



Schlussbericht

Ermittlung der akustischen Eigenschaft von Straßen
zur Qualitätssicherung der Lärmkartierung
(AQuStra III)



lärm



Schlussbericht

Ermittlung der akustischen Eigenschaft von Straßen zur Qualitätssicherung der Lärmkartierung (AQuStra III)

Projektlaufzeit:
Februar 2022 bis März 2025



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



UmweltProjekt

Impressum

Ermittlung der akustischen Eigenschaft von Straßen zur Qualitätssicherung der Lärmkartierung (AQuStra III)

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Bearbeitung:

LfU, André Hinträger

Stand:

Juli 2025

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 0 89 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen, Formelzeichen, Begriffe	4
Kurzzusammenfassung	8
1 Einleitung	9
2 Akustische Zustandserfassung	10
2.1 Umfang der Messungen im Verlauf der Jahre	10
2.2 Akustische Qualität der häufigsten Deckschichttypen	12
2.3 Alterungsverhalten	13
2.4 Berücksichtigung von Lkw bei der Betroffenheitsanalyse	17
2.5 Anwendung von ATMS durch weitere Fachstellen	18
3 Auswirkung auf die Lärmkartierung und -betroffenheit	20
3.1 Lärmkartierung nach BUB am Beispiel der Stadt Weilheim	20
3.2 Abgleich des Berechnungsmodells als Untersuchungsgrundlage	21
3.3 Lärmkartierung auf Basis der realen Geräuschemissionen	22
3.4 Auswirkungen der realen Geräuschemissionen auf die Lärmkartierung	25
3.5 Auswirkung auf die Betroffenheitsanalyse	27
4 Zusammenfassung	28
4.1 Schlussfolgerungen aus den ATM	28
4.2 Empfehlungen für die Lärmkartierung	28
4.3 Ausblick	30
Danksagung	30
5 Literaturverzeichnis	31
6 Anhang	33
6.1 Qualitätssicherung der ATM	33
6.2 Ergänzung E TP ATM	34
6.3 Erweiterung der Übertragungsfunktion	34
6.4 Weitere Aspekte und Überlegungen für künftige Nutzungen	38
6.5 Daten der SPB-Messungen	40
6.6 Formblätter gemäß DIN ISO 5725-2 für die Messungen aus dem Jahr 2021	42
6.7 Formblätter gemäß DIN ISO 5725-2 für die konsolidierten Messungen	43
6.8 Formblätter gemäß DIN ISO 5725-2 für die Messungen aus dem Jahr 2023	44
6.9 Ergänzende Pegeldifferenzkarte zum Flottenversuch	45
6.10 Ergänzende Karte der Fahrten der BAST	45

Abkürzungen, Formelzeichen, Begriffe

Abkürzungen

Zeichen	Bedeutung
A	Bundesautobahn
AK	Autobahnkreuz
AQuStra II	FuE-Vorhaben „Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus-Messungen“
AQuStra III	FuE-Vorhaben „Ermittlung der akustischen Eigenschaft von Straßen zur Qualitätssicherung der Lärmkartierung“
ASB	Anweisung StraßeninformationsBank
AT	akustisches Torus-Messverfahren
ATM	akustische Torus-Messung
ATMG	akustisches Torus-Messgerät
ATMS	akustisches Torus-Messsystem (ATMG mit Datenlogger, GPS und Beschleunigungssensor)
B	Bundesstraße
BALM	Bundesamt für Logistik und Mobilität
BASt	Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen, Bergisch Gladbach
BAYSIS	Bayerisches Straßeninformationssystem
BayStrWG	Bayerisches Straßen- und Wegegesetz
BEB	Berechnungsmethode zur Ermittlung der Belastetenzahlen durch Umgebungslärm
BUB	Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe)
BUB-D	Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe)
CPX	Nahfeldmessverfahren (en: close-proximity method)
EG-ULR	EG-Umgebungslärmrichtlinie
E TP ATM	Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen
FStrG	Bundesfernstraßengesetz
FuE-Vorhaben	Forschungs- und Entwicklungs-Vorhaben
FzG	Fahrzeuggruppe nach den RLS-19 (Pkw, Lkw1 oder Lkw2)
GPS	globales Positionsbestimmungssystem (en: Global Positioning System)
Kfz	Kraftfahrzeug
LfU	Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg
Lkw1	Fahrzeuggruppe der Lastkraftwagen ohne Anhänger mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t und Busse nach den RLS-19
Lkw2	Fahrzeuggruppe der Lastkraftwagen mit Anhänger bzw. Sattelkraftfahrzeuge nach den RLS-19
MPD	mittlere Profiltiefe
OSM	OpenStreetMap
Pkw	Fahrzeuggruppe der Personenkraftwagen nach den RLS-19
RLS-19	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
SDT	Straßendeckschichttyp
SPB	Statistisches Vorbeifahrtverfahren (en: statistical pass-by)
St	Staatsstraße

Zeichen	Bedeutung
StMUV	Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz
TP KoSD-19	Technische Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
UTM	Universal Transverse Mercator (globales Koordinatensystem)
VBUS	Vorläufige Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Straßen
WGS 84	World Geodetic System 1984 (geodätisches Referenzsystem)
WLAN	drahtloses lokales Netzwerk (en: wireless local area network)

Straßendeckschichttypen

Zeichen	SDT
AC	Asphaltbeton
DSH-V	Dünnschichtbelag (dünne Asphaltdeckschicht in Heißbauweise auf Versiegelung)
MA-NG	nicht geriffelter Gussasphalt (nationale Referenz)
SMA	Splittmastixasphalt
WB	Waschbeton
Grinding	Oberflächenbearbeitung bei Schichten mit hydraulischem Bindemittel
... 5/8/11/22	Postfix für die Körnung des Mischgutes
... D	Postfix für Deckschichten (im Gegensatz zu z. B. Tragschichten)
... LOA	Postfix für lärmtechnisch optimierte Deckschichten
... S	Postfix für Deckschichten mit besonderer Beanspruchung

Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung der physikalischen Größen
a	dB(A)	Achsenabschnitt bei der Regressionsanalyse der SPB-Messung: $L_{veh} = a + b \cdot \log(v)$
a_t	dB(A)	Achsenabschnitt für die individuelle Umrechnung des $L_{AT,100,t}$ auf den $L_{AT,Pkw}$ bei 100 km/h
a_v	dB(A)	Achsenabschnitt für die Umrechnung von $\lambda_{DS;h,t}$ auf $L_{AT,100,t}$
$\alpha_{f,m}$	dB	Spektralkorrekturkoeffizient für die Straßenoberfläche nach BUB
b	dB(A)	Steigungsparameter bei der Regressionsanalyse der SPB-Messung: $L_{veh} = a + b \cdot \log(v)$
b_t		Steigung für die individuelle Umrechnung des $L_{AT,100,t}$ auf den $L_{AT,Pkw}$ bei 100 km/h
b_v	dB(A)/m	Steigung für die Umrechnung von $\lambda_{DS;h,t}$ auf $L_{AT,100,t}$
β_m		Korrekturkoeffizient für die Straßenoberfläche nach BUB
$C_{d,f}$		Gerätekorrektur nach DIN EN ISO 11819-2
$D_{SD,SDT,FzG}(v)$	dB	Korrekturwerte für unterschiedliche SDT der Fahrzeuggruppen gemäß den RLS-19
$D_{SD,SDT,Pkw}(v)$	dB	Korrekturwerte für unterschiedliche SDT und Pkw gemäß den RLS-19
DTV	Kfz/24 h	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
f	Hz	Frequenz
h		homogener Abschnitt (Messorte werden auch als homogener Abschnitt betrachtet)
i		Index für die Straßensegmente

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung der physikalischen Größen
j		Index für die Messwerte innerhalb eines Straßensegments
k		Abdeckungsfaktor ($k = 1, 2$ oder 3)
$\Delta L(p)$	dB	Pegeldifferenz eines Fahrzeugkollektivs: $\Delta L(p) = L_{AT}(p) - L_{RLS}(p)$. Für $p = 0$ geht die Formel in $\Delta L = L_{AT,Pkw} - L_{RLS,Pkw}$ über.
$L_{0,SDT}$	dB	mittlere Pegelminderung des SDT im Neuzustand
$L_{AT,100,t}$	dB(A)	geschwindigkeitskorrigierter Torusgeräusch-Pegel bei 100 km/h
$L_{AT,Pkw}$	dB(A)	mit der ATM und den Übertragungsfunktionen ermittelter äquivalenter Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 100 km/h
L_{CPX}	dB(A)	Nahfeld-Pegel bei der CPX-Messung
L_{DEN}	dB(A)	Tag-Abend-Nacht-Lärmindex
L_{Lkw2}	dB(A)	Fahrzeuggeräuschpegel für Lastkraftwagen mit Anhänger oder Sattelkraftfahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse über 3,5 t bei 80 km/h nach DIN EN ISO 11819-1
L_{Night}	dB(A)	Nacht-Lärmindex
L_{Pkw}	dB(A)	Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 100 km/h nach DIN EN ISO 11819-1
$L_{RLS,Lkw2}$	dB(A)	maximaler Vorbeifahrtpegel eines Lkw2 bei 80 km/h nach den RLS-19: $L_{RLS,Lkw2} = L_{W0,Lkw2} - 25,6$ dB(A)
$L_{RLS,Pkw}$	dB(A)	maximaler Vorbeifahrtpegel eines Pkw bei 100 km/h nach den RLS-19: $L_{RLS,Pkw} = L_{W0,Pkw} - 25,6$ dB(A)
ΔL_{SDT}	dB	akustisches Vorhaltemaß Pegelzunahme des SDT aufgrund der akustischen Alterung
$L_{SDT}(t)$	dB	Geräuschemission des SDT in Abhängigkeit von der Zeit
$L_{W0,Lkw2}(v_{Lkw2})$	dB(A)	Schalleistungspegel eines Lkw2 nach den RLS-19
$L_{W0,Pkw}(v_{Pkw})$	dB(A)	Schalleistungspegel eines Pkw 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
$\lambda_{DS;h,t}$	m	mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht in einem homogenen Abschnitt h für das Prüfrad t
$\lambda_{DS;r,i,t}$	m	mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht beim Lauf r im Straßensegment i für das Prüfrad t
m		Fahrzeugklasse nach BUB
n		Nummer der Reifenmode
N_{Pkw} und N_{Lkw2}		Anzahl von Pkw bzw. Lkw2 bei einer SPB-Messung nach dem Ausreißertest gemäß den TP KoSD-19
n_{RMmax}		maximale Anzahl an detektierten Moden der Eigenschwingung des Reifens
p	%	Anteil an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Lkw1 und Lkw2 über 24 Stunden, $p = p_1 + p_2$
p_1	%	Anteil an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Lkw1
p_2	%	Anteil an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Lkw2
r		Index des ATM-Laufs
Σ_{Lkw2}	Mio.	über die Liegedauer kumulierte Verkehrsbelastung durch Lkw2
$s_{r,h}$	m	Wiederholstandardabweichung nach DIN ISO 5725-2 in einem homogenen Abschnitt h
$s_{R,h}$	m	Vergleichstandardabweichung nach DIN ISO 5725-2 in einem homogenen Abschnitt h
t		Index für das Prüfrad
t	a (Jahre)	Liegedauer der Deckschicht
$t_{0,5,SDT}$	a (Jahre)	vergangene Zeit, in der ΔL_{SDT} zur Hälfte aufgebraucht ist

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung der physikalischen Größen
T_{SPB}	°C	mittlere Lufttemperatur bei der SPB-Messung
τ_{SDT}	a (Jahre)	Zeitkonstante der akustischen Alterung des SDT
$u_{c,\text{ATMG};i}(k)$	m	kombinierte Unsicherheit des ATMG pro Straßensegment i in Abhängigkeit vom Abdeckungsfaktor k
$u_{c,\text{DS};h,t}(k)$	m	kombinierte Unsicherheit der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht im homogenen Unterabschnitt h für das Prüfrad t in Abhängigkeit vom Abdeckungsfaktor k
\bar{v}_{Pkw} und \bar{v}_{Lkw2}	km/h	mittlere Geschwindigkeit der vorbeifahrenden Pkw bzw. Lkw2 bei der SPB-Messung
v_{ref}	km/h	Referenzgeschwindigkeit

Begriffe

Begriff	Beschreibung
Hauptverkehrsstraßen	Straßen mit einem Verkehrsaufkommen von über 3 Millionen Kraftfahrzeugen im Jahr, gemäß EG-ULR
Bundesfernstraßen	Bundesautobahnen und Bundesstraßen gemäß FStrG (ohne Bezug zur EG-ULR)
untergeordnete Straßen	Staats-, Kreis- und Gemeindestraßen gemäß BayStrWG (ohne Bezug zur EG-ULR)

Kurzzusammenfassung

Am 27.03.2023 hat das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) die Lärmkarten der vierten Runde veröffentlicht. Hierbei wurden entsprechend des Straßendeckschichttyps akustische Standardparameter verwendet.

In der Realität unterliegen die Straßendeckschichten allerdings einem Verschleiß aufgrund der Verkehrsbelastung und Liegedauer. Der tatsächliche akustische Zustand kann daher von den Annahmen aufgrund der formal vorgesehenen Standardparameter erheblich abweichen. Mit Geräuschmessungen im Reifeninneren, den sogenannten akustischen Torus-Messungen (ATM), kann die akustische Qualität von Straßenoberflächen in einem Straßennetz erfasst werden.

In diesem Projekt wurde untersucht, wie sich mit Hilfe von ATM gewonnene, realistischere Emissionsparameter auf das Ergebnis der Lärmkartierung auswirken würden und ob es folglich zielführend und praktikabel wäre, ATM für künftige Lärmkartierungen zu nutzen.

Für dieses Ziel wurden vorhandene und neu ermittelte ATM-Ergebnisse aufbereitet. Die damit erhaltenen Geräuschemissionen der Straßendeckschichten flossen probeweise in die Lärmkartierung nach der EG-Umgebungslärmrichtlinie (EG-ULR) ein. Auf Grundlage der ATM-basierten Emissionsansätze wird sichergestellt, dass in der Lärmkartierung auch die Anzahl der von Lärm betroffenen Menschen bzw. sensiblen Einrichtungen möglichst realistisch ermittelt wird.

Als Modellstadt für die Vergleichsberechnungen und die alternative Betroffenheitsanalyse wurde die Kreisstadt Weilheim in Oberbayern ausgewählt. In der Gemeinde Weilheim sind ca. 2 700 Menschen einem Tag-Abend-Nacht-Lärmindex von größer als 55 dB(A) ausgesetzt sowie drei Schul- und zwei Krankenhausgebäude von Lärm belastet.

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass bei Anwendung der Qualitätssicherung der Lärmkartierung mit Hilfe von ATM die Gesamtanzahl der Lärmbetroffenen um 10 % zurückgeht. Zwar nimmt in der Pegelklasse 65 bis 69 dB(A) die Zahl der belasteten Personen um 15 % zu, gleichzeitig nimmt jedoch die Menge der hochbelasteten Menschen, die einem $L_{DEN} > 70$ dB ausgesetzt sind, um fast die Hälfte ab. Darüber hinaus verminderte sich die Anzahl der lärmbelasteten Schulgebäude um 2 und die verlärmte Fläche um 36 Hektar (ha).

Der Datenbestand der akustischen Torus-Messungen am LfU reicht mittlerweile 6 Jahre zurück und umfasst über 100 000 km auf bayerischen Bundesfernstraßen. Die Ergebnisse werden in Übersichtskarten dargestellt, die den akustischen Zustand des jeweiligen Straßenabschnitts zeigen. Über eine Häufigkeitsverteilung wurde ein Alterungsmodell für die akustische Qualität verbreiteter Deckschichttypen entwickelt, das die Liegedauer beinhaltet.

Es konnte gezeigt werden, dass die ATM technisch geeignet ist und damit im Rahmen der Lärmkartierung realistischere Ergebnisse erzielt werden. Allerdings erscheint es aufgrund eines erheblich höheren Aufwands fraglich, ob es verhältnismäßig und praktikabel wäre, ATM bei der Lärmkartierung verpflichtend für eine lückenlose Bestimmung der realen Fahrbahnemissionen vorzuschreiben. ATM kann aber zur Verbesserung der Qualitätssicherung der Lärmkartierung genutzt werden, um sukzessive die Datenbanken der Straßenbauverwaltung um akustische Parameter zu erweitern und zu aktualisieren.

1 Einleitung

Die 2022 im Rahmen der EG-Umgebungslärmrichtlinie durchgeführte vierte Runde der Lärmkartierung der Hauptverkehrsstraßen und Ballungsräume ergab, dass in Bayern ca. 2,2 Millionen Menschen einem Tag-Abend-Nacht-Lärmindex L_{DEN} von über 55 dB(A) und ca. 1,4 Millionen Menschen einem Nacht-Lärmindex L_{Night} von mehr als 50 dB(A) ausgesetzt sind. Im Anschluss an jede Kartierung erfolgt die Lärmaktionsplanung, bei der mögliche Maßnahmen zur Minderung der Lärmbelastung geprüft werden. Die Hauptlärmquelle im fließenden Verkehr ist das Rollgeräusch, das bei heutigen Pkw ab einer Geschwindigkeit von circa 20 km/h dominiert. Auf dieses Geräusch hat die akustische Qualität der Deckschichten (Straßenoberflächen) einen wesentlichen Einfluss.

Der Typ der Deckschicht wird bei der Kartierung des Straßenverkehrslärms anhand von Standardparametern berücksichtigt. Für die zurückliegenden drei Runden fanden die Vorgaben nach Tabelle 3 der „vorläufigen Berechnungsmethode für den Umgebungslärm an Straßen“ (VBUS) [1] Anwendung. Die aktuelle vierte Runde wurde auf der Grundlage von Tabelle A-3 der „Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe)“ (BUB) [2] ermittelt. Eine Empfehlung, wie die einzelnen klassifizierten Deckschichten bei der Kartierung zu berücksichtigen sind, bietet das Arbeitspapier der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) „Zuordnung der Bauweisen von Fahrbahndeckschichten der ASB zu denen der BUB-D“ [3]. In der Anweisung StraßeninformationsBank (ASB) wird allgemein beschrieben, wie der Straßenaufbau systematisch dokumentiert werden kann [4]. Für Bayern wurde dies im Bayerischen Straßeninformationssystem (BAYSIS) umgesetzt [5].

Tatsächlich hängt der Einfluss der Fahrbahn auf die Höhe des Rollgeräusches von einer Vielzahl an Parametern der Deckschichten ab [6]. Im Neuzustand entscheiden die verwendeten Baustoffe und die Güte des Einbaus. Während der Liegedauer bestimmen zeitlich verändernde Prozesse das Geräuschniveau; einerseits verursacht durch witterungsbedingte Alterungsprozesse und andererseits durch den Verschleiß infolge der kumulierten Verkehrsbelastung. Diese beiden Effekte bestimmen den akustischen Zustand der Deckschichten. Die Streubreite kann bis zu 10 dB betragen [7].

Dies ist auch relevant für die Anwendung der BUB, denn gemäß Kapitel 1.2.1 sind alle „... Eingangswerte, die den Emissionspegel einer Quelle beeinflussen, mit einer Genauigkeit zu bestimmen, die einer Unsicherheit von ± 2 dB(A) im Emissionspegel der Quelle entspricht“. Genauere Eingangsdaten zur tatsächlichen Geräuschemission der Deckschicht, die auch die Verschleißzustände der Straßenoberflächen einbeziehen, fehlen jedoch bislang. Denn bis vor kurzem stand kein geeignetes und praktikables Messverfahren zur Verfügung. Weder mit dem statistischen Vorbeifahrtverfahren (SPB, Fahrzeuggeräuschpegel in 7,5 m Abstand und 1,2 m Höhe zur Fahrstreifenmitte) [8] noch dem ebenfalls schon länger etablierten Nahfeldmessverfahren (CPX, Geräuschpegel im akustischen Nahfeld eines Reifens) [9] kann die akustische Qualität der kartierten Hauptverkehrsstraßen in Bayern (rund 7 600 km) mit vertretbarem Aufwand ermittelt werden.

Mit akustischen Torus-Messgeräten/-systemen (ATMG/ATMS) könnte dies gelingen. Denn diese Systeme arbeiten weitgehend autonom, äußerst zuverlässig und höchst effektiv, wie der Flottenversuch im Projekt „Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus-Messungen“ (AQuStra II) für das Umweltbundesamt (UBA) zeigte. Hinzu kommt, dass mit dem Entwurf der Technischen Prüfvorschrift für akustische Torus-Messungen (E TP ATM) eine praktikable Mess- und Auswertemethode zur Verfügung steht [7].

2 Akustische Zustandserfassung

In AQuStra II [7] konnte gezeigt werden, dass mit akustischen Torus-Messungen (ATM) die akustische Qualität eines Straßennetzes erfasst werden kann. Der damals für das UBA konzipierte Flottenversuch wurde in AQuStra III mit denselben Dienstkraftfahrzeugen fortgesetzt. In Tab. 1 sind die Reifen aufgelistet, mit denen die Flottenfahrzeuge ausgestattet sind. Im Frühjahr 2024 wurde am Prüfrad $t = 2$ der Reifen gewechselt und durch einen identischen ersetzt; das Profil war zu weit abgefahren.

