

Texte

37/2023

Abschlussbericht

Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus- Messungen

AQuStra II

von:

André Hinträger und Alexander Attenberger
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 37/2023

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3717 54 104 0

FB001122

Abschlussbericht

Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus-Messun- gen

AQuStra II

von

André Hinträger und Alexander Attenberger
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

[f/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

[t/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg

Abschlussdatum:

April 2022

Redaktion:

Fachgebiet I 2.3 Lärminderung im Verkehr
Jan Gebhardt und Dr. Lars Schade

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, März 2023

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus-Messungen

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) hat Dienst-Kraftfahrzeuge (Kfz) mit akustischen Torus-Mess-Systemen (ATMS) ausgestattet, um über einen Flottenversuch einen Großteil des Bayerischen Fernstraßennetzes außerorts akustisch zu untersuchen. Darüber hinaus wurde am Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (PFF) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) das Torusgeräusch, das heißt das Rollgeräusch, das nicht nach außen, sondern in das Innere eines Reifens abgestrahlt wird, unter kontrollierten Bedingungen analysiert. Hier lag der Fokus auf der Geschwindigkeit sowie der Radlast, dem Fülldruck und Profil des Reifens. Die Erkenntnis aus diesen Messungen ist, dass nicht die absolute Pegelhöhe, sondern die Charakteristik des Torusgeräusches Auskunft über den akustischen Zustand der Straße gibt. Als wesentliche Einflussgröße auf das Geräusch wurde die Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht identifiziert. Der sogenannte akustische Fingerabdruck einer jeden Deckschicht. Mit diesem Wissen wurde ein Entwurf einer Technischen Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen (E TP ATM) verfasst. Gemäß dieser wurde der Flottenversuch ausgewertet.

Aus Sicht des Lärmschutzes ist es erwünscht, mit diesen akustischen Torus-Messungen auf einen äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw $L_{AT,Pkw}$ bei 120 km/h zu schließen. Hierfür wurden Übertragungsfunktionen aufgestellt, die durch statistische Vorbeifahrt-(SPB-)Messungen abgeglichen wurden. Die notwendigen Untersuchungen fanden an ausgewählten Orten mit den Flottenfahrzeugen in Form kontrollierter Vorbeifahrten statt. Der so berechnete Geräuschpegel kann nun mit dem entsprechenden maximalen Vorbeifahrtpegel, gemäß den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-19), verglichen werden.

Im Ergebnis konnte mit dem Flottenversuch für insgesamt ca. 3 850 km Fernstraßen in Bayern die akustische Qualität von Fahrbahnbelägen untersucht werden. Eine statistische Auswertung ergab, dass etwa 60 % der untersuchten Streckenlänge lärmindernd sind; ca. 14 % sind laut, der Rest liegt dazwischen. Lärmindernd bedeutet hier, dass durch die Deckschicht der Grundwert des Schalleistungspegels eines Pkws der RLS-19 um mindestens 3 dB unterschritten wird; laut ist eine Deckschicht, wenn dieser Grundpegel überschritten wird.

Mit akustischen Torus-Messungen kann die akustische Qualität eines Straßennetzes kostengünstig und effizient untersucht werden.

Abstract: Monitoring of the acoustic quality of a road network with tire torus measurements

The Bavarian Environment Agency (LfU) has equipped company vehicles with acoustic torus measurement systems (ATMS) in order to acoustically study a large part of the Bavarian trunk road network outside built-up areas via a fleet test. In addition, the torus sound, i.e. the rolling noise that is not emitted outwardly but into the interior of a tire, was analyzed under controlled conditions at the vehicle-pavement interaction facility (PFF) of the Federal Highway Research Institute (BASt). Here, the focus was on speed as well as wheel load, inflation pressure and profile of the tire. These measurements revealed that the characteristics of the torus sound – rather than its absolute level – carries information about the acoustic state of the road. The wavelength of the formative texture of the surface layer was identified as the main factor influencing the torus sound. This is the so-called acoustic fingerprint of each surface layer. With this knowledge, a draft technical test specification for acoustic torus measurements (E TP ATM) was written. The fleet test has been evaluated in compliance with this draft.

From a noise protection point of view, it is desirable to use these acoustic torus measurements to infer an equivalent vehicle noise level for passenger cars $L_{AT,Pkw}$ at 120 km/h. For this purpose, transfer functions were established, which were calibrated by statistical pass-by (SPB)

measurements. The necessary investigations took place at selected locations with the fleet vehicles in the form of controlled pass-by measurements. The noise level calculated in this way can now be compared with the corresponding maximum pass-by level, according to the Guidelines for Noise Protection at Roads (RLS-19).

As a result, the fleet test made it possible to survey the acoustic quality for a total of approximately 3,850 km of trunk roads in Bavaria. A statistical evaluation showed that about 60 % of the surveyed road length are noise-reducing; about 14 % are noisy, with the rest in between. Here, noise-reducing means that the inferred equivalent vehicle noise level for passenger cars lies at least 3 dB below the corresponding Grundwert of the RLS-19 sound power level; a road segment is loud if its equivalent vehicle noise level for passenger cars exceeds the Grundwert of the RLS-19.

Acoustic torus measurements can be used to survey the acoustic quality of a road network cost-effectively and efficiently.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	9
Tabellenverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	11
Straßendeckschichten	12
Formelzeichen	12
Zusammenfassung.....	14
Summary	18
1 Einleitung – Erkenntnisstand.....	22
2 Aufbau der Infrastruktur	24
2.1 Inbetriebnahme der ATMS.....	24
2.2 Anpassung der Software (ATMS der Fahrzeugflotte und Datenübertragung)	24
2.3 Anpassung der Hardware.....	28
2.4 Auswahl der Fahrzeuge.....	29
3 Ermittlung von Einflussparametern	30
3.1 Akustische Torusmessungen am Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der BAST.....	30
3.1.1 Einfluss der Geschwindigkeit auf das Torusgeräusch	30
3.1.2 Einfluss von Radlast und Reifenfülldruck auf das Torusgeräusch sowie die Festlegung eines Signal-Rausch-Verhältnisses	33
3.1.3 Einfluss des Profils auf das Torusgeräusch	36
4 Validierung der akustischen Torusmessungen.....	37
4.1 Auswahl der Orte für kontrollierte Messungen.....	37
4.2 Texturmessungen.....	38
4.3 SPB-Messungen an ausgewählten Orten.....	39
4.4 Nahfeld-(CPX-)Messungen	41
4.5 Kontrollierte Vorbeifahrten mit den Flottenfahrzeugen	43
4.6 Die Übertragungsfunktionen für akustische Torus-Messungen	47
5 Akustische Torus-Messungen auf dem Bayerischen Fernstraßennetz	50
5.1 Prüfschritte bei der Datenauswertung	50
5.2 Umfang der ATM im Bayerischen Fernstraßennetz.....	52
5.3 Die akustische Qualität des Bayerischen Fernstraßennetzes	54
5.4 Bezug zum Korrekturwert der RLS-19.....	56
6 Abschließende Diskussion und Ausblick.....	57
7 Quellenverzeichnis	58

A	Lauffläche der verwendeten Prüfräder	60
B	Mitarbeiterinformation	61
B.1	Allgemeine Information der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Intranet des LfU	61
B.1.1	Flyer zur allgemeinen Information im Intranet	62
B.2	Individuelle Information für den Nutzer eines Flottenfahrzeugs bei der Buchung	63
C	Software-Updates.....	64
C.1	Anpassungen an der Software des RPi	64
C.2	Korrekturen und Erweiterungen an der Software für den RPi	64
C.3	Verbesserungen der Software am ATMG-Mikrokontroller	65
D	Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen (E TP ATM)	66

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Akustische Qualität des Bayerischen Fernstraßennetzes.....	16
Abbildung 2:	Schematische Darstellung zur Entstehung des texturinduzierten Beitrags zum Roll- und Torusgeräusch	22
Abbildung 3:	Schematische Darstellung des Datenaustausches.....	24
Abbildung 4:	Programmablaufplan	26
Abbildung 5:	Mikrofonhalterung	28
Abbildung 6:	Akustisches Torus-Messgerät	28
Abbildung 7:	Akustische Torusmessung im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn	31
Abbildung 8:	Veranschaulichung der Reifenmoden	31
Abbildung 9:	Akustische Torusmessung bei einer längeren Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit	32
Abbildung 10:	Nahfeldmessungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn.....	33
Abbildung 11:	Betriebszustände im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn.....	34
Abbildung 12:	Wellenlängen der prägenden Textur für die verschiedenen Betriebszustände im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn	35
Abbildung 13:	Akustische Torusmessung von einem Prüfrad mit und ohne Profil	36
Abbildung 14:	Lage der Orte für die kontrollierten Messungen.....	37
Abbildung 15:	Texturmessgerät am CXP-Anhänger.....	38
Abbildung 16:	Texturspektrum in der linken Rollspur	39
Abbildung 17:	Terzspektrum der Pkw bei einer Referenzgeschwindigkeit von 120 km/h.....	41
Abbildung 18:	CPX-Anhänger und Zugfahrzeug.....	41
Abbildung 19:	Terzspektrum der CPX-Messungen bei einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h.	42
Abbildung 20:	Mittlere Wellenlänge $\lambda_{DS;h,t}$ der prägenden Textur der Deckschicht	46
Abbildung 21:	Korrelation zwischen prägender Wellenlänge und Fahrzeuggeräuschpegel	48
Abbildung 22:	Individuelle Skalierung der Prüfräder.....	49
Abbildung 23:	Streckenbänder aus BAYSIS.....	50
Abbildung 24:	Ausschluss von Straßenabschnitten und Segmentierung des Messabschnittes	51
Abbildung 25:	Akustische Qualität der untersuchten Straßensegmente	52
Abbildung 26:	Länge der untersuchten Fernstraßen	53
Abbildung 27:	Histogramm der akustischen Qualität der untersuchten Straßensegmente	54
Abbildung 28:	Vergleich mit den Korrekturwerten.....	56
Abbildung 29:	Prüfrad 1 und 2	60
Abbildung 30:	Prüfrad 3 und 4	60
Abbildung 31:	Prüfrad 5 im CXP-Anhänger	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Flottenversuchsfahrzeuge	29
Tabelle 2:	Bereifung der Prüfräder an den Flottenversuchsfahrzeugen.....	29
Tabelle 3:	Nummer und genaue Lage der Orte für kontrollierte Messungen	37
Tabelle 4:	Kennwerte der Textur an den ausgewählten Orten.....	38
Tabelle 5:	Ergebnis der SPB-Messung von Pkw an ausgewählten Orten.....	40
Tabelle 6:	Ergebnis der SPB-Messung von Lkw2 an ausgewählten Orten	40
Tabelle 7:	Ergebnis der CPX-Messung an den ausgewählten Orten	42
Tabelle 8:	Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt B für die Zusammenstellung der arithmetischen Mittelwerte \bar{y}_{ji} bzw. $\lambda_{DS;h,t}$	44
Tabelle 9:	Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt C für die Zusammenstellung der Maße für die Streuung s_{ji} bzw. $u_{c,DS;h,t}$	45
Tabelle 10:	Parameter für die individuelle Übertragungsfunktion	48
Tabelle 11:	Wartezeiten bis die Fahrbahn nach einem Regenereignis wieder trocken ist.....	51
Tabelle 12:	Anteil von lauten und leisen Deckschichten im Fernstraßennetz in Prozent.....	55

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Bedeutung
AD	Autobahndreieck
AK	Autobahnkreuz
AS	Anschlussstelle
ASB	Anweisung StraßeninformationsBank
ATM	akustische Torus-Messung
ATMG	akustisches Torus-Messgerät
ATMS	akustisches Torus-Messsystem (ATMG mit Datenlogger, GPS und IMU)
B	Bundesstraße
BAB	Bundesautobahn
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
BAYSIS	Bayerisches Straßeninformationssystem
BT	Bluetooth
BYBN	Bayerisches Behördennetz
CPB	Kontrollierte Vorbeifahrt
CPX	akustisches Nahfeld
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
eDMZ	externe Demilitarisierte Zone
FuE-Vorhaben	Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben
GPS	globales Positionsbestimmungssystem
IMU	Beschleunigungssensor (en: inertial measurement unit)
IT-DLZ	IT-Dienstleistungszentrum des Freistaats Bayern
Kfz	Kraftfahrzeug
KIT	Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg
MP	Ort für die SPB-Messung
PFF	Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn
RPi	Raspberry Pi
RLS	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
SPB	Statistische Vorbeifahrt
SRV	Signal-Rausch-Verhältnis
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München
E TP ATM	Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
WGS 84	World Geodetic System 1984
WLAN	drahtloses lokales Netzwerk (en: wireless local area network)

Straßendeckschichten

Zeichen	Deckschichttyp
AC	Asphaltbeton
DSH-V	Dünnschichtbelag (dünne Asphaltdeckschicht in Heißbauweise auf Versiegelung)
DSK	Dünnschichtbelag kalt
MA	Gußasphalt
PA	offenporiger Asphalt
SMA	Splittmastixasphalt
WB	Waschbeton

Das Zeichen kann um eine Zahl erweitert sein, welche die Körnung des Mischgutes angibt.

Zeichen	Ergänzung zum Deckschichttyp
LA	lärmtechnisch optimiert
S	besondere Beanspruchung
N	normale Beanspruchung
D	Deckschicht
T D	Tragdeckschicht

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung der physikalischen Größen
A_{\max}	mm	maximale Amplitude des Wellenlängenspektrums
a	dB(A)	Achsenabschnitt bei der Regressionsanalyse der SPB-Messung: $L_{\text{veh}} = a + b \cdot \log(v)$
a_t	dB(A)	Achsenabschnitt für die individuelle Umrechnung des $L_{\text{AT},120,t}$ auf den $L_{\text{AT},\text{pkw}}$ bei 120 km/h
a_v	dB(A)	Achsenabschnitt für die Umrechnung von $\lambda_{\text{DS};h,t}$ auf $L_{\text{AT},120,t}$
b	dB(A)	Steigungsparameter bei der Regressionsanalyse der SPB-Messung: $L_{\text{veh}} = a + b \cdot \log(v)$
b_t		Steigung für die individuelle Umrechnung des $L_{\text{AT},120,t}$ auf den $L_{\text{AT},\text{pkw}}$ bei 120 km/h
b_v	dB(A)/m	Steigung für die Umrechnung von $\lambda_{\text{DS};h,t}$ auf $L_{\text{AT},120,t}$
ΔL	dB	Pegeldifferenz: $\Delta L = L_{\text{AT},\text{pkw}} - L_{\text{RLS},\text{pkw}}$
F_t	N	statische Radlast
g		Gestaltfaktor
$GF_{5/95}$		bewährter Gestaltfaktor
L_{AFmax}	dB(A)	A-bewerteter maximaler Vorbeifahrtpegel

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung der physikalischen Größen
$L_{AT,Pkw}$	dB(A)	mit der ATM und den Übertragungsfunktionen ermittelter äquivalenter Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 120 km/h
$L_{AT,120,t}$	dB(A)	geschwindigkeitskorrigierter Torusgeräusch-Pegel bei 120 km/h
L_{CPX}	dB(A)	Nahfeld-Pegel bei der CPX-Messung
L_{Pkw} und L_{Lkw2}	dB(A)	Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw und Lkw2 bei 120 km/h bzw. 80 km/h nach DIN EN ISO 11819-1
$L_{RLS,Pkw}$	dB(A)	maximaler Vorbeifahrtpegel eines Pkws nach den RLS-19: $L_{RLS,Pkw} = L_{W0,Pkw} - 25,6 \text{ dB(A)}$
$L_{W0,Pkw}(v_{Pkw})$	dB(A)	Schalleistungspegel eines Pkws nach den RLS-19
$\hat{\lambda}_{DS;h}$	m	Schätzwert für den Gesamtmittelwert der prägenden Wellenlänge einer Deckschicht in einem homogenen Abschnitt h nach DIN ISO 5725-2
$\lambda_{DS;r,i,t}$	m	mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im Straßensegment i für den ATM-Lauf r und das Prüfrad t
MPD	mm	mittlere Profiltiefe (en: mean profile depth)
N_{Pkw} und N_{Lkw2}		Anzahl von Pkw bzw. Lkw2 bei einer SPB-Messung nach dem Ausreißertest gemäß den TP KoSD-19 [1]
p_t	Pa	Fülldruck des Reifens
R_{ms}	mm	Effektivwert des Texturprofils
s_r	m	Wiederholstandardabweichung nach DIN ISO 5725-2
s_R	m	Vergleichstandardabweichung nach DIN ISO 5725-2
t		Index für das Prüfrad
TD	mm	Texturtiefe
$TD_{5/95}$	mm	bewährte Texturtiefe
$T_{DWD,Luft}$	°C	mittlere Lufttemperatur der der ATM nächstgelegenen vier Messstationen des DWD
T_{SPB}	°C	mittlere Lufttemperatur bei der SPB-Messung
T_{CPX}	°C	mittlere Lufttemperatur bei der CPX-Messung
T_{DS}	°C	mittlere Temperatur der Deckschicht bei der CPX-Messung
\bar{v}_{Pkw} und \bar{v}_{Lkw}	km/h	mittlere Geschwindigkeit und Standardabweichung der vorbeifahrenden Pkw bzw. Lkw2 bei der SPB-Messung
W_{max}	mm	dem A_{max} -Wert entsprechende Wellenlänge

Für weitere Formelzeichen siehe den E TP ATM in Anhang D.

Zusammenfassung

Lärm beeinträchtigt in kaum zu unterschätzender Weise das Leben sowie die Gesundheit und das Wohlbefinden des Menschen. Geräuschpegel von mehr als 55 dB(A) am Tag gelten nach Erkenntnissen der Lärmwirkungsforscher als gesundheitlich bedenklich. In Deutschland sind etwa 8,5 Millionen Menschen diesen Pegeln ausgesetzt [2]. Und etwa 76 % der Bevölkerung fühlen sich vom Straßenverkehr, der dominierenden Lärmquelle, gestört oder belastigt [3].

Maßgebend für die Geräuschemissionen eines Kfz ist das Rollgeräusch, das durch die Wechselwirkung zwischen Reifen und Fahrbahn entsteht. Darauf hat die akustische Qualität der Fahrbahn einen wesentlichen Einfluss [4]. Dieser kann bei dichten Deckschichten gut 5 dB betragen.

In Deutschland wird die akustische Qualität einer Deckschicht durch Kombination zweier Prüfungen ermittelt [1]: mit dem statistischen Vorbeifahrt-(SPB-) [5] und dem Nahfeld-(CPX-) [6] Messverfahren. Ersteres wird verwendet, um die tatsächlichen Verkehrsgeräusche und damit das absolute Emissionsniveau einer Straße zu untersuchen. Das Verfahren ist allerdings zeitaufwändig, da eine Mindestanzahl von ungestört vorbeifahrenden Fahrzeugen einer Gruppe (Pkw, leichte und schwere Lkw) erfasst werden muss. Mit dem CPX-Verfahren wird das Rollgeräusch in unmittelbarer Nähe eines Reifens an definierten Mikrofonpositionen gemessen. Damit kann die akustische Homogenität eines Straßenabschnitts beurteilt werden. Hierbei müssen genormte Messreifen verwendet werden [7].

Für den Lärmschutz ist das Wissen über den akustischen Zustand der Deckschichten fundamental. Bisher war jedoch eine flächendeckende Erfassung des akustischen Zustands des Straßennetzes wegen des immensen Messaufwandes nahezu unmöglich. Hier könnte das im Folgenden beschriebene Messverfahren völlig neue Möglichkeiten eröffnen.

Anfang der 80er Jahre hatte Dr. Oskar Bschorr die Idee, die Rollgeräusche im Inneren von Reifen zu messen und darüber den akustischen Zustand von Straßen zu ermitteln [8] [9] [10]. Durch die stetige Verbesserung der Messtechnik [11] [12] wurde zuletzt für das Umweltbundesamt (UBA) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ein weitgehend automatisch arbeitendes akustisches Torus-Messsystem (ATMS) entwickelt [13]. Dieses besteht aus dem eigentlichen akustischen Torus-Messgerät (ATMG), das die Geräusche im Reifentorus während der Fahrt misst, und einem Datenlogger inklusive eines GPS-Empfängers, der die Messwerte zwischenspeichert und nach Fahrtende über WLAN auf einen Server zur Auswertung überträgt.

In diesem Forschungsvorhaben wurden nun diese ATMS des KIT in mehrere Kraftfahrzeuge des LfU eingebaut, um mittels Flottenversuch die akustische Qualität eines Straßennetzes zu untersuchen. Bisher wurde das Torusgeräusch in Anlehnung an das CPX-Verfahren in Terzen gemessen und ausgewertet [14]. Eine Anforderung war, dass bei diesen Fahrten möglichst gleichmäßig gefahren und sehr exakt eine Referenzgeschwindigkeit eingehalten werden musste. Denn die Formel für die Korrektur der Geschwindigkeit nach dem CPX-Verfahren konnte nicht auf die akustische Torus-Messung (ATM) angewendet werden. Während dieses Flottenversuchs fuhren die Kolleginnen und Kollegen bei ihren Dienstreisen mit den Kraftfahrzeugen jedoch unterschiedlich schnell. Wie kann nun der Torusgeräusch-Pegel sinnvoll korrigiert werden?

Dazu wurden am Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (PFF) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) kontrollierte Messungen durchgeführt. Hierbei wurde auch der Einfluss von Radlast und Reifenfülldruck auf das Torusgeräusch untersucht. Bei der frequenz aufgelösten Auswertung dieser Prüfstands-Messungen wurden neben den Torusmoden als weiterer Bestandteil des Torusgeräusches sogenannte Reifenmoden identifiziert. Bei diesen handelt es sich möglicherweise um Längsmoden der Eigenschwingung des freien Teils des Reifen-Gürtels. Diese Moden konnten bei allen eingesetzten Prüfrädern bis etwa zur 90-ten Ordnung detektiert werden. Während die

Frequenz der Torusmoden durch die Geometrie des Torus festgelegt ist, ist die Frequenz der Reifenmoden zusätzlich abhängig von der Geschwindigkeit. Und die Reifenmoden beeinflussen den Gesamtpegel wesentlich.

Unabhängig von diesen reifentypischen Schwingungen prägen sich beim Fahren die Unebenheiten der Straßenoberfläche in die Reifenaufstandsfläche ein und regen den Reifen zu texturinduzierten Schwingungen an. Der Frequenzbereich dieser Schwingungen ist auf gleiche Weise geschwindigkeitsabhängig und sie überdecken bei einer Grenzfrequenz den Pegel der Reifenmoden. Da sich die Geschwindigkeitsabhängigkeiten beider Größen herauskürzen, kann diese Tatsache ausgenutzt werden, um durch Abzählen der Reifenmoden den akustischen Beitrag der Deckschicht an der Reifenschwingung festzustellen. Über die entsprechende Frequenz der Anzahl der maximal möglich zu detektierenden Moden wird die prägende Wellenlänge einer Straße berechnet. Diese Wellenlänge kann als akustischer Fingerabdruck einer Straße interpretiert werden. Ist die Wellenlänge klein, dann ist die Deckschicht leise; anderenfalls entsprechend laut.

Weil sich die Reifenaufstandsfläche unter den typischen Betriebsbedingungen der Kfz nicht wesentlich vergrößert oder verkleinert, verändert sich der frei schwingende Teil des Reifen-Gürtels nicht maßgebend. Deshalb haben die Beladung des Fahrzeugs und der Reifenfülldruck keinen nennenswerten Einfluss auf die Anzahl der Reifenmoden und damit auf die ermittelte Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht. Für die Abmessungen von klassischen Pkw-Reifen korrespondiert die 90-ste Ordnung der Reifenmoden (höhere Ordnungen wurden bis jetzt nicht detektiert) mit einer Texturwellenlänge von ca. 20 mm. Dies entspricht zugleich dem unteren Auflösungsvermögen von akustischen Torus-Messungen. Die obere Messgrenze liegt bei der Größe der Reifenaufstandsfläche. Bei der Auswertung einer ATM ist also nicht die absolute Pegelhöhe entscheidend, sondern die Geräuschcharakteristik.

Wird das Geräusch von vorbeifahrenden Pkw einer statistischen Grundgesamtheit bei einer Referenzgeschwindigkeit spektral analysiert, dann enthalten die fünf Terzen von 630 bis 1 600 Hz weit mehr als die Hälfte der Energie der Verkehrsgeräusche. Diese Energie wird hauptsächlich durch die Schwingungsanregung der Reifen von Wellenlängen zwischen 20 und 50 mm in der Textur der Deckschicht verursacht. Genau in diesem Wellenlängenbereich ist die ATM empfindlich! Das ATMG kann quasi wie ein Texturmessgerät eingesetzt werden. Vor diesem Hintergrund wurde der Entwurf einer Technischen Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen (E TP ATM) verfasst.

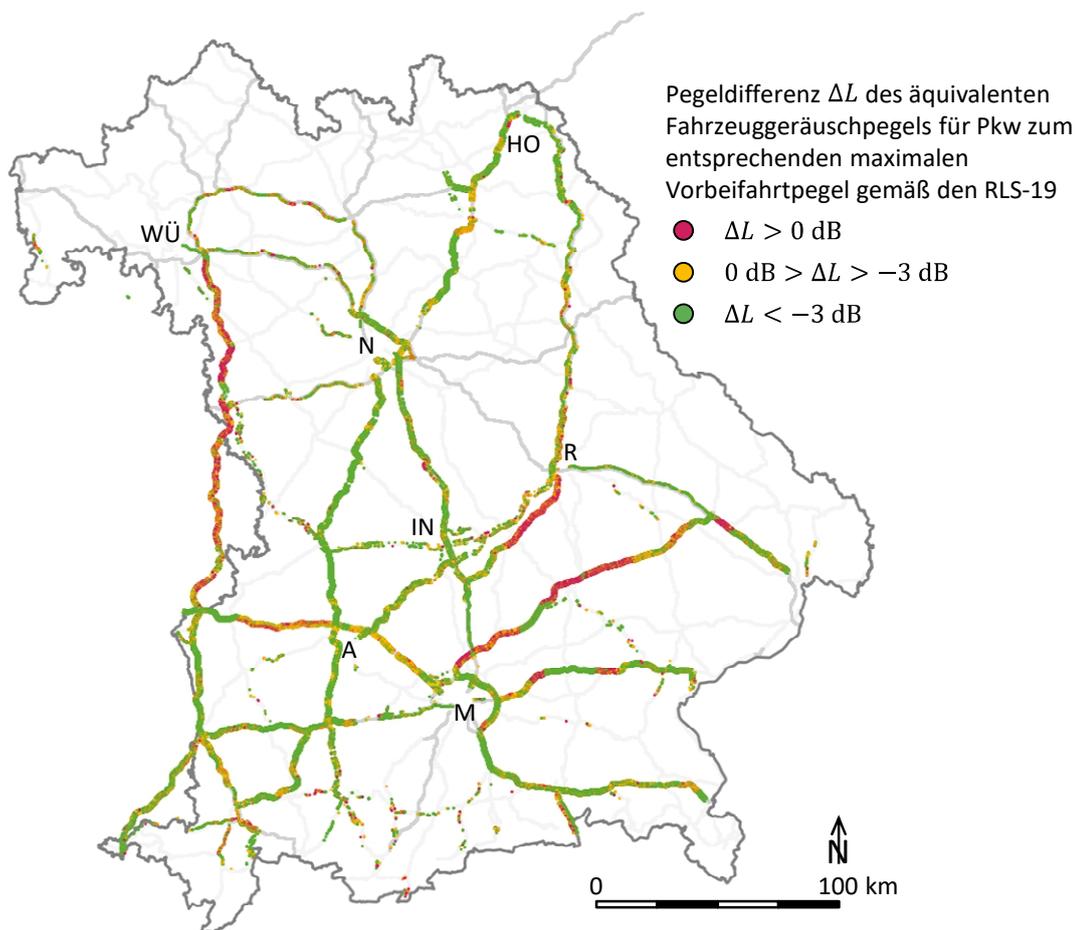
Als Ergebnis liefert der E TP ATM die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht für ein 20 m langes Straßensegment. Aus Sicht des Lärmschutzes wäre es erwünscht, wenn für dieses auch die akustische Qualität angegeben werden könnte. Aus diesem Grund fanden an ausgewählten Orten mit den Flottenfahrzeugen kontrollierte Fahrten sowie SPB-Messungen statt. Damit konnten Übertragungsfunktionen aufgestellt werden, mit denen aus einer ATM ein äquivalenter Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw $L_{AT,Pkw}$ bei 120 km/h berechnet werden kann.

Mit dem Flottenversuch wurden in Bayern insgesamt ca. 3 850 km Fernstraßen bzw. ca. 192 500 Straßensegmente akustisch untersucht. Für die Durchführung des Flottenversuchs musste:

- ▶ Die notwendige Netzwerk-Infrastruktur mit WLAN-Access-Points aufgebaut werden.
- ▶ Das relativ preiswerte akustische Torus-Messsystem (ATMS) [13] des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) für den Flottenversuch modifiziert werden.
- ▶ Vier Dienstfahrzeuge mit den ATMS ausgestattet werden.
- ▶ Für jedes Fahrzeug für den Betrieb der ATMG am Rad-Reifen beim TÜV eine Betriebsgenehmigung eingeholt werden.

- ▶ Der zuverlässige Messbetrieb und die sichere Datenübertragung auf einen Server im Bayerischen Behördennetz gewährleistet werden.
- ▶ Die erhobenen Messdaten auf Plausibilität geprüft und gemäß des E TP ATM ausgewertet werden. Hierfür wurden entsprechende Programme geschrieben.
- ▶ Eine Datenbank für die Messdaten aufgebaut werden.
- ▶ Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des LfU überzeugt werden am Flottenversuch teilzunehmen. Die Daten ihrer Fahrt wurden in anonymisierter Form aufgezeichnet, wenn das Fahrzeug bei einer Dienstreise auf einer Bundesfernstraße (Autobahnen und Bundesstraßen) schneller als 50 km/h gefahren wird. Um möglichst viele Daten auswerten zu können, wurden die Kolleginnen und Kollegen gebeten, möglichst gleichmäßig und vorausschauend zu fahren und sich an die Richtgeschwindigkeit von 130 km/h auf Autobahnen zu halten. Eine gleichmäßige Fahrt bedeutet nach dem E TP ATM, wenn die absolute Beschleunigung von $0,2 \text{ m/s}^2$ nicht überschritten wird.

Abbildung 1: Akustische Qualität des Bayerischen Fernstraßennetzes



In der Karte ist die Pegeldifferenz des mit den Übertragungsfunktionen bestimmten äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegels für Pkw $L_{AT,PKW}$ bei 120 km/h zum entsprechenden maximalen Vorbeifahrtpegel gemäß den RLS-19 pro untersuchtes Straßensegment eingetragen. Rot markiert Differenzen, die größer sind als 0 dB und grün, die kleiner sind als -3 dB. Gelb kennzeichnet Unterschiede zwischen 0 und -3 dB.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

In Abbildung 1 ist der Umfang dieses Versuchs nachgezeichnet sowie die akustische Qualität eines jeden Straßensegmentes dargestellt; hier in den Ampelfarben Rot, Gelb und Grün als Pegeldifferenz ΔL des mit den Übertragungsfunktionen berechneten äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegels für Pkw $L_{AT,PKW}$ bei 120 km/h zum entsprechenden maximalen Vorbeifahrtpegel gemäß den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-19 [15].

Die Segmente konnten statistisch ausgewertet werden. Danach sind etwa 60 % der Deckschichten lärmindernd, aber auch ca. 14 % laut. Aus Sicht des Lärmschutzes bedeutet hier lärmindernd, wenn die berechnete Pegeldifferenz ΔL kleiner als -3 dB ist, und laut, wenn die Differenz über 0 dB liegt. Der Rest davon liegt dazwischen.

