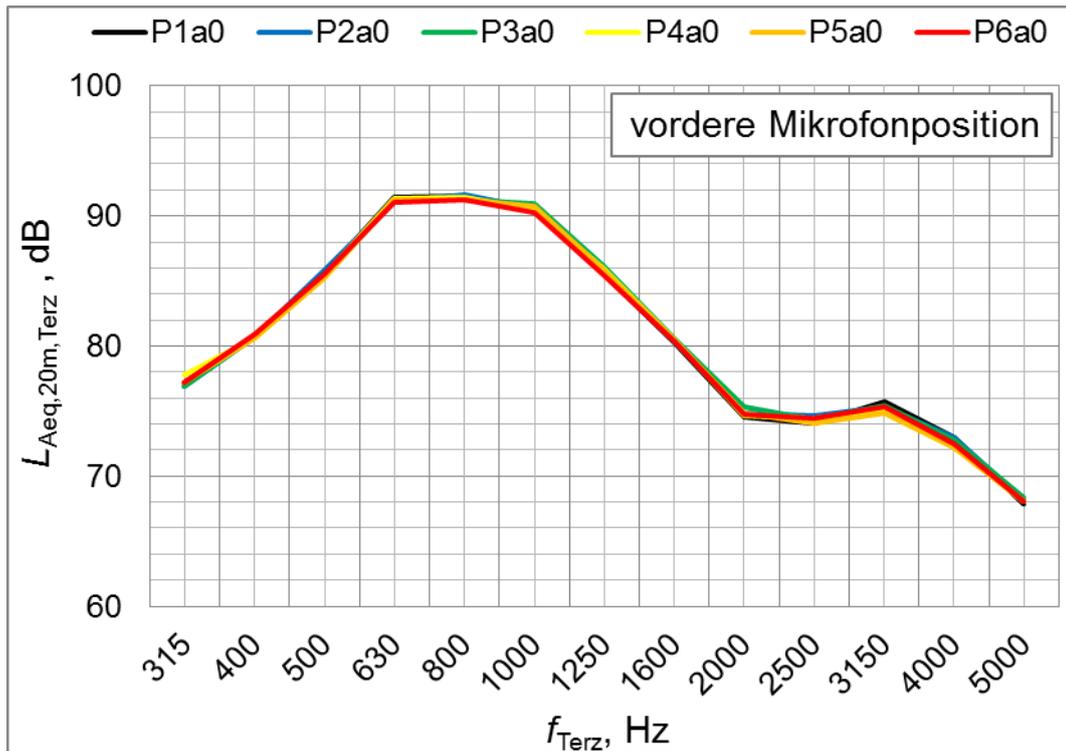
**Abb. 60** Gemittelter CPX-Pegel  $L_{Aeq,20m}$  für den H-Reifen in Abhängigkeit von der Reifennummer, der Profiltiefe und der Shore A Härte.



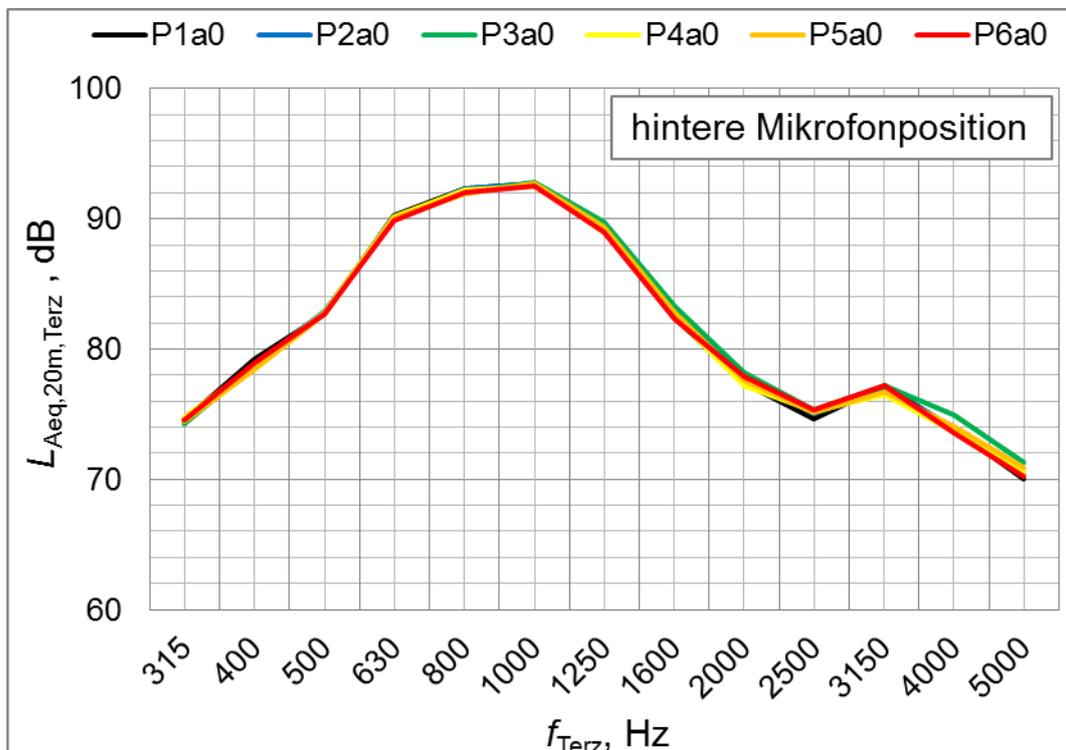
**Abb. 61** Gemittelter CPX-Pegel  $L_{Aeq,20m}$  entlang der Messstrecke für den P-Reifen auf Asphalt (links) und Beton (rechts) vor dem Reifenabriebexperiment (Spalte ganz links und dritte Spalte von links) und nach dem Verschleiss (zweite Spalte von links und ganz rechts).



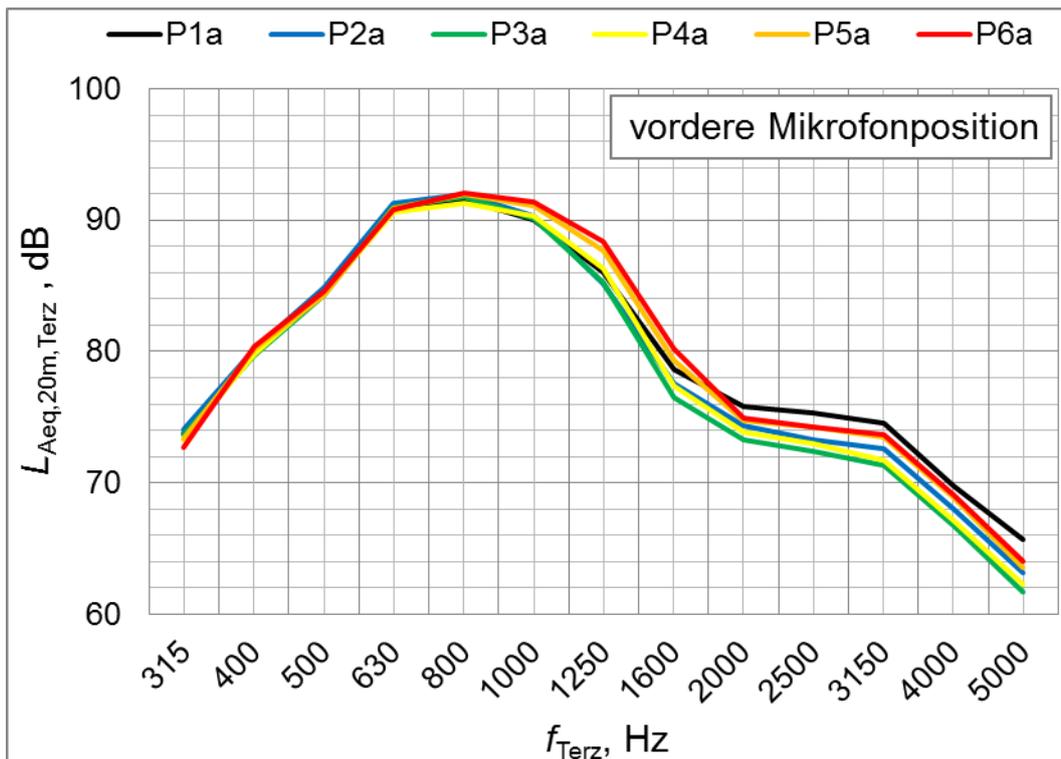
**Abb. 62** Gemittelter CPX-Pegel  $L_{Aeq,20m}$  entlang der Messstrecke für den H-Reifen auf Asphalt (links) und Beton (rechts) vor dem Reifenabriebexperiment (Spalte ganz links und dritte Spalte von links) und nach dem Verschleiss (zweite Spalte von links und ganz rechts).



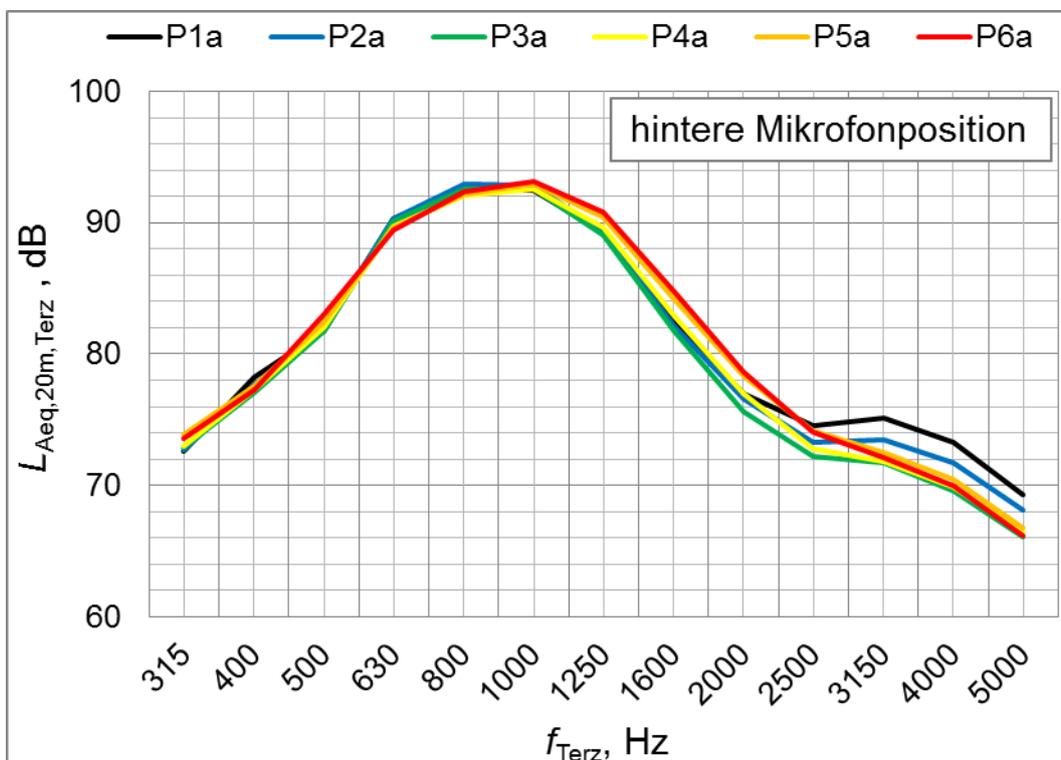
**Abb. 63** Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  am Messmikrofon in Fahrrichtung vor dem Reifen auf Asphalt, gemessen für alle P-Reifen vor der Abnutzung.  $f_{Terz}$ : Terzmittenfrequenz in Hz.



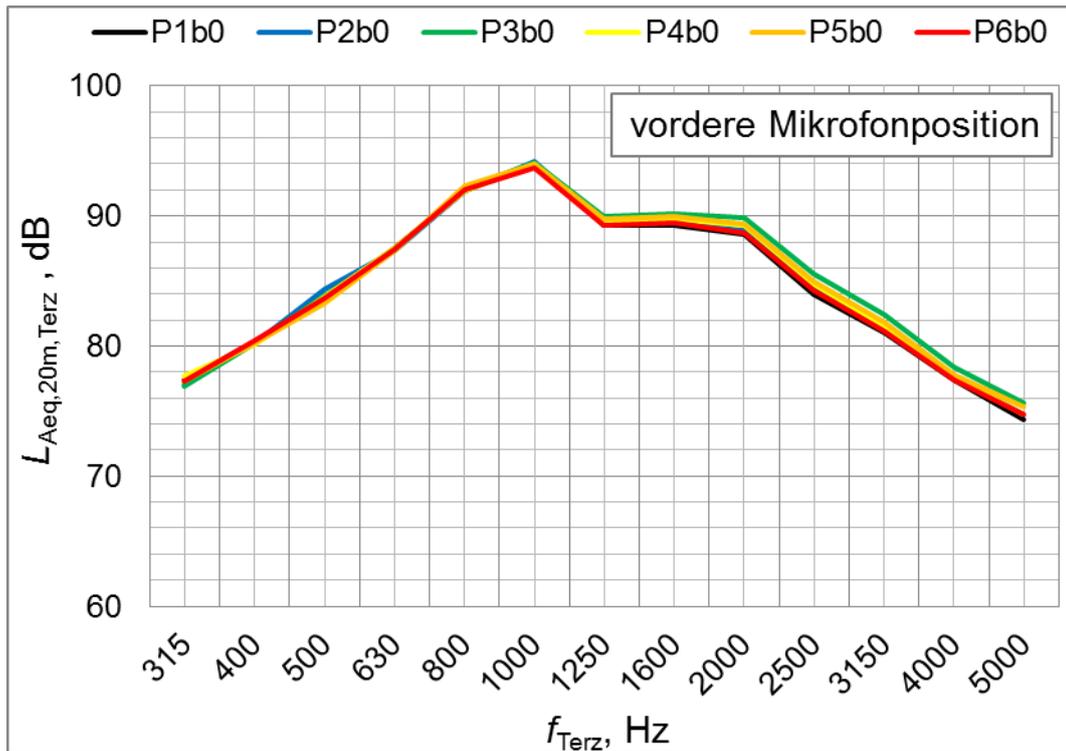
**Abb. 64** Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  am Messmikrofon in Fahrrichtung hinter dem Reifen auf Asphalt, gemessen für alle P-Reifen vor der Abnutzung.  $f_{Terz}$ : Terzmittenfrequenz in Hz.



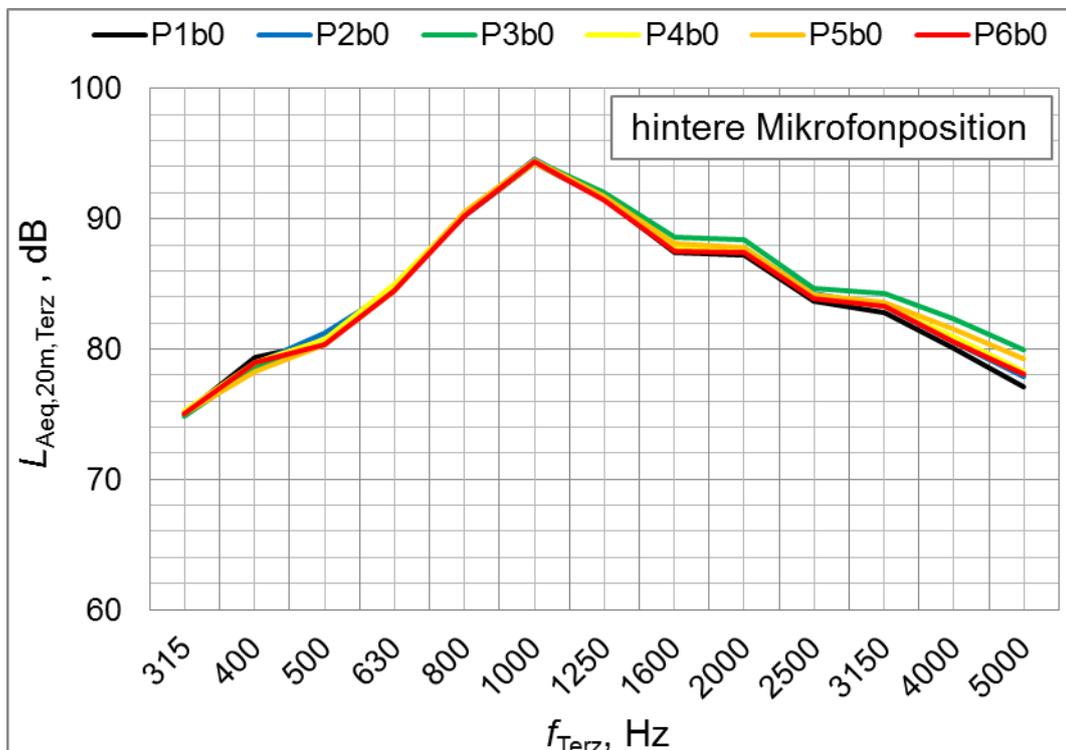
**Abb. 65** Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  am Messmikrofon in Fahrtrichtung vor dem Reifen auf Asphalt gemessen für alle P-Reifen nach der Abnutzung.  $f_{Terz}$ : Terzmittenfrequenz in Hz.



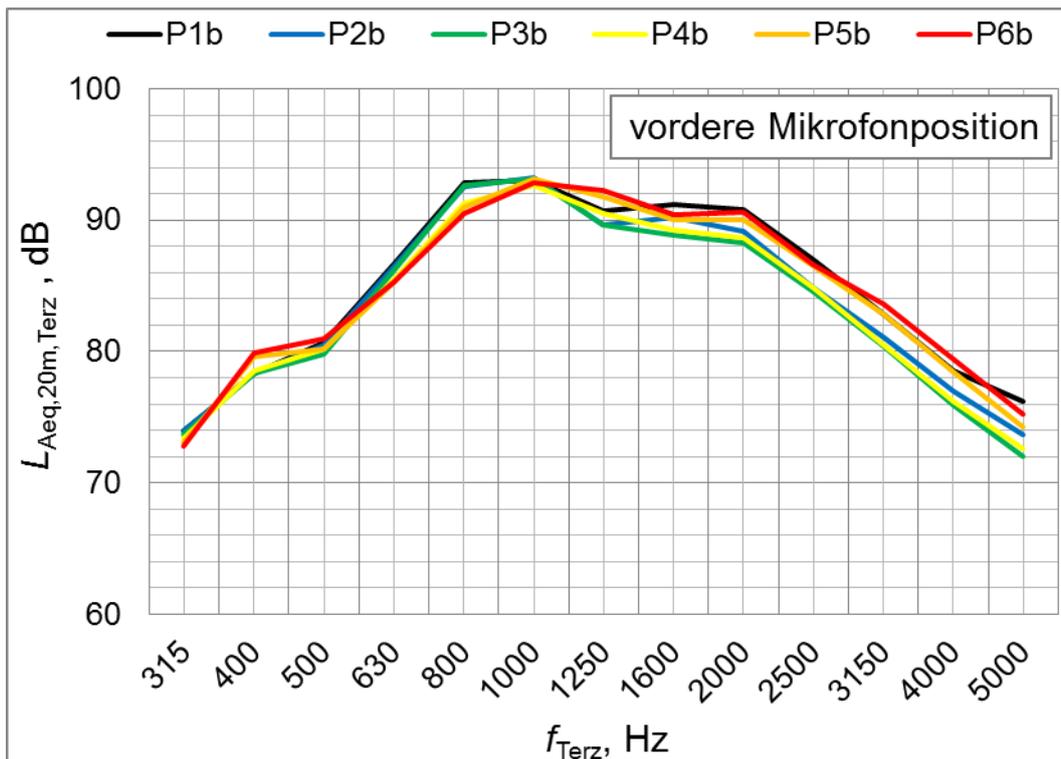
**Abb. 66** Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  am Messmikrofon in Fahrtrichtung hinter dem Reifen auf Asphalt gemessen für alle P-Reifen nach der Abnutzung.  $f_{Terz}$ : Terzmittenfrequenz in Hz.



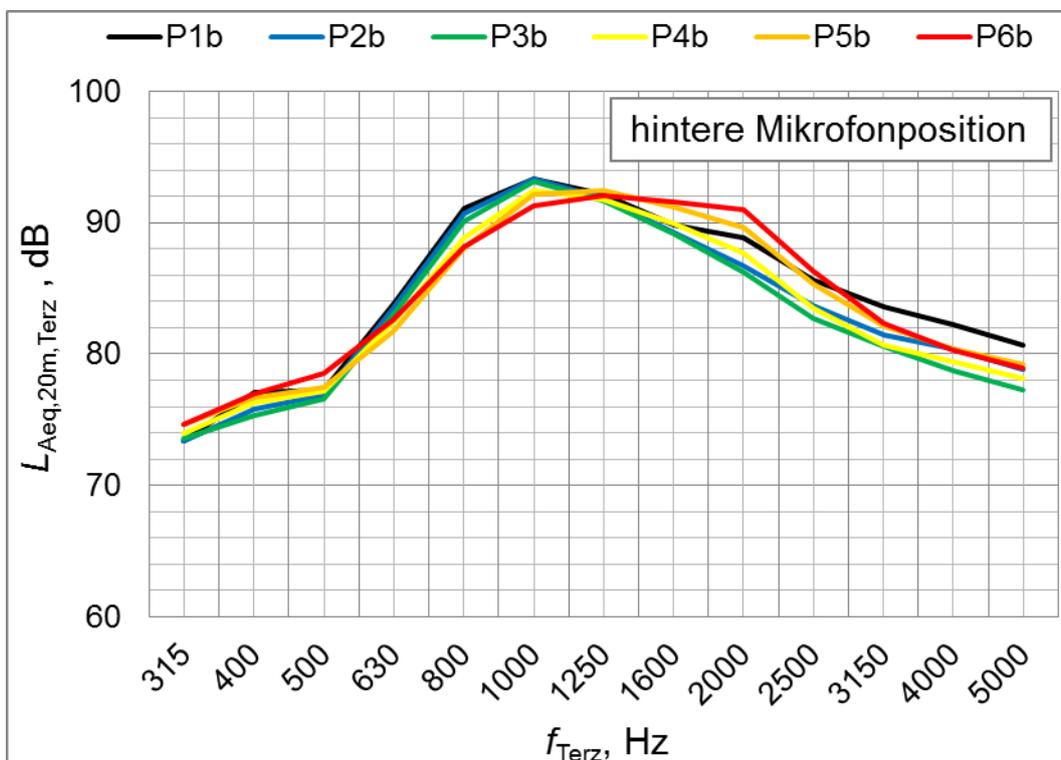
**Abb. 67** Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  am Messmikrofon in Fahrtrichtung vor dem Reifen auf Beton gemessen für alle P-Reifen vor der Abnutzung.  $f_{Terz}$ : Terzmittenfrequenz in Hz.



**Abb. 68** Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  am Messmikrofon in Fahrtrichtung hinter dem Reifen auf Beton gemessen für alle P-Reifen vor der Abnutzung.  $f_{Terz}$ : Terzmittenfrequenz in Hz.



**Abb. 69** Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  am Messmikrofon in Fahrtrichtung vor dem Reifen auf Beton, gemessen für alle P-Reifen nach der Abnutzung.  $f_{Terz}$ : Terzmittenfrequenz in Hz.



**Abb. 70** Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels  $L_{Aeq,20m, Terz}$  am Messmikrofon in Fahrtrichtung hinter dem Reifen auf Beton, gemessen für alle P-Reifen nach der Abnutzung.  $f_{Terz}$ : Terzmittenfrequenz in Hz.

## 2.4.8 Schlussfolgerungen

Die Standardabweichung der CPX-Geräuschpegel nimmt durch den Reifenverschleissprozess geringfügig zu und spiegelt damit eine grössere Inhomogenität der Belagsstrecke wider.

Diesen Ergebnissen nach kann man überschlagsmässig mit einer Pegelzunahme von rund 0.1 dB pro abgetragenem Profilmillimeter sowohl auf Asphalt als auch auf Beton für P- und H-Reifen rechnen.

In der Messpraxis bedeutsamer als der Einfluss der Profilabnahme dürfte die Schallpegelzunahme mit der Alterung der Messreifen sein, welche mit einer Zunahme der Shore Härte einhergeht. In den Messdaten finden sich Hinweise darauf, insbesondere in den Nullmessungen. Für eine genaue Untersuchung dieses Aspekts ist das Messreifenensemble aber nicht geeignet, weil die Shore Härten nicht verschieden genug sind. Einer der geringsten innerhalb der Literatur berichteten Gradienten von 0.1 dB pro Shore A bei CPX-Messungen [26] ist mit unseren Daten aber kompatibel.

Wie schnell die Reifenhärtung vor sich geht hängt ganz wesentlich von den Lagerungsbedingungen, insbesondere der Temperatur ab. Bei ausgemusterten P-Messreifen von Ende 2006 waren Shore Härten von gut 69 zu messen, bei den neuen Reifen etwa 61 Shore A. Daraus ergibt sich ein Gradient von 1.3 Shore A pro Jahr. Bei ausgemusterten H-Reifen aus dem Jahre 2008 war ein Härtegrad von 61 Shore A zu messen bei 10 mm Profilstärke (übrigens unverändert vom Jahr zuvor). Dies ist fast der Wert, der bei den neuen Reifen (H-1 bis H-4) mit Produktion Mitte 2010 zu messen war. Die beiden Reifen mit Produktionsdatum Ende 2011 haben Härten von rund 57 Shore A +/- 1. Offensichtlich hängt die Härte der H-Reifen ebenso stark von produktionsbedingten Schwankungen ab, wie von ihrem Alter.

Insgesamt führt der Reifenverschleiss zu systematischen geringfügigen Verschiebungen innerhalb der Frequenzbänder mit einer spektralen Abnahme zwischen 500 Hz und 800 Hz, wenig Veränderung im Bereich knapp um und über 1000 Hz und zu einer Amplitudenzunahme oberhalb von 1250 Hz. Für den Gesamtpegel bedeutet dies keine deutliche Änderung, insbesondere solange die Profilabnutzung unterhalb von 2 mm bleibt. Stärkere Abnutzung ist unter normalen Messbedingungen nur über mehrere Messjahre zu erreichen. Dieser Zustand stellt sich jedoch schon wegen einer vorzeitigen Ausmusterung der Messreifen aufgrund ihrer Alterung und der damit verbundenen Verhärtung nicht ein.

Folgende Empfehlungen für die Messpraxis sind aus den Ergebnissen abzuleiten:

- Zwar gibt es eine leichte Zunahme der Schalldruckpegel mit der Profilabtragung, bis diese Zunahme in der Messpraxis aber zum Tragen kommt, sollte der Messreifen ohnehin aufgrund seiner Alterung und der damit einhergehenden Verhärtung ausgemustert worden sein.
- Nach spätestens drei, besser zwei Jahren sollten die P-Messreifen ausgemustert werden, denn dann dürfte die Härte um 4 Shore A zugenommen haben und der CPX-Pegel um rund 0.4 dB, was im Rahmen der allgemeinen Messgenauigkeit liegt. Bei den H-Reifen sind die produktionsbedingten Schwankungen so gross, dass der Alterungseffekt innerhalb von zwei bis drei Jahren davor zurücktreten könnte. Beim Neukauf sollte die Shore A Härte der H-Reifen gemessen und protokolliert werden. Eine härteabhängige Korrektur der Schallpegel sollte für die H-Reifen ins Auge gefasst werden.
- In jedem Fall sollte vor und nach jeder Messsaison und einmal währenddessen die Shore Härte gemessen und protokolliert werden.

## 2.5 Genauigkeit der Positionsbestimmung bei CPX-Messungen

### 2.5.1 Ausgangslage

Ab dem Start einer CPX-Messung werden die Schalldruckpegel als Funktion der Messzeit vom fahrenden Fahrzeug aus registriert. Um CPX-Messungen verorten zu können, verfügen Messsysteme der Müller-BBM über einen GPS-Sensor (im Einklang mit der Empfehlung im Normentwurf [3]), der auf der Deichsel des Anhängers montiert ist. Die GPS-Ortskoordinaten werden während der akustischen Messungen permanent erfasst und aufgezeichnet. Bei der Auswertung wird auf diese Positionsdaten und auf händisch an bestimmten Landmarken (z.B. Kilometrierungsschildern) ausgelöste Triggersignale zurückgegriffen. Bei Auswertungen, bei denen es auf eine hohe Ortsgenauigkeit ankommt wurden zwischen Trigger- und GPS-Signalen schon Diskrepanzen beobachtet. Auch bei der georeferenzierten Darstellung von CPX-Daten kommt es zu ortsabhängigen Diskrepanzen zwischen Messdatenposition auf der Strasse und den von der Vermessung her bekannten Strassenkoordinaten (siehe Beispiel in *Abb. 71*).



**Abb. 71** Beispiel einer georeferenzierte Darstellung von CPX-Messungen. Die Farbkodierung steht für den gemessenen Schalldruckpegel. Beachte die Abstände der farbigen Pegelkurve von der Messstrecke.

### 2.5.2 Vorgehen und Ergebnisse

Im Rahmen der CPX-Temperaturmessserien wurden über einige Stunden hinweg immer die gleiche Streckenabschnitte und die gleichen Rollspuren im zeitlichen Abstand von rund 30 Minuten wiederholt befahren und an den gleichen Wegmarken wurden Triggersignale aufgezeichnet. Das GPS-Signal wurde permanent registriert. Damit stand ein umfangreicherer Datensatz zur Verfügung, um die Genauigkeit der GPS-Daten prüfen zu können.

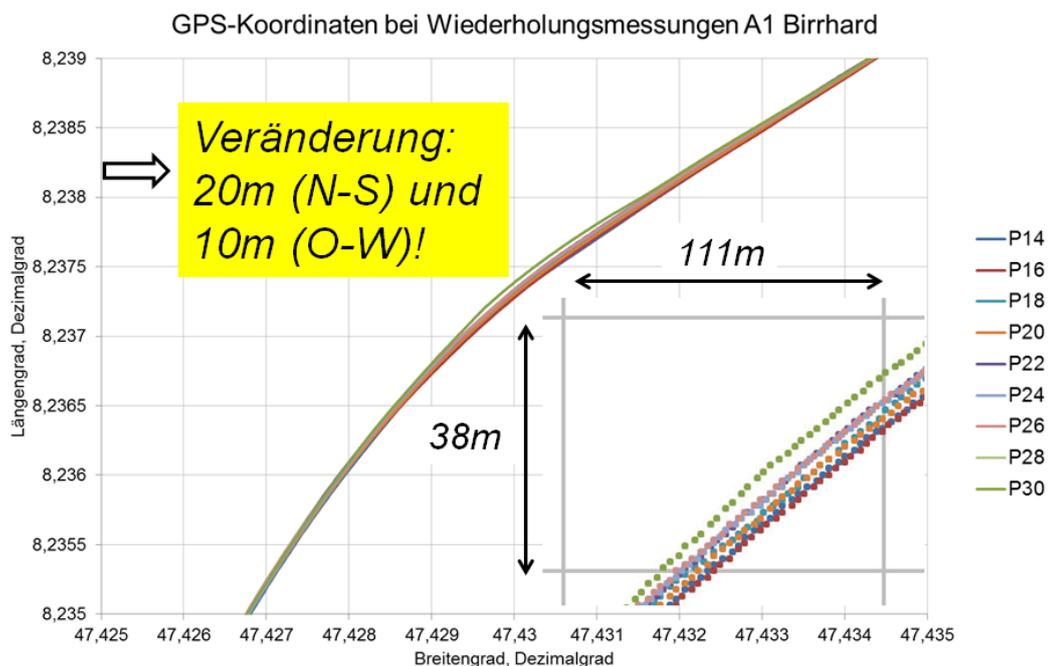
Wie bei der CPX-Auswertung üblich wurden die registrierte Pegel-Zeitkurven zunächst mit Hilfe der aufgezeichneten Fahrgeschwindigkeit in Pegel-Ortskurven umgewandelt. Anhand der Triggerdaten und akustisch auffälliger Wegmarken (z.B. Fahrbahnübergängen) wurden sämtliche akustische und nicht-akustische Wiederholungsmessdaten relativ zueinander verortet (verschoben). Die so verorteten räumlich kohärenten Messdaten sollten dann auch bei jeder Wiederholungsfahrt die gleichen GPS-Koordinaten aufweisen.

Wie *Abb. 72* zeigt, ist dies nicht exakt der Fall. Gezeigt sind die GPS-Koordinaten entlang der A1 bei Birrhard in Fahrtrichtung Westen, wobei der Breitengrad nach rechts und der Längengrad nach oben aufgetragen ist. Ein Koordinatenrechteck entspricht einer Strecke von 111 m x 38 m. Die Detaildarstellung zeigt, dass die maximale Abweichung zwischen

den neun Vorbeifahrten innerhalb der Messzeit von 8:11 Uhr bis 12:45 Uhr bei 10 m in Ost-West-Richtung liegt und bei 20 m in Nord-Süd-Richtung. Es gibt eine kontinuierliche Drift der Koordinaten, so dass der Unterschied zwischen aufeinanderfolgenden Messungen deutlich kleiner ist als die maximale Abweichung. Die Koordinatendrift ist aber nicht gleichmässig, so liegen etwa die Koordinaten der drei aufeinanderfolgenden Messungen P22, P24 und P26 fast exakt aufeinander, während die Messungen P28 (fast identisch mit P14 und deshalb überdeckt) und P30 jeweils einen deutlichen Koordinatensprung mit unterschiedlichen Vorzeichen aufweisen.

Um diese Beobachtung zu verstehen ist es erforderlich, sich die Funktionsweise des GPS-Systems vor Augen zu führen. Das Global Positioning System (GPS, eigentlich NAVSTAR GPS) wurde in den 70er Jahren vom US-Verteidigungsministerium entwickelt und erlaubt seit dem Jahr 2000 auch für zivile Zwecke Ortsgenauigkeiten von heute unter 10 m (bei 95 Prozent der Messungen). In einer Höhe von gut 20 km umkreisen mindestens 24 Satelliten die Erde, wobei jeder Satellit etwa zweimal pro Tag den gleichen Punkt überfliegt. Die Satelliten übertragen ständig ihre Position und eine Uhrzeit, so dass ein Empfänger mit Hilfe von vier Satelliten seine räumlichen Koordinaten und die genaue Zeit berechnen kann. Zu je mehr Satelliten eine Sichtverbindung besteht und je gleichmässiger sie am Himmel verteilt sind, desto genauer die Positionsbestimmung. Zum Teil ergeben sich grosse Ungenauigkeiten, wenn z.B. drei von vier Satelliten nahe beieinander stehen. Auch mehrfach reflektierte Signale führen zu Ungenauigkeiten. Erheblich erhöhen lässt sich die Positionsgenauigkeit durch Differential-GPS (Integration weiterer GPS-Empfänger oder von Bodenreferenzstationen), weil nahegelegene Empfänger ähnliche Positionsfehler aufweisen, die aus der Differenz der Signale herausfallen.

Die bei der CPX-Messung auf der N1 bei Birrhard beobachteten Positionsschwankungen erklären sich zwanglos durch die zeitlich variierenden Positionen und die Anzahl der zur Messzeit jeweils zur Verfügung stehenden Satelliten. Diese wird auch durch Berge beschränkt und diese führen oft zu kurviger Streckenführung. Deshalb ist der Positionierungsfehler im Bereich von Kurven oft grösser.



**Abb. 72** GPS-Koordinaten bei neun Wiederholungsfahrten auf demselben Streckenabschnitt der A1 in der Nähe von Birrhard. Die mit geraden Zahlen durchnummerierten aufeinanderfolgenden Messungen P14 bis P30 wurden jeweils im Abstand von rund 30 Minuten aufgezeichnet.

### 2.5.3 Schlussfolgerungen

- Die Ortsposition des GPS-Systems weist einen statistischen Messfehler von gut 10 Metern auf. Dies hängt mit der Anzahl und Position der gerade zur Messzeit am Messort am Himmel stehenden und empfangbaren Satelliten zusammen.
- Die Verortung allein aufgrund von GPS-Positionssignalen ist nicht ratsam, wenn es auf Genauigkeiten in der Grössenordnung von einem oder wenigen Metern ankommt. Das Triggersignal dürfte bei erfahrenem Messpersonal meist genauer sein. Noch zuverlässiger ist im Allgemeinen die Verortung anhand von deutlich messbaren Wegmarken, insbesondere von Fahrbahnübergängen, die sich akustisch oder in der via Infrarotsensor gemessenen Fahrbahntemperatur als Sprungstellen bemerkbar machen.
- Eine georeferenzierte Darstellung von CPX-Messdaten benachbarter Fahrstreifen ist trotz der hier beobachteten Ungenauigkeit des GPS-Signals im Allgemeinen möglich, weil die entsprechenden Messdaten in der Regel innerhalb kurzer Zeitintervalle gemessen werden und notfalls in einem Geoinformationssystem (GIS) global um einige Meter verschoben werden können, damit sie mit vorgegebenen Strassenkoordinaten in Einklang stehen.

## 3 Verbesserung der SPB-Methode

### 3.1 Sichtbarkeit des SPB Messaufbaus

#### 3.1.1 Ausgangslage

Gemäss Anhang 1c des „Leitfaden Strassenlärm – Vollzugshilfe für die Sanierung“ [15] sind SPB-Messungen in einem Abstand von 5 m zur Fahrstreifenmitte durchzuführen. Bei einer mittleren Fahrstreifenbreite von 3.5 m liegt der Messpunkt somit nur ca. 3.25 m neben dem Fahrstreifen. Vor allem bei höheren Geschwindigkeiten und bei Positionierung auf dem Standstreifen gibt es deshalb Überlegungen (und teilweise behördliche Vorgaben), die Messstelle durch entsprechende Massnahmen, wie der Aufstellung von Warnpylonen oder Warndreiecken abzusichern. Eine andere Variante der Absicherung besteht darin, ein Sicherungsfahrzeug in mehreren hundert Metern Abstand vor der Messstelle zu positionieren und so die Verkehrsteilnehmer auf die Gefahrenstelle aufmerksam zu machen. Allen diesen Sicherungsmassnahmen ist gemein, dass sie den Verkehr beeinflussen. Dies führt zumindest zu einer leichten Verschwenkung der tatsächlichen Fahrzeugachse von der Mittelachse des Fahrstreifens und somit zu einer Vergrösserung des Abstandes zwischen Fahrzeug und Messmikrofon und eventuell zu einem Verlassen der Fahrspur. Weiterhin kann nicht ausgeschlossen werden, dass gewarnte Fahrzeugführer ihre Fahrgeschwindigkeit verringern. Das Verringern der Fahrzeuggeschwindigkeit kann dabei bezogen auf den gemessenen Schalldruckpegel zwei gegenläufige Effekte hervorrufen: Einerseits führt die geringere Geschwindigkeit zu niedrigeren Schalldruckpegeln. Dies ist der Fall, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit durch ein Absenken der Antriebsleistung („Vom Gas gehen“) langsam verringert wird. Andererseits können die über den Reifen-Fahrbahn-Kontakt abgeleiteten Bremskräfte auch zu sogenannten stick-slip-Effekten führen, die einen Anstieg der Reifen-Fahrbahn-Geräusche mit sich bringen. Dies ist dann der Fall, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit rapide durch Bremsmanöver verringert wird. Der Einfluss der genannten Effekte (Spurverschwenkung und Geschwindigkeitsverringerung) ist stark von den äusseren Bedingungen der Messstelle (umliegende Bebauung, Verkehrsstärke) abhängig und deshalb von Messstelle zu Messstelle unterschiedlich.

#### 3.1.2 Versuchsdurchführung

##### Messort und Arbeitsprogramm

Anhand einer kleinen Serie von Wiederholungsmessungen wird der Einfluss der Sichtbarkeit des Messaufbaus auf das akustische Messergebnis nachgewiesen und quantifiziert. Die Messreihen wurden auf der nördlichen Seite des ACMR8 Probefeldes an der Aaretalstrasse T5 bei Kilometer 5.202 in Richtung Aarau durchgeführt. Dabei war die Messstelle für die Autofahrer wie folgt abgesichert:

- A) Ohne Sicherungsmassnahmen, möglichst unsichtbar.
- B) Ein dreieckiges Warnschild auf dem Pannestreifen 100 m vor dem Messpunkt und Leitkegel am äusseren Fahrbahnrand (siehe *Abb. 73*).
- C) Sperrung des Pannestreifens durch Leuchtsignale eines Bauhoffahrzeugs 250 m vor dem Messpunkt und Leitkegel am inneren Fahrbahnrand (siehe *Abb. 74*).



**Abb. 73** Absicherung B durch dreieckiges Warnschild 100 m vor der Messstelle und Leitkegel am äusseren Fahrbahnrand.



**Abb. 74** Absicherung C durch Sperrung des Pannenstreifens mit Leuchtsignalen eines Bauhoffahrzeugs 250 m vor dem Messpunkt und Leitkegel am inneren Fahrbahnrand.

### Mikrofonpositionen

Es wurden die nach Technischem Merkblatt [15] obligatorischen Mikrofonpositionen gewählt, d.h. für die SPB-Messung des  $L_{AFmax}$  wurde das Mikrofon bei 7.5 m Abstand zur Mitte des rechten Fahrstreifens in einer Höhe von 1.2 m über Fahrbahnoberkante plat-

ziert und für den  $L_{Aeq}$  im Abstand von 5 m von der Fahrstreifenmitte und 1.5 m über der Fahrbahn (siehe Abb. 75).



**Abb. 75** Mikrofonpositionen bei SPB-Messung mit Absicherung durch Kegel.

### Zeitpunkt und Witterung

Die Messungen wurden an zwei Tagen durchgeführt, weil die Messung mit Standstreifensperrung zu lang dauerte, um die beiden anderen Messungen anzuschliessen. Während der Messungen herrschten die in Tab. 9 eingetragenen Luft- und Fahrbahntemperaturen.

**Tab. 9** Zeitraum und Witterungsbedingungen ( $T_L$ =Lufttemperatur,  $T_{Fb}$ =Fahrbahntemperatur).

Absicherung	Datum	Zeitraum	$T_L$ , °C	$T_{Fb}$ , °C
A keine	02.10.2013	12 <sup>05</sup> – 13 <sup>45</sup>	11 – 13	15 – 17
B Dreieckschild + Leitkegel 100m	02.10.2013	09 <sup>35</sup> – 11 <sup>35</sup>	10 – 12	10 – 14
C Leuchtschild + Leitkegel 250m	27.09.2013	09 <sup>30</sup> – 15 <sup>05</sup>	16 – 23	15 – 24

Zum Zeitpunkt der Messungen waren die Fahrbahnen trocken. Auch an den Tagen vor den Messungen waren keine Niederschläge zu verzeichnen, so dass davon auszugehen ist, dass sich keine Restfeuchtigkeit im Belag befand, die die Messergebnisse hätten beeinflussen können. Der Wind war stets schwach (unter 2 m/s).

Die Witterungsbedingungen entsprachen in vollem Umfang den Normanforderungen.

### Störgeräusche

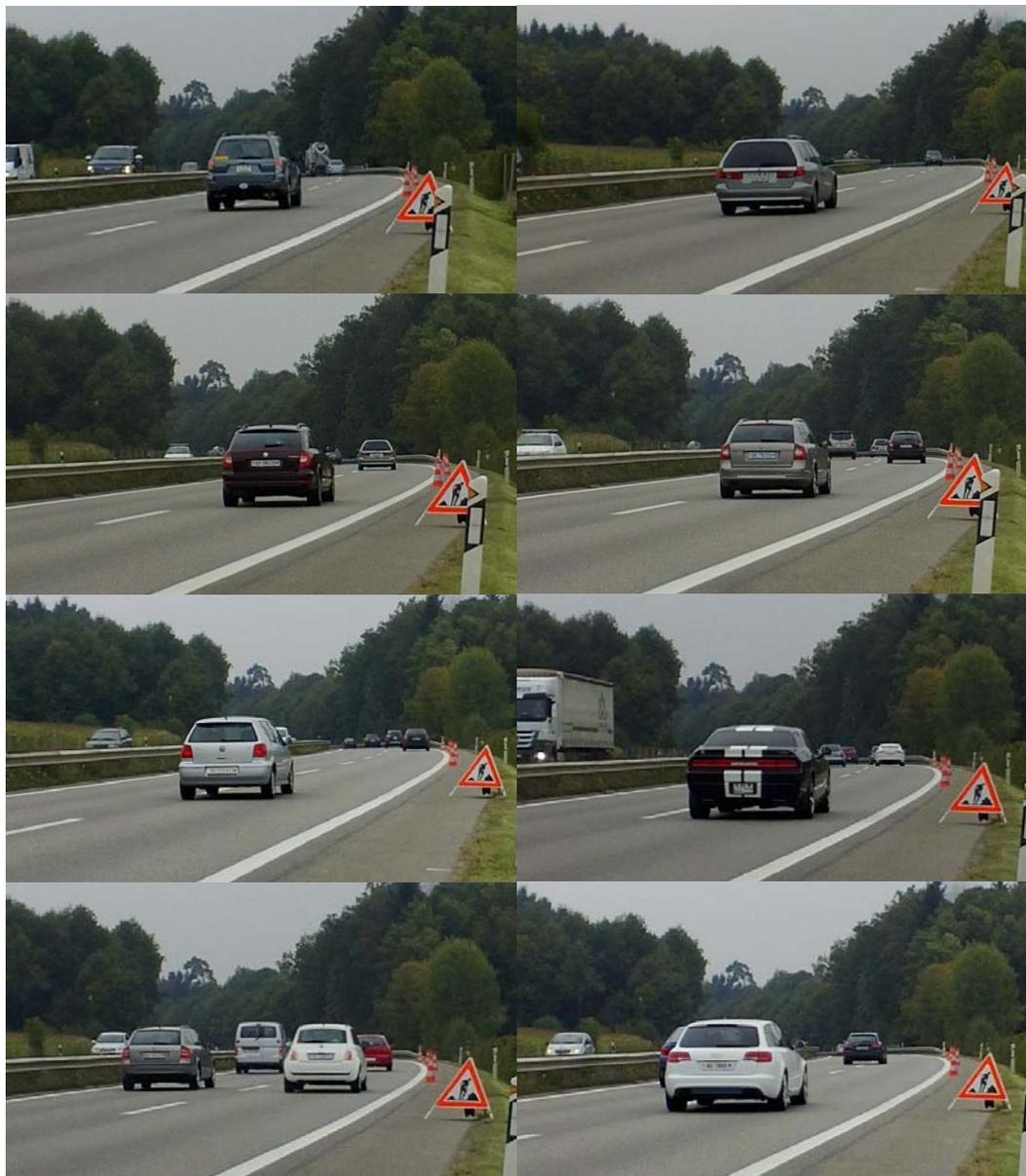
Besondere Störgeräusche, beispielsweise durch Flugbetrieb oder landwirtschaftliche Arbeiten, Bahnverkehr etc. sind während der Messungen nicht aufgetreten.

## Beobachtungen bei der Messdurchführung

Das Verhalten der Autofahrer unterschied sich bei jedem Szenario und war bei der Messdurchführung deutlich festzustellen. Dies äussert sich vor allem bei der Geschwindigkeit und dem Versatz der Fahrzeugachse von der Fahrstreifenmitte.

Je deutlicher die Vorwarnung A → C desto mehr nahm das mittlere Tempo der vorbeifahrenden Fahrzeuge ab. Die Reduktion der Fahrgeschwindigkeit reduziert den Schallpegel und die Konkurrenz zu den Umgebungsgeräuschen steigt. Dadurch werden gültige Vorbeifahrten seltener, deren Maximalpegel  $L_{AFmax}$  10 dB grösser als die Schalldruckpegel der Umgebungsgeräusche sind.

Die einmal nach aussen (B) und einmal leicht nach innen (C) platzierten Leitkegel bewirkten einen sichtbar unterschiedlich grossen Versatz der Fahrzeuge von der Fahrstreifenmitte, siehe *Abb. 76* und *Abb. 77*. Der Versatz hängt aber auch davon ab, ob zeitgleich ein Fahrzeug überholt. Bei der Messung werden ausschliesslich einzeln vorbeifahrende Fahrzeuge erfasst, sodass der Versatz durchaus recht gross werden kann.



**Abb. 76** Versatz der Fahrzeuge aus der Fahrstreifenmitte bei Absicherung Typ B.



**Abb. 77** Versatz der Fahrzeuge aus der Fahrstreifenmitte bei Absicherung Typ C.

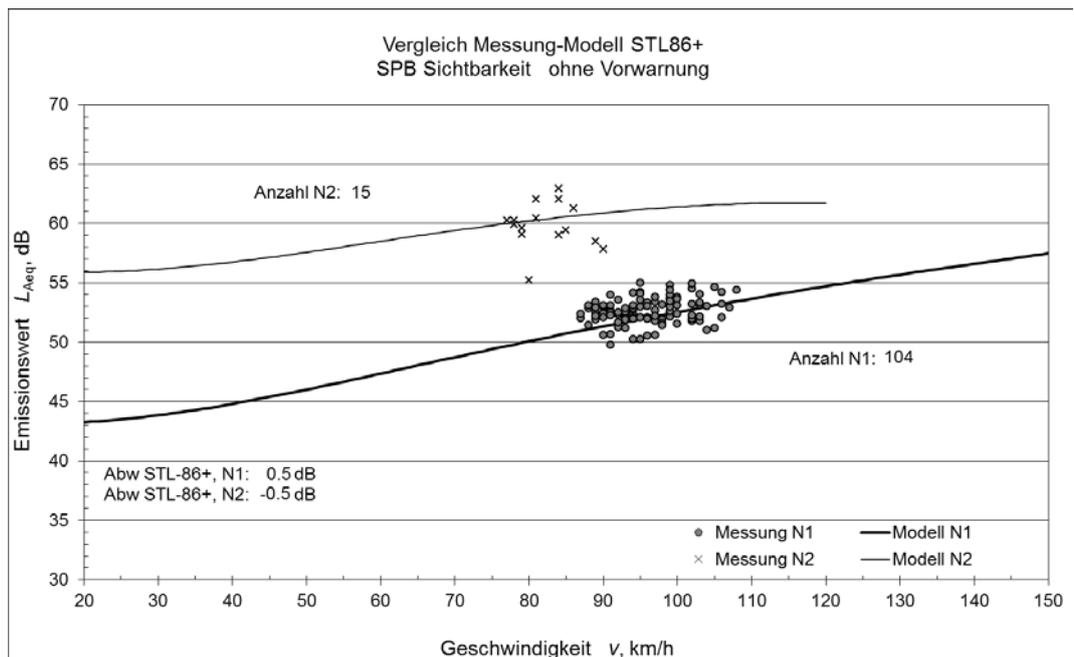
### 3.1.3 Ergebnisse

Bei der SPB-Methode wird der maximale A-bewertete Schalldruckpegel  $L_{AFmax}$  mit der Zeitbewertung „FAST“ und der ebenfalls A-bewertete energieäquivalente Mittelungspegel  $L_{Aeq}$  einzelner ungestörter Fahrzeug-Vorbeifahrten des normalen Verkehrs mit zwei Mikrofönen (siehe verwendete Messmittelliste) gleichzeitig gemessen.

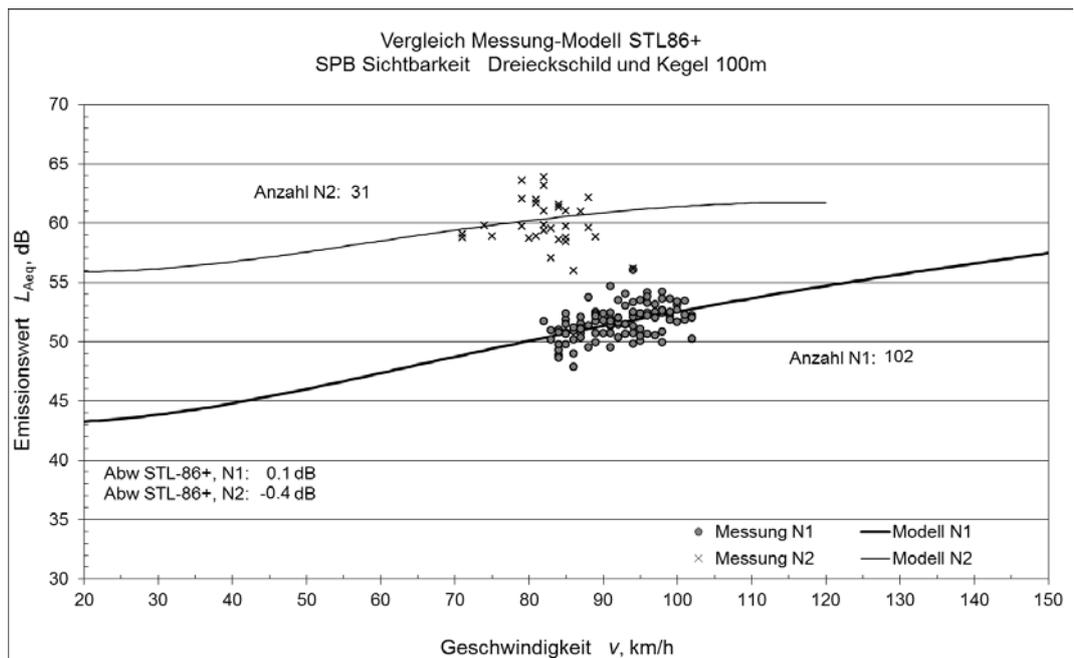
Die A-bewerteten  $L_{Aeq}$ -Einzelwerte werden gemäss Merkblatt [15] je nach Fahrzeugkategorie (N1 oder N2) und Belagsart temperaturkorrigiert und dann in Emissionswerte  $L_{Aeq,1m,1Fz/h}$  in einem Meter Entfernung und für ein Fahrzeug pro Stunde umgerechnet. Die Fahrzeugkategorie N1 beinhaltet Personenwagen und N2 Lastwagen. Der Kb-Wert entspricht der mittleren Abweichung der Emissionswerte  $L_{Aeq,1m,1Fz/h}$  vom Referenzmodell StL-86+. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen *Abb. 78* bis *Abb. 80* dargestellt und in *Tab. 10* zusammengefasst.

**Tab. 10** SPB-Messergebnisse Sichtbarkeit.  $t_{\text{mess}}$ : Messdauer,  $v$  N1 N2: Mittelwerte und Standardabweichung der Fahrgeschwindigkeiten für die Fahrzeugkategorien N1 und N2,  $K_b$  N1 N2: Mittelwerte und Standardabweichung der  $K_b$ -Werte für N1 und N2.

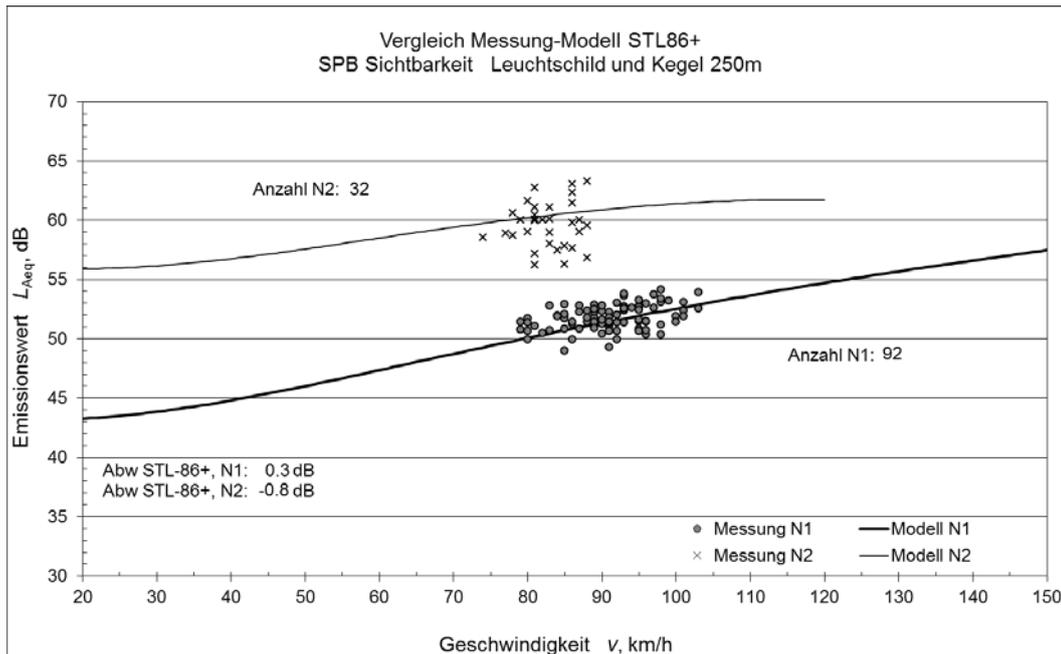
Absicherung	$t_{\text{mess}}$ , h	$v$ N1 km/h	$v$ N2 km/h	$K_b$ N1 dB	$K_b$ N2 dB
A ohne	1.7	96 ±5	84 ±4	+0.5 ±1.1	-0.5 ±1.9
B Dreieckschild + Leitkegel 100m	2.0	92 ±5	83 ±5	+0.1 ±1.2	-0.4 ±2.0
C Leuchtschild + Leitkegel 250m	5.5	91 ±6	84 ±4	+0.3 ±1.0	-0.8 ±1.9



**Abb. 78** Abweichung zum StL-86+ Modell, Messung ohne Absicherung Typ A.



**Abb. 79** Abweichung zum StL-86+ Modell, Messung mit Absicherung Typ B.



**Abb. 80** Abweichung zum StL-86+ Modell, Messung mit Absicherung Typ C.

Die Messergebnisse stimmen mit der Beobachtung insofern überein als die bei Absicherung B und C im Durchschnitt erfasste PKW-Geschwindigkeit kleiner ist als ohne Absicherung A. Allerdings ist der Unterschied der gemittelten Vorbeifahrtgeschwindigkeiten zwischen B und C sehr gering, deutlich kleiner als die Beobachtung vermuten lassen würde. Dafür war die Messdauer bei C etwa dreimal länger als bei den anderen beiden Messungen. Dies lässt sich so erklären: Die Vorbeifahrten bei Absicherung Typ C waren bereits so langsam und damit leise, dass nur der lauteste und schnellste Anteil der einzeln vorbeifahrenden Fahrzeuge als gültig erfasst werden konnte. Dadurch ist die mittlere Geschwindigkeit bei C nicht viel geringer als bei B, aber die Messdauer steigt entsprechend der statistisch kleineren Menge an gültigen Vorbeifahrten enorm.

Bei der Geschwindigkeit der LKW ist kein signifikanter Unterschied festzustellen.

Die Unterschiede der Kb-Werte liegen für beide Fahrzeugkategorien innerhalb von 0.4 dB und sind damit kleiner als die Standardabweichung. Die geringfügig kleineren Werte mit Absicherung lassen sich durch den Versatz der Fahrzeuge zur Fahrstreifenmitte erklären. Mit einer aus den Beobachtungen überschlägig angenommenen Vergrößerung des Mikrofonabstandes von 0.5 m ergibt sich eine Pegelminderung von etwa 0.4 dB<sup>1</sup>.