Tab. 1: Bereifung der Prüfräder t an den Flottenversuchsfahrzeugen. Die Gummi­härte für Oktober 2021, April 2022, Oktober 2022, November 2023 und November 2024 wird nach DIN ISO/TS 11819-3 [10] bestimmt.

t	Reifen	Größe	Produktions- woche / Jahr	Gummi­härte in Shore A 2021 / '22 / '22 / '23 / '24
1	Goodyear Cargo Vector	225/60 R16C 101/99H	08 / 2017	76 / 75 / 78 / 79 / 80
2	Michelin Primacy 3	205/55 R16 91V	42 / 2017	70 / 73 / 71 / 76 / —
			53 / 2023	— / — / — / — / 70
3	Continental EcoContact 6	215/55 R16 93V	49 / 2019	62 / 64 / 62 / 65 / 65
4	Continental ContiPremiumContact 2	205/60 R16 96H	24 / 2016	69 / 71 / 69 / 72 / 73
5	Michelin Energy Saver	205/55 R16 91H	02 / 2021	63 / 65 / 64 / 66 / 66

Darüber hinaus steht am Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) für simultane akustische Nahfeld- und Torus-Messungen ein CPX-Anhänger mit dem Prüfrad $t = 5$ zur Verfügung. Dieser Anhänger muss die Kriterien der DIN EN ISO 11819-2 [9] für die Gerätekorrektur $C_{d,f}$ erfüllen. Hierfür sind die Radkästen mit schallabsorbierendem Material auszukleiden. Die aktuellen Gerätekorrekturen $C_{d,f}$ für die Terzen von 315 Hz bis 5 kHz sind in Tab. 2 eingetragen. Der Korrekturwert ist in sämtlichen Terzen kleiner als 3 dB. Damit erfüllt der Anhänger die Auflagen der Norm.

Tab. 2: Aktuelle Gerätekorrektur $C_{d,f}$ des CPX-Anhängers nach den Kriterien der DIN EN ISO 11819-2 [9].

f in Hz	Jahr	315	400	500	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150	4 000	5 000
$C_{d,f}$ in dB	2023	1,0	-0,9	0,7	-0,4	-0,3	-0,7	0,5	-0,2	-0,5	-1,1	-0,1	0,6	-1,9
	2024	0,8	-1,5	0,8	-0,5	-0,1	-0,8	0,4	-0,5	-0,7	-0,3	-0,5	-0,1	-0,7

2.1 Umfang der Messungen im Verlauf der Jahre

Von Anfang an stand bei der Durchführung des Flottenversuchs mit den Dienstfahrzeugen die statistische Auswertung im Vordergrund, d. h. je öfter mit verschiedenen Prüfrädern zu unterschiedlichen Zeiten über gleiche Segmente gefahren wird, desto exakter kann von diesen die akustische Qualität bestimmt werden. Die zentrale Auswertegröße im akustischen Torus-Messverfahren (AT) ist die Wellenlänge der prägenden Textur einer Deckschicht $\lambda_{DS,r,l}$. In der Zwischenzeit reicht der Datenbestand 6 Jahre zurück und umfasst über 100 000 km auf bayerischen Bundesfernstraßen. Anhand dieser Daten kann die Qualität einer ATM überprüft werden. In den Anhängen 6.1 bis 6.3 wird am Beispiel des etwa 6 km langen Abschnittes 640 von der Bundesstraße B 12 zwischen Jengen und Germaringen der Ablauf dieser Qualitätssicherung ausführlich beschrieben und veranschaulicht. Mit diesem qualitätsgesicherten Datensatz wurden die Übertragungsfunktionen neu hergeleitet (einschließlich konsolidierter Regressionsparameter) und ihre Gültigkeit auf niedrigere Geschwindigkeiten ausgedehnt.

Mit diesen Übertragungsfunktionen kann ein äquivalenter Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 100 km/h $L_{AT,Pkw}$ berechnet werden und dieser dann zum maximalen Vorbeifahrtpegel eines Pkw $L_{RLS,Pkw}$, wie er nach den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS-19) [11] auf der Referenz-

oberfläche „nicht geriffelter Gussasphalt“ (MA-NG) ermittelt wird, in Bezug gesetzt werden. In den Karten der Abb. 1 bis 4 ist diese Pegeldifferenz ΔL der untersuchten 20 m langen Straßensegmente kumulativ bis zu den Jahren von 2021 bis 2024 dargestellt. Die Karte für die Testphase des Flottenversuchs im Jahr 2019 ist in Anhang 6.9 zu finden. Anhand der Farbcodierung wird der jeweilige akustische Zustand eines Segmentes deutlich.

Mit den frei fahrenden Fahrzeugen an der Dienststelle in Augsburg können bei weitem nicht alle Bundesfernstraßen erfasst werden. Im Hinblick auf eine künftige eventuelle akustische Straßenzustandserfassung und um die bisher nicht angefahrenen Straßen sowie die vom Kartierungsumfang betroffenen Staatsstraßen zu untersuchen, müsste der Flottenversuch entsprechend ausgeweitet und auf eine breitere Basis gestellt werden. Beispielsweise könnte geprüft werden, ob Dienstfahrzeuge der

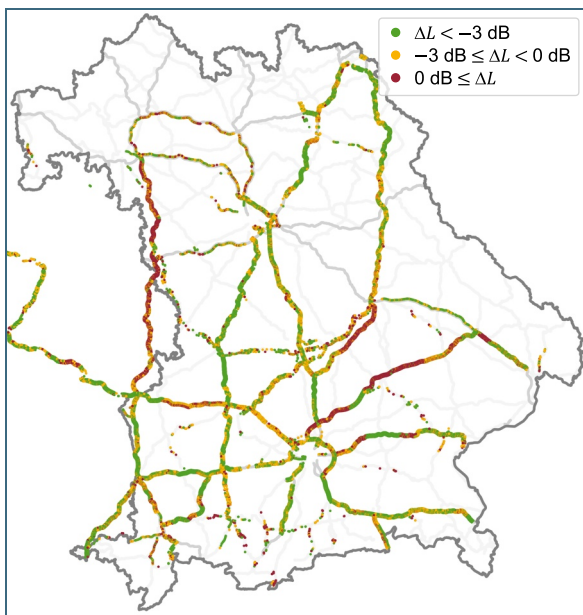


Abb. 1: Pegeldifferenz ΔL für die Messungen bis zum Jahr 2021.

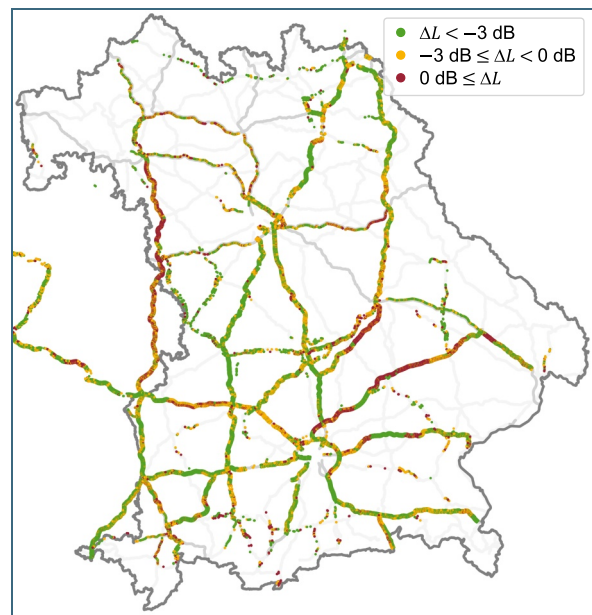


Abb. 2: Pegeldifferenz ΔL für die Messungen bis zum Jahr 2022.

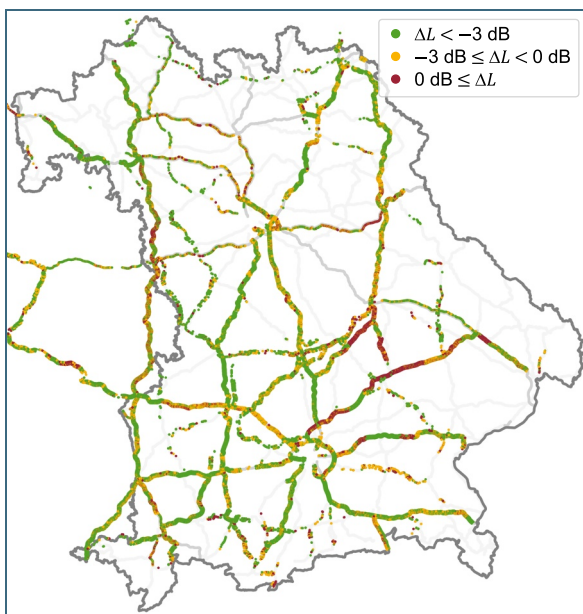


Abb. 3: Pegeldifferenz ΔL für die Messungen bis zum Jahr 2023.

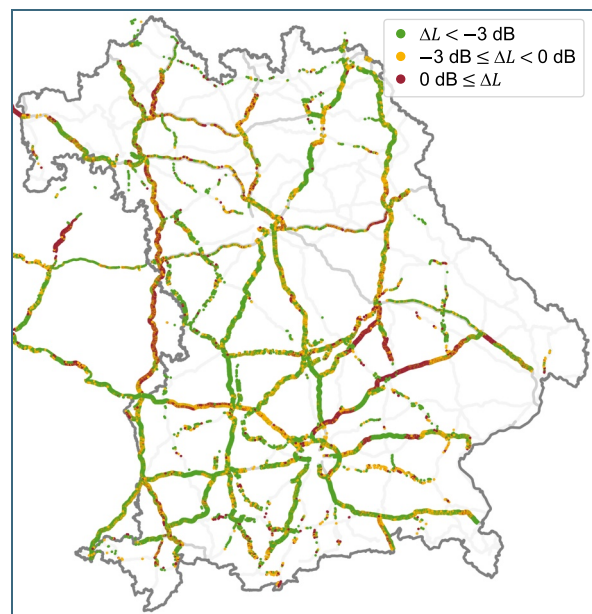


Abb. 4: Pegeldifferenz ΔL für die Messungen bis zum Jahr 2024.

Staatlichen Bauämter oder Wasserwirtschaftsämter sowie von Transportunternehmen, dem ADAC, dem Bundesamt für Logistik und Mobilität (BALM) oder von anderen Stellen eingebunden werden können.

2.2 Akustische Qualität der häufigsten Deckschichttypen

Aus der Vielzahl der Daten der Jahre 2021 bis 2024 (insgesamt ca. 1 240 000 Straßensegmente, für die auch der verbaute Deckschichttyp und das Alter bekannt sind) wurden die in Abb. 5 und 6 dargestellten Häufigkeitsverteilungen der vier am meisten gemessenen Deckschichttypen angefertigt. Hierbei handelt es sich um eine dünne Asphaltdeckschicht in Heißbauweise auf Versiegelung (DSH-V), einen Splittmastixasphalt (SMA) und einen Waschbeton (WB). Die Bezeichnungen können noch um eine Zahl für die Korngröße und einem S für Deckschichten mit besonderer Beanspruchung erweitert sein. In diese Auswertung wurden nur Deckschichten mit einbezogen, die nach BAYSIS zum Messzeitpunkt ein Alter von mindestens 6 und höchstens 15 Jahren aufweisen. Die untere Grenze stammt aus der Vorgabe der „Technischen Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten“ (TP KoSD-19), dass der Messabschnitt zum Zeitpunkt der Messung mindestens seit 6 Jahren unter Verkehr sein muss. Die obere Grenze wurde gewählt, da ältere Einträge in BAYSIS eher fehlerbehaftet sind.

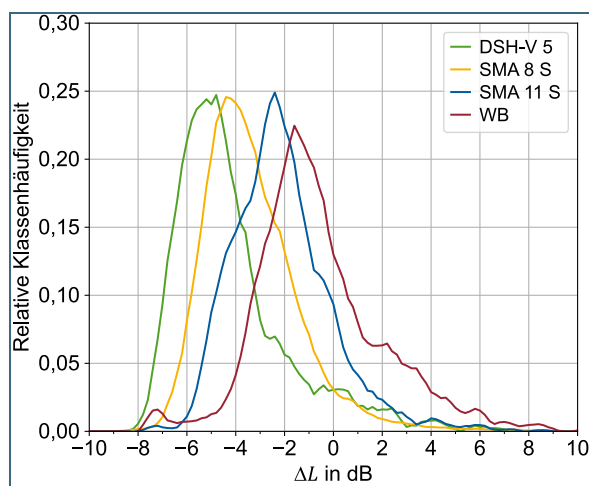


Abb. 5: Relative Klassenhäufigkeit für die Pegeldifferenzen ΔL der Messungen des Jahres 2021.

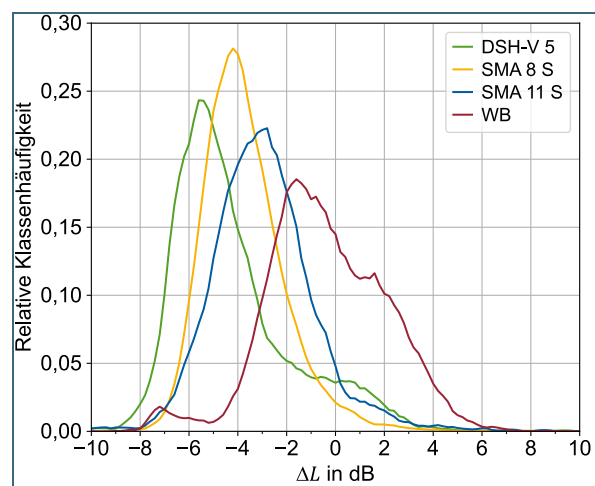


Abb. 6: Relative Klassenhäufigkeit für die Pegeldifferenzen ΔL der Messungen für die Jahre 2021 bis 2024.

Diese Fehleinträge sind beispielsweise an der Verteilung des WB am vorgelagerten Nebenmaximum zwischen -8 dB und -4 dB deutlich erkennbar. Dieser Deckschichttyp wird ausschließlich auf Bundesautobahnen eingebaut. Wahrscheinlich fanden dort Sanierungen statt. Diese Deckschichtänderungen wurden in BAYSIS jedoch nicht aktualisiert. Der Datenbestand der Bundesautobahnen wird generell in BAYSIS nicht mehr von der Landesbaudirektion gepflegt, denn zum 01.01.2021 wurde „Die Autobahn GmbH des Bundes“ gegründet. Seit 01.01.2024 sollten diese Informationen von der Autobahn GmbH bereitgestellt werden. Dort befindet man sich allerdings erst am Anfang des Aufbaus einer Straßendatenbank. Derzeit kann nicht abgeschätzt werden, in welcher Qualität, Aktualität und Vollständigkeit die Straßendaten vor allem auch zur Fahrbahnoberfläche künftig zur Verfügung stehen werden. Dieser Umstand macht deutlich, dass durch den Einsatz der ATMS eine verbesserte Qualitätssicherung der Eingangsdaten für die Lärmkartierung gewährleistet werden kann.

Aus den Häufigkeitsverteilungen können unter Berücksichtigung der Streuungen die Korrekturwerte für unterschiedliche Straßendeckschichttypen (SDT) gemäß den RLS-19 statistisch abgesichert validiert werden.

2.3 Alterungsverhalten

Nach erfolgreichem Einbau einer Deckschicht nimmt deren lärmindernde Wirkung mit der Zeit ab. Die Textur verändert sich, die mittlere Profiltiefe (MPD) nimmt zu und die Gestalt verschiebt sich von der konkaven Form aus „Plateaus mit Schluchten“ hin zur konvexen aus „Gebirgen mit Tälern“. Grund hierfür ist, dass die Viskosität des Bindemittels einer witterungsbedingten Langzeitalterung unterliegt und zunimmt. Damit einhergehend sowie abhängig von der Verkehrsbelastung bricht der Feinkornanteil zwischen dem Stützkorn aus der Oberfläche aus. Die Oberfläche magert aus [12].

Ein Lkw beansprucht eine Straße etwa 100 000-mal so stark wie ein Pkw (Vierte-Potenz-Gesetz). Diesbezüglich sollte bei einer mehrstreifigen Fahrbahn auf dem rechten Fahrstreifen (Hauptfahrstreifen), auf dem fast ausschließlich die Lkws fahren, diese Texturveränderung deutlicher ausgeprägt sein als auf dem mittleren und linken Fahrstreifen (1. bzw. 2. Überholstreifen), d. h. der rechte Fahrstreifen verschleißt schneller und wird unter der kumulativen Last lauter.

Die Position eines Flottenfahrzeugs kann jedoch nicht fahrstreifengenau geortet werden, da der eingesetzte GPS-Empfänger nicht hochauflösend genug ist. Um den Einfluss der Verkehrsbelastung dennoch zu analysieren, wurden die Daten aus dem Vorgänger-FuE-Vorhaben „Akustische Charakterisierung von Deckschichten mittels CPX- und ATM-Verfahren“, das 2018 zugunsten von AQuStra II ausgesetzt wurde, nochmals aufbereitet, siehe Abb. 7 und 8. Hier wurden 2017 bzw. 2018 ausschließlich die rechten Fahrstreifen ausgewählter Abschnitte der Bundesautobahnen A 6, 7, 8, 9, 93, 95, 96, 99 sowie der Bundesstraßen B 2 und 17 abgefahren. Nach einer abschließenden Qualitätskontrolle standen damals 1 192 Straßenkilometer für akustische Auswertungen zur Verfügung [13].

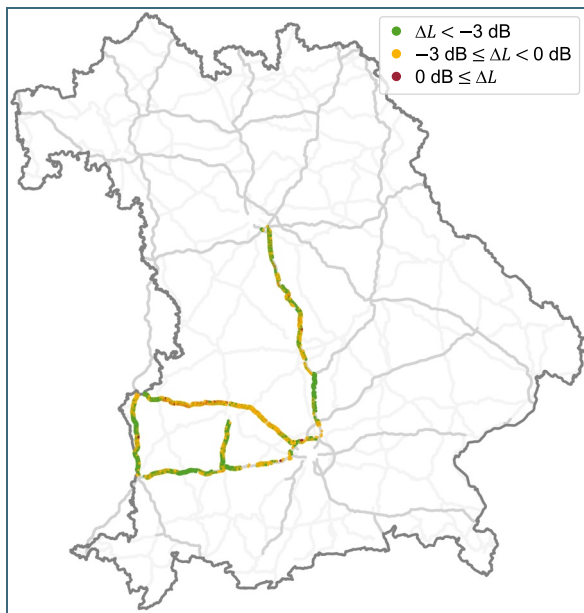


Abb. 7: Mit dem CPX-Anhänger durchgeführte ATM in den linken Rollspuren des **rechten Fahrstreifens** 2017 [13].

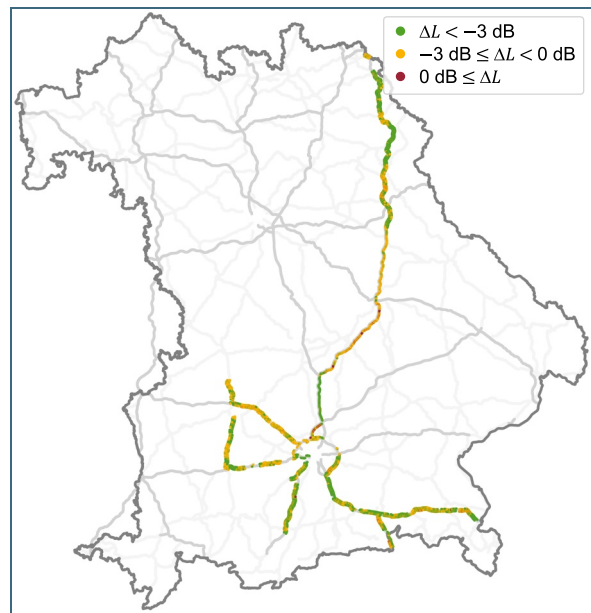


Abb. 8: Mit dem CPX-Anhänger durchgeführte ATM in den linken Rollspuren des **rechten Fahrstreifens** 2018 [13].

In den Abb. 9 bis 12 sind der CPX-Pegel bei einer Referenzgeschwindigkeit v_{ref} von 85 km/h und der äquivalente Fahrzeuggeräuschpegel $L_{\text{AT,Pkw}}$ der ATM in den linken Rollspuren der rechten Fahrstreifen exemplarisch für die DSH-V 5 in Abhängigkeit von der Liegedauer und der kumulierten Verkehrsbelastung über die Liegedauer Σ_{Lkw2} dieser kontrollierten Anhänger-Fahrten dargestellt. Σ_{Lkw2} ist die Summe aller Lkw-Fahrten über eine Deckschicht seit Einbau dieser bis zum Tag der Messung gemäß der Straßenverkehrszählung. Weil der Tag der Verkehrsfreigabe nicht bekannt ist, jedoch die meisten

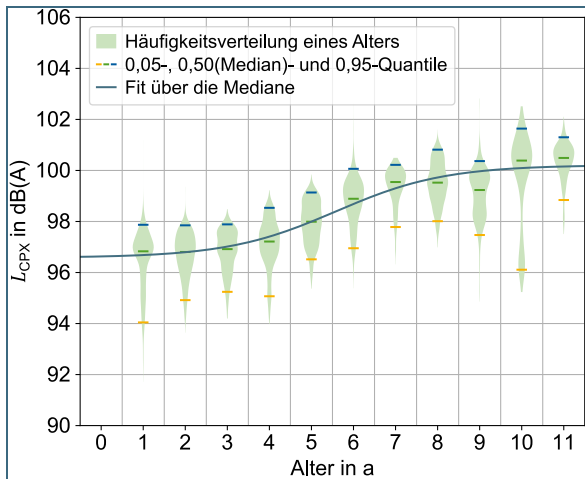


Abb. 9: CPX-Pegel in den linken Rollspuren des **rechten Fahrstreifens** in Abhängigkeit von der Liegedauer in Jahren (a) der DSH-V 5 [13].