Summary

Noise affects human life, health and well-being in a way that can hardly be underestimated. Noise levels of more than 55 dB(A) during the day are considered a health hazard according to noise effect researchers. In Germany, about 8.5 million people are exposed to these levels [2]. And about 76 % of the population feel disturbed or annoyed by road traffic, the dominant noise source [3].

The decisive factor for noise emission is the rolling noise, which is generated by the interaction between tires and the road surface. The acoustic quality of the road surface has a significant influence on this [4]. This can amount to a good 5 dB on dense surface layers.

In Germany, the acoustic quality of a surface layer is assessed by a combination of two tests [1]: the statistical pass-by (SPB) [5] and the close-proximity (CPX) [6] measurement methods. The former is used to investigate the actual traffic noise and thus the absolute emission level of a road. However, the method is time-consuming because a minimum number of undisturbed passing vehicles of one group (passenger cars, light trucks, and heavy trucks) must be recorded. The CPX method measures the rolling noise in the immediate vicinity of a tire at defined microphone positions. This allows the acoustic homogeneity of a road section to be assessed. Standardized test tires must be used for this purpose [7].

Knowledge of the acoustic condition of the surface layers is fundamental for noise protection. Up to now, however, an assessment of the acoustic condition of an entire road network was almost impossible because of the immense measurement effort. Here, the measurement method described below could open up completely new possibilities.

In the early 1980s, Dr. Oskar Bschorr had the idea of measuring the sound inside to determine the acoustic condition of roads tires [8] [9] [10]. Due to the continuous improvement of measurement technology [11] [12], a largely automatic acoustic torus measurement system (ATMS) was recently developed for the Federal Environment Agency (UBA) at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) [13]. This consists of the actual acoustic torus measuring device (ATMG), which measures the sound inside the tire torus while driving, and a data logger including a GPS receiver, which temporarily stores the measured values and transmits them via Wi-Fi to a server for evaluation after the end of the journey.

In this research project, these ATMS of KIT have been installed in several motor vehicles of the LfU in order to investigate the acoustic quality of a road network with a fleet test. Previously, the torus sound was measured and evaluated in third octaves following the CPX method [14]. One requirement was that the test vehicle had to be driven as smoothly as possible and a reference speed had to be maintained very accurately. This was because the formula for correcting the speed according to the CPX method could not necessarily be applied to the acoustic torus measurement (ATM). However, during our fleet test, the colleagues drove the motor vehicles at different speeds during their business trips. How can the torus noise level now be corrected in a meaningful way?

For this purpose, controlled measurements were carried out at the vehicle-pavement interaction facility (PFF) of the Federal Highway Research Institute (BAST). The influence of wheel load and tire inflation pressure on the torus noise was also investigated. In the frequency-resolved evaluation of these test rig measurements, so-called tire modes were identified as a further component of the torus sound in addition to the torus modes. These are possibly longitudinal modes of the natural vibration of the free part of the tire belt. These modes could be detected up to about

the 90th order in all test wheels used. While the frequency of the torus modes is fixed by the geometry of the torus, the frequency of the tire modes is additionally dependent on the speed. And the tire modes influence the overall level of the torus sound significantly.

Irrespective of these tire-typical vibrations, the unevenness of the road surface imprints itself on the tire contact patch during driving and stimulates the tire to produce texture-induced vibrations. The frequency range of these vibrations is speed-dependent in the same way, and above a cutoff frequency they mask the tire modes. Since the velocity dependencies of both quantities cancel out, this fact can be used to determine the acoustic contribution of the road to the tire vibration by counting the tire modes. The formative wavelength of a road is calculated from the frequency corresponding to the highest detectable tire mode. This wavelength can be interpreted as the acoustic fingerprint of a road. If the wavelength is small, then the surface layer is quiet; otherwise, it is correspondingly loud.

Because the tire contact patch does not increase or decrease significantly under typical motor vehicle operating conditions, the freely vibrating portion of the tire belt does not change significantly. Therefore, vehicle loading and tire inflation pressure have no significant effect on the number of tire modes detectable and thus on the determined wavelength of the formative texture of the surface layer. For the dimensions of classic passenger car tires, the 90th order of the tire modes (higher orders have not been detected so far) corresponds to a texture wavelength of about 20 mm. It constitutes the lower bound of the resolving capacity of acoustic torus measurements. The upper bound is the size of the tire contact patch. Thus, when evaluating an ATM, the characteristics of the torus sound is of interest rather than its overall sound pressure level.

In a spectral analysis of SPB measurements the five third octave bands from 630 to 1,600 Hz typically contain far more than half of the energy of the traffic noise. This energy is mainly caused by the vibration excitation of the tires at wavelengths between 20 and 50 mm in the texture of the surface layer. It is precisely in this wavelength range that the ATM is sensitive! The ATMG can be used virtually like a texture measuring device. Against this background, the draft of a technical test specification for acoustic torus measurements (E TP ATM) was written.

As a result, the E TP ATM provides the mean wavelength of the formative texture of the surface course for a 20 m long road segment. From the point of view of noise protection, it would be desirable to infer the acoustic quality from this formative wavelength. For this reason, both controlled pass-by (CPB) measurements with the fleet vehicles and regular SPB measurements were carried out at selected locations. This made it possible to establish transfer functions with which an equivalent vehicle noise level for passenger cars $L_{AT,PKW}$ at 120 km/h can be calculated from an ATM.

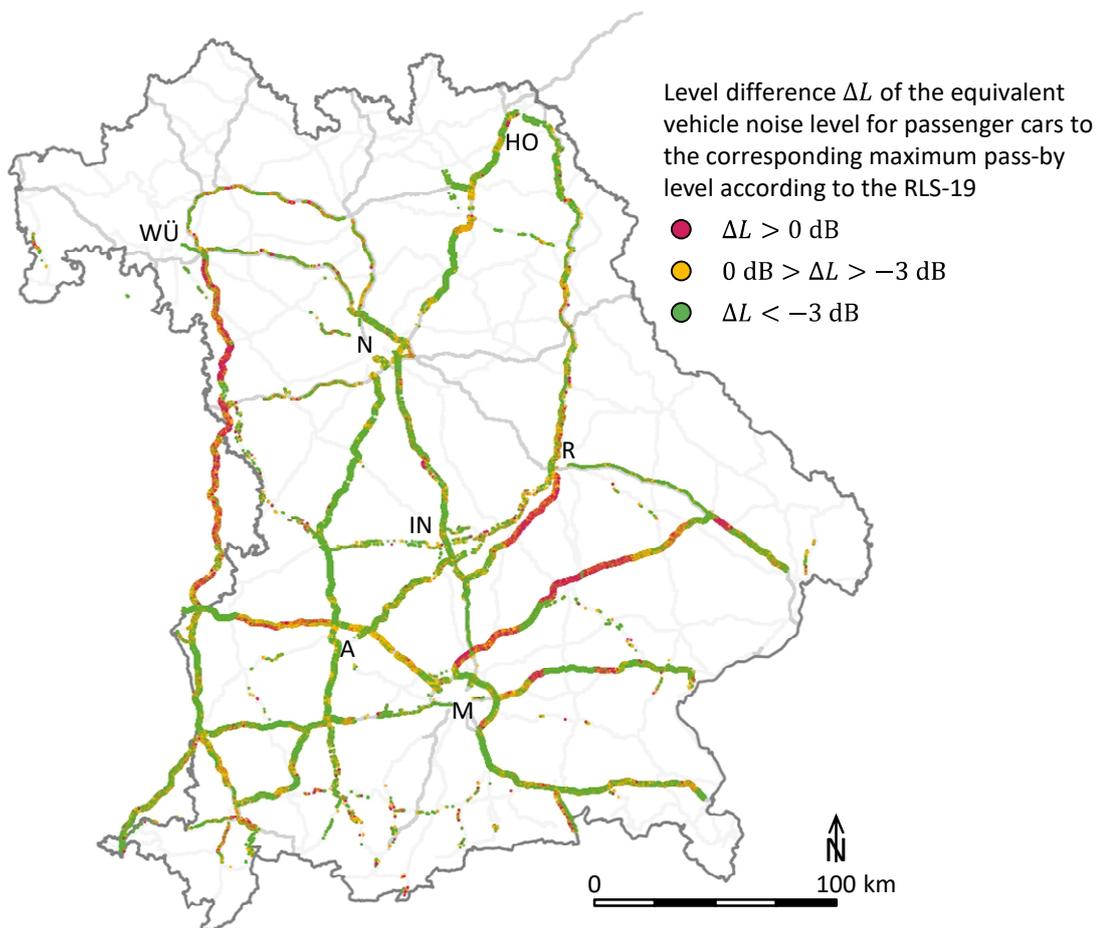
With the fleet test, a total of approx. 3,850 km of trunk roads or approx. 192,500 road segments were acoustically surveyed in Bavaria. To perform the fleet test:

- ▶ The necessary network infrastructure with Wi-Fi access points had to be set up.
- ▶ The relatively inexpensive acoustic torus measurement system (ATMS) [13] of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) had to be modified.
- ▶ Four company vehicles had to be equipped with the ATMS.
- ▶ An operating permit for each vehicle for the usage of the ATMG on the wheel-tire had to be obtained from a Technical Inspection Association (TÜV).
- ▶ Reliable measurement operation and secure data transmission to a server in the Bavarian government network had to be ensured.

- ▶ The collected measurement data had to be checked for plausibility and evaluated according to the E TP ATM. Appropriate programs were written for this purpose.
- ▶ A database for the measurement data had to be set up.
- ▶ The employees of the LfU had to be convinced to participate in the fleet test. The data of their trips was recorded in anonymized form, if the vehicle was driven faster than 50 km/h during a business trip on a trunk road (freeways and federal highways). In order to be able to evaluate as much data as possible, the colleagues were asked to drive as evenly as possible and with foresight and to comply with the recommended speed of 130 km/h on freeways. According to the E TP ATM, steady driving means that the absolute acceleration does not exceed 0.2 m/s^2 .

Figure 1 shows the road network surveyed during the fleet test. The acoustic quality of each road segment is displayed in a traffic light scheme with the colors red, yellow and green based on the level difference ΔL . ΔL is defined as the difference between the equivalent vehicle noise

Figure 1: Acoustic quality of the Bavarian trunk road network



The map shows – for each road segment examined – the difference ΔL between the equivalent vehicle noise level for passenger cars $L_{AT,PKW}$ at 120 km/h determined with the transfer functions and the corresponding sound level according to the RLS-19. Red indicates differences greater than 0 dB and green indicates differences less than -3 dB . Yellow marks differences between 0 and -3 dB .

Source: own representation, LfU

level for passenger cars $L_{AT,PKW}$ at 120 km/h derived from the torus sound measurements and the corresponding sound level according to the Guidelines for Noise Protection at Roads RLS-19 [15].

About 60 % of the road segment examined are noise-reducing (i.e. $\Delta L < -3$ dB) and about 14 % are noisy (i.e. $\Delta L > 0$ dB) with the rest in between.

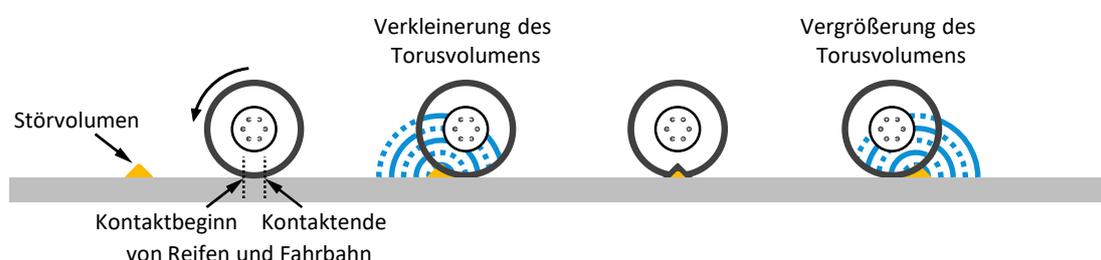
1 Einleitung – Erkenntnisstand

Derzeit stehen für die Ermittlung der Geräuschemission von Straßendeckschichten zwei Messverfahren zur Verfügung: das statistische Vorbeifahrt-(SPB-)Verfahren [5] und das Nahfeld-(CPX-)Messverfahren [6]. Ersteres wird verwendet, um die tatsächlichen Verkehrsgeräusche einer Straße zu untersuchen. Das Verfahren ist allerdings zeitaufwändig, da eine Mindestanzahl von ungestört vorbeifahrenden Fahrzeugen einer Gruppe (Pkw, leichte und schwere Lkw) zu erfassen ist. Da das Mikrofon im akustischen Freifeld aufgestellt werden sollte, kann dieses Verfahren nicht überall angewendet werden.

Mit dem CPX-Verfahren wird das Rollgeräusch in unmittelbarer Nähe eines Reifens an definierten Mikrofonpositionen in Terzen von 315 bis 5 000 Hz gemessen. Damit kann die akustische Homogenität eines Straßenabschnitts beurteilt werden. Für diese Messungen hat sich ein einachsiger Anhänger bewährt, auf dem vorgeschriebene Messreifen [7] montiert sind. Da die Messungen im fließenden Verkehr stattfinden, können entgegenkommende oder überholende Fahrzeuge das eigentliche Messsignal stören. Um dies möglichst zu verhindern, befinden sich die Reifen in separaten geschlossenen Radkästen, die mit absorbierendem Material ausgekleidet sind. Hiermit werden die Schallreflexionen in den Radkästen weitestgehend reduziert und somit nahezu Freifeldbedingungen hergestellt. Die akustischen Eigenschaften der Radkästen müssen in regelmäßigen Abständen überprüft werden, da diese durch den Betrieb verschmutzen. Mit dem CPX-Anhänger können gleichzeitig die akustischen Eigenschaften beider Rollspuren untersucht werden. Er ist ein empfindliches Messsystem und im Dauerbetrieb zur Bestimmung der akustischen Qualität eines Straßennetzes weniger geeignet.

Anfang der 80er Jahre hatte Dr. Oskar Bschorr die Idee, die Rollgeräusche im Inneren von Reifen zu messen, siehe Abbildung 2. Er führte hierzu auch erste Messungen sowie mit dem LfU weiterführende Arbeiten durch [8] [9] [10]. Doch erst von Oktober 2009 bis Juni 2013 wurde am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für das LfU ein praxistaugliches akustisches Torus-Messgerät (ATMG) aufgebaut [11] [12]. Ziel dieser Arbeit war es, insbesondere mit einem Glattreifen die akustisch relevante Textur von Deckschichten zu untersuchen. Darüber hinaus sollten für diesen Reifen auch Übertragungsfunktionen aufgestellt werden, anhand derer aus dem ATM-Signal die Fahrzeuggeräuschpegel von vorbeifahrenden Pkw abgeleitet werden können. In Anlehnung an das CPX-Verfahren wurden dabei auch die Torusgeräusche in den Terzen von 315 bis 5 000 Hz untersucht. Darauf basierend wurde von Oktober 2014 bis März 2018 vom LfU das

Abbildung 2: Schematische Darstellung zur Entstehung des texturinduzierten Beitrags zum Roll- und Torusgeräusch



Beim Rollen wechselwirkt der Reifen mit der Fahrbahn in der Aufstandsfläche (Latsch). Ein Störvolumen (orange) wird am Kontaktbeginn eingeschlossen. Hierdurch wird die Lauffläche des Reifens eingedrückt. Das Torusvolumen verkleinert sich und Schallwellen werden abgestrahlt. Wird das Störvolumen im Latsch ganz eingeschlossen, dann findet keine Volumenänderung statt. Am Kontaktende wird die Störstelle wieder freigegeben, die Lauffläche wird rückverformt und das Torusvolumen vergrößert sich wieder. Die Abstrahlung des Schalls läuft Phasenverschoben ab.

Quelle: eigene Darstellung, LfU, in Anlehnung an O. Bschorr u. R. Kühne [9] [10]

vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) finanzierte Forschungs- und Entwicklungs-(FuE-)Vorhaben „Akustische Charakterisierung von Deckschichten mittels CPX- und ATM-Verfahren“ durchgeführt [14]. Der CPX-Anhänger des LfU wurde mit zwei ATMG ausgerüstet. Erstmals konnte damit in jeder Rollspur das Rollgeräusch in unmittelbarer Nähe des Reifens und das Torusgeräusch simultan gemessen und speziell die schallabsorbierenden Eigenschaften von offenporigen Asphaltdeckschichten analysiert werden [14].

Hierfür wurde ein Mess- und Auswerteprogramm entwickelt. Dieses wurde durch umfangreiche Messungen auf Fernstraßen in Bayern in der Praxis getestet. Die Referenzgeschwindigkeit betrug dabei 80 km/h. Bei den Messungen musste möglichst gleichmäßig gefahren werden, denn das Torusgeräusch konnte nur in einem sehr schmalen Geschwindigkeitsbereich mit der bekannten Formel für das CPX-Verfahren korrigiert werden. Der Grund hierfür liegt an den Torusmoden. Wenn das Torusgeräusch in Anlehnung an das CPX-Verfahren ausgewertet wird, dann sind die Terzbänder der zweiten Torusmode bei 400 und 500 Hz pegelbestimmend, siehe Abbildung 7. Diese Pegel sättigen ab einer Geschwindigkeit von ca. 50 km/h. Um dies zu umgehen, wurde der Auswertebereich für eine ATM um eine Oktave zu höheren Frequenzen verschoben und lag zwischen 630 und 10 000 Hz.

Parallel zu den Arbeiten am LfU wurde am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) innerhalb des Forschungs-Vorhabens „Technische Aspekte der Überwachung der akustischen Qualität der Fahrwege im Straßenverkehr, AQuStra“ für das Umweltbundesamt (UBA) ein weitgehend automatisch arbeitendes akustisches Torus-Messsystem (ATMS) entwickelt [13]. In diesem FuE-Vorhaben wurden ATMS in Pkw verbaut und die akustische Qualität eines Teils des Bayerischen Fernstraßennetzes untersucht.

2 Aufbau der Infrastruktur

Innerhalb des FuE-Vorhabens „AQuStra“ wurde für das Umweltbundesamt (UBA) am KIT das ATMG weiterentwickelt und mit einem Raspberry Pi (RPi) als Datenlogger ausgestattet, der mit einem GPS-Empfänger und einem Beschleunigungssensor (IMU) erweitert wurde [13]. Diese Messeinheit kann in Kleinserie produziert werden und wird als ATM-System (ATMS) bezeichnet. Bei der Auftaktveranstaltung zu „AQuStra II“ im Mai 2018 wurden dem LfU fünf dieser ATMS zur Verfügung gestellt. Fünf weitere wurden vom LfU nachgebaut.

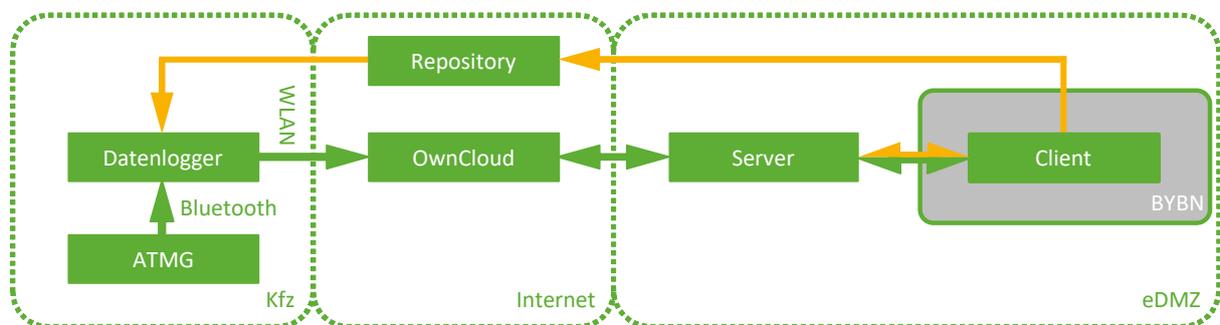
2.1 Inbetriebnahme der ATMS

Zunächst mussten die ATMS für den Flottenversuch in Betrieb genommen werden. Der Bericht des KIT enthält hierfür eine Anleitung mit den wesentlichen Arbeitsschritten [13].

Als erstes wurde im Internet ein Repository eingerichtet, auf dem die Messprogramme und die Konfiguration (im wesentlichen WLAN-Zugangs- und Serververbindungsdaten) für den Datenlogger abgelegt sind, siehe Abbildung 3. Das Betriebssystemimage wurde mit den Repository-Zugangsdaten des LfU versehen und auf den RPi aufgespielt. Beim ersten Start wird mit einem Skript im Betriebssystemimage der Repository-Inhalt heruntergeladen und installiert sowie alle Verbindungen zu den Geräten/Sensoren aufgebaut. Falls beim Herunterfahren des Datenloggers eine Internetverbindung vorhanden ist, aktualisiert der Datenlogger automatisch die Messprogramme und die Konfiguration.

An der Dienststelle Augsburg wurden zwei WLAN-Access-Points eingerichtet. Der Windows Server wurde im IT-Dienstleistungszentrum (IT-DLZ) in München installiert.

Abbildung 3: Schematische Darstellung des Datenaustausches



Schematische Darstellung der Übertragungswege von Messdaten (grün) aus dem ATMG auf den Datenlogger im Kfz, über den WLAN-Access-Point in eine OwnCloud und von hier in die externe Demilitarisierte Zone (eDMZ) des Bayerischen Behördenetzes (BYBN). Übertragungswege der Skripte und Programme (orange).

Quelle: eigene Darstellung, LfU

2.2 Anpassung der Software (ATMS der Fahrzeugflotte und Datenübertragung)

Um die Anforderungen an den Datenschutz zu erfüllen, wurde eine Funktion eingebaut, die kontinuierlich mehrere Kriterien überprüft. Das Fahrzeug muss sich innerhalb eines Korridors von 50 m um die Mittellinie einer Bundesautobahn oder Bundesstraße befinden. Außerdem darf sich die Bewegungsrichtung um höchstens 20° von der Straßenmittellinie unterscheiden. Dies verhindert, dass beim Kreuzen von entsprechenden Straßen gemessen wird. Zudem muss die Geschwindigkeit des Fahrzeuges mindestens 50 km/h betragen. Die Messdaten werden in anonymisierter Form aufgezeichnet.

Darüber hinaus wurde eine Vielzahl an Korrekturen an der Software vorgenommen, um die Qualität der Messdaten zu optimieren und die Zuverlässigkeit des Messsystems zu erhöhen. Eine Übersicht über alle wesentlichen Software-Updates ist in Anhang C zu finden.

In Abbildung 4 ist der vereinfachte Programmablauf, wie er mit der verbesserten Software bei einer Messfahrt abläuft, dargestellt.

Das ATMG wird von einem Mikrocontroller gesteuert, auf dem ein in C++ geschriebenes Programm (PowerManagement.cpp) läuft. Sobald ein geladener Akku mit der Platine verbunden wird, startet dieses Programm und läuft permanent im Energiesparmodus. Aus diesem Modus wacht der Controller auf, um beispielsweise das BT-Modul zu Starten oder zu Stoppen und kehrt danach wieder in den Energiesparmodus zurück.

Die Messung auf dem RPi wird durch eine Reihe von Diensten (.service), Shell-Skripten (.sh) und Python-Programmen (.py) gesteuert. Zudem informiert die unterbrechungsfreie Stromversorgung den RPi über Änderungen in der Bordspannung, es ist ihm außerdem möglich dort Statusinformationen wie den Akkustand abzufragen.

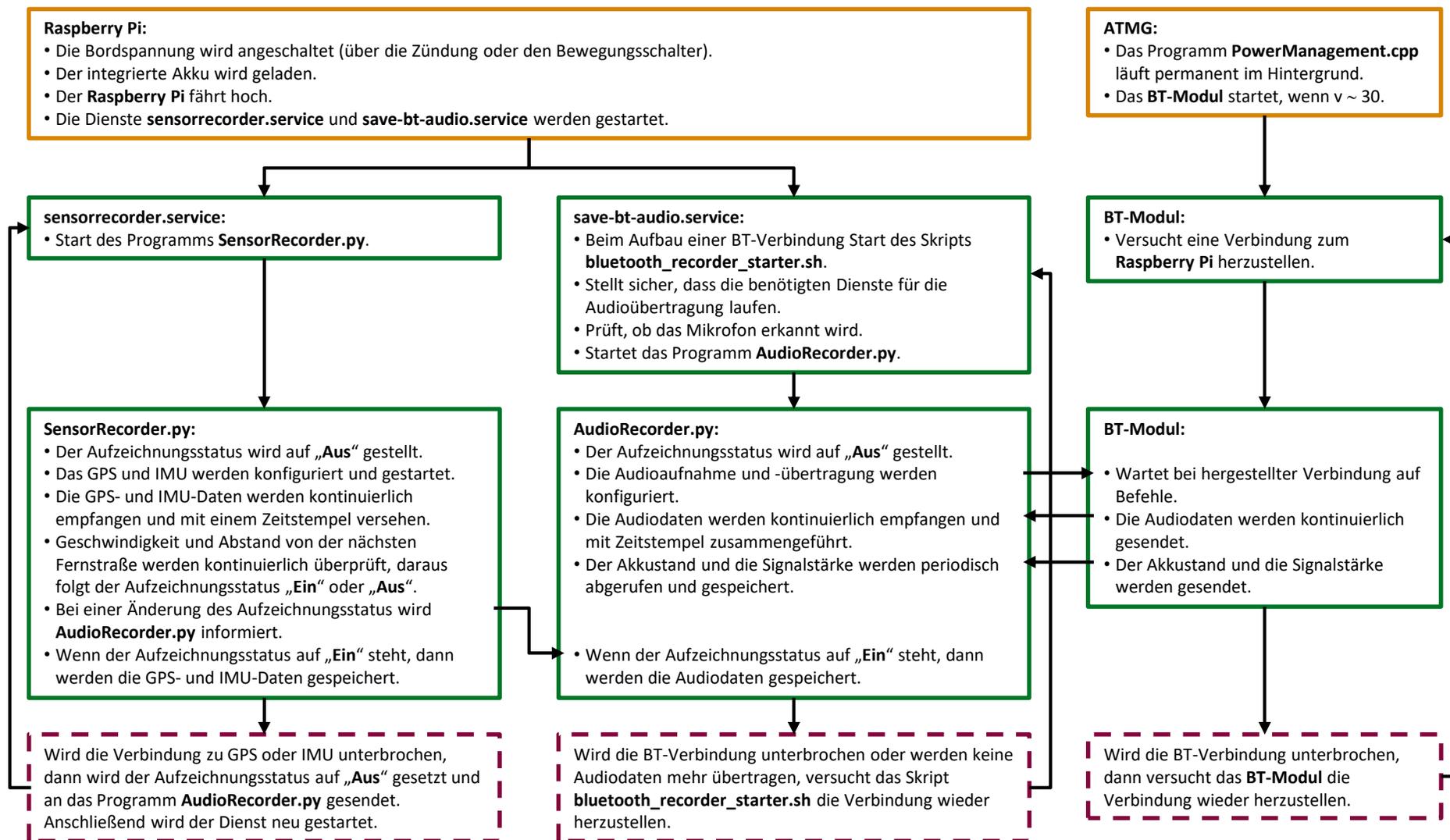
Nach den Sicherheitsvorgaben des IT-Dienstleistungszentrums des Freistaats Bayern ist der vom KIT vorgesehene Weg für eine Datenübertragung aus dem Internet in das Behördenetz nicht möglich. Daher erfolgt der Upload nun mittels WebDAV auf eine OwnCloud. Von dieser lädt der Server die Daten herunter, siehe Abbildung 3.

Auf dem Server durchlaufen die Messdaten mehrere Verarbeitungsstufen, die aus speziell dafür entwickelten Python- und LabVIEW-Programmen bestehen:

- ▶ **01_WebDAV.py:** Herunterladen der Messdaten von der OwnCloud
- ▶ **02_ATMimport.py:** Zuordnen der Audiodaten zu den GPS- und IMU-Daten
- ▶ **03_ATMdayruns.py:** Einteilen der Messdaten in zusammenhängende Abschnitte
- ▶ **04_MergeAndFilter.py:** Starten und verwalten mehrerer Instanzen des rechenintensiven LabVIEW Programms **MergeAndFilter.exe**, das die Messdaten synchronisiert zusammenführt, die Torusgeräusch-Pegel berechnet und die Reifenmoden zählt
- ▶ **05_ATMfindStation.py:** Zuordnung zu Straße, Abschnitt und Station sowie Berechnung der Messwerte für jedes überfahrene Straßensegment
- ▶ **06_ATMWriteDB.py:** Schreiben der Messdaten pro Straßensegment in die Datenbank
- ▶ **07_ATMUpdateDBSurface.py:** Eintragen des Deckschichttyps und des Baujahres in die Datenbank
- ▶ **08_ATMWetterdaten.py:** Eintragen der Umgebungstemperatur und ob das Straßensegment trocken war in die Datenbank

Diese Datenbankeinträge sind die Grundlage für die Auswertung des Flottenversuchs.

Abbildung 4: Programmablaufplan



Raspberry Pi:

- Die Bordspannung fällt weg (Abschalten der Zündung oder nach 10 Minuten durch den Bewegungsschalter).
- Die Spannungsversorgung erfolgt über den integrierten Akku.
- Versuch, eine WLAN-Verbindung herzustellen.
- Start des Skripts **wificronjob.sh**.

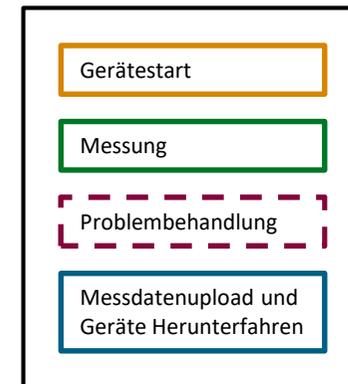


wificronjob.sh:

- wenn nach 10 Sekunden die Bordspannung immer noch weg ist
 - wenn WLAN verbunden ist
 - Systemzeit synchronisieren
 - neue Dateien vom Git-Repository laden
 - falls neues Updateskripte vorhanden, dann ausführen
 - Die Dienste **sensorrecorder.service** und **save-bt-audio.service** anhalten
 - Messdaten auf OwnCloud laden
 - Prüfsumme kontrollieren, bei Erfolg die Messdaten vom **Raspberry Pi** löschen
 - Log-Dateien auf OwnCloud laden
- am Ende und in allen anderen Fällen:
 - wenn Spannung wieder anliegt
 - falls die Dienste **sensorrecorder.service** und **save-bt-audio.service** angehalten wurden, wieder starten
 - Skript wird beendet
 - Messung läuft normal weiter
 - sonst
 - Der **Raspberry Pi** fährt herunter

ATMG:

- Wenn für 5 Minuten $v < 30$ km/h, dann wird das **BT-Modul** ausgeschaltet.



Vereinfachte schematische Darstellung der im ATMS automatisch ablaufenden Prozesse vom Start bis zum Ende einer Messfahrt.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

2.3 Anpassung der Hardware

Ursprünglich war vorgesehen, dass der Datenlogger an der Bordspannungssteckdose in der Mittelkonsole angesteckt wird. Doch die LfU-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeiter wollten diese Steckdose für ihr Navigationsgerät oder Handy-Ladegerät nutzen. Also wurde der Datenlogger in den Kofferraum des Fahrzeugs verlegt und an die dortige Steckdose angeschlossen. Diese Steckdose wird in einigen Modellen beim Abstellen des Fahrzeugs nicht spannungsfrei geschaltet, womit das Startsignal für die Datenübertragung entfiel. Deshalb wurde bei den betroffenen Fahrzeugen ein Beschleunigungsschalter in den Datenlogger integriert, der erkennt, ob das Fahrzeug bewegt wird oder Erschütterungen auftreten. Über ein zusätzliches Relais wird dann der Datenlogger mit der Bordspannung verbunden oder davon getrennt.