### 3.1.4 Schlussfolgerungen

Die Untersuchung zeigt, dass eine Vorwarnung und Absicherung der SPB-Messstelle einen sehr deutlichen Einfluss auf das Fahrverhalten der Autofahrer hat: sie reduzieren die Geschwindigkeit und fahren aussermittig vom Fahrstreifen. Dies wirkt sich vor allem auf die Messdauer aus. Die mittleren Geschwindigkeiten der Lastwagen unterscheiden sich nicht, sie fahren jedoch ebenfalls aussermittig.

Es lässt sich eine geringfügige Auswirkung des veränderten Fahrverhaltens auf den Kb-Wert um bis zu 0.4 dB erkennen, allerdings bei einer Standardabweichung von rund 1 dB. Die durchschnittlich langsamere Vorbeifahrtgeschwindigkeit von bis zu 5% wird durch das Referenzmodell StL-86+ ausgeglichen, sodass keine signifikante Beeinflussung des Belagsgütwertes Kb auftritt. Der durch den Versatz zur Fahrstreifenmitte verur-

<sup>1</sup> Gemäss  $\Delta L_p = 10 \lg(1 + \text{Versatz}/\text{Mikrofonabstand})$  dB

sachte grössere Mikrofonabstand lässt eine Pegelminderung von etwa 0.4 dB erwarten und ist die Ursache für die niedrigeren  $K_b$ -Werte. Durch Abschätzen des Versatzes bei der Messung mit Absicherung könnte das Ergebnis entsprechend abstandskorrigiert werden.

Nicht ohne weiteres korrigieren lassen sich Einflüsse auf das SPB-Messergebnis durch Unterschiede in der akustischen Güte zwischen den normalen Rollspuren und dem Belag dazwischen, der bei Ausweichmanövern befahren wird. Eine Vorwarnung wirkt sich hier negativ aus.

Zu Gunsten der Qualität der akustischen Messung und deren Ergebnis sowie einer überschaubaren Messdauer sollte nach Möglichkeit auf eine zu deutliche Vorwarnung einer SPB-Messstelle verzichtet werden. Eine deutliche Vorwarnung, wie im Fall C, kann eine deutliche Erhöhung nicht verwertbarer Vorbeifahrten bewirken und kann die Messdauer leicht um ein Vielfaches erhöhen. Falls eine Absicherung unerlässlich ist, sollte sie durch zurückgesetzte Warnpylone auf dem Seitenstreifen möglichst wenig Versatz der vorbeifahrenden Fahrzeuge aus der Fahrstreifenmitte verursachen. Falls ein mehrheitlicher Versatz beobachtet wird, sollte er abgeschätzt und zur Korrektur des Ergebnisses verwendet werden.

## 3.2 SPB Messdurchführung und Fahrzeugauswahl

### 3.2.1 Ausgangslage

Die internationale Norm ISO 11819-1 [2] gibt bezüglich der Fahrzeugauswahl, die in die statistische Vorbeifahrtmessung aufgenommen werden soll, drei verschiedene Fahrzeugkategorien (PW, leichte LW und schwere LW) an. Die Untergliederung nach leichten und schweren LW wird über die Anzahl der Achsen festgelegt. Bei der Genauigkeit der Mikrofonpositionen wird ein maximaler Fehler von 0.1 m beim Abstand und der Höhe erlaubt. Im Anhang 1c des „Leitfaden Strassenlärm“ [15] sind zwei Fahrzeugkategorien festgelegt, PW und LW. Aufgrund der zunehmenden Heterogenisierung der Fahrzeugflotte sind die Grenzen zwischen den Kategorien allerdings nicht mehr klar definiert. So sind mit SUV-Fahrzeugen (Geländewagen) und Vans zum Beispiel Fahrzeugkategorien entstanden, die bezogen auf die zulässige Gesamtmasse und Grösse durchaus mit den LW bis 3.5 t verglichen werden können. Darüber hinaus wurden weitere Fahrzeugkategorien, wie Roadster und Kleinwagen einem breiteren Markt zugeführt, so dass sich mit der Fahrzeugflotte auch die Vorbeifahrtpegel einzelner Fahrzeuge deutlich stärker unterscheiden als dies noch vor ein bis zwei Jahrzehnten der Fall war.

Somit stellte sich die Frage, in wie weit die bisherigen Vorgaben der Fahrzeugkategorisierung und Anzahl der Einzelmesswerte im Hinblick auf die veränderte Fahrzeugflotte noch aktuell sind und den Anforderungen an ein genaues Messergebnis mit hoher Wiederholgenauigkeit genügen.

### 3.2.2 Arbeitsprogramm und Anonymisierung

Zur Untersuchung des Einflusses der Messdurchführung und Fahrzeugauswahl wurde ein Ringversuch durchgeführt. Für diesen Ringversuch wurden an vier schweizerische Institute Aufträge für SPB-Messungen vergeben. Zusätzlich hat am Messstandort die Müller-BBM Schweiz AG eine SPB-Messung durchgeführt. Alle fünf Messungen fanden innerhalb von fünf Wochen statt.

Die Teilnehmer am Ringversuch wurden aufgefordert, Messungen entsprechend Kapitel 3 des "Technischen Merkblatts für akustische Belagsgütemessungen an Strassen", ASTRA/BAFU, 2006 (Version vom 31.07.2013, [15]), durchzuführen, wobei sowohl die Messungen nach Abschnitt 3.6 ( $L_{max}$ -Messung) als auch die Messungen nach Abschnitt 3.7 ( $L_{eq}$ -Messung) vorzunehmen waren. Jeder Teilnehmer sollte seine Messung komplett

eigenständig durchführen, d. h. mit der eigenen Messausrüstung, selbständiger Ausmessung der Mikrofonpositionen und eigener Messdatenerfassung. Die Lage der ausgemessenen Mikrofonpositionen sollte relativ zu einem festen Bezugspunkt (Markierung an dem festen Stativ einer Dauermessstation) ermittelt und angegeben werden (waagrechter Abstand und Höhenversatz zum Bezugspunkt).

Die Messdaten für mindestens 100 PW- und 30 LW-Vorbeifahrten sollen für jede einzelne der erfassten Fahrzeugvorbeifahrten folgende Angaben umfassen:

- Fahrzeugkategorie
- Fahrgeschwindigkeit in km/h
- relativer Zeitpunkt der Vorbeifahrt (Start bei 00:00 Uhr), sekundengenau
- $L_{AF,max}$ -Pegel in dB bei 7.5 m Mikrofonabstand und 1.2 m Mikrofonhöhe zur Fahrstreifenmitte
- Terzspektrum zwischen 50 Hz und 5'000 Hz, zugehörig zum  $L_{AF,max}$
- $L_{Aeq}$ -Pegel in dB bei 5 m Mikrofonabstand und 1.5 m Mikrofonhöhe zur Fahrstreifenmitte
- Messdauer für  $L_{A,eq}$ , d.h. die  $t_{10}$ -Zeit in Sekunden
- Luft- und ggf. Strassenoberflächentemperatur in °C, ggf. Windgeschwindigkeit

Es war nicht Ziel des Projektes, die Qualität der einzelnen Dienstleistungsanbieter oder Messteams zu bewerten. Die Teilnehmer wurden daher aufgefordert, so zu messen, wie sie es auch bei Routineaufgaben tun würden. Eine Anonymisierung der abgegebenen Messdaten sollte den Beteiligten das „natürliche“ Messen erleichtern, d.h. den Verzicht auf aussergewöhnliche und impraktikable Sorgfalt, etwa um ein möglichst gutes Ringversuchsergebnis zu erzielen. Zur genauen Analyse des jeweiligen Strassenverkehrs wurden die vorbeifahrenden Fahrzeuge zeitsynchron mit einer Videokamera aufgenommen. Um die akustischen Messdaten den Videobildern zuordnen zu können, wurden die Systemzeiten des jeweiligen akustischen Datenerfassungssystems und der Videokamera synchronisiert oder im Nachhinein so bereinigt, dass alle Datensätze am 01.09.2013 um 00:00 Uhr begannen. Jeder Teilnehmer legte dann seine Messdaten auf einem Server ab, der von der Firma Nibuxs, Ecublens, freundlicherweise zur Verfügung gestellt worden war. Dazu wurde zuvor in einem Losverfahren via Kettenbrief jeder der Firmen eine Teilnehmernummer zugewiesen (Nummer 1 bis 5), welche nur der jeweiligen Firma bekannt war. Diese Nummer wurde beim Heraufladen der Daten und bei der Dateibenennung verwendet. Müller-BBM benutzte diese Dateinamen bei der Auswertung und in diesem Bericht als Referenzbezeichnung. Vier Datensätze wurden als MS Access-Datenbankdatei ausgeliefert, ein Teilnehmer gab seine Messergebnisse in Form einer MS Excel-Tabelle ab.

## Messstandort

Der Messstandort sollte folgende Kriterien erfüllen:

- gut erreichbar und relativ zentral innerhalb der Schweiz gelegen (zumindest in Bezug auf die Firmenstandorte der möglichen Teilnehmer)
- gute Messbedingungen: Die Verkehrsbelastung sollte es erlauben, ausserhalb der allmorgendlichen und allabendlichen Stosszeiten und bei Tage zu messen; anfahren- de Fahrzeuge sollten gut sichtbar sein, die Umgebung aus freiem und weitgehend ebenem Gelände bestehen und es sollte keine Leitplanke vorhanden sein.

Ausgewählt wurde ein Messpunkt an der Hochleistungsstrasse T5 östlich von Aarau (Swisstopo: 651294, 249217). Dort sind obige Messbedingungen erfüllt und zusätzlich liegen umfangreiche Messdaten von diesem Standort bereits vor (u.a. SPB- und CPX-Messungen, Daten einer akustische Dauermessstation über zwei Jahre hinweg, zahlreiche in situ Messungen), die gegebenenfalls als Referenzen dienen konnten. Am Messstandort liegt seit Sommer 2011 ein AC MR 8 Deckbelag. Die akustischen Eigenschaften des Belags sind am Messort als homogen anzusehen, wie von CPX-Messungen her bekannt ist. Die Abbildungen unten zeigen den Messstandort auf einem Satellitenbildauschnitt und einer Fotografie.



**Abb. 81** Messstandort des Ringversuchs an der Aaretalstrasse (roter Punkt).



**Abb. 82** Situation am Messpunkt des Ringversuchs bei der Messung durch die Müller-BBM Schweiz AG. Im Vordergrund das Radarmessgerät zur Geschwindigkeitsmessung, links und rechts die SPB-Messmikrofone, oben die Wetterstation und das Mikrofon der Dauermessstelle, die teilweise verdeckt ist.

### 3.2.3 Teilnehmer, Durchführung der Messungen, Messausrüstung

Alle angefragten Ingenieurbüros waren bereit, an dem Ringversuch teilzunehmen. Die Zusammenarbeit bei der Organisation der Messungen und der Lieferung der Messdaten gestaltete sich kollegial und unkompliziert. Tab. 11 listet die Teilnehmer am Ringversuch auf, das Datum der SPB-Messungen an der T5 und die klimatischen Randbedingungen. Bei niedrigen Windgeschwindigkeiten und trockener Witterung (auch am Vortag der jeweiligen Messungen) waren die Messbedingungen normgerecht. Drei der Teilnehmer vertrauten auf Messhardware und Software der Firma Norsonic (Nor121 und NorPass-ByNoise), einer auf ein System der Sinus Messtechnik GmbH mit selbstentwickelter Software und einer auf eine Messkarte von National Instruments, kombiniert mit eigener Software (siehe Tab. 12).

**Tab. 11** Teilnehmer am SPB-Ringversuch, Messdatum und Wetterdaten. Lufttemperatur  $T_{Luft}$ , Windgeschwindigkeit  $v_{Wind}$ .

Teilnehmer	Datum	$T_{Luft}$ °C	$v_{Wind}$ km/h
Müller-BBM Schweiz AG, Allschwil	05.09.2013	22 - 30	0 – 1
Planteam GHS AG, Sempach	20.09.2013	14 - 19	0 – 1
IFEC Consulenze SA, Rivera	25.09.2013	23 - 25	0 – 1
Sinus Engineering AG, Tägerwilen	08.10.2013	13 – 14	0 – 1
Grolimund & Partner, Bern	08.10.2013	13 – 15	0 – 2

Nach Ankunft am Messpunkt wurden die Teilnehmer kurz mit den lokalen Verhältnissen vertraut gemacht und gebeten, die Mikrofonposition in Bezug auf eine Markierung am Stativ der dort installierten akustischen Dauermessstation auszumessen und dann sich selbst überlassen. Die Videokamera wurde gut 20 m vom Messpunkt entfernt aufgestellt. Unmittelbar vor Messbeginn wurden die Zeitbasen von Messhardware und Videokamera synchronisiert und letztere gestartet. Vier der Ingenieurbüros traten mit jeweils zwei Personen auf, wobei zunächst gemeinsam aufgebaut und ausgemessen wurde und später eine Person den Messcomputer bediente und die andere die Geschwindigkeitsmessung der vorbeifahrenden Fahrzeuge übernahm. Ein Teilnehmer vertraute auf eine automatische Geschwindigkeitsmessung und führte Aufbau und akustische Messung alleine durch. *Abb. 83* zeigt den Ausschnitt aus den Videoaufzeichnungen mit der Messaufstellung eines der Teilnehmer am Ringversuch.



**Abb. 83** Ausschnitt aus einer Videoaufzeichnung. Am linken Bildrand ist das Stativ der Dauermessstation zu sehen, links davon und ausserhalb des Bildausschnitts liegt der 7.5 m Messpunkt, in der Mitte zwischen Maschendrahtzaun und Fahrbahn steht das 5 m Mikrofon eines Messdienstleisters.

**Tab. 12** Eingesetzte Messausrüstung der Versuchsteilnehmer.

Teilnehmer	Hardware	Software	Geschwindigkeitsmessung
Müller-BBM Schweiz AG Allschwil	Messkarte NI 9234	MBBM SPB 1.4.4534	via traffic controlling Viacount II
Planteam GHS AG Sempach	Norsonic Nor121	Norsonic Nor-PassbyNoise 1.1.8	Bushnell Velocity Radarpistole
IFEC Consulenze SA Rivera	Sinus Messtechnik GmbH MK2 8B (BNC)	IFEC PB_EVA	Laser Technology Inc. LASER LTI 100
Sinus Engineering AG Tägerwilen	Norsonic Nor121	Norsonic Nor-PassbyNoise 1.1.8	Bushnell Velocity Radarpistole
Grolimund & Partner Bern	Norsonic Nor121	Norsonic Nor-PassbyNoise 1.1.7	Radar Sierzega SR3 und Radarpistole Speedgun Magnum

### 3.2.4 Ergebnisse

Die Messdaten wurden Müller-BBM im Dezember 2013 anonymisiert zugeschickt, zunächst in ein einheitliches Dateiformat gebracht und auf gleiche Art und Weise ausgewertet. Schallpegel und Spektren wurden gemäss „Technischem Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen an Strassen“ [15] temperaturkorrigiert und die Spektren zusätzlich A-bewertet.

Leider haben nur zwei Anbieter den Mikrofonabstand zum Referenzpunkt am Stativ der Dauermessstelle angegeben. Bei diesen beiden ergaben sich für den horizontalen Abstand senkrecht zur Fahrtrichtung nur sehr kleine Abweichungen von rund 1 cm. In der Höhenkoordinate betrug der Unterschied aber 20 cm. Rechnerisch beträgt der Unterschied in der Länge des direkten Schallwegs damit weniger als 0.5 Prozent, wegen der gerichteten Schallabstrahlung des Reifen-Fahrbahnkontakts dürfte der akustische Unterschied aber deutlich grösser sein.

Im Folgenden finden sich statistische Untersuchungen zu gemessenen Geschwindigkeiten,  $t_{10}$ -Zeiten,  $L_{Aeq}$ -Werte in 5 m Mikrofonabstand und  $L_{AF,max}$ -Werte in 7.5 m Mikrofonabstand, jeweils getrennt für Personenwagen (PW) und Lastwagen (LW).

Einen ersten Überblick über die Messergebnisse gibt die Tab. 13. Die Reihenfolge der Teilnehmernummern entspricht nicht der Reihenfolge der in Tab. 11 aufgeführten Teilnehmernamen.

**Tab. 13** Zusammenfassung der Messergebnisse (Anzahl der Fahrzeuge,  $L_{Aeq}$ = Pegelmittelwert,  $Kb$ =Kb-Wert,  $L_{AF,max}$ =Maximalpegel).

Teilnehmer Nummer	PW				LW			
	Anzahl	$L_{Aeq}$ dB	$Kb$ dB	$L_{AF,max}$ dB	Anzahl	$L_{Aeq}$ dB	$Kb$ dB	$L_{AF,max}$ dB
1	110	78.1	0.2	78.6	35	86.9	-0.7	86.4
2	92	79.5	1.2	79.4	34	88.1	0.1	86.3
3	103	77.8	0.6	78.8	32	87.5	-0.4	86.6
4	98	79.3	0.9	78.9	58	87.8	0.0	86.5
5	118	78.0	-0.4	77.6	40	88.2	-0.2	86.4

Die Bewertungen der Belagsgüte im Vergleich zum Modell STL86+ finden sich auf den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 84 bis Abb. 88) für jeden der Anbieter. Es ergeben sich je nach Messteam und Fahrzeugkategorie Kb-Werte zwischen -0.7 dB und +1.2 dB. Die Betrachtung der  $L_{Aeq}$ -Punktwolken bei Personenwagen zeigt meist kompakte Punktwolken, auffällig sind aber einige besonders laute Fahrzeuge in den Ensembles der Teilnehmer Nr. 2, Nr. 3 und Nr. 4, ungewöhnlich schnelle (bei Nr. 1, Nr. 3 und Nr. 4), besonders langsame (bei Nr. 2 und Nr. 4) und auffällig leise Fahrzeuge (Nr. 2). Die Punktwolken bei Lastwagen sind naturgemäss dünner besetzt aber noch recht kompakt, besonders Teilnehmer Nr. 4 weist eine „schöne“ Punktwolke auf. Einige besonders schnelle Lastwagen hat Teilnehmer Nr. 5 registriert, kleine Cluster von auffällig leisen Fahrzeugen finden sich bei den Teilnehmern Nr. 1, Nr. 2 und Nr. 3.

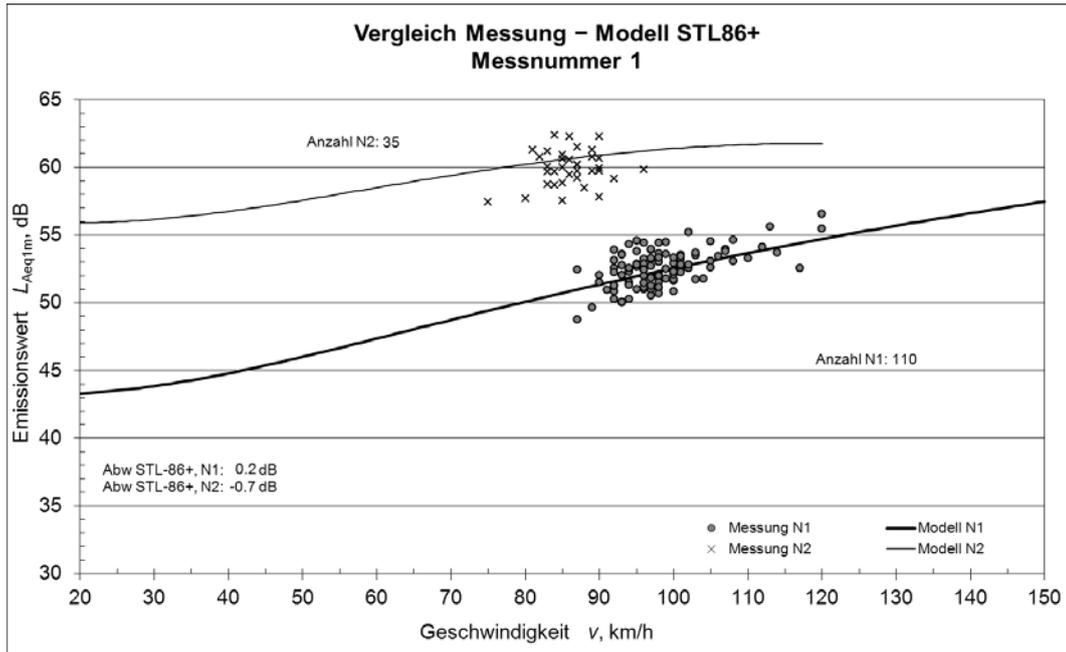


Abb. 84 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 1.

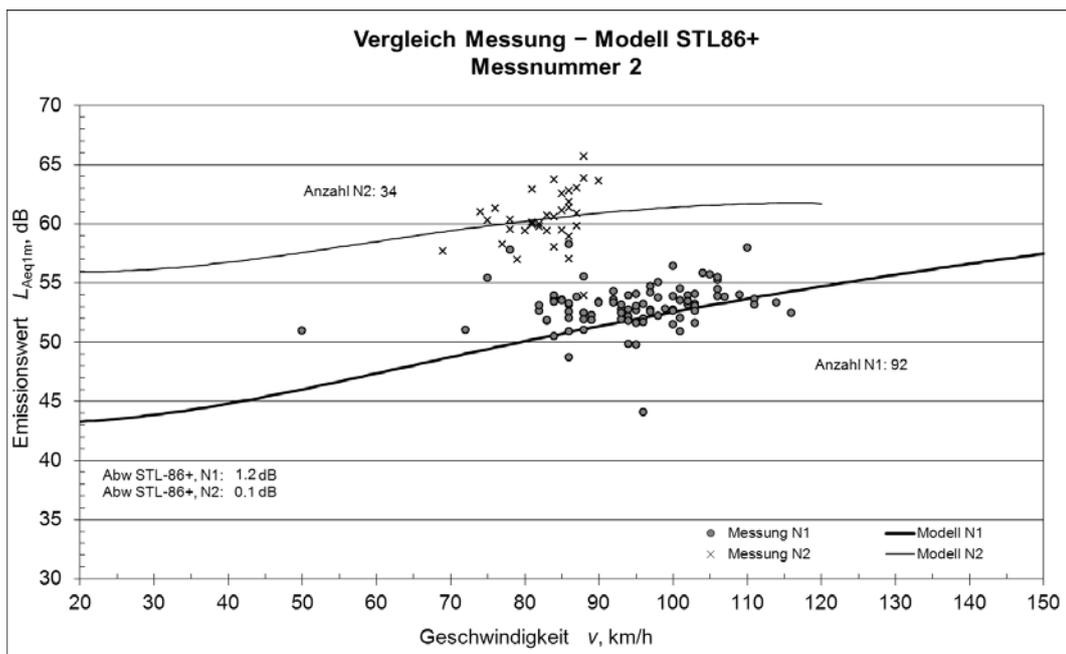


Abb. 85 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 2.

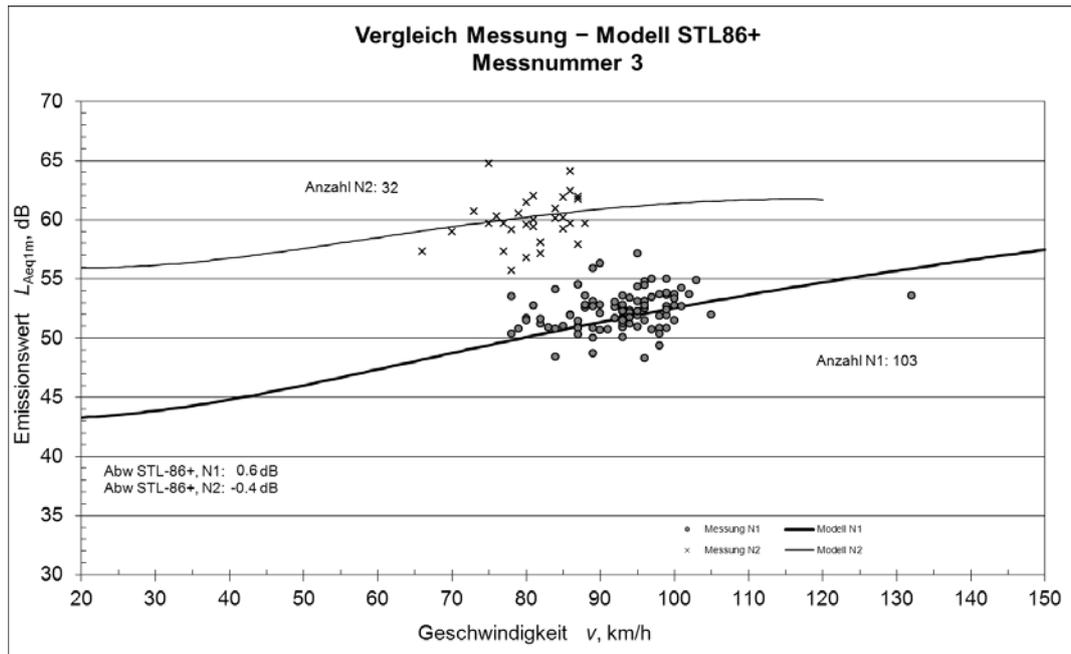


Abb. 86 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 3.

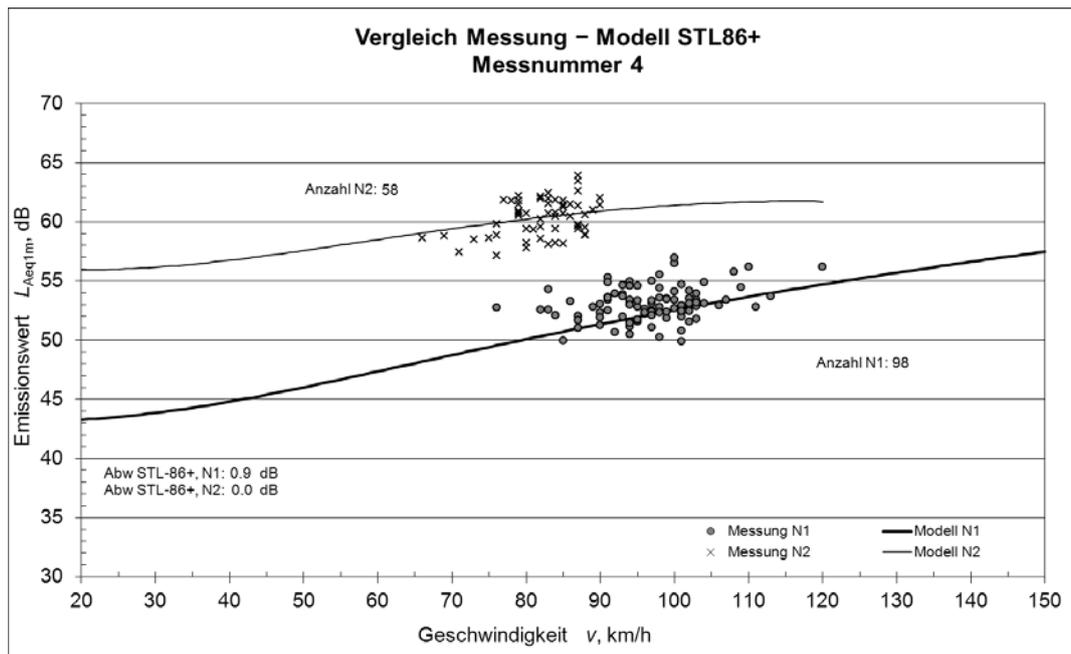
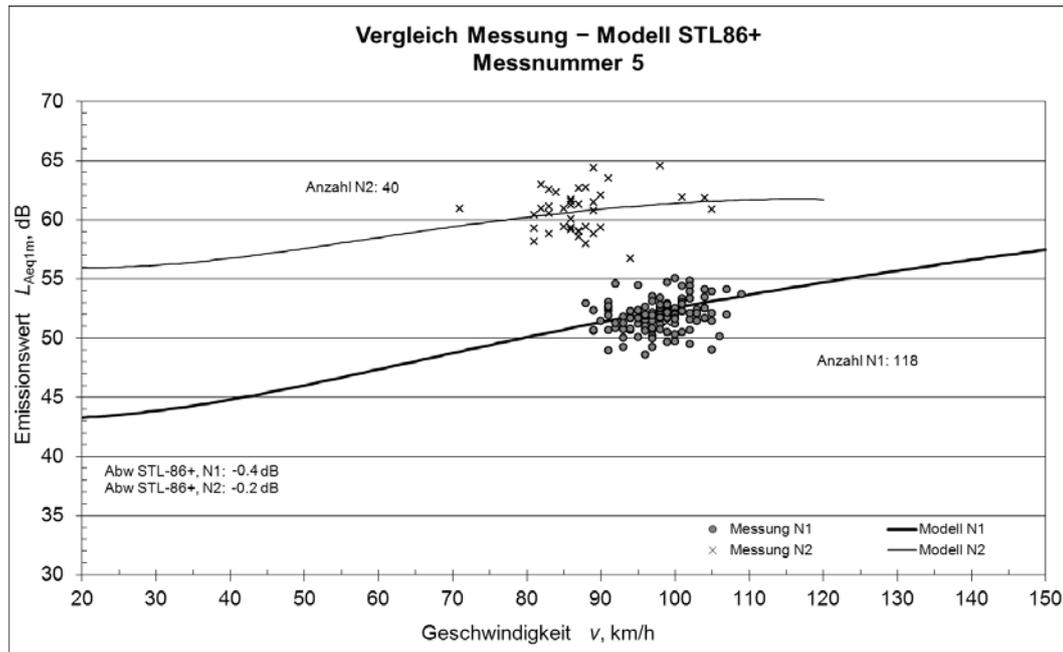
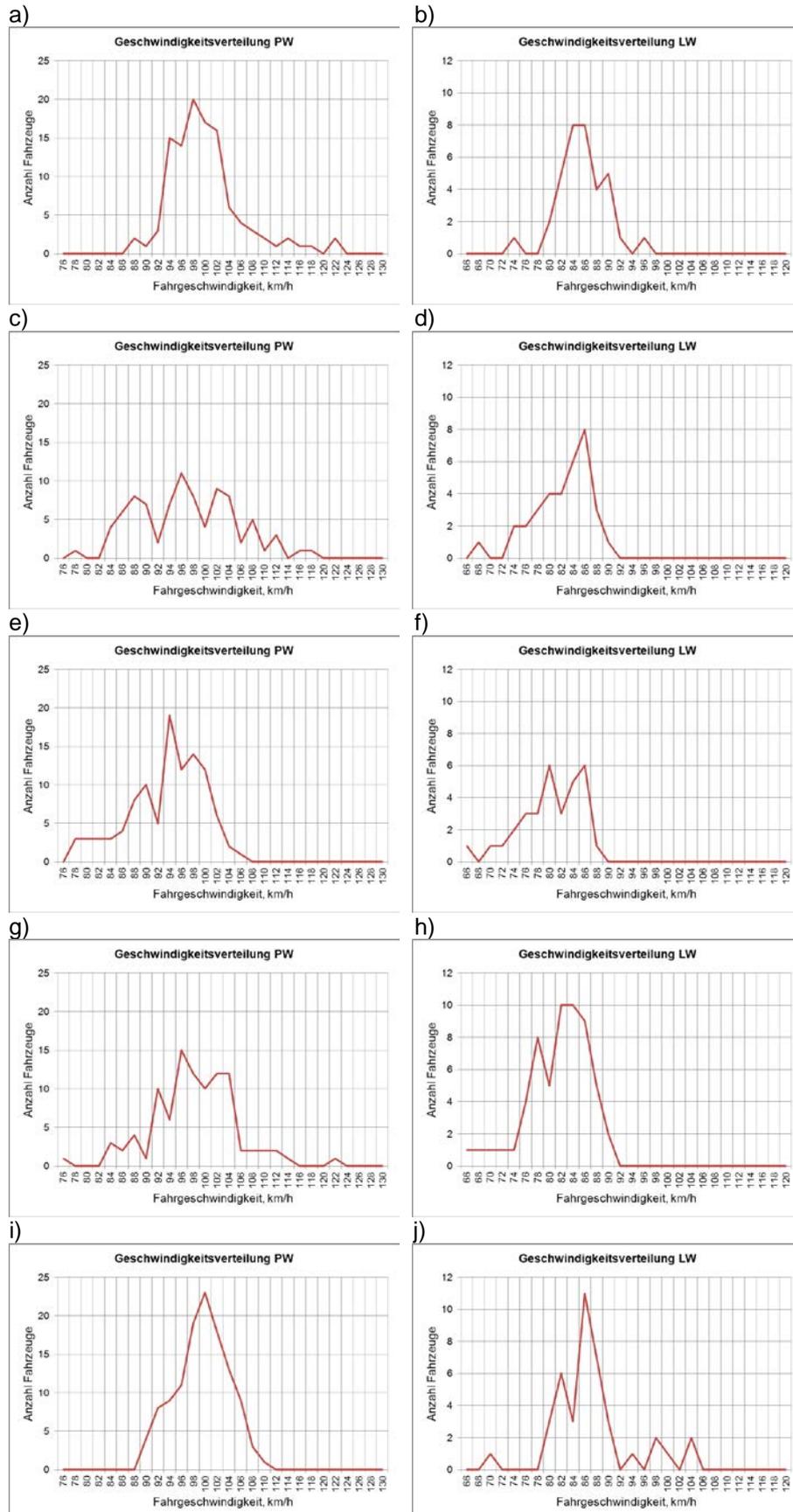


Abb. 87 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 4.



**Abb. 88** Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 5.

Die Geschwindigkeitsverteilungen hängen naturgemäss vom Verkehrsaufkommen und von den meteorologischen Bedingungen ab. Das Verkehrsaufkommen an der Aaretalstrasse schwankt zwischen den allmorgendlichen und allabendlichen Stosszeiten wenig (mit Ausnahme des Mittagsverkehrs, den die meisten Teilnehmer vermeiden konnten). Alle Messungen wurden bei spätsommerlich trockener Witterung durchgeführt. Zur Erstellung der Verteilungskurven wurden jeweils Geschwindigkeitsintervalle von 2 km/h gebildet und die Anzahl der registrierten Fahrzeuge gezählt, die in dieses Intervall fallen. Bei den Personenwagen umfasste das erste Intervall Fahrgeschwindigkeiten oberhalb von 75 km/h und das letzte Intervall endete bei 130 km/h. Bei den Lastwagen gingen die Intervalle von 66 km/h bis 120 km/h. Damit fallen sehr wenige extrem schnelle oder extrem langsam gemessene Fahrzeuge aus den Verteilungskurven heraus. Die statistischen Geschwindigkeitsverteilungen in *Abb. 89* bestätigen die visuelle Bewertung der Punktwolken. Die Verteilungen sind in der Regel linksschief, was mit der lokal geltenden Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h zu tun haben dürfte, welche die Autofahrer nur zögernd überschreiten. Die Verteilungen von Anbieter Nr. 2 und von Nr. 4 erscheinen recht breit, im Gegensatz zum Ergebnis von Nr. 5, welches trotz hoher Fahrzeuganzahl sehr eng ist. Die Extremwerte der gemessenen Geschwindigkeiten sind z.T. unrealistisch (insbesondere bei Teilnehmer Nr. 2, siehe *Tab. 14*), was auf Messfehler hindeutet. Bei den Lastwagen ist die Verteilung besonders deutlich linksschief, ansonsten aber ist die Grundform der Verteilungskurven zwischen den Anbietern recht ähnlich.



**Abb. 89** Häufigkeitsverteilung der gemessenen Geschwindigkeiten während des Ringversuchs. Links: Verteilung für Personenwagen, rechts: für Lastwagen. Von oben nach unten gezeigt sind die Ergebnisse für Teilnehmer Nr. 1 (a und b), Nr. 2 (c und d), Nr.3 (e und f), Nr.4 (g und h) und Nr.5 (i und j).

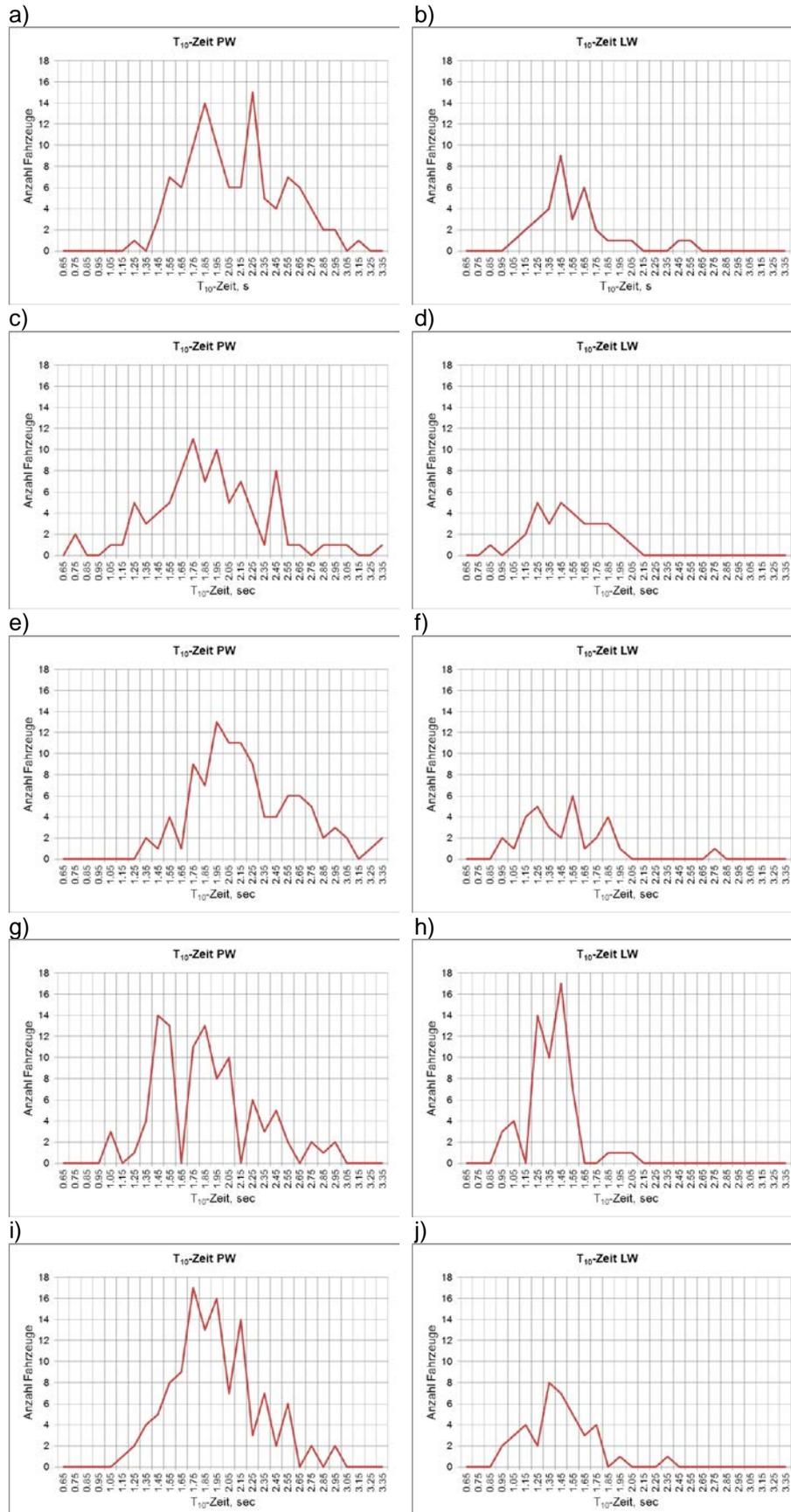
**Tab. 14** Statistische Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen ( $v_d$  = Durchschnittsgeschwindigkeit,  $\sigma_v$  = Standardabweichung,  $v_{min}$  = minimale Geschwindigkeit,  $v_{max}$  = maximale Geschwindigkeit).

Teilnehmer Nummer	PW				LW			
	$v_d$ km/h	$\sigma_v$ km/h	$v_{min}$ km/h	$v_{max}$ km/h	$v_d$ km/h	$\sigma_v$ km/h	$v_{min}$ km/h	$v_{max}$ km/h
1	98.4	6.1	87	120	86.1	3.8	75	96
2	95.0	11.5	50	152	82.7	4.7	69	90
3	92.9	7.0	78	132	80.7	5.2	66	88
4	96.7	6.9	76	120	82.1	5.1	66	90
5	98.0	4.4	88	109	87.7	6.4	71	105

Bei den Personenwagen schwankt die durchschnittliche gemessene Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_d$  von Messserie zu Messserie um mehr als fünf Stundenkilometer, die Standardabweichung  $\sigma_v$  der einzelnen Messserien variiert noch stärker. Letzteres zeigt sich auch bei den beobachteten Extremwerten. Bei den Lastwagen ist der Unterschied zwischen langsamster und schnellster Durchschnittsgeschwindigkeit noch grösser (7 km/h), aber die Schwankungsbreite innerhalb der Datensätze ist kleiner. Wenn die Personenwagen während einer Messung schneller unterwegs waren, so galt dies auch für die Lastwagen. Teilnehmer Nr. 2 fällt bei den Personenwagen mit einer sehr grossen Varianz und extrem niedrigen und extrem hohen Messgeschwindigkeiten aus dem Rahmen.

Die  $t_{10}$ -Zeiten bei SPB-Messungen markieren die Zeitintervalle, in welchen der A-bewertete Geräuschpegel einer Vorbeifahrt um maximal 10 dB unterhalb des Maximalwertes liegt. Sie ist grundsätzlich abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und der Fahrzeuglänge, Hintergrundgeräusche können die  $t_{10}$ -Zeit fehlerhaft verlängern. Eine kurze  $t_{10}$ -Zeit geht mit einem lauten und/oder schnellen Fahrzeug einher, während eine lange  $t_{10}$ -Zeit auf ein langsames leises Fahrzeug oder hohes Hintergrundgeräusch hindeutet.

Ähnlich wie die Verteilung der Geschwindigkeiten wurde auch die Verteilung der  $t_{10}$ -Zeiten der Versuchsteilnehmer statistisch ausgewertet (Abb. 90, Tab. 15). Dazu wurden die gemessenen  $t_{10}$ -Zeiten von 0.60 Sekunden bis 3.4 Sekunden in 28 Intervalle der Länge 0.1 s eingeteilt und die Anzahl der Messzeiten innerhalb jeden Intervalls gezählt. Da die Messzeiten umgekehrt proportional zur Fahrgeschwindigkeit und die Geschwindigkeitsverteilungen linksschief sind, sind die  $t_{10}$ -Kurven für Personenwagen rechtsschief. Auffällig breit sind die Verteilungskurven bei den Teilnehmern Nr. 2 und Nr. 4. In Tab. 15 sind die Auswertungen zusammengefasst. Die  $t_{10}$ -Zeiten der Lastwagen sind tendenziell kürzer als bei Personenwagen, weil sie zwar langsamer, aber dafür deutlich lauter sind. Auch die Standardabweichungen der  $t_{10}$ -Zeiten sind bei Lastwagen kleiner.

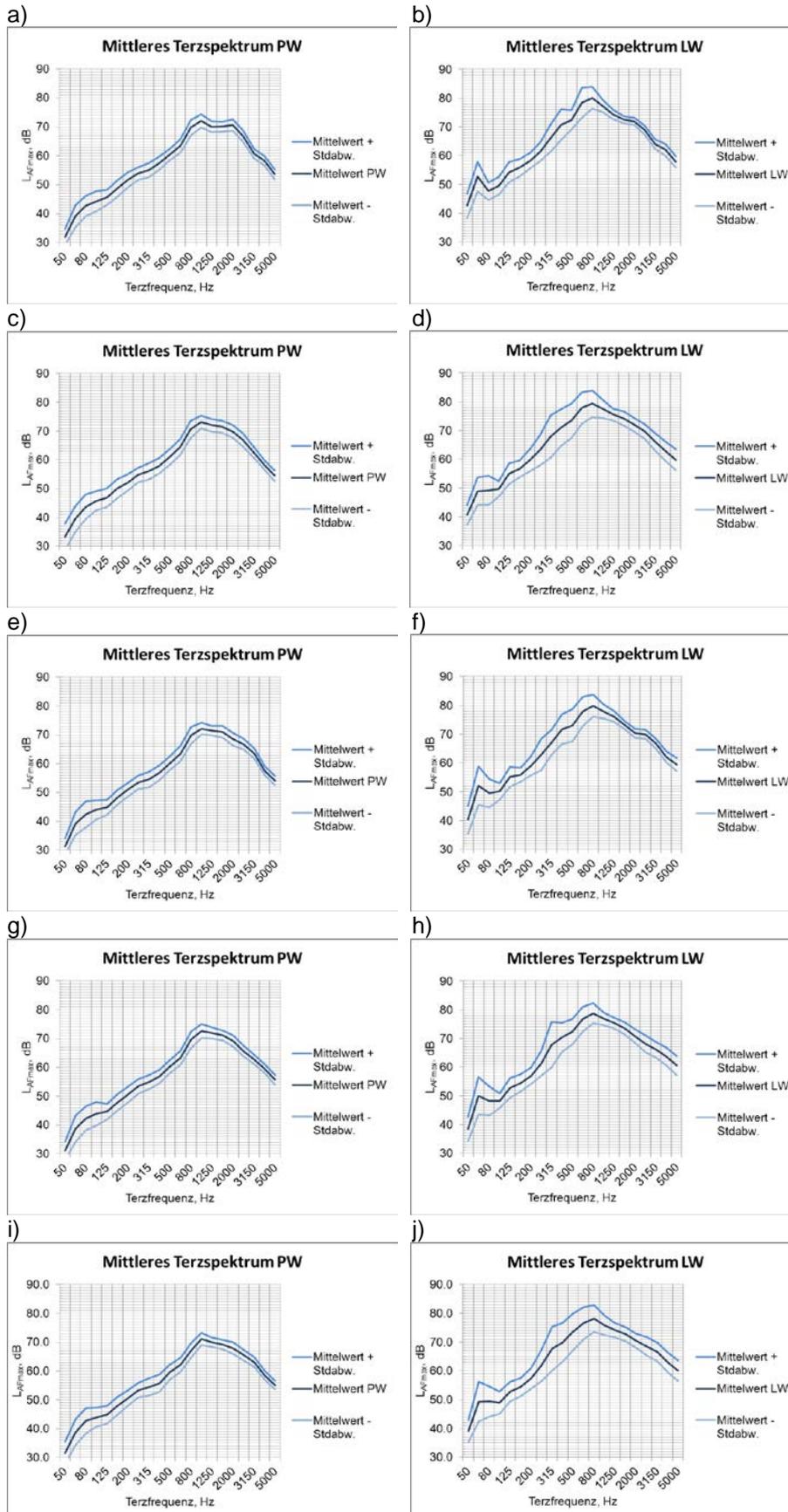


**Abb. 90** Häufigkeitsverteilung der gemessenen  $t_{10}$ -Zeiten während des Ringversuchs. Links: Verteilung für Personenwagen, rechts für Lastwagen. Von oben nach unten gezeigt sind die Ergebnisse für Teilnehmer Nr. 1 (a und b), Nr. 2 (c und d), Nr.3 (e und f), Nr.4 (g und h) und Nr.5 (i und j).

**Tab. 15** Statistische Auswertung der  $t_{10}$ -Zeiten ( $t_d$  = durchschnittliche  $t_{10}$ -Zeit,  $\sigma_t$  = Standardabweichung,  $t_{min}$  = minimale  $t_{10}$ -Zeit,  $t_{max}$  = maximale  $t_{10}$ -Zeit).

Teilnehmer Nummer	PW				LW			
	$t_d$ s	$\sigma_t$ s	$t_{min}$ s	$t_{max}$ s	$t_d$ s	$\sigma_t$ s	$t_{min}$ s	$t_{max}$ s
1	2.17	0.42	1.30	3.50	1.61	0.32	1.10	2.60
2	2.00	0.63	0.60	4.80	1.63	0.50	0.90	4.00
3	2.26	0.43	1.40	3.40	1.53	0.36	1.00	2.80
4	1.91	0.41	1.10	3.0	1.42	0.21	1.00	2.10
5	1.94	0.36	1.20	2.96	1.45	0.27	0.96	2.36

Die gelieferten  $L_{AFmax}$ -Terzspektren wurden zunächst A-bewertet und temperaturkorrigiert. Dabei wurde auf Messungen der Strassentemperatur zurückgegriffen, soweit diese verfügbar war. Einige Anbieter lieferten keine Messwerte für die Oberflächentemperatur des Strassenbelags, daher wurde die Strassentemperatur in diesen Fällen abgeschätzt. Dazu musste die Anonymität der Datensätze teilweise aufgehoben werden. Datengrundlage der Abschätzung waren Belagstemperaturmessungen im Rahmen von SPB-Messungen, welche zeitgleich in unmittelbarer Nachbarschaft des Messpunktes durchgeführt worden waren und Messungen der Lufttemperatur, wie sie von der am Ringversuchsmesspunkt gelegenen Dauermessstation aufgezeichnet wurde. Es konnte die Strassentemperatur an den betreffenden Tagen mit Bewölkung und Temperaturen nahe bei 20 C recht zuverlässig abgeschätzt werden. In *Abb. 91* sind die gemittelten Terzspektren mit ihren Standardabweichungen dargestellt. Die Form der gemittelten Terzspektren von Personenwagenvorbeifahrten ist jeweils recht ähnlich, wenn auch die Ausprägung der Spitze um 1000 Hz unterschiedlich deutlich ist. Die Standardabweichung dieser Spektren beträgt jeweils um 2 dB im akustisch relevanten Bereich. Allerdings sind die Spektren in der Spitze von Teilnehmer zu Teilnehmer relativ zueinander ebenfalls um bis zu 2 dB verschoben (höchste Pegel bei Teilnehmer Nr. 2, niedrigster bei Nr. 5). Die Mittelungsspektren der Vorbeifahrten des Schwerverkehrs schwanken um das Maximum herum ebenfalls um 2 dB zwischen niedrigstem (Nr. 5) und höchsten Pegel (Nr. 1), wobei die Standardabweichung der Lastwagenpegel jeweils mindestens 3.5 dB beträgt.



**Abb. 91** Gemittelte Terzspektren der Vorbeifahrtpegel  $L_{AFmax}$  mit Standardabweichungen der Messdaten des Ringversuchs. Links: Spektren für Personenwagen, rechts: für Lastwagen. Von oben nach unten gezeigt sind die Ergebnisse für Teilnehmer Nr. 1 (a und b), Nr. 2 (c und d), Nr.3 (e und f), Nr.4 (g und h) und Nr.5 (i und j).

Die Videoauswertung erfolgte folgendermassen: Für jeden Teilnehmer des Ringversuchs wurde jede einzelne in den gelieferten Datentabellen dokumentierte Vorbeifahrt auf der entsprechenden Videoaufzeichnung gesucht. Dies funktionierte aufgrund der Zeitsynchronisierung zwischen akustischer Messtechnik, bzw. Computer und der Videokamera im Allgemeinen recht gut. Es waren rund zwölf Stunden Videoaufzeichnung zu prüfen. Jede Vorbeifahrt wurde nach folgenden Kriterien bewertet.

- Kann die Vorbeifahrt eindeutig zugeordnet werden?
- Welcher Swiss10-Fahrzeugkategorie (in [13]) gehört das Fahrzeug auf dem Video an?
- Fährt das Fahrzeug in der Rollspur?
- Lassen sich anhand des Kameramikrofons Störgeräusche identifizieren oder zeichnet sich auf dem Videobild ein störendes (z.B. überholendes) Fahrzeug ab?

Abb. 92 und Abb. 93 zeigen Beispiele der Videoauswertung. Eine Zusammenfassung der Videoauswertung enthält Tab. 16. Die Unterschiede zwischen den fünf Versuchsteilnehmern sind signifikant. Aus technischen Gründen gibt es keine Auswertung der Rollspurposition und des Hintergrundgeräuschs für Teilnehmer Nr. 5. Aufgrund eines nicht hundertprozentig exakten Gleichlaufs der akustischen Mess- und Videozeit war eine eindeutige Zuordnung nicht immer möglich. Im Zweifel wurde auf eine Bewertung von Vorbeifahrten verzichtet. Bei Anbieter Nr. 2 fuhren bis zu zehn Prozent der registrierten Fahrzeuge nicht in der Rollspur und immerhin bis zu vier Prozent der Fahrzeuge wurden trotz offensichtlicher Störgeräusche registriert. Bei anderen Anbietern war diese Fehlerrate kleiner, aber nicht null. Zwei Anbieter (Nr. 2 und Nr. 4) wiesen Lieferwagen (nach Klasse Swiss10) der Klasse der Personenwagen zu, drei Anbieter vermieden es, vorbeifahrende Lieferwagen überhaupt zu messen. Abb. 94 zeigt die Swiss 10 Klassifizierungen als Ergebnis der Videoauswertung für jeden Teilnehmer.



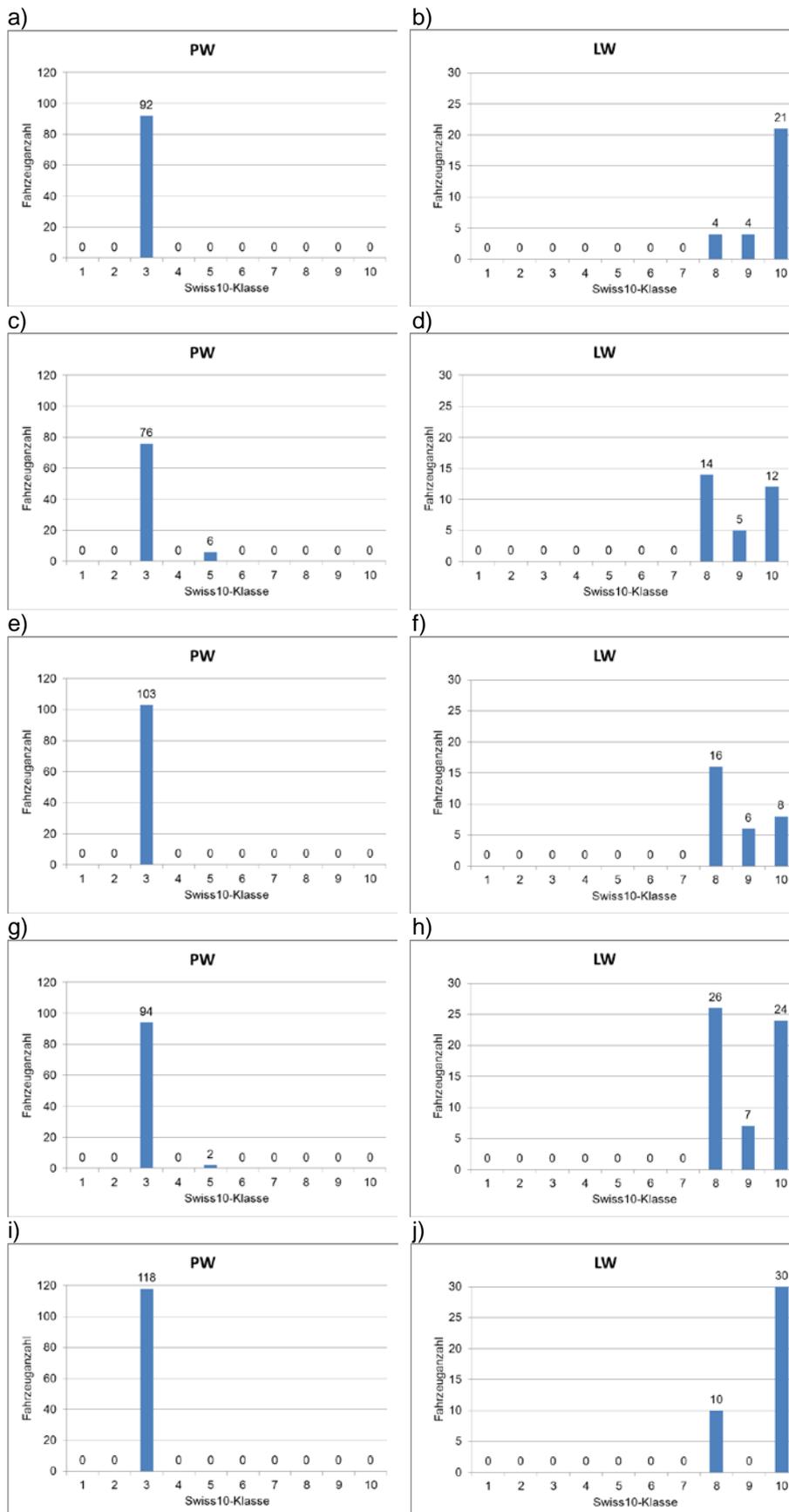
**Abb. 92** Vorbeifahrt eines Lieferwagens aus einer Videoaufzeichnung. Am linken Bildrand ist das Stativ der Dauermessstation zu sehen, links davon und ausserhalb des Bildausschnitts liegt der 7.5 m Messpunkt, in der Mitte zwischen Maschendrahtzaun und Fahrbahn steht das 5 m Mikrophon eines Messdienstleisters.



**Abb. 93** Vorbeifahrt eines Personenwagens aus der Perspektive der Videokamera. Am linken Bildrand ist das Stativ der Dauermessstation zu sehen, links davon und ausserhalb des Bildausschnitts liegt der 7.5 m Messpunkt, in der Mitte zwischen Maschendrahtzaun und Fahrbahn steht das 5 m Mikrofon eines Messdienstleisters.

**Tab. 16** Statistische Auswertung der Videoaufzeichnung.

Teilnehmer Nummer	Anzahl der Fahrzeuge			
	gemessen	zugeordnet	in Rollspur	ohne Störgeräusch
1	126	121	119	114
2	126	113	100	95
3	135	133	129	127
4	156	153	141	139
5	158	?	?	?



**Abb. 94** Swiss10-Klassifizierung der Fahrzeuge. Links die Histogramme für Personewagen, rechts für Lastwagen. Von oben nach unten gezeigt sind die Ergebnisse für Teilnehmer Nr. 1 (a und b), Nr. 2 (c und d), Nr.3 (e und f), Nr.4 (g und h) und Nr.5 (i und j).

### 3.2.5 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse des SPB-Ringversuchs für Personenwagen sind unterschiedlicher als erwartet. Die gemessenen Fahrtgeschwindigkeiten zeigen einige offensichtliche Fehlmessungen mit zu niedrigen, wie auch (häufiger) zu hohen Geschwindigkeiten. Wahrscheinlich wurde der messende Radarstrahl gelegentlich falsch ausgerichtet und hat dadurch Reflexionspunkte ausserhalb der angepeilten Fahrzeugoberflächen erreicht. Die zweifelhaften Messungen verteilen sich durchaus auf mehrere Teilnehmer. Ob es auch eine systematische Fehlaustrichtung der Radarmessgeräte gab, lässt sich nicht sicher beantworten.