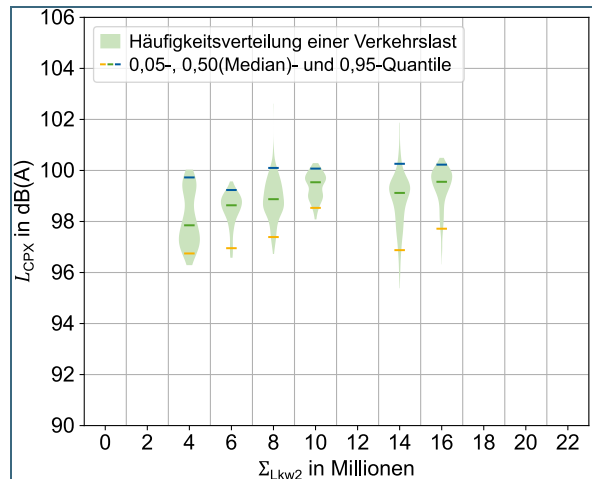


Abb. 10: CPX-Pegel in den linken Rollspuren des **rechten Fahrstreifens** der DSH-V 5 in Abhängigkeit von der kumulativen Verkehrsbelastung nach einer Liegedauer von 6 bis 7 Jahren.

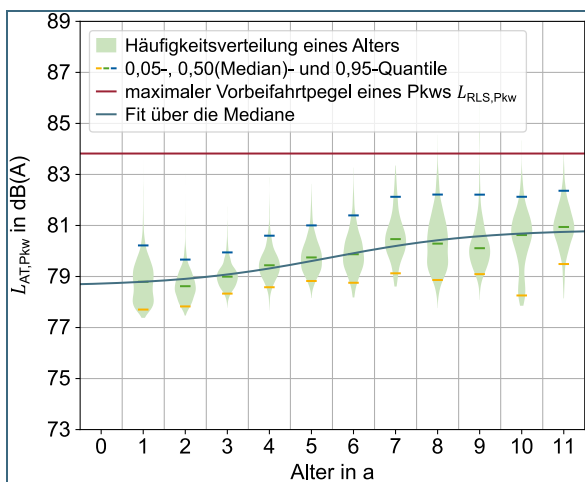


Abb. 11: $L_{AT,PKW}$ in den linken Rollspuren des **rechten Fahrstreifens** in Abhängigkeit von der Liegedauer in Jahren (a) der DSH-V 5.

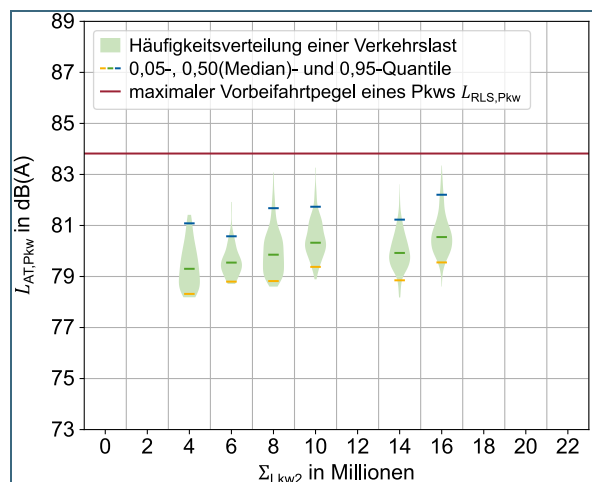


Abb. 12: $L_{AT,PKW}$ in den linken Rollspuren des **rechten Fahrstreifens** der DSH-V 5 in Abhängigkeit von der kumulativen Verkehrsbelastung nach einer Liegedauer von 6 bis 7 Jahren.

Deckschicht-Sanierungen und Neubaumaßnahmen in den Sommermonaten stattfinden, fließt das in BAYSIS hinterlegte Baujahr bei der Berechnung der kumulierten Verkehrsbelastung zur Hälfte ein.

Die Geräuschpegel aller Segmente eines Alters wurden in einer Häufigkeitsverteilung zusammengefasst (Violinen-Plot). Die Querstriche der Violinen kennzeichnen für jedes Alter die 0,05-, 0,50(Median)- und 0,95-Quantile. Die horizontale rote Linie markiert den maximalen Vorbeifahrtpegel eines Pkw $L_{RLS,PKW} = 83,8 \text{ dB(A)}$ auf der nationalen Referenzoberfläche nach den RLS-19.

In dieser statistischen Auftragsung ist gut zu erkennen, dass sich sowohl der CPX- als auch ATM-Pegel in den ersten beiden Jahren nach Einbau praktisch nicht verändert, dann in den folgenden 5 Jahren aber um insgesamt ca. 2 bis 3 dB kontinuierlich ansteigt und anschließend auf diesem höheren Niveau verharrt. In der Altersklasse von 10 Jahren wurde auf einem Straßenabschnitt eine Deckschicht mit größter Wahrscheinlichkeit neu eingebaut. Dies ist an der Spreizung der Violine erkennbar. Diese Deckenerneuerung wurde in BAYSIS nicht aufgenommen und verzerrt somit die Statistik.

Bei einer DSH-V 5 mit einer Liegedauer von 6 bis 7 Jahren steigt der Median der $L_{AT,Pkw}$ um knapp 2 dB infolge der kumulativen Verkehrsbelastung.

Dieselbe Auswertung wurde nun für die ATM mit den Flottenversuchsfahrzeugen durchgeführt, siehe Abb. 13 und 14. Da die Position der Kfz nicht exakt bestimmt werden kann, beinhalten diese Grafiken Messungen aller befahrenen Fahrstreifen. Auch hier steigt der ermittelte äquivalente Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 100 km/h $L_{AT,Pkw}$ in Abhängigkeit von der Liegedauer gegenüber dem Neuzustand um nahezu 4 dB an. Der Anstieg setzt im Mittel jedoch ca. ein bis zwei Jahre später ein und dauert etwa ein Jahr länger, bis dieser abgeschlossen ist. Darüber hinaus sind die Violinen der einzelnen Jahre langgezogener als bei den kontrollierten Messfahrten mit dem CPX-Anhänger. Dies deutet darauf hin, dass die einzelnen Fahrstreifen unterschiedlich akustisch altern oder verschleifen. Die Pegelzunahme durch die kumulative Verkehrsbelastung ist nicht so ausgeprägt wie bei den kontrollierten Messungen auf dem rechten Fahrstreifen.

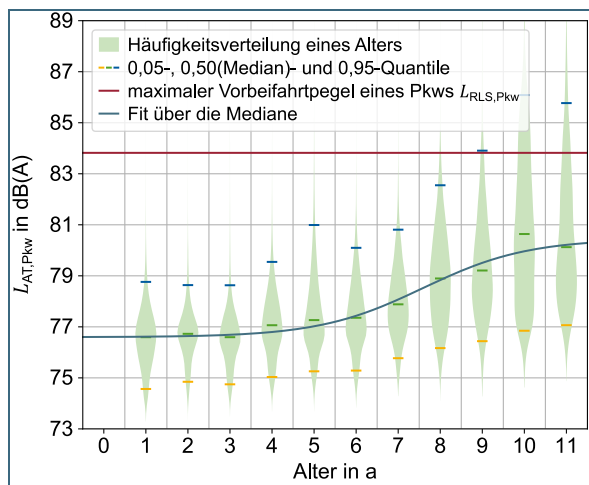


Abb. 13: $L_{AT,Pkw}$ in den linken Rollspuren der DSH-V 5 in Abhängigkeit vom Alter in Jahren (a). Alle Einzelpegel eines Alters wurden in einer Häufigkeitsverteilung zusammengefasst.

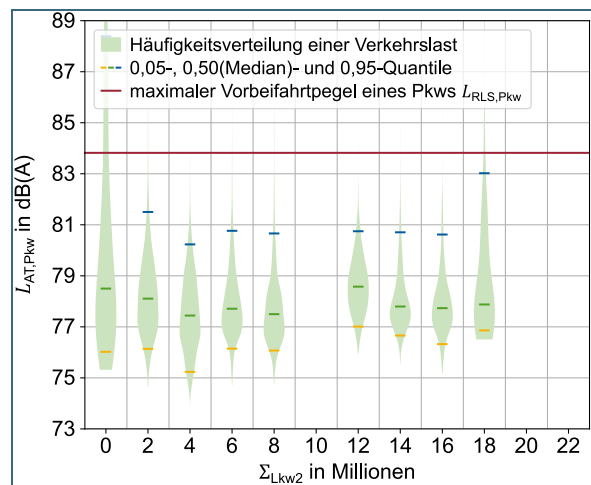


Abb. 14: $L_{AT,Pkw}$ in den linken Rollspuren der DSH-V 5 in Abhängigkeit von der kumulativen Verkehrsbelastung nach einer Liegedauer von 6 bis 7 Jahren.

Die akustische Alterung einer Deckschicht infolge der Liegedauer kann quantitativ mit Hilfe der logistischen Funktion

$$L_{SDT}(t) = L_{0,SDT} + \frac{\Delta L_{SDT}}{1 + e^{-(t-t_{0,5,SDT})/\tau_{SDT}}} \quad (1)$$

beschrieben werden. Hierbei ist $L_{SDT}(t)$ die Geräuschemission des Straßendeckschichttyps in Abhängigkeit der Zeit, $L_{0,SDT}$ die mittlere pegelmindernde Wirkung der Deckschicht nach Einbau, ΔL_{SDT} die Pegelzunahme der Deckschicht bis zur Sättigung auf dem höheren Pegelniveau an deren Ende und $t_{0,5,SDT}$ die vergangene Zeit, nach der die Hälfte der Minderungswirkung der Deckschicht aufgebraucht ist sowie $\tau_{SDT} = \sigma \cdot \sqrt{3}/\pi$ die Zeitkonstante der akustischen Alterung, die sich aus der Standardabweichung der Normalverteilung der Alterungsrate σ berechnet. Angewendet auf die Median-Pegel der Alters-Häufigkeitsverteilung der DSH-V 5 und des SMA 8 S aus den kontrollierten Fahrten mit dem CPX-Anhänger und dem Flottenversuch ergeben sich für die Koeffizienten der logistischen Funktion die Werte, die in Tab. 3 zusammengefasst sind.

Tab. 3: Werte der Koeffizienten $L_{0,SDT}$, ΔL_{SDT} , $t_{0,5,SDT}$ sowie τ_{SDT} der logistischen Funktion nach der Anpassung der Median-Werte in den linken Rollspuren der DSH-V 5 und SMA 8 S aus den kontrollierten CPX-Messungen und ATM sowie aus dem Flottenversuch anhand der kleinsten Fehlerquadrate.

Messung	Methode	SDT	Fahrstreifen	$L_{0,SDT}$ in dB(A)	ΔL_{SDT} in dB(A)	$t_{0,5,SDT}$ in a	τ_{SDT} in a
kontrolliert mit Anhänger	CPX	DSH-V 5	rechts	96,6	3,6	5,6	1,3
kontrolliert mit Anhänger	ATM	DSH-V 5	rechts	78,6	2,2	5,4	1,8
Flottenversuch	ATM	DSH-V 5	alle	76,6	3,9	7,6	1,2
kontrolliert mit Anhänger	CPX	SMA 8 S	rechts	93,4	10,7	0,0	13,5
kontrolliert mit Anhänger	ATM	SMA 8 S	rechts	66,6	29,5	14,7	61,1
Flottenversuch	ATM	SMA 8 S	alle	79,0	1,8	10,2	3,0

Für die DSH-V 5 sind die Werte der Koeffizienten aus den verschiedenen Messungen sehr ähnlich. Hiernach kann ein ausgeprägtes Alterungsverhalten der Deckschicht ausgemacht werden. Die Minderwirkung über die Liegedauer beträgt gut 3 dB. Nach ca. 6 Jahren ab Einbau ist diese Wirkung bis zur Hälfte aufgebraucht.

Hiervon unterscheidet sich das Emissionsverhalten eines SMA 8 S. Die Grundemission $L_{0,SDT}$, d. h. die mittlere pegelmindernde Wirkung der Deckschicht nach Einbau ist um ca. 2 dB höher als die für eine DSH-V 5. Selbst wenn sich für den SMA 8 S die Werte der Koeffizienten der logistischen Funktion der kontrollierten CPX-Messung und ATM sehr unterscheiden, so ist doch das akustische Alterungsverhalten sehr ähnlich. Bei dieser Deckschicht zeigen sich nach Einbau und gegen Ende der Nutzungszeit keine Plateaus. Die Emission des Hauptfahrstreifens nimmt kontinuierlich um etwa 0,12 dB pro Jahr und damit in Summe bis zu einer Liegedauer von 15 Jahren um ca. 1,8 dB zu. Aus den Daten des Flottenversuchs ergibt sich in Summe fast keine akustische Veränderung der Fahrstreifen. Unter der Annahme, dass die Flottenfahrzeuge häufiger auf dem mittleren oder linken Fahrstreifen fahren als auf dem Hauptfahrstreifen, deutet dies darauf hin, dass diese Fahrstreifen wenig altern, siehe Abb. 15 und 16.

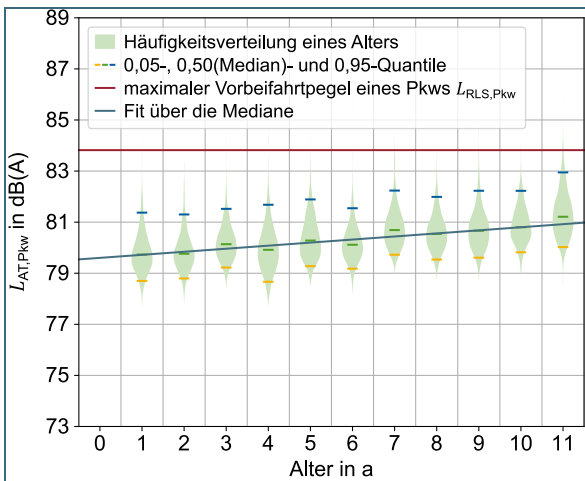


Abb. 15: $L_{AT,Pkw}$ in den linken Rollspuren des rechten Fahrstreifens in Abhängigkeit von der Liegedauer in Jahren (a) der SMA 8 S.

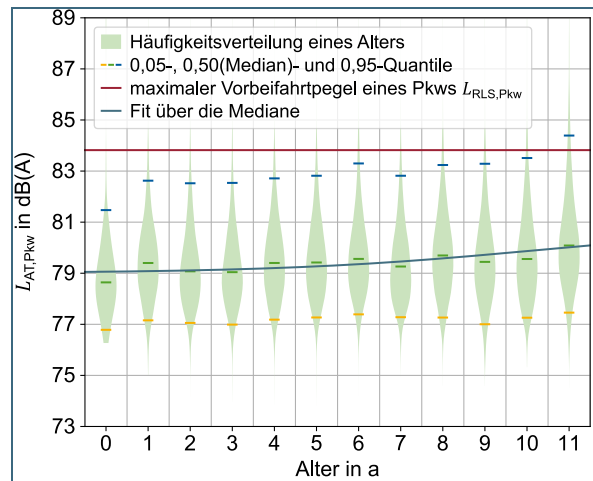


Abb. 16: $L_{AT,Pkw}$ in den linken Rollspuren der SMA 8 S in Abhängigkeit vom Alter in Jahren (a). Alle Einzelpegel eines Alters wurden in einer Häufigkeitsverteilung zusammengefasst.

Gleichwohl nähert sich die Geräuschemission auf einer DSH-V 5 zum Ende ihrer Liegedauer derjenigen auf einem SMA 8 S an. Für die anderen Deckschichten (SMA 11 S und WB) konnten keine Koeffizienten ermittelt werden. Deren Verschleiß ist nicht so ausgeprägt wie der für eine DSH-V 5 und einen SMA 8 S.

2.4 Berücksichtigung von Lkw bei der Betroffenheitsanalyse

Der Flottenversuch am LfU basiert ausschließlich auf ATM mit Pkw-Reifen, die empfindlich auf die texturinduzierte Schwingungsanregung durch die Deckschichten reagieren. Was eine ATM mit einem Lkw-Reifen ergibt, wurde bisher nicht untersucht. Am LfU steht kein Lkw für die Ausrüstung mit einem ATMS zur Verfügung.

Gleichwohl muss die Geräuschemission dieser Fahrzeuggruppe auf dem realen Straßennetz für die anstehende Betroffenheitsanalyse berücksichtigt werden. Auf dem untergeordneten Straßennetz sind die SPB-Messungen zeitintensiver als auf dem Bundesfernstraßennetz. In derselben Zeit fahren deutlich weniger Pkw am Messort vorbei. Darüber hinaus kann die geforderte Mindestanzahl an Lkw1 oder Lkw2 an einem Tag bei Weitem nicht erfasst werden, siehe Anhang 6.5. Die TP KoSD-19 empfiehlt bei der Bestimmung der Minderungswirkung einer Deckschicht innerorts die Fahrzeuggruppe der Lastkraftwagen ohne Anhänger (Lkw1) und außerorts die der Lastkraftwagen mit Anhänger (Lkw2) nach den RLS-19 heranzuziehen. Der Einfluss einer Deckschicht auf die Geräuschabstrahlung eines Lkw1- und Lkw2-Reifens ist derselbe.

Das Ergebnis ist in Abb. 17 dargestellt. Aufgetragen ist für dichte Deckschichten der Fahrzeuggeräuschpegel für Lkw2, L_{Lkw2} , bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h gegenüber dem Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw, L_{Pkw} , bei 100 km/h. Die Dynamik der Pegel für Lkw2 ist etwa halb so groß wie diejenige für Pkw, siehe Gleichung (2). Ein ähnlicher Zusammenhang wurde in der „Fortsetzung der UBA-Zeitreihe zum Geräuschverhalten der deutschen Kfz-Flotte“ festgestellt [14].

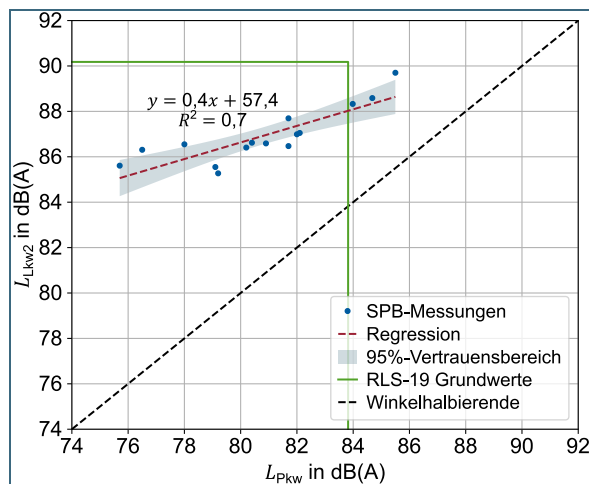


Abb. 17: Fahrzeuggeräuschpegel für Lkw2, L_{Lkw2} , in dB(A) bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h gegenübergestellt dem Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw, L_{Pkw} , in dB(A) bei 100 km/h aus SPB-Messungen an dichten Deckschichten. In Rot ist die Regressionsgerade mit einer Steigung von 0,4 und einem Achsenabschnitt von 57,4 dB(A) dargestellt. Die graue Fläche kennzeichnet den 95%-Vertrauensbereich für die untersuchte Stichprobe. Zur Orientierung markieren die grünen Linien die Referenz-Emission der Fahrzeuggruppen auf einem MA-NG nach den RLS-19.

In erster Näherung gilt für die Korrelation:

$$L_{Lkw2} = 57,4 \text{ dB(A)} + 0,4 \cdot L_{Pkw} \quad (2)$$

Wenn der aus den Übertragungsfunktionen ermittelte äquivalente Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 100 km/h dem Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 100 km/h aus der SPB-Messung gleichgesetzt wird, d. h. $L_{\text{Pkw}} = L_{\text{AT,Pkw}}$, dann kann mit Gleichung (2) der Fahrzeuggeräuschpegel für einen Lastkraftwagen mit Anhänger, L_{Lkw2} , bei 80 km/h berechnet werden. Dieser Pegel eingesetzt in Gleichung (3) ergibt die Geräuschemissionen einer Deckschicht $L_{\text{AT}}(p)$ in Abhängigkeit des (gesamt) Lkw-Anteils p .

$$\begin{aligned} L_{\text{AT}}(p) &= 10 \cdot \log \left(\frac{100-p}{100} 10^{0,1(L_{\text{AT,Pkw}})} + \frac{p}{100} 10^{0,1(L_{\text{Lkw2}})} \right) = \\ &= 10 \cdot \log \left(\frac{100-p}{100} 10^{0,1(L_{\text{AT,Pkw}})} + \frac{p}{100} 10^{0,1(57,4 \text{ dB(A)} + 0,4 \cdot L_{\text{AT,Pkw}})} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Verglichen mit den, ggf. um die Korrekturwerte für unterschiedliche Straßendeckschichttypen $D_{\text{SD,SDT,FZG}}(v)$ angepassten, Grundwerten der Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw und Lkw2 nach den RLS-19, siehe Gleichung (4),

$$L_{\text{RLS}}(p) = 10 \cdot \log \left(\frac{100-p}{100} 10^{0,1(L_{\text{RLS,Pkw}})} + \frac{p}{100} 10^{0,1(L_{\text{RLS,Lkw2}})} \right) \quad (4)$$

resultiert daraus die Pegeldifferenz für ein Fahrzeugkollektiv

$$\Delta L(p) = L_{\text{AT}}(p) - L_{\text{RLS}}(p). \quad (5)$$

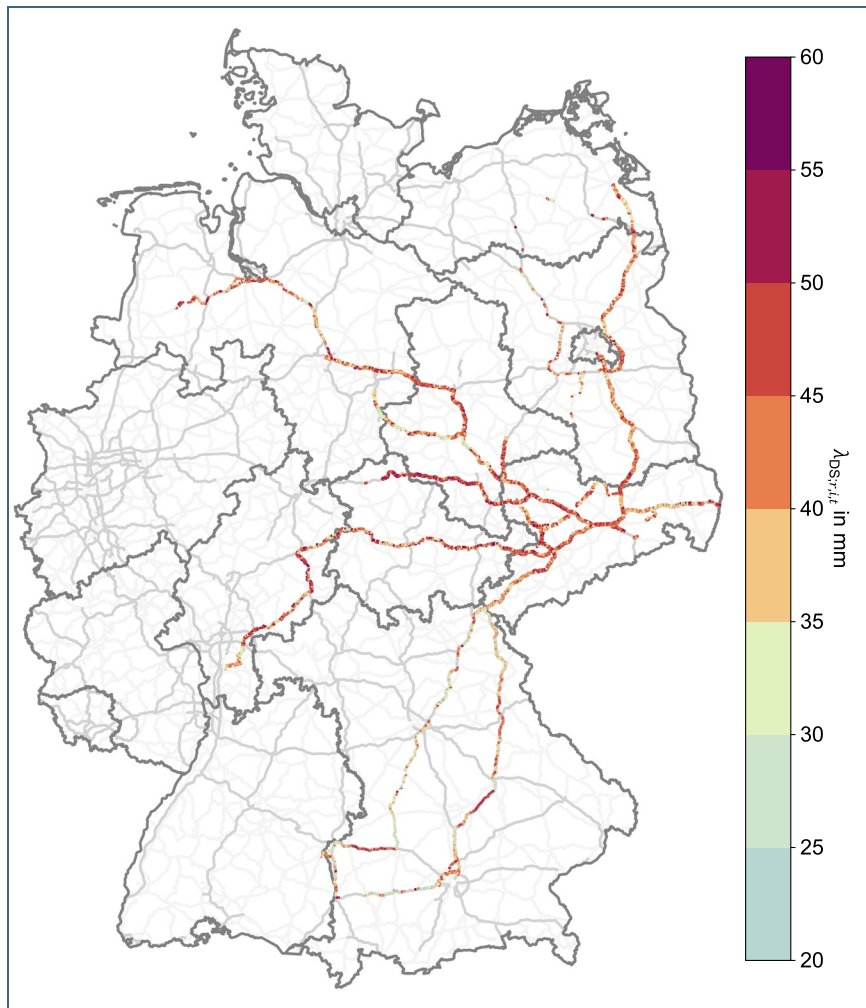
Um diese Pegeldifferenz kann der längenbezogene Schallleistungspegel bei der Lärmberechnung gegebenenfalls angepasst werden.