Das Mikrofon muss fest in den Reifentorus eingebaut werden. Bei den Vorarbeiten am KIT wurde es mit Dämmmaterial auf die Felge geklebt [13]. Von dieser Lösung wurde abgewichen, um mögliche Rotationsbeschleunigungen auf die Membran des Mikrofons zu minimieren [11] sowie eine annähernd gleiche Mikrofonposition wie beim ATMG im CPX-Anhänger des LfU zu gewährleisten. Daher wurde eine spezielle Halterung entwickelt und aus Polyetheretherketon (PEEK) in der LfU eigenen Werkstatt gefertigt. Die Halterung wird mit dem Adapter der Ventil- und Kabeldurchführung [13] fest verschraubt, siehe Anhang D.

Abbildung 5: Mikrofonhalterung



Fotografie der Mikrofonhalterung im Tiefbett der Felge. Die Halterung, an die der Reifendruckkontrollsystem-Sensor (links) befestigt wurde, ist mit dem Adapter der Kabeldurchführung [13] fest verschraubt.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Darüber hinaus wurde das ATMG überarbeitet. Der Akku wird jetzt induktiv aufgeladen und benötigt deshalb nicht mehr länger eine Ladebuchse im Gehäuse (Die Ladebuchse wurde durch das Universal Qi Wireless Receiver Module 1901 von Adafruit ersetzt). Im praktischen Einsatz der Flottenfahrzeuge mussten die ATMG alle fünf bis sechs Wochen aufgeladen werden. Das gesamte Gerät ist nun kompakter und liegt zum größeren Teil zwischen den Radschrauben/-muttern. Es verschwindet praktisch unter der Radkappe und ist von außen nicht mehr zu sehen. Ein stabiler Deckel schützt die Mikrofonkabeldurchführung, siehe Abbildung 6.

Abbildung 6: Akustisches Torus-Messgerät



Fotografie des neuen ATMG: Mit offenem Gehäuse (links), von unten mit „spikes spider fix clip“ zur Befestigung an den Radschrauben/-muttern (Mitte) und mit Deckel (rechts).

Quelle: eigene Darstellung, LfU

2.4 Auswahl der Fahrzeuge

Aus allen Dienstfahrzeugen, die für die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des LfU frei verfügbar sind, wurden zusammen mit dem Projektberaterkreis des UBA und der BAST in Abstimmung mit der LfU-Fahrbereitschaft Fahrzeuge ausgewählt, siehe Tabelle 1. Die Auswahl erfolgte nach den Gesichtspunkten: Fahrleistung, Standort, Zulassungsjahr und einer möglichst großen Variation in der Flotte. Einige Fahrzeug-Modelle schieden von vornherein aus, weil nach jedem Reifenwechsel das Reifendruckkontrollsystem eigens vom Hersteller neu programmiert werden muss. Die Fahrzeuge sind in Augsburg stationiert. In Tabelle 2 ist die Bereifung der Fahrzeuge aufgelistet und in Anhang A die Laufflächen der Prüfräder abgebildet.

Tabelle 1: Flottenversuchsfahrzeuge

Nr.	RPI Nummer	Kfz-Typ/Einsatzzweck	Modell	Klasse	Zulassung
1	2	Lärmesswagen	Mercedes Vito	Utility	2009
2	1	Kombi	Ford Focus	Kompaktklasse	2017
3	6	Kombi	Ford C-Max	Mini-Van	2018
4	7	Werkstattwagen	Transit Connect	Utility	2016

Dienstfahrzeuge, die für den Flottenversuch ausgewählt wurden.

Tabelle 2: Bereifung der Prüfräder an den Flottenversuchsfahrzeugen

Nr.	Reifen	Größe	Produktions- woche / Jahr	Gummihärte in Shore A
1	Goodyear Cargo Vector	225/60 R16C 101/99H	08 / 2017	77
2	Michelin Primacy 3	205/55 R16 91V	42 / 2017	69
3	Continental EcoContact 6	215/55R16 93V	49 / 2019	61
4	Continental ContiPremiumContact 2	205/60 R16 96H	24 / 2016	68

Prüfräder der Flottenversuchsfahrzeuge.

Die ATMG wurden an die linken Hinterräder der Flottenfahrzeuge montiert. Jedes Fahrzeug, das damit ausgestattet wurde, musste dem TÜV vorgeführt werden. Dieser genehmigte den Betrieb unter Auflagen. Mit dem Fahrzeug darf nicht schneller als 160 km/h gefahren und, solange das ATMG montiert ist, muss ein Reserverad mitgeführt werden. Ein entsprechender Eintrag im Fahrzeugschein bestätigt dies. Die Maximalgeschwindigkeit wurde vom LfU aus sicherheitstechnischen Gründen auf 130 km/h beschränkt.

Die LfU-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeiter wurden über eine Hausmitteilung im Intranet über den Flottenversuch informiert. Hierfür wurde ein Infoblatt bereitgestellt. Nach der Buchung eines Flottenfahrzeuges bekam jede Mitarbeiterin und jeder Mitarbeiter außerdem eine Informations-E-Mail zugesandt, siehe Anhang B.

3 Ermittlung von Einflussparametern

Zu Beginn des FuE-Vorhabens wurde das Torusgeräusch in Anlehnung an das Nahfeldmessverfahren [6] in Terzen zwischen 315 und 5 000 Hz bestimmt und ausgewertet [14]. Bei diesen Messungen musste möglichst gleichmäßig gefahren und sehr exakt die Referenzgeschwindigkeit eingehalten werden, denn die Formel für die Korrektur der Geschwindigkeit nach dem CPX-Verfahren konnte nicht „eins zu eins“ auf die ATM übertragen werden. Gleichwohl spielten die Radlast und der Reifenfülldruck keine Rolle, weil diese von der Norm vorgegeben sind.

Während des Flottenversuchs fahren die Kolleginnen und Kollegen bei ihren Dienstreisen mit den Kraftfahrzeugen jedoch unterschiedlich schnell. Darüber hinaus werden die Fahrzeuge verschieden beladen und der Fülldruck im Reifen kann schwanken. Aus diesem Grund lag das Augenmerk auf der Herleitung von möglichen Korrekturfunktionen für die Torusgeräusch-Pegel, insbesondere für unterschiedliche Geschwindigkeiten.

3.1 Akustische Torusmessungen am Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn der BAST

Am Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn (PFF) der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) wurde unter kontrollierten Bedingungen auf einem „Safety Walk“ (Antirutsch-)Belag für die Prüfreifenpaare „Michelin Energy Saver, 205/55 R16 91 H“ und „Goodyear Cargo Vector, 225/60 R16C 101/99H“ das Torusgeräusch untersucht. Hierbei wurde die Geschwindigkeit zwischen 30 und 120 km/h, die statische Radlast bezogen auf die (typische) Betriebs-Last um $\pm 50\%$ sowie der Fülldruck des Reifens in Vergleich zum Betriebsfülldruck um $\pm 0,3 \cdot 10^5$ Pa variiert, siehe Abbildung 11. Aus Sicherheitsgründen wurde der Betriebszustand hohe Last bei kleinem Fülldruck nicht untersucht. Darüber hinaus wurde von einem „Michelin Energy Saver“-Reifen das Profil abgeschält, um die Frage zu beantworten welchen Einfluss das Profil auf das Torusgeräusch hat, wenn sonst alle anderen Parameter (Materialeigenschaften) des Reifens unverändert bleiben.

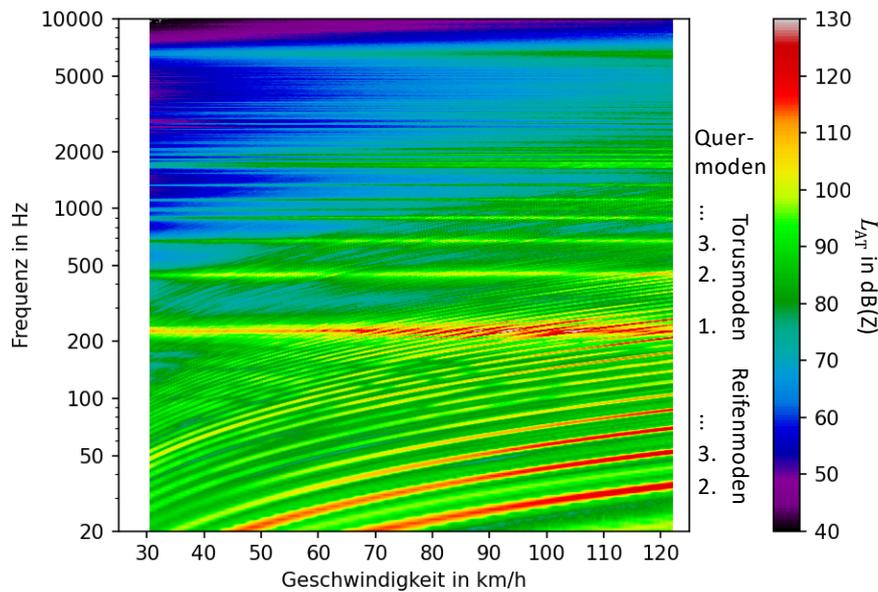
Vor jedem Messblock am Prüfstand wurde der Reifen 20 Minuten lang eingefahren, um Einflüsse beispielsweise durch Temperaturänderung zu minimieren.

3.1.1 Einfluss der Geschwindigkeit auf das Torusgeräusch

Die Abbildung 7 zeigt den Torusgeräusch-Pegel frequenz aufgelöst. Hierbei sind die Torus- und die Reifenmoden deutlich zu erkennen. Erste sind unabhängig von der Geschwindigkeit und damit in der Abbildung horizontale Linien. Bei den Zweiten nimmt die Frequenz mit der Geschwindigkeit zu, sie sind in der Abbildung als logarithmisch ansteigende Kurven erkennbar [12]. Die Reifenmoden wurden zunächst als „Störquelle“ betrachtet. Bei diesen handelt es sich möglicherweise um Längsmode der Eigenschwingung des freien Teils des Reifen-Gürtels, die bei allen eingesetzten Prüfrädern bis etwa zur 90-ten Ordnung detektiert werden konnten. Abbildung 8 veranschaulicht wie diese Reifenmoden aussehen können, wenn sich ein Schwingungsknoten in der Reifenaufstandsfläche befindet. Die Tonhöhe f_{RM} dieser Moden ist direkt proportional zur Geschwindigkeit v und indirekt proportional zum akustischen Radius des Reifens r_{ak} , siehe Formel (1):

$$f_{\text{RM}} = \frac{v}{2\pi \cdot r_{\text{ak}}} \cdot n_{\text{RM}} \quad (1)$$

Abbildung 7: Akustische Torusmessung im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn



Konturdiagramm der unbewerteten Torusgeräusch-Pegel in einem Prüfrad (Reifen: Michelin Energy Saver, 205/55 R16 91 H) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Frequenz bei einem Reifenfülldruck von $2,0 \cdot 10^5$ Pa und einer statischen Radlast von 3,2 kN; gekennzeichnet sind die Reifen-, Torus- und Quermoden.

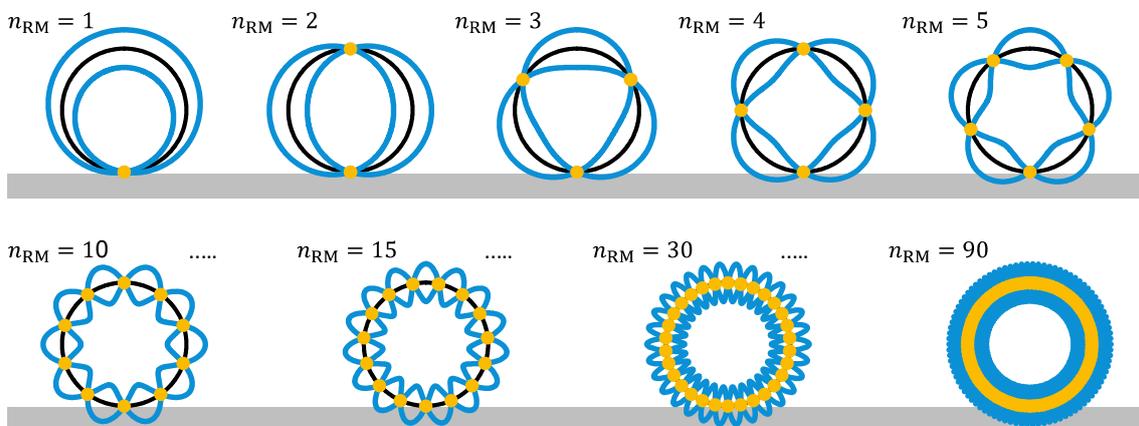
Quelle: eigene Darstellung, LfU

Gleichzeitig ist der Reifentorus ein Hohlraumresonator, in dem die Luft in charakteristischen Torusmoden schwingt. Die Geometrie des Torus bestimmt einzig und allein die Tonhöhe f_{TM} dieser Moden, siehe Formel (2).

$$f_{TM} = \frac{c_{Luft}}{2\pi \cdot r_T} \cdot n_{TM} \quad (2)$$

Wenn sich nun die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ändert, dann schieben sich die Reifenmoden über die Torusmoden hinweg und die Amplituden beider Schwingungen überlagern sich. Diese Wechselwirkung erschwert die Datenauswertung. Die Idee war nun, das Torusgeräusch bezüglich des Beitrags der Reifenmoden zu filtern.

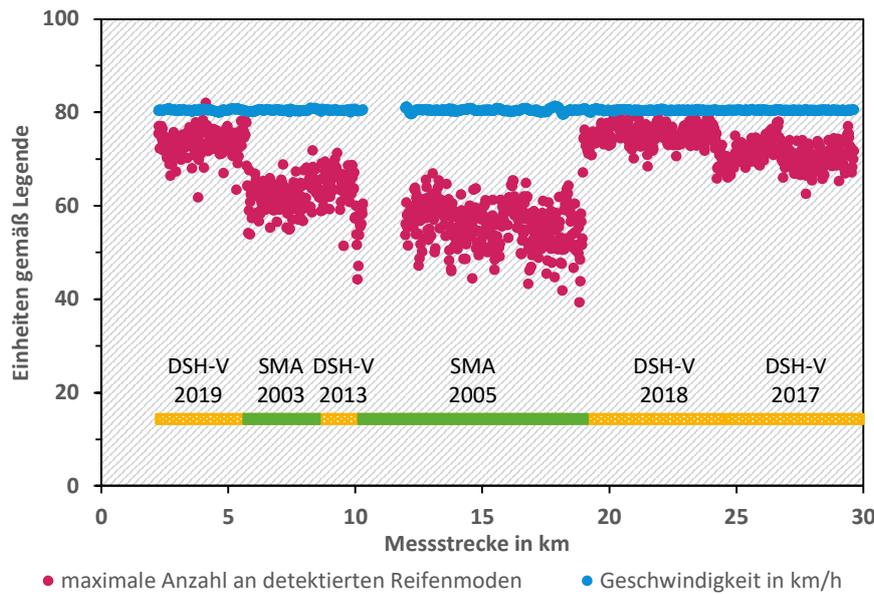
Abbildung 8: Veranschaulichung der Reifenmoden



Vereinfachte Darstellung der Reifenmoden von der 1. bis zur 90. Ordnung, wie sich diese im Reifen-Gürtel ausbilden können. Ein Schwingungsknoten (orange Punkte) befindet sich immer im Kontaktpunkt von Reifen und Fahrbahn.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Abbildung 9: Akustische Torusmessung bei einer längeren Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit



Beispiel einer ATM mit konstanter Geschwindigkeit von (80 ± 2) km/h über eine Messstrecke von ca. 30 km: Die maximale Anzahl an Reifenmoden, die pro Segment detektiert werden kann, ist abhängig von der Textur der Oberfläche. Miteingezeichnet ist das zugehörige Streckenband mit Typ und Baujahr der Deckschichten gemäß BAYSIS, siehe Kapitel 5.2. Quelle: eigene Darstellung, LfU

Auf Grundlage der Formel (1) wurde ein Auswerte-Programm geschrieben, das alle erkennbaren Reifenmoden zählt und iterativ den akustischen Radius des Prüfrads bestimmt. Der Algorithmus hierfür steht in Anhang D. Dieses Programm wurde bei einer längeren Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit getestet. Hierbei zeigte sich, dass die maximale Zahl an Reifenmoden, die in einem Straßenabschnitt detektiert werden, von der Textur der Fahrbahnoberfläche abhängt, siehe Abbildung 9.

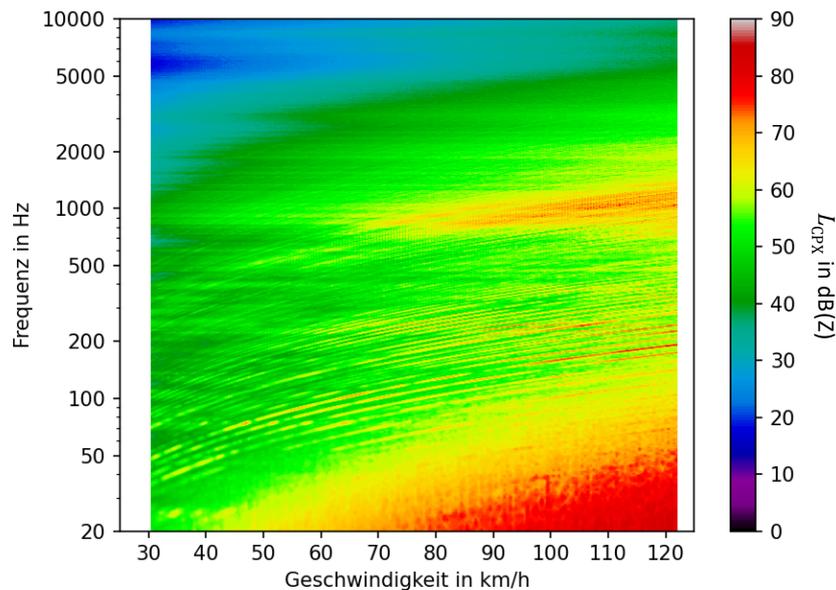
Je geringer/größer die akustische Anregung des Reifens durch die Fahrbahnoberfläche ist, desto mehr/weniger Reifenmoden können in einem Straßenabschnitt detektiert werden und desto leiser/lauter ist die Deckschicht. Diese Besonderheit des Torusgeräusches ist verständlich, denn beim Abrollen tastet der Reifen die Oberfläche ab. Die Texturwellenlängen λ_{DS} der Deckschicht prägen sich in die Aufstandsfläche des Reifens ein und induzieren im Ein- und Auslauf eine Schwingung mit der Frequenz f_{DS} , die von der Geschwindigkeit abhängt, siehe Abbildung 2 und Formel (3):

$$f_{DS} = \frac{v}{\lambda_{DS}} \quad (3)$$

Oberhalb einer bestimmten Frequenz, die im Folgenden als Grenzfrequenz bezeichnet wird, überdecken die Geräuschpegel dieser texturinduzierten Schwingungen nun die Pegel der Reifenschwingungen. Je tieffrequenter diese Anregung ist, desto früher beginnt diese Maskierung und desto weniger Reifenmoden können vom Algorithmus erfasst werden. Für die Grenzfrequenz gilt: $f_{DS} = f_{RM}$ oder umgestellt nach der Wellenlänge für die prägende Textur der Deckschicht, siehe Formel (4):

$$\lambda_{DS} = \frac{2\pi \cdot r_{ak}}{n_{RM}} \quad (4)$$

Abbildung 10: Nahfeldmessungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn



Konturdiagramm der unbewerteten Nahfeld-Pegel an einem Prüfrad (Reifen: Michelin Energy Saver, 205/55 R16 91 H) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Frequenz bei einem Reifenfülldruck von $2,0 \cdot 10^5$ Pa und einer statischen Radlast von 3,2 kN; auch hier sind die Reifenmoden erkennbar.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Bei den Messungen am PFF wurden die Reifenmoden anfänglich als das „Störsignal“ im Torusgeräusch identifiziert. Doch gezählt bis zur maximalen Mode und umgerechnet in die Wellenlänge λ_{DS} der prägenden Textur sind sie im Grunde der „Fingerabdruck“, der über die akustische Qualität einer jeden Deckschicht entscheidet.

Als einzige Einschränkung und vielleicht als die Grundvoraussetzung für jede ATM verbleibt die gleichmäßige und vorausschauende Fahrt. Wenn der Prüfreifen im Prüfstand mit mehr als $0,2 \text{ m/s}^2$ beschleunigt oder gebremst wurde, dann konnte über den Algorithmus der akustische Radius des Reifens r_{ak} nicht mehr zuverlässig ermittelt werden.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde der Entwurf einer Technische Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen (E TP ATM) verfasst, siehe Anhang D. Nach dem darin beschriebenen Analyseverfahren werden die ATM samt ihren Unsicherheiten ausgewertet.

Im Übrigen sind die Reifenmoden auch im Nahfeldpegel zu erkennen. Bei der Auswertung nach dem CPX-Verfahren sind diese jedoch nicht pegelbestimmend, siehe Abbildung 10.

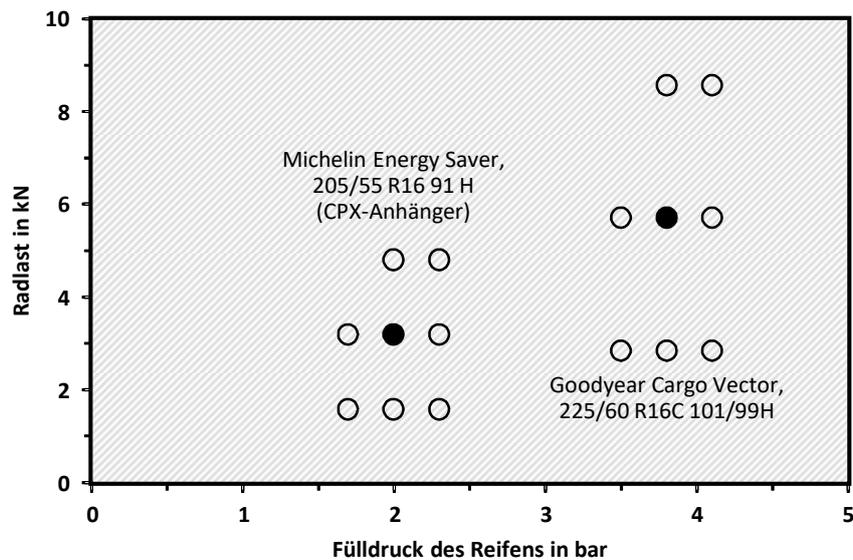
3.1.2 Einfluss von Radlast und Reifenfülldruck auf das Torusgeräusch sowie die Festlegung eines Signal-Rausch-Verhältnisses

Bei den Untersuchungen am PFF der BAST wurden auch die Radlasten und die Reifenfülldrucke variiert. Hiermit sollte bei konstanter Textur der Lauffläche geklärt werden, ob sich

- ▶ die Beladung des Flottenfahrzeuges oder
- ▶ die Schwankung des Reifenfülldrucks

auf das Torusgeräusch auswirkt. In Abbildung 11 sind alle gefahrenen Betriebszustände eingetragen. Diese repräsentieren eine „Worst-Case“ Betrachtung, denn im realen Betrieb der Kraftfahrzeuge werden diese großen Variationen niemals auftreten.

Abbildung 11: Betriebszustände im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn



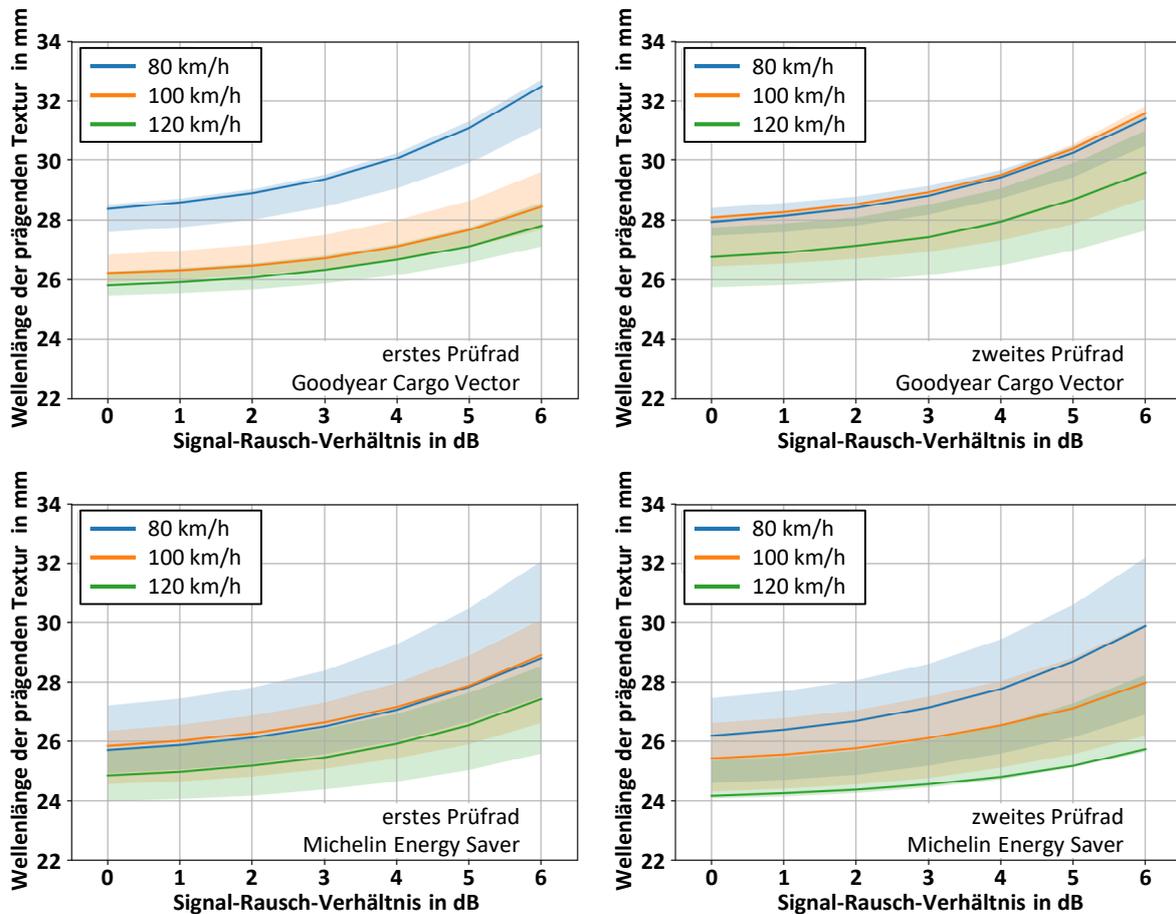
Wertebereich für die Last- und Fülldruck-Variation am PFF der BAST. Der Mittelpunkt im Zustandsdiagramm (●) gehört zu den typischen Betriebsbedingungen des jeweiligen Rad-Reifens („Michelin Energy Saver“ und „Goodyear Cargo Vector“).
Quelle: eigene Darstellung, LfU

Gewöhnlich vergrößert oder verkleinert sich die Reifenaufstandsfläche infolge von Radlast- und Reifenfülldruck-Änderungen. In gleichem Maße verkürzt bzw. verlängert sich der freie Teil des Reifen-Gürtels, der in den Eigenmoden (Reifenmoden) mechanisch schwingt. Eine Vergrößerung oder Verkleinerung der Aufstandsfläche der untersuchten Rad-Reifen um $\pm 30\%$ bewirkt, dass sich im interessanten Moden-Untersuchungsbereich die Wellenlänge der Reifenmoden überschlägig um ca. ± 2 mm ändert.

Aus diesem Grund sind Schwankungen der Last und des Fülldruckes während des Flottenversuches unbedeutend für die Ermittlung der Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht; genauso wie die Variationen der Geschwindigkeit, siehe Kapitel 3.1.1.

Bei den ersten Auswertungen der Torus-Messungen war es diffizil, insbesondere die Signale der Reifenmoden der höheren Ordnungen im Torusgeräusch sicher und zuverlässig zu erkennen. Folglich wurde in den Algorithmus ein Signal-Rausch-Verhältnis (SRV) implementiert, das entscheidet, ob die Suche nach weiteren Reifenmoden abbricht. Dabei wird gefordert, dass eine Reifenmode mindestens um einen bestimmten Wert aus dem Hintergrundgeräusch herausragen muss. Das Verhältnis darf zum einen nicht zu groß gewählt werden, um den Algorithmus nicht vorzeitig abzubrechen und damit zu große Wellenlängen λ_{DS} der prägenden Textur zu berechnen. Zum anderen sollte es nicht zu klein sein, um mögliche Störsignale als Reifenmoden zu interpretieren. In Abbildung 12 ist dieser Sachverhalt dargestellt. Für zwei Prüfrad-Paare sind die Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschicht pro 20 m Segment in Abhängigkeit vom SRV für die drei Referenzgeschwindigkeiten (v_{ref}) 80, 100 und 120 km/h sowie die verschiedenen Betriebszustände aus der Abbildung 11 aufgetragen. Obwohl es sich dabei um zwei sehr unterschiedliche Prüfrad-Paare handelt, siehe Anhang A, sind die Unterschiede im Millimeter-Bereich.

Abbildung 12: Wellenlängen der prägenden Textur für die verschiedenen Betriebszustände im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn



Für das jeweilige Prüfrad-Paar („Goodyear Cargo Vector“ und „Michelin Energy Saver“) ermittelte Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschicht in Abhängigkeit vom Signal-Rausch-Verhältnis bei den Referenzgeschwindigkeiten 80, 100 und 120 km/h. Die durchgezogenen Linien entsprechen den typischen Betriebsbedingungen für Last und Fülldruck des jeweiligen Prüfrades. In passender halbtransparenter Farbe ist der maximal bestimmte Wellenlängen-Bereich für die gesamten Bandbreite der Last- und Fülldruck-Variation am PFF dargestellt, siehe Abbildung 11.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Um die Höhe des SRV festzulegen wurden die Messungen am PFF als Ringversuch interpretiert und statistisch nach der DIN ISO 5725-2, „Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen“: 2002-12 [16] ausgewertet, siehe auch Kapitel 4.5. Die Begriffe und Notationen aus der Norm werden weitgehend übernommen, bei dem:

- ▶ jedes Prüfrad t ein „Labor“ i repräsentiert,
- ▶ jede ermittelte mittlere Wellenlänge $\lambda_{DS;t}$ der prägenden Textur für ein 20 m Segment im jeweiligen Betriebszustand und der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} dem Ermittlungsergebnis y_{ijk} entspricht und
- ▶ das SRV von 0, 2 und 4 dB einem „Merkmalsniveau“ j zugeordnet wird.

Mit diesen Eingangsgrößen errechnet sich eine Wiederhol- und Vergleichstandardabweichung von $\pm 1,4$ mm bzw. $\pm 2,0$ mm.

Mit dem gewählten SRV von 2 dB kann die Wellenlänge λ_{DS} der prägenden Textur der Deckschicht mit einem relativen Fehler von $\pm 2,5$ % bestimmt werden.