Auch bei den beobachteten  $t_{10}$ -Zeiten gibt es einzelne Ausreisser, die mit isolierten Vorbeifahrten nicht kompatibel sind. Anbieter mit einer höheren Anzahl von zweifelhaften Vorbeifahrtregistrierungen weisen tendenziell auch höhere spektrale Mittelungspegel und Summenpegel auf. Die Standardabweichungen der Terzspektren sind allerdings trotzdem jeweils vergleichbar.

Die Videoauswertung der Vorbeifahrten weist auf Fehler bei der Erkennung der Fahrzeugkategorie hin. Lieferwagen wurden von zwei Anbietern fälschlicherweise den Personenwagen zugeschlagen. Diese Anbieter bestimmten auch die höchsten Mittelungspegel. Nach „Technischem Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen“ [15] sollen nur Personenwagen und Lastwagen erfasst werden, d.h. keine Lieferwagen. Im Prinzip kann es hier zu Verwirrungen kommen, denn nach dem Fachhandbuch und Technischem Merkblatt zur Projektierung [27] sollen Lieferwagen zu 50 Prozent der Fahrzeugkategorie N1 (nach LSV) zugeordnet werden und die anderen 50 Prozent der Fahrzeugkategorie N2 (nach LSV). Im vorliegenden Fall war dies aber offensichtlich nicht der Fall, denn unter den von den Teilnehmern als Lastwagen (bzw. N2) kategorisierten Fahrzeugen fanden sich auf den Videoaufzeichnungen keine Lieferwagen.

Das Fahrzeugensemble der Lastwagen ist akustisch heterogener, weshalb die Auswahl der zufällig vorbeifahrenden Fahrzeuge und die Auswahl des Messingenieurs zu verschiedenen Messzeitpunkten zu prinzipiell grösseren Unterschieden des gemessenen Fahrzeugensembles führt als bei Vorbeifahrtmessungen von Personenwagen. Andererseits sind Messfehler bei vorbeifahrenden Lastwagen unwahrscheinlicher, weil die Geschwindigkeitsmessung für grosse reflektierende Flächen robuster ist und der Geräuschpegel meist deutlich über dem Hintergrundstörpegel liegt. Auch ist die Abgrenzung eines Lastwagens gegenüber anderen Fahrzeugkategorien recht eindeutig. Das bestätigt auch die Videoanalyse, die keine Fehlzuzuweisung der Fahrzeugkategorie nachweisen konnte. Die beobachteten Unterschiede in den Mittelungsgeräuschpegeln dürften eher auf die unterschiedlichen gemessenen Fahrzeugensembles zurückzuführen sein.

Folgende Empfehlungen für SPB-Messungen im Allgemeinen ergeben sich aus dem Ringversuch:

1. Eine bessere Schulung des Messpersonals und verbesserte Qualitätssicherung im Hinblick auf die Kategorisierung der Fahrzeuge, Beobachtung des Einhaltens der Rollspur und Vermeidung von verkehrlich bedingten oder sonstigen Störgeräuschen.
2. Mehr Sorgfalt und/oder verbesserte Messtechnik für die Geschwindigkeitsmessung der vorbeifahrenden Fahrzeuge.
3. Empfehlenswert ist eine statistische Filterung der Messergebnisse, um extrem schnelle, extrem langsame, extrem leise und extrem laute Fahrzeuge vor der Auswertung zu eliminieren. Eine symmetrische perzentilbasierte Aussortierung von jeweils fünf Prozent der Einzelregistrierungen würde die statistische Aussagekraft einer SPB-Messserie deutlich verbessern und auch die vorliegenden Datensätze homogenisieren.
4. Mehr Sorgfalt beim Ausmessen der Messpunkte, insbesondere der Mikrofonhöhe in Gelände mit erheblicher Topografie.

## 3.3 Temperaturkorrektur bei SPB-Messungen

### 3.3.1 Ausgangslage

Im Vergleich zum CPX-Messsystem ist die Problematik der Temperaturkorrektur bei SPB-Messungen anders gelagert. Die Reifen, die die Reifen-Fahrbahn-Geräusche erzeugen, sind bei der SPB-Messung nicht klar definiert, sondern durch das statistische Fahrzeugkollektiv der gemessenen Fahrzeuge gegeben. Mit dem Anstieg der Heterogenisierung der Fahrzeugflotte in den letzten Jahrzehnten stieg allerdings auch die Bandbreite der Eigenschaften der Reifen der Verkehrsteilnehmer. So stieg die maximale Reifenbreite bei Fahrzeugneuauslieferungen im Mittelklassesegment innerhalb der letzten 15 Jahre von der Reifenbreite 215 auf die Reifenbreite 245. Demnach müssen die angesetzten Temperaturkorrekturen auf deren Validität überprüft werden.

In der ISO-11819-1, die SPB-Messungen und deren Auswertung beschreibt [2], wird die Messung der Lufttemperatur in 1 m bis 1.5 m Höhe über dem Niveau der Fahrbahn im Schatten, unter Vermeidung der Wärmestrahlung von der Fahrbahn und mit einem maximalen Fehler von 1 °C vorgeschrieben und die viertelstündliche Messung der Fahrbahntemperatur empfohlen. Wie die Korrektur anhand der gemessenen Temperaturen durchzuführen ist, wird dort nicht festgelegt. Allerdings wird empfohlen, die etwaige Korrektur individuell für jede Vorbeifahrt durchzuführen (und nicht global für das gemittelte Gesamtergebnis).

Im Anhang 1c zum Leitfaden Strassenlärm [15] wird auf den gemittelten Schallpegel einer Messserie eine Temperaturkorrektur  $C_T$  gemäss folgender Gleichung addiert:

$$\text{Formel 3} \quad C_T = b(T - 20^\circ\text{C})$$

mit:

$C_T$  Temperaturkorrektur in dB

$b$  Temperaturkoeffizient in dB/°C

$T$  Fahrbahntemperatur in °C während der Messungen,

wobei der Temperaturkoeffizienten von Belagsklasse und Fahrzeugkategorie abhängt und im Anhang 1c [15] tabelliert ist. In diesem Abschnitt wird in Anlehnung an die internationale SPB-Norm [1] nur zwischen den Fahrzeugkategorien Personenwagen und Lastwagen unterschieden und es wird definiert: N1=PW und N2=LW.

Es muss überprüft werden, ob die bisher durchgeführte Temperaturkorrektur über die Temperatur der Fahrbahnoberfläche noch zu optimalen Ergebnissen führt, oder ob die Lufttemperatur ebenfalls oder alternativ berücksichtigt werden sollte.

### 3.3.2 Durchführung der Messungen

#### Arbeitsprogramm

Zur Ermittlung einer Temperaturkorrektur für SPB-Daten wurden an einem dichten und einem offenporigen Fahrbahnbelag jeweils mehrere SPB-Messungen bei unterschiedlichen Luft- und Fahrbahntemperaturen durchgeführt und statistisch ausgewertet. Dabei wurden auch die Ergebnisse der oben beschriebenen Untersuchung zur Temperaturkorrektur der CPX-Messungen auf ihre Anwendbarkeit auf SPB-Messungen diskutiert.

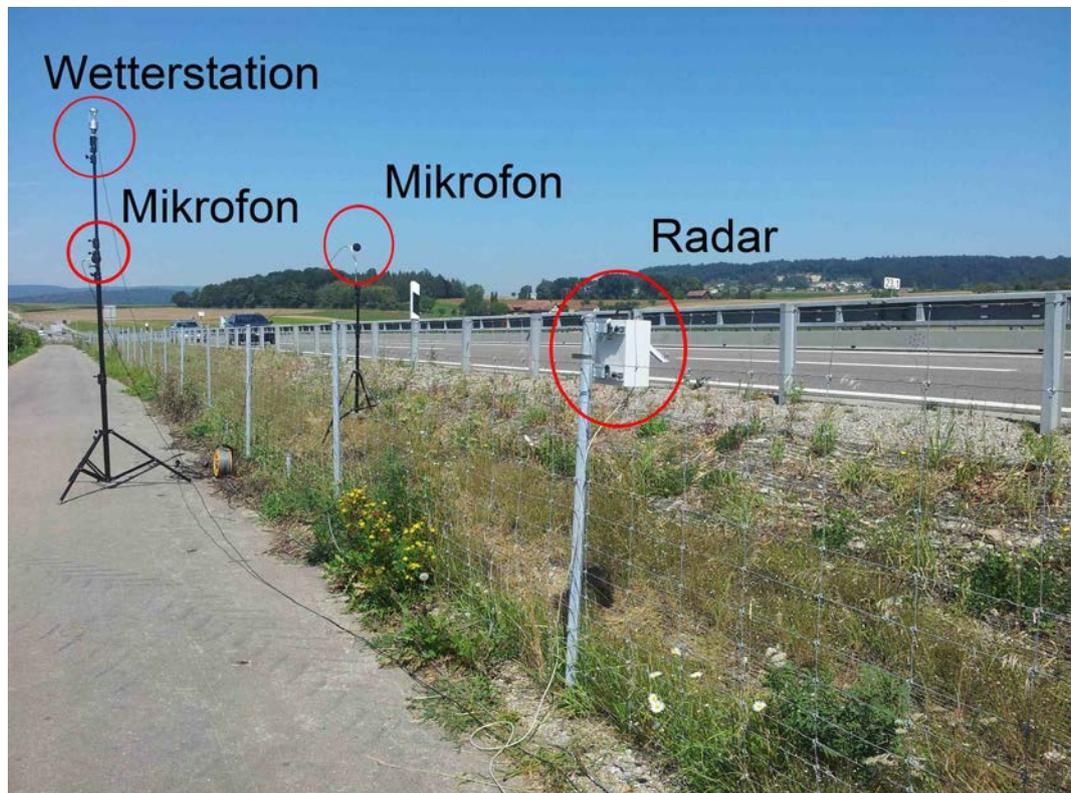
#### Beschreibung der Messorte

Die Messreihen wurden bei Lausen an der N22 und bei Benken an der N4 durchgeführt. Der Messpunkt bei Benken liegt bei Streckenkilometer 23.1 auf offenem Feld in Fahrtrich-

ung Süden (Winterthur, *Abb. 95*). Die N4 steigt dort leicht an (*Abb. 96*). Bei Benken auf der N4 wurde im Jahr 2010 ein AC MR 8 Belag eingebaut, bei Lausen im Jahr 2010 ein PA8. Der Messpunkt in Lausen liegt bei Streckenkilometer 9.05 (*Abb. 97*) neben einem Feld mit einer leichten Böschung (*Abb. 98*). An beiden Orten sind Leitplanken vorhanden.



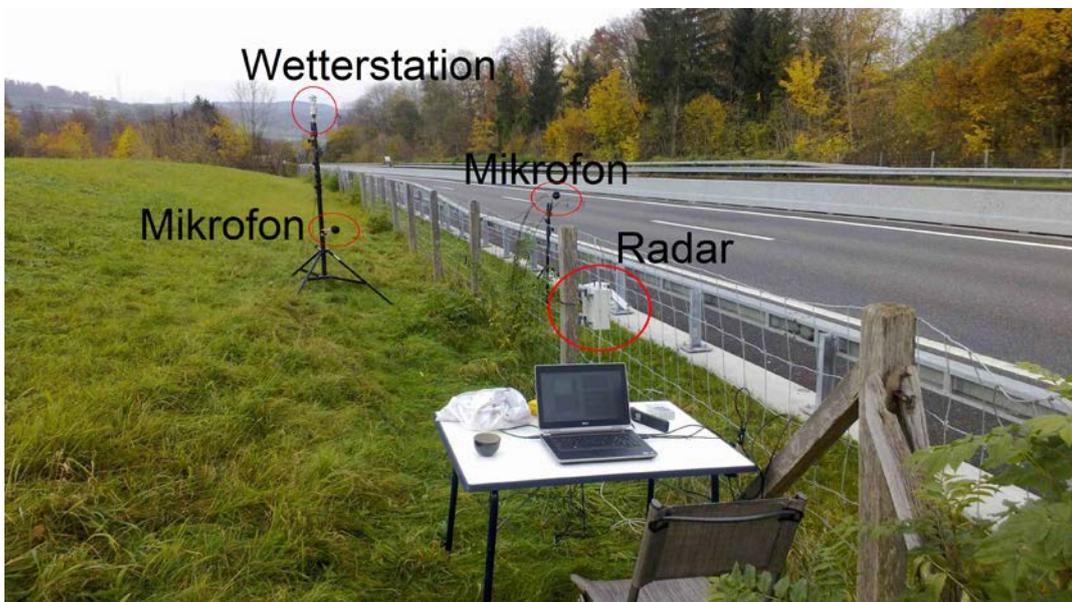
**Abb. 95** Messort an der N4 bei Benken(ZH) in Fahrtrichtung Süden (Winterthur).



**Abb. 96** Messaufbau an der N4 bei Benken(ZH) in Fahrtrichtung Süden (Winterthur).



**Abb. 97** Messort an der N22 bei Lausen (BL) in Fahrtrichtung Osten.



**Abb. 98** Messaufbau an der N22 bei Lausen(BL) in Fahrtrichtung Osten (Sissach).

### Mikrofonpositionen

Es wurden die nach Technischem Merkblatt [15] obligatorischen Mikrofonpositionen gewählt, d.h. für die SPB-Messung des  $L_{max}$  wurde das Mikrofon bei 7.5 m Abstand zur Mitte des rechten Fahrstreifens in einer Höhe von 1.2 m über Fahrbahnoberkante platziert und für den  $L_{eq}$  im Abstand von 5 m von der Fahrstreifenmitte und 1.5 m über der Fahrbahn.

### Zeitpunkt und Witterung der Messungen

Die Messungen wurden an mehreren Tagen durchgeführt, um den Lufttemperaturbereich von 0 – 35°C abdecken zu können. Messzeiten und Temperaturen gehen aus *Tab. 17* hervor.

**Tab. 17** Messzeiten und Temperaturen der SPB-Messreihen ( $T_L$ =Lufttemperatur,  $T_{Fb}$ =Fahrbahntemperatur).

Messort	Datum	Zeitraum	$T_L$ °C	$T_{Fb}$ °C
Lausen	17.08.2012	11 <sup>40</sup> – 15 <sup>45</sup>	27 – 32	37 – 46
	20.08.2012	06 <sup>15</sup> – 13 <sup>00</sup>	19 – 37	21 – 44
	07.09.2012	07 <sup>45</sup> – 13 <sup>00</sup>	11 – 21	12 – 26
	08.11.2012	08 <sup>00</sup> – 13 <sup>00</sup>	0 – 11	2 – 9
Benken	08.08.2012	06 <sup>30</sup> – 13 <sup>00</sup>	17 – 22	19 – 27
	14.08.2012	15 <sup>45</sup> – 18 <sup>00</sup>	27 – 30	29 – 38
	15.08.2012	10 <sup>30</sup> – 12 <sup>30</sup>	24 – 30	27 – 36
	20.09.2012	07 <sup>15</sup> – 13 <sup>00</sup>	5 – 17	6 – 23

Zum Zeitpunkt der Messungen waren Witterung und Fahrbahnen jeweils trocken. Auch an den Tagen vor den Messungen waren keine Niederschläge zu verzeichnen, so dass davon auszugehen ist, dass sich in keine Restfeuchtigkeit in den beiden Belägen befand, die die Messergebnisse hätten beeinflussen können. Der Wind war schwach (immer unter 2 m/s).

Die Witterungsbedingungen entsprachen in vollem Umfang den Normanforderungen.

### Störgeräusche

Besondere Störgeräusche, beispielsweise durch Flugbetrieb oder landwirtschaftliche Arbeiten, Bahnverkehr etc. sind während der Messungen nicht aufgetreten.

### 3.3.3 Ergebnisse

Zunächst wurden die Rohdaten der einzelnen Messreihen zu einer Datentabelle zusammengefasst. Trotz statistischer Kriterien, die bei einer SPB-Messung stets angewandt werden, müssen unplausible Vorbeifahrt-Ereignisse herausgefiltert werden (z.B. unrealistische Vorbeifahrtzeiten  $t_{10}$ ). Anschließend werden die Schalldruckpegel mit der gemessenen Fahrgeschwindigkeit folgendermassen korrigiert:

$$\text{Formel 4} \quad L_{i,v\text{-korr}} = L_i + 30 \lg \left( \bar{v} / v_i \right) \text{ dB(A)}$$

$L_{i,v\text{-korr}}$  Geschwindigkeitskorrigierter Schalldruckpegel der i-ten Vorbeifahrt

$L_i$  Vorbeifahrt-Schalldruckpegel der i-ten Vorbeifahrt

$\bar{v}$  arithmetischer Geschwindigkeitsmittelwert aller gültigen Vorbeifahrten

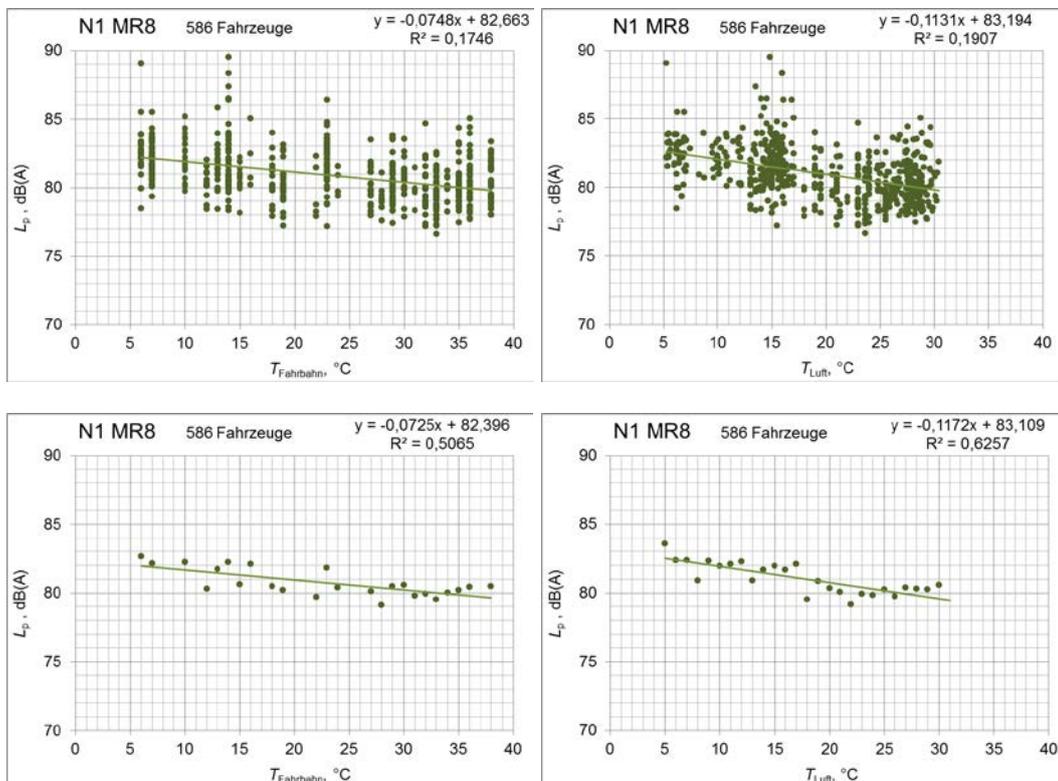
$v_i$  Geschwindigkeit der i-ten Vorbeifahrt

Der arithmetische Mittelwert aller gültigen Vorbeifahrten betrug in Benken 90.8 km/h und in Lausen 97.7 km/h. Eine visuelle Analyse der so erhaltenen Daten wird dadurch erschwert, dass innerhalb eines schmalen Temperaturbereichs viele Vorbeifahrten mit teils sehr unterschiedlichen Schalldruckpegeln vorhanden sein können. Die Varianz in den Schalldruckpegeldaten ist sehr hoch. Ein Weg, diese Varianz zu reduzieren besteht in der Aggregation der Daten, d.h. Messwerte innerhalb eines bestimmten Intervalls werden zu einem Messwert zusammengefasst, z.B. gemittelt. Hier wurden die Daten aggregiert, indem die Schalldruckpegel innerhalb eines 1°C-Intervalls arithmetisch gemittelt und dem ganzzahligen Temperaturwert in der Mitte des Intervalls zugeordnet wurden. Dieses Verfahren komprimiert die Punktwolke der Einzelmesswerte zu wenigen Schalldruckpegel-

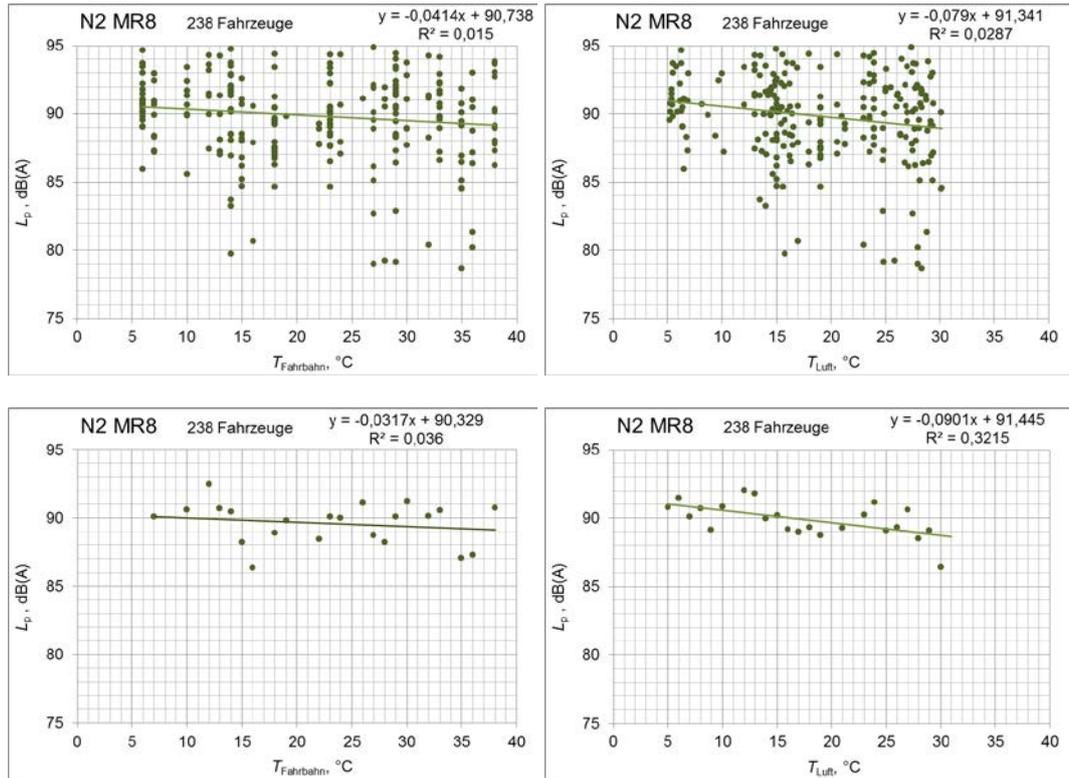
Temperatur-Wertepaaren. Andererseits verzerrt dieses Vorgehen das statistische Temperaturmodell, wenn nach der Aggregation alle Wertepaare gleichgewichtig in eine lineare Regression eingehen, unabhängig davon wie viele Fahrzeuge bei einer bestimmten Temperatur gemessen wurden. Wenn im Datenensemble sehr viele Fahrzeuge vorhanden sind, wirkt sich die Aggregation kaum aus (z.B. bei der Fahrzeugkategorie N1 als Funktion der Lufttemperatur), wenn wenige Fahrzeuge vorhanden sind hingegen schon (z.B. bei Kategorie N2 als Funktion der Fahrbahntemperatur).

Die Lufttemperatur wird kontinuierlich mit einer Wetterstation gemessen und bei jeder Vorbeifahrt mit mehreren Nachkommastellen abgespeichert. Damit ergibt sich entlang der Temperaturachse eine quasi kontinuierliche Verteilung. Im Gegensatz dazu wurden die Fahrbahntemperaturen etwa alle 15 Minuten mit einem Infrarothandgerät gemessen und periodisch als ganzzahliger Wert in die Eingabemaske der Messsoftware eingetragen, so dass der aktuellste Fahrbahntemperaturmesswert im Allgemeinen mit mehreren Einzelvorbeifahrtmessungen verknüpft ist.

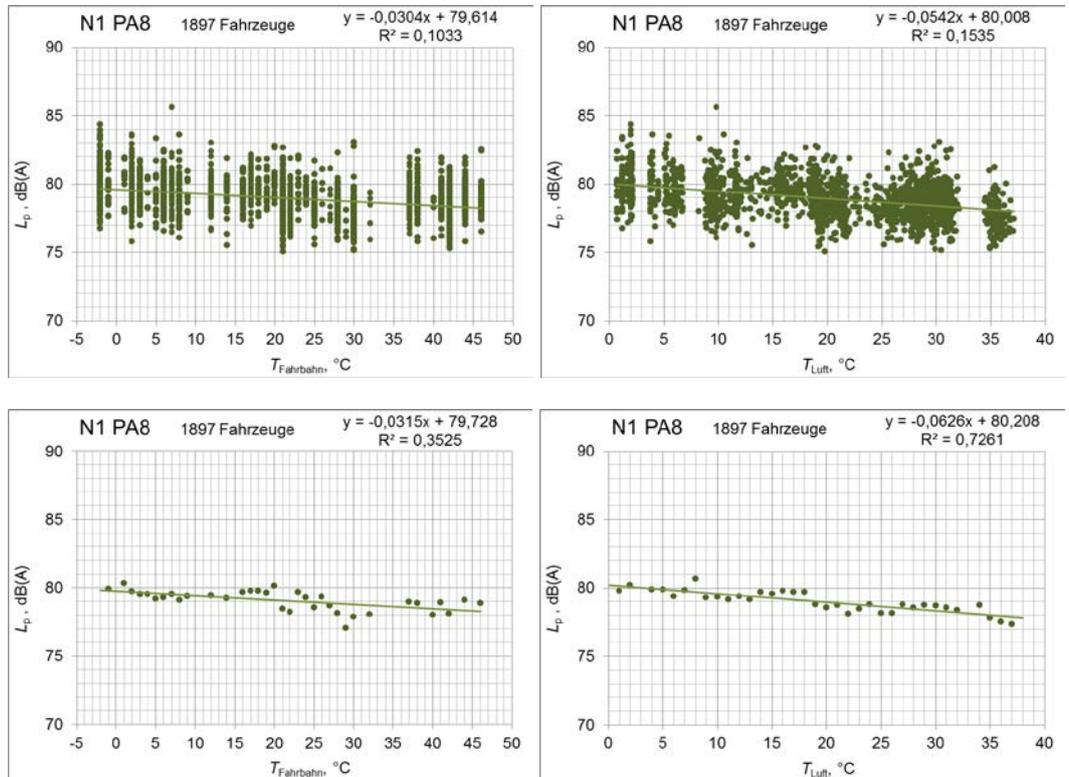
In den folgenden Diagrammen (Abb. 99 bis Abb. 102) sind die Vorbeifahrtpegel beider Messstellen als Funktion der Lufttemperatur und der Fahrbahntemperatur für die Fahrzeugkategorien N1 und N2 dargestellt, sowohl in originaler als auch in aggregierter Form. Eine lineare Regression wurde jeweils durchgeführt. Dabei wurde - wie allgemein üblich - angenommen, dass die Temperaturwerte jeweils nicht fehlerbehaftet sind. Man kann davon ausgehen, dass der Messfehler der Fahrbahntemperatur in der Größenordnung von  $\pm 2^\circ\text{C}$  liegt, bei der Lufttemperatur dürfte er unter  $1^\circ\text{C}$  liegen. Die Schwankungsbreite der Schalldruckpegel im Verhältnis zu ihrem Erwartungswert (Mittelwert) ist deutlich grösser als für die Temperaturwerte, weshalb die Vereinfachung gerechtfertigt ist. In den Graphen ist auch die Anzahl der gültigen Vorbeifahrten genannt. In Lausen auf dem PA8 wurden knapp 2000 Vorbeifahrten erfasst, in Benken gut 800. Durch die gefilterten und aggregierten oder nicht aggregierten Datenpunkte lassen sich Regressionsgeraden mit Bestimmtheitsmassen zwischen  $R^2 = 0.015$  und  $R^2 = 0.726$  legen.



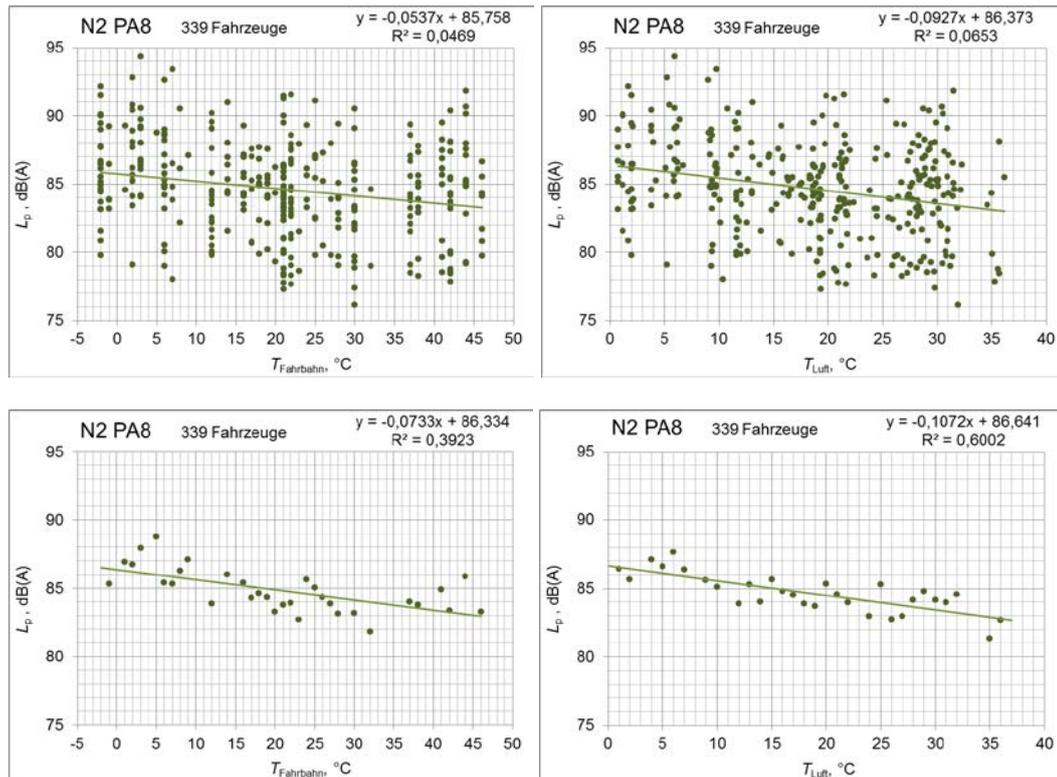
**Abb. 99** Vorbeifahrtpegel der Fahrzeugkategorie N1 in Benken auf dem MR8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Fahrbahntemperatur  $T_{\text{Fb}}$  (links) und der Lufttemperatur  $T_L$  (rechts), ohne Aggregation (oben) und mit Aggregation (unten).



**Abb. 100** Vorbeifahrtpegel der Fahrzeugkategorie N2 in Benken auf dem MR8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Fahrbahntemperatur  $T_{Fb}$  (links) und der Lufttemperatur  $T_L$  (rechts), ohne Aggregation (oben) und mit Aggregation (unten).



**Abb. 101** Vorbeifahrtpegel der Fahrzeugkategorie N1 in Lausen auf dem PA8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Fahrbahntemperatur  $T_{Fb}$  (links) und der Lufttemperatur  $T_L$  (rechts), ohne Aggregation (oben) und mit Aggregation (unten).



**Abb. 102** Vorbeifahrtpegel der Fahrzeugkategorie N2 in Lausen auf dem PA8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Fahrbahntemperatur  $T_{\text{Fb}}$  (links) und der Lufttemperatur  $T_{\text{L}}$  (rechts), ohne Aggregation (oben) und mit Aggregation (unten).

**Tab. 18** Temperaturkoeffizienten  $C_T$ , basierend auf Lufttemperatur  $T_L$  und Fahrbahntemperatur  $T_{\text{Fb}}$  für die Fahrzeugkategorien N1 und N2 aus den SPB-Messungen in Lausen und Benken.

Temperaturkorrektur für	$C_T$ N1, dB/°C		$C_T$ N2, dB/°C	
	original	aggregiert	Original	aggregiert
Benken MR8, $T_L$	-0.113	-0.117	-0.079	-0.090
Benken MR8, $T_{\text{Fb}}$	-0.075	-0.073	-0.041	-0.032
Lausen PA8, $T_L$	-0.054	-0.063	-0.093	-0.107
Lausen PA8, $T_{\text{Fb}}$	-0.030	-0.032	-0.054	-0.073

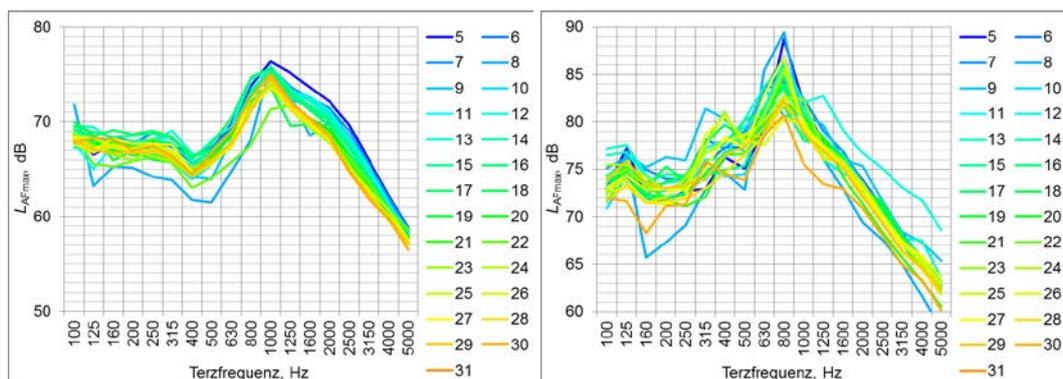
Folgendes zeigen die Abbildungen und die Zusammenfassung in Tab. 18:

- Die Aggregation führt zu visuell klareren Ergebnissen und der Anteil der statistisch erklärbaren Varianz in den Daten ( $R^2$ ) erhöht sich deutlich.
- Die lineare Regression mit und ohne Aggregation liefert für N1 ähnliche Temperaturkoeffizienten, bei N2 sind die Unterschiede grösser.
- Die Aggregation führt zur gleichen Gewichtung aller Temperaturbereiche, d.h. auch solchen mit wenigen gemessenen Fahrzeugen, letztere finden sich oft an beiden Enden der Temperaturskala. Dadurch werden tendenziell die höchsten und niedrigsten Temperaturbereiche eher übergewichtet und demzufolge wird die Geradensteigung meist überschätzt.
- Die Temperaturspannweite für die Fahrbahntemperatur ist grösser als für die Lufttemperatur. Trotzdem sind die Geradengleichungen für die Fahrbahntemperaturen in

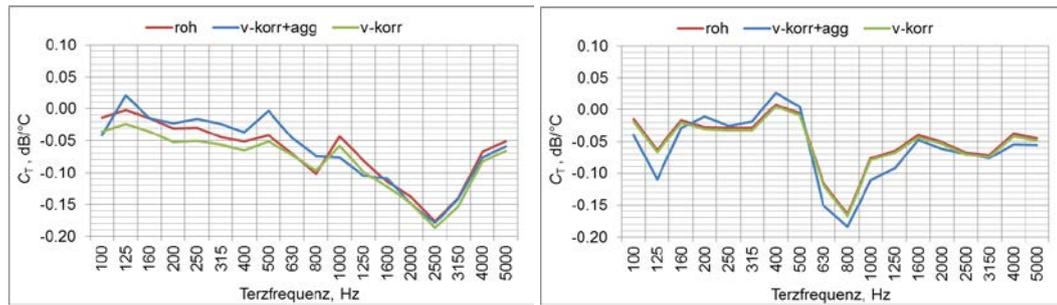
Benken und Lausen sowohl für N1 als auch für N2 statistisch schlechter bestimmt als für die Lufttemperatur.

Bei der Untersuchung einer geeigneten Temperaturkorrektur für CPX-Messungen (oben) wurde herausgefunden, dass der Temperatureffekt frequenzabhängig ist. Daher wird im Folgenden auch die Veränderung des Spektrums bei den SPB-Messungen diskutiert und es werden frequenzabhängige Temperaturkoeffizienten betrachtet. Die Spektren werden getrennt für die Fahrzeugkategorien N1 und N2 dargestellt, wobei die Farbe der Kurven von blau nach rot je nach Temperatur variiert (Abb. 103 für Benken und Abb. 105 für Lausen). Der Schallpegel reduziert sich tendenziell mit der Lufttemperatur, allerdings nicht bei allen Frequenzen in gleicher Weise. Bei der Fahrzeugkategorie N1 scheinen die temperaturbedingten Veränderungen systematischer zu sein, was an dem grösseren Datenensemble und dessen grösserer Homogenität liegen dürfte. Bei der Klasse N2 sind die Kurvenverläufe unterhalb von 400 Hz besonders heterogen. Die spektralen Maxima in Benken liegen für N1 bei 1000 Hz und für N2 bei 800 Hz. In Lausen liegt der Peak jeweils bei 630 Hz und das Spektrum wirkt insgesamt etwas breitbandiger.

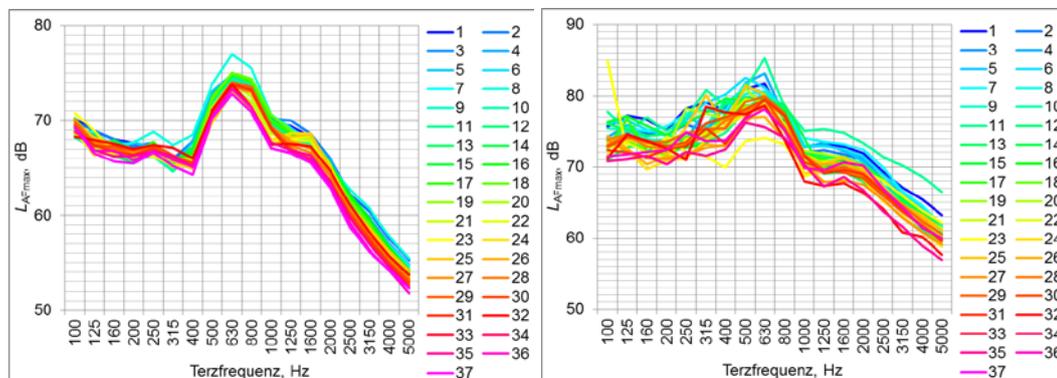
Analog zur Anpassung einer Geraden an die Gesamtschalldruckpegel als Funktion der Lufttemperatur lässt sich eine Gerade auch an die Summenpegel für jedes Terzband separat anpassen. So ergeben sich frequenzabhängige Temperaturkoeffizienten  $C_T$  für die Messorte bei Benken (Abb. 104) und Lausen (Abb. 106). Die Anpassung wurde aufgrund der Rohspektren (rot) und der geschwindigkeitskorrigierten Spektren mit (blau) und ohne Aggregation (grün) durchgeführt. Letztere sollte die zuverlässigsten Koeffizienten liefern. In Benken schwanken die Temperaturkoeffizienten erheblich. Für die Fahrzeugkategorie N1 nehmen die Koeffizienten von  $-0.03 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  bei 100 Hz bis  $-0.18 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  bei 2500 Hz fast kontinuierlich ab, bevor sie wieder steil ansteigen. Der Terzbereich von 630 Hz bis 2000 Hz dominiert energetisch bei geringer Koeffizientenfluktuation. Daher erscheint eine spektrale Korrektur hier nicht notwendig. Bei Lastwagen (Klasse N2) gibt es ein ausgeprägtes Extremum bei 800 Hz mit einem hohen Koeffizienten von  $0.17 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ . Bei dieser Frequenz hat das N2-Spektrum in Benken ein Maximum. Man kann annehmen, dass ein bestimmter Reifenanregungsmechanismus das Gesamtgeräusch dominiert und dieser auf die Änderung der viskosen Eigenschaften mit der Temperatur besonders deutlich reagiert. In Lausen ist die Abhängigkeit des Temperaturkoeffizienten von der Frequenz für die Klasse N1 im energetisch wichtigen Bereich zwischen 400 Hz und 2000 Hz gering. Die Fahrzeugkategorie N2 weist als Funktion der Frequenz fluktuierende Koeffizienten auf, gerade im energetisch wichtigen Bereich zwischen 400



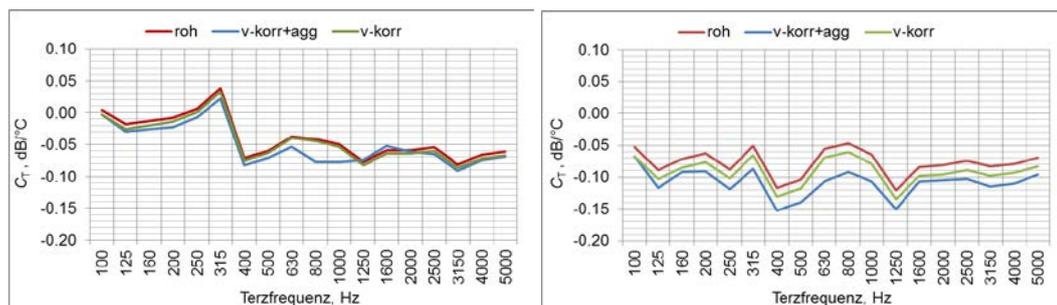
**Abb. 103** Spektren des Vorbeifahrtpegels  $L_{AFmax}$  der Fahrzeugkategorie N1 (links) und N2 (rechts) in Benken auf dem MR8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Lufttemperatur nach Aggregation.



**Abb. 104** Spektrale Temperaturkorrekturen  $C_T$  des Vorbeifahrtpegels der Fahrzeugkategorie N1 (links) und N2 (rechts) in Benken auf dem MR8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Lufttemperatur, abgeleitet jeweils aufgrund der Rohdaten (rot), der geschwindigkeitskorrigierten und aggregierten Messdaten (blau) und der nur geschwindigkeitskorrigierten Daten (grün).



**Abb. 105** Spektren des Vorbeifahrtpegels  $L_{AF,max}$  der Fahrzeugkategorie N1 (links) und N2 (rechts) in Lausen auf dem PA8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Lufttemperatur nach Aggregation.



**Abb. 106** Spektrale Temperaturkorrekturen  $C_T$  des Vorbeifahrtpegels der Fahrzeugkategorie N1 (links) und N2 (rechts) in Lausen auf dem PA8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Lufttemperatur, abgeleitet jeweils aufgrund der Rohdaten (rot), der geschwindigkeitskorrigierten und aggregierten Messdaten (blau) und der nur geschwindigkeitskorrigierten Daten (grün).

Folgendes zeigen die spektralen Untersuchungen:

- Die Spektren unterscheiden sich je nach Messort (bzw. Belagstyp) und Fahrzeugkategorie. Auf dem PA8 erscheint das Spektrum bei N1 schmalbandiger und bei N2

breitbandiger als auf dem MR8. Die spektralen Spitzen liegen bei Messung auf dem PA8 jeweils bei 630 Hz und auf dem MR8 bei 1000 Hz für N1 und 800 Hz für N2.

- Die spektralen Pegel nehmen tendenziell mit der Temperatur ab, die Abhängigkeit ist aber je nach Belagstyp, Fahrzeugkategorie und Frequenz verschieden.
- Im energetisch jeweils dominierenden Frequenzbereich schwanken die Temperaturkoeffizienten als Funktion der Terzfrequenz für die Fahrzeugkategorie N1 wenig, für N2 erheblich.

### 3.3.4 Schlussfolgerungen

Die Messungen mit einer weiten Temperaturspannweite am selben Standort innerhalb möglichst weniger Wochen mit gleicher Messhardware zielen auf eine möglichst isolierte Variation der Messparameter Luft- und Fahrbahntemperatur. Der Datenumfang liegt zwischen dem 19-fachen (N1, Lausen) und 6-fachen (N1, Benken) einer SPB-Messung nach Norm ISO 11819-1 [2] und Technischem Merkblatt [15] und ist damit statistisch gut abgesichert.

Zur Frage, ob die Lufttemperatur oder die Fahrbahntemperatur der geeignetere Parameter zur Korrektur des Geräuschpegels ist, gilt es folgendes zu bedenken: Für das Reifen-Fahrbahngeräusch wäre die Reifentemperatur zum Messzeitpunkt eigentlich der relevantere Parameter, denn diese beeinflusst die visko-elastischen Eigenschaften des Reifens und damit direkt das Ausmass der Geräuschenstehung. Allerdings handelt es sich um eine integrierte Grösse, denn die Reifentemperatur stellt sich über längere Fahrstrecken als Ergebnis der Angleichung an die Fahrbahntemperatur, aber auch der Reibung (u.a. durch Bremsen und Beschleunigen) und der Lufttemperatur (z.B. durch Abkühlung) ein, ist innerhalb des Reifens variabel und lässt sich beim vorbeifahrenden Fahrzeug kaum zuverlässig messen. Die lokale Fahrbahntemperatur ist nur dann ein geeigneter Parameter, wenn sie die durchschnittliche Fahrbahntemperatur auf dem Fahrstreifen einige Kilometer entgegen der Fahrtrichtung repräsentiert. Da die Fahrbahntemperatur bei SPB-Messungen aber lokal bestimmt wird, ist dies im Allgemeinen nicht der Fall, im Gegenteil hängt das Ergebnis der Fahrbahntemperaturmessung von lokalen Belags- und Strahlungsverhältnissen (Sonnenschein oder Schatten!) ab. Die Lufttemperatur hat an sich schon integrativen Charakter, weil Wind- und Strahlungsverhältnisse aus einem grösseren Umgebungsbereich indirekt eingehen. Damit ist die Lufttemperatur statistisch gesehen die stabilere Grösse und führt auch bei den hier ausgewerteten Messdaten immer zu einem höheren Bestimmtheitsmass der angepassten Geraden. Messtechnisch und für die Auswertung hat ein Bezug von Pegelkorrekturen auf die Oberflächentemperatur anstatt auf die Lufttemperatur zusätzliche Nachteile (erhöhter technischer Aufwand für kontinuierliche Messungen auf der befahrenen Strasse, stärkerer Einfluss von Sonneneinstrahlung, Licht und Schatten, die rechnerisch auszugleichen wären), so dass die Lufttemperatur, die viele dieser lokalen Faktoren automatisch integriert, die bessere Wahl ist. Messwerte der Lufttemperatur korrelieren, über grosse Datenensemble betrachtet, sehr gut mit Messwerten der Fahrbahntemperatur und auch der Temperatur der Reifenoberfläche [20], daher darf man sich bei der Wahl der geeignetsten Temperaturvariable für die Korrektur von praxisnahen Kriterien leiten lassen.

Für den offenporigen Belag in Lausen ergeben sich etwa halb so grosse Koeffizienten für die Lufttemperatur (N1:  $-0.054 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ , N2:  $-0.03 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ ) als für den dichten Belag in Benken (N1:  $-0.113 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ , N2:  $-0.075 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ ). Für die Fahrbahntemperaturen ergeben sich in Lausen für N1  $-0.03 \text{ dB}/^\circ\text{C}$  und für N2  $-0.054 \text{ dB}/^\circ\text{C}$  und in Benken für N1  $-0.075 \text{ dB}/^\circ\text{C}$  und für N2  $-0.041 \text{ dB}/^\circ\text{C}$ . Da die Spannweite der Fahrbahntemperaturwerte grösser ist als diejenige der Lufttemperaturen, weisen die Temperaturkoeffizienten auf der Basis der Fahrbahntemperaturen absolut kleinere Werte auf. Der Trend zu absolut höheren Temperaturkoeffizienten bei Messung von akustischen Eigenschaften dichter Beläge ist physikalisch plausibel. Der warme und damit mechanisch weichere Reifen reagiert generell schwächer auf äussere Anregung und wird somit bei hohen Temperaturen auf an sich lauten Deckschichten überproportional leiser. Offenporige Beläge haben höhere Schallabsorption und geringeren hohlrauminduzierten Strömungswiderstand, welche jeweils kaum von der Temperatur abhängen. Daher ist der temperaturabhängige Anteil texturbedingter Geräuschanregung am Gesamtpegel bei offenporigen Deckschichten relativ klei-

ner als auf dichten Belägen und folglich ist ein kleinerer Temperaturkoeffizient auf offenen Belägen zu erwarten. Für CPX-Messungen gilt diese Argumentation nicht automatisch ebenfalls, denn das CPX-Verfahren erfasst das Nahfeld, wo die relativen Beiträge von Absorption, Strömungswiderstand und texturinduzierter Anregung in anderem Verhältnis stehen.

Eine spektrale Temperaturkorrektur wäre im Hinblick auf die frequenzabhängige Anregung und die frequenz- und temperaturabhängigen visko-elastischen Eigenschaften der Reifen prinzipiell wünschenswert. Dem steht aber entgegen, dass im Gegensatz zu CPX-Messungen, das zufällig registrierte Reifenkollektiv eine wichtige und in der SPB-Messpraxis nicht beeinflussbare Grösse darstellt, die im Hinblick auf Frequenzabhängigkeiten zu erheblicher Unsicherheit führen kann. Die für CPX-Messungen in Abschnitt 2.1 abgeleiteten spektralen Abhängigkeiten der Temperaturkoeffizienten finden sich in den SPB-Daten deshalb so nicht wieder. Allenfalls finden sich für den offenporigen Belag gewisse Ähnlichkeiten im Verlauf der Kurven. Für die Fahrzeugkategorie N1 lohnt sich nach den vorliegenden Messungen eine frequenzabhängige Temperaturkorrektur nicht, weil die Frequenzabhängigkeit der Korrekturfaktoren im energetisch wichtigsten Bereich nur gering ist, ähnlich wie das bei den CPX-Messungen beobachtet wurde (siehe Abschnitt 2.1). Bei der Fahrzeugkategorie N2 wurden signifikante Frequenzabhängigkeiten der Koeffizienten beobachtet. Allerdings ist nicht klar, inwieweit diese Abhängigkeit sich mit einem etwas anderen Reifenkollektiv und an anderen Messorten bestätigen liesse. Deshalb kann an dieser Stelle nicht empfohlen werden, die beobachteten frequenzabhängigen Temperaturkoeffizienten generell auf die entsprechenden Belagsklassen (offen und dicht) anzuwenden.

Überraschenderweise und entgegen den hier vorgelegten Ergebnissen, solchen aus anderen Veröffentlichungen und entgegen der physikalischen Erwartung schreibt das „Technische Merkblatt für akustische Belagsgütemessungen“ [15] eine Korrektur anhand der Fahrbahntemperatur vor, die für offenporige Beläge grösser ist als für dichte (N1: Drainbeläge:  $-0.05 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ , dichte Beläge:  $-0.03 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ , Betonbeläge:  $-0.01 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ ; N2: Drainbeläge:  $-0.03 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ , sonst  $0.0 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ ). Die im Anhang 1c empfohlenen Beträge der Korrekturfaktoren für dichte Asphaltdecken und für Betonbeläge erscheinen zu niedrig, nicht nur im Vergleich mit den hier vorgestellten Ergebnissen, sondern auch im Vergleich zur Fachliteratur. Eine aktuelle Auswertung von internationalen Veröffentlichungen zum Thema [28] empfiehlt folgende Korrekturwerte für Personenwagen (N1): Drainbeläge:  $-0.05 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ , dichte Beläge:  $-0.10 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ , Betonbeläge:  $-0.07 \text{ dB/}^\circ\text{C}$ . Für Lastwagen (N2) ist die veröffentlichte Datenbasis deutlich kleiner, die Autoren empfehlen hier eine ungefähre Halbierung der jeweiligen N1-Temperaturfaktoren. Die Autoren Bühlmann und van Blokland schlagen ihre Temperaturfaktoren für die Übernahme in die internationalen Normen für SPB-, CPX-, CPB- und OBSI-Messungen vor. Da Nahfeld- und Fernfeldmessungen sich in den relativen Beiträgen ihrer Geräuschzusammensetzung unterscheiden, ist dies als ein gewagter Vorschlag zu bewerten. Nach den hier vorliegenden Messergebnissen sind zudem die Temperaturkoeffizienten für N2 nicht unbedingt und auf keinen Fall wesentlich kleiner als für N1. Mit zunehmendem Anteil des Motorengeräuschs und anderer Störgeräusche am Gesamtpegel nimmt die Temperaturabhängigkeit des Gesamtpegels ab. Dies könnte die Ursache dafür sein, dass für N2 in der Literatur zuweilen niedrigere Temperaturkoeffizienten als für N1 berichtet werden, denn bei den ohnehin sehr lauten Lastwagen wird in der Messpraxis auf Nebengeräusche oder Interferenz mit anderen Fahrzeugen nicht immer genau geachtet.

Aufgrund der hier neu vorliegenden Messergebnisse und unter Berücksichtigung publizierter internationaler Untersuchungen ergeben sich für eine Neufassung des Anhangs 1c [15] die empfohlenen Korrekturfaktoren  $C_T$  auf Basis der Lufttemperatur aus Tab. 19.

**Tab. 19** SPB-Temperaturkorrekturkoeffizienten  $C_T$ .

Temperaturkorrektur für Fahrzeugkategorie	Anhang 1c (31.07.2013) [15]		Bühlmann und van Blokland [28]		Messungen in Benken und Lausen		Empfehlung für Anhang 1c	
	N1 dB/°C	N2 dB/°C	N1 dB/°C	N2 dB/°C	N1 dB/°C	N2 dB/°C	N1 dB/°C	N2 dB/°C
offene Beläge	0.05	0.03	0.05	0.03	0.054	0.093	0.05	0.04
dichte Beläge	0.03	0.0	0.10	0.05	0.113	0.079	0.11	0.08
Betonbeläge	0.01	0.0	0.07	0.04	-	-	0.07	0.04

Diese Empfehlung wurde aus Autobahnvorbeifahrtdaten abgeleitet. Bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten, etwa innerorts, sind die Beiträge der einzelnen physikalischen Prozesse zum Gesamtgeräusch anders gewichtet, was sich deutlich in spektralen Untersuchungen der Temperaturkorrekturfunktionen zeigt (siehe z.B. 2.1). Damit resultiert auch prinzipiell eine andere Temperaturabhängigkeit für das Gesamtgeräusch. Da bei niedrigen Fahrtgeschwindigkeiten das Motorengeräusch eine zunehmende Rolle spielt und dieses (bei warmgefahrenen Motoren!) als unabhängig von der Lufttemperatur angesehen werden kann, dürfte die Temperaturkorrektur tendenziell geringer ausfallen. Die Datenbasis für SPB-Messungen bei 50 km/h in der Fachliteratur ist allerdings weniger belastbar, u.a. weil innerorts nahezu keine offenporigen Beläge eingebaut werden und nicht zuletzt auch aus pragmatischen Gründen im Allgemeinen die gleichen Temperaturkoeffizienten für alle Fahrtgeschwindigkeiten empfohlen werden.

## 3.4 SPB Geschwindigkeitsmessung

### 3.4.1 Ausgangslage

Die Geschwindigkeitsmessung findet üblicherweise entweder mit Radar-, Laser- oder Lichtschrankenmesssystemen statt. Alle diese Systeme haben gemein, dass eine zur Fahrbahn parallele Ausrichtung ein notwendiges Kriterium für die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung ist. Bei auch nur leicht winkliger Aufstellung wird die Geschwindigkeit systematisch falsch gemessen. So ergibt sich ein im Nachhinein nicht nachvollziehbarer Fehler, der die Wiederholgenauigkeit der SPB-Messung einschränkt. Die Sensibilität des Fehlers bei der Geschwindigkeitsmessung auf das Ergebnis von SPB-Messungen sollte daher untersucht werden.

Die massgebende Norm ISO 11819-1 [2] legt fest, dass der Standardfehler bei der Geschwindigkeitsmessung bei maximal drei Prozent des wahren Geschwindigkeitswertes liegen sollte. Der auszuwertende Geschwindigkeitsbereich soll um den Mittelwert der gemessenen Fahrgeschwindigkeiten nur um die einfache (Personenwagen), bzw. die 1.5fache (Lastwagen) Standardabweichung schwanken.

### 3.4.2 Durchführung der Messungen

#### Arbeitsprogramm

Zur Bestimmung der notwendigen Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessungen wurde eine experimentelle und rechnerische Untersuchung durchgeführt. Bei einer SPB-Messung wurden zwei Geschwindigkeitsmesseinrichtungen parallel eingesetzt. Eine der beiden Geschwindigkeitsmesseinrichtungen wurde ordnungsgemäss, die zweite leicht winklig aufgestellt. Aus den Ergebnissen war eine Anforderung für die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessungen und der Aufstellung der Radarmessgeräte abzuleiten. Die rechnerische Untersuchung sollte die Geschwindigkeitswerte von realen akustischen Da-

tensätzen manipulieren, um die Auswirkungen auf die Ergebnisse der Auswertung bewerten zu können.

### Messstandort

Als Messstandort ausgewählt wurde der gleiche Messpunkt an der Hochleistungsstrasse T5 östlich von Aarau (Swisstopo: 651294, 249217), an dem auch der SPB-Ringversuch stattfand. Die akustischen Eigenschaften am Messpunkt sind gut untersucht. Am Messstandort liegt seit Sommer 2011 ein AC MR 8 Deckbelag. Die Abb. 107 bis Abb. 110 zeigen den Messstandort auf einem Satellitenbildausschnitt und Fotografien des Messaufbaus.



**Abb. 107** Messstandort des SPB Geschwindigkeitsversuchs an der Aaretalstrasse (roter Punkt).



**Abb. 108** Situation am Messstandort bei der Doppelmessung durch die Müller-BBM Schweiz AG. In der Mitte etwas verdeckt das leicht verdrehte Radarmessgerät, rechts das korrekt orientierte Gerät zur Geschwindigkeitsmessung. Mittig links und rechts die SPB-Messmikrofone, wobei auf jedem Stativ zwei Mikrofone montiert waren. Ebenfalls mittig die beiden Messrechner.

## Messdurchführung, Messausrüstung

Die SPB-Messungen wurden am 05.09.2013 bei günstigen und normgerechten Bedingungen durchgeführt. Die Windgeschwindigkeiten waren sehr niedrig, die Witterung trocken (letzteres auch am Vortag der Messungen). Die Messung begann am Nachmittag und musste wegen des einsetzenden Feierabendverkehrs für zwei Stunden unterbrochen werden. Der Messaufbau erfolgte nach Technischem Merkblatt [15], mit dem Unterschied, dass an den obligatorischen Mikrofonpositionen in 7.5 m Abstand zur Mitte des rechten Fahrstreifens in einer Höhe von 1.2 m über Fahrbahnoberfläche und im Abstand von 5 m von der Fahrstreifenmitte und in 1.5 m über der Fahrbahn diesmal je zwei Mikrofone gleichen Typs unmittelbar nebeneinander installiert wurden (Abb. 109). Die Mikrofone und Radargeräte wurden komplett unabhängig voneinander mit je einem Messcomputer verkabelt, so dass der Messingenieur zwei identische voneinander unabhängige Messsysteme gleichzeitig bediente, wobei darauf geachtet wurde, möglichst synchron die Vorbeifahrtmessungen auszulösen und zu beenden.