2.5 Anwendung von ATMS durch weitere Fachstellen

Um die Praxistauglichkeit und Skalierbarkeit des ATMS zu testen, wurde ein Exemplar der BAST und ein zweites der Müller-BBM Industry Solutions GmbH übergeben. Freundlicherweise haben sich die Kollegen bereit erklärt, dieses am Zugfahrzeug ihres CPX-Anhängers bzw. an einem Firmenfahrzeug an der Niederlassung in Dresden zu montieren.

Hierfür wurden Messsysteme vorbereitet und zusammen mit dem nötigen Zubehör, wie zum Beispiel Mikrofonhalterung, Radschraubenklammern und Ladeadapter, versandt. Zunächst wurden dort die benötigten WLAN-Zugangsdaten am Datenlogger eingestellt. Dann wurde das Mikrofon in ein Rad montiert und anschließend der Reifen aufgezogen. Das ATMG wurde mit „spikes spider fix clip“ an den Radschrauben/-muttern befestigt und der Datenlogger im Fahrzeuginneren angebracht. Die Messdaten werden auf den Projektserver hochgeladen.

Da diese Fahrzeuge außerhalb von Bayern gefahren werden, wurde das Auswerteprogramm um Geoinformationen zum Straßennetz aus der Internet-Datenbank OpenStreetMap (OSM) erweitert. In Abb. 18 sind die ATM der Kolleginnen und Kollegen der Müller-BBM Industry Solutions GmbH am Standort in Dresden in den Jahren 2023 und 2024 darstellt. Die Fahrten der Kollegen von der BAST stehen in Anhang 6.10. Für diese Prüfräder wurden noch keine Übertragungsfunktionen aufgestellt. Deshalb ist in den Abbildungen jeweils die mittlere Wellenlänge der prägenden Textur $\lambda_{\text{DS};r,i,t}$ der Deckschicht pro Straßensegment aufgetragen. Für die Übertragungsfunktionen könnten statt kontrollierten ATM an den Orten der Tab. 8 eventuell Schnittmengen mit Fahrten der Flottenfahrzeuge des LfU ausgewertet werden.



3 Auswirkung auf die Lärmkartierung und -betroffenheit

Am 27.03.2023 hat das LfU die Lärmkarten der vierten Runde (Kartierung 2022) nach EG-Umgebungslärmrichtlinie (EG-ULR) auf Basis von Berechnungen der ACCON GmbH veröffentlicht. Die ACCON GmbH führte die Berechnungen der Lärmbelastung in der Nähe von Hauptverkehrsstraßen außerhalb der Ballungsräume gemäß BUB mit der Software CadnaA durch. Basierend auf den Ergebnissen zur Lärmkartierung wurde im weiteren Projektfortschritt die Kreisstadt Weilheim in Oberbayern für die Betroffenheitsanalyse ausgewählt.

3.1 Lärmkartierung nach BUB am Beispiel der Stadt Weilheim

Entsprechend der Kartierung 2022 sind in der Gemeinde Weilheim ca. 2 700 Menschen einem Tag-Abend-Nacht-Lärmindex ab 55 dB(A) und ca. 1 900 Menschen einem Nacht-Lärmindex ab 50 dB(A) ausgesetzt sowie drei Schul- und zwei Krankenhausgebäude belastet [15], sie deckt somit die möglichen Betroffenheitsfälle ab. Zudem liegt Weilheim nahe genug am LfU, um kurzfristig vor Ort Messungen durchführen zu können. Von der Straßenbauverwaltung wurde für die Kartierung der Hauptverkehrsstraßen die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke *DTV*, die Lkw-Anteile p_1 und p_2 und der sich daraus ergebende gesamte Lkw-Anteil p sowie die Informationen über den Straßendeckschichttyp (SDT) bereitgestellt. In Weilheim betrifft dies die Straßenabschnitte der Bundesstraße B 2 und der Staatsstraßen St 2057 sowie 2064. In Tab. 4 sind die Daten zusammengefasst aufgelistet.

Die Zuordnung des Deckschichttyps erfolgt anhand der Ziffernfolge im Aufbauschichtenschlüssel [3], siehe Spalte 7. Wenn die Folge keinem Deckschichttyp zugeordnet werden kann, dann wurde entsprechend der LAI-Hinweise zur Lärmkartierung [16] die nationale Referenz, d. h. „nicht geriffelter

Tab. 4: SDT, *DTV* in Kfz/24 Stunden und gesamter Lkw-Anteil p in % auf den vom Kartierungsumfang betroffenen Straßen in Weilheim in Oberbayern. Am 04.10.2021 wurde von der Straßenbauverwaltung die SDT bereitgestellt [5]. Die Zuordnung des SDT erfolgt für die Kartierung nach BUB anhand des Aufbauschichtenschlüssels [3].

Straße	Straßenname	Abschnitt	<i>DTV</i>	p	bereitgestellt	Zuordnung	Kartierung
					SDT	Aufbauschichtenschlüssel	SDT
1	2	3	4	5	6	7	8
B 2	Ettinger Straße	580	15 232	3,4	SMA	3 430	MA-NG
	Alpenstraße	580	15 232	3,4	SMA	3 430	MA-NG
	Alpenstraße	600	21 572	4,3	SMA AC D	3 430 3 410	MA-NG MA-NG
	Pütrichstraße	620	17 736	3,3	SMA DSH-V 5	3 430 3 491	MA-NG DSH-V 5
	Pütrichstraße	640	17 736	3,3	DSH-V 5	3 491	DSH-V 5
	Olympiastraße	640	17 736	3,3	DSH-V 5	3 491	DSH-V 5
	Olympiastraße	660	21 464	3,3	AC 11 D S	3 412	AC 11
St 2057	Wessobrunner Str.	290	12 612	2,4	AC 11 D S SMA 0/11	3 412 3 436	AC 11 SMA 11
	Schützenstraße	290	12 612	2,4	AC 11 D S	3 412	AC 11
	Waisenhausstraße	310	10 580	3,6	AC D	3 410	MA-NG
	Pollinger Straße	310	21 104	2,2	AC 11 D S	3 412	AC 11
St 2064	Obere Stadt	140	10 168	2,9	SMA	3 430	MA-NG
	Obere Stadt	160–220	10 168	2,9	SMA	3 430	MA-NG
	Deutenhausener Str.	220	10 168	2,9	AC D	3 410	MA-NG

Gussasphalt“ (MA-NG) verwendet, wie beispielsweise auf der Alpenstraße; obwohl hier ein SMA oder Asphaltbeton AC D liegt. Der Aufbauschichtenschlüssel ist hier zu ungenau spezifiziert, weil mindestens die Angabe zur Korngröße fehlt, die an der 4-ten Stelle codiert ist.

Gemäß BAYSIS waren zum Zeitpunkt der ATM (Stichtag 09.10.2024) auf den Straßen ein AC, ein SMA und ein DSH-V eingebaut; der Einbau der Straßendeckschichten erfolgte zwischen 1988 und 2022, siehe Tab. 5 [5].

Tab. 5: Gegenüberstellung von SDT von der vom Kartierungsumfang betroffenen Straßen in Weilheim in Oberbayern nach der Lärmkartierung und gemäß BAYSIS zum Stichtag 09.10.2024 für die ATM. (Die Spalte 4 stimmt mit Spalte 8 der Tab. 4 überein.)

Straße	Straßenname	Abschnitt	SDT zur Lärmkartierung	SDT zur ATM	Baujahr
1	2	3	4	5	6
B 2	Ettinger Straße	580	MA-NG	AC 11 D S DSH-V 5	2020 2021
	Alpenstraße	580	MA-NG	DSH-V 5	2021
	Alpenstraße	600	MA-NG MA-NG	DSH-V 5 AC 5 D LOA	2021 2021
	Pütrichstraße	620	MA-NG DSH-V 5	SMA DSH-V 5	2001 2021
	Pütrichstraße	640	DSH-V 5	DSH-V 5	2016
	Olympiastraße	640	DSH-V 5	DSH-V 5	2016
	Olympiastraße	660	AC 11	AC 11 D S	2013
St 2057	Wessobrunner Str.	290	AC 11 SMA 11	AC 11 D S SMA 0/11	1994 2009
	Schützenstraße	290	AC 11	AC 11 D S	1988
	Waisenhausstraße	310	MA-NG	AC D	2001
	Pollinger Straße	310	AC 11	AC 11 D S	2010
St 2064	Obere Stadt	140	MA-NG	AC 11 D S	2021
	Obere Stadt	160–220	MA-NG	AC 11 D S	2022
	Deutenhausener Str.	220	MA-NG	AC 11 D S	2022

3.2 Abgleich des Berechnungsmodells als Untersuchungsgrundlage

Zur Vorbereitung der geplanten alternativen Lärmkartierung, bei der messtechnisch qualitätsgesicherte Straßenkorrekturwerte einfließen sollen und der dadurch geänderten Betroffenheitsanalyse für Weilheim haben wir zunächst die Lärmkarte für die Stadt Weilheim mit den bei der 4. Kartierungsrunde verwendeten pauschalen Korrekturwerten nachberechnet, siehe Abb. 19. Hierfür wurden die damals verwendeten Berechnungseinstellungen von der ACCON GmbH übernommen [17]. Um zu verifizieren, dass Ergebnisse einer Neuberechnungen mit anderen Korrekturwerten (siehe Kapitel 3.3) nur den dadurch bewirkten Einfluss wiedergeben, wurden die Unterschiede zwischen beiden Karten, der von der ACCON GmbH und der vom LfU bestimmten, herausgearbeitet. Die Abweichungen sind in einer Differenzlärmkarte, Abb. 20, sichtbar gemacht und fallen im Allgemeinen sehr gering aus. Für 99,7 % der Rasterpunkte mit einer Kantenlänge von 10 m liegen diese unter 0,2 dB. Damit ist nachgewiesen, dass das neu aufgesetzte Berechnungsmodell geeignet ist, bei der geplanten Alternativberechnung für die Lärmkartierung von Weilheim den Effekt geänderter Parameter (für die akustischen Eigenschaften der Straßendeckschichten) auf die Ergebnisse der Lärmkartierung sowie der Betroffenheitsanalyse korrekt zu ermitteln.

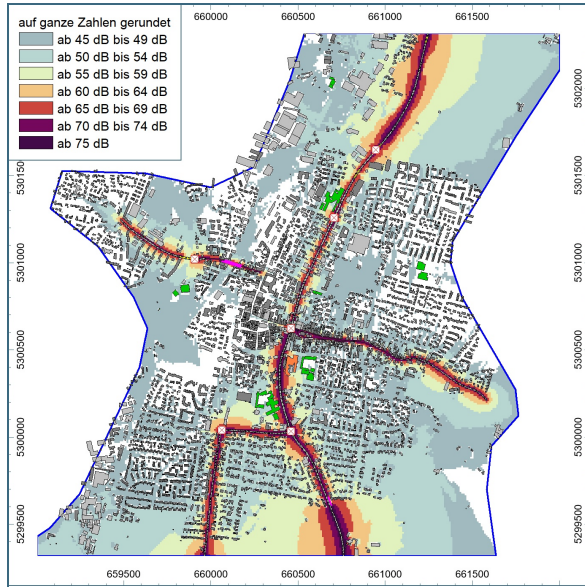


Abb. 19: Nachberechnung der Lärmkarte für den Tag-Abend-Nacht-Lärmindex L_{DEN} der Stadt Weilheim im UTM-Koordinatensystem gemäß den bei der Umgebungs-lärmkartierung 2022 verwendeten Berechnungseinstellungen und Eingaben. Die Kreuzungen und Kreisverkehre sind mit roten Quadraten gekennzeichnet, Lärmschutzeinrichtungen sind in Pink eingetragen, Schul- und Krankenhausbauwerke in Grün bzw. in Orange eingefärbt.

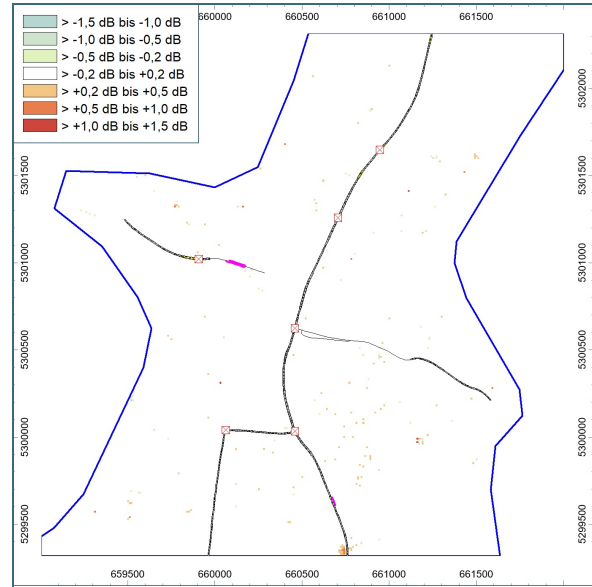


Abb. 20: Differenzdarstellung von der Umgebungs-lärmkartierung 2022 und der nachberechneten Lärmkarte für die Stadt Weilheim. Rasterpunkte, die um weniger als 0,2 dB voneinander abweichen, sind ausgeblendet. Größere Abweichungen ($\pm 1,5$ dB) sind farbig dargestellt, siehe Legende. Die blauen Linien begrenzen den Berechnungskorridor. Die grauen Linien kennzeichnen die kartierten Straßen.

Der Berechnungsumgriff ist größer als der dargestellte Kartenausschnitt und besteht aus vier Kacheln mit einer Kantenlänge von 5 km, die auch die ACCON GmbH für die Umgebungs-lärmkartierung verwendete. Die Neuberechnung am LfU fand auf zwei Standard-Bürolaptops statt, auf die die Rechenlast automatisch verteilt wurde. Die vier Kacheln wurden so innerhalb von 24 h erzeugt.

3.3 Lärmkartierung auf Basis der realen Geräuschemissionen

Am 09.10.2024 wurde in Weilheim auf den kartierten Straßen mit allen Flottenfahrzeugen ATM durchgeführt und anhand der konsolidierten Übertragungsfunktionen, siehe Gleichung (8), für jedes erfasste 20 m lange Straßensegment ein äquivalenter Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw $L_{AT,Pkw}$ bei 100 km/h berechnet. Zur statistischen Absicherung fanden mindestens drei Wiederholungsfahrten statt. Wenn ein Segment mehrmals abgefahren wurde und damit mehrere Pegel vorliegen, wird von diesen der Median bestimmt und dieser für die weitere Auswertung herangezogen. Anschließend wurde dieser Medianpegel mittels der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Grundwerts des Schalleistungspegels eines Pkw gemäß den RLS-19 auf eine Geschwindigkeit von 50 km/h umgerechnet, siehe Gleichung (6). Der maximale Vorbeifahrtpegel eines Pkw bei 50 km/h beträgt auf der Referenzoberfläche (MA-NG) 74,8 dB(A).

$$L_{W0,Pkw}(v_{Pkw}) = A_{W,Pkw} + 10 \cdot \log \left[1 + \left(\frac{v_{Pkw}}{B_{W,Pkw}} \right)^{C_{W,Pkw}} \right] \quad \text{mit} \quad \begin{aligned} A_{W,Pkw} &= 88,0 \text{ dB(A)}, \\ B_{W,Pkw} &= 20 \text{ km/h und} \\ C_{W,Pkw} &= 3,06. \end{aligned} \quad (6)$$

Das Ergebnis dieser Zusammenfassung und Umrechnung der ATM ist in Abb. 21 dargestellt. Mit eingezeichnet in die Karte sind die Orte $h = 12$ bis 15, an denen SPB-Messungen zur Qualitätskontrolle stattfanden, siehe Anhang 6.5. Die über die beiden Messverfahren (AT/SPB) bestimmten Vorbeifahrtpegel stimmen sehr gut überein. Simultan zu den ATM erfolgten mit dem Anhänger CPX-Messungen [9], siehe Abb. 22. Auch hier zeigt sich eine nahezu identische Abhängigkeit des Rollgeräusches vom Straßensegment.



Abb. 21: Median des auf eine Geschwindigkeit von 50 km/h umgerechneten äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw $L_{AT,PKW}$ für 20 m lange Segmente der kartierten Straßen in Weilheim. Die Orte $h = 12$ bis 15, an denen SPB-Messungen stattfanden, sind miteingezeichnet. Die Emission auf der Referenzoberfläche (MA-NG) beträgt 74,8 dB(A).

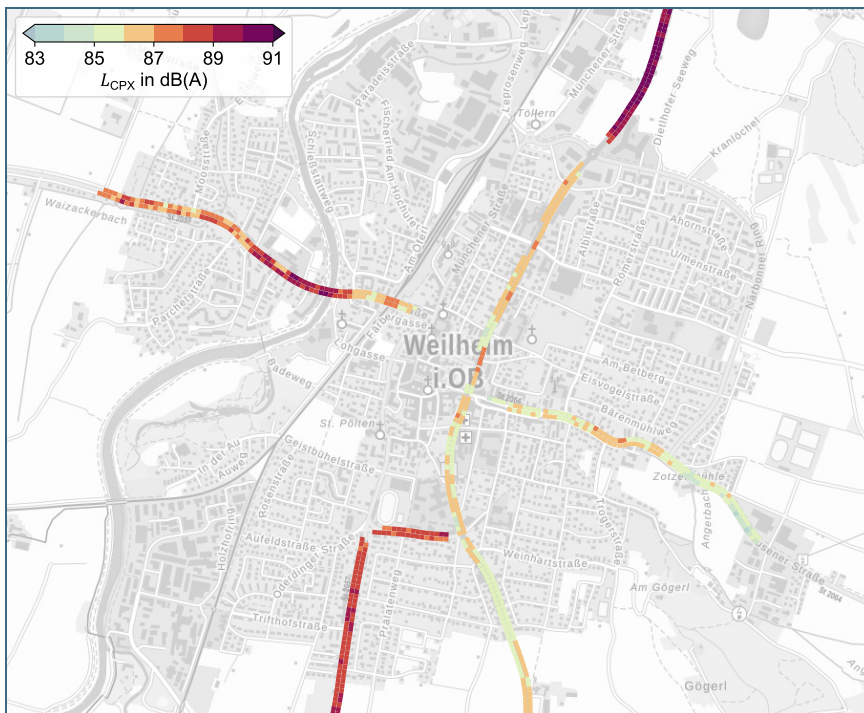


Abb. 22: Nahfeld-Pegel L_{CPX} der CPX-Messung in Weilheim bei 40 km/h. Aufgrund der Nähe der Mikrofone zum Reifen sind die Pegel hier etwa 15 dB höher als bei der ATM-Auswertung und der SPB-Messung. Für die CPX-Messungen kann keine Referenzemission angegeben werden, da der Anhänger nicht mit normkonformen Reifen ausgestattet ist und der MA-NG nicht untersucht werden konnte.

Durch die Einfärbung in Abb. 21 und 22 wird deutlich, wie sich der akustische Zustand der Straße von Segment zu Segment verändert oder, ob auf der Straße ein Wechsel im Straßendeckschichttyp vorliegt. Darüber hinaus heben sich die jeweiligen Fahrstreifen voneinander ab. In ihrer Gesamtheit können die Deckschichten als pegelmindernd gegenüber der Referenzoberfläche (MA-NG) bezeichnet werden.

Messfahrten in Stadtzenturnähe wurden entweder durch die Ampelschaltungen, Kreisverkehre oder andere Verkehrsteilnehmer gestört. Damit fehlen dort Segmente.