3.1.3 Einfluss des Profils auf das Torusgeräusch

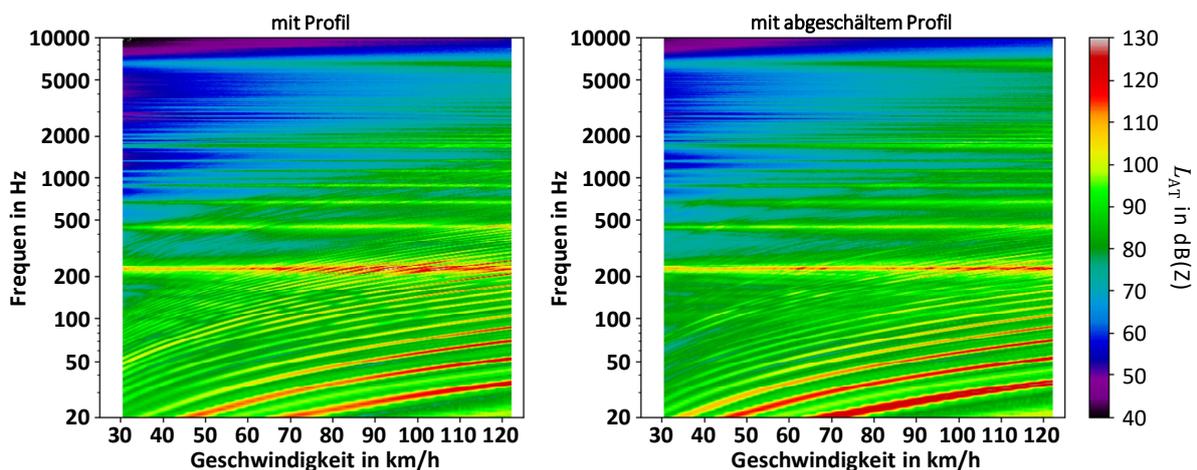
Die Ergebnisse aus Kapitel 3.1.2 sind auch im Hinblick auf die Frage interessant: Welchen Einfluss hat das Profil auf die ermittelte Wellenlänge der prägenden Textur? Insbesondere da im PFF der BAST zwei Rad-Reifen mit sehr unterschiedlichen Profilen vermessen wurden; der „Goodyear Cargo Vector“ mit seiner groben Lauffläche, siehe Abbildung 29 links in Anhang A, und der „Michelin Energy Saver“, dessen Lauffläche hauptsächlich aus Rillen besteht, siehe Abbildung 31 in Anhang A.

Beim Betrachten der Abbildung 12 fällt auf, dass der Einfluss des Profils auf die Geräusch-Charakteristik eigentlich relativ gering sein sollte. Im Wesentlichen werden bei einem SRV von 2 dB mit allen Prüfrädern dieselbe Wellenlänge der prägenden Textur von ca. 26 mm bei einer Vergleichsstandardabweichung von $\pm 2,0$ mm ermittelt.

Um diesen Sachverhalt bei sonst unveränderten Materialeigenschaften des Rad-Reifens genauer zu untersuchen, wurde das Profil von einem „Michelin Energy Saver“ vollständig abgeschält und Vorher- bzw. Nachher-Messungen unter typischen Betriebsbedingungen durchgeführt. Die ATM mit diesen Prüfrädern fand ebenfalls im Prüfstand statt. Das Ergebnis dieser Vergleichsmessung ist in Abbildung 13 dargestellt. Die Torusgeräusch-Spektren unterscheiden sich nicht signifikant; außer, dass durch das Profil die Geräuschpegel der Reifenmoden verstärkt angeregt werden. Dies wird deutlich, wenn sich die geschwindigkeitsabhängigen Reifenmoden über die geschwindigkeitsunabhängigen Torusmoden (insbesondere über die 1. Torusmode) schieben.

Beim Flottenversuch konnten mit allen Prüfrädern, siehe Kapitel 2.4, mit dem Algorithmus in Anhang D auf sehr ebenen Deckschichten vereinzelt Reifenmoden bis zur 90-sten Ordnung detektiert werden. Darum sollte das Profil keinen wesentlichen Einfluss auf das Torusgeräusch haben. Diese höchste Mode entspricht einer Wellenlänge der prägenden Textur einer Deckschicht von ca. 20 mm und ist die Untergrenze des Messbereichs einer ATM. Nach oben hin ist der Messbereich durch die Längenausdehnung der Reifenaufstandsfläche begrenzt.

Abbildung 13: Akustische Torusmessung von einem Prüfrad mit und ohne Profil



Konturdiagramm der unbewerteten Torusgeräusch-Pegel in einem Prüfrad (Reifen: Michelin Energy Saver, 205/55 R16 91 H) mit Profil (links) und mit abgeschältem Profil (rechts) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Frequenz bei einem Reifenfülldruck von $2,0 \cdot 10^5$ Pa und einer statischen Radlast von 3,2 kN. Durch das Profil werden die Amplituden der Reifenmoden verstärkt. Dies wird besonders deutlich, wenn sich durch die Geschwindigkeitsvariation die Reifenmoden über die Torusmode schieben. Grundsätzlich können mit beiden Prüfrädern dieselben Reifenmoden detektiert werden. Die ATM wurde im PFF der BAST durchgeführt. Zur Beschriftung der Moden siehe Abbildung 7.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

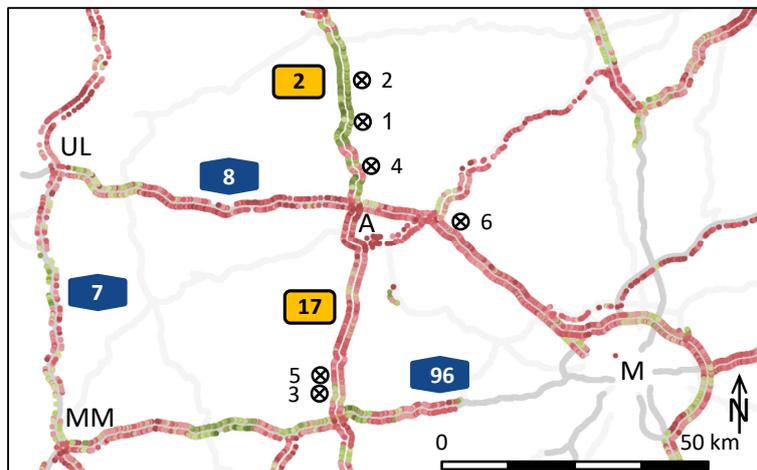
4 Validierung der akustischen Torusmessungen

Aus den ATM wurde die Wellenlänge der prägenden Textur als das Qualitätskriterium einer Deckschicht identifiziert. Die Pegel im Geräuschspektrum, die von dieser Wellenlänge induziert werden, überdecken die Pegel der Moden der Reifenschwingung. Um diese Auswertegröße genauer zu charakterisieren und eine Kausalkette für die Entstehung des Rollgeräusches aufzustellen, wurden an ausgewählten Orten kontrollierte Fahrten mit den Flottenfahrzeugen sowie Textur-, SPB- und CPX-Messungen [17] [5] [6] durchgeführt.

4.1 Auswahl der Orte für kontrollierte Messungen

Die Orte wurden anhand der Zwischenergebnisse aus den Fahrten im Jahr 2020 ausgewählt, siehe Abbildung 14 und Tabelle 3. Sie liegen alle in akustisch homogenen Abschnitten gemäß des E TP ATM, siehe Anhang D. Mit ihnen wird ein möglichst großes Wellenlängenspektrum $\lambda_{DS,h}$ der prägenden Textur der Deckschicht abgedeckt.

Abbildung 14: Lage der Orte für die kontrollierten Messungen



Kartenausschnitt des Fernstraßennetzes (hellgrau Bundesstraßen und dunkelgrau Autobahnen) um Augsburg (A). Gemäß dem E TP ATM, siehe Anhang D, und den Prüfschritten aus Kapitel 5.1 wurde hier für das Prüfrad 2 die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschichten für jedes Straßensegment einer Richtungsfahrbahn bestimmt (Farbe: Dunkelrot entspricht einer Wellenlänge von ca. 50 mm und Dunkelgrün einer von ca. 30 mm). Anhand dieser Karte wurden die Orte 1 bis 6 (⊗) für die kontrollierten Messungen ausgewählt.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Tabelle 3: Nummer und genaue Lage der Orte für kontrollierte Messungen

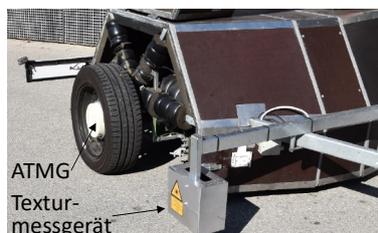
Ort Nr.	Straße	Fahrtrichtung	WGS 84 Koordinate	Deckschichttyp	Baujahr
1	B 2	Norden	48,539 407° / 10,840 667°	DSH-V 5	2020
2	B 2	Norden	48,600 687° / 10,839 518°	DSH-V 5	2018
3	B 17	Süden	48,095 420° / 10,837 420°	DSH-V 5	2011
4	B 2	Norden	48,475 940° / 10,872 638°	SMA	2003
5	B 17	Süden	48,110 682° / 10,835 429°	SMA 11 S	2008
6	BAB A 8	Nordwesten	48,375 506° / 11,094 653°	WB 0/8	2009

Genaue Lage der Orte für die kontrollierten Messungen an unterschiedlichen Deckschichttypen und deren Baujahre. (Die Liste ist alphabetisch nach dem Deckschichttyp sortiert.)

4.2 Texturmessungen

Zwei Texturmessgeräte (Gocator 1340) der Firma LMI Technologies wurden auf die Deichsel des CPX-Anhängers, siehe Kapitel 4.4, montiert. Damit kann während der Fahrt die Oberflächen-textur der Deckschichten in der Mitte der linken und rechten Rollspur der Prüfräder mit optischen Punkt-Sensoren simultan erfasst werden, siehe Abbildung 15.

Abbildung 15: Texturmessgerät am CPX-Anhänger



Fotografie des geöffneten rechten Radkastens des CPX-Anhängers. Das ATMG (weißer Zylinder) ist mit den Radschrauben am Lochkreis der Radscheibe befestigt. Die optischen Sensoren der Texturmessgeräte sind an der Deichsel des Anhängers montiert und messen die Oberflächentextur der Deckschicht in der linken und rechten Rollspur der Prüfräder. Zum Schutz vor der Laserstrahlung wurde um den Sensor ein Blechgehäuse gebaut, das nach unten offen ist.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Da die ATMG an den Flottenfahrzeugen am hinteren linken Rad-Reifen montiert sind, wurden an den ausgewählten Orten 1 bis 6, siehe Tabelle 3, nur die Texturmessungen vom linken Sensor ausgewertet und das Texturspektrum gemäß der ISO 13473-1 [17] analysiert, siehe Abbildung 16, sowie die folgenden Kennwerte bestimmt:

- ▶ mittlere Profiltiefe MPD (en: mean profil depth),
- ▶ Effektiv-Amplitude R_{ms} (en: root mean square),
- ▶ bewährte Texturtiefe $TD_{5/95}$ (en: texture depth) und
- ▶ bewährter Gestaltfaktor $GF_{5/95}$ [4] [18], siehe Tabelle 4.

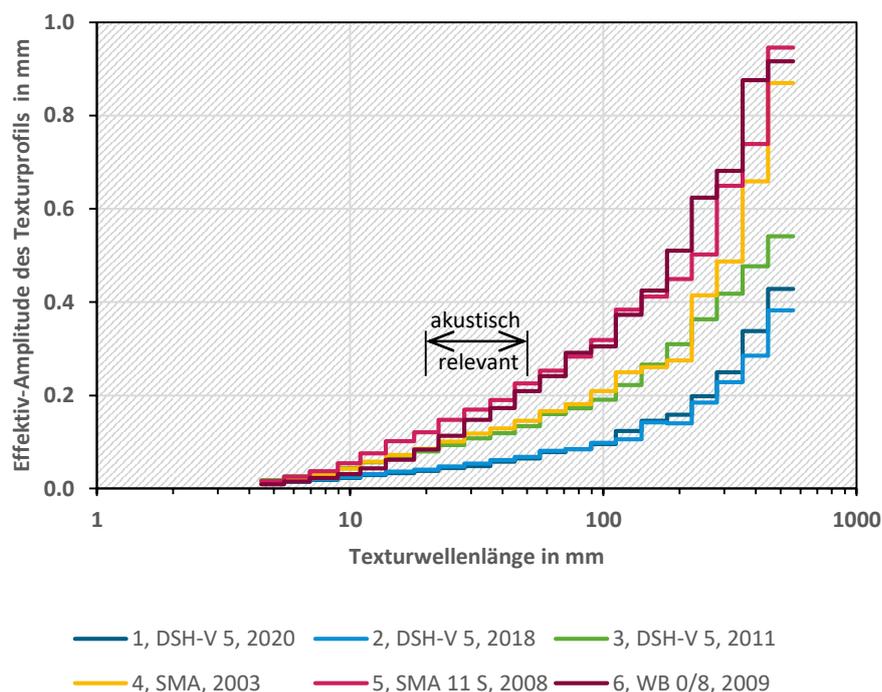
Statt dem Gestaltfaktor g [4] und der Texturtiefe TD wurde der bewährte Gestaltfaktor $GF_{5/95}$ und die bewährte Texturtiefe $TD_{5/95}$ ermittelt [18]. Denn diese Größen sind robuster bezüglich zufälliger Abweichungen im Rauheitsprofil, wie z. B. kleinen Steinen oder einem Loch in der Deckschicht.

Tabelle 4: Kennwerte der Textur an den ausgewählten Orten

Ort Nr.	Deckschichtart	Baujahr	MPD in mm	R_{ms} in mm	$TD_{5/95}$ in mm	$GF_{5/95}$	Gestalt
1	DSH-V 5	2020	0,340	0,227	0,735	0,74	konkav
2	DSH-V 5	2018	0,368	0,249	0,811	0,74	konkav
3	DSH-V 5	2011	0,710	0,448	1,484	0,67	
4	SMA	2003	0,616	0,406	1,363	0,68	
5	SMA 11 S	2008	0,794	0,577	1,925	0,71	
6	WB 0/8	2009	0,559	0,362	1,168	0,57	konvex

Kennwerte der Textur an den ausgewählten Orten 1 bis 6 gemäß Tabelle 3.

Abbildung 16: Texturspektrum in der linken Rollspur



Effektiv-Amplitude des Texturprofils in Abhängigkeit von der Texturwellenlänge an den ausgewählten Orten 1 bis 6 gemäß Tabelle 3. Der akustisch relevante Bereich liegt zwischen 20 und 50 mm.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Die Texturspektren der Deckschichten sind in Abbildung 16 aufgetragen. Im akustisch relevanten Wellenlängenbereich sind keine Auffälligkeiten erkennbar. An allen ausgewählten Orten nimmt die Effektiv-Amplitude kontinuierlich mit der Wellenlänge zu und weist kein Maximum auf. Aus diesem Grund konnte keine maximale spektrale Rauheitstiefe, A_{\max} und damit auch keine entsprechende Wellenlänge, W_{\max} abgeleitet werden. Gleichwohl wird deutlich, dass die Texturen der Deckschichten an den Orten 1 und 2 sehr ähnlich sind. Dasselbe gilt für die an den Orten 3 und 4; auch die Wellenlängen an den Orten 5 und 6 korrespondieren miteinander.

Ein Gestaltfaktor von größer 70 % charakterisiert tendenziell eine konkave Gestalt, die aus „Plateaus mit Schluchten“ besteht und ein Faktor kleiner 60 % eher eine konvexe Gestalt, die sich aus „Gebirgen mit Tälern“ zusammensetzt [4].

4.3 SPB-Messungen an ausgewählten Orten

Für die Bestimmung des absoluten Emissionsniveaus der Straßenabschnitte wurden statistische Vorbeifahrt-(SPB-)Messungen durchgeführt. Aufgrund der mitunter sehr hohen Verkehrsstärke auf einigen Abschnitten, wurde hierfür ein Mikrofon-Array [19] verwendet. Damit konnten die Messungen auch in einer vertretbaren Zeit abgeschlossen werden.

Bei der Auswertung wurden die Pegel einem Ausreißertest unterzogen und die 5 % lautesten und leisesten Fahrzeuge verworfen. Darüber hinaus wurde jeder gemessene maximale Vorbeifahrtpegel nach dem in der TP KoSD [1] beschriebenen Verfahren temperaturkorrigiert. In der Tabelle 5 und Tabelle 6 sind die wesentlichen Begleitparameter sowie das Ergebnis der Auswertung der SPB-Messungen für die Fahrzeuggruppe der Pkw bzw. die der Lkw2 (Last- und Sattelzüge) zusammengefasst. Die Spannweite des Fahrzeuggeräuschpegels für die Pkw bei 120 km/h beträgt gut 5 dB und die für die Lkw2 bei 80 km/h rund 2 dB.

Tabelle 5: Ergebnis der SPB-Messung von Pkw an ausgewählten Orten

Ort Nr.	Datum	T_{Luft} in °C	N_{Pkw}	\bar{v}_{Pkw} in km/h	a in dB(A)	b in dB(A)	L_{Pkw} in dB(A) bei 120 km/h
1	14.07.2021	20	136	111 ± 9	35,5 ± 8,9	20,1 ± 4,4	77,9 ± 0,7
2	13.07.2021	22	125	112 ± 8	49,2 ± 9,6	14,4 ± 4,7	79,0 ± 0,4
3	20.07.2021	15	155	117 ± 14	36,5 ± 4,7	21,3 ± 2,3	80,7 ± 0,2
4	19.07.2021	25	130	108 ± 8	31,4 ± 7,1	24,5 ± 3,5	82,4 ± 0,4
5	29.07.2021	23	170	113 ± 16	30,3 ± 3,1	25,7 ± 1,5	83,7 ± 0,2
6	19.07.2021	27	120	109 ± 12	39,3 ± 4,6	21,2 ± 2,3	83,3 ± 0,3

Mess- und Auswerteparameter bei der SPB-Messung von Pkw.

Tabelle 6: Ergebnis der SPB-Messung von Lkw2 an ausgewählten Orten

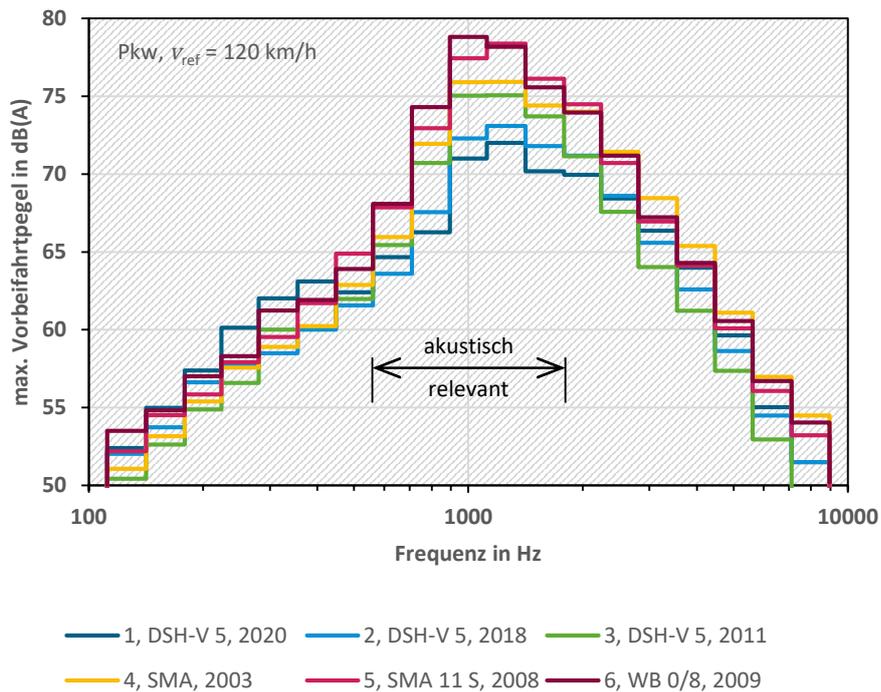
Ort Nr.	Datum	T_{Luft} in °C	N_{Lkw2}	\bar{v}_{Lkw2} in km/h	a in dB(A)	b in dB(A)	L_{Lkw2} in dB(A) bei 120 km/h
1	14.07.2021	20	92	81 ± 5	30,8 ± 18,7	28,8 ± 9,8	85,6 ± 0,5
2	13.07.2021	22	80	82 ± 5	56,1 ± 19,7	16,0 ± 10,3	86,6 ± 0,5
3	20.07.2021	15	118	82 ± 4	43,3 ± 10,7	22,2 ± 5,6	85,5 ± 0,3
4	19.07.2021	25	98	82 ± 4	55,6 ± 14,1	16,3 ± 7,4	86,6 ± 0,4
5	29.07.2021	23	88	80 ± 6	48,6 ± 8,5	19,9 ± 4,5	86,6 ± 0,3
6	19.07.2021	27	92	83 ± 4	48,3 ± 13,2	20,7 ± 6,9	87,7 ± 0,4

Mess- und Auswerteparameter bei der SPB-Messung von Lkw2.

Die Pkw-Rad-Reifen reagieren empfindlicher auf Texturunterschiede der Deckschichten als die Lkw-Reifen [4]. Um diesen Umstand abzuklären, wurden die Geräusch-Spektren der Pkw ausgewertet, siehe Abbildung 17. Als Referenzgeschwindigkeit wurde 120 km/h gewählt, denn diese entspricht weitestgehend dem Geschwindigkeitsniveau der Straßen. Die Geschwindigkeit wurde auch bei den kontrollierten Fahrten mit den Flottenfahrzeugen gefahren, siehe Kapitel 4.5.

Die zentrale 1 000 Hz Oktave mit ihren benachbarten Terzen, d. h. die fünf Terzen von 630 bis 1 600 Hz, enthalten 60 % bis 80 % der Energie der Verkehrsgeräusche. Dies bewirkt, dass der WB 0/8 mit ihrer konvexen Gestalt um mehr als 5 dB lauter ist als eine neu hergestellte DSH-V 5 mit konkaver Gestalt. Diese Pegelunterschiede werden alleine durch die Textur verursacht. Verantwortlich sind hierfür die Wellenlängen zwischen 20 und 50 mm.

Abbildung 17: Terzspektrum der Pkw bei einer Referenzgeschwindigkeit von 120 km/h



Mittlere Geräuschspektren aus der SPB-Messung von Pkws an den ausgewählten Orten 1 bis 6 gemäß der Tabelle 3. Für die Spektren wurden alle Fahrzeuge berücksichtigt, die mit einer Geschwindigkeit von ± 10 % um die Referenzgeschwindigkeit von 120 km/h am Messpunkt vorbeifahren.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

4.4 Nahfeld-(CPX-)Messungen

Die Deckschichten an den ausgewählten Orten, siehe Tabelle 3, wurden mit Nahfeld-(CPX-)Messungen nach der DIN EN ISO 11819-2 [6] weiter untersucht. Hierzu wird das Rollgeräusch in unmittelbarer Nähe eines Rad-Reifens gemessen. Diese befinden sich in separaten, akustisch gedämmten Radkästen eines Mess-Anhängers, siehe Abbildung 18.

Abbildung 18: CPX-Anhänger und Zugfahrzeug



Fotografie des CPX-Anhängers samt Zugfahrzeug. Nach der DIN EN ISO 11819-2 [6] wird das Rollgeräusch in unmittelbarer Nähe der Rad-Reifen gemessen.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Die Messungen fanden am 21.07.2021 statt. Als Messreifen wurde ein „Michelin Energy Saver“ verwendet, also der gleiche Reifentyp, der bereits im PFF der BASt untersucht wurde, siehe Kapitel 3. Die Reifen wurden im Februar 2021 hergestellt und ihre Gummihärte beträgt 63 Shore A. An jedem Ort wurde dreimal vorbeigefahren. Die Referenzgeschwindigkeit war dabei 80 km/h. Wie die Texturmessungen, siehe Kapitel 4.2, wurden auch die Nahfeld-Pegel nur in der linken Rollspur ausgewertet, da die ATMG an den Flottenfahrzeugen ebenfalls hier messen. In der Tabelle 7 ist das wesentliche Ergebnis dieser CPX-Messungen zusammengefasst.

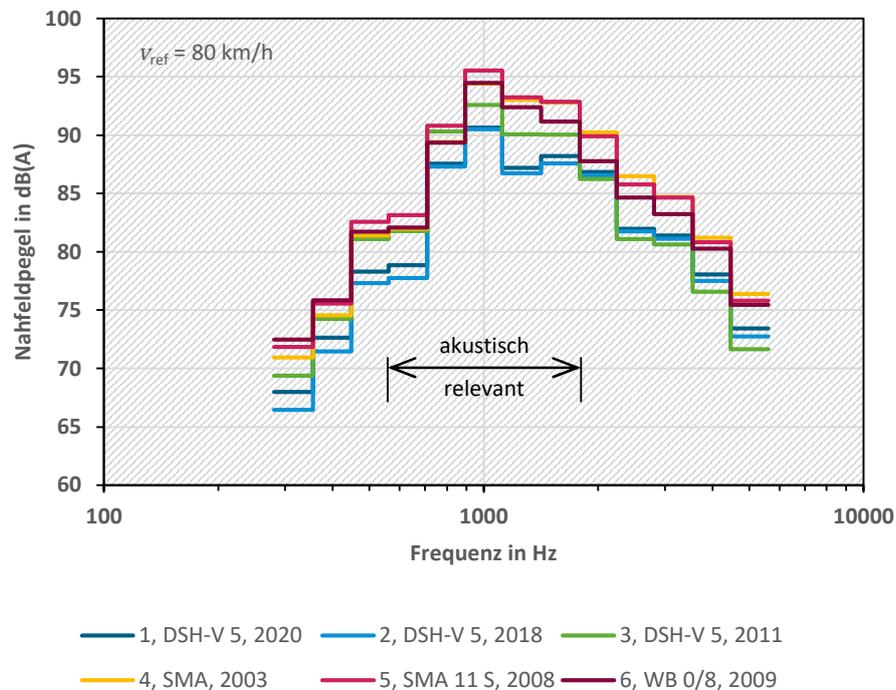
In Abbildung 19 ist das Geräuschspektrum der Nahfeldmessung dargestellt. Die Charakteristik und Dynamik ist weitestgehend dieselbe wie bei den SPB-Messungen, siehe Kapitel 4.3.

Tabelle 7: Ergebnis der CPX-Messung an den ausgewählten Orten

Ort Nr.	T_{CPX} in °C	T_{DS} in °C	L_{CPX} in dB(A)
1	24,6	27,6	96,0
2	24,5	28,0	95,7
3	20,6	21,7	97,8
4	24,9	27,3	100,0
5	20,8	22,2	100,5
6	26,8	29,9	99,2

Luft- und Deckschicht-Temperatur bei der CPX-Messung sowie ermittelter Nahfeld-Pegel L_{CPX} für den linken Rad-Reifen am ausgewählten Ort.

Abbildung 19: Terzspektrum der CPX-Messungen bei einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h



Mittlere Geräuschspektren aus der CPX-Messung [6] mit dem „Michelin Energy Saver“ Rad-Reifen im linken Radkasten bei einer Referenzgeschwindigkeit von 80 km/h an den ausgewählten Orten 1 bis 6 gemäß der Tabelle 3.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

4.5 Kontrollierte Vorbeifahrten mit den Flottenfahrzeugen

Die kontrollierten Fahrten mit den Flottenfahrzeugen dienen zum Test, ob die unterschiedlichen Prüfräder t , siehe Tabelle 2 und Anhang A, an den Fahrzeugen vergleichbare Ergebnisse liefern. Hierzu wurde an jedem Ort mit jedem Fahrzeug bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{\text{ref}} = 80, 100$ und 120 km/h je dreimal kontrolliert vorbeigefahren. Die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht und die kombinierte Unsicherheit $u_{c,DS,h}(k)$ wurde gemäß Kapitel 10 des E TP ATM für den homogenen Unterabschnitt h mit einem Abdeckungsfaktor $k = 1$ bestimmt und nach dem Cochran- und Grubbs-Test statistisch ausgewertet. Mit dem Cochran-Test sollen auffällige Streuungen bei einem Prüfrad identifiziert werden. Der „Einzel-Ausreißer“ Grubbs-Test kontrolliert die Prüfräder untereinander auf vergleichbare Ergebnisse. Die entsprechende „Numerische Methode der Ausreißerprüfung“ ist in der DIN ISO 5725-2, „Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen“: 2002-12 [16] beschrieben.

Aus der Norm wurden weitgehend die Begriffe und Notationen übernommen, d. h. die kontrollierten Fahrten mit den verschiedenen Flottenfahrzeugen werden als Ringversuch interpretiert, bei dem:

- ▶ jedes Prüfrad t ein „Labor“ i repräsentiert,
- ▶ jede ermittelte mittlere Wellenlänge $\lambda_{DS,h,t}$ der prägenden Textur für ± 100 m um den ausgewählten Ort h bei der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} dem Mittelwert \bar{y}_{ji} für das Merkmalsniveau j und dem Labor i zugeordnet wird,
- ▶ die Anzahl der ATM-Läufe r der „Anzahl n_i der in einem Labor auf einem Merkmalsniveau j gewonnenen Ermittlungsergebnisse“ entspricht; hier gleich drei,
- ▶ p die „Anzahl der am Ringversuch beteiligten Labors“ ist; hier für $v_{\text{ref}} = 80$ km/h gleich fünf sonst vier,
- ▶ q die „Anzahl der bei einem Ringversuch untersuchten Merkmalsniveaus“ ist; hier gleich 18.

Über die Zwischenergebnisse T_1 bis T_5 mit den Formeln (5) errechnet sich für jedes Merkmalsniveau die Wiederhol- und Vergleichsvarianz sowie der Schätzwert für den Gesamtmittelwert nach Formel (6) und (7):

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \sum_{t=1}^p n_t \cdot \lambda_{DS,h,t} & T_2 &= \sum_{t=1}^p n_t \cdot \lambda_{DS,h,t}^2 & (5) \\
 T_3 &= \sum_{t=1}^p n_t & T_4 &= \sum_{t=1}^p n_t^2 & T_5 &= \sum_{t=1}^p (n_t - 1) \cdot u_{c,DS,h,t}^2
 \end{aligned}$$

Wiederholvarianz:

$$s_r^2 = \frac{T_5}{T_3 - p}$$

Varianz zwischen den Prüfrädern (Labore):

$$s_L^2 = \left[\frac{T_2 \cdot T_3 - T_1^2}{T_3 \cdot (p - 1)} - s_r^2 \right] \cdot \left[\frac{T_3 \cdot (p - 1)}{T_3^2 - T_4} \right] \quad (6)$$

Vergleichsvarianz:

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2$$

Schätzwert für den Gesamtmittelwert:

$$\hat{\lambda}_{DS,h} = \frac{T_1}{T_3} \quad (7)$$

Tabelle 8: Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt B für die Zusammenstellung der arithmetischen Mittelwerte \bar{y}_{ji} bzw. $\lambda_{DS,h,t}$

Ausgewählter Ort h	1) B 2, DSH-V 5, 20			2) B 2, DSH-V 5, 18			3) B 17, DSH-V 5, 11			4) B 2, SMA, 03			5) B 17, SMA 11 S, 08			6) A 8, WB 0/8, 09		
Geschw. v_{ref} in km/h	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120
Merkmalsniveau j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfrad 1	27,8	27,4	26,8	27,6	27,5	25,5	31,7	34,9	33,2	37,5	36,2	33,6	35,6	37,6	34,4	42,9	40,7	35,2
Prüfrad 2	27,8	25,0	23,9	26,5	24,9	24,0	31,3	30,3	28,4	37,7	36,6	30,9	38,4	35,3	31,9	39,8	33,9	31,8
Prüfrad 3	34,9	29,7	29,8	33,0	29,4	29,1	42,1	38,4	33,7	43,0	40,2	38,5	42,7	39,9	41,1	46,8	43,0	40,8
Prüfrad 4	30,1	28,6	26,2	27,4	26,6	26,5	38,3	32,4	34,5	40,3	36,3	37,4	41,0	38,1	38,0	45,3	42,2	40,0
Prüfrad 5 (CPX links)	30,3	---	---	28,3	---	---	39,9	---	---	44,2	---	---	44,7	---	---	50,6	---	---
Schätzwert $\hat{\lambda}_{DS,h}$	30,2	27,7	26,7	28,5	27,1	26,2	36,7	34,0	32,5	40,5	37,3	35,1	40,5	37,7	36,3	45,1	39,9	36,9

Mit den Prüfrädern t bestimmte mittlere Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschicht in Millimeter für ± 100 m um den ausgewählten Ort ($h = 1$ bis 6) gemäß der Tabelle 3 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h nach dem E TP ATM, siehe Anhang D, für die Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichpräzision.