**Abb. 109** Mikrofonaufbau bei der Doppelmessung durch die Müller-BBM Schweiz AG. Im Vordergrund die 7.5 m Mikrofone, im Hintergrund, die 5 m Position. Jeweils links die Mikrofone der Messung mit korrekter Ausrichtung, rechts die SPB-Mikrofone der Messung mit verdrehter Geschwindigkeitsmesstechnik.

Besonders grosser Wert wurde auf die exakte Ausrichtung der Geschwindigkeitsmessgeräte gelegt. Beide Geräte wurden im Abstand von wenigen Metern am Sicherheitszaun montiert, damit sie sich gegenseitig nicht stören konnten, aber in derselben Höhe über der Fahrbahn, damit der Vertikalwinkel zu den herankommenden Fahrzeugen identisch war. Ein Gerät wurde parallel zur Strasse ausgerichtet, das andere um nur 2° zur Strasse hin gedreht. Die Schrägausrichtung des Geschwindigkeitsmessgeräts erfolgte mit Hilfe einer Winkelmesseinrichtung, die auf einer Holzplatte aufgeschraubt war, welche parallel zur Fahrbahn ausgerichtet wurde, während das Geschwindigkeitsmessgerät in einem abweichenden Winkel ausgerichtet wurde (Abb. 110). Zunächst wurde versucht, die Geschwindigkeitsmessungen mit den automatischen Messgeräten vom Typ Viacount durch händische Messungen mit älteren Radarpistolen vom Typ Tribar Muni Quip K-GP zu ergänzen, wobei diese gleichzeitig in zueinander um den gleichen Winkel verdrehter Ausrichtung bedient werden sollten. Die Vor-Ort-Testmessungen ergaben jedoch zum Teil unrealistische Werte und eine so grosse Streuung der Geschwindigkeitsmesswerte, dass auf die händische Messung der Geschwindigkeit mit Radarpistolen verzichtet wurde. Die Witterungsbedingungen während der Messungen sind in Tab. 20 eingetragen. Die Messausrüstung geht aus Tab. 21 hervor.



**Abb. 110** Die Ausrichtung des Geschwindigkeitsmessgeräts erfolgte mit Hilfe einer Winkelmesseinrichtung (links), die auf einer Holzplatte aufgeschraubt war, welche parallel zur Fahrbahn ausgerichtet wurde, während das Geschwindigkeitsmessgerät nach einem abweichenden Winkel (siehe Aluminiumprofilstange) ausgerichtet wurde (rechts).

**Tab. 20** Messdatum und Klimadaten während der SPB-Geschwindigkeitsmessung (Lufttemperatur  $T_L$ , Fahrbahntemperatur  $T_{Fb}$  und Windgeschwindigkeit  $v_{Wind}$ ).

Datum	Uhrzeit	$T_L$ °C	$T_{Fb}$ °C	$v_{Wind}$ km/h
05.09.2013	14:30 – 20:00	22 - 30	22 – 35	0 – 1

**Tab. 21** Parallel eingesetzte Messausrüstung.

Messsystem	Hardware	Software	Geschwindigkeitsmessung
Nr. 1	Messkarte NI 9234	MBBM SPB 1.4.4534	via traffic controlling Viacount II
Nr. 2	Messkarte NI 9234	MBBM SPB 1.4.4534	via traffic controlling Viacount II

### 3.4.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgte für beide Messdatensätze zunächst unabhängig voneinander, aber mit identischer Temperaturkorrektur. Beim Vergleich der Datensätze zeigte sich, dass alle Fahrzeuge von beiden Systemen aufgezeichnet worden waren, in die STL86+-Auswertung gingen also identische Vorbeifahrten ein. Der Vergleich der Punktwolken zeigt aber schon, dass etliche Punkte gegeneinander verschoben sind (Abb. 111 und Abb. 112). Es ergeben sich für die falsch orientierte Messung höhere Kb-Werte.

Um dieses Ergebnis zu verstehen ist es sinnvoll, sich klar zu machen, wie Radarmessgeräte funktionieren. Die Bedienungsanleitungen der Geschwindigkeitsmessgeräte weisen in der Regel daraufhin, dass die Geräte parallel zur Strasse (genau genommen zur Fahrtrichtung) ausgerichtet sein müssen, denn der Radarstrahl, welcher vom Fahrzeug reflektiert wird, weist eine Dopplerverschiebung auf, die zur Fahrgeschwindigkeit proportional ist. Bei schrägwinkliger Aufstellung wird nur die Bewegungskomponente der Fahrzeuge erfasst, welche parallel zum Radarstrahl verläuft, d.h. es gilt:

$$\text{Formel 5} \quad v_{\text{gemessen}} = v_{\text{wahr}} \cos(\text{Winkelabweichung})$$

Da der Betrag der Kosinusfunktion nur Werte im Intervall zwischen Null und Eins annehmen kann, führt eine fehlerhafte Ausrichtung immer zu einer Unterschätzung der Fahrtgeschwindigkeit. Intelligente Messgeräte implementieren diese Korrektur in Abhängigkeit vom wahren Messwinkel oder vermeiden eine fahrwegparallele Orientierung des Radarstrahls von vorneherein. Beispielsweise messen die von Müller-BBM eingesetzten Viacount-Geräte in einem Winkel von 45° zur Fahrbahn. Dies macht es leichter, die Fahrtgeschwindigkeiten auf Höhe der Mikrofonpositionen zu bestimmen, weil das Messgerät wenige Meter vom Mikrofonstandort entfernt aufgestellt werden kann. Dafür ist der theoretische geometriebedingte Messfehler geringfügig grösser, was die Systemsoftware und eine präzise Messelektronik aber ausgleichen.

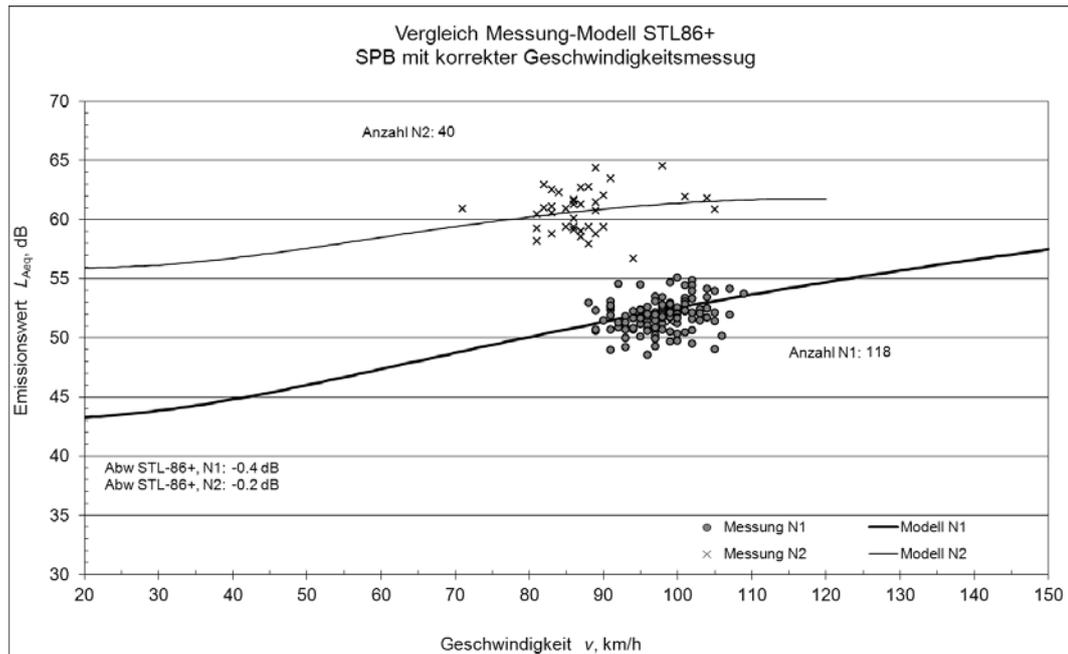
Eine Unterschätzung der wahren Geschwindigkeit führt beim Auftragen von Geräuschpegeln über der Fahrgeschwindigkeit zu einer Linksverschiebung der Punktwolke aus den Einzelwerten der Vorbeifahrten. Modellkurven wie das STL86+- oder EMPA97-Modell sagen mit zunehmender Fahrtgeschwindigkeit ansteigende Geräuschpegel voraus. Daraus folgt, dass eine Linksverschiebung der Pegelwerte relativ zu den Modellkurven, die Pegelwertpunktwolken relativ zu den Modellkurven nach oben verschiebt. Abweichungsmasse wie der Kb-Wert erhöhen sich folglich durch falsche Ausrichtung der Geschwindigkeitsmessgeräte. Dies illustrieren auch *Abb. 113* bis *Abb. 118*.

In diesen beispielhaften Untersuchungen wurden die bei korrekter Ausrichtung gemessenen Vorbeifahrtgeschwindigkeiten einheitlich um einen Faktor herunterskaliert, der dem Kosinus des angenommenen Winkelausrichtungsfehlers entspricht. Unter der Annahme, dass gemessene  $L_{Aeq}$ -Punktwolken einer bestimmten Modellkurve folgen (wenn auch im Allgemeinen vertikal verschoben), lassen sich die zu erwartenden Kb-Werte für beobachtete Geschwindigkeitswerte und einen anzunehmenden systematischen Geschwindigkeitsmessfehler vorhersagen. Im vorliegenden ersten Beispiel mit zwei Grad Fehl Ausrichtung ist der beobachtete Unterschied in den Kb-Werten wesentlich grösser als es der rein durch die Orientierung bedingte Fehler erwarten liesse (Erwartungswert für PW +0.007 dB und für LW +0.004 dB). Andere Messunsicherheiten spielen hier offensichtlich eine grössere Rolle. Variiert man für das Datenbeispiel den Winkelfehler, so ergeben sich bei einem Ausrichtungsfehler von 5° jedoch bereits Änderungen im Kb-Wert von 0.05 dB für PW und 0.02 dB für LW, d.h. der Fehler beeinflusst bereits die erste Nachkommastelle der Modellabweichung, auf welche üblicherweise gerundet wird. Im Datenbeispiel beträgt die winkelfehlerbedingte Abweichung des Kb-Werts bei 15° bereits 0.4 dB für PW und 0.2 dB für LW und ist damit auf keinen Fall mehr akzeptabel.

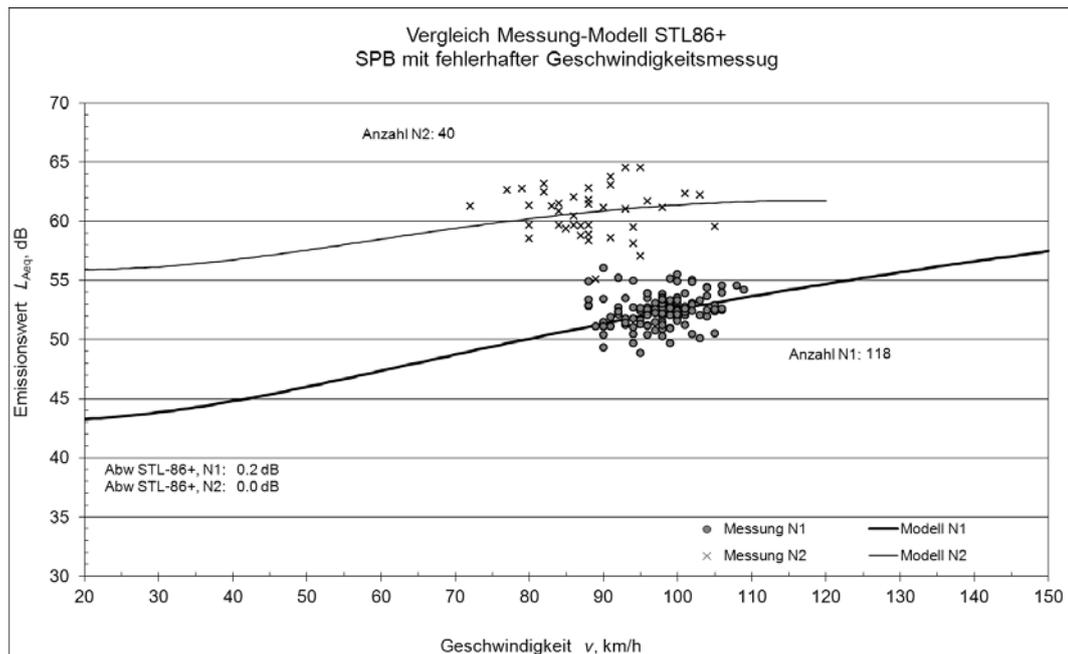
Die nachfolgende *Tab. 22* verdeutlicht den Einfluss, den die fehlerhafte Ausrichtung des Geschwindigkeitsmessgeräts auf die gemessene Vorbeifahrtgeschwindigkeit und etwaige Kb-Werte hat (letzteres gilt nur für das vorliegende Datenbeispiel).

**Tab. 22** Einfluss des Winkelfehlers auf Geschwindigkeitsmessungen und Kb-Werte.

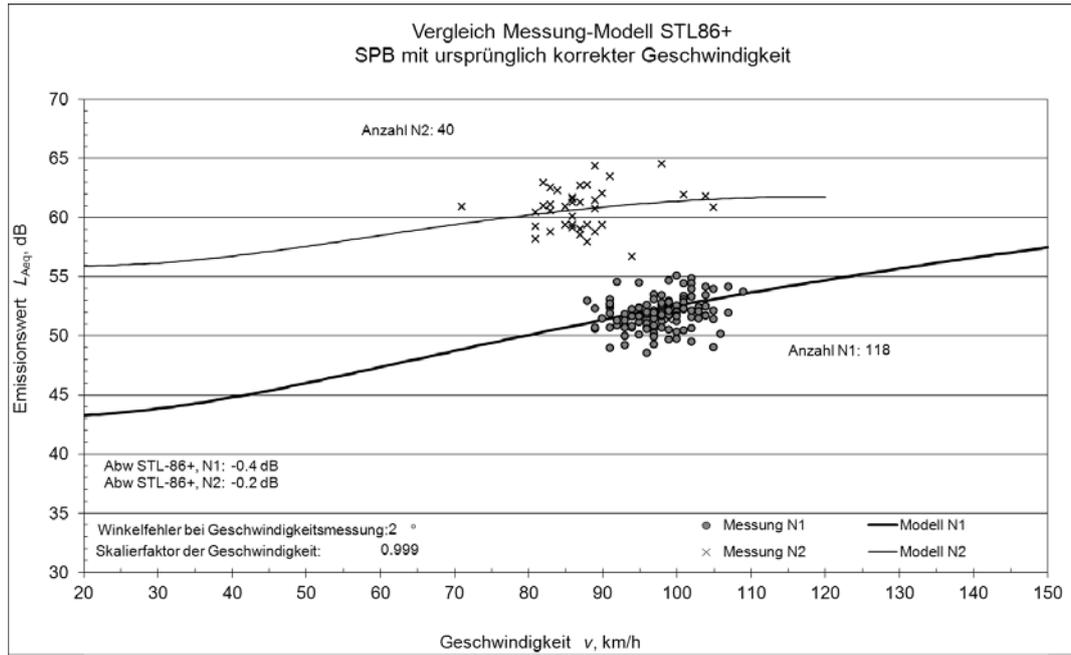
Winkelfehler, °	0	2	5	10	15	20	25
Skalierungsfaktor	0.000	0.999	0.996	0.985	0.966	0.940	0.906
Geschwindigkeitsfehler, %	1.000	0.100	0.400	1.500	3.400	6.000	9.400
Kb-Wert-Fehler für PW, dB	0.000	0.007	0.044	0.175	0.396	0.706	1.109
Kb-Wert-Fehler für LW, dB	0.000	0.004	0.021	0.084	0.192	0.349	0.561



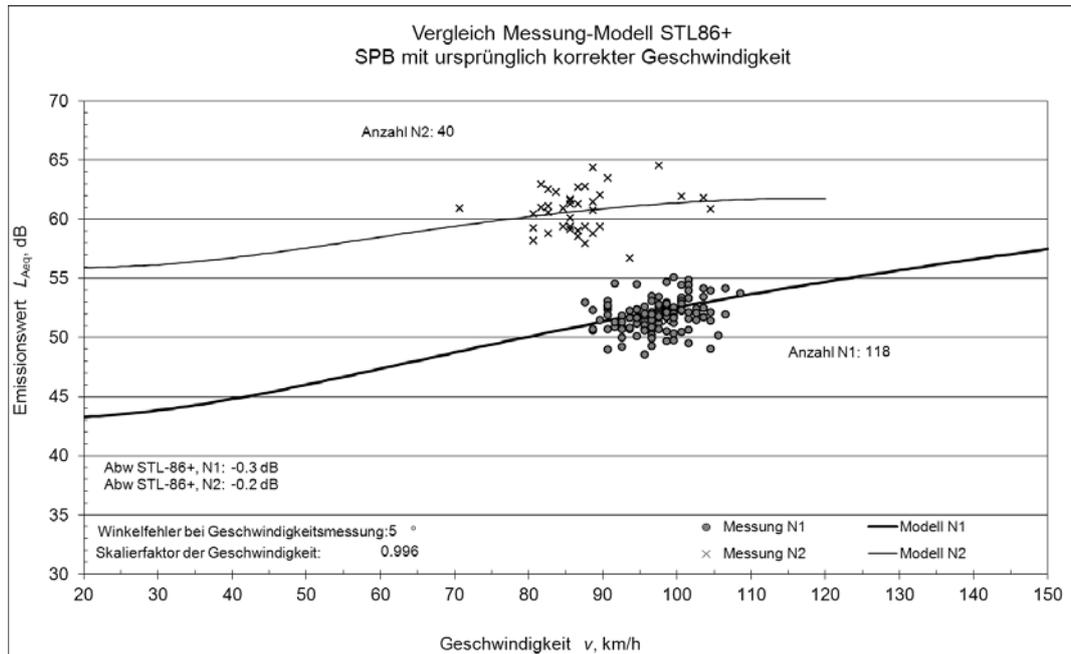
**Abb. 111** Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin.



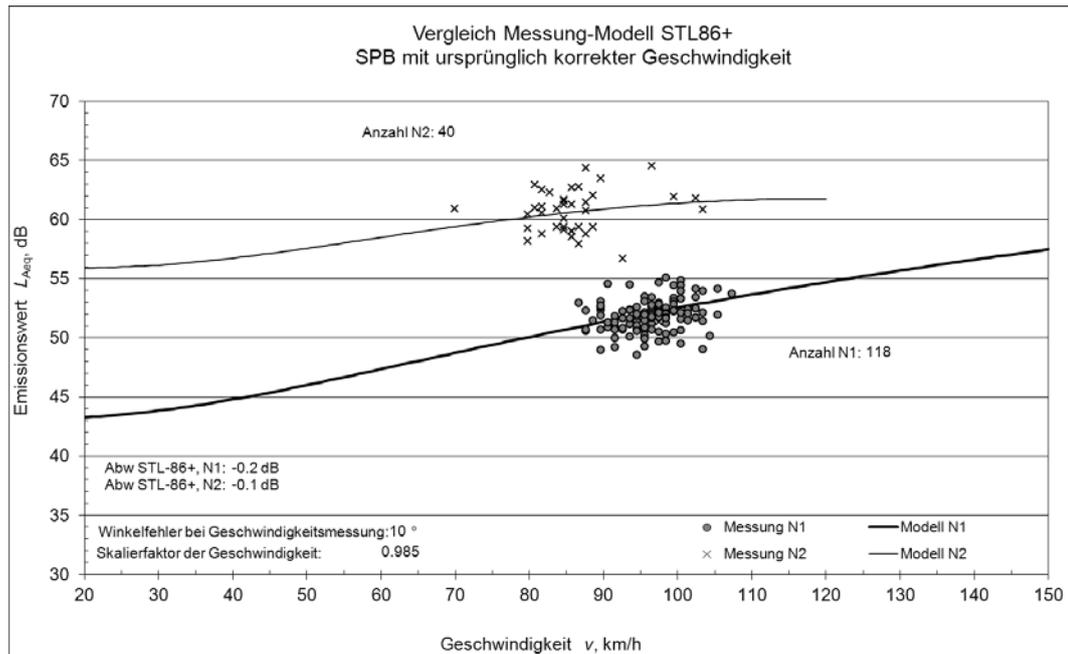
**Abb. 112** Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit verdrehter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin.



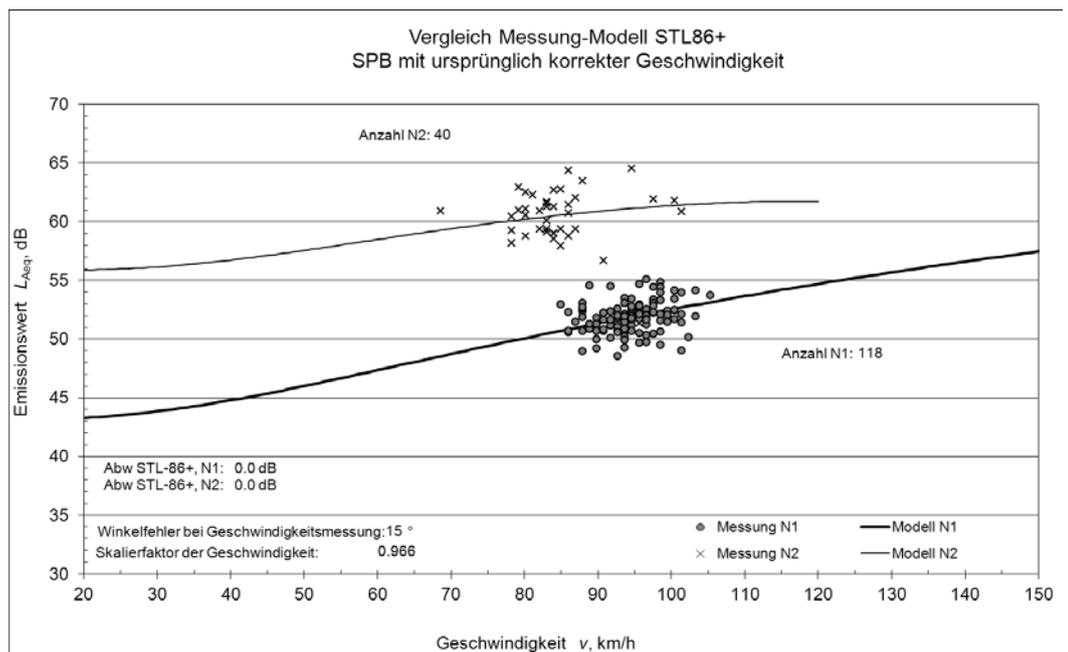
**Abb. 113** Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 2°.



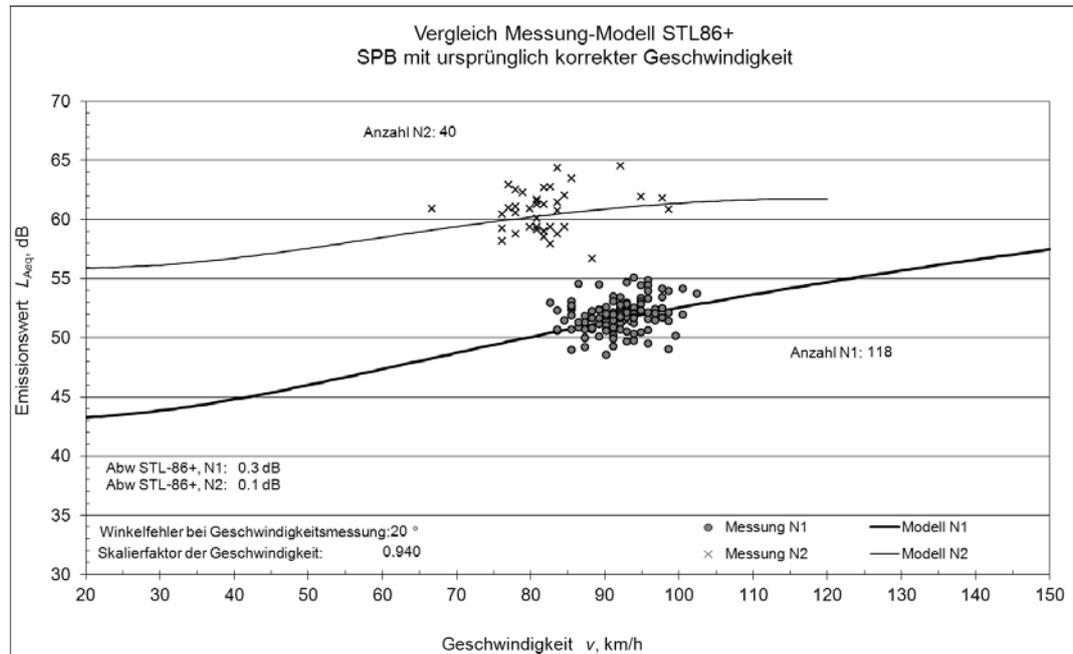
**Abb. 114** Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 5°.



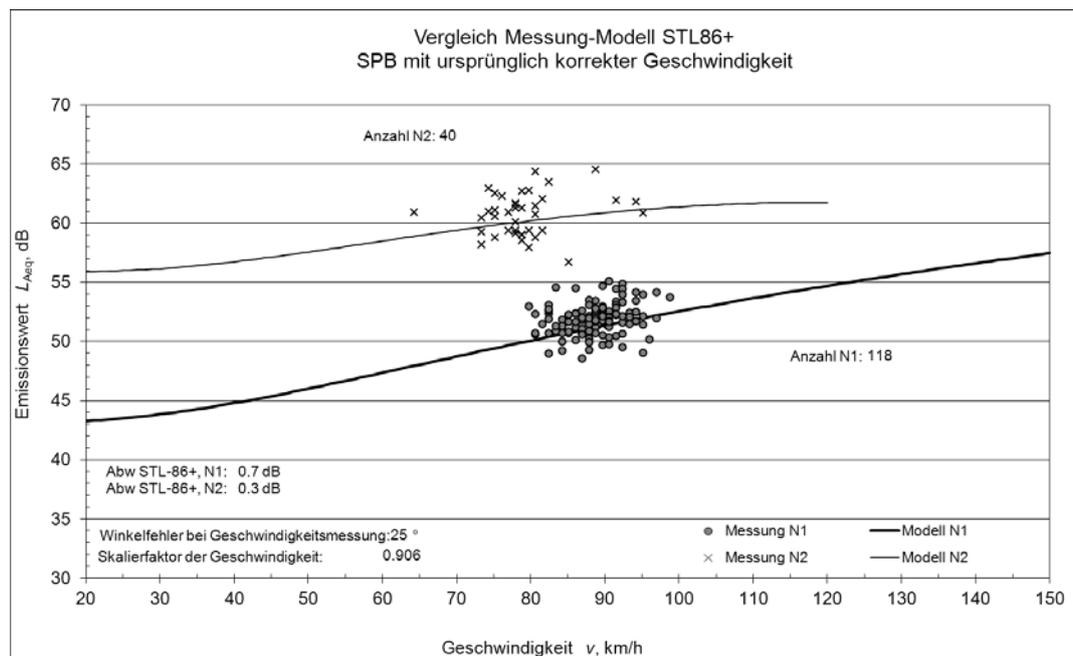
**Abb. 115** Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschausrichtung um 10°.



**Abb. 116** Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschausrichtung um 15°.



**Abb. 117** Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 20°.



**Abb. 118** Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 25°.

### 3.4.4 Schlussfolgerungen

1. Fehler bei der Ausrichtung der Geräte zur Geschwindigkeitsmessung oder bewusste Abweichungen von der fahrtrichtungsparallelen Ausrichtung führen in der Praxis zu

einer Unterschätzung der wahren Fahrtgeschwindigkeit und zu einer Überschätzung der daraus abgeleiteten  $K_b$ -Werte.

2. Ist der Ausrichtungsfehler bekannt, lässt er sich auch nach Abschluss der Messung rechnerisch noch korrigieren.
3. Bei Lastwagen ist der geschwindigkeitsfehlerbedingte Anstieg der  $K_b$ -Werte nur etwa halb so gross wie bei Personenwagen, weil die theoretischen Modellkurven (Geräuschpegel aufgetragen über der Fahrgeschwindigkeit) für Lastwagen flacher verlaufen.
4. Bereits bei Winkelfehlern von nur  $5^\circ$  beeinflusst eine ungenaue Ausrichtung von Geschwindigkeitsmessgeräten spürbar die aus SPB-Messungen abgeleiteten  $K_b$ -Werte; spätestens jenseits von  $10^\circ$  bis  $15^\circ$  wird die resultierende Abweichung inakzeptabel. Bei freihändiger Anwendung von Radarpistolen dürften Winkelfehler in dieser Größenordnung durchaus in der Praxis vorkommen.



## 4 Verbesserung der Absorptionsgradmessung

### 4.1 Ausgangslage

Neben CPX- und SPB-Messungen können Systeme zur zerstörungsfreien Messung des Schallabsorptionsgrades wertvolle Daten liefern. Derartige Systeme werden in der Praxis seit mehreren Jahren erfolgreich eingesetzt. Bestehende Normen beschreiben jedoch weder die praxisgerechte Verwendung der Systeme noch deren Einsatzgrenzen. Deshalb sollten im Rahmen dieses Projektes verschiedene Messvarianten beschrieben werden und der Einzugsbereich der Absorptionsgradmessungen genauer bestimmt werden. Die Qualitätssicherung des von Müller-BBM eingesetzten Verfahrens war eine weitere wichtige Projektaufgabe.

Es werden unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades, angefangen vom Hallraum über das Impedanzrohr bis hin zu verschiedenen in-situ Verfahren miteinander verglichen. Unter den in-situ Verfahren steht das Subtraktionsverfahren mit einem Mikrofon, das p-p- und p-p-p-Verfahren (mit 2 bzw. 3 Mikrofonen) und das p-v-Verfahren (mit kombiniertem Druck- und Schnellesensor) zur Verfügung. Schliesslich werden Empfehlungen für den Einsatz von Schallabsorptionsgradmesssystemen erarbeitet.

Zunächst erfolgt ein allgemeiner Überblick über die Messverfahren mit Diskussion ihrer Eignung für kleinräumige Messungen, etwa bei heterogenen Einbaubedingungen oder auf Prüfplatten.

### 4.2 Messsystemvarianten

#### 4.2.1 Hallraummethode

Die Norm DIN EN ISO 354 [6] beschreibt die Messung des Schallabsorptionsgrades in Hallräumen. Das Messprinzip nutzt einen Hallraum und die physikalische Gesetzmässigkeit der Abhängigkeit der Nachhallzeit in Räumen von der äquivalenten Schallabsorptionsfläche der Umschliessungsflächen bzw. Einbauten. Gemäss Norm muss für eine solche Messung allerdings eine Probenfläche von 10 m<sup>2</sup> bis 12 m<sup>2</sup> verwendet werden und ein Hallraumvolumen von mindestens 150 m<sup>3</sup> zur Verfügung stehen. Die für lokale in situ Untersuchungen auf der Strasse sinnvollen Dimensionen unterschreiten diese Anforderungen erheblich.

Weiterhin werden in der Praxis Hallkabinen eingesetzt, die sich durch eine Verringerung der notwendigen Probefläche für entwicklungsbegleitende Messungen als vorteilhafter darstellen. Müller-BBM verfügt über eine Eigenentwicklung einer Hallkabine, in der Prüfkörper mit einer Grundfläche von ca. 1 m<sup>2</sup> untersucht werden können. Das Volumen der Hallkabine beträgt ca. 5 m<sup>3</sup>. Die Dimensionen von typischen Prüfkörpern der Baupraxis liegen allerdings immer noch deutlich unter denen der beschriebenen Hallkabine. Theoretisch wäre zwar auch eine Anwendung der Messmethode in noch kleineren Dimensionen denkbar, allerdings steigt mit der Verkleinerung von Prüffläche und Hallraumvolumen auch die untere auswertbare Grenzfrequenz des Messergebnisses an. Dies würde bedeuten, dass bei einer weiteren Verkleinerung der Hallkabine Messungen in dem für Strassenverkehrslärm relevanten Frequenzbereich nicht mehr möglich sind. Somit ist dieses Messverfahren für den geplanten Einsatzzweck nicht geeignet.

Das Hallraumverfahren wird vor allem dann eingesetzt, wenn der Schalleinfall aus vielen verteilten Richtungen zu untersuchen ist, etwa in der Raumakustik.

## 4.2.2 Impedanzrohrmethode

Die Norm DIN EN ISO 10534-2 [7] beschreibt die Messung des Schallabsorptionsgrades von Prüfkörpern im Impedanzrohr, auch Kundtsches Rohr genannt. Das Verfahren sieht vor, Probekörper, z.B. Bohrkerne aus einer Prüffläche auszubauen und in einem Impedanzrohr zu messen. Die Fläche des Probekörpers und damit der Querschnitt des Impedanzrohres legt dabei den auswertbaren Frequenzbereich des Messsignals fest. Der für Strassenverkehrslärm massgebliche Frequenzbereich führt z.B. zu einer kreisrunden Probenform mit ca. 10 cm Durchmesser. Somit liegt die notwendige Probenfläche unterhalb einer typischen Probekörperfläche aus der Baustoffprüfung. Die maximal mit dem Impedanzrohr zuverlässig untersuchbare Frequenz nimmt invers zu dem Rohrdurchmesser ab und liegt für ein kreiszylindrisches Rohr mit 10 cm Durchmesser knapp unter 2000 Hz. Der akustisch ebenfalls relevante Frequenzbereich zwischen 2000 Hz und 4000 Hz kann damit nicht untersucht werden. Da es sich bei der Prüfung nach dem Impedanzrohrverfahren ausserdem um eine nicht zerstörungsfreie Prüfung handelt, ist dieses Messverfahren für den Einsatz auf der Strasse wenig geeignet.

Das in der Literatur häufig beschriebene „Sealed Tube Verfahren“, das in Anlehnung an die normgemässe Impedanzrohrmessung durchgeführt wird und 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. Im Allgemeinen ist damit auch das „Sealed Tube Verfahren“ für den geplanten Einsatzzweck nicht geeignet.

Messungen mit dem Impedanzrohrverfahren sind in der Akustik recht verbreitet (u.a. in der Entwicklung schalldämmender Stoffe), weil sie schnell durchzuführen sind und auch sehr kleine Probekörper zulassen.

## 4.2.3 Messung des Schallabsorptionsgrads in situ

Als „in-situ“-Systeme werden Messsysteme bezeichnet mit deren Hilfe es möglich ist, den Schallabsorptionsgrad von Prüfflächen im eingebauten Zustand zerstörungsfrei zu bestimmen. 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, sogenannte P-U-Sonden ( $p$  als Symbol für den Schalldruck und  $u$  für die Schallschnelle). Die Messgenauigkeit und der auswertbare Frequenzbereich nimmt in der genannten Reihenfolge zu.

Das Müller-BBM System verwendet einen kombinierten Schalldruck- und Schallschnellesensor. 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 über den Lautsprecher abgestrahlt. Die Messsonde für Schalldruck und Schallschnelle befindet sich direkt über der Oberfläche. Durch die verwendete Signalverarbeitung kann die Impulsantwort des ausgestrahlten Nutzsymbols 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.

Die in situ Absorptionsgradbestimmung ist vielseitig für näherungsweise ebene Flächen einsetzbar, z.B. um systematisch die Schallabsorption bei schrägem Einfall zu untersuchen oder die Absorption von Wänden in Veranstaltungsräumen. Im Zusammenhang mit Strassenlärm wird vor allem das Schallabsorptionsgradspektrum von Lärmschutzwänden und Deckschichten bei senkrechtem Einfall untersucht. Im Fall von Reifen-Fahrbahn-

Geräuschen dient der Absorptionsgrad der Deckschicht als Eingabe in das Simulationswerkzeug SPERoN und ist ein wichtiger Indikator für die akustische Alterung von Deckschichten. Aus dem Absorptionsgradspektrum lassen sich Aussagen ableiten über die Dicke der (akustisch wirksamen) Deckschicht, den Hohlraumgehalt und den Strömungswiderstand.

#### 4.2.4 Schlussfolgerungen

Unter den hier diskutierten Verfahren erscheint die zerstörungsfreie Prüfung mit einem in situ Messsystem auf der Strasse am geeignetsten, wobei die Messgenauigkeit und der auswertbare Frequenzbereich für eine Kombination aus einem Mikrofon und einem Schallschnellesensor spricht.

Bei Bohrkernuntersuchungen hat sich die Impedanzrohrmethode bewährt, jedoch nur für Frequenzen bis maximal 2000 Hz

### 4.3 Einzugsbereich von in situ Messungen

#### 4.3.1 Ausgangslage

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Ergebnisse von in-situ Messungen des Schallabsorptionsgrades ist die erfasste Messfläche. Diese ist frequenzabhängig und nimmt bei tiefen Frequenzen mehrere Quadratmeter ein. Mit der Fresneltheorie kann der Einzugsbereich einer Messung abgeschätzt werden, jedoch wurde bisher noch keine Parameterstudie durchgeführt, die den Einfluss reflektierender Gegenstände im Nahbereich der Messung untersucht.

#### 4.3.2 Durchführung der Messungen

##### Arbeitsprogramm

Zur Bestimmung des Einzugsbereichs der in-situ Messungen des Schallabsorptionsgrads wurden Messreihen in einem reflexionsarmen Halbraum durchgeführt, wobei die Messungen auf einem nahezu perfekt reflektierenden und einem sehr gut absorbierenden Boden erfolgten. Die Messsonde verblieb jeweils am selben Ort, während verschiedene Hindernisse schrittweise an die Sonde herangeschoben wurden und jeweils Messungen des spektralen Absorptionsgrads durchgeführt wurden. Die bestimmten Absorptionsgradspektren wurden ausgewertet und den Vorhersagen der Fresneltheorie gegenübergestellt.

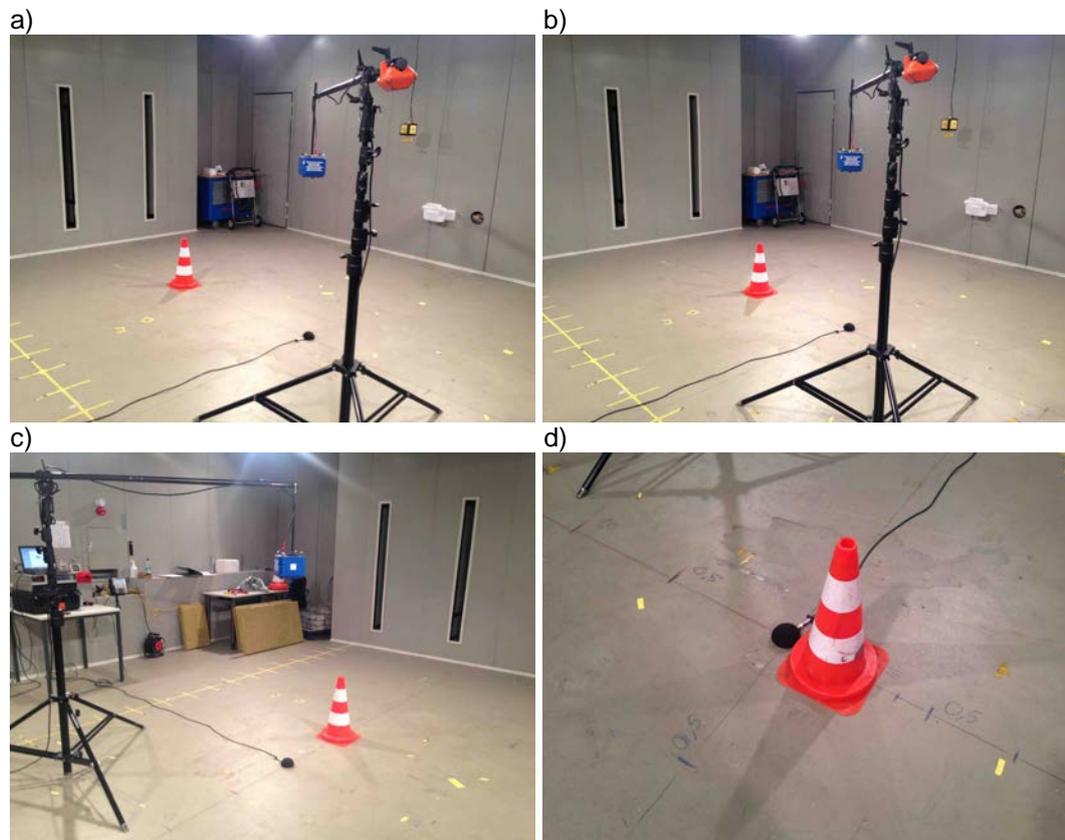
##### Messdurchführung

Der akustische Messraum bei der Müller-BBM GmbH in Planegg, Deutschland, ist an allen Seiten und der Decke mit schallabsorbierendem Material ausgekleidet, der Boden besteht aus einer glatten schallreflektierenden Betonschicht (siehe auch *Abb. 119*). Die erste Folge von Messreihen erfolgte auf dem schallreflektierenden Boden. Für die zweite Folge wurde der Boden mit Platten aus einer zwei Zentimeter starken Trittschallisolierung ausgelegt, die den Luftschall sehr gut absorbiert. Zunächst wurde ohne künstliche Hindernisse gemessen, danach wurde schrittweise jeweils eines der folgenden Hindernisse an die Messsonde angenähert:

- Leitkegel, 50 cm hoch
- Pflastersteine, 8 cm hoch (niedrige Bordsteinkante)
- Pflastersteine, 16 cm hoch (hohe Bordsteinkante)
- Seitlich aufgestellter Bürotisch, 50 cm hoch (Hauswand oder Fahrzeug)
- Wandaufbau (Hauswand oder Fahrzeug; nur einmal auf absorbierendem Boden)



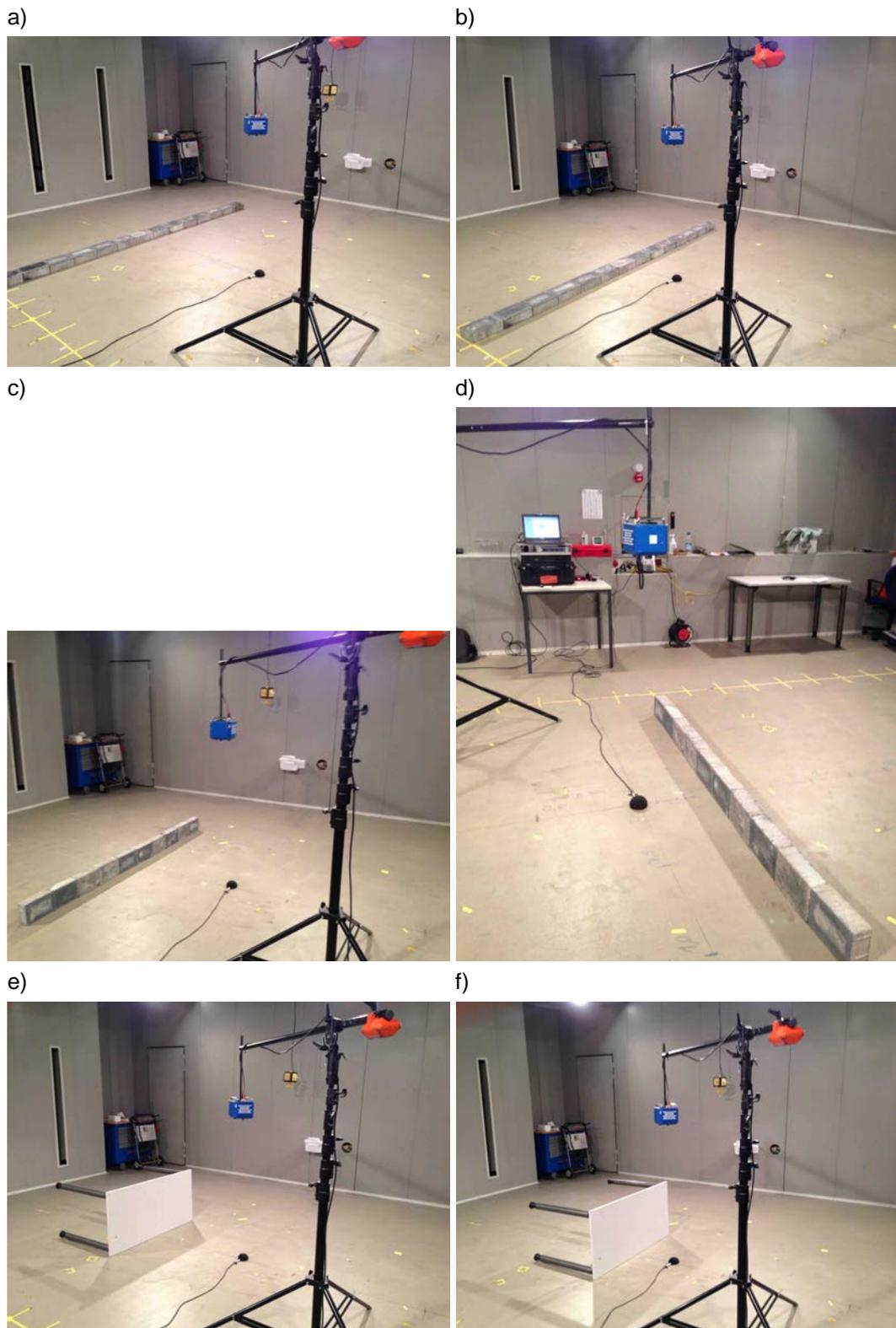
**Abb. 119** Messaufbau im schallabsorbierenden Raum mit reflektierendem Boden. Die Messsonde mit einem halbierten Windball liegt unterhalb des blauen Lautsprechers. Die Erzeugung des Messsignals und die Aufzeichnung des Schalldrucks und der Schallschnelle erfolgt mit spezieller Messelektronik und einem Laptop (rechts).



**Abb. 120** Messaufbau im schallabsorbierenden Raum mit reflektierendem Boden und Leitkegel. Der Leitkegel näherte sich im Rahmen der Messserie schrittweise der Messsonde an (a) bis d)).

Nach einem ersten Testdurchlauf bei grösseren Hindernisentfernungen betrugen die Annäherungsentfernungen 1.5 m, 1 m, 0.75 m, 0.5 m, 0.4 m, 0.3 m, 0.2 m, 0.1 m, 0.0 m. Der Abstand bezieht sich jeweils auf die der Sonde nächstgelegenen Kanten der Objekte, d.h. für den Leitkegel auf den Kegelfuss. Es wurden über einhundert Einzelmessungen durchgeführt und ausgewertet. Die Abb. 119 bis Abb. 122 zeigen den Messaufbau. Die

Fläche der ausgelegten absorbierenden Bodenplatten betrug rund 5 m mal 7 m und war damit deutlich grösser als der Erwartungswert für die Einzugsfläche der Messung.



**Abb. 121** Messaufbau im schallabsorbierenden Raum mit reflektierendem Boden und mit 8 cm hohen Pflastersteinen (a) und b)), mit seitlich aufgestellten Pflastersteinen (16 cm hoch, c) und d) und kleinem Tisch (e) und f)).

a)

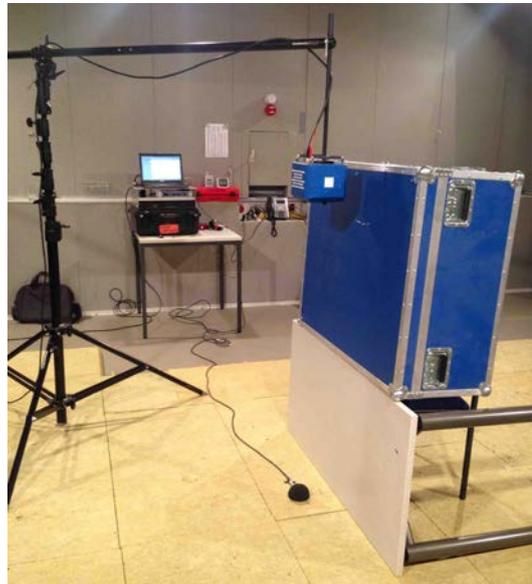
b)

c)

d)

e)

f)



**Abb. 122** Messaufbau im schallabsorbierenden Raum mit absorbierenden Boden (a) und Leitkegel (b), 8 cm Pflastersteinen (c), 16 cm Pflastersteinen, einem gekippten Tisch e) und dem Aufbau einer künstlichen Wand (f).

Der Lautsprecher war in 1.3 m Höhe über der Messsonde an einem Stativ mit langem Auslegerarm montiert und strahlte ein deterministisches Prüfsignal ab (Gleitsinuston mit einem rosa Rauschen). Der Lautsprecher hatte einen horizontalen Abstand von 1.4 m vom vertikalen Stativrohr und die Sonde hatte einen Abstand von 1.2 m vom nächstgele-

genen Stativfuss. Die Messsonde, bestehend aus einem Mikrofon und einem Schallschnellesensor, registrierte in 1 cm Höhe über der Messfläche das eintreffende Signal. Dieses Signal besteht aus dem Direktschall und dem von der Prüffläche und eventuellen Hindernissen reflektierten Schall. Durch die verwendete Signalverarbeitung kann die Impulsantwort des aus-gestrahnten Nutzsignals und dessen Reflexion errechnet werden. Aus den Impulsantworten kann die akustische Impedanz der Prüffläche und somit deren Schallabsorptionsgrad bestimmt werden. Ausgewertet wurden Frequenzen von 100 Hz bis 4000 Hz, wie sie in der Verkehrsakustik bedeutsam sind.

### 4.3.3 Ergebnisse

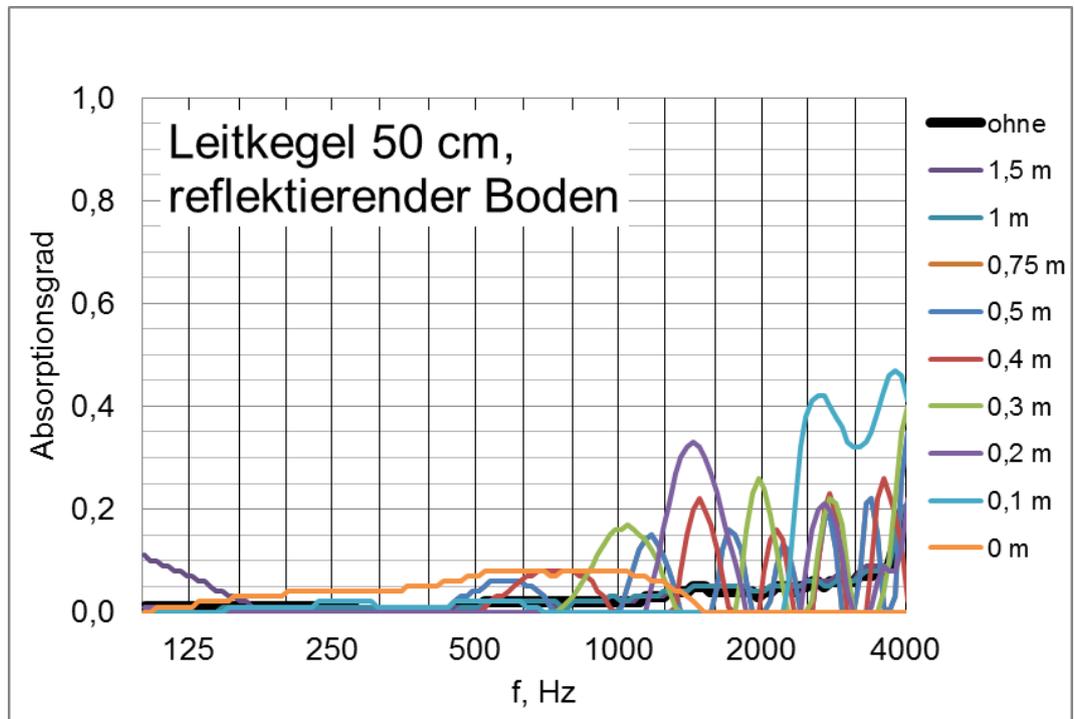
Die Absorptionsgradspektren werden in *Abb. 123* bis *Abb. 131* für jede Messserie dargestellt. Zunächst wird auf die vier Messserien auf reflektierendem Untergrund eingegangen.

In Abwesenheit von Hindernissen beschreibt die Absorptionsgradkurve des reflektierenden Bodens eine bei null beginnende und bei 4000 Hz bis auf 0.2 langsam ansteigende Rampe (siehe jeweils fett schwarz gedruckte Kurve). Der Betonboden reflektiert bei tiefen Frequenzen perfekt (Absorptionsgrad gleich null) und bei höheren Frequenzen zunehmend etwas schlechter. Solange der Leitkegel 1.5 m oder 1.0 m entfernt ist verändert sich der Absorptionsgrad nicht. Bei weiterer Annäherung bilden sich zuerst bei den hohen Frequenzen und später auch bei den niedrigen Frequenzen Schwankungen im Absorptionsgrad aus. Diese Schwankungen entstehen dadurch, dass sich die Reflexionen vom Boden unterhalb der Sonde mit den Reflexionen vom Kegel überlagern. Je nachdem ob sich die beiden Reflexionen bei der Sonde destruktiv oder konstruktiv überlagern kommt es zu einer Unterschätzung oder Überschätzung der Reflexionsstärke des Bodens, bzw. zu einer Überschätzung oder Unterschätzung des Absorptionsgrads. Bezogen auf das eigentliche Messobjekt führt die Überlagerung zu scheinbaren Absorptionsmaxima und -minima. Es treten auch bei bestimmten Frequenzen scheinbare negative Absorptionsgrade auf, die in den Grafiken aber nicht dargestellt werden, weil die Ordinate jeweils bei null beginnt. Eine besonders breitbandige Veränderung findet sich im Absorptionsspektrum bei niedrigen Frequenzen, wenn der Leitkegel unmittelbar neben der Messsonde platziert wird.

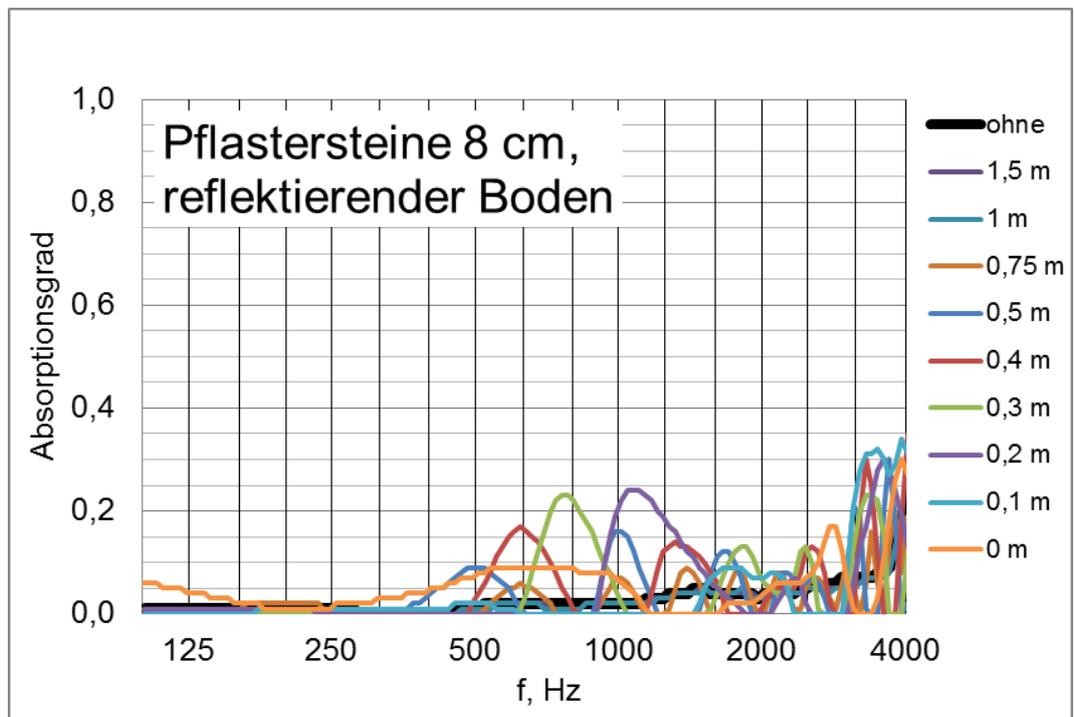
Bei den Experimenten mit den niedrigen Pflastersteinen ergibt sich ein ähnliches Bild, wie bei der Messserie mit dem Leitkegel. Auch hier treten die ersten Absorptionsgradfluktuationen bereits bei wenigen Hundert Hertz auf. Im Vergleich zwischen den beiden Messerien mit den Pflastersteinen liegen die Absorptionsmaxima zumindest bei den niedrigen Frequenzen an den gleichen Positionen entlang der Frequenzachse, unterscheiden sich aber in der Amplitude. Dies spricht dafür, dass die Reflexionsmuster beider Pflastersteinmüerchen sehr ähnlich sind, die Reflexionsamplituden aber nicht. Bei der glatten 50 cm hohen Wand ergibt sich grundsätzlich ein ähnliches Bild, die Verzerrungen durch die Wandreflexion führen aber zu grösseren Schwankungen und tendenziell zu grösseren maximalen Abweichungen.