Mit dem Datensatz der ATM könnte in eine Lärmberechnung eingestiegen werden. Diese wäre jedoch wegen der vielen 20 m langen Straßensegmente sehr kleinteilig und zeitaufwendig. Um diese Rechnung zu beschleunigen, wurden innerhalb eines Straßenabschnittes die äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel der Segmente nochmals aggregiert und pro Deckschichttyp ein mittlerer Geräuschpegel bestimmt, siehe Spalte 6 der Tab. 6. Mit diesem Pegel und dem gesamten Lkw-Anteil p über 24 Stunden kann mit Gleichung (5) die Pegeldifferenz eines Fahrzeugkollektivs $\Delta L(p)$ zum Grundwert einschließlich der Deckschichtkorrektur nach den RLS-19 für einen Straßenabschnitt ermittelt werden. Bei dem vorliegenden Lkw-Anteil wird deutlich, dass die Geräuschsituation hauptsächlich von den

Tab. 6: Gegenüberstellung von SDT von den vom Kartierungsumfang betroffenen Straßen in Weilheim in Oberbayern gemäß Lärmkartierung und BAYSIS zum Stichtag 09.10.2024 der ATM (siehe Spalte 4 bzw. Spalte 5 in Tab. 5).

In Spalte 6 ist der pro Straßenabschnitt und SDT aggregierter $L_{AT,Pkw}$ in dB(A) bei 50 km/h (innerorts, sonst siehe Fußnote), in Spalte 7 der gesamte Lkw-Anteil p in % und in Spalte 8 die Pegeldifferenz eines Fahrzeugkollektivs $\Delta L(p)$ in dB zum Grundwert einschließlich der für diesen Straßenabschnitt zu berücksichtigende Deckschichtkorrektur $D_{SD,SDT,FZG}(v)$ nach den RLS-19 gemäß Gleichung (5) eingetragen.

Straße	Straßenname	Abschnitt	SDT zur Lärmkartierung	SDT zur ATM	$L_{AT,Pkw}$ bei 50 km/h	p	$\Delta L(p)$
1	2	3	4	5	6	7	8
B 2	Ettinger Straße	580	MA-NG	AC 11 D S DSH-V 5	69,1 ¹ 69,2 ¹	3,4	-3,8 -3,7
	Alpenstraße	580	MA-NG	DSH-V 5	69,2 ¹	3,4	-3,7
	Alpenstraße	600	MA-NG	DSH-V 5 AC 5 D LOA	69,6 69,6	4,3	-3,1 -3,1
	Pütrichstraße	620	MA-NG DSH-V 5	SMA DSH-V 5	69,7 71,9	3,3	-3,4 -1,7
	Pütrichstraße	640	DSH-V 5	DSH-V 5	70,4	3,3	-2,8
	Olympiastraße	640	DSH-V 5	DSH-V 5	70,4	3,3	-2,8
	Olympiastraße	660	AC 11	AC 11 D S	72,9	3,3	-1,0
St 2057	Wessobrunner Str.	290	AC 11 SMA 11	AC 11 D S SMA 0/11	72,1 74,3	2,4	-1,8 0,1
	Schützenstraße	290	AC 11	AC 11 D S	73,3	2,4	-0,8
	Waisenhausstraße	310	MA-NG	AC D	73,7	3,6	-0,2
	Pollinger Straße	310	AC 11	AC 11 D S	72,3	2,2	-1,7
St 2064	Obere Stadt	140	MA-NG	AC 11 D S	—	2,9	—
	Obere Stadt	160–220	MA-NG	AC 11 D S	71,9	2,9	-1,8
	Deutenhausener Str.	220	MA-NG	AC 11 D S	71,3	2,9	-2,3

¹ Dieser Straßenabschnitt liegt außerhalb der Stadt, daher ist $v > 50$ km/h und der Wert wurde entsprechend korrigiert.

Pkw dominiert wird. Mit diesen Informationen kann nun der längenbezogene Schalleistungspegel für die Berechnung des Tag-Abend-Nacht- Lärmindex L_{DEN} nach BUB entsprechend korrigiert und die Lärmkarte von Weilheim in Oberbayern unter Berücksichtigung der über ATM ermittelten Fahrzeuggeräuschemissionen neu erstellt werden, siehe Abb. 23. Zur besseren Vergleichbarkeit ist in Abb. 24 nochmals die Nachrechnung der Lärmkartierung von 2022 abgebildet.

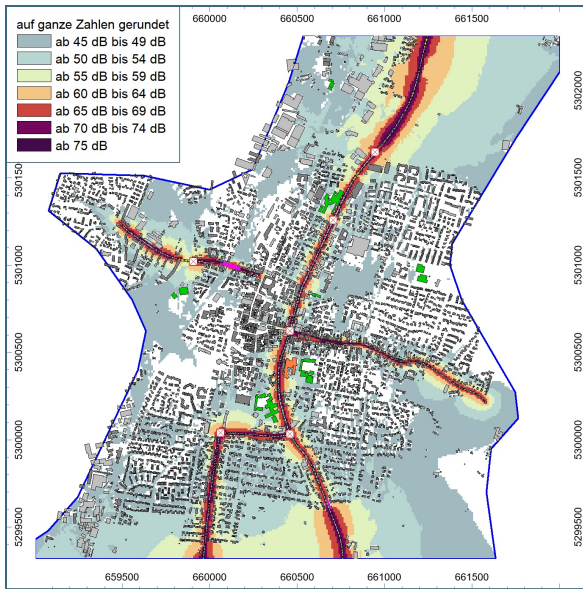


Abb. 23: Lärmkarte für den Tag-Abend-Nacht-Lärmindex L_{DEN} der Stadt Weilheim in Oberbayern nach der Qualitätssicherung der Straßen-deckschichten mit ATM.

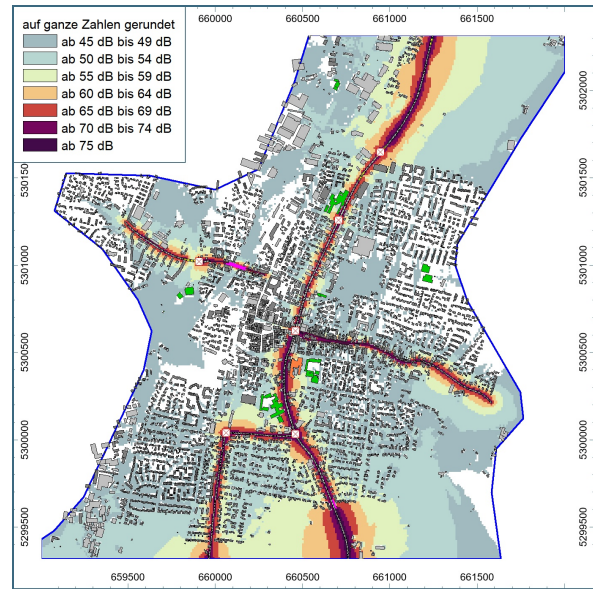


Abb. 24: Nachberechnung der Lärmkarte für den Tag-Abend-Nacht-Lärmindex L_{DEN} der Stadt Weilheim in Oberbayern, siehe Abb. 19.

3.4 Auswirkungen der realen Geräuschemissionen auf die Lärmkartierung

Ein Vergleich der beiden Lärmkarten, zum einen basierend auf den realen Geräuschemissionen, siehe Abb. 23, zum anderen formal nach BUB, siehe Abb. 24, macht die Unterschiede deutlich, siehe Abb. 25.

Die aktuelle Verkehrslärmsituation in Weilheim kann demnach wie folgt beschrieben werden. Im südlichen Abschnitt der B 2, ab der Einmündung der St 2064 bis einschließlich der Ettinger Straße, und an der St 2064 ist es um bis zu 4 dB sowie an der Waisenhausstraße (ein Teil der St 2057) um etwa 1 dB leiser als bei der Kartierung 2022. Im nördlichen Abschnitt der B 2 bis zur Einmündung der St 2064 sowie im Rest der St 2057 ist es um ca. 1 bis 2 dB lauter als bei der Kartierung.

Die Unterschiede ergeben sich, weil die vorhandenen Deckschichten im Zuge ihrer Liegedauer verschleissen und akustisch altern, siehe Kapitel 2.3. Am ausgeprägtesten ist dieses Alterungsverhalten bei der DSH-V 5. Dieser Umstand wurde bei der Zuweisung der Korrekturwerte zum Teil berücksichtigt, siehe Tabelle 4a der RLS-19 und „Datenbank für die Berechnungsmethode für den Umgebungslärm von bodennahen Quellen (Straßen, Schienenwege, Industrie und Gewerbe)“ (BUB-D) [2]. Diese Korrekturwerte repräsentieren den akustischen Zustand einer Deckschicht nach 6 Jahren unter Verkehr, siehe TP KoSD-19. Je länger aber die Deckschichten unter Verkehr stehen, desto geringer kann die Minderung ausfallen. Dies gilt in Weilheim für die Straßen, an denen nun höhere Pegel berechnet werden als zur Kartierung.

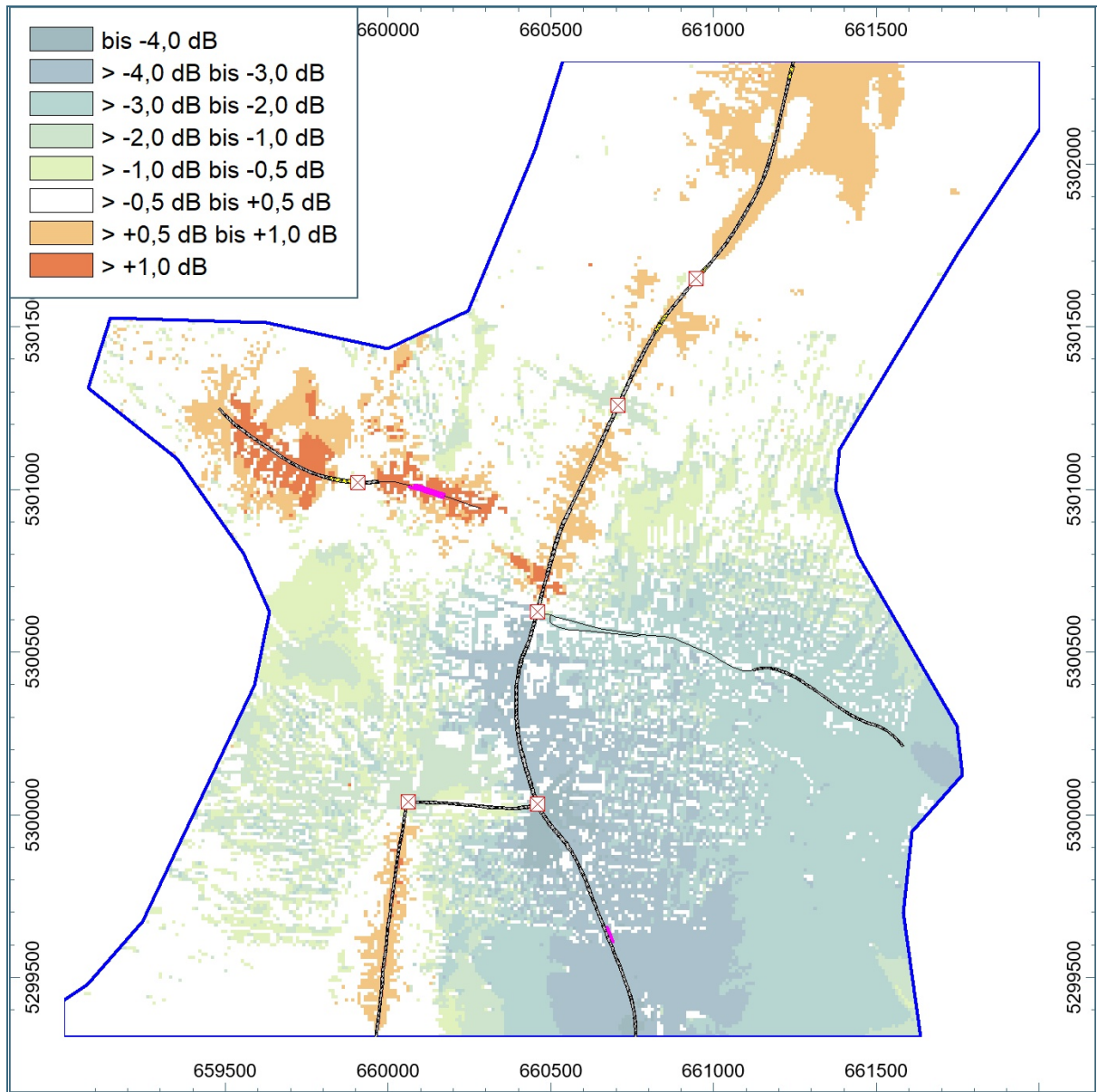


Abb. 25: Differenzdarstellung von der Umgebungslärmkartierung 2022, siehe Abb. 24 (oder 19), und der Nachberechnung anhand der Qualitätssicherung der akustischen Eigenschaften der Straßendeckschichten mit ATM für die Stadt Weilheim.

Im Neuzustand kann die Minderung einer Deckschicht mitunter größer sein als der ihr zugewiesene Korrekturwert. Mit Stichtag zum 04.10.2021 wurden von der Landesbaudirektion die Informationen über die Deckschichten bereitgestellt. Gleichwohl wurden Deckschichten später gebaut. Dies betrifft den südlichen Abschnitt der B 2, ab der Einmündung der St 2064 bis einschließlich der Ettinger Straße und die St 2064. Folglich werden hier niedrigere Lärmindizes berechnet als zur Kartierung. In diesen Abschnitten lagen auch alte Asphaltdeckschichten, für die der Aufbauschlüssel für das Material nicht immer mit dem vorhandenen Straßendeckschichttyp übereinstimmte. In diesem Fall wurde bei der Kartierung die nationale Referenz (MA-NG) verwendet und wurden folglich höhere Lärmindizes ermittelt.

3.5 Auswirkung auf die Betroffenheitsanalyse

Gemäß der „Berechnungsmethode zur Ermittlung der Belastetenzahlen durch Umgebungslärm“ (BEB) [2] wurden die Anzahl der Einwohner, Schulgebäude und Krankenhäuser bestimmt, die in Weilheim vom Verkehrslärm betroffenen sind, siehe Tab. 7. Die Zahlen gelten für den sichtbaren Kartenausschnitt, siehe Abb. 24 und 23. Weil dieser Ausschnitt nicht mit dem gesamten Gemeindegebiet übereinstimmt, weichen die Zahlen etwas zum Ergebnis der Kartierung 2022 ab [15].

Tab. 7: Anzahl der Einwohner, Schulgebäude und Krankenhäuser, die gemäß BEB in der Stadt Weilheim an Hauptverkehrsstraßen von einem Tag-Abend-Nacht-Lärmindex L_{DEN} betroffenen sind. In den Spalten 6 bis 9 (grau hinterlegte Zellen) sind die Zahlen anhand der Indizes aus den ATM eingetragen.

Lärmindex L_{DEN} in dB(A)	Betroffene an Hauptverkehrsstraßen	Fläche an Hauptverkehrsstraßen in km ²	Anzahl Schulgebäude	Anzahl Krankenhäuser	Betroffene an Hauptverkehrsstraßen	Fläche an Hauptverkehrsstraßen in km ²	Anzahl Schulgebäude	Anzahl Krankenhäuser
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ab 50 bis 54	1 920	1,312	8	0	1 664	1,103	6	0
ab 55 bis 59	776	0,617	0	0	664	0,542	0	0
ab 60 bis 64	739	0,274	0	0	627	0,242	0	1
ab 65 bis 69	853	0,174	2	2	985	0,162	2	1
ab 70 bis 74	252	0,146	1	0	130	0,133	1	0
ab 75	4	0,043	0	0	0	0,024	0	0
Summe	4 544	2,566	11	2	4 070	2,206	9	2

Infolge der Qualitätssicherung der Lärmkartierung mit ATM geht die Gesamtanzahl der Lärmbetroffenen über 24 Stunden von 4 544 auf 4 070, d. h. um 474 oder um 10 % zurück. Zwar nimmt in der Pegelklasse 65 bis 69 dB(A) die Zahl der belasteten Personen von 853 auf 985 zu, aber gleichzeitig nimmt die Menge der hochbelasteten Menschen, die einem $L_{DEN} > 70$ dB ausgesetzt sind, um fast die Hälfte ab. Darüber hinaus wird die Zahl der belasteten Schulgebäude um 2 weniger und die verlärmte Fläche um 36 Hektar (ha) kleiner.

4 Zusammenfassung

Aus dem Forschungsvorhaben ergaben sich eine Reihe an Erkenntnissen. Dies betrifft zum einen den Wert und das Potential der ATM an sich und zum anderen die Einsatzmöglichkeiten bei der Qualitätssicherung von Eingangsdaten für die Umgebungslärmkartierung. Darüber hinaus bietet sich an, das AT bei künftigen Straßenzustandserfassungen und zur Optimierung der Dateneinträge in Datenbanken der Straßenbauverwaltung einzusetzen.

4.1 Schlussfolgerungen aus den ATM

In den FuE-Vorhaben AQuStra II und III konnte demonstriert werden, dass das akustische Torus-Messverfahren praktikabel und effizient eingesetzt werden kann. Die Ergebnisse aus den ATM wurden mit den bautechnischen Eigenschaften der Straßen gemäß BAYSIS verschnitten. Hieraus konnte für die am häufigsten realisierten Deckschichttypen (WB, SMA 11 S, SMA 8 S und DSH-V 5) auf dem bayerischen Fernstraßennetz eine Pegeldifferenz ΔL zum maximalen Vorbeifahrtpegel für Pkw gemäß den RLS-19 ermittelt werden. Dieser Differenzpegel wurde für jedes 20 m lange Straßensegment bestimmt und statistisch ausgewertet. Unter Berücksichtigung der Halbwertsbreite der Häufigkeitsverteilung mindert eine DSH-V 5 das Rollgeräusch der Pkw um ca. 4 dB, eine SMA 8 S um ca. 3 dB, eine SMA 11 S um ca. 2 dB und ein WB um ca. 1 dB.

Basierend auf dem umfangreichen Datensatz aus dem Flottenversuch konnte eine akustische Alterung einer DSH-V 5 und eines SMA 8 S nachgewiesen werden. Während auf den Hauptfahrstreifen die SMA die Minderungswirkung ab Einbau ausgehend von rund -4 dB mit der Zeit kontinuierlich um ca. $0,12$ dB pro Jahr nachlässt, siehe Abb. 15, beginnt die Pegelzunahme einer DSH-V 5 ausgehend von einer Minderungswirkung von etwa -5 dB. Dieses Vorhaltemaß ist nach circa 10 Jahren aufgebraucht. Bis dorthin gehorcht der Pegelanstieg der logistischen Funktion, siehe Abb. 11. Ältere DSH-V 5 findet man in BAYSIS praktisch nicht, da dieser Deckschichttyp meistens vor Erreichen dieses Alters erneuert wird.

4.2 Empfehlungen für die Lärmkartierung

Über die Vertiefung der Erkenntnisse der pegelmindernden Eigenschaften und der akustischen Alterung von Deckschichten hinaus wurde in AQuStra III untersucht, wie sich eine Berücksichtigung der ATM auf die Qualität der Eingangsdaten für die Lärmkartierung und auf deren Ergebnisse auswirkt. Dazu wurde die Stadt Weilheim in Oberbayern ausgewählt und die Lärmbetroffenheit aus Ergebnissen von ATM neu ermittelt. Hiernach geht die Gesamtanzahl der Betroffenen um ca. 10 % zurück.

Besonders große Unterschiede in den erstellten Differenzlärmkarten sind darauf zurückzuführen, dass bei der Kartierung nach der EG-ULR die Empfehlung befolgt wurde, den vorhandenen Deckschichttyp anhand der Zahlenfolge im Aufbauschichtenschlüssel zu ermitteln. Wenn allerdings diese Zahlenfolge nicht eindeutig einem der Straßendeckschichttypen nach BUB-D zugeordnet werden konnte, dann wurde die nationale Referenz verwendet, d. h. eine Deckschicht aus MA-NG. In der Regel werden damit höhere Lärmindizes ermittelt – mit der Ausnahme, die vorhandene Deckschicht ist infolge der Liegedauer oder Verkehrsbelastung verschlissen und nicht mehr geräuschmindernd gemäß Tabelle 4a der RLS-19 oder der BUB-D.

Die in dem Arbeitspapier der BAST [3] dargestellte Vorgehensweise bei der Zuordnung der Fahrbaudeckschichten anhand des Aufbauschichtenschlüssel erlaubt eine automatisierte, mit EDV-Skripten oder GIS-Software unterstützte Datenbearbeitung, die aufgrund der großen Datenmenge, wie sie für eine landesweite Umgebungslärmkartierung anfällt, als unerlässlich anzusehen ist. Die Vollständigkeit

und Korrektheit des Aufbauschichtenschlüssel sind dabei von elementarer Bedeutung. Auf diesen Umstand sollte die Straßenbauverwaltung und „Die Autobahn GmbH des Bundes“, die diese Daten bereitstellen, hingewiesen werden. Das Ziel sollte sein, dieses Verbesserungspotential künftig zu nutzen. Anhand den Abb. 26 und 27 soll veranschaulicht werden, wie häufig und wie erheblich sich dies auf die Ergebnisse der Lärmkartierung auswirkt. Überall dort, wo sich die Einfärbung unterscheidet, stimmt aufgrund eines unzureichend spezifizierten Aufbauschichtenschlüssels die Deckschichtzuordnung für die Kartierung nicht mit der tatsächlich verbauten Fahrbahndeckschicht überein.

Die Kartierung überschätzt überwiegend den Straßenverkehrslärm und die Anzahl der lärmbeeinträchtigten Menschen. Dies macht ein Vergleich von Abb. 26 mit 28 deutlich. In den meisten Straßenabschnitten werden mit der ATM niedrigere Pegel für Pkw bei $v > 70$ km/h gemessen als bei der Kartierung angesetzt worden sind. Eine Ausnahme macht die A 8 westlich von Augsburg bis Günzburg oder die A 7 nördlich des Autobahnkreuzes (AK) Ulm/Elchingen.