Nach dem Cochran-Test wurde der komplette Datensatz als „korrekt“ geprüft. Der Grubbs-Test identifizierte für das Prüfrad $t = 3$ am ausgewählten Ort 2 bei der Referenzgeschwindigkeit $v_{ref} = 80$ km/h sowie am Ort 4 bei der Geschwindigkeit von 100 km/h die bestimmten mittleren Wellenlängen, d. h. die Merkmalsniveaus $j = 4$ und 11 , als sogenannten „Fastausreißer“. Diese als „Einzel Ausreißer“ identifizierten Werte wurden bei den weiteren Auswertungen nicht ausgeschlossen. Diese Vorgehensweise entspricht der Norm.

Tabelle 9: Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt C für die Zusammenstellung der Maße für die Streuung s_{ji} bzw. $u_{c,DS;h,t}$

Ausgewählter Ort h	1) B 2, DSH-V 5, 20			2) B 2, DSH-V 5, 18			3) B 17, DSH-V 5, 11			4) B 2, SMA, 03			5) B 17, SMA 11 S, 08			6) A 8, WB 0/8, 09		
Geschw. v_{ref} in km/h	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120
Merkmalsniveau j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Prüfrad 1	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5	1,3	1,0	1,0	1,9	1,3	1,2	1,0	1,7	1,2	2,1	1,4	1,2
Prüfrad 2	0,9	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	1,0	1,2	1,2	2,4	2,4	1,2	1,9	1,2	1,4	2,0	1,7	1,0
Prüfrad 3	1,2	0,9	1,4	0,9	0,6	0,5	1,3	1,5	1,3	1,3	1,0	2,0	1,1	1,3	2,1	1,1	1,7	1,3
Prüfrad 4	1,4	0,7	0,6	0,5	0,5	0,6	1,1	1,0	0,8	1,7	1,2	2,2	1,6	1,1	2,0	1,8	1,7	2,2
Prüfrad 5 (CPX links)	0,9	---	---	0,5	---	---	1,6	---	---	2,2	---	---	1,9	---	---	2,1	---	---
Wiederholvarianz $s_{r,h}^2$	1,1	0,5	0,8	0,4	0,3	0,3	1,7	1,4	1,2	3,7	2,4	3,0	2,4	1,8	2,9	3,4	2,5	2,3
Vergleichvarianz $s_{R,h}^2$	9,1	4,4	6,4	6,7	3,7	4,8	25,3	12,8	8,4	11,6	5,2	14,4	14,4	4,7	18,3	18,9	19,0	19,4

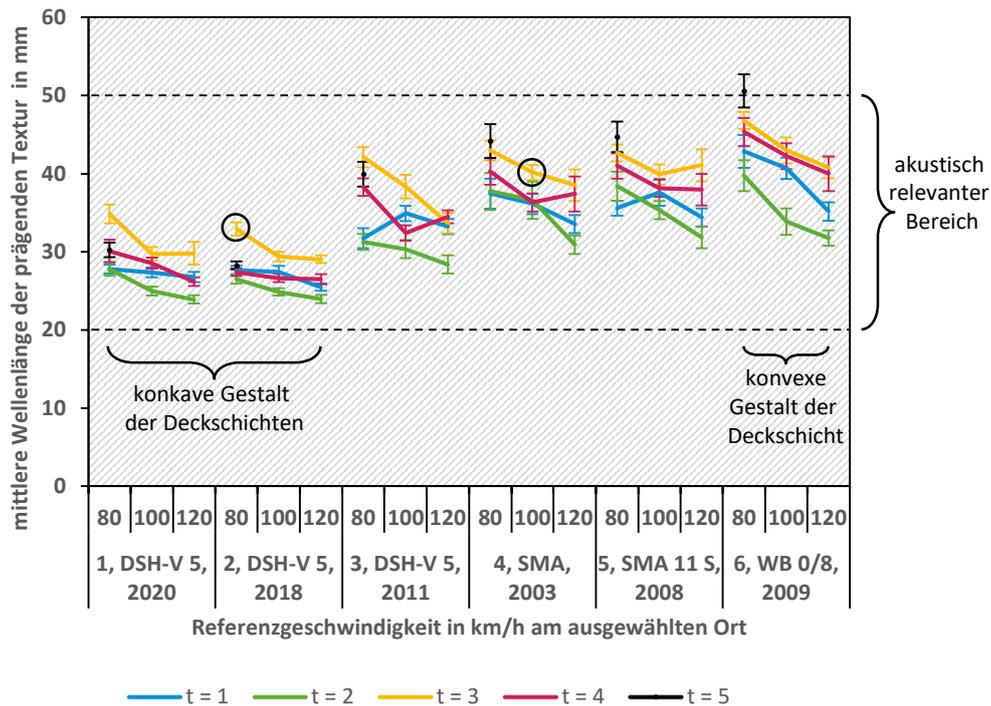
Für die Prüfräder t und den Abdeckungsfaktor $k = 1$ bestimmte Streuung der mittleren Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschicht in Millimeter für ± 100 m um den ausgewählten Ort ($h = 1$ bis 6) gemäß der Tabelle 3 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h nach dem E TP ATM, siehe Anhang D. für die Wiederhol- und Vergleichpräzision.

Als Ergebnis dieses Ringversuchs zum Test der Prüfräder ergibt sich mit dem Abdeckungsfaktor $k = 1$ eine

- ▶ Wiederholstandardabweichung $s_r = \frac{1}{q} \sum_{h=1}^q \sqrt{s_{r,h}^2}$ von 1,3 mm sowie
- ▶ Vergleichstandardabweichung $s_R = \frac{1}{q} \sum_{h=1}^q \sqrt{s_{R,h}^2}$ von 3,3 mm.

Die Untersuchungen fanden in der Zeit vom 07.07.2021 bis 24.08.2021 statt.

Abbildung 20: Mittlere Wellenlänge $\lambda_{DS;h,t}$ der prägenden Textur der Deckschicht



Mit den Prüfrädern der Flottenfahrzeuge ($t = 1$ bis 4) bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h und mit dem Prüfrad im CPX-Anhänger ($t = 5$) bei der Referenzgeschwindigkeit von $v_{ref} = 80$ km/h nach dem E TP ATM, siehe Anhang D, bestimmte mittlere Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschichten, siehe Tabelle 8, an den ausgewählten Orten $h = 1$ bis 6 gemäß der Tabelle 3. Die eingekreisten Werte (O) wurden nach dem Grubbs-Test als „Fastausreißer“ identifiziert. Die Fehlerbalken geben die Streuung aus Tabelle 9 an. Mit den gestrichelten Linien zwischen ca. 20 und 50 mm ist der akustisch relevante Bereich markiert.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

In Abbildung 20 ist das Ergebnis der kontrollierten Vorbeifahrten mit den Flottenfahrzeugen an den ausgewählten Orten grafisch zusammengefasst.

- ▶ Bei „konkaven“ Deckschichten, die eben eingebaut sind wie die DSH-V 5 am Ort $h = 1$ und 2 , werden mittlere Wellenlängen der prägenden Textur von unter 30 mm bestimmt.
- ▶ Bei „konvexen“ Deckschichten wie dem WB (Ort $h = 6$) werden mittlere Wellenlängen von über 40 mm ermittelt.
- ▶ Die mittleren Wellenlängen an den anderen Orten ($h = 3$ bis 5) liegen zwischen diesen Extremwerten. Hier sind die Asphaltdeckschichten stark abgenutzt.
- ▶ Je größer die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur, desto größer ist die Wiederholvarianz, siehe Tabelle 8 und Tabelle 9.
- ▶ Die Flottenfahrzeuge sind mit unterschiedlichen Prüfrädern ausgestattet, siehe Abschnitt 2.4. Der Einfluss des Profils auf das Torusgeräusch, siehe Abschnitt 3.1.3, könnte die Ursache sein, warum für einen Ort mit einem Prüfrad eine etwas andere mittlere Wellenlänge der prägenden Textur bestimmt wurde als mit einem anderen Prüfrad. Der Einfluss ist jedoch gering, denn aus allen kontrollierten Fahrten ergibt sich für die ATM mit allen eingesetzten Prüfrädern eine Vergleichsstandardabweichung von $\pm 3,3$ mm.

- ▶ Die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur ist leicht abhängig von der Geschwindigkeit. Dieser Effekt ist bei „konvexen“ Deckschichten markanter als bei „konkaven“. Wird langsamer/schneller gefahren, dann werden weniger/mehr Reifenmoden detektiert und desto größere/kleinere Wellenlängen werden berechnet.
- ▶ Beim Flottenversuch stand der Geschwindigkeitsbereich von ca. 80 bis maximal 130 km/h im Fokus. Am PFF der BASt wurde auch nicht schneller gefahren, siehe Abschnitt 3, und die Kolleginnen und Kollegen gebeten, sich an die Richtgeschwindigkeiten auf Autobahnen zu halten, siehe Kapitel 2.4 und Anhang B. Möglicherweise nähert sich für hohe Geschwindigkeiten die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur asymptotisch einer noch zu bestimmenden Grenzwellenlänge an. Um diese These zu bestätigen, müsste das Torusgeräusch gezielt bei höheren ($120 \text{ km/h} \leq v_{\text{ref}} \leq 160 \text{ km/h}$) Geschwindigkeiten untersucht werden. Hierbei sollten auch niedrige ($50 \text{ km/h} \leq v_{\text{ref}} \leq 80 \text{ km/h}$) Geschwindigkeiten mit einbezogen werden. Für diese kontrollierten Fahrten auf dem Fernstraßennetz müssten Sicherungsfahrzeuge eingesetzt oder entsprechende Ausnahmegenehmigungen beantragt werden. Hinzu kommt, dass es immer schwieriger wird, bei niedrigen Geschwindigkeiten die Reifenmoden fehlerlos zu detektieren. Anderenfalls, je höher die Referenzgeschwindigkeit gewählt wird, desto schwieriger wird es, diese auch einzuhalten. Die Fahrt wird häufiger durch andere Fahrzeuge beeinflusst. Öfter muss gebremst, beschleunigt oder der Fahrstreifen gewechselt werden. Für die Auswertung bleiben immer weniger Straßensegmente übrig, siehe E TP ATM im Anhang D. Ob diese Experimente zielführend und praktikabel durchzuführen sind, müsste geklärt werden.
- ▶ Mit der ATM können prägende Texturwellenlängen von etwa 20 bis 50 mm in der Deckschicht ermittelt werden, die für 60 % bis 80 % der Energie der Verkehrsgeräusche verantwortlich sind, siehe Abschnitt 4.3.

4.6 Die Übertragungsfunktionen für akustische Torus-Messungen

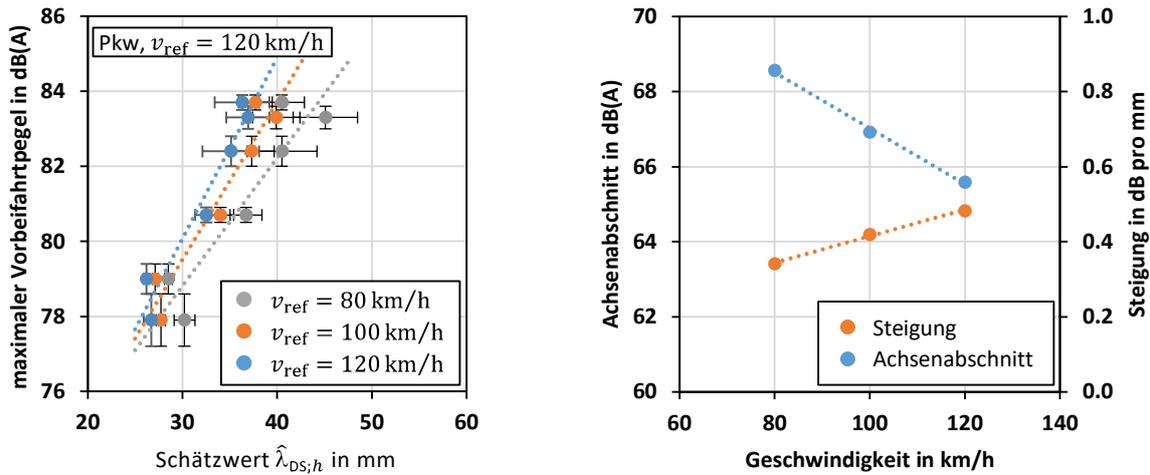
Die ATM ist im akustisch relevanten Texturwellen-Bereich für die Verkehrsgeräusche von Pkw sensitiv. Aus Sicht des Lärmschutzes wäre es deshalb vorteilhaft, wenn mit diesen Messungen auf das Emissionsniveau eines Straßenabschnittes geschlossen werden könnte.

Nach Abbildung 20 hängt die Wellenlänge der prägenden Textur einer Deckschicht geringfügig von der Geschwindigkeit ab. Um diese Abhängigkeit zu quantifizieren, wurde in Abbildung 21 links der Schätzwert der Wellenlänge bei den jeweiligen Referenzgeschwindigkeiten aus den kontrollierten akustischen Torus-Messungen, siehe Tabelle 8, in Relation zum Fahrzeuggeräuschpegel von Pkws bei 120 km/h aus der SPB-Messung, vgl. Abschnitt 4.3, gesetzt. Hieraus wurden die Regressionsparameter in erster Näherung mit einem Bestimmtheitsmaß größer 0,99 ermittelt, siehe Abbildung 21 rechts. Mit diesen Parametern kann das Ergebnis $\lambda_{\text{DS};r,i,t}$ einer ATM auf die Referenzgeschwindigkeit von 120 km/h umgerechnet werden:

$$L_{\text{AT},120,t} = a_v + b_v \cdot \lambda_{\text{DS};r,i,t} \quad \text{mit} \quad a_v = 74,46 \text{ dB(A)} - 0,27 \frac{\text{dB(A)} \cdot \text{s}}{\text{m}} \cdot v \quad (8)$$

$$\text{und} \quad b_v = 61,78 \frac{\text{dB(A)}}{\text{m}} + 12,70 \frac{\text{dB(A)} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot v$$

Abbildung 21: Korrelation zwischen prägender Wellenlänge und Fahrzeuggeräuschpegel



Gegenüberstellung des Schätzwertes $\hat{\lambda}_{DS,h}$ für den Gesamtmittelwert der mittleren Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschichten an den ausgewählten Orten $h = 1$ bis 6 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h gemäß der Tabelle 8 und dem Fahrzeuggeräuschpegel aus der SPB-Messung von Pkws bei 120 km/h nach der Tabelle 5 (links). Entsprechende lineare Regressionsparameter „Steigung“ und „Achsenabschnitt“ in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (rechts).

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Diese geschwindigkeitskorrigierten Torusgeräusch-Pegel $L_{AT,120,t}$ für die einzelnen Prüfräder t weichen jedoch weiter vom Fahrzeuggeräuschpegel der SPB-Messung ab, siehe Abbildung 22. Über die nachfolgende Umrechnung werden diese Pegel für jedes Prüfrad t individuell angepasst:

$$L_{AT,Pkw} = a_t + b_t \cdot L_{AT,120,t} \quad (9)$$

Die Parameter hierfür sind in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10: Parameter für die individuelle Übertragungsfunktion

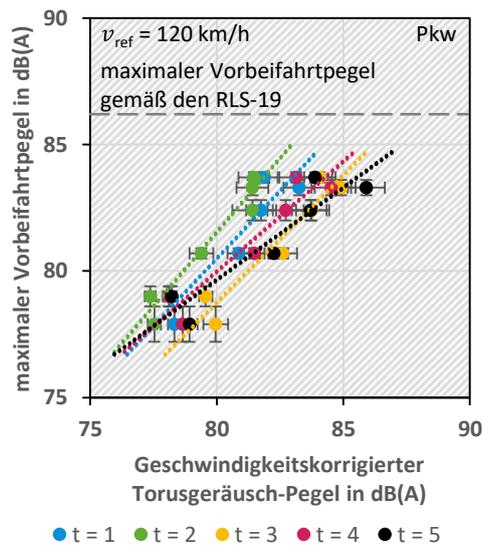
Prüfrad t	a_t in dB(A)	b_t
1	-5,7	1,1
2	-12,6	1,2
3	-2,4	1,0
4	9,8	0,9
5	20,8	0,7

Achsenabschnitt und Steigung für die individuelle Umrechnung des geschwindigkeitskorrigierten Torusgeräusch-Pegel $L_{AT,120,t}$ auf den äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw $L_{AT,Pkw}$ bei 120 km/h.

Das Ergebnis dieser zweistufigen Regressionsanalyse sind Übertragungsfunktionen, siehe Formeln (8) und (9), mit denen aus der ATM auf einen äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw $L_{AT,Pkw}$ bei 120 km/h geschlossen werden kann.

Mit dieser Methode sollten neue Fahrzeuge leicht in den Bestand integriert werden können, ohne die kontrollierten Messungen mit allen Prüfräder in vollem Umfang aufwändig wiederholen zu müssen.

Abbildung 22: Individuelle Skalierung der Prüfräder



Für jedes Prüfrad t wurden in erster Näherung individuelle Korrekturfunktionen ermittelt, mit deren Hilfe der geschwindigkeitskorrigierte Torusgeräusch-Pegel in einen äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw $L_{AT,Pkw}$ bei 120 km/h umgerechnet werden kann. Gemäß den RLS-19 [15] ist der entsprechende maximale Vorbeifahrtpegel für einen Pkw mit eingetragen. Quelle: eigene Darstellung, LfU

Die Funktionen gelten für dichte Deckschichten in dem eingeschränkten Geschwindigkeits- und Pegelbereich der kontrollierten Fahrten, siehe Abschnitt 4.5. Entsprechend der DIN ISO 5725-2 [16] wurde die Genauigkeit überprüft. Das Emissionsniveau eines Straßenabschnittes kann für Pkws mit einer Vergleichsvarianz von 0,7 dB bei einem Abdeckungsfaktor von $k = 1$, also einer Abdeckungswahrscheinlichkeit von 68,3 %, bzw. von 1,4 dB mit $k = 3$ und 99,7 % bestimmt werden.

5 Akustische Torus-Messungen auf dem Bayerischen Fernstraßennetz

Gemäß der Tabelle 4a der Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-19) [15] gibt es mindestens neun unterschiedliche Straßendeckschichttypen, die auf Außerortsstraßen eingebaut sind. Ein Themenschwerpunkt in dem FuE-Vorhaben war, die Ergebnisse der ATM den bautechnischen Eigenschaften dieser Deckschichten gegenüberzustellen und damit deren akustische Qualität zu untersuchen.

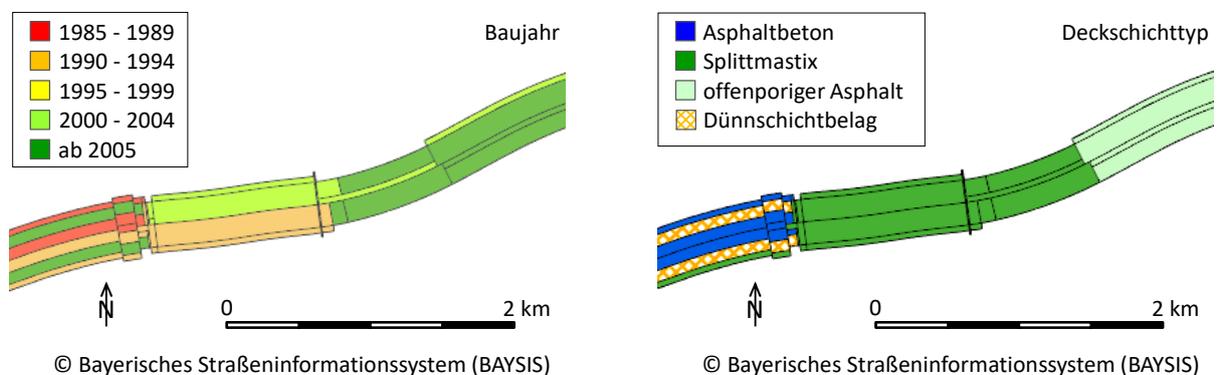
5.1 Prüfschritte bei der Datenauswertung

Mit den verwendeten GPS-Empfängern konnte die Position des Fahrzeugs nicht exakt bestimmt werden. Insbesondere konnte nicht ermittelt werden, auf welchem Fahrstreifen einer mehrbahnigen Straße das Kfz fährt. Um diese Messungen nicht gänzlich zu verwerfen, wurde ein Programm entwickelt, das aus der Datenbank des Bayerischen Straßeninformationssystems (BAYSIS) [20] die Beschreibung der Deckschicht für Typ und Alter (Baujahre) extrahiert und diese Objektattribute dem gefahrenen Messabschnitt zuordnet, siehe Abbildung 23. Für diese Zuordnung mussten die Messabschnitte zunächst in bautechnisch gleichwertige Abschnitte eingeteilt werden. Dies geschah wie folgt:

- ▶ Ändert sich innerhalb eines Abschnitts die Eigenschaft der Deckschicht, dann wird in Anlehnung an das Merkblatt für Asphaltdeckschichten aus offenporigem Asphalt (M OPA) [21] bei diesem Abschnittsübergang per Definition die Strecke von ± 160 m als bautechnisch nicht homogen eingestuft und von der weiteren akustischen Auswertung ausgeschlossen, siehe weiße Quadrate in Abbildung 24 links.
- ▶ Sind in den Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn verschiedene Deckschichtentypen eingebaut oder wurde ein Typ zu unterschiedlichen Zeiten hergestellt, dann werden diese Abschnitte auch verworfen, siehe schwarz durchgestrichen Bereiche in Abbildung 24 links.
- ▶ Dasselbe gilt, wenn zu Typ und/oder Baujahr der Deckschicht keine Informationen vorliegen.

Gemäß dem CPX-Verfahren [6] wurde der verbliebene Messabschnitt in 20 m lange Straßensegmente (siehe Abbildung 24 rechts) eingeteilt und mit den Attributen Straße, Abschnitt, Station,

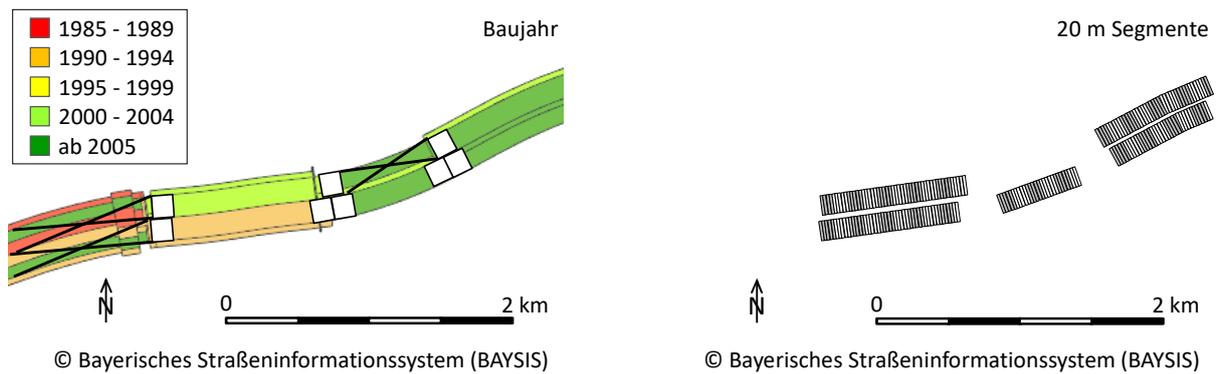
Abbildung 23: Streckenbänder aus BAYSIS



Steckenbänder für ein ca. 4 km langes Straßenstück gemäß BAYSIS. Die Darstellung erfolgt nach Baujahr (links) und Deckschichttyp (rechts).

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Abbildung 24: Ausschluss von Straßenabschnitten und Segmentierung des Messabschnittes



Ausschluss von Straßenabschnitten mit unterschiedlichen Deckschichten auf den Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn (schwarz durchgestrichen) und von ± 160 m langen Teilstücken einer Richtungsfahrbahn (weiße Quadrate) beim Übergang von einem bautechnischen Abschnitt in den anderen (links). Die übrigen Straßenabschnitte werden gemäß dem CPX-Verfahren in 20 m lange Straßensegmente eingeteilt (rechts).

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Deckschichttyp und Baujahr versehen. Hierbei wurde die „Anweisung Straßeninformations-Bank“ (ASB) [22] beachtet. Die Segmentierung beginnt immer dort, wo ein Straßenabschnitt bei Station 0,000 anfängt.

Eine weitere Prüfung bestand darin zu klären, ob die Deckschicht bei der ATM trocken war. Da die Dienstfahrzeuge mit keinem Feuchte- und Temperatursensor ausgestattet sind, der hätte ausgewertet werden können, wurden hierfür hilfsweise die Informationen des Deutschen Wetterdienstes herangezogen. Die verwendeten historischen Niederschlagsradar-Karten bzw. Lufttemperaturen von Messstationen stehen auf den folgenden Internetseiten zur Verfügung:

- ▶ https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/hourly/precipitation/
- ▶ https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/hourly/radolan/

Die Fahrbahn wurde als trocken angesehen, wenn es nach einer Wartezeit, die Abhängig von der Lufttemperatur ist, siehe Tabelle 11, nicht mehr geregnet hat. Die Lufttemperatur ist der Mittelwert von den vier Lufttemperatur-Messstationen des Deutschen Wetterdienstes, die dem Straßensegment der ATM am nächsten liegen.

Tabelle 11: Wartezeiten bis die Fahrbahn nach einem Regenereignis wieder trocken ist

$T_{DWD, Luft}$ in °C	Wartezeit in h
> 20	1
≤ 20 und > 15	2
≤ 15 und > 10	3
≤ 10 und > 5	4
≤ 5	12

Wartezeit in Stunden bis die Fahrbahn nach einem Regenereignis wieder trocken ist in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, $T_{DWD, Luft}$. Die Lufttemperatur ist der Mittelwert der Daten der vier Messstationen des Deutschen Wetterdienstes, DWD, die dem jeweiligen Straßensegment bei der ATM am nächsten liegen.

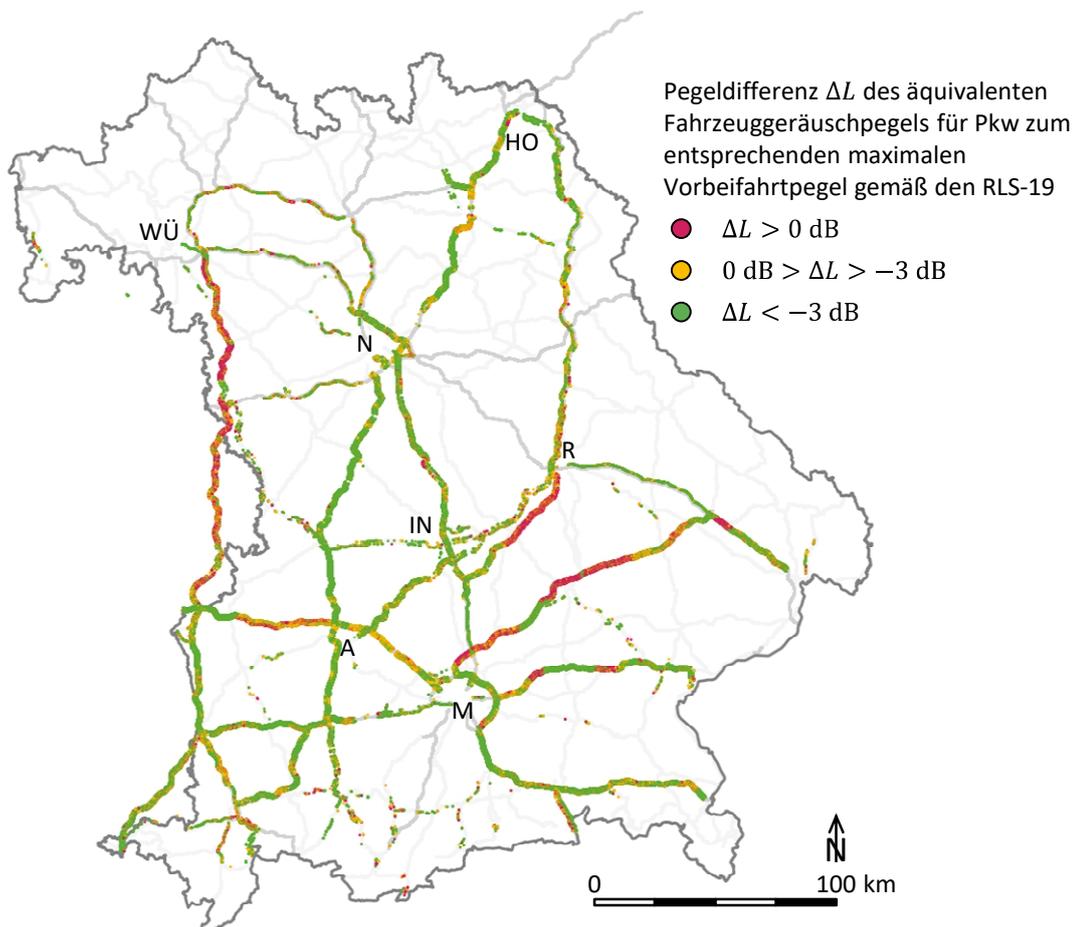
Um ein gültiges Segment handelt es sich schließlich, wenn:

- ▶ vom ATMG plausible Torus-Pegel gemessen wurden, d. h. die höchsten Torusgeräusch-Pegel müssen zwischen 200 und 2 000 Hz liegen,
- ▶ mit dem Kfz schneller als 50 km/h und gleichmäßig gefahren wurde, d. h. die absolute Beschleunigung war kleiner als $0,2 \text{ m/s}^2$,
- ▶ die Fahrzeugbewegung auf $\pm 50 \text{ m}$ einer Fernstraßenachse zugeordnet werden konnte und
- ▶ die Deckschicht trocken war.

Nach diesen Prüfschritten konnte mit dem E TP ATM, siehe Anhang D, für jedes Straßensegment einer Richtungsfahrbahn die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht aus einer oder mehreren Überfahrten ermittelt werden.

5.2 Umfang der ATM im Bayerischen Fernstraßennetz

Abbildung 25: Akustische Qualität der untersuchten Straßensegmente



In der Karte ist die Pegeldifferenz des mit den Übertragungsfunktionen bestimmten äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegels für Pkw $L_{AT,Pkw}$ bei 120 km/h zum entsprechenden maximalen Vorbeifahrtpegel gemäß den RLS-19 pro untersuchtes Straßensegment eingetragen. Rot markiert Differenzen, die größer sind als 0 dB, und grün, die kleiner sind als -3 dB . Gelb kennzeichnet Unterschiede zwischen 0 und -3 dB .

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Mit jedem untersuchten Straßensegment ist die Position auf einer Bundesfernstraße verknüpft. Die Karte in Abbildung 25 veranschaulicht den Umfang des Flottenversuchs.

Der Stützpunkt der Flottenfahrzeuge ist Augsburg. Aus diesem Grund ist im südlichen Teil von Bayern die Messdichte besonders hoch. Sehr oft wurden die Bundesstraßen B 2 und B 17 sowie die Bundesautobahn (BAB) A 8 befahren. Hier lagen auch die Orte für die kontrollierten Messungen, siehe Abbildung 14. Bei der Untersuchung der Vergleichbarkeit der Prüfräder, siehe Kapitel 4.5, wurde jeder ausgewählte Ort mit jedem Kfz mindestens neunmal angefahren.

Auch der rege Pendelverkehr zwischen den einzelnen Dienststellen hat zur Folge, dass manche Straßen häufiger befahren wurden als andere. Gleichwohl führten einzelne Fahrten bis an den Rand von Bayern.