Die Absorptionsgradkurve des absorbierenden Bodens bei Abwesenheit von Hindernissen beschreibt ebenfalls eine langsam ansteigende Rampe (siehe jeweils fett schwarz gedruckte Kurve), beginnt allerdings bei einem Wert von 0.6 und steigt fast gleichmässig bis zu 0.95. Die Trittschalldämmung absorbiert niedrige Frequenzen aufgrund der begrenzten Dicke der Schicht nicht ganz so gut wie die höchsten untersuchten Frequenzen, die fast perfekt absorbiert werden (Absorptionsgrad nahe eins). Solange der Leitkegel 0.75 m oder 0.5 m entfernt ist, verändert sich der Absorptionsgrad nicht. Bei weiterer Annäherung des Kegels bilden sich zuerst bei den hohen Frequenzen und später auch bei den niedrigen Frequenzen Schwankungen im Absorptionsgrad aus. Diese Schwankungen liegen aber alle oberhalb von 400 Hz. Je nachdem, ob Bodenreflexion und Warnkegelreflexion sich bei der Sonde destruktiv oder konstruktiv überlagern kommt es zu einer Unterschätzung oder Überschätzung der Reflexionsstärke des Bodens und damit zu einer Überschätzung oder Unterschätzung des Absorptionsgrads. Die Schwankungen oszillieren um die Kurve, welche ohne Hindernis aufgezeichnet wurde. Bei den Experimenten mit den Pflastersteinen nehmen diese Oszillationen der Messkurven zu, ähneln sich aber für beide Pflastersteinhöhen. Eine weitere Zunahme der Überlagerungseffekte lässt sich im Fall der kleinen reflektierenden Wand beobachten. Sowohl die Amplitude der Ab-

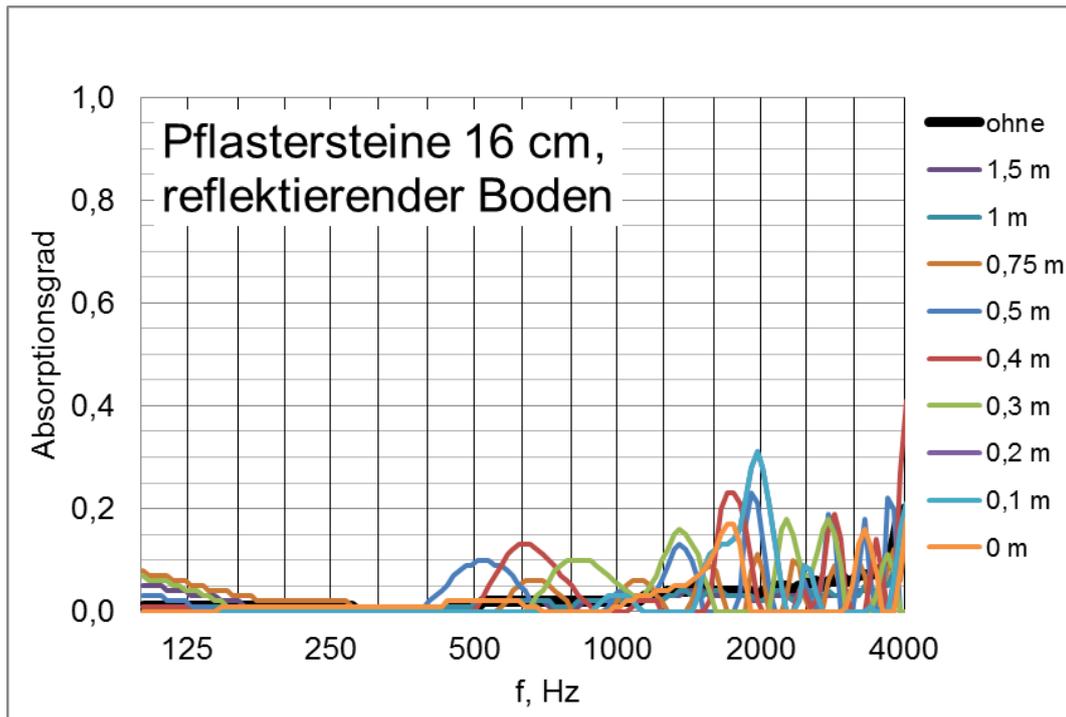
weichungen von der ungestörten Messung, als auch deren Schwankungsfrequenz nehmen gegenüber den Pflastersteinexperimenten zu. Die Messung an der hohen Wand mit Abstand 0,15 m führt zu einem ähnlichem Ergebnis wie bei der Messung im Abstand von 0,1 m der kleinen Wand, weil die Wandreflexion, welche die Sonde erreicht, ihren Reflexionspunkt im unteren Teil der Wand hat, was aus geometrischen Überlegungen folgt.



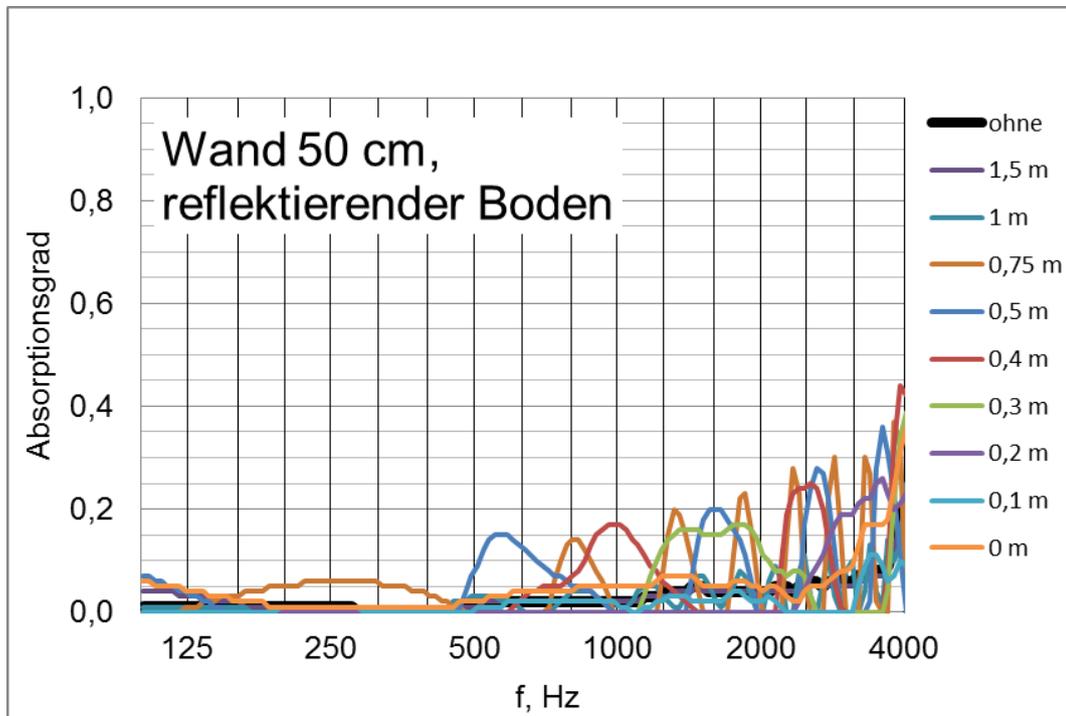
**Abb. 123** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf reflektierendem Boden und bei Messung mit einem 50 cm hohen Leitkegel in der jeweils angegebenen Entfernung.



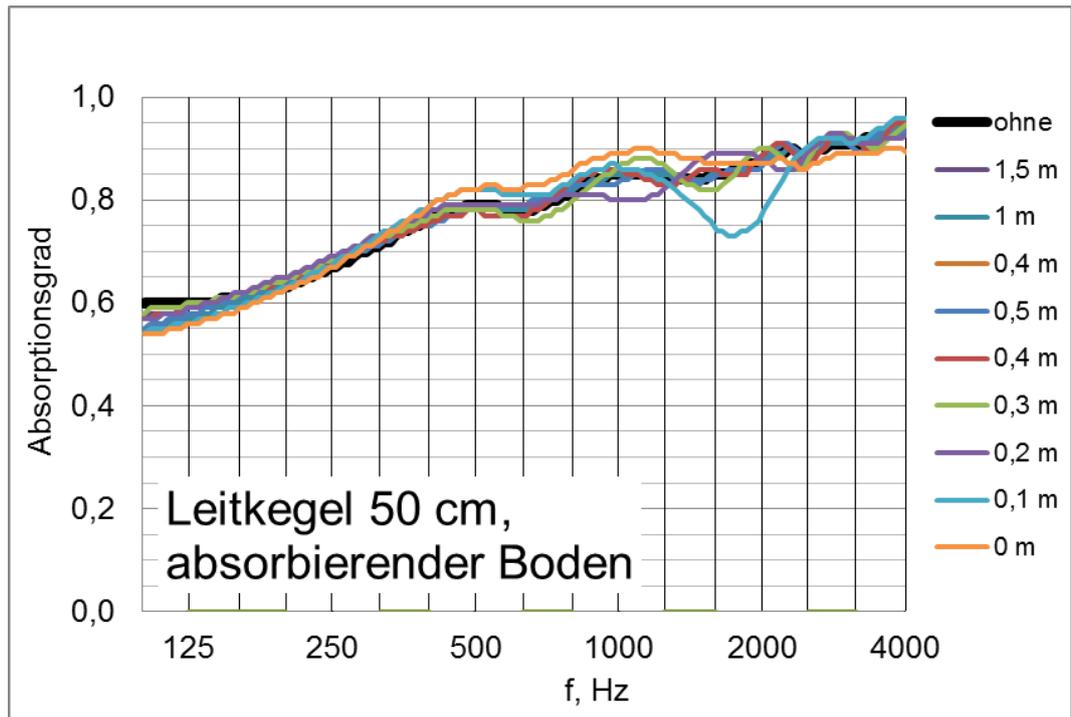
**Abb. 124** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf reflektierendem Boden und bei Messung mit einer Pflastersteinmauer in Höhe von 8 cm in der jeweils angegebenen Entfernung.



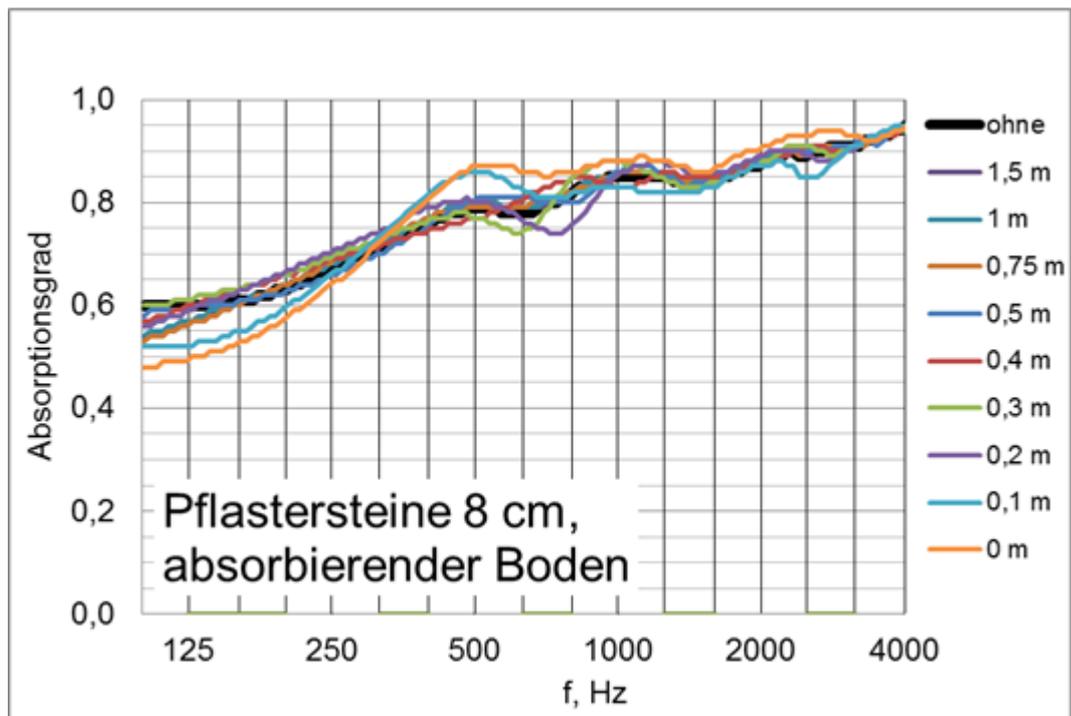
**Abb. 125** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf reflektierendem Boden und bei Messung mit einer Pflastersteinmauer in Höhe von 16 cm in der jeweils angegebenen Entfernung.



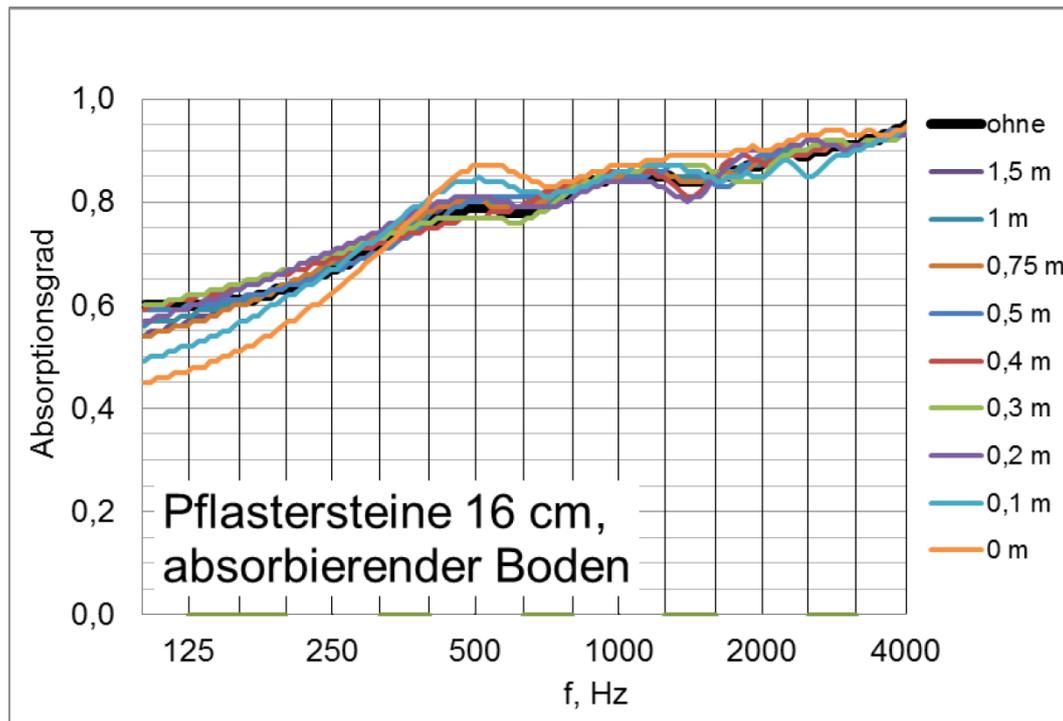
**Abb. 126** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf reflektierendem Boden und bei Messung mit einer kleinen Wand in Höhe von 50 cm in der jeweils angegebenen Entfernung.



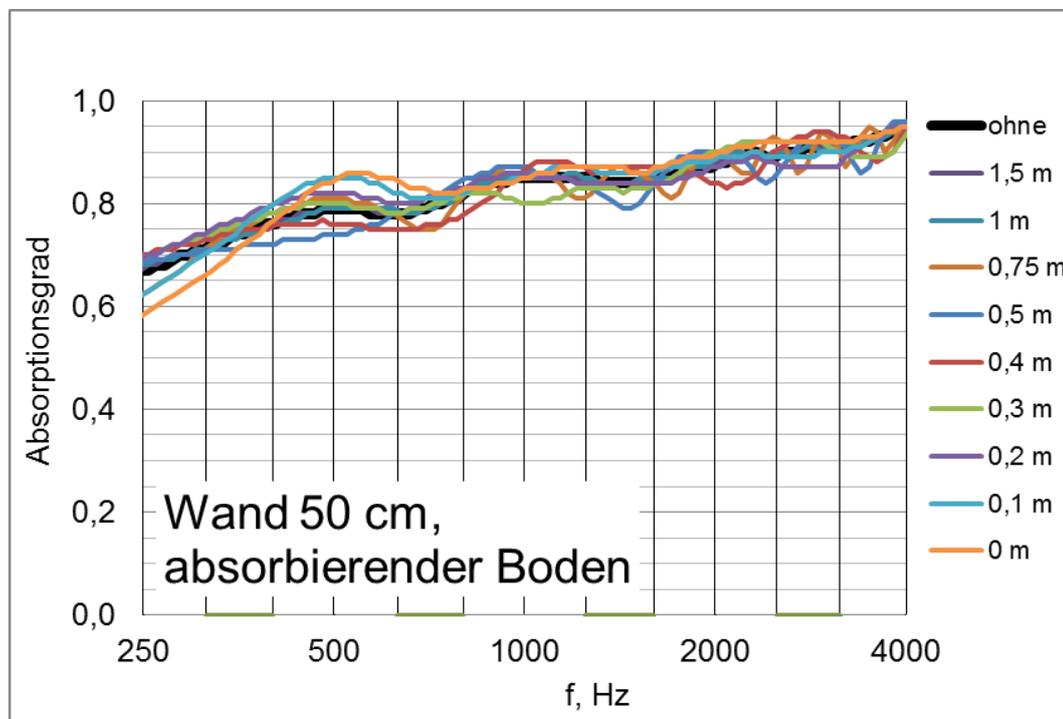
**Abb. 127** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einem 50 cm hohen Leitkegel in der jeweils angegebenen Entfernung.



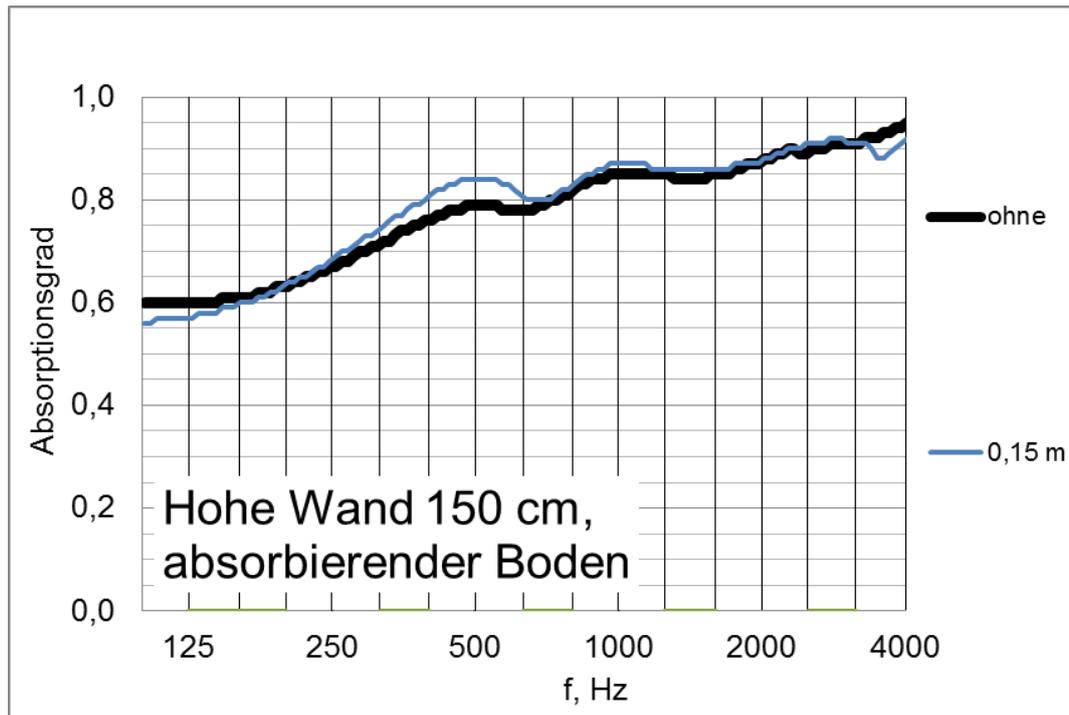
**Abb. 128** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einer Pflastersteinmauer in Höhe von 8 cm in der jeweils angegebenen Entfernung.



**Abb. 129** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einer Pflastersteinmauer in Höhe von 16 cm in der jeweils angegebenen Entfernung.



**Abb. 130** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einer kleinen Wand in Höhe von 50 cm in der jeweils angegebenen Entfernung.



**Abb. 131** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einer Wand von 150 cm Höhe in einer Entfernung von 15 cm.

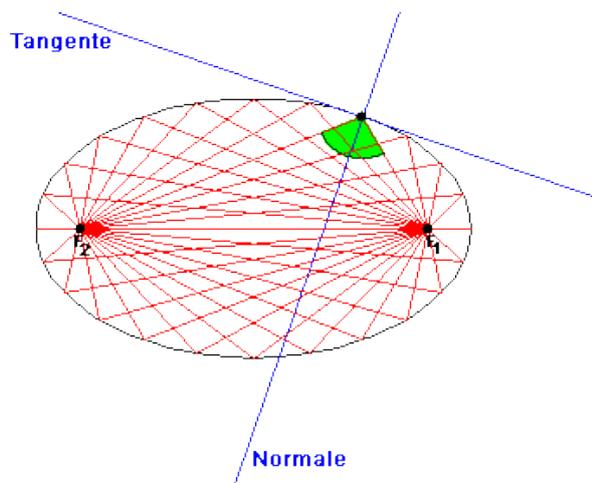
Wenn der Boden den Luftschall stark absorbiert, wird der Wellenfront, die sich vom Hindernis zur Sonde hin bewegt, bodenseitig fortlaufend Energie entzogen. Diese Energie steht bei der Sonde nicht mehr zur Verfügung und kann deshalb dort auch nicht als Stör-signal wirken. Umgekehrt geht auf einer perfekt reflektierenden Oberfläche keine Energie verloren. Aus diesem Grund wirken sich Hindernisse bei der in situ Messung des Schall-absorptionsgrads auf absorbierenden Untergrund weniger störend aus als auf reflektierenden Oberflächen.

#### 4.3.4 Vergleich mit der Fresnel-Theorie

Die Wellenpfade, die einen Quellpunkt und einen Empfängerpunkt miteinander verbinden liegen im Falle konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf einem Rotationsellipsoid. In einem Brennpunkt des Ellipsoids liegt der Quellpunkt, im anderen der Empfängerpunkt. Dies folgt aus geometrischen Überlegungen. In *Abb. 132* ist dies anhand einer Ellipse dargestellt. Die Verbindungslinien zwischen einem Punkt auf der Ellipse und den Brennpunkten halbieren jeweils den Winkel zwischen diesen beiden sogenannten Brennpstrahlen und der Normalen auf die Ellipse. Es gilt folglich das Reflexionsgesetz "Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel". Eine Welle, die vom Quellpunkt ausgeht und den Empfängerpunkt zu einer gegebenen Zeit erreicht, muss von einer Struktur auf der Oberfläche des entsprechenden Ellipsoids gestreut oder reflektiert worden sein. Das Ellipsoid definiert eine Fläche konstanter Laufzeit (Isochrone). Treffen Streuwellen zu einer späten Zeit ein, ist das Ellipsoid entsprechend gross. Eine Welle, die innerhalb einer vorgegebenen Messzeit registriert wird, kann nur aus einem gegebenen Entfernungsbereich und damit von der Oberfläche eines Ellipsoids bestimmter Grösse zurückgeworfen worden sein.

Bei dem in situ Messsystem der Müller-BBM wird die ausgewertete Messzeit beschränkt, um den Einfluss später Reflexionen auszuschliessen, die mit dem Prüfobjekt nichts zu tun haben. Dazu wird aus den Positionen von Lautsprecher und Sonde eine Zeitfensterfunktion berechnet, die aber aus numerischen Gründen nicht zu kurz gewählt werden kann. Störreflexionen in Entfernungen von wenigen Metern können so nicht ausge-

geschlossen werden, sondern müssen durch Positionierung der Messsonde so weit wie möglich verhindert werden. Die experimentellen Messergebnisse von oben werden zu diesem Zweck hier mit der Fresneltheorie verglichen. Die Fresneltheorie betrachtet Rotationsellipsoide von solchen Streuflächen, bei welchen der Gangunterschied zwischen auf kürzestem Wege eintreffender Welle und möglichen Reflexionen ein halbzahliges Vielfaches der Wellenlänge beträgt. Ein Ellipsoid mit einem Gangunterschied von  $n$  halben Wellenlängen heisst  $n$ -te Fresnelzone. Bei ungeradzahligem  $n$  ist die Auslöschung durch sich überlagernde Wellen maximal, bei geradzahligem  $n$  ist die Verstärkung durch Überlagerung maximal. Es kommt also jeweils zu einer Unter- oder Überschätzung der Reflexionsamplitude des eigentlichen Prüfkörpers in Abhängigkeit von der Wellenlänge und damit entsprechend zu einer Über- oder Unterschätzung des Absorptionsgrads.

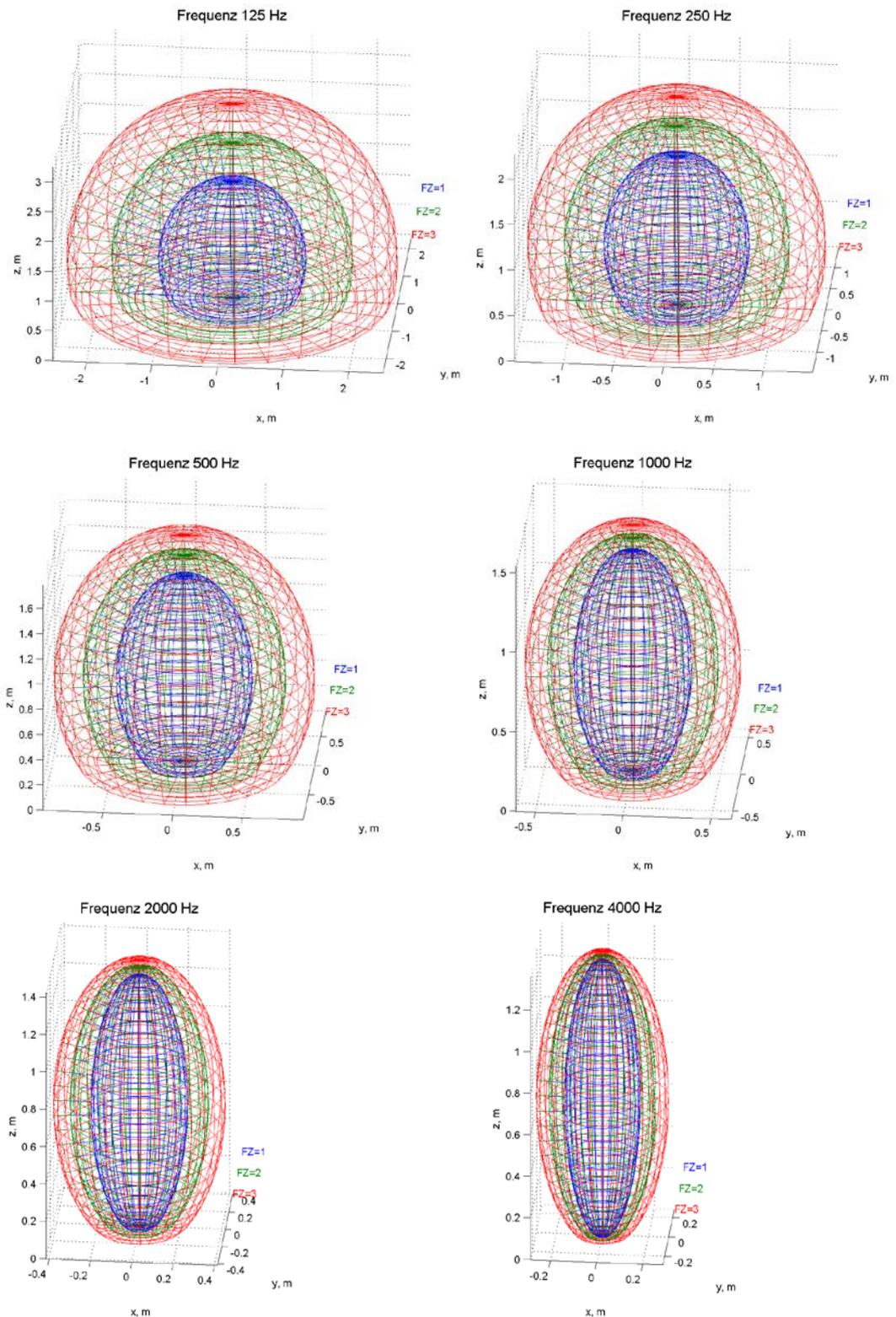


**Abb. 132** Ellipse als Schnitt durch das Rotationsellipsoid und seine Brennpunkte (Wikipedia). Die Verbindungslinien zwischen einem Punkt auf der Ellipse und dem Brennpunkt  $F_1$ , bzw. dem anderen Brennpunkt ( $F_2$ ) halbieren jeweils den Winkel zwischen diesen beiden sogenannten Brennstrahlen und der Normalen auf die Ellipse.

In der Messkonfiguration mit dem Lautsprecher in 1.3 m Höhe und der Sonde 1 cm über dem zu prüfenden Boden gibt es keine Reflexionen von unterhalb des Bodens und das Ellipsoid reduziert sich zu einem Ellipsoidstumpf. In Abb. 133 sind für den experimentellen Aufbau im Schallmessraum Ellipsoidstümpfe für die Fresnelzonen 1 (blau), 2 (grün) und 3 (rot) für verschiedene Frequenzen dargestellt. Das Koordinatensystem  $(x,y,z)$  ist in den Abbildungen so gewählt, dass der Mittelpunkt der Prüffläche jeweils bei  $(0,0,0)$  liegt, die Sonde bei  $(0,0,0.01)$  und der Lautsprecher bei  $(0,0,1.3)$ . Der äussere Kreis jeder Farbe in der Ebene  $z=0$  markiert somit den Einzugsbereich der geprüften Fläche für die jeweilige Fresnelzone. Ein Störkörper, der in den Ellipsoidstumpf hineinragt, beeinflusst die jeweilige Messung durch einen Gangunterschied, wie er durch die Ordnung der Fresnelzone vorgegeben ist. Das Volumen der Ellipsoidstümpfe nimmt mit der Frequenz schnell ab. Die Abnahme in vertikaler Richtung ist durch den Abstand des Lautsprechers zu Probe und Sonde beschränkt, deshalb werden die Fresnelzonen immer schmaler und gehen von einer rundlichen Form in eine "Zigarrengestalt" über.

Da Lautsprecher, Sonde und Probeflächenmittelpunkt auf einer vertikalen Linie liegen, ist die Schnittfläche zwischen der Probenebene und dem Ellipsoidstumpf kreisförmig. Die Durchmesser dieser Fläche stellen ein wichtiges Mass für den räumlichen Bereich der ungestörten Absorptionsgradmessung dar und sind für die Messpraxis besonders bedeutsam. In Abb. 134 ist der Durchmesser der Fresnelzonen für verschiedene Ordnungen und als Funktion der Frequenz gezeigt. Hier sieht man deutlich, wie schnell der Einzugsbereich der Messung mit der Frequenz abnimmt. Beachtet man zur Orientierung die erste Fresnelzone (grüne Kurve) so ist ihr Durchmesser unterhalb von 300 Hz schon unter einem Meter, bei 1000 Hz beträgt er 29 cm und bei 2000 Hz rund 14 cm (Tab. 23). Als

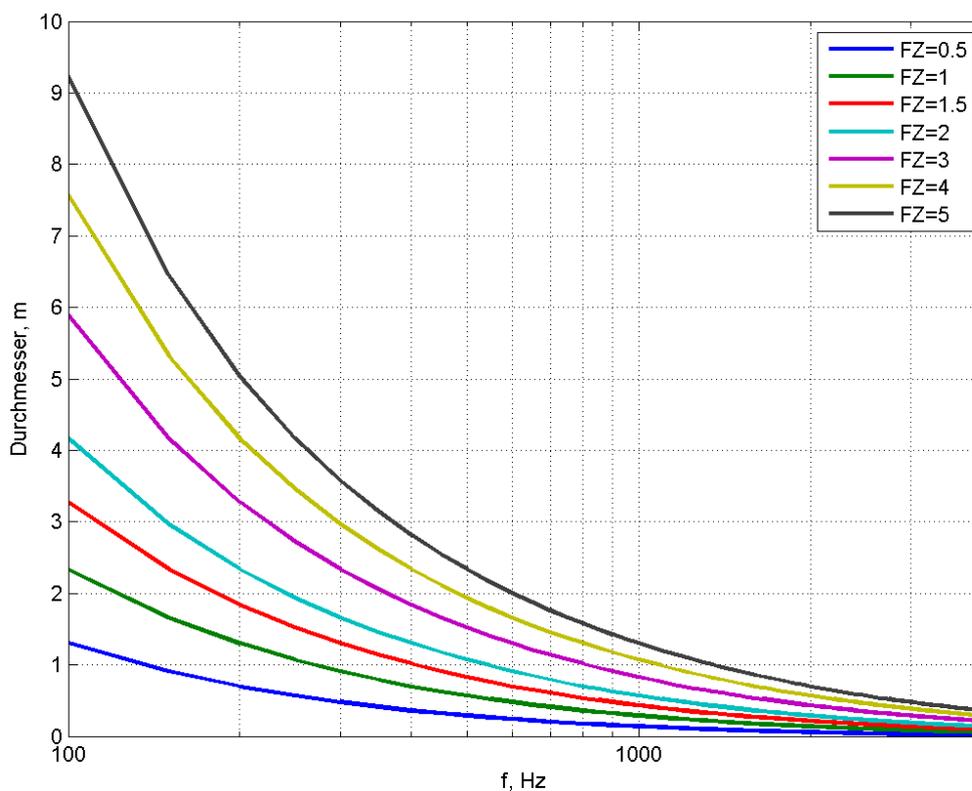
grobe Faustregel gilt, dass mit jeder Frequenzverdoppelung sich der Durchmesser halbiert.



**Abb. 133** Räumlicher Verlauf der ersten drei Fresnelzonen für verschiedene Frequenzen und die Messkonfiguration mit einem Lautsprecher 1.3 m senkrecht über der Probenoberfläche und 1.29 m oberhalb der Messsonde. Gezeigt sind die Fresnelzonen 1 (blau), 2 (grün) und 3 (rot) für die Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz.

**Tab. 23** Durchmesser der ersten Fresnelzone für verschiedene Frequenzen.

Frequenz $f$ Hz	Fresnelzone	Durchmesser der erfassten Probenfläche m
125	1	1.94
250	1	1.07
500	1	0.57
1000	1	0.29
2000	1	0.14
4000	1	0.06



**Abb. 134** Durchmesser der Fresnelzonen in Abhängigkeit von der Frequenz  $f$  für die Messkonfiguration mit einem Lautsprecher 1.3 m senkrecht über der Probenoberfläche und 1.29 m oberhalb der Messsonde. Gezeigt sind die Fresnelzonen von 0.5 bis 5.

Einige allgemeine Bemerkungen zum Einzugsbereich der Absorptionsgradmessung sind hier von Interesse (siehe auch [29]). Bei Veränderung des Einstrahlwinkels weg von der Senkrechten vergrößert sich der Einzugsbereich sukzessive. Wird der Lautsprecher bei senkrechtem Einfall immer weiter von der Probenoberfläche entfernt, so vergrößert sich die Fläche, besonders ausgeprägt bei tiefen Frequenzen. Letzteres trifft auch beim Übergang zu höheren Fresnelzonen zu. Bei der Messerie im Schallmessraum haben sich die Störkörper ab Frequenzen von 300 Hz bis 400 Hz durch Undulationen der Absorptionsgradkurven bemerkbar gemacht, ab Störkörperabständen von 0.5 m bis 1 m. Dies entspricht in etwa dem Bereich der ersten Fresnelzone oder kurz darunter. Die Überlappung der Reflexionen von Probenoberfläche und Störkörper beträgt mithin ein Viertel bis zur Hälfte der jeweiligen Wellenlänge.

### 4.3.5 Schlussfolgerungen

Die Anwesenheit von Objekten in der Nähe der Messfläche führt zur konstruktiven oder destruktiven Überlagerung von direkt an der Messfläche reflektierten und an Objekten gestreuten Schallwellen und damit zu einer frequenzabhängigen Über- oder Unterschätzung des Absorptionsgrads.

Wenn in der Messpraxis auftretende kleinere Hindernisse wie Leitkegel oder Bordsteinkanten gut einen Meter von der P-U-Sonde entfernt sind, werden in situ Absorptionsgradmessungen selbst bei hohen Messfrequenzen bis 4000 Hz und gut reflektierender Messfläche nicht wesentlich beeinflusst.

Die Stärke der Beeinflussung geht mit der Stärke der bei der Messsonde eintreffenden unerwünschten Wellenenergie einher. Konvexe Gegenstände wie Leitkegel streuen einfallendes Wellensignal in grössere Raumwinkel als ebene Flächen wie Hauswände oder Bordsteine, welche senkrecht zur Achse Lautsprecher-Messsonde orientiert sind. Eine grössere und ungünstig orientierte reflektierende Fläche erlaubt eine höhere Anzahl von unerwünschten Wellenpfaden und somit eine höhere Störenergie.

Auf einer stark absorbierenden Messfläche können die Hindernisse noch etwas näher rücken als auf reflektierender Messfläche (bis zu etwa 0.5 m), ohne zu stören. In diesem Fall spielen Wellenmoden keine Rolle, welche zunächst am Störkörper und dann auf dem Probekörper reflektiert wurden, bevor die Messsonde erreicht wurde. Eine vertikale Wand wirkt sich als Störkörper auf absorbierendem Untergrund stärker aus als kleine Hindernisse, die einzuhaltende Entfernung ist aber nur wenig grösser.

Die bisher in der Messpraxis beachteten Abstände von Hindernissen waren hinreichend konservativ angesetzt und können im Einzelfall künftig sogar etwas grosszügiger gehandhabt werden.

Die beobachteten Fluktuationen des Absorptionsgrads bei Anwesenheit von Störkörpern sind meist auf Überlagerungen aus dem Entfernungsbereich innerhalb der ersten Fresnelzone zurückzuführen. Ab Gangunterschieden von einem Viertel der Wellenlänge lassen sich diese Störeffekte beobachten, ab einer halben Wellenlänge beeinträchtigen sie das Messergebnis deutlich, es sei denn die Streuenergie ist sehr niedrig.

## 4.4 Qualitätssicherung von in situ Absorptionsgradmessungen

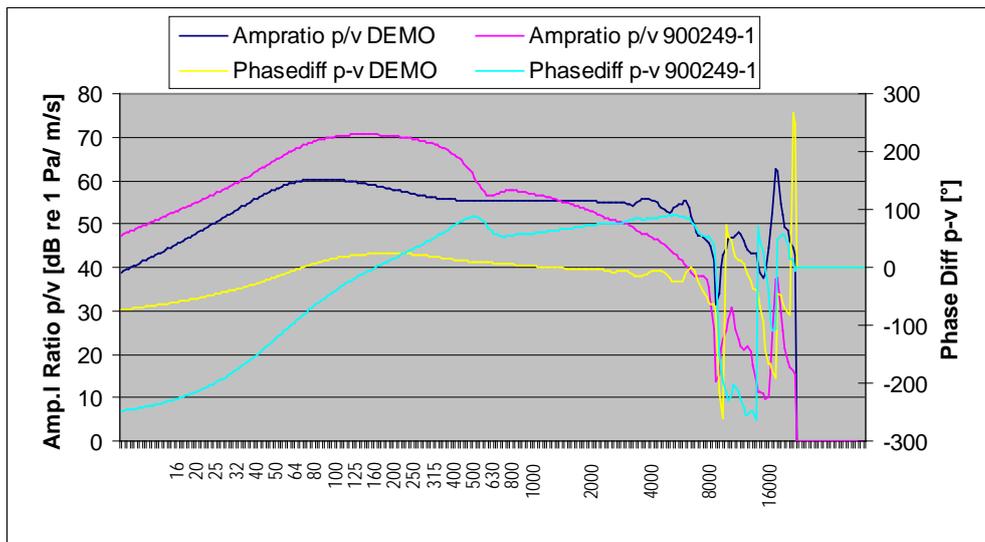
Bei den Verfahren zur in-situ Messung des Absorptionsgrads wird auf den Fahrbahnbelag ein Prüfsignal (Rauschen, Sweep, MLS-Signal) abgestrahlt und durch einen akustischen Sensor sowohl die auf die Oberfläche auftreffende Schallwelle, wie auch die reflektierte Schallwelle detektiert. Dabei unterscheiden sich die eingesetzten Verfahren stark hinsichtlich des abdeckbaren Frequenzbereichs, Sensibilität gegenüber Störgeräuschen und Genauigkeit. Müller-BBM setzt seit Jahren erfolgreich das p-u-Verfahren (mit kombiniertem Druck- und Schnellesensor der Firma Microflown (Niederlande)) zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades ein.

Bei diesem Messverfahren wird ein deterministisches Schallsignal (Sinus-Sweep) auf die Prüffläche abgestrahlt. Eine Messsonde für Schalldruck und Schallschnelle befindet sich direkt über der Oberfläche. Durch die verwendete Signalverarbeitung kann die Impulsantwort des ausgestrahlten Nutzsignals errechnet werden. Aus der Impulsantwort kann die akustische Impedanz der Prüffläche und damit deren Absorptionsgrad bestimmt werden. Der ermittelte Absorptionsgrad kann als Absorptionsgrad für Kugelwellen interpretiert werden. Mit dieser Messmethode kann ein breites Spektrum des Absorptionsgrades bestimmt werden und es ist möglich, verhältnismässig kleine Absorptionsgrade in situ mit hoher Genauigkeit zu bestimmen.

Die Messsonden der Firma Microflow werden mit einer Mess- und Auswertesoftware von Müller-BBM betrieben. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden die Untersuchungen zweier Sonden durchgeführt, die entgegen der Erwartung sehr unterschiedliche Ergebnisse lieferten, um aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen für die Verwendung solcher Sonden mit hoher Genauigkeit abzuleiten.

#### 4.4.1 Kalibrierung der Messsonden

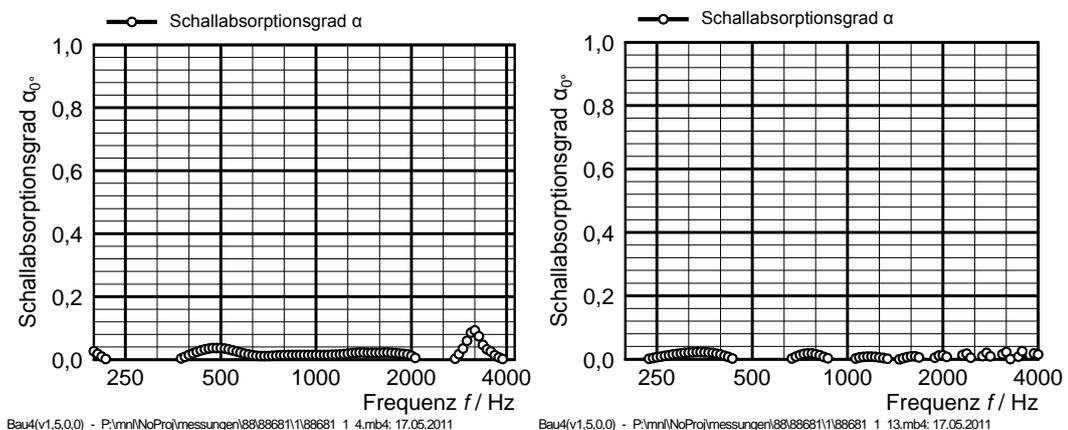
Vor Absorptionsgradmessungen mit neuen Messsonden werden diese bei Müller-BBM in einer semischallabsorbierenden Kammer durch eine Messung auf einem vollständig reflektierenden Boden kalibriert. Die Ergebnisse dieser Messung finden sich in *Abb. 135*. Es wird deutlich, dass sich die Ergebnisse beider Sonden („DEMO“-Sonde und Sonde 900249-1) deutlich unterscheiden.



**Abb. 135** Kalibrationskurven in Abhängigkeit von der Frequenz für die beiden P-U-Messsonden.

#### 4.4.2 Ergebnisse der Absorptionsmessungen

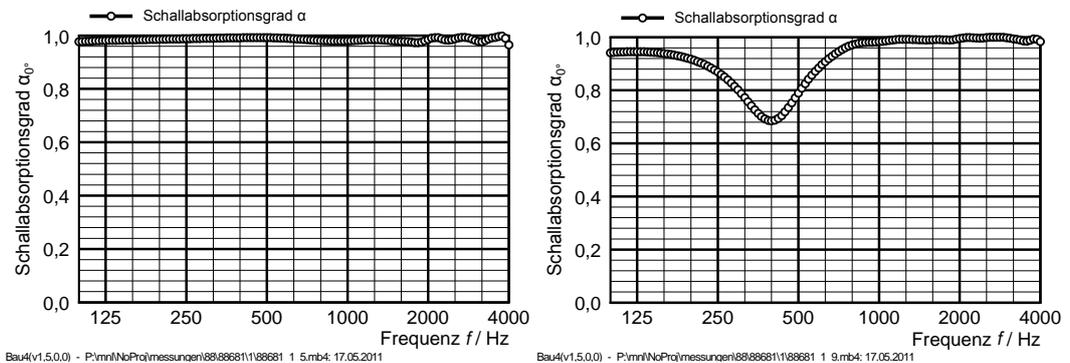
Die folgende *Abb. 136* zeigt die Messergebnisse für einen perfekt reflektierenden Boden für die PV-Probe S/N 900249-1 und für das DEMO Kit.



**Abb. 136** Frequenzabhängiger Schallabsorptionsgrad  $\alpha_0$  auf vollreflektierendem Untergrund für DEMO KIT (links) und die P-U-Sonde S/N 900249-1 (rechts). Messungen unmittelbar nach den Kalibrierungsmessungen und mit der gleichen Messkonfiguration.

Die Ergebnisse von *Abb. 136* sind reproduzierbar und plausibel. Es ist zu beachten, dass die Messgeometrie (Abstände Probe-Lautsprecher-Boden und Probe-Lautsprecher) mit derjenigen der Kalibrierungsmessung identisch war.

Für die nächste Messung wurden die Sonden vor einer absorbierenden Wand in einer halbabsorbierenden Kammer platziert. Zu erwarten ist dort ein Absorptionsgrad von 1 ab einer Frequenz von 100 Hz. Die Ergebnisse der Messungen finden sich in *Abb. 137*.



**Abb. 137** Frequenzabhängiger Schallabsorptionsgrad  $\alpha$  bei Anordnung der Prüffläche vor einer vollständig absorbierenden Wand für das DEMO KIT (links) und die P-U-Sonde S/N 900249-1.

Während das Ergebnis des DEMO KIT sehr gut aussieht, liefert die Sonde 900249-1 kein zufriedenstellendes Resultat.

Um die Ursache dieser Diskrepanzen zu finden, wurden weitere Testmessungen durchgeführt. Es ist zu beachten, dass die fehlende Absorption in *Abb. 137* in denselben Frequenzbereich fällt, in welchem die Magnitude des Verhältnisses  $p/u$  in *Abb. 135* ein Maximum zeigt (100 Hz – 800 Hz).

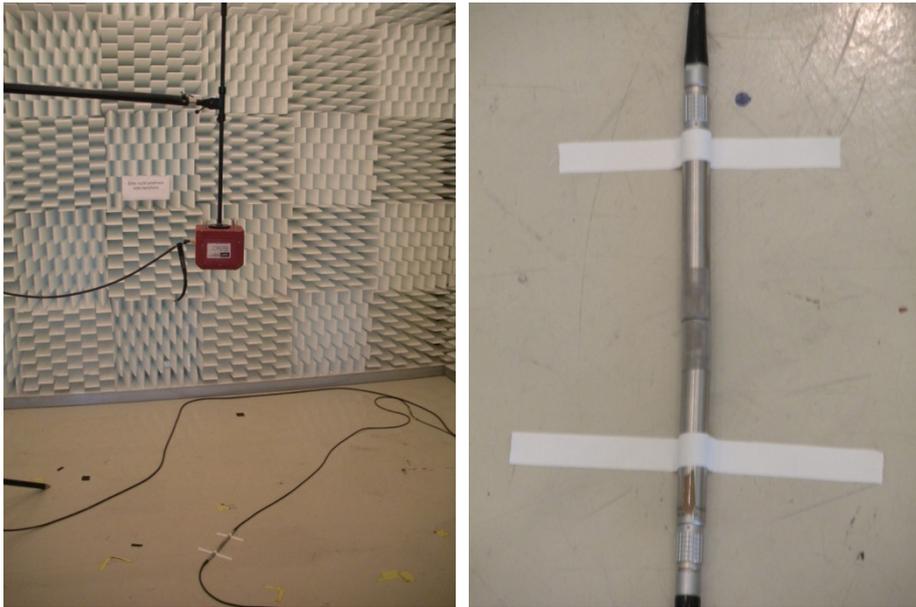
Die Messergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Messungen auf reflektierendem Boden führen zu vernünftigen Resultaten für beide Sonden (wenn dieselbe Messkonfiguration, Hardware- und Softwareeinstellungen wie bei den Kalibrierungsmessungen verwendet werden).
- Die Messungen vor der absorbierenden Wand liefern gute Ergebnisse für das DEMO KIT, aber nicht für die Sonde 900249-1.

#### 4.4.3 Kalibrierungsprozedur

Beide Messungen (mit reflektierendem Boden und der absorbierenden Wand) wurden mit derselben Hard- und Software durchgeführt, nur die Sonden selbst wurden zwischendurch ausgewechselt. Auch die Abstände Lautsprecher-Boden und Lautsprecher-Sonde waren gleich (etwa 1.2 m), wie auch die Signalstärke der Lautsprecher. Der prinzipielle Unterschied zwischen den Messungen besteht darin, dass das Druckniveau über dem reflektierenden Grund höher ist als vor der absorbierenden Wand und dass die Schallschnelle vor der Absorptionswand höher ist als über dem reflektierenden Boden.

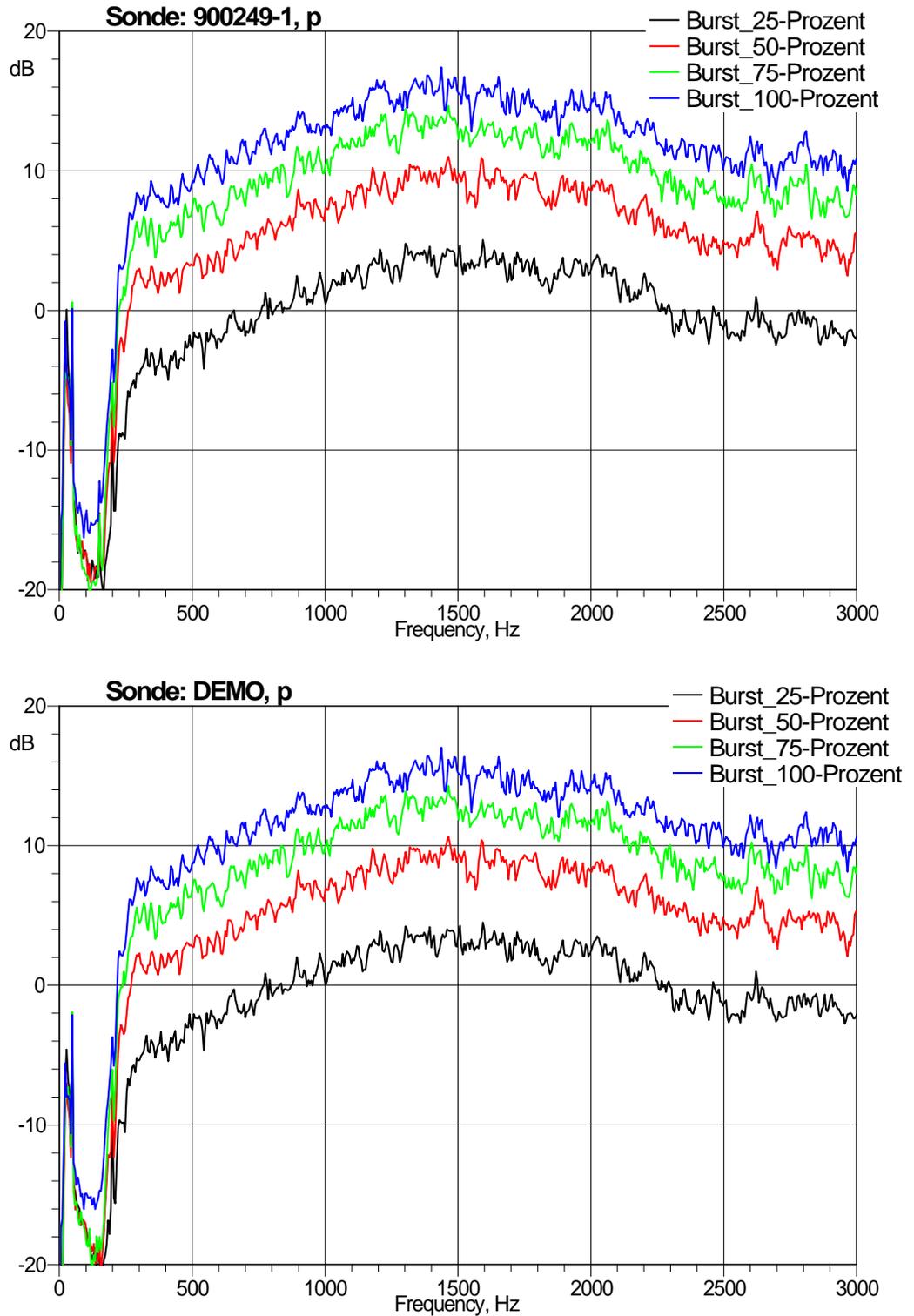
Um die Ursache für das unterschiedliche Verhalten der Sonden zu finden, wurden weitere Messungen durchgeführt. *Abb. 138* zeigt den Messaufbau.



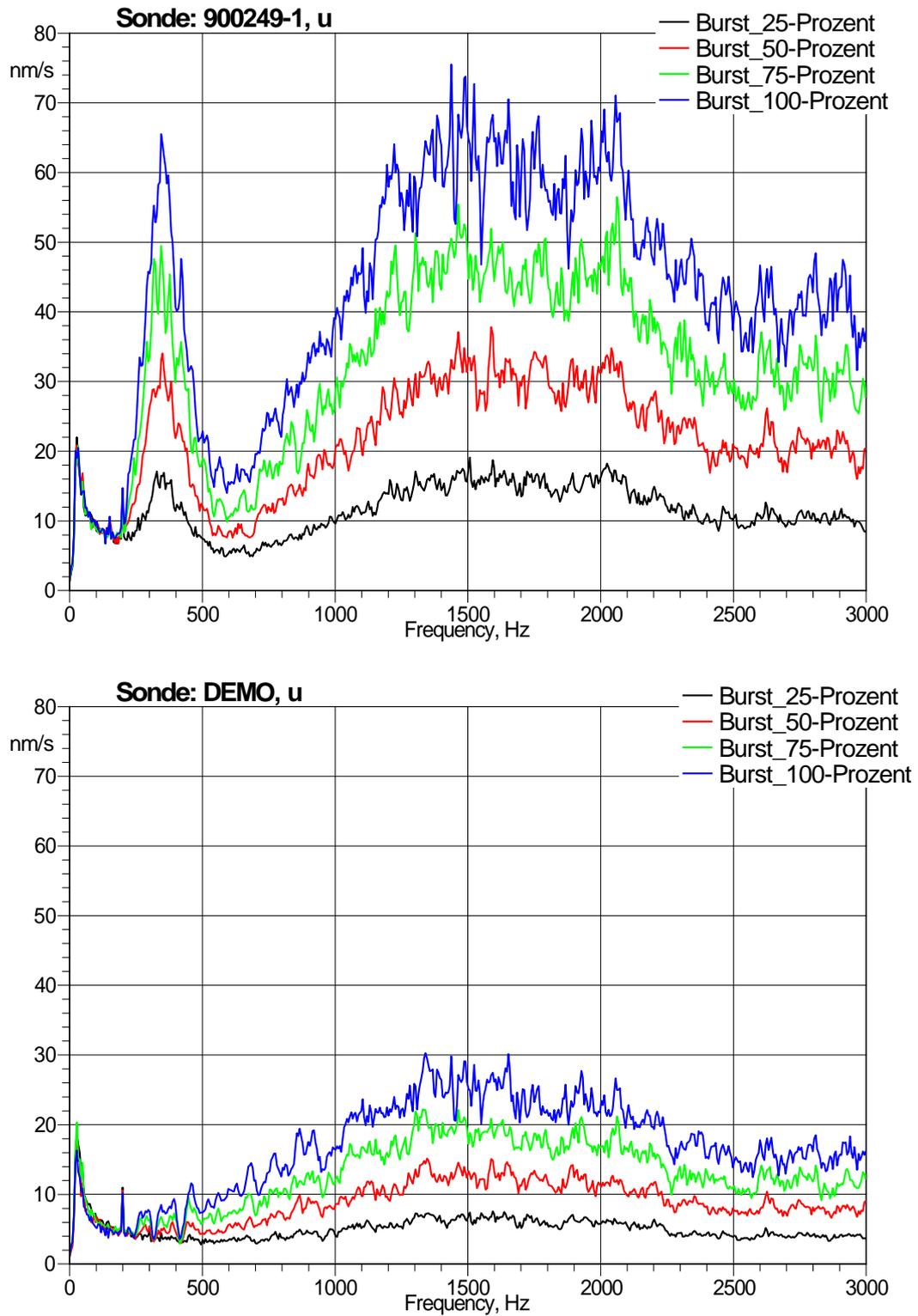
**Abb. 138** Überblick über den Messaufbau (links). DEMO Sonde und die Sonde 200489-1 gegenüberliegend auf dem Boden (rechts).

Der Abstand Lautsprecher-Boden betrug 1.2 m. Die Signale wurden mit beiden Proben simultan erfasst. Der Lautsprecher strahlte 64 Pulssignale in einem Frequenzbereich von 200 Hz bis 4000 Hz aus. Nur die gemittelten Ergebnisse der 64 Messsignale werden hier dargestellt. Die Messungen wurden mit vier verschiedenen Quellstärken ausgeführt (25%, 50% 75% und 100%).

Abb. 139 und Abb. 140 zeigen die Ergebnisse.