Mit den ATM könnte der Datenbestand ergänzt bzw. aktualisiert werden. Dadurch könnten korrektere und realitätsnähere Ergebnisse bei der Lärmkartierung, die auf ein breites Interesse in der Öffentlichkeit stößt, erzielt werden. Dieses Vorgehen würde insbesondere einer realitätsnäheren Ermittlung der

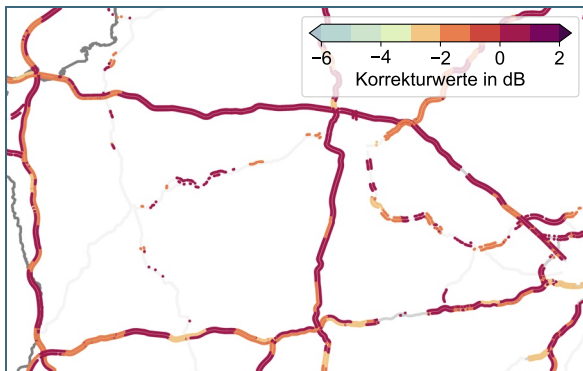


Abb. 26: Korrekturwerte für Pkw mit $v > 70$ km/h für die SDT der Kartierung nach BUB. Bestimmt anhand des Aufbauschichtenschlüssels für Straßenabschnitte zwischen dem AK Ulm/Elchingen, AK Memmingen und München sowie Augsburg und Landsberg am Lech.

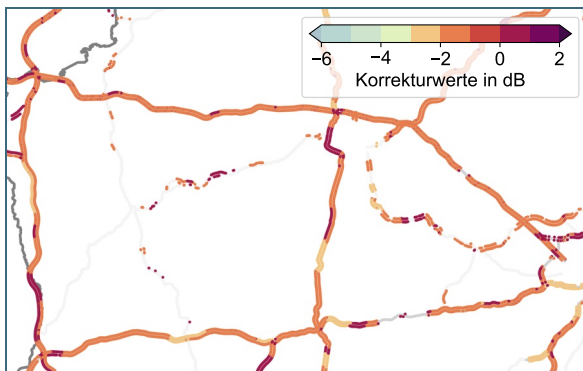


Abb. 27: Korrekturwerte $D_{SD,SDT,Pkw}(v)$ für Pkw mit $v > 70$ km/h für die SDT gemäß den RLS-19 anhand des eingetragenen SDT in BAYSIS für Straßenabschnitte zwischen dem AK Ulm/Elchingen, AK Memmingen und München sowie Augsburg und Landsberg am Lech.

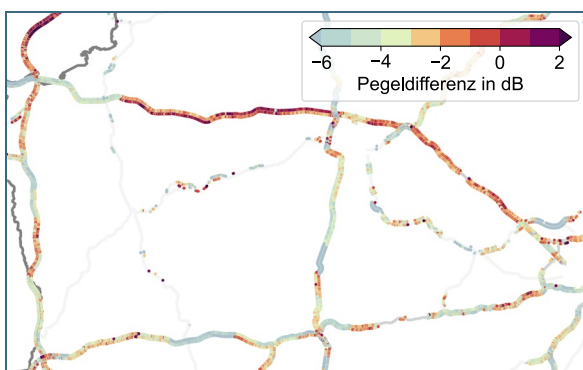


Abb. 28: Pegeldifferenz ΔL für Pkw aus der ATM bezogen auf die Referenzoberfläche nach RLS-19 für dieselben Straßenabschnitte wie in Abb. 26 und 27.

Lärmbelastung der Bevölkerung dienen. Eine in der Fläche lückenlose und konsistente ATM-qualitätsgesicherte Lärmkartierung für künftige Runden der Lärmkartierung erscheint allerdings derzeit nicht praktikabel und nicht mit verhältnismäßigem Aufwand möglich. In Einzelfällen können die Ergebnisse der ATM für die Lärmkartierung mit einbezogen werden, sofern diese bereits vorliegen.

4.3 Ausblick

Die Länge der Bundesautobahnen in Bayern beträgt ca. 2 500 km. Mit den frei fahrenden Fahrzeugen an der Dienststelle in Augsburg könnten für die anstehende, nächste Kartierung im Jahr 2027 die Hauptfahrstreifen dieses Straßennetzes mit der aufgebauten Messinfrastruktur in einem vertretbaren zeitlichen Rahmen (rund zwei Monate) zielgenau akustisch untersucht werden. Ob der dazu nötige Aufwand gerechtfertigt ist, müsste geprüft werden.

Auf jeden Fall erscheint es aber möglich und geboten, Straßendeckschichttypen, die bislang nicht in der BUB-D enthalten sind und somit entsprechend dem Arbeitspapier der BAST als nationale Referenz MA-NG behandelt wurden, aufgrund ihrer über die ATM gewonnenen akustischen Eigenschaften einem akustisch vergleichbaren Straßendeckschichttyp nach BUB zuzuordnen. Die in AQuStra III erhobenen Daten bieten eine gute Basis für dementsprechende Auswertungen und können eine Grundlage für eine verbesserte Qualitätssicherung der Lärmkartierung darstellen.

Aus Sicht des Verkehrslärmschutzes wäre es sinnvoll, dass über die bautechnisch relevanten Zustandsgrößen einer Deckschicht hinaus auch deren akustischen Eigenschaften bei der Straßenzustandserfassung als notwendige Bewertungsgröße erhoben werden. Zugleich könnten die Datenbanken der Straßenbauverwaltung um akustische Parameter erweitert und aktualisiert werden. Die Straßenbauverwaltung könnte in vielfältiger Weise von belastbareren und vervollständigten Datenbankinformationen profitieren. Beispielsweise könnten damit auf objektiver Grundlage Straßenabschnitte für eine mögliche Lärmsanierung erkannt werden.

Für eine künftige akustische Straßenzustandserfassung und deren Erweiterung auf bisher nicht mit ATMS angefahrenen Straßen könnten die in den AQuStra-Projekten begonnenen Flottenversuche entsprechend ausgeweitet und auf eine breitere Basis gestellt werden. Hierbei wäre zu prüfen, ob Dienstfahrzeuge an den Standorten der Staatlichen Bauämter oder Wasserwirtschaftsämter sowie Fahrzeuge von Transportunternehmen, dem ADAC oder dem Bundesamt für Logistik und Mobilität (BALM) oder von anderen Stellen eingebunden werden können. Grundsätzlich müsste ein solches erweitertes Procedere wohl bundesweit organisiert werden.

Weitere fachliche Aspekte und Überlegungen für künftige Nutzungen und Weiterentwicklungen der ATM können dem Anhang 6.4 entnommen werden.

Danksagung

Danke sagen wir den Kollegen von Müller-BBM für den Testbetrieb eines ATMS am Standort Dresden. Ebenso danken wir den Kollegen vom UBA und der BAST für Ihr großes Interesse am Projektfortschritt und Ihre sehr wertvollen und konstruktiven Anregungen und Diskussionen sowie dem StMUV für die Finanzierung des FuE-Vorhabens.

5 Literaturverzeichnis

- [1] BAnz. Nr. 154a 17.08.2006 (17.08.2006): Bekanntmachung der Vorläufigen Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach § 5 Abs. 1 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn
- [2] BAnz AT 05.10.2021 B4 (05.10.2021): Bekanntmachung der Berechnungsverfahren für den Umgebungslärm nach § 5 Absatz 1 der Verordnung über die Lärmkartierung (34. BImSchV). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit und Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn
- [3] W. Bartolomaeus (23.02.2022): Zuordnung der Bauweisen von Fahrbahndeckschichten der ASB zu denen der BUB-D. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach
- [4] ASB (13.08.2024): Anweisung StraßeninformationsBank - Segment: Querschnitt und Aufbau, Version 2.05. Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)
- [5] Zentralstelle für Straßeninformationssysteme (2019): BAYSIS – Bayerisches Straßeninformationssystem. Zentralstelle für Straßeninformationssysteme, <https://www.baysis.bayern.de> (16.11.2022)
- [6] 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
- [7] A. Hinträger und A. Attenberger (März 2023): Überwachung der akustischen Qualität des Straßennetzes mittels Reifen-Torus-Messungen. Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, im Auftrag des Umweltbundesamts
- [8] DIN EN ISO 11819-1 (Mai 2001): Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [9] DIN EN ISO 11819-2 (Oktober 2017): Akustik – Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche – Teil 2: Nahfeldmessverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [10] 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
- [11] RLS-19 (2019): Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln
- [12] M. Männel, N. Kirchhoff und J. Eicher, (2022 Nr. 4): Horizontalschleifen von Straßendeckschichten als ressourcenschonende Maßnahme zur Geräuschminderung. In: Lärmbekämpfung, Bd. 4, Nr. 17, S. 108–113

- [13] A. Walter (März 2018): Akustische Charakterisierung von Deckschichten mittels CPX- und ATM-Messverfahren, Dritter Zwischenbericht zum Projekt TLÄ01Lä-66876. LfU, Augsburg
- [14] N. Kirchhoff und M. Männel (Januar 2025): Fortsetzung der UBA-Zeitreihe zum Geräuschverhalten der deutschen Kfz-Flotte. Müller-BBM Industry Solutions GmbH, Planegg, im Auftrag des Umweltbundesamts
- [15] Bayerisches Landesamt für Umwelt (Februar.2023): Ergebnisse der Lärmkartierung. https://www.lfu.bayern.de/laerm/eg_umgebungslaermrichtlinie/ergebnisse/index.htm?in_gemid=190157#banalyse (11.09.2023)
- [16] LAI-Hinweise (27.01.2022): LAI-Hinweise zur Lärmkartierung - Dritte Aktualisierung. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI)
- [17] R. Ratz (2023): Durchführung der Kartierungen an Hauptverkehrsstraßen außerhalb der Ballungsräume gemäß EG-Umgebungslärmrichtlinie. ACCON GmbH, Greifenberg
- [18] 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
- [19] TP KoSD-19 (29.10.2019): Technischen Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Köln
- [20] S. Ullrich, K.-P. Glaeser und K. Sander (Januar 1996): Der Einfluß der Textur auf Reifen/Fahrbahngeräusch und Rollwiderstand, Straßenbau, Heft S 11. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

6 Anhang

6.1 Qualitätssicherung der ATM

Am Beispiel des etwa 6 km langen Abschnittes 640 von der Bundesstraße B 12 zwischen Jengen und Germaringen wird der Ablauf der Qualitätssicherung ausführlich beschrieben und veranschaulicht. Dort wurde im Jahr 2016 ein Asphaltbeton AC 11 D S eingebaut. Gemäß Nummer 10 des E TP ATM [7] ist dieser Abschnitt akustisch homogen.

In Abb. 29 wurde für diesen Abschnitt in einer Häufigkeitsverteilung (Violinen-Plot) die Wellenlänge aller gültigen Segmente in Abhängigkeit der Prüfräder $t = 1, 2$ und 4 und des Alters der Deckschicht aufgetragen. Die Querstriche der Violinen kennzeichnen für jedes Alter die 0,05-, 0,50(Median)- und 0,95-Quantile. Während die Verteilungen für die Prüfräder $t = 1$ und 4 vergleichbar sind, weicht diese für das Prüfrad $t = 2$ deutlich zu größeren Wellenlängen hin ab. Um hierfür den Grund zu finden, wurde für das Prüfrad $t = 2$ die ermittelte Wellenlänge in jedem untersuchten Straßensegment i die zugehörige kombinierte Unsicherheit $u_{c,ATMG;i}(k)$, siehe Gleichung (14) aus dem E TP ATM, mit einem Abdeckungsfaktor $k = 1$ gegenübergestellt, siehe Abb. 30. Zu erkennen sind zwei Bereiche: Eine verdichtete Punktwolke (grün) mit Schwerpunkt bei $\lambda_{DS;r,i} \approx 26$ mm und einer Unsicherheit $u_{c,ATMG;i}(1) < 1,5$ mm sowie eine offene Punktwolke (rostrot) mit $u_{c,ATMG;i}(1) > 1,5$ mm. Zu erklären ist dies, dass im betroffenen Straßensegment i mit $u_{c,ATMG;i}(1) > 1,5$ mm bei mindestens einem Messwert j auffällig wenige Reifenmoden $n_{RMmax;r,i,j}$ im Spektrum des Torusgeräusches gezählt werden, d. h. die ATM ist mindestens in einem 1/8-Sekunden-Messwert-Intervall im Segment i gestört. Diese gestörten Segmente werden bei allen folgenden Auswertungen verworfen. Wie dieses zusätzliche Kriterium in verallgemeinerter Form in den E TP ATM einfließt, wird in Anhang 6.2 gezeigt.

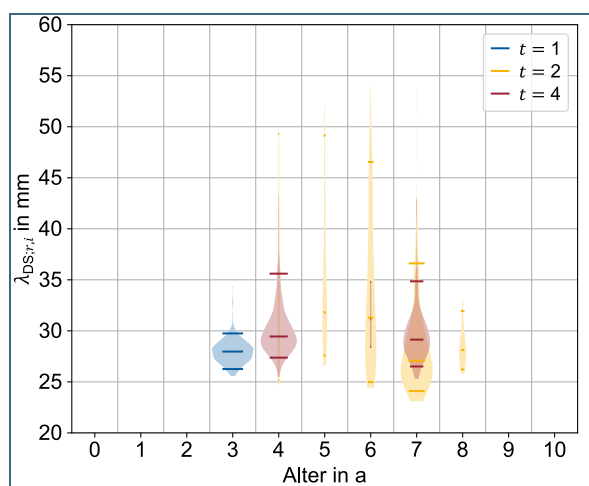


Abb. 29: Mit den Prüfrädern $t = 1, 2$ und 4 in den Jahren 2020 bis 2023 bestimmte Häufigkeitsverteilung der mittleren Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschicht $\lambda_{DS;r,i}$ für den AC 11 D S im Abschnitt 640 der B 12. Die Querstriche der Violinen kennzeichnen für jedes Alter die 0,05-, 0,50(Median)- und 0,95-Quantile.

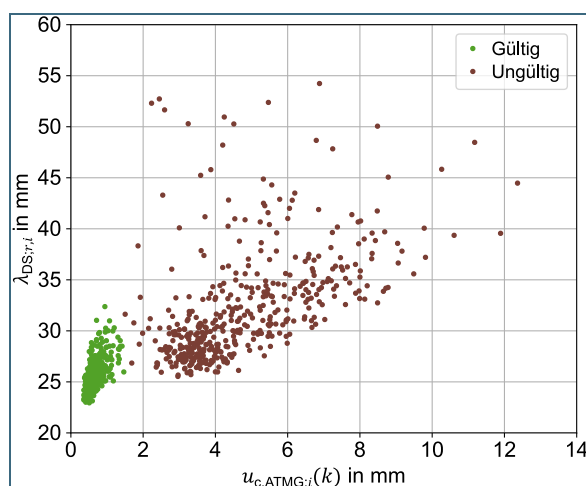


Abb. 30: Gegenüberstellung von mittlerer Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht $\lambda_{DS;r,i}$ für den AC 11 D S und die kombinierten Unsicherheit $u_{c,ATMG;i}(k)$ für das Prüfrad $t = 2$ in den Straßensegmenten i im Abschnitt 640 der B 12 entsprechend Abb. 29.

6.2 Ergänzung E TP ATM

In dem E TP ATM muss gegen Ende des Kapitels 9 nach Gleichung (8) folgender Abschnitt eingefügt werden:

Bei der Berechnung der maximalen Anzahl an detektierten Moden eines Messwertes $n_{\text{RMmax};r,i,j}$ kann der Algorithmus aufgrund einer Störung vorzeitig abbrechen. Dabei wird ein deutlich zu niedriger Wert ausgegeben. Ein Indiz hierfür ist, wenn der relative Fehler auf die maximale Anzahl an detektierten Moden eines Messwertes $\varepsilon_{n,i}$ im Straßensegment i größer ist als 10 %, siehe Gleichung (9). Davon betroffene Straßensegmente sollen in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt werden.

$$\varepsilon_{n,i} = \frac{S_{\text{RMmax};r,i}}{n_{\text{RMmax};r,i}} \cdot 100 \% \quad (9)$$

Die Nummerierung der nachfolgenden Gleichungen ist um jeweils eins zu erhöhen. Zudem ist in Tabelle 1 folgende Zeile einzufügen und die nachfolgenden Nummern sind um jeweils eins zu erhöhen.

Nr.	Zeichen (lang)	Zeichen (kurz)	Einheit	Bedeutung
8	$\varepsilon_{n,i}$			Fehler auf die maximale Anzahl an detektierten Moden eines Messwertes

6.3 Erweiterung der Übertragungsfunktion

Vor diesem Hintergrund wurden die Übertragungsfunktionen aus AQuStra II [7] neu ermittelt. Hierbei wurden folgende Punkte berücksichtigt:

- In AQuStra II wurden die Übertragungsfunktionen für das übergeordnete Fernstraßennetz bei den Referenzgeschwindigkeiten der Prüffahrzeug von $v_{\text{ref}} = 80, 100$ und 120 km/h aufgestellt, um ausgehend von der Wellenlänge der prägenden Textur einer Deckschicht einen äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 120 km/h zu berechnen. Zwischen einem Geräuschpegel von 78 dB(A) und 84 dB(A) sowie einer Wellenlänge von 25 mm und 45 mm waren diese Übertragungsfunktionen valide. Gleichwohl werden im Flottenversuch auch größere Wellenlängen ermittelt. Hier wurden die Übertragungsfunktionen linear extrapoliert, um den zugehörigen Geräuschpegel zu berechnen. Zur Absicherung der Gültigkeit der Funktionen wurde in AQuStra III der Datensatz um einen Messort mit besonders großen Wellenlängen erweitert. Dieser weist einen Waschbeton (WB) mit Körnung $0/22$ aus dem Jahr 1986 auf und liegt auf der Bundesautobahn $A 93$ nördlich der Anschlussstelle Siegenburg.
- In AQuStra III wurde die akustische Qualität der Deckschichten im untergeordneten Straßennetz untersucht. Zu Beginn waren dort keine besonders lauten und leisen Straßenabschnitte bekannt. Da Deckschichten mit dem Gebrauch beziehungsweise der Liegedauer lauter werden, siehe Kapitel 2.3, wurden solche Orte mit Hilfe von BAYSIS ermittelt. Dies sind ein Dünnschichtbelag DSH-V 5 aus dem Jahr 2020 und 2011 bzw. ein AC aus 2022 und ca. 1998 (das zuständige Staatliche Bauamt Kempten konnte uns auf Nachfrage kein genaues Baujahr mitteilen). Dort wurden SPB-Messungen als auch kontrollierte ATM durchgeführt. Bei der ATM betrug die Referenzgeschwindigkeit des Prüffahrzeugs $v_{\text{ref}} = 60, 80$ und 100 km/h. Diese wurden so gewählt, um bei höheren Geschwindigkeiten einen Überlapp zu den vorhandenen Übertragungsfunktionen für das Bundesfernstraßennetz herzustellen. Zudem wird es bei niedrigeren Geschwindigkeiten immer schwieriger, die Reifenmoden sicher zu detektieren. Bei der SPB-Messung variierten die Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 80 km/h von $72,7$ dB(A) bis $77,2$ dB(A).

In Tab. 8 sind die Orte aufgelistet, an denen kontrollierte akustische Messungen für die Ermittlung der Übertragungsfunktionen stattfanden. Die Orte $h = 1$ bis 7 liegen an Abschnitten, in denen Pkw schneller als 100 km/h fahren. An den Orten $h = 8$ bis 11 beträgt die zulässige Höchstgeschwindigkeit für Pkw 100 km/h. Die Orte $h = 12$ bis 15 sind in Weilheim, siehe Kapitel 3, und dienen zur Qualitätskontrolle der neu berechneten Lärmkarten. Mit jedem neuen Messpunkt steigt der Messaufwand. Deshalb wurde die Anzahl der etablierten Messpunkte aus AQuStra II, siehe Spalte 2021, reduziert. Durch entsprechende Wiederholmessungen in den Folgejahren bis 2024 wurde das Ergebnis konsolidiert. Die Orte $h = A$ bis C aus der Messkampagne 2018 wurden mit aufgenommen, um vereinfachte Übertragungsfunktionen für das ATMG im CPX-Anhänger aufzustellen.

Das Resultat dieser qualitätsgesicherten ATM aus den Jahren 2021 bis 2024 ist für die Prüfräder $t = 1$ bis 4 in Abb. 31 dargestellt. Aufgetragen ist jeweils der Mittelwert, der für die Prüfräder nach dem E TP ATM bestimmten mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht $\lambda_{DS;h,t}$ aus mindestens drei Überfahrten in Abhängigkeit von der jeweiligen Referenzgeschwindigkeit v_{ref} und dem Ort h . Die in den Jahren verwendeten Prüfräder sind zu den Vorjahren identisch, siehe Tab. 1. Nur das Prüfrad $t = 2$ erhielt im Jahr 2024 eine neue Bereifung. Deshalb wurden mit diesem Rad bei der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} von 100 km/h die Orte $h = 1$ und 6 nochmals angefahren. Wie erwartet, korrelieren diese Messwerte mit den anderen sehr gut; die Werte für den lauten Ort $h = 7$ reihen sich oberhalb ein.