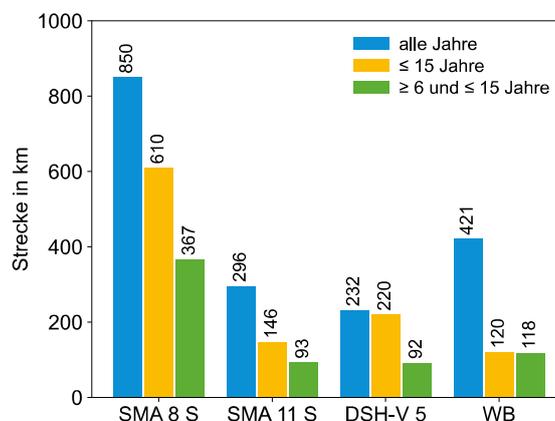
Von 2019 bis 2021 wurde mit den Flottenfahrzeugen eine Strecke von insgesamt ca. 34 480 km zurückgelegt, bei der die Kolleginnen und Kollegen bei ihren Dienstreisen mit den Kfz auf den Bundesfernstraßen schneller als 50 km/h fuhren. Sowohl Audio- als auch GPS-Sensordaten sind in Summe von ca. 34 390 km vorhanden. Das Beschleunigungskriterium ($|a| < 0,2 \text{ m/s}^2$) reduziert die auswertbare Streckenlänge auf 17 010 km.

Nach den in Kapitel 5.1 beschriebenen Prüfschritten und dem Kriterium, dass Straßensegmente nur einmal gezählt werden, selbst wenn diese mehrmals überfahren wurden, verbleibt für die Gegenüberstellung der ATM mit den bautechnischen Eigenschaften der Deckschichten eine Weglänge von 2 900 km. Werden in die Auswertung zur Untersuchung der akustischen Qualität des Fernstraßennetzes nur die meist gebauten Deckschichten SMA 8 S, SMA 11 S, DSH-V 5 und WB mit einbezogen, dann reduziert sich die Strecke weiter auf 1 799 km, siehe in Abbildung 26 die blauen Säulen.

Diese Länge reduziert sich nochmals, wenn gemäß BAYSIS nur Deckschichten betrachtet werden, die nicht älter als 15 Jahre sind (orange Säulen). Denn je älter die Einträge in BAYSIS sind, desto fehlerbehafteter sind sie wohl. Mit diesen Auswahlkriterien bleibt ein Untersuchungsumfang von ca. 1 096 km übrig, oder im Detail ca. 54 800 Segmente.

Wird der Maßstab der TP KoSD-19 [1] angelegt, dass der Messabschnitt zum Zeitpunkt der Messung mindestens seit sechs Jahren unter Verkehr sein muss (grüne Säulen), dann stehen für die statistische Auswertung in Summe 670 km zur Verfügung; (im Detail sind dies: 18 350 Segmente für den SMA 8 S, 4 650 für den SMA 11 S, 4 600 für die DSH-V 5 und 5 900 für den WB).

Abbildung 26: Länge der untersuchten Fernstraßen



Untersuchte Strecke pro Deckschichttyp für die Jahre 2019 bis 2021 (blaue Säulen für Deckschichten jeglichen Alters, orange Säulen für Deckschichten, die jünger als 15 Jahre sind und grüne Säulen für Deckschichten, die älter als 6 Jahre und jünger als 15 Jahre sind).

Quelle: eigene Darstellung, LfU

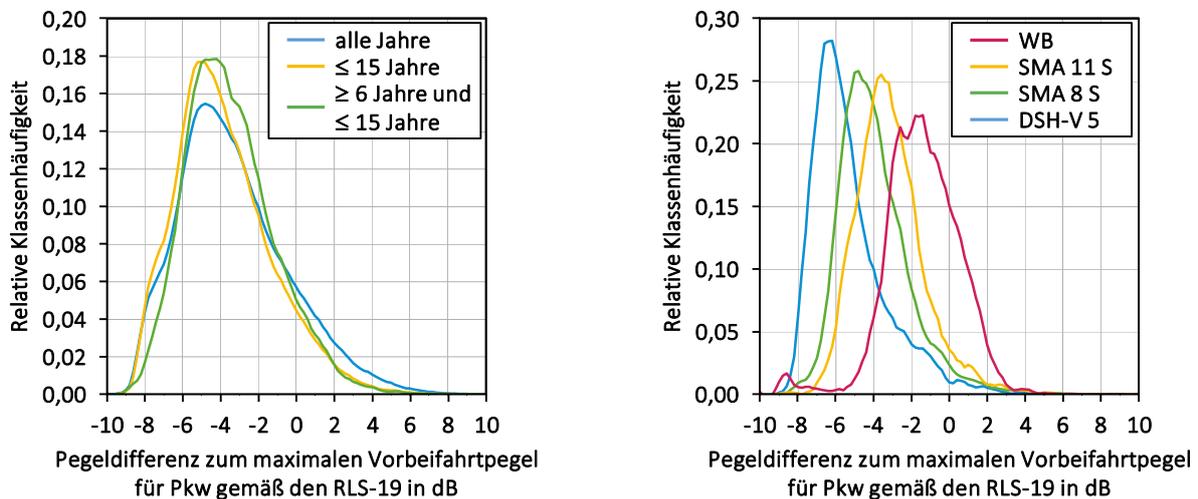
Die offenporigen Asphaltdeckschichten wurden bei der Auswertung ausgeschlossen. Ihre beträchtliche pegelmindernde Wirkung basiert auf der Schallabsorption. Diese akustische Eigenschaft kann mit einer ATM nicht bestimmt werden. Die gegenwärtigen Übertragungsfunktionen gelten nur für dichte Deckschichttypen.

5.3 Die akustische Qualität des Bayerischen Fernstraßennetzes

Mit den Übertragungsfunktionen aus Kapitel 4.6 wird aus der nach dem E TP ATM bestimmten mittleren Wellenlänge der prägenden Textur einer dichten Deckschicht pro Straßensegment ein äquivalenter Fahrzeuggeräuschpegel $L_{AT,Pkw}$ für Pkw bei 120 km/h berechnet. Diese Funktionen sind für die eingesetzten Prüfräder uneingeschränkt für Geschwindigkeiten zwischen 80 km/h und 120 km/h anwendbar. Gleichwohl werden auch Fahrten bis 140 km/h in die Auswertung mit einbezogen, denn die sehr gute Korrelation der Regression erlaubt diese Hochrechnung, siehe Abbildung 21 rechts. Dadurch erweitert sich der Untersuchungsumfang an Fernstraßen um 17 %.

Die Abbildung 25 gibt nicht nur einen Überblick über die Dimension des Flottenversuchs, sondern veranschaulicht auch die akustische Qualität eines jeden Straßensegmentes. Hier wurde in den Ampelfarben die Pegeldifferenz ΔL des berechneten äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegels für Pkw $L_{AT,Pkw}$ zum entsprechenden maximalen Vorbeifahrtpegel gemäß den RLS-19 dargestellt; in Rot, wenn die Abweichung größer ist als 0 dB; in Grün, wenn diese kleiner ist als -3 dB und in Gelb, wenn die Unterschiede zwischen 0 und -3 dB liegen. Gleichzeitig wurden diese Pegeldifferenzen ΔL in ein Histogramm übertragen, um deren Häufigkeitsverteilung darzustellen bzw. die akustische Qualität des untersuchten Fernstraßennetzes zu quantifizieren, siehe Abbildung 27 (links). Hierbei wurde im Detail nach dem Alter der Deckschichten gemäß ihrem Eintrag in der Datenbank von BAYSIS unterschieden.

Abbildung 27: Histogramm der akustischen Qualität der untersuchten Straßensegmente



Relative Klassenhäufigkeit für die Pegeldifferenzen ΔL der mit den Übertragungsfunktionen berechneten äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw $L_{AT,Pkw}$ bei 120 km/h zum entsprechenden maximalen Vorbeifahrtpegel gemäß den RLS-19 pro Straßensegment; unterschieden nach dem Alter der Deckschichten gemäß BAYSIS (links). Dieselbe Auftragung für die vier meistgebauten Deckschichttypen WB, SMA 11 S, SMA 8 S und DSH-V 5; diese Deckschichten sind mindestens 6 Jahre und maximal 15 Jahre alt (rechts).

Quelle: eigene Darstellung, LfU

Die Spannweite der Differenzen reicht ungefähr von -8 bis $+2$ dB. Der Bereich zwischen -8 und -2 dB ist durch die kontrollierten Messungen validiert, siehe Kapitel 4. Die Werte von -2 bis $+2$ dB wurden durch die Extrapolation der Übertragungsfunktionen ermittelt.

Ist diese Hochrechnung auf sehr laute Deckschichten begründet?

Werden die ermittelten Nahfeldpegel L_{CPX} aus den CPX-Messungen, siehe Kapitel 4.4, mit den Fahrzeuggeräuschpegeln L_{Pkw} aus den SPB-Messungen, siehe Kapitel 4.3, verglichen, dann hängen diese beiden Größen nahezu direkt proportional voneinander ab.

Am 12. September 2018, zu Beginn dieses FuE-Vorhabens wurden an der BAB A 93 in der Anschlussstelle (AS) Wernberg-Köblitz in beiden Fahrtrichtungen vom LfU SPB-Messungen durchgeführt¹. Dort wurde 2013 von der damaligen Autobahndirektion Nordbayern die WB-Deckschicht mit dem sogenannten Grinding-Verfahren bearbeitet. In diesem Zusammenhang wurde auch die akustische Homogenität der BAB A 93 vom Autobahndreieck (AD) Holledau zum Autobahnkreuz (AK) Regensburg mit CPX-Messungen untersucht. Beispielsweise wurde zwischen den AS Elsendorf und Siegenburg ein mittlerer Nahfeldpegel L_{CPX} von ca. 103 dB(A) ermittelt. Dieser Pegel ist um ca. 3 dB höher als er auf den lauten dichten Deckschichten innerhalb des Flottenversuchs bei den kontrollierten Fahrten gemessen wurde, siehe Kapitel 4.4. Wegen der direkten Proportionalität von CPX- und SPB-Messung sollte somit auch hier an der BAB A 93 ein um etwa 3 dB höherer Pegel am Fahrbahnrand gemessen werden als an den lauten Stellen bei den kontrollierten Messungen. Mit den aufgestellten Übertragungsfunktionen wurde für diese beiden Orte ein Unterschied in den berechneten äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegeln $L_{AT,Pkw}$ für Pkw von ca. 2 dB ermittelt. Folglich sollten unter Beachtung der Vergleichsvarianz die Übertragungsfunktionen auch auf laute Straßensegmente angewendet werden können.

Gleichwohl muss diese These noch durch SPB-Messungen und kontrollierte Fahrten bestätigt werden. Mögliche Orte an diesen lauten Straßen können durch die ATM leicht identifiziert werden, siehe Abbildung 25.

Tabelle 12: Anteil von lauten und leisen Deckschichten im Fernstraßennetz in Prozent

Material	$\Delta L < -3$ dB	-3 dB $< \Delta L < 0$ dB	$\Delta L > 0$ dB
DSH-V 5	87,1	10,7	2,2
SMA 8 S	74,7	21,4	3,9
SMA 11 S	57,3	36,9	5,8
WB	17,4	59,6	23,0
Mittelwert über alle Deckschichten	62,1	29,3	8,6

Für das untersuchte Fernstraßennetz sind die Anteile der lärmindernden Wirkung in Prozent für die meistgebauten Deckschichttypen (SMA 8 S, SMA 11 S, DSH-V 5 und WB) sowie für alle Deckschichttypen aufgelistet, die nach BAYSIS mindestens 6 Jahre alt aber nicht älter als 15 Jahre sind.

In Abbildung 27 (rechts) ist die relative Klassenhäufigkeit der Differenz ΔL der mit den Übertragungsfunktionen berechneten äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegeln für Pkw $L_{AT,Pkw}$ zum entsprechenden maximalen Vorbeifahrtpegel gemäß den RLS-19 aufgetragen. Hierbei wurden nur die am meisten gebauten Deckschichttypen auf dem Bayerischen Fernstraßennetz SMA 8 S, SMA 11 S, DSH-V 5 und WB betrachtet, die nach BAYSIS mindestens 6 Jahre aber nicht älter als

¹ Für Pkw wurde bei 120 km/h ein Fahrzeuggeräuschpegel von ca. 82 dB(A) und für schwere Lkw (Lkw2) bei 80 km/h ein Pegel vom ca. 88 dB(A) bestimmt.

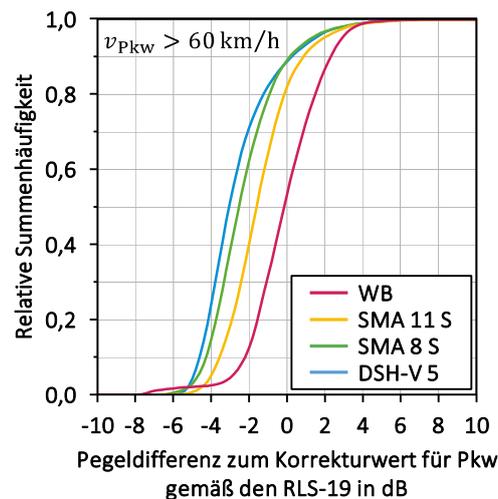
15 Jahre sind. Die daraus abgeleiteten Anteile von lauten und leisen Deckschichten sind in der Tabelle 12 gegenübergestellt. Als laut gilt eine Deckschicht, wenn der berechnete Fahrzeuggeräuschpegel $L_{AT,Pkw}$ für Pkw größer ist als der entsprechende maximale Vorbeifahrtpegel der RLS-19, und als leise, wenn dieser Pegel um mehr als 3 dB unter diesem maximalen Vorbeifahrtpegel liegt.

Nach dieser Einteilung sind von den untersuchten Fernstraßen gut 60 % der Deckschichten lärm-mindernd. Ungeachtet dessen verbleiben fast 10 % an zu lauten Straßen.

5.4 Bezug zum Korrekturwert der RLS-19

In Kapitel 5.3 wurde der äquivalente Fahrzeuggeräuschpegel $L_{AT,Pkw}$ für Pkw, wie er mit den Übertragungsfunktionen berechnet wird, mit dem entsprechenden maximalen Vorbeifahrtpegel gemäß den RLS-19 bei 120 km/h verglichen und die akustische Qualität des untersuchten Fernstraßennetzes quantifiziert. Gleichwohl können diese Pegel dem Korrekturwert für Pkw gemäß der Tabelle 4a der RLS-19 [15] der vorhandenen Deckschicht gegenübergestellt werden. Die daraus berechnete Pegeldifferenz ist in Abbildung 28 als relative Summenhäufigkeit herausgearbeitet. Da die Kurven nicht zusammenfallen, sollte aus Sicht des Lärmschutzes der Korrekturwert für einzelne Straßendeckschichttypen gemäß der TP KoSD [1] überprüft und gegebenenfalls fortgeschrieben werden.

Abbildung 28: Vergleich mit den Korrekturwerten



Relative Summenhäufigkeit der Pegeldifferenzen der mit den Übertragungsfunktionen berechneten Fahrzeuggeräuschpegeln für Pkw $L_{AT,Pkw}$ zu den Korrekturwerten für die Deckschichttypen WB, SMA 11 S, SMA 8 S und DSH-V 5 für $v_{Pkw} > 60$ km/h gemäß den RLS-19. Nach BAYSIS sind diese Deckschichten mindestens 6 Jahre und maximal 15 Jahre alt.

Quelle: eigene Darstellung, LfU

6 Abschließende Diskussion und Ausblick

Innerhalb dieses FuE-Vorhabens wurde mit akustischen Torus-Messgeräten die akustische Qualität von ca. 3 850 km Fernstraßen in Bayern effizient und kostengünstig untersucht. Die Geräte arbeiteten äußerst zuverlässig; von insgesamt ca. 34 500 km konnten nur 100 km nicht ausgewertet werden. Die Messungen wurden nach dem E TP ATM ausgewertet. Als entscheidende Auswertegröße wurde die Wellenlänge der prägenden Textur einer Deckschicht identifiziert. Diese Wellenlänge ist sozusagen der akustische Fingerabdruck einer Straße.

An sechs ausgewählten Orten wurde mit den Flottenfahrzeugen gezielt vorbeigefahren. Hierbei betrug die Geschwindigkeit 80, 100 und 120 km/h. Zusätzlich wurde dort die Textur der Oberfläche untersucht sowie CPX- und SPB-Messungen durchgeführt. Aus diesem umfangreichen Datensatz wurden Übertragungsfunktionen aufgestellt. Mit diesen kann aus einer ATM ein äquivalenter Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 120 km/h für ein 20 m langes Straßensegment berechnet werden. Diese Funktionen gelten nur für den Wertebereich aus Kapitel 4, d. h. für Wellenlängen von ca. 20 bis 50 mm und für Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw zwischen etwa 77 und 84 dB(A).

Während des Flottenversuchs wurde von den Kolleginnen und Kollegen jedoch auch schneller gefahren und nach dem E TP ATM an mehreren Straßenabschnitten auch größere Wellenlängen bestimmt. Für diese Fälle wurden die Übertragungsfunktionen extrapoliert. Der äquivalente Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw wurde quasi hochgerechnet. Begründet wurde diese Methode u. a. mit CPX-Messungen. Dieses Vorgehen ist noch durch SPB-Messungen und kontrollierte Vorbeifahrten zu validieren. Darüber hinaus sollte die Frage geklärt werden, wie die Übertragungsfunktionen um die Fahrzeuggruppe der Lkw erweitert und die offenporigen Asphaltdeckschichten berücksichtigt werden könnten. Zusätzlich sollten auch langsame Fahrten ($v < 50$ km/h) in die Auswertung mit aufgenommen werden, um die akustische Qualität von Innerortsstraßen zu beurteilen. Diese Fragestellungen sollen im Folgeprojekt „AQuStra III“ untersucht werden, das vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gefördert wird.

Danksagung:

Herrn Ralf Becker, Herrn Jens Steinheuer, Herrn Dr. Fabio Strigari und Herrn Dr. Wolfram Bartolomaeus von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) für die akustischen Messungen im Prüfstand Fahrzeug/Fahrbahn und gemeinsame SPB-Messungen sowie die kritische Durchsicht des E TP ATM.

Allen Kolleginnen und Kollegen am LfU, die sich am Flottenversuch beteiligt haben. Insbesondere der Fahrbereitschaft, die uns bei der Auswahl der Fahrzeuge und dem Einbau der Mikrofone in den Reifentorus sehr unterstützt hat; der Informationstechnik (IT), die beim Aufbau der Infrastruktur zur Datenübertragung behilflich war; sowie dem Referat 26 für die Durchführung der aufwendigen SPB- und CPX-Messungen sowie der kontrollierten Fahrten mit den Flottenfahrzeugen.

Dem UBA für die Finanzierung dieses FuE-Vorhabens und last but not least bei Herrn Jan Gebhardt und Herrn Dr. Lars Schade für Ihre sehr wertvollen und konstruktiven Diskussionen.

7 Quellenverzeichnis

- [1] TP KoSD-19 (29.10.2019): Technischen Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln
- [2] Sachverständigenrat für Umweltfragen (Mai 2020): Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa – Umweltgutachten 2020. Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt (März 2017): Umweltbewusstsein in Deutschland 2016 – Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Umweltbundesamt, Berlin, Dessau-Roßlau
- [4] T. Beckenbauer, P. Spiegler, G. v. Blokland, A. Kuijpers, F. Reinink, S. Huschek, T. Stütze und J. Heerkens (August 2001): Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn
- [5] DIN EN ISO 11819-1 (Mai 2001): Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [6] DIN EN ISO 11819-2 (Oktober 2017): Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 2: Nahfeldmessverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [7] ISO/TS 11819-3 (März 2017): Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 3: Reference tyres. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [8] A. Wolf (1997): Bewertung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches durch Messung des Reifeninnengeräusches. Dissertation, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart, expert verlag, Renningen-Malmsheim
- [9] O. Bschorr und R. Kühne (Juli 2007): Bestimmung der akustischen Qualität von Straßen. In: Lärmbekämpfung, S. 144–148
- [10] O. Bschorr und R. Kühne (September 2007): Bestimmung der akustischen Qualität von Straßen. In: Lärmbekämpfung, S. 182–186
- [11] O. Krauss (Juni 2013): Abschlussbericht zur Akustischen Torusmessmethode – ATM (P.2702). Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
- [12] O. Krauss (2019): Experimentelle Untersuchungen zum Innengeräusch von Fahrzeuginnenräumen. Dissertation, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe

- [13] J. Masino, M. Frey und F. Gauterin (März 2018): Technische Aspekte der Überwachung der akustischen Qualität der Fahrwege im Straßenverkehr. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, im Auftrag des Umweltbundesamts TEXTE 101/2018
- [14] A. Walter (März 2018): Simultane Torus- und Nahfeldmessungen auf Fernstraßen in Bayern. Deutsche Jahrestagung für Akustik, München
- [15] RLS-19 (2019): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln
- [16] DIN ISO 5725-2 (Dezember 2002): Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 2: Grundlegende Methode für Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens (ISO 5725-2:1994 incl. Tech. Korrigendum 1:2002). Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [17] ISO 13473-1 (Februar 2019): Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 1: Determination of mean profile depth. International Organization for Standardization, Vernier, Geneva, Switzerland
- [18] I. Müller (Mai 2011): Untersuchung der Messunsicherheit und der Klassifizierungsfähigkeit von Straßenbelägen. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- [19] D. Püschel, M. Auerbach und W. Bartolomaeus (März 2011): Einsatz eines Mikrofon-Arrays für Statistische Vorbeifahrt-Messungen (SPB). Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
- [20] Zentralstelle für Straßeninformationssysteme (2019): BAYSIS – Bayerisches Straßeninformationssystem. Zentralstelle für Straßeninformationssysteme, <http://www.baysis.bayern.de> (03.02.2022)
- [21] M OPA (2013): Merkblatt für Asphaltdeckschichten aus Offenporigem Asphalt. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln
- [22] ASB (Version 2.04) (19.09.2018): Anweisung Straßeninformationsbank. Bundesanstalt für Straßenwesen, https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Publikationen/Regelwerke/Verkehrstechnik/Unterseiten/V-ASB.html (18.08.2021)

A Lauffläche der verwendeten Prüfräder

Abbildung 29: Prüfrad 1 und 2



Links: Goodyear Cargo Vector, Größe: 225/60 R16C 101/99H
Rechts: Michelin Primacy 3, Größe: 205/55 R16 91V
Quelle: eigene Darstellung, LfU

Abbildung 30: Prüfrad 3 und 4



Links: Continental EcoContact 6, Größe: 215/55 R16 93V
Rechts: Continental ContiPremiumContact 2, Größe: 205/60 R16 96H
Quelle: eigene Darstellung, LfU

Abbildung 31: Prüfrad 5 im CXP-Anhänger



Michelin Energy Saver, Größe: 205/55 R16 91H
Quelle: eigene Darstellung, LfU

B Mitarbeiterinformation

B.1 Allgemeine Information der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Intranet des LfU

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Kolleginnen und Kollegen,

wir bitten Sie um Ihre Mithilfe bei Dienstreisen. In Auftrag des Umweltbundesamtes (FuE-Vorhaben „AQuStra II“) wird das LfU im Zeitraum von Mai 2019 bis Oktober 2020 einen Großteil des bayerischen Fernstraßennetzes (Autobahnen und Bundesstraßen) akustisch untersuchen.

Hierzu haben wir sieben Dienstfahrzeuge des LfU (drei Poolfahrzeuge mit offenem Nutzerkreis und vier Referatsfahrzeuge mit eingeschränktem Nutzerkreis) mit sogenannten Akustischen Torus-Messgeräten (ATMG) inklusive Datenloggern ausgerüstet. Die ATMG sind auf die Felge der linken Hinterräder montiert. Während der Fahrt misst das ATMG automatisch das Torusgeräusch und sendet die Messwerte an einen Datenlogger im Fahrzeuginneren, der auch die Position und die Geschwindigkeit des Kfz bestimmt. Zurück am Standort verbindet sich der Datenlogger mit dem Rechenzentrum und überträgt die Messwerte.

Erst ab einer Geschwindigkeit größer 50 km/h werden die Daten erhoben und von uns ausgewertet. Bitte fahren Sie möglichst gleichmäßig und vorausschauend.

Bei der Datenauswertung ist der Datenschutz sichergestellt, ein Bezug zu Fahrer und Fahrtenbuch wird nicht hergestellt! Der Datenschutzbeauftragte sowie der Personalrat des LfU haben dem Versuch zugestimmt, da keine personenbezogenen Daten erhoben und gespeichert werden. Die Fahrzeuge werden als „Straßenverkehrslärm-Messfahrzeug“ gekennzeichnet. Die Nutzung der Poolfahrzeuge ist freiwillig. Die Nutzer der Referatsfahrzeuge wurden im Vorfeld über die Funktionsweise des ATMG informiert und aufgeklärt.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Vielen Dank und mit freundlichen Grüßen

André Hinträger

Dr. Alexander Attenberger

Dr. Michael Gerke

Referat 25

B.1.1 Flyer zur allgemeinen Information im Intranet

Bayerisches Landesamt für
Umwelt



STRASSENVERKEHRSLÄRM

Erfassung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus-Messungen (AQuStra II)



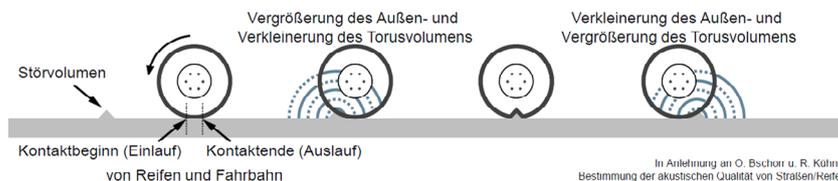
Bayerisches Fernstraßennetz (rot: Autobahnen, gelb: Bundesstraßen, grau: Standorte der Dienstfahrzeuge)

Idee

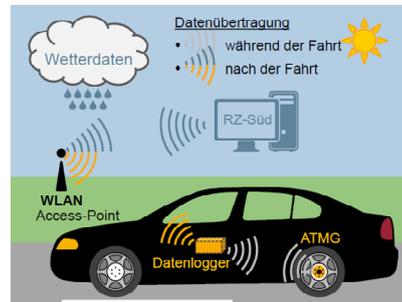
Ein Großteil des bayerischen Fernstraßennetzes soll außerorts akustisch vermessen und die Auswirkungen von wesentlichen Einflussparametern auf das Torusgeräusch untersucht werden. Hierzu werden sieben Dienstfahrzeuge des LfU mit Akustischen Torus-Messgeräten (ATMG) mit Datenloggern ausgerüstet. Das Projekt wird vom Umweltbundesamt gefördert.

Grundlagen

Das Rollgeräusch ist die dominierende Lärmquelle im Straßenverkehr. Dabei beträgt der Einfluss des Fahrbahnbelags auf das Rollgeräusch mehr als 10 dB(A). Dies wird als Verdopplung bzw. Halbierung der Lautstärke empfunden. Die Größe der Schalldruckpegel hängt wesentlich von der Straßenrauhigkeit ab.



Beim Abrollen wird der Reifen verformt, die Rauigkeit der Straßenoberfläche in die Aufstandsfläche eingepreßt und der Reifen zu Schwingungen angeregt. Hierbei strahlt er Schall in die Umgebung und nach innen als sogenanntes Torusgeräusch ab.



Das an der Felge des linken Hinterrades montierte ATMG misst während der Fahrt das Torusgeräusch und sendet die Messwerte an den Datenlogger im Fahrzeuginneren, der auch die Position bestimmt. Zurück am Standort verbindet sich dieser über einen WLAN-Access-Point mit dem Rechenzentrum und überträgt die aufgezeichneten Daten. Die akustischen Messdaten werden den bautechnischen Informationen der befahrenen Strecken und den entsprechenden Wetterdaten gegenübergestellt.

Ziele

Innerhalb des Projektes soll auf ATM-Basis ein kostengünstiges, robustes akustisches Messverfahren erarbeitet werden, das von der Straßenbauverwaltung bei der Straßenzustandserfassung eingesetzt werden kann. Darüber hinaus könnte ein Modell für die akustische Alterung von Deckschichten auf Grundlage der tatsächlichen Verkehrsbelastung entwickelt werden.

Datenschutz

Der Datenschutz wird sichergestellt, d.h. ein Bezug zu Fahrer und Fahrtenbuch wird nicht hergestellt. Die Mitarbeiter werden über das Projekt informiert. Die Fahrzeuge werden als „Straßenverkehrslärm – Messfahrzeug“ gekennzeichnet.

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Bildnachweis: Bayerisches Landesamt für Umwelt,
Bayerische Vermessungsverwaltung

Ansprechpersonen
Referat 25: • André Hinträger
• Dr. Alexander Attenberger
• Dr. Michael Gerke

B.2 Individuelle Information für den Nutzer eines Flottenfahrzeugs bei der Buchung

Sehr geehrte Damen und Herren,
liebe Kolleginnen und Kollegen,

Sie haben ein Dienstfahrzeug gebucht, das an einem Flottenversuch teilnimmt. Während der Fahrt wird der akustische Zustand der Straßenoberfläche gemessen und gleichzeitig die Position und die Geschwindigkeit des Fahrzeugs bestimmt.

Die Messgeräte schalten sich automatisch ein und wieder aus. Bitten achten Sie nur darauf, dass der Stecker des Datenloggers in der Bordspannungssteckdose (Zigarettenanzünder) steckt.

Bitte beachten Sie die Straßenverkehrsordnung und hierbei insbesondere die Vorgaben zur Geschwindigkeitsbeschränkung. Bitte passen Sie die Geschwindigkeit den Witterungsverhältnissen an und fahren Sie möglichst gleichmäßig und vorausschauend. Vom TÜV wurde das Messfahrzeug für eine Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h zugelassen. Aus messtechnischen Gründen bitten wir Sie, **nicht schneller als 130 km/h** zu fahren.

Die Datenauswertung erfolgt für Autobahnen und Bundesstraßen ab einer Geschwindigkeit von 50 km/h. Der Datenschutz ist sichergestellt, ein Bezug zu Fahrer und Fahrtenbuch wird nicht hergestellt! Das Fahrzeug wurde als „Straßenverkehrslärm-Messfahrzeug“ gekennzeichnet. Die Nutzung des Fahrzeugs ist freiwillig.

Für Rückfragen stehen Ihnen André Hinträger und Dr. Alexander Attenberger gerne zur Verfügung.

Wichtiger Hinweis:

Bitte fahren Sie mit dem DkFz nicht in die Waschanlage.