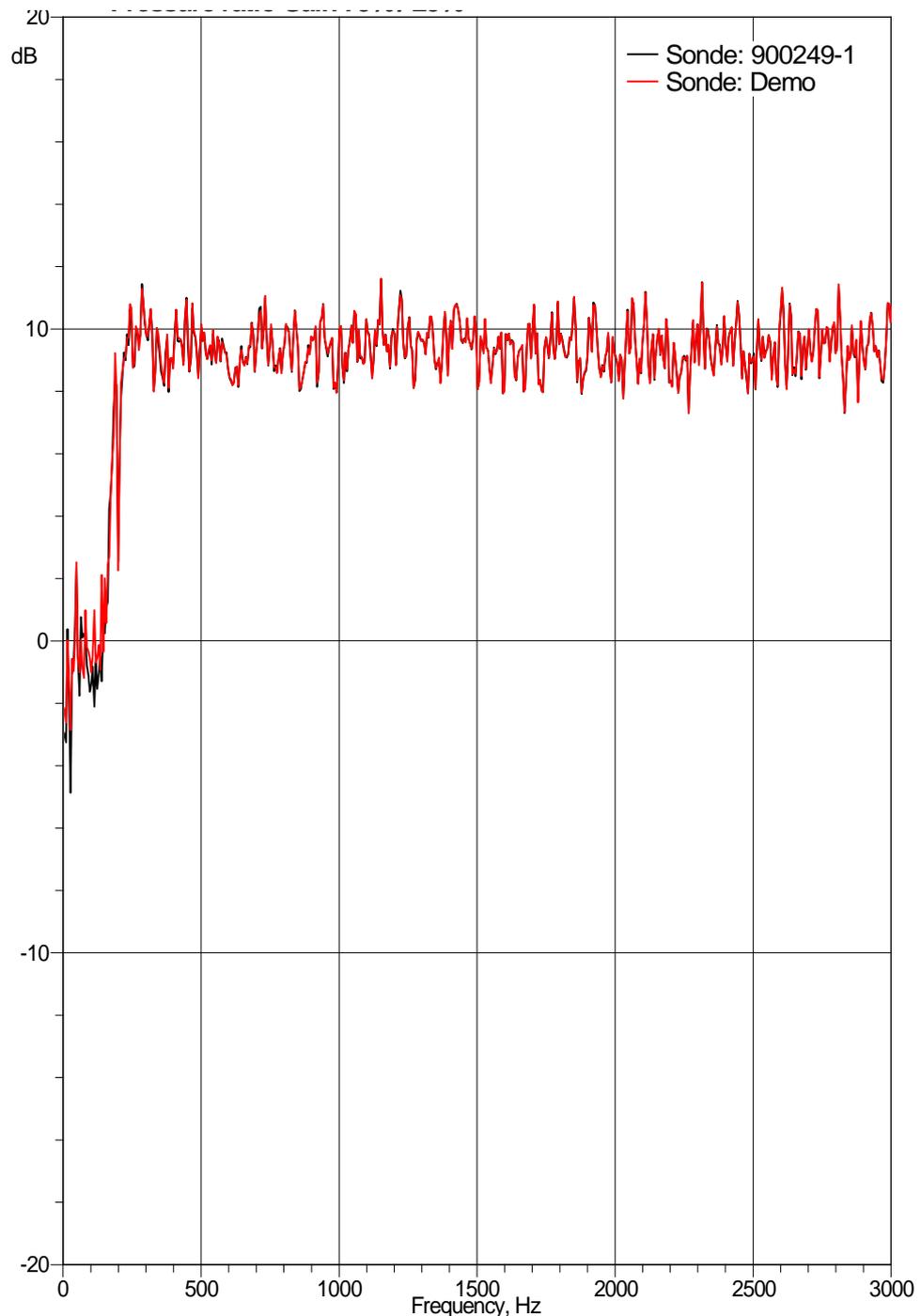


**Abb. 139** Druckniveaus in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Quellstärken für das DEMO KIT (unteres Diagramm) und die Sonde 900249-1 (oberes Diagramm).



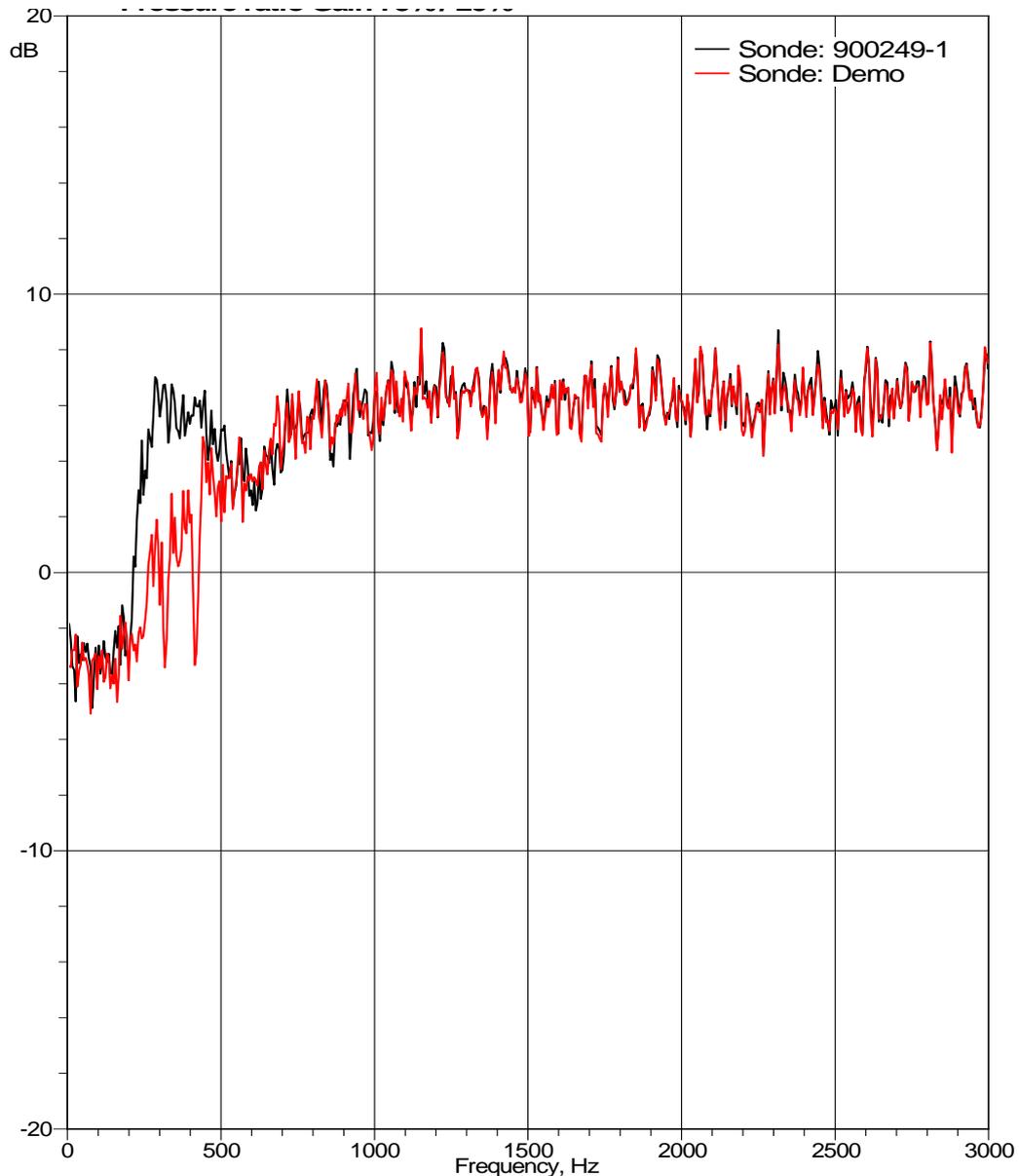
**Abb. 140** Schallschnellen  $u$  in Abhängigkeit von der Frequenz für verschiedene Quellstärken für das DEMO KIT (unteres Diagramm) und die Sonde 900249-1 (oberes Diagramm)

Es ist zu beachten, dass die Kalibrierwerte bei 1 kHz für den Drucksensor und bei 250 Hz für den Schallschnellesensor nicht benutzt wurden. Da die folgenden Ergebnisse alle Verhältnisse für verschiedene Quellstärken zeigen, würden sich diese Werte ohnehin auslöschen. *Abb. 141* zeigt das Verhältnis der Schalldrücke  $p_{75\%} / p_{25\%}$  für Signale mit einer Quellstärke von 75% zum Signal mit einer Quellstärke von 25% für beide Sonden.



**Abb. 141** Schalldruckverhältnis  $p_{75\%}/p_{25\%}$  in Abhängigkeit von der Frequenz für das DEMO KIT (rot) und die Sonde 900249-1 (schwarz).

Innerhalb des interessierenden Frequenzbereichs (über 200 Hz) sind die Kurven sehr gut vergleichbar. Die nachfolgende *Abb. 142* zeigt die Schallschnelleverhältnisse  $u_{75\%} / u_{25\%}$  für 75 % Quellstärke und für 25 % Quellstärke.



**Abb. 142** Schallschnelleverhältnis  $u_{75\%}/u_{25\%}$  in Abhängigkeit von der Frequenz für das DEMO KIT (rot) und die Sonde 900249-1 (schwarz).

Die Verhältnisse der Schallschnellen bei unterschiedlichen Quellstärken differieren deutlich im Frequenzbereich von 200 Hz – 800 Hz zwischen den beiden Sonden.

#### 4.4.4 Schlussfolgerungen

Wie nach den ersten Messungen zu erwarten war, sind die Verhältnisse der Schalldrücke für verschiedene Quellstärken für die beiden getesteten Sonden identisch. Die Verhältnisse der Schallschnellen unterscheiden sich jedoch erheblich. Die beobachteten Unter-

schiede liegen im selben Frequenzbereich (unter 1000 Hz) wie die mit zu niedrigen Werten gemessene Schallabsorption bei der neuen Sonde.

Der Schallschnellesensor der neuen P-U-Sonden S/N 900249-1 und S/N 900249-2 zeigt offenbar ein nichtlineares Verhalten für ein gegebenes Eingangssignal. Der Austausch der Signalverstärkungs- und Signalverarbeitungshardware beweist, dass das Problem auf die Sonde selbst zurückzuführen ist.

Die Herstellerfirma Microflown konnte diese Ergebnisse verifizieren und die Abweichungen der neuen Sonden auf Herstellungsfehler zurückführen. Die Methodik, mit der die Fehler nachgewiesen wurden, kann zur Grundlage für die zukünftige Kalibrierung der Sonden gemacht werden und trägt entscheidend zur Verbesserung der Genauigkeit des Messverfahrens bei.

## 5 Randbedingungen für akustische Messungen, Trocknungszeiten und Absorptionsgrad

### 5.1 Ausgangslage

Eine zuverlässige Messung erfordert neben der Einhaltung aller normativen und sonstigen Anforderungen an die Auswahl und den Einsatz der Messgeräte und die Umgebungsbedingungen auch, dass sich der Prüfkörper in einem repräsentativen Zustand befindet. Nur dann besteht die Möglichkeit zu zeitversetzten Wiederholungsmessungen. Bisher geben die einschlägigen SPB- und CPX-Richtlinien nur unzureichende Verfahren zur Überprüfung von Restwasser im Fahrbahnbelag an. So empfiehlt die Norm zu SPB-Messungen ISO 11819-1 [2], Druckluft mit 0.5 bis 0.8 kPa in die Poren der Strassen-deckschicht zu blasen, um eine Restfeuchte anhand einer Sprühfahne zu erkennen. Für reproduzierbare Messungen muss eine Definition für Abtrocknungszeiten oder aber ein einfach und sicher anwendbares Verfahren gefunden werden, mit dem Restfeuchte nachgewiesen werden kann. Eine Möglichkeit zum Nachweis von Restfeuchte sollte die Absorptionsgradmessung bieten, denn Luftschallabsorption findet in den Hohlräumen und auf der rauen Strassenoberfläche statt, die durch Benetzung und Verstopfung mit Wasser verändert werden.

In der Norm zu CPX-Messungen (ISO/DIS 11819-2, [3]) wird das Problem der Belagstrocknung nur oberflächlich behandelt, ein Bezug zur Temperatur fehlt völlig. Unter Punkt F.2 der Norm wird lediglich empfohlen, auf dichten Belägen eine visuelle Inspektion durchzuführen, auf SMA-Belägen drei Stunden nach einem Regen zu warten und auf porösen Oberflächen 24 bis 48 Stunden, je nach Sonnenschein, Wind und Verkehr.

### 5.2 Versuchsdurchführung

Es wurden wiederholt Absorptionsgradmessungen an Bohrkernen durchgeführt, welche zu Beginn benetzt und dann unter vorgegebener Temperatur in einem Klimaschrank getrocknet wurden. Für die Absorptionsgradmessung wurden die Bohrkernkerne kurzfristig dem Klimaschrank entnommen, im Impedanzrohr vermessen und wieder in den Klimaschrank eingebracht. Das Gewicht der Bohrkernkerne wurde jeweils vor und nach einer Messung bestimmt und protokolliert. Die Differenz zwischen Trockengewicht und Feuchtgewicht ergab die noch vorhandene Wassermenge, die Differenz unmittelbar vor und nach der Absorptionsgradmessung den Wasserverlust ausserhalb des Klimaschranks (*Tab. 24*).

Bei der Auswahl der Bohrkernkerne, wurde darauf geachtet, dass unterschiedliche Beläge mit guten Absorptionseigenschaften und hohem Hohlraumgehalt repräsentiert wurden. Bei hohlraumreichen Deckschichten kann mehr Wasser eindringen und es ist mit längeren Trocknungszeiten zu rechnen. Für das Experiment fiel die Wahl auf jeweils zwei Bohrkernkerne aus einem semidichten Splittmastixasphalt lärmarm (SMA-LA) und einem offenporigen Asphalt mit Grösstkorn 8 mm (PA8), die aus anderen Projekten verfügbar waren. *Tab. 24* fasst die Bohrkernparameter zusammen. Dort sind auch die gemessenen Strömungswiderstände der Bohrkernkerne nach DIN EN 29053 [8] aufgeführt. Die Strömungswiderstände der PA-Kerne sind sehr tief, die der SMA-LA-Proben doppelt so gross aber damit immer noch sehr tief. Die niedrigen Strömungswiderstände weisen auf eine gute Durchströmbarkeit des vorhandenen Hohlraums hin. Im trockenen Zustand besitzt der PA 8 ein enges Absorptionsmaximum von fast 0.95 bei rund 1000 Hz, während der SMA-LA sein Absorptionsgradmaximum bei 800 Hz aufweist und dabei einen Wert von 0.8 erreicht. Man kann daraus schliessen, dass hinreichend viel Porenraum vorhanden ist, sich dieser gut benetzen lässt und Wasserdampf gut entweichen kann. Damit sind alle Probekörper für das Experiment gut geeignet.

Auf alle Probekörper wurde an den Zylindermantelflächen wasserdichte Farbe aufgebracht, um eine seitliche Verdunstung zu verhindern und die Verdunstungsverhältnisse auf einer Strasse besser simulieren zu können.

**Tab. 24** Bohrkern für das Trocknungsexperiment. Das Gewicht wurde hier bei 20 C° gemessen.

Bohrkern	Höhe mm	Durch- messer mm	Gewicht (trocken) ohne Pro- benhalter g	Gewicht (trocken) mit Probenhalter g	spezifischer Strömungs- widerstand Pa s/m
SMA-LA 1	41	100	597.8	1055.9	454
SMA-LA 2	41	100	598.2	-	484
PA8 1	44	100	622.5	1084.1	212
PA8 2	45	100	635.6	-	240



**Abb. 143** Asphaltbohrkerne im Probenhalter.



**Abb. 144** Probekörper des Experiments zum Trocknungsverhalten. Gezeigt sind SMA-LA 2 (links oben), SMA-LA 1 (links unten), PA 2 (rechts oben) und PA 1 (rechts unten).

Bei der Messung des Absorptionsgrads nach DIN EN ISO 10534-2 [7] werden Bohrkern in einen Probenhalter an das Impedanzrohr von unten angeschraubt (Abb. 143, Abb. 145). Vor Ermittlung des Schallabsorptionsgrades wurden die Ränder zwischen Probekörper und Probenhalter jeweils mit einem dünnen Dichtstreifen umgeben, damit die Bohrkern im Impedanzrohr abgedichtet waren (Abb. 144). Nach Entnahme aus dem Klimaschrank wurden die Messungen jeweils zügig durchgeführt. Zwei Probekörper (PA 1 und SMA-LA 1) wurden während des gesamten Experiments in den Probehaltern belassen, die beiden anderen Proben (PA 2 und SMA-LA 2) wurden jeweils unmittelbar vor der Mes-

sung des Absorptionsgrads in den Standardprobenhalter des Impedanzrohrs eingebracht.



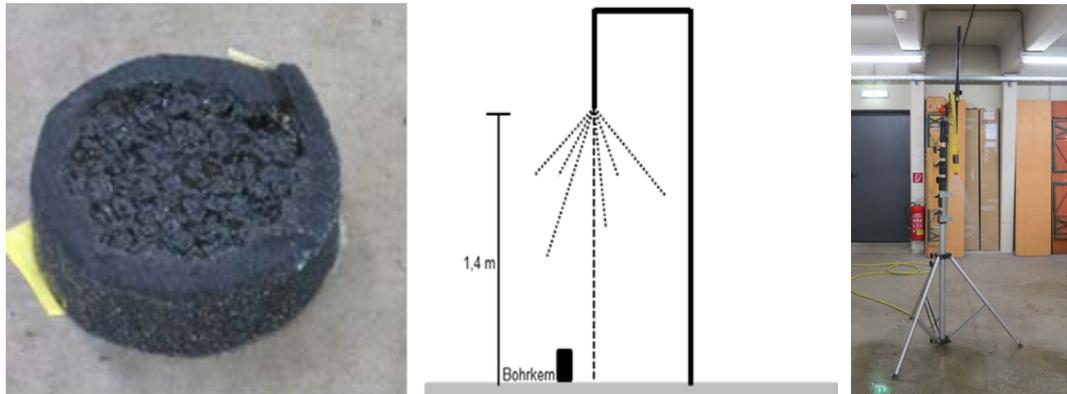
**Abb. 145** Impedanzrohr zur Messung des akustischen Absorptionsgrads. Lautsprecher oben im Gehäuse, die Öffnungen rechts nehmen Messmikrofone auf, der Probekörper ist unten angeschraubt.

Die Bewässerungsmenge beeinflusst die Dauer der Trocknungszeit. Im Experiment erfolgte eine Beregnung mit einer Normregenmenge. Ausgewählt wurde eine spezifische Bemessungsregenmenge, die zur Bemessung von Entwässerungsanlagen herangezogen wird. Nach einem einschlägigen Fachbuch [30] beträgt diese Normregenmenge in Süddeutschland auf Verkehrsflächen 270 l/s/ha. Ein starker Regenschauer dieses Umfangs mit einer Dauer von 15 Minuten tritt statistisch gesehen einmal jährlich auf. Umgerechnet auf die Stirnfläche der Bohrkerns ergibt sich eine Regenmenge von 0.19 l / 15 min.

Massgebend für die Bemessung von Strassenentwässerungsanlagen in der Schweiz ist die VSS SN 640350 [12]. Darin wird, basierend auf Messdaten von zehninütigen Intervallen bis 1995, ein Berechnungsschema für die maximal zu erwartenden Regenintensitäten von kurzzeitigem Starkregen als Funktion der Region, der Wiederkehrperiode und der Regendauer angegeben. Für eine Wiederkehrperiode von einem Jahr, einer Regendauer von 15 Minuten und dem Tessin als der Region mit der grössten Wahrscheinlichkeit von Starkregen ergibt sich eine Regenintensität von rund 81 mm/h, d.h. 225 l/s/ha. Im Experiment wurde dieser Wert bewusst um 20 Prozent auf den Wert aus Süddeutschland erhöht (270 l/s/ha), um bei der Wahl des Extremereignisses für die Bestimmung der Trocknungszeiten eine Sicherheitsreserve zu haben und andererseits heuristisch zu berücksichtigen, dass Starkregenereignisse aufgrund des gegenwärtigen Klimawandels häufiger auftreten werden. Vor diesem Hintergrund wird auch in der Schweiz eine Erhöhung der Normregenmengen diskutiert und in einer jüngeren Norm aus dem Jahr 2007 sogar ein noch höherer Wert angesetzt. Die entsprechende Bemessungsregenspende für die Schweiz beträgt gemäss SN 59200 [11] 300l/s/ha und ist damit rund 10 Prozent höher.

Um die in situ Bedingungen möglichst gut zu repräsentieren, wurden die Bohrkerns während der Beregnung mit Glasfilz umwickelt, der einen ähnlichen Strömungswiderstand aufwies wie die Asphaltprobekörper in trockenem Zustand. Unten wurden die Bohrkerns abdichtet. Die viertelstündige Beregnung erfolgte mit einem Gartenschlauch aus einer

Höhe von 1.4 m und der spezifizierten Regenmenge von 0.19 Litern. Durch Wägung ergab sich für den SMA-LA nach viertelstündiger Beregnung eine Wassermenge von 9.6 g und für den PA 8 von 14.5 g. Der Versuchsaufbau ist in *Abb. 146* gezeigt.



**Abb. 146** Umwickelter Bohrkern vor der Beregnung (links), Skizze (mittig) und Foto (rechts) des Versuchsaufbaus zur Beregnung.



**Abb. 147** Probekörper im Klimaschrank.

Im Inneren des Klimaschranks lief ein fest installierter Ventilator, damit sich die jeweilige Temperatur im Inneren stets gleichmässig verteilt. Die Probekörper mit den Nummern 1 wurden im Probenhalter, diejenigen mit den Nummern 2 wurden ohne Probenhalter gelagert. Die Anordnung der Probekörper im Klimaschrank ist in *Abb. 147* gezeigt. Der Klimaschrank ist vor Sonneneinstrahlung geschützt aufgestellt. Eine Variation von Luftdruck und -feuchte erlaubt der Schrank nicht. Die Luftfeuchte sollte durch die ständige Verwirbelung innerhalb des Schranks aber gleichmässig verteilt werden.

Die Messreihen wurden mit den identischen Bohrkernen für Klimaschranktemperaturen von 5°C, 20°C und 32°C durchgeführt. Die Messreihen wurden jeweils beendet, nachdem die gemessenen Bohrkernmassen diejenigen der trockenen Bohrkern wieder erreicht hatten.

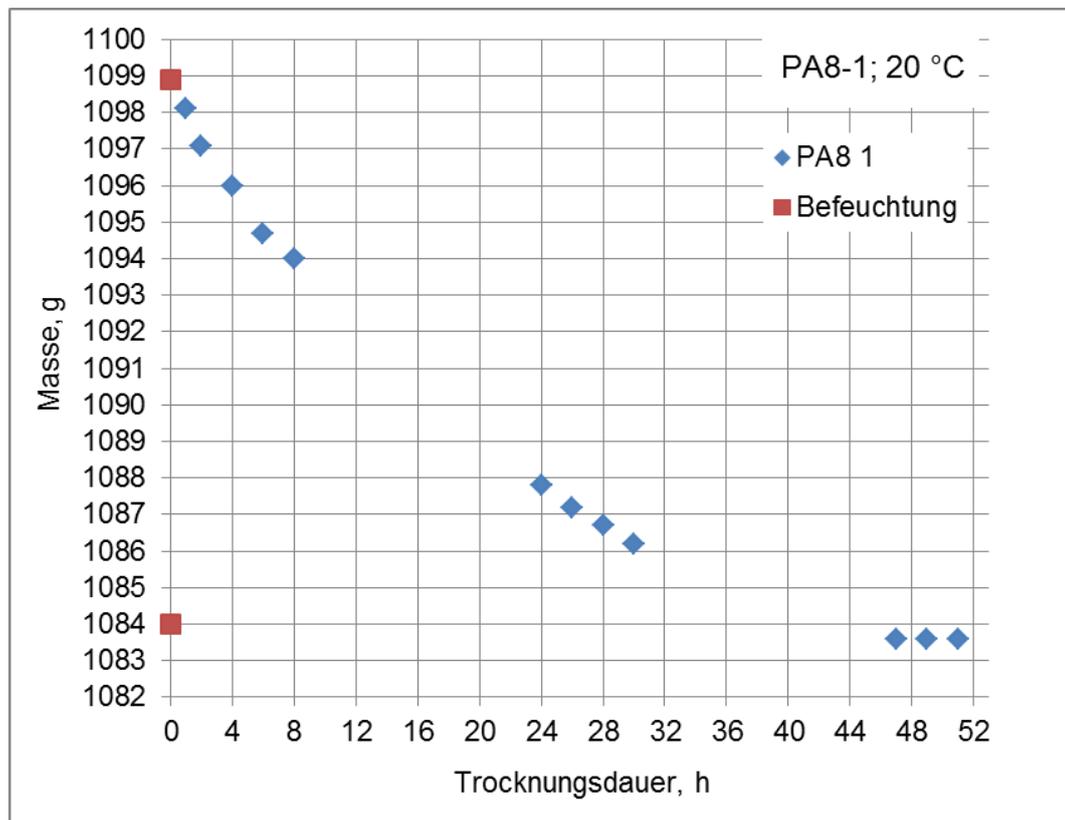
### 5.3 Ergebnisse des Trocknungsversuchs

Die Auswertung des Experiments zum Trocknungsverhalten zielte vor allem auf zwei Fragen:

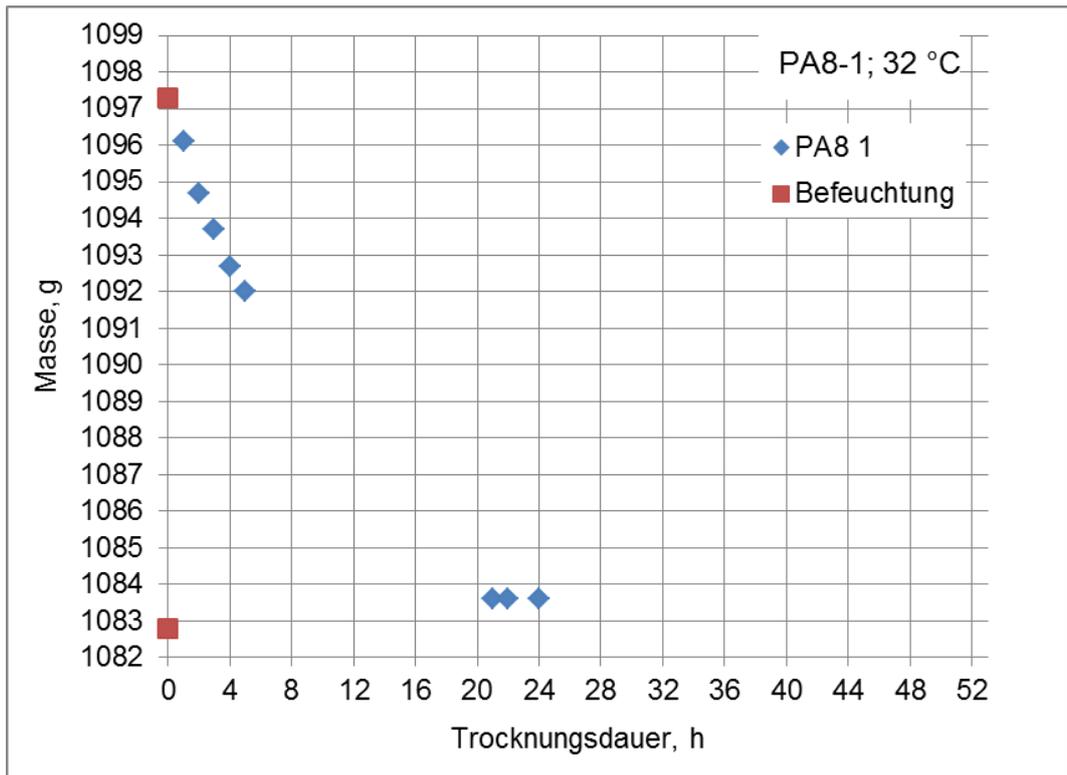
- Wie lange dauert es, bis die Probekörper abgetrocknet sind?
- Wie verändert sich der spektrale Absorptionsgrad der Probekörper durch ihre Feuchte?

In unregelmässigen Zeitabständen wurden die Bohrkern aus dem Klimaschrank entnommen und gewogen. Die Genauigkeit der verwendeten Waage lag bei unter 0.1 g. Die Zeitintervalle zwischen zwei Entnahmen wurden während der gewöhnlichen Bürozeiten auf maximal zwei Stunden beschränkt, weiteten sich aber durch die nächtlichen Arbeitspausen aus.

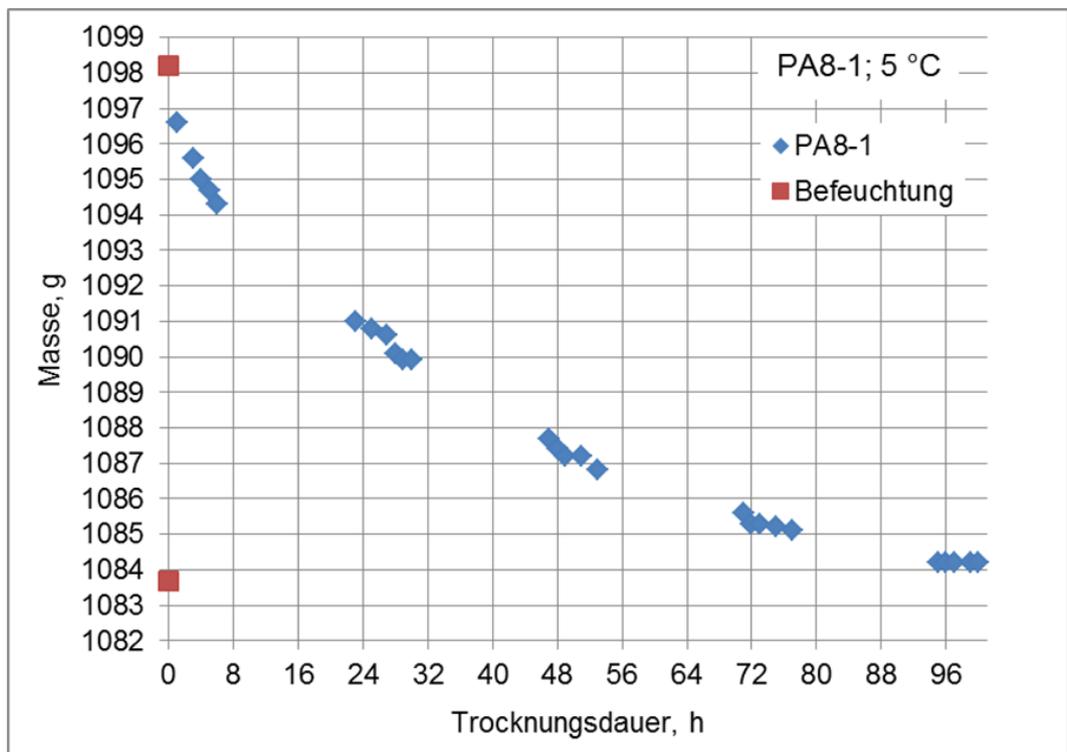
Die nachfolgenden Abbildungen *Abb. 148* bis *Abb. 153* zeigen die Massen der jeweiligen Bohrkern als Funktion der Trocknungszeit. Die Differenz der Feuchtmasse zu Beginn und der Trockenmasse ist die Masse des in und auf den Bohrkernen vorhandenen Wassers. Die Wassermenge nimmt näherungsweise exponentiell mit der Trockenzeit ab.



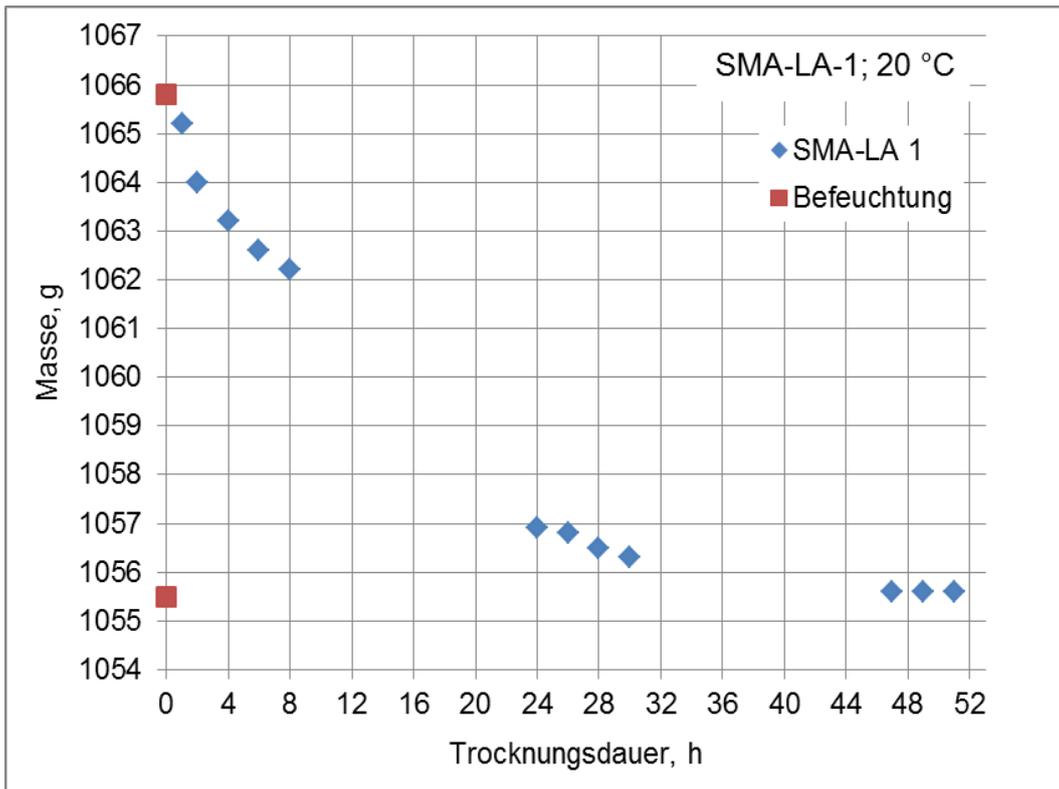
**Abb. 148** Gesamtmasse des Probekörpers PA 8-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 20°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben.



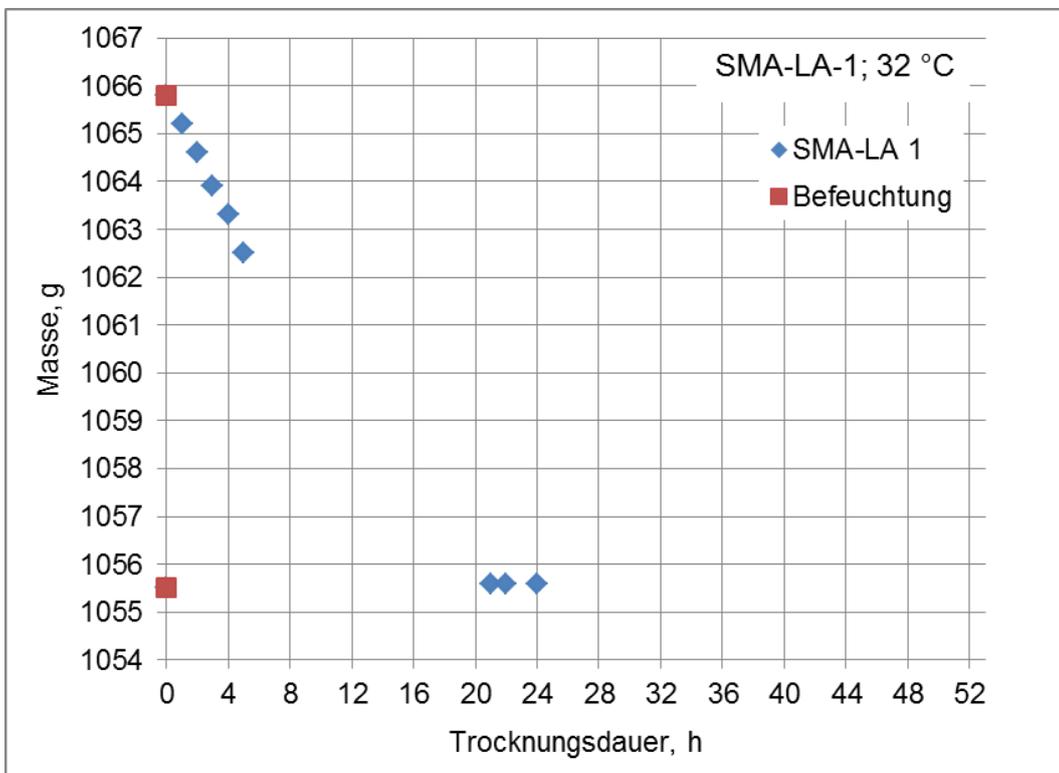
**Abb. 149** Gesamtmasse des Probekörpers PA 8-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 32°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben.



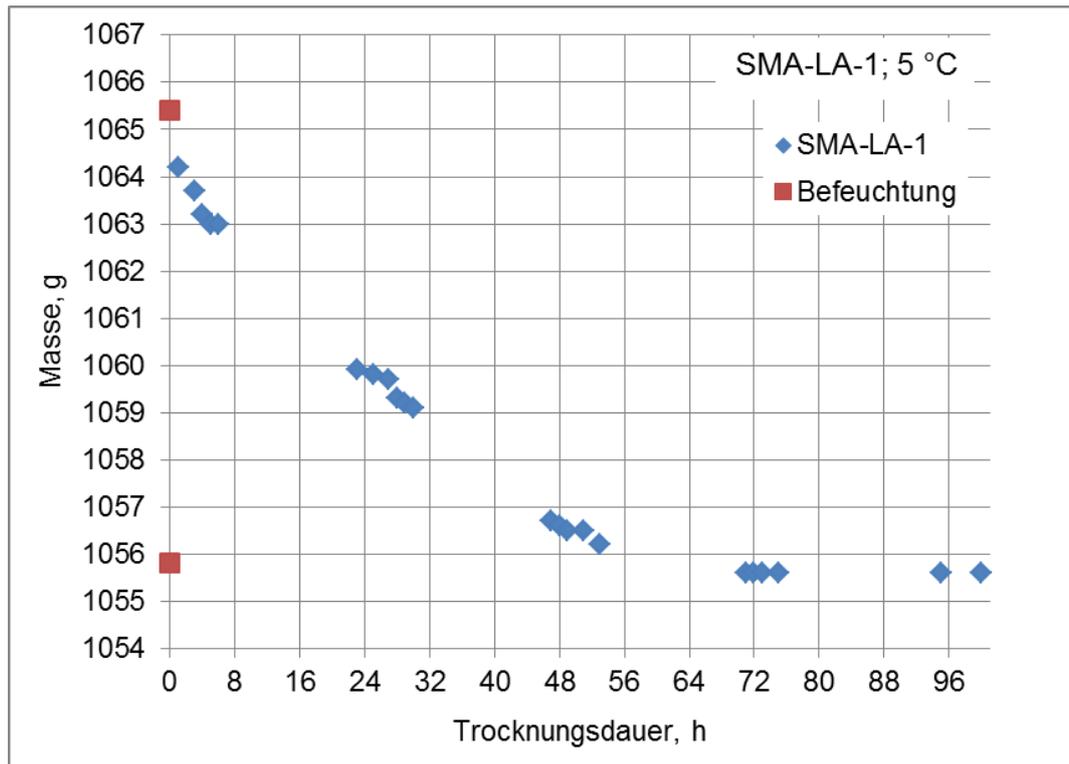
**Abb. 150** Gesamtmasse des Probekörpers PA 8-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 5°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben.



**Abb. 151** Gesamtmasse des Probekörpers SMA-LA-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 20°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben.



**Abb. 152** Gesamtmasse des Probekörpers SMA-LA-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 32°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben.



**Abb. 153** Gesamtmasse des Probekörpers SMA-LA-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 5°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben.

Aus den Messwerten lassen sich durch Interpolation die frühesten Zeitpunkte bestimmen, zu denen das Wasser aus den Bohrkernen vollständig verschwunden ist. Diese Gesamttrocknungsdauer ist in *Tab. 25* aufgelistet.

**Tab. 25** Trocknungsdauern der Probekörper bei unterschiedlichen Temperaturen.

Temperatur °C	Trocknungsdauer, h			
	PA 8-1	PA 8-2	SMA-LA-1	SMA-LA-2
5	88	60	64	56
20	44	18	40	22
32	18	8	20	8

Während des Trocknens nimmt der Wasserverlust pro Zeiteinheit stetig ab, wie man den Kurven oben entnehmen kann. Ein Teil dieses Verlusts erfolgt ausserhalb des Klimaschranks während der Absorptionsgradmessungen. Wie *Tab. 26* zeigt, verlieren die Probekörper, die jeweils in den Probenhalter eingebettet werden mussten, zu Beginn der Absorptionsgradmessserie eine grössere Wassermenge als die permanent im Probenhalter montierten Bohrkern. Dies dürfte daran liegen, dass die Probekörper PA 2 und SMA-LA 2 um die Umbettungszeit länger ausserhalb des Klimaschranks verweilen als die Probekörper PA 1 und SMA-LA 1. Nach einigen Stunden verliert sich dieser Unterschied weitgehend, vermutlich weil auch die absoluten Feuchtigkeitsverluste dann deutlich geringer ausfallen.

Die Verdunstung während der Messung kann aber den grossen Unterschied während des Trocknens zwischen PA 1 und SMA-LA 1 auf der einen und PA 2 und SMA-LA 2 auf der anderen Seite nicht erklären. Wahrscheinlich erfolgt die schnellere Austrocknung der Kerne, die nicht permanent im Probenhalter waren, auch teilweise über ihre Mantelfläche, trotz des Schutzanstrichs, der dies eigentlich verhindern sollte.

**Tab. 26** Wasserverlust während der Absorptionsgradmessungen bei 20°C in Gramm.

Probekörper	Trocknungszeit, h											
	1	2	4	6	8	24	26	28	30	47	49	51
PA 8 1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0	0	0.1	0.1	0	0	0
PA8 2	0.9	0.8	0.4	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	0
SMA-LA 1	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0	0	0.1	0.2	0	0	0
SMA-LA 2	1.1	0.4	0.2	0.3	0.2	0	0	0	0	0	0	0

## 5.4 Exkurs: Theoretische Anmerkungen zur Verdunstung

Dieses Kapitel präsentiert Grundlagen des Trocknungsverhaltens von Strassen aus der allgemeinen Physik, Meteorologie, Ingenieurhydrologie, Bodenkunde und Bauphysik und erlaubt damit ein tieferes Verständnis der Messergebnisse, wie den ungefähr exponentiellen Abfall der Wassermenge in der Deckschicht mit der Trocknungszeit. Es wird aber auch auf die Komplexität des Trocknungsvorgangs auf der realen Strasse eingegangen und somit auf die vielfältigen Abhängigkeiten von Parametern, die sich messtechnisch nicht alle erfassen lassen. Daraus geht hervor, dass, man bei der Vorhersage in der Praxis mit einer vorsichtigen Abschätzung der Trocknungszeiten zufrieden sein muss.

Zwischen einer Flüssigkeitsoberfläche und einem umgebenden Gas stellt sich im Gleichgewicht ein spezifischer Dampfdruck ein, der hauptsächlich von der Temperatur abhängt. Die Anzahl der Moleküle, die der Flüssigkeit entweichen und die vom Gas in die Flüssigkeit eintreten ist in diesem Gleichgewichtszustand gleich. Die Energie, die notwendig ist, um einen Verdampfungsvorgang zu veranlassen ergibt sich aus der Temperatur  $T$  des Systems, der Steigung der Dampfdruckkurve ( $dP(T)/dT$ ) und den Dichten der Flüssigkeit und des Gases (Clausius-Clapeyron-Gleichung). Mit zunehmender Temperatur in der Flüssigkeit (z.B. durch Sonneneinstrahlung) steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Flüssigkeitsmolekül genügend Bewegungsenergie aufbringt, um die molekularen Bindungskräfte in der Flüssigkeit zu überwinden und in das Gas zu entweichen. Diese Wahrscheinlichkeit hängt von der statistischen Verteilung der Molekülgeschwindigkeiten in der Flüssigkeit ab, welche durch die sogenannte Boltzmann-Verteilung beschrieben wird. Bei höheren Temperaturen verschiebt sich der Schwerpunkt der Verteilung zu höheren Geschwindigkeiten hin und die Boltzmann-Verteilung wird breiter, d.h. der Anteil der schnellen Moleküle, die die Flüssigkeit verlassen können, erhöht sich sehr schnell mit der Temperatur und die Verdunstungszeiten verkürzen sich entsprechend. Würde man austretenden Dampf permanent sofort wegblasen, würden sofort viele Moleküle aus der Flüssigkeit austreten, um den ursprünglichen Gleichgewichtsdampfdruck wieder herzustellen und der Verdunstungsprozess würde sehr viel schneller erfolgen als dies im Alltag beobachtet wird. In der Realität bildet sich über der Flüssigkeit eine dünne Dampfschicht (Prandl-Grenzschicht) an deren unterem Rand der Sättigungsdampfdruck herrscht und an deren oberer Grenzfläche sich der niedrigere Umgebungsdampfdruck einstellt. Diese Grenzschicht blockiert die schnelle Verdampfung.

In der Praxis ist es schwierig, die Verdunstungsgeschwindigkeit von Wasser auf einer porösen Strasse vorherzusagen, denn diese hängt von vielen Parametern ab, welche in der Praxis kaum alle als Messwert zur Verfügung stehen dürften, u.a. Luft- und Strassentemperatur, Netto-Sonneneinstrahlungsleistung (d.h. ohne Reflexionen), Luft- und Strassen-

feuchtigkeit, Windstärke und –richtung, Oberflächenbeschaffenheit (Farbe der Deckschicht, Hohlraumgehalt, Permeabilität der Hohlräume), Verkehrsdichte (Strassenverkehr führt zu einer Verwirbelung der Luft und zu einem Aufheizen der Strassenoberfläche) und Luftdruck. Da die exakte Berechnung der Evaporation vor diesem Hintergrund sehr schwierig wäre, hilft man sich in der Ingenieurhydrologie mit empirischen und semiempirischen Formeln [31], welche zur Berechnung der Verdunstung von Seen oder der Transpiration von Vegetationsflächen herangezogen werden. Im Prinzip sind diese Formeln an die Strassenverdunstung anpassbar, aber es fehlen Messdaten zur Abschätzung von Koeffizienten, welche die komplexen Eigenschaften einer porösen Strassenoberfläche und deren Befeuchtung beschreiben können. Entsprechende Forschungsarbeiten liegen jedenfalls nicht vor.

Ein Vergleich der Trocknungszeiten aus der Bohrkernuntersuchung mit einer solchen Formel ist aber illustrativ und kann den Weg zu einem praxistauglichen Vorgehen weisen. Eine einfache mit wenigen leicht zugänglichen meteorologischen Parametern auskommende Formel für die Verdunstungsrate ist die empirische Formel von Haude (diese und andere Formeln und Messverfahren der Verdunstung sind ausführlich beschrieben in einem Merkblatt [32]). Sie wird in der Wasserwirtschaft und der Bodenkunde in Zentraleuropa oft angewandt, allerdings zur Abschätzung von Monatsmitteln. Die Verdunstungsrate  $E_H$  in Millimetern pro Tag wird berechnet aus der Differenz des Sättigungsdampfdrucks  $e_s$  und des aktuellen Dampfdrucks  $e_a$  (jeweils in hPa) multipliziert mit einem empirischen Faktor  $f_{Hd}$ :

$$\text{Formel 6} \quad E_H = f_{Hd} (e_s - e_a) = f_{Hd} e_s (1 - U / 100)$$

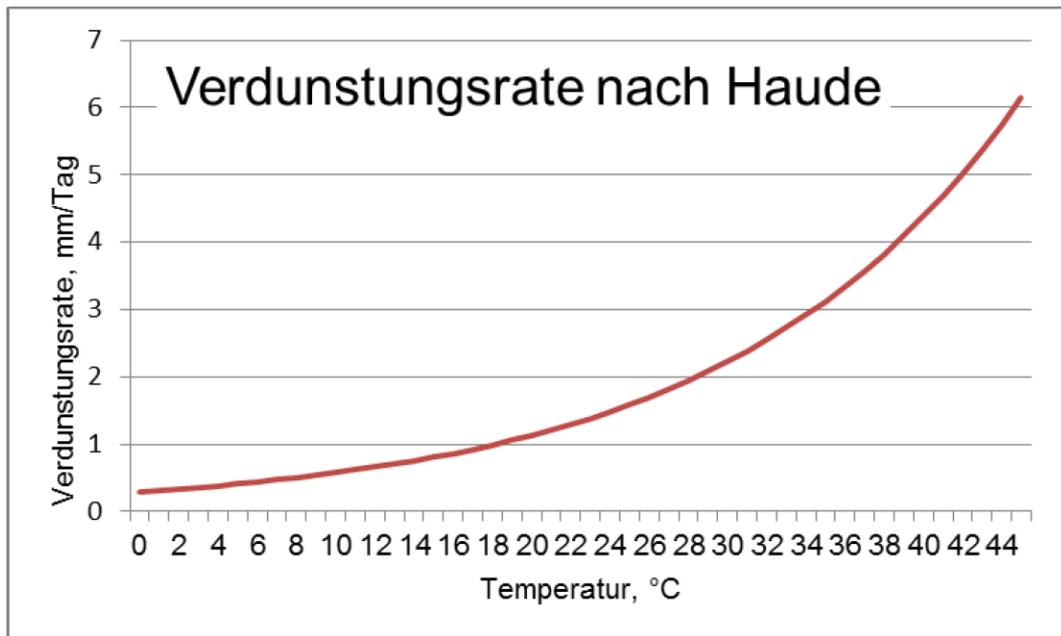
wobei  $U$  für die relative Luftfeuchte in Prozent steht und der Sättigungsdampfdruck als Funktion der Temperatur  $T$  (in °C) mit der empirischen Magnusformel berechnet wird:

$$\text{Formel 7} \quad e_s(T) = 611.2e^{(17.62T/(243.12+T))}$$

Diese Magnusformel liefert Werte, die bis auf 0.1 Prozent mit den Tabellenwerten in der bauphysikalischen Norm DIN 4108 übereinstimmen [9]. Der empirische Faktor  $f_{Hd}$  in der Haude-Formel berücksichtigt jahreszeitliche Schwankungen der Strahlungsbilanz und des Anteils der Transpiration (Verdampfung durch Vegetation). Die DIN 19685 listet beispielhaft die Haude-Faktoren für kurzes Gras auf durchfeuchtetem Boden auf [10] (Tab. 27). Die Verdunstung auf Gras gilt als Referenz zur Kalibrierung von Verdunstungsmodellen. Ein blattloser Buchenwald im Winter weist einen Haude-Faktor von 0.01 auf, Winterweizen im Juni einen Wert von 0.38. Mit einem Haude-Faktor von 0.16 und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 Prozent ergeben sich mit der Haude-Formel die temperaturabhängigen Verdunstungsraten aus Abb. 154. Bei 5 °C wird demnach 0.4 mm Wasser pro Tag verdunstet, bei 20 °C sind es 1.1 mm und bei 32 °C sogar 2.6 mm.

**Tab. 27** Haude-Faktoren  $f_{Hd}$  für die Tagesverdunstung von kurzem Gras nach DIN 19685.

	Monat im Jahr											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$f_{Hd}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.22
	2	2	2	9	9	8	6	5	3	2	2	



**Abb. 154** Verdunstungsrate nach der Formel von Haude für kurzes Gras als Funktion der Temperatur.

**Tab. 28** Vergleich der beobachteten Verdunstungsrate mit der Haude-Formel.

Bohrkern	Temperatur °C	Mittlere Verdunstungsrate, mm/Tag		Abweichung %
		Messung	Haude	
PA 8-1	5	0.5	0.4	22
PA 8-1	20	1.0	1.1	-9
PA 8-1	32	2.5	2.6	-3
PA 8-2	5	0.7	0.4	80
PA 8-2	20	2.5	1.1	117
PA 8-2	32	5.5	2.6	117
SMA-LA-1	5	0.5	0.4	11
SMA-LA-1	20	0.8	1.1	-31
SMA-LA-1	32	1.6	2.6	-38
SMA-LA-2	5	0.5	0.4	27
SMA-LA-2	20	1.3	1.1	18
SMA-LA-2	32	3.7	2.6	44

Da in dem hier durchgeführten Laborexperiment direkte Sonneneinstrahlung vermieden und ein Luftstrom in den Klimaschrank hinein und daraus heraus unterbunden wurde, bietet es sich an, die experimentellen Beobachtungen der Trocknungszeiten mit einem einfachen Modell wie den Vorhersagen nach der Haude-Formel zu vergleichen. Die durch Wägung bestimmte in den Poren und auf der Oberfläche der Probekörper vorhandene Wassermenge wurde dazu auf eine aufliegende zylindrische Wassersäule umgerechnet und die Trocknungszeit in eine entsprechende Trocknungsrate in mm/Tag umgerechnet. Für die Haude-Formel wurde eine relative Luftfeuchtigkeit von 70 Prozent und

ein Faktor  $f_{\text{HD}}=0.16$  angenommen. Beachte, dass beide hier angenommenen Faktoren in der Haude-Formel jeweils den Sättigungsdampfdruck skalieren. Die Gegenüberstellung von gemessenen und berechneten Verdunstungsraten in *Tab. 28* zeigt, dass die Größenordnung der theoretischen Vorhersage zwar mit den Messdaten übereinstimmt, aber auch, dass sich die Temperaturabhängigkeit nicht sehr gut widerspiegelt. Bei den Bohrkernen PA 8 1 und SMA-LA 1 wird die Verdampfung bei hohen Temperaturen gegenüber der Verdampfung bei niedrigen Temperaturen von der Haude-Formel überschätzt, bei den Bohrkernen PA 8 2 und SMA-LA 2 wird sie unterschätzt. Eine reine Skalierung, etwa durch einen belagsabhängigen Haude-Faktor, kann diese systematische Abweichung nicht korrigieren. Aufgrund der beobachteten stark zeitabhängigen Verdunstungsrate kann es nicht überraschen, dass die Haude-Formel mit ihrer jeweils konstanten Verdunstungsrate nur als grobe Abschätzung geeignet ist, die Messdaten zu erklären.

Genauere Abschätzungen als die Haude-Formel liefert das ebenfalls verbreitete Penman-Verfahren [32], das auch tageweise angewandt werden kann. An meteorologischen Daten werden dazu gebraucht: Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer, Lufttemperatur, Dampfdruck der Luft, Windgeschwindigkeit und Tageslänge. Noch genauer, stundenweise anwendbar und von physikalischen Prinzipien abgeleitet ist das erweiterte Verfahren nach Penman-Monteith, welches als weitere Parameter zusätzlich noch Verdunstungswiderstände benötigt. Eine Anwendung dieser Verfahren auf die Labormessdaten erscheint hier nicht sinnvoll, weil wesentliche Eingangsgrößen für die Penman-Formel nicht verfügbar sind. Bei Wetterdiensten sind diese Eingangsgrößen als Stundenmittelwerte aber schweizweit bei vielen Messstationen verfügbar. Deshalb sollte eine Anwendung des Verfahrens in der Messpraxis auf der Strasse prinzipiell möglich sein, wenn ein belagsspezifischer und verkehrsmengenbezogener Skalierungsfaktor ähnlich dem Haude-Faktor hinzugefügt wird. Die Ableitung eines praxisgerechten Belagsfaktors für die Penman-Formel würde ein grosses Datenensemble von gemessenen Wetterdaten erfordern und gleichzeitig jeweils zuverlässige Feuchtedaten der Strassenoberfläche und Verkehrsdaten. Solche Datenreihen dürften nur schwer verfügbar sein. Eventuell liessen sich die Feuchtedaten durch statistisch geschichtete Schalldruckpegelwerte einer Dauer-messstation näherungsweise ersetzen, aber dies zu untersuchen, würde den Rahmen dieses Teilprojekts sprengen.

Einen alternativen Zugang zum Vergleich der Messdaten mit einer Theorie liefert die Physik von Feuchtetransportphänomenen in kapillarporösen Baustoffen [33]. Dabei zeigt sich, dass wesentliche Transportvorgänge durch Diffusionsgleichungen beschrieben werden können, d.h. die zeitliche Änderung der Wassermenge (ihre Stromdichte) wird auf räumliche Gradienten einer Grösse (Druck oder Wassermenge) multipliziert mit einer Diffusionskonstanten zurückgeführt. Der Transport des Wasserdampfes (hier wichtig, um den Verdampfungsdruck im Porenraum hoch zu halten) erfolgt demnach im Wesentlichen durch Dampfdiffusion (Stösse von Wassermolekülen untereinander angetrieben durch unterschiedlichen Partialdampfdruck) und im Mikroporenbereich durch Effusion (Stösse von Wassermolekülen mit der Porenwand ebenfalls angetrieben durch den Partialdruck). Da in Baustoffen in der Regel beide Arten von Gasdiffusion vorkommen, kann man sie durch einen gemeinsamen Diffusionskoeffizienten beschreiben, der auch den Strömungswiderstand durch Querschnittsveränderungen in den Porenkanälen und durch erzwungene Umwege innerhalb der Porenstruktur berücksichtigt. Das flüssige Wasser wird durch die Porenoberflächendiffusion und Kapillarleitungstransport bewegt. Durch die Anlagerung von Wassermolekülen an die Porenwand (Adsorption) entsteht ein Sorbatfilm, dessen Dicke mit steigender relativer Luftfeuchte zunimmt. Je dicker diese Schicht ist, desto grösser ist der Massentransport, um Schichtdickenunterschiede durch einen Diffusionsvorgang auszugleichen, und je höher die Temperatur ist, desto höher ist die Massentransportleistung. Die Kapillarleitung ist ein Ergebnis der Saugspannung (Kapillardruck). Tritt eine Wasserfront in einen porösen Strassenkörper ein, so führt das Zusammenspiel von Oberflächenspannung und Grenzflächenspannung an den Porenwänden zur lokalen Ausbildung gekrümmter Wasseroberflächen (Menisken), die aus energetischen Gründen versuchen, ihre der Verdampfung ausgesetzte Oberfläche zu minimieren, was nur in den engsten Kapillaren (Poren) möglich ist. Bei kontinuierlicher Porengrößenverteilung werden nach Regen deshalb zwar zunächst die leicht zugänglichen grossen Poren gefüllt (saugen schwächer, aber haben den deutlich niedrigeren Strömungswiderstand), aber dann (in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt) von den kleineren Poren aus-

gesaugt bis diese bis zu einem bestimmten Mass mit Wasser gefüllt sind (abgesehen von eingeschlossenen Luftblasen) oder gesättigt sind. Die Eindringtiefe dieses Saugprozesses ist proportional zur Quadratwurzel der Zeit nach dem Regen. Beim Trocknen entweicht das Wasser aus den grossen Poren, erniedrigt dadurch den Kapillardruck und erlaubt auch den Wasseraustritt aus kleineren Poren. Der Kapillartransport kann durch einen Diffusionsansatz beschrieben werden, wobei der Gradient des Wassergehalts das antreibende Potential ist. Der Diffusionskoeffizient (Flüssigkeitstransportkoeffizient) ist dabei allerdings stark vom Wassergehalt und damit von der Zeit seit Beginn der Verdunstung abhängig.

Das bauphysikalische Modell der Verdunstung in einer porösen Deckschicht ist komplex, denn es erfordert die Lösung einer gekoppelten Differentialgleichung für die Kapillarleitung der Flüssigkeit, ihrer Oberflächendiffusion, für die Dampfdiffusion und Effusion. Diese verschiedenen physikalischen Prozesse werden von verschiedenen Potentialen angetrieben (Meniskuskrümmungsdruck, Wasserkonzentrationsgefälle, Partialdampfdruck), welche zeit- und temperaturabhängig sind und durch verschiedene Diffusionskoeffizienten skaliert werden, welche ebenfalls nicht konstant sind und für Strassendeckschichten bestenfalls abgeschätzt werden können. Die Gravitationskraft dürfte im Falle einer Strasse im Gegensatz zu vielen anderen Fragestellungen ebenfalls eine Rolle spielen. Als wesentliche weitere Erschwernis für eine Modellierung kommt die komplexe Geometrie und Vernetzung der Poren hinzu, die eine exakte theoretische Beschreibung des Trocknungsvorgangs sehr erschwert. Zur Modellierung des realen Trocknungsvorgangs müsste man als Randbedingung auch den vorhergehenden Eindringvorgang des Wassers simulieren. Abhängig von Porosität, Permeabilität, Dampfdruck usw. stellt sich nämlich eine zeit- und ortsabhängige üblicherweise konvexe Feuchteverteilungskurve innerhalb des Strassenaufbaus ein [33]. Je nach vergangener Zeit nach einem Regenereignis und den meteorologisch bedingten lokalen Trocknungsraten verändert sich das Tiefenprofil der Feuchteverteilung ständig.