Tab. 8: Nummer und genaue Lage der Orte für kontrollierte Messungen im Jahr 2018, 2021, 2022, 2023 und 2024 auf unterschiedlichen Straßendeckschichttypen (SDT). Bei den Deckschichttypen handelt es sich um DSH-V, Splittmastixasphalt (SMA), AC und WB. Das Baujahr ist mit angegeben. Für den Ort $h = 10$ konnte das zuständige Staatliche Bauamt Kempten auf Nachfrage kein genaues Baujahr mitteilen. Die Orte $h = 8$ bis 15 liegen auf dem untergeordneten Straßennetz, davon die Orte $h = 12$ bis 15 in Weilheim. Die Orte $h = A$ bis D wurden aus der Messkampagne 2018 miteinbezogen, um bei der Referenzgeschwindigkeit v_{ref} von 85 km/h die Übertragungsfunktionen für das ATMG im CPX-Anhänger zu berechnen.

h	Straße	Fahrtrichtung	WGS 84 Koordinate	SDT	Baujahr	'18	'21	'22	'23	'24
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	A 8	Nordwesten	48,375 506° / 11,094 653°	WB 0/8	2009	✓	✓			✓
7	A 93	Nordosten	48,760 432° / 11,879 262°	WB 0/22	1986			✓		
8	B 2	Norden	48,261 362° / 10,970 422°	DSH-V 5	2020				✓	
9	B 2	Süden	48,289 932° / 10,966 419°	DSH-V 5	2011				✓	
10	St 2035	Norden	48,079 920° / 10,736 590°	AC D	~1998				✓	
11	St 2381	Norden	48,502 427° / 10,920 509°	AC 8 D S	2022				✓	
12	B 2	Süden	47,830 128° / 11,146 703°	DSH-V 5	2021					✓
13	B 2	Süden	47,846 339° / 11,149 275°	DSH-V 5	2016					✓
14	St 2057	Osten	47,843 106° / 11,134 607°	SMA 0/11	2009					✓
15	St 2064	Osten	47,836 206° / 11,156 217°	AC 11 DS	2022					✓
A	B 2	Norden	48,539 407° / 10,840 667°	SMA 0/8 S	2003	✓				
B	A 93	Norden	49,532 257° / 12,141 046°	Grinding	2015	✓				
C	A 93	Süden	49,535 211° / 12,137 062°	Grinding	2015	✓				
D	A 952	Westen	48,004 095° / 11,390 310°	DSH-V 5	2009	✓				

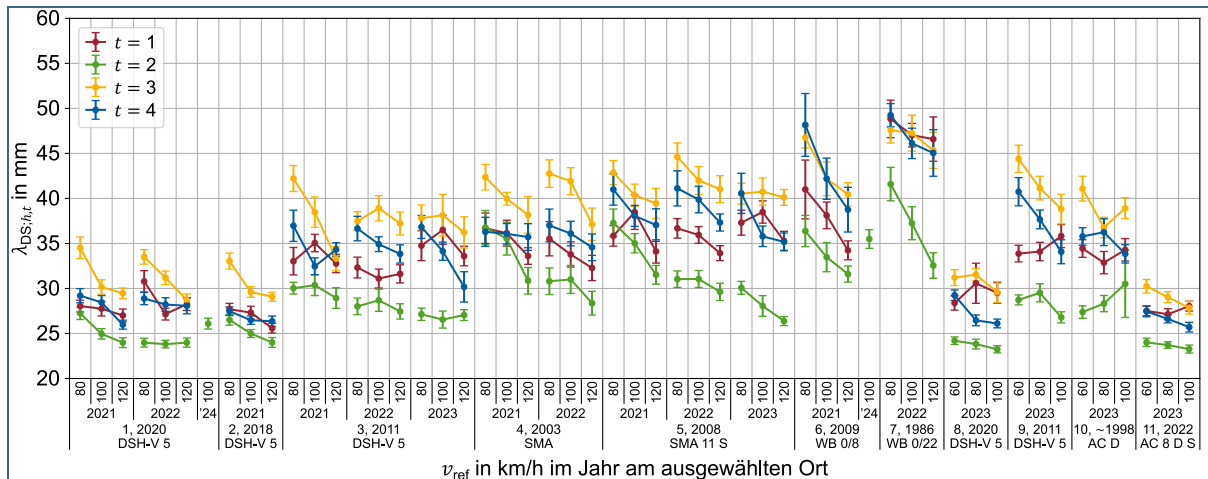


Abb. 31: Mit den Prüfrädern $t = 1$ bis 4 in den Jahren 2021 bis 2024 auf dem Fernstraßen- und untergeordneten Straßennetz bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h bzw. $v_{ref} = 60, 80$ und 100 km/h bestimmte mittlere Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschichten $\lambda_{DS;h,t}$ und kombinierte Unsicherheit der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht $u_{c,DS;h,t}$ bei einem Abdeckungsfaktor $k = 1$ an den Orten $h = 1$ bis 11 .

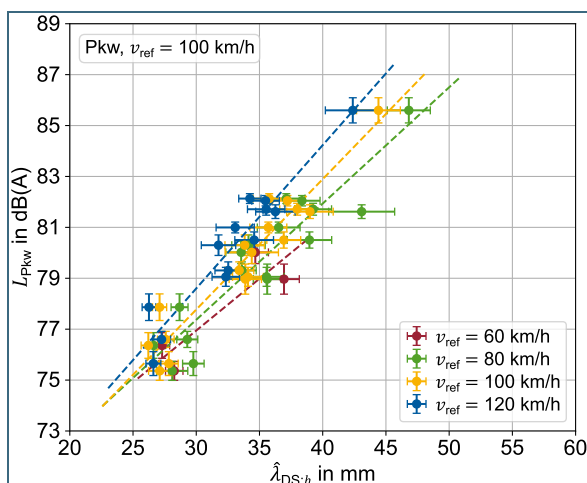


Abb. 32: Gegenüberstellung des qualitätsgesicherten und konsolidierten Schätzwertes $\hat{\lambda}_{DS;h}$ an den Orten $h = 1$ bis 11 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 60, 80, 100$ und 120 km/h und den Fahrzeuggeräuschpegeln L_{PKW} bei 100 km/h für das Jahr 2021 bis 2024. Die gestrichelten Linien sind die linearen Regressionen.

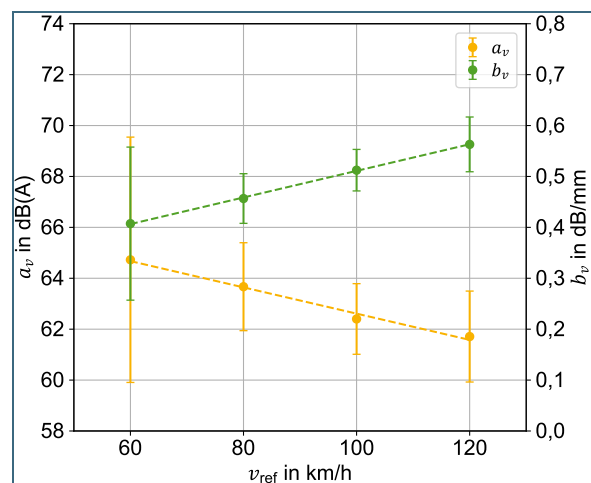


Abb. 33: Konsolidierte Regressionsparameter für den Achsenabschnitt a_v und die Steigung b_v in Abhängigkeit von der Referenzgeschwindigkeiten v_{ref} .

Mit diesem qualitätsgesicherten Datensatz wurden nun die Übertragungsfunktionen neu hergeleitet und konsolidiert sowie auf das untergeordnete Straßennetz, d. h. auf niedrigere Geschwindigkeiten ausgedehnt. Das Schema hierfür ist in Kapitel 4.6 des Schlussberichtes zu AQuStra II [7] beschrieben. Gemäß der DIN ISO 5725-2 [18] wurden die Schätzwerte $\hat{\lambda}_{DS;h}$, die Wiederhol- $s_{r,h}$ und die Vergleichsstandardabweichung $s_{R,h}$ der mittleren Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht $\lambda_{DS;h}$ für die Messorte h und Referenzgeschwindigkeiten v_{ref} ermittelt, siehe Anhang 6.6 und 6.7. Diese neuen Schätzwerte wurden, abweichend zu AQuStra II, weil in AQuStra III das untergeordnete Straßennetz in die Auswertung mit einbezogen wurde, nun dem aus der SPB-Messung bestimmten Fahrzeuggeräuschpegel L_{PKW} für Pkw bei der Referenzgeschwindigkeit von 100 km/h zugeordnet, statt der bei 120 km/h, siehe Abb. 32. Die Geschwindigkeit von 100 km/h wurde gewählt, da diese von den Pkw sowohl im übergeordneten Fernstraßennetz als auch im untergeordneten Straßennetz gefahren

wird und die Unsicherheiten der mittleren Pegeldifferenz bei der SPB-Messung [19] weniger als 0,5 dB beträgt. Die Ergebnisse der SPB-Messungen [8] inklusive der Bestimmung der Regressionsparameter nach den „Technischen Prüfvorschriften zur Korrekturwertbestimmung der Geräuschemission von Straßendeckschichten“ (TP KoSD-19) [19] sind in Anhang 6.5 zusammengefasst. Nur auf dem Fernstraßennetz konnten die Lkws in ausreichender Zahl erfasst werden.

Anschließend wird durch die Mittelwerte und die verbleibenden Einzelergebnisse neue Regressionsgeraden gelegt. Die sich hieraus ergebenden Regressionsparameter sind in Abhängigkeit von der Referenzgeschwindigkeiten v_{ref} in Abb. 33 eingetragen. Mit diesen konsolidierten Parametern kann in erster Näherung mit einem Bestimmtheitsmaß von größer als 0,99 jede ATM auf einen geschwindigkeitskorrigierten Torusgeräusch-Pegel $L_{\text{AT},100,t}$ für die Prüfräder $t = 1$ bis 4 und die Referenzgeschwindigkeit von 100 km/h umgerechnet werden, siehe Gleichung (7).

$$L_{\text{AT},100,t} = a_v + b_v \cdot \lambda_{\text{DS};r,i,t}$$

mit

$$a_v = 67,74 \text{ dB(A)} - 0,19 \frac{\text{dB(A)} \cdot \text{s}}{\text{m}} \cdot v$$

und

$$b_v = 250,24 \frac{\text{dB(A)}}{\text{m}} + 9,39 \frac{\text{dB(A)} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \cdot v \quad (7)$$

Diese geschwindigkeitskorrigierten Torusgeräusch-Pegel $L_{\text{AT},100,t}$ für die einzelnen Prüfräder t weichen jedoch weiterhin von den Ergebnissen der SPB-Messung ab. Über eine nachfolgende zweite Korrektur, Gleichung (8), werden diese Pegel für jedes Prüfrad t individuell angepasst. Das Verfahren wurde in AQuStra II erarbeitet [7]. Die Parameter hierfür sind in Tab. 9 angegeben.

$$L_{\text{AT},\text{Pkw}} = a_t + b_t \cdot L_{\text{AT},100,t} \quad (8)$$

Das Ergebnis dieser zweistufigen Regressionsanalyse sind Übertragungsfunktionen, mit denen aus der ATM auf einen äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 100 km/h $L_{\text{AT},\text{Pkw}}$ geschlossen werden kann. Das Emissionsniveau eines Straßenabschnittes kann für Pkw mit den konsolidierten Parametern mit einer Vergleichsstandardabweichung von 0,9 dB bei einem Abdeckungsfaktor von $k = 1$, also einer Abdeckungswahrscheinlichkeit von 68,3 %, bzw. von 1,6 dB mit $k = 3$ und 99,7 % bestimmt werden.

Datengrundlage	Prüfrad t	a_t in dB(A)	b_t
2021–2023	1	2,2	0,972
2021–2024	2	–2,4	1,060
2021–2023	3	3,5	0,933
2021–2023	4	11,8	0,846
2018	5, Anhänger	33,0	0,599

Tab. 9:
Regressionsparameter für die individuelle Übertragungsfunktion.

Die Übertragungsfunktionen für das Prüfrad $t = 5$ im CPX-Anhänger wurden aus dem Datensatz von 2018 vereinfacht ermittelt. Hierfür wurde der Datensatz rückblickend mit der aktuellen Auswertemethode (E TP ATM) ausgewertet. Diese Funktionen sollten eigentlich auf einer breiteren Datengrundlage mit einer größeren Pegel-Dynamik basieren. Sie gelten für die Referenzgeschwindigkeit v_{ref} von 85 km/h. Mit dem Anhänger erfolgten keine Geschwindigkeitsvariationen wie mit den Flottenfahrzeugen. Die hierfür verwendeten Größen sind für die Orte h in Tab. 10 aufgelistet.

Tab. 10: In 2018 nach dem E TP ATM mit dem Prüfrad $t = 5$ im CPX-Anhänger bei der Referenzgeschwindigkeit $v_{\text{ref}} = 85$ km/h bestimmte mittlere Wellenlängen der prägenden Textur $\lambda_{\text{DS};h,t}$ in Millimeter und kombinierte Unsicherheit $u_{\text{c,DS};h}(k)$ in Millimeter mit $k = 1$ der Deckschichten für ± 100 m um den ausgewählten Ort ($h = \text{A bis D}$ sowie 4 und 6) aus Tab. 8 sowie nach der DIN EN ISO 11819-1 der ermittelte Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw L_{Pkw} bei 100 km/h.

Messort h	A	B	C	D	4	6
$\lambda_{\text{DS};h}$ in mm	35,9	30,3	30,6	32,7	35,1	41,0
$u_{\text{c,DS};h}(k)$ in mm mit $k = 1$	1,0	0,7	1,0	1,2	1,3	2,1
L_{Pkw} in dB(A) bei 100 km/h	$78,5 \pm 0,5$	$80,1 \pm 0,5$	$80,6 \pm 0,4$	$78,5 \pm 0,3$	$81,7 \pm 0,3$	$83,4 \pm 0,4$

6.4 Weitere Aspekte und Überlegungen für künftige Nutzungen

In dem Forschungsprojekt AQuStra III wurde der vom UBA im Vorhaben AQuStra II initiierte Flottenversuch mit Dienstfahrzeugen fortgesetzt. Die Auswertung der Daten nach dem E TP ATM hat sich bewährt. Die aufgestellten Übertragungsfunktionen, um von der Geräuschcharakteristik im Torus auf den Vorbeifahrtpegel eines Pkw zu rechnen, wurden qualitätsgesichert und auf die Referenzgeschwindigkeit von 100 km/h konsolidiert. Ein hierbei implementierter Ausreißertest garantiert, dass in die Auswertung nur ungestörte Segmente einbezogen werden. Die Güte der ATM wurde mit CPX- und SPB-Messungen überprüft und verbessert.

Zudem wurden innerhalb des Projektes der BAST und der Müller-BBM Industry Solutions GmbH jeweils ein ATMS übergeben. Diese konnten erfolgreich in den Flottenversuch integriert werden. Damit konnte gezeigt werden, dass die aufgebaute Infrastruktur skalierbar ist. Die eingegangenen Messdaten von den Strecken wurden gemäß dem E TP ATM ausgewertet. Dazu wurden das Programm um Geoinformationen aus dem Straßennetz von OSM erweitert. Allerdings konnte für die Prüfräder noch keine Übertragungsfunktionen aufgestellt werden. In einem ersten Schritt dorthin, sollen Schnittmengen von Streckenabschnitten ausgewertet werden, die sowohl von diesen Fahrzeugen als auch von Fahrzeugen mit bekannten Übertragungsfunktionen überfahren wurden.

Darüber hinaus hat sich eine Reihe weiterer Ideen für die künftige Nutzung und Weiterentwicklung der ATM ergeben:

- Die maximale Anzahl an detektierten Moden n_{RMmax} der Eigenschwingung des Reifens für ein 20 m langes Segment wird nach dem in Anhang B des E TP ATM skizzierten Struktogramm über die Median-Funktion berechnet. Die Anwendung dieses Algorithmus bewirkt, dass mit den Übertragungsfunktionen der äquivalente Fahrzeuggeräuschpegel für Pkw bei 100 km/h $L_{\text{AT,Pkw}}$ auf lauten Deckschichten etwas leiser und auf leisen etwas lauter berechnet wird.

Hier knüpft die Frage an, wie die einzelnen Reifenmoden durch den jeweiligen Deckschichttyp überdeckt werden. Mit einem KI-basierten Rechenprogramm könnte dies vermutlich geklärt werden. Das Programm müsste das Torusgeräusch analysieren und aus dem Moden-Muster, siehe Abb. 34, den Straßendeckschichttypen identifizieren.

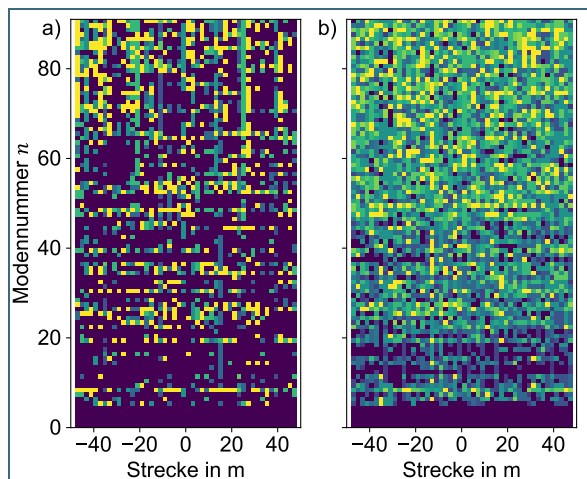


Abb. 34: Mittelwert (Zwischenfarbe) von detektierter (dunkelviolett) und nicht detektierter (gelb) Reifenmode n aus 3 und 4 Überfahrten bei $v = 100$ km/h mit dem Prüfrad $t = 2$ über eine Strecke von ± 50 m am Ort $h = 1$, a) bzw. $h = 6$, b).

- Wie kann die bautechnische und akustische Qualität von Deckschichten über geschwindigkeitsreduzierende Maßnahmen hinaus helfen, den Energie-/Kraftstoffverbrauch beim Fahren zu reduzieren? Bereits 1996 konnte im Prüfstand nachgewiesen werden, dass die Textur einer Deckschicht einen Einfluss auf das Reifen/Fahrbahngeräusch und den Rollwiderstand hat [20], siehe Abb. 35. In der Arbeit zum Horizontalschleifen von Straßendeckschichten als ressourcenschonende Maßnahme zur Geräuschminderung wurde ebenfalls darauf aufmerksam gemacht [12].

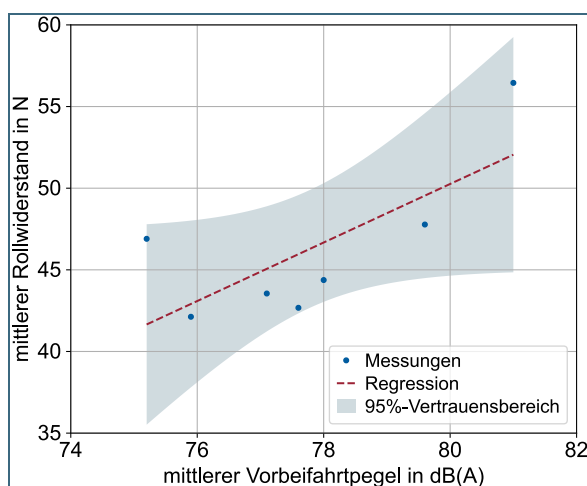


Abb. 35: Mittlerer Rollwiderstand in Newton (N) bei 50, 90 und 120 km/h in Abhängigkeit vom mittleren Vorbeifahrtpegel bei 100 km/h in einem Mikrofonabstand von 7,5 m von vier damaligen Standardreifen. Erstellt aus den Tabellen 6.4 und 7.1 in [20].

- Der härter werdende Gummi könnte infolge der Zeit einen Einfluss auf die Schwingungsanregung eines Reifens haben. Ändern sich dadurch die Anzahl an zu detektierbaren Reifenmoden? Muss hierfür eine Korrektur durchgeführt werden ähnlich wie in der DIN EN ISO 11819-2?

6.5 Daten der SPB-Messungen

Tab. 11: Mess- und Auswerteparameter der SPB-Messungen von **Pkw** an ausgewählten Orten. L_{Pkw} wurde für die Orte 1 bis 7 und A bis F bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h ausgewertet und für die Orte 8 bis 11 bei 80 km/h sowie für die Orte 12 bis 15 bei 50 km/h.