Vielen Dank und mit freundlichen Grüßen

Hansjürgen Baur
Fahrdienstleitung

C Software-Updates

C.1 Anpassungen an der Software des RPi

- ▶ Bitbucket Zugangsdaten
- ▶ RPi-Image Erstellungsskript
- ▶ Samba-Pfad und -Authentifizierungsmethode
- ▶ WLAN-Zugangsdaten
- ▶ Netzwerk-Adressen

C.2 Korrekturen und Erweiterungen an der Software für den RPi

- ▶ Auslesen der Bluetooth (BT)-MAC-Adresse berichtigt
- ▶ Hostname an allen Stellen gesetzt
- ▶ Ladestopp-Spannung des ATMG-Akkus von 4 250 mV auf 4 150 mV gesenkt
- ▶ RPi Fake-Hardwareclock (fake-hwclock) entfernt
- ▶ Skript für nachträgliches BT-Pairing erstellt (Pairing vorher nur bei kompletter Neuinstallation möglich und dabei zu ca. 75 % gescheitert)
- ▶ automatischer Messprogramstart bei BT-Verbindungsaufbau korrigiert
- ▶ Protokoll beim BT-Verbindungsaufbau erweitert
- ▶ Timing Probleme beim BT-Verbindungsaufbau behoben
- ▶ Wiederherstellen der BT-Verbindung verbessert
- ▶ Zeitstempel der einzelnen Audiochunks hinzugefügt um verlorene Pakete erkennen zu können (kommt bei gestörtem BT-Empfang vor)
- ▶ Zugriffsrechte auf Protokolle vereinheitlicht
- ▶ Protokoll für GPS und Beschleunigungssensor optimiert
- ▶ System-Zeitstempel in alle Protokolle eingefügt
- ▶ mehrfaches Starten des Audioaufnahme-Programms verhindert und Messprogramme sauber beendet um Datenverluste zu vermeiden
- ▶ Audioabtastrate von 44,1 kHz auf 48 kHz erhöht
- ▶ Puls pro Sekunde (PPS)-Unterstützung für GPS aktiviert (höhere Zeitgenauigkeit)
- ▶ GPS-Zeitstempel zur Messdatei hinzugefügt (genaue zeitliche Zuordnung vorher nicht möglich)
- ▶ GPS als Systemdienst eingerichtet (GPS-Ausfall vorher wegen einmaligem Start beim Hochfahren möglich)

- ▶ Unterstützung für einmalig auszuführende Updateskripts eingearbeitet (für GPS-Umbau benötigt)
- ▶ Protokolle dem Hochlade-Skript hinzugefügt
- ▶ Betriebssystem auf Raspbian Stretch aktualisiert
- ▶ Skripte wegen neuer BT-Software bei Raspbian Stretch angepasst
- ▶ Protokoll zum Hochladen und Herunterfahren verbessert
- ▶ Positions- und Geschwindigkeitsfilter eingebaut (Aufzeichnung nur dann, wenn sich das Fahrzeug in der Nähe einer Fernstraße befindet und eine bestimmte Geschwindigkeit überschritten hat)
- ▶ Prozesskommunikation für die Weitergabe des Aufzeichnungsstatus integriert
- ▶ kontinuierliche ATM-Ladezustandsüberwachung integriert
- ▶ RPi-Image Erstellung beschleunigt (Compilieren nicht mehr notwendig)
- ▶ Betriebssystem auf Raspbian Buster aktualisiert
- ▶ Zeitsynchronisation in das Hochlade-Skript eingebaut
- ▶ Update auf neuere BT-Firmware erfolgreich durchgeführt (hiermit ist Inbetriebnahme der neu hergestellten Platinen möglich)
- ▶ Rsync Dateisystemzugriff von Samba auf davfs2 umgestellt
- ▶ Audiochunkgröße von 25 ms auf 500 ms vergrößert
- ▶ GPS-Datenrate von 1 Hz auf 5 Hz erhöht
- ▶ ATMG-Abschaltspannung von 2 900 mV auf 3 700 mV angehoben (um Tiefendladung zu vermeiden)
- ▶ Übertragungsprotokoll von Rsync und davfs2 auf Python und webdavclient3 umgestellt
- ▶ Prüfsummenvergleich bei Datenübertragung eingefügt
- ▶ Fehlerbehandlung bei Abbruch von Geräteverbindungen verbessert
- ▶ Neustart bei Rückkehr der Bordspannung während des Herunterfahrens integriert

C.3 Verbesserungen der Software am ATMG-Mikrokontroller

- ▶ Die Konfiguration des Beschleunigungssensors wird regelmäßig vom Mikrokontroller überprüft und bei Bedarf neu eingespielt. Die Konfiguration konnte früher verloren gehen und somit das ATMG nicht mehr starten.
- ▶ Das ATMG schaltet sich zuverlässig ab. Das ATMG blieb vorher manchmal dauerhaft an.
- ▶ Es wurde eine Protokollierung der Zustände ergänzt.

D Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen (E TP ATM)

Akustik –

Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche –

Entwurf Technische Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen (E TP ATM)

Fassung: April 2022

Inhaltsverzeichnis:

Einleitung	67
1 Anwendungsbereich.....	67
2 Begriffe, Definitionen, Abkürzungen und Symbole	68
2.1 Begriffe zum Messort und Messgerät.....	68
2.2 Akustische Begriffe	69
2.3 Abkürzungen und Symbole	70
3 Messprinzip.....	72
4 Messvorrichtungen	72
4.1 Prüfrad.....	72
4.2 Geräte zur Schallkalibrierung.....	72
4.3 Geräte zur Positionsbestimmung und Geschwindigkeitsmessung.....	72
4.4 Geräte zur Fülldruckmessung	73
5 Messabschnitt	73
6 Meteorologie, Messzeitraum.....	73
7 Prüffahrzeug	73
7.1 Allgemeine Anforderungen, Montage und Ausrichtung des Prüfrades	73
7.2 Mikrofonpositionen.....	73
7.3 Einfahren der Reifen	73
8 Messverfahren	74
8.1 Vorbereitung der Messungen.....	74
8.2 Messung des Schalls	74
8.3 Position im Messabschnitt.....	74
8.4 Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs.....	74
8.5 Berücksichtigung von Störgeräuschen.....	74
8.6 Zusammenfassung der Messparameter	75
9 Analyseverfahren zur Bestimmung des akustischen Zustands für ein Straßensegment	75
10 Analyseverfahren zur Bestimmung der akustischen Zustände in einem Messabschnitt.....	78
11 Messunsicherheit.....	79
11.1 Messgenauigkeit des akustischen Torus-Messgeräts.....	79
11.2 Genauigkeit der akustischen Torus-Messung für den homogenen Abschnitt.....	80
12 Wiederhol- und Vergleichpräzision.....	81
13 Prüfbericht	82
Anhang A Abbildung einer möglichen Mikrofonhalterung.....	84
Anhang B Struktogramm des Algorithmus.....	85
Literaturhinweise	86

Einleitung

Beim Fahren eines Kraftfahrzeugs (Kfz) wechselwirken die Reifen mit der Fahrbahn. Die Reifen werden zu Schwingungen angeregt und Schall wird abgestrahlt. Neben den Reifen hat der akustische Zustand der Fahrbahndeckschicht einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe des Geräuschpegels.

Das absolute Niveau der Geräuschemission einer Fahrzeuggruppe auf einer Straße wird normalerweise mit dem statistischen Vorbeifahrtverfahren (SPB) [1] ermittelt. Von Nachteil ist, dass diese Messungen sehr zeitaufwändig und nur für einen Ort maßgebend sind. Darüber hinaus kann mit dem Nahfeldmessverfahren (CPX) [2] die akustische Homogenität eines Straßenabschnitts durch Messung des Rollgeräusches in unmittelbarer Nähe eines Rad-Reifens an definierten Mikrofonpositionen ermittelt werden. Hier hat sich ein einachsiger Anhänger bewährt. Diese Messungen sind jedoch gegenüber äußeren Störungen sehr empfindlich und für einen Dauereinsatz weniger geeignet. In Deutschland werden beide Messverfahren in der „Technischen Prüfvorschrift zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten“ (TP KoSD-19) [3] kombiniert.

Die Reifenschwingungen erzeugen aber auch im Innenraum des Rad-Reifens (Reifentorus) ein Geräusch, das sogenannte Torusgeräusch. Dieses kann störungsfrei und geschützt von äußeren Einflüssen gemessen werden [4] und gibt gleichfalls Auskunft über den akustischen Zustand der Deckschichten. Diese Messungen werden im Folgenden als akustische Torus-Messungen (ATM) bezeichnet. Die vorliegende Technische Prüfvorschrift (TP ATM) beschreibt ein Verfahren, wie diese ATM durchzuführen sind und damit der akustische Zustand eines Straßennetzes rationell bestimmt werden kann.

1 Anwendungsbereich

Nach dieser TP ATM können Straßen- und Umweltbehörden den akustischen Zustand von Deckschichten eines überörtlichen Straßennetzes auf großer Länge untersuchen. Der Verkehr muss dabei frei fließen und das Prüffahrzeug möglichst gleichmäßig fahren. Darüber hinaus können anhand dieser akustischen Torus-Messungen akustisch homogene Straßenabschnitte identifiziert werden.

Die schallabsorbierenden Eigenschaften von hohlraumreichen Deckschichten können damit jedoch nicht analysiert werden.

2 Begriffe, Definitionen, Abkürzungen und Symbole

Für die Anwendung dieser Vorschrift gelten die Begriffe und Definitionen aus SPB- und CPX-Verfahren sowie aus den „Technischen Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten“, TP KoSD-19, und darüber hinaus die folgenden.

2.1 Begriffe zum Messort und Messgerät

2.1.1 Fahrbahn

Aus Fahrstreifen und Randstreifen bestehender, zusammenhängend befestigter Teil der Straße [5].

2.1.2 Fahrstreifen

Durch Markierung gekennzeichnete Teil der Fahrbahn, der für die Fortbewegung einer Fahrzeugreihe bestimmt ist [5].

2.1.3 Radspur

Der Bereich der Fahrbahn, über den ein Rad eines Fahrzeugs rollt [5].

2.1.4 Rollspuren

Die Bereiche eines Fahrstreifens, in denen sich die Radspuren des überwiegenden Teils aller Fahrzeuge befinden [5].

2.1.5 Messabschnitt

Die Gesamtstrecke der zu untersuchenden Fahrstreifen.

2.1.6 Straßensegment

Ein 20 m langes Stück eines Messabschnitts, für das der akustische Zustand ermittelt wird.

2.1.7 Unterabschnitt

Ein Teil eines Messabschnitts, in dem die Straßensegmente akustisch ähnlich (homogen) sind. Akustisch ähnlich können auch unterschiedliche Deckschichttypen sein.

2.1.8 Textur [Rauheit]

Die geometrischen Abweichungen einer Fahrbahnoberfläche von einer vollkommen ebenen Oberfläche im Wellenlängenbereich von wenigen Mikrometern bis einigen Dezimetern [6].

2.1.9 Reifen

Der Reifen für das Prüffahrzeug.

2.1.10 Rad

Das Rad besteht aus Felge und Radscheibe [7].

2.1.11 Rad-Reifen

Die Kombination aus Rad und Reifen.

2.1.12 Prüfrad

Der Rad-Reifen mit angebautem ATMG.

2.1.13 Prüffahrzeug

Ein Kraftfahrzeug oder Anhänger, an dem das Prüfrad montiert ist.

2.1.14 Reifentorus

Der Luftraum, der von Reifen und Felge eingeschlossen wird.

2.1.15 Akustisches Torus-Messgerät (ATMG)

Das Gerät zur Messung von Geräuschen in einem Reifentorus.

2.1.16 Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs

$v_{r,i}$ oder kurz v

Die Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs bei der ATM.

2.1.17 Referenzgeschwindigkeit

v_{ref}

Die bei Messungen bevorzugte Geschwindigkeit.

2.2 Akustische Begriffe

2.2.1 Reifen/Fahrbahn-Geräusch

Das Geräusch, das beim Fahren durch die Wechselwirkung des Reifens mit der Fahrbahnoberfläche entsteht und nach außen abgestrahlt wird.

2.2.2 Torusgeräusch

Das Geräusch, das beim Fahren durch die Wechselwirkung des Reifens mit der Fahrbahnoberfläche im luftgefüllten Innenraum des Reifentorus entsteht.

2.2.3 Torusgeräusch-Pegel

$L_{ATF;r,l,f}$ oder kurz L_{ATF}

Der Schalldruckpegel (en: sound pressure level, SPL) im Reifentorus in Anlehnung an die Zeitbewertung F (fast).

2.2.4 Torusmode

Eine Mode der Eigenschwingung der Luft im Reifentorus.

2.2.5 Reifenmode

Eine Mode der Eigenschwingung des Reifens.

2.2.6 Radius des Reifentorus

r_T

Der Radius des Reifentorus kann aus der Bezeichnung der Reifengrößen berechnet werden und ist näherungsweise der harmonische Mittelwert aus dem Radius der Felge (r_{Felge}) und Radius

des Reifens (r_{Reifen}): $r_T = 2 \cdot \frac{r_{\text{Felge}} \cdot r_{\text{Reifen}}}{r_{\text{Felge}} + r_{\text{Reifen}}}$.

2.2.7 Akustischer Radius

$$r_{ak;r,i,j}$$

Der Radius, der in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit den Abstand der Frequenzen der Reifenmoden beschreibt und durch das iterative Abtasten der Reifenmoden ermittelt wird.

2.2.8 Mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht

$$\lambda_{DS;i}$$

Die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht charakterisiert den akustischen Zustand im Straßensegment i .

ANMERKUNG 1: Aus der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht kann mit geeigneten Übertragungsfunktionen ein äquivalenter Fahrzeuggeräuschpegel berechnet werden.

2.3 Abkürzungen und Symbole

In der Tabelle 1 sind alle in diesem Dokument verwendeten Abkürzungen und Symbole mit ihren jeweiligen Einheiten und Bedeutungen aufgeführt, und zwar unter Anführung aller Indices.

Tabelle 1: Erläuterung der Abkürzungen und Symbole

Nr.	Zeichen (lang)	Zeichen (kurz)	Einheit	Bedeutung
1	ATM			akustische Torus-Messung
2	ATMG			akustisches Torus-Messgerät
3	c_{Luft}		m/s	Schallgeschwindigkeit in trockener Luft 343,2 m/s bei einer Temperatur von 20 °C und einem Druck von 1 013,25 hPa
4	c_E			Empfindlichkeitskoeffizienten ($c_{ak;i}$, $c_{RMmax;i}$)
5	δ_E			Unsicherheitsbeitrag ($\delta_{ak;i}$, $\delta_{RMmax;i}$, δ_{SRV})
6	E			Einflussgrößen (r_{ak} , n_{RMmax} , SRV) zur Messunsicherheit
7	$\varepsilon_{\lambda,h}$			relative Fehler auf den Mittelwert der Texturwellenlängen
8	f			Index der Frequenz zwischen 20 Hz und 5 000 Hz (in 1 Hz-Schritten)
9	f_{DS}		Hz	Frequenz der texturinduzierten Schwingungsanregung der Deckschicht
10	$f_{RM;r,i,j,n}$	f_{RM}	Hz	Frequenz der n -ten Mode der Eigenschwingung des Reifens
11	$f_{TM;n}$	f_{TM}	Hz	Frequenz der n -ten Mode der Eigenschwingung des Reifentorus
12	G		dimensionslos	Gewichtungsfaktor ($G = 1$ bei Normal- und Student-Verteilung, $G = 1/3$ bei Rechteck-Verteilung, $G = 1/6$ bei Dreieck-Verteilung)
13	h			Index des homogenen Unterabschnitte h
14	h_A und h_E			Index für das erste und letzte Straßensegment im homogenen Unterabschnitt h
15	i			Index für die Straßensegmente
16	int(...)			„Ganzzahl“-Funktion
17	j			Index für die Messwerte innerhalb des Straßensegmentes i
18	k		dimensionslos	Abdeckungsfaktor ($k = 1,2$ oder 3)
19	κ		dimensionslos	Adiabatexponent der trockenen Luft 1,400 bei einer Temperatur von 20 °C
20	Kfz			Kraftfahrzeug
21	$L_{ATF;r,i,f}$	L_{ATF}	dB(Z)	Torusgeräusch-Pegel in Anlehnung an die Zeitbewertung F (fast) und ohne Frequenzbewertung

Nr.	Zeichen (lang)	Zeichen (kurz)	Einheit	Bedeutung
22	$\lambda_{DS;h}$		m	mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im homogenen Unterabschnitt h
23	$\lambda_{DS;r,i}$		m	mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im Straßensegment i
24	M		kg/mol	mittlere molare Masse der trockenen Luft 0,028 96 kg/mol
25	N_h			Anzahl an Straßensegmenten im homogenen Unterabschnitt h
26	$N_{r,i}$			maximale natürliche ganze Zahl an Messwerten im Straßensegment i
27	$n_{RM;r,i,j}$	n_{RM}	dimensionslos	Mode der Eigenschwingung des Reifens
28	$n_{RMmax;r,i,j}$	n_{RMmax}	dimensionslos	maximale Anzahl an detektierten Moden der Eigenschwingung des Reifens
29	$n_{RMmax;h}$		dimensionslos	maximale Anzahl an detektierten Moden der Eigenschwingung des Reifens im homogenen Unterabschnitt h
30	n_{TM}		dimensionslos	Torusmode
31	R		J/(mol · K)	allgemeine Gaskonstante 8,314 J/(mol · K)
32	r			Index des ATM-Laufs
33	$r_{ak;r,i,j}$	r_{ak}	m	akustischer Radius des Reifens
34	$r_{ak;h}$		m	akustischer Radius des Reifens im homogenen Unterabschnitt h
35	r_T		m	Radius des Reifentorus
36	$s_{ak;r,i}^2$		m ²	Varianz des akustischen Radius des Reifens im Straßensegment i
37	$s_{DS;h}^2$		m ²	Varianz der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im homogenen Unterabschnitt h
38	s_{DS}^2		m ²	Gesamt-Abweichungskomponente der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht von zwei benachbarten Unterabschnitten
39	$S_{h,k}$		m	kumulative Summe für den homogenen Unterabschnitt h
40	$s_{RMmax;r,i}^2$			Varianz der maximalen Anzahl an detektierten Moden der Eigenschwingung des Reifens im Straßensegment i
41	SRV		dB	erforderliches Signal-Rausch-Verhältnis für die Erkennung von Moden der Eigenschwingung des Reifens im Spektrum des Torusgeräusches, SRV = 2 dB
42	t_F		s	Zeitkonstante (0,125 s) in Anlehnung an die Zeitbewertung F (fast)
43	$T_{h,h+1}$			Prüfwert für benachbarte Unterabschnitte
44	T_{Luft}		K	absolute Temperatur der Luft im Reifentorus $\{T\}_K = 273,15 + \{T\}_C$
45	t_h^P			Erwartungswert der zweiseitigen Student-t-Verteilung mit n Freiheitsgraden und dem zweiseitigen Vertrauensbereich mit der Wahrscheinlichkeit P
46	$u_{c,ATMG;i}(k)$		m	kombinierte Unsicherheit des ATMG pro Straßensegment i in Abhängigkeit vom Abdeckungsfaktor k
47	$u_{c,DS;h}(k)$		m	kombinierte Unsicherheit der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im homogenen Unterabschnitt h in Abhängigkeit vom Abdeckungsfaktor k
48	v_{ref}		km/h	Referenzgeschwindigkeit
49	$v_{r,i}$	v	km/h	mittlere Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs im Straßensegment i

3 Messprinzip

Beim Fahren wird der Reifen kontinuierlich in der Aufstandsfläche verformt (gewalkt) und zu Schwingungen angeregt. Diese Schwingungen werden, neben den Eigenschaften des Reifens wie Profil, Aufbau, verwendete Materialien oder Inhomogenitäten bei der Herstellung, ganz wesentlich durch die Textur der Fahrbahnoberfläche beeinflusst. Mit dem sogenannten akustischen Torus-Messgerät (ATMG) wird das Geräusch, das mit diesen Schwingungen verbunden ist und im weiteren als Torusgeräusch bezeichnet wird, im luftgefüllten Inneren des Reifens (Reifentorus) gemessen.

Entscheidend für die Interpretation des Messergebnisses ist aber nicht die absolute Pegelhöhe, sondern die Charakteristik des Torusgeräusches. Zu diesem Zweck muss das Spektrum des Geräusches frequenz aufgelöst (in 1 Hz-Schritte) analysiert und die Moden der Eigenschwingungen der Reifen (Reifenmoden) ausgewertet werden. Die maximal mögliche Anzahl an detektierten Moden ist dann ein Maß für den akustischen Zustand der Deckschicht.

Wenn viele Moden gezählt werden, dann ist der akustische Zustand der Deckschicht gut und andernfalls schlecht. Die Deckschicht kann hiermit klassifiziert werden.

Bei der Analyse wird auch deutlich, dass die Luft im Reifentorus in charakteristischen Moden (Torusmoden) schwingt, denn der Torus entspricht einem Hohlraumresonator. Die Frequenzlage (Tonhöhe) dieser Moden dient als akustische Referenz und das Torusgeräusch wird auf Plausibilität überprüft.

Die räumliche Zuordnung des Torusgeräusches erfolgt über ein globales Positionsbestimmungssystem.

Um den absoluten akustischen Zustand der Deckschichten zu bestimmen, müssen begleitende Messungen gemäß der TP KoSD-19 [3] durchgeführt werden.

4 Messvorrichtungen

4.1 Prüfrad

Das akustische Torus-Messgerät (ATMG) am Prüfrad muss Frequenzen im Bereich von 20 Hz bis 5 000 Hz erfassen.

4.2 Geräte zur Schallkalibrierung

Bevor der Reifen auf das Rad aufgezogen wird, muss der Gesamtübertragungskoeffizient des ATMG (einschließlich Mikrofon) mit einem Kalibrator überprüft werden.

Danach ist eine Schallkalibrierung nicht mehr möglich und auch nicht mehr erforderlich, da für die Ermittlung des akustischen Zustandes von Deckschichten nicht die absolute Pegelhöhe entscheidend ist, sondern die Charakteristik des Torusgeräusches. Die Frequenzlage (Tonhöhe) der Torusmoden dient als Referenz.

4.3 Geräte zur Positionsbestimmung und Geschwindigkeitsmessung

Ein Gerät zur Positionsbestimmung des Prüffahrzeugs muss verwendet werden. Mit diesem soll eine Präzision von ± 5 m erreicht werden. Das Gerät dient auch zur Ermittlung der Geschwindigkeit.

4.4 Geräte zur Fülldruckmessung

Die Geräte zur Feststellung des Fülldrucks des Prüfrads dürfen vom Hersteller festgelegte relative Fehlergrenzen von höchstens $\pm 4\%$ aufweisen.

5 Messabschnitt

Der Messabschnitt ist ein Straßenabschnitt einer befestigten Straße mit einer Mindestlänge von 20 m. In der Zufahrt muss auf einer Länge von mehr als 10 m die gleiche Deckschicht eingebaut sein wie an der Messstrecke.

6 Meteorologie, Messzeitraum

Für den Messzeitraum gelten die Regelungen aus der TP KoSD-19. Grundsätzlich muss die Fahrbahnoberfläche trocken sein.

7 Prüffahrzeug

Als Prüffahrzeug dienen Kraftfahrzeuge der Klasse M_1 und N_1 nach der EU-Verordnung 2018/858 [8], außer Geländewagen oder geländewagenähnliche und sonstige auffällige Fahrzeuge. Darüber hinaus können zweirädrige, einachsige Starrdeichsel-Kraftfahrzeug-Anhänger der Klasse O_1 verwendet werden. In diesem Fall muss die statische Radlast $3\,200\text{ N} \pm 200\text{ N}$ betragen.

Hinweis: Gemäß Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) [9] muss die Erlaubnis für den Betrieb des Prüfrades am Prüffahrzeug erlangt werden. Die (typischen) Betriebsbedingungen des Prüfrades und Prüffahrzeugs müssen beachtet und eingehalten werden.

7.1 Allgemeine Anforderungen, Montage und Ausrichtung des Prüfrades

Das luftgefüllte Prüfrad wird an die linke oder rechte, nicht angetriebene Nabe des Prüffahrzeugs montiert. Die Führung des Prüfrades muss Spur- und Sturz-konstant sein, d. h. der Querneigungswinkel und die (statische) Vorspur des Prüfrades darf $1,5^\circ$ bzw. $\pm 1^\circ$ nicht überschreiten. Dies ist mindestens alle zwei Jahre einmal zu prüfen.

7.2 Mikrofonpositionen

Das Mikrofon wird im Tiefbett der Felge des Prüfrades befestigt. Dabei zeigt die Normale der Membran des Mikrofons vom äußeren Hump zur Felgenmitte, um die Rotationsbeschleunigung auf die Membran zu minimieren. Beim Aufziehen des Reifens auf das Rad muss das Mikrofon vor Beschädigungen geschützt werden.

Wenn am Prüfrad der Reifen gewechselt wird, muss die Mikrofonposition kontrolliert werden.

Im Anhang A ist eine mögliche Mikrofonhalterung abgebildet.

7.3 Einfahren der Reifen

Vor der ersten Verwendung eines Prüfrades muss der Reifen eingefahren werden. Die Strecke, die hierbei auf öffentlichen Straßen zurückgelegt werden muss, beträgt bei einem Kfz der Klasse M_1 und N_1 mindestens 200 km und bei einem Anhänger der Klasse O_1 mindestens 400 km.

8 Messverfahren

8.1 Vorbereitung der Messungen

Vor jeder ATM muss das Prüfrad auf Betriebstemperatur gebracht werden. Hierfür wird es auf einer öffentlichen Straße mit dem Prüffahrzeug für mindestens 15 Minuten warmgefahren.

Der Reifen am Prüfrad muss regelmäßig auf Schäden untersucht werden. Gegenstände, z. B. Steine im Profil müssen dann entfernt werden.

8.2 Messung des Schalls

In der Rollspur eines Fahrstreifens wird mit einem Prüfrad der Schalldruck des Torusgeräusches gemessen.

8.3 Position im Messabschnitt

Mit dem Prüfrad wird die Rollspur des Fahrstreifens eines Messabschnitts abgefahren. Dies kann gegebenenfalls auch mehrmals stattfinden. Das Überfahren von Straßenmarkierungen soll vermieden werden.

Die Position des Prüffahrzeugs muss synchron zum Torusgeräusch erfasst werden.

8.4 Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs

Wenn keine Geschwindigkeitsbeschränkung angeordnet ist und es die örtliche Situation zulässt, dann gilt grundsätzlich auf einer einbahnigen Straße 80 km/h und auf einer mehrbahnigen 120 km/h. Innerorts beträgt die Geschwindigkeit 50 km/h.

Die Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs muss synchron zum Torusgeräusch gemessen werden.

8.4.1 Akzeptable Abweichungen für die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Prüffahrzeugs

Mit dem Prüffahrzeug muss mit möglichst konstanter Geschwindigkeit gefahren werden. Absolute Beschleunigungen von mehr als $0,2 \text{ m/s}^2$ sind zu vermeiden. Hilfreich ist bei der ATM die Verwendung einer Geschwindigkeitsregelanlage (Tempomat).

ANMERKUNG 1: Die maximale absolute Beschleunigung von $0,2 \text{ m/s}^2$ darf nicht überschritten werden, da sonst der akustische Radius des Rad-Reifens und damit die Reifenmoden nicht bestimmt werden können. Zur Veranschaulichung: Die Beschleunigung von $0,2 \text{ m/s}^2$ entspricht einer Geschwindigkeitsänderung von ca. 0,5 km/h pro Straßensegment.

8.5 Berücksichtigung von Störgeräuschen

Bei der ATM entsteht ein Torusgeräusch-Pegel von weit über 100 dB. Dieser ist gegenüber äußeren Störgeräuschen unempfindlich, wie sie z. B. durch Wind, vorbeifahrende Fahrzeuge oder Reflexionen verursacht werden.

Im ungünstigsten Fall kann der Pegel durch Abweichungen der regulären Textur der Fahrbahnoberfläche, z. B. durch Markierungen auf der Fahrbahn, Schäden in der Deckschicht oder Fahrbahnübergänge an Brücken gestört werden. Dies gilt auch für mögliche Gegenstände im Profil des Prüfrades.

Diese Straßensegmente müssen gekennzeichnet und gegebenenfalls verworfen werden.

8.6 Zusammenfassung der Messparameter

Tabelle 2: Zusammenfassung der wichtigsten Messparameter

Nr.	Parameter	Spezifischer Wert	Alternativen
1	Geschwindigkeit	50 km/h, 80 km/h, 120 km/h	Die angeordnete Geschwindigkeitsbeschränkung oder was die örtliche Situation erfordert.
2	Beschleunigung	0 m/s ²	
3	Horizontale Position		
4	Eigenschaften der Reifen (Fülldruck, Last, Profiltiefe, Gummihärte)	vgl. die Betriebsbedingungen des Prüffahrzeugs	
5	Frequenz	20 Hz ≤ f ≤ 5 000 Hz	
6	Meteorologie	Trockene Fahrbahn	

9 Analyseverfahren zur Bestimmung des akustischen Zustands für ein Straßensegment

Fährt das Prüffahrzeug in einem Straßensegment mit konstanter Geschwindigkeit, d. h. ist die absolute Beschleunigung geringer als 0,2 m/s², dann kann das Spektrum der Torusgeräusch-Pegel (L_{ATF}) berechnet werden.

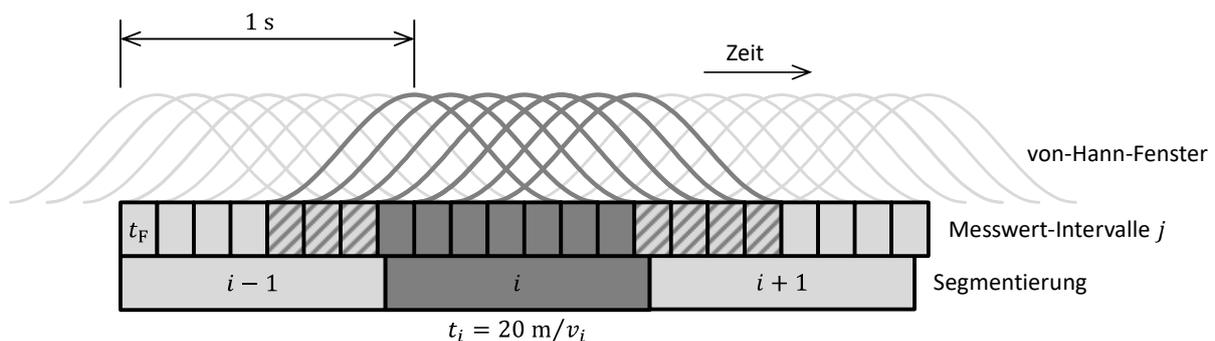


Abbildung 1: Veranschaulichung der zeitlichen Lage der von-Hann-Fenster für ein Zeitfenster von 1 Sekunde und die Abfolge der Messwert-Intervalle bezogen auf die Segmentierung eines Messabschnittes.

ANMERKUNG 1: Die gleichmäßige Fahrt gilt für die größte natürliche ganze Zahl an Messwerten im zu analysierenden Straßensegment i und darüber hinaus für die unmittelbar anschließenden 4 Messwerte im Straßensegment $i + 1$ und 3 Messwerte im Straßensegment $i - 1$.

Hierbei wird für **eine** Sekunde des Schalldruckverlaufs das Hanning-Fenster auf die Schnelle Fouriertransformation (en: fast fourier transformation, FFT) angewendet. Die Frequenz-Auflösung beträgt somit 1 Hz. Für die weitere Auswertung wird der Frequenzbereich von 20 Hz bis 5 000 Hz benötigt. Dem Spektrum wird die Zeit, die zur Mitte des Schalldruckverlaufs gehört, zugeordnet. Die Einzelspektren werden in Anlehnung an die Zeitbewertung F (fast) in 0,125 s Schritten (t_F) berechnet, die jeweiligen Schalldruckverläufe überschneiden sich entsprechend.

Hierbei wird deutlich, dass das Spektrum von Torusmoden dominiert wird. Die Moden n_{TM} dieser Eigenschwingung liegen bei festen Frequenzen f_{TM} und werden vom Radius des Reifentorus r_T bestimmt, siehe Gleichung (1).

$$f_{TM} = \frac{c_{Luft}}{2\pi \cdot r_T} \cdot n_{TM} \quad (1)$$

Die Analyse dieser Torusmoden dient indirekt als Funktionstest des Mikrofons.

Weil der Radius des Reifentorus konstant ist, kann optional mit Gleichung (2) die Temperatur der Luft im Prüfrad berechnet werden, siehe Gleichung (3).

$$c_{\text{Luft}} = \sqrt{\kappa \frac{R \cdot T_{\text{Luft}}}{M}} \quad (2)$$

$$T_{\text{Luft}} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{M}{R} \left(\frac{2\pi r_T \cdot f_{\text{TM}}}{n_{\text{TM}}} \right)^2 \quad (3)$$

Gleichzeitig sind im Spektrum die Moden der Eigenschwingungen des Reifens zu erkennen. Die Frequenz f_{RM} der n_{RM} -ten Mode dieser Schwingung ist eine Funktion der Geschwindigkeit v bei bekanntem akustischen Radius r_{ak} des Reifens, siehe Gleichung (4).

$$f_{\text{RM}} = \frac{n_{\text{RM}}}{2\pi \cdot r_{\text{ak}}} \cdot v \quad (4)$$

ANMERKUNG 2: Wenn die Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs und die Tonhöhe der n_{RM} -ten Reifenmode bekannt sind, dann kann mit Gleichung (4) der akustische Radius r_{ak} des Reifens bestimmt werden.