## 5.5 Ergebnisse der Absorptionsgradmessungen

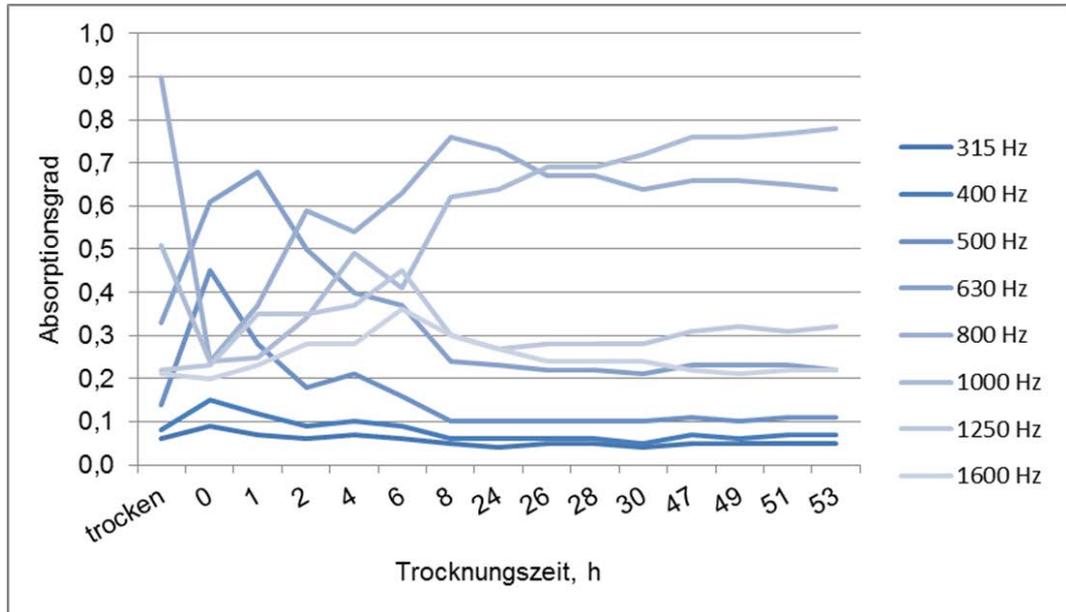
Insgesamt wurden im Rahmen der Messserie mehr als einhundert Absorptionsgradmessungen mit dem Impedanzrohr durchgeführt. Ausgewählte Absorptionsgradspektren zeigen eine sprunghafte Veränderung nach Befeuchtung und anschliessend eine systematische Entwicklung während der Trockenzeit bis zum trockenen Ausgangszustand (Abb. 156 bis Abb. 161).

Der Probekörper PA8 1 zeigt vor der Befeuchtung ein enges Absorptionsspektrum mit einem Maximum von gut 0.9 bei etwas über 800 Hz, welches entlang der logarithmischen Frequenzachse beidseits fast symmetrisch schnell abklingt. Nach der Befeuchtung sinkt das Maximum auf 0.7 und verschiebt sich nach rund 600 Hz. Die Trocknung bewirkt, dass das Absorptionsmaximum schrittweise nach 800 Hz zurückwandert. Im Laufe einiger Stunden bei Trocknung im 20°C warmen Klimaschrank bildet sich zunächst ein ansteigendes Nebenmaximum bei 1100 Hz, welches nach und nach mit dem Hauptmaximum verschmilzt, bis der trockene Ausgangszustand erreicht ist. Bei der Versuchsreihe mit einer Temperatur von 5°C dauert es ein paar Stunden länger bis das Nebenmaximum verschwindet. Die Versuchsreihe bei 32°C verläuft ähnlich wie bei 20°C nur schneller und die Ausbildung des Nebenmaximums ist nicht nachweisbar.

Bohrkern SMA-LA 1 zeigt vor der Befeuchtung ein enges Absorptionsspektrum mit einem Maximum von 0.8 bei fast 1000 Hz, welches entlang der Frequenzachse ähnlich wie das Spektrum vom PA8 1 schnell abklingt. Nach der Befeuchtung sinkt das Maximum auf 0.6 und verschiebt sich nach rund 550 Hz. Die Trocknung bei 20°C bewirkt, dass das Absorptionsmaximum schrittweise zurückwandert und nach 24 Stunden schon die Form des Trockenspektrums erreicht hat. Ein Nebenmaximum wie beim PA8 1 bildet sich nicht aus. Die Versuchsreihen bei 5°C und 32°C verlaufen ähnlich wie bei 20°C, nur entsprechend langsamer, bzw. schneller.

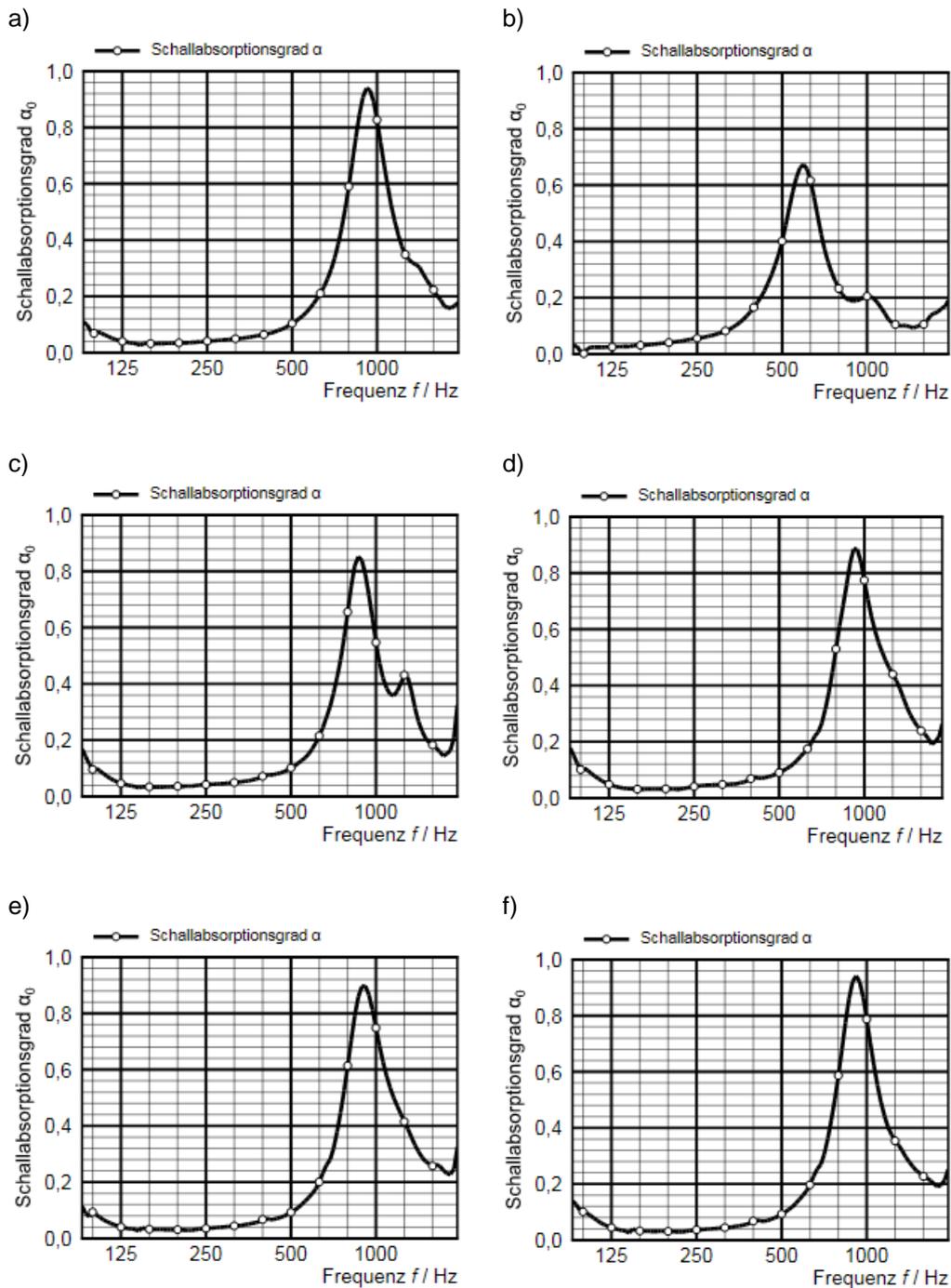
Während des Trocknungsvorgangs erreichen die niedrigen Frequenzen zuerst ihr Ausgangsniveau des Absorptionsgrads vor der Befeuchtung. Je höher die Frequenz, desto

länger dauert es tendenziell, bis der Absorptionsgrad sein Trockenniveau erreicht (siehe *Abb. 155*). Bei allen Experimenten ist das Amplitudenspektrum des Absorptionsgrads bereits bei der Hälfte bis spätestens nach zwei Dritteln der interpolierten Trockenzeit visuell vom Spektrum im trockenen Zustand kaum noch zu unterscheiden. In diesem Zusammenhang sei aber daran erinnert, dass Frequenzen oberhalb von 2000 Hz im verwendeten Impedanzrohr nicht untersucht werden können.

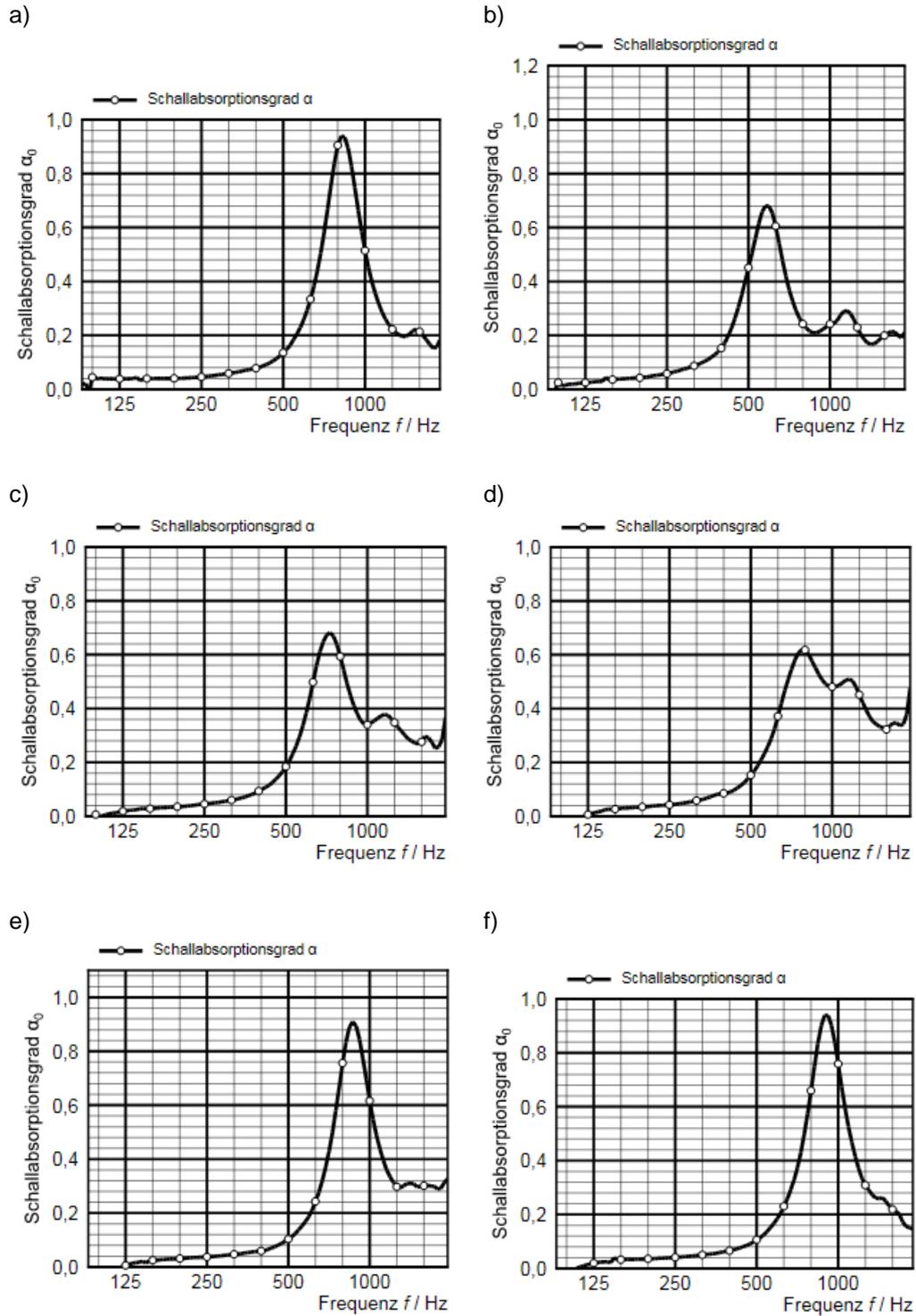


**Abb. 155** Absorptionsgrad  $\alpha$  in Abhängigkeit von der Trocknungszeit während des Trocknungsversuchs mit Probekörper PA8 1 bei 20°C, getrennt betrachtet für Terzen mit Mittenfrequenzen von 315 Hz bis 1600 Hz.

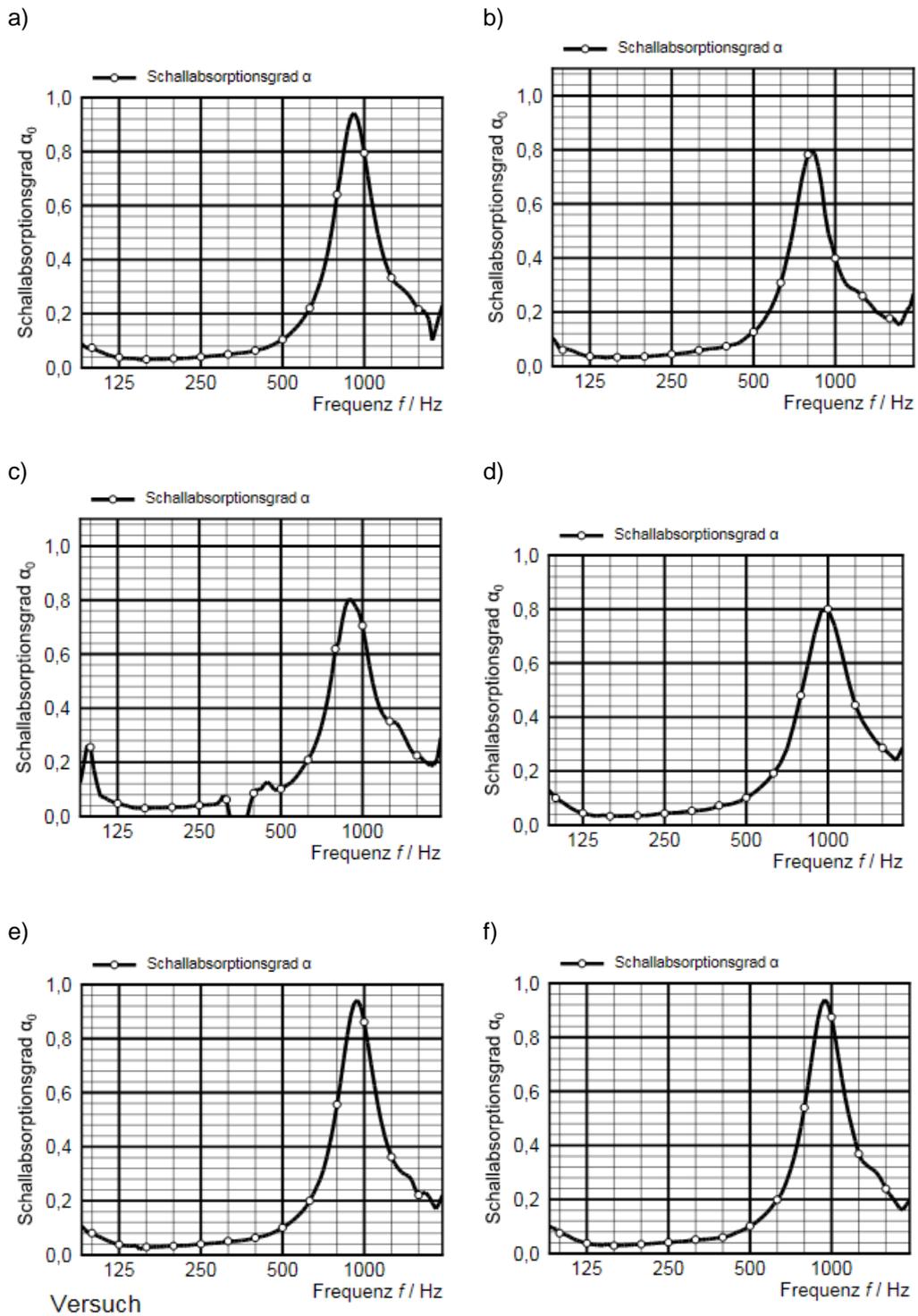
Aus den Veränderungen der Absorptionsspektren in *Abb. 156* bis *Abb. 161* geht hervor, dass mit Befeuchtung der hohlraumreichen Deckschichten nicht nur eine Verringerung des zugänglichen, also akustisch wirksamen Hohlraumgehaltes einhergeht, sondern auch eine Erhöhung des Luftströmungswiderstands aufgrund der Verengung der Porenräume. Das Wasser im Bohrkern verstopft die zugänglichen Poren und reduziert damit temporär das für die Absorption (Mehrfachstreuung) zur Verfügung stehende Porenvolumen, welches während des Trocknungsprozesses nach und nach wieder freigegeben wird. Die Amplitude des Absorptionsmaximums reduziert sich, weil weniger absorbierender Hohlraum zur Verfügung steht. Die Absorptionsmaxima werden durch die Durchfeuchtung breitbandiger und nach tieferen Frequenzen verschoben. Dies hängt mit der durch das geringere und teilweise mit Wasser verstopfte Porenvolumen verursachten geringeren Permeabilität und dadurch erhöhten Luftströmungswiderstand zusammen. Absorptionsmaxima treten normalerweise bei Frequenzen auf, die einem Vielfachen des Verhältnisses der Schallgeschwindigkeit zur Deckschichtdicke entsprechen. Die Schichtdicke ändert sich jedoch nicht oder wird sogar für die Schallwellen effektiv durch das eingedrungene Wasser reduziert. Da die Maxima aber zu tieferen Frequenzen wandern, ist dies ein Hinweis auf einen nicht-lokal reagierenden Absorber, in welchem sich Schallwellen wesentlich auch horizontal innerhalb des stark vernetzten Porenraums ausbreiten können.



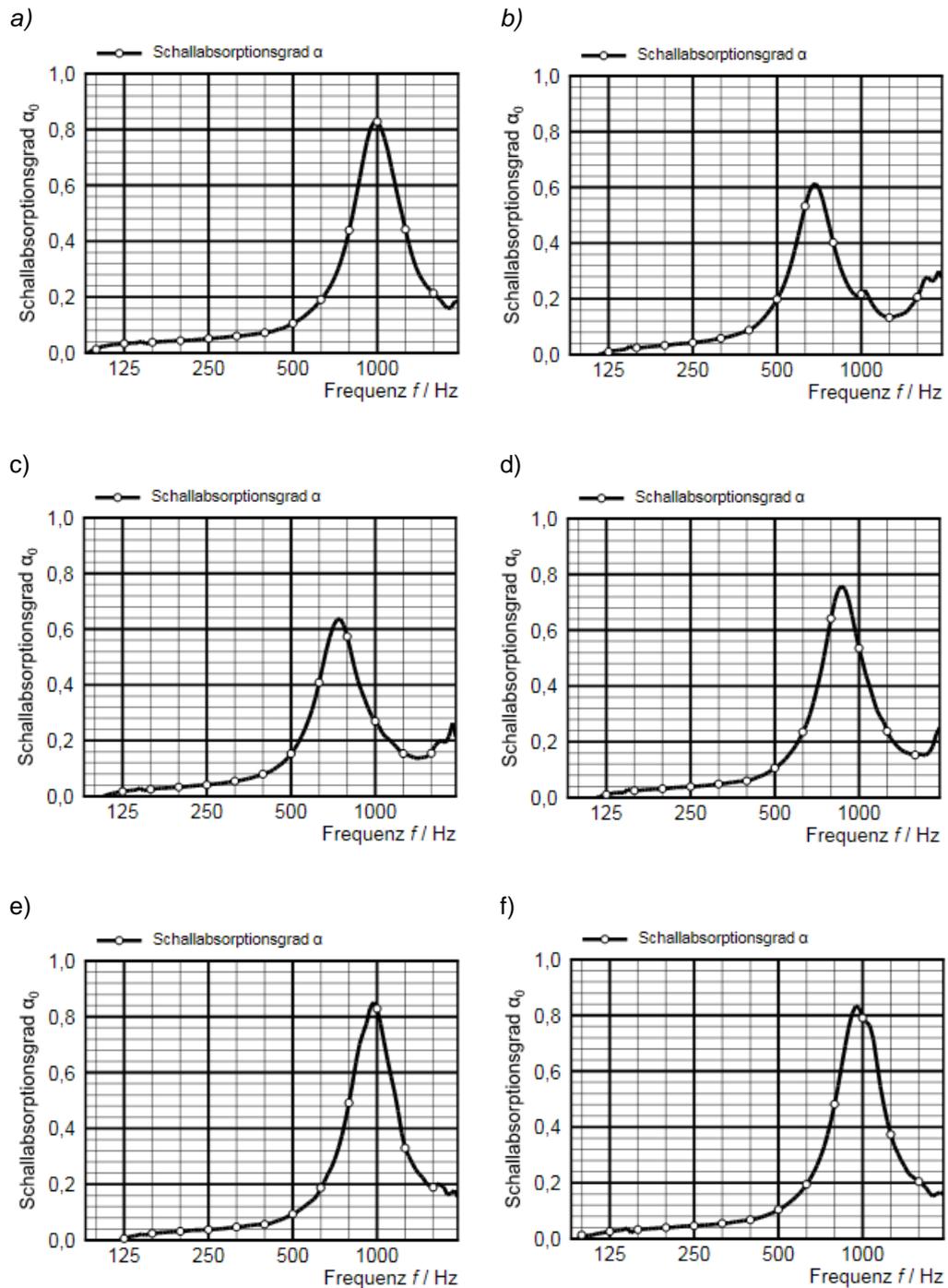
**Abb. 156** Absorptionsgradspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper PA8 1 bei 5°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a), nach der Bewässerung (b) und nach Trocknungszeiten von 4 Stunden (c), 23 Stunden (d), 48 Stunden (e) und 71 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 88 Stunden.



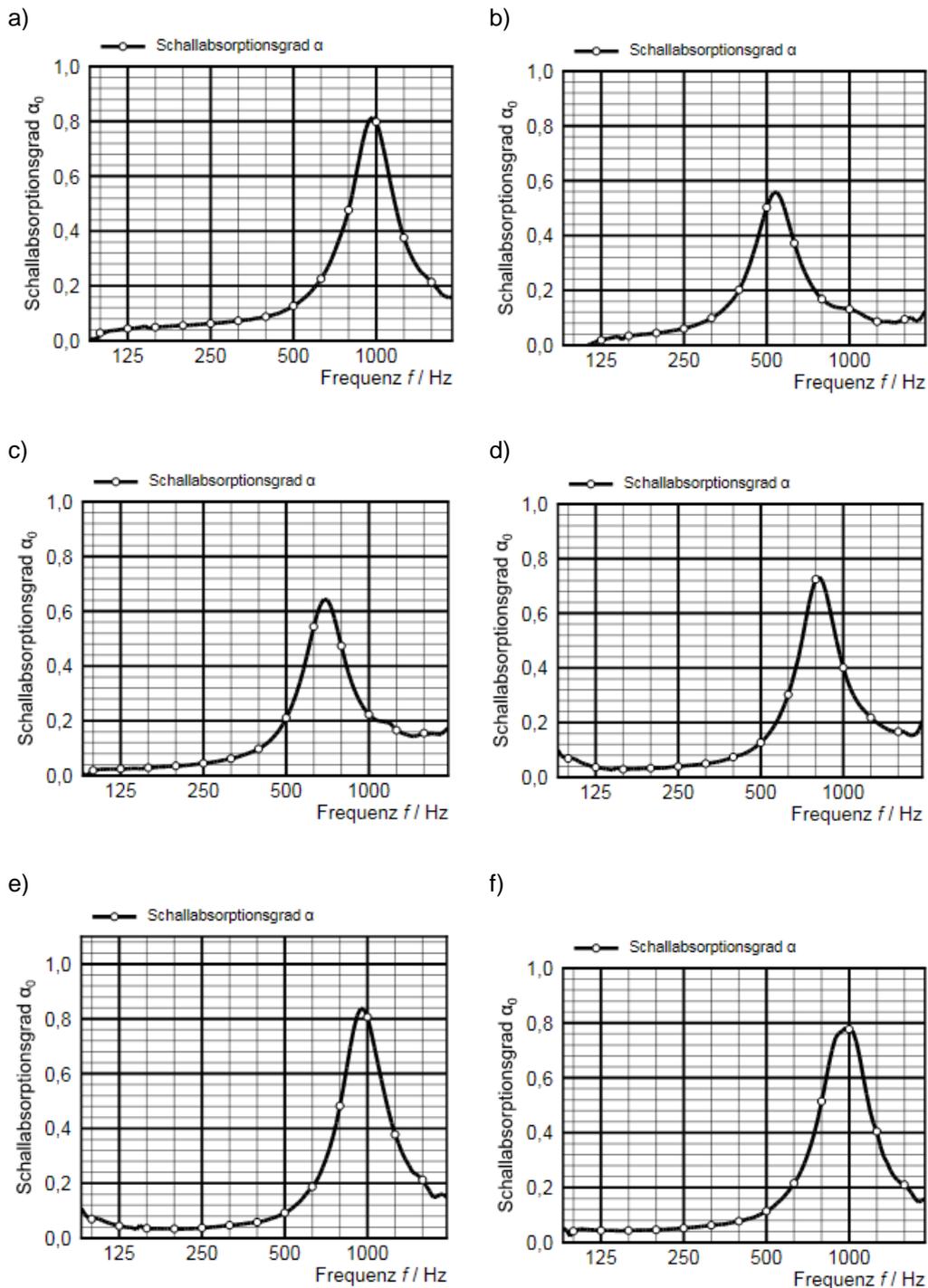
**Abb. 157** Absorptionsgradspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper PA8 1 bei 20°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a), nach der Bewässerung (b) und nach Trocknungszeiten von 2 Stunden (c), 8 Stunden (d), 24 Stunden (e) und 47 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 44 Stunden.



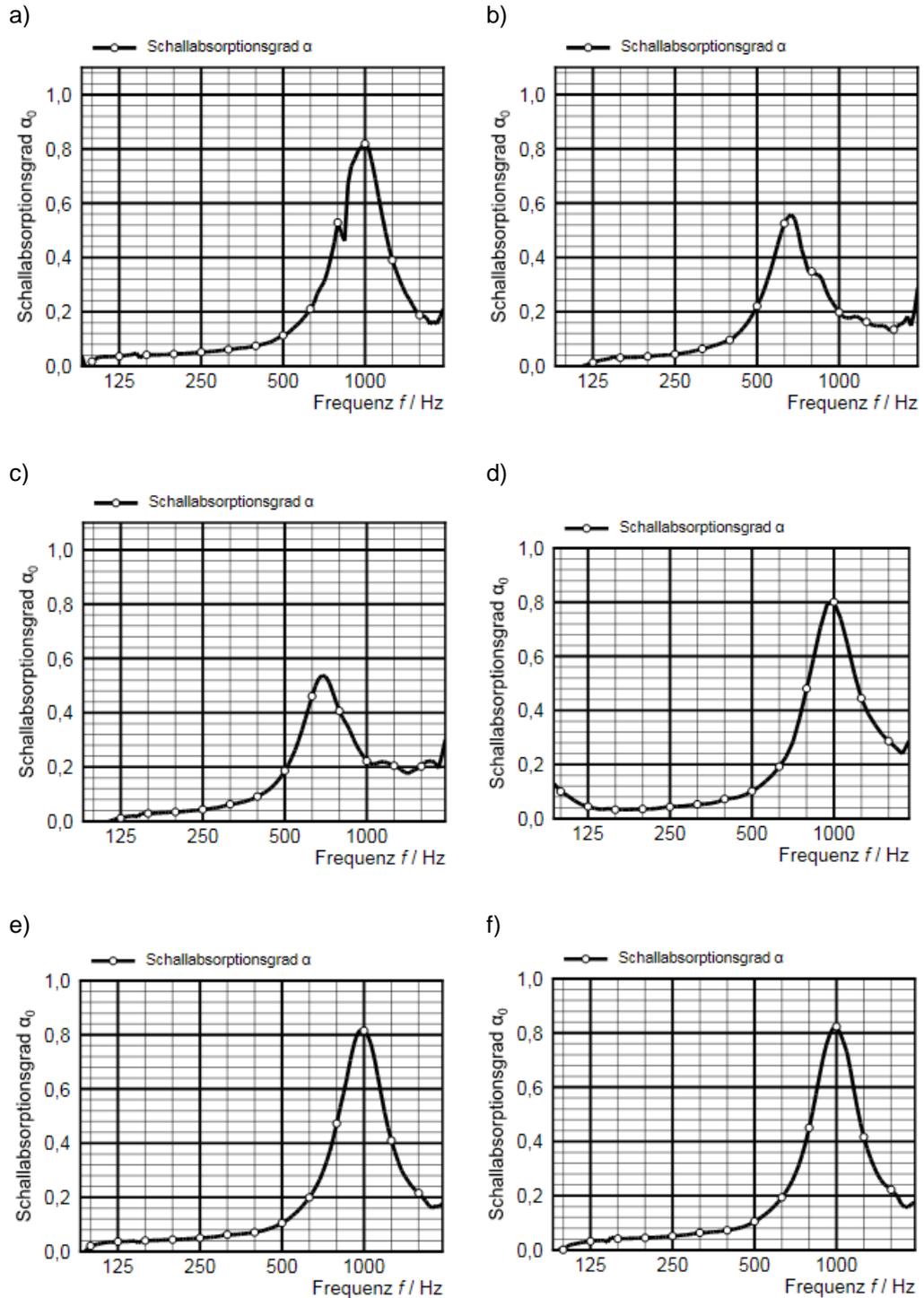
**Abb. 158** Absorptionsgradspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper PA8 1 bei 32°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a) und nach Trocknungszeiten von 1 Stunde (b), 3 Stunden (c), 5 Stunden (d), 21 Stunden (e) und 24 Stunden (f). Die geschätzte Trocknungszeit betrug 18 Stunden.



**Abb. 159** Absorptionsgradspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper SMA-LA 1 bei 5°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a), nach der Bewässerung (b) und nach Trocknungszeiten von 4 Stunden (c), 23 Stunden (d), 48 Stunden (e) und 71 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 64 Stunden



**Abb. 160** Absorptionsgradspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper SMA-LA 1 bei 20°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a), nach der Bewässerung (b) und nach Trocknungszeiten von 2 Stunden (c), 8 Stunden (d), 24 Stunden (e) und 47 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 40 Stunden.



**Abb. 161** Absorptionsgradspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper SMA-LA 1 bei 32°C.

Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a) und nach Trocknungszeiten von 1 Stunde (b), 3 Stunden (c), 5 Stunden (d), 21 Stunden (e) und 24 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 20 Stunden.

## 5.6 Schlussfolgerungen

Die obigen Abbildungen, Tabellen und theoretischen Betrachtungen führen zu folgenden Beobachtungen und Schlussfolgerungen:

- Die Restfeuchte in den Bohrkernen fällt mit der Trockenzeit schnell ab. Ein Exponentialgesetz mit negativem Exponenten beschreibt die Daten hinreichend gut. Wird ein Polynom angepasst, muss man mindestens bis zur dritten Ordnung gehen, um einen besseren Fit zu erhalten.
- Bei kühleren Temperaturen trocknen die Probekörper wesentlich langsamer.
- Der PA 8 trocknet generell etwas langsamer als der SMA-LA.
- Die Bohrkern, die permanent im Probenhalter bleiben konnten, trocknen erheblich langsamer ab, als ihre Gegenstücke, die jeweils in die Probekörper montiert und wieder herausgenommen werden mussten. Offensichtlich verdunstet das Wasser bei den Bohrkernen PA 8 2 und SMA-LA 2 auch über die Zylindermantelflächen, weshalb deren Trocknungszeiten weniger praxisrelevant sein dürften.
- Der ungefähr exponentielle Abfall der Restwassermenge über die Trocknungszeit steht im Einklang mit der theoretischen Erwartung. In der Ingenieurhydrologie gängige Ansätze zu Trocknungsraten als Funktion meteorologischer Parameter können nur die Grössenordnung der Trocknungszeit abschätzen, weil keine (den Autoren bekannte) Korrekturwerte für unterschiedliche Asphaltdeckschichten vorliegen und diese messtechnisch nur mit grossem Aufwand zu bestimmen wären.
- Bauphysikalische Betrachtungen führen auf eine Beschreibung des Verdunstungsvorgangs durch gekoppelte Diffusionsprozesse, insbesondere die Kapillarleitung durch das Netzwerk zwischen den Poren, die Wasserdiffusion an den Porenoberflächen und die Diffusion des Wasserdampfs. Die Lösung dieser Gleichungen im Hinblick auf die Herleitung von realistischen Trocknungszeiten ist weniger aussichtsreich, weil die notwendigen Materialeigenschaften nicht hinreichend genau bekannt sind und deshalb zu erheblichen Unsicherheiten bei der Modellierung führen würden. Zu nennen ist hier die komplexe Porengeometrie und schwer abschätzbare Diffusionskoeffizienten, welche u.a. von der lokalen Temperatur und Feuchte abhängen. Ein Regenereignis führt zu einer tiefenabhängigen Feuchteverteilung in der Deckschicht, die sich während des Trocknens u.a. in Abhängigkeit von meteorologischen Randbedingungen verändert.
- Durch die Befeuchtung weist das Maximum des Absorptionsgradspektrums eine kleinere Amplitude auf als im Trockenzustand und eine Verschiebung zu niedrigeren Frequenzen hin. Gleichzeitig wird das Spektrum breitbandiger.
- Die Verringerung des Hohlraumgehaltes macht sich durch die deutliche Abnahme des Absorptionsgrades im Maximum des Absorptionsspektrums bemerkbar. Die Verlagerung der Frequenzen der Absorptionsmaxima von höheren zu tieferen Frequenzen bei gleichzeitiger Zunahme der Bandbreite hängt mit der Zunahme des Luftströmungswiderstands und mit der Veränderung der Hohlraumstruktur zusammen.
- Während des Trockenvorgangs verändert sich das Absorptionsgradspektrum schrittweise zurück bis zum Trockenzustand. Dabei sind die Veränderungen in den ersten Stunden am grössten. Bei den tiefsten Frequenzen wird das Trockenniveau des Absorptionsgrads zuerst erreicht, die höheren Frequenzen folgen später. Physikalisch ist das plausibel, denn tiefe Frequenzen (grosse Wellenlängen) reagieren eher auf (relativ zur Wellenlänge) nicht zu kleine Wasseransammlungen in den grösseren Porenkanälen durch Streuung, bzw. Absorption, während sie mit (relativ zur Wellenlänge) sehr kleinräumigen Wasserstreuern in den engen Porenräumen nicht wechselwirken. Gleichzeitig werden grössere Wasseransammlungen oder Benetzungsflächen während des Trockenvorgangs immer seltener, weil die grossen Porenkanäle aufgrund ihres geringeren Strömungswiderstands am schnellsten Wasservolumen freisetzen. Die überraschende temporäre Entwicklung von Nebenmaxima in den ersten Stunden nach dem simulierten Regenereignis könnte eine Folge des noch laufenden Eindringvorgangs in tiefere Regionen und engere Porenetzwerke als Folge der Saugspannung sein.
- Im beobachteten Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 1600 Hz ist das Absorptionsgradspektrum nach rund der Hälfte bis zwei Dritteln der jeweiligen Gesamttrock-

kenzeit von seinem Äquivalent im Trockenzustand visuell kaum noch zu unterscheiden. Wegen des exponentiell mit der Zeit abnehmenden Volumens des Restwassers in der Deckschicht ist nach zwei Dritteln der gesamten Trockenzeit nur noch ein kleiner Bruchteil davon übrig. Im untersuchten Frequenzbereich kann man folglich schon Feldmessungen des Absorptionsgrads durchführen, bevor die Deckschicht vollkommen abgetrocknet ist. Das ist ein erheblicher Vorteil für die Messpraxis, da in situ Messungen oft wegen zu kurzer Intervalle zwischen einem erfolgten und einem vorhergesagten Regenereignis verschoben werden müssen. Für andere Messverfahren, für welche die Absorption nur als ein Faktor von mehreren in die eigentliche Messgrösse eingeht, wie SPB- und CPX-Messungen, sollte diese 2/3-Faustregel erst recht gelten.

- Die gemessenen Trocknungsdauern dürften eine obere Schranke für die in der Praxis zu beobachtenden Trocknungsdauern darstellen, denn das beim Experiment zugrunde gelegte Regenereignis war sehr stark. Ausserdem dürften Sonneneinstrahlung und Verwirbelung der dünnen Prandl-Luftschicht in und unmittelbar oberhalb der Deckschicht durch den Strassenverkehr zu z.T. deutlich kürzeren Trocknungsdauern führen.
- Da sich nach 2/3-der gemessenen Trocknungszeit das akustische Absorptionsgradspektrum der Proben, die mit Nummer 1 gekennzeichnet waren, kaum noch veränderte, kann man die experimentell bestimmten Trocknungszeiten in der Praxis um einen Faktor 1/3 jeweils unterschreiten. Diese Proben waren während des Experiments im Probenhalter verblieben und lieferten deshalb zuverlässigere Werte. Wegen der auf der Strasse zusätzlich trocknend wirkenden Faktoren wie Luftverwirbelung und Strahlungswärme sollte diese Empfehlung auch bei etwas höheren Frequenzen bis zu 4000 Hz (die sich messtechnisch mit dem Impedanzrohr nicht erfassen lassen) auch noch näherungsweise gültig sein.

## 6 Empfehlungen

### 6.1 Empfehlungen für die Messpraxis

#### 6.1.1 CPX

- Bei der Interpretation von Terzspektren von CPX-Messungen sollte man berücksichtigen, dass der Schalldruckpegel bei Frequenzen oberhalb des Energiemaximums mit steigender Temperatur deutlich abnimmt, bei einer teilweisen Zunahme der Pegel beim Energiemaximum und tieferen Frequenzen. Das vordere Mikrofon weist eine stärkere Temperaturabhängigkeit auf.
- Die CPX-Schalldruckpegel nehmen mit steigender Lufttemperatur  $T_L$  ab und sollten auf eine Referenztemperatur von 20°C korrigiert werden, indem auf gemessene Pegel ein Korrekturfaktor  $C_T$  addiert wird:

$$\text{Formel 8} \quad C_T = b(T - 20^\circ\text{C})$$

wobei  $b$  der Temperaturkoeffizient in dB/°C ist. Auf Basis der durchgeführten Messungen ergeben sich Korrekturkoeffizienten für Abweichungen der Lufttemperatur von 20°C von 0.05 dB/°C für offenporige und von 0.03 dB/°C für dichte und semidichte Beläge, basierend auf der jeweils gemessenen Lufttemperatur. Die Koeffizienten sind sowohl auf den A-bewerteten Gesamtpegel als auch in gleicher Weise auf die Terz-Schalldruckpegel anwendbar.

- Die zuvor genannten Werte gelten jedoch nur für die einzigen hier untersuchten Reifen-Fahrbahn-Kombinationen und liegen zufälligerweise am unteren Ende der in der Literatur dargelegten Spannweiten von Temperaturkorrekturen für in der Praxis ausgeführte Beläge eines Belagstyps. Eine andere als die im Normentwurf ISO 11819-2 und dessen Fortschreibung genannte Temperaturkorrektur kann deshalb hier nicht empfohlen werden.
- Gleichwohl sollte die Abhängigkeit der Temperaturkorrektur von Belagstypen, aber auch von einzelnen Belägen eines Belagstyps, in der Messpraxis berücksichtigt werden. Temperaturkorrekturen sollten regelmässig, besonders bei Einführung neuer Bauweisen oder Änderungen des bautechnischen Regelwerks, überprüft werden.
- Die Ermittlung oder Überprüfung von Temperaturkorrekturen sollte anhand eines Round Robin Tests einer Anzahl von mindestens sechs ausgeführten Belägen eines Belags- bzw. Mischguttyps durch CPX-Befahrung mit dem Reifen P erfolgen. Die CPX-Messungen müssen dabei pro Belag kontinuierlich mit derselben Messausstattung, insbesondere denselben Reifen, in einem weiten Lufttemperaturbereich innerhalb eines Tages durchgeführt werden. Für diesen Test kommen deshalb nur Tage im späten Frühjahr oder frühen Herbst in Frage. Die Lufttemperatur sollte dabei mindestens einen Bereich von 10°C bis 25°C umfassen.
- Für eine Umrechnung von CPX-Pegeln, die von sehr unterschiedlichen Geschwindigkeitsregimen stammen (z.B. von 50 km/h auf 80 km/h) kann hier keine Empfehlung gegeben werden, denn eine solche Umrechnung müsste frequenz- und reifenabhängig erfolgen und würde eine sehr grosse Datenbasis benötigen, wie sie hier nicht zur Verfügung stand. Es ist zweifelhaft, dass eine solche Umrechnungskorrektur in der Praxis ermittelbar und sinnvoll anzuwenden wäre.
- Zur Korrektur moderater Abweichungen von der Referenzgeschwindigkeit bis zu etwa zehn Prozent, wie sie während der Messfahrt z.B. verkehrsbedingt vorkommen kann, sollte eine einfache Korrekturformel angestrebt werden. Eine Pegelkorrektur  $c_v$  sollte zum gemessenen Schalldruckpegel addiert werden:

$$\text{Formel 9} \quad c_v = B \cdot \lg\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad [dB],$$

wobei  $v_{ref}$  die Referenzgeschwindigkeit ist und  $v$  die Geschwindigkeit während der Messung. Der Geschwindigkeitskoeffizient  $B$  ergibt sich aus der folgenden Tabelle Tab. 29.

**Tab. 29** Empfehlungen für CPX-Geschwindigkeitskoeffizienten *B* in Abhängigkeit von der nominellen Fahrgeschwindigkeit *v*.

<i>v</i> km/h	30	50	80
<i>B</i>	35	32	26

- Die im akustischen Windkanal gemessenen Strömungsgeräusche fallen mit steigender Frequenz ab und liegen jeweils um 15 bis 30 dB unter den geschwindigkeitsabhängigen CPX-Pegeln, wobei dieser Abstand bei den niedrigsten Terzbändern auch am kleinsten ist. Damit sind die Strömungsgeräusche im Prinzip vernachlässigbar, zumindest bei dem Müller-BBM CPX-Anhänger und Zugfahrzeugen von der Grösse eines VW T5. Eine entsprechende Korrektur der Messergebnisse ist nicht notwendig. Bei kleineren Zugfahrzeugen und Messanhängern mit mehr Bodenfreiheit, bei welchen die Messmikrofone der Strömung stärker ausgesetzt sind, ist nicht auszuschliessen, dass Terzbänder um wenige hundert Hertz einen überhöhten CPX-Pegel ausweisen.
- Zwar gibt es eine leichte Zunahme der Schalldruckpegel mit der Profilabtragung der Messreifen, bis diese Zunahme in der Messpraxis aber zum Tragen kommt, sollte der Messreifen ohnehin aufgrund seiner Alterung und der damit einhergehenden Verhärtung ausgemustert worden sein. Dies ist nach spätestens drei Jahren der Fall. Die Messreifen sollten kühl gelagert werden, idealerweise klimatisiert nur wenige Grad Celsius über Null. In jedem Fall sollte vor und nach jeder Messsaison und einmal währenddessen die Shore A Härte gemessen und protokolliert werden.
- Bei dem Messreifen H sind die produktionsbedingten Schwankungen so gross, dass vor dem ersten Einsatz des Reifens die Shore A Härte unbedingt gemessen und protokolliert werden sollte. Eine härteabhängige Pegelkorrektur sollte ins Auge gefasst werden, sobald dafür eine belastbare Datengrundlage existiert.
- Die Ortsposition des GPS-Systems weist einen statistischen Messfehler von gut 10 Metern auf. Dies hängt mit der Anzahl und Position der gerade zur Messzeit am Messort am Himmel stehenden Satelliten zusammen. Die Verortung allein aufgrund von GPS-Positionssignalen ist nicht ratsam, wenn es auf Genauigkeiten in der Gröszenordnung von einem oder wenigen Metern ankommt. Stattdessen sollte auch auf Triggersignale und deutlich messbare Wegmarken zurückgegriffen werden, insbesondere von Fahrbahnübergängen, die sich akustisch oder in der via Infrarotsensor gemessenen Fahrbahntemperatur als Sprungstellen bemerkbar machen. Dies macht die kontinuierliche Messung der Fahrbahntemperatur unerlässlich.
- Eine georeferenzierte Darstellung von CPX-Messdaten benachbarter Fahrstreifen wird begünstigt, wenn die entsprechenden Messdaten innerhalb kurzer Zeitintervalle (z.B. innerhalb einer Stunde) gemessen werden und notfalls in einem Geoinformationssystem (GIS) global um einige Meter verschoben werden können, damit sie mit vorgegebenen Strassenkoordinaten in Einklang stehen.

### 6.1.2 SPB

- Zu Gunsten der Qualität der akustischen Messung und deren Ergebnis sowie einer überschaubaren Messdauer sollte nach Möglichkeit auf eine zu deutliche Vorwarnung einer SPB-Messstelle verzichtet werden. Falls eine Absicherung unerlässlich ist, sollte sie durch zurückgesetzte Warnpylone auf dem Seitenstreifen möglichst wenig Versatz der vorbeifahrenden Fahrzeuge aus der Fahrstreifenmitte verursachen. Falls ein mehrheitlicher Versatz beobachtet wird, sollte er abgeschätzt und zur Korrektur des Ergebnisses verwendet werden. Nicht umgangen werden kann jedoch der Einfluss der unterschiedlichen akustischen Belagsgüte in den Radrollspuren und ausserhalb der Radrollspuren. Letztere kommt dann zum Tragen, wenn sich die Fahrzeuge aufgrund deutlich sichtbarer Absicherung aus der Fahrstreifenmitte versetzt bewegen. Zur Vermeidung eines gravierenden Anstiegs der Messzeit sollte ebenfalls auf eine deutlich sichtbare Absicherung verzichtet werden.
- Empfehlenswert ist eine bessere Schulung des SPB-Messpersonals und verbesserte Qualitätssicherung im Hinblick auf Klassifizierung der Fahrzeugkategorien, Einhalten

der Rollspur und Vermeidung von Störgeräuschen. Beim Ausmessen der Messpunkte, insbesondere der Mikrofonhöhe in Gelände mit erheblicher Topografie, sollte sorgfältiger vorgegangen werden.

- Es sollte eine statistische Filterung der Messergebnisse erfolgen, um extrem schnelle, extrem langsame, extrem leise und extrem laute Fahrzeuge vor der Auswertung zu eliminieren. Eine symmetrische perzentilbasierte Aussortierung von jeweils fünf Prozent der Einzelregistrierungen würde die statistische Aussagekraft einer SPB-Messserie deutlich verbessern.
- Eine bei einer Lufttemperatur  $T_L$  gemessene SPB-Vorbeifahrt wird auf eine Temperatur von 20 °C korrigiert, indem auf gemessene Pegel ein Korrekturfaktor  $C_T$  addiert wird:

$$\text{Formel 10 } C_T = b(T - 20^\circ\text{C})$$

wobei  $b$  der Temperaturkoeffizient in dB/°C ist. Auf Basis der durchgeführten Messungen und aufgrund publizierter internationaler Ergebnisse ergeben sich die in Tab. 30 eingetragenen empfohlenen Korrekturfaktoren für Temperaturabweichungen von 20°C basierend auf der gemessenen Lufttemperatur (nicht Fahrbahntemperatur wie im Anhang 1c):

**Tab. 30** Empfehlungen für SPB-Temperaturkoeffizienten  $b$  in Abhängigkeit von der Fahrzeugkategorie.

Temperaturkorrekturfaktor für Fahrzeugkategorie	$b_{N1}$ dB/°C	$b_{N2}$ dB/°C
offenporige Beläge	0.05	0.04
dichte und semidichte Beläge	0.11	0.08
Betonbeläge	0.07	0.04

- Die Luft- und die Fahrbahntemperatur sollte möglichst kontinuierlich, mindestens aber alle 15 Minuten gemessen werden und die aktuellsten Temperaturwerte sollten für jede Vorbeifahrt zusammen mit den akustischen Messdaten (in einer Datenbank) abgelegt werden. Lufttemperaturen sollten im Einklang mit der ISO 11819-1 auf einem Höhengniveau von 1 m bis 1.5 m über der Fahrbahn neben der Fahrbahn gemessen werden. Die Temperaturkorrektur sollte für jede einzelne Vorbeifahrt erfolgen, nicht einfach nur für die mittlere Modellabweichung für Fahrzeugkategorien N1 und N2.
- Winkelfehler bei der Ausrichtung des Geschwindigkeitsmessgeräts sollte durch sorgfältiges Ausmessen auf maximal 5° beschränkt bleiben. Die freihändige Anwendung von Radarpistolen sollte eher vermieden werden. Messdatensätze mit unrealistischen Geschwindigkeitsmesswerten sollten automatisch identifiziert und von der Auswertung ausgeschlossen werden. Bei der Geschwindigkeitsmessung vorbeifahrender Fahrzeuge sollte mehr Sorgfalt und/oder verbesserte Messtechnik eingesetzt werden.

### 6.1.3 Absorptionsgradmessung

- Bei Untersuchungen des Absorptionsgrads an Bohrkernen hat sich das Verfahren im Impedanzrohr bewährt.
- Die zerstörungsfreie Prüfung mit einem in situ Messsystem auf der Strasse erscheint am geeignetsten den Absorptionsgrad von Deckschichten zu bestimmen, wobei die Messgenauigkeit und der auswertbare Frequenzbereich für eine Kombination aus einem Mikrofon und einem Schallschnellesensor sprechen.
- Bei in situ Messungen des Schallabsorptionsgrads unterhalb von 4000 Hz und oberhalb von 300 Hz sollten Objekte im Fall reflektierender Fahrbahnoberflächen mindestens 1 m, auf absorbierenden Belägen mindestens 0.5 m von der Fahrbahnoberfläche entfernt sein.
- Zur Sicherung der Messgenauigkeit von Druck-Schnelle-Sensoren wird empfohlen, Kalibrierungsmessungen für ein gegebenes Eingangssignal bei unterschiedlichen

Schalleistungsniveaus durchzuführen und die jeweiligen Absorptionsgradspektren zu dividieren, um nichtlineares Verhalten erkennen zu können.

#### 6.1.4 Trocknungszeiten

Für offenporige und semidichte Deckbeläge kann nachfolgende konservative Empfehlung für den frühestmöglichen Zeitpunkt für akustische Messungen nach einem Regenereignis gegeben werden (*Tab. 31*). Diese Zeiten können bei dichten Belägen, tiefen Frequenzen oder Sonneneinstrahlung und hoher Verkehrsdichte erheblich unterschritten werden.

**Tab. 31** *Empfohlene Trocknungszeiten nach einem Regenereignis.*

<b>Belag</b>	<b>Temperatur °C</b>	<b>Trocknungszeit h</b>
Offenporige Deckschichten	5	60
	20	30
Semidichte Deckschichten	32	12
	5	44
	20	26
	32	14

## 6.2 Allgemeine Empfehlungen

### 6.2.1 CPX

Da die Diskussionen um eine Aktualisierung der internationalen CPX-Norm ISO 11819-2 [3] [4] [5] schon seit Jahren im Gange sind und weiterhin anhalten, sollten die Verfahrenshinweise zum CPX-Verfahren im Anhang 1c zum Leitfaden Strassenlärm [15] periodisch aktualisiert werden. Dabei sollte in der nächsten Revision nach wie vor auf die jeweils aktuelle Version der ISO 11819-2, auch wenn es sich dabei nach wie vor um eine Entwurfsversion handelt, verwiesen werden, diese aber um die Empfehlungen aus Abschnitt 6.1.1 und 6.1.4. ergänzt und präzisiert werden.

### 6.2.2 SPB

Der Anhang 1c [15] und teilweise der Anhang 1a [34] zum Leitfaden Strassenlärm sollte aktualisiert werden, wobei die Empfehlungen aus Abschnitt 6.1.2 und 6.1.4 eingearbeitet werden sollten.

### 6.2.3 Absorptionsgradmessung

Die Absorptionsgradmessung ist ein wichtiges Werkzeug zur Bestimmung des akustischen Zustands von Deckschichten und sollte in Zukunft häufiger eingesetzt werden. Dies gilt sowohl für Bohrkernuntersuchungen mit dem Impedanzrohr als auch für die in situ Messung. Der Frequenzgang des Schallabsorptionsgrads gibt auch Auskunft über den Volumenanteil zugänglicher Hohlräume und die akustisch wirksame Schichtdicke der hohlraumreichen Deckschicht. Dessen Messung stellt damit, neben den bautechnischen Labormethoden zur Untersuchung von Bohrkernen oder Marshall Probekörpern, eine akustische und ausserdem zerstörungsfreie Alternative zur Überprüfung des Hohlraumgehalts semidichter und offenporiger Deckschichten dar, die im Rahmen der Eigenüberwachung oder Bauherrenüberwachung der Bauleistung empfohlen werden könnte. Aus Sicht der Forschungsstelle wäre auch denkbar, den Anhang 1c zum Leitfaden Strassenlärm [15] um ein Kapitel zur Absorptionsgradmessung zu erweitern.



## Anhang

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	XL9CPX75009095476
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.*

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

## Glossar

Begriff	Bedeutung
ACMR (+)	<b>Asphalt Concrete Macro Rugueux</b> Makrorauhe, dichte Fahrbahndeckschichten aus Asphaltmischgut mit diskontinuierlicher Siebkurve. Bei erhöhtem Hohlraumgehalt zwischen typischerweise 10 Vol.-% und 16 Vol.-% spricht man von AC MR +
Belagskorrektur $K_b$	Korrekturwert bei der Berechnung des Schallemissionspegels von Strassenverkehrsgereuschen nach StL-86+ zur Berücksichtigung der gegenüber dem Referenzwert abweichenden akustischen Belagsgüte eines Fahrbahnbelags [34] [35] [36] Formelzeichen: $K_b$ Einheit: dB(A)
CPX	<b>Nahfeldmessung (Close Proximity Measurement)</b> Messung der Reifen-Fahrbahn-Gereusche in Abständen von weniger als der doppelten grössten Abmessung des Reifens, also dem doppelten Durchmesser des Reifens. Messverfahren zur direkten Bestimmung der von der akustischen Belagsgüte beeinflussten Rollgereusche [3] [15]
Frequenzbewertung A	Die Frequenzbewertung A (A-Bewertung) ist die gehörbezogene Bewertung des Spektrums eines Gereuschs. 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 Gereuschspektren 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 Gereuschs.
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.
Geschwindigkeitskorrektur $c_v$	Pegelmass zur Korrektur der bei anderen Geschwindigkeiten $v$ als der Nominalgeschwindigkeit $v_{ref}$ gemessenen CPX-Pegel Formelzeichen: $c_v$ Einheit: dB
Geräuschkdauer $t_{10}$	Dauer eines an- und danach wieder abschwelldenden Gereuschs wie es bei der Vorbeifahrt eines einzelnen Fahrzeugs auftritt. Die Geräuschkdauer ist dabei als dasjenige Zeitintervall definiert, innerhalb dessen der Schalldruckpegel des Gereuschs maximal 10 dB unter dem Maximalpegel $L_{max}$ liegt. Formelzeichen: $t_{10}$ Einheit: s
GPS	<b>Global Positioning System</b> Globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde und in der Luft durch den Empfang der Signale von Navigationssatelliten.
in situ	Vor Ort, auf der Strasse, auf dem eingebauten Fahrbahnbelag
PA	<b>Porous Asphalt</b> Sammelbegriff für offenporige Asphaltdeckschichten typischerweise mit Hohlraumgehalten über 16 Vol.-%
Reifen-Fahrbahn-Gereusch (Rollgereusch)	Gereusch, das beim Abrollen des Fahrzeugreifens auf der Fahrbahnoberfläche entsteht (Rollgereusch). Schalldruckpegel und Spektrum des Reifen-Fahrbahn-Gereuschs 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 $\alpha$	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 EP5 wurde ausschliesslich bei senkrechtem Schalleinfall gemessen. Formelzeichen: $\alpha$ , 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- $L_{Aeq,20m}$	Der über eine Streckenlänge von 20 m energetisch gemittelte A-bewertete Schalldruckpegel einer CPX-Messung Formelzeichen: $L_{Aeq,20m}$ Einheit: dB(A)
Schalldruckpegel $L_{max}, L_{AF,max}$	Der während eines zeitlich schwankenden Schallereignisses, z.B. der Vorbeifahrt eines einzelnen Fahrzeugs an einer Messstelle, auftretende höchste Wert des A-bewerteten, mit Zeitkonstante FAST gemessenen Schalldruckpegels. Allgemein: Maximalpegel $L_{max}$ . Formelzeichen: $L_{max}, L_{AF,max}$ Einheit: dB, dB(A)
SDA	<b>Semi-Dichter Asphalt</b> gemäss [14]
Shore Härte	Kennzahl zur Prüfung der Nachgiebigkeit von Elastomeren und gummielastischen Polymeren. Sie ist direkt proportional zur Eindringtiefe eines in das zu prüfende Material gedrückten federbelasteten Stifts aus gehärtetem Stahl. Je nach Form und Abmessung des Stifts unterscheidet man zwischen den Verfahren Shore A, C und D. In EP5 wird das Verfahren Shore A eingesetzt.
SMA, SMA-LA	<b>Splittmastixasphalt</b> (lärmarm) In Deutschland bewährte Bauweise für dichte Fahrbahndeckschichten aus Asphaltmischgut nach ZTV-Asphalt. Bei erhöhtem Hohlraumgehalt (10 Vol.-% bis 16 Vol.-%) wird von „Splittmastixasphalt lärmarm, SMA-LA“ gesprochen.
SPB	Statistische Vorbeifahrtmessung ( <b>Statistical Pass-By Measurement</b> ) Vorbeifahrtmessung einzelner Fahrzeuge des fliessenden Verkehrs und Ermittlung eines Einzahlwerts zur Charakterisierung der von der Strasse ausgehenden Schallemissionen anhand einer statistischer Auswertung der Einzelmessergebnisse [2] [15]
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.
Standardabweichung $\sigma$	Ein Mass für die Streuung der Messwerte um ihren Mittelwert. Formelzeichen: $\sigma$ Einheit: dieselbe wie die Messgrösse
Temperaturkorrektur $C_T$	Pegelmass zur Korrektur der bei anderen Lufttemperaturen $T_L$ als der Bezugslufttemperatur von $T_L = 20^\circ\text{C}$ gemessenen CPX- und SPB-Pegel Formelzeichen: $C_T$ Einheit: dB
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 neben der Strasse 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.