<i>h</i>	Datum	T_{SPB} in °C	N_{Pkw}	\bar{v}_{Pkw} in km/h	a in dB(A)	b in dB(A)	L_{Pkw} in dB(A)
1–3	—	—	—	—	—	—	—
4	21.06.2018	28	111	107 ± 8	28,3 ± 6,6	26,7 ± 3,2	81,7 ± 0,3
5	—	—	—	—	—	—	—
6	12.07.2018	21	106	119 ± 14	60,7 ± 4,7	11,4 ± 2,3	83,4 ± 0,4
7–15	—	—	—	—	—	—	—
A	27.06.2018	20	88	83 ± 7	32,2 ± 5,2	23,1 ± 2,7	78,5 ± 0,5
B	12.09.2018	29	197	128 ± 14	27,8 ± 4,4	26,2 ± 2,1	80,1 ± 0,5
C	12.09.2018	30	128	119 ± 16	37,1 ± 4,5	21,7 ± 2,2	80,6 ± 0,4
D	20.09.2018	28	173	115 ± 14	40,0 ± 4,2	19,2 ± 2,0	78,5 ± 0,3
1	14.07.2021	20	136	111 ± 9	35,5 ± 8,9	20,1 ± 4,4	75,6 ± 0,5
2	13.07.2021	22	125	112 ± 8	49,2 ± 9,6	14,4 ± 4,7	77,9 ± 0,5
3	20.07.2021	15	155	117 ± 14	36,5 ± 4,7	21,3 ± 2,3	79,1 ± 0,4
4	19.07.2021	25	130	108 ± 8	31,4 ± 7,1	24,5 ± 3,5	80,5 ± 0,3
5	29.07.2021	23	170	113 ± 16	30,3 ± 3,1	25,7 ± 1,5	81,7 ± 0,2
6	19.07.2021	27	120	109 ± 12	39,3 ± 4,6	21,2 ± 2,3	81,6 ± 0,3
7–15	—	—	—	—	—	—	—
1	02.08.2022	29	154	105 ± 9	39,5 ± 7,8	18,5 ± 3,8	76,6 ± 0,3
2	—	—	—	—	—	—	—
3	11.08.2022	23	151	112 ± 13	27,6 ± 5,1	25,8 ± 2,5	79,3 ± 0,3
4	02.08.2022	24	156	106 ± 10	45,9 ± 4,8	17,5 ± 2,4	81,0 ± 0,2
5	04.08.2022	30	145	106 ± 17	31,4 ± 3,0	25,3 ± 1,5	82,0 ± 0,2
6	—	—	—	—	—	—	—
7	26.07.2022	26	167	121 ± 11	26,7 ± 5,8	29,4 ± 2,8	85,6 ± 0,5
8–15	—	—	—	—	—	—	—
1 u. 2	—	—	—	—	—	—	—
3	23.08.2023	28	141	115 ± 10	34,2 ± 6,0	23,0 ± 2,9	80,3 ± 0,4
4	—	—	—	—	—	—	—
5	22.08.2023	28	130	103 ± 15	35,1 ± 3,1	23,5 ± 1,6	82,1 ± 0,2
6 u. 7	—	—	—	—	—	—	—
8	03.08.2023	22	154	82 ± 13	19,6 ± 3,3	27,9 ± 1,7	72,7 ± 0,2
9	31.07.2023	22	138	73 ± 10	19,8 ± 3,7	29,6 ± 2,0	76,1 ± 0,3
10	13.10.2023	21	102	87 ± 9	22,7 ± 5,4	28,7 ± 2,8	77,2 ± 0,3
11	11.10.2023	22	112	80 ± 12	15,4 ± 4,1	30,5 ± 2,2	73,4 ± 0,3
12–15	—	—	—	—	—	—	—
1–11	—	—	—	—	—	—	—
12	09.10.2024	15	114	51 ± 6	8,9 ± 3,9	35,2 ± 2,3	68,6 ± 0,2
13	09.10.2024	22	97	43 ± 4	27,4 ± 4,9	24,6 ± 3,0	69,2 ± 0,5
14	30.07.2024	30	110	45 ± 4	21,8 ± 4,5	30,4 ± 2,7	73,5 ± 0,4
15	11.09.2024	16	124	40 ± 4	23,8 ± 4,3	25,9 ± 2,6	67,8 ± 0,5

Tab. 12: Mess- und Auswerteparameter der SPB-Messungen von **Lkw2** an ausgewählten Orten. L_{Lkw2} wurde für die Orte 1 bis 7 und A bis D bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h ausgewertet. Für die Orte 8 bis 11 und D konnte die erforderliche Mindestanzahl an Vorbeifahrten nicht gemessen werden. Wenn jedoch mehr als ein Lkw2 erfasst wurde, dann ist der L_{Lkw2} außerorts bei 60 km/h und innerorts bei 40 km/h informativ angegeben.

h	Datum	T_{SPB} in °C	N_{Lkw2}	\bar{v}_{Lkw2} in km/h	a in dB(A)	b in dB(A)	L_{Lkw2} in dB(A)
1–3	—	—	—	—	—	—	—
4	21.06.2018	28	70	84 ± 5	$55,0 \pm 11,5$	$17,0 \pm 6,0$	$87,4 \pm 0,4$
5	—	—	—	—	—	—	—
6	12.07.2018	21	53	85 ± 3	$47,1 \pm 21,3$	$21,8 \pm 11,0$	$88,6 \pm 0,7$
7–15	—	—	—	—	—	—	—
A	27.06.2018	20	65	81 ± 5	$18,3 \pm 11,6$	$34,6 \pm 6,1$	$84,2 \pm 0,3$
B	12.09.2018	29	87	87 ± 4	$59,2 \pm 16,5$	$15,0 \pm 8,5$	$87,6 \pm 0,7$
C	12.09.2018	30	71	84 ± 3	$84,5 \pm 23,0$	$2,0 \pm 12,0$	$88,2 \pm 0,6$
D	20.09.2018	28	31	84 ± 4	$-2,3 \pm 35,2$	$46,0 \pm 18,3$	$85,3 \pm 1,0$
1	14.07.2021	20	92	81 ± 5	$30,8 \pm 18,7$	$28,8 \pm 9,8$	$85,6 \pm 0,5$
2	13.07.2021	22	80	82 ± 5	$56,1 \pm 19,7$	$16,0 \pm 10,3$	$86,6 \pm 0,5$
3	20.07.2021	15	118	82 ± 4	$43,3 \pm 10,7$	$22,2 \pm 5,6$	$85,5 \pm 0,3$
4	19.07.2021	25	98	82 ± 4	$55,6 \pm 14,1$	$16,3 \pm 7,4$	$86,6 \pm 0,4$
5	29.07.2021	23	88	80 ± 6	$48,6 \pm 8,5$	$19,9 \pm 4,5$	$86,6 \pm 0,3$
6	19.07.2021	27	92	83 ± 4	$48,3 \pm 13,2$	$20,7 \pm 6,9$	$87,7 \pm 0,4$
7–15	—	—	—	—	—	—	—
1	02.08.2022	29	84	81 ± 5	$13,8 \pm 13,8$	$38,1 \pm 7,2$	$86,3 \pm 0,4$
2	—	—	—	—	—	—	—
3	11.08.2022	23	95	83 ± 6	$35,6 \pm 10,4$	$26,1 \pm 5,4$	$85,2 \pm 0,3$
4	02.08.2022	24	107	82 ± 5	$25,5 \pm 11,1$	$32,1 \pm 5,8$	$86,7 \pm 0,3$
5	04.08.2022	30	94	81 ± 6	$49,5 \pm 8,5$	$19,7 \pm 4,5$	$87,1 \pm 0,3$
6	—	—	—	—	—	—	—
7	26.07.2022	26	111	84 ± 4	$52,4 \pm 12,3$	$19,6 \pm 6,4$	$89,7 \pm 0,4$
8–15	—	—	—	—	—	—	—
1 u. 2	—	—	—	—	—	—	—
3	23.08.2023	28	85	84 ± 4	$33,5 \pm 17,9$	$27,8 \pm 9,3$	$86,4 \pm 0,6$
4	—	—	—	—	—	—	—
5	22.08.2023	28	71	80 ± 5	$50,7 \pm 11,6$	$19,1 \pm 6,1$	$87,0 \pm 0,3$
6 u. 7	—	—	—	—	—	—	—
8	03.08.2023	22	17	64 ± 5	—	—	$79,5 \pm 1,3$
9	31.07.2023	22	8	61 ± 4	—	—	$80,4 \pm 0,9$
10	—	—	—	—	—	—	—
11	11.10.2023	22	8	64 ± 5	—	—	$80,5 \pm 2,9$
12–15	—	—	—	—	—	—	—
1–11	—	—	—	—	—	—	—
12	09.10.2024	15	11	44 ± 5	$52,4 \pm 26,7$	$14,5 \pm 16,1$	$75,6 \pm 1,9$
13	09.10.2024	22	12	38 ± 5	$43,7 \pm 15,6$	$19,8 \pm 9,4$	$75,4 \pm 1,0$
14	30.07.2024	30	4	43 ± 5	$20,5 \pm 32,1$	$36,4 \pm 19,5$	$78,8 \pm 1,8$
15	11.09.2024	16	7	36 ± 6	$52,3 \pm 29,7$	$14,1 \pm 17,8$	$74,9 \pm 2,3$

6.6 Formblätter gemäß DIN ISO 5725-2 für die Messungen aus dem Jahr 2021

Tab. 13: Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt B für die Zusammenstellung der arithmetischen Mittelwerte \bar{y}_{ji} bzw. hier $\lambda_{DS,h,t}$. 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 Tab. 8 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h nach dem E TP ATM für die Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichpräzision.

Messort h	1, DSH-V 5, 2020			2, DSH-V 5, 2018			3, DSH-V 5, 2011			4, SMA, 2003			5, SMA 11 S, 2008			6, WB 0/8, 2009			7, WB 0/22, 1986		
	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120
Prüfrad 1	27,8	27,4	26,8	27,6	27,4	25,5	31,7	34,9	33,2	37,5	36,2	33,5	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	31,8	39,8	33,9	31,8	—	—	—
Prüfrad 3	34,9	29,7	29,8	33,0	29,4	29,1	42,1	38,3	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	—	—	—
Schätzwert $\hat{\lambda}_{DS,h}$	30,1	27,7	26,7	28,6	27,1	26,2	35,9	34,0	32,4	39,6	37,3	35,1	39,4	37,7	36,3	43,7	39,9	36,9	—	—	—

Tab. 14: Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt C für die Zusammenstellung der Maße für die Streuung s_{ji} bzw. hier $u_{c,DS,h,t}$. 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 Tab. 8 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h nach dem E TP ATM für die Wiederhol- und Vergleichpräzision.

Messort h	1, DSH-V 5, 2020			2, DSH-V 5, 2018			3, DSH-V 5, 2011			4, SMA, 2003			5, SMA 11 S, 2008			6, WB 0/8, 2009			7, WB 0/22, 1986		
	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120
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	1,6	1,3	—	—	—
Prüfrad 4	1,4	0,7	0,5	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	—	—	—
Wiederholvar. $s_{r,h}^2$	1,1	0,5	0,8	0,4	0,3	0,3	1,4	1,4	1,2	3,4	2,4	3,0	2,1	1,8	2,9	3,2	2,5	2,3	—	—	—
Vergleichvar. $s_{R,h}^2$	11,9	4,4	6,4	8,8	3,7	4,8	28,7	12,8	8,5	8,9	5,2	14,4	11,0	4,7	18,3	11,6	18,9	19,4	—	—	—

6.7 Formblätter gemäß DIN ISO 5725-2 für die konsolidierten Messungen

Tab. 15: Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt B für die Zusammenstellung der arithmetischen Mittelwerte \bar{y}_{ji} bzw. hier $\lambda_{DS;h,t}$. Mit den Prüfrädern t bestimmte mittlere Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschicht in Millimeter für ± 100 m um den ausgewählten Ort ($h = 1$ bis 7) gemäß der Tab. 8 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h nach dem E TP ATM für die Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichpräzision.

Messort h	1, DSH-V 5, 2020			2, DSH-V 5, 2018			3, DSH-V 5, 2011			4, SMA, 2003			5, SMA 11 S, 2008			6, WB 0/8, 2009			7, WB 0/22, 1986		
	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120
Prüfrad 1	29,0	27,1	27,4	27,6	27,4	25,5	32,1	33,3	32,8	37,0	34,9	33,0	37,1	36,7	34,3	42,9	40,7	35,2	46,3	46,4	44,6
Prüfrad 2	26,1	24,4	24,0	26,5	24,9	24,0	30,2	29,4	27,8	34,9	35,0	29,4	35,3	33,5	30,7	39,8	33,9	31,8	41,2	39,4	33,7
Prüfrad 3	34,5	30,5	29,4	33,0	29,4	29,1	39,6	38,5	36,0	42,4	40,9	38,7	43,3	41,1	41,0	46,8	43,0	40,8	47,8	48,2	46,8
Prüfrad 4	30,4	28,5	27,4	27,4	26,6	26,5	36,8	34,9	34,0	39,3	36,9	36,2	41,6	38,9	37,5	45,3	42,2	40,0	48,7	46,0	45,3
Schätzwert $\hat{\lambda}_{DS;h}$	30,0	27,7	27,1	28,6	27,1	26,2	34,7	34,0	32,7	38,4	36,9	34,3	39,3	37,6	35,9	43,7	39,9	36,9	46,0	45,0	42,6

Tab. 16: Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt C für die Zusammenstellung der Maße für die Streuung s_{ji} bzw. hier $u_{c,DS;h,t}$. 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 7) gemäß der Tab. 8 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{ref} = 80, 100$ und 120 km/h nach dem E TP ATM für die Wiederhol- und Vergleichpräzision.

Messort h	1, DSH-V 5, 2020			2, DSH-V 5, 2018			3, DSH-V 5, 2011			4, SMA, 2003			5, SMA 11 S, 2008			6, WB 0/8, 2009			7, WB 0/22, 1986		
	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120	80	100	120
Prüfrad 1	1,1	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5	1,2	1,2	1,1	1,9	1,3	1,4	1,1	1,5	1,3	2,1	1,4	1,2	1,8	1,6	2,6
Prüfrad 2	0,8	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	1,2	1,2	1,0	2,0	2,2	1,2	1,4	1,2	1,1	2,0	1,7	1,0	1,7	2,0	1,7
Prüfrad 3	1,1	0,8	1,2	0,9	0,6	0,5	1,2	1,5	1,4	1,4	1,3	1,8	1,2	1,3	1,6	1,1	1,6	1,3	2,0	1,9	1,7
Prüfrad 4	1,7	0,8	0,7	0,5	0,5	0,6	1,2	1,3	0,9	2,0	1,3	1,9	1,6	1,2	1,5	1,8	1,7	2,2	1,8	1,3	1,7
Wiederholvar. $s_{r,h}^2$	1,5	0,5	0,6	0,4	0,3	0,3	1,4	1,8	1,2	3,4	2,5	2,5	1,8	1,7	2,0	3,2	2,5	2,3	3,4	3,0	3,9
Vergleichvar. $s_{R,h}^2$	13,1	6,8	5,6	8,8	3,7	4,8	19,4	15,6	13,1	12,4	9,6	17,6	15,3	11,6	20,9	11,6	18,9	19,4	13,6	16,8	38,3

6.8 Formblätter gemäß DIN ISO 5725-2 für die Messungen aus dem Jahr 2023

Tab. 17: Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt B für die Zusammenstellung der arithmetischen Mittelwerte \bar{y}_{ji} bzw. hier $\lambda_{DS;h,t}$. Mit den Prüfrädern t bestimmte mittlere Wellenlängen der prägenden Textur der Deckschicht in Millimeter für ± 100 m um den ausgewählten Ort ($h = 3$ und 5 sowie auf dem untergeordneten Straßennetz 8 bis 11 (grau hinterlegt)) gemäß der Tab. 8 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{\text{ref}} = 60, 80, 100$ bzw. 120 km/h nach dem E TP ATM für die Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichpräzision.

Messort h	3, DSH-V 5, 2011			5, SMA 11 S, 2008			8, DSH-V 5, 2020			9, DSH-V 5, 2011			10, AC D, ~1998			11, AC 8 D S, 2022					
	80	100	120	80	100	120	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100			
Prüfrad 1	34,8	36,5	34,7	37,8	39,7	36,5	29,1	30,6	29,7	34,6	34,5	37,8	35,3	32,9	35,4	28,3	27,1	28,3			
Prüfrad 2	28,8	29,1	27,3	31,1	30,6	26,8	25,6	25,3	23,3	31,5	30,3	28,0	30,3	31,8	35,1	28,1	24,5	25,3			
Prüfrad 3	36,9	36,1	36,6	41,3	40,5	40,0	33,9	31,1	30,1	44,2	41,6	38,8	40,9	37,1	39,5	33,4	31,0	28,6			
Prüfrad 4	38,1	34,1	29,5	40,0	37,7	35,5	30,6	26,5	28,5	41,5	40,3	34,1	37,9	37,7	37,1	28,9	27,5	25,7			
Schätzwert $\hat{\lambda}_{DS;h}$	34,6	33,9	32,0	37,6	37,1	34,7	29,8	28,4	27,9	37,9	36,7	34,7	36,1	34,8	36,8	29,7	27,5	27,0			

Tab. 18: Gemäß DIN ISO 5725-2: 2002-12 empfohlenes Formblatt C für die Zusammenstellung der Maße für die Streuung s_{ji} bzw. hier $u_{c,DS;h,t}$. 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 ($h = 3$ und 5 sowie auf dem untergeordneten Straßennetz 8 bis 11 (grau hinterlegt)) gemäß der Tab. 8 bei den Referenzgeschwindigkeiten $v_{\text{ref}} = 60, 80, 100$ bzw. 120 km/h nach dem E TP ATM für die Wiederhol- und Vergleichpräzision.

Messort h	3, DSH-V 5, 2011			5, SMA 11 S, 2008			8, DSH-V 5, 2020			9, DSH-V 5, 2011			10, AC D, ~1998			11, AC 8 D S, 2022					
	80	100	120	80	100	120	60	80	100	60	80	100	60	80	100	60	80	100			
Prüfrad 1	1,7	2,0	1,3	1,6	1,1	1,0	0,6	2,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,5	1,2	1,4	0,8	0,6	0,6			
Prüfrad 2	1,5	1,4	0,8	1,4	1,5	0,7	0,8	1,4	0,4	1,8	0,8	1,1	1,6	1,5	4,3	2,4	0,7	1,9			
Prüfrad 3	1,5	1,7	1,6	1,6	1,5	0,9	1,4	0,8	1,3	1,0	1,3	1,5	1,1	1,3	1,3	1,3	1,4	1,1			
Prüfrad 4	1,1	1,0	1,6	1,5	1,4	1,0	1,0	0,6	1,6	1,1	1,1	1,4	1,5	1,4	2,1	1,1	0,7	0,5			
Wiederholvar. $s_{r,h}^2$	2,2	2,4	1,9	2,3	1,9	0,9	0,9	2,0	1,4	1,6	1,1	1,6	2,1	1,9	6,6	2,3	0,9	1,4			
Vergleichvar. $s_{R,h}^2$	18,4	13,2	20,0	22,0	21,8	32,1	12,5	9,8	10,9	35,9	28,5	24,9	21,5	10,1	8,4	7,8	7,6	3,8			

6.9 Ergänzende Pegeldifferenzkarte zum Flottenversuch

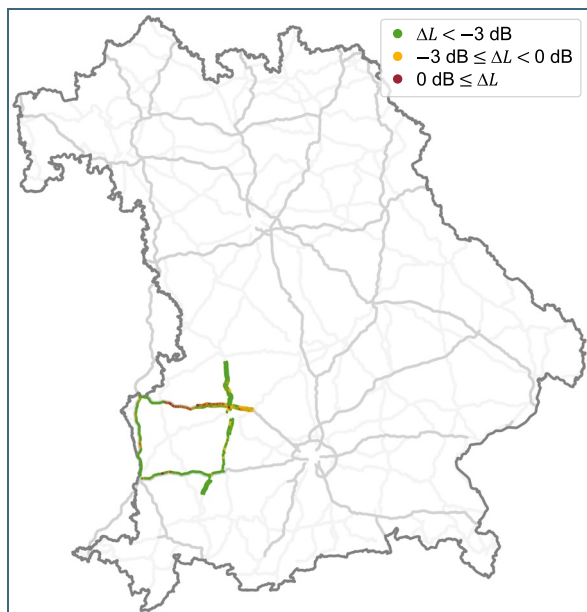


Abb. 36: Pegeldifferenz ΔL des äquivalenten Fahrzeuggeräuschpegels für Pkw bei 100 km/h $L_{AT,Pkw}$ und dem maximalen Vorbeifahrtpegel eines Pkw $L_{RLS,Pkw}$, wie er nach RLS-19 ermittelt wird, für die Messungen aus dem Jahr 2019.

6.10 Ergänzende Karte der Fahrten der BAST

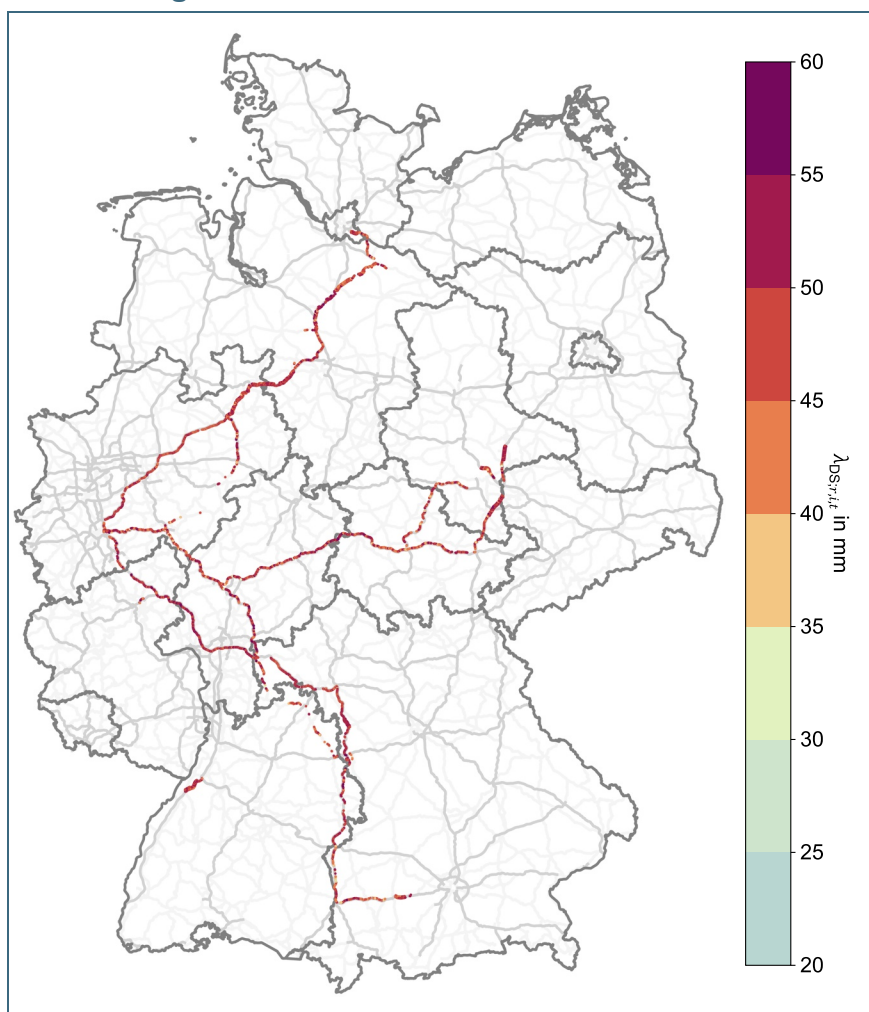


Abb. 37: ATM von Mitarbeitenden der BAST am Standort in Bergisch Gladbach. Dargestellt als mittlere Wellenlänge der prägenden Textur der Deckschicht $\lambda_{DS;r,i,t}$ im Straßensegment. Das Prüfrad bei der BAST besitzt nicht die Dynamik wie das der Müller-BBM Industry Solutions GmbH.



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