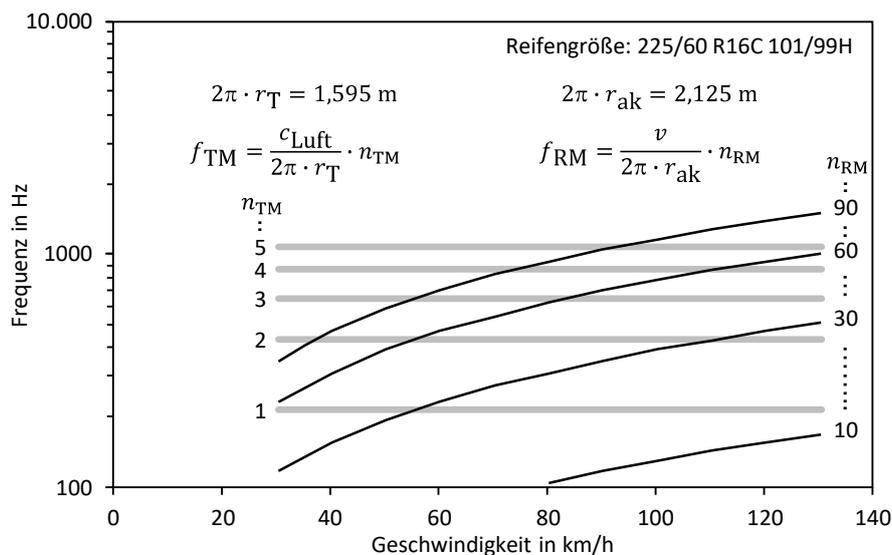


Abbildung 2: Prinzip-Skizze für die Tonhöhen der n_{TM} -ten Torusmode und der n_{RM} -ten Reifenmode im Spektrum des Torusgeräusches in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit bei festen Radien [10]. Je höher die Mode, desto niedriger ihr Schalldruckpegel.

Das Prüfrad tastet die Fahrbahnoberfläche ab. Hierbei prägt sich die Textur in die Lauffläche ein und regt den Rad-Reifen zu texturinduzierten Schwingungen an. Die Frequenz f der Schwingung steht in Beziehung zur Texturwellenlänge λ und kann mit Gleichung (5) berechnet werden.

$$f = \frac{1}{\lambda} \cdot v \quad (5)$$

Sind die Torusgeräusch-Pegel dieser Textur-induzierten Schwingungen hoch genug, dann maskieren sie die Pegel der Moden der Eigenschwingungen des Reifens. Diese Maskierung erfolgt bei der Grenzfrequenz f_{DS} , die mit der Frequenz f_{RM} für die maximale Anzahl an detektierten

Moden n_{RMmax} zusammentrifft. Für diese Konjunktion gilt: $f_{\text{RM}} = f_{\text{DS}}$. Die Texturwellenlänge λ korrespondiert mit der Wellenlänge der prägenden Textur λ_{DS} der Deckschicht, siehe Gleichung (6).

$$\lambda_{\text{DS}} = \frac{2\pi \cdot r_{\text{ak}}}{n_{\text{RMmax}}} \quad (6)$$

Der akustische Radius r_{ak} des Reifens wird iterativ durch das Abzählen der Moden bis zur maximalen Anzahl an detektierten Moden n_{RMmax} ermittelt. Der Algorithmus hierfür steht in Anhang B. Mit diesem wird eine Mode erkannt, wenn der Pegel der Mode um 2 dB über den Pegeln des Hintergrundgeräusches liegt.

Durch arithmetische Mittelung über die Anzahl $N_{r,i}$ der Messwerte j in einem Straßensegment i wird die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht $\lambda_{\text{DS};i}$ berechnet, siehe Gleichung (7). Dieser Textur-Parameter charakterisiert den akustischen Zustand der Deckschicht im Straßensegment i .

$$\lambda_{\text{DS};r,i} = \frac{2\pi \cdot r_{\text{ak};r,i}}{n_{\text{RMmax};r,i}} \quad \text{mit} \quad r_{\text{ak};r,i} = \frac{1}{N_{r,i}} \sum_{j=1}^{N_{r,i}} r_{\text{ak};r,i,j} \quad (7)$$

$$n_{\text{RMmax};r,i} = \frac{1}{N_{r,i}} \sum_{j=1}^{N_{r,i}} n_{\text{RMmax};r,i,j}$$

$$\text{und} \quad N_{r,i} = \text{int} \left(\frac{20 \text{ m}}{t_{\text{F}} \cdot v_{r,i} [\text{m/s}]} \right)$$

sowie mit den empirischen Varianzen $s_{\text{ak};r,i}^2$ und $s_{\text{RMmax};r,i}^2$ des akustischen Radius r_{ak} des Reifens bzw. der maximalen Anzahl an detektierten Moden der Eigenschwingungen des Reifens im Straßensegment i .

$$s_{\text{ak};r,i}^2 = \frac{1}{N_{r,i} - 1} \sum_{j=1}^{N_{r,i}} (r_{\text{ak};r,i,j} - r_{\text{ak};r,i})^2 \quad (8)$$

$$s_{\text{RMmax};r,i}^2 = \frac{1}{N_{r,i} - 1} \sum_{j=1}^{N_{r,i}} (n_{\text{RMmax};r,i,j} - n_{\text{RMmax};r,i})^2$$

Wurde innerhalb eines Messzeitraums der akustische Zustand eines Straßensegments i mit einem Prüfrad t mehrmals erhoben, d. h. mehrere ATM-Läufe r durchgeführt, dann ist die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht $\lambda_{\text{DS};i}$ der Median der Einzelmessungen für dieses Straßensegment i mit dem zugehörigen akustischen Radius $r_{\text{ak};i}$ und der entsprechenden maximalen Anzahl an Reifenmoden $n_{\text{RMmax};i}$. Damit ist der Datensatz robust gegenüber Ausreißern.

10 Analyseverfahren zur Bestimmung der akustischen Zustände in einem Messabschnitt

Ein Messabschnitt kann aus unterschiedlichen Deckschichten bestehen, die zu verschiedenen Zeiten hergestellt wurden und einer ungleichen Verkehrsbelastung unterliegen. Aus diesem Grund kann der Messabschnitt, der sich aus einer Reihung von vielen Straßensegmenten zusammensetzt, aus mehreren Unterabschnitten h bestehen, die sich in ihrem akustischen Zustand unterscheiden. Ein Indiz ist, wenn der relative Fehler auf den Mittelwert der Texturwellenlängen $\varepsilon_{\lambda,h}$ im Unterabschnitt größer ist als 10 %, siehe Gleichung (9).

$$\varepsilon_{\lambda,h} = \frac{s_{DS;h}}{\lambda_{DS;h}} \cdot 100 \% \quad \text{mit} \quad \lambda_{DS;h} = \frac{2\pi \cdot r_{ak;h}}{n_{RMmax;h}} \quad (9)$$

$$r_{ak;h} = \frac{1}{N_h} \sum_{i=h_A}^{h_E} r_{ak;i}$$

$$n_{RMmax;h} = \frac{1}{N_h} \sum_{i=h_A}^{h_E} n_{RMmax;i}$$

$$\text{und} \quad s_{DS;h}^2 = \frac{1}{N_h - 1} \sum_{i=h_A}^{h_E} (\lambda_{DS;i} - \lambda_{DS;h})^2$$

Dabei ist N_h die Anzahl an Straßensegmenten im Unterabschnitt h sowie h_A das Anfangs- und h_E das End-Straßensegment im Unterabschnitt h .

Identifiziert werden diese Unterabschnitte nach dem „Verfahren der kumulativen Summen“ [11]. Hierbei wird die Differenz der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im Straßensegment i von der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im Unterabschnitt $\lambda_{DS;h}$ partiell aufsummiert, siehe Gleichung (10).

$$S_{h,k} = \sum_{i=h_A}^k (\lambda_{DS;i} - \lambda_{DS;h}) \quad \text{mit} \quad k = h_A \text{ bis } h_E \quad (10)$$

Wenn diese kumulative Summe $S_{h,k}$ Extrema aufweist, dann muss dort folgender Signifikanztest durchgeführt werden. Voraussetzung für diesen Test bei der ATM ist, dass die Unterabschnitte aus mindestens 30 Straßensegmenten bestehen. Aus der empirischen Varianz $s_{DS;h}^2$ für den Unterabschnitt h und $s_{DS;h+1}^2$ für den Unterabschnitt $(h + 1)$ wird die Gesamt-Abweichungskomponente s_{DS}^2 berechnet, siehe Gleichung (11).

$$s_{DS}^2 = \frac{s_{DS;h}^2}{N_h - 1} + \frac{s_{DS;h+1}^2}{N_{h+1} - 1} \quad (11)$$

Ist dieser Prüfwert $T_{h,h+1}$ für benachbarte Unterabschnitte größer als der Studentfaktor der zweiseitigen t-Verteilung mit n Freiheitsgraden und einer 95 % Wahrscheinlichkeit, dann sind zwei unabhängige homogene Unterabschnitte gefunden, siehe Gleichung (12):

$$T_{h,h+1} = \frac{|\lambda_{DS;h} - \lambda_{DS;h+1}|}{s_{DS}} > t_n^{95} \quad \text{mit} \quad n = N_h + N_{h+1} - 1 \quad (12)$$

Im anderen Fall werden die beiden Unterabschnitte wieder zusammengefasst.

Nach Bedarf müssen die Unterabschnitte weiter unterteilt werden, siehe Gleichung (9).

11 Messunsicherheit

11.1 Messgenauigkeit des akustischen Torus-Messgeräts

In den ISO/IEC Guide 98-3 [12] wird erklärt, wie mit Messunsicherheiten verfahren wird. Zuerst müssen die Einflussgrößen E identifiziert werden, die das Ergebnis beeinflussen. Diese sind hier:

- Prüffahrzeug
(Geschwindigkeit, ...)
- Prüfrad
(Radlast, Reifenfülldruck, Dämpfungseigenschaften des Reifens, Profil, Reifen-Abmessungen, Mikrofon, ...)
- Störungen während einer ATM
(Wie genau kann die Position bestimmt werden und wie exakt fährt das Prüffahrzeug in der Rollspur? Welchen Einfluss haben Fahrten über Markierungen und Fahrbahnübergänge an Brücken? Wie wirkt sich die Meteorologie aus? ...)
- externe Faktoren
(äußere Geräuschquellen, Meteorologie, ...)

Wie genau die Wellenlänge der prägenden Textur λ_{DS} der Deckschicht bestimmt werden kann, hängt entscheidend davon ab, wie exakt der akustische Radius $r_{ak;i}$ des Reifens und die maximale Anzahl an Moden der Eigenschwingung des Reifens $n_{RMmax;i}$ ermittelt werden können. Hierauf hat das Signal-Rausch-Verhältnis SRV einen wesentlichen Einfluss. Je größer das Verhältnis gewählt wird, desto früher bricht der Algorithmus (s. Anhang B) bei der Suche nach der maximalen Anzahl an Moden der Eigenschwingung des Reifens $n_{RMmax;i}$ ab und umso kleinere Wellenlängen der prägenden Textur λ_{DS} der Deckschicht werden berechnet.

ANMERKUNG 1: Am Prüfstand wurde für das Signal-Rausch-Verhältnis SRV ein Wert von 2 dB ermittelt. Damit kann sichergestellt werden, dass unter Referenzbedingungen die maximale Anzahl an Moden der Eigenschwingung des Reifens pro Straßensegment i mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5\%$ bestimmt werden kann, d. h. $s_{SRV} = 2,5\% \cdot \lambda_{DS;i}$, siehe Kapitel 3.1.2 in [13].

Der allgemeine Ausdruck für die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im Straßensegment i lautet:

$$\lambda_{DS;i} = \frac{2\pi \cdot (r_{ak;i} + \delta_{ak;i})}{n_{RMmax;i} + \delta_{RMmax;i}}$$

Hiervon bzw. aus Gleichung (6) leiten sich die Empfindlichkeitskoeffizienten

$$c_{ak;i} = \frac{\partial \lambda_{DS;i}}{\partial r_{ak;i}} = \frac{2\pi}{n_{RMmax;i}} \quad \text{und} \quad c_{RMmax;i} = \frac{\partial \lambda_{DS;i}}{\partial n_{RMmax;i}} = -\frac{\lambda_{DS;i}}{n_{RMmax;i}} \quad (13)$$

ab. Mit diesen Koeffizienten und dem Abdeckungsfaktor k ergibt sich die kombinierte Unsicherheit für das akustische Torus-Messgerät $u_{c,ATMG;i}(k)$ pro Straßensegment i .

$$u_{c,ATMG;i}(k) = k \cdot \sqrt{\delta_{ak;i}^2 + \delta_{RMmax;i}^2 + \delta_{SRV}^2} \quad (14)$$

Hierbei ist:

$$\delta_{ak;i} = c_{ak;i} \cdot t_{N_i-1}^{68,3} \cdot \sqrt{G} \cdot s_{ak;i}$$

$$\delta_{RMmax;i} = c_{RMmax;i} \cdot t_{N_i-1}^{68,3} \cdot \sqrt{G} \cdot s_{RMmax;i}$$

und $\delta_{SRV} = \sqrt{G} \cdot s_{SRV}$

Diese Unsicherheit sollte für das Prüfrad unter Einhaltung der Referenz- und Betriebsbedingungen des Prüffahrzeugs in einem Prüfstand auf einem Antirutschbelag bestätigt werden. Die hierfür zurückgelegte Messstrecke muss aus mindestens 30 Straßensegmenten bestehen.

Die erforderlichen Informationen zur Ermittlung der kombinierten Unsicherheit sind in Tabelle 3 bzw. Tabelle 4 angegeben.

Tabelle 3: Budgetanalyse für die Unsicherheitsbeiträge

Einflussgröße E	Schätzwert	Standardunsicherheit	Verteilung	Empfindlichkeitskoeffizient c_E	Unsicherheitsbeitrag δ_E in mm
r	$r_{ak;i}$	$s_{ak;i}$	Student, $G = 1$	c_r	0,1
n	$n_{RMmax;i}$	$s_{RMmax;i}$	Student, $G = 1$	c_n	-1,1
SRV	$n_{RMmax;i}$	s_{SRV}	Rechteck, $G = 1/3$	1	0,5

Tabelle 4: Geschätzte kombinierte Unsicherheit für die Abdeckungswahrscheinlichkeit 1 bis 3, basierend auf der Budgetanalyse aus Tabelle 3

Abdeckungsfaktor k	Abdeckungswahrscheinlichkeit in %	kombinierte Unsicherheit $u_{c,ATMG;i}(k)$ in mm
1	68,3	1,3
2	95,4	2,5
3	99,7	3,8

11.2 Genauigkeit der akustischen Torus-Messung für den homogenen Abschnitt

Ein zusätzliches Ergebnis einer akustischen Torus-Messung ist die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht für einen akustisch homogenen Unterabschnitt h , $\lambda_{DS;h}$. Dieser Abschnitt besteht aus mindestens 30 Straßensegmenten. Segmente, die während der ATM gestört wurden, werden bei der Bildung der homogenen Abschnitte identifiziert und verworfen.

Die kombinierte Unsicherheit einer akustischen Torus-Messung für einen homogenen Unterabschnitt h ist $u_{c,DS;h}(k)$ und kann in Abhängigkeit vom Abdeckungsfaktor k mit Gleichung (15) berechnet werden.

$$u_{c,DS;h}(k) = k \cdot \sqrt{\delta_{ak;h}^2 + \delta_{RMmax;h}^2 + \delta_{SRV}^2} \quad (15)$$

Hierbei ist:

$$\delta_{ak;h} = c_{ak;h} \cdot t_{N_h-1}^{68,3} \cdot \sqrt{G} \cdot s_{ak;h} \quad \text{mit } G = 1$$

$$\delta_{RMmax;h} = c_{RMmax;h} \cdot t_{N_h-1}^{68,3} \cdot \sqrt{G} \cdot s_{RMmax;h} \quad \text{mit } G = 1$$

und $\delta_{SRV} = \sqrt{G} \cdot s_{SRV} \quad \text{mit } G = 1/3$

sowie mit:

$$c_{ak;h} = \frac{2\pi}{n_{RMmax;h}} \quad \text{und} \quad s_{ak;h}^2 = \frac{1}{N_h - 1} \sum_{i=h_A}^{h_E} (r_{ak;i} - r_{ak;h})^2$$

$$c_{RMmax;h} = -\frac{\lambda_{DS;h}}{n_{RMmax;h}} \quad \text{und} \quad s_{RMmax;h}^2 = \frac{1}{N_h - 1} \sum_{i=h_A}^{h_E} (n_{RMmax;i} - n_{RMmax;h})^2$$

$$s_{SRV} = 2,5 \% \cdot \lambda_{DS;h}$$

12 Wiederhol- und Vergleichpräzision

Sind mehrere Prüffahrzeuge im Einsatz, um z. B. zeitnah den akustischen Zustand eines umfangreichen Straßennetzes zu untersuchen, dann muss für alle eingesetzten Prüfreifen regelmäßig ein Präzisionsversuch nach DIN ISO 5725-2 [14] durchgeführt werden. Als Ergebnis dieses Versuches kann die Wiederhol- und Vergleichstandardabweichung angegeben werden.

13 Prüfbericht

Der Prüfbericht muss die folgenden Angaben enthalten:

Allgemeines

- 1) Uhrzeit und Datum der Messung
- 2) Prüfinstitut und für die Messung Verantwortliche
- 3) Zweck der Prüfung
- 4) Art der verwendeten Messgeräte
(Prüffahrzeug mit Prüfreifen und ATMG, Gerät zur Positionsbestimmung)

Lage des Messortes

- 5) Fahrbahn, Straßenabschnitt und Radspur eines Fahrstreifens, in dem das Prüfrad rollt; falls möglich, sollten die geographischen Koordinaten mit angegeben werden

Art und Zustand der geprüften Deckschicht

- 6) Deckschicht sollte mit der genormten oder allgemein üblichen Bezeichnung [dichter Asphaltbeton (en: dense asphalt concrete, DAC), Splitt-Mastix-Asphalt (en: stone mastic asphalt, SMA), usw.] möglichst präzise beschrieben werden; optional kann von der Oberfläche (Abmessung: 100 mm × 150 mm) ein repräsentatives Foto mit Maßstab erstellt werden
- 7) Alter und Zustand der Deckschicht (falls verfügbar)
- 8) besondere Oberflächenbehandlung (falls verfügbar)
- 9) Anmerkungen zur Homogenität des Straßenabschnitts

Umweltfaktoren

- 10) Anzahl der Tage seit dem letzten Niederschlag (falls verfügbar)

Prüfreifen und andere Prüfbedingungen

- 11) verwendete Prüfreifen, Kennzeichnung der Reifen und Herstellungsdatum
- 12) Gummihärte der Prüfreifen
(diese sollte innerhalb von 3 Monaten um den Messzeitpunkt erfasst werden)
- 13) Anzahl der ATM-Läufe
- 14) angewendete Referenzgeschwindigkeit v_{ref}
- 15) mittlere Geschwindigkeit des Prüffahrzeugs im Straßensegment

Wellenlänge λ_{DS} der prägenden Textur der Deckschicht

- 16) mittleren Wellenlänge $\lambda_{\text{DS},h}$ der prägenden Textur der Deckschicht im homogenen Unterabschnitt h
- 17) Varianz der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im homogenen Unterabschnitt h
- 18) kombinierte Unsicherheit der Prüfergebnisse und die Abdeckungswahrscheinlichkeit (optional)

Weitere Angaben

19) Bemerkungen und Kommentare zur ATM

Graphen und Tabellen (optional)

20) aufgezeichnete Geschwindigkeit entlang des Straßenabschnitts

21) mittleren Wellenlänge $\lambda_{DS,h}$ der prägenden Textur der Deckschicht entlang des Straßenabschnitts (ein Durchlauf oder der Median aller ATM-Läufe)

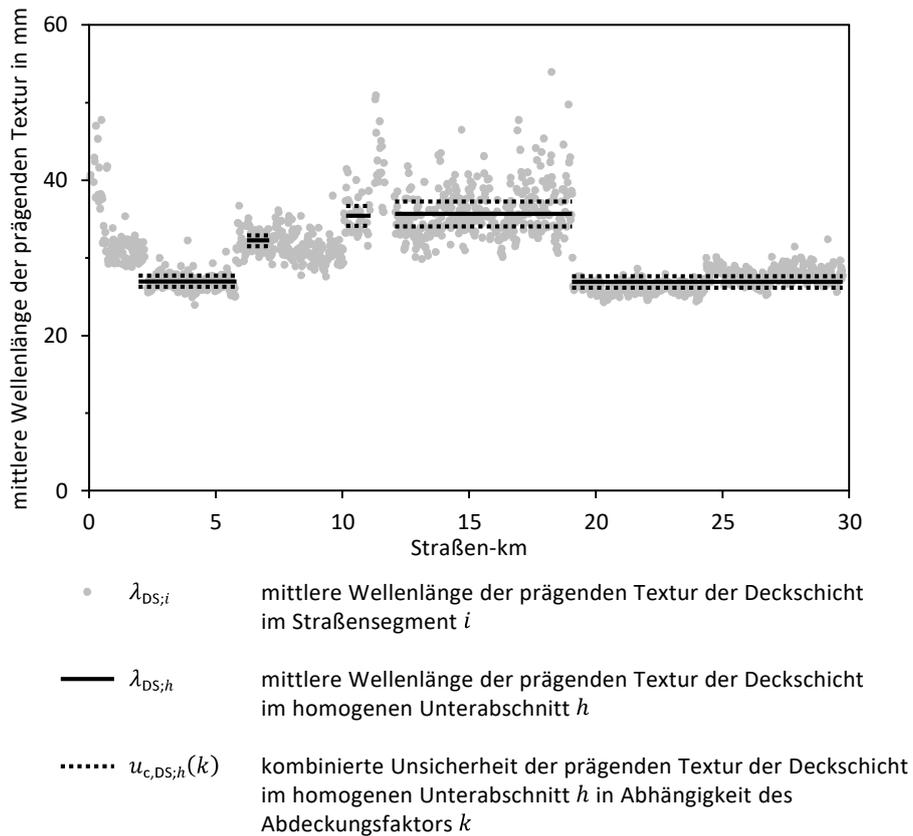
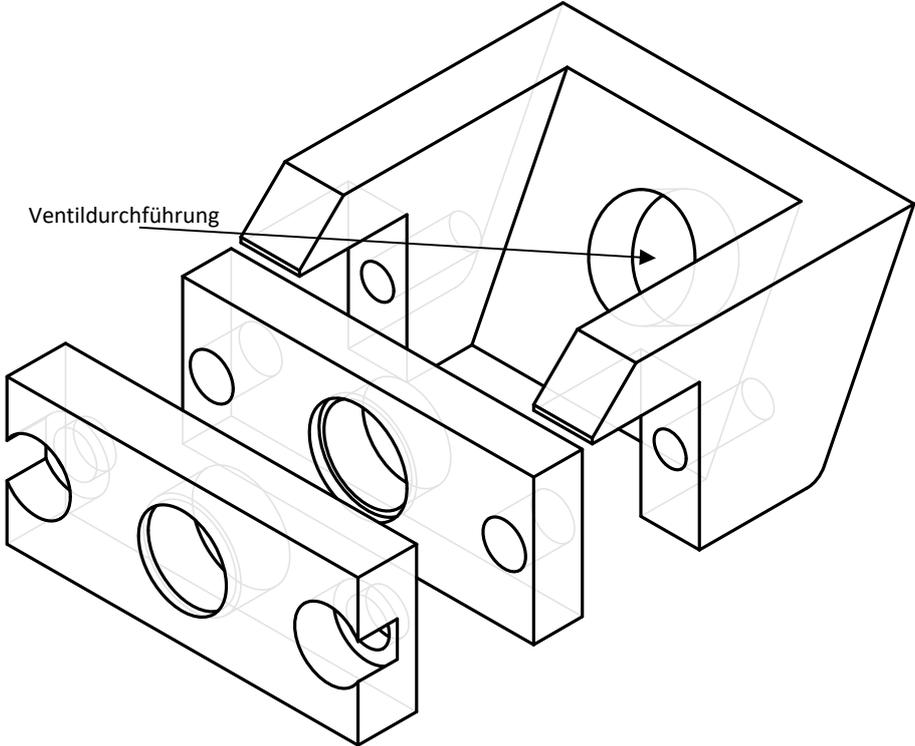


Abbildung 3: 30 km lange ATM. In diesem Straßenabschnitt wurden 5 akustisch homogene Unterabschnitte ermittelt. Jeder Messpunkt gehört zu einem Straßensegment. Die waagrechten Linien geben die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht an; die gestrichelte Linien markieren die kombinierte Unsicherheit der ATM mit einem Abdeckungsfaktor von $k = 1$.

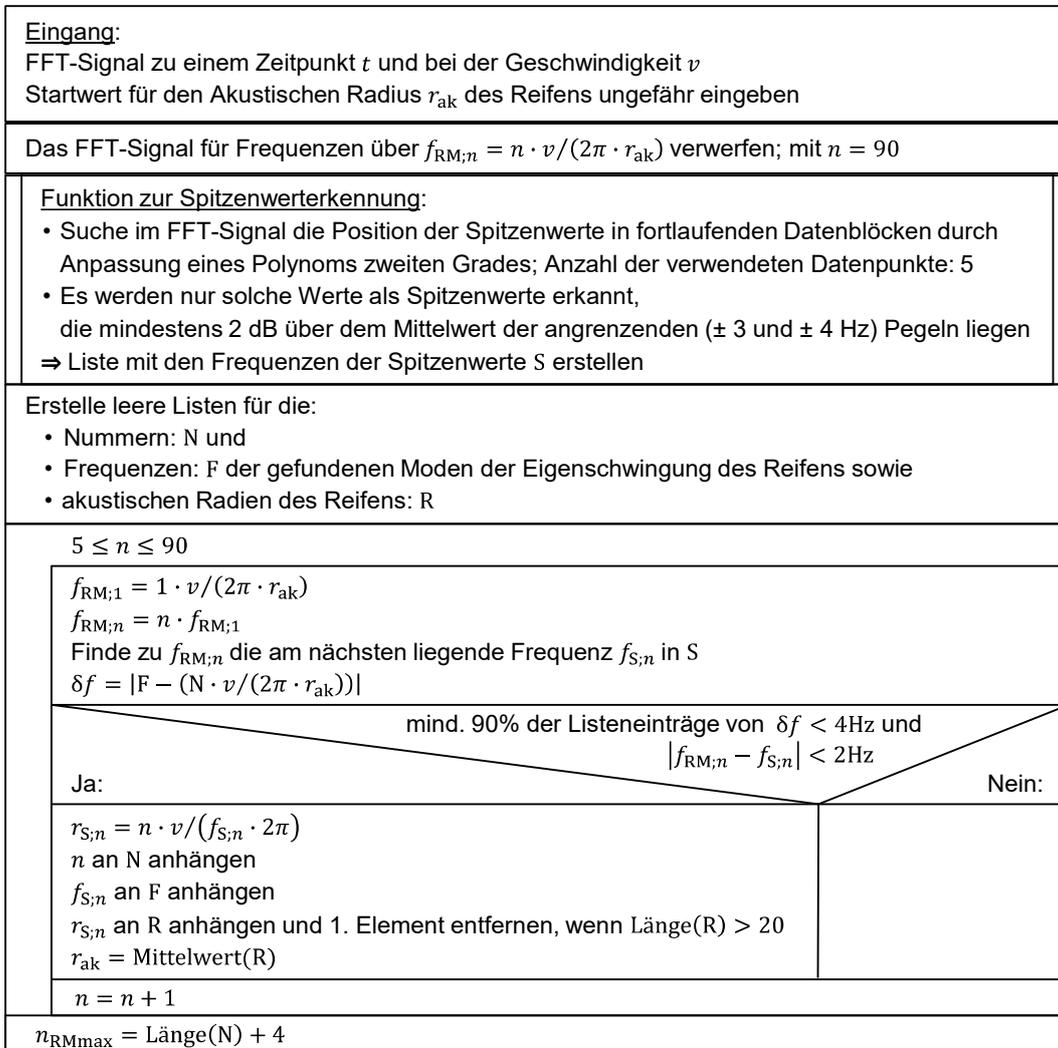
Anhang A Abbildung einer möglichen Mikrofonhalterung



Anhang B Struktogramm des Algorithmus

Struktogramm des Algorithmus zur Bestimmung

- des akustischen Radius r_{ak} des Reifens und
- der maximalen Anzahl an detektierten Moden n_{RMmax} der Eigenschwingung des Reifens.



ANMERKUNG 1: Das Signal-Rausch-Verhältnis SRV von 2 dB wurde am Prüfstand ermittelt. Damit kann die Wellenlänge der prägenden Textur λ_{DS} der Deckschicht mit einem relativen Fehler von $\pm 2,5 \%$ bestimmt werden. Je größer das Verhältnis gewählt wird, umso früher bricht der Algorithmus ab und umso größere Werte für die prägende Textur-Wellenlänge werden berechnet.

ANMERKUNG 2: Am Prüfstand konnten unter Referenzbedingungen für alle Prüfreifen maximal 90 Moden der Eigenschwingung des Reifens bestimmt werden.

Literaturhinweise

- [1] DIN EN ISO 11819-1, „Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2001.
- [2] DIN EN ISO 11819-2, „Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 2: Nahfeldmessverfahren,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 2017.
- [3] TP KoSD-19, „Technischen Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten,“ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, 29.10.2019.
- [4] Anton Wolf, „Bewertung des Reifen-Fahrbahn-Geräusches durch Messung des Reifeninnengeräusches,“ Dissertation, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart, expert verlag, Renningen-Malmsheim, 1997.
- [5] BBSV, „Begriffsbestimmungen für das Straßen- und Verkehrswesen,“ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln, Juni 2020.
- [6] DIN ISO 13473-2, „Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 2: Begriffe und grundlegende Anforderungen für die Analyse von Fahrbahntexturprofilen (ISO 13473-2:2002),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2004.
- [7] BS ISO 3911, „Wheels and rims for pneumatic tyres. Vocabulary, designation and marking,“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, 06.12.2004.
- [8] Verordnung (EU) 2018/858, „über die Genehmigung und die Marktüberwachung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 715/2007 und (EG) Nr. 595/2009 und zur Aufhebung der Richtlinie 2007/46/EG,“ Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 30.05.2018.
- [9] StVZO, „Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung,“ zuletzt geändert durch Artikel 11 des Gesetzes vom 12.07.2021 (BGBl. I S. 3091), BGBl. I S. 679, 26.04.2012.
- [10] Oliver Krauss, „Experimentelle Untersuchungen zum Innengeräusch von Fahrzeugluftreifen,“ Dissertation, Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Karlsruher Institut für Technologie, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2019.
- [11] FGSV 431, „Arbeitspapier, Grundlagen zur Ermittlung homogener Abschnitte zur Bewertung der strukturellen Substanz von Straßenbefestigungen,“ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 2009.
- [12] ISO/IEC Guide 98-3, „Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995),“ ISO – International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, September 2008.
- [13] André Hinträger et al., „Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus-Messungen,“ Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, im Auftrag des Umweltbundesamts, April 2022.
- [14] DIN ISO 5725-2, „Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen – Teil 2: Grundlegende Methode für Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens (ISO 5725-2:1994 incl. Tech. Korrigendum 1:2002),“ Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2002.