## Literaturverzeichnis

### Gesetze und Verordnungen

- [1] **Lärmschutz-Verordnung** vom 15. Dezember 1986, Stand am 1. August 2010.

### Normen und Richtlinien

- [2] DIN EN ISO 11819-1:2002-05 (2002), „**Akustik – Messung des Einflusses von Strassenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren**“.
- [3] ISO/DIS 11819-2 (2012), „**Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method**“, Layout zur Durchsicht und Prüfung vom 30.08.2012.
- [4] ISO/CD 11819-2 (2000), „**Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method**“, Entwurf, Arbeitsvorlage vom 13.12.2000.
- [5] ISO/CD 3<sup>rd</sup> 11819-2 (2009), „**Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: The close-proximity method**“, Entwurf, Arbeitsvorlage vom 20.04.2009.
- [6] DIN EN ISO 354 (2003), „**Akustik; Messung der Schallabsorption in Hallräumen**“.
- [7] DIN EN ISO 10534-2 (2001), „**Akustik; Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion**“
- [8] DIN EN 29053:1993-05 (1993), „**Akustik; Materialien für akustische Anwendungen; Bestimmung des Strömungswiderstands**“.
- [9] DIN 4108-2:2013-02 (2013), „**Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden- Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz**“.
- [10] DIN 19685 (1997), „**Klimatologische Standortuntersuchungen – Ermittlung der meteorologischen Grössen**“.
- [11] Schweizer Normen Vereinigung SN 59200 (2007), „**Planung und Erstellen von Anlagen für die Liegenschaftsentwässerung**“.
- [12] SN 640350 (2001), „**Oberflächenentwässerung von Strassen – Regenintensitäten**“, Schweizer Normen Vereinigung.
- [13] Bundesamt für Strassen ASTRA (2009), „**Verkehrszähler**“, ASTRA-Richtlinie 13012 (Version 1.05).

### Technische Regeln

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

### Dokumentation

- [15] Bundesamt für Strassen ASTRA und Bundesamt für Umwelt BAFU (2006), „**Leitfaden Strassenlärm – Vollzugshilfe für die Sanierung-, Anhang 1c: Technisches Merkblatt für die Belagsgütemessungen an Strassen**“ (Version vom 31.07.2013).
- [16] Männel, M., (2010), „**Forschungspaket lärmarme Beläge innerorts, TP1 Forschung und Innovation, Forschungsprojekt EP5, Verbesserung der Genauigkeit akustischer Messmethoden: Bearbeitungsvorschlag**“, Müller-BBM Bericht M88 681 / 3 zum Forschungsantrag vom 24. August 2010.
- [17] 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>
- [18] 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>
- [19] Bühlmann, E., Ziegler, T. (2013), „**Temperature effects on tyre/road noise measurements and the main reasons for their variation**“, Proceedings of the 2013 Internoise Congress
- [20] Bühlmann, E., Ziegler, T. (2011), „**Temperature effects on tyre/road noise measurements**“, Proceedings of the 2011 Internoise Congress.
- [21] Beckenbauer, T., Spiegler, P., van Blokland, G., Kuijpers, A., Reinik, F., Huschek, S., Stütze, T., Heerkens, J. (2002), „**Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch**“, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 847, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Deutschland.

- 
- [22] Sandberg, U., Glaeser, K.-P., Ejsmont, J.A., Schwalbe, G. (2008), "**The influence of tyre wear and ageing on tyre/road noise emission and rolling resistance**", Final Report EU Silence Project, Contract N. 516288.
- 
- [23] Balsom, M.H., Nelson, P.M., Summers, C. (2005), "**Comparison of tyre/road noise for a range of surfaces on the A47, A447, A511 and B582 in Leicestershire**", TRL Published Project Report PPR023, TRL Ltd, U.K.
- 
- [24] van Blokland, G.J., (2007), "**Comparison of potential CPX tyres, variability within AVON-A4 and SRTT tyres set**", Report M+P.DWW.07.04.2, 2007, M+P raadgevende ingenieurs bv, Vught, the Netherlands
- 
- [25] Bühlmann, E., Schulze, S., Ziegler, T. (2013), "**Ageing of the new CPX-reference tyres during a measurement season**", Proceedings of the 2013 Internoise Congress
- 
- [26] Oddershede, J., Kragh, J. (2014), "**Changes in noise levels from Standard Reference Test Tyres due to increasing rubber hardness**", Forum Acusticum, Krakau.
- 
- [27] Bundesamt für Strassen ASTRA (2012), "**Fachhandbuch Trasse und Umwelt, Technisches Merkblatt Projektierung, Strassenlärmmittlung im Nationalstrassennetz**", Fachhandbuch ASTRA 23001, Technisches Merkblatt 23001-23003, V3.04.
- 
- [28] Bühlmann, E., van Blokland, G., (2014), "**Temperature effects on tyre/road noise – a review of empirical research**", Forum Acusticum, Krakau.
- 
- [29] Männel, M., (2005), "**Entwicklung eines in-situ Systems zur Messung des komplexen Reflexionsfaktors von Fahrbahnbelägen für den fahrenden Einsatz**", Diplomarbeit, Universität Stuttgart.
- 
- [30] Borgwardt, S., Gerlach, A., Köhler, M., (2000), "**Versickerungsfähige Verkehrsflächen: Anforderungen, Einsatz und Bemessung**", Springer Verlag, Berlin.
- 
- [31] Koch, M. (2013), "**Ingenieurhydrologie, Vorlesungsskript Universität Kassel**"; [http://www.uni-kassel.de/fb14/geohydrologik/Lehre/Hydrologie\\_I/Hydrologie\\_I.html](http://www.uni-kassel.de/fb14/geohydrologik/Lehre/Hydrologie_I/Hydrologie_I.html), recherchiert am 08.08.2014.
- 
- [32] Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1996), DVWK-Merkblatt 238/1996: "**Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen**", ISBN 3—935067-84-4.
- 
- [33] Krus, M. (1995), "**Feuchtetransport- und -speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken**", Dissertation, Universität Stuttgart.
- 
- [34] Bundesamt für Strassen ASTRA und Bundesamt für Umwelt BAFU (2006), "**Leitfaden Strassenlärm –Vollzugshilfe für die Sanierung-, Anhang 1a: Bestimmung von akustischen Belagskennwerten als Grundlage für den Leitfaden Strassenlärm BAFU/ASTRA**" (Version vom 18.12.2006).
- 
- [35] Bundesamt für Umweltschutz (1987), "**Computermodell zur Berechnung von Strassenlärm**", Schriftenreihe Umweltschutz, Nr. 60.
- 
- [36] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1995), "**Strassenlärm: Korrekturen zum Strassenlärm-Berechnungsmodell**", Mitteilungen zur Lärmschutz-Verordnung (LSV), Nr. 6.
-

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Organigramm des Forschungsprojekts „lärmarme Beläge innerorts“ .....	21
Abb. 2 20 m-Mittelwert der CPX-Pegel $L_{Aeq,20m}$ in Abhängigkeit von der Lufttemperatur $T_L$ für beide Mikrofonpositionen, oben: T5 ACMR8, Mitte: T5 ACMR8+, unten: N1 PA8, links: Reifentyp P, rechts: Reifentyp H.....	26
Abb. 3 Terzspektren des CPX-Pegels $L_{Aeq,20m, Terz}$ aller Temperaturen, Reifentyp P, oben: T5 ACMR8, Mitte: T5 ACMR8+, unten: N1 PA8, links: Mikrofon vorne, rechts: Mikrofon hinten.....	27
Abb. 4 Terzspektren des CPX-Pegels $L_{Aeq,20m, Terz}$ aller Temperaturen, Reifentyp H, oben: T5 ACMR8, Mitte: T5 ACMR8+, unten: N1 PA8, links: Mikrofon vorne, rechts: Mikrofon hinten.....	28
Abb. 5 Terzspektren des CPX-Pegels $L_{Aeq,20m, Terz}$ für alle Temperaturen, Reifentyp P, T5 MR8 und N1 PA8, vordere Mikrofonposition.....	29
Abb. 6 Einzelne Terzpegel des CPX-Pegels $L_{A,20m}$ in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, Mikrofon vorne, oben: T5 ACMR8, Mitte: T5 ACMR8+, unten: N1 PA8, links: Reifentyp P, rechts: Reifentyp H.....	30
Abb. 7 Spektrale Temperatur-Koeffizienten, oben: Reifentyp P, unten: Reifentyp H, links: vordere Mikrofonposition, rechts: hintere Mikrofonposition, (MW = arithmetischer Mittelwert).....	31
Abb. 8 Spektrale Temperatur-Koeffizienten in dB/°C, oben: Reifentyp P, unten: Reifentyp H, jeweils vordere und hintere Mikrofonposition.....	32
Abb. 9 Nach dem Vorschlag spektral temperaturkorrigierte Terzspektren des CPX-Pegels $L_{Aeq,20m, Terz}$ für alle Temperaturen, N1 PA8, Mikrofon vorne, Reifen P. Bezugstemperatur für die Korrektur: 20°C. ....	33
Abb. 10 Terzspektren des CPX-Pegels $L_{Aeq,20m, Terz}$ für alle Temperaturen mit der Temperaturkorrektur nach Anhang 1c des Leitfadens Strassenlärm [3], N1 PA8, Mikrofon vorne, Reifen P. Bezugstemperatur für die Korrektur: 20°C.....	33
Abb. 11 Messstrecke Tecknau.....	38
Abb. 12 Detail der Belagsoberfläche.....	38
Abb. 13 Messstrecke Aaretalstrasse mit MR8+ zwischen A und B und MR8 zwischen B und C.....	39
Abb. 14 Messstrecke bei Lausen mit PA8 zwischen A und B und PA11 zwischen B und C.....	39
Abb. 15 Gemittelter Schalldruckpegel $L_{Aeq,20m}$ als Funktion der Geschwindigkeit, Messreifen P und H, Messstrecke bei Tecknau, SMA11.....	40
Abb. 16 Gemittelter Schalldruckpegel $L_{Aeq,20m}$ als Funktion des Logarithmus der Geschwindigkeit, Messreifen P und H, Messstrecke bei Tecknau, SMA11.....	41
Abb. 17 Gemittelter Schalldruckpegel $L_{Aeq,20m}$ als Funktion der Geschwindigkeit zusammen mit drei Umrechnungen auf die Geschwindigkeiten 30, 50 und 80 km/h nach der geltenden Korrekturformel Formel. 2 mit $B=35$ , Messreifen P, Messstrecke bei Tecknau, SMA11.....	42

Abb. 18 Gemittelter Schalldruckpegel $L_{Aeq,20m}$ als Funktion der Geschwindigkeit zusammen mit drei Umrechnungen auf die Geschwindigkeiten 30, 50 und 80 km/h nach der geltenden Korrekturformel Formel. 2 mit $B=35$ , Messreifen H, Messstrecke bei Tecknau, SMA11. ....	42
Abb. 19 „Lokale“ Geschwindigkeitskoeffizienten $B$ für Reifen P, die Referenzgeschwindigkeiten 80, 50 und 30 km/h, getrennt für Mikrofonposition vorne und hinten. ....	43
Abb. 20 „Lokale“ Geschwindigkeitskoeffizienten $B$ für Reifen H, die Referenzgeschwindigkeiten 80, 50 und 30 km/h, getrennt für Mikrofonposition vorne und hinten. ....	43
Abb. 21 A-bewertete Terzpegel $L_{Aeq,20m, Terz}$ als Funktion der Geschwindigkeit $v$ , Messreifen H, Messstrecke bei Tecknau, SMA11 (die Mikrofonaufnahmen vor und hinter dem Reifen wurden gemittelt). ....	44
Abb. 22 Terzpegel $L_{Aeq,20m}$ für 315 Hz bis 1000 Hz als Funktion der Geschwindigkeit $v$ für verschiedene Beläge, Reifen P, links vordere und rechts hintere Mikrofonposition.....	45
Abb. 23 Terzpegel $L_{Aeq,20m}$ für 315 Hz bis 1000 Hz als Funktion der Geschwindigkeit $v$ für verschiedene Beläge, Reifen H, links vordere und rechts hintere Mikrofonposition. ....	47
Abb. 24 Terzpegel 315 Hz als Funktion der Geschwindigkeit, Messwerte schwarz, Modellfit mit aerodynamischen und mechanischen Anteilen und der energetischen Summe, Tecknau SMA11, Reifen P, hintere Mikrofonposition.....	49
Abb. 25 Terzpegel 500 Hz als Funktion der Geschwindigkeit, Messwerte schwarz, Modellfit mit aerodynamischen und mechanischen Anteilen und der energetischen Summe, Tecknau SMA11, Reifen H, hintere Mikrofonposition. ....	49
Abb. 26 Messung im BMW Akustik-Windkanal mit Zugfahrzeug. ....	51
Abb. 27 Anzeige im Windkanal für Luftdruck, Temperatur, Strömungsgeschwindigkeit. .	52
Abb. 28 Messung ohne Zugfahrzeug.....	52
Abb. 29 Deutlicher Dampffaden in laminarer Strömung neben dem Fahrzeuggespann..	53
Abb. 30 Turbulente Strömungsverhältnisse hinter dem Zugfahrzeug bei 30 km/h. ....	53
Abb. 31 Die Unterströmung des Anhängers ist ebenfalls turbulent (30 km/h). ....	53
Abb. 32 Kantengeometrie 1: Verlängerte Schürze an der rechten Vorderkante. ....	54
Abb. 33 Kantengeometrie 1: Detailbild von unten. ....	54
Abb. 34 Kantengeometrie 2: nach vorne gezogene Spitze mit Verrundung nach oben und unten. ....	55
Abb. 35 Kantengeometrie 2: Detailbild von der Seite.....	55
Abb. 36 Kantengeometrie 3: Verrundung der nach unten gerichteten Kante.....	55
Abb. 37 Kantengeometrie 3: Detailbild der Verrundung nach unten. ....	56
Abb. 38 Schmalbandspektrum der Mikrofonposition rechts vorne nah bei allen Geschwindigkeiten.....	56

<i>Abb. 39 Vergleich der Messungen im Windkanal mit und ohne Zugfahrzeug zu einer Messfahrt auf einem ACMR8+ Belag, jeweils bei 80 km/h (Mikrofon rechts, vorne, nah).</i>	57
<i>Abb. 40 Unterschied zwischen linken und rechten Radhaus (vorne, nah).</i>	58
<i>Abb. 41 Unterschied zwischen vorderem und hinterem Mikrofon (rechts, nah).</i>	58
<i>Abb. 42 Unterschied zwischen Mikrofon nah und fern (rechts, vorne).</i>	59
<i>Abb. 43 Unterschied zum kleineren Messreifensatz (rechts, vorne, nah).</i>	59
<i>Abb. 44 Kantenmodifikation 1 (rechts, vorne, nah).</i>	60
<i>Abb. 45 Kantenmodifikation 2 (rechts, vorne, nah).</i>	61
<i>Abb. 46 Kantenmodifikation 3 (rechts, vorne, nah).</i>	61
<i>Abb. 47 Vergleich mit und ohne Zugfahrzeug (rechts, vorne, nah).</i>	62
<i>Abb. 48 Belagskarte des Messabschnitts auf der A5 südlich von Karlsruhe. Die blauen Doppelpfeile markieren die Messstrecken des rechten Fahrstreifens nach Süden auf Zementbeton (links) und dem PA8 (rechts). (Quelle: Regierungspräsidium Freiburg (D)).</i>	65
<i>Abb. 49 Handgerät zur normgerechten Messung der Shore-Härte (links) und Profilmesser (rechts).</i>	66
<i>Abb. 50 Messpunkte für Reifen vom Typ H (links) und Verteilung der Messprofile (rechts).</i>	66
<i>Abb. 51 Messpunkte für Reifen vom Typ P (links), Verteilung der Messprofile (rechts).</i>	67
<i>Abb. 52 Vergleich von Profiltiefe (links) und Shore A Härte (rechts) für das Messreifenensemble vor und nach der Reifenabnutzung.</i>	68
<i>Abb. 53 Frisch geschälter Reifen H mit Längsrillen durch den Schälvorgang und daher unrealistischer Reifenoberfläche.</i>	70
<i>Abb. 54 Messreifen H unmittelbar nach dem Einfahren (rechts), in der geringsten Verschleissstufe (2 mm, links) und ein alter Messreifen nach Ausmusterung aufgrund der Alterung (mittig).</i>	70
<i>Abb. 55 Ortspegelverläufe für den CPX-Pegel <math>L_{A,20m}</math> des P-Reifens auf Asphalt für die Reifen P-1 bis P-6 vor dem Verschleiss (oben) und danach (unten). s: zurückgelegte Distanz.</i>	74
<i>Abb. 56 Ortspegelverläufe für den CPX-Pegel <math>L_{A,20m}</math> des P-Reifens auf Beton für die Reifen P-1 bis P-6 vor dem Verschleiss (oben) und danach (unten). s: zurückgelegte Distanz.</i>	75
<i>Abb. 57 Ortspegelverläufe für den CPX-Pegel <math>L_{A,20m}</math> des H-Reifens auf Asphalt für die Reifen H-1 bis H-6 vor dem Verschleiss (oben) und danach (unten). s: zurückgelegte Distanz.</i>	76
<i>Abb. 58 Ortspegelverläufe für den CPX-Pegel <math>L_{A,20m}</math> des H-Reifens auf Beton für die Reifen H-1 bis H-6 vor dem Verschleiss (oben) und danach (unten). s: zurückgelegte Distanz.</i>	77

<i>Abb. 59 Gemittelter CPX-Pegel <math>L_{Aeq,20m}</math> für den P-Reifen in Abhängigkeit von der Reifenummer, der Profiltiefe und der Shore A Härte.</i>	78
<i>Abb. 60 Gemittelter CPX-Pegel <math>L_{Aeq,20m}</math> für den H-Reifen in Abhängigkeit von der Reifenummer, der Profiltiefe und der Shore A Härte.</i>	79
<i>Abb. 61 Gemittelter CPX-Pegel <math>L_{Aeq,20m}</math> entlang der Messstrecke für den P-Reifen auf Asphalt (links) und Beton (rechts) vor dem Reifenabriebexperiment (Spalte ganz links und dritte Spalte von links) und nach dem Verschleiss (zweite Spalte von links und ganz rechts).</i>	80
<i>Abb. 62 Gemittelter CPX-Pegel <math>L_{Aeq,20m}</math> entlang der Messstrecke für den H-Reifen auf Asphalt (links) und Beton (rechts) vor dem Reifenabriebexperiment (Spalte ganz links und dritte Spalte von links) und nach dem Verschleiss (zweite Spalte von links und ganz rechts).</i>	80
<i>Abb. 63 Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels <math>L_{Aeq,20m, Terz}</math> am Messmikrofon in Fahrtrichtung vor dem Reifen auf Asphalt, gemessen für alle P-Reifen vor der Abnutzung. <math>f_{Terz}</math>: Terzmittenfrequenz in Hz.</i>	81
<i>Abb. 64 Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels <math>L_{Aeq,20m, Terz}</math> am Messmikrofon in Fahrtrichtung hinter dem Reifen auf Asphalt, gemessen für alle P-Reifen vor der Abnutzung. <math>f_{Terz}</math>: Terzmittenfrequenz in Hz.</i>	81
<i>Abb. 65 Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels <math>L_{Aeq,20m, Terz}</math> am Messmikrofon in Fahrtrichtung vor dem Reifen auf Asphalt gemessen für alle P-Reifen nach der Abnutzung. <math>f_{Terz}</math>: Terzmittenfrequenz in Hz.</i>	82
<i>Abb. 66 Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels <math>L_{Aeq,20m, Terz}</math> am Messmikrofon in Fahrtrichtung hinter dem Reifen auf Asphalt gemessen für alle P-Reifen nach der Abnutzung. <math>f_{Terz}</math>: Terzmittenfrequenz in Hz.</i>	82
<i>Abb. 67 Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels <math>L_{Aeq,20m, Terz}</math> am Messmikrofon in Fahrtrichtung vor dem Reifen auf Beton gemessen für alle P-Reifen vor der Abnutzung. <math>f_{Terz}</math>: Terzmittenfrequenz in Hz.</i>	83
<i>Abb. 68 Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels <math>L_{Aeq,20m, Terz}</math> am Messmikrofon in Fahrtrichtung hinter dem Reifen auf Beton gemessen für alle P-Reifen vor der Abnutzung. <math>f_{Terz}</math>: Terzmittenfrequenz in Hz.</i>	83
<i>Abb. 69 Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels <math>L_{Aeq,20m, Terz}</math> am Messmikrofon in Fahrtrichtung vor dem Reifen auf Beton, gemessen für alle P-Reifen nach der Abnutzung. <math>f_{Terz}</math>: Terzmittenfrequenz in Hz.</i>	84
<i>Abb. 70 Mittleres Terzspektrum des Schalldruckpegels <math>L_{Aeq,20m, Terz}</math> am Messmikrofon in Fahrtrichtung hinter dem Reifen auf Beton, gemessen für alle P-Reifen nach der Abnutzung. <math>f_{Terz}</math>: Terzmittenfrequenz in Hz.</i>	84
<i>Abb. 71 Beispiel einer georeferenzierte Darstellung von CPX-Messungen. Die Farbkodierung steht für den gemessenen Schalldruckpegel. Beachte die Abstände der farbigen Pegelkurve von der Messstrecke.</i>	86
<i>Abb. 72 GPS-Koordinaten bei neun Wiederholungsfahrten auf demselben Streckenabschnitt der A1 in der Nähe von Birrhard. Die mit geraden Zahlen durchnummerierten aufeinanderfolgenden Messungen P14 bis P30 wurden jeweils im Abstand von rund 30 Minuten aufgezeichnet.</i>	87
<i>Abb. 73 Absicherung B durch dreieckiges Warnschild 100 m vor der Messstelle und Leitkegel am äusseren Fahrbahnrand.</i>	90

Abb. 74 Absicherung C durch Sperrung des Pannestreifens mit Leuchtsignalen eines Bauhoffahrzeugs 250 m vor dem Messpunkt und Leitkegel am inneren Fahrbahnrand. . 90

Abb. 75 Mikrofonpositionen bei SPB-Messung mit Absicherung durch Kegel. .... 91

Abb. 76 Versatz der Fahrzeuge aus der Fahrstreifenmitte bei Absicherung Typ B. .... 92

Abb. 77 Versatz der Fahrzeuge aus der Fahrstreifenmitte bei Absicherung Typ C. .... 93

Abb. 78 Abweichung zum StL-86+ Modell, Messung ohne Absicherung Typ A..... 94

Abb. 79 Abweichung zum StL-86+ Modell, Messung mit Absicherung Typ B..... 94

Abb. 80 Abweichung zum StL-86+ Modell, Messung mit Absicherung Typ C..... 95

Abb. 81 Messstandort des Ringversuchs an der Aaretalstrasse (roter Punkt)..... 98

Abb. 82 Situation am Messpunkt des Ringversuchs bei der Messung durch die Müller-BBM Schweiz AG. Im Vordergrund das Radarmessgerät zur Geschwindigkeitsmessung, links und rechts die SPB-Messmikrofone, oben die Wetterstation und das Mikrofon der Dauermessstation, die teilweise verdeckt ist. .... 98

Abb. 83 Ausschnitt aus einer Videoaufzeichnung. Am linken Bildrand ist das Stativ der Dauermessstation zu sehen, links davon und ausserhalb des Bildausschnitts liegt der 7.5 m Messpunkt, in der Mitte zwischen Maschendrahtzaun und Fahrbahn steht das 5 m Mikrofon eines Messdienstleisters. .... 99

Abb. 84 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 1. .... 101

Abb. 85 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 2. .... 101

Abb. 86 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 3. .... 102

Abb. 87 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 4. .... 102

Abb. 88 Abweichung zum StL-86+ Modell, Ergebnis von Messteilnehmer Nr. 5. .... 103

Abb. 89 Häufigkeitsverteilung der gemessenen Geschwindigkeiten während des Ringversuchs. Links: Verteilung für Personenwagen, rechts: für Lastwagen. Von oben nach unten gezeigt sind die Ergebnisse für Teilnehmer Nr. 1 (a und b), Nr. 2 (c und d), Nr.3 (e und f), Nr.4 (g und h) und Nr.5 (i und j)..... 104

Abb. 90 Häufigkeitsverteilung der gemessenen  $t_{10}$ -Zeiten während des Ringversuchs. Links: Verteilung für Personenwagen, rechts für Lastwagen. Von oben nach unten gezeigt sind die Ergebnisse für Teilnehmer Nr. 1 (a und b), Nr. 2 (c und d), Nr.3 (e und f), Nr.4 (g und h) und Nr.5 (i und j). .... 106

Abb. 91 Gemittelte Terzspektren der Vorbeifahrtpegel  $L_{AFmax}$  mit Standardabweichungen der Messdaten des Ringversuchs. Links: Spektren für Personenwagen, rechts: für Lastwagen. Von oben nach unten gezeigt sind die Ergebnisse für Teilnehmer Nr. 1 (a und b), Nr. 2 (c und d), Nr.3 (e und f), Nr.4 (g und h) und Nr.5 (i und j). .... 108

Abb. 92 Vorbeifahrt eines Lieferwagens aus einer Videoaufzeichnung. Am linken Bildrand ist das Stativ der Dauermessstation zu sehen, links davon und ausserhalb des Bildausschnitts liegt der 7.5 m Messpunkt, in der Mitte zwischen Maschendrahtzaun und Fahrbahn steht das 5 m Mikrofon eines Messdienstleisters..... 109

Abb. 93 Vorbeifahrt eines Personenwagens aus der Perspektive der Videokamera. Am linken Bildrand ist das Stativ der Dauermessstation zu sehen, links davon und ausserhalb

des Bildausschnitts liegt der 7.5 m Messpunkt, in der Mitte zwischen Maschendrahtzaun und Fahrbahn steht das 5 m Mikrofon eines Messdienstleisters..... 110

Abb. 94 Swiss10-Klassifizierung der Fahrzeuge. Links die Histogramme für Personenwagen, rechts für Lastwagen. Von oben nach unten gezeigt sind die Ergebnisse für Teilnehmer Nr. 1 (a und b), Nr. 2 (c und d), Nr.3 (e und f), Nr.4 (g und h) und Nr.5 (i und j). ..... 111

Abb. 95 Messort an der N4 bei Benken(ZH) in Fahrtrichtung Süden (Winterthur)..... 114

Abb. 96 Messaufbau an der N4 bei Benken(ZH) in Fahrtrichtung Süden (Winterthur).. 114

Abb. 97 Messort an der N22 bei Lausen (BL) in Fahrtrichtung Osten. .... 115

Abb. 98 Messaufbau an der N22 bei Lausen(BL) in Fahrtrichtung Osten (Sissach). .... 115

Abb. 99 Vorbeifahrtpegel der Fahrzeugkategorie N1 in Benken auf dem MR8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Fahrbahntemperatur  $T_{Fb}$  (links) und der Lufttemperatur  $T_L$  (rechts), ohne Aggregation (oben) und mit Aggregation (unten). ..... 117

Abb. 100 Vorbeifahrtpegel der Fahrzeugkategorie N2 in Benken auf dem MR8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Fahrbahntemperatur  $T_{Fb}$  (links) und der Lufttemperatur  $T_L$  (rechts), ohne Aggregation (oben) und mit Aggregation (unten). ..... 118

Abb. 101 Vorbeifahrtpegel der Fahrzeugkategorie N1 in Lausen auf dem PA8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Fahrbahntemperatur  $T_{Fb}$  (links) und der Lufttemperatur  $T_L$  (rechts), ohne Aggregation (oben) und mit Aggregation (unten). ..... 118

Abb. 102 Vorbeifahrtpegel der Fahrzeugkategorie N2 in Lausen auf dem PA8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Fahrbahntemperatur  $T_{Fb}$  (links) und der Lufttemperatur  $T_L$  (rechts), ohne Aggregation (oben) und mit Aggregation (unten). ..... 119

Abb. 103 Spektren des Vorbeifahrtpegels  $L_{AFmax}$  der Fahrzeugkategorie N1 (links) und N2 (rechts) in Benken auf dem MR8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Lufttemperatur nach Aggregation. .... 120

Abb. 104 Spektrale Temperaturkorrekturen  $C_T$  des Vorbeifahrtpegels der Fahrzeugkategorie N1 (links) und N2 (rechts) in Benken auf dem MR8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Lufttemperatur, abgeleitet jeweils aufgrund der Rohdaten (rot), der geschwindigkeitskorrigierten und aggregierten Messdaten (blau) und der nur geschwindigkeitskorrigierten Daten (grün). ..... 121

Abb. 105 Spektren des Vorbeifahrtpegels  $L_{AFmax}$  der Fahrzeugkategorie N1 (links) und N2 (rechts) in Lausen auf dem PA8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Lufttemperatur nach Aggregation. .... 121

Abb. 106 Spektrale Temperaturkorrekturen  $C_T$  des Vorbeifahrtpegels der Fahrzeugkategorie N1 (links) und N2 (rechts) in Lausen auf dem PA8. Gezeigt ist die Abhängigkeit von der Lufttemperatur, abgeleitet jeweils aufgrund der Rohdaten (rot), der geschwindigkeitskorrigierten und aggregierten Messdaten (blau) und der nur geschwindigkeitskorrigierten Daten (grün). ..... 121

Abb. 107 Messstandort des SPB Geschwindigkeitsversuchs an der Aaretalstrasse (roter Punkt)..... 125

Abb. 108 Situation am Messstandort bei der Doppelmessung durch die Müller-BBM Schweiz AG. In der Mitte etwas verdeckt das leicht verdrehte Radarmessgerät, rechts das korrekt orientierte Gerät zur Geschwindigkeitsmessung. Mittig links und rechts die SPB-Messmikrofone, wobei auf jedem Stativ zwei Mikrofone montiert waren. Ebenfalls mittig die beiden Messrechner. .... 125

Abb. 109 Mikrofonaufbau bei der Doppelmessung durch die Müller-BBM Schweiz AG. Im Vordergrund die 7.5 m Mikrofone, im Hintergrund, die 5 m Position. Jeweils links die Mikrofone der Messung mit korrekter Ausrichtung, rechts die SPB-Mikrofone der Messung mit verdrehter Geschwindigkeitsmesstechnik. .... 126

Abb. 110 Die Ausrichtung des Geschwindigkeitsmessgeräts erfolgte mit Hilfe einer Winkelmesseinrichtung (links), die auf einer Holzplatte aufgeschraubt war, welche parallel zur Fahrbahn ausgerichtet wurde, während das Geschwindigkeitsmessgerät nach einem abweichenden Winkel (siehe Aluminiumprofilstange) ausgerichtet wurde (rechts)..... 127

Abb. 111 Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin. .... 129

Abb. 112 Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit verdrehter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin. .... 129

Abb. 113 Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 2°. .... 130

Abb. 114 Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 5°. .... 130

Abb. 115 Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 10°. .... 131

Abb. 116 Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 15°. .... 131

Abb. 117 Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 20°. .... 132

Abb. 118 Auswertung und Vergleich zum StL-86+ Modell, Ergebnis für das Messsystem mit korrekter Orientierung des Geschwindigkeitsmessgeräts zur Fahrbahn hin, aber einer rechnerischen Falschrichtung um 25°. .... 132

Abb. 119 Messaufbau im schallabsorbierenden Raum mit reflektierendem Boden. Die Messsonde mit einem halbierten Windball liegt unterhalb des blauen Lautsprechers. Die Erzeugung des Messsignals und die Aufzeichnung des Schalldrucks und der Schallschnelle erfolgt mit spezieller Messelektronik und einem Laptop (rechts)..... 138

Abb. 120 Messaufbau im schallabsorbierenden Raum mit reflektierendem Boden und Leitkegel. Der Leitkegel näherte sich im Rahmen der Messserie schrittweise der Messsonde an (a) bis d)). .... 138

Abb. 121 Messaufbau im schallabsorbierenden Raum mit reflektierendem Boden und mit 8 cm hohen Pflastersteinen (a) und b)), mit seitlich aufgestellten Pflastersteinen (16 cm hoch, c) und d) und kleinem Tisch (e) und f)). .... 139

Abb. 122 Messaufbau im schallabsorbierenden Raum mit absorbierenden Boden (a) und Leitkegel (b), 8 cm Pflastersteinen (c), 16 cm Pflastersteinen, einem gekippten Tisch e) und dem Aufbau einer künstlichen Wand (f)..... 140

Abb. 123 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf reflektierendem Boden und bei Messung mit einem 50 cm hohen Leitkegel in der jeweils angegebenen Entfernung. .... 142

<i>Abb. 124 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf reflektierendem Boden und bei Messung mit einer Pflastersteinmauer in Höhe von 8 cm in der jeweils angegebenen Entfernung. ....</i>	<i>142</i>
<i>Abb. 125 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf reflektierendem Boden und bei Messung mit einer Pflastersteinmauer in Höhe von 16 cm in der jeweils angegebenen Entfernung. ....</i>	<i>143</i>
<i>Abb. 126 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf reflektierendem Boden und bei Messung mit einer kleinen Wand in Höhe von 50 cm in der jeweils angegebenen Entfernung. ....</i>	<i>143</i>
<i>Abb. 127 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einem 50 cm hohen Leitkegel in der jeweils angegebenen Entfernung. ....</i>	<i>144</i>
<i>Abb. 128 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einer Pflastersteinmauer in Höhe von 8 cm in der jeweils angegebenen Entfernung. ....</i>	<i>144</i>
<i>Abb. 129 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einer Pflastersteinmauer in Höhe von 16 cm in der jeweils angegebenen Entfernung. ....</i>	<i>145</i>
<i>Abb. 130 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einer kleinen Wand in Höhe von 50 cm in der jeweils angegebenen Entfernung. ....</i>	<i>145</i>
<i>Abb. 131 Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Terzfrequenz auf absorbierendem Boden und bei Messung mit einer Wand von 150 cm Höhe in einer Entfernung von 15 cm. ....</i>	<i>146</i>
<i>Abb. 132 Ellipse als Schnitt durch das Rotationsellipsoid und seine Brennpunkte (Wikipedia). Die Verbindungslinien zwischen einem Punkt auf der Ellipse und dem Brennpunkt F1, bzw. dem anderen Brennpunkt (F2) halbieren jeweils den Winkel zwischen diesen beiden sogenannten Brennstrahlen und der Normalen auf die Ellipse. ....</i>	<i>147</i>
<i>Abb. 133 Räumlicher Verlauf der ersten drei Fresnelzonen für verschiedene Frequenzen und die Messkonfiguration mit einem Lautsprecher 1.3 m senkrecht über der Probenoberfläche und 1.29 m oberhalb der Messsonde. Gezeigt sind die Fresnelzonen 1 (blau), 2 (grün) und 3 (rot) für die Frequenzen 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz.....</i>	<i>148</i>
<i>Abb. 134 Durchmesser der Fresnelzonen in Abhängigkeit von der Frequenz für die Messkonfiguration mit einem Lautsprecher 1.3 m senkrecht über der Probenoberfläche und 1.29 m oberhalb der Messsonde. Gezeigt sind die Fresnelzonen von 0.5 bis 5.....</i>	<i>149</i>
<i>Abb. 135 Kalibrationskurven für die beiden P-U-Messsonden. ....</i>	<i>151</i>
<i>Abb. 136 Schallabsorptionsmessung auf vollreflektierendem Untergrund für DEMO KIT (links) und die P-U-Sonde S/N 900249-1 (rechts). Messungen unmittelbar nach den Kalibrierungsmessungen und mit der gleichen Messkonfiguration. ....</i>	<i>151</i>
<i>Abb. 137 Schallabsorptionsmessung vor einer vollständig absorbierenden Wand für das DEMO KIT (links) und die P-U-Sonde S/N 900249-1. ....</i>	<i>152</i>
<i>Abb. 138 Überblick über den Messaufbau (links). DEMO Sonde und die Sonde 200489-1 gegenüberliegend auf dem Boden (rechts). ....</i>	<i>153</i>

<i>Abb. 139 Druckniveaus für verschiedene Quellstärken für das DEMO KIT (unteres Diagramm) und die Sonde 900249-1 (oberes Diagramm).....</i>	<i>154</i>
<i>Abb. 140 Schallschnellen für verschiedene Quellstärken für das DEMO KIT (unteres Diagramm) und die Sonde 900249-1 (oberes Diagramm).....</i>	<i>155</i>
<i>Abb. 141 Schalldruckverhältnis <math>p_{75\%}/p_{25\%}</math> für das DEMO KIT (rot) und die Sonde 900249-1 (schwarz).....</i>	<i>156</i>
<i>Abb. 142 Schallschnelleverhältnis <math>u_{75\%}/u_{25\%}</math> für das DEMO KIT (rot) und die Sonde 900249-1 (schwarz). .....</i>	<i>157</i>
<i>Abb. 143 Asphaltbohrkerne im Probenhalter. ....</i>	<i>160</i>
<i>Abb. 144 Probekörper des Experiments zum Trocknungsverhalten. Gezeigt sind SMA-LA 2 (links oben), SMA-LA 1 (links unten), PA 2 (rechts oben) und PA 1 (rechts unten). .....</i>	<i>160</i>
<i>Abb. 145 Impedanzrohr zur Messung des akustischen Absorptionsgrads. Lautsprecher oben im Gehäuse, die Öffnungen rechts nehmen Messmikrofone auf, der Probekörper ist unten angeschraubt. ....</i>	<i>161</i>
<i>Abb. 146 Umwickelter Bohrkern vor der Beregnung (links), Skizze (mittig) und Foto (rechts) des Versuchsaufbaus zur Beregnung.....</i>	<i>162</i>
<i>Abb. 147 Probekörper im Klimaschrank. ....</i>	<i>162</i>
<i>Abb. 148 Gesamtmasse des Probekörpers PA 8-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 20°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben. ....</i>	<i>163</i>
<i>Abb. 149 Gesamtmasse des Probekörpers PA 8-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 32°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben. ....</i>	<i>164</i>
<i>Abb. 150 Gesamtmasse des Probekörpers PA 8-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 5°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben. ....</i>	<i>164</i>
<i>Abb. 151 Gesamtmasse des Probekörpers SMA-LA-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 20°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben. ....</i>	<i>165</i>
<i>Abb. 152 Gesamtmasse des Probekörpers SMA-LA-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 32°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben. ....</i>	<i>165</i>
<i>Abb. 153 Gesamtmasse des Probekörpers SMA-LA-1 während der Trocknungsphase bei einer Temperatur von 5°C. Trockenmasse und Anfangsmasse nach Befeuchtung sind durch rote Messpunkte hervorgehoben. ....</i>	<i>166</i>
<i>Abb. 154 Verdunstungsrate nach der Formel von Haude für kurzes Gras als Funktion der Temperatur.....</i>	<i>169</i>
<i>Abb. 155 Absorptionsgrad während des Trocknungsversuchs mit Probekörper PA8 1 bei 20°C, getrennt betrachtet für Terzen mit Mittenfrequenzen von 315 Hz bis 1600 Hz. ...</i>	<i>172</i>
<i>Abb. 156 Absorptionsspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper PA8 1 bei 5°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a), nach der Bewässerung (b)</i>	

*und nach Trocknungszeiten von 4 Stunden (c), 23 Stunden (d), 48 Stunden (e) und 71 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 88 Stunden. .... 173*

*Abb. 157 Absorptionsspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper PA8 1 bei 20°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a), nach der Bewässerung (b) und nach Trocknungszeiten von 2 Stunden (c), 8 Stunden (d), 24 Stunden (e) und 47 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 44 Stunden. .... 174*

*Abb. 158 Absorptionsspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper PA8 1 bei 32°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a) und nach Trocknungszeiten von 1 Stunde (b), 3 Stunden (c), 5 Stunden (d), 21 Stunden (e) und 24 Stunden (f). Die geschätzte Trocknungszeit betrug 18 Stunden. .... 175*

*Abb. 159 Absorptionsspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper SMA-LA 1 bei 5°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a), nach der Bewässerung (b) und nach Trocknungszeiten von 4 Stunden (c), 23 Stunden (d), 48 Stunden (e) und 71 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 64 Stunden. .... 176*

*Abb. 160 Absorptionsspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper SMA-LA 1 bei 20°C. Gezeigt sind die Spektren vor der Bewässerung (a), nach der Bewässerung (b) und nach Trocknungszeiten von 2 Stunden (c), 8 Stunden (d), 24 Stunden (e) und 47 Stunden (f). Die Trocknungszeit betrug 40 Stunden. .... 177*

*Abb. 161 Absorptionsspektren während des Trocknungsversuchs mit Probekörper SMA-LA 1 bei 32°C. .... 178*

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Temperaturkoeffizienten für CPX-Messungen in dB/°C. ....	32
Tab. 2	Gegenüberstellung Gesamtpegel-Korrektur nach Norm und spektral Norm 0.05: Korrektur nach [3] mit 0.05 dB/°C, Norm 0.03: Korrektur nach [4] mit 0.03 dB/°C. ....	34
Tab. 3	Messtrecken für die CPX-Messungen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten; Eignung bezieht sich auf CPX-Messungen als Funktion der Lufttemperatur $T$ und der Geschwindigkeit $v$ . ....	38
Tab. 4	Zeitraum und Witterungsbedingungen (Lufttemperatur $T_L$ und Fahrbahntemperatur $T_{Fb}$ ). ....	40
Tab. 5	Reifenspezifisches Spektrum der mechanischen Geräuschanregung mit der Fahrgeschwindigkeit $v_{anr}$ bei bestimmten Terzfrequenzen $f_{Terz}$ . ....	48
Tab. 6	Geschwindigkeitskoeffizienten als Funktion der Fahrgeschwindigkeit $v$ . ....	50
Tab. 7	Profiltiefen und Shore Härten des Messreifenensembles. ....	69
Tab. 8	Luft- und Fahrbahntemperaturen $T_L$ , $T_{Fb}$ während der Messungen. ....	71
Tab. 9	Zeitraum und Witterungsbedingungen ( $T_L$ =Lufttemperatur, $T_{Fb}$ =Fahrbahntemperatur). ....	91
Tab. 10	SPB-Messergebnisse Sichtbarkeit. $t_{mess}$ : Messdauer, $v_{N1}$ $v_{N2}$ : Mittelwerte und Standardabweichung der Fahrgeschwindigkeiten für die Fahrzeugkategorien N1 und N2, $Kb_{N1}$ $Kb_{N2}$ : Mittelwerte und Standardabweichung der $Kb$ -Werte für N1 und N2. ....	94
Tab. 11	Teilnehmer am SPB-Ringversuch, Messdatum und Wetterdaten. Lufttemperatur $T_{Luft}$ , Windgeschwindigkeit $v_{Wind}$ . ....	99
Tab. 12	Eingesetzte Messausrüstung der Versuchsteilnehmer. ....	100
Tab. 13	Zusammenfassung der Messergebnisse (Anzahl der Fahrzeuge, $L_{Aeq}$ = Pegelmittelwert, $Kb$ = $Kb$ -Wert, $L_{Amax}$ =Maximalpegel). ....	100
Tab. 14	Statistische Auswertung der Geschwindigkeitsmessungen ( $v_d$ = Durchschnittsgeschwindigkeit, $\sigma_v$ = Standardabweichung, $v_{min}$ = minimale Geschwindigkeit, $v_{max}$ = maximale Geschwindigkeit). ....	105
Tab. 15	Statistische Auswertung der $t_{10}$ -Zeiten ( $t_d$ = durchschnittliche $t_{10}$ -Zeit, $\sigma_t$ = Standardabweichung, $t_{min}$ = minimale $t_{10}$ -Zeit, $t_{max}$ = maximale $t_{10}$ -Zeit). ....	107
Tab. 16	Statistische Auswertung der Videoaufzeichnung. ....	110
Tab. 17	Messzeiten und Temperaturen der SPB-Messreihen ( $T_L$ =Lufttemperatur, $T_{Fb}$ =Fahrbahntemperatur). ....	116
Tab. 18	Temperaturkoeffizienten $C_T$ , basierend auf Lufttemperatur $T_L$ und Fahrbahntemperatur $T_{Fb}$ für die Fahrzeugkategorien N1 und N2 aus den SPB-Messungen in Lausen und Benken. ....	119
Tab. 19	SPB-Temperaturkorrekturkoeffizienten. ....	124
Tab. 20	Messdatum und Klimadaten während der SPB-Geschwindigkeitsmessung (Lufttemperatur $T_L$ , Fahrbahntemperatur $T_{Fb}$ und Windgeschwindigkeit $v_{Wind}$ ). ....	127

<i>Tab. 21 Parallel eingesetzte Messausrüstung.....</i>	<i>127</i>
<i>Tab. 22 Einfluss des Winkelfehlers auf Geschwindigkeitsmessungen und Kb-Werte. .</i>	<i>128</i>
<i>Tab. 23 Durchmesser der ersten Fresnelzone für verschiedene Frequenzen. ....</i>	<i>149</i>
<i>Tab. 24 Bohrkern für das Trocknungsexperiment. Das Gewicht wurde hier bei 20 C° gemessen. ....</i>	<i>160</i>
<i>Tab. 25 Trocknungsdauern der Probekörper bei unterschiedlichen Temperaturen.....</i>	<i>166</i>
<i>Tab. 26 Wasserverlust während der Absorptionsgradmessungen bei 20°C in Gramm.</i>	<i>167</i>
<i>Tab. 27 Haude-Faktoren <math>f_{Hd}</math> für die Tagesverdunstung von kurzem Gras nach DIN 19685. ....</i>	<i>168</i>
<i>Tab. 28 Vergleich der beobachteten Verdunstungsrate mit der Haude-Formel.....</i>	<i>169</i>
<i>Tab. 30 Empfehlungen für CPX-Geschwindigkeitskoeffizienten B in Abhängigkeit von der nominellen Fahrgeschwindigkeit v. ....</i>	<i>182</i>
<i>Tab. 31 Empfehlungen für SPB-Temperaturkoeffizienten b in Abhängigkeit von der Fahrzeugkategorie. ....</i>	<i>183</i>
<i>Tab. 32 Empfohlene Trocknungszeiten nach einem Regenereignis. ....</i>	<i>184</i>
<i>Tab. 33 Verwendete Messmittel für SPB-Messungen. ....</i>	<i>187</i>
<i>Tab. 34 Verwendete Messmittel für CPX-Messungen.....</i>	<i>187</i>
<i>Tab. 35 Verwendete Messmittel für die Messung des Schallabsorptionsgrads in situ.</i>	<i>188</i>

# 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: 11.12.2015

#### Grunddaten

Projekt-Nr.: ASTRA 2010/014

Projekttitel: EP5: Verbesserung der Genauigkeit akustischer Messmethoden

Enddatum: 31.12.2014

#### Texte

Zusammenfassung der Projektergebnisse:

Die Genauigkeit verschiedener akustischer Verfahren zur Charakterisierung des Strassenlärms sollte im Hinblick auf Methodik und praktische Durchführung verbessert werden. Sowohl bei der Close-Proximity Methode (CPX), der statistischen Vorbeifahrtmethode (SPB) als auch der Messmethode für den Schallabsorptionsgrad haben sich signifikante Verbesserungsmöglichkeiten ergeben. CPX-Schalldruckpegel hängen von Temperatur und Geschwindigkeit ab. Beide Einflussgrößen wirken sich jedoch je nach Schallfrequenz unterschiedlich stark aus. Zur Umrechnung von CPX-Pegeln auf eine Referenztemperatur und eine Referenzgeschwindigkeit werden konkrete Formeln angegeben.

Windkanalmessungen haben gezeigt, dass die Abschattung des CPX-Anhängers durch das Zugfahrzeug die Fahrtwindgeräusche so weit reduziert, dass sie akustisch vernachlässigbar sind.

Shore-Härte und Profiltiefe der CPX-Messreifen beeinflussen das Messergebnis und damit die Vergleichbarkeit von Messungen. Die alters- und gebrauchsbedingte Verhärtung der Reifen führt jedoch im Vergleich zur Verringerung der Profiltiefe durch Abnutzung zu deutlich grösseren Abweichungen der Messergebnisse. Letztere ist innerhalb der Gebrauchsdauer der Reifen vernachlässigbar. Sowohl die produktionsbedingten Schwankungen der Shore Härte (A) als auch die lebensdauer- und gebrauchsbabhängige Verhärtung erfordern dagegen eine sorgfältige Wareneingangskontrolle, Lagerung und Betriebsüberwachung der Reifen.

Die GPS basierte Verortung von CPX-Messungen kann technologiebedingt innerhalb kurzer Zeit zu systematischen Abweichungen der registrierten Positionen von bis zu gut zehn Metern führen. Die Ergänzung der Positionsbestimmung durch manuelle Triggerng anhand von Weg- und Landmarken während der Messfahrt und eine Nachführung der Koordinaten auf Basis digitaler Karten ist unerlässlich.

Zur Verbesserung bzw. Sicherstellung der Reproduzier- und Vergleichbarkeit der Ergebnisse von SPB-Messungen ist bei der Messdurchführung darauf zu achten, dass nur Fahrzeuge, die den Radrollspuren folgen, ausgewertet werden. Eine sichtbare Vorwarnung an der Messstelle führt zu einer erhöhten Anzahl von Fahrten ausserhalb der Radrollspuren, wodurch sich die Messzeit erheblich erhöht.

Für Fahrzeugauswahl und -klassifizierung, Vermessung der Mikrofonpositionen und die Ermittlung der Vorbeifahrtgeschwindigkeit werden Anforderungen beschrieben, die dazu dienen, interindividuelle Ergebnisdifferenzen zwischen Messteams zu minimieren. Mit Hilfe systematischer SPB-Wiederholungsmessungen in einem weiten Lufttemperaturbereich wurden belagsabhängige Temperaturkorrekturen für die Fahrzeugklassen Personenkraftwagen und Lastwagen bestimmt.

Für die Bestimmung des Schallabsorptionsgrads von Bohrkernen als Funktion der Frequenz hat sich das Impedanzrohrverfahren bewährt. Die zerstörungsfreie in situ Prüfung auf der Fahrbahnoberfläche ist möglich und praktikabel. Aufgrund der Vielfalt und des grossen Wertebereichs der in der Praxis vorkommenden Absorptionsgrade und des auszuwertenden Frequenzbereichs ist der Einsatz einer Kombination aus Schalldruckaufnehmer und Schallschnellesensor sinnvoll. Schallreflektierende Objekte müssen im Fall dichter Deckbeläge mindestens 1 m, auf hohlräumreichen Belägen mindestens 0.5 m vom Messpunkt auf der Fahrbahnoberfläche entfernt sein. Zur Sicherstellung der Messgenauigkeit sind Kalibrierungsmessungen mit einem gegebenen Messsignal bei unterschiedlichen Schalleistungspegeln durchzuführen. Die sich jeweils ergebenden Absorptionsgradspektren dürfen bis auf eine gegebene Schranke nicht voneinander abweichen.

Akustische Messungen dürfen nur auf ausreichend trockenen Fahrbahnbelägen durchgeführt werden. Die erforderlichen Trocknungszeiten nach einem Regenereignis werden auf Basis von Labormessergebnissen, empirischen Formeln und bauphysikalischen Überlegungen für offene und semiporöse Deckschichten als Funktion der Lufttemperatur angegeben.



Zielerreichung:

Die im Forschungsantrag skizzierten methodischen und messpraktischen Fragestellungen zu CPX-, SPB- und Absorptionsgradmessungen und zu den Fahrbahntrocknungszeiten wurden systematisch untersucht. Dabei wurden, wie vorgesehen, qualitativ hochwertige und umfangreiche Serien von Messdaten akquiriert und analysiert. Dies führte zu wichtigen neuen Erkenntnissen und praxistauglichen Verbesserungsvorschlägen, die je Verfahren beschrieben werden. Dabei wird nach Empfehlungen für die Messpraxis und für den Vollzug von Messvorschriften durch den Auftraggeber unterschieden. Ein auf der Anwendung eines akustischen Rollenprüfstandes basierendes Kalibrierverfahren für CPX-Anhänger konnte entgegen den Erwartungen mangels Verfügbarkeit solcher Prüfstände nicht realisiert werden. Die Umsetzung der Empfehlungen wird Qualitätsverbesserungen in der Durchführung und Auswertung von Messungen zur Bestimmung der akustischen Belagsgüte zur Folge haben. Sie können unmittelbar in die Regelsetzung einfließen.

Folgerungen und Empfehlungen:

CPX-Methode: Geschwindigkeitsbedingte Pegelschwankungen sind bei Abweichungen von bis zu  $\pm 10\%$  von der Nominalgeschwindigkeit mit einem Koeffizienten B von 35, 32 und 26 für Nominalgeschwindigkeiten von 30, 50 bzw. 80 km/h auszugleichen, unabhängig von der Bauweise. Eine frequenzabhängige Temperatur- und Geschwindigkeitskorrektur ist nicht erforderlich.

Für eine ausreichende Unterdrückung störender Fahrtwindgeräusche sind Zugfahrzeuge von der Grösse eines Kleintransporters, full-size oder Mittelklasse SUVs zu empfehlen.

Die Shore A Härte der verwendeten Messreifen P und H ist mit dem beschriebenen Procedere nachzuweisen. Der Shore A Wert muss für jeden Reifen P kleiner oder gleich 64 sein.

Die GPS basierte Verortung von CPX-Messungen muss durch manuelle Triggering von Wegmarken ergänzt und durch eine Nachführung der Koordinaten auf Basis digitaler Karten bereinigt werden.

SPB-Methode: Zur Gewährleistung der Spurtreue der vorbeifahrenden Fahrzeuge sollte auf eine deutlich sichtbare Absicherung der Messstelle verzichtet werden. Durch Instruktion des Messpersonals bezüglich Messaufbau, Klassifizierung von Fahrzeugen und statistische Auswertung der Messung kann eine Qualitätsverbesserung erzielt werden. Handgeführte Geräte für die Geschwindigkeitsmessung sind zu vermeiden. Lufttemperaturbedingte Abweichungen der Vorbeifahrtpegelwerte sind für offenporige Beläge, dichte und semidichte Asphaltpflaster sowie Betondecken mit  $0.05 / 0.11 / 0.07 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  für die Fahrzeugkategorie N1 und mit  $0.04 / 0.08 / 0.04 \text{ dB/}^\circ\text{C}$  für N2 auf die Referenztemperatur zu korrigieren.

Absorptionsgradmessung: Für in situ Messungen empfehlen sich pu-Sonden. Das entwickelte Kalibrierverfahren vergrössert den Wertebereich messbarer Absorptionsgrade. Reflektierende Objekte in der Nähe der Messstelle müssen einen Mindestabstand von 1 m bei dichten und von 0.5 m bei semidichten und offenporigen Belägen einhalten. Nach Regenereignissen sind in Abhängigkeit von der Lufttemperatur vor Messbeginn Zeiten für die Trocknung der Deckschicht von 12 bis 60 Stunden bei offenporigen und von 14 bis 44 Stunden bei semidichten Belägen einzuplanen.

Publikationen:

Es sind Publikationen geplant, die aber noch konkretisiert und mit dem ASTRA abgestimmt werden müssen.

Der Projektleiter/die Projektleiterin:

Name: Beckenbauer

Vorname: Thomas

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

Unterschrift des Projektleiters/der Projektleiterin:



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

### Formular Nr. 3: Projektabschluss

#### Beurteilung der Begleitkommission:

##### Beurteilung:

Das Hauptziel des Forschungsprojektes - die Genauigkeit der akustischen Belagsmessungen (CPX, SPB und Absorptionsgrad) zu verbessern - wurde erreicht.

CPX: Die im Rahmen des Forschungsprojektes ermittelten Korrekturwerte für die Temperatur bei dichten und semi-dichten Belägen von 0.03 dB(A)<sup>°C</sup> und 0.05 dB(A)<sup>°C</sup> für dichte Beläge sind wesentlich tiefer als die üblicherweise in der Schweiz und im Ausland verwendeten Korrekturwerte von ca. 0.10 dB(A)<sup>°C</sup>. Der Einfluss des Zugfahrzeuges auf den CPX-Anhänger scheint vernachlässigbar, solange das Zugfahrzeug nicht zu klein ist. Weitere Abklärungen wären hingegen bei der Härte des Gummis der zu verwendenden Reifen sinnvoll.

SPB: Bei den Messungen wirkt sich die Signalisierung der Messstelle auf das Verhalten der Verkehrsteilnehmers aus, was wiederum die Qualität der Lärmessungen beeinträchtigt. Eine statistische Nachbearbeitung der Daten basierend auf den Perzentilen wird empfohlen. Korrekturwerte für die Lufttemperatur wurden vorgeschlagen. Der Winkel für die Geschwindigkeitsmessungen darf maximal 5° betragen und der Einsatz von Radarpistolen ist zu vermeiden.

Absorptionsgrad: Es dürfen sich keine Objekte im Abstand von weniger als 1.0m bei reflektierenden Fahrbahnoberflächen und weniger als 0.5m bei absorbierenden Belägen befinden.

Generell wurden auch Empfehlungen für die Wartezeiten (Trocknungszeiten) nach Niederschlägen erarbeitet.

##### Umsetzung:

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sollten bei einer allfälligen Revision der Richtlinie Strassenlärm nochmals geprüft werden.

Eine Präzisierung der Anwendungsprozesse der Norm ISO 11819-2 wäre zu prüfen.

##### weitergehender Forschungsbedarf:

Weitere Abklärungen bezüglich des Einflusses der Gummihärte der bei CPX-Messungen verwendeten Reifen sind notwendig.

##### Einfluss auf Normenwerk:

keiner

#### Der Präsident/die Präsidentin der Begleitkommission:

Name: Seller

Vorname: Luzia

Ant, Firma, Institut: ASTRA

#### Unterschrift des Präsidenten/der Präsidentin der Begleitkommission:

29.2.16



## 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 Kreisell	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 Strassenbaubindemitteln	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

<b>Bericht-Nr.</b>	<b>Projekt Nr.</b>	<b>Titel</b>	<b>Jahr</b>
